

新穎的微量銻通道銻砷化銦鎵/砷化鎵高電子移動率電晶體

許渭州*、蘇科化

成功大學微電子研究所

temp11@ncku.edu.tw

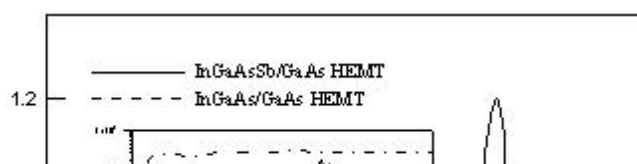
IEEE Electron Device Letters, 28, 96 (February 2007)

以微量氮四元化合物結構形成的氮砷化銦鎵(InGaAsN)在近幾年已被廣泛的研究，導因於在氮砷化銦鎵與砷化鎵的異質結構接面具有高的傳導帶不連續能階，即在異質結構接面上可形成較深的量子井，使元件處於高溫的操作下，接面上對導電載子的侷限能力得以增加，使載子不會輕易的跳脫出量子井形成漏電流而降低了元件特性。氮砷化銦鎵可以成長於晶格匹配之砷化鎵基板上，亦可使用於通訊元件1.3微米(1微米即一公尺的百萬分之一長度)的長波長雷射上。除此之外將氮砷化銦鎵(InGaAsN)使用於異質接面雙極性電晶體上也証實與鋁砷化鎵材料相比較可以有效地減少其元件的導通電壓。雖然氮原子的摻雜可以減少能隙但卻會伴隨著粗劣的磊晶品質。對於電子元件的應用上，氮的加入便會嚴重的降低載子的傳輸能力，而且在光電元件上的應用為了改善光特性，必須利用退火來減少缺陷或非幅射雜質。因此，使用微量氮的元件特性無法進一步突破。近來某些團隊已經致力於將銻原子當成類似表面活性劑的功能，並使用於砷化鎵(GaAs)及銻氮砷化銦鎵(InGaAsNSb)的量子井雷射上以期改善結晶品質及抑制長晶時的三維成長。在長波長雷射元件中摻雜入銻原子不僅可以改善元件的臨界電流密度亦可以有效的減少能隙並造成紅移現象的增加，讓雷射元件可以操作於更長波長的通訊波段。然而，對於電元件的應用方面操作速度是一項很重要的特性指標，有鑑於此，本文提出全世界第一個以分子束磊晶法(MBE)成長銻砷化銦鎵(InGaAsSb)為通道的高電子移動率電晶體(HEMT)，一方面摒除了氮元素的摻雜會造成元件內載子移動速度嚴重下降的缺點，一方面又摻雜銻元素可以更增加砷化鎵的結晶品質。藉由加入銻後可以同時改善元件通道接面磊晶品質、載子傳輸特性和通道內的載子侷限能力。與傳統的砷化銦鎵通道的元件比較，本論文摻雜銻的銻砷化銦鎵通道的元件可以獲得較優異的載子移動率以期元件可以在更高的速度下操作，並同時具有較高的汲極電流密度、轉導值(即放大率)、閘極電壓擺幅(元件所施加的電壓範圍)、和高頻操作等特性。

本研究主題結構組成為在絕緣的砷化鎵基板上先成長0.4微米(一的砷化鎵緩衝層(buffer layer)，其上依序成長9.5奈米(一奈米即一公尺的十億分之一長度)提供導電載子移動的銻砷化銦鎵的通道層(channel layer)，4奈米的絕緣砷化鎵隔離層(space layer)，20奈米的砷化鎵與矽摻雜載子提供層(carrier supply layer)，15奈米的絕緣砷化鎵蕭基層(Schottky layer)，最後為20奈米砷化鎵的矽摻雜覆蓋層(cap layer)。我們亦成長了相同的結構，但其通道層為不摻雜銻原子的傳統砷化銦鎵通道的結構，以提供有力的比較。

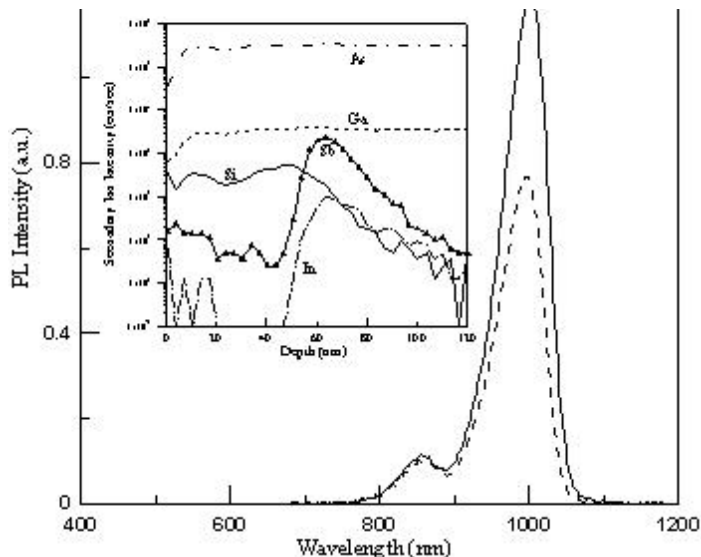
霍爾量測中可獲得所提出的銻砷化銦鎵通道及砷化銦鎵通道高電子移動率電晶體的二維電子氣(2DEG)濃度及電子移動率資料。在室溫下銻砷化銦鎵通道高電子移動率電晶體(砷化銦鎵通道高電子移動率電晶體)的二維電子氣濃度與電子移動率分別為2951 (2340) $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 及 $3.1 (3) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。由此可知在兩個樣品具有相近的2DEG濃度下，電子移動率卻有26%的改善，可以証明銻原子的摻雜的確提升了載子的傳輸特性。

圖一的插圖中為銻砷化銦鎵通道高電子移動率電晶體結構二次離子質譜(SIMS)密度與接面深度的作圖。由圖可知因為銻砷化銦鎵通道



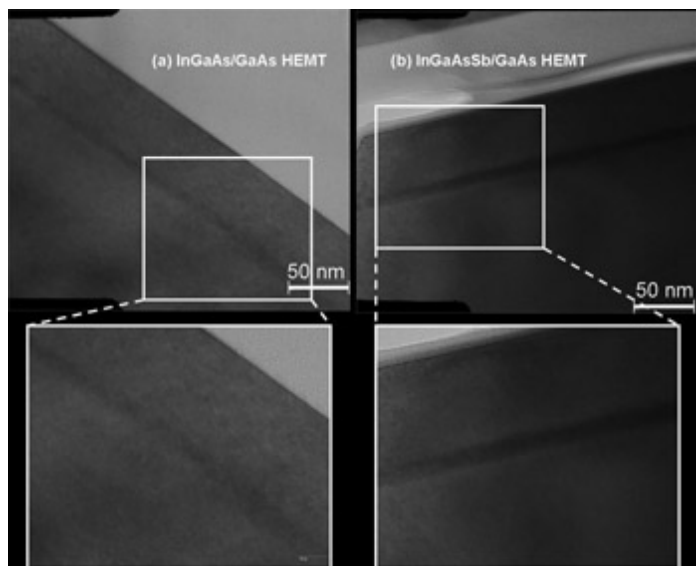
大約在距離元件表面下59奈米處，當元件在成長的時候砷及鎵離子都保持在穩定值，但是在60奈米深的地方，銻和銻離子卻明顯的增加到最大值。所以由SIMS的表現可以証實銻原子在通道層成長時有摻雜入通道。而且銻原子的微量摻入砷化鎵薄膜可以使銻原子扮演類似活化劑的功能以改善結晶的品質。

圖一為銻砷化鎵通道及傳統砷化鎵通道的高電子移動率電晶體於室溫時的光激發光圖譜與波長的關係圖。由圖可知銻砷化鎵通道 HEMT 的光激發光強度約為傳統砷化鎵通道 HEMT 的 1.56 倍。其原因為銻原子的摻雜導致能隙的減少使其波長由 0.993 微米增加到 1.002 微米。從光激發光密度及半高寬清楚的顯示出異質介面品質的改善是由於在砷化鎵中加入類似活性劑的銻原子所導致。所以由光激發光圖譜的特性亦表現出與霍爾量測結果相符一致。



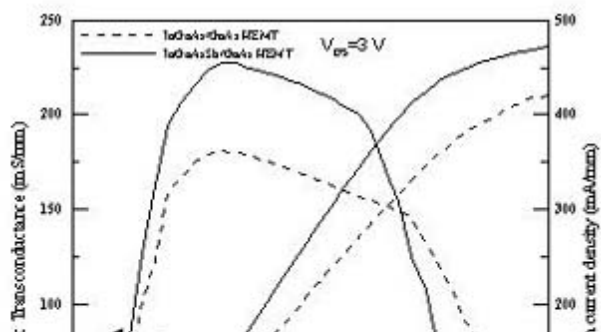
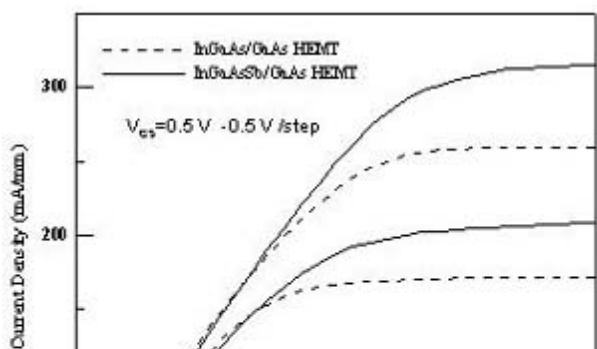
圖一 銻砷化鎵通道及砷化鎵通道高速電晶體於室溫時的光激發光圖譜與波長的關係圖，插圖為銻砷化鎵通道 HEMT 結構的二次離子質譜 (SIMS) 密度與介面深度關係圖

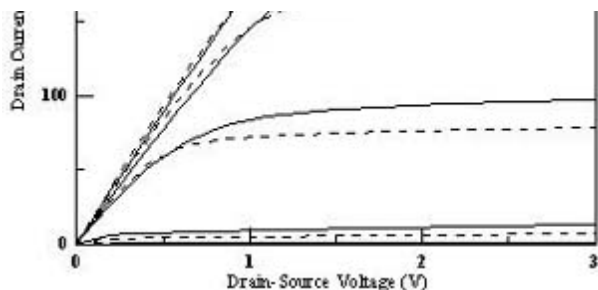
圖二 (a) (b) 分別為砷化鎵通道及銻砷化鎵通道高電子移動率電晶體的高解析電子顯微鏡影像。在銻砷化鎵通道高電子移動率電晶體元件中，其隔離層與通道和通道與緩衝層的介面都可以發現比傳統的砷化鎵通道 HEMT 的介面來得更平坦與均勻。所以由解析電子顯微鏡影像也清楚的証明了在加入銻原子後可以改善磊晶的品質。



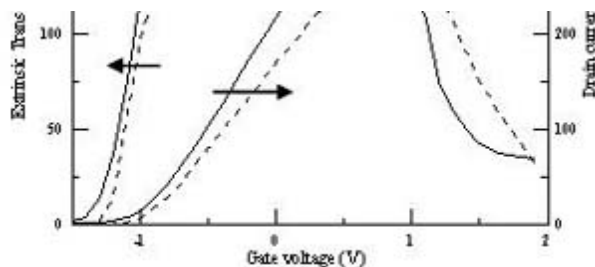
圖二 (a) 砷化鎵通道高速電晶體及 (b) 銻砷化鎵通道高速電晶體的高解析電子顯微鏡影像

圖三 (a) 為銻砷化鎵通道高電子移動率電晶體及砷化鎵通道高電子移動率電晶體於室溫下之電流電壓 (I-V) 特性圖。對於銻砷化鎵通道及砷化鎵通道的高電子移動率電晶體在閘極對源極電壓為零伏所量測的汲極飽和電流 (IDSS) 而言分別為 208 及 171 mA/mm。由霍爾量測所得的 2DEG 濃度比較可知，所增加的電流驅動能力主要是由於摻雜了銻原子於砷化鎵量子井通道中，改善了載子傳輸能力與接面的磊晶品質所致。





圖三(a) 銻砷化銦鎵通道及砷化銦鎵通道高速電晶體的汲極電流密度與汲極對源極電壓的關係圖



圖三(b) 銻砷化銦鎵通道及砷化銦鎵通道高速電晶體的汲極電流密度、轉導值與閘極電壓的關係圖

圖三(b)為銻砷化銦鎵通道HEMT及傳統砷化銦鎵通道HEMT於室溫下轉導及汲極電流對閘源極電壓的特性圖。汲極對源極的電壓條件固定在3伏特。在室溫下銻砷化銦鎵通道HEMT(砷化銦鎵通道HEMT)的轉導最大值與在閘源極電壓為2伏特時的汲極電流密度分別為227 (181) mS/mm 及473 (421) mA/mm。因為使用了摻雜微量銻的通道,由上述特性可知其轉導特性將近有25%的明顯改善。

在結論中,新穎的微量銻通道層銻砷化銦鎵高電子移動率電晶體第一次成功的成長於砷化鎵基板上。摻雜銻原子於砷化鎵通道層中做為活性劑所形成的銻砷化銦鎵與砷化鎵的異質介面,可以有效的改善磊晶品質。另一方面由於微量銻的加入所降低的能隙亦可明顯改善載子的傳輸特性與通道層的載子侷限能力。多種的特性分析技術如二次離子質譜儀、光激發光圖譜、霍爾效應量測及高解析電子顯微鏡影像皆証實了磊晶品質的改善,因此優異的元件特性如寬廣的元件操作電壓範圍、高轉導值、和高的電流驅動能力皆可由本文所發表的銻砷化銦鎵高電子移動率電晶體結構所獲得。