

一種新穎具有步階式砷化銮鋁鎵集極層之磷化銮/砷化銮鎵雙異質界面雙極性電晶體

陳梓斌, 鄭岫盈¹, 洪慶文, 朱桂逸, 陳利洋, 蔡宗翰和劉文超*

國立成功大學電機資訊學院微電子工程研究所

¹國立宜蘭大學電子工程系

Email: wcliu@mail.ncku.edu.tw

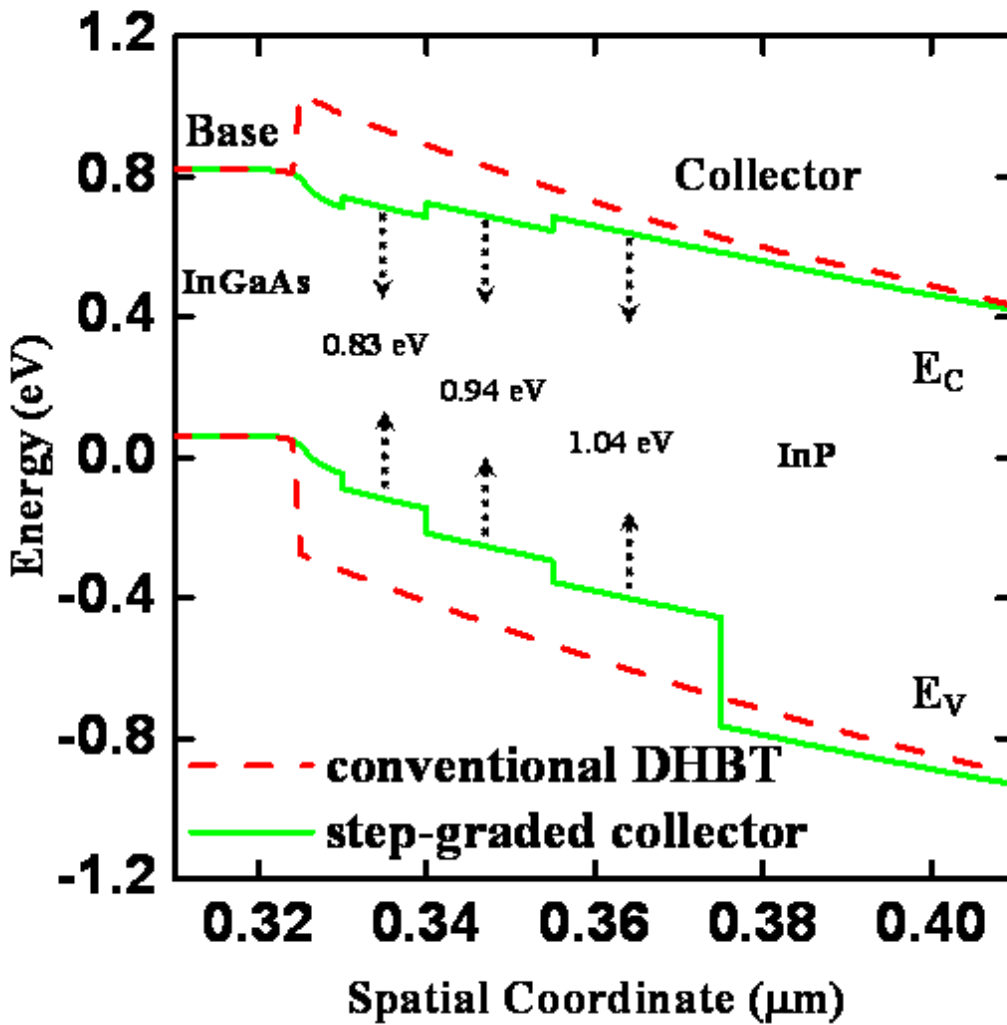
IEEE Electron Device Letters, Vol. 29, No. 1, pp. 11-14, Jan 2008.

近幾年來, 由於砷化銮鎵材料突出之傳輸特性, 使得磷化銮鎵系列異質界面雙極性電晶體的應用益趨廣泛, 特別是在低功率數位電路的應用上更深具潛力。然而較差之崩潰特性限制了其在低電壓及低功率電路之應用。另一方面, 雙異質結構雙極性電晶體已證實可有效地改善崩潰電壓特性。但是, 對雙異質結構雙極性電晶體而言, 在基-集界面之異質結構所引起之載子阻擋效應卻會造成位障尖峰與載子傳輸之障礙, 使元件特性隨之下降。為了改善此問題, 世界上各個研究團隊無不針對改善載子阻擋效應, 藉由設計適當之雙異質界面結構來達到理想直流特性的要求。

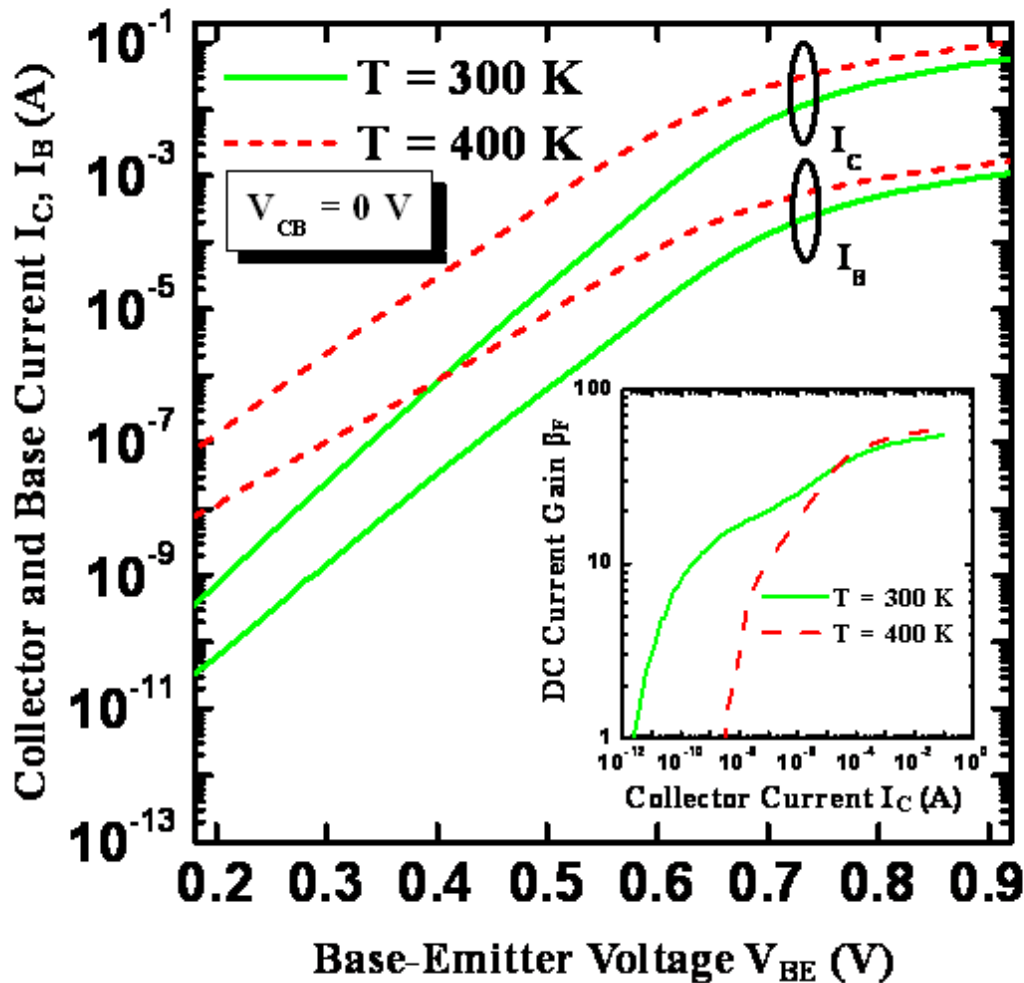


在本文中, 吾人研製一新穎具有步階式砷化銮鋁鎵集極層之磷化銮/砷化銮鎵雙異質界面雙極性電晶體。此元件結構之特徵主要係於基極層與集極層間導入一由四元化合物砷化銮鋁鎵材料所構成之步階式集極層結構, 使基-集極界面位障尖峰減緩; 再者, 此四元化合物砷化銮鋁鎵所構成之步階式集極層結構係由不同大小能隙之複數步階層所組合而成, 而此複數步階層之排列係自基極層往集極層方向逐漸增加其能隙值, 且些複數步階層之能隙係值係大於基極層之能隙值且小於集極層之能隙值, 因此, 較佳之崩潰特性是可被預期的。

圖一為在熱平衡時, 基-集極界面之傳統雙異質界面雙極性電晶體與所研究之步階式砷化銮鋁鎵集極層結構模擬之能帶圖。在集極空乏區域內分散之基-集極能障甚至在零偏壓時得以與足夠動能之電子越過導電帶尖峰。而靠近P⁺基極層之砷化銮鎵背置層的存在, 有利於減少載子阻擋效應。基本上, 此層延伸了在基-集極空間電荷區中可以實質阻擋電子通過集極層之第一層導電帶的尖峰。此外, 當在基-集異質界面中插入步階式砷化銮鋁鎵集極層, 最初在基-集界面中高且寬之尖峰可被分成一些低且狹窄之尖峰。因此, 電子收集率可獲得改進。



圖一、在熱平衡時在基-集界面之傳統雙異質界面雙極性電晶體與所研究之砷化銻鋁鎵集極層結構模擬之能帶圖。

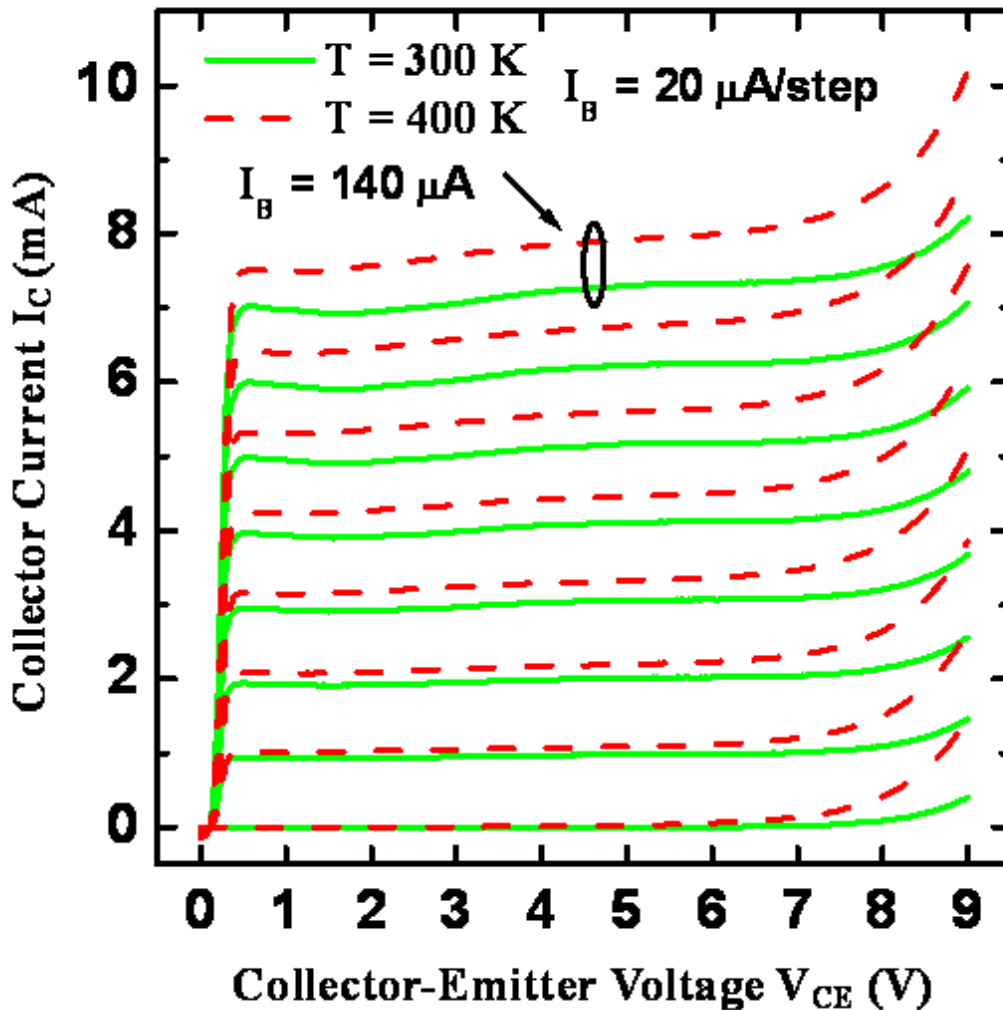


圖二、所研究之元件在300及400 K時所量測之Gummel plots。插圖顯示在300及400 K時直流電流增益與集極電流 I_C 之關係圖。

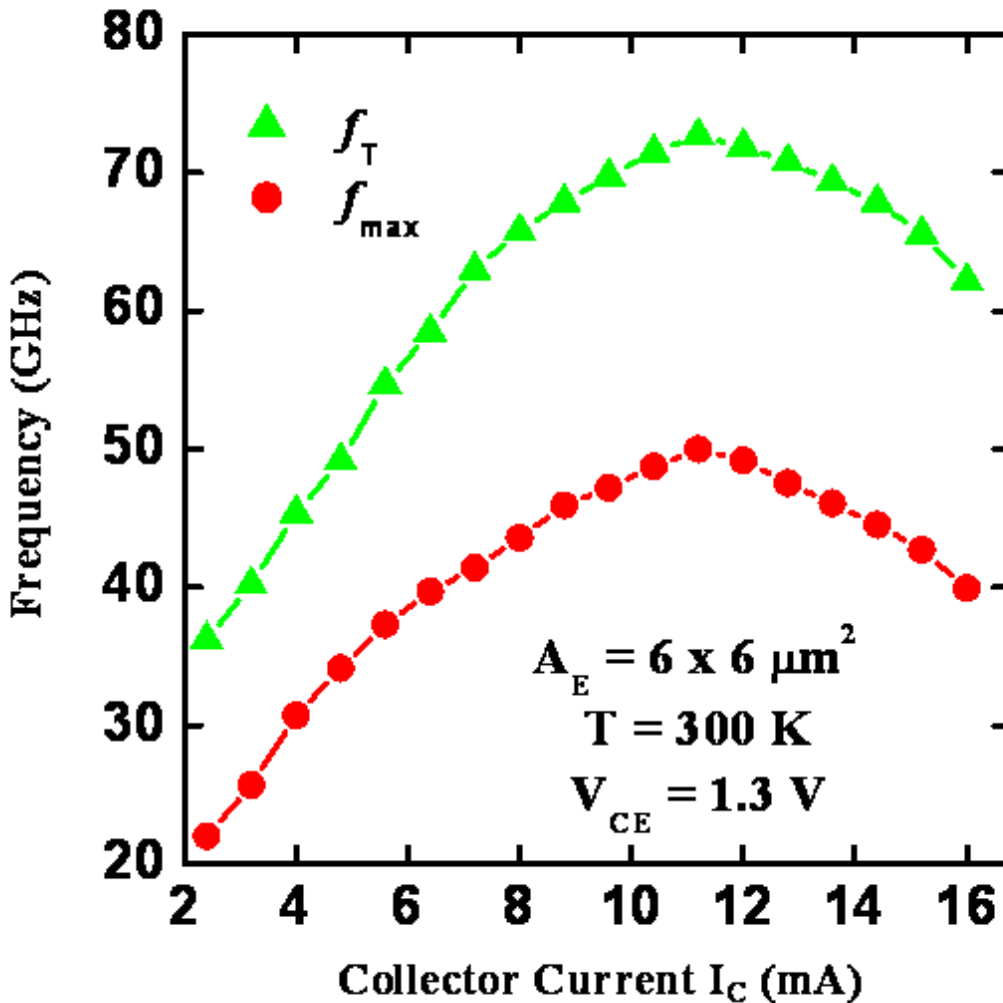
圖二為所研究之元件在300及400 K時所量測之Gummel plots。而集(基)極電流之理想因子在300及400 K時分別為1.15 (1.27) 與1.1 (1.22)。理想因子主要是討論在射-基與基-集界面內導電帶中之載子傳輸。1-KT之集極電流指出傳導載子之傳輸主要是由熱離子發射與擴散機制所主導。略大於一之集極電流之理想因子主要歸因於穿遂電流流過基-射與基-集異質界面。此外，集極電流之理想因子隨著溫度增加而減少意指在高溫下熱離子發射之實質重要性。接近一的基極電流之理想因子，特別在高溫時呈現本體復合電流主宰整個基極電流。由以上之敘述清楚發現，良好之理想因子特性主要係由於步階式集極結構之使用。此外，所研究之元件存在低的偏移電壓(98.4 V)與飽和電壓(0.33 V)。另一方面，插圖顯示在300及400 K，時直流電流增益與集極電流 I_C 之關係圖，其集-基電壓固定在零伏。由圖可知，所研究之元件可運作在極廣闊之集極電流區間。操作區間超過11個數量級($I_C = 10^{-12}$ A至 $I_C = 10^{-1}$ A)。由實驗得知，在300 K時甚至操作在極低之電流 $I_C = 2.3$ pA所研製之元件的電流增益大於1。在極低之電流區間所獲得之 β_F 主要歸因於使用步階式砷化銻鋁鎵集極層。步階式砷化銻鋁鎵集極層能有效地降低基-集異質界面之位障尖峰。此外，在400 K時當集極電流增加至 $I_C = 10^{-4}$ A時，較大之直流電流增益可被發現。這主要歸因於隨著溫度增加之高熱漏電流，這對集極電流有很大的貢獻且導致較高之直流電流增益。

圖三說明所研究之元件在300及400 K時所量測之共射極輸出電流-電壓特性。明顯地，此元件呈現高的共射極崩潰電壓及低的輸出電導。當溫度增加時，在集極區裡之載子獲得更多的熱能，因此，增加了衝擊離

子化之可能性。所以，熱所生之貢獻對集極電流的增加產生了關鍵性的作用。實驗上，於集極厚度400 nm下元件之共射極崩潰電壓在集極電流達到100微安時可高達8.05伏。此外，所研究之元件呈現了一低偏移與飽和電壓，導致較大之電壓操作範圍。當溫度增加時，在集極層裡由於正溫度係數之衝擊離子化係數，引起集極電流上升而導致較低之崩潰電壓。此外，所研究之元件甚至在溫度至400 K時呈現相似之放大現象。這些優良之特性再次指出所研究之元件在實際電路應用之潛力。



圖三、所研究之元件在300及400 K 時所量測之共射極輸出電流-電壓特性。



圖四、單位增益截止頻率 f_T 與最大振盪頻率 f_{max} 對集極電流之關係圖。

圖四說明單位增益截止頻率 f_T 與最大振盪頻率 f_{max} 對集極電流之關係圖。對於射極面積為 $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ 微米平方之元件而言，所研究之元件 f_T 與 f_{max} 峰值為 72.7 與 50 GHz。明顯地，由於步階式砷化銻鋁鎵集極層之使用，所研製之元件存在較佳之微波特性。 f_T 與 f_{max} 在高集極電流區間下降之現象係由 Kirk 效應與串聯電阻效應所引起。

結論，本文探討了具有步階式砷化銻鋁鎵集極層之磷化銻/砷化銻鋁鎵雙異質界面雙極性電晶體之直流及微波特性。藉由在基-集異質界面使用步階式砷化銻鋁鎵集極層之結構，不受歡迎之載子阻擋效應可被消除。實驗上，操作區間可超過 11 個數量級 ($I_C = 10^{-12} \text{ A}$ 至 $I_C = 10^{-1} \text{ A}$)。此外，所研製之元件甚至在高溫時仍呈現相對較高之共射極崩潰電壓及低的輸出電導。對所研製之元件而言，良好之微波特性 f_T (72.7 GHz) 與 f_{max} (50 GHz) 也已獲得。

參考文獻：

- [1] J. Y. Chen, D. F. Guo, S. Y. Cheng, K. M. Lee, C. Y. Chen, H. M. Chuang, S. Y. Fu, and W. C. Liu, "A new InP-InGaAs HBT with a superlattice collector structure," IEEE Electron Device Lett., vol. 25, no. 5, pp. 244–246, May 2004.
- [2] W. K. Huang, S. C. Huang, H. W. Chung, Y. M. Hsin, J. W. Shi, Y. C. Kao, and J. M. Kuo, "37-GHz

bandwidth monolithically integrated InP HBT/evanescently coupled photodiode,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 18, no. 12, pp. 1323–1325, Jun. 2006.

[3] J. H. Tsai and Y. C. Kang, “DC performance of InP/InGaAs p-n-p heterostructure-emitter bipolar transistor,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 53, no. 5, pp. 1265–1268, May 2006.

[4] N. Parthasarathy, Z. Griffith, C. Kadow, U. Singiseti, M. J. W. Rodwell, X. M. Fang, D. Loubychev, Y. Wu, J. M. Fastenau, and A. W. K. Liu, “Collector–pedestal InGaAs/InP DHBTs fabricated in a single-growth, triple-implant process,” IEEE Electron Device Lett., vol. 27, no. 5, pp. 313–316, May 2006.

[5] A. Feygenson, D. Ritter, R. A. Hamm, P. R. Smith, P. K. Montgomery, R. D. Yadvish, H. Temkin, and M. B. Panish, “InGaAs/InP composite collector heterostructure bipolar transistors,” Electron. Lett., vol. 28, no. 7, pp. 607–609, Mar. 1992.

Copyright 2009 National Cheng Kung University