

利用光電化學氧化法製作氮化鋁鎵/氮化鎵金屬-氧化物-半導體高速電子移動率場效電晶體之閘極氧化層

黃立賢, 葉書豪, 李清庭*, Haipeng Tang, Jennifer Bardwell, 以及 James B. Webb.

國立成功大學, 微電子工程研究所

Email: ctlee@ee.ncku.edu.tw

IEEE Electron Device Letters, 2008, 29, 284.

近年來，由於三五族氮化物材料具有高的載子移動率、直接能隙、優良的熱穩定性以及化學穩定性，而引起眾多研究者的興趣。這些材料已經被廣泛地應用於電子元件與發光元件，例如：高速電子移動率場效電晶體、金屬-氧化物-半導體高速電子移動率場效電晶體、發光二極體、光檢測器、以及雷射二極體等。

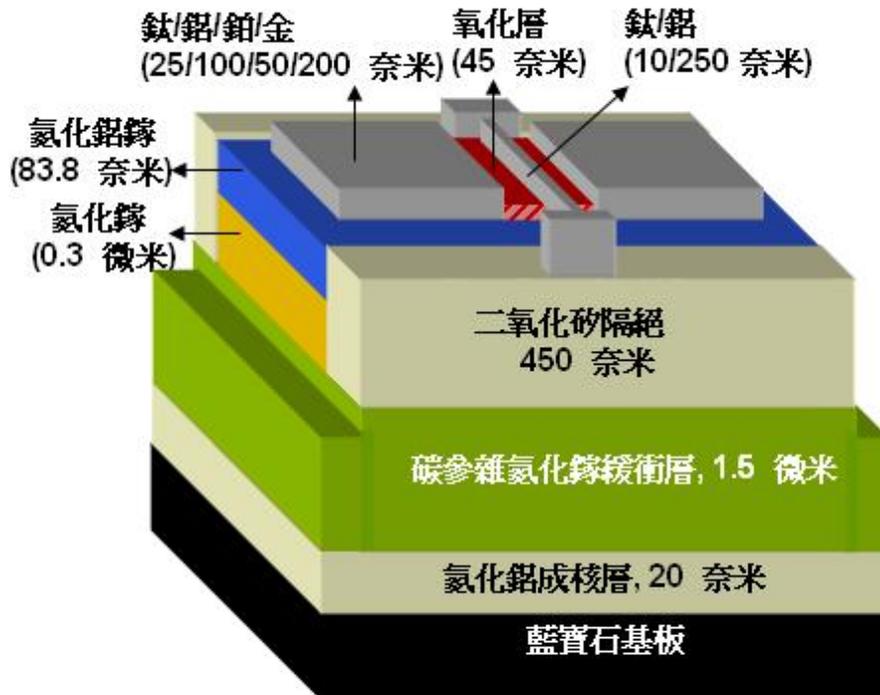
比較高速電子移動率場效電晶體與金屬-氧化物-半導體高速電子移動率場效電晶體兩者間的特性，後者具有較優良的特性，例如：較小的閘極漏電流、較大的元件崩潰電場、較大的閘極電壓擺幅等，因此在高頻、高功率的微波系統以及通訊系統的應用上，更具有潛力。至目前為止，已經有許多介電材料被應用於製作氮化鎵系列金屬-氧化物-半導體高速電子移動率場效電晶體的閘極氧化層，然而這些氧化物，通常是被蒸鍍到半導體表面，與利用溼氧化法或熱氧化法，在矽晶圓上直接成長二氧化矽絕緣層的方式有所不同。基於前面所提到的原因，找尋適當的方法直接氧化三五族半導體，做為三五族金屬-氧化物-半導體元件的氧化層，成為目前重要的議題。



光電化學氧化法已經成功地被用以直接氧化氮化鎵以及氮化鋁鎵來形成氧化物。利用光電化學氧化法成長氮化鎵金屬-氧化物-半導體二極體以及氮化鋁鎵金屬-氧化物-半導體二極體的閘極氧化層，所完成的元件具有低的界面態位密度，分別為 $2.53 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 以及 $5.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。其順偏崩潰電場及逆偏崩潰電場可大於 2.2 MV/cm 以及 5.8 MV/cm 。這些結果在在顯示出光電化學氧化法，是可應用於製作氮化鎵系列材料金屬-氧化物-半導體元件的有效方法。因此，在本研究中，我們利用光電化學氧化法直接氧化氮化鋁鎵，作為氮化鋁鎵/氮化鎵金屬-氧化物-半導體高速電子移動率場效電晶體之閘極氧化層。

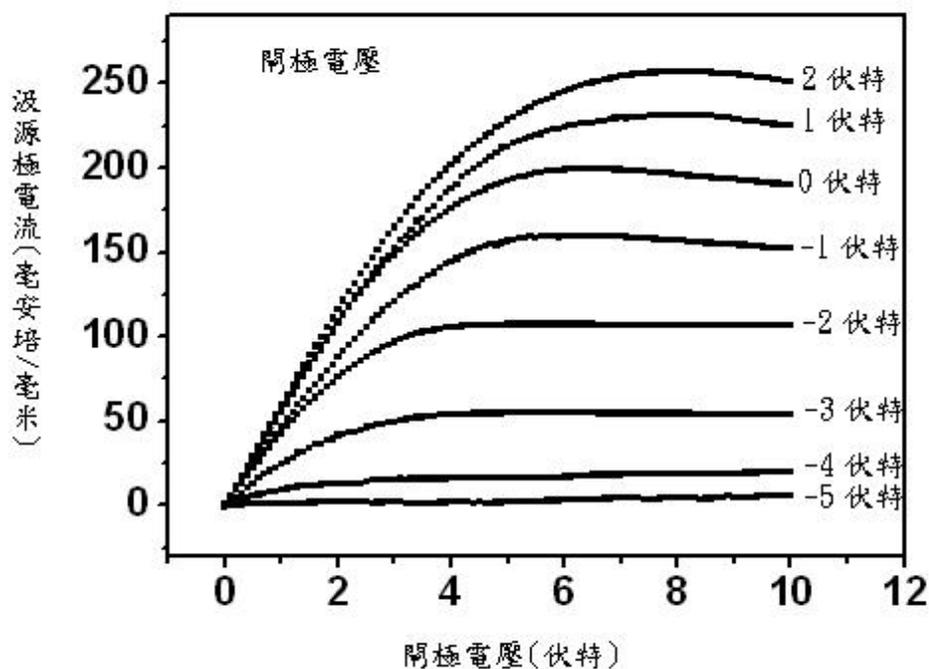
圖一顯示本實驗所使用的高速電子移動率場效電晶體之磊晶結構，此結構是利用分子束磊晶系統在藍寶石基板上，依次成長 20 nm 的氮化鋁成核層、1.5 μm 的碳參雜氮化鎵緩衝層，0.3 μm 的氮化鎵層以及 100 nm 的氮化鋁鎵層。此結構具有片載子濃度 $6.93 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 以及霍爾載子移動率 $1240 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。一開始，先蒸鍍鎳/金金屬(50/600 nm)，再利用活性離子蝕刻機定義高台圖案。接著利用電漿輔助化學氣相沉積系統，蒸鍍 450 nm 的二氧化矽，來補足元件表面因定義高台所形成的高低落差，並避免閘極電極斷裂。再蒸鍍鈦/鋁/鉑/金(25/100/50/200 nm)作為歐姆金屬之前，先利用表面硫化技術，去除氮化鋁鎵半導體表面的原生氧化層，蒸鍍完鈦/鋁/鉑/金(25/100/50/200 nm)金屬之後，利用快速熱退火系統，以 850°C 、氮氣氛圍、熱處理 2 分鐘條件進行熱處理，可以達到良好的歐姆特性。此歐姆電極能在 750°C 、氮氣氛圍、熱處理 10 小時以上而不破壞其歐姆特性。然後，本實驗中利用光電化學氧化法成長氮化鋁鎵/氮化鎵金屬-氧化物-半導體高速電子移動率場效電晶體之閘極氧化層，利用波長 325 nm 的氬鎢雷射作為光源，PH 值為 3.5 的磷酸溶液作為電解液。氧化層成長速率為 10nm/min，初成長完的氧化層

厚度為 65nm。利用光電化學氧化法成長氧化層的同時，氮化鋁鎵的厚度也隨之減少，在完成氧化層成長步驟之後，氮化鋁鎵厚度約剩下 83.8nm。然而，初成長的氧化層，十分容易被顯影液、酸性溶液以及鹼性溶液所蝕刻，不容易應用於元件製程中；在經過 700 °C、氧氣氛圍、熱處理2小時之後，氧化層出現 β -Ga₂O₃ 和 α -Al₂O₃ 等晶相，而且不會再被顯影液、酸性溶液以及鹼性溶液所蝕刻，熱處理後的氧化層厚度為 45nm。最後，蒸鍍鈦/金(10/250 nm)作為閘極金屬，元件的閘極長度與閘極寬度分別為 3 μ m 與 300 μ m。

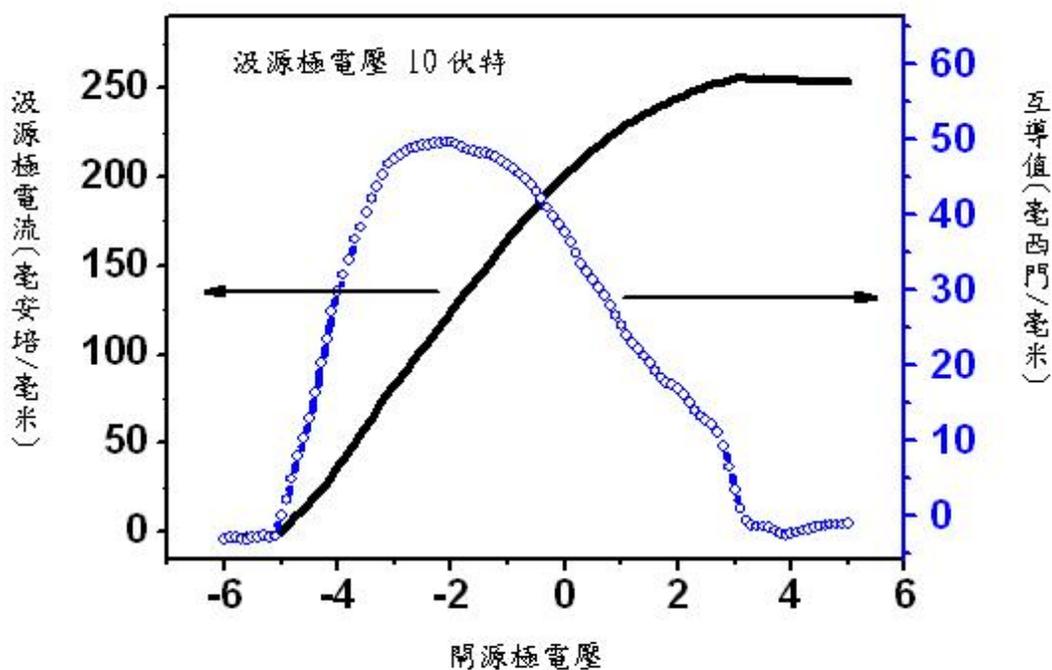


圖一、氮化鋁鎵/氮化鎵金氧半高速電子移動率場效電晶體

本實驗利用型號:HP 4145B 半導體參數分析儀，在常溫下量測閘極氧化層厚度 45nm 的氮化鋁鎵/氮化鎵金屬-氧化層-半導體高速電子移動率場效電晶體的直流特性。圖二為金屬-氧化層-半導體高速電子移動率場效電晶體元件的汲源極電流與汲源極電壓關係之直流輸出特性。我們所製作的金屬-氧化層-半導體高速電子移動率場效電晶體為常開型元件，當閘極不施加任何偏壓時，元件通道就已經存在。當閘極施加更大的負偏壓時，空乏區深度隨著閘極負偏壓變大而增加，進而導致汲源極電流變小。此研究製作的金屬-氧化層-半導體場效電晶體元件，在閘極偏壓為 -5 V 時通道完全截止，表示元件的臨界電壓為 -5 V。當閘極偏壓為 0 V 時，對應的汲源極飽和電流為 200 mA/mm。圖三為汲源極電壓為 10 V 時，元件的互導值與閘源極電壓的關係圖。元件的互導值，代表元件的閘極電壓對汲源極電流的控制能力。元件的最大互導值為 50 mS/mm，發生在閘極偏壓為 -2.09 V 與汲源極電壓為 10 V 時。此外，為了瞭解氧化層的功能及絕緣特性，我們也利用 HP 4145B 半導體參數分析儀量測常溫下，閘源極電流對應閘源極電壓的變化。當閘源極電壓為 10V 與 -10 V 時，閘源極漏電流分別為 50 pA 與 2 pA。



圖二、氮化鋁鎵/氮化鎵金氧半高速電子移動率場效電晶體輸出特性曲線



圖三、氮化鋁鎵/氮化鎵金氧半高速電子移動率場效電晶體互導特性曲線

總結來說，光電化學氧化法可以成功的直接氧化氮化鋁鎵形成氧化層，作為氮化鋁鎵/氮化鎵金屬-氧化層-半導體元件的閘極氧化層。經過 700 °C、氧氣氛圍、熱處理2小時後的氧化層，具有 β -Ga₂O₃ 與 α -Al₂O₃

等晶相，而且不會再被顯影液、酸性溶液以及鹼性溶液所蝕刻，其界面態位密度為 $5.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。氮化鋁鎵/氮化鎵金屬-氧化層-半導體高速電子移動率場效電晶體元件的汲源極飽和電流與最大互導值，分別為 200 mA/mm 與 50 mS/mm 。當閘源極電壓為 10V 與 -10 V 時，閘源極漏電流分別為 50 pA 與 2 pA 。根據本研究所量測的數據，可以了解：光電化學氧化法，可被視為未來用以製作高性能三五族氮化物金屬-氧化層-半導體高速電子移動率場效電晶體的優良技術，並可將其應用在積體電路上。

Copyright 2009 National Cheng Kung University