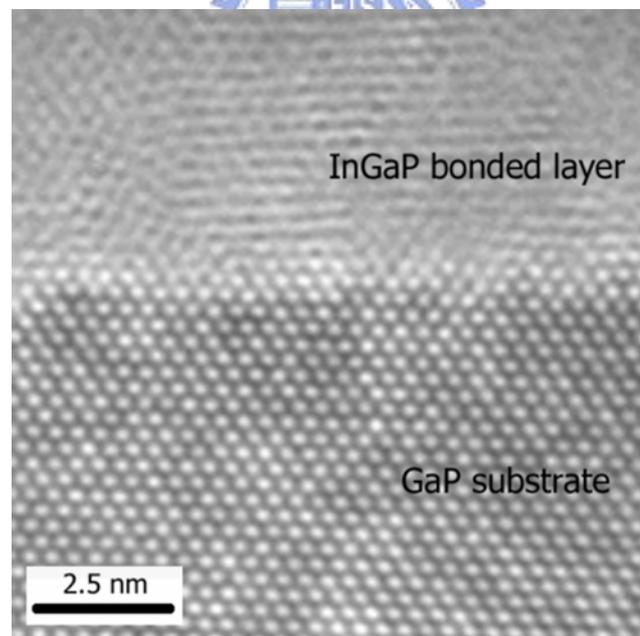


(a)



(b)

圖 4.18 (a)具直線通道圖形的磷化銦鎵/磷化鎵晶圓接合介面穿透電子顯微鏡影像; (b)具直線通道圖形的磷化銦鎵/磷化鎵晶圓接合介面高解析度穿透電子顯微鏡影像

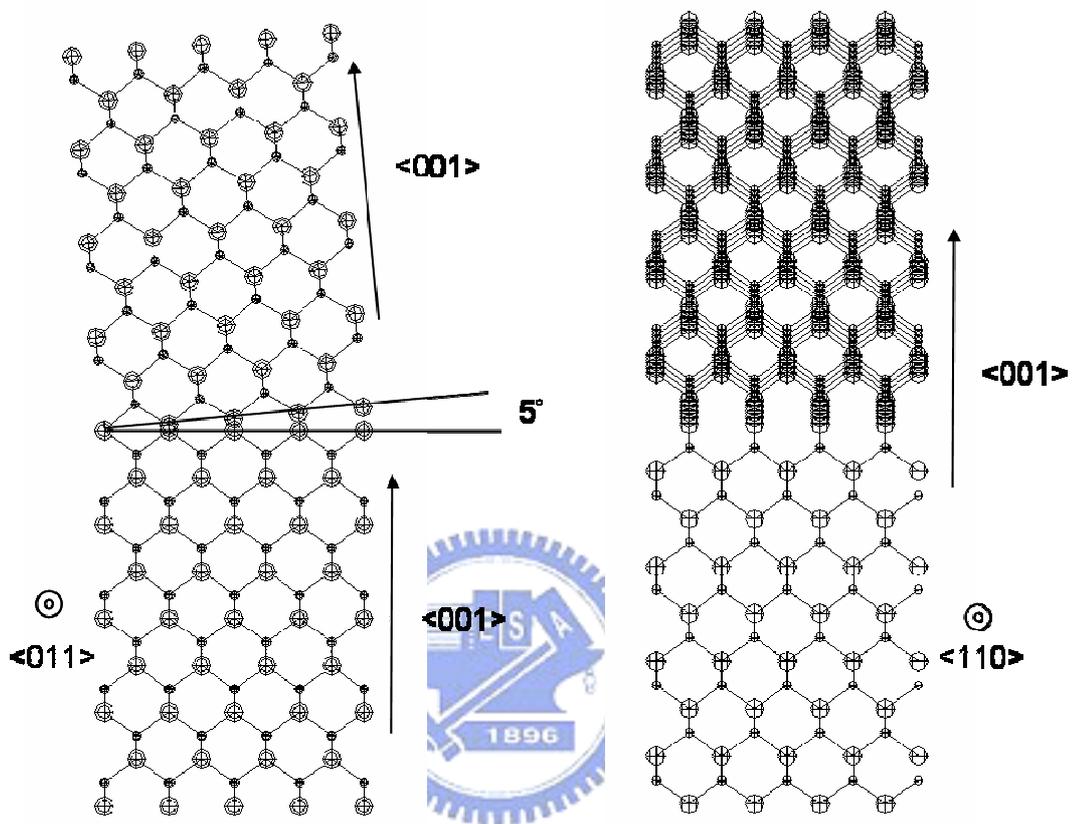


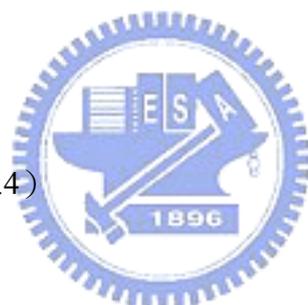
圖 4.19 具有 5° 表面角度差的磷化銦鎵/磷化鎵晶圓接合介面示意圖

4.4.3. 殘留應力鑑定－光子激光(Photo Luminescence; PL)能譜圖

此實驗是分別量測轉移前後磷化銦鎵的 PL 能譜，觀察其轉移前後 PL 的峰值的變化量，圖 4.20 就是磷化銦鎵轉移前後的 PL 能譜圖，轉移之前在砷化鎵晶片上的磷化銦鎵磊晶層，其峰值波長為 643.4 nm，然而轉移後到磷化鎵的磷化銦鎵轉移層 PL 的峰值波長位移 (Peak wavelength shift) 非常的小，大約都小於 1 nm 以下，當然，僅僅知道其受應力的屬性是不夠的，所以，將其應力的量化才是重要的，圖 4.21 指出了磷化銦鎵受拉伸及壓縮應力能隙與應變關係變化，圖中的 ΔE_{lh} (lh: light hole) 是表示當磷化銦鎵受壓應縮力時所造成的能隙改變量， ΔE_{hh} (hh: heavy hole) 當然就是表示當磷化銦鎵受拉伸應力時所造成的能隙改變量，這圖是經由理論運算和實驗驗證而得到，〔26〕利用此圖形可以經由能隙的改變量求得應變量。

經由圖 4.21 可以推算其應力：

$$\begin{aligned}\Delta E &= -3 \times 10^{-3} \text{ eV} \\ \Rightarrow \varepsilon &= -4.27 \times 10^{-4}\end{aligned} \quad (4.4)$$



ΔE ：能量偏移量 eV

ε ：應變量

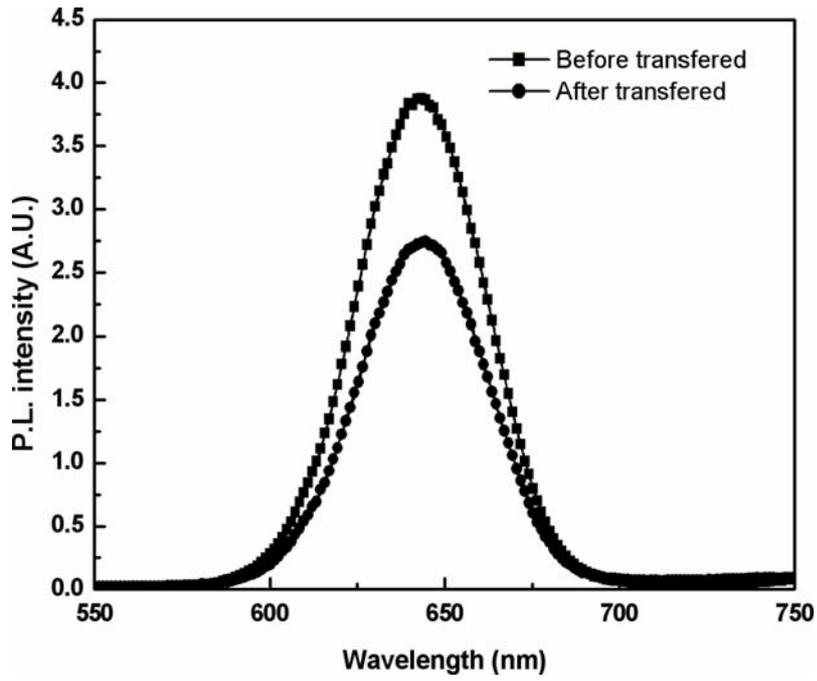


圖 4.20 磷化銦鎵層轉移前後的 PL 能譜圖

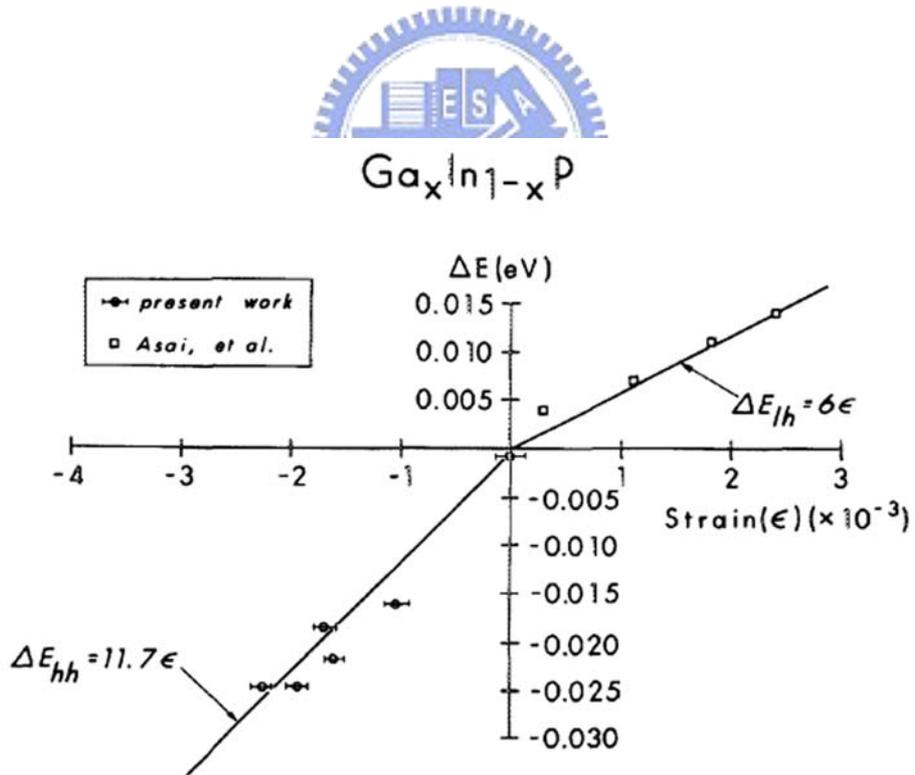
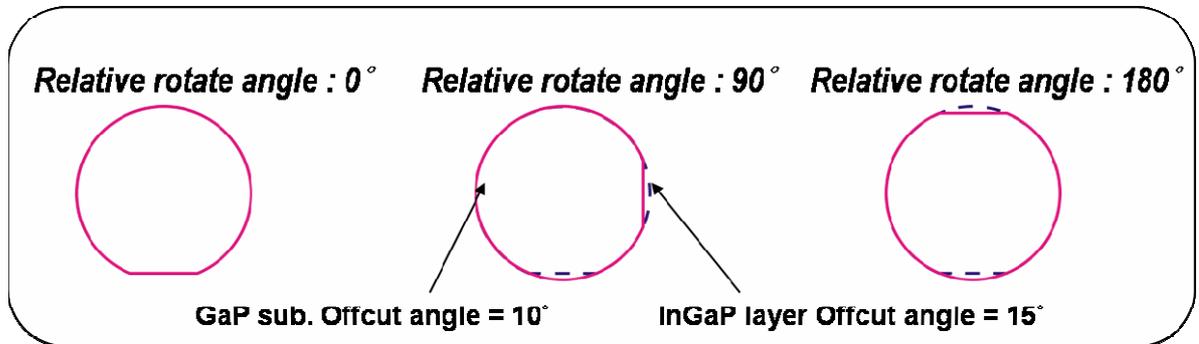


圖 4.21 磷化銦鎵受拉伸及壓縮應力能隙與應變的變化 [26]

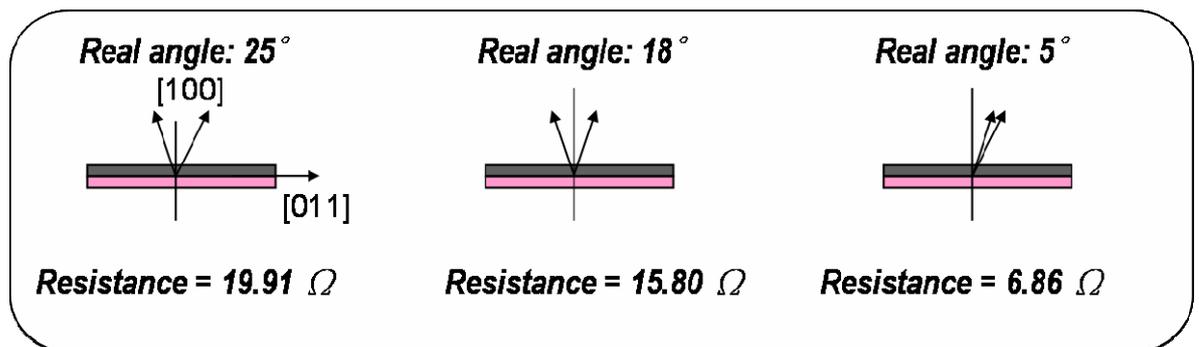
經由經驗圖〔32〕推得轉移層的應力小於 5×10^8 dyne/cm²，這是一個還能容許的值。然而，PL 光譜另一個重要的可以研究的參數為半高寬 (Full width half maximum; FWHM)，轉移前後的半高寬值大約都是 36.1 nm 左右，其差異不到 0.5 nm，因此，轉移後的磷化銦鎵結晶品質未改變許多，強度上的差異推測是由轉移工作會將原來磷化銦鎵的磊晶底部往上翻，因此與原本的磷化銦鎵磊晶層的上下相反，造成 PL 的強度會有所差異。

4.4.4. 接合介面電阻分析

晶片在接合時的晶體方向的對準(晶片的相對旋轉角)，對電阻的改變是很顯著的，因此，旋轉角度的存在與否是很重要的，在這實驗中所使用的晶圓為磷化銦鎵(磊晶於砷化鎵晶片上)，磷化銦鎵的晶片表面方向是(100)+15°偏向(011)，另一方面，磷化鎵的晶片表面方向是(100)+10°偏向(011)，因此，以晶片(011)大平邊為基準的相對旋轉角(a) 0°，(b) 90°和 180°時，其向對應的真實角度差為(a) 25°，(b) 18°和 5°，如圖 4.22。圖 4.23 顯示異質接合介面(In_{0.5}Ga_{0.5}P/GaP)呈現的是線性歐姆行為(Ohmic behavior)，然而，介面電阻隨著其相對應的旋轉角度降低慢慢減少，以旋轉 180°的接合晶片組電阻最低。圖 4.22(b)指出接合旋轉角度以及對應的真實角度差，當其角度差為 5°時(相對旋轉角 180°)其電阻只有 6.86Ω，而當相對旋轉角為 90°時其接合後的角度差為 15.80Ω，最後，不具相對旋轉角度時兩晶片的相對角度差為 25°，此時的電阻值最大 19.91Ω，這實驗的結果與 Kish 等人〔33〕在異質接合介面(In_{0.5}Ga_{0.5}P/GaP)的結果相類似。在他們的實驗中，於 1000°C 接合後，發現要在接合介面獲得低電阻必須要有晶圓方向之晶體方向的對準，然而在本實驗中，低電阻的介面是需要的，所以，在晶圓接合時選擇的角度為 180°，也就是只有 5°的真實角度差。結果與第三章的結論相異，但是，這裡的實驗中是接合兩表面方向差異較大的兩晶片，才会有如此的差異。Kish 等人〔33〕實驗中表面方向差異對於介面電阻的影響是較大的，在他們的實驗中以兩具有不同表面方向的晶片執行接合，其結果也和這實驗有相同的趨勢。



(a)



(b)

圖 4.22 砷化鎵與磷化鎵晶片以(011)大平邊為基準的相對旋轉角為 (a) 0° , 90° 和 180° 時，其向對應的真實角度差為(b) 25° , 18° 和 5°

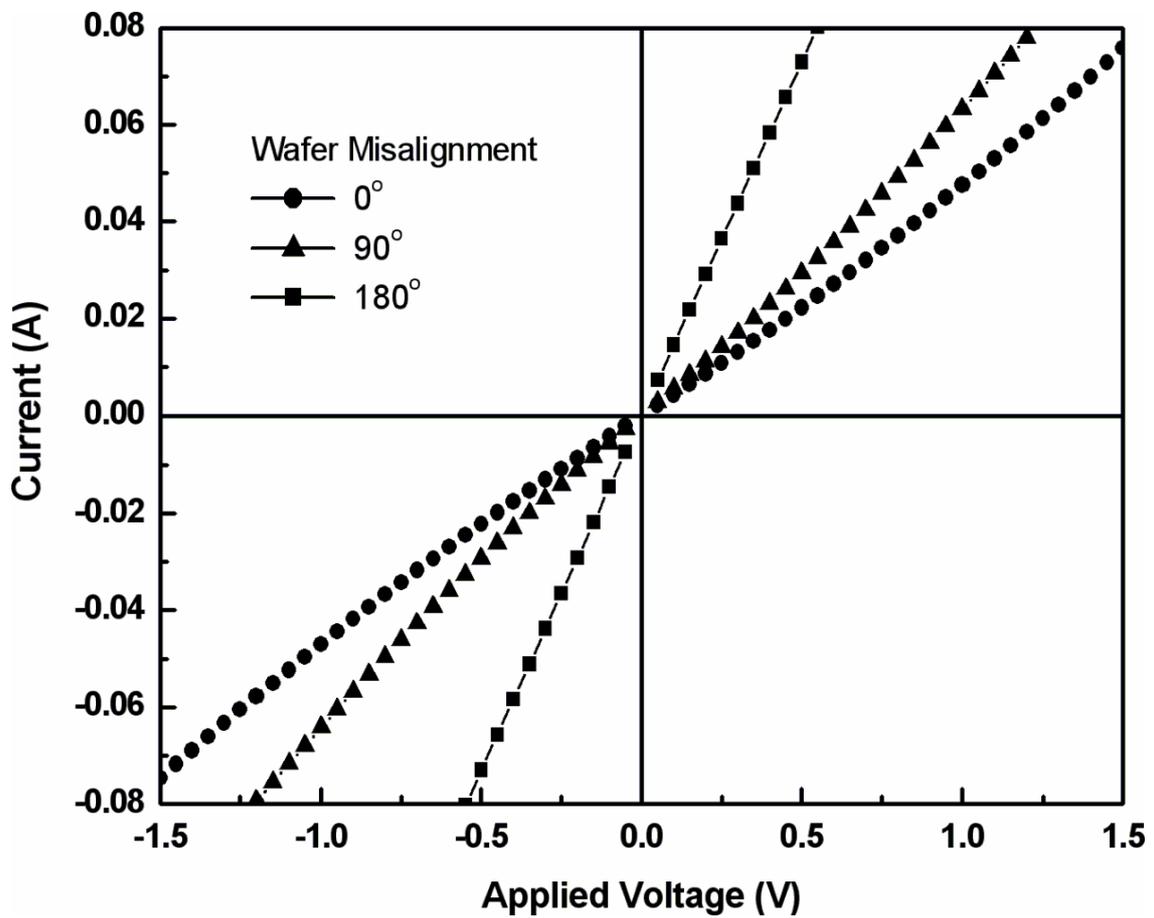


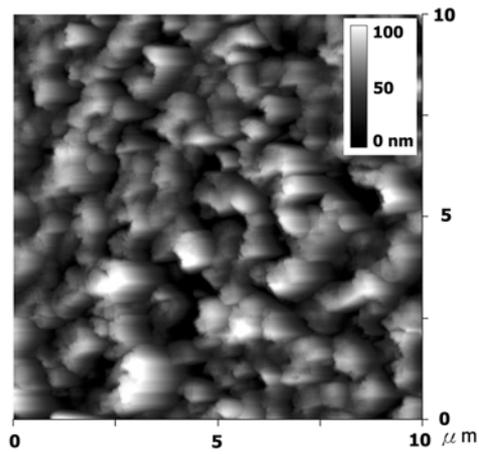
圖 4.23 磷化銦鎵/磷化鎵在不同旋轉角度執行接合的電壓電流特性

4.4.5. $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 異質磊晶層表面型態分析

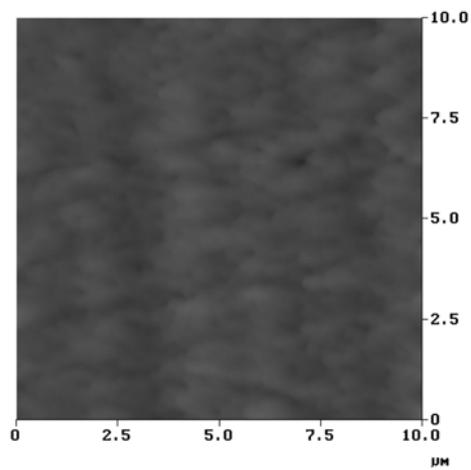
原子力顯微鏡 (Atomic force microscope; AFM) 在這實驗中將被使用來量測異質磊晶層表面狀況，異質磊晶層成長在磷化鎵晶格不匹配基材上，會出現許多不連續出現小的突起隆起物被觀察出，但是在直線圖案的磷化銦鎵基材和砷化鎵兩種基材上的異質磊晶層卻不見此現象(如圖4.24所示)，在表面粗糙度方均根值 (Root mean square; RMS) 磷化鎵、直線圖形磷化銦鎵和砷化鎵基材上分別為20.13 nm, 2.04 nm 和 0.22 nm，造成表面粗糙差異的主要因素為晶格常數的差異，異質磊晶層在砷化鎵基材是非常平坦的，主要因為兩者晶格完全相互匹配，相反的當異質磊晶層成長在磷化鎵基材時表面會非常的粗糙，原因是此基材與異質磊晶層有3.7%的晶格常數差異，晶格常數差異大的異質磊晶往往會造成應力，這些應力在磊晶過程中導致表面會特別粗糙，[34] 然而，在有線圖形磷化銦鎵基材上，表面粗糙度明顯的被改善，如圖4.24。

4.4.6. $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 異質磊晶層之缺陷觀察以及成分鑑定

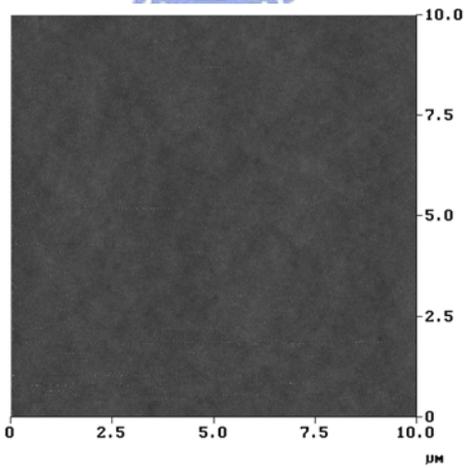
缺陷觀察是使用穿透式電子顯微鏡來執行，首先，觀察在砷化鎵上的異質磊晶層，圖 4.25(c)指出如預期的沒有缺陷在此基材的磊晶層上被發現，這是因為晶格相匹配的關係，因此，未有所謂的介面缺陷在其中被發現，另一方面在磷化鎵基材上，異質磊晶層中出現了許多的缺陷，這主要是因為晶格不匹配所產生的一些現象，如圖 4.25(a)，這些缺陷包括了：差排、疊差以及一些應力區，然而，若是將異質磊晶層成長在直線圖形的磷化銦鎵晶片，50 nm 的磷化銦鎵將缺陷密度大大的降低到低於 10^6 cm^{-2} 以下，圖 4.25(b)中不見任何缺陷。另一方面，電子繞射圖形可以看出異質磊晶層的晶體結構及結晶狀況，當然，如預期的當異質磊晶層在砷化鎵基材上的繞射點顯示是單晶之晶體結構，除此之外並沒有其他的非結晶型態存在。而當異質磊晶層被成長在直線圖形的磷化銦鎵基材上時，其繞射點依舊是呈現清楚的單晶晶體結構型態，這結果繼續驗證了這薄磷化銦鎵卻實可以改善晶格不匹配的問題。



(a)



(b)



(c)

圖4.24 $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ 異質磊晶層磊晶後的原子力顯微鏡影像 (a)磷化鎵基板; (b)具直線圖形轉移層的基板; (c)砷化鎵基板。