

變晶性高電子移動率電晶體撞擊游離特性之溫度效應 賴柏憲, 傅思逸, 洪慶文, 蔡衍穎, 陳梓斌, 陳君威, 劉文超*

國立成功大學電機工程系、微電子工程研究所

Email: wcliu@mail.ncku.edu.tw

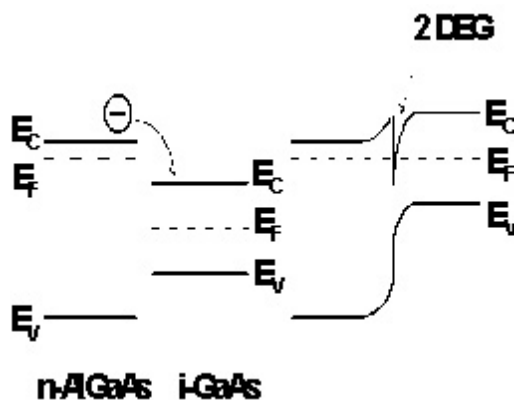
Applied Physics Letters 89, 263503 (2006)

高電子移動率電晶體(HEMTs)已廣泛的應用在低雜訊, 高功率及數位電路。高電子移動率電晶體最重要的觀念就是二維電子雲。由於散射效應的影響, 使得移動率降低, 為了改進其缺點, 應用異質界面結構的觀念。它是使用異質界面特性來改變能帶結構及摻雜濃度, 以設計優異之元件結構。由於通道內的電子與提供載子的游離雜質分開, 使得庫倫散射減少, 因此, 電子移動率就可以增加。例如: n- 砷化鋁鎵/砷化鎵(如圖一所示)和n-砷化銻鋁/砷化銻鎵。圖二顯示典型常用來製造不同元件的磊晶層。這些結構不同的地方在於通道中的銻含量不同。高銻含量是值得注意的, 因為移動率及最大切換速率與銻含量成正比。成長在砷化鎵基板的擬晶性高電子移動率電晶體(PHEMTs)銻含量能夠達到25%。高速的磷化銻高電子移動率電晶體或是變晶式高電子移動率電晶體(MHEMTs)通道銻含量能夠到達80%。

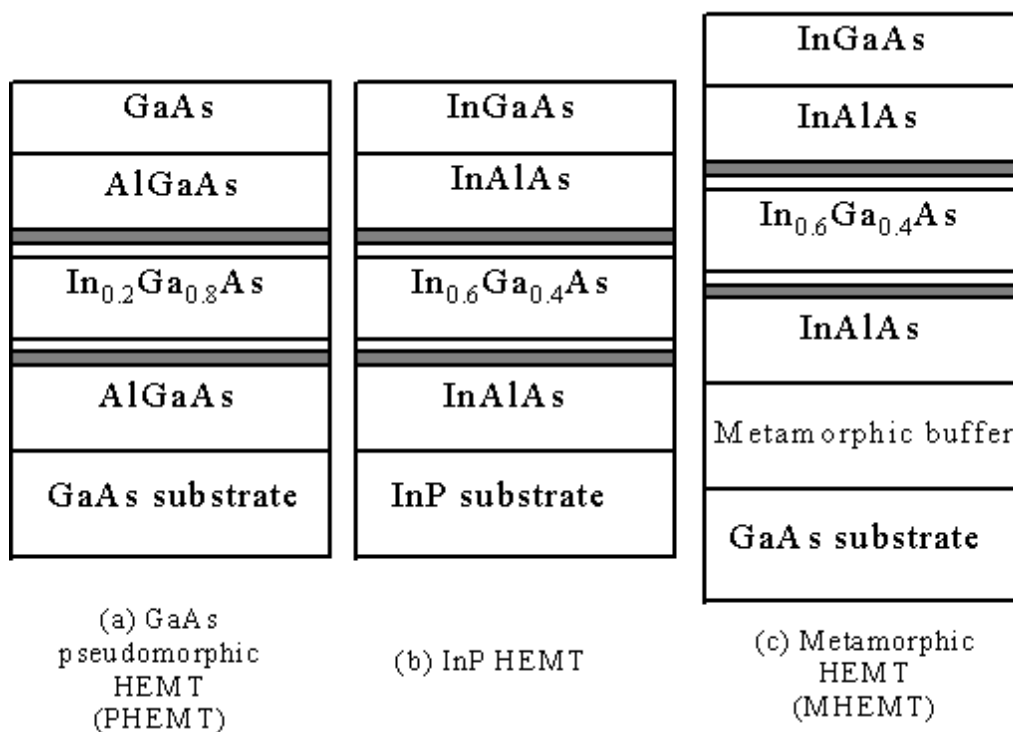
儘管磷化銻高電子移動率電晶體有絕佳的電晶體特性, 但磷化銻高電子移動率電晶體礙於磷化銻基板本身特性, 使其應用上會受到限制。與砷化鎵基板的高電子移動率電晶體相比較, 由於磷化銻基板較貴, 且容易破碎, 亦沒有較大尺寸的基板, 使得在商業的應用上增加了其製程的困難度。為了克服上述問題, 人們研究出成長在砷化鎵基板上之變晶式砷化銻鋁/砷化銻鎵高電子移動率電晶體(MHEMT)。變晶性高電子移動率電晶體的快速興起可解決磷化銻大量製造上的問題。

變晶性緩衝層(metamorphic buffer)最主要的目的在於可在砷化鎵基板上成長銻(In)莫耳分率較高的砷化銻鎵材料, 使得元件的特性可以與成長在磷化銻基板上匹敵。然而當銻的含量越大, 則砷化鎵與砷化銻鎵的晶格不匹配也越嚴重。當晶膜厚度大於臨界厚度時, 晶格間所存在的應力會使晶格發生扭曲, 進而引起晶格的缺陷及錯位, 使元件的特性大幅的衰減。為了克服此問題, 在磊晶成長變晶型元件時, 必須在砷化鎵及砷化銻鎵之間成長一變晶緩衝層來釋放砷化鎵及砷化銻鎵因晶格不匹配所造成的應力。在許多結構中, 變晶式緩衝層對元件特性而言扮演了非常重要的角色, 它的兩個重要功能如下: (1)調變主動層與砷化鎵基板間晶格的不匹配, (2)將缺陷固定在緩衝層內, 並防止其擴散至主動層。此外, 變晶性高電子移動率電晶體(MHEMT)的優點為可使用的在大基板尺寸以降低成本, 而且在砷化鎵基板上也有較佳的機械穩定性。





圖一顯示具有高電子移動率的電子侷限於二維電子雲。



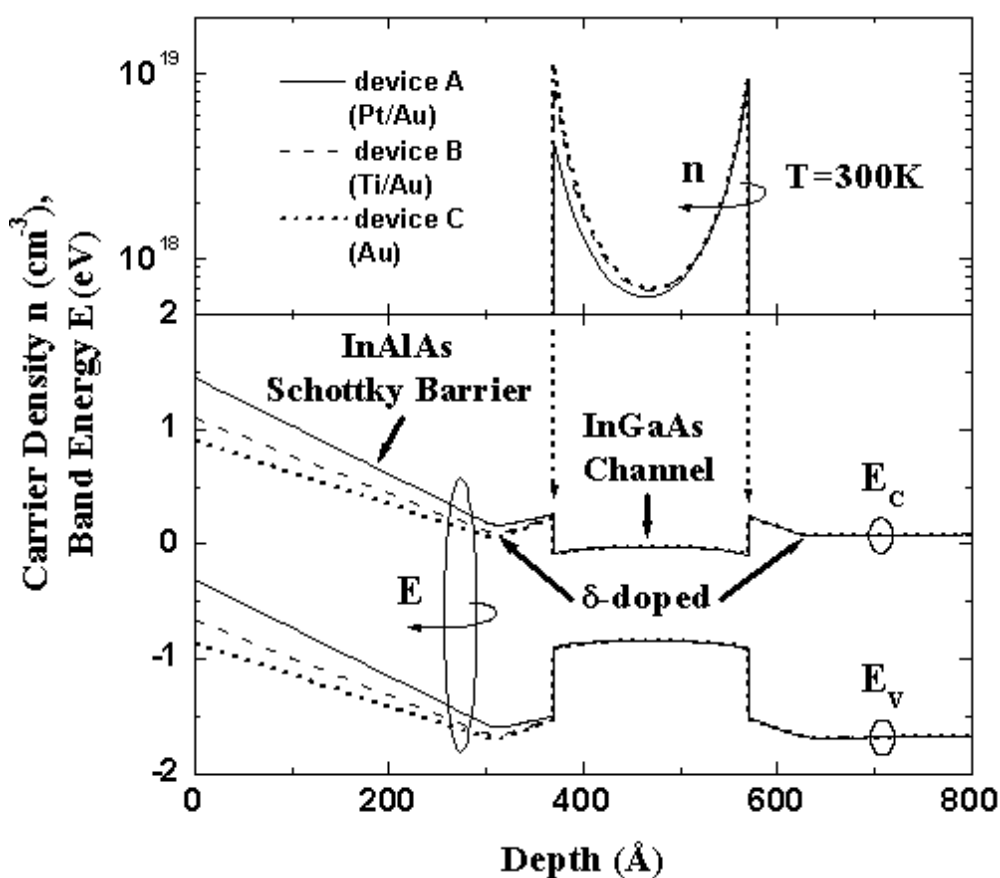
圖二顯示典型常用來製造不同元件的磊晶層。

近年來，成長在GaAs基板上以InP系列磊晶層為基礎之變晶性高電子移動率電晶體(Metamorphic High Electron Mobility Transistors, MHEMTs) [Please use a drawing to explain to laymen what MHEMT is.]，對於高功率和低雜訊微波之應用已吸引相當多的注意。從物理觀點來看，閘極漏電流的增加跟崩潰電壓的減少主要是由於通道中載子產生以及載子傳輸穿過蕭特基層所導致。因此，通道中有效撞擊游離化所造成的載子產生是影響崩潰電壓特性的主要原因。

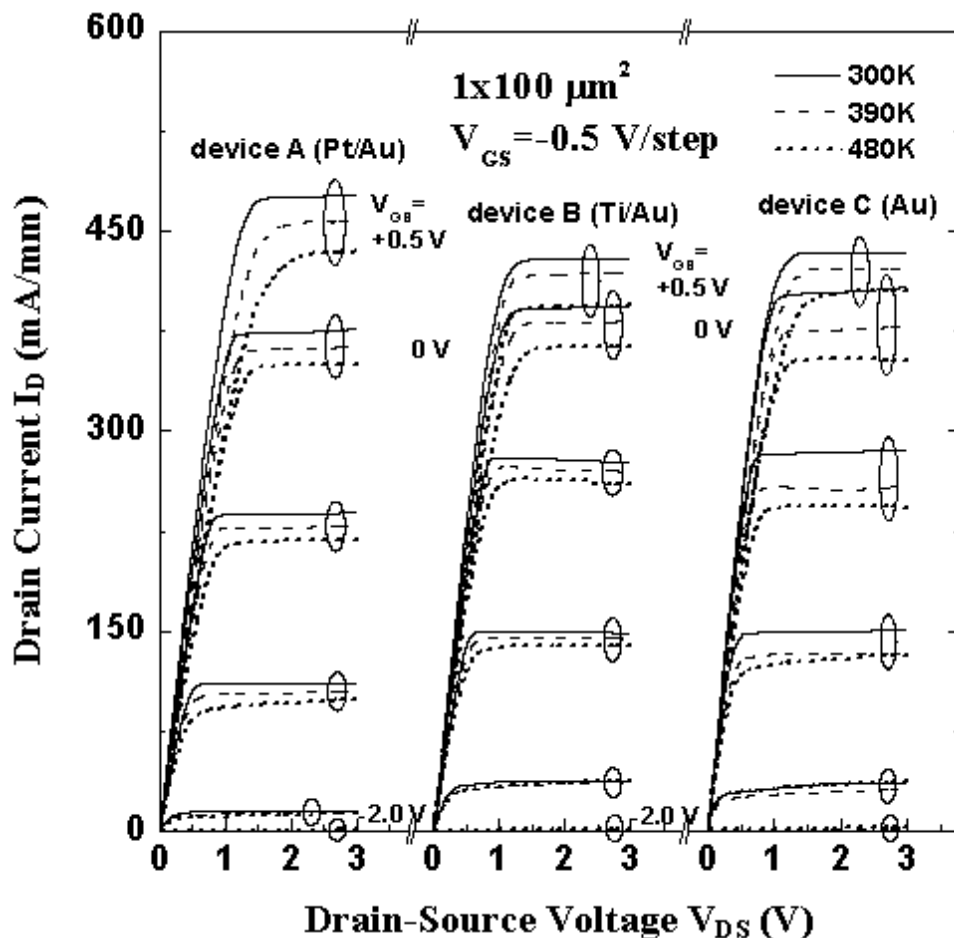
由於撞擊游離化與能帶間隙值成反比的關係，窄能隙的InGaAs通道容易引起撞擊游離效應。這個問題通常會導致元件特性的衰退，包含低崩潰電壓，高閘極漏電流，以及高輸出電導。為了研究撞擊游離效應，經由量測到的總閘極漏電流去萃取撞擊游離所引起的閘極漏電流變得不可或缺。值得注意的是撞擊游離效應與閘極接觸之蕭特基能障具有強烈的依存性，因此選擇適當的閘極金屬，能夠抑制撞擊游離效應以及改善元件特性。在本文中，吾人研究變晶性高電子移動率電晶體搭配不同蕭特基閘極金屬之撞擊游離溫度相關特性。本研究主要研製包含鉑/金、鈦/金及金等不同的金屬當作蕭特基閘極金屬，並同時探討撞擊游離效應。為了考慮撞擊游離效應所引起的閘極漏電流，吾人應用Webster等人所建立的一種過量閘極電洞流模

型。另外，對於撞擊游離而言，兩種在不同電場範圍分別主導的機制(游離臨界能(ionization threshold energy)和熱電子總量(hot electron population))也被提出來詮釋不規則的電場及溫度相依性。為了做比較，三種不同的金屬同樣利用蒸鍍的方式及相同的製程步驟分別形成元件的蕭特基閘極金屬。其中，元件A的閘極為鉑/金(20nm/130nm)，元件B的閘極為鈦/金(20nm/130nm)，而元件C的閘極則為金(150nm)。

圖三顯示熱平衡狀態下的能帶示意圖及通道層範圍內所對應的電子密度。對於元件A和B，由於蕭特基能障高度增加導致電子濃度減少。因此，電子電洞對的產生以及相關的撞擊游離效應被有效地抑制，而蕭特基層的砷化銦鋁和通道層的砷化銦鎵之間存在較大的導帶不連續度也能夠抑制電子注入到閘極，這個結果更進一步改善高溫的載子侷限能力。圖四為不同溫度下量測到的共源極電流-電壓輸出特性曲線圖。值得注意的是在溫度為300~480K之間，吾人所研製的元件並沒有觀察到撞擊游離導致的扭曲效應或其他衰退現象。特別是對元件A來說，即使閘極電壓增加到+0.5V時，汲極電流也沒有明顯地被抑制。而且，元件A展現較低的汲-源極飽和電流，這是因為鉑/金閘極金屬導致蕭特基能障高度的增加，這可能會使得閘極下的空乏區擴大造成汲極電流降低。



圖三、變晶性高電子移動率電晶體搭配不同蕭特基閘極金屬的能帶示意圖及通道層範圍內所對應的電子密度。

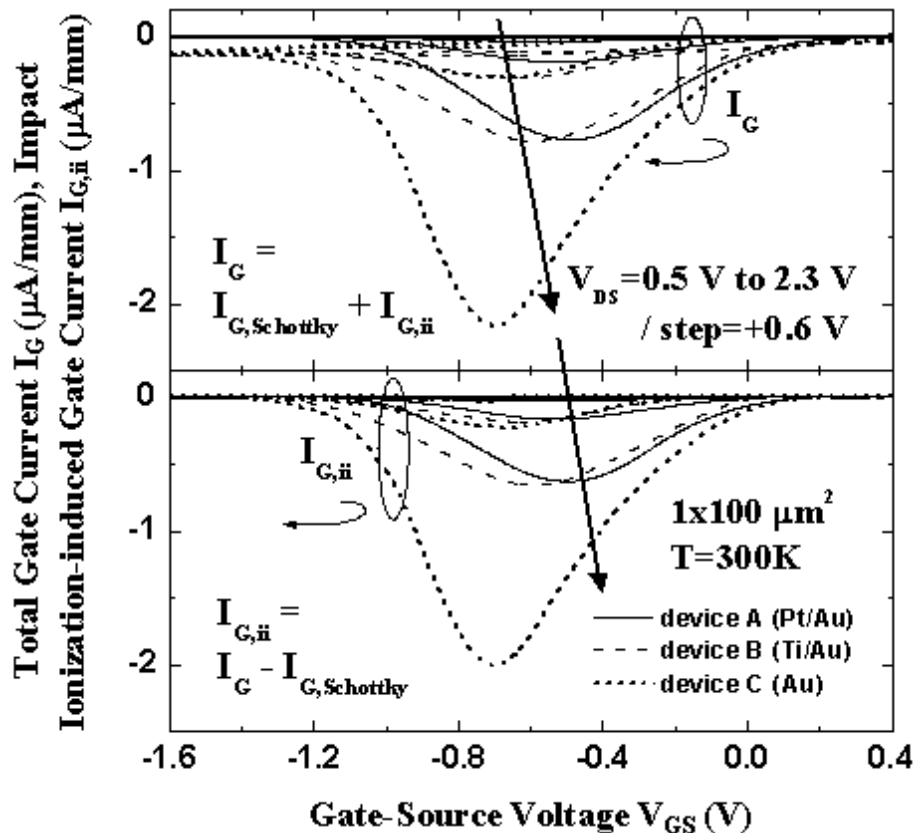


圖四、不同溫度下典型共源極電流-電壓特性曲線圖。

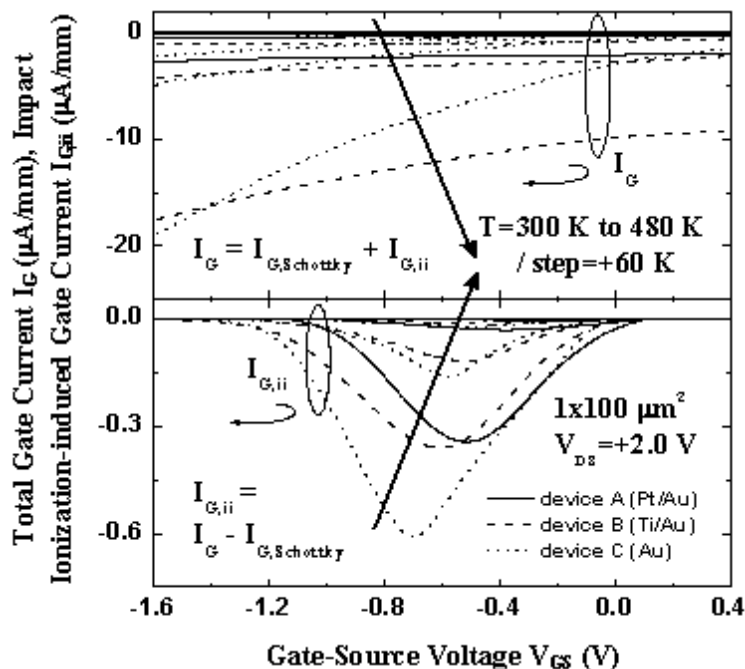
圖五顯示室溫時在不同電場下，總閘極電流及撞擊游離所引起的閘極電流對閘-源極電壓的關係。圖六顯示在高電場($V_{DS}=+2.0V$)時總閘極電流(I_G)和撞擊游離所引起的閘極電流($I_{G,ii}$)對閘-源極電壓的關係。吾人可以清楚地看到bell-shaped的現象反映在大的汲-源極電壓，且低溫時撞擊游離漏電流大於蕭特基閘極漏電流。bell-shaped現象的存在起因於撞擊游離，常發生在高電子濃度及高電場情況下。在適度的 $|V_{GS}|$ 區間，電子電洞對產生在閘極與汲極電極之間的高電場地帶。從圖五及圖六中可以得知一部分的電洞注入越過蕭特基層，並且聚集在閘極端，因此，閘極電洞流及相關的bell-shaped現象增加且同時發生。總閘極電流是由於通道中發生撞擊游離所產生的電洞流及蕭特基漏電流所組成。根據閘極電洞流模型， $I_{G,ii}$ 可以被解釋為：

$$I_{G,ii} = I_G - I_{G,Schottky}$$

其中 $I_{G,Schottky}$ 為蕭特基閘極漏電流，而且是閘極跟汲極電壓的函數。元件A和B與元件C比較起來，顯然因撞擊游離所產生的bell-shaped現象較明顯地被抑制。這是藉由蒸鍍特定的閘極金屬接觸所導致的，例如：鉑/金和鈦/金。較高的蕭特基能障將會導致電位能有重大的改變。因為閘極下方的空乏區擴大而導致通道汲極電流減少，因此，撞擊游離效應可以被有效地抑制。特別是從圖六中，吾人可以發現從300到480K的寬廣溫度範圍內，元件A和B的 $I_{G,ii}$ 峰值有向正 V_{GS} 區域移動的傾向。由於溫度提升使得聲子散射增加，造成電子移動率和汲極電流減少， $I_{G,ii}$ 在相同的電場下被汲極電流所主導，因此，元件A和B的閘-源極電壓絕對值需要減少以便維持相同的汲極電流密度。



圖五、室溫時在不同汲-源極電壓下，總閘極電流及撞擊游離所引起的閘極電流對閘-源極電壓的關係圖。



圖六、不同溫度下總閘極電流和撞擊游離所引起的閘極電流對閘-源極電壓的關係圖。

吾人觀察到反向發展的 $I_{G,ii}$ 對電場與溫度的相依性，這意味著電場和撞擊游離對溫度的相依性機制是不同的。實際上，元件操作的電場及撞擊游離對溫度的相依性主要決定於游離臨界能及熱電子總量之間的競爭。如圖五所示，當電場減少時(較低的汲極偏壓)，撞擊游離主要是被高游離臨界能所控制。因為電子分佈在溫度較低的狀態，所以低電場時熱電子總量大大地減少。這將導致通道中的撞擊游離消失而且減小 I_G 。

ii。反之，既然高電場出現在高汲-源極偏壓的閘-汲極區域，那麼電子便能獲得足夠的能量且熱電子輔助的撞擊游離容易發生在通道中，接著相關的電子電洞對產生，導致 $I_{G,ii}$ 增加。另一方面，如圖六所示，一旦溫度從300增加到480K，游離臨界能及相關能帶輕微的減小使得撞擊游離效應有增大的傾向。然而，通道電子的平均自由路徑減小是由於聲子散射增加的緣故，這意味著晶格電子在不夠充足的能量狀態下難以釋放。因此，雖然游離臨界能稍微的減少，但熱電子總量及相符合的撞擊游離實質上是被抑制住，同時，可以觀察到 $I_{G,ii}$ 隨著溫度增加而減小。

結論，吾人研究變晶性高電子移動率電晶體搭配不同閘極金屬及其相關的撞擊游離性質。從實驗結果得知，蕭特基能障高度影響了撞擊游離效應及元件特性。更進一步來說，兩種不同機制分別主導在不同電場區域的撞擊游離，這可用來解釋不規則的電場及溫度相依性。因此，藉由使用較高的閘極金屬蕭特基能障能夠有效地抑制bell-shaped現象及相關撞擊游離效應所產生的漏電流。此外，撞擊游離效應所引起閘極漏電流也會隨著電場減小及溫度增加而減少。

Copyright 2009 National Cheng Kung University