

# 國立交通大學

材料科學與工程學系

碩士論文

砷化鎵晶圓接合的界面型態與電性探討

## **Interface Morphologies and Electrical Properties of Bonded GaAs Chips to GaAs Wafers**

研究生：鄭筑文 ( Chu Weng Cheng )

指導教授：吳耀銓 教授 ( Yew Chung Sermon Wu )

中華民國九十九年八月

# 國立交通大學

材料科學與工程學系

碩士論文

砷化鎵晶圓接合的界面型態與電性探討



**Interface Morphologies and Electrical  
Properties of Bonded GaAs Chips to GaAs  
Wafers**

研究生：鄭筑文（Chu-Weng Cheng）

指導教授：吳耀銓 教授（Yew-Chung Sermon Wu）

中華民國九十九年八月

砷化鎵晶圓接合的界面型態與電性探討

Interface Morphologies and Electrical Properties of Bonded GaAs Chips to GaAs  
Wafers

研究生：鄭筑文

Student : Chu-Weng Cheng

指導教授：吳耀銓

Advisor : Prof. Yew-Chung Sermon Wu

國立交通大學  
材料科學與工程學系  
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Material Science and Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of The Requirements  
for The Degree of  
Master  
In

Material Science and Engineering

August 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年八月

# 砷化鎵晶圓接合的界面型態與電性探討

學生：鄭筑文

指導教授：吳耀銓 教授

國立交通大學材料科學與工程學系碩士班

## 摘 要

本論文研究之目的，在於對N型砷化鎵晶圓對不同尺寸接合的界面形態變化對電性的影響，隨著溫度上升電阻下降，順相介面比反相介面電性優異，並且做了不同的退火時間來對照界面形態的變化，發現在相同溫度下介面形態類似。對於原生氧化層的影響也做了研究和探討，以及在各個不同的條件下，界面形態做了比較。主要目的在於了解影響N型砷化鎵晶圓接合的主要因素，並利用穿透式電子顯微鏡技術來幫助我們對界面形態的進一步了解。

# **Interface Morphologies and Electrical Properties of Bonded GaAs Chips to GaAs Wafers**

Student : Chu-Weng Cheng

Advisors : Pro. Yew-Chung Sermon Wu

**Department of Material Science and Engineering  
National Chiao Tung University**

## **ABSTRACT**

There are some researches about comparing n-GaAs wafers bonding for different contact area of wafers; therefore, this study is mainly about factors affect n-GaAs wafer bonding by observation on the morphology of bonding interface through the use of Transmission Electron Microscopy (TEM). The purpose of this study is to discuss: (1) the effect of morphology of bonding interface of n-GaAs wafer bonding on electrical properties ; (2) the relation between different annealing time and the morphology of bonding interface; (3) the effect of native oxide on electrical properties . Comparisons of the morphology of bonding interface under different conditions are also presented.

By the way , bonding strength for wafer contact is better than chip contact . However, the resistance increased with temperature over 800 °C due to the reduction of EL2 concentration for wafer contact and chip contact . Chip contact make an asymmetric I-V Curve , which looks like a P-N junction.

## 誌謝

此份論文得以完成，必須歸功於許多人員的協助。首先，感謝 吳耀銓 教授 對於論文的指導及我研究生涯的啟發，並對於個人就學期間給予許多學業、研究上的指導與建議，以及對於生活上的關心。此外，感謝材料系的陳智教授以及胡國仁學長在百忙之中擔任我的口試委員，給予我許多實用的建議以及指教，有了你們的建議，讓此篇論文得以順利完成並讓內容更加豐富。

感謝實驗室的各位，謝謝學長姐：林博文、李美儀、賴明輝、謝承佑、賴東彥、廖錚、張志榜、王寶明、黃秉緯、鄭季豪、邱偉哲、陳奕宏、陳建誌、黃璽豪等學長姊們，給予我實驗上的幫助以及指導；也感謝我的同學們：張勝傑、趙育誠、張岱民、廖偉志，還有學弟妹：陳俞中、許堉程、鍾承璋、卓昕如、錢奐宇、鄭文豪、邱郁珈、牛振儀、胡人立、趙玟雅、彭子洋、鄭惇元、吳鴻佑、童騰賦、蕭豐慶、黃冠賓、陳柏安、黃士哲。在碩士班生活中，有你（妳）們的陪伴，讓我的生活中充滿著歡笑，留下許多美好的回憶。

## 目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	II
表目錄.....	III
一、 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	2
二、 晶圓接合技術簡介.....	6
2.1 接合理論簡介.....	6
2.2 晶圓接合技術.....	11
2.3 接合變數影響.....	14
2.4 晶圓接合的優點.....	18
三、 實驗方法.....	20
3.1 實驗流程.....	20
3.2 晶圓試片的製備.....	20
3.3 清洗流程.....	21
3.4 室溫下的接合.....	23
3.5 高溫退火過程.....	25
3.6 電性量測.....	27
3.7 微結構觀察與分析.....	29
四、 結果與討論.....	30
4.1 實驗整體架構與接合參數考慮.....	30
4.2 介面微觀結構分析.....	32
4.3 電性量測分析.....	38
五、 結論.....	52
六、 未來工作.....	54
參考文獻.....	55

## 圖目錄

圖 1.1 砷化鎵晶格示意圖.....	2
圖 1.2 直接能隙(GaAs)和間接能隙(Si)能帶示意圖.....	4
圖 1.3 砷化鎵同相結構.....	5
圖 1.4 砷化鎵反相結構.....	5
圖 2.1 晶圓接觸初期三種吸引力.....	7
圖 2.2 表面張力作用下的兩晶片接觸情形.....	8
圖 2.3 兩晶片相接觸後靜電吸引力作用過程.....	9
圖 2.4(a)曲率差異造成擴散現象 (b)退火後的表面鍵結.....	11
圖 2.5 陽極接合法的實驗配置圖.....	12
圖 2.6 一般化學旋塗接合流程圖.....	14
圖 2.7 表面殘留細微粒子對接合面積的影響.....	15
圖 2.8 不同材料在不同溫度下熱膨脹係數變化.....	16
圖 2.9 退火溫度與退火時間對接合強度的影響.....	17
圖 3.1 試片切割示意圖.....	20
圖 3.2 精密晶圓切割機(Dicing Saw).....	21
圖 3.3 試片清洗流程圖.....	22
圖 3.4 旋轉角度接合面<110>投影示意圖.....	23
圖 3.5 夾具分解示意圖.....	24
圖 3.6 夾具結合示意圖.....	24
圖 3.7 高溫退火器材.....	26
圖 3.8 鉬與不鏽鋼熱膨脹係數對溫度圖.....	26
圖 3.9 電性量測試片製備流程圖.....	28
圖 3.10 電性量測示意圖.....	28
圖 4.1 400°C 2hr 劉柏均學長接合 N-GaAs 介面形態.....	33
圖 4.2 500°C 2hr 劉柏均學長接合 N-GaAs 介面形態.....	33
圖 4.3 600°C 2hr 劉柏均學長接合 N-GaAs 介面形態.....	34
圖 4.4 850°C 2hr 劉柏均學長接合 N-GaAs 介面形態.....	34
圖 4.5 600-900°C 2hr 使用具有網格狀結構接合 N-GaAs 介面形態.....	35
圖 4.6 溫度升高時接合介面的變化.....	36
圖 4.7 具網格狀結構矽晶圓與砷化鎵晶圓接合之電子顯微鏡影像.....	37

圖 4.8 N-GaAs / N-GaAs 600°C 僅拋光未減薄 .....	39
圖 4.9 N-GaAs / N-GaAs 600°C 僅拋光加減薄 .....	40
圖 4.10 N-GaAs/N-GaAs 600°C 僅拋光未減薄直到露出網格狀結構.....	40
圖 4.11 600°C 試片各編號界面與表面紅外光偵測光學顯微鏡.....	42
圖 4.12 600°C 試片各編號界面電性量測分析 .....	43
圖 4.13 700°C 試片各編號界面與表面紅外光偵測光學顯微鏡.....	44
圖 4.14 700°C 試片各編號界面電性量測分析 .....	44
圖 4.15 400-850°C 劉柏均學長砷化鎵晶片界面電性量測分析結果.....	46
圖 4.16 500~900°C 砷化鎵試片界面電性量測分析圖 .....	47
圖 4.17 500~900°C 砷化鎵試片界面之正偏壓電性量測對數分析圖.....	48
圖 4.18 500~900°C 砷化鎵試片界面之負偏壓電性量測對數分析圖.....	48
圖 4.19 500°C 砷化鎵試片界面電性量測分析圖 .....	50
圖 4.20 砷化鎵試片界面趨勢圖.....	50
圖 4.21 砷化鎵試片接合情況圖.....	51

## 表目錄

表 1.1	300K 時砷化鎵半導體的基本性質.....	3
表 4.1	N-GaAs/N-GaAs 晶圓接合結果.....	31

## 一、緒論

### 1.1 前言

在科技一日千里的今天，人類為了追求更方便快速且高效能的生活，產業發展也不斷受到挑戰，近年來，尤其以半導體材料的整合應用更是倍受各界矚目，例如：積體電路(Integrated circuits)、光電半導體元件(Optoelectronic semiconductor device)、高速電子元件(High speed electronics)或太陽能電池(Solar cells)等。為了滿足消費者越來越全方位的需求，傳統單一材料設計元件特性已遭遇瓶頸，多種異質材料整合勢在必行，藉由不同材料物理性質(如機械強度、導熱性、反射率)，化學性質(如活化能)、電子特性(如原子能階、電子電洞遷移率、導電率)之差異，期望藉此截長補短，以擬補不足之缺憾。

過去，異質磊晶(Heteroepitaxial)為常見整合異質材料的主流方式，然而，不同材料間的晶格常數不匹配(Lattice mismatch)，往往使應力累積而容易在界面產生穿透性差排<sup>[1][2][3]</sup> (Threading dislocation)，這些穿透性差排在元件運作時常常捕捉內部載子而成為捕捉中心(Trap center)，這將大大影響元件特性，此外，磊晶晶面受限於基板方向，也使異質材料整合蒙上一層陰影。

近年來，晶圓接合技術(Wafer bonding technique)的出現，為異質材料整合開啟了一扇明窗，晶圓接合技術不僅成功消除傳統磊晶所遭遇到的

難題，且已在各種光電半導體元件製作上皆有傑出的運用，例如：高亮度發光二極體<sup>[4][5]</sup>、雷射二極體、垂直共振腔面射型雷射(VCSEL)<sup>[6]</sup>、光電整合電路(OEICs)、光偵測器(Photodectors)、異質接面電晶體(HBT)<sup>[7][8][9]</sup>、光子晶體等應用層面。

## 1.2 研究動機

首先說明一下砷化鎵的一些基本特性以及優勢所在，這也是個人對砷化鎵材料感興趣的原因之一。砷化鎵在晶體學上是閃鋅礦結構(Zincblende)，砷原子和鎵原子佔據的位置如圖1.1所示，砷化鎵位共價鍵結晶體，以 $sp^3$  混成軌域鍵結。表1.1為砷化鎵的一些重要的基本特性，另由於砷化鎵劇毒性，研究時必須特別小心安全。

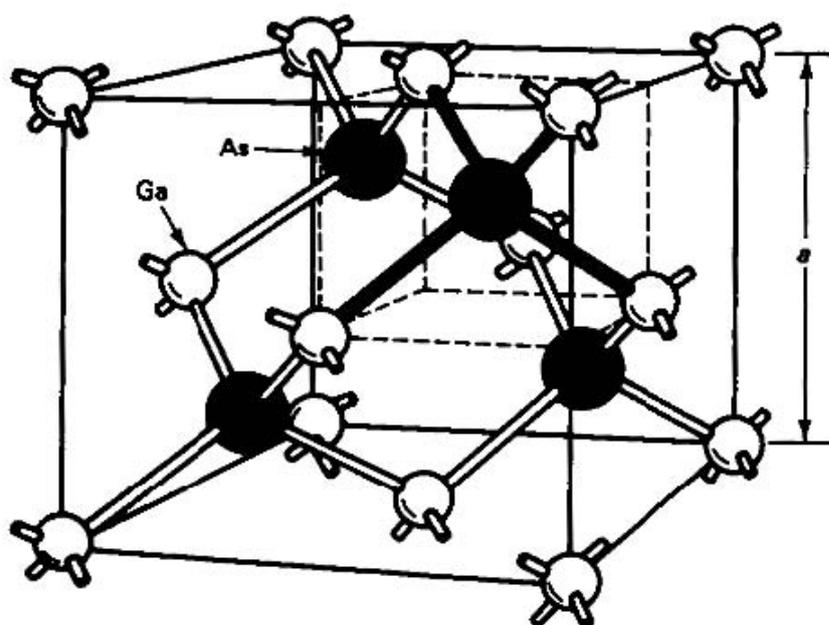


圖1.1 砷化鎵晶格示意圖<sup>[10]</sup>

---

<b>Crystal Structure</b>	<b>Zinc Blende</b>
<b>Group of Symmetry</b>	<b><math>T_D^2-F43m</math></b>
<b>Number of Atoms in 1 cm<sup>3</sup></b>	<b><math>4.42 \times 10^{22}</math></b>
<b>De Broglie Electron Wavelength</b>	<b>240 Å</b>
<b>Debye Temperature</b>	<b>360 K</b>
<b>Density</b>	<b><math>5.32 \text{ g cm}^{-3}</math></b>
<b>Dielectric Constant ( Static )</b>	<b>12.9</b>
<b>Dielectric Constant ( High Frequency )</b>	<b>10.89</b>
<b>Effective Electron Mass <math>m_e</math></b>	<b><math>0.063m_0</math></b>
<b>Effective Hole Masses <math>m_h</math></b>	<b><math>0.51m_0</math></b>
<b>Effective Electron Masses <math>m_{lp}</math></b>	<b><math>0.082m_0</math></b>
<b>Electron Affinity</b>	<b>4.07 eV</b>
<b>Lattice Constant</b>	<b>5.65325 Å</b>
<b>Optical Phonon Energy</b>	<b>0.035 eV</b>

---

表1.1 300K 時砷化鎵半導體的基本性質<sup>[10]</sup>

## GaAs 的優勢

GaAs 是屬於光電半導體，砷化鎵具有直接能隙(如圖1.2)、高頻、抗輻射、耐高溫等特性，而其中，直接能隙材料中價帶與導帶間電子電洞對的複合因不需要作動量的轉變，所以相對於間接能隙材料容易，光轉換效率亦較高，所以在光電積體電路(optoelectronic integrated circuits)的應用較為廣泛。

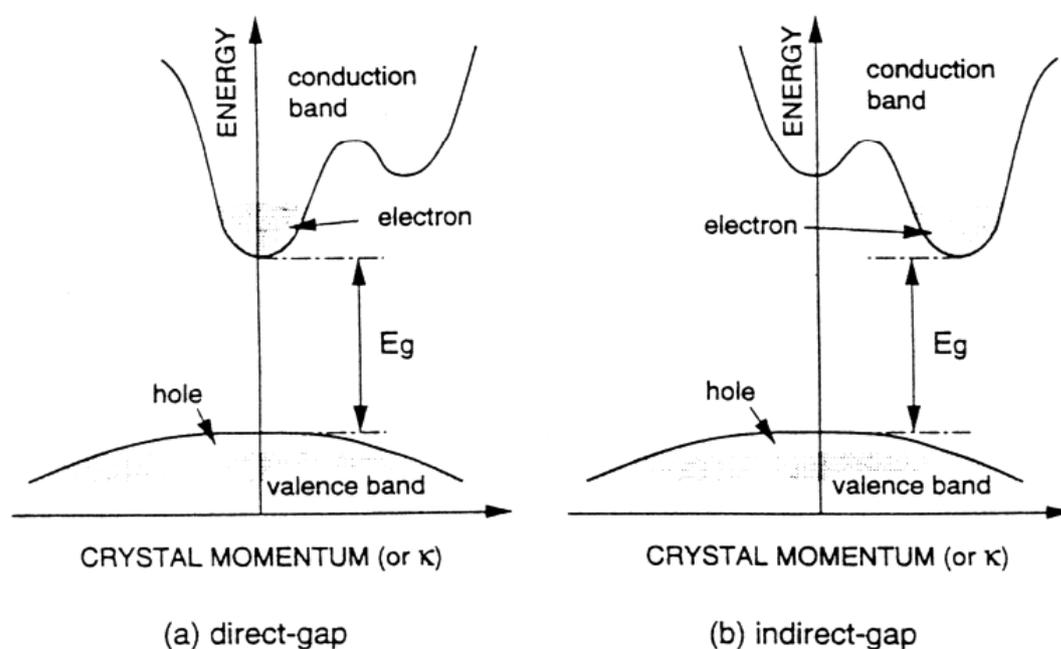


圖1.2 直接能隙(GaAs)和間接能隙(Si)能帶示意圖<sup>[10]</sup>

相較於矽晶圓的接合研究，三五族晶圓接合的研究相對較晚。其中，又以砷化鎵晶圓相互接合的情況較為單純，亦是研究異質接合的基礎。

藉由實驗室學長盧正倫與彭顯智的實驗成果中顯示砷化鎵接合同相和反相之間的電性和介面型態將有極大的不同。同相結構(如圖1.3)乃指其中一片接合的砷化鎵晶片旋轉90°與另一未旋轉之砷化鎵晶片接合，所得的

結構為同相，同相材料接合猶如單一塊材般完美，可適用於後續加工；反相結構(如圖1.4)乃指其中一片接合的砷化鎵晶片旋轉 $180^{\circ}$ 與另一未旋轉之砷化鎵晶片接合，所得的結構為反相，反向材料接合如雙晶結構，材料沿著介面呈現對稱的結構。

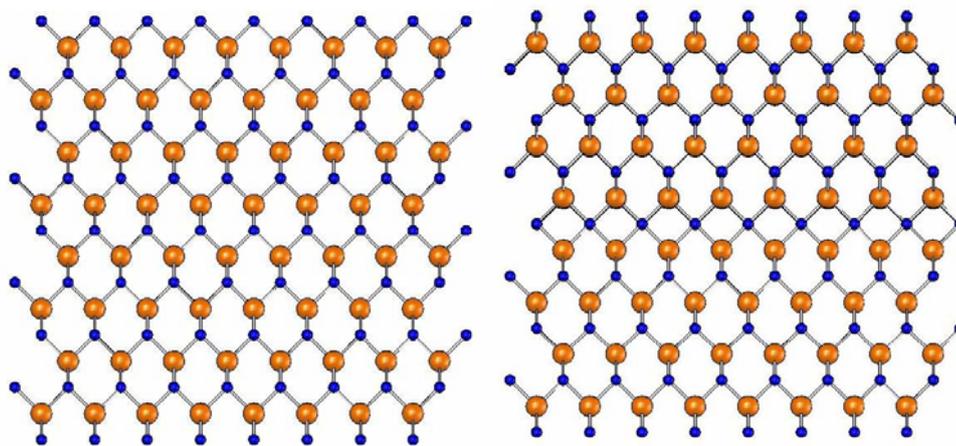


圖1.3 砷化鎵同相結構<sup>[10]</sup>

圖1.4 砷化鎵反相結構<sup>[10]</sup>

本實驗將採用N型砷化鎵晶圓以同相方式相互接合，並藉由調整不同退火溫度等其他實驗參數，希望可以有效的觀察界面接合型態以及電性表現，也期望能藉由控制變因找出對電性介面影響的關鍵。

此外，過去前人研究砷化鎵試片接合皆採用大面積的接合方式，接合完畢後在切成需要大小去作量測，容易產生正向以及剪切應力，使得接合強度受到影響，也不易選擇百分之百接合面積作測量，使應用受到侷限，本實驗亦將探討其中同與不同之處，供後續之人做進一步的研究。

## 二、晶圓接合技術簡介

### 2.1 接合理論簡介

一般所謂晶圓接合技術就是將兩片晶圓面對面相接，利用此時產生微弱的吸引力讓兩片晶圓預接合(Pre bond)，或施以同軸壓力(Uni-axis stress)或施以高溫退火，使兩晶圓表面產生化學鍵互相鍵結，並使鍵結變強，最後結合有如塊材般的強度特性。現行多種晶圓的接合方式又可以兩片晶圓中間是否存在其他介質物做黏著劑接合為分類，可簡單將晶圓接合技術粗略分成兩類：A. 使用膠(Glue)或中間介質層(Intermediate layer)做接合，稱為中間介質層晶圓接合(Intermediate layer wafer bonding)；B. 不使用中間介質層做接合稱直接晶圓接合(Direct wafer bonding)或是融合接合(Fusion bonding)。然而，在直接晶圓接合方面通常可被分成兩階段，第一個階段是初期的晶圓接觸 (Wafer contacting)，另一階段是晶圓鍵合(Wafer binding) 階段，以下將分別做介紹。

#### 2.1.1 晶圓初步接觸的作用力(凡得瓦力、靜電力、毛細作用力)

在兩片材料接觸初期，產生一些初期的交互作用力，讓兩試片具有一定程度吸引力，可將之簡單分類為以下三種：(1)凡德瓦爾力；(2)毛細作用力；(3)靜電力；圖2.1 顯示出了三種作用力的狀況。

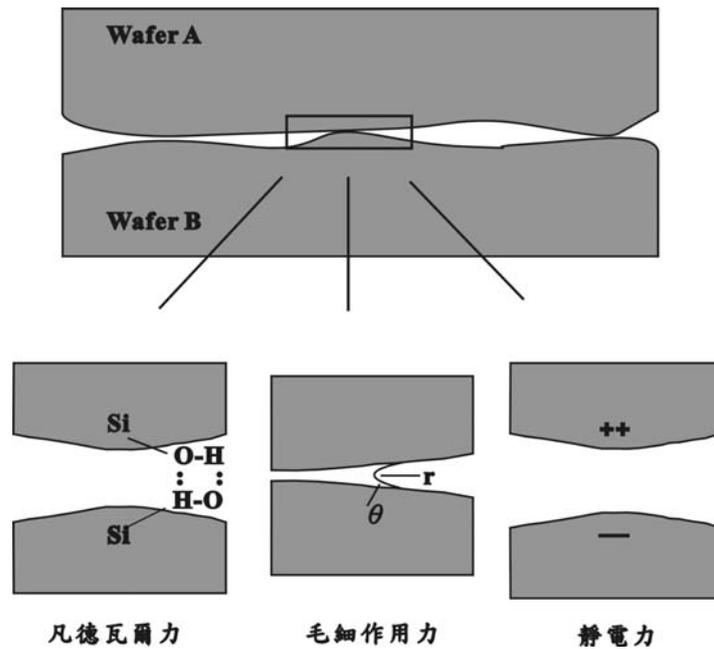


圖 2.1 晶圓接觸初期三種吸引力<sup>[11]</sup>

### 2.1.1.1 凡德瓦爾力

單純藉由非偶極分子誘發的凡德瓦爾力<sup>[12]</sup>，在晶圓初期接觸的階段扮演很搶眼的角色，無論是矽(Si)或者砷化鎵(GaAs)等半導體皆是對稱結構，所以單純非偶極誘發的凡德瓦爾力難以存在於完全無氧化層結構的矽(Si)或者砷化鎵(GaAs)晶圓上，舉例來說，當我們使用氫氟酸(HF)除去氧化層時，會有很多的離子殘留在介面處形成 H-F、H-O 和 H-N 的氫鍵(Hydrogen bond)結構，兩片晶圓即是藉由這些產生在接合介面的極性分子吸引，因此凡德瓦爾力大部份表現在兩接合介面處。

### 2.1.1.2 毛細作用力

當液體存在接觸介面，毛細作用力就容易出現，雖然一般的晶片都具有鏡片拋光的表面，但事實上，晶片表面微觀卻不是完全平整的，毛細作用力的大小跟以下幾個因素有關：兩個晶片之間的距離、液體的表面張力、液體在兩介面之間所擁有的曲率半徑 $r$ 以及液體和晶片之間的夾角 $\theta$ 等等。其真正的作用力可以用下式來表示<sup>[13]</sup>：

$$F_c = 2\pi R\alpha(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

$R$ : 液體曲率半徑

$\alpha$ : 液體黏滯性

$\theta$ : 液體與晶片夾角

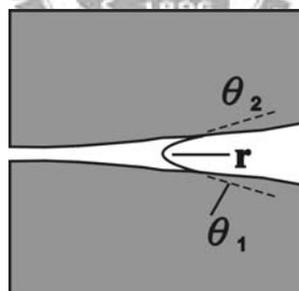


圖2.2 表面張力作用下的兩晶片接觸情形<sup>[14]</sup>

### 2.1.1.3 靜電力

靜電吸引力又稱為庫倫(Coulombic)吸引力，當兩晶圓接合在一起的時，表面接觸而達到化學平衡時會產生費米能階效應 (Fermi level effect)，為達到這平衡狀態電荷會相互流動，最後在介面形成不可動的正

負離子，而兩晶圓就靠這些正負離子的吸引力吸引在一起<sup>[15]</sup>。通常庫倫吸引力大小會與兩晶片的距離平方成反比，亦即，當兩晶片靠的越近這種庫倫力將會越強，下式可以表示其引力和距離的關係<sup>[16]</sup>：

$$F_i = \frac{32\sigma^2}{\pi^2 \epsilon \epsilon_0} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}\pi d}{l}\right)$$

$\epsilon$ ：介在兩個物體中之物質介電常數

$\epsilon_0$ ：真空中的電容值

$l$ ：兩物質的間距

$\sigma$ ：電荷密度

$d$ ：由物體的幾何學來決定的距離

化學平衡過程(電子-電洞流動)

靜電力產生

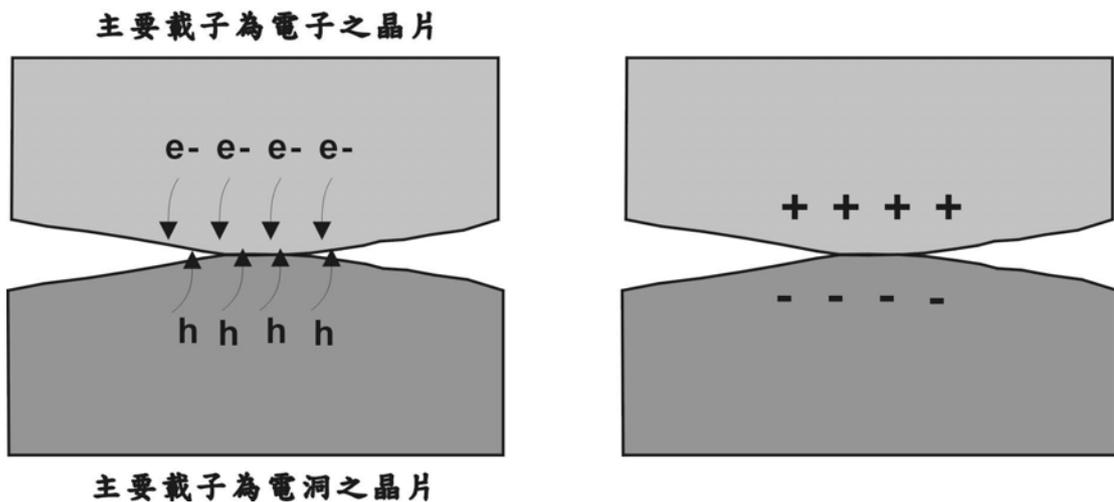


圖2.3 兩晶片相接觸後靜電吸引力作用過程<sup>[17]</sup>

## 2.1.2 晶圓產生鍵合的驅動力與機制

由於固態材料表面的原子排列並不如塊材內部般整齊，會有許多的未鍵合的鍵(Dangling bond)，造成了重構狀態(Reconstructed state)的存在，作為材料外部表面與內部結構的連結，這些表面結構相較於塊材內部是不平衡的狀態，因此具有比較高的能量，由熱力學我們可以知道在適當的溫度與應力的作用，此兩片晶片表面(two surface)的重構區域會發生側向成長的行為使重構狀態的表面消除，而以晶界(one grain boundary)的型態代替<sup>[18]</sup>，藉此作用來降低總能量，這是以表面能的角度來分析接合的驅動力；此外，以自由能的觀點來分析接合的驅動力，表面張力也是晶圓接合的驅動力之一，試片表面有許多高低起伏(Roughness)存在，原子會由表面曲率大處( $r > 0$ )擴散至表面曲率小( $r < 0$ )的地方，如下方圖示。藉由以上兩大驅動力，可使試片獲得較高的接合強度。

體積自由能和表面曲率的關係

$$\frac{dG}{dV} = \frac{2\gamma}{r}$$

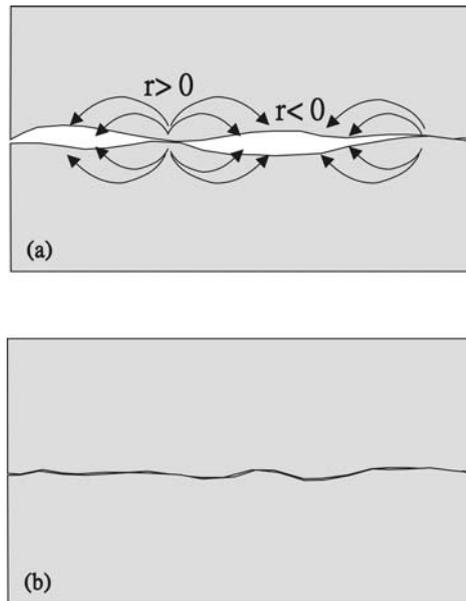


圖2.4 (a)曲率差異造成擴散現象 (b)退火後的表面鍵結<sup>[19]</sup>

## 2.2 晶圓接合技術

由前述可知由中間界質層(Intermediate layer)的使用可將晶圓接合技術粗分為兩類,個人可在依不同的接合條件又可細分為以下幾類<sup>[20]</sup> :

### 1. 直接晶圓接合 (Direct Bonding)

所謂直接晶圓接合即是在晶圓接合時不靠任何的中間介質層,例如:膠或者金屬層,直接由晶圓相互接觸後,由高溫及同軸壓力使兩片晶圓產生接合,有以下幾類接合法:

#### a. 融合接合法 (Fusing bonding)

所謂融合接合即是一般泛指之晶圓接合,將預接合的試片經清洗後在潔淨室面對面接觸,利用兩晶圓間的凡德瓦爾力或氫鍵等初步作

用力接觸在一起，在置入氣氛爐中做高溫退火處理使進一步的鍵結產生，使介面強度能達到如塊材般的水準。

#### b. 陽極接合法 (Anodic bonding)

接合的晶片中其一為導體或半導體，另一晶片為具有可移動離子(如：鈉或鋰)之絕緣體時即可使用陽極接合法來執行晶片接合，簡單的操作原理是將正極接在導體或(半導體)上，負極接於含離子的絕緣體上，如圖 2.5 所示，因界面不導通，而在界面附近形成電荷聚集，造成空間電場，也就是所謂的靜電吸引力，因具有靜電力加成作用加熱溫度就不用如一般融合接合時的高溫，可大幅降低製程溫度，以避免兩材料在製程時熱膨脹係數不同所造成的試片破裂

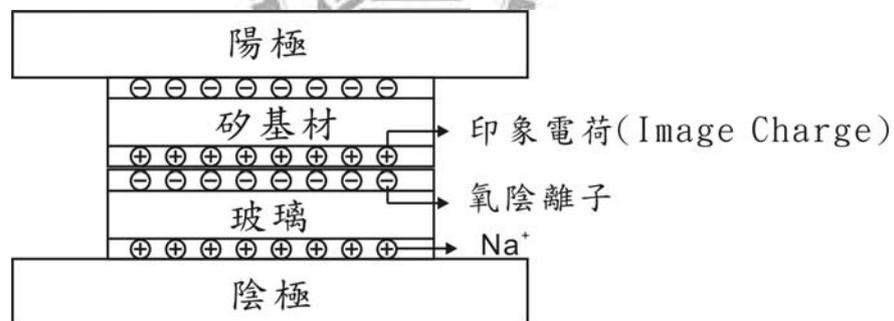


圖 2.5 陽極接合法的實驗配置圖<sup>[21]</sup>

#### c. 低溫接合 (Low Temperature Bonding)

高溫接合製程雖可增加接合強度，但往往會對材料性質產生影響，尤其是異質材料的接合更會產生很大的熱應力導致試片破裂，且大尺寸接合的試片上應用會產生困難，因此採用低溫接合降低熱應力

的影響，主要有幾種方式：低溫長時間退火、超高真空中進行接合退火、表面活化晶圓接合。以能量的觀點看低溫接合技術，低溫長時間退火增加跨越能障的機會，超高真空進行接合降低所需跨越能障的大小，而表面活化處理使的初始能階提高，使接合所需跨越的能障降低；三種方式均是為了使試片不在溫度的驅動下能夠跨越能障形成進一步的鍵結接合。

## 2. 間接晶圓接合 (Indirect Bonding)

間接接合顧名思義是利用中間質層來進行晶圓接合，而非靠兩晶片本身來接合，目的是為了要降低接合的溫度或者是比較特別的用途例如合金化之用，個人可將之分為下列幾種：

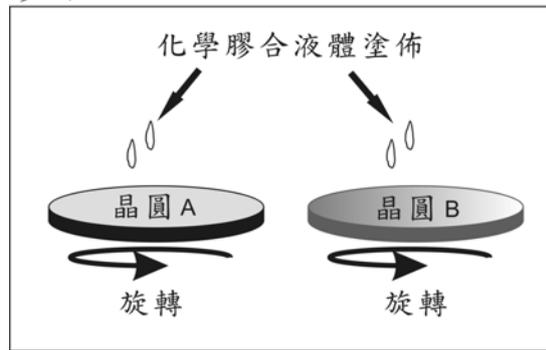
### a. 共晶接合法 (Eutectic bonding)

先將兩具有共晶相的金屬分別鍍在兩片不同的晶片上，經過清洗後將兩片晶片相接觸，於共晶溫度執行退火，此時兩種金屬就會產生共晶相，利用此方式材料可在相較低溫度下進行接合。

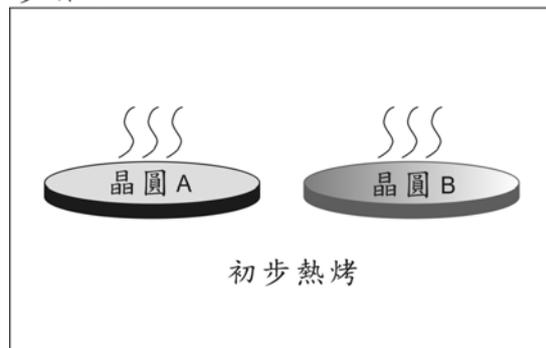
### b. 塗佈化學介質層接合/黏接接合法(Adhesive Bonding)

首先將在室溫下為黏稠狀的液體/化學物質塗佈在晶圓表面，在進行升溫退火後此塗佈層會變的穩定且具有強度，故可將兩片試片黏貼固定，目前廣泛被使用的有旋塗式玻璃(Spin on glass; SOG)和BCB(Bzocyclobutene)膠<sup>[22][23]</sup>。

步驟 1



步驟 2



步驟 3

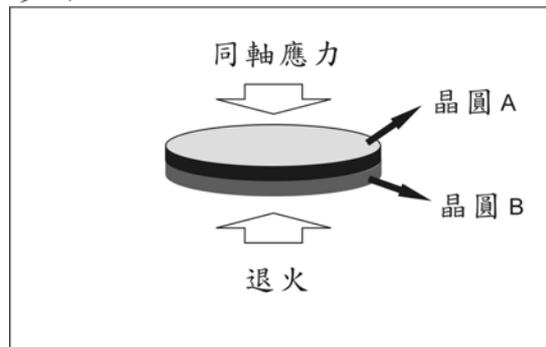


圖2.6 一般化學旋塗接合流程圖<sup>[24]</sup>

## 2.3 接合變數影響

### 2.3.1 晶圓表面品質

從晶圓表面的品質來分類，有三個參數可以做為觀察的重點：平坦度 (Flatness)、平行度 (Parallelism) 和晶圓表面的平滑度

(Smoothness)，平坦度指的是巨觀上厚度的變化，平行度則是相對翹曲的程度，平滑度指的是微觀上的粗糙程度，表面的不平整會造成缺陷如孔洞等，亦會造成未接合區域的增加。晶圓接合需要乾淨和平整拋光的鏡面，表面的不平整在接合後會留下許多的缺陷例如孔洞等，也會造成接合面的牛頓環，牛頓環的出現代表接合不完整的地方。孔洞若是超過了一個臨界值，將會造成未接合的區域<sup>[25]</sup>，也可能造成試片將無法接合，因此晶圓表面的粗糙度一定要在某一度之下，清潔表面也需要做到潔淨的目的，盡量不讓雜質顆粒(Particle)或者其他污染物殘留在表面，殘留物對於表面的平整也會造成影響，通常造成的未接合區域比殘留物本身還要大許多如圖2.7。

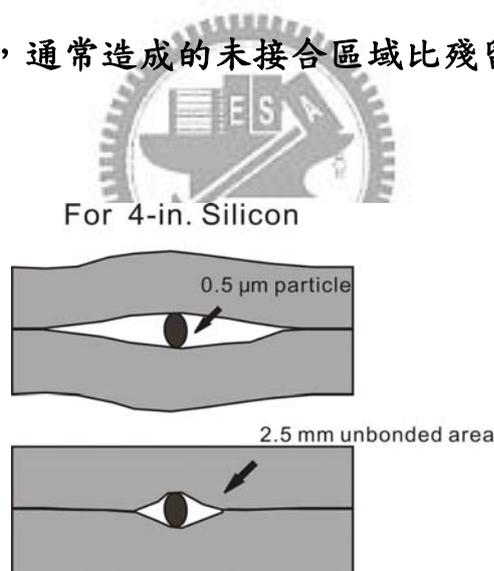


圖 2.7 表面殘留細微粒子對接合面積的影響<sup>[26]</sup>

### 2.3.2 熱膨脹係數差異

晶圓接合經歷高溫退火的過程，由於材料熱膨脹係數皆不盡相同，在升降溫過程中，材料將累積相當大的熱應力在界面，尤其在降溫的過程，熱應力會拉扯在高溫已鍵結的異質界面，並由微觀產生差排釋放應力，擴

大成巨觀的裂縫使試片分開或脆裂。目前研究顯示低溫長時間退火，表面活化處理，改變表面形貌等等，都可有效的減少熱應力影響。下圖顯示了各種不同的材料在不同的溫度下熱膨脹係數的變化：

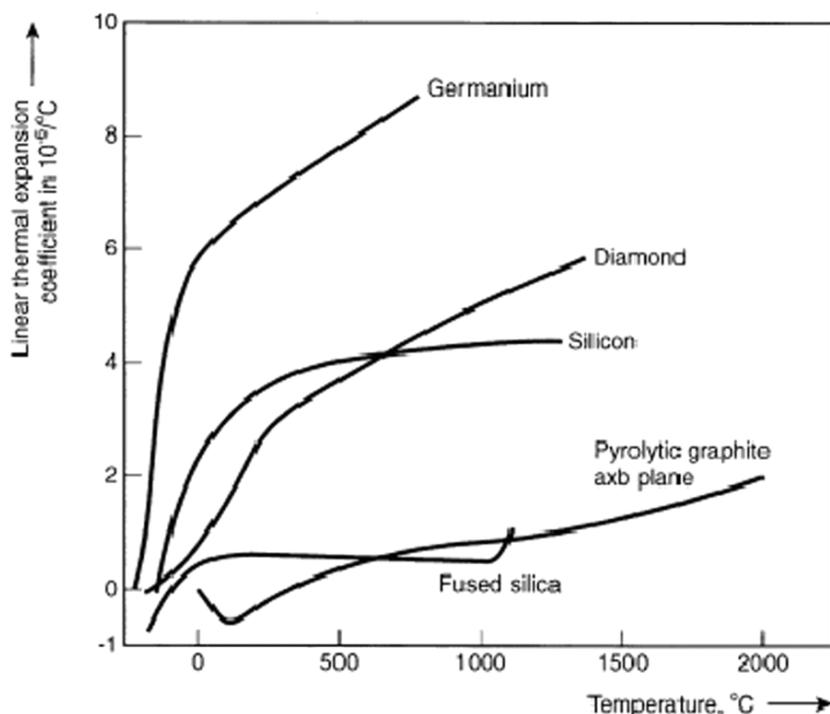


圖2.8 不同材料在不同溫度下熱膨脹係數變化<sup>[27]</sup>

### 2.3.3 接合環境

接合環境對晶圓接合品質有重大的影響，在真空系統中清洗後接合可避免水氣捕捉在界面以及污染物的產生，接合的強度約是在空氣中接合的兩倍，但真空系統造價昂貴。在有機溶液中接合可達到類似的效果，主要是減少水氣捕捉在界面的現象，水氣在高溫形成氣體，若無路徑使之離開介面，會產生氣泡或孔洞降低接合強度，有機溶劑相較於水，較不易被介面捕捉，本實驗選用的有機溶劑為異丙醇(IPA)。

### 2.3.4 退火時間與溫度

退火是晶圓接合技術的關鍵步驟，圖 2.9 為矽晶圓接合強度與退火溫度、時間的關係圖<sup>[32]</sup>，溫度與時間是接合過程中相當重要的兩項變數，晶片在室溫接觸(contact)後產生的微弱吸引力，須經過高溫退火後方可產生較強的共價鍵結，然而材料接合需考慮熱應力的作用，高溫退火產生的熱應力會導致試片的碎裂，選擇適當的退火溫度與時間方可取得接合強度與熱應力間的平衡。另外高溫退火造成原子的擴散以及參雜濃度的改變，亦是界面分析的重點。

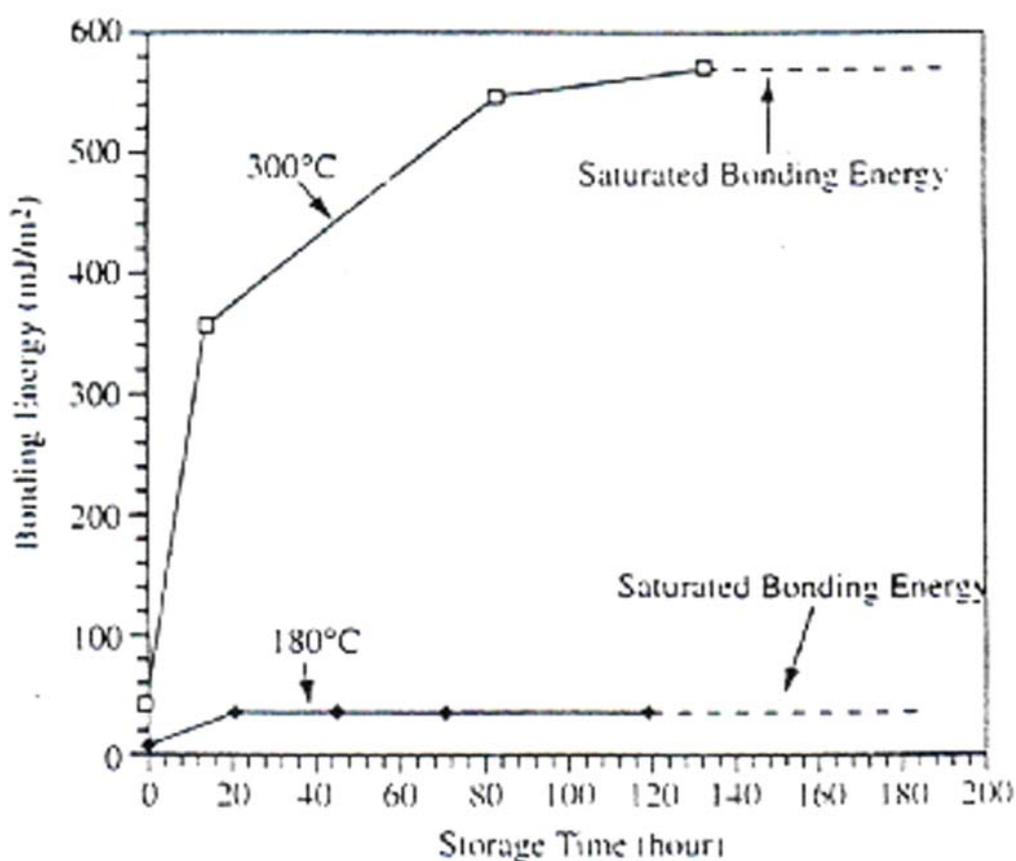


圖2.9 退火溫度與退火時間對接合強度的影響<sup>[28]</sup>

### 2.3.5 退火氣氛

為了使接合試片有良好的接合介面及電流電壓特性，需避免空氣中的氧易被界面補捉而造成額外的氧化層出現，選用惰性氣體做為保護性氣氛可避免此現象，甚至可選用還原性氣氛將表面的氧帶走已達清潔的目的<sup>[29]</sup>，在本實驗中，是使用氬氣(Ar)來作為還原性氣氛。

### 2.3.6 同軸應力

試片的退火過程中可施加一同軸的應力，使試片表面的原子互相接觸面積增加。再藉由熱與壓力的幫助讓原子間的接合面積增加，形成較強的共價鍵結完成接合。壓力大小比須適中，壓力過大，試片將無法承受而產生破裂，過小則無助於接合的完成。壓力也需要均勻的施加於試片上，不均勻的壓力會導致接合失敗或是接合的強度不一。

## 2.4 晶圓接合優勢

使用晶圓接合有下列幾項優點<sup>[30]</sup>：

#### A. 使晶格不匹配(lattice mismatch)所產生的差排(dislocation)

和缺陷(defect)僅限於接合界面區域，而不會延伸至元件活性層而影響元件特性。

- B. 結合面牢固，接合的材料像單一的晶體材料一樣，完全適合後續加工如於切割、研磨、拋光等機械加工技術。
- C. 直接接合晶片，可以實現低電阻歐姆性質的導電特性及高透明度的光學性質，滿足了光電元件的需求。
- D. 增加了元件設計的自由度。
- E. 設備簡單、價格便宜。



### 三、實驗方法

#### 3.1 實驗流程

本實驗主要分為，工作試片製備、清洗流程、室溫接合、高溫接合、電性量測、微結構觀察與分析，室溫接合包含了試片在有機溶液中接合的動作。高溫接合是本實驗最重要的控制變因之一，高溫接合在本實驗中使用了五個溫度， $500^{\circ}\text{C}$ 、 $600^{\circ}\text{C}$ 、 $700^{\circ}\text{C}$ 、 $800^{\circ}\text{C}$ 、 $900^{\circ}\text{C}$ 。

#### 3.2 晶圓試片的製備

本實驗使用的晶片為3吋(100)面N型砷化鎵晶圓，參雜物為矽，濃度約 $10^{18}$ ，厚度約 $350\ \mu\text{m}$ ，試片製備以精密晶圓切割機(Dicing saw)對準平邊 $[0\bar{1}\bar{1}]$ 垂直水平方向切割成 $8\text{mm}\times 8\text{mm}$ 大小，深度約 $120\ \mu\text{m}$ 的網格狀結構(Mesa)。示意圖如下：

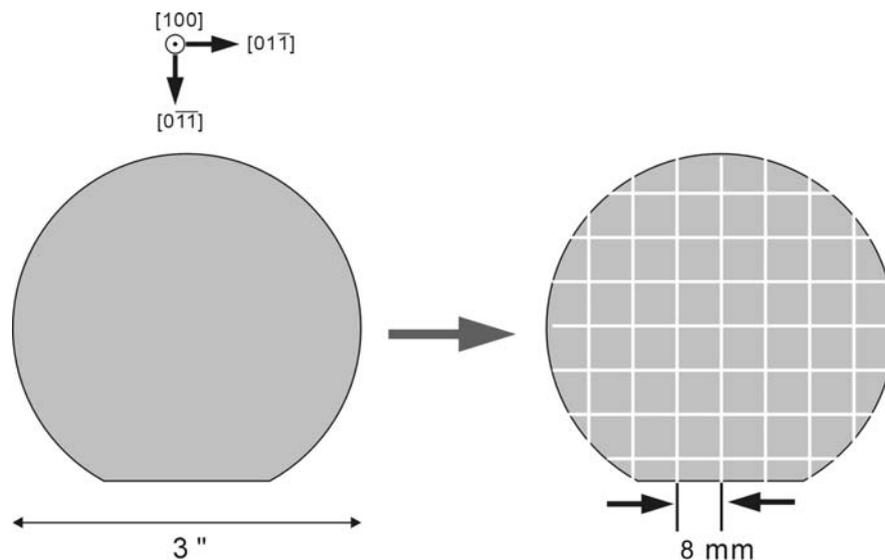


圖 3.1 試片切割示意圖



圖3.2 精密晶圓切割機(Dicing Saw)

### 3.3 清洗流程

首先將試片取出靠近平邊的地方做記號，以確定試片的方向，接著把試片放上破片用載具並用去離子水(DI water)沖洗 5 分鐘，接著放入丙酮(ACE)內用超音波震盪器震盪 5 分鐘，藉此清除表面附著的微細粒子與黏著性有機物雜質；再來將試片放入異丙醇(IPA)當中浸泡 5 分鐘來除去前一個步驟殘存在試片上的水氣或丙酮；然後再將試片放入硫酸與雙氧水的混合溶液 ( $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:10$ )內 5 分鐘，將表面有機物脫水碳化，雙氧水將之氧化帶離表面，使表面有機污染物清除；再來我們使用氫氟酸(DHF)快速浸泡 20 秒，除去試片表面的原生氧化層(Native oxide)。清洗完成後呈

現疏水性表面，緊接著把清洗完成的試片放入異丙醇(IPA)中面對面進行接觸，文獻中<sup>[31]</sup>指出，在甲醇或異丙醇中進行室溫接合的步驟，可以有效的提高接合的強度，且由於有機溶液異丙醇揮發速率較快，也可以順便將殘留在表面的水氣都帶走，而不會影響到介面處接合的結果。整體的清洗過程流程圖如下所示：

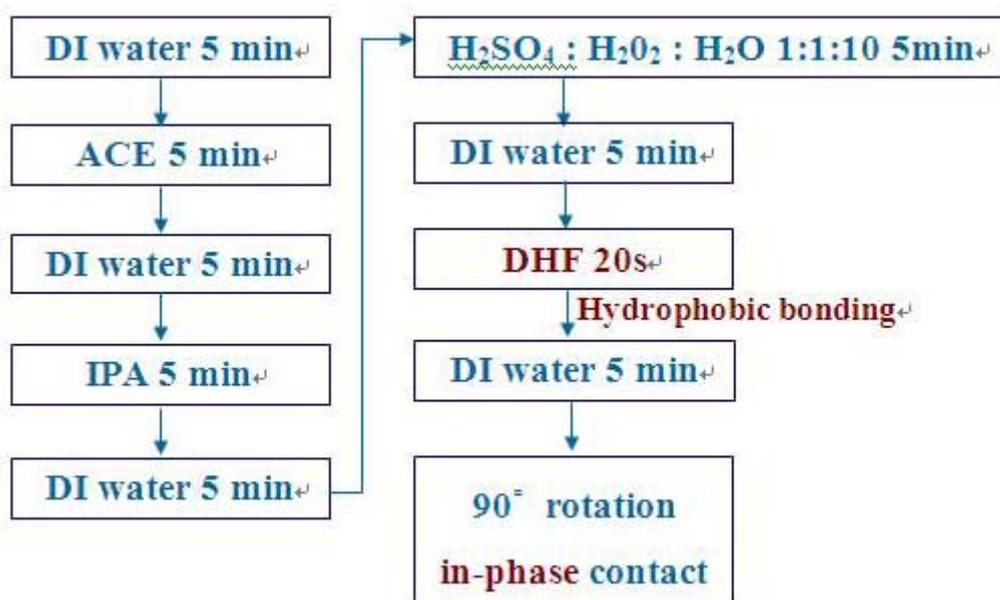


圖 3.3 試片清洗流程圖

旋轉角度對晶圓接合介面也有很大的影響，旋轉 90° 做接合，稱這種方向為順向(In phase)接合方向，旋轉 0° 或 180° 接合則稱為反向接合方向(Anti phase)<sup>[30]</sup>。由[110]方向投影的原子結構來看，反向接合的介面會產生雙晶(Twin interface)的排列方式，順向接合則無此雙晶介面的產生，如下圖所示。本實驗是以晶圓平邊記號為準，旋轉 90° 做順向接合，且必須注意邊角的對齊，避免旋轉角度對介面分析及電性分析造成的誤判。

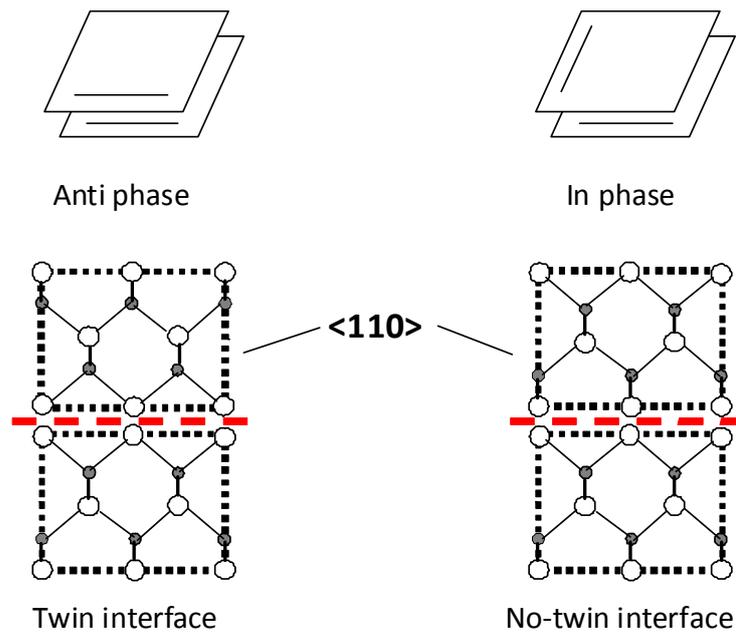


圖 3.4 旋轉角度接合面 $\langle 110 \rangle$ 投影示意圖<sup>[32]</sup>

### 3.4 室溫下的接合

當兩片試片在異丙醇當中順向接合疊合完整後，即取出放置在無塵紙上面，此時要注意取出的過程中不能使的兩試片間有滑動而使介面觸碰到空氣，緊接著就將兩試片放置在石墨片之間，並且使用本實驗室特製的夾具(Fixture)，將之鎖好後，即可以接著後續的高溫退火步驟。實驗室特製的夾具是由下列幾項零件組成：(1)鉬螺帽 (2)鉬螺旋棒 (3)不鏽鋼(304)圓盤 (4)石墨墊片，而夾具的分解示意圖以及結合示意圖如下所示：

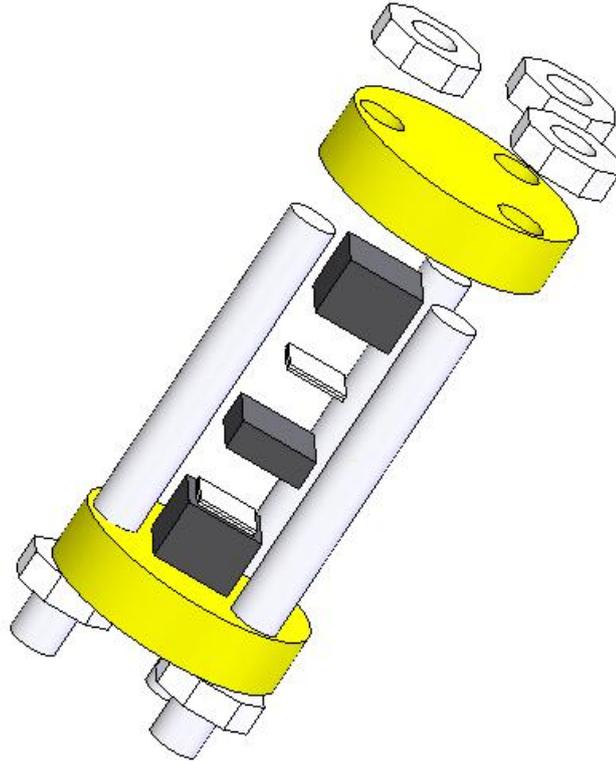


圖3.5 夾具分解示意圖<sup>[33]</sup>

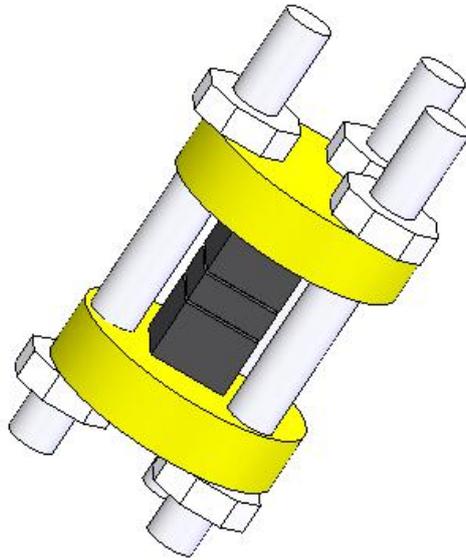


圖3.6 夾具結合示意圖<sup>[33]</sup>

### 3.5 高溫退火過程

在本實驗退火的溫度區間內，不銹鋼的熱膨脹係數和鉬的熱膨脹係數差異很大，如圖 3.8 所示。在高溫退火過程中，不銹鋼往外膨脹的趨勢將被相對不太膨脹的鉬螺絲給限制住，大部分的熱膨脹形變都往內進行進而對試片施加同軸應力，施加應力的估計值大約為 10MPa，隨溫度區間有所變化。石墨墊片的熔點約 3650°C，遠大於本實驗操作的溫度，可避免試片黏著在不銹鋼上，且石墨的表面具有相當多的微小孔隙，本實驗選用的砷化鎵晶片中砷元素在高溫很容易昇華成氣體，多次操作後吸附在石墨孔隙中的砷氣體將在砷化鎵/石墨介面形成身保護性氣氛，避免過多的砷蒸氣產生。

夾具推入以長條型熱電偶加熱之長形爐管中做高溫退火，退火氣氛選用氬氣(Ar)做保護性氣氛。升溫前，須抽取管內氣體後再通入氬氣，通入的壓力需大於 1 大氣壓，避免外界的空氣進入爐管中造成過多的氧化層在界面產生，反覆通入三次氬氣以降低爐管內的氧化氣氛含量。完成通氣後開始升溫，升溫的速率最快 20~30°C 每分鐘，最慢 5~10°C 每分鐘，隨溫度高低做變化。升至所選擇的溫度後再進行一次抽氣通氣動作，避免高溫中由爐管管壁逸散出的水氣(Out gassing)造成過多的氧化層。升溫至選定溫度後震盪最高不超過 10°C，降溫採用爐冷(Furnace cooling)，冷卻速率約 20~40°C 每分鐘。

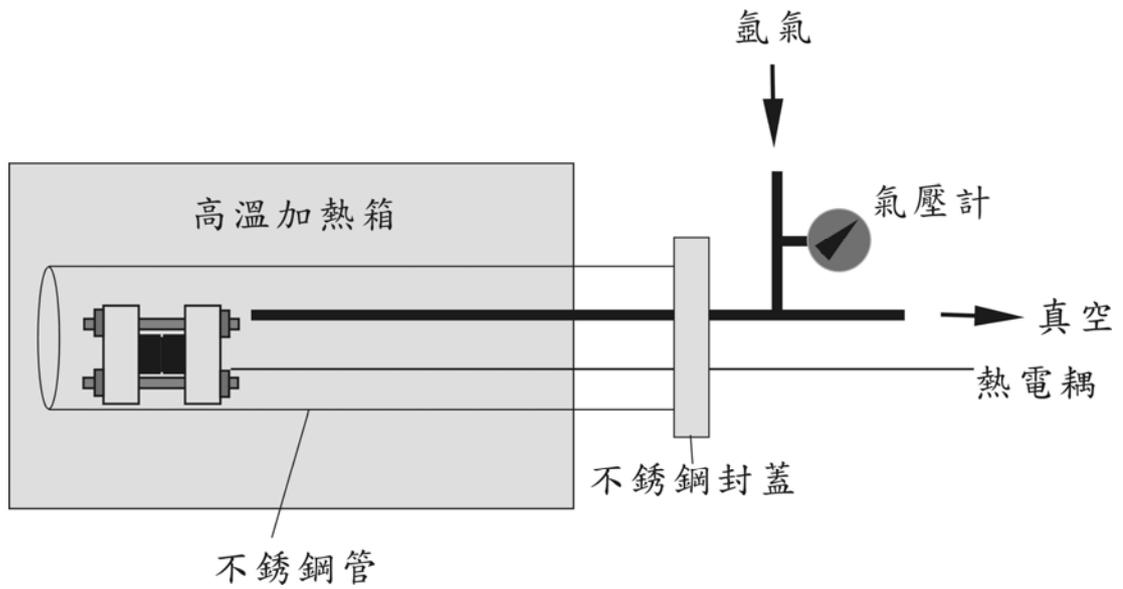


圖3.7 高溫退火器材<sup>[33]</sup>

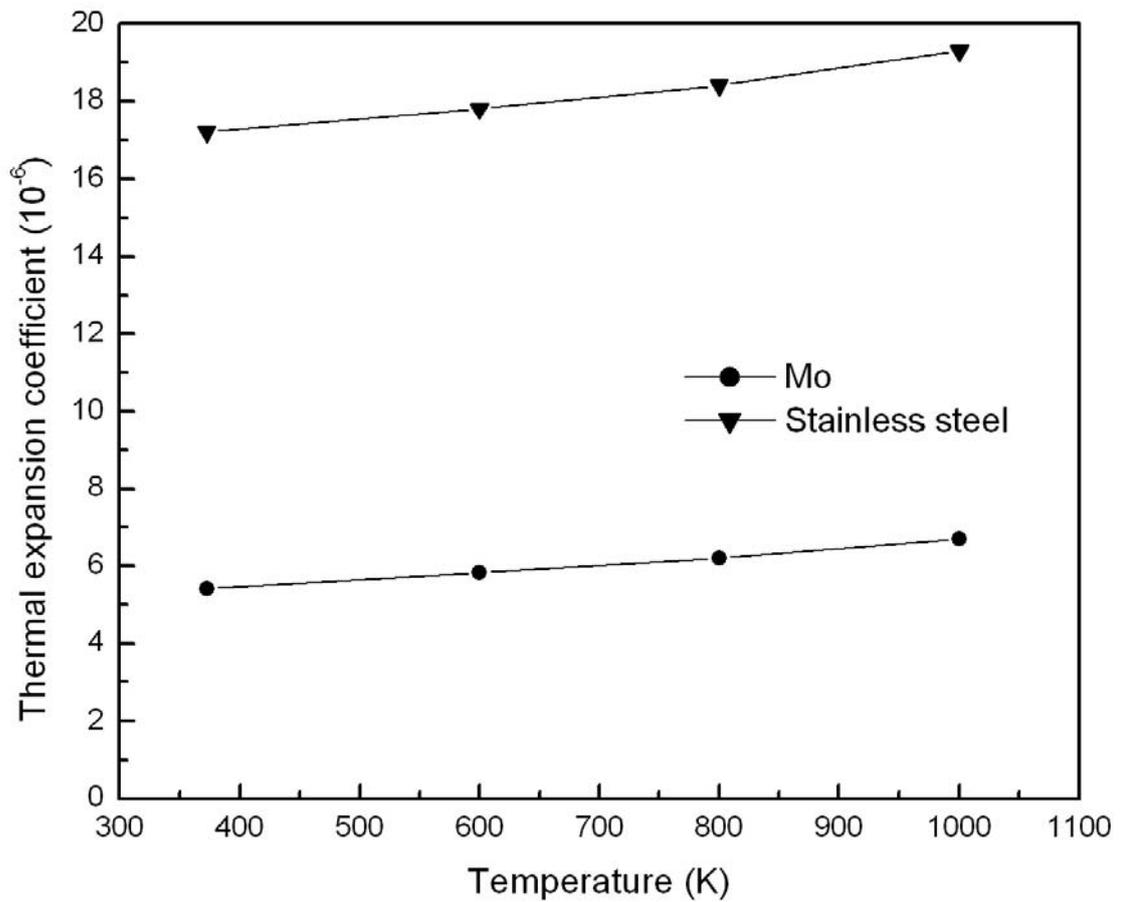


圖3.8 鉬與不鏽鋼熱膨脹係數對溫度圖<sup>[31]</sup>

### 3.6 電性量測

本實驗中所有的接合試片皆分為兩部分：一邊是 8mm X8mm 的方格，另一邊則是在 8mm X8mm 的方格上再切割出長寬皆為 1mm X1mm、深度約為 120  $\mu\text{m}$  的網格狀結構，而在具有網格狀結構的試片背面處進行研磨，一直研磨到露出網格狀的結構為止，接著鍍附上一層金屬做為歐姆接觸(Ohmic contact)，實驗上我們是使用 Cr/Au (2000Å/300Å) 作為電極，且使用鍍雙面的方式來量測電性，並且金屬沉積上後送入爐管經歷 380°C、10 分鐘退火使金屬層與試片表面形成歐姆接觸並增加附著性，所以若是在網格狀結構邊緣所形成的溝槽中有金屬鍍附上的話，在量測時電流就會沿著底部金屬直接流過下面的材料，而不會如我們預期的流經材料的接合介面，對於電性量測上會造成很大的困擾，所以再鍍附金屬之前會再加入一個步驟，就是先將露出的網格狀結構面先上一層很薄的光阻，而光阻會同時塗布在網格狀結構的表面上以及邊緣的溝槽裡，之後再將表面上的光阻利用研磨的方式除去，只留下溝槽內的光阻，退火後以超音波震盪器將溝槽內的光阻去除，同時也去除光阻上的金屬層，以達到我們所想要的試片成品。使用 KETHLEY 4200 做為電性量測機台，量測時一端接地，偏壓加在砷化鎵端。

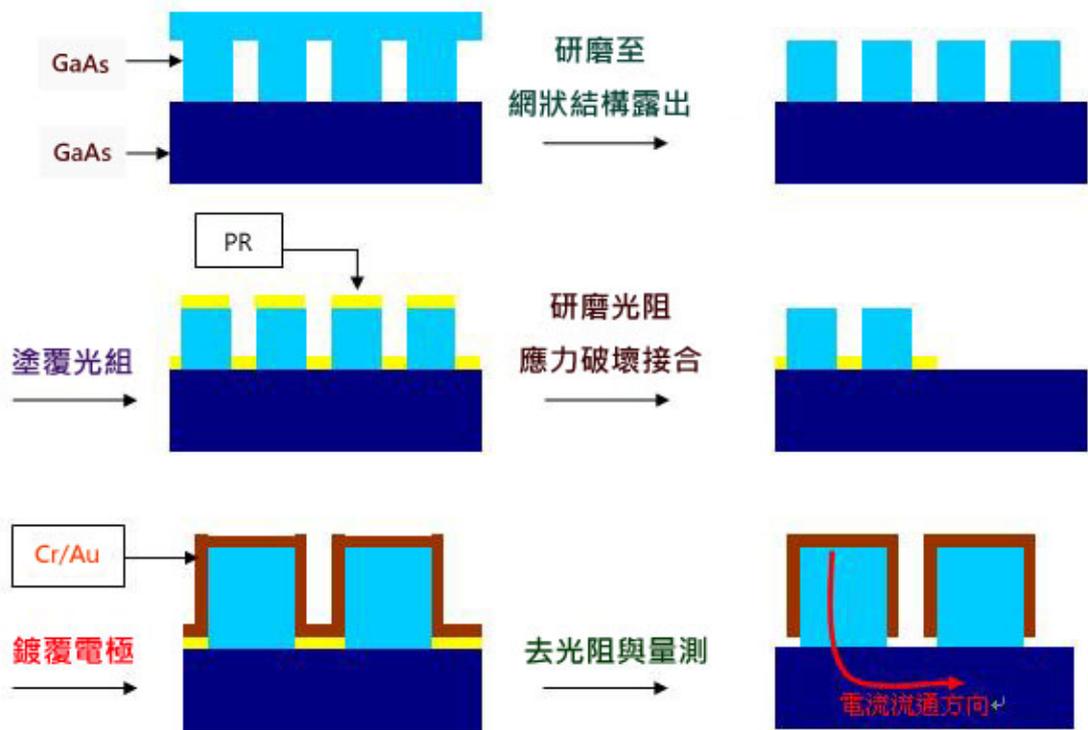
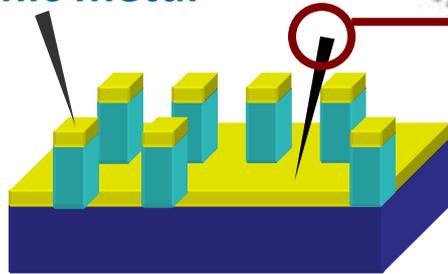


圖 3.9 電性量測試片製備流程圖

*Cr/Au as*

*Ohmic metal*



*Measured by*

*KEITHLY 4200*

圖 3.10 電性量測示意圖

### 3.7 微結構觀察與分析

我們採用穿透式電子顯微鏡(TEM)的高解析度影像來觀察界面型態，TEM 使用具有短波長特性的高能量電子(200kV)，可以觀測到試片界面處的一些缺陷，例如：差排、疊差等等。另 TEM 也可以做電子束的繞射，藉由電子束的繞射點(Diffraction pattern)來鑑定材料的結構並將材料定性。此外，由於接合的界面處會有非晶質層(Amorphous layer)的出現，且兩邊試片界面在高溫下也會有原子交互擴散的可能性，為了確定此一區域的原子種類，使用電子能量散佈 X 光分析(Energy Dispersive X-ray analysis; EDX)即可以確定材料中特定區域的成分組成。

試片製作方面，將原本 8mm X8mm 的試片先分成小塊，在試片的兩側各黏貼上一墊片，再將界面的橫截面(Cross section)研磨至約 20  $\mu\text{m}$  的厚度，之後把此薄試片上銅環後，利用準確離子減薄機(Precision Ion Polish System , PIPS)再將之減薄至適合拍 TEM 的厚度。

## 四、結果與討論

### 4.1 實驗整體架構與接合參數考慮

本實驗採用材料為 3 吋(100)面 N 型砷化鎵晶圓，參雜物為矽，濃度約  $10^{18}$ ，厚度約  $350\ \mu\text{m}$ ，試片製備以精密晶圓切割機(Dicing saw)對準平邊  $[0\bar{1}\bar{1}]$  垂直水平方向切割成  $8\text{mm}\times 8\text{mm}$  大小，深度約  $120\ \mu\text{m}$  的網格狀結構(Mesa)，目的是為了減少熱應力對界面的影響，以及因試片本身晶圓表面品質，如：平坦度 (Flatness)、平行度 (Parallelism) 和晶圓表面的平滑度 (Smoothness) 等因素影響，可能使接合界面產生氣泡或是孔洞，藉由此深度約  $120\ \mu\text{m}$  的網格狀結構(Mesa)，使之有機會形成類似氣體通道，當對試片施加同軸應力時，可將接合界面多餘氣體藉此網格狀結構(Mesa)排除，將可避免氣泡空孔在界面形成，並可用以增加接合面積與強度；同時，高溫退火亦將使界面接合處揮發氣體，網格狀結構(Mesa)的試片將可再次發揮類似氣體通道的作用。

個人利用表面網狀結構做接合，分別做了 500、600、700、800、900  $^{\circ}\text{C}$ ，退火兩小時的試片，都成功的接合砷化鎵晶圓，且接合強度足夠進行後續的電性試片與 TEM 試片製作。

實驗結果如下列表格：

Temp.	Annealing time	S or F
500	2hr	S
600	2hr	S
700	2hr	S
800	2hr	S
900	2hr	S

表 4.1 N-GaAs/N-GaAs 晶圓接合結果

因為砷化鎵(GaAs)同質接合，熱膨脹係數接近相同，理論上熱應力對接合結果的影響並不大，實際上實驗結果也顯示，接合完成的試片強度足夠，且在試片上沒有出現裂痕，或是試片破裂的情形，接合的情況皆算成功；唯獨在 500°C 時，試片成功接合率非常低，雖偶有一二組可免強接合，然而結合強度過低，試片在研磨過程中會產生破裂，使後續的電性試片與 TEM 試片製作遭遇相當大的困難，製備上也需要更多細心與耐心，同時，這也表示，500°C 的砷化鎵(GaAs)試片結合強度對於後續冷加工過程所能承受的強度極具挑戰，應用層面亦受相當侷限。

本實驗主要研究不同退火溫度對介面微結構與電性的影響，並探討使用具有網格狀結構與無網格狀結構的試片接合之比較並討論。

## 4.2 介面微觀結構分析

在以往的研究中，如果在超高真空(UHV)中操作，從試片清洗、預接合到高溫退火都在真空系統中進行，則可避免外來物，包括了氧與污染物在介面的殘留。而本實驗不是在超高真空中進行操作，在室溫預接合和進行爐管退火的操作過程中，無可避免的會有氧原子殘留在介面中，導致在介面處必然有一層非晶質層的存在。根據以往砷化鎵晶圓接合的研究，退火溫度越高，介面原子獲得的驅動力越大，越能夠跨越能障進行介面結構的重組，對氧原子來說，包括了橫向的擴散以及往晶圓內部的擴散，均是為了降低介面能以及表面能，使總自由能降低。由前面對接合的機制論述我們可以知道，隨著退火溫度的增加，我們預期會看到氧化層的聚集現象以及完美接合區域的增加，從電性量測所觀察到介面電阻值的變化，也能夠解釋介面隨溫度變化的現象。下圖 4.1-圖 4.4 分別是劉柏均學長使用無網格狀結構的試片 400°C~850°C 接合 N-GaAs 介面形態。

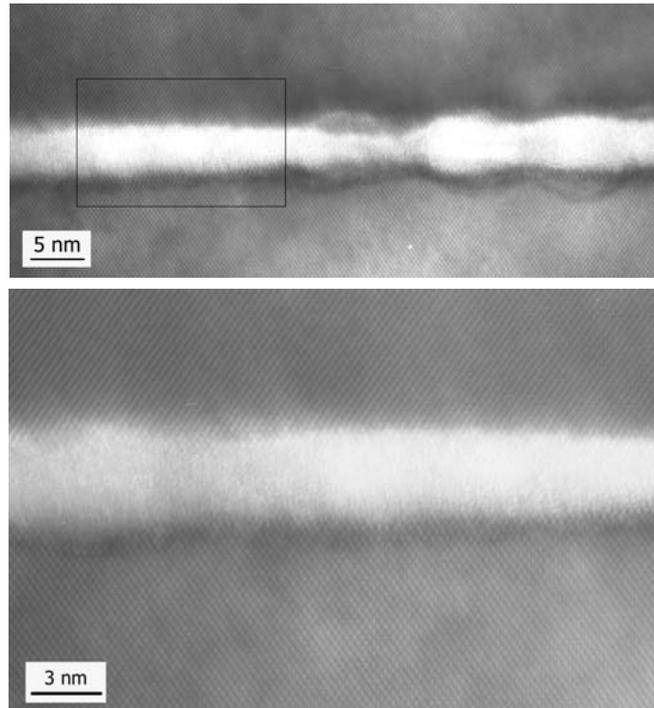


圖 4.1 400°C 2hr 劉柏均學長接合 N-GaAs 介面形態<sup>[38]</sup>

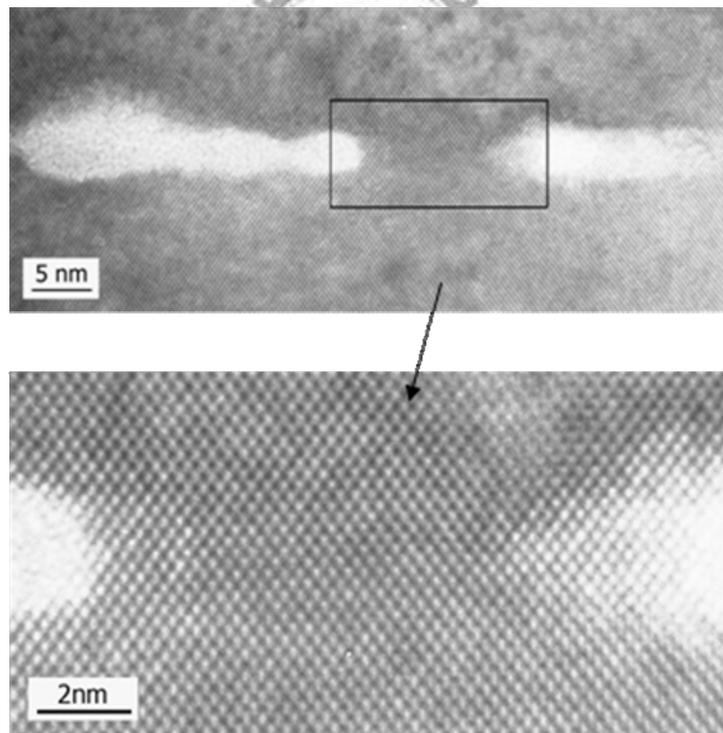


圖 4.2 500°C 2hr 劉柏均學長接合 N-GaAs 介面形態<sup>[38]</sup>

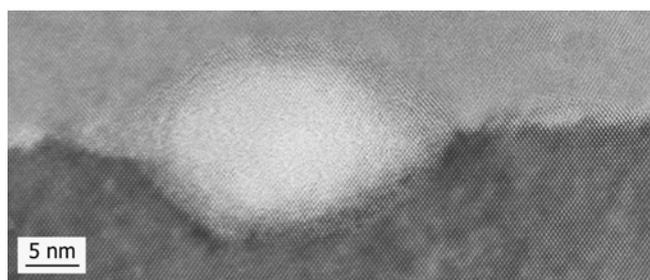


圖 4.3 600°C 2hr 劉柏均學長接合 N-GaAs 介面形態<sup>[38]</sup>

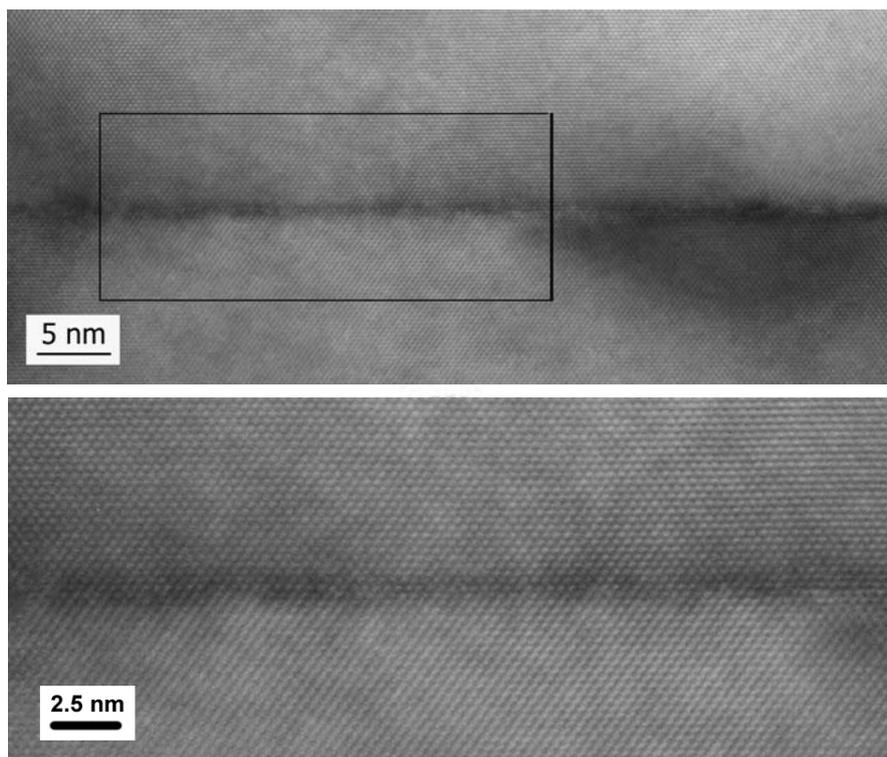


圖 4.4 850°C 2hr 劉柏均學長接合 N-GaAs 介面形態<sup>[34]</sup>

觀察劉柏均學長接合 400-850°C 兩小時 N-GaAs 介面形態，我們發現介面處在 400°C 呈現連續非晶質層，而在 500°C 開始有一些非晶質層聚集的現象，600°C 的影響可觀察到已經聚集成球狀的氧化物，而在 850°C 兩小時 N-GaAs 介面形態可發現，介面處的非晶質層已經完全擴散進入試片內部，砷化鎵晶圓試片呈現完美接合狀態。

下圖 4.5 為個人使用具有網格狀結構的試片在 600°C~900°C 接合 N-GaAs 介面形態。

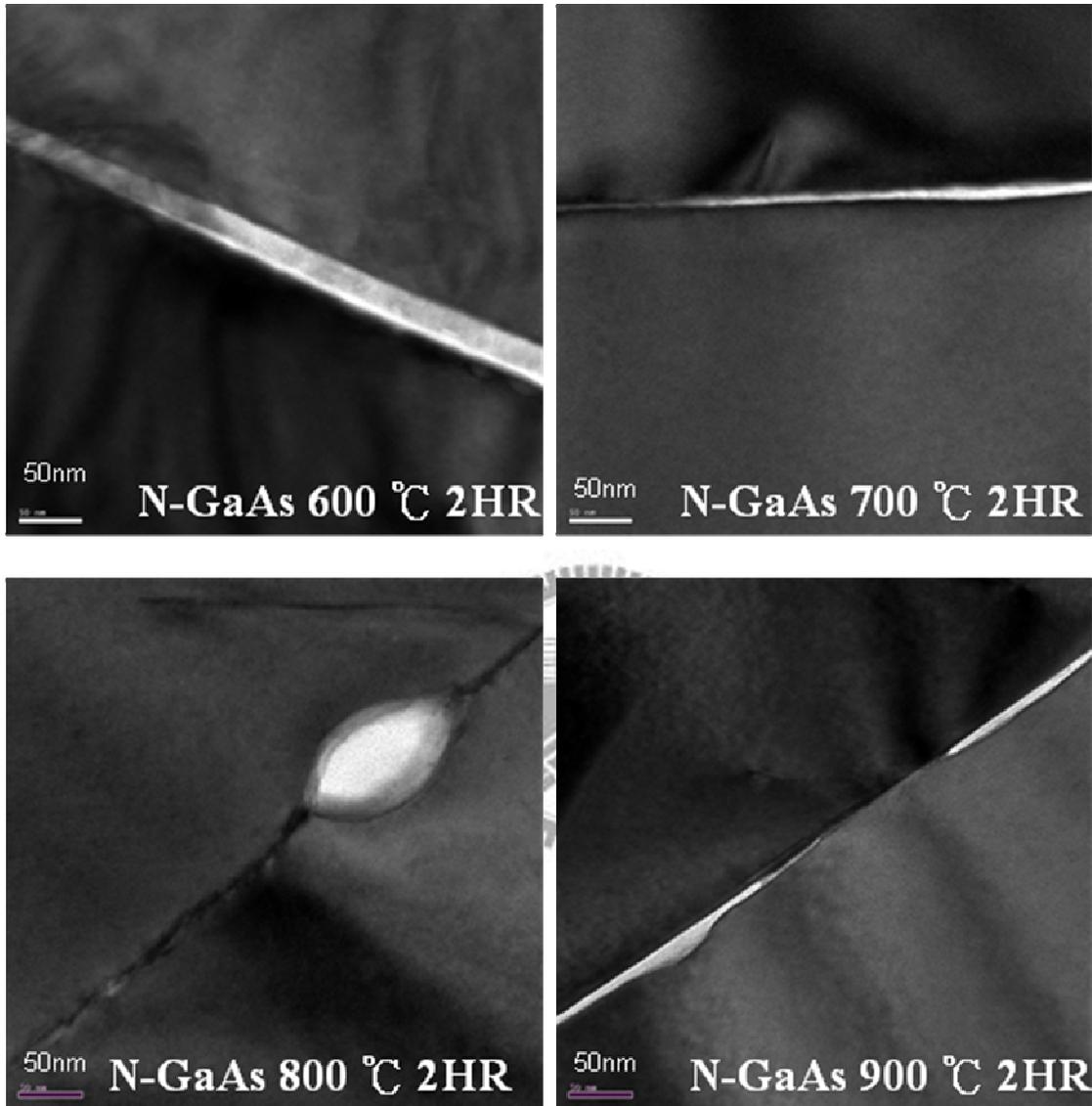


圖 4.5 600-900°C 2hr 使用具有網格狀結構接合 N-GaAs 介面形態

由上圖 4.5 中可看出，介面處非晶質層由低溫到高溫同樣呈現類似的情況，連續非晶質層先是變薄，接著出現球化聚集現象，而在 900°C 非晶質層厚度觀察不到 5nm，試片幾乎呈現完美接合狀態，整體趨勢與劉柏均學長使用無網格狀結構的試片接合結果大致相同。

此種變化可由下圖表示：

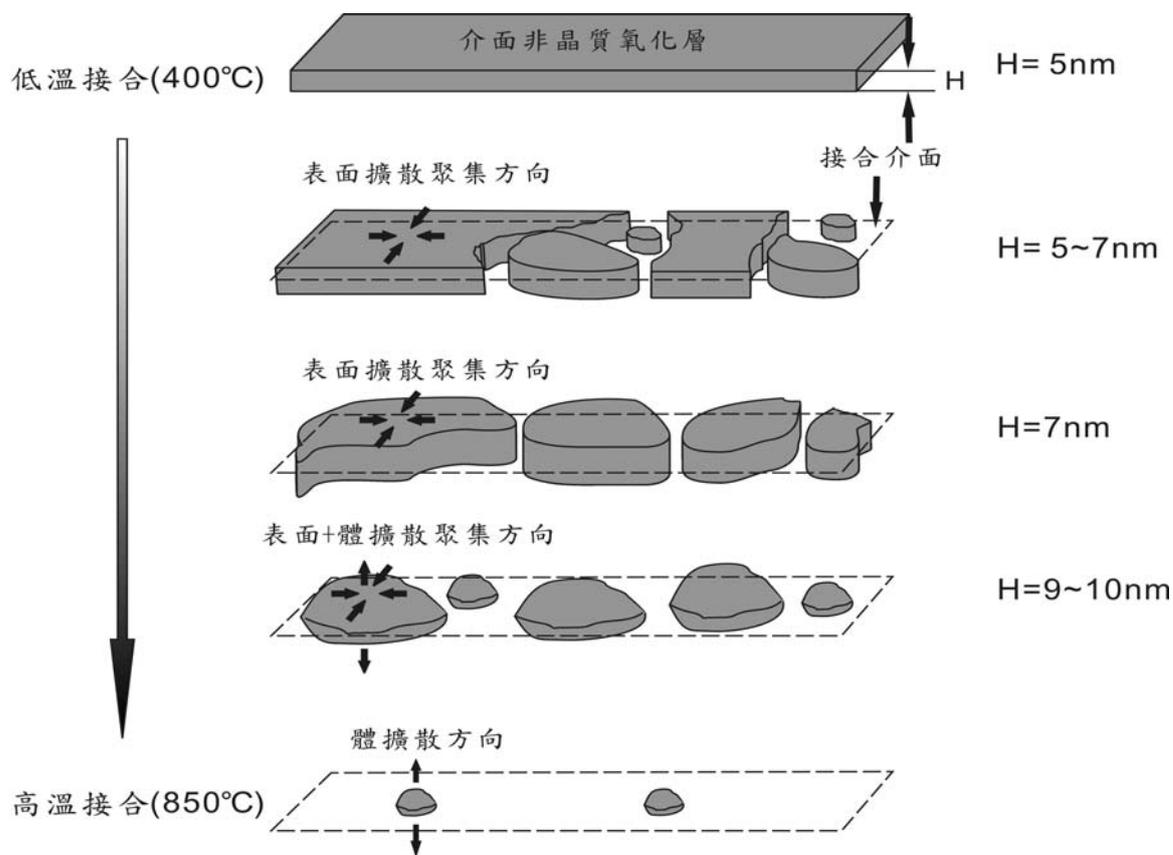


圖 4.6 溫度升高時接合界面的變化<sup>[35]</sup>

以自由能的觀點分析，當有一異質物質存在本體的三維空間中，將形成球體來降低表面能與總自由能，若是存在在三維空間的邊界上，將形成帽狀(cap)來降低能量，我們可將砷化鎳與砷化鎳的表面視為三維空間的邊界，非晶質視為異質物質，非晶質將傾向形成雙帽狀(double cap)來降低總能量。因此，隨著時間的變化，介面非晶質將因自由能的趨勢聚集成球狀，非晶質擴散留下的空位將由砷化鎳內部的原子擴散來填補，進而形成完美接合的區域，這種現象解釋了在高溫退火下的試片會觀察到完整接合面與球狀聚集非晶質區域交替排列的介面形貌。

此外，我們在實驗中發現，砷化鎵晶圓接合中沒有接合好的地方往往出現白色脆化薄膜，為了進一步觀察使用網格狀結構對砷化鎵晶圓接合的影響。我們觀察具網格狀結構的矽晶圓與砷化鎵晶圓接合之電子顯微鏡影像，如下圖 4.7。

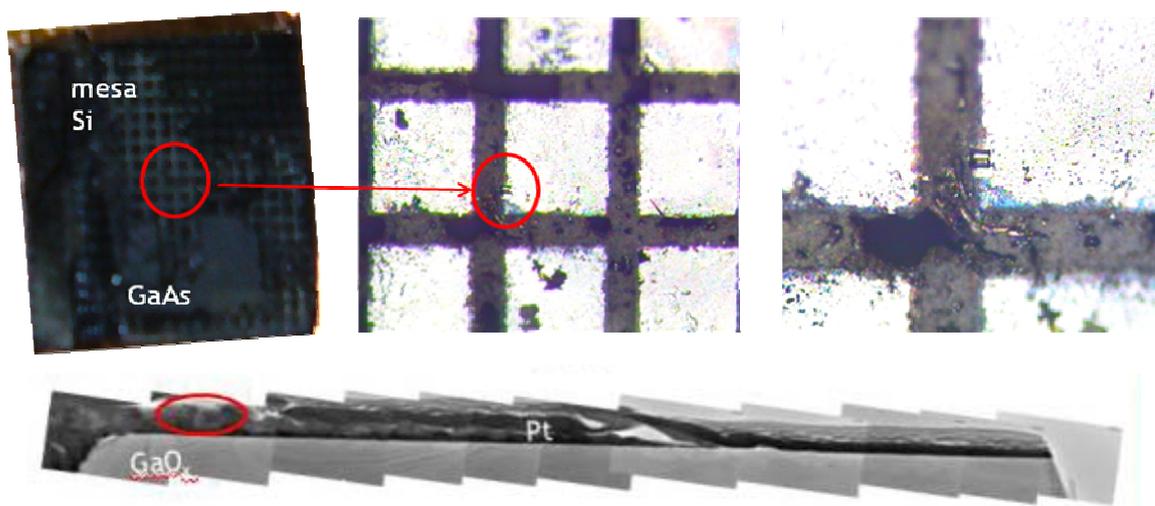


圖 4.7 具網格狀結構的矽晶圓與砷化鎵晶圓接合之電子顯微鏡影像

由成份分析我們證實此白色脆化薄膜為氧化鎵薄膜，從電子顯微鏡影像我們可以觀察到氧化鎵薄膜為連續薄膜，環繞在網格狀結構矽晶圓上，並且，氧化鎵薄膜從溝槽一直連續到網格狀結構矽晶圓上面。

此氧化鎵薄膜的出現導致低溫接合的難度變高，不利於同質晶圓接合，我們推論網格狀結構晶圓接合將較適合於異質接合結構。

### 4.3 電性量測分析

電性量測的部分，首先在具有網格狀結構的試片背面處進行研磨，直到露出網格狀的結構為止，接著鍍附上一層金屬做為歐姆接觸(Ohmic contact)，本實驗上是使用Cr/Au (2000Å/300Å) 作為電極，且使用鍍雙面的方式來量測電性，而用來量測電性的機台為KETHLEY 4200。電性實驗過程是將真空膠切割成很細小的長條狀，再將網格狀結構的試片表面處有溝槽的地方黏貼住，接著送鍍Cr/Au (2000Å/300Å) 作為電極，使用KETHLEY 4200電性量測前再將之前貼的細小長條狀真空膠撕除，如此一來可以有效的避免金屬鍍附在溝槽的內部，所以可以得到我們想要的正確的電性分析。

我們發現 N-GaAs / N-GaAs 接合在低溫如600°C以下時，電性量測分佈範圍較寬，造成實驗數據判讀較為困難，為了有效確認500°C~900°C正確的電性量測分佈結果，個人決定將電性試片製作時，研磨所造成的影響，列入實驗考慮因素。

在低溫研磨過程中，500°C與600°C試片因接合強度不佳，分別有網格狀結構(Mesa)大量以及微量隨研磨動作而掉落的情況。我們取一片600°C試片觀察同一顆網格狀結構(Mesa)並分別用紅外光偵測光學顯微鏡(Infrared light optical microscope)記錄這顆網格狀結構(Mesa)在研磨過程中接合面積的變化。

下面三張分別是使用紅外光偵測光學顯微鏡(Infrared light optical

marcoscope)拍攝的圖片，第一張是一開始僅用研磨砂紙號數2400、4000以及鑽石砂紙(diamond grit)拋光無減薄的界面接合照片，圖中陰暗區是沒有接合好的部份，由圖中可以看出整個網格狀結構(Mesa)接合好的比例約為60%；第二張是使用研磨砂紙號數1500、2400、4000以及鑽石砂紙(diamond grit)拋光並減薄但尚未露出網格狀結構(Mesa)的界面接合照片，圖中可以看出減薄過程中大體上接合比例仍為60%；最後一張是使用研磨砂紙號數1500、2400、4000以及鑽石砂紙(diamond grit)拋光並減薄且露出網格狀結構(Mesa)的界面接合照片，圖中可以看出直到網格狀結構(Mesa)露出，接合比例還是60%左右。



圖4.8 N-GaAs / N-GaAs 600°C 僅拋光未減薄



圖4.9 N-GaAs / N-GaAs 600°C 僅拋光加減薄

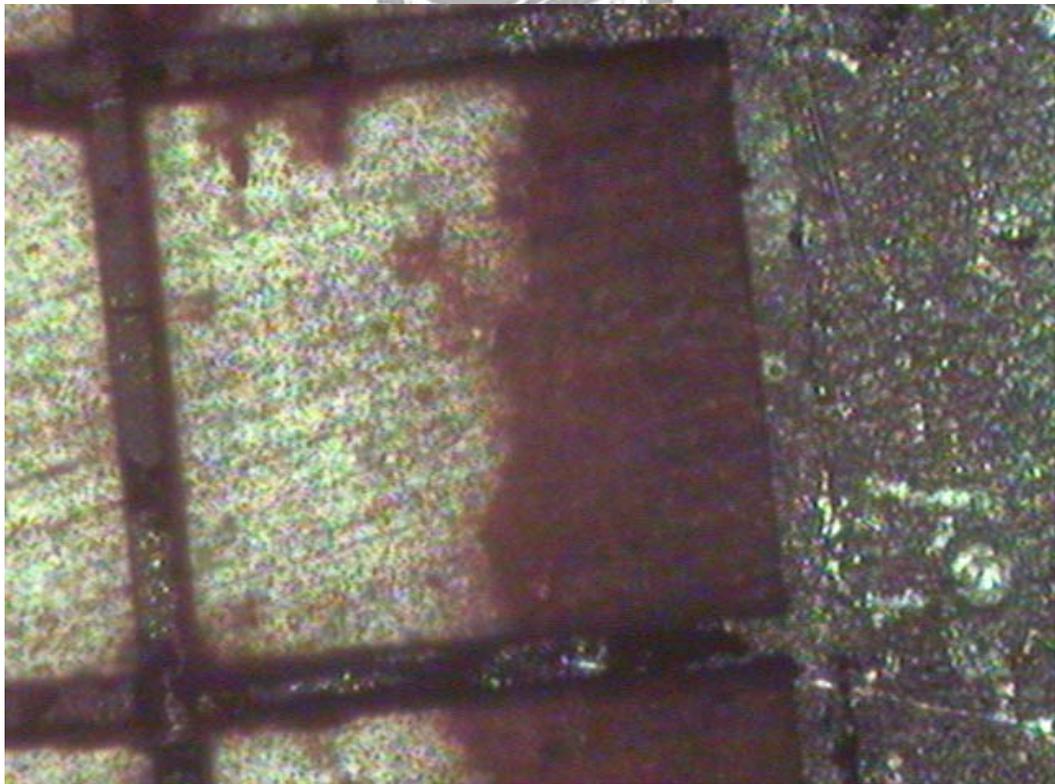


圖4.10 N-GaAs / N-GaAs 600°C 僅拋光未減薄直到露出網格狀結構(Mesa)

由以上觀察我們發現，只要在研磨過程中得以留下的網格狀結構(Mesa)，界面的接合強度並不會因為研磨動作而改變，因此我們決定進一步選擇相同接合比例的網格狀結構(Mesa)去比較電性分析。

由於一片試片擁有64個網格狀結構(Mesa)之多，每塊網格狀結構(Mesa)因為晶圓表面品質等其他因素的差異，造成不同網格狀結構(Mesa)可能擁有不同接合比例，而不同接合比例極有可能使網格狀結構(Mesa)電性量測產生誤差偏離，故我們決定採取不同以及相同接合比例去觀察對電性量測的影響。

我們將600°C試片中所有網格狀結構(Mesa)分別加以編號並記錄所有網格狀結構(Mesa)原先的相對位置，使用紅外光偵測光學顯微鏡(Infrared light optical microscope)拍攝界面接合的情況，為了避免表面刮痕造成誤判，一併也同時拍攝各個網格狀結構(Mesa)表面狀態。

下圖是600°C試片各編號界面與表面紅外光偵測光學顯微鏡(Infrared light optical microscope)拍攝圖，我們取其中編號A1、A2、A3、A4、A5去做比較，其中A1、A2、A3號網格狀結構(Mesa)表面接合皆有30~70%未接合區域，而A4、A5號網格狀結構(Mesa)表面接合區域則是接近100%。

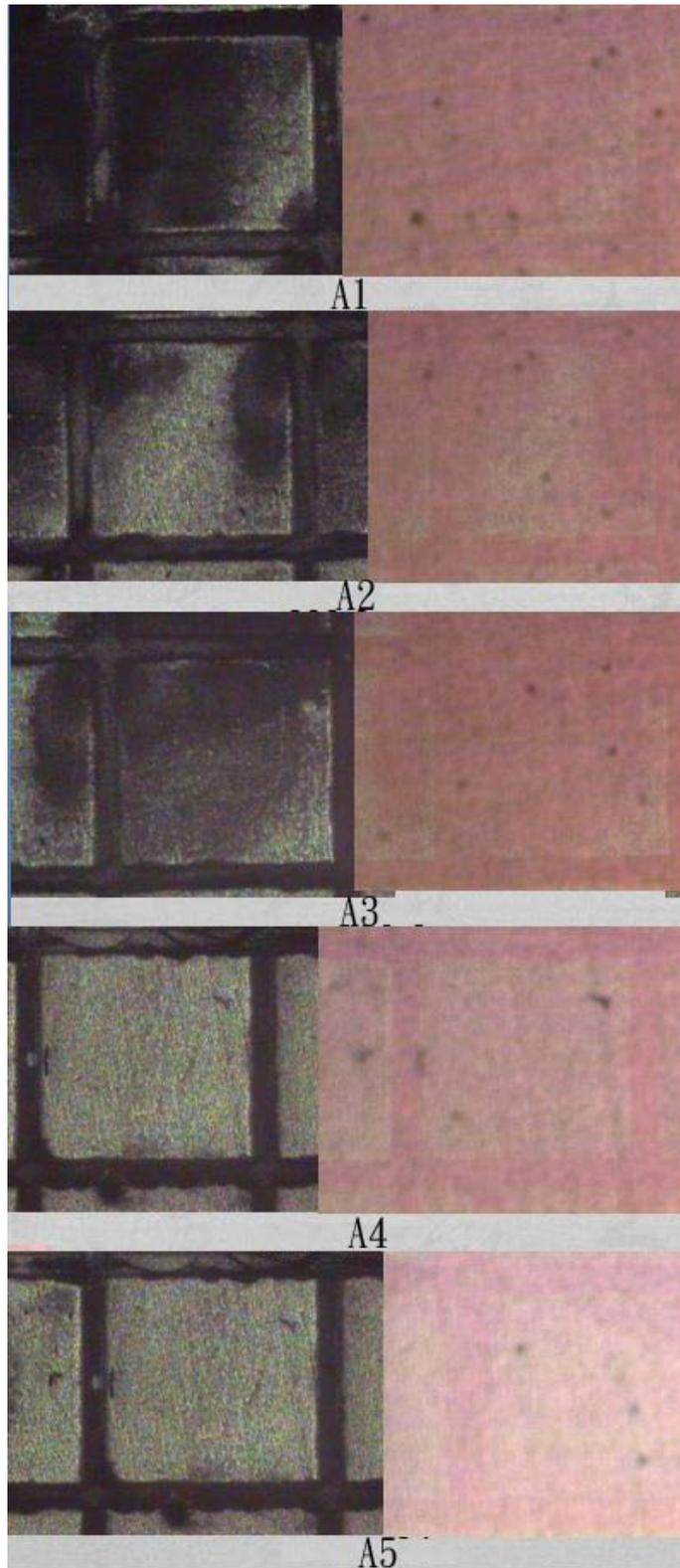


圖4.11 600°C 試片各編號界面與表面紅外光偵測光學顯微鏡(Infrared light optical microscope)拍攝圖

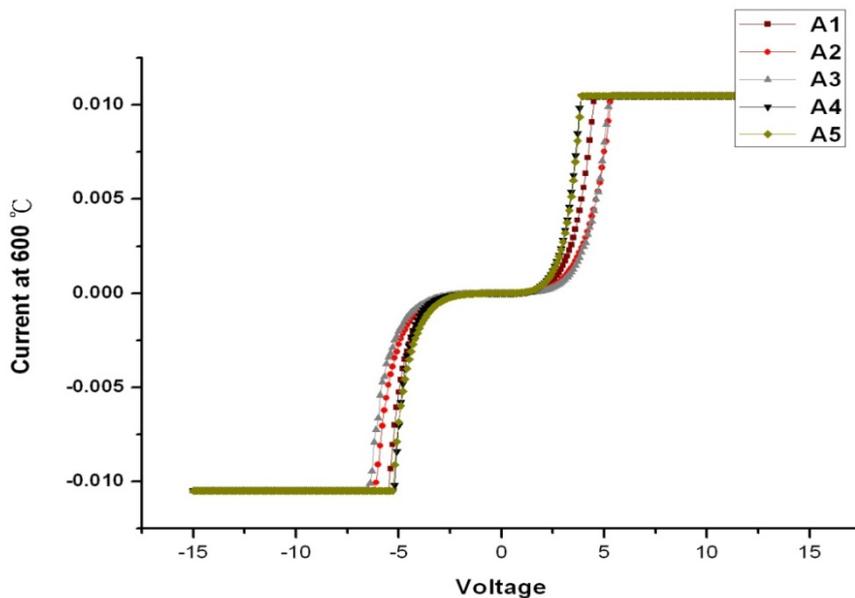


圖4.12 600°C 試片各編號界面電性量測分析

上圖是600°C 試片各編號界面電性量測分析圖，由圖中可以看出完美接合編號A4、A5號與非完美有未接合區域的A1、A2、A3號網格狀結構(Mesa)相比，可大致看出，隨著接合比例約高，電壓電流圖形趨勢也越加線性，電性特性也越好，由圖可看出編號A1、A2、A3號偏離編號A4、A5號曲線，可見其一般。

700°C 以上因為隨著溫度的提高，試片接合度也好相當多，觀察界面與表面紅外光偵測光學顯微鏡(Infrared light optical microscope)拍攝圖可發現其大多都是接近100%完美接合，故無之前考慮擔心接合比例對電性影響之問題。

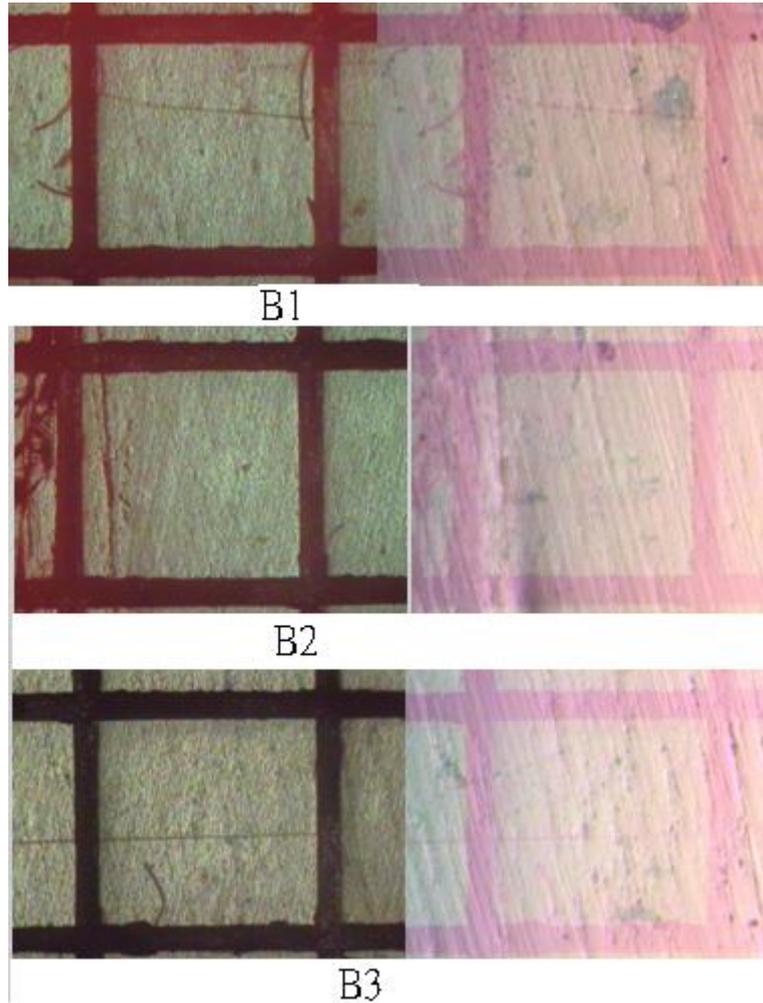


圖4.13 700°C 試片各編號界面與表面紅外光偵測光學顯微鏡(Infrared light optical microscope)拍攝圖

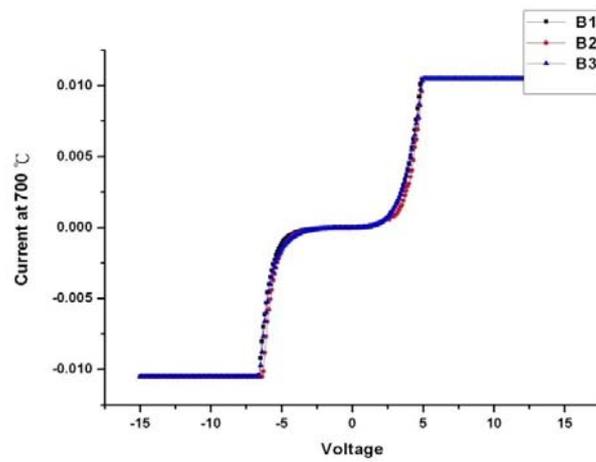


圖4.14 700°C 試片各編號界面電性量測分析

上圖中可看出700°C 試片接合比例幾乎完美電性量測圖形也幾乎重疊，進一步證實我們原先的猜測，故決定取500°C、600°C、700°C、800°C、900°C，各溫度中接合幾近完美接合的電壓電流曲線圖整合再一起，並與學長的數據作比較。

在介紹電性量測分析之前，我們先來簡介一下有關 EL2 的相關資料，EL2 是在砷化鎵中，砷取代鎵位置所形成的錯位缺陷，以  $As_{Ga}$  表示， $As_{Ga}$  錯位缺陷常被解釋為深位施體能階 (deep-level donor center, EL2)<sup>[40]</sup>，以下式可以表示之<sup>[37]</sup>：



上式中的  $As_{As}$  表示砷位於正常位置， $V_{Ga}$  表示鎵原子之空缺， $V_{As}$  即是砷原子位置之空缺，另一方面，當砷原子增加時這種缺陷的濃度跟著增加<sup>[34]</sup>， $Ga_{As}$  錯位缺陷則會形成一個雙重受體 (Acceptor)，換句話說就是可以抓住兩個電洞。當砷化鎵晶片在進行高溫製程時砷的蒸發速率大約是鎵的2.5倍 (於 827 °C)<sup>[35]</sup>，因此，經過高溫製程過後砷原子的濃度將會大大降低，這也意味著 EL2 的濃度將會下降。因此，當砷化鎵晶片是半絕緣 (Semi-Insulator)，砷原子的蒸發將會使晶片表面產生電性轉化 (Conversion)，原本為半絕緣的晶片其表面將變成為 p 型的，在我們的實驗中，EL2 濃度的下降將使得 n 形砷化鎵變得較偏中性，以  $n \rightarrow n^-$  表示。

下圖4.15為400-850°C劉柏均學長砷化鎵晶片界面電性量測分析結果，由圖中我們可以看到在400-700°C砷化鎵晶片界面量測電阻隨溫度上升而下降，而在超過850°C時，砷化鎵晶片界面量測電阻急遽增加，這是因為在850°C時產生了深位施體能階 (deep-level donor center, EL2) 效應，產生一種讓砷化鎵晶片由n→p型的效應，使電性變差，電阻大幅增加。

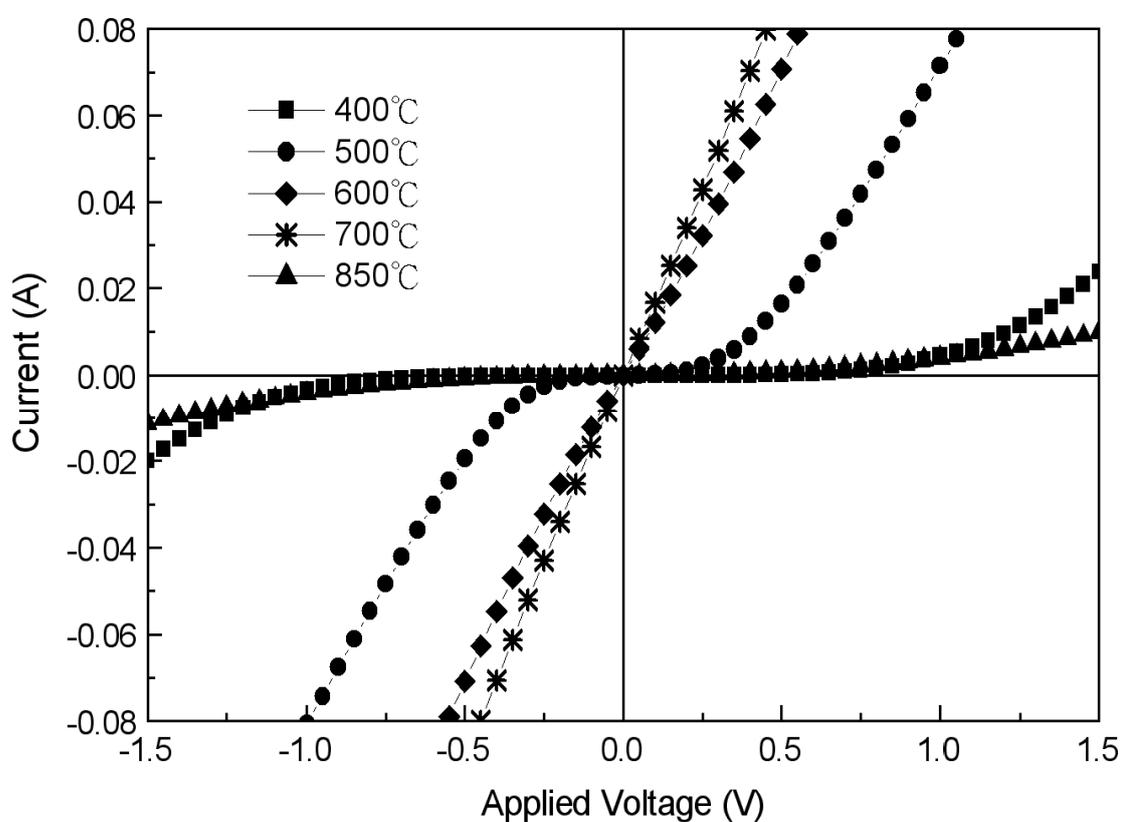


圖4.15 400-850°C劉柏均學長砷化鎵晶片界面電性量測分析結果<sup>[38]</sup>

下圖為個人500~900°C試片界面電性量測分析圖：

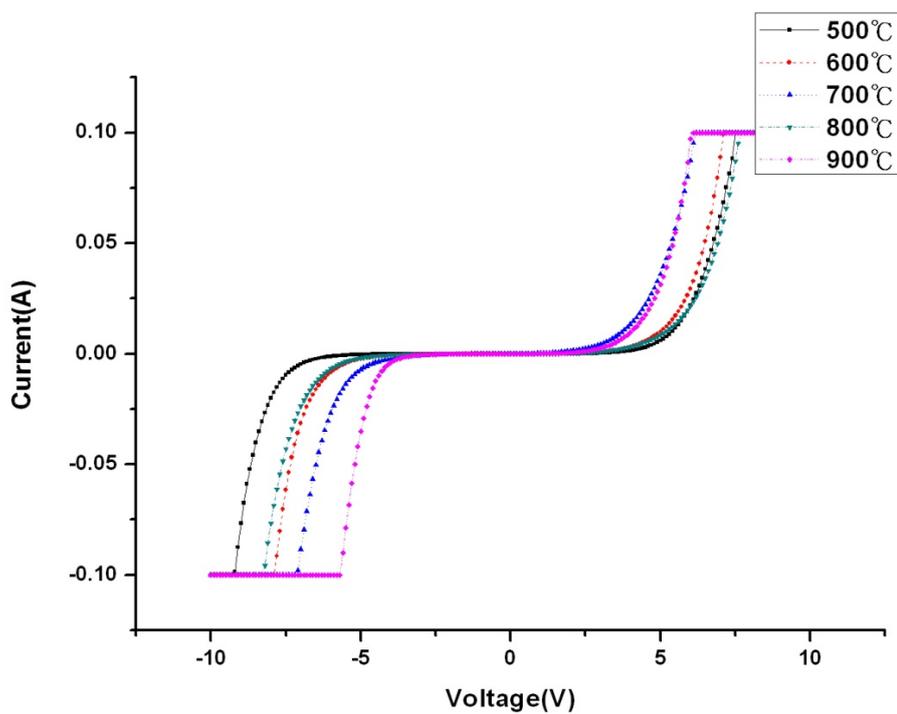


圖4.16 500~900°C砷化鎵試片界面電性量測分析圖

我們針對正偏壓以及負偏壓的界面電性量測取對數分析，分別如圖

4.17 及圖4.18 。

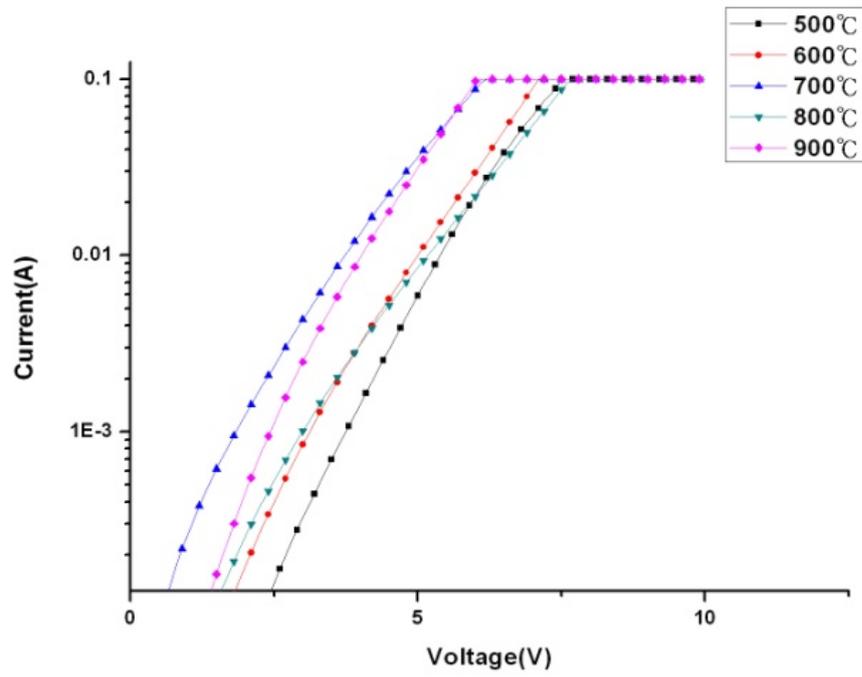


圖4.17 500~900°C砷化鎵試片界面之正偏壓電性量測對數分析圖

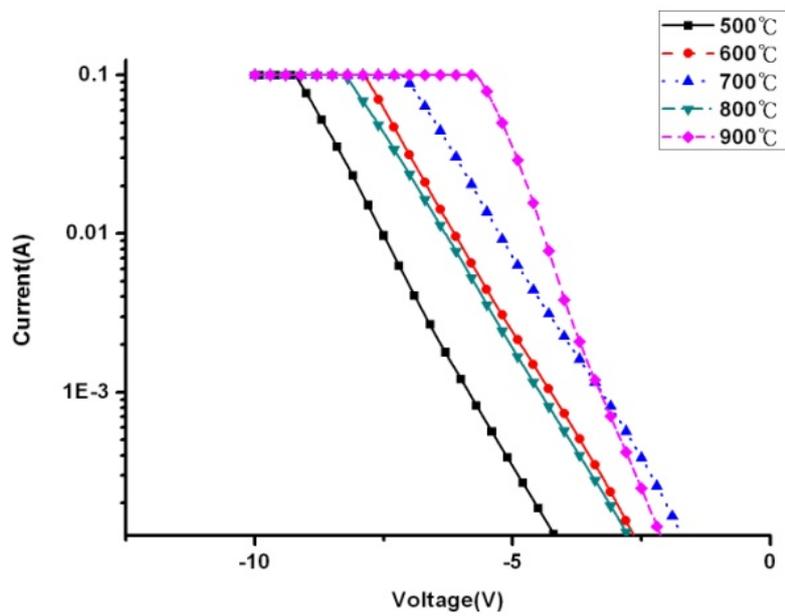


圖4.18 500~900°C砷化鎵試片界面之負偏壓電性量測對數分析圖

由上面兩張圖，我們可以發現，在正偏壓時，500-700°C 砷化鎵晶片界面量測電阻隨溫度上升而下降，起始電壓也隨溫度上升而下降；而在超過800°C 時，砷化鎵晶片界面量測電阻急增，起始電壓液大幅提昇，這是因為在800°C 時產生了深位施體能階 (deep-level donor center, EL2) 效應，產生一種讓砷化鎵晶片由 n→p 型的效應，使電性變差，電阻大幅增加。同樣的，在負偏壓時，也有類似的現象發生，500-700°C 砷化鎵晶片界面量測電阻隨溫度上升而下降，崩潰電壓也隨溫度上升而下降；而在超過800°C 時，砷化鎵晶片界面量測電阻急增，崩潰電壓液大幅提昇，這是因為在800°C 時產生了深位施體能階 (deep-level donor center, EL2) 效應，產生一種讓砷化鎵晶片由 n→p 型的效應，使電性變差，電阻大幅增加。

此外，我們注意到使用網格狀結構(Mesa)接合的砷化鎵晶片電性呈現不對稱的情況，如下圖4.19所示。

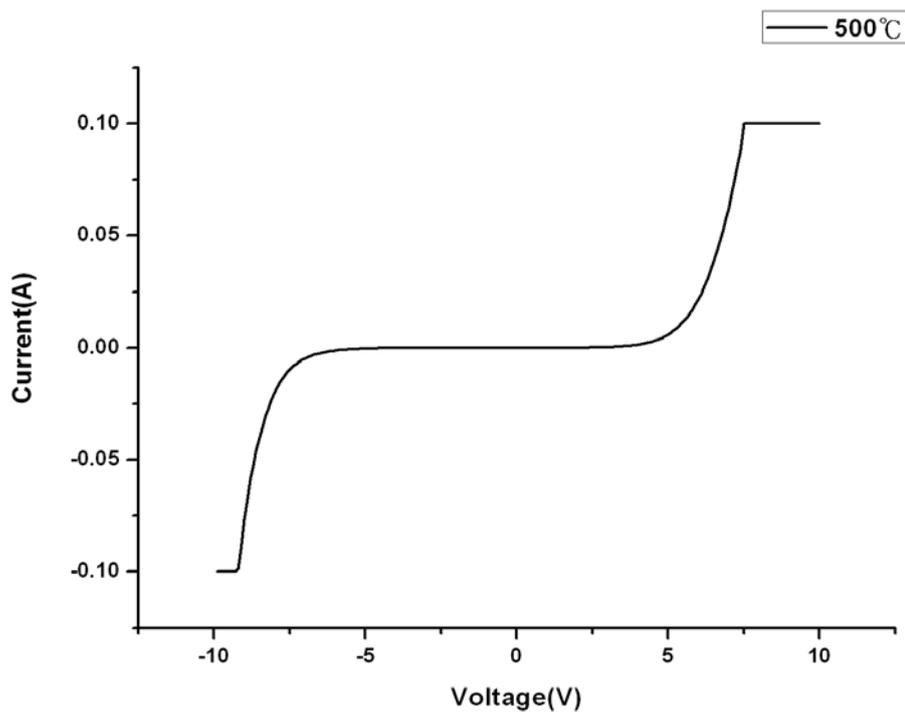


圖4.19 500°C 砷化鎵試片界面電性量測分析圖

由上圖4.19並配合本次實驗的網格狀結構(Mesa)，我們可以發現試片在網格狀結構(Mesa)區域呈現P型趨向，如下圖4.20所示：

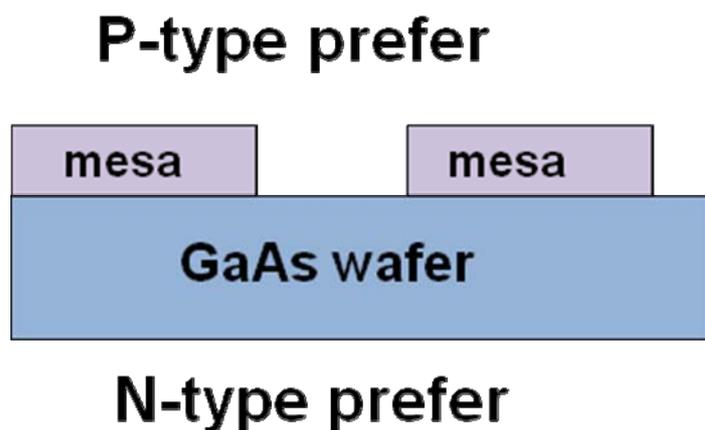


圖4.20 砷化鎵試片界面趨勢圖

讓我們放大網格狀結構砷化鎵試片接合情況，如下圖4.21所示：

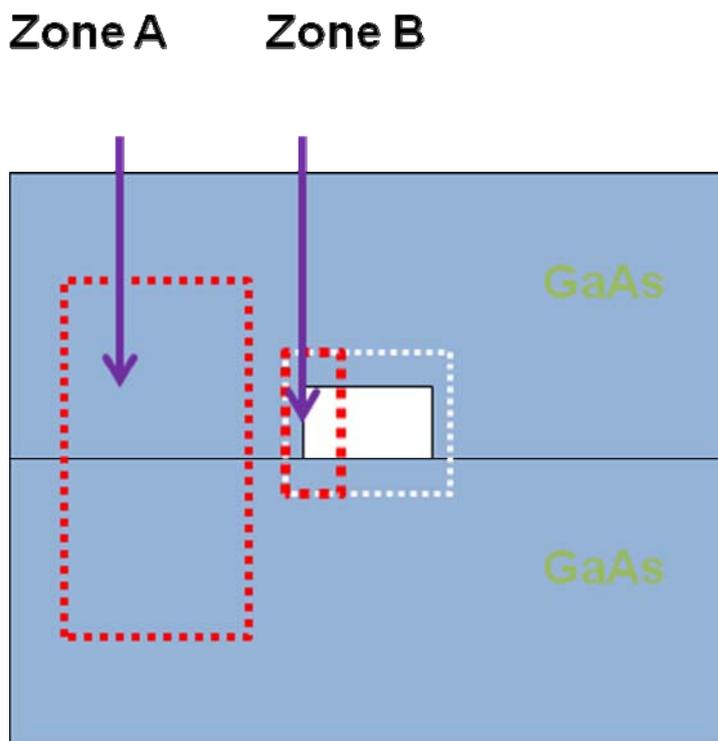


圖4.21 砷化鎵試片接合情況圖

中間白色區塊表示砷化鎵試片網格狀結構區域，我們將網格狀結構砷化鎵試片分成A、B兩區，如上圖4.21所示，由圖可以看到A區跟劉柏均學長所作大面積砷化鎵試片接合的情況相類似，而B區部份正是我們與學長所作不同之處，由於小尺寸的網格狀結構空孔使砷在高溫中揮發散逸，使深位施體(deep-level donor center, EL2)降低，網格狀結構部份呈現P型趨向，使電性量測圖呈現不對稱分佈。

## 五、結論

在本實驗中成功的將 N-GaAs / N-GaAs 試片，利用網格狀的結構將其接合。

在 N-GaAs / N-GaAs 的接合介面型態部分，大略可以分成三種型態，第一種為完美接合區域，形成情況就如同 900°C 試片一樣，在介面的兩側可以觀察到排列整齊的晶格；而第二種介面則出現較厚的非晶質區域，如同 600°C 的試片，介面的原生氧化層互相鍵結所造成的規則結構；第三種介面則為球狀的非晶質層，在 700°C~800°C 中的試片都可以觀測到，有可能是介面的氧聚集，也可能是原本比較厚的氧化層來不及擴散進入塊材所造成的型態。整體而言，隨著溫度的上升，中間非晶質層的區域會逐漸的變薄且聚集成球狀，而接合完美的區域則會逐漸的變大，此一現象對於電性量測會產生很大的影響。

網格狀結構試片接合較適合於異質晶圓接合，同質晶圓接合將因為氧化鎵的形成使試片在低溫接合容易失敗。

在 N-GaAs / N-GaAs 的電性分析方面，可以量測到一系列典型的二極體特性圖：在順相偏壓方面，可以得知當退火溫度從 500°C 升高到 700°C 的過程，所需要的起始電壓是逐漸的變小，電阻隨溫度增加而下降，在超過 800°C 時，由於深位施體(deep-level donor center, EL2)降低，電阻變大，且起始電壓增加；而在反相偏壓的部分，當退火溫度從 500°C 升高到 700°C

的時候，崩潰電壓隨溫度增加而降低，電阻變小，但是當退火溫度超過 800 °C 的時候，崩潰電壓反而有增加的趨勢，電阻也明顯變大。

網格狀結構 N-GaAs / N-GaAs 試片接合將產生不對稱的電壓-電流曲線，形成類似典型 P-N 二極體的電性曲線圖。



## 六、未來工作

在N-GaAs / N-GaAs的晶圓接合方面，可以繼續藉由改變試片的條件來觀察介面型態變化或者是電性分析的不同，例如：不同材料、溫度。

後續的實驗也可利用 ESCA 或 SIMS 做微量原素的綜深分析，得到精準的擴散梯度，可進一步幫助說明在電性上所觀察到的現象。

此外，也可以透過模擬電流可能流通方式釐清電流真正可能的流通方式，也可以有助於電性的分析。



## 七、參考文獻

1. A. E. Romanov, W. Pompe, S. Mathis, G. E. Belts, and J. S. Speck. *J. Appl. Phys.* **85**, pp.182 (1999)
2. 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**, pp.3819 (2001)
3. E. Koppensteiner, A. Schuh, G. Bauer, V. Holy, G. P. Watson and E. A. Fitzgerald, *J. Phys.*, Determination of threading dislocation density in hetero-epitaxial layers by diffuse x-ray scattering, *Appl. Phys.* **28**, pp. A116-A120(1995)
4. F. A. Kish, F. M. Steranka, D. C. DeFevre, 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.* **64**, pp.2839 (1994)
5. G. E. Hofler, D. A. Vandereater, D. C. DeFevre, F. A. Kish, M. D. Camras, F. M. Steranka, and I. H. Tan, *Appl. Phys. Lett.* **69**, pp.803 (1996)
6. H. C. Lin, K. L. Chang, K. C. Hsieh, K. Y. Cheng, and W. H. Wang, *J. Appl. Phys.* **92**, pp.4132 (2002)
7. J. Jasinski, Z.L.-Weber, S. Estrada, and E. Hu, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **722**, K7. pp.15 (2002)
8. J. Jasinski, Z.L.-Weber, S. Estrada, and E. Hu, *Mater., Appl. Phys. Lett.* **81**, pp.3152(2002)
9. S. Estrada, H. Xing, A. Stonsa, A. Huntigton, U. Mishra, S. DenBaars, L. Coldren and E. Hu, *Appl. Phys. Lett.* **82**, pp.820(2003)
10. 陳一凡 P 型砷化鎵晶圓接合電性與界面形態之研究 交大材料碩士論文 pp.2-6,(2005)
11. Q.-Y. Tong, and U. Gösele, *Semiconductor wafer bonding: science and technology*, Chap. 2 J. Wiley and Sons, Inc, pp. 52 (1998)

12. T. A. Michalske and E. R. Fuller, *J. Am. Ceram. Soc.*, 68, pp.586 (1985)
13. L. R. Fisher and J. N. Israelachvili, “ Direct measurement of effect of meniscus forces on adhesion: A study of the applicability of macroscopic thermodynamics to microscopic liquid interface”, *Colloids Surf.*, 3, pp. 303-319, December (1981)
14. Q.-Y. Tong, and U. Gösele, *Semiconductor wafer bonding: science and technology*, Chap. 2, John Wiley & Sons, Inc., pp. 52(1998)
15. J.N. Israelachvili, P. McGuiggan, and R. Horn, “Basic physics of interactions between surfaces in dry, humid and aqueous environments”, 1st ed *International Symposium on Semiconductor Wafer bonding: Science, Technology and Applications*, 92-7, The electrochemical society, Pennington, NJ, pp. 33-47, (1992)
16. K.-T. Wan, D. T. Amith, and B. R. Lawn, “Fracture and contact adhesion energies of mica-mica, and silica-silica, and mica-silica interface in dry and moist atmospheres”, *J. Am. Ceram. Soc.*, 75, pp. 667-76, March(1992)
17. 劉柏均 三五族化合物半導體晶圓接合之基本研究及應用研究交通大學材料所碩士論文, pp.8,(2005)
18. 張勝傑 砷化鎵/砷化鎵以及砷化鎵/鍺晶圓接合介面形態與電性 研究交通大學材料所碩士論文, pp.8,(2009)
19. 劉柏均 三五族化合物半導體晶圓接合之基本研究及應用研究交通大學材料所碩士論文, pp.12,(2005)
20. 李天賜、林澤勝、彭成鑑、呂冠良、潘信宏 *工業材料雜誌* 170, pp.146-157,(2001)
21. 劉柏均 三五族化合物半導體晶圓接合之基本研究及應用研究交通大學材料所碩士論文, pp.14,(2005)
22. K. Hjort, *Journal of Crystal Growth*, 268 , pp.346 (2004)

23. Niklaus F. Andersson H. Enoksson P. Stemme G , Sensors & Actuators ,A-Physical, A92, pp.235 (2001)
24. 劉柏均 三五族化合物半導體晶圓接合之基本研究及應用研究交通大學材料所碩士論文, pp.21,(2005)
25. M Shimbo, K. Furukawa, K. Gukuda, and K. Tanzawa, J. Appl. Phys. 60, pp.2987(1986)
26. 陳一凡 P型砷化鎵晶圓接合電性與界面形態之研究 交大材料碩士論文 pp.8,(2005)
27. J. Haisma, G.A.C.M.Spierings,“Contact bonding, including direct-bonding in a historical and recent context of material science and technology, physics and chemistry Historical review in a broader scope and comparative outlook” , Materials science and engineering, R 37, pp.1-60, (2002)
28. Q. Y. Tong, E. Schmidt, and U. Gösele, Appl. Phys. Lett., 64, pp.625 (1994).
29. V. Antonova, O. V. Naumova, V.P. Popov and J. Stano, V. A. Skuratov, J. Appl. Phys. 93 , pp.426(2003)
30. 彭顯智 不同旋轉角度之砷化鎵晶圓接合 交通大學材料所碩士論文, pp.26-50,(2004)
31. G. N. Yushin and Z. Sitar , Appl. Phys. Lett. 84, pp.3993 (2004)
32. 張岱民 N型砷化鎵/N型矽晶圓接合介面形態與電性研究交大材料碩士論文 pp.17,(2009)
33. 陳一凡 P型砷化鎵晶圓接合電性與界面形態之研究 交大材料碩士論文 pp.47,(2005)
34. 劉柏均 三五族化合物半導體晶圓接合之基本研究及應用研究交通大學材料所碩士論文, pp.53-59,(2005)
35. 劉柏均 三五族化合物半導體晶圓接合之基本研究及應用研究交通大學材料所碩士論文, pp.60,(2005)

36. Oda, Holmes, H. Yamamoto, M. Seiwa, G. Kano, T. Inoue, M. Mori, H. Shinakura, and M. Oyake, *Semicond , Sci. Technol*, 7, pp.A215 (1992)

37. J.Lagowski, H.C.Gatos, J.M.Psrsey, K.Wada, *Appl.Phys.Lett.*, 40, pp.342 (1982)

38. C. T. Foxton, J. A. Harvey, and B. A. Joyce, *J. Phys. Chem. Solids*, 34, pp.1693 (1973)

