

國立清華大學 電機工程學系

實作專題成果摘要

Bessel Beam in Grass Welding

貝索光束玻璃焊接

專題領域：光電領域

組 別：B271

指導教授：楊尚達教授

組員姓名：108061204林宗楷、108061243鄭楊議

研究期間：111年2月14日至112年1月13日止，共11個月

背景

超短脈衝雷射焊接以其高空間選擇性、高精度和沒有顯著的熱變形現象等特性，可以滿足先進焊接技術的更高要求，但由於超短脈衝雷射焊接需要將雷射焦點準確地放置在樣品界面上，控制焦點位置之挑戰增加了此焊接技術在工業應用的難度。貝索光束具有幾乎無繞射傳播的特性，此外聚焦的貝索光束具有長焦深，通常比聚焦的高斯光束瑞利範圍大許多。因此，採用超短貝索光束可以解決上述存在的問題，使超短脈衝雷射焊接的焦點於樣品位置變為相對寬鬆^[1-2]。

目的

在本文中，我們利用軸稜鏡與超短脈衝高斯光束試著產生貝索光束，並且進行觀察、量測確定其性質。未來會利用該光束進行玻璃焊接並與高斯光束比較研究，以闡明使用超短脈衝貝索光束的優勢。

原理及實驗架構

由於單顆光子的能量不足以讓電子從基態躍遷至激發態，因此需要多顆光子來激發電子。在超短脈衝雷射在高功率密度的照射下，材料內部會產生非線性吸收，電子藉由吸收多顆光子能量產生躍遷而形成自由電子，稱作「多光子吸收(multi-photon absorption)」。躍遷至激發態的電子可吸收多個光子而躍遷到更高能階，透過撞擊周圍的原子而產生額外的電子。經過持續的吸收和撞擊，使導帶中的自由電子密度快速成長，該過程稱為「雪崩效應(Avalanche ionization)」。

當電子雲密度達一定量值時，會產生電漿雲從表面噴出。當雷射聚焦於下層玻璃時，玻璃與玻璃之間會產生的水滴狀結構，電漿從底下噴發先融化掉一部分的上層玻璃，再經過冷卻後彼此重新結晶化以黏合，若有足夠多且一定大小穩固水滴狀結構產生，加上水滴結構彼此之間距離足夠近，最後會達到玻璃焊接的效果。

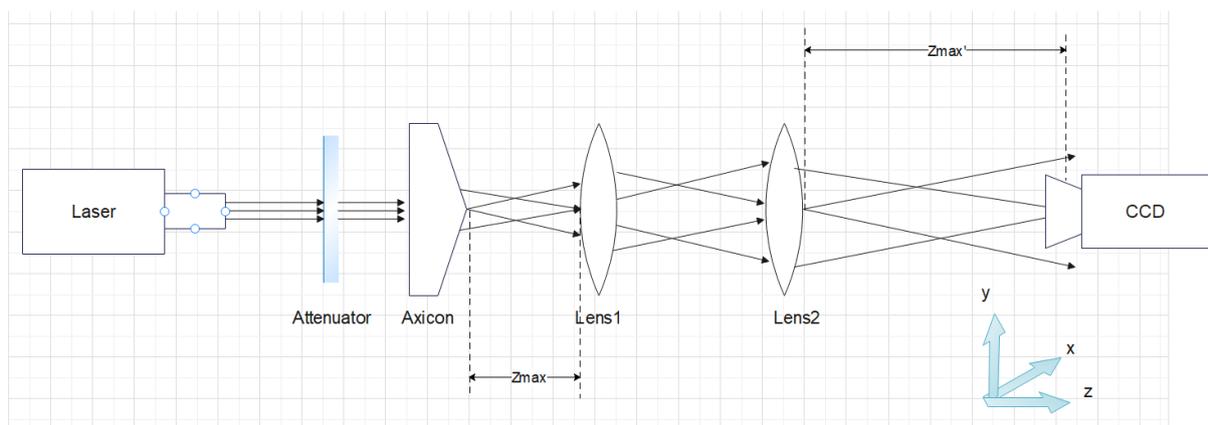


圖 1 貝索光束量測實驗架構

此架構所使用之雷射為紅外光短脈衝雷射，中心波長 $\lambda=1030\text{nm}$ ，脈衝寬度為 300fs ，重複頻率為 250kHz ，高斯光束半徑 $\omega_0=1.1\text{mm}$ ；軸稜鏡底角 $\alpha=10^\circ$ ，折射率 $n=1.458$ ；凸透鏡組焦距 $f_1=7.5\text{cm}$ 與 $f_2=60\text{cm}$ ，擴束比 β 定義為 $\beta=f_2/f_1=8$ 。此架構所

得軸稜鏡產生的貝索光束無繞射傳輸距離 z_{max} 理論值，可以利用以下公式求出：

$$z_{max} = \frac{\omega_0}{(n-1)\alpha} \approx 1.376\text{cm}$$

經過擴束後的 z_{max} 為 z_{max}' 可以利用以下公式求出：

$$z_{max}' = \frac{\beta^2 \omega_0}{(n-1)\alpha} = 8^2 z_{max} \approx 88.064\text{cm}$$

實驗結果

完成圖1的實驗架設後，我們首先要確認利用軸稜鏡後方產生的是否為貝索光束。我們使用電荷耦合器件(CCD, Charge Couple Device)去觀察其光斑形狀，測量結果如下圖2所示。可以發現其光斑形狀與高斯光束不同，高斯光束的光斑形狀只有一個中心圓，而圖中除了中心圓還有外圍的同心環，與貝索光束的場形分布大致相同。

確認光斑形狀後，接著要測量其參數 z_{max} 並與理論值做比較。我們的做法是沿著光軸每 5 公分利用 CCD 掃描其光斑並記錄其相對能量值，掃描約 1 公尺後，利用 MATLAB 軟體將所有光斑的能量分布畫在一起，x 軸和 y 軸為單一光斑分布範圍，z 軸則是光軸方向，我們可以得出 3D 的能量分布圖。之後為了方便計算參數 z_{max} ，我們將 3D 圖分為 x-z 平面和 y-z 平面來看，如圖 3 所示。因為可能有實驗誤差，我們不確定光束實際上是否 x-y 對稱，所以分為 x-z 平面和 y-z 平面分別探討。從圖 3 可以得知，無論是從 x-z 平面或是 y-z 平面來看，其 z_{max} 皆大約為 70 公分，與理論值 88 公分相差不遠。誤差來源推測是來自軸稜鏡的錐面像差再加上後續的擴束造成誤差放大，但憑光斑形狀以及光束的聚焦範圍，我們可以確定我們成功做出貝索光束。

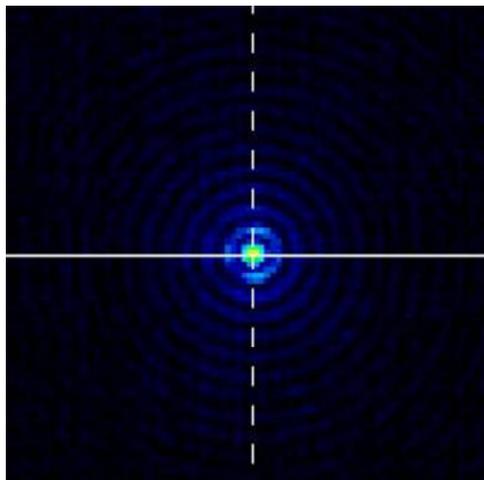


圖 2 貝索光束輪廓

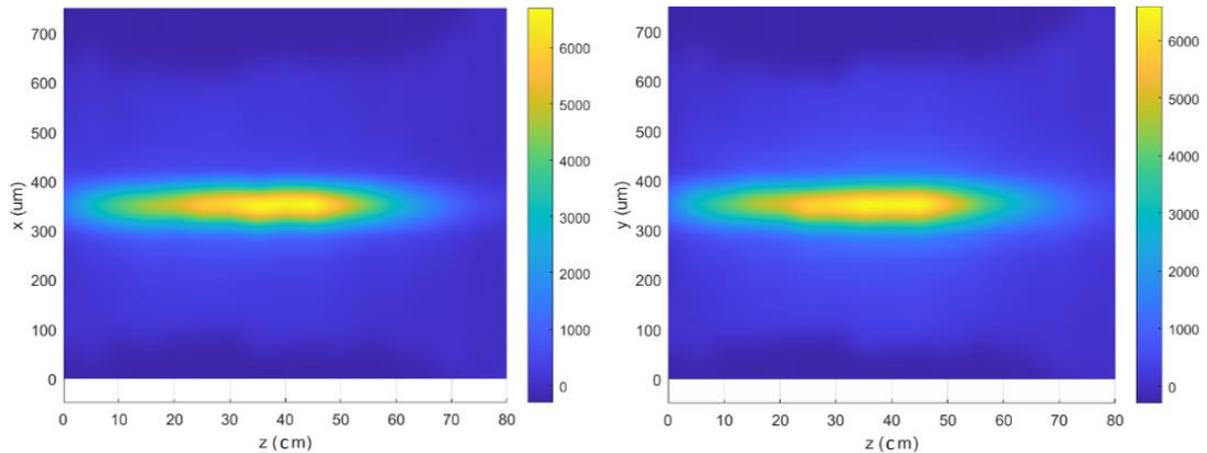


圖 3 x 方向(左)與 y 方向(右)貝索光束強度沿光軸之強度分佈

總結

本專題目前已成功產生貝索光束，其無繞射傳播距離大致與理論相符，驗證了飛秒短脈衝高斯光束雷射由軸稜鏡聚焦後所產生的貝索光束相較於聚焦後之高斯光束擁有較大焦深，此結果將可以改善利用高斯光束進行玻璃焊接時對於焦點位置之準確性，將此條件變為相對寬鬆。然而所產生之貝索光束目前尚未無法將玻璃樣本成功焊接，但原先之高斯光束卻可以將玻璃樣本成功焊接，且其附著力可以抵抗一定所施的外力，導致強度損失此結果之原因還有待釐清，現階段的想法為使用更高功率之飛秒脈衝雷射及使用底角較小之軸稜鏡，將於專題剩餘之時間與指導教授楊尚達老師、實驗室的博士及學長繼續實驗探討原因與尋找解決方法。

心得

林宗楷：

選擇做這個專題是因為被標題及之前專題學長的成品所吸引，再加上有修了一些光電領域的課程，所以希望藉由實作專題了解一下光電相關的資訊。在上學期跟楊尚達教授每次報告的過程中，藉由被教授點出問題及準備不足之處後與組員討論，讓我學到更多光電領域的相關知識。這學期實作的過程中，由於先前完全沒有做過光學實驗的經驗，在剛開始的訓練課程就遇到許多難題，但也讓我們累積了許多實作的經驗，感謝教授提供解決的方向及實驗室的博士以及學長們在我們有需要時對我們伸出援手，使我們可以順利完成訓練課程。

鄭楊議：

最初選擇這個專題是因為修與光電相關的課程，希望藉由專題更加了解光電領域。與多數人相同，剛開始教授給定主題讓我們查詢相關的資料、論文並兩周報告一次。在過程中我們自學 MATLAB 程式做簡易繪圖、資料分析、濾波等等。報告時教授會針對我們閱讀的論文內容提出疑點並用引導式問答讓我們在過程中推敲出可能的答案，讓我們了解論文不一定是完全正確，在閱讀的同時也得思考文章的說法是否合理。大三升大四的暑假，我們開始進到實驗室學習實作的部分。一開始類似大一的普物實驗，不同的是博士只會給我們實驗題目，實驗目的、步驟、量測方法、所需儀器全都需要我們自己找資料，並在實驗前與他討論。剛開始做實驗前我們非常苦惱，因為查到的資料有限，但經過與研究員討論後我們更熟悉其實驗過程、實驗室器材的配置。雖然現在專題尚未全部完成，但在過程中學到許多東西，感謝指導教授跟實驗室的學長，在我們遇到瓶頸時不厭其煩的教導我們。

參考文獻

- [1] Sören Richter, Felix Zimmermann, Dirk Sutter, Aleksander Budnicki, Andreas Tünnermann, and Stefan Nolte, “Ultrashort pulse laser welding of glasses without optical contacting,” SPIE Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XVII, Vol. 10094, No.11, Feb. 2017
- [2] Guodong Zhang, Razvan Stoian, Wei Zhao, and Guanghua Cheng, “Femtosecond laser Bessel beam welding of transparent to non-transparent materials with large focal-position tolerant zone,” Opt. Express, Vol. 26, Issue 2, Jan. 2018, pp. 917-926