

4.3 清除氧化層一小時退火之晶圓接合

4.3.1 電性

圖 4-24 與 4-25 為 500°C~850°C 順相與反相電性圖，由電性圖當中可以知道，順相接合所有溫度下都可以得到良好的歐姆接觸，隨著溫度的上升，接合試片的電阻將會降低，500°C~850°C 的電性均相當不錯，而反相的試片中，500°C 的試片有些微的能障存在著，能障的由來可能是由於接合時間較短，造成介面的非晶質區域比較多而產生的，比較順相和反相電性，如圖 4-26 到 4-29 所示，順相接合的電性比反相接合的電性較佳，在所有的溫度都有這個現象。

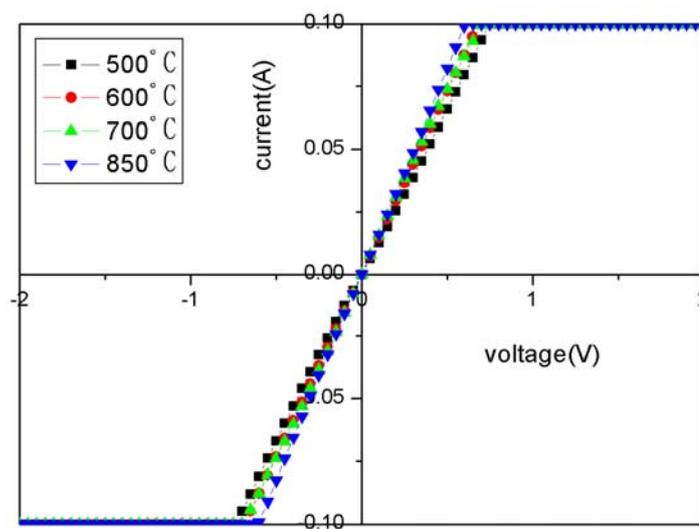


圖 4-24 500°~850° 順相接合電性圖

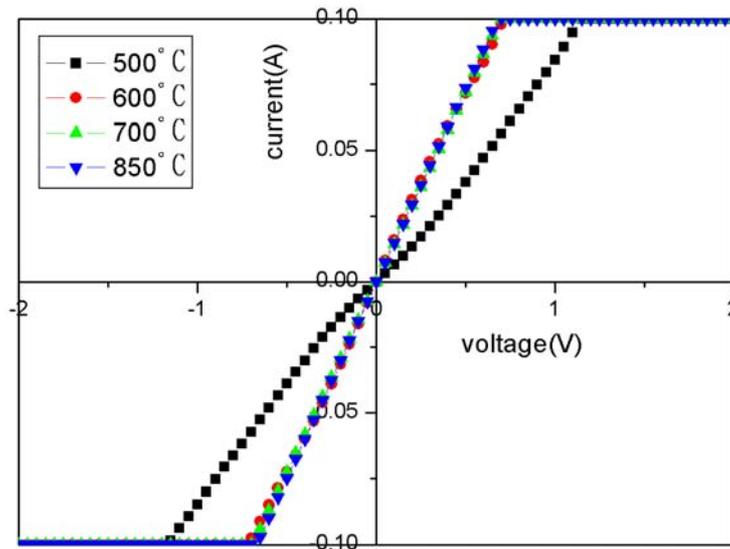


圖 4-25 500°~850°反相接合電性圖

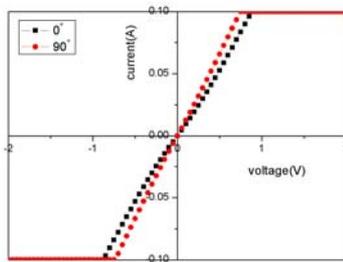


圖 4-26 500°C順相與反相電性

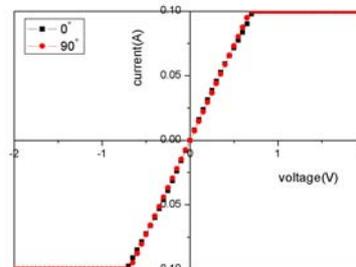


圖 4-27 600°C順相與反相電性

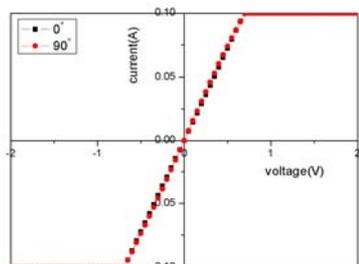


圖 4-28 700°C順相與反相電性

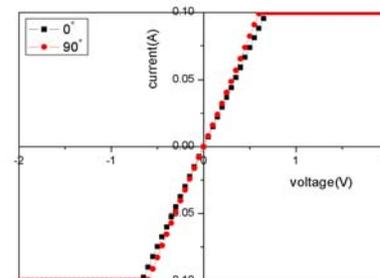


圖 4-29 850°C順相與反相電性

4.3.2 介面形態

從 500°C 的 TEM 圖，如圖 4-30，可以發現仍然有氧化層的存在而且呈現平板狀的結構，隨著溫度的上升，為了降低表面能，到了 600°C 可以從 TEM 圖，如圖 4-31，氧化物已經開始聚集而成為球狀的結構。隨著溫度的上升，氧化物將會聚集的更大，如圖 4-32，可以明顯的看的出來 700°C，的氧化物明顯的已經變的更大了，到了 850°C 時，如圖 4-33，球狀非晶質顆粒尺寸已經到了 100nm 左右，所以隨著溫度的上升氧化物有聚集且變大的趨勢存在。

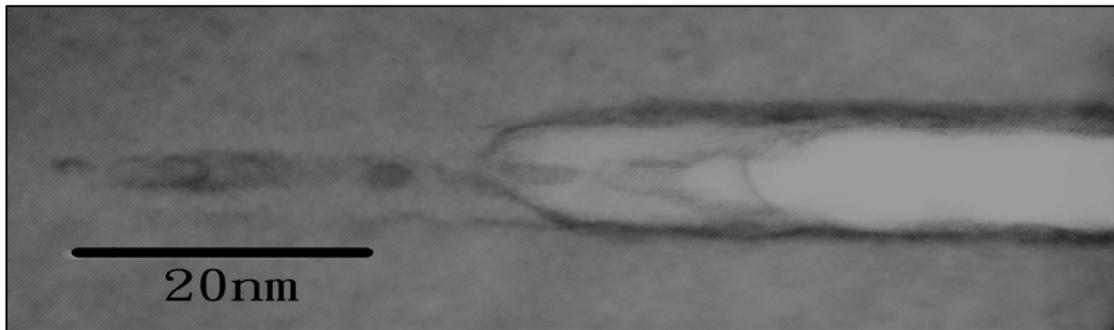


圖 4-30 P 型砷化鎵清除氧化物接合一小時 500°C 反相接合介面形態

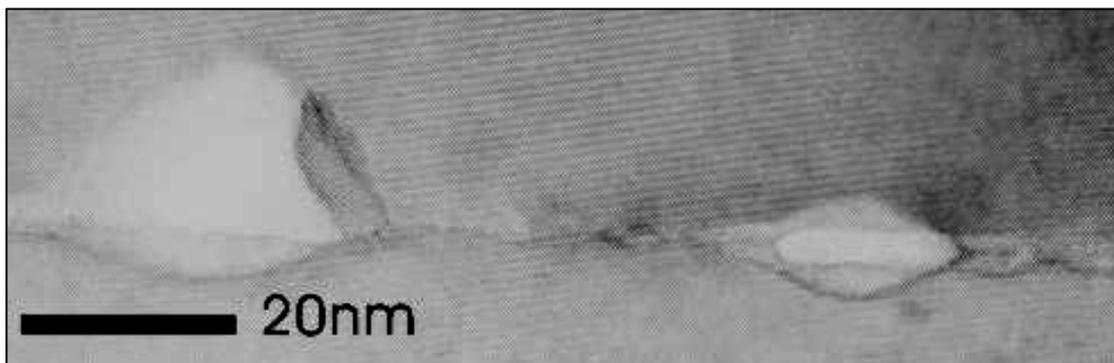


圖 4-31 P 型砷化鎵清除氧化物接合一小時 600°C 反相接合介面形態

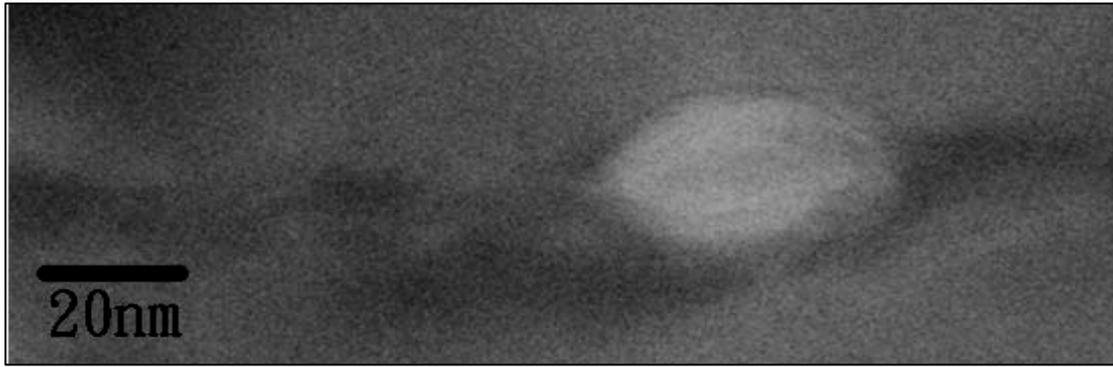


圖 4-32 P 型砷化鎵清除氧化物接合一小時 700°C 反相接合介面形態



圖 4-33 P 型砷化鎵未清除氧化物接合一小時 850°C 反相接合介面形態

4.3.3 順相反相電性和介面型態的關係

電性和先前討論到的一樣，和介面型態有很大的關係。圖 4-34 與 4-35 為 600°C 時順相和反相接合區域。從圖中可以發現介面接合較完美的區域，仍然可以發現和前面所提相似的現象，順相接合完整接合區域較反相多，原因在前面已說明過，在此不再多加說明。

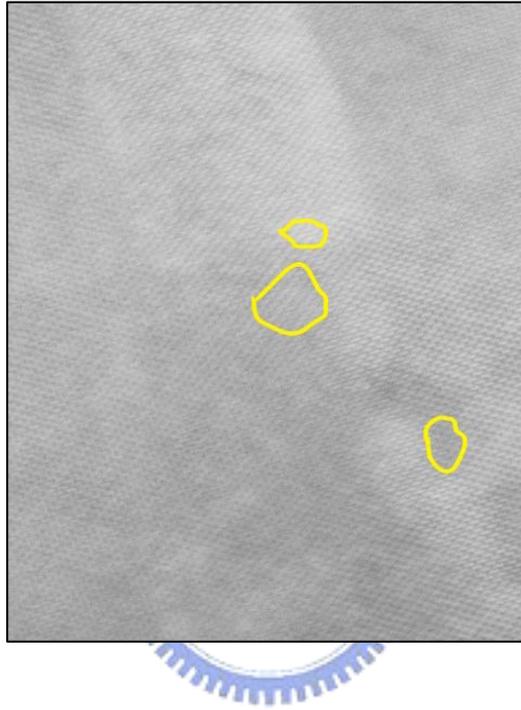


圖 4-34 600°C 順相接合 TEM 圖



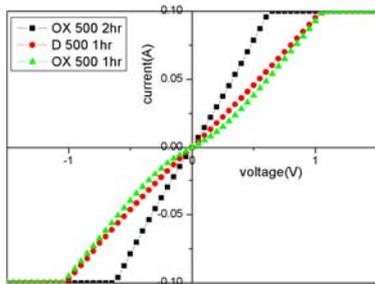
圖 4-35 600°C 反相接合 TEM 圖



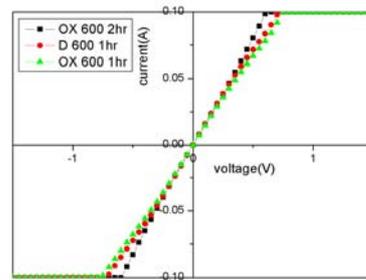
4.4 整體電性比較

4.4.1 整體電性比較

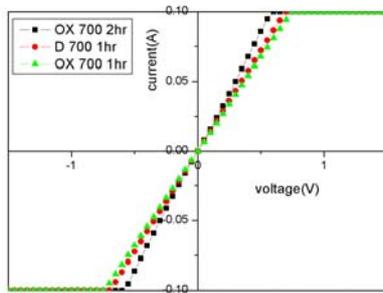
這章節，我們將前面所做的各條件下的電性圖放在一起做比較。圖 4-36 為反相電性圖，圖 4-37 為順相電性圖，OX 是有原生氧化層存在，D 則是代表去除了原生氧化層。由圖中可以觀察的到，反相除了 500°C 退火一小時的試片有些微的能障存在之外，其餘的試片電性都相當的集中。明顯的可以看出未清除氧化層接合二小時的電性比其餘二的條件電性優異。而在相同的退火時間，有清除氧化層的試片電性比未清除氧化層的試片優異。在順相也可以觀察的到這樣的情況，而且順相所有的試片都呈現歐姆接觸的狀態。



(a)



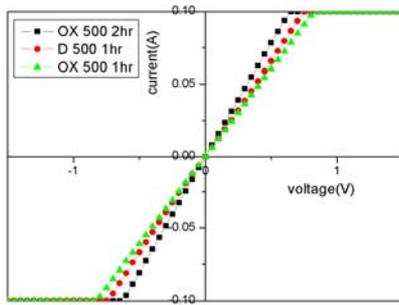
(b)



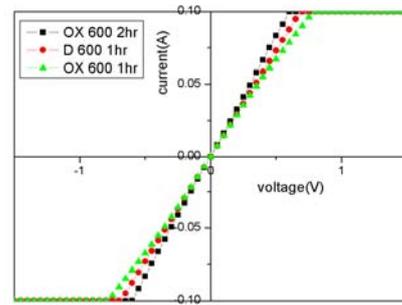
(c)



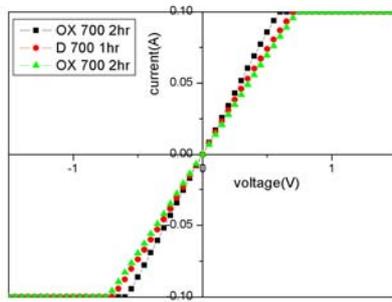
圖 4-36 反相接合所有狀態電性比較圖(a)500°C(b)600°C(c)700°C



(a)



(b)



(c)

圖 4-37 順相接合所有狀態電性比較圖(a)500°C(b)600°C(c)700°C



4.4.2 不同退火時間電性與介面型態

由於 600°C 的試片有著相當明顯的現象，因此，我們先看 600°C 的試片。4-38 為退火二個小時的試片，可以看的出來，球狀的結構相當的完整。將球狀結構接近接合介面的區域放大來看，可以看的到完整的接合結構，晶格影像相當的完整。再來看退火一個小時的狀態，圖 4-39 個小時的球狀結構，球狀結構乍看之下也是相當完整。接著放大靠近接合介面的區域，我們可以發現，氧化物區域的存在。因此球狀結構不是完整，退火二個小時的試片球狀節明顯的是比較完整的狀態，而一個小時的試片則是還存在氧化物區域。這點可以從退火時間較長，造成二個小時退火的試片有足夠的時間讓氧化物區域擴散，變成完整的接合區域。而一個小時的退火時間還不足以讓氧化物擴散，所以電性上二小時退火試片會比一個小時退火試片優異是可以理解的。

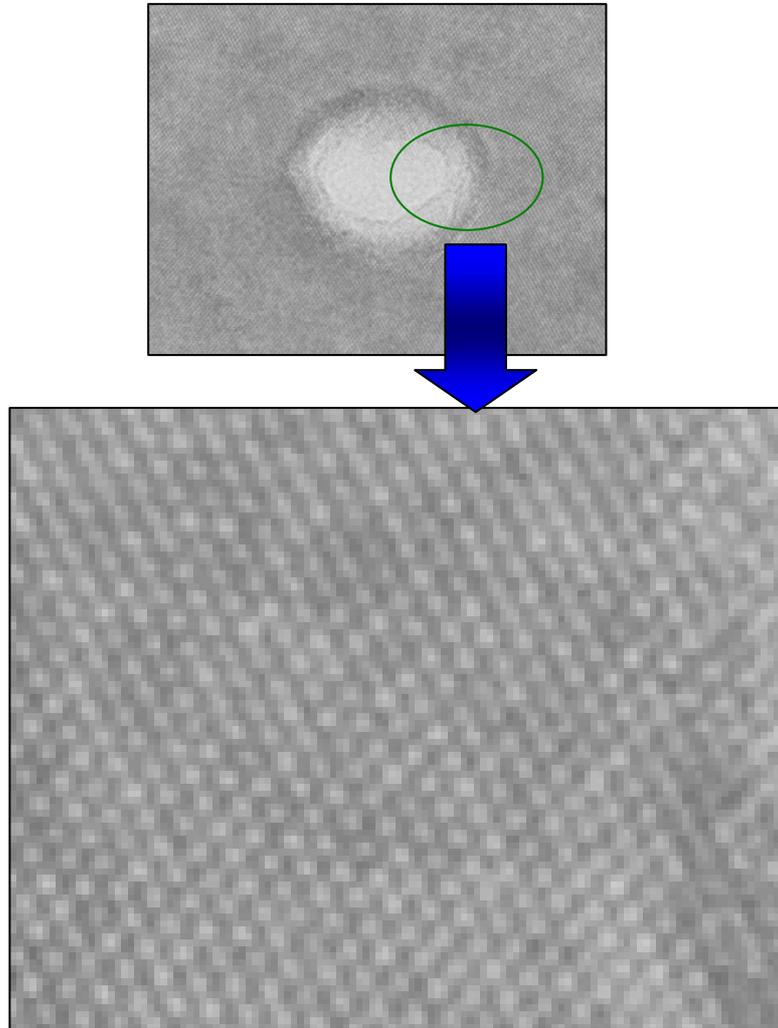


圖 4-38 二小時退火球狀結構以及結合介面放大 TEM 圖

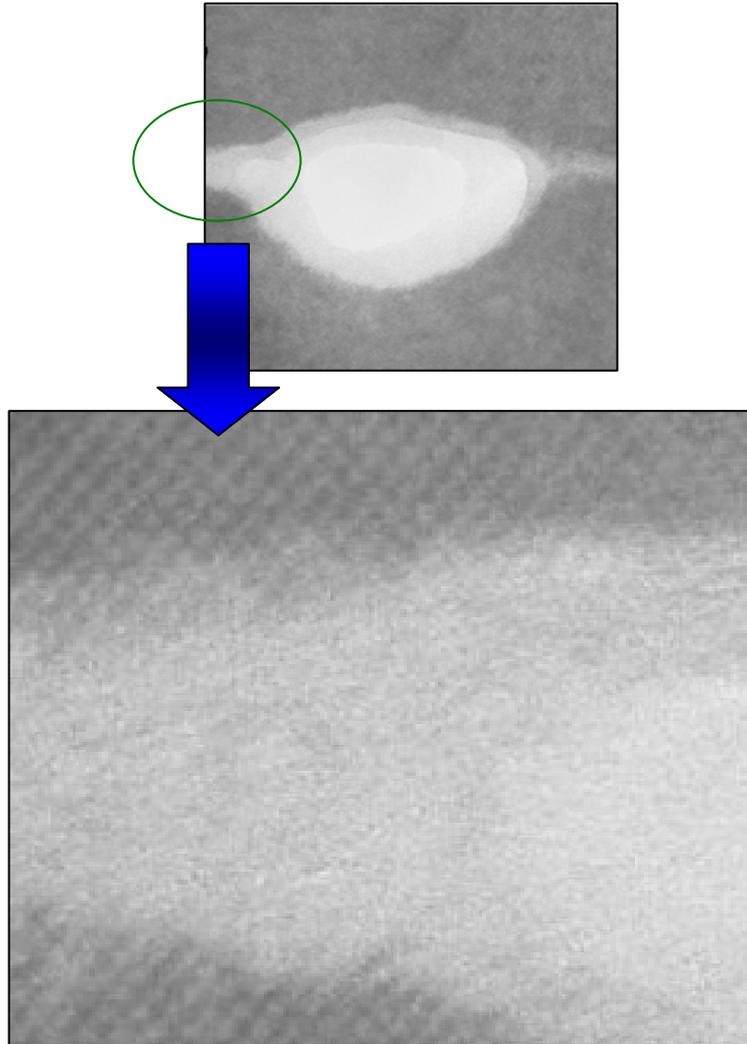


圖 4-39 一小時退火球狀結構以及接合介面放大 TEM 圖

4.4.3 原生氧化層對電性的影響

原生氧化層對於電性也是有相當大的影響，從 600°C 有清除原生氧化層(圖 4-40)，以及未清除原生氧化層(圖 4-41)，明顯的可以看的出來，清除氧化層的

試片，殘留的平板狀氧化層約為 3nm 厚，而未清除氧化層的試片，最薄的區域約為 6nm 厚。氧化層的厚度關係著完整接合區域的大小，當氧化層較厚，可想而知完整接合區域將相對的減少，較薄的氧化層相對的完整接合區域也會比較多。在相同的退火時間下，也可以推測電性的差異是和氧化層的厚度有極大的關係，氧化層較薄的電性表現將會比較優異。

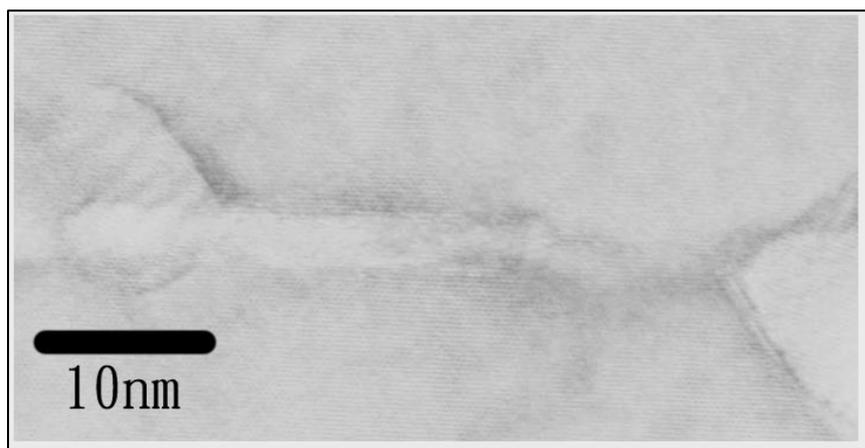


圖 4-40 清除原生氧化層 600°C 退火一小時反相接合 TEM 圖

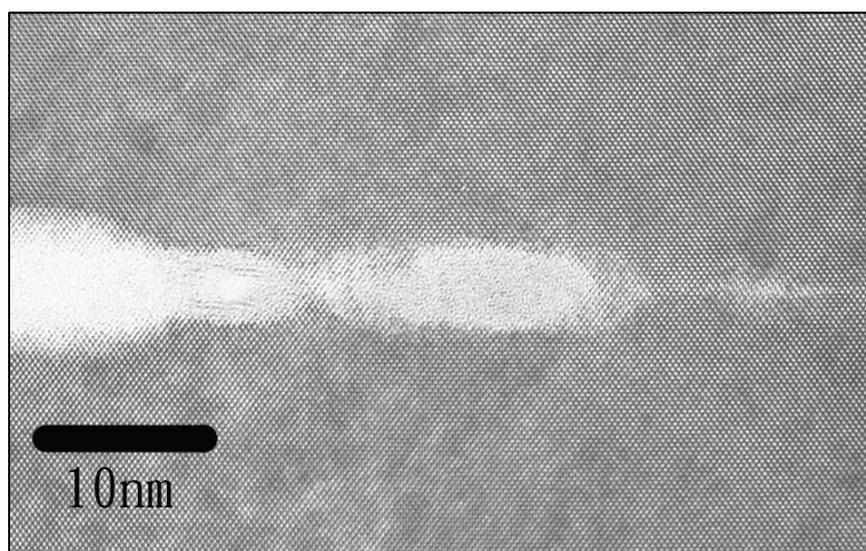
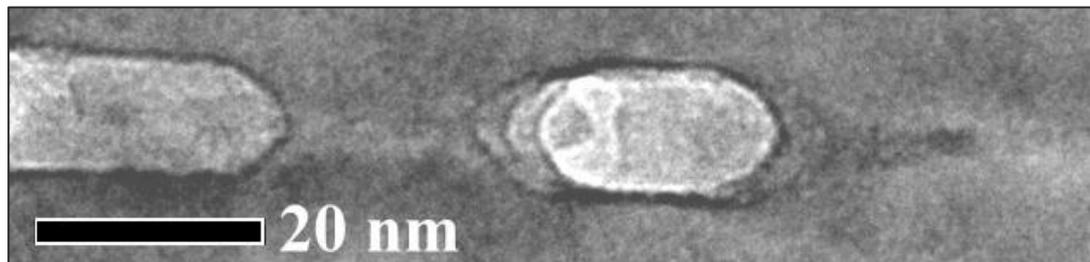


圖 4-41 未清除原生氧化層 600°C 退火一小時反相接合 TEM 圖

4.5 整體介面型態比較

4.5.1 500°C 接合介面形態

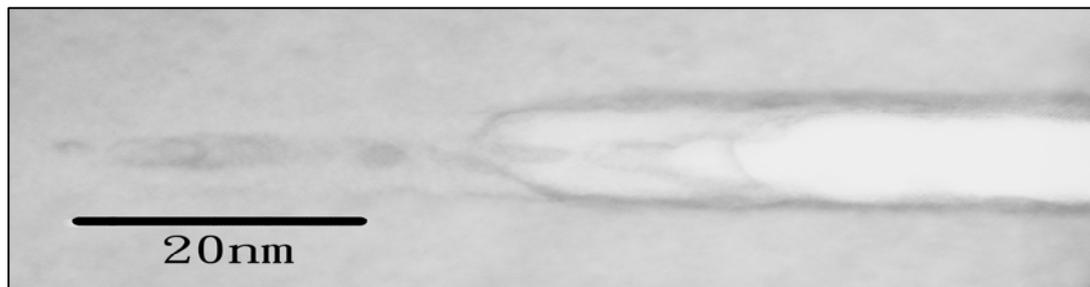
圖 4-42 由上而下分別為 500°C 未清除氧化物二小時退火、未清除氧化物一小時退火、清除氧化物退火一小時，三個狀態下的氧化物都呈現平板的狀態，平板厚度也都約在 5~10nm 左右，也可以明顯的看出二小時的退火平板結構是比較完整的，在平板的末端已經呈現完整的接合，而退火一小時的試片都還有些非晶質氧化物存在，在這個溫度介面氧化物型態是相似的。



未清除氧化層退火二小時



未清除氧化層退火一小時

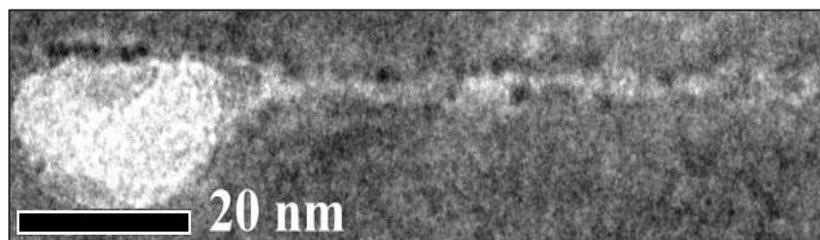


清除氧化層退火一小時

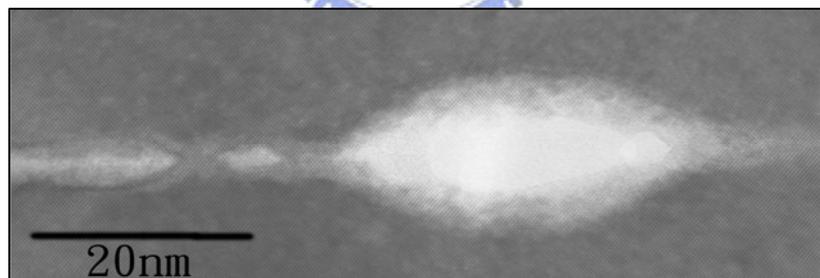
圖 4-42 500°C 下不同條件下的介面氧化物形態

4.5.2 600°C 接合介面形態

圖 4-43 由上而下分別為 600°C 未清除氧化物二小時退火、未清除氧化物一小時退火、清除氧化物退火一小時，很明顯的三個狀態下介面氧化物都是呈現球狀的形態，大小約在 15nm 左右的尺寸範圍內，二小時的退火雖然可以看見白色似板狀物，實際上這些板狀物都呈現了晶格影像了，是屬於接合比較完整的部份，而一個小時的退火，也有類似的板狀物存在，而這些板狀物實際上還是有氧化物存在，當放大倍率是有些板狀物的地方是呈現非晶質的狀態，我們推測這是由於退火時間的不同造成的，在 600°C 下介面形態也是類似的都是呈現球狀。



未清除氧化層退火二小時



未清除氧化層退火一小時

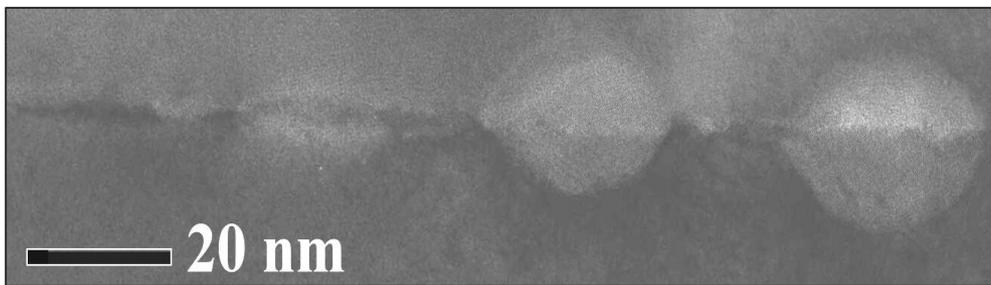


清氧化層退火一小時

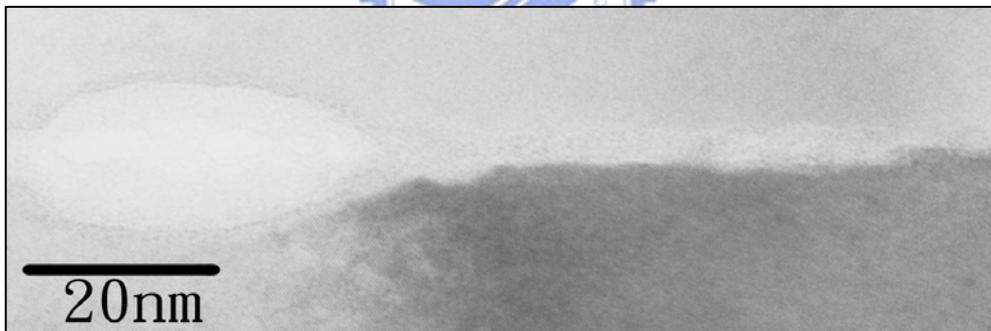
圖 4-43 600°C 下不同條件下的介面氧化物形態

4.5.3 700°C 接合介面形態

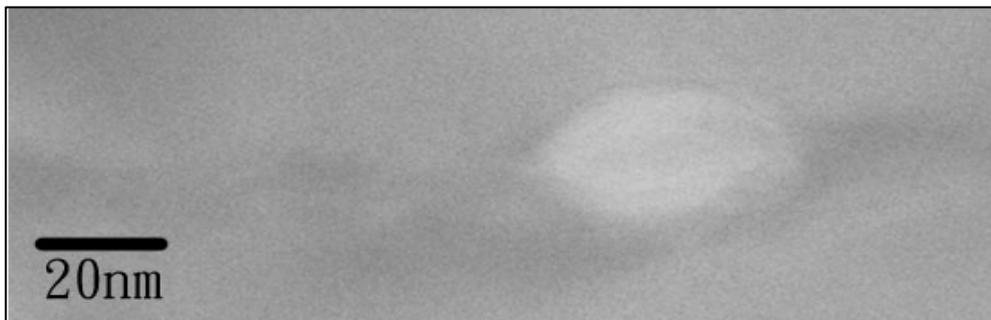
圖 4-44 由上而下分別為 700°C 未清除氧化物二小時退火、未清除氧化物一小時退火、清除氧化物退火一小時。在這個條件下，也很明顯的發現，球狀形態也都是很明確的，尺寸也都在 25nm 左右。二小時的退火時間球狀顆粒內部也有呈現晶格影像的狀態，而一小時退火的條件仍然有明顯的球狀氧化物存在，推測也是由於退火時間的差異造成的擴散現象，在這個溫度下，介面形態也是相類似的。



未清除氧化層退火二小時



未清除氧化層退火一小時



清氧化層退火一小時

圖 4-44 700°C 下不同條件下的介面氧化物形態

4.5.4 介面型態討論

圖4-45為我們看到的TEM影像圖所描繪出來的所有溫度狀態下氧化物的形態，可以很明顯的發現，在相同的溫度下介面形態是類似的，500°C下全部呈現板狀，600°C下都是呈現球狀的，700°C下也是呈現球狀的形態，由這邊可以發現，介面形態是和溫度有極大的關係，在某個特定的溫度下指能達到一定尺寸的大小，由600°C和700°C的示意圖可以很明顯的發現這一點。而氧化層的多寡並不會對介面形態造成太多的影響，從清除氧化層和未清除氧化層最後形態尺寸都類似可以發現這一點，我們推論由於溫度造成的氧化層聚集，為了降低表面能而產生的現象，但是溫度提供的能量只能讓他們聚集到一個穩定的大小，所以溫度決定了介面的主要形態。藉由觀察不同的退火時間，可以發現退火時間較久的試片介面比較容易呈現完美結晶的狀態。可以從600°C的試片觀察到這一點，在這溫度下球狀物的周圍都是完美的接合狀態，而一個小時的退火卻可以很明顯的觀察到非晶質區域。有無清除原生氧化層的影響也可以從這溫度觀察的出來，清除氧化層的試片由於氧化層會較薄所以在相同的退火時間下，介面比未清除氧化層的試片容易有完美結晶的情況出現。為了觀察介面擴散的現象，我們對600°C未清除氧化層退火二個小時以及一個小時的試片做了能量散佈光譜(Energy Dispersion Spectrum ; EDS)。圖4-46為600°C分別對球狀物的中心、球狀物內部偏外圍處、球狀物外圍處、以及距離球狀物外圍約20nm處，結果可以明顯的發現，球狀物外圍以及外圍20nm處的氧成份是相似的，藉由這結果，我們推斷球狀氧化物在一個小時的退火當中擴散現象並不明顯，在藉由鄭季豪所做出來的未清除氧化物退火二小時的結果^[31](圖4-47)，可以明顯的發現球狀中心的氧成分與球狀外圍處成份差異不大，推論氧在二個小時的退火有明顯的擴散現象。最後我們對介面的擴散做一個總結，由600°C來說明在這溫度下現象是比較明顯的，圖4-45是退火時間於介面形態的示意圖，首先擴散的現象在任何時間都是存在的而且是跟溫度有密

切的關係，先假設擴散是呈現一定速率，當試片放入長形爐管開始退火，介面的氧化層如圖4-48中的狀態1所示，是二試片接合的狀態也就是平板狀已經開始發生擴散現象，隨著時間的增加，氧化層有足夠的能量聚集，相對於氧擴散進入深化鎳基材而言，聚集現象是比較劇烈的，因為藉由聚集降低的自由能比擴散降低的自由能快，因此氧化物選擇聚集反應會比選擇擴散來的多如圖4-48中的狀態2所示。由於一小時的退火球形結構才剛開始有明顯的擴散現象，由EDS中球形結構周圍的氧成分比中心高可以發現，氧開始相外擴散，所以推論球形結構完成的時間是在一個小時以內，至於正確形成球形結構的時間則需要再去了解。到了圖4-48中的狀態3球形結構主要形態已經完成，周圍平板狀的氧化物已經不能在相內聚集，所以選擇擴散是降低自由能的路徑，因此擴散現象會較明顯，從先前的600°C退火一個小時的TEM圖中發現平板狀有結晶現象可用來證明推論，接著隨著退火時間的拉長，球形結構也會選擇擴散來繼續降低自由能，因此，在600°C退火二個小時的TEM圖中發現平板幾乎呈現結晶的狀態，而且球狀物周圍大部份也呈現結晶，只剩下靠近中心部分仍有未結晶的狀態來證明，如圖4-45中狀態4所示球狀物會開始結晶周圍平板也會結晶，所以介面形態會在短時間內完成，而結晶狀況則需視退火時間來決定。

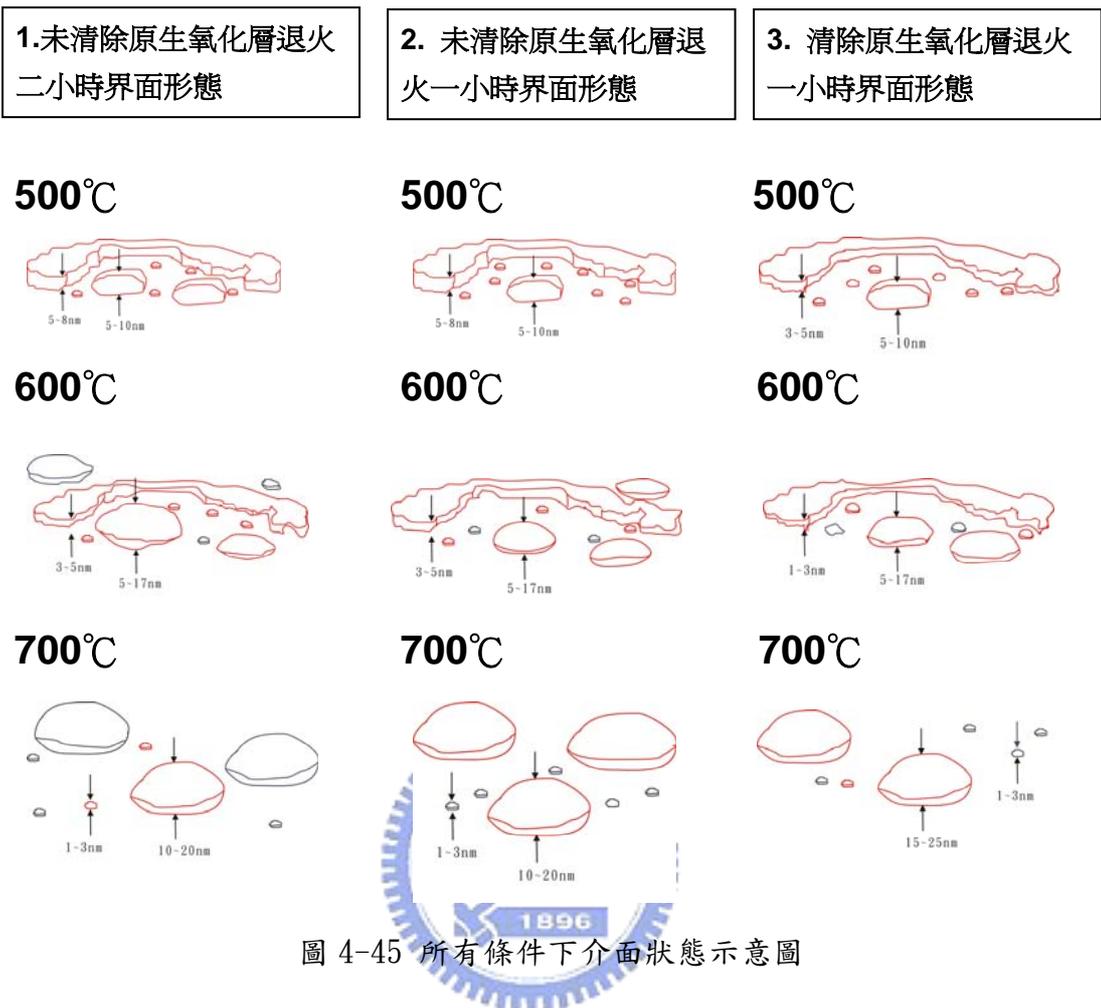


圖 4-45 所有條件下介面狀態示意圖

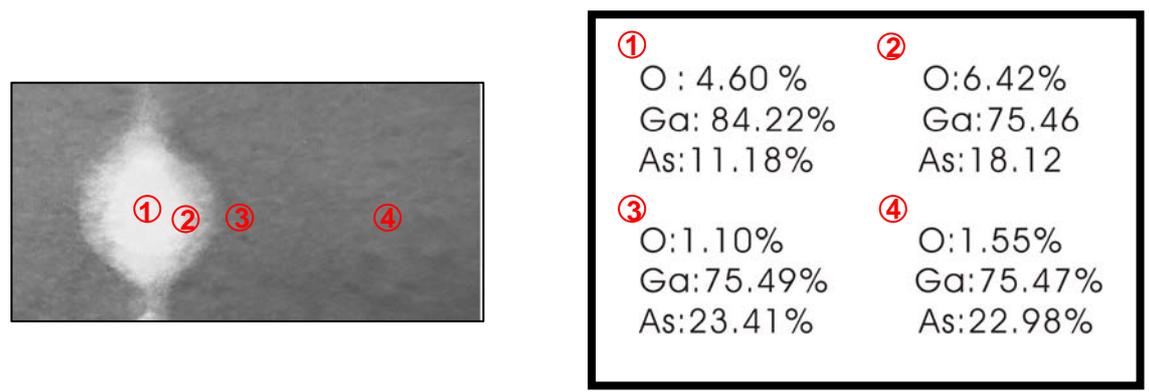


圖 4-46 600°C 未清除氧化層退火一小時不同位置與成份 EDS 圖

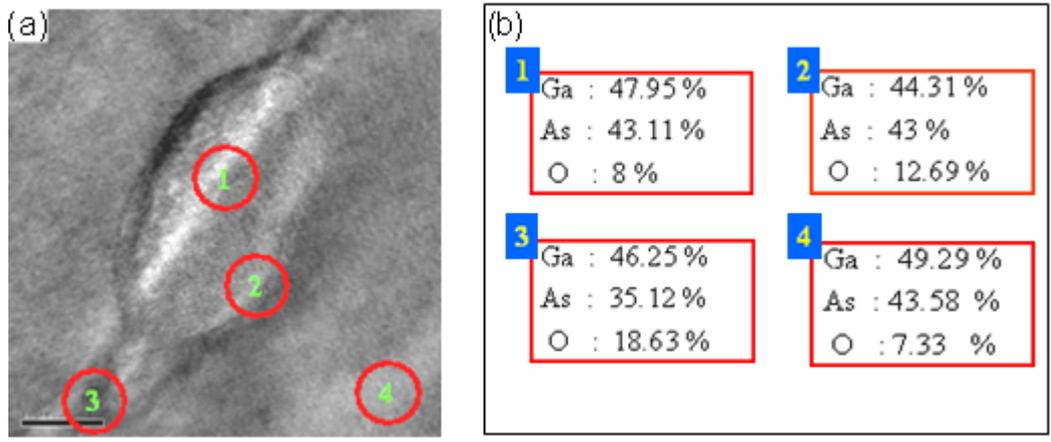


圖 4-47 600°C 未清除氧化層退火二小時不同位置與成份 EDS 圖[31]

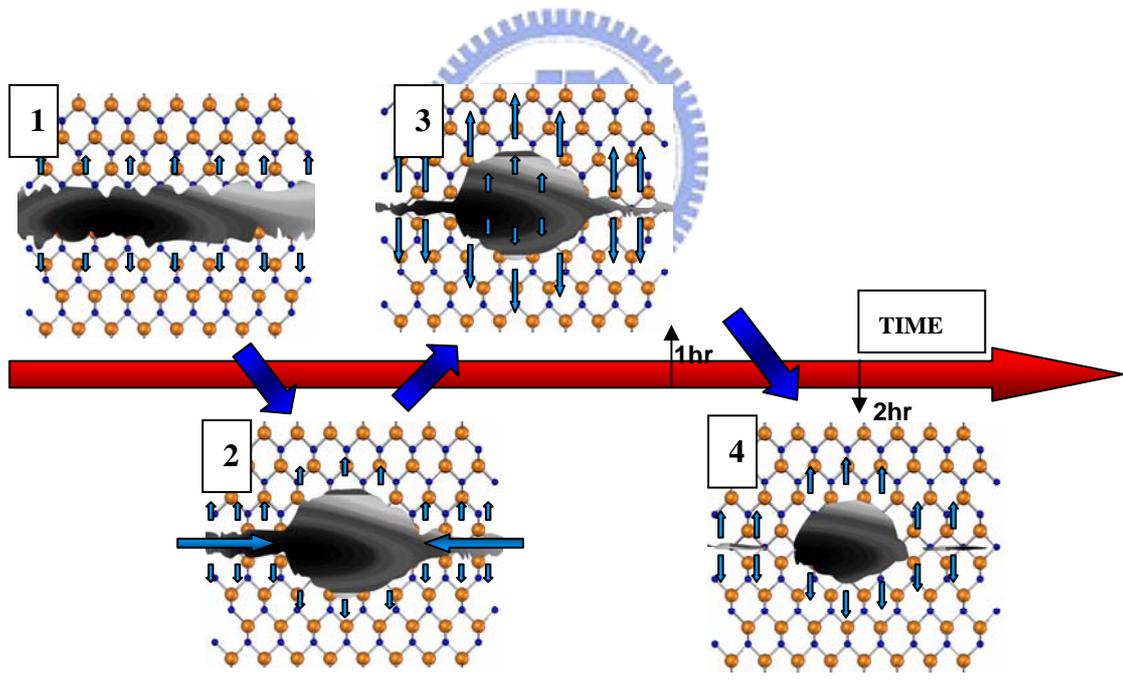


圖 4-48 退火時間與氧化層之變化關係示意圖

4.6 P 型砷化鎵接合與 N 型砷化鎵接合電性比較

4.6.1 電性綜合比較

本實驗的試片處理流程和盧正倫與彭顯智所做的 N 型砷化鎵試片流程一致^{[19][20]}，電性上確有明顯的差異如圖 4-49 ~4-52 順相反相電性圖，從 P 型和 N 型砷化鎵的電性圖看來，我們可以發現，P 型砷化鎵的趨勢，第一所有 P 型砷化鎵試片的電性呈現線性，第二退火二個小時無清除氧化層電性較退火一個小時清除氧化層電性優，第三 P 型砷化鎵不管有無清除氧化層隨著溫度變化電性變化範圍較小，而 N 型砷化鎵的趨勢有，第一無清除氧化層電性呈現非線性，清除氧化層電性呈現線性，第二退火一個小時清除氧化層電性較退火二個小時無清除氧化層電性優，第三 N 型砷化鎵無清除氧化層電性變化範圍較廣，根據以上的比較發現，氧化層對於 N 型砷化鎵電性有著重要的影響。

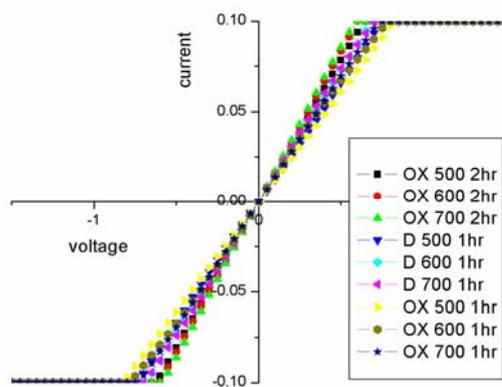


圖 4-49 P 型砷化鎵反相接合電性

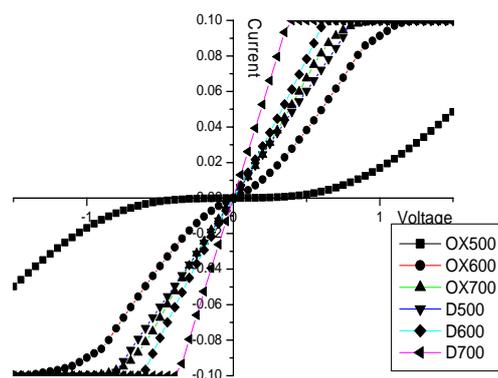


圖 4-50 N 型砷化鎵反相接合電性

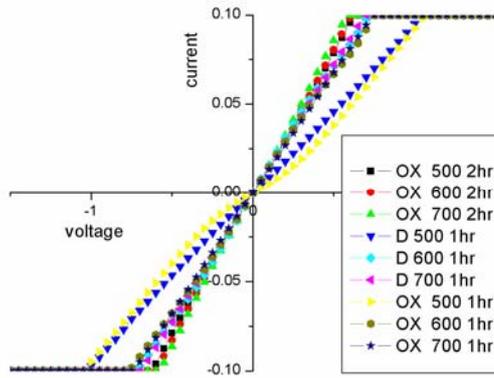


圖 4-51 P 型砷化鎵順相接合電性

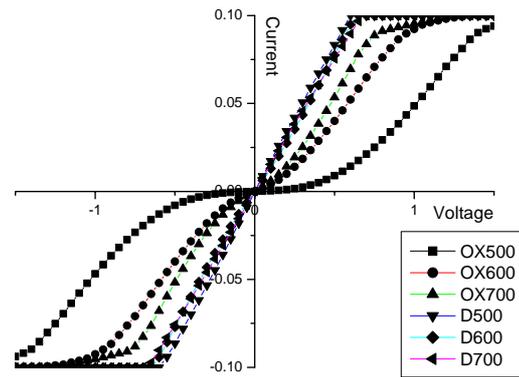


圖 4-52 N 型砷化鎵順相接合電性

4.6.2 氧對砷化鎵的影響

最早有關氧在半導體材料中對研究是氧在矽晶圓中的影響，氧再矽晶圓中的可以藉由二種方式，第一、氧原子以插入型原子和相鄰的二個矽原子形成 Si_2O ，插入型的鍵結對矽晶圓來說是穩定的且電性不活潑，是矽晶圓當中主要的缺陷形式，第二、氧原子以置換型原子方式存在，藉由插入型原子所引起的空孔捕捉，形成 (V-O) 缺陷，作為淨受體，氧在砷化鎵中的穩定位置與影響可以從文獻[32]中得知，圖 4-53 中” Td” 代表晶格四面體的位置、” H” 代表六方體的插入型位置、” BC” 代表砷原子與鎵原子互相鍵結的中心位置、” C” 代表四面體位置、” Td(III)” 代表與鄰近三個砷化鎵原子所組成的菱形體中心位置、” M” 的位置在 C(As)和 C(As)中間，M 不是位於(110)平面，為了求得最穩定的位置，也需要把 Fermi-level effect 列入考慮，結果顯示氧原子在沒有摻雜其他原子的狀況下，可以形成二種穩定的結構:Ga-O-Ga 和 Ga-O-As，文獻中提到，當砷化鎵晶圓為 N-type 時氧在” Ga-O-Ga” 結構中的最穩定位置為 Td(Ga)，並且在砷化鎵的能階中形成一個 deep level，這也說明了 Ga-O-Ga 在 N 型砷化鎵內有捕獲電子的能力，而 Ga-O-As 在電中性的條件下較為穩定，所以在 N 型砷化鎵中不能

穩定的存在，也代表了 Ga-O-As 不會捉住砷化鎵內部的電子，再 P 型砷化鎵中只有一種穩定的位置 BC，顯示出 Ga-O-As 在砷化鎵中捕獲電洞的能力很弱，這結果說明了氧再砷化鎵中有二種結構(Ga-O-Ga 和 Ga-O-As)，在 N 型砷化鎵中只有 Ga-O-Ga 能穩定存在，由於捕捉電子的能力，因此對電性有相當大的影響，而在 P 型砷化鎵中，只有 Ga-O-As 穩定存在，並不會對電洞有相當大的影響。

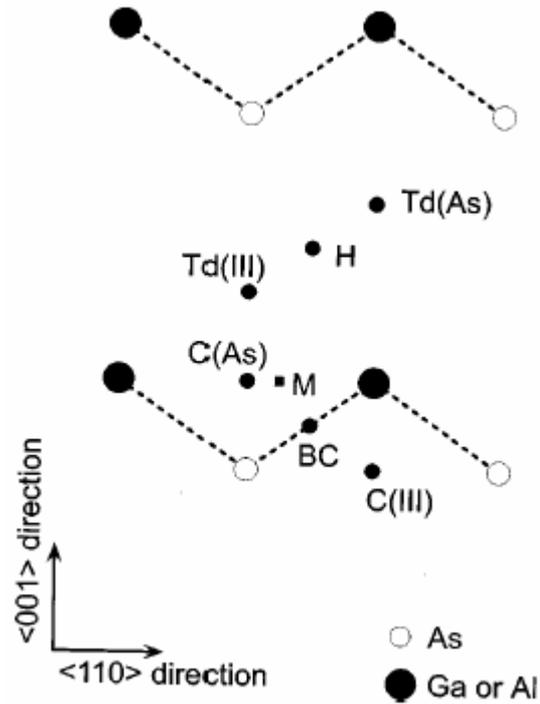


圖 4-53 在砷化鎵中的移動位置，中” Td” 代表晶格四面體的位置、” H” 代表六方體的插入型位置、” BC” 代表砷原子與鎵原子互相鍵結的中心位置、” C” 代表四面體位置，” Td(III)” 代表與鄰近三個砷化鎵原子所組成的菱形體中心位置、” M” 的位置在 C(As)和 C(As)中間，M 不是位於(110)平面

4.6.3 影響電性的原因

由以上的氧對砷化鎵的影響可以推測得知，氧的存在對於 N 型砷化鎵有著重要的影響。接著我們可以從電性圖當中得知，對於 N 型砷化鎵而言，清除氧化物的試片，在相同的溫度下電性的表現都優於未清除氧化物的試片。對於 P 型而言，氧在 P 型砷化鎵裡面擴散較快，不管有無清除氧化層在 500°C 時已經出現不少完整接合區域，故電性皆呈現歐米接觸，隨著溫度上升 N 型砷化鎵接合試片，未清除氧化層的試片隨著溫度上升電性有變好的趨勢，原因為氧化層開始聚集，無氧化層區開始出現，砷化鎵從新排列需要時間，而氧擴散也需要時間，前者使電子能通過的區域變多使電阻降低，後者與砷化鎵形成 Ga-O-Ga 時會抓住電子，使 N 型砷化鎵電性變差產生能障，藉由退火一個小時與二個小時的試片可以發現，在 N 型砷化鎵中氧化層的影響遠超過退火時間的影響，跟 P 型砷化鎵比較可以發現退火二個小時未清除氧化層的電性比清除氧化層退火一個小時的電性好，與 N 型比較呈現相反的狀況，原因為氧在 P 型砷化鎵中擴散較快速，無氧化層區出現的比較早，500°C 時就已經發現無氧化層區，隨著退火時間的增加，完整接合區出現的區域也會跟著增加，所以電性隨著時間的增加而增加，另一方面，氧在 P 型砷化鎵晶圓當中形成的 Ga-O-As 並不會對電洞有太大的影響，所以隨著時間的增加，氧擴散進入砷化鎵當中，雖然會增加但是對電性卻不會有太大的影響，所以對 P 型砷化鎵而言退火時間比氧化層的清除重要，而對 N 型砷化鎵而言則是相反的情況。

4.7 700°C 大角度的比較

當接合溫度提高到 700 度時，接合的面積將相對的提高，可以從電阻圖 4-54 當中發現，電阻隨著旋轉角度的變化而變化，順相接合介面 interface energy 比較低，原子比較容易重新排列，而反相介面的 interface energy 比順相高，因此，順相介面電性比反相介面電性好，將電阻值和角度做關係圖，可以發現電阻

值有一週期性的分佈，電阻值以 45° 為中心對稱分佈，這也說明了砷化鎵晶體的立方晶系的對稱性關係，在其他期刊中將砷化鎵晶圓做不同旋轉接合，對其接合強度與旋轉角度做圖如圖 4-55，當角度小於 10° 時，可以用 $d = b/2 \sin(\theta/2)$ ， d 為 screw dislocation 之間的距離，當角度大於 10° 時並不適用差排的公式，簡單的利用晶格投影圖如圖 4-56 來解釋，由晶格投影圖可以看出，當旋轉角度越靠近 45° 時，介面鍵結的狀況將會越加渾亂，當到達 45° 之後，由於砷化鎵是立方晶系， 45° 到 90° 之間介面鍵結混亂度會隨著角度的增加而減少，當介面排列混亂的時候，電子比較難通過，透過 TEM 圖如圖 4-57 和 4-58 可以知道，渾亂的鍵結對介面是造成不同的影響的，由相互旋轉 50° 的介面中可以看出，介面存再相當多的似球狀非晶質，而相互旋轉 80° 的介面比較少，可以了解電性的差異在於此。

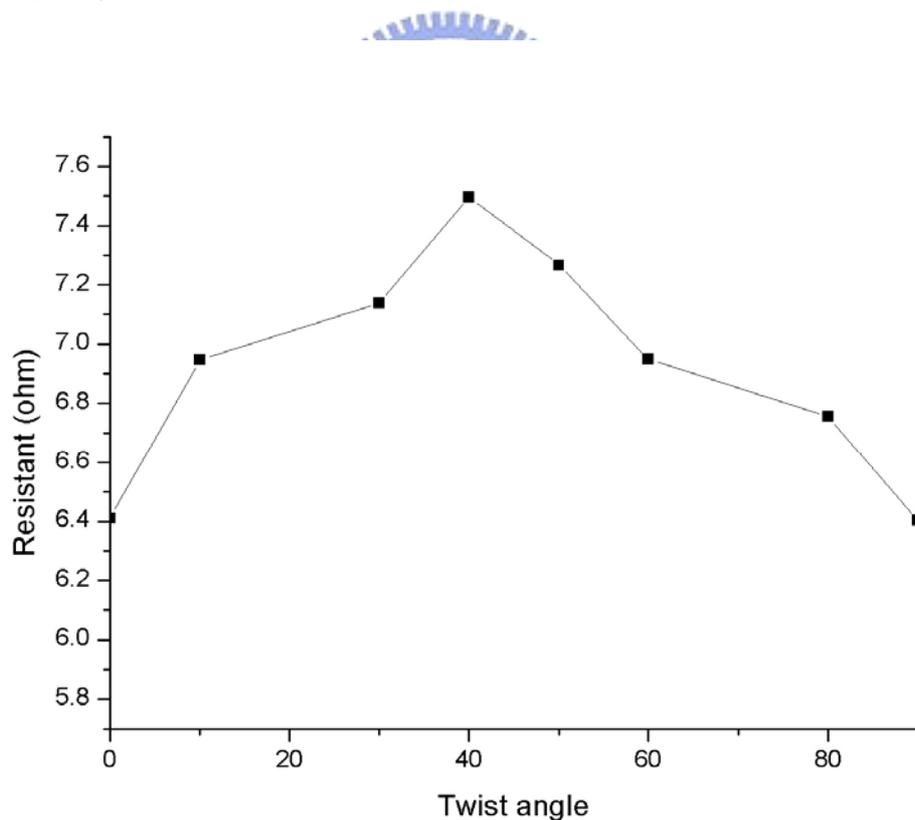


圖 4-54 700°C 整數角度電阻與選轉角度關係圖

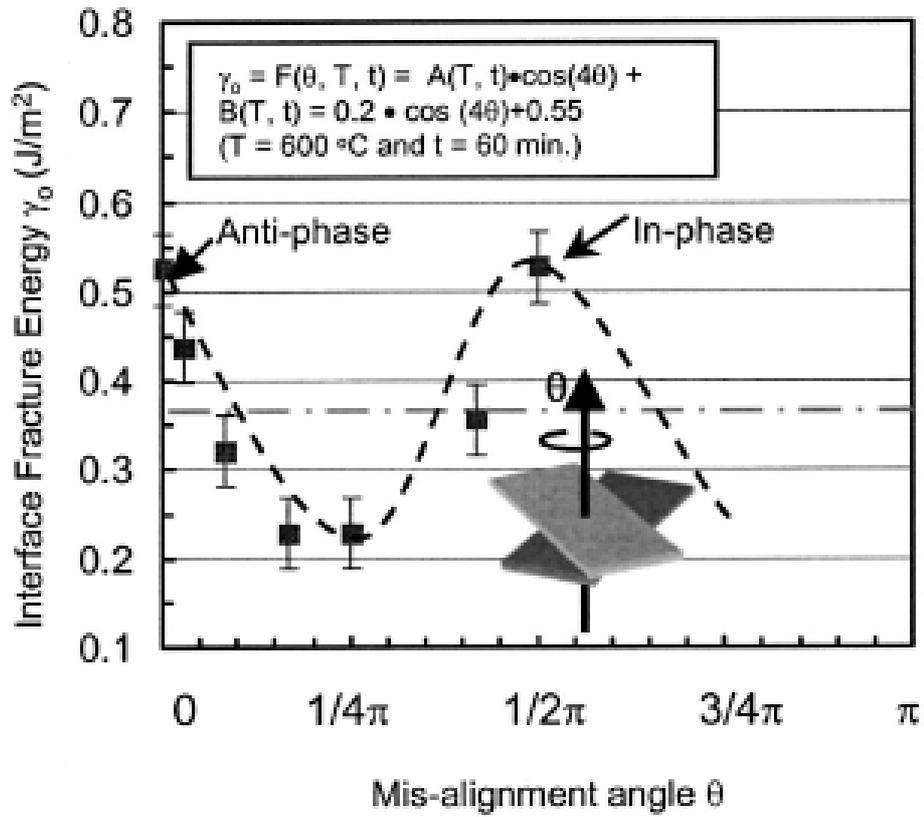


圖 4-55 砷化鎵晶圓接合強度與旋轉角度關係圖(33)



圖 4-56 晶格相互旋轉 80° 及 50° 示意圖

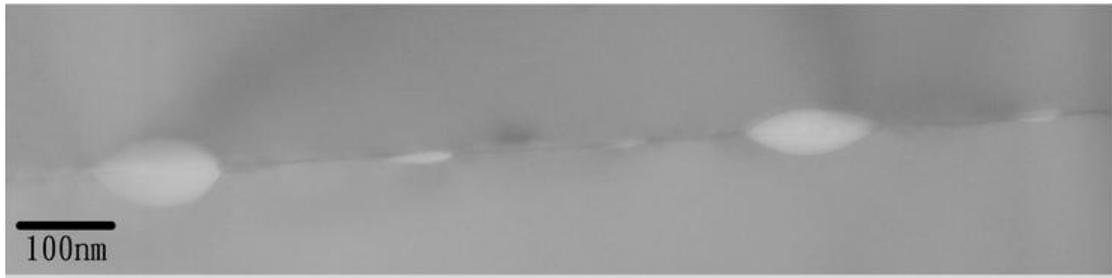


圖 4-57 砷化鎵晶圓相對旋轉 50° 的介面形態



圖 4-58 砷化鎵晶圓相對旋轉 80° 的介面形態



五、結論

本實驗做了退火時間以及氧化層對於 P 型砷化鎵晶圓接合的電性及介面形態的探討，得到了下列幾個結論：

- 一、不管退火時間長短或是有無清除氧化層，電性都是隨著溫度上升而變好，原因為隨著溫度的上升完整接合區域會變的更多。
- 二、不管退火時間長短或是有無清除氧化層，順相電性都是反相來的好，原因為順相完整接合區域的非晶質區域是比反相的來得少。
- 三、不管退火時間長短或是有無清除氧化層，介面的形態都是由 500°C 的平

板狀，600°C的球狀，700°C聚集成更大的球狀。

四、不同的退火時間對電性是由影響的，二小時的退火相較於一小時的退火電性是比较優異的，原因為退火時間較長原子有較多的時間排列，結晶區域會較多。

五、有清除氧化層的電性較未清除氧化層的電性優異，原因為氧化層較厚的試片完整接合區域將會比清除氧化層的試片少，所以造成電性上的影響

六、在相同的溫度下，介面形態將呈現類似的情形出現，原因為介面形態主要控制在於溫度，所以在同一個溫度下，介面形態相似。

七、在退火的過程當中，介面形態會在短時間內完成，而退火時間的長短皆會影響結晶區域的大小。

八、對於P型砷化鎵而言，氧的影響並不大，退火時間是控制電性的關鍵，對於N型而言則是氧的影響較大。

九、700°C旋轉角度的試片電性呈現45度對成，影響電性的主要原因為旋轉角度所造成的介面形態變化。



六、未來工作

為了確定球型結構形成的時間，需要做不同短時間的退火來確定，另外，也需要做更長的退火時間來確定時間對於結晶的影響是多大，以及是否更長的退火時間會造成介面形態的改變，我們已經確定了600°C未清除氧化層的球狀物擴散並不明顯，對於500°C以及700°C卻不知道，接下的工作需要利用EDS去了解不同溫度氧的擴散狀態，對於P型砷化鎵順相和反相的接合已經有進一步的了解了，對於P型砷化鎵的旋轉角度接合，也有了初步的研究，旋轉角度對於介面形態是有影響的，為了確定旋轉角度對電性的影響，需要再去做500°C、600°C不同旋轉角度對於電性的影響以及介面形態是否也會改變，前人也對於N型的共位晶界角

做了研究，N 的電性得不到一定的趨勢，可能是由於氧化層的影響，由於氧化層對於 P 型的電性影響不是哪麼大，所以可能會有比較完整的結果。



參考文獻

1. F. A. Kish, F. M. Steranka, D. C. DeFevere, D. A. Vanderwater, K. G. Park, C. P. Kuo, T. D. Osentowski, M. J. Peanasky, J. G. Yu, R. M. Fletcher, D. A. Steigerwald, M. G. Craford, V. M. Robbins, Appl. Phys. Lett. Vpl.64 pp.2839-2841, May 1994
2. G. E. Hofler, D. A. Vandereater, D. C. DeFevere, F. A. Kish, M. D. Camras, F. M. Steranka, and I. H. Tan, Appl. Phys. Lett. 69, 803(1996)
3. J Jasinsiki, Z. Liliental-Weber, S. Estrada, and E. Hu, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 722, K7.15 (2002)
4. J Jasinsiki, Z. Liliental-Weber, S. Estrada, and E. Hu, Mater., Appl. Phys. Lett.81, 3152(2002)
5. S. Estrada, H. Xing, A. Stonsa, A. Huntigton, U. Mishra, S. DenBaars, L. Coldren and E. Hu, Appl. Phys. Lett. 82, 820(2003)
6. H. C. Lin, K. L. Chang, K. C. Hsieh, K. Y. Cheng, and W. H. Wang, J. Appl. Phys. 92, 4132(2002)
7. L. Gordon, G. L. Woods, R. C. Eckhardt, R. R. Route, R. S. Feigelson, M. M. Fejer, and R. L. Byer, Electron. Lett. 1942(1993)
8. A. E. Romanov, W. Pompe, S. Mathis, G. E. Belts, and J. S. Speckj. J. Appl. Phys. 85, 182(1999)
9. J. dela Figuera, K. Pohl, O. Rodriguez dela Fuente, A. K. Schmid, N. C. bartelt, C. B. Carter and R. Q. Hwang, Phys. Rev. Lett. 86, 3819(2001)
10. E. Koppensteiner, A. Schuh, G. Bauer, V. Holy, G. P. Watson and E. A. Fitzgerald, J. Phys. D: Appl. Phys. 28(1995)
11. Frank Shi, Scott MacLaren, Chaofeng Xu, K. Y. Cheng, and K. C. Hsieh, J. Appl. Phys. 93, 5750(2003)
12. Frank Shi, Kuo-Lih Chang, John Epple, Chao-Feng Xu, K. Y. Cheng, and K. C. Hsieh,

- J. Appl. Phys. 92, 7544(2002)
13. R. Khilil, A. El Hdiy, A. Cavanna, F. Laruelle, and Y. Jin, J. Appl. Phys. 96, 3023(2004)
14. S. Estrada, A. Stonas, A. Huntington, H. Xing, L. Coldren, S. DenBaars, U. Mishra, E. Hu, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 743 2003 Material Research Society
15. Hiroshi Wada, Yoh OgaWa, and Takeshi Kamiyoh, Appl. Phys. Lett. 62 ,738(1992)
16. Q.-Y. Tong, Q. Gan, G. Hudson, G. Fountain, and P. Enquist, Appl. Phys. Lett. 84, 732(2004)
17. http://www-ncce.ceg.uiuc.edu/tutorials/crystal_structures/gaas.html
18. A. Fedotov, Anis M. H. Saad, K. Enisherlova, A. Mazanik, Materials Science and Engineering B91-92, 384(2002)
19. 盧正倫 砷化鎵晶圓接合的介面型態及電性研究 交通大學碩士論文
20. 彭顯智 不同選轉角度之砷化鎵晶圓接合 交通大學碩士論文
21. 李天賜、林澤勝、彭成鑑、呂冠良、潘信宏 工業材料雜誌 170
22. J. Jasinski, Z. Liliental-weber, S. Estrada, E. Hu, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 711 2002 Materials Research Society
23. M Shimbo, K. furukawa, k. Gukuda, and K. Tanzawa, J. Appl. Phys. 60, 2987(1986)
24. Xuanxiong Zhang and Jean-pierre Raskin , Electrochemical and Solid-State Letters , 7(8) G172-G174(2004)
25. Radu, I. Szafraniak, R. Scholz, M. Alexe, and U. Gosele, J. Appl. Phys. 94 , 7820(2003)
26. Q.-Y Tong, W. J. Kim, T.-H. Lee, and U. Gosele, Electrochemical and Solid-State Letters, 1, 52(1998)
27. I. V. Antonova, O. V. Naumova, V.P. Popov and J. Stano, V. A. Skuratov, J. Appl.

Phys. 93 ,426(2003)

28. Y. S. Wu, R. S. Feigelson, R.K. Route, D. Zheng, L. A. Gordon, M. M. Fejer, and R. L. Byer, J. Electrochem. Soc. 145, No.1(1998)

29. United States Patent , Gosele et al. Patent number 4883215

30. G. N. Yushin and Z. Sitar , Appl. Phys. Lett. 84, 3993(2004)

31 鄭季豪 砷化鎵晶圓接合界面微結構與電性之研究中 興大學碩士論文

32 Akihito Taguchi and Hiroyuki Kageshima, PHYSICAL REVIEW B, v60 p5383, 1999

33 Frank Shi, Scott MacLaren, Chaofeng Xu, K. Y. Cheng, and K.C. Hsieh, J. Appl. Phys., 93, pp. 5750-5756, May2003

