

## 二維電子氣結構對氮化鎵變電容之特性研究

### Characteristics of the 2D Electron Gas GaN Varactor

田主業

Chu-Yeh Tien

空軍航空技術學院一般學科部航空通訊電子系

Department of Aviation & Communication Electronics

Air Force Institute of Technology

#### 摘要

本研究主要對氮化鋁鎵/氮化鎵結構所研製之二維電子氣變容器其變電容相關特性進行較完整呈現，藉改變其電極製程面積之參數，探討元件之電容比值變化率、元件操作電壓與漏電流特性等特性。變容器之可調式電容特性研究的精進與提升，有助於因應在通電領域中之不同應用需求。

**關鍵詞：**氮化鎵、二維電子氣、變容器

#### ABSTRACT

A study of the AlGaIn/GaN 2D gas varactor is performed in detail. The characteristic of a varactors such as the  $C_{max}/C_{min}$ , threshold voltage and leakage current etc. can be tuned by varying the size of electrode. The electrical measurements show the potential of the varactor as crucial device to support different application in the communication and electrical field.

**Keywords :** GaN, 2D gas, varactor

#### 一、簡介

在高速電子元件應用中，氮化鎵電子元件因其優異的高功率、耐高溫、抗輻射、高頻率等諸多優異特性而被廣泛應用於軍民用科技中[1-3]，就近年綠能產業的蓬勃發展，工業節能減碳的需求指標，通信電子系統之節電與效能之展現亦以此目標邁進，因此，在電子元件的製程中，兼具前述多項優點之氮化鎵材料就成為目前積極發展的明日之星[4,5]。在通信電子系統中由氮化鎵所研製的高速功率電晶體常為系統電路中的功率放大器，其功用是將射頻信號放大功率後以

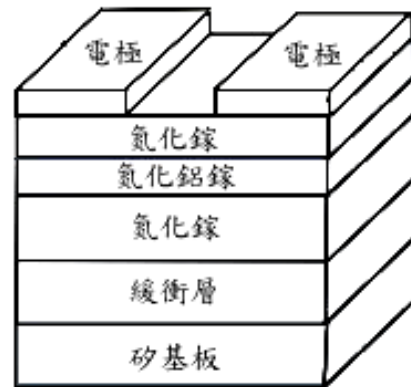
利天線發射傳輸[6-8]，被視作通電系統之關鍵零組件。然而，若在整體系統中的其餘電子元件非由氮化鎵材料所研製，那在電子元件及積體電路的批量製程上，就容易產生整合不易、製程複雜及成本增加的風險。因此，俱有與功率電晶體等關鍵零組件相同氮化鎵基板製程之氮化鋁鎵/氮化鎵並存在二維電子氣特性的金屬-半導體-金屬結構的氮化鎵變容器就非常適合在此積體電路的整合應用上[9]，有利於系統電路效能之發揮。

二維電子氣結構對氮化鎵變電容器因其俱有電容值改變的特性，藉輸入操作電壓的改變致使元件電容

值亦隨之改變，此一特性常被應用於通信系統電路中射頻切換開關之研製[10]，即藉由電容值的改變調整接收信號頻率。另外，相關研究亦顯示出此一元件電容調變特性將之應用於關鍵零組件之電路前端靜電突波防護上有較佳的防護效果[11]。因此，此種俱有二維電子氣結構之氮化鎵變容器對於現今通電系統中電路元件之整合性與增加元件可靠度是愈發重要。而變容器的製程結構與電極幾何設計等因素深深影響著元件的特性響應，進而影響電路之特性表現。所以對於變容器製程的特性研究，以提升元件性能實為相關研究之重點[12,13]。本研究主要是藉由元件電極的面積設計，探討此種俱二維電子氣之氮化鎵變容器的變容之電容-電壓特性(C-V)，即元件最大與最小電容值比( $C_{\max}/C_{\min}$ )、電流-電壓特性(I-V)等，以研究元件變容特性之影響設計參數與元件表現操作範圍。

## 二、實驗設計

本實驗所採用的元件製程半導體基板為日商DOWA公司所生產的氮化鋁鎵/氮化鎵磊晶層於矽上的磊晶基板，其常溫下的霍爾遷移率為 $1497\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、載子的片電子為濃度為 $1.03 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ ，經由一般標準製程下所研製的俱二維電子氣之氮化鎵變容器元件示意圖如圖一所示。變容器元件的金屬電極面積設計由小到大分別為37922、85224、151122、236472平方微米，電極製程部分鎳/金金屬層分別以蒸鍍方式鍍於基板之上，其後再以標準曝光顯影之掀膜製程程序，完成金屬電極之製作。我們於變容器元件研製完成後，隨即進行元件相關電容-電壓特性(C-V)、電流-電壓特性(I-V)等量測，以分析其特性表現。

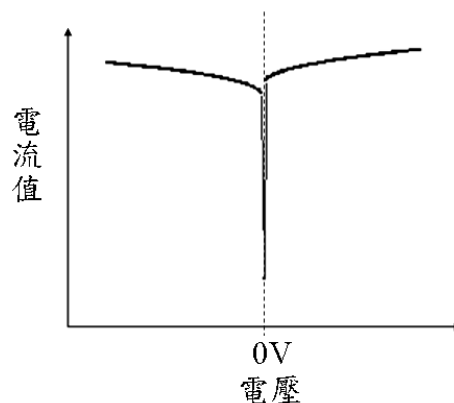


圖一、俱二維電子氣之氮化鎵變容器示意圖  
(自行整理繪製)

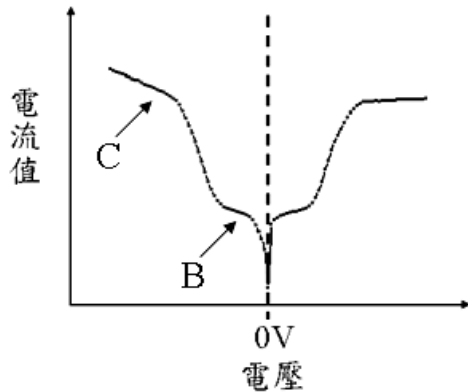
## 三、結果與討論

### 3.1 俱有二維電子氣結構之氮化鎵變容器工作原理

此元件結構與傳統之蕭基元件結構有許多不同點，僅就其工作原理，說明如下：有兩個背對背的蕭基金屬接觸所構成，這兩個蕭基金屬接觸被置於同一平面上，互相靠近。對於金屬-半導體-金屬結構的電流-電壓特性，由於是兩個背對背的蕭基接觸所構成，即相當於兩個蕭基二極體串接；當這兩個蕭基接觸接上一偏壓，一個形成順偏壓，另一個形成逆偏壓，且對於蕭基二極體，其電流主要是由逆偏壓所決定的，因此順偏壓與逆偏壓的電流-電壓特性是屬於對稱的型態，而不俱二維電子氣的元件電壓-電流特性圖(如圖二)相較於俱有二維電子氣的元件的元件電壓-電流特性圖(如圖三)[14]。

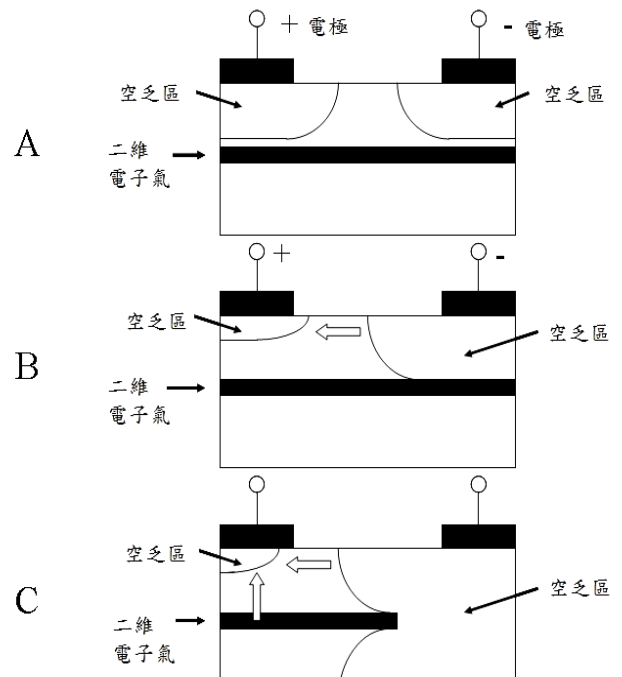


圖二、不俱二維電子氣元件電壓-電流特性圖

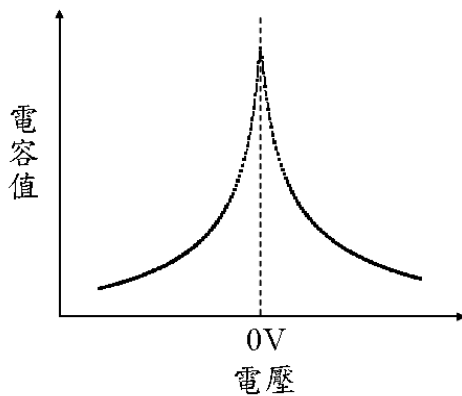


圖三、俱二維電子氣的元件電壓-電流特性圖

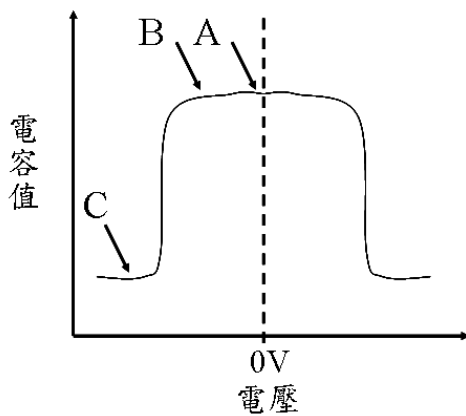
當元件沒有二維電子氣時，其電流-電壓的特性如圖二，和有二維電子氣相比較，其漏電流值不會有轉折點，只會隨著逆向偏壓增加，逆向空乏區到正向偏壓區形成一條漏電流路徑，電流慢慢的往上升而達到蕭基二極體所會有的電流飽和現象。然而，當元件結構中有二維電子氣時，其電流-電壓的特性圖能由圖四來了解，如圖四之 A，一開始並沒有電壓所以電流趨近於零；如圖四之 B，主要是由於逆向空乏區到正向空乏區間形成的漏電流路徑所造成的。然後當電壓超過大約 4V 時，其電流值會有一個轉折點，此轉折點是夾止電壓點，電流值會很快的上升，不會變大太多，這主要是因為二維電子氣通道的關係；如圖四之 C，空乏區會穿透了二維電子氣通道，當電流流過二維電子氣通道後，會在通道與正向的空乏區間多了一條漏電流路徑，造成電流值的上升，而這電流值的大小就是達到蕭基二極體所會有的電流飽和現象。

圖四、俱二維電子氣元件漏電流示意圖  
(自行整理繪製)

對於元件結構中沒有二維電子氣時，其電容-電壓的特性如圖五[11]，其電容值會呈現線性的情況往下降，和半導體有二維電子氣相比較的電容值，其不能維持一段時間，因此無法達到我們所想要的特性，而對於元件結構中有二維電子氣時，其在無偏壓時的電容值，主要是由電極的幾何形狀和電極到二維電子氣通道的空乏距離所決定的。電容值從高電容值到低電容值的轉變電壓，會依據二維電子氣的載子濃度以及其臨界電壓。整個元件結構的電容值隨電壓的變化，如圖六所示。



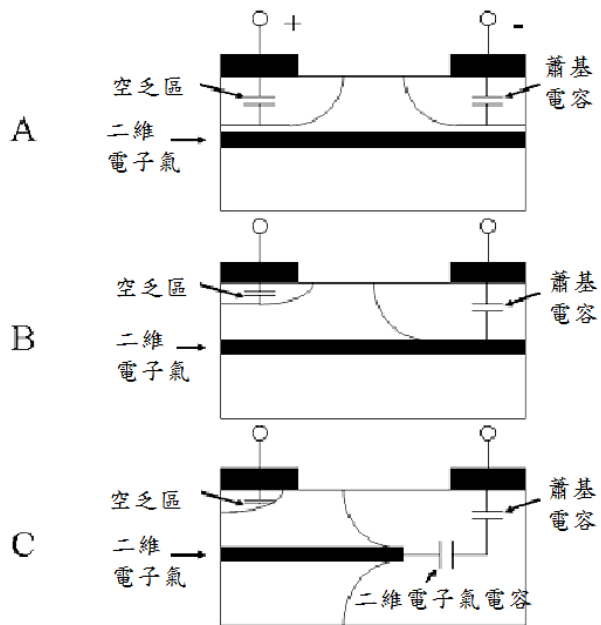
圖五、不俱二維電子氣元件電容-電壓特性圖



圖六、俱二維電子氣元件電容-電壓特性圖

圖六[11]之元件特性可由圖七之元件內空乏區成因所致來說明:圖七中主要區分為兩個部分,第一部分是在低電壓時,第二部分是在高電壓時;如圖七的A,當電壓為零偏壓時,兩邊的空乏區大約接近在二維電子氣,此時電容值剛好是兩邊空乏區電容串連的數值,即是一邊電容值的一半,然而當電壓慢慢的增加少許,如圖七的B,順向偏壓的空乏區會逐漸變薄,電容值會增加,相對的逆向偏壓的空乏區會逐漸的變厚,電容值會變小,然而電容相串連起來,其電容值仍然維持在和零偏壓時的電容值差不多,直到電壓繼續加大,空乏區穿透二維電子氣通道,即變成高電壓部分。第二部分是在高電壓時,如圖七的C,主

要是因為氮化鋁鎵的濃度比氮化鎵的濃度大很多,空乏區的遷移載子會穿透二維電子氣通道,此時在二維電子氣通道會形成一個額外的電容,此電容會非常的小[15],相對於在空乏區的電容值很大,相串聯後,會以較小的電容值為主,而這也是造成元件結構的電容值會突然的掉下來的主要原因。

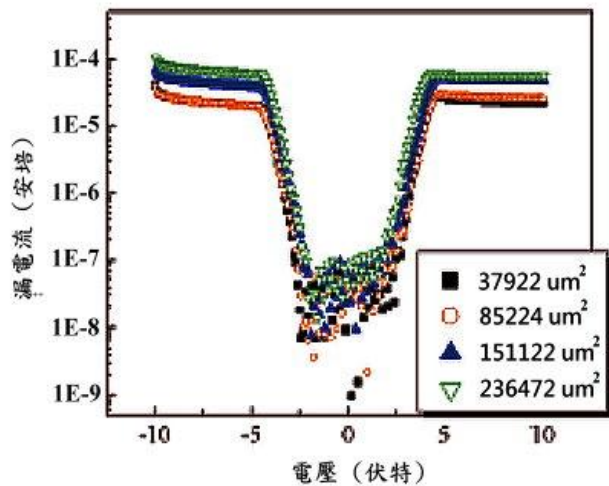


圖七、俱二維電子氣元件空乏區示意圖  
(自行整理繪製)

### 3.2 俱有二維電子氣結構之氮化鎵變容器試片量測結果

變容器元件之漏電流-電壓量測結果如圖八所示,有二維電子氣結構之氮化鎵變容器其漏電流隨電極面積增加而增大。因為此中變容器結構為二個背對背連接的蕭基二極體在二維電子氣通道上方,故順向及逆向漏電流的值為相同且對稱的,且逆向漏電流的形成由逆偏的蕭基二極體所主導[16]。氮化鎵變容器的漏電流約在 $10^{-8}$ 安培。在此研究中,當輸入電壓超過 $\pm 5$ 伏特時,元件逆向偏壓所形成逐漸增大的空乏區刺穿二維電子氣通道,此時形成一通

往由順向偏壓所形成之空乏區的漏電流導通路經，致使元件漏電流突增加至飽和狀態約  $10^{-5}$  安培左右。

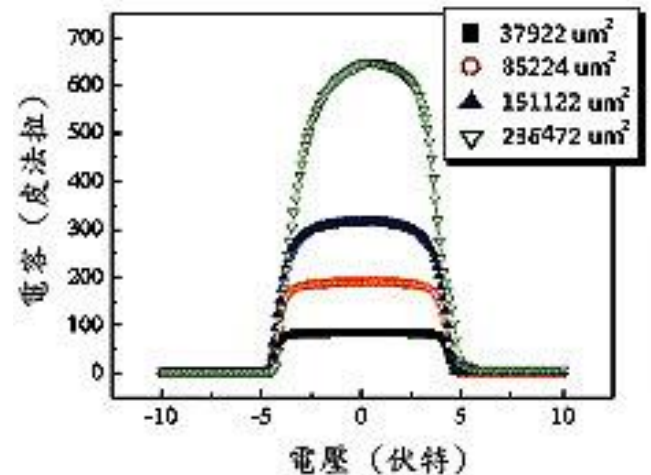


圖八、元件電流電流-電壓特性(I-V)量測圖

如圖九所示，變容器元件之電容-電壓量測結果可知道，元件電容值會隨著電極面積增加而增大，與此同時，我們也發現元件的最大電容值與最小電容值之比值( $C_{\max}/C_{\min}$ )亦同時隨電極面積增加而增大。這樣的量測結果與前述理論中提到元件電容值是由其電極面積因素所決定的不謀而合。在研究試片量測結果可發現其轉換電壓值( $V_T$ )約在 $\pm 5V$ ，也就是當輸入電壓小於 $\pm 5V$ 時，元件的總電容即是最大電容值( $C_{\max}$ )，這是取決於金屬電極與二維電子氣通道間所形成之空乏區而有的蕭基電容，然而此一電容值亦正比於電極面積的大小。相反的，若是元件的輸入電壓大於 $\pm 5V$ 時，此時空乏區增大並刺穿及深入二維電子氣通道，並在此橫向通道內形成一小的二維電子氣電容來串聯於前述之蕭基電容，而氮化鎵變容器的總電容值幾乎等於此一小的二維電子氣電容值，即等同形成元件之最小電容值( $C_{\min}$ )，其大小也與金屬電極面積成正比的增加。

從圖九變容器的電容變化就明顯的看

出，因此種俱有二維電子氣之氮化鎵變容器元件其結構為背對背連結的蕭基二極體所形成，所以電容值的變化也呈現一大小相同但以  $0V$  為中心相互對稱的特性表現。此一電容變化之量測特性結果有助於實際應用上對於通過元件信號頻率及振幅大小之選擇性。



圖九、元件電容電容-電壓特性(C-V)量測圖

#### 四、結論

本研究主要是藉由元件電極的面積設計，探討此種俱有二維電子氣之氮化鎵變容器的元件特性，並由所研製的元件量測結果發現其元件漏電流與電極面積呈反比，相反的，元件電容值卻與電極面積呈正比。本次實驗所研製的相關元件其操作的轉移電壓約在 $\pm 5V$ ，即在此電壓範圍內操作下，元件有較為穩定低漏電流與高電容比值之特性表現。此一結果已顯示此種元件在實際運用上非常適用於通信電子系統中射頻電路的相關應用，並大大提升了未來積體電路中元件的整合性與降低製程成本。

#### 五、致謝

感謝長庚大學綠色科技中心提供相關製程及量測協助。

## 六、參考文獻

- [1] J. Delaine, P. O. Jeannin, D. Frey, and K. Guepratte, "High frequency DC-DC converter using GaN device," 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Mar. 2012.
- [2] L. Han, Z. Xin, and Y. Zhen-Kun, "The application analysis of GaN power devices in radar transmitter," IET Conference Publications (551 CP), 2009.
- [3] U. K. Mishra, P. Parikh, Y. F. Wu, "AlGaIn/GaN HEMTs: An overview of device operation and applications," Proceedings of the IEEE, vol. 90, pp. 1-16, 2002.
- [4] Z. Zhong, F. Qian, D. Wang, and C. M. Lieber, "Synthesis of p-Type Gallium Nitride Nanowires for Electronic and Photonic Nanodevices," Nano Letters, 3(3), pp 343-346, 2003.
- [5] 林宏宇、鄧友清, "綠能大未來-關鍵零組件之發展趨勢", 電腦與通訊, 第 163 期, 第 4-9 頁, 民國 104 年。
- [6] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y. F. Wu, "GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers," Proceedings of the IEEE, Vol. 96, No. 2, 2008.
- [7] L. Shen, S. Heikman, B. Moran, R. Coffie, N. Q. Zhang, D. Buttari, I. P. Smorchkova, S. Keller, S. P. DenBaars, and U.K. Mishra, "AlGaIn/AlN/GaN high-power microwave HEMT," IEEE Electron Device Letters, Vol. 22, pp. 457-459, 2001.
- [8] Walt DeMore, "衡量 GaN 功率放大器的性能狀態", EE Times Taiwan 電子工程專輯, 民國 105 年。
- [9] M. Marso, M. Wolter, P. Javorka, A. Fox and P. Kordos, "AlGaIn/GaN varactor diode for integration in HEMT circuits," ELECTRONICS LETTERS, Vol. 37 No. 24, pp. 1476-1478, 2001.
- [10] G. Simin, A. Koudymov, Z. J. Yang, V. Adivarahan, J. Yang, and M. Asif Khan, "High-Power RF Switching Using III-Nitride Metal-Oxide-Semiconductor Heterojunction Capacitors," IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 26, NO. 2, pp. 56-58, 2005.
- [11] 徐健彬, "覆晶型 GaN HEMTs 可靠度提升之研究", 碩士論文, 國防大學理工學院, 民國 102 年。
- [12] M. Muso, J. Betnit, M. Wolter, P. Javorka, A. Fox, and P. Kordos, "MSM Diodes Based on an AlGaIn/GaN HEMT Layer Structure for Varactor and Photodiode Application," The 4th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystem, Slovakia, 2002.
- [13] M. Marso, A. Fox, G. Heidelberger, P. Kordoš, and H. Lüth, "Comparison of AlGaIn/GaN MSM Varactor Diodes Based on HFET and MOSHFET Layer Structures MSM Diodes," IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 27, NO. 12, pp. 947, 2006.
- [14] 李光立, "氮化鎵金屬-半導體-金屬光偵測器之研究", 碩士論文, 國立交通大學, 民國 101 年。
- [15] MARSO, M. HORSTMANN, H. HARDTDEGEN, P. KORDOS and H. LUTH, "ELECTRICAL BEHAVIOUR OF THE InP/InGaAs BASED MSM-2DEG

- DIODE,” Solid-State Electronics Vol. 41, pp. 25-31, 1997.
- [16] Y. C. Ferng, L. B. Chang, Atanu Das, C. C. Lin, C. Y. Cheng, P. Y. Kuei, and L. Chow, “Improvement of Surge Protection by Using an AlGaIn/GaN-Based Metal–Semiconductor–Metal Two-Dimensional Electron Gas Varactor,” Japanese Journal of Applied Physics, 51, pp. 124201-1~124201-4, 2012.

