

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

異質介面電晶體之熱穩定性研究(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2215-E-009-017-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學電子工程學系

計畫主持人：李建平

計畫參與人員：廖志豪、管建葳

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 9 月 24 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

異質介面電晶體之熱穩定性研究(2/2)

Thermal stability of heterojunction bipolar transistors

計畫編號：NSC 91-2215-E-009-017

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：李建平教授 國立交通大學電子工程學系

一、中文摘要

本報告總結本實驗室今年在「異質介面電晶體之熱穩定性研究」的研究成果，我們研究重點是利用異質介面電晶體對熱之敏感特性，就元件物理的分析循序地建立起直流電性與溫度的模型，再經由數學上代數簡化，發展出一套變溫的參數粹取方式，能夠準確粹取異質介面電晶體的參數，包括導電帶不連續能障、價電帶不連續能障、基極電子漂移速度與電子等效質量。

最後，我們比較變溫實驗量測之數據與模型模擬，結果是非常令人滿意的，研究在變溫下元件直流電性行為，我們相信本論文研究能提供檢視異質界面雙載子電晶體特性以達到元件最佳效能。

關鍵詞：熱穩定性、溫度敏感性、參數粹取

Abstract

This report summarizes the major results obtained from the first year program

of the “Thermal stability of heterojunction bipolar transistors”. The purpose of this research is mainly to build up the HBTs’ model by analysis of device physics and to develop a new extraction method for device parameters. We could accurately extract important parameters for DC operation, such as conduction band energy discontinuity, valence band energy discontinuity, electron mobility in base, and electron effective mass of emitter material.

Finally, the results of this model were also verified by the comparison with the experimental measurement data and the simulation results. Excellent agreement was obtained. From the research of HBTs’ DC behavior under variant temperature, we believe this report can offer a method to qualify the fundamental properties of HBTs for different materials to achieve the optimum performance.

Keywords: Thermal Stability, Temperature sensitivity, Parameters extraction

二、計畫緣由與目的

異質介面電晶體 (HBT, Heterojunction Bipolar Transistor) 因其高功率驅動力、高直流轉換效率及高線性特性，使其十分適於製作功率放大器 (power amplifier)，且由於其高頻特性良好，故在高頻無線通訊上的運用最為廣泛。

由於操作溫度變化將會嚴重影響了異質介面電晶體的特性，因此，研究異質介面電晶體對熱的穩定性是刻不容緩的。而不同半導體材料介面之電晶體對溫度的關係在電性行為上亦有非常明顯的不同，本報告將比較相異半導體材料介面對溫度的敏感度(砷化鋁鎵/砷化鎵電晶體在溫度升高時，電流增益迅速下降，相反的，磷化銦鎵/砷化鎵電晶體則相對地變化不大)。主要的原因在於電晶體元件之異質介面處半導體材料的改變而具有不同能帶寬，形成了導電帶不連續能差與價電帶不連續能差，若價電帶不連續能差低將使得反向入射基極電流項相對的重要，此電流項對溫度變化是相當敏感，造成基極電流隨著溫度上升而急遽升高，這將使得電流增益的大幅下降，因此，這就是為什麼磷化銦鎵/砷化鎵電晶體比砷化鋁鎵/砷化鎵電晶體具有較高的溫度穩定性。

由上述的介紹，我們知道異質介面電晶體對溫度之敏感性與其異質介面的條件有著密切的關係，將會嚴重影響整體電路的操作和元件本身的可靠度，故我們的目的就是建立一個 HBTs 的變溫模型與異質介面的參數粹取，並依此模型檢視設計最佳異質介面條件，以達到元件最佳效能。

三、結果與討論

單一異質介面電晶體中，其射極和基極因著半導體材料的改變而存在著一個異質介面，所謂的異質介面也就是其雜質的改變在接面上為非同態的形式；因此，兩個不同半導體之能量帶寬度差(ΔE_g)在界面處造成導電帶之不連續能差 ΔE_C 與價電帶之不連續能差 ΔE_V 。

在建立集極直流電流的過程中，我們將採用熱發射理論來描述此介面之電性物理機制。

$$J_{th,E \rightarrow B} = A^* \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_W}{kT}\right)$$

其中，

$$\Delta E_W \approx E_{g,GaAs} + \Delta E_C - \Phi_p - V_{BE}$$

$$J_{th,E \rightarrow B} = A^* \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{E_{g,GaAs} + \Delta E_C - \Phi_p - V_{BE}}{kT}\right)$$

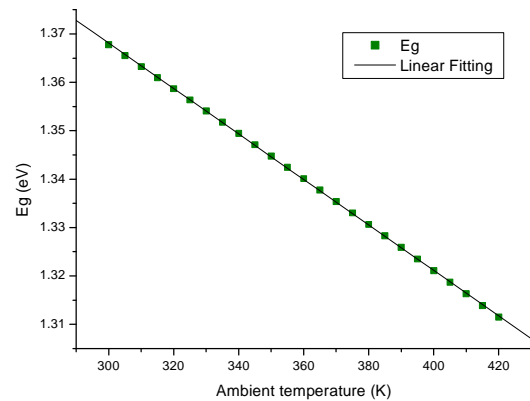
上式中的常數 A^* 為有效 Richardson 常數，在本報告中介紹之異質介面電晶體中的基極區域皆為 p-type 重度摻雜 ($\sim 4 \times 10^{19}$) 之砷化鎵半導體材料，所以基極將發生能帶減縮效應 (Energy Bandgap Narrowing effect)，且我們知道砷化鎵能帶與溫度之間的關係為非線性函數之曲線^[1]，因此，在量測溫度範圍內，我們將砷化鎵能帶對溫度的變化簡化成線性的關係，這個簡化的步驟將有助於物理參數粹取。

下圖為參考文獻^[1]中砷化鎵能帶對溫度的關係，實線為非線性關係與實線為線性近似關係，由圖中可看出在此一範圍中能帶的確是隨溫度改變近似線性的變化，因此，砷化鎵能帶寬將為下式之關係式。

$$E_{g,GaAs} = E_{g0,GaAs} - \Delta E_{g,narrow} \approx r - s \cdot T$$

其中，

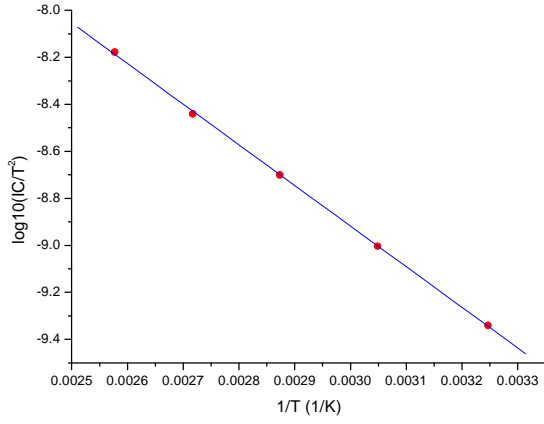
$$r = 1.5078 \text{ eV}, \quad s = 4.6625e-4 \text{ eV/K}$$



由上述分析，下式集極電流型式是令人興奮的結果。

$$I_C = I_{C0} \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\Delta E_C}{kT}} \cdot e^{-\frac{E_{g,GaAs}}{kT}} \cdot e^{-\frac{V_{BE}}{kT}}$$

我們可將上式兩邊皆除上溫度的平方再取對數運算，由式子中可知，其取完對數後，對溫度倒數的關係應是線性的；由斜率可粹取出導電帶不連續能差而截距可粹取出射極電子的等效質量。

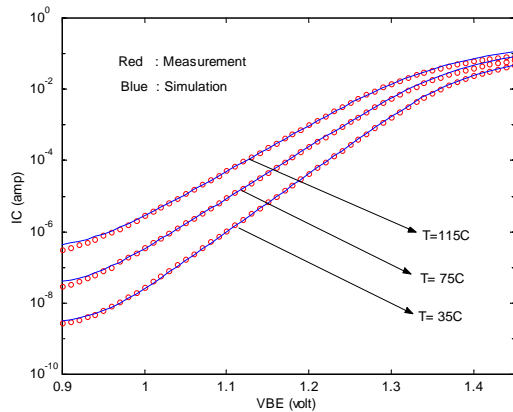


上圖 GCT 磷化銦鎵/砷化鎵異質介面電晶體(Ae=2.8i m*12i m)，由圖中的顯示，正如我們模型所預測的，實驗量測結果非常完美的落在所分析的直線上，且利用變溫方式所粹取出之導電帶不連續能差與文獻記載數值是非常接近($m_n^* = 0.099 m_0$ ， $\Delta E_C = 0.03 \sim 0.22 eV$)；而配合本篇報告之後續，我們將由基極電流部份找出的價電帶之不連續能差來綜合判斷，經由粹取的結果綜合分析此異質介面的晶格之排列為 partial order。

$$m_{n,InGaP}^* = 0.11 m_0$$

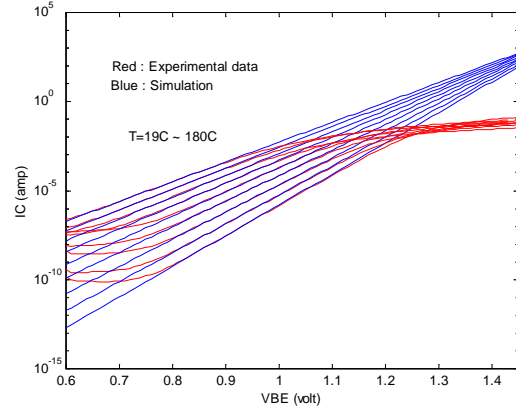
$$\Delta E_C = 35.2 \text{ meV}$$

下圖為 GCT 磷化銦鎵/砷化鎵異質介面電晶體(Ae=2.8 μ m*12 μ m)，實驗量測溫度範圍是 Ta=30°C~130°C，圖中紅色實線為實驗上量測之數據，藍色實線為集極電流模型所模擬出之變溫電性，變溫模型能準確模擬電性。



下圖為 VPEC 磷化銦鎵/砷化鎵異質介面電晶體(Ae=75 μ m*75 μ m)，實驗量測溫度範圍是 Ta=19°C~180°C，圖中藍色實

線為集極電流模型所模擬出之變溫電性(圖中模擬部份未加入漏電流 leakage current 與高電流時射極電阻之影響)。



基極本質電子電洞復合電流項(bulk recombination base current)主要為 SRH recombination、Auger recombination 和 Radiation recombination 電子電洞復合機制，且三種復合機制是同時發生的，因此，考慮三者的電子電洞之復合速率為個別復合速率之總合，可定義出基極區域中等效少數載子復合生命時間常數，而等效少數載子復合生命時間常數強烈相關於基極摻雜的濃度。

$$I_{B,bulk} = I_{B0,bulk} \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\Delta E_C}{kT}} \cdot e^{-\frac{E_{g,GaAs}}{kT}} \cdot e^{-\frac{V_{BE}}{kT}}$$

反向入射基極電流項(back injection base current)的產生為基極之電洞克服價電帶不連續能差而進入射極，而形成之基極電流項，其中主要的物理形式為熱發射機制。

$$I_{B,backinjection} = I_{B0,backinjection} \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{E_{g0,GaAs} + \Delta E_V}{kT}} \cdot e^{-\frac{V_{BE}}{kT}}$$

基極-射極間之空乏區電子電洞復合基極電流項(space charge recombination base current)，介面之空乏區分為兩個區域發生，分別為在射極部份區域(emitter side of depletion)及在基極部份區域(base side of depletion)，電晶體操作在主動順偏壓下及基極為重度摻雜的情況下，其基極部份區域幾乎完全被補償掉，只需分析在射極區域部份。假設在此區域中，SRH recombination 為主要的電子電洞復合機制

且近似其整個空乏區之區域 SRH 復合速率為最大值。

$$U_{SRH,E} = \frac{p \cdot n - n_i^2}{\tau_{SRH} \cdot (n + p + 2 \cdot n_i)} \approx \frac{p \cdot n}{\tau_{SRH} \cdot n}$$

$$= \frac{n_i \cdot \ln_{GaP} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{2 \cdot kT}\right)}{\tau_{SRH}} = \frac{\sqrt{N_C \cdot N_V} \cdot \exp\left(-\frac{E_{g,InGaP}}{2 \cdot kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{2 \cdot kT}\right)}{\tau_{SRH}}$$

正如我們前述的，電子電洞復合機制發生於射極區域部份，基極之電洞依然需克服價電帶不連續能障而進入射極產生基極電流項，因此，空乏區復合電流項中考慮這項因子。

$$I_{B,SCR} = I_{B0,SCR} \cdot e^{-\frac{E_{g,InGaP} - \Delta E_V}{2 \cdot kT}} \cdot e^{-\frac{V_{BE}}{2 \cdot kT}}$$

最後，我們經循序地分析而得到完整電流與溫度的型式。總合上述分析結果，經代數整理後得下式，我們由下式中可看出，電流增益是同時相關於溫度與集極電流密度，因此，在實驗上，在固定之集極電流情況下，我們在每個操作溫度下量測出該工作點之電流增益值，藉由量測之數據可粹取出物理參數。

$$S^{-1} = P_1 + P_2 \cdot e^{\frac{\Delta E_C}{kT}} \cdot e^{-\frac{P_3}{T}} + P_4 \cdot \frac{1}{T \cdot \sqrt{I_C}} \cdot e^{-\frac{3 \cdot P_3}{2 \cdot T}}$$

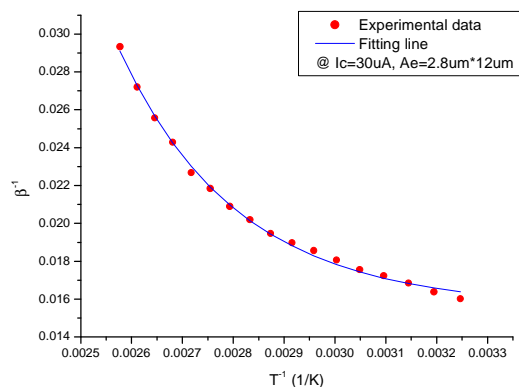
$$= P_1 + P_2 \cdot e^{\frac{\Delta E_C}{k} \cdot \frac{1}{T}} \cdot e^{-\frac{P_3}{T}} + P_4 \cdot \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{3 \cdot P_3}{2 \cdot T}}$$

其中，

$$P_1 = \frac{I_{B0,bulk}}{I_{C0}}, P_2 = \frac{I_{B0,backinjection}}{I_{C0} \cdot e^{S/k}}, P_3 = \frac{\Delta E_V}{k}$$

$$P_4 = \frac{I_{B0,SCR}}{\sqrt{I_{C0} \cdot I_C}}$$

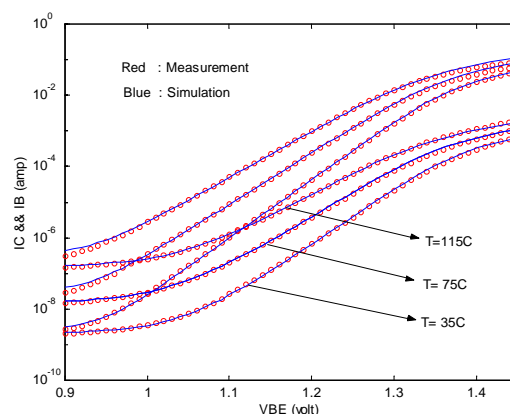
上式中，參數 P₂ 可由價電帶等效電洞質量決定之，計算結果於下方，因此，上式實為三個變數的式子，利用最小均方根誤差法(Least Square Error)可疊代得出一組最佳近似解，圖中實線為上式之最佳解 Fitted 的曲線，由上式所得到之 P 參數為作小均方誤差解；因此，可由 P₁、P₃ 和 P₄，我們可粹取出對映之物理參數值，下圖為 P 參數的粹取圖，圖中實點為實驗量測數據，而實線為 fitting 的曲線。



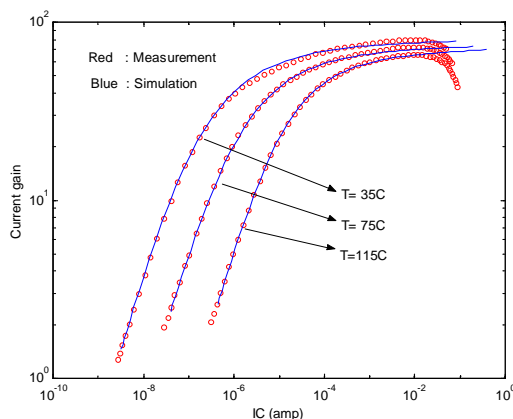
$$\Delta E_V = 363.3 \text{ meV}$$

$$\mu_n = 2511.5 \text{ (cm}^2/\text{volt-sec)}, T = 300^\circ\text{K}$$

此種粹取方式所粹取出之基極電子漂移係數與參考文獻 [4][5] 中實驗量測重度摻雜 P type 砷化鎵半導體之電子漂移係數據相近。

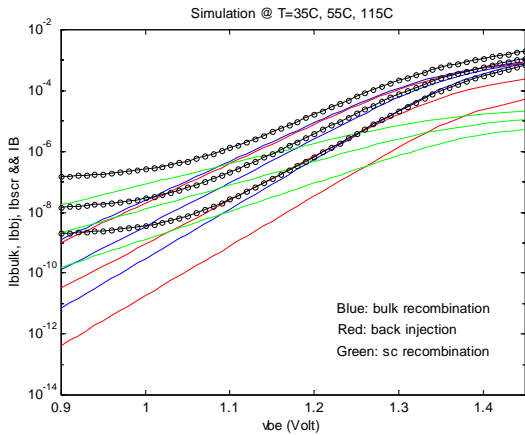


上圖射極面積為 2.8 μm*12 μm (GCT 磷化銦鎵/砷化鎵異質介面電晶體)之 Gummel plot，利用已建立起之變溫模型模擬電性與實驗量測所得數據之比較，不同溫度操作下均能準確模擬出電性改變，下圖為集極電流與電流增益在變溫下的模型模擬與實驗量測之比較。



在我們已建立之變溫模型中，本報告

前面論述已介紹，基極電流主要分為三部份組成：基極本質電子電洞復合電流、反向入射基極電流與基極-射極間之空乏區電子電洞復合基極電流，下圖為 $2.8 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ，GCT 磷化銦鎵/砷化鎵異質介面電晶體，其對溫度改變有著不同的敏感性，可利用已粹取之異質介面電晶體的參數來模擬出溫度改變時每個基極電流分量的變化之比例。



晶體，粹取出之參數不受元件之幾何面積、元件之縱向結構及半導體之異質介面材料不同所影響，我們就這幾種狀況深入作探討。

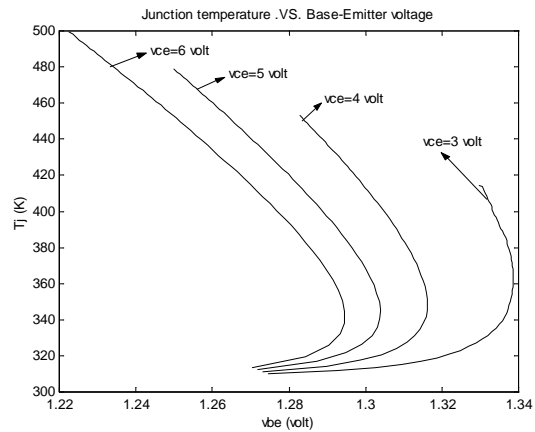
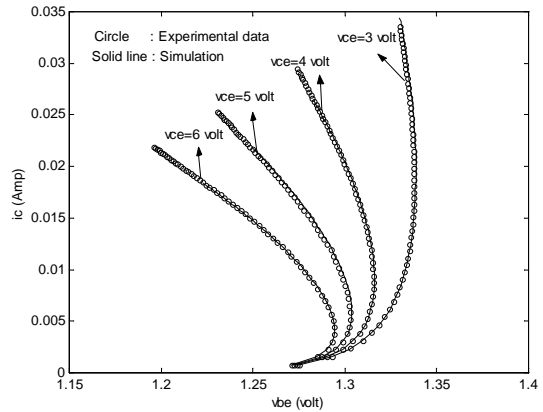
由最後的表格(Table 1)，我們固定元件之縱向結構而改變幾何面積和固定幾何面積而改變縱向結構，證實利用此變溫方式所粹取出之能帶差與基極中電子漂移係數不受影響，變溫粹取方法所粹取出之數值是非常高的可靠性，且我們亦可利用已建立之模型正確計算出不同結構元件之基極厚度。最後，改變異質介面的半導體材料(VPEC 砷化鋁鎵(x=0.28)/砷化鎵電晶體)，我們發現所粹取出之能帶差($\sim 0.340\text{eV}$)與參考文獻($\sim 0.349\text{eV}$)非常接近，且基極摻雜濃度與磷化銦鎵/砷化鎵異質介面電晶體相同，正如我們所預測，所粹取出之電子漂移係數亦幾乎相同，這是十分令人滿意的結果。

$$P_1 = \frac{I_{B0, bulk}}{I_{CO}} = \frac{f_t}{f_n}$$

$$f_t = \frac{W_{base}^2}{2 \cdot D_n} \rightarrow W_{base} \propto \sqrt{P_1}$$

最後，下圖為改變集極-射極電壓由 3 伏~6 伏之集極電流實驗量測與 Fitting 之曲

線，藉由我們在本章已建立之直流變溫模型可 Fitting 實驗量測數據可模擬出接面溫度右上方圖，而圖中的曲線為模擬出之不同工作點的接面溫度。



熱導係數會因溫度的變化而改變，而是相關於功率散逸與溫度之非線性函數 [2][3]，如下之關係式， k_{th0} 為在室溫下 thermal conductivity 和 b 為 fitting parameter。

$$T_j = T_a \cdot \left[1 - \frac{(b-1)}{T_a} \cdot (T_j - T_a) \right]^{-\frac{1}{b-1}}$$

$$k_{th}(T_j) = k_{th0} \cdot \left(\frac{T_j}{T_a} \right)^{-b}$$

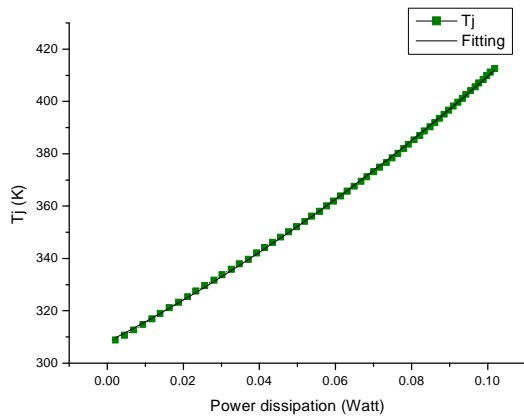
而由我們已建立之變溫模型可 fitting 接面溫度與功率散逸之關係為下圖，可證實熱阻的確並非為常數值，因此，熱阻可近似為下式的二次函數關係式。

$$T_j = T_a + (R_{th} \cdot P_{diss} + R_{th}' \cdot P_{diss}^2)$$

其中，

R_{th} : Thermal resistance

R_{th}^i : Second order thermal resistance



四、計畫成果自評

在本研究中，我們充份地利用了異質介面電晶體對溫度改變的電性行為，成功地建立起異質介面電晶體的變溫模型，並且發展出一套準確的參數粹取方式，利用此變溫所粹取出之物理參數對於設計一個高效能之電晶體元件是非常重要且關鍵的，因此，我們的研究亦能提供檢視元件

異質介面特性的重要依據。

異質介面電晶體擁有許多優越於傳統矽電晶體的特性有待應用，相信本研究對於日後元件設計者改善元件特性有很大的幫助。

五、參考文獻

- [1] *S. M. Sze*, Physics of semiconductor Devices, New York : Wiley, 1981
- [2] *C.-H. Liao, C.-P. Lee, N. L. Wang, and B. Lin*, "Optimum design for a thermally stable multifinger power transistor," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 49, pp. 902–908, May 2002.
- [3] *C.-H. Liao, C.-P. Lee*, "Optimum Design for a Thermally Stable Multifinger Power Transistor With Temperature-Dependent Thermal Conductivity," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 49, pp. 909–915, May 2
- [4] *LOWNEY, J. R., and BENNETT, H. S.*, "Majority and minority electron and hole mobilities in heavily doped GaAs", *J. Appl. Phys.*, 1991, 69, (10), pp. 7102-7110
- [5] *Lye, B.C.; Yow, H.K.; Houston, P.A.; Button, C.C.*, "Electron mobility enhancement in heavily doped GaAs:C heterojunction bipolar transistors", *Electronics Letters*, Volume: 32 Issue: 25, 5 Dec 1996, Page(s): 2351 -2352

	Ec (eV)	Ev (eV)	Eg (eV)	$\mu_{n,base}$ (cm ² /s)
<i>InGaP</i> HBTs (Ae=2 μ m*4 μ m, GCT analog devices)	0.029	0.410	0.439	2739.2
<i>InGaP</i> HBTs (Ae=2 μ m*20 μ m, GCT analog devices)	0.032	0.391	0.423	2834.8
<i>InGaP</i> HBTs (Ae=2 μ m*4 μ m, GCT digital devices)	0.018	0.414	0.432	$W_{base}=800\text{\AA}$
<i>Al_{0.28}Ga_{0.72}As</i> grading HBTs (Ae=75 μ m*75 μ m, VPEC)	0.037	0.303	0.340	2680.1

Table 1

Reference data : *InGaP/GaAs* Eg=0.43~0.46 eV
Al_{0.28}Ga_{0.72}As/GaAs Eg=0.349 eV

