

國立交通大學

工學院半導體材料與製程設備學程

碩士論文

GaN HEMT 打線接合構裝技術之研究

Investigation of the Wire Bonding Technique in the GaN HEMT Packaging

研究生：戴光助

指導教授：成維華 教授

賴振民 博士

中華民國一百零一年七月

GaN HEMT 打線接合構裝技術之研究

Investigation of the Wire Bonding Technique in the GaN HEMT Packaging

研究生：戴光助

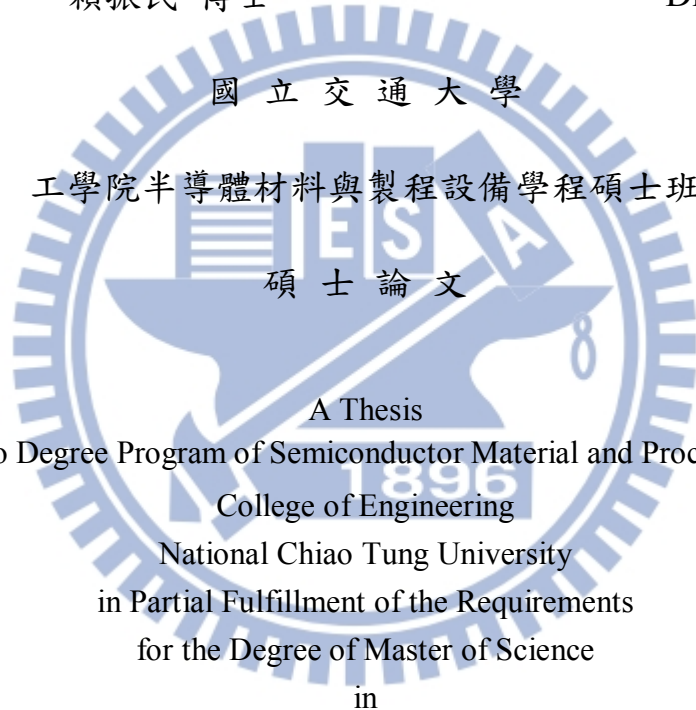
Student : Kuang-Chu Tai

指導教授：成維華 教授

Advisor : Dr. Wei-Hua Chieng

賴振民 博士

Dr. Jenn-Min Lai



Semiconductor Material and Process Equipment

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一百零一年 七月

GaN HEMT 打線接合構裝技術之研究

學生：戴光助

指導教授：成維華 教授

賴振民 博士

國立交通大學工學院半導體材料與製程設備學程碩士班

摘 要

氮化鎵材料在抗熱性、崩潰電壓、電流密度、電子遷移率等具有良好的特性，使得它在高速切換及高溫高功率的應用上成為極佳的選擇，目前也已獲得廣泛的研究與良好的成果。

目前國內鮮少有關氮化鎵功率晶體的封裝研究，而此次研究嘗試以 GaN HEMT，使用不同的 Wire Bond 參數，利用實驗計畫法進行實驗，探討 Wire Bond 參數(接合時間、接合壓力、接合頻率、接合溫度)與接合強度的關係，並嘗試比對 GaN HEMT 電性在不同 Wire Bond 參數下的變化。希望藉由設計合適的 Wire Bond 製程，達到可以呈現 GaN HEMT 特性。

關鍵字：GaN，HEMT，實驗計劃，封裝，Wire Bond

Investigation of the Wire Bonding Technique in the GaN HEMT Packaging

Student : Kuang-Chu Tai

Advisor : Dr. Wei-Hua Chieng

Dr. Jenn-Min Lai

Degree Program of Semiconductor Material and Process Equipment
National Chiao Tung University

ABSTRACT

GaN material has good properties in heat resistance, breakdown voltage, current density, and electron mobility. Hence, it becomes an excellent choice in high-speed switching, high temperature and high power applications. It has been extensive research with good results.

There is rarely research about the GaN power transistor package. The topic of this thesis is the wire bonding technique in the GaN HEMT package. The experiments of this thesis are planned by the experimental design method. The relation between wire bonding parameters and bonding strength is studied. The bonding parameters include bonding times, bonding pressure, bonding frequency, and bonding temperature. The electrical characteristic of GaN HEMT varies with the wire bonding parameters. The applicable or optimal electrical characteristic of GaN HEMT can be obtained by the wire bonding parameters selected by this thesis procedure.

Keywords : GaN , HEMT , Design of Experiment , Package , Wire Bond

誌謝

首先要感謝成維華教授、鄭時龍教授及賴振民博士，在碩士論文研究期間的指導，才能使本論文順利完成，也謝謝口試委員許隆結教授，在百忙之中撥空前來，對本篇論文的指教。另外也感謝智慧機電實驗室的各位學弟，在個人就學期間的協助。回首這段日子在於自己的人生經驗當中，著實是一段令人難以忘懷的回憶，有一種苦盡甘來的深刻體驗。

在這段的碩士生涯，謝謝感謝我的父母及哥哥與弟弟，在這段期間的支持與鼓勵，另外也謝謝太太的陪伴與過往的付出。

最後再次向師長、家人與同事，致上十二萬分的真誠感謝，希望日後大家的日子都能平安快樂。



戴光助 101.7.17

目 錄

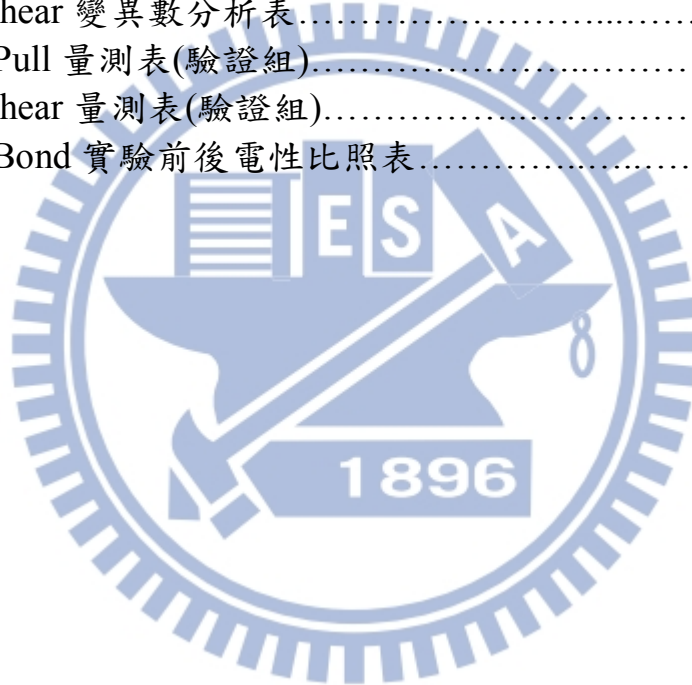
中文摘要	.....	ii
英文摘要	.....	iii
誌謝	.....	iv
目錄	.....	vi
表目錄	.....	vii
圖目錄	.....	viii
符號說明	.....	ix
第一章	緒論.....	1
1.1	研究動機與目的.....	3
1.2	文獻回顧.....	4
1.3	論文架構.....	5
第二章	封裝製程與實驗作法介紹.....	7
2.1	封裝製程介紹.....	7
2.1.1	Die Saw Process.....	8
2.1.2	Die Bond Process.....	9
2.1.3	Wire Bond Process.....	11
2.1.4	Mold Process.....	13
2.1.5	Trim/Form Process.....	13
2.2	Wire Bond 加工後品質特性量測方式.....	14
2.3	超音波焊接共晶原理.....	15
2.4	田口實驗設計法.....	16
2.5	變異數分析.....	20
第三章	實驗研究.....	22
3.1	製程評估.....	22
3.2	實驗步驟.....	24
3.2.1	Die Saw 實驗作法.....	24
3.2.2	Die Bond 實驗作法.....	24
3.2.3	Wire Bond 實驗作法.....	24
3.2.4	Mold 實驗作法.....	25
3.2.5	Trim/Form 實驗作法.....	25
3.3	田口實驗實作狀況.....	25
3.4	變異數分析.....	27
3.5	驗證實驗.....	27
3.6	封裝前後電性分析.....	28

第四章	結論與建議.....	29
4.1	GaN HEMT Wire Bond 製程分析結論.....	29
4.2	未來目標與建議.....	30
參考文獻	.....	31



表目錄

表 1	線材特性表.....	33
表 2	金線熔斷電流表.....	33
表 3	鋁線熔斷電流表.....	33
表 4	銅線熔斷電流表.....	33
表 5	Wire Bond 製程參數 L9 直交表.....	34
表 6	Wire Bond 製程參數表.....	34
表 7	Wire Pull 量測表.....	35
表 8	Ball Shear 量測表.....	35
表 9	Wire Pull 變異數分析表.....	36
表 10	Ball Shear 變異數分析表.....	36
表 11	Wire Pull 量測表(驗證組).....	37
表 12	Ball Shear 量測表(驗證組).....	37
表 13	Wire Bond 實驗前後電性比照表.....	37



圖目錄

圖 1	2009~2015 年 GaN 功率元件市場產值分析.....	38
圖 2	理論上的電阻乘以晶片面積(氮化鎵及矽元件於不同電壓下之表現限制).....	38
圖 3	構封裝流程圖.....	39
圖 4	晶圓黏片後照片.....	39
圖 5	切割製程示意圖.....	40
圖 6	切割後晶片照片.....	40
圖 7	Scribing and Die defects.....	41
圖 8	Die Bond 後照片.....	41
圖 9	Void Criteria.....	42
圖 10	Wire Bond process flow.....	42
圖 11	Wire Bond 後照片.....	43
圖 12	Wire Pull test 示意圖.....	43
圖 13	Ball Shear test 示意圖.....	44
圖 14	Wire Pull test 規格.....	44
圖 15	Ball Shear test 規格.....	45
圖 16	Mold process flow.....	45
圖 17	Mold 後照片.....	46
圖 18	Wire Pull 斷點示意圖.....	46
圖 19	TO220 橫切面示意圖.....	47
圖 20	TO220 上視透視圖.....	47
圖 21	新美化 SPB-U668 超音波焊線機.....	48
圖 22	打線示意圖.....	48
圖 23	打線示意圖(側視).....	49
圖 24	導線架裁剪處示意圖.....	49
圖 25	Wire Pull S/N ration 圖.....	50
圖 26	Ball Shear S/N ration 圖.....	50
圖 27	5mm GaN 晶片圖.....	51
圖 28	推拉力高實驗組量測圖(Wire Bond 前).....	51
圖 29	推拉力低實驗組量測圖(Wire Bond 前).....	52
圖 30	推拉力高實驗組量測圖(Wire Bond 後).....	52
圖 31	推拉力低實驗組量測圖(Wire Bond 後).....	53
圖 32	金線接合觀測圖(推拉力高實驗組).....	53
圖 33	金線接合觀測圖(推拉力低實驗組).....	54

符號說明

- S/N : signal to noise ration , 訊號雜訊比
 S_n : 實驗數值的標準偏差
 S : 標準差
 m : 目標值
 \bar{y} : 平均值
 y_i : 第 i 組實驗數據
 SS_{Total} : 實驗的總平方和
 SS_j : 因子平方和
 MS_j : 均方和



第一章、緒論

電力電子發展已逾 50 年，功率電力電子元件是其核心，過去以矽(Si)材料為主，最常見的如泛用在交換式電源供應器(Switching Mode Power Supply, SMPS)及 AC-DC 轉換器中的 MOSFET，用於變頻器(Inverter)的 IGBT，至今矽特性已近極限，電力電子技術持續進展，有賴新興的寬能隙(Wide Bandgap)材料，如氮化鎵(GaN)及碳化矽(SiC)等電子元件等，美國、日本及歐洲一些研究單位已進行多年此類新型功率元件研發，日本稱其為”super devices”。GaN 電子元件的低導通電阻(為 IGBT 之 1/5~1/10)、高速切換速率(為 IGBT 之 10 倍以上)、耐高壓(原理可達 10000V) 與耐高溫(> 250 °C)等特性，且具有成本低於 SiC 元件的優勢。圖 2 是針對 Si、SiC 和 GaN 在不同額定電壓下所計算出來的物理極限曲線，GaN 的導通電阻比 Si 和 SiC 低將近十倍，這也說明了 GaN 在與其他材料間特性的優勢[2]。

在電動車驅動應用，如同在市場與發展趨勢比較中所做的分析，從系統應用面看，GaN 電子元件構成的模組成本具有與 IGBT 匹敵的潛力。

根據新電子雜誌於 2011 年 5 月引用 Yole Developpement 公布的資料顯示，GaN 功率半導體市場已自 2010 年開始萌芽，並以崩潰電壓(Breakdown Voltage)在 200 伏特以下的資訊科技和消費性電子市場為應用大宗[1]。

圖 1 為新電子雜誌引用 Yole Developpement 針對 2009~2015 年 GaN 功

率元件市場產值分析，2012 年初將是 GaN 功率元件市場快速起飛的轉捩點，而整體市場產值將於 2013 年達到 5,000 萬美元規模，並於 2015 年快速激增至 3 億 5,000 萬美元，屆時 GaN 的 IC、功率元件和模組產品將各占總產值三分一的比重[1]。

GaN 功率元件市場規模未來數年會快速成長，成長最快速的是 HEV(油電混合車/電動汽車)及 Power Supply PFC(功率因數修正)電路應用。如果台灣能拿下 20%市占率，零件年產值約新台幣數十億元。若考慮將其相關產品加值鍊，綠能電子元件及模組技術衍生效益和其所能產生的加成效果，可以同時提昇其他產業的表現，如被動元件、電源供應器、家電產品、馬達驅動控制、負載點(POL)電源管理及電壓轉換、分散式再生能源發電變頻器等領域，相乘效果若已保守的 20 倍估計，產業效益就達新台幣近千億元以上，從事相關產業人數，保守估計達千人以上，多則到萬人。2007 年商用電源供應器全球市場規模約 US\$15B，前 10 大供應商，台灣就占了 5 家，台達電居首，其他有光寶、飛宏、康舒及全漢等公司，GaN 功率元件有助於提高電源供應器效率，符合 80 Plus 規範的更高等級。GaN 功率元件也致力於設計製造效率更高體積更小，用於筆記型電腦的 AC-DC 轉換器，及用於 CPU 的 DC-DC 轉換器，這些都能支援資訊產品能發揮更大效益，增強競爭力之處。除上述資訊產品外，GaN 功率元件也可應用於家電產品、併聯型太陽能發電及小型風力發電變頻器。動力馬達控制晶片、高功率的電

力電子元件及模組自主研發與製造，能提升我國電力電子在能源管理技術競爭力，掌握成本優勢，有助於台灣於電動車之世界具有領先地位。

1.1 研究動機與目的

而功率元件中 GaN HEMT 結合高傳導電子密度、高電子遷移率和較寬的能隙，使其可在指定的反向耐壓下，顯著降低元件的導通電阻 $R_{DS(on)}$ 。適合於製作高頻率、大功率和高效率的電子器件，因此 GaN HEMT 逐漸成為目前學術研究重點。

而在晶粒的封裝製程考量上也必須達到符合低傳導阻抗以及可承受高電流的要求，才能完整的呈現出 GaN HEMT 的特性。因為晶粒的封裝如果無法配合，不僅會造成無法量測到晶粒的特性，且也可能因不合適的封裝製程造成晶粒的劣化、降低使用壽命。

封裝製程中最關鍵的便是晶粒連線技術，而 Wire Bond 接合技術是目前使用最多的晶粒連線方式。Wire Bond 是最早也是目前應用最廣的技術，由於 Wire Bond 接合技術相當簡易及便利，加上長時間下來與之相配合之設備及相關技術皆已相當完善，且現今其製程作業皆已經利用自動化或半自動化方式進行，加上材料與製程技術的不斷改善，因此在封裝製程中 Wire Bond 接合技術至今仍然未被淘汰，特別是金線的熱音波接合技術。但由於金線尺寸非常細小，在 Wire Bond 後的鐸點強度並不大，所以接合的強度，

便與 Wire Bond 製程控制參數的設定會有顯著的影響。

目前國內鮮少有關 GaN 功率元件的封裝研究，而此次研究嘗試以 GaN HEMT，使用不同的 Wire Bond 製程控制參數，利用實驗計畫法及變異數分析進行實驗，探討 Wire Bond 製程控制參數與金線接合強度的關係，並嘗試比對 GaN HEMT 電性在不同 Wire Bond 製程控制參數下的變化。希望藉由設計合適的 Wire Bond 製程，達到可以呈現 GaN HEMT 特性，這是此研究的目的。

1.2 文獻回顧

有關 Wire Bond 製程改善之相關文獻，簡述如下：

陳建良[3]指出熱音波銲接過程中影響 Wire Bond 接合的主要參數貢獻度：超音波振動頻率>瓷嘴下壓力量>超音波振動時間。同時利用田口回歸分析方法，尋求熱音波銲接過程中之最佳參數組合。並藉此提高熱音波銲線機銲接的成功。

陳柏光[4]主要表示銲線機的銲頭型態及超音波振動時間、瓷嘴下壓力量等參數對銲接品質的影響。藉由直交陣列配置的控制因子及水準數來進行實驗規劃，透過訊號雜訊比(Signal to Noise Ratio , S/N Ratio)可以了解各個參數對品質特性的影響，進而決定最佳參數水準組合，研究結果在銲針型態固定，則超音波振動時間加長，其接合點斷裂強度有增強趨勢。

張恆碩[5]利用不同的接合參數，造成時效過程中得到不同的金鋁微接點組織。在接合的介面所留下的 Passive Region 愈少，所得的接合強度愈好，時效過程較不容易發生及早退化。接合介面所留下的 Passive Region 愈多，將造成金屬接合過程中的不均勻成長，導致應力集中並發生 Crack。

黃焜銘[6]針對微細間距的 BGA 產品，為求提高製程能力，故從金線之評估下手，先從五種材料中找出較佳的一種後，再試錒針之搭配與比較，選定好錒針與金線之組合後，選用田口實驗直交表來找出錒接之關鍵參數，經實驗分析後，取超音波振動時間、瓷嘴下壓力量、超音波振動頻率為第一錒點及第二錒點之主要參數，最後應用反應曲面法(Respond Surface Method, RSM)來顯示其主因子、水準。

上述之參考文獻，綜合其歸納如下：

瓷嘴下壓力量、超音波振動頻率、晶片加熱溫度、超音波振動時間在經過實驗後，是最常出現之最佳控制參數，對於第一錒點影響性大。

而經由實驗計劃或其他之統計方法找出最佳參數後，第一錒點之改善是顯著的，且大都有明顯之改善。但多數研究皆未實際再將 Wire Bond 前後電性進行比對。

1.3 論文架構

本論文架構共分成四章：

第一章、緒論：包含研究動機、研究目的及論文架構。

第二章、封裝製程與實驗方法介紹：包含封裝作業說明及此次實驗所進行的實驗方法介紹。

第三章、實驗研究：實驗取得資料，來驗證本研究之最佳參數，以反應實際可行之製程參數的結果。

第四章、結論與建議：將分析結果作成結論，並提出未來的研究方向與建議。



第二章、封裝製程與實驗作法介紹

2.1 封裝製程介紹

所有電子產品的電子訊號及電力傳送必須經過線路之連接方可達成，IC 封裝即可達到此一功能。而線路連接之後，各個電子元件間的訊號傳遞，則可經由這些電路加以輸送。IC 封裝的另一功能則是藉由封裝材料之導熱功能將電子於線路間傳遞產生之熱量去除，以避免 IC 晶粒因過熱而毀損。

最後，IC 封裝除對易碎的晶粒提供了足夠的機械強度及適當的保護，亦避免了精細的積體電路受到污染的可能性。IC 封裝除能提供上述之主要功能之外，並提供了安全的使用及簡便的操作環境。

綜合而言 IC 封裝對於晶粒而言具有 4 項功能：

1. 電性傳遞：晶粒所產生的訊號，或由外界輸入晶粒的訊號，皆需透過封裝線路的傳送，並送達至正確的位置。
2. 散熱功能：另外晶粒的發熱量相當驚人，可藉由封裝的熱傳，將晶粒的發熱排出。
3. 保護功能：封裝可將晶粒密封，隔絕外界污染及外力的破壞。
4. 提供足夠的機械強度：IC 封裝的一項主要目的，就是保護易碎的晶粒，提供足夠的機械強度，供後續製程使用。

封裝製程大致有晶粒切割(Die Saw)、黏晶(Die Bond)、鐳線(Wire Bond)、

封膠(Mold), 剪切/成形(Trim/Form)等步驟(圖 3)。以下將依序作製程之簡介。

2.1.1 Die Saw Process

晶片切割之目的是要將晶片上一顆顆之晶粒(Die)切割分離。首先在晶片背面貼上膠膜(Blue Tape)並置於鋼製之框架上, 此一動作叫晶圓黏片(Wafer Mount)如圖 4。而後再送至切割機上進行切割, 圖 5 為切割製程的示意圖。

切割完後, 一顆顆之晶粒井然有序的排列黏著在膠膜上如圖 6, 同時由於框架之支撐可避免膠膜皺摺而使晶粒互相碰撞, 而框架撐住膠帶以便於搬運。

Die Saw 製程同時需留意下列問題, 以避免製程上的異常。

1. 控制切割刀具的 Life Time, 以避免因刀具崩裂造成的晶粒的 Crack。
2. 於切割過程使用的清洗水壓須控制在適當之條件, 以減少對晶片之應力破壞。
3. 清洗壓力及角度的控制可以減少切割時的矽粉殘留。
4. 調整切割速度可避免晶粒崩裂。
5. Tape 的黏性要適當的控制, 太黏不易後製程 Die Bond, 不黏亦會在切割時流失晶粒。

對於 Die Saw 後的檢查是利用顯微鏡進行檢查, 檢查項目為晶粒是否有崩裂, 而檢查規格則大多以一般半導體相關的國際規範 MIL-STD-883F METHOD 2010.11 要求(圖 7)[7]。

2.1.2 Die Bond Process

Die Bond 的目的是將一顆顆分離的晶粒放置在導線架(Lead Frame)上，並使用銀膠(Epoxy)或 Solder Paste 黏著固定。

導線架是提供晶粒一個黏著的位置(晶粒座 Die Pad)，並預設有可延伸 IC 晶粒電路的延伸腳。一個導線架上依不同的設計可以有數個晶粒座，這數個晶粒座通常排成一列，亦有成矩陣式的多列排法。

而對於晶粒與導線架接合方式主要分為下 2 種:

1. 環氧樹脂黏結法(Epoxy)利用點膠等方法將環氧樹脂(Epoxy)塗佈於導線架的晶粒承載座上，置妥晶粒後再加熱使其完成黏接，膠中填入銀等金屬以提高其熱傳導性。而晶粒與導線架黏接機制為機械力與靜電力，機械力是藉由物體表面凹凸粗糙性來壓入或填入黏結劑來達到黏結效果，而靜電力為兩物體間因帶有電荷而互相排斥或吸引的作用力。
2. 銲接黏結法(Solder Paste)為利用合金反應進行晶粒黏結的方法，可以形成熱傳導性優良的黏結。但銲接黏結法必須在氮氣遮護的環境中進行以防止銲錫氧化及孔洞，一般常見的銲料有金-矽、金-錫、金-鍍等硬質合金與鉛-錫、鉛-銀-銅等軟質合金，使用材質較硬的銲料有熱膨脹係數差異引起的應力破壞問題；使用材質較軟的銲料可以改善此一缺點，但須在晶粒背面先鍍上金屬薄膜以達成共晶條件，可促進銲料的潤濕。

Die Bond 作業流程為導線架先經機台傳輸至定位後，首先要在晶粒座

預定黏著晶粒的位置上點上銀膠或 Solder Paste，然後移至下一位置放置晶粒。而經過切割之晶圓上之晶粒則由取放臂一顆一顆地置放在已點膠之晶粒座上。Die Bond 後的導線架則經由機台傳輸設備送至彈匣內。Die Bond 後之成品如圖 8 所示。

點膠時晶粒座上之點膠量也要作適當的控制，才能使晶粒能很正確的置放於晶粒座上，以進行後續的製程，若膠量太多可能會造成膠體溢出至晶粒表面，若膠量太少則可能會無法完整的覆蓋晶粒背部，進而影響晶粒的散熱。

而晶粒之取放為 Die Bond Process 重點，除了用取放臂上的真空吸嘴從晶圓上取出晶粒置於導線架之晶粒座上外，在晶圓底下則同時要頂針裝置將晶粒頂出以利吸嘴之吸取。因為每顆晶粒之間距很小，在吸取需注意避免造成晶粒之脆裂。

最後晶粒置放於導線架上的晶粒座後，再經過烘烤後才能牢固的黏著。對於 Die Bond 後的檢查是以晶粒推力測試為主，檢測方式及規格依據國際規範 MIL-STD-883F METHOD 2019.7 所規範的晶片推力測試要求進行。另外也需要檢查晶粒與導線架間的接合膠是否存有 Void，可採用 Ultrasonic Inspection 進行檢測，判斷規格則依圖 9(國際規範 MIL-STD-883F METHOD 2030)要求，晶粒與導線架間的接合膠的 Void 不得大於晶粒面積 10%。

2.1.3 Wire Bond Process

鐳線的目的是將晶粒上的接點以連接線連接到導線架上之引腳，藉而將 IC 晶粒之電路訊號傳輸到外界。

一般在鐳線製程中所使用的機器依其提供鐳線能量的方法區分：

1. 熱壓鐳線：熱壓鐳線使用的線材為金線，鐳接前先對金線之端點進行燒結

成球的動作，再利用瓷嘴將金線壓於鐳墊上，並將瓷嘴與導線架加熱至固定的溫度，增加金屬間原子擴散的速度，然後再給予一適當的壓力使金線塑性變形，並使其接觸面間產生接和的效果。熱壓鐳線所需的預熱溫度(300 °C ~400 °C)與接合壓力較高，容易造成晶片的損傷，目前已鮮少使用。

2. 超音波鐳線：超音波鐳接是一種原子間擴散的接合，愈易擴散者，愈易接

合，此結晶為金屬原子所致，接合時的振動能引起原子移動(原子擴散)，原子擴散後，再結晶即完成接合。

3. 熱+超音波鐳線：熱+超音波鐳線和超音波鐳線所運用的鐳接原理大致相

同，以超音波能量為主，但對於晶粒加熱做為輔助，此溫度有助於跨越原子擴散的活化能，可使超音波熔接表現更好。

此次研究採用熱+超音波鐳線方式進行鐳線作業。鐳線作業流程如下說明：

- A. 金線穿過瓷嘴，通入電流 (Electronic Flame off Spark) 熔化金線，使在金線底部形成一個金球。

- B. 當燒球完成時，所形成的金球就會卡在瓷嘴的下方底部。
- C. 瓷嘴下降至 Bond Pad 上，金球受瓷嘴下壓而抵住 Bond Pad 的結合面，這時熱板上的溫度傳入金球，使的金球溫度上升，施加超音波能量，令金球與錫墊結合。
- D. 瓷嘴提起離開熔接表面移往第二個熔接位置，此時瓷嘴已完成線弧的輪廓軌跡路線形成迴路。
- E. 完成線弧運動軌跡後瓷嘴再次移到第二錫點位置，此時移動裝載導線架的平台，將 Bond Pad 移往至瓷嘴下方。
- F. 瓷嘴下降如步驟 (C) 形成錫接結合點。
- G. 第二結合點完成後瓷嘴上升至瓷嘴工作位置原點，位在瓷嘴上方的線鉗會將金線拉起並將之扯斷。
- H. 再通入電流完成燒球動作，使另一個金球得以形成。
- 錫線作業流程如圖 10。錫線完成後之晶粒與導線架則如圖 11。

一般連接線的材料以鋁及金為主，另外銅線也是目前較常被選擇的材料，其線材的耐電流及相關的電性比較皆以金為較佳(表 1~表 4)。

另外 Wire Bond 後，檢查接合線與 Bond Pad 的接合是否良好，可利用 Wire Pull & Ball Shear 方式(如圖 12 & 13)進行驗證。目前已有相關的國際技術標準組織對檢查方式及規則訂定規範[8][9]。而 Wire Pull & Ball Shear 要求規格如圖 14 & 15。

2.1.4 Mold Process

IC 外部塑膠封裝材料為熱固性環氧樹脂，其作用為將導線架完全包覆，使鐸線好的晶粒有所保護。導線架稱為 Lead Frame，其目的是在承載晶粒及鐸接金線用，使信號得以順利傳遞。

封膠之過程比較單純，首先將鐸線完成之導線架置放於框架上並先行預熱，再將框架置於壓模機(Mold Press)上的封裝模穴中，此時預熱好的樹脂亦準備好投入封裝模穴上之樹脂進料口。啟動機器後，壓模機壓下，封閉上下模再將半溶化後之樹脂擠入模中，待樹脂充填硬化後，再開模取出成品，其作業流程圖如圖 16 所示。

封膠完成後的成品如圖 17，可以看到在每一條導線架上之每一顆晶粒包覆著堅固之外殼，並伸出外引腳互相串聯在一起。

2.1.5 Trim/Form Process

封膠完後的導線架需先將導線架上多餘之殘膠去除，並且經過電鍍(Plating)以增加引腳之導電性及抗氧化性，而後再進行剪切成型。剪切之目的，是要將整條導線架上已封裝好之晶粒，每個獨立分開。同時，亦要把不需要的連接用材料及部份凸出之樹脂切除。剪切完成時之每個獨立封膠晶粒之模樣，是一塊堅固的樹脂硬殼並由側面伸出引腳。

而成型的目的，則是將這些引腳壓成各種預先設計好之形狀，以便於裝置在電路板上使用，由於定位及動作的機器連續性，剪切及成型通常在一

部機器上，或分成兩部機上連續完成。

2.2 Wire Bond 加工後品質特性量測方式

Wire Pull 測試檢驗為打線製程中主要檢驗項目之一。一般而言，封裝製程所參考的標準是依據電子構裝業者在鉚點品管工程中訂定的審查標準，其中針對 1 mil 金線規格為：鉚接完成後之最低拉力標準為 3g。在作鉚點拉力測試時，除了檢查該鉚點之拉力強度外，鉚點之斷裂位置如圖 18，也是審核標準之一。

A 點破壞：晶片上的鉚墊被拔起，該點破壞為最差的破壞情形，造成該破壞方式的原因有：鉚墊本身與晶片結合力不足、打線造成鉚墊的破壞。

B 點破壞：線頸斷裂該形式的破壞代表著線頸強度不足，較金線整體強度而言，因為破壞點位於熱影響區，可能材料性質的改變或線頸有破損，需仔細評估屬於哪種方式的損壞，即使量測值有達到製程規格，都不可忽視該情況的破壞。

C & D 點破壞：此狀況為最佳情形的破壞點，該破壞值最為接近金線強度值。

E 點破壞：若是發現該斷裂情形，多屬於參數與陶瓷嘴選用不當造成，視情況調整。

以上五種線弧斷裂情形，A、B 與 E 點斷裂情形，屬於較嚴重即使量測值大於製程規格，也需要立即調整或調查原因。

Ball Shear 實驗是在量測單一銲點上的接合強度，尤其是針對金球形接合的強度。當推刀(Shear Blade)移至適當位置後，以固定的速度往金球成型後的第一銲點前進，並將金球推起。此時推刀上的感應器(Force Sensor)便會把測得的推力值紀錄下來。

2.3 超音波銲接共晶原理

超音波能是機械的振動能，工作頻率超過聲波(正常的人類聽力，其頻率上限為 18 kHz)。Wire Bond 封裝製程所使用的超音波的頻率多為 40 kHz 到 120 kHz。超音波這種銲接方法：在銲接開始時，金屬材料在摩擦力作用下發生了強烈的塑性流動，為金屬表面之間的接觸創造了條件。而銲接區的高溫以及高頻振動，則進一步造成了金屬晶格上原子的受激活狀態，因此，就有可能透過公共電子形成了原子間的電子橋，即所謂金屬鍵合[10]。超音波鍵合機制乃是利用「熱能」及「超音波」提供能量，使金屬界面間產生一種高頻快速的運動，藉著界面之摩擦去除表層的金屬氧化物，在高頻的往覆運動過程氧化膜將來不及生成，並結合摩擦所產生的犁割、黏著特性使原子產生擴散遷移，促進金屬界面間的金屬原子形成鍵結，達成 Bonding 的目的。

2.4 田口實驗設計法

實驗計劃法是以較少成本來獲得最佳效果的製程改善。實驗計劃法於 1920 年代由 R.A. Fisher 創始。實驗計劃法傳到日本以後，日本工業界隨品質管制的實施，普遍的採用此方法。1949 年田口玄一博士在 ECL(Electrical Communication Lab.)研究開發中負責提高生產力的工作。為了改進實驗計劃的成本效益，1950 年代田口玄一博士發展出一套實驗計劃方法，使用直交表的實驗計劃方法，並帶領研究人員開發各種直交表、使用方式及分析方法。田口博士所開發的品質管制方法由於簡單易用而受推崇，AT&T 貝爾實驗室、福特汽車公司首開風氣，在 1980~1982 年將田口方法引介到美國。田口博士協助成立 American Supplier Institute，使自己的方法和觀念能更加普及。後續推廣範圍更擴至加拿大、墨西哥、英國、法國、義大利、西班牙，這些國家均有機構推廣。1985 年我國亦由鍾清章教授領導下成立田口品質工程推行委員會，持續推廣至今。

田口博士之參數設計可分成三大階段，包括 6 個步驟如下[11]：

第一階段：規劃實驗

步驟 1：選定品質特性：品質特性最好是選擇可以測量的實數參數；品質特性的選擇常常影響整個專案的成敗。

步驟 2：判定品質特性之規格，亦即品質特性之理想值。

步驟 3：決定控制因子(Control Factors)，並定出它們的水準。

步驟 4：依控制因子及其水準的數目選定適當的直交表(Orthogonal Array)，並安排完整的實驗計劃。直交表的構想是用較少的實驗次數來獲得有用的資訊。對於解決工程品質問題的目的而言，田口式直交表常常是兼顧實驗成本及精準度下很好的折衷辦法。每一行都是自我平衡的(Self-Balanced)且每一行中各水準出現的頻率是相同的。每兩行間也都是互相平衡的(Mutual-Balanced)，且在某一行中，出現某水準的所有實驗組，在另外一行中，出現各水準的頻率是相同的。同時擁有以上這兩個特性的實驗計劃表稱為直交表。

典型的直交表示以 $L_a(bc)$ 來命名，它代表共有 a 組實驗、最多可以容納 b 個水準的因子 c 個，以及代表一個 a 橫列 c 直行的直交表。有些直交表同時可以容納兩種水準的因子，此時已 $L_a(bc \times de)$ 來表示，它代表共有 a 組實驗、最多可以容納 b 個水準的因子 c 個及 d 個水準的因子 e 個。

第二階段：執行實驗(Performing the Experiment)

步驟 5：執行實驗，記錄實驗數據。

第三階段：分析及驗證(Verification)實驗結果

步驟 6：資料分析。

品質特性依規格不同而有不同之計算公式，一般可區分為 (1)望目特性 (Nominal-the-Better)、(2) 望小特性 (Smaller-the-Better)、(3)望大特性 (Larger-the-Better)。在田口參數設計方法中以 S/N 比 (Signal to Noise Ration，訊號雜訊比)為品質指標，此值越大則表示品質越佳。其計算公式分別描述如下：

(1). 望目特性之 S/N 比：

望目特性第一型，用於必須同時考慮品質特性的變異及平均的偏心值時，即調整因子不存在時用：

$$\text{望目特性第一型 S/N 比} = -10 \log[(\bar{y}_i - m)^2 + S_n^2] \quad (2-1)$$

其中 \bar{y} 為平均值， m 為目標值， S 為標準差， S_n 為實驗數值的標準偏差， n 為實驗數值個數。

望目特性第二型，用於存在一個以上的「調整因子」，可以將平均值調至目標值，而使得偏心值可以不必計入，亦即只考慮品質特性的變異時：

$$\text{望目特性第二型 S/N 比} = -10 \log\left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2}{n}\right] = -10 \log(S_n^2) \quad (2-2)$$

其中 n 代表資料數目， y_i 表示為第 i 組實驗數據。

望目特性第三型，與上述望目特性第二型相同的情況，但是因為各組資料之平均值大小相差很大，故此時比較「相對變異」會更合理。

$$\text{望目特性第三型 S/N 比} = -10 \log \left[\frac{S^2}{y^2} \right] \quad (2-3)$$

(2). 望小特性 S/N 比：

非負數值且其值越小越好的特性稱為望小特性值。如耗油量、異常數量等即為望小特性值，其理想值為 0。在望小特性中，希望平均值在零，變異數愈小愈好，田口建議用下列公式計算其 S/N 比。

$$\text{望小特性 S/N 比} = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right] = -10 \log(\bar{y}^2 s_n^2) \quad (2-4)$$

(3). 望大特性 S/N 比：

非負數值且其值越大越好的特性稱為望大特性值。如壽命、燃料效率等即為望大特性值。品質特性值越大越好時，如拉力強度、黏著強度等，我們希望平均值為無限大，變異數愈小愈好。當品質特性值越大越好時，乃品質特性值越小越好的相反狀況，田口建議取品質特性值的倒數(1/y)，依下列公式計算其 S/N 比，評估原則仍同品質特性值越小越好時，以 S/N 比之值較大者為佳。

$$\text{望大特性 S/N 比} = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \right] \quad (2-5)$$

在田口實驗計畫所使用的直接表是一種具有直接性及經濟性的方式，一次就可以做許多因素的實驗。在實驗計畫中最主要的一個特性，便是實驗結果的再現性。例如：觀察 A、B 兩種因子的排列情形，因子 B 對因子 A 各

影響的水準均相等，且因子 A 對因子 B 各影響水準也均相等，此即稱為直交性。這是一種在評估因素水準時相當重要的特性。

2.5 變異數分析

變異數分析(Analysis Of Variation , ANOVA)：檢定三個或三個以上的母體平均數是否相等的方法，或檢定因子(Factor)對依變數是否有影響。變異數分析是一種統計分析的方法，係將一組資料的變異，依可能發生的變異來源，分割為數個部份，亦即每一部份均可歸因於某原因(變異來源)；測度這些不同的變異來源，可瞭解各種變異是否有顯著差異；若有差異，則表示某依變異來源對資料具有顯著的影響作用。

ANOVA 之前題假設

1.常態性假設(Normality)：

假設 K 個母體分布均為常態分布。

2.同質性假設(Homogeneity)：

假設 K 個常態母體分布之變異數均相等。

3.獨立性假設(Independence)：

假設 K 個常態母體分布互相均獨立。

這些假設理論上都可利用原始數據一一加以檢定。

變異數分析[12][13]可用來探討各控制因子對品質特性的影響程度，並

分析控制因子影響的大小，進行評估是否為主要影響因子，藉以掌握最有效的對策並做出正確的分析。需先求出實驗的總平方和：

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^9 (y_i - m^2) \quad (2-6)$$

y 為實驗數據，m 為所有實驗數據的平均值，接下來計算 SS_i 因子平方和：

$$SS_j = \sum_{i=1}^3 r(m_{ji} - m)^2 \quad (2-7)$$

r 表示每一水準下之實驗個數，如 L9 表中每一水準下實驗數為三次，所以 r=3，各個平方和之間的關係：

$$\text{總平方和} = (\text{各因子平方和}) + (\text{誤差平方和}) \quad (2-8)$$

實驗的自由度即有關獨立參數之個數，一個 L9 的實驗中就有 9 個自由度，但總平均也是一個自由度，因此總平均和的自由度為 $9-1=8$ ，各因子自由度是水準數減 1。各個自由度之間的關係：

$$\text{總平方和自由度} = (\text{各因子自由度}) + (\text{誤差自由度}) \quad (2-9)$$

由上式得知誤差自由度為 0，所以將平方和 (SS_j) 較小的因子合併視為誤差。均方和 (MS_j) 等於各平方和除以相對應自由度。最後將各因子的均方和分別除以誤差均方和可以得到個別的變異數比值 (F)，F 值越大代表該因子對製程反應的影響越重要，所以 F 值可以作為判斷因子重要性的指標。

第三章、實驗研究

實驗將針對 Wire Bond 參數設定最佳化，將利用田口式實驗計畫法及變異數分析來探討各製程控制參數對於金線接合品質的影響。

為了探討製程控制參數對於金線接合品質影響之程度及其關係，因此設計了 Wire Bond 測試實驗，金線推拉力是此次實驗加工品質的分析指標，製程控制參數設計是依照實際的加工經驗，此次實驗選擇製程當中影響加工品質較為高的製程控制參數，在此選用超音波振動頻率、振動時間、瓷嘴下壓力量、晶片加熱溫度四項參數作為本實驗控制之實驗參數。

3.1 製程評估

GaN HEMT 在封裝型別的選擇上，選取 TO220 Type 進行研究，圖 19 & 20 為 TO220 的橫切面及正視圖。其優點為散熱效率高、結構相較於其他封裝型式較簡單及較容易取得。

目前實驗取得的 GaN HEMT 晶粒在評估使用 TO220 進行封裝時發現有以下幾點困難：

GaN HEMT 晶粒上 Drain 及 Source 的 Bond Pad 分佈在晶粒的 2 側 Bond Pad，易造成金線相互 Short 情況，應用於 TO220 的導線架條件下，是較為複雜的作業。

因考量上述所提到 Wire Bond 作業的問題，故設計了 Bond Pad Re-Layout 封裝製程。

將 GaN 晶粒上的分散的 Drain & Gate Pad 利用連接板方式連接至導線架，可減少原本由晶粒連接至導線架的製程風險。

而連接板部份因考量封裝結構上可能造成電容影響，故連接板材質採用介電常數較小的 AlN 陶瓷材料。

另外在實驗初期嘗試進行 Wire Bond 的 Trial run，但在封裝的作業過程中遭遇了 Bond Pad 有嚴重 Peeling 的問題。

而為避免 Peeling 狀況，就 Wire Bond 機台作業上進行了下列分析，評估可能造成的原因如下：

在 1st 銲點完成後，進行 2nd 銲點的銲接時，瓷嘴會快速移動至 2nd。由於 1st 銲點與 2nd 銲點的高低落差大，造成瓷嘴在移動的過程對金線拉扯，進而造成對 1st 銲點與 Bond Pad 接合界面的 stress。

針對此問題也改變了 Wire Bond 部份作業因應，在機械移動前利用手動方式將金線拉長，拉長的金線用以在機械移動 2nd 時形成減緩層，避免對 1st 銲點與 Bond Pad 接合界面的破壞。

3.2 實驗步驟

3.2.1 Die Saw 實驗作法

由於目前取得的 GaN 晶片皆非完整片，無法使用自動機台進行晶圓黏片作業，因而需要由人工進行操作，而在操作作業上就需要特別小心。且需適當的控制切割時的進刀速度及刀具轉速，避免晶粒崩裂。Die Saw 製程採取委託外包廠商進行作業。

3.2.2 Die Bond 實驗作法

此次實驗將 Ablestik 廠商生產的 84-1LMISR4 銀膠做為晶粒與導線架的接合膠，並以手動進行 Die Bond 作業，首先利用一般針筒抽取銀膠，然後擠壓針筒將銀膠點至導線架上預定黏著晶粒的位置，接著使用塑膠夾將晶粒夾取至已點上銀膠的導線架置放，再將完成接合的晶粒放置於烤箱中，銀膠的烘烤設定為升溫速率 $3 - 5^{\circ}\text{C} / \text{min}$ 將溫度增加至 150°C ，再進行 150°C 進行 1hr 的烘烤，而烘烤後降溫速率為 $3 - 5^{\circ}\text{C} / \text{min}$ ，使銀膠固化達到固定晶粒的目標。

3.2.3 Wire Bond 實驗作法

實驗所使用之機台為新美化(型號 SPB-TS668D) 手動 Wire Bond

Machine(如圖 21)。Wire Bond 線數為 Gate 連接線 1 條；Source 連接線 4 條；Drain 連接線 2 條。先打晶片對地的線即 Source 接點，接著打晶片兩側分別接到左右的 AlN 轉接板即 Drain 及 Gate 接點;最後打 AlN 轉接板至 lead 的線。打線示意圖如圖 22 & 23。而此次研究所使用的連接線材料為製程較成熟及材料較易取得的金。

3.2.4 Mold 實驗作法

採用手動mold膠的方式，使用的膠材為Dow Corning 3140B液態封裝用環氧樹脂。首先利用一般針筒抽取molding膠，然後擠壓針筒將膠點至wire bond後的晶粒的位置，待膠流入金線與晶粒間的空隙後再重新點膠至晶粒，直到將晶粒、金線與連接金線部份的導線架包裹後，再將完成mold的導線架放置於室溫中2~3小時固化。

3.2.5 Trim/Form 實驗作法

此項作業利用一般手工工具斜口鉗，將導線架上連接材料剪除後，即可達到與 Trim 作業相同的結果，導線架上連接材料剪除處如圖 24。

3.3 田口實驗實作狀況

田口實驗設計的目的主要是為了探討製程控制參數對於金線推拉力特

性影響之程度及其關係，因此設計了 Wire Bond 測試實驗，金線推拉力是此次實驗加工品質的分析指標，再透過田口式實驗計劃法運算得到最佳化的加工參數。而作為判定品質特性的金線推拉力規格如下：

Wire Pull (U.S. military standards. MIL-STD-883 wire pull test 1 mil Au wire 規格 >3g)

Ball Shear (Joint Electron Device Engineering Council. JESD22-B116A 1 mil Au wire 規格 >58.3g)

參數設計是依照實際的加工經驗，此次實驗選擇製程當中影響加工品質較為高的製程控制參數，在此次實驗使用：瓷嘴下壓力量、超音波振動頻率、晶片加熱溫度、超音波振動時間四項參數作為控制因子 (Control Factors)。而控制因子的水準數(Levels)為 3。

依規劃的 4 個控制因子及 3 水準，實驗將採用田口實驗計劃法中的 L9 直交表如表 5 所示來進行本實驗。

實驗中各參數如表 6 所示，除了實驗計劃中 4 項的實驗參數外，其他的加工參數皆為固定，使實驗結果保持一致性和穩定。

利用田口實驗方法 L9 直交表，所產生出來的 9 組實驗的量測數據，加以歸類整理並且分析，在直交表的每組實驗共做 3 次，所得到的數據共有 27 組，並將 27 組進行拉力的量測實驗，分析每組拉力值及破壞點位置，找出最佳的參數。在表 7 的拉力品質特性量測數據表中可看出，影響拉力值最顯著的因子為瓷嘴下壓力量。

由 Wire Pull S/N 回應圖(如圖 25)推定最適條件如下:

瓷嘴下壓力量:3、超音波振動頻率:1、晶片加熱溫度:3、超音波振動時間:3

Ball Shear 數據量測在這個實驗中我們可以發現瓷嘴下壓力量對銲點強度的影響最為顯著，如表 8 所示。

由 Ball Shear S/N 回應圖(如圖 26)可推定最適條件如下:

瓷嘴下壓力量:3、超音波振動頻率:1、晶片加熱溫度:3、超音波振動時間:2

但考慮晶片加熱溫度因素，由 S/N 回應圖看到水準 1 與水準 3 差異不大，但為了避免材料氧化考量，採以溫度低者為優先，故選擇水準 1。

經由以上評估之結果，決定製程之最佳條件為:

瓷嘴下壓力量:3、超音波振動頻率:1、晶片加熱溫度:1、超音波振動時間:3

3.4 變異數分析

另外進行變異數分析表 9 及表 10，由各個影響因子計算所得 F 分配值，可得知瓷嘴下壓力量為最顯著因子，驗證結果與田口實驗方法 S/N 回應圖計算相符。而後進行 90%信心水準檢定時，金線推力未達到檢定水準，推估為取樣樣品數不足所導致。

3.5 驗證實驗

利用田口實驗所得到的最佳參數(瓷嘴下壓力量:3、超音波振動頻率:1、

晶片加熱溫度:1、超音波振動時間:3)，進行推拉力驗證，量測數據如表 11 & 表 12，由量測數據得知此次實驗結果為正確。

3.6 封裝前後電性分析

就推拉力量測值最佳及最差的 Wire Bond 實驗參數，取具有電性 5mm GaN 樣品(如圖 27)進行 2 組電性比照實驗。

實驗方式為先進行量測未 Wire Bond 前晶片 IV 特性曲線，再量測 Wire Bond 後的 IV 特性曲線(如圖 28-圖 31)，藉此比對推拉力對於電性上的差異。由量測資料判讀 Wire Bond 後在 Static Drain to Source On Resistance(RDS (on)) 有部份差異，最佳參數實驗組量測值為 3.378Ω，最差參數實驗組量測值為 4.505Ω(如表 13)，但經比較 Wire Bond 前量測值卻發現最差參數實驗組量測值為 5Ω，懷疑為晶粒量測時發生量測探針與 Pad 接觸不良所導致。

第四章、結論與建議

4.1 GaN HEMT Wire Bond 製程分析結論

不同的製程參數組合的推拉力量測值，可發現在參數的調整上應盡量採取瓷嘴下壓力量重及超音波振動頻率低的方向作業，而晶片加熱溫度及超音波振動時間則非主要的控制參數。

由電性資料的比對上雖然因封裝前資料有部份量測問題，但評估此 2 顆晶粒為同一批生產，就其晶粒特性上的差異性不高，故推論為 Wire Bond 後的差異性應多數來自於 Wire Bond 製程，而經由外觀分析金線推拉力差的實驗組，發現其 Wire Bond 過程中已造成 Bond Pad 與晶片接合界面的損傷導致(如圖 32 & 33)，而於電性上將反應於 RDS (on)的數值，推拉力越差則 RDS (on)越高。

另外在 GaN HEMT 的 Wire Bond 作業中，發現不同的 Wafer Lot 所生產出的 Bond Pad Metal 與晶片接合性存在有著相當大的差異，在同樣的製程參數作業中，Bond Pad 接合性不佳的樣品則會發生 Bond Pad Peeling 狀況，故在每批不同生產批次的晶粒於 Wire Bond 作業前，皆需要取部份電性功能不佳的樣品進行試打線，並透過推拉力找出合適的製程控制參數範圍，才可避免 Bond Pad 損傷。

4.2 未來目標與建議

本文所使用的電性分析，現行只針對 RDS (on) 進行探討，但真正 GaN HEMT 可以被量測的電性特性，尚包括 Gate-to-Source Voltage、Drain-to-Source Leakage Current 或 Gate-to-Source Forward Leakage 等特性，故在未來的探討中，亦能加入這些比較因子，探討 Wire Bond 對於 GaN HEMT 之影響。另外就 GaN HEMT Wire Bond 而言，若能考慮 Wire Bond 之可靠度驗證，並能搭配壽命預估，相信對提升 GaN HEMT 結構安全性，能有很大的幫助。



參考文獻

1. 王智弘，林苑卿，「下世代功率半導體競技賽開打 GaN/SiC 爭搶主流寶座」，新電子雜誌，民國一百年五月。
2. Tim McDonald, "Cost-Effective Revolutionary Performance", Power Electronics Europe, pp.30, August 2008.
3. 陳建良，「電子構裝熱音波鐳線製程研究」，國立台灣科技大學，醫學工程研究所碩士學位論文，民國一百年。
4. 陳柏光，「應用田口法探討鐳線製程參數最佳化」，逢甲大學，資訊電機工程碩士在職專班論文，民國九十八年。
5. 張恆碩，「電子構裝金線接點破壞機構及顯微組織分析」，國立中山大學，材料科學研究所博士論文，民國九十年。
6. 黃坤銘，"Applying Taguchi's Method to Study the Optimum Parameter for the 50um Fine Pitch on the Pad in the Wire Bonding Process of the IC Assembly", 雲林科技大學，工業工程管理學系碩士論文，民國九十一年。
7. MIL Standard- Internal Visual, MIL STD 883F 2010.11, Department of Defense USA, pp.24, June 2004.

8. JESD Standard-Wire Bond Shear Test Method, JESD22-B116A, JESD Solid State Technology Association, pp.8, July 1998.
9. MIL Standard- Test Method Standard for Microcircuits, MIL STD 883F 2011.7, Department of Defense USA, pp.5, March 1989.
10. George G. Harman and John Albers, "The Ultrasonic Welding as Applied to Aluminurn-and Gold-Wire Bonding", IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Package, Vol.13, pp.406, September 1997.
- 11.蘇朝敦，產品穩健設計田口品質工程方法的介紹和應用，中華民國品質學會，台北，民國八十六年。
- 12.鍾清章，田口式品質工程導論，中華民國品質管制學會，台北，民國八十五年。
- 13.葉怡成，實驗計畫法-製程與產品最佳化，五南圖書出版社，台北，民國九十年。

附 錄

特 性	單 位	金	鋁	銅	
導電度	σ	$1/\Omega \cdot m$	1.25×10^7	1.56×10^7	1.711×10^7
比重 ($T_0 \sim T_m \alpha$ 平均值)	ρ	g/m^3	18.3×10^6	2.54×10^6	8.96×10^6
比熱 ($T_0 \sim T_m \alpha$ 平均值)	C	$ws/g \cdot ^\circ C$	0.14	1	0.385
融點	T_m	$^\circ C$	1063	660	1083
融解熱	H_f	ws/g	62.8	311	211.8
熱傳導率	K	$w/m \cdot ^\circ C$	293	238	394

表1. 線材特性表

線徑(μm)(mil)		接線長度 (mm)				
		1	2	3	4	5
25	1.00	2.71	1.36	0.90	0.68	0.54
30	1.20	3.91	1.95	1.30	0.98	0.78
38	1.50	6.27	3.13	2.09	1.57	1.25

表2. 金線熔斷電流表(單位:A)

線徑(μm)(mil)		接線長度 (mm)				
		1	2	3	4	5
25	1.00	2.14	1.07	0.71	0.53	0.43
30	1.20	3.08	1.54	1.03	0.77	0.62
38	1.50	4.94	2.47	1.65	1.23	0.99

表3. 鋁線熔斷電流表(單位:A)

線徑(μm)(mil)		接線長度 (mm)				
		1	2	3	4	5
25	1.00	3.71	1.86	1.24	0.93	0.74
30	1.20	5.35	2.67	1.78	1.34	1.07
38	1.50	8.58	4.29	2.86	2.14	1.72

表4. 銅線熔斷電流表(單位:A)

實驗編號	控制因子			
	瓷嘴下壓力量	超音波振動頻率	晶片加熱溫度	超音波振動時間
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表5. Wire Bond製程參數 L9直交表

水準	1	2	3	單位
控制因子				
瓷嘴下壓力量	40	50	60	g
超音波振動頻率	0.21	0.24	0.27	W
晶片加熱溫度	100	120	140	°C
超音波振動時間	40	50	60	ms

表6. Wire Bond製程參數表

		實驗1	實驗2	實驗3	MAX	MIN	AVGE.	STDEV
第1組	WIRE PULL	2.15	2.09	2.59	2.59	2.09	2.28	0.273008
	斷點	A	A	A				
第2組	WIRE PULL	1.33	1.76	1.10	1.76	1.10	1.40	0.335012
	斷點	A	A	A				
第3組	WIRE PULL	1.45	1.90	1.20	1.90	1.20	1.52	0.35473
	斷點	A	A	A				
第4組	WIRE PULL	1.56	1.31	1.69	1.69	1.31	1.52	0.193132
	斷點	A	A	A				
第5組	WIRE PULL	2.00	0.96	1.56	2.00	0.96	1.51	0.522047
	斷點	A	D	A				
第6組	WIRE PULL	0.86	0.95	1.58	1.58	0.86	1.13	0.392301
	斷點	A	A	A				
第7組	WIRE PULL	4.63	3.47	3.26	4.63	3.26	3.79	0.737857
	斷點	D	D	D				
第8組	WIRE PULL	3.84	3.08	2.93	3.84	2.93	3.28	0.487887
	斷點	D	D	B				
第9組	WIRE PULL	2.49	1.15	1.38	2.49	1.15	1.67	0.716543
	斷點	A	A	A				

表7. Wire Pull量測表

		實驗1	實驗2	實驗3	MAX	MIN	AVGE.	STDEV
第1組	BALL SHEAR	18.33	11.49	15.2	18.33	11.49	15.01	3.424096
第2組	BALL SHEAR	10.12	9.12	12.56	12.56	9.12	10.60	1.76952
第3組	BALL SHEAR	11.01	16.23	9.11	16.23	9.11	12.12	3.686751
第4組	BALL SHEAR	16.23	15.51	11.13	16.23	11.13	14.29	2.760217
第5組	BALL SHEAR	12.98	10.25	17.54	17.54	10.25	13.59	3.683083
第6組	BALL SHEAR	17.15	15.99	11.29	17.15	11.29	14.81	3.103095
第7組	BALL SHEAR	53.32	64.19	52.07	64.19	52.07	56.53	6.666006
第8組	BALL SHEAR	20.78	26.54	33.62	33.62	20.78	26.98	6.431298
第9組	BALL SHEAR	13.89	16.84	21.53	21.53	13.89	17.42	3.852882

表8. Ball Shear量測表

Factor	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean of Square	F	F _{0.10}
超音波振動頻率	1.78716296	2	0.89358148	2.96978724	4.3246
超音波振動時間	0.164362963	2	0.082181481	0.27312732	4.3246
瓷嘴下壓力量	3.85905185	2	1.92952593	6.41271287	4.3246
晶片加熱溫度	1.0392	2	0.5196	1.72687268	4.3246
Total error	1.203562963	4	0.300890741		
Total	2.45293333	12			

表9. Wire Pull變異數分析表

Factor	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean of Square	F	F _{0.10}
超音波振動頻率	329.747252	2	164.873626	1.28739746	4.3246
超音波振動時間	239.9628667	2	119.9814333	0.93686174	4.3246
瓷嘴下壓力量	823.426496	2	411.713248	3.21481732	4.3246
晶片加熱溫度	272.3066741	2	136.153337	1.06313826	4.3246
Total error	512.2695407	4	128.0673852		
Total	10.95893333	12			

表10. Ball Shear變異數分析表



		實驗1	實驗2	實驗3	MAX	MIN	AVGE.	STDEV
第10組	WIRE PULL	3.33	4.24	3.92	4.24	3.33	3.83	0.461628
	斷點	D	D	D				

表11. Wire Pull量測表(驗證組)

		實驗1	實驗2	實驗3	MAX	MIN	AVGE.	STDEV
第10組	BALL SHEAR	68.67	59.26	54.84	68.67	54.84	60.92	7.063443

表12. Ball Shear量測表(驗證組)

	Parameter	推拉力高		推拉力低		Units
		晶片測試值	封裝後測試值	晶片測試值	封裝後測試值	
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	5	3.378	4.464	4.505	Ω
I_D	Continuous Drain Current, $V_{GS@_1_V}$	1000	1000	1000	1000	mA

表13. Wire Bond實驗前後電性比照表

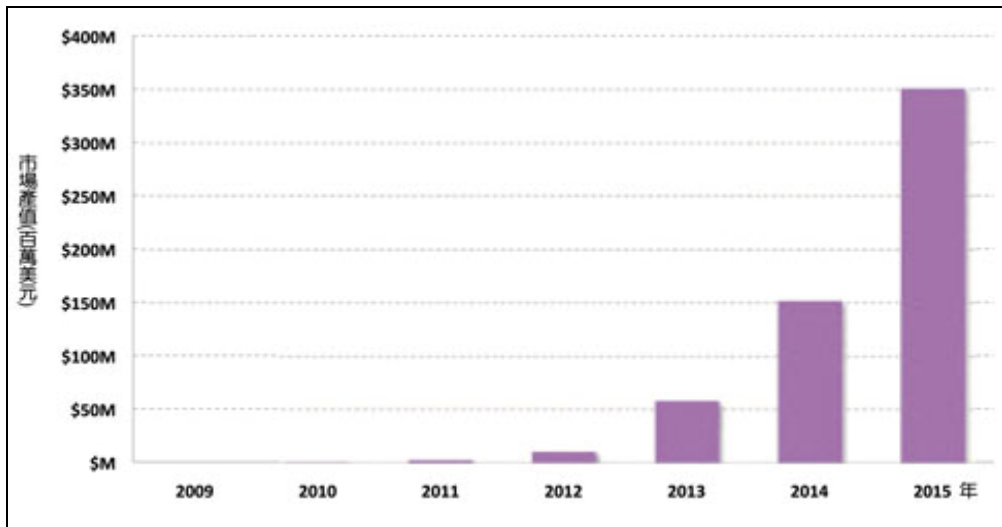


圖 1. 2009~2015 年 GaN 功率元件市場產值分析 資料來源：新電子雜誌, May 2011

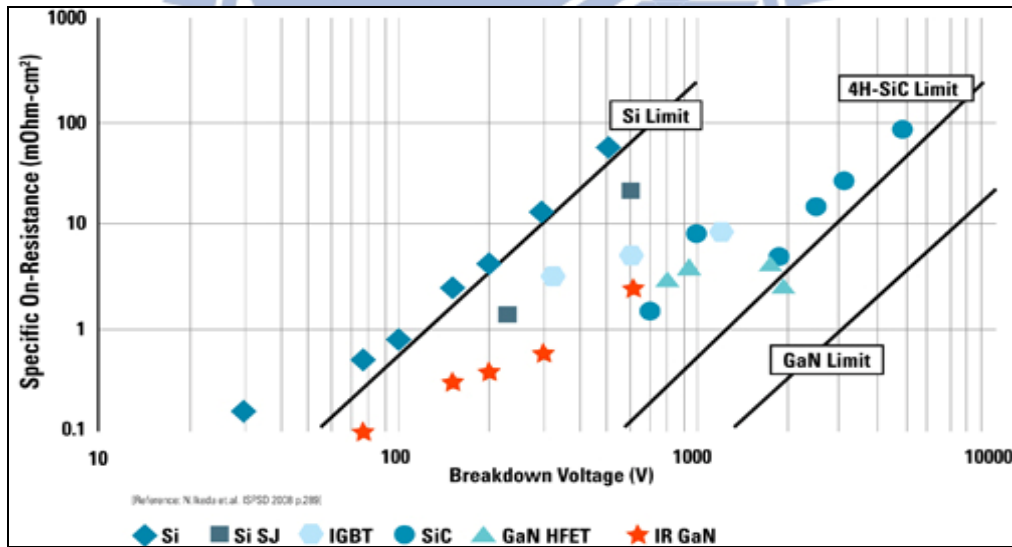


圖2. 理論上的電阻乘以晶片面積(氮化鎵及矽元件於不同電壓下之表現限制) 資料來源：Power Electronics Europe, pp.30, August 2008

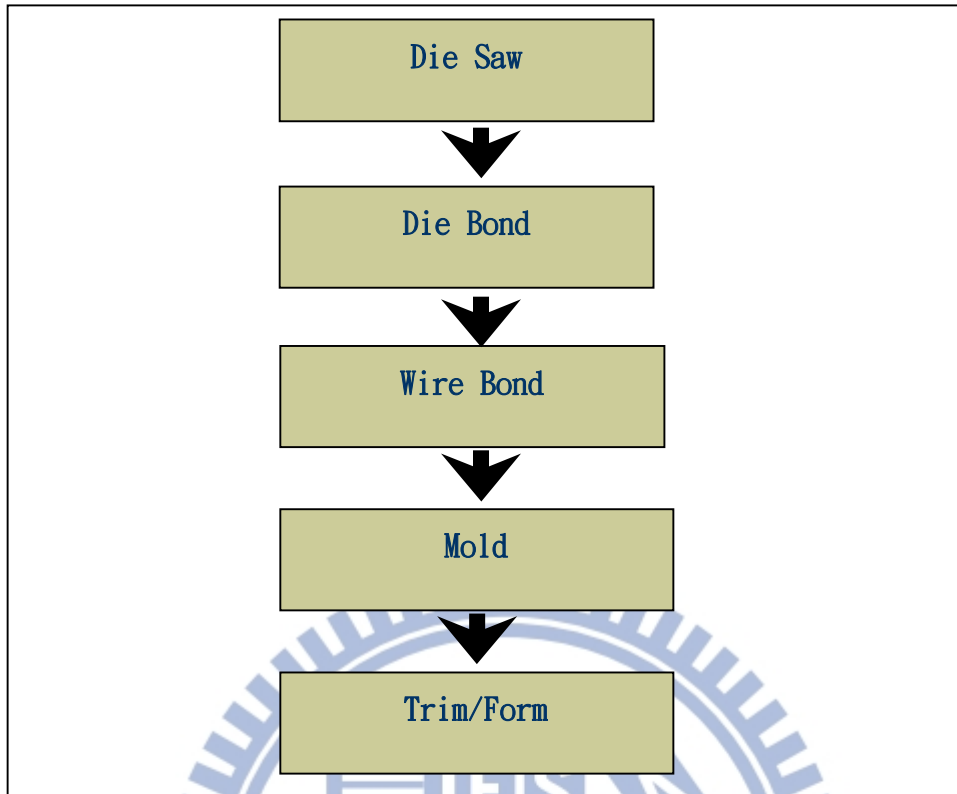


圖 3. 封裝流程圖

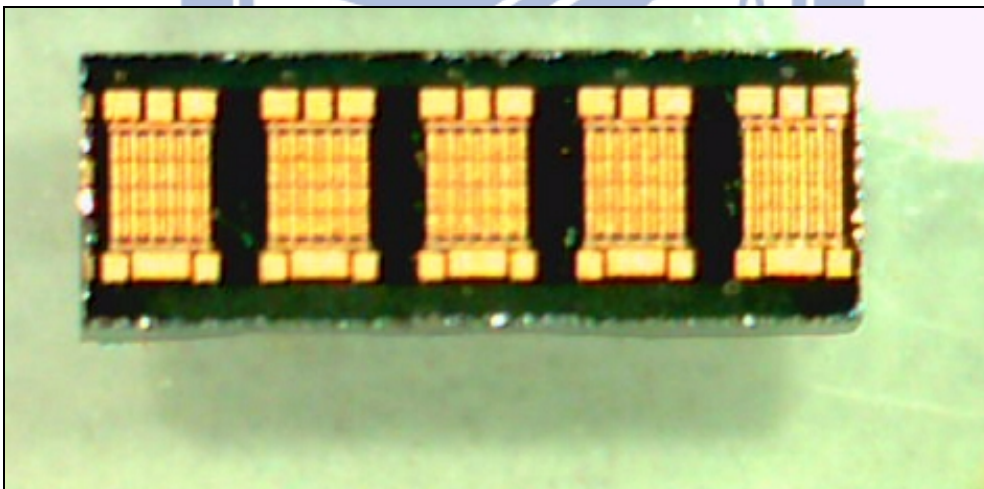


圖 4. 晶圓黏片後照片

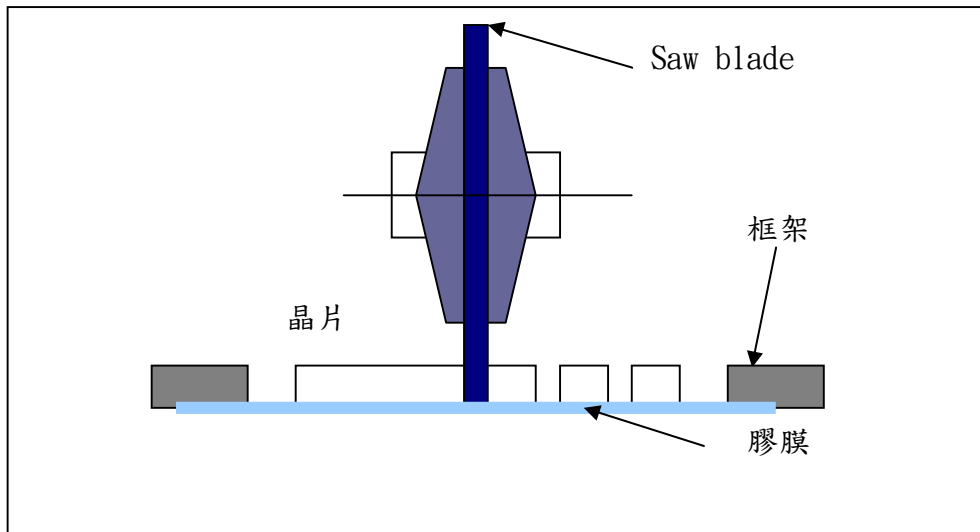


圖5. 切割製程示意圖

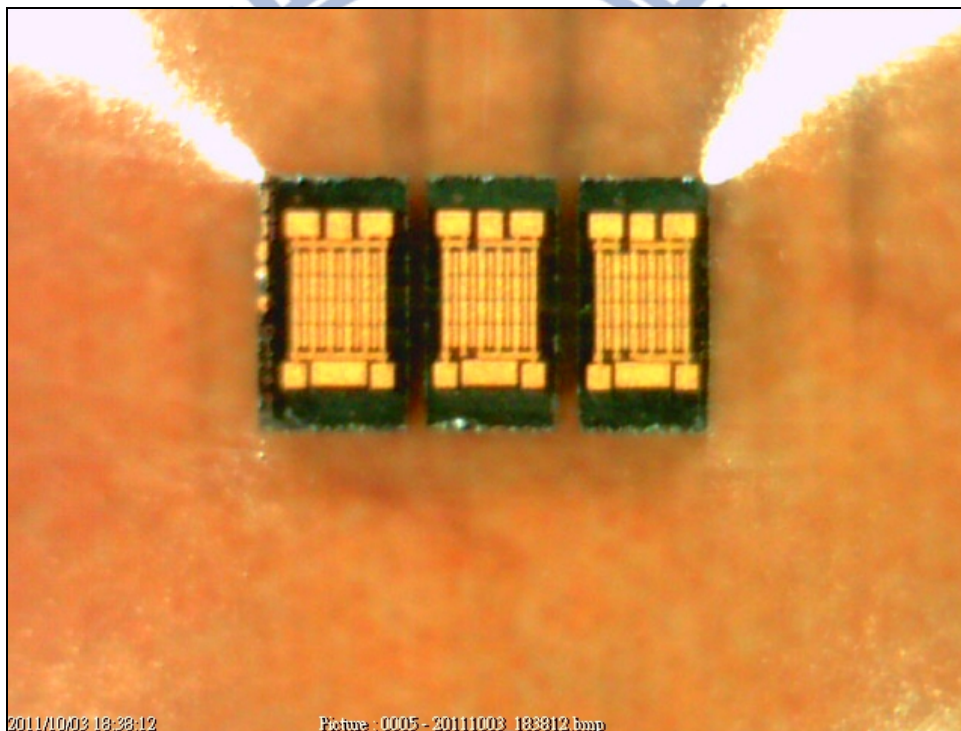


圖6. 切割後晶片照片

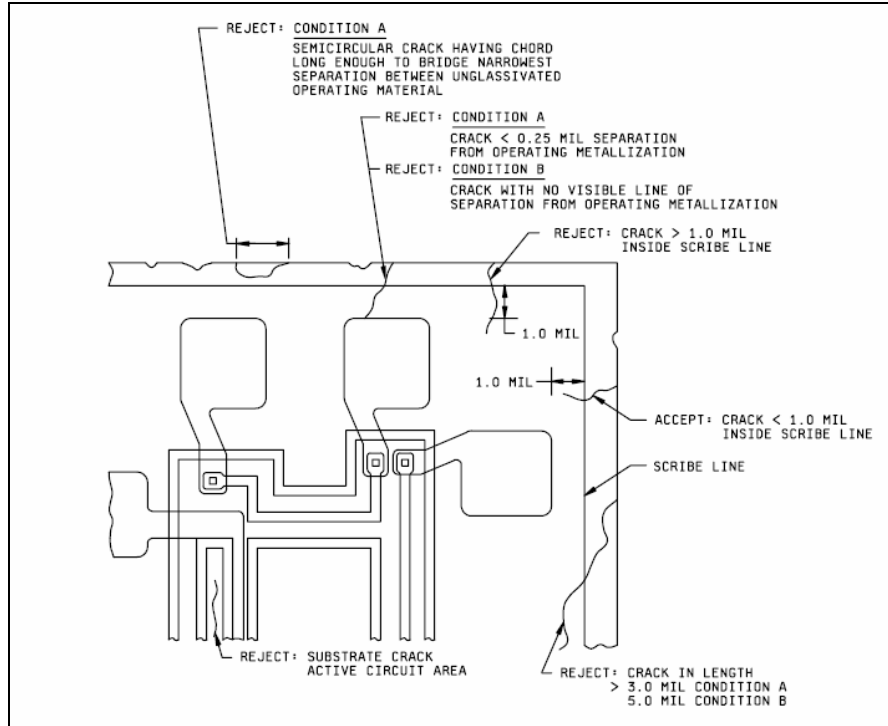


圖7. Scribing and Die defects(condition A為加嚴要求; condition B
為一般要求) 資料來源：U.S. military standards.
MIL-STD-883 METHOD 2010.11

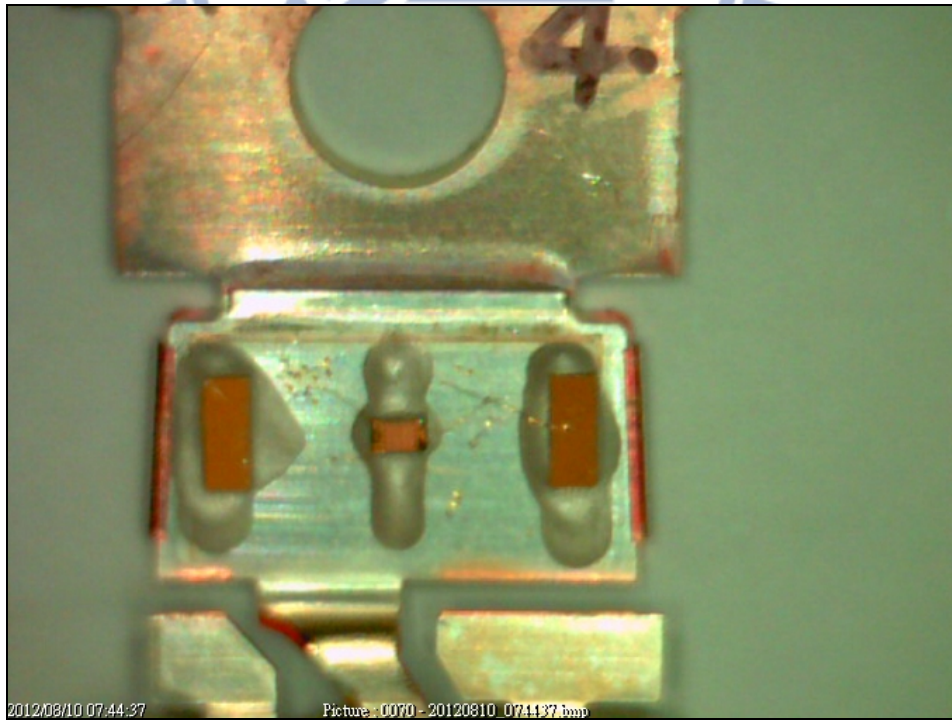


圖8. Die Bond後照片

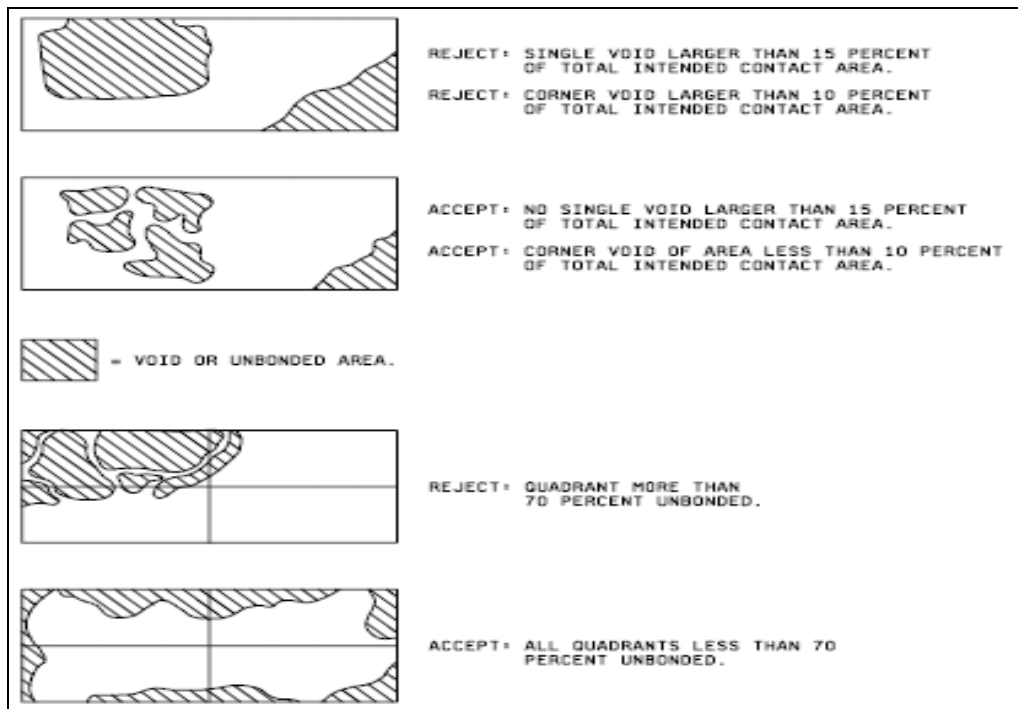


圖9. Void Criteria 資料來源：U.S. military standards MIL-STD-883 METHOD 2030-1

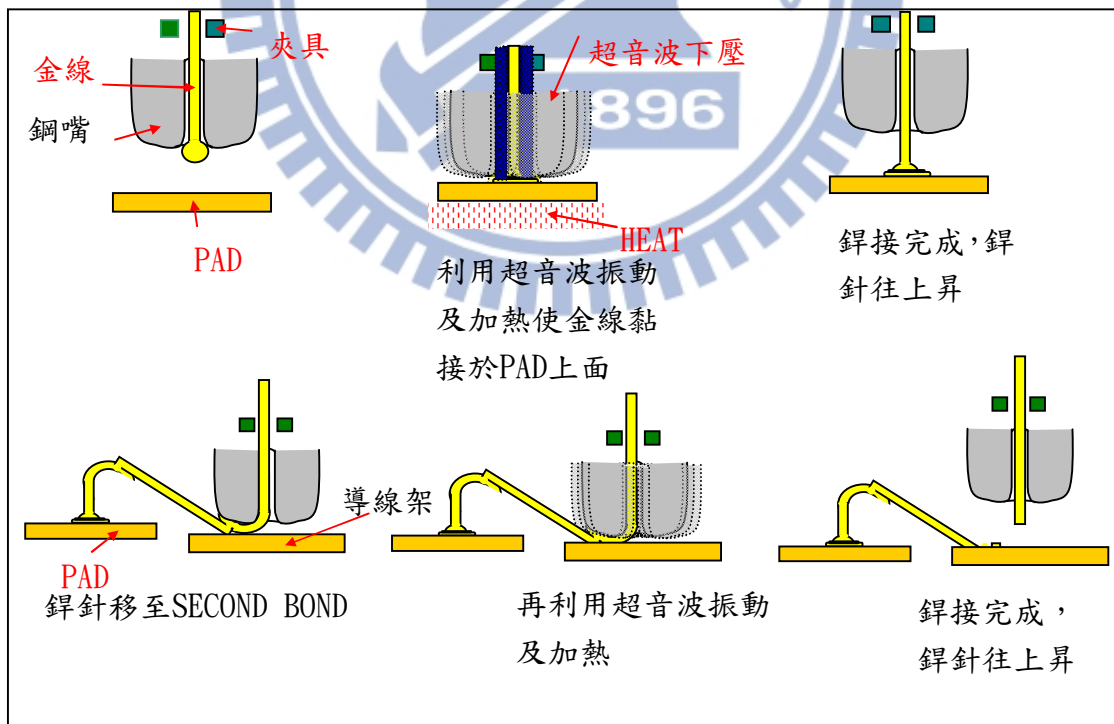


圖 10. Wire Bond process flow

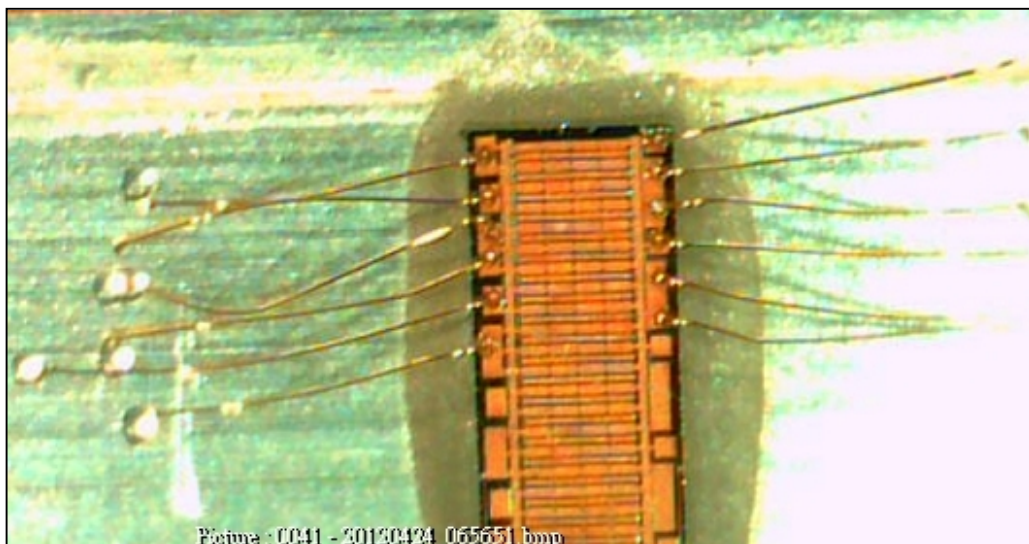


圖 11. Wire Bond 後照片

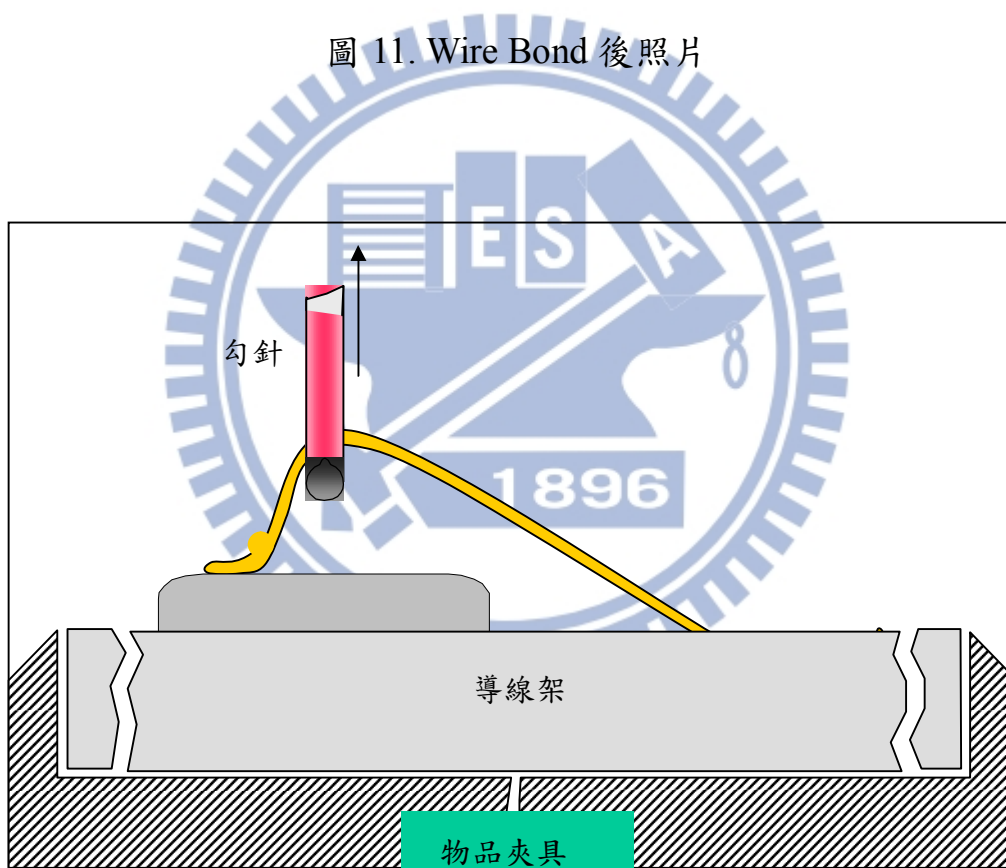


圖 12. Wire Pull test 示意圖

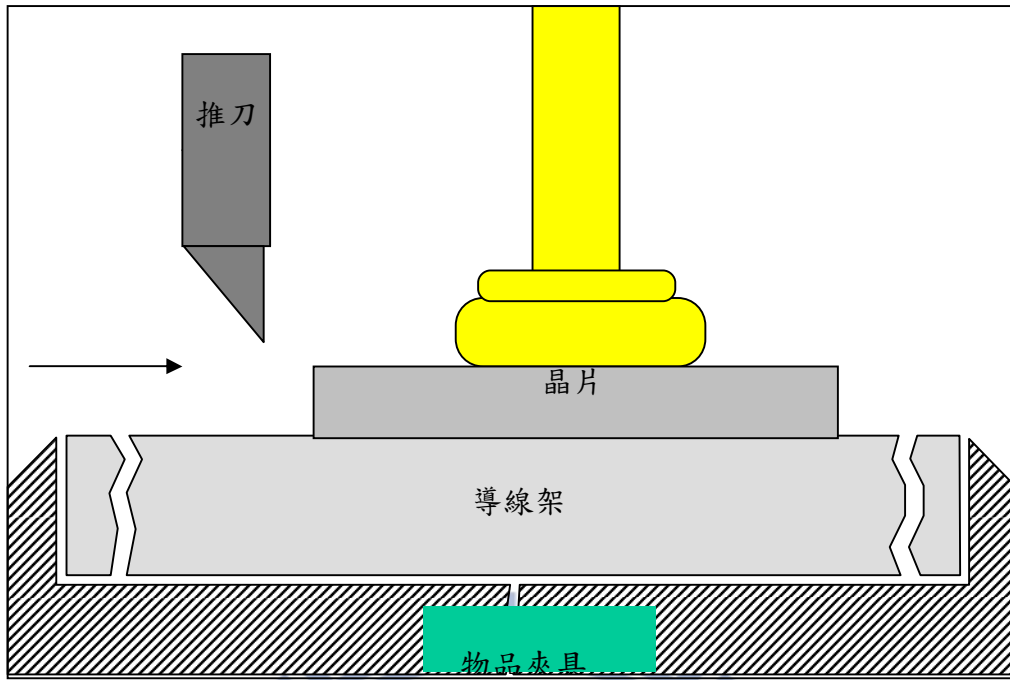


圖 13. Ball Shear test 示意圖

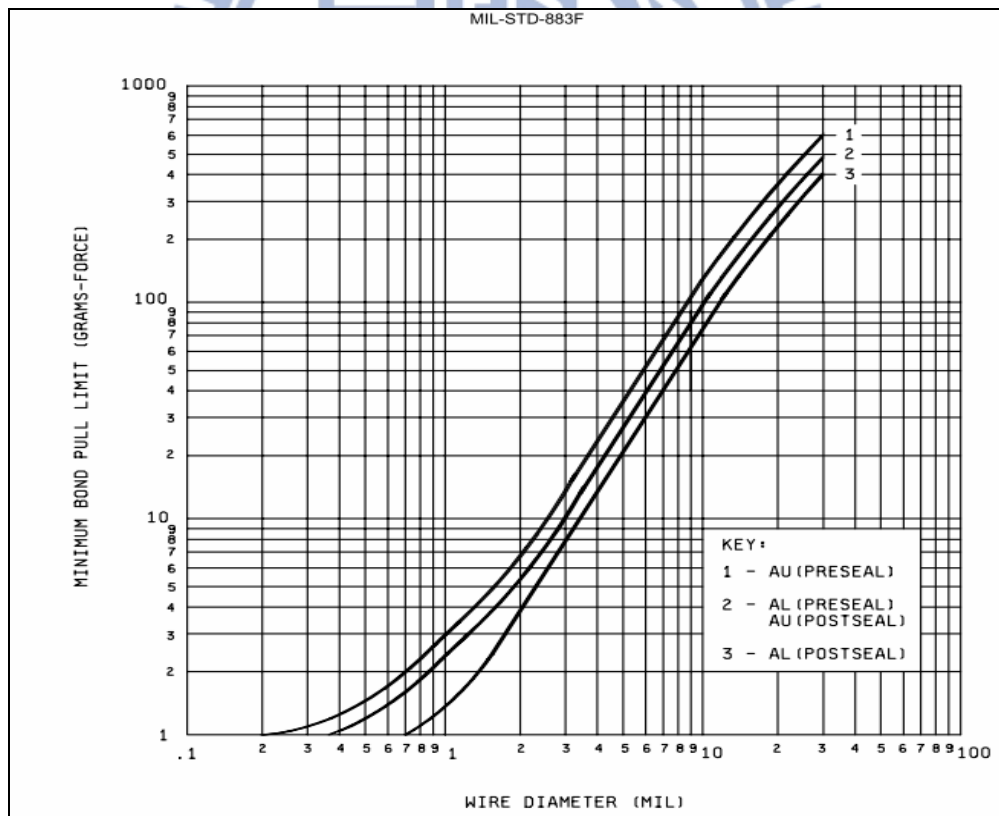


圖 14. Wire Pull test 規格 資料來源： U.S. military standards.

MIL-STD-883 METHOD 2011.7

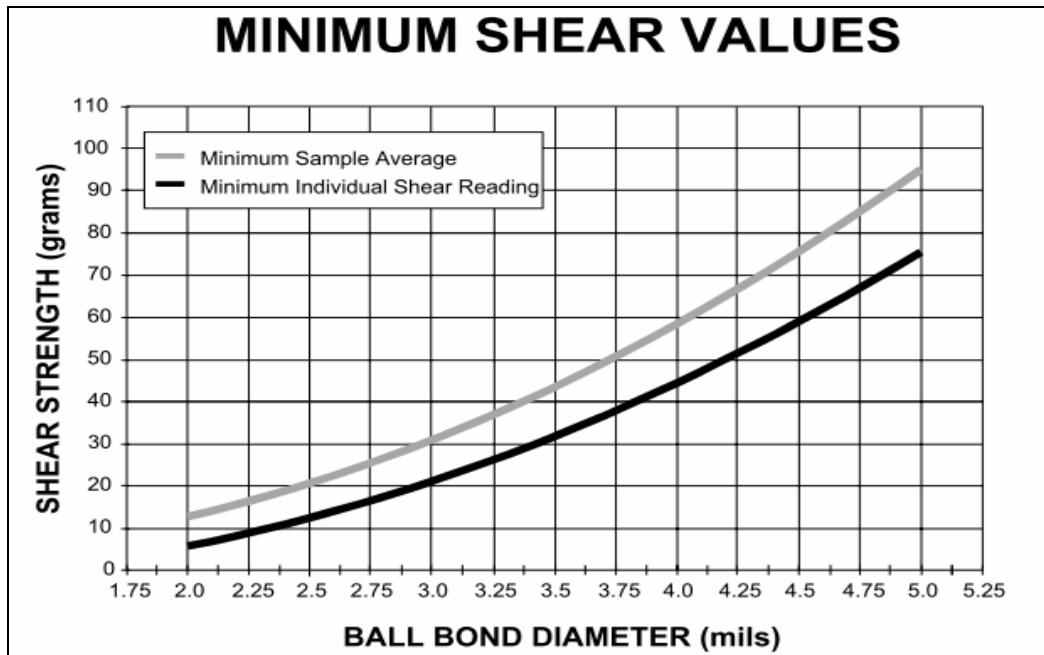


圖 15. Ball Shear test 規格 資料來源：Joint Electron Device Engineering Council. JESD22-B116A

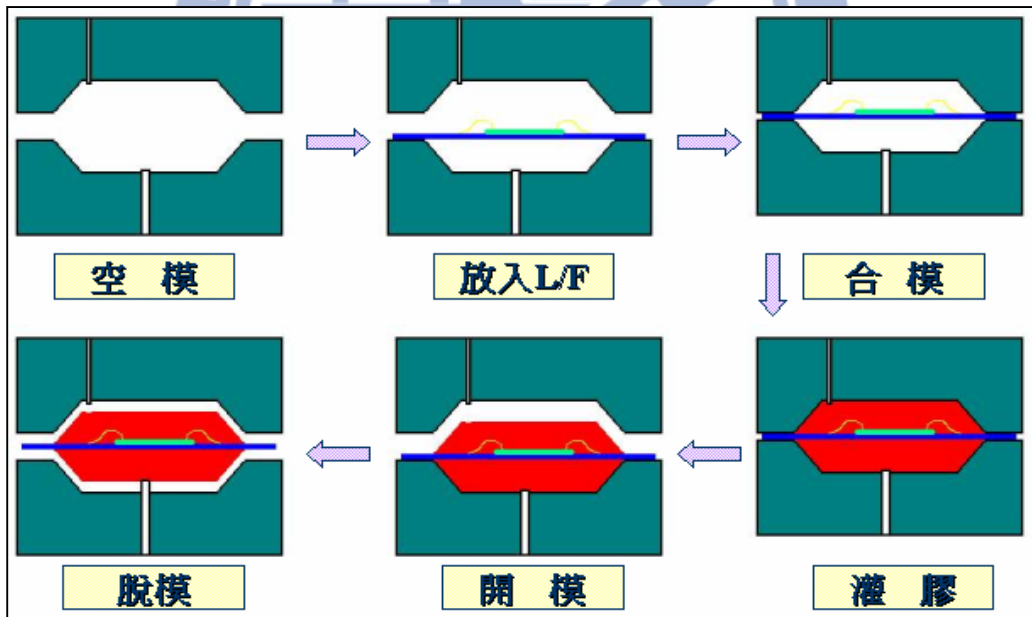


圖 16. Mold process flow

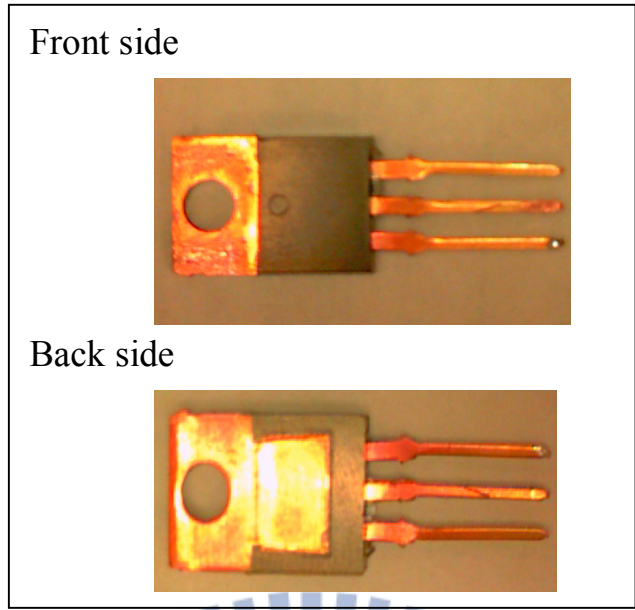


圖17. Mold 後照片

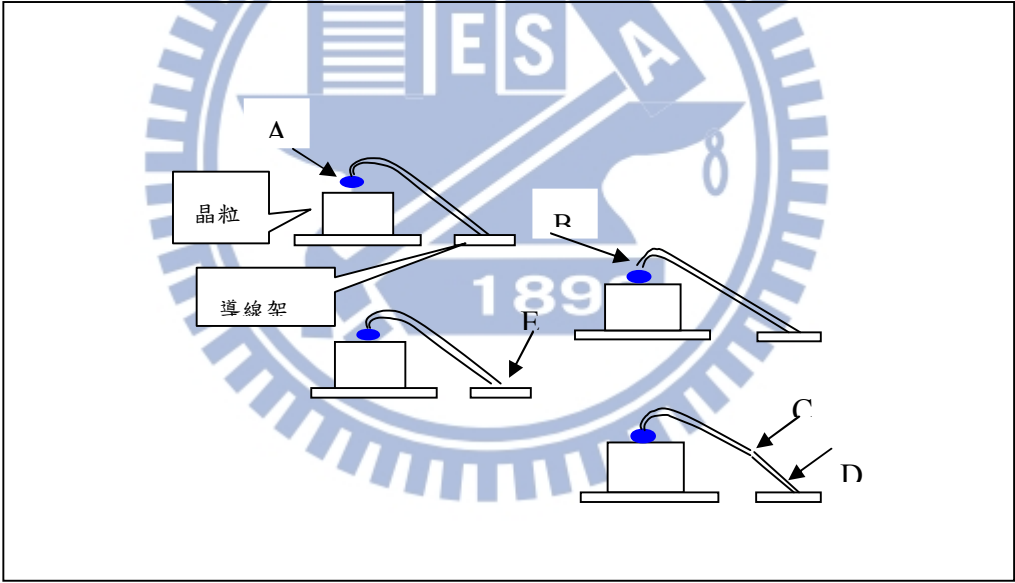


圖 18. Wire Pull 斷點示意圖

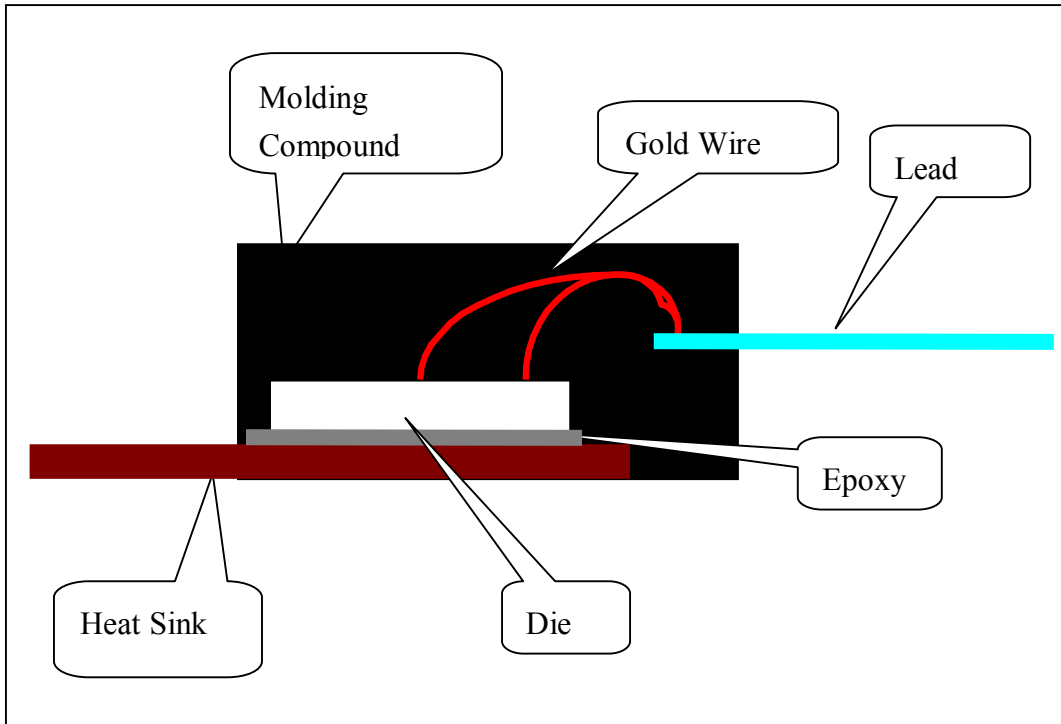


圖19. TO220 橫切面示意圖

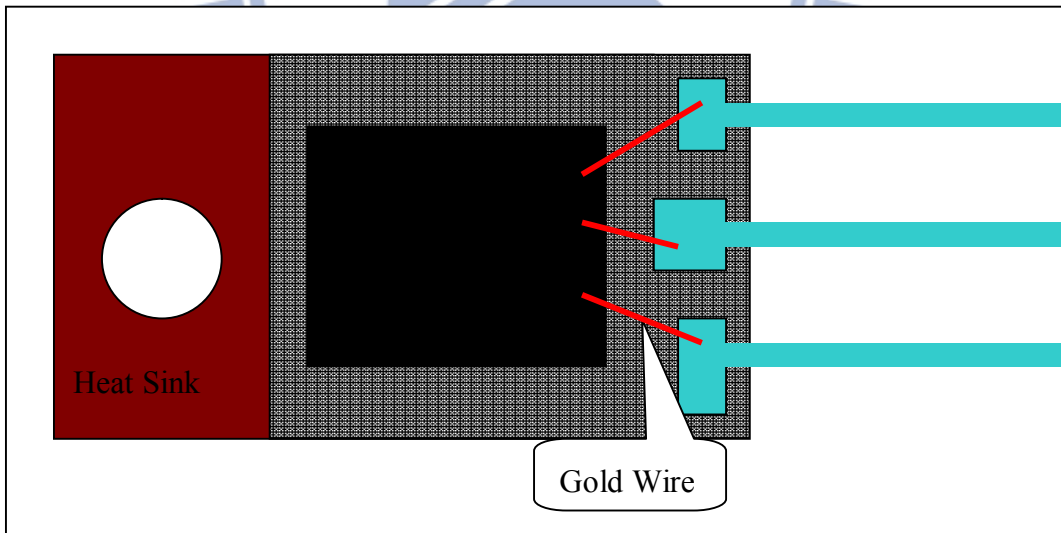


圖20. TO220 上視透視圖

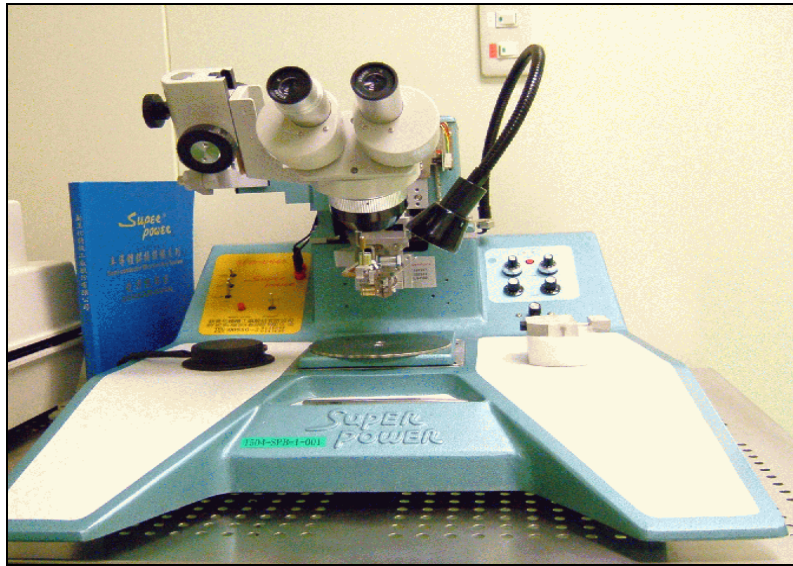


圖 21. 新美化 SPB-U668 超音波鐳線機

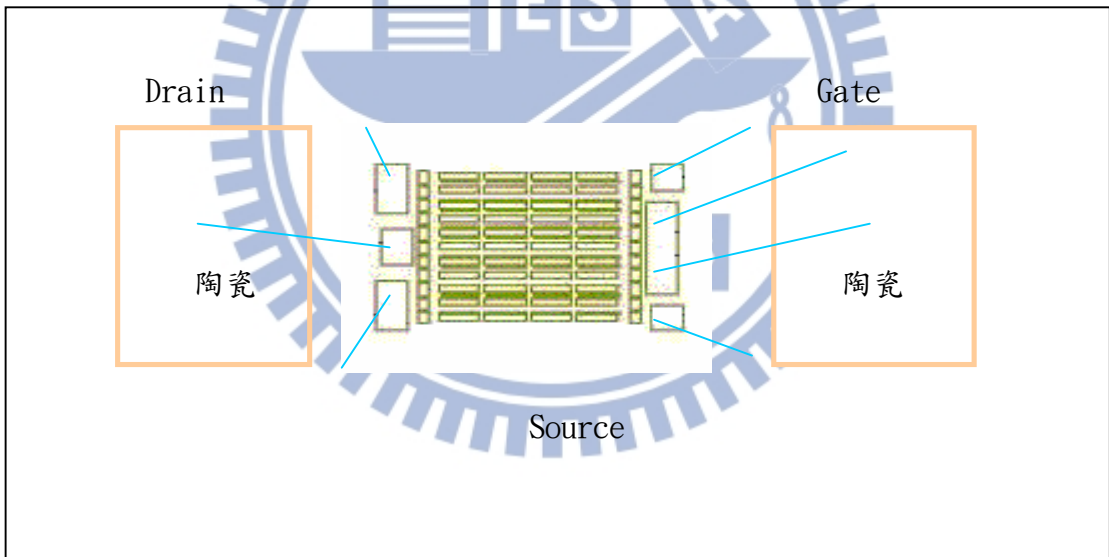


圖22. 打線示意圖

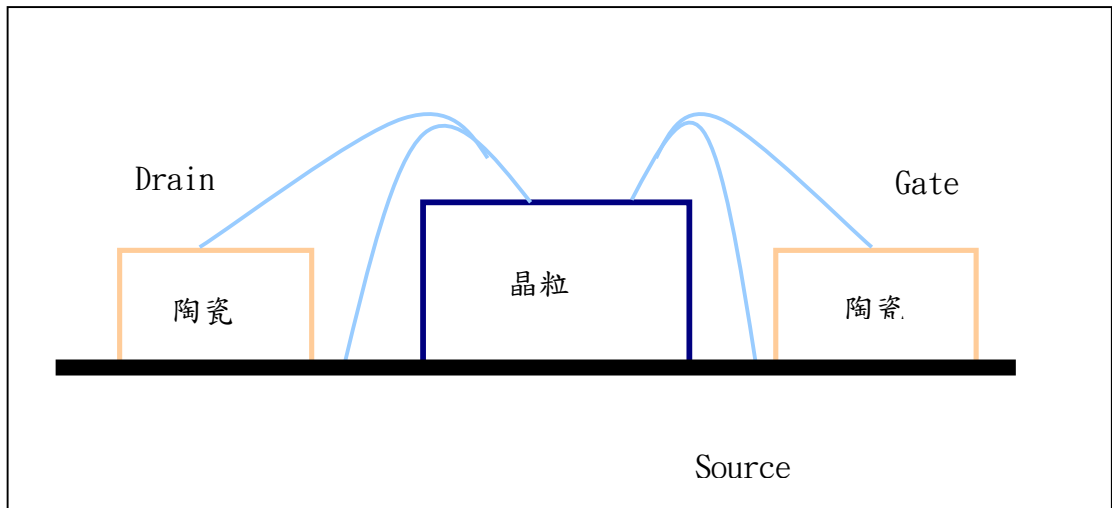


圖23. 打線示意圖(側視)

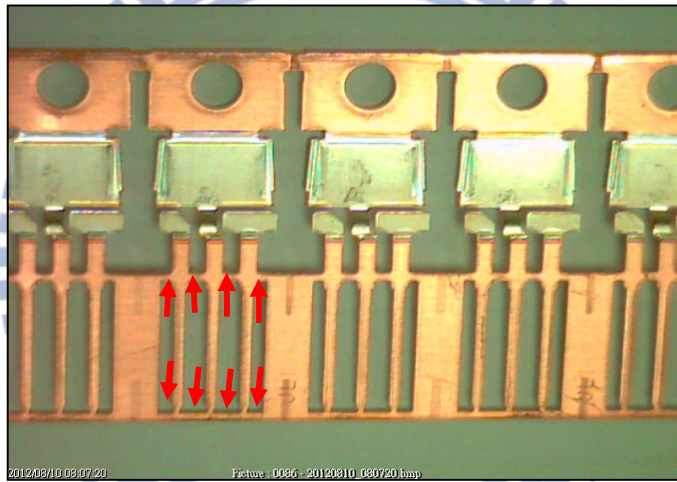


圖 24. 導線架裁剪處示意圖

Response Table for Signal to Noise Ratios
Larger is better

	瓷嘴下 壓力量	超音波振 動頻率	晶片加 熱溫度	超音波振 動時間
Level				
1	4.555	7.449	6.178	5.059
2	2.753	5.596	3.670	5.176
3	8.788	3.050	6.248	5.860
Delta	6.035	4.399	2.578	0.801
Rank	1	2	3	4

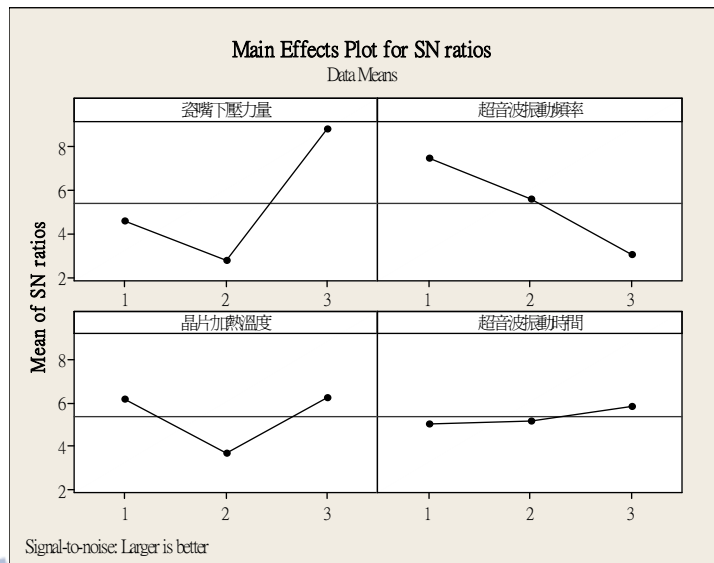


圖25. Wire Pull S/N ration 圖

Response Table for Signal to Noise Ratios
Larger is better

	瓷嘴下 壓力量	超音波振 動頻率	晶片加 熱溫度	超音波振 動時間
Level				
1	21.90	27.22	25.19	23.67
2	23.06	23.93	22.81	26.32
3	29.50	23.30	26.46	24.46
Delta	7.60	3.92	3.65	2.65
Rank	1	2	3	4

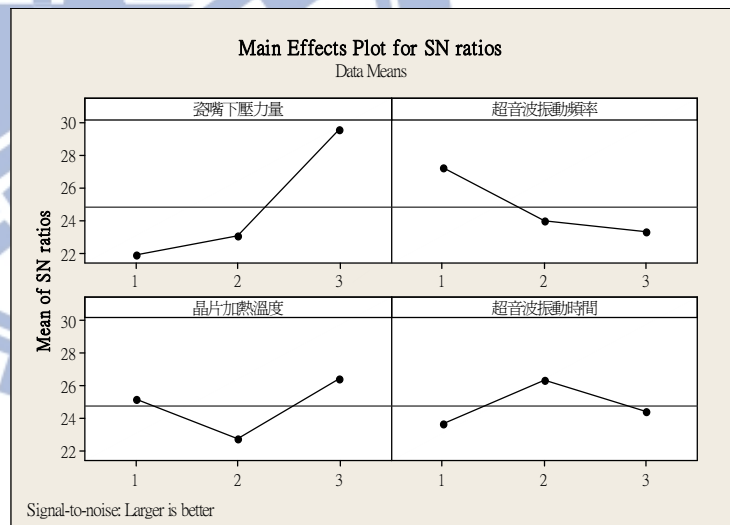


圖26. Ball Shear S/N ration 圖

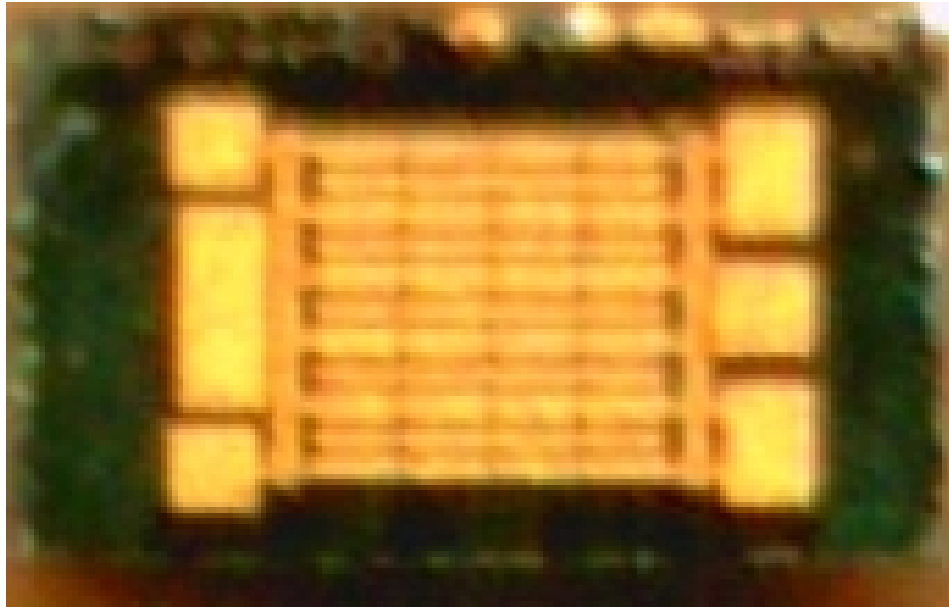


圖27. 5mm GaN晶片圖

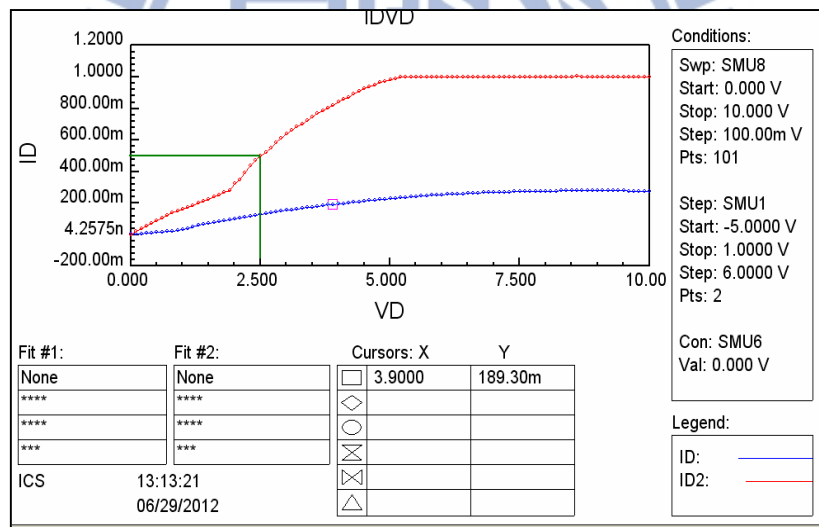


圖28. 推拉力高實驗組量測圖(Wire Bond前)

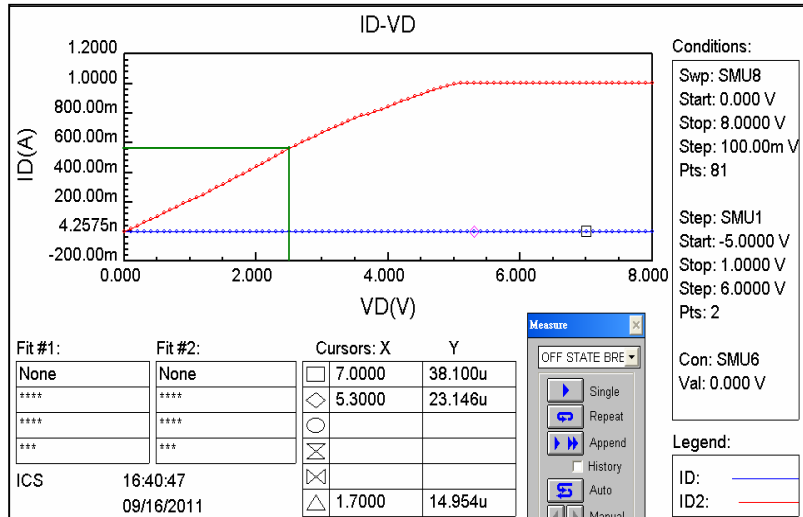


圖29. 推拉力低實驗組量測圖(Wire Bond前)

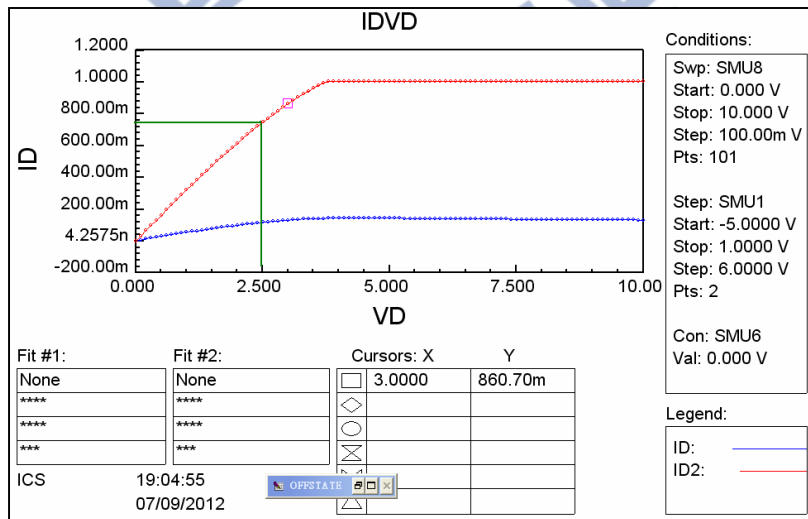


圖30. 推拉力高實驗組量測圖(Wire Bond後)

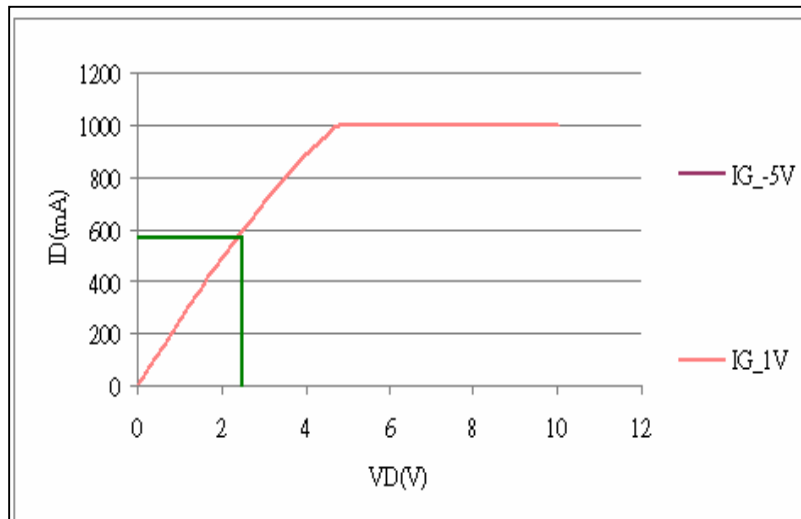


圖31. 推拉力低實驗組量測圖(Wire Bond後)

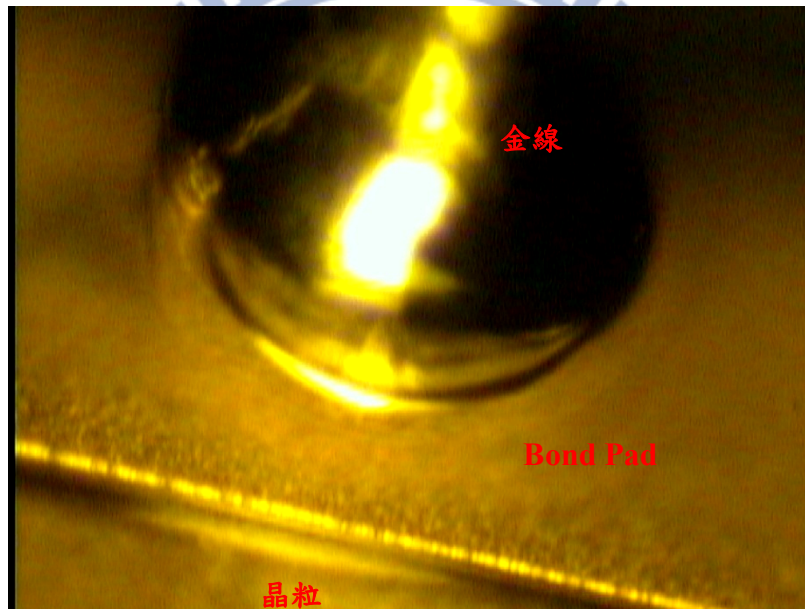


圖32. 金線接合觀測圖(推拉力高實驗組)

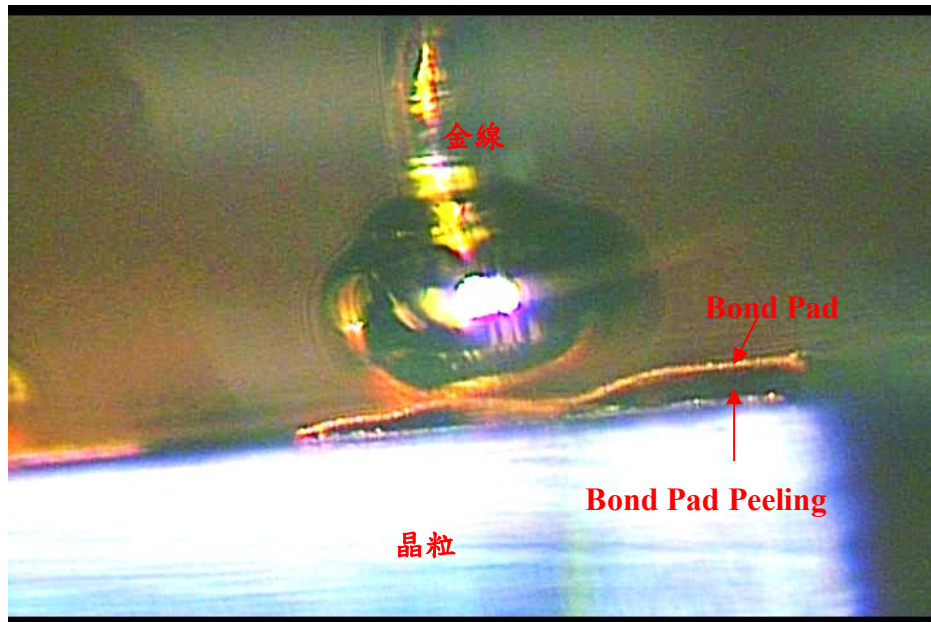


圖33. 金線接合觀測圖(推拉力低實驗組)

