

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Femtosecond Laser Welding: Strategies for
Extending from Homogeneous to Heterogeneous
Materials

飛秒雷射焊接-從同質延伸至異質焊接的
策略探討

專題姓名：光電領域

組別：A520

指導教授：楊尚達

組員姓名：黃家品、鍾承翰

研究期間：113 年 6 月 26 日至 114 年 5 月 5 日止，共 10 個月

報告摘要

本研究旨在探討同質材料(玻璃-玻璃)與異質材料(玻璃-鋁)於飛秒雷射焊接中所需策略之差異，並透過改變掃描路徑以提升焊接強度與降低對材料表面品質的要求。飛秒雷射具備高峰值功率與極低熱影響區(Heat Affected Zone)之特性，能藉由非線性吸收導致焦點區域中自由電子密度快速增加，進一步產生雪崩電離與電漿雲，最終實現材料間相互熔融結合。此特性使其可於極低熱損傷條件下完成微米乃至奈米級的高精度焊接。

研究中我們以玻璃-玻璃焊接經驗為基礎，延伸至玻璃-鋁之異質材料接合，並針對焊接表面不平整、材料變形與設備誤差進行補償與調整。實驗中進一步設計反射式高度量測系統監測界面高度並相應地調整雷射參數。以及嘗試應用螺旋式雷射掃描路徑取代傳統單一直線掃描，藉此擴大熔接面積並改善焊接穩定性。結果顯示從同質材料焊接的經驗延伸，在控制參數與掃描路徑優化後，成功實現異質材料的穩定焊接，並提升焊接品質對材料誤差的容忍度。本研究提出之掃描策略與高度控制技術可望推廣到其他異質材料，擴展超快雷射微接合於封裝、加工、微機電之商業應用潛力。

一、研究背景

隨著半導體與精密電子產業對高階封裝技術之需求日益增加，異質材料(如玻璃、金屬與矽)之接合能力成為關鍵技術之一。其應用範疇涵蓋光學組件、微致動器(micro-actuators)、微機電系統(MEMS)及晶片實驗室(lab-on-a-chip)等系統之晶圓級封裝。傳統接合方法包括陽極鍵合、玻璃熔塊連接、共晶接合與膠合技術[1]，然而這些方法多需較長加工時間、高溫處理，對熱敏感元件可能造成損壞，且常伴隨氣密性差、老化與尺寸精度不足等問題。

在此背景下，飛秒雷射微焊接逐漸受到重視。飛秒雷射為脈衝寬度在 10^{-15} 秒等級的超短脈衝雷射，其具備極高峰值功率($>10^{12}$ W/cm²)與極短作用時間，能夠於極小熱影響區內產生高強度聚焦，觸發透明材料中的非線性吸收效應和不透明材料中的線性吸收效應。非線性吸收機制促使材料內部產生自由電子、雪崩電離，形成電漿界面，進而實現局部熔融，當電漿混合並冷卻時，兩材料之間隙將被混合的固體填充，形成焊點，完成無接觸、極小熱擴散的接合。

儘管如此，仍有多項技術挑戰待克服。首先，於高功率雷射系統中，雷射光可能造成元件擊穿或損傷。其次，因飛秒雷射焊接具高度局部化特性，熔融區周圍可能因熱應力累積導致材料破裂，特別是在焊接大面積接縫或異質材料時，因熱膨脹係數差異大，於冷卻過程中易產生殘餘應力[2,3,4]，降低焊接強度與穩定性。

再者，其普遍要求材料表面要達到高平整度，時常需要進行一些預處理並另加外力將兩表面推至光學接觸[2, 4, 5, 6]，否則熔融物質不足以填補兩界面間隙。此外，熔接區域之形貌(寬度、深度與對稱性)同樣會直接影響焊縫的機械性能與氣密性，對於工業應用尤為關鍵。

二、研究動機與目的

基於上述背景，本研究採用 190 fs 飛秒雷射作為主要焊接工具，聚焦於玻璃-玻璃、玻璃-金屬(鋁)之間直接接合，提出以下三點主要研究動機與目的：

1. 探索異質材料雷射焊接的可行性

透過玻璃-玻璃焊接實驗累積之聚焦控制、間隙量測與雷射參數優化經驗，延伸應用至玻璃-鋁片的焊接中，探討在焊接過程無壓合、無填料、與無金屬表面拋光處理條件下，異質材料能否透過飛秒雷射實現直接接合。

2. 建立異質焊接過程中關鍵控制參數

包括材料界面高度差控制、樣品固定設計、掃描路徑形狀等，藉由搭建反射式高度量測系統與 3D 列印載台，確保焊接界面誤差降至 $\pm 15 \mu\text{m}$ 以內，進一步提升焊接一致性與成功率。

3. 分析異質焊接之物理結合機構與路徑優化策略

藉由顯微觀察與實驗對比，探討玻璃-鋁焊接的熔融行為與材料互滲現象，並引入螺旋式掃描策略模擬傳統金屬焊接中的「擺動軌跡」，驗證其對提升焊接連結面積與穩定性的影響。

最終目標為提出一套穩定、低成本且具實務應用潛力之異質材料焊接製程方案，在不使用中介材料、黏著劑或高溫燒結的條件下，發展具高容錯能力與可調性之掃描策略與量測方法，並且透過雷射聚焦策略優化及加入實驗輔助系統，進一步優化整體實驗流程，使我們能夠系統性探索參數影響，提升研究結果的可信度，為未來異質結構於光機電整合元件、微封裝應用提供製程基礎與參考依據。

三、研究方法

1. 雷射光路設置

雷射規格：波長 1030 nm、重複率(Repetition rate) 200 kHz、平均功率 6 W、脈衝寬度(Δt) 190 fs。

雷射出光，通過兩片偏振片(polarizer)以調控功率，經多面反射鏡導引後進入 Galvanometer Scanner(SCANcube III 14) 後搭配焦距 20 公分的 F-theta 掃描鏡頭，雷射聚焦於待焊兩片玻璃樣品之接合界面。使用 F-theta 鏡頭的關鍵為因其光學設計使雷射焦點得以維持於平坦加工平面上，且焦點位移與掃描角度成線性關係 [7]，實現精準、等速的掃描效果。

定義樣品接合面中心為焦點基準面($Z = 0$)，表面以上為正，使用具微米級精度之步進馬達調控平台高度，放置測試片觀察其受雷射擊打的結果。當樣品界面受雷射影響區域最小(即光斑最小、能量最集中)時，即視為聚焦位置，並據此建立相對高度座標系統。

2. 玻璃-玻璃樣品預備

玻璃樣本：厚度 0.7 mm 的康寧玻璃(Corning Eagle XG, EXG 0.7)

樣本預前處理與製備：以鑽石筆裁切，上片為約 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ，下片為 $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 。焊接前以丙酮清洗接合面以去除油脂與粉塵。

雖焊接過程未使用固定夾具使界面貼合，但放置於平台前會施以輕微壓合以排除氣泡，並藉由觀察牛頓環(Newton rings)之產生來確認貼合品質與估算界面間隙大小。通常情況下，壓合時可觀察到自樣品一側邊緣展開水平條紋形式之牛頓環(圖二(a)左)，此為玻璃間達到局部光學接觸[5]所致。而焊接成功後，則可見中心焊接區為牛頓環擴散之起點(圖二(a)右)。

牛頓環為兩貼近玻璃間因干涉所產生之光學現象，干涉環條紋越稀疏，表示間隙越小；反之，條紋密集則代表間隙較大。藉由計算水平牛頓環數量與形貌，可間接估算玻璃間之貼合程度。後續實驗亦證實，焊接前壓合的貼合程度對後續焊接成功率與接合強度具有決定性影響，貼合越緊密，越能提升焊接穩定性與效率。

3. 玻璃-鋁樣品預備與載台設計

玻璃-鋁片樣本：面積 $1 \times 5 \text{ cm}^2$ 的鋁片 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 的玻璃片

樣品配置：玻璃置於鋁片之上之加工區域進行焊接。

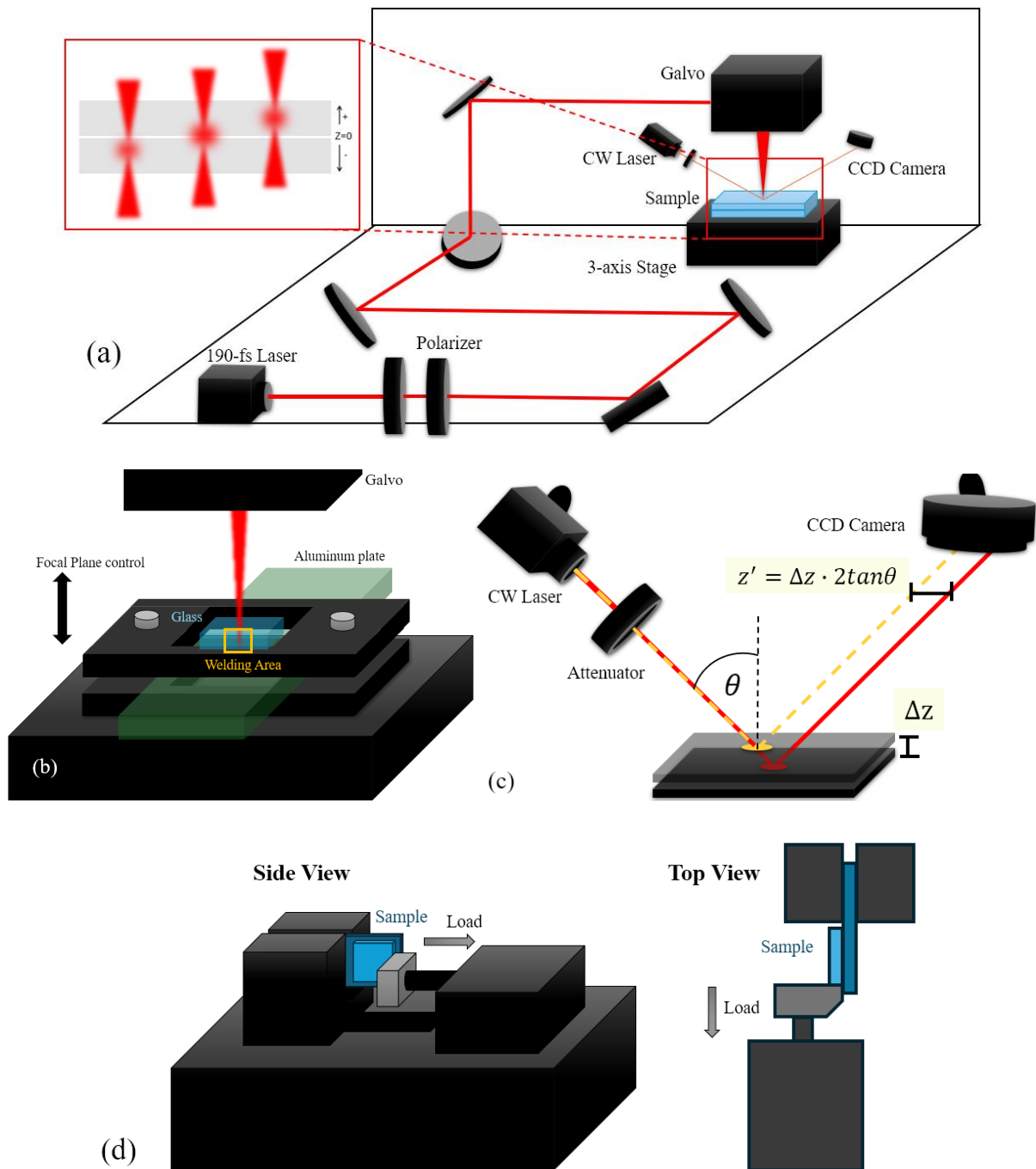
樣本差異與解決方法：有別於玻璃樣品具嚴格的表面品質管控(如雜質、氣泡、平整度)。市售鋁片則存在較大品質差異，包括厚度誤差與普遍性的微彎曲現象，其造成的表面高低落差可達數百微米，遠高於玻璃-玻璃焊接容許範圍。

為改善鋁片平整度並提升焊接成功率，我們利用建模軟體設計並 3D 列印一組低成本固定夾具載台(圖一(b))。該裝置可同時固定玻璃與鋁片的位置，並壓平鋁片，達到降低鋁片彎曲程度、減少界面高度誤差，進一步提升雷射聚焦精度與焊接品質。

4. 反射式高度量測系統

裝置架設：為實現可重複且穩定之異質材料焊接，利用角度固定之斜射雷射照射待焊接表面，並搭配 QHYCCD 相機觀測反射光光斑位置。當樣品表面高度改變時，反射點於相機影像中之位置亦隨之變化。接著透過推導空間中的幾何轉換公式，可捕捉影像中光斑偏移量換算為實際高度變化(圖一(c))，進而調整平台高度。

精度與重要性：經由光學顯微鏡觀測樣本驗證，此設計能夠使計算高度與實際高度誤差控制於約 $\pm 15 \mu\text{m}$ 以內。若無高度控制系統協助，雷射聚焦將無法準確對應接合界面，將導致焊接品質不穩定、實驗數據無法重現。因此是關鍵前置技術之一。



圖一、(a)雷射光路架構與聚焦平面定義示意圖 (b)固定夾具載台 (c)反射式高度量測系統 (d)剪力測試裝置示意圖側、俯視圖

5. 剪力檢測方法

設置與檢測步驟：

- (1) 將樣本固定於載台夾具上(圖一(d))，右側則設置用以紀錄受力數據之量測

儀器。

- (2) 將載台向右移動，樣本會推抵儀器上的應力桿，使應力桿承受剪力並將其轉換為數據，由儀器即時顯示。
- (3) 當樣本達到其剪力承受極限並發生脫落時，儀器所顯示的最大受力值即為該樣本的剪力峰值，據此可評估其接合強度。

可能誤差來源：載台運行時的穩定性、樣本與應力桿之間的接觸貼合程度，以及受力方向是否垂直於接合面等。故本裝置所獲得之剪力數據僅作為相對趨勢判斷之依據，若需獲得更為準確的強度數值，仍須使用更穩定且高精度之力學測試設備加以驗證。

四、研究結果

1. 玻璃-玻璃同質焊接

本研究初期以同質玻璃(glass-to-glass)焊接為起點，固定雷射掃描速度 15 mm/s、功率 6 W 與重複率 200 kHz，我們針對聚焦位置進行 $\pm 50 \mu\text{m}$ 範圍內的掃描實驗，以找出最佳的聚焦深度。結果顯示，當聚焦位置偏離接合基準面超過 $\pm 30 \mu\text{m}$ 時，多數焊接皆失敗，最穩定之聚焦點位於基準面下方約 $15 \mu\text{m}$ ，達最高結合強度約 11 MPa。

牛頓環的觀察是我們判別焊接成功與否的重要指標。若焊接完成後牛頓環仍穩定存在，象徵焊點已連接兩玻璃表面並形成最小間隙，干涉現象圍繞接合區域生成清晰干涉環。相對地，若牛頓環於焊後全數消失，通常代表兩界面並未連接，仍存在超過數微米的間隙，顯示焊接未成功。

用光學顯微鏡觀察焊點分析剖面圖圖二(b左)，下層玻璃，為雷射聚焦加熱處，產生局部熔融，體積冷卻收縮後形成凹口。而上層玻璃，受下層玻璃加熱而產生些微可塑性與下層玻璃熔接，冷卻後產生輕微變形，故可在照光後看見明暗交錯變化。由上下玻璃剖面可觀察到於焊點處形成的同質均勻混合形成的水滴狀接合結構(圖二(b)右)。

此外，我們發現即使在相同的聚焦條件下，若玻璃在焊接前貼合程度不佳，焊接仍可能失敗。為進一步驗證間隙大小與焊接強度的關聯性，我們觀察樣品焊接前牛頓環數量與密度，估算其初始間隙大小。以干涉的公式我們可以推算對第 m 個環(暗紋)，兩玻璃之間間隙厚度 d_m 與波長 λ 的關係為：

$$d_m = \frac{(2m - 1)\lambda}{4n}$$

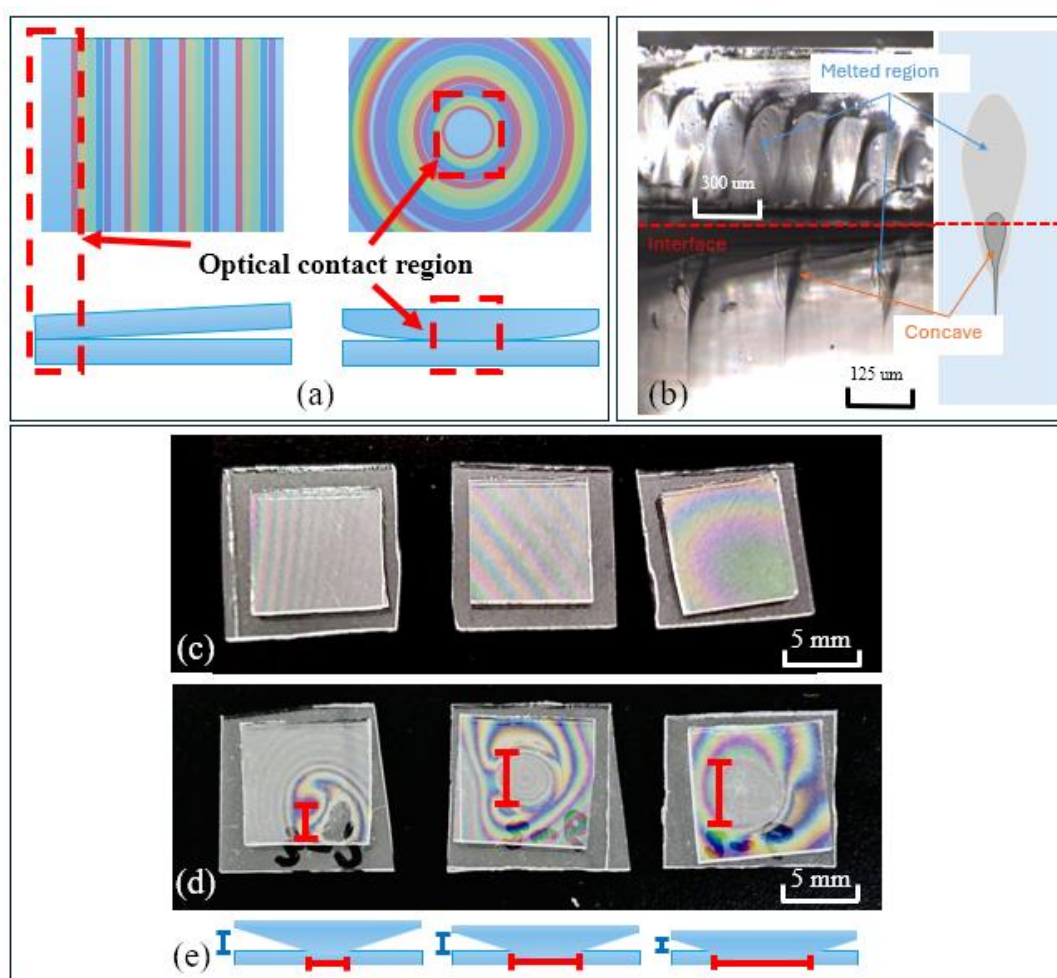
其中 λ 為使用光源的波長(以日光燈下取綠光約 550 nm 為代表值)， n 是兩玻

玻璃間介質的折射率視為 1。故若有 5 個環則估算有大小約 $1.24 \mu\text{m}$ 之間隙存在。

如圖二(c)所示，在相同雷射條件與掃描參數下，三組樣品僅於初始貼合狀態不同，由左至右，牛頓環數分別約有 13, 7, 2.5 個，表示間隙由大至小。從圖二(d)(e)焊接結果圖中可觀察到：

- 左側樣品焊接區域明顯縮小，部分已失效；
- 中間樣品焊接區域較完整，但仍可見焊紋痕跡，顯示存在部分殘餘間隙；
- 右側樣品焊接區幾乎透明無明顯邊界，顯示貼合極佳。

兩片玻璃接合面之間若存在較大間隙，則難以有足夠熔融玻璃填補，進而形成穩定接合。牛頓環左至右呈現密與疏的差別，驗證了初始貼合間隙對焊接品質具決定性影響。



圖二 (a)部分光學接觸所產生的牛頓環示意圖，左為因邊緣光學接觸而產生水平牛頓條紋；右為因焊接中間產生光學接觸，使牛頓環一起自中間向外擴散 (b)玻璃-玻璃焊點剖面接合圖與示意圖 (c)玻璃-玻璃樣品俯視圖左至右呈現牛頓環由多至少，意味初始間隙由大至小 (d)為(c)圖樣品焊接後之俯視圖，同

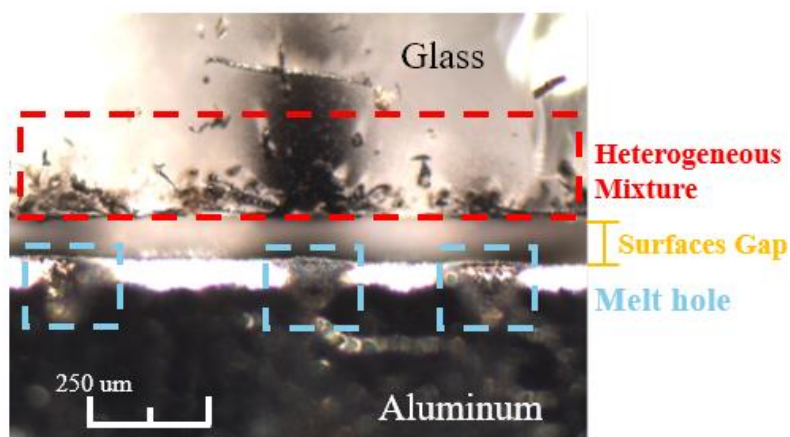
樣的掃描參數卻形成大小、品質不同的焊接區域 (e)示意圖模擬(d)圖各樣品兩玻璃之間間隙之差異

2. 玻璃-鋁異質焊接

在完成玻璃-玻璃的飛秒雷射焊接實驗後，嘗試將技術延伸至異質材料—玻璃與鋁之間的雷射焊接。根據前述玻璃-玻璃焊接經驗，我們意識到聚焦位置的精度對焊接成功具有決定性影響，其可接受容差約為十微米等級。為實現穩定的玻璃-鋁接合，我們導入改良後的載台以降低鋁片彎曲問題，並搭設反射式高度量測系統以更準確控制聚焦位置。

經改善後，我們進行了大範圍聚焦掃描，尋找玻璃-鋁最佳焊接位置。相較於玻璃-玻璃系統，雷射聚焦點不再位於材料界面之下，而是在界面上方 50 至 550 μm 的範圍，其中以聚焦於界面上方約 200 μm 時，剪力強度最佳，可達 7~13 MPa。

然而，儘管使用了載台壓平鋁片，玻璃與鋁間的貼合度仍遠不及玻璃與玻璃(圖三)，這個間隙不是控制聚焦位置能夠改善的，而是需要足夠的熔融質來連接，此過大且因鋁片表面粗糙而無法形成牛頓環使我們不能預測的間隙是造成品質的參差不齊的主因。



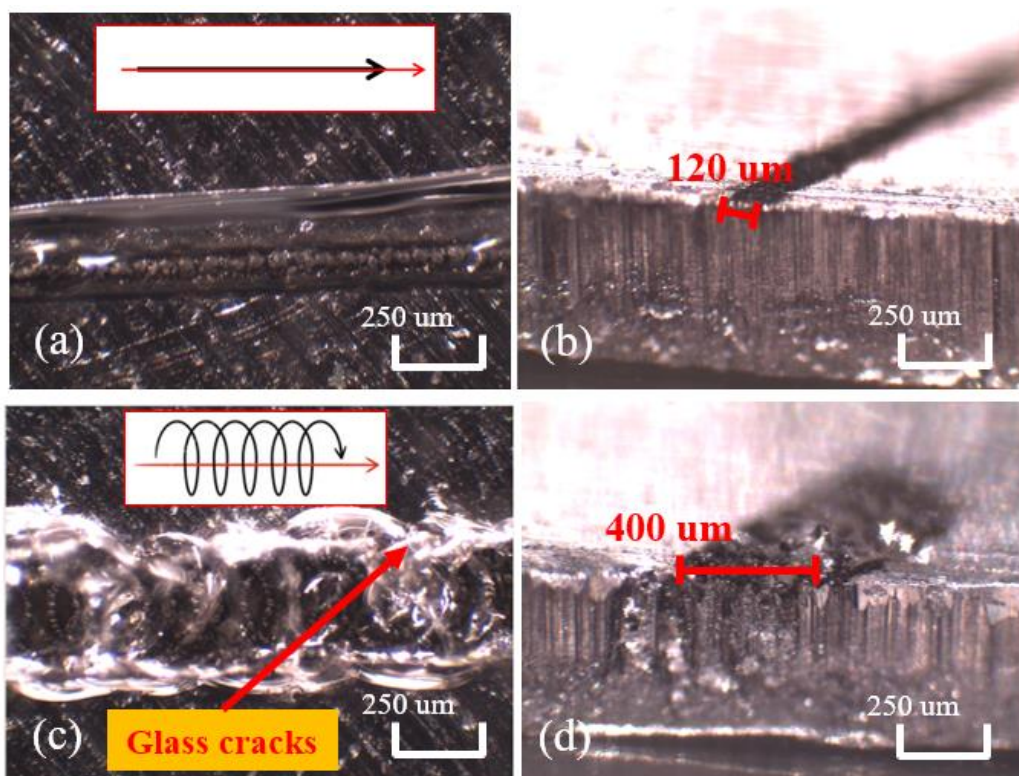
圖三、因間隙過大而無法連結的界面

進一步的根據材料的熱膨脹性質與熱傳導速率分析。玻璃與鋁在 25 至 500 $^{\circ}\text{C}$ 的熱傳導率分別約為 1.058–1.447 W/m·K 與 205–250 W/m·K [9]，鋁明顯大於玻璃。當兩材料皆被加熱至熔融態時，鋁因為熱傳導速率高，造成局部熔融與凹陷，而玻璃會在重力與壓力下流入熔融與凹陷處與部分鋁混合，鋁也會因為受熱不均產生局部向上彎曲，使兩材料貼合更加緊密。進入冷卻階段時，因鋁的熱傳導速率遠大於玻璃，故原先受熱膨脹凹陷處將產生收縮與玻璃嵌合，兩材料連結處形成互鎖式機械結構而達到連接效果[2, 10]。但由於兩材料過大的熱傳導速率

差異，鋁促使玻璃降溫速度變快，使其內部應力不均勻，產生內部結構破裂的缺陷，而鋁體積變化太快將導致連接處的玻璃受到鋁體積回縮擠壓使連結處結構被破壞，導致焊接強度不如預期。我們多數焊接結果存有白色破裂紋路為界面內部不均勻混合與內應力破壞的結果，若能設計一套退火機制(annealing)控制溫度變化速率，以控制材料冷卻速率與應力釋放，應有望進一步改善破裂情況與提升焊接強度。

為了提高焊接成功穩定性，受到傳統金屬焊接技術之啟發[11]，我們推論：在無填料焊接條件下，若能提升熔融材料的流動性與接合面積，將有助於提升異質材料間的焊接效果。因此，我們將加工路徑由原本的單一直線修改為螺旋式掃描(圖四)。此路徑模擬傳統焊接中之擺動軌跡，藉此達到以下目的：

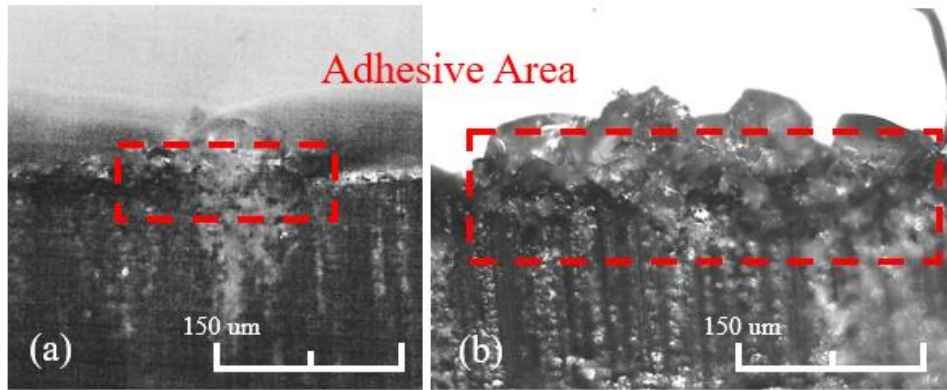
- 提升加熱區域面積，延長雷射與材料互動時間；
- 促進熔融材料於掃描路徑堆積以填補間隙；
- 減緩能量集中導致的熱應力，避免裂縫產生。



圖四、直線式掃描(a)俯視圖(b)玻璃移除後之側視圖；螺旋式掃描(c)俯視圖(d)玻璃移除後之側視圖

在相同雷射功率與掃描速度條件下，設定螺旋圓圈直徑為 0.3 mm，並進行測試。從樣本結果圖四(a)(b)(c)(d)可觀察到，螺旋式掃描的焊接路徑寬度達到約 400 μm ，相較於直線式的 120 μm 具有更大的連結範圍。進一步從圖五(a)(b)兩圖相比

可見，螺旋式不僅提高了黏合區域，其中心路徑因熱量累積較高使熔融物質增加，也產生了更深的凹陷，進而增強異質材料之間的參雜深度。此策略在焊接成功率與剪力測試上表現確實更為穩定，其中平均剪力強度可達 10 MPa 以上。



圖五、經剪力測試後仍有玻璃殘留之焊接截面(a)直線式掃描(b)螺旋式掃描

然而，值得注意的是，螺旋式掃描方式也伴隨玻璃破裂現象的增加，顯示其所引入的內部熱應力可能超過玻璃的承受極限，反而導致焊接失效。整體而言，實驗結果證實本研究所提出之路徑優化策略能有效提升玻璃與鋁異質材料焊接的穩定性與可靠性，但同時亦需平衡應力管理以避免材料損傷。

五、總結

本研究展示了飛秒雷射微焊接在玻璃-玻璃與玻璃-鋁異質材料接合策略與結果之差異。在同質焊接玻璃-玻璃實驗中，發現及討論焦點位置與初始貼合程度對焊接品質的重要性。最佳聚焦點位於接合基準面下方約 15 μm ，容差範圍 $\pm 30 \mu\text{m}$ ，最高結合強度達 11 MPa。著重分析牛頓環作為間隙與焊接品質的指標，具有實務應用價值，驗證了貼合度與焊接效果的正相關性。

而在玻璃-鋁異質焊接得出最佳聚焦位置位於界面上方約 200 μm ，剪力強度可達 10 MPa 以上。以材料性質角度分析其接合機制與前實驗的不同，解釋材料互滲結構如何增強接合和異質焊接之挑戰包括鋁片表面粗糙、熱傳導率差異與熱應力導致的破裂。接著進一步提出螺旋式掃描並驗證此策略在提升接合面積與穩定性方面的優勢，為異質材料焊接路徑優化提供新思路。

未來在熱應力管理、表面品質控制與測試精度仍需改進，可通過退火機制、掃描策略優化與標準化製備進一步提升技術成熟度，更能夠推廣此策略到其他異質材料，為微封裝、加工領域開拓新的製程可能性。

六、心得感想

黃家品：

這次專題能夠順利完成，我特別感謝高福學長與指導教授楊尚達老師，在此專題過程中給予我耐心的指導與協助。此外，也非常感謝負責我們專題訓練課程的學長姐們，他們細心準備的課程內容讓我們能更順利地踏入光電研究的領域，打下重要的基礎。

這次的專題經驗除了使我透過閱讀文獻與實際操作獲得豐富的知識與技能，在親自參與光路架設與調整的過程中，我深刻體會到從理論模擬到實作應用之間的巨大差異，也再次認識到解決問題與臨場應變能力的重要性。就如同教授所說：「失敗的實驗才是最能學到東西的機會。」最後，我也要感謝我的組員，感謝他在時間緊迫、過程不斷嘗試與調摸索的狀況下，始終與我一同堅持到底，讓這次的實驗順利落幕，也留下愉快且充實的合作回憶。

鍾承翰：

由於自己是工學院學士班的學生，雙專長是材料與電機，便希望能選一個兩個專長都能涵蓋到的主題作為專題題目，剛好在專題說明會上聽到楊尚達教授介紹這個題目，聽完發現不僅符合需求，自己也有興趣，因為未來會想走半導體相關產業，便找教授面談希望能做這個專題題目。

學習相關知識的過程其實我覺得挺累的，因為光學是我以前相對不擅長的領域，有不少新東西要學，但每次 meeting 教授都會透過問答引導我們思考並解惑，都會有新的收穫，讓原先困難的學習過程變得相對簡單。此外，透過這次專題也學到不少相關知識外的技能，例如：如何使用 LabView 寫程式、學會使用 SolidWorks 建模與 3D 列印、培養查詢資料與解決問題的能力等，可以說是收穫頗豐。

專題實驗中，我覺得最困難的部份便是找到 beam waist 應該在的位置，這很大程度影響焊接成功與否，還記得當初找好幾小時焊接都失敗的經歷。另外因為這個主題是學長姊之前沒有做過的，加上我們打算從同質焊接延伸，所以報告要整理的內容也是相當多，可以說是兩個題目加起來的量也不為過。心裡十分感謝黃家品同學在專題的幫助，報告的示意圖不僅都是他用 ppt 做出來，他對實驗的嚴謹、思考方式與報告呈現的想法我覺得都有很多我值得學習的地方。

七、參考文獻

- [1] 陳園迪、蔡武融 (2020)。超快雷射玻璃微銲接技術。機械工業雜誌，(443)，14-

- [2] Lin Zhang, Han Wu, Jincheng Wen, Meng Li, Xinyu Shao, Xiuquan Ma, Glass to aluminum joining by forming a mechanical pin structure using femtosecond laser, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 302, 2022, 117504, ISSN 0924-0136.
- [3] Takayuki Tamaki, Wataru Watanabe, and Kazuyoshi Itoh, "Laser micro-welding of transparent materials by a localized heat accumulation effect using a femtosecond fiber laser at 1558 nm," *Opt. Express* 14, 10460-10468 (2006)
- [4] Matsuyoshi, S. & Mizuguchi, Y. & Muratsugu, Atsushi & Yamada, H. & Tamaki, T. & Watanabe, Wataru. (2018). Welding of Glass and Copper with a Rough Surface using Femtosecond Fiber Laser Pulses. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*. 13. 21-25.
- [5] Tan, H., Duan, J. Welding of glasses in optical and partial-optical contact via focal position adjustment of femtosecond-laser pulses at moderately high repetition rate. *Appl. Phys. A* 123, 481 (2017).
- [6] 陳園迪、蔡武融(2021)。Ultrafast Micro Laser Welding Technology for Glass and Metal。機械工業雜誌，(455)，13-17。
- [7] Yurevich, V. I., Grimm, V. A., Afonyushkin, A. A., Yudin, K. V., & Gorny, S. G. (2015). Optical design and performance of F-Theta lenses for high-power and high-precision applications. *Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI*.
- [8] Neo, & Lee, C. (2023, February 17). F-Theta 掃描透鏡應用說明. *Wavelength-Oe.Com*. <https://wavelength-oe.com/zh-TW/f-theta-scan-lens/>
- [9] Bunaziv, I., Akselsen, O. M., Ren, X., Nyhus, B., & Eriksson, M. (2021). Laser Beam and Laser-Arc Hybrid Welding of Aluminum Alloys. *Metals*, 11(8), 1150.
- [10] Ciuca, O. P., Carter, R. M., Prangnell, P. B., & Hand, D. P. (2016). Characterisation of weld zone reactions in dissimilar glass-to-aluminum pulsed picosecond laser welds. *Materials Characterization*, 120, 53–62.
- [11] 黃光瑤、簡士凱、王雍行(2022)。Development Trend of High-Power Laser Wobble Machining Technology。機械工業雜誌，(467)，29-34。