

氮化鋁鎵/氮化鎵高速電子移動率電晶體在單軸張力應變下的電特性變化

張家達, 蕭世匡, 張翼, 呂宗育, 黃瑞乾, 李清庭*

國立成功大學, 微電子工程研究所

ctlee@ee.ncku.edu.tw

IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, 2009, 30, 213.

摘要-本文研究在單軸張力應變下未護佈之氮化鋁鎵/氮化鎵高速電子移動率電晶體的特性。機械性應力會產生額外的電荷以改變高速電子移動率電晶體的通道電流，此種現象取決於閘極的方向，亦可能是由於壓電效應和使用單軸應力改變電子移動率的結果。此外，實驗結果顯示張力應變減少暫態電流，其現象類似於由壓電效應所產生的額外類施體的表面態位。



由於氮化鋁鎵/氮化鎵高速電子移動率電晶體在高頻和高功率應用上的極具潛力，近幾年已經廣泛的研究出許多傑出的成果。在早期研究此材料時，射頻電流散逸現象是所常遭遇的議題之一，此散逸現象與氮化鋁鎵的敏感表面和壓電的本質有關。解決此問題的方法之一，為利用氮化矽護佈於閘極以外的區域。此技術改善直流與射頻的特性。當減少表面態位密度時，則能降低表面相關的射頻散逸。此外，由於張力應用在氮化矽薄膜使壓電極化產生的額外電荷可說明直流電流增加的原因。然而，先前的研究並未能解釋僅張力應變在氮化鋁鎵/氮化鎵高速電子移動率電晶體的效應或應變在表面態位的影響。

本文以三點彎曲試驗的裝置，模擬氮化矽護佈於c軸所產生之張力應變。本文描述在機械性單軸張力應變下未護佈的氮化鋁鎵/氮化鎵高速電子移動率電晶體特性，以及閘極沿[10-10]與[11-20]方向下的應變對於元件之順向直流與暫態特性的效應。

利用有機金屬氣相沉積(MOCVD)在2吋的(0001)藍寶石基板上成長未摻雜的氮化鋁鎵/氮化鎵高速電子移動率電晶體(AIGaN/GaN HEMTs)異質結構。磊晶結構由2 μm 的氮化鎵為緩衝層與30 nm氮化鋁鎵障壁層所組成。室溫下試片的霍爾移動率和片電子濃度各為1100 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。如圖一(a)所示，將晶片邊緣沿著[10-10]與[11-20]方向切成大小為25 mm \times 15 mm的測試片。利用傳統製程製作源極及汲極，其間距為7 μm ，且閘極沿[10-10]、[11-20]方向的元件。閘極的長寬各為1 μm 和2 \times 50 μm 。為避免氮化矽護佈所造成的應力效應，因此元件並未護佈。如圖一(b)所示，利用三個不銹鋼圓柱棒所組成的彎曲試驗裝置以施加應力。由下式可計算張力應變為：

$$\varepsilon_{xy} = 3hJ_0/L^2$$

上式中h表示測試片的厚度、 J_0 表示在中心處的變形，且L表示測試片的長度。元件測量的區域為在上方的兩圓柱棒之間。利用Agilent E5270B半導體分析儀測量元件的直流特性。脈衝長度為100 ns、脈衝之間間隔為1 ms，且脈衝從偏壓點 $V_{GS} = V_{\text{pinch-off}}$ 和 $V_D = 0 \text{ V}$ 開始Accent DiVA D225量測元件的脈衝電流-電壓特性。

圖2顯示兩閘極方向元件在不同單軸張力應力下飽和電流密度(I_{DSS})的位移。當單軸張力應變增加時，[10-10]方向閘極元件之飽和電流密度會隨之增加。在單軸張力應變為 3.94×10^{-4} 時，飽和電流會增加大約3.42

%，但對於[11-20]方向閘極的元件在應力為 1.47×10^{-4} 時會下降約0.73 %，此外，在應力為 3.94×10^{-4} 時會上升約0.96 %。由理論上可計算利用機械單軸應變 P_{un} 所感應的額外極化電荷為

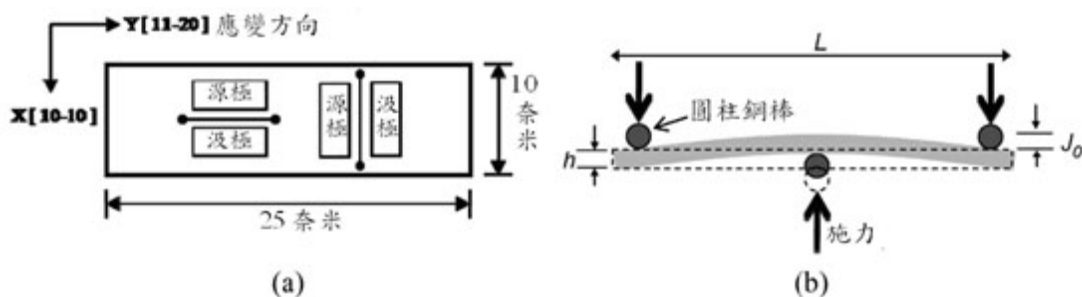
$$P_{un} = \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{12}}{C_{13}} \right) \varepsilon_{yy}$$

其中 e 為壓電常數， C 為纖維鋅礦晶格的彈性常數。圖2顯示由霍爾量測所得之單軸張力應變為歸一化飽和電流密度函數的結果。此等結果與元件閘極方向在[10-10]方向上吻合，然而對於[11-20]方向的閘極元件，此偏差時可能是由單軸應變所造成之電子移動率的調變。在低的應變狀態下，在[10-10]方向電流的電子移動率減少將主導電流密度的行為。當應變變大時，電荷密度的增加將主導電流密度的行為。先前的研究指出在單軸應變下的P型氮化鎵電洞移動率是取決於方向性，但是此效應對於AlGaIn/GaN電子移動率的影響需有更進一步的研究。

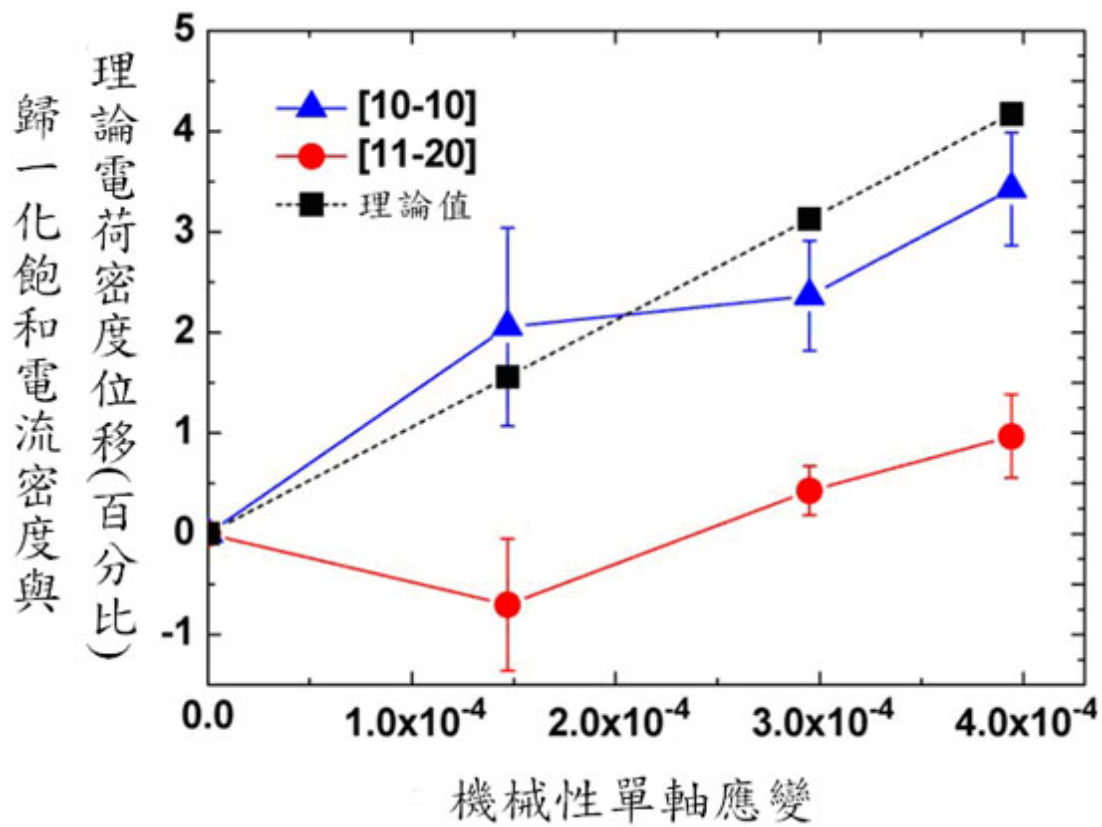
圖3(a)比較脈衝電流-電壓與直流電流-電壓的特性。在 1.47×10^{-4} 的單軸張力應變下，元件的暫態汲極電流有明顯地衰減。圖3(b)顯示在不同單軸張力應變為電流恢復率(I_T/I_{DC})的函數(也就是閘源極電壓為0伏和汲源極電壓為10伏下的暫態汲極電流，在相同偏壓下，暫態電流相對於直流電流的值)。於電流恢復率上，兩個方向的閘極元件沒有太大的差異，而且在應變為 1.47×10^{-4} 時，電流恢復率會有約10 %的衰減。當應變超過 1.47×10^{-4} 時，在應變為 3.94×10^{-4} 下，電流恢復率仍然會有5 %的衰減。由此顯示在額外的壓電極化作用下，存在著提供二維電子氣(2DEG)電子的額外類施體的表面態將會增加閘極延遲。此發現與Ibbetson與其他研究人員對AlGaIn/GaN異質界面研究上電子產生的因素吻合。在應變為 1.47×10^{-4} 以下，電流恢復率有些微上升的趨勢顯示出可能有其他來源會產生電子。

為確定SiN_x引起之張力應變在汲極電流暫態情形下所扮演的角色，如圖4(a)所示利用標準PECVD氮化矽薄膜護佈於另一依先前在同樣製程下的晶圓上。第一層氮化矽可防止氮化鋁鎵和氮化矽間的界面反應，第二層氮化矽將於元件上感應出 2.32×10^{-4} 的張力應變，其值是利用高解析度X光繞射儀量測在氮化鋁鎵c-軸上的晶格變形所得到者。圖4(b)為元件在第二層SiN_x護佈之前和之後的暫態特性比較。在經過SiN_x護佈的張力應變後，其暫態汲極電流降低，且此現象與閘極方向性無關。

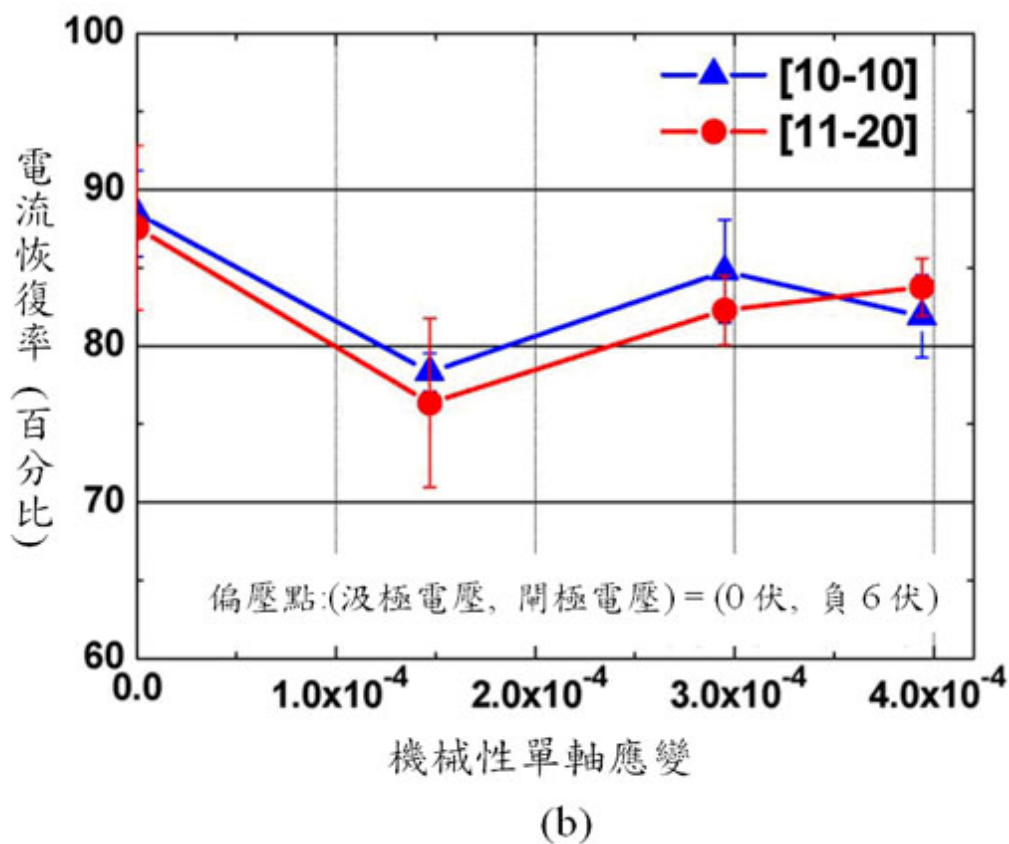
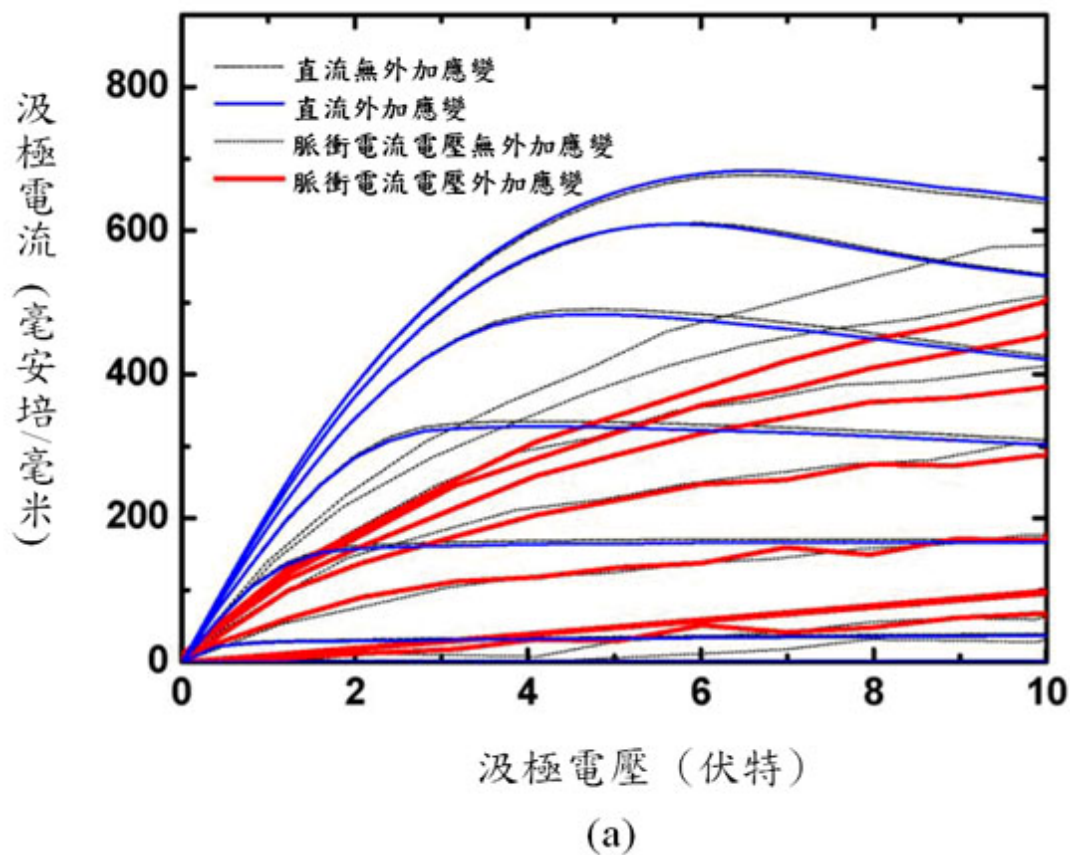
氮化鋁鎵/氮化鎵高電子移動率電晶體的通道電流密度可以經由外加單軸張力應變來做調整，其電流密度的改變量取決於閘極的方向性。雖然此應變會加強直流特性，但它同時也會嚴重地降低電流恢復率。由氮化矽護佈測試，張力應變會降低元件的暫態表現，造成此現象的原因主要是由於張力應變會產生額外的壓電極化現象，此壓電極化現象會感應出額外之類施體的表面態。本研究的發現相當有助於氮化鋁鎵/氮化鎵高電子移動率電晶體的最佳化氮化矽護佈。



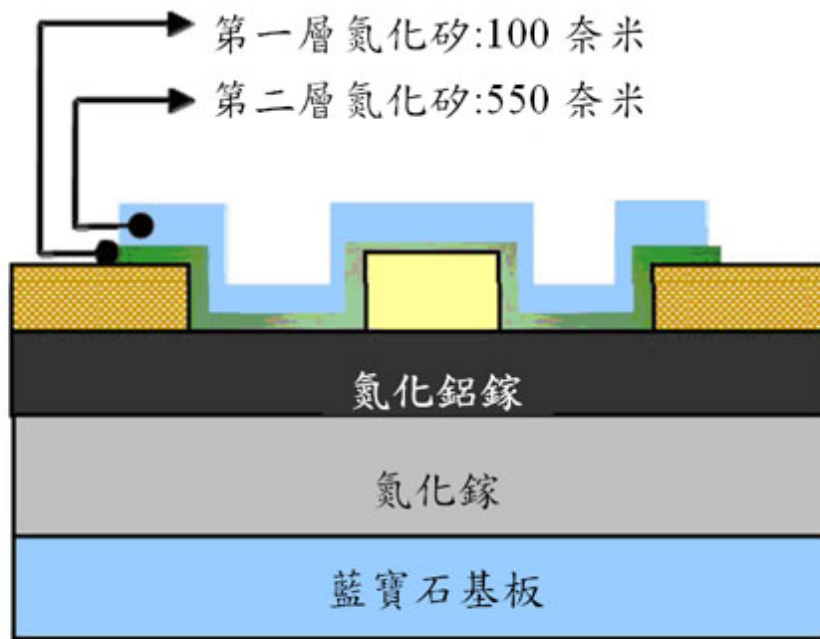
圖一、(a) 測試片上視圖與在單軸應變下沿[11-20]和[10-10]的閘極方向，(b)張力應變之三點彎曲試驗裝置。



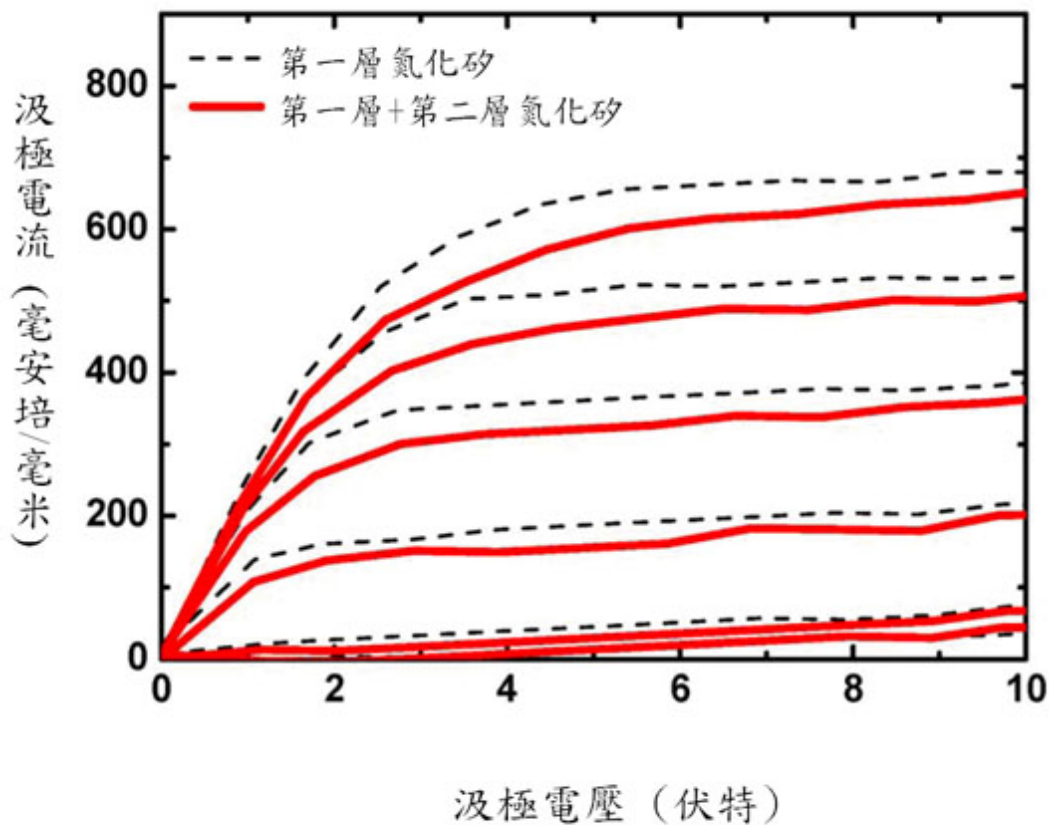
圖二、沿[10-10]與[11-20]方向閘極之元件歸一化飽和電流密度與單軸張力應變為理論電荷密度位移之函數。



圖三、(a)未護佈元件在0與 1.47×10^{-4} 應變下之暫態電流(閘極偏壓 = 截止電壓到0伏, 1伏/間距)與直流特性比較, (b)機械性單軸應變為未護佈元件之電流恢復率之函數。



(a)



(b)

圖四、(a)氮化矽護佈之高速電子移動率電晶體元件剖面圖，包含第一層100奈米厚度之氮化矽與第二層550奈米厚度之氮化矽，(b)元件護佈第二層氮化矽前後之暫態電流特性(閘極偏壓 = 截止電壓到0伏，1伏/間距)。