

逢甲大學學生報告 ePaper

幾何狹縫繞射

Geometric slit diffraction

作者：翁嘉駿、歐雲智、許豐璿、莊子慶

系級：光電四乙

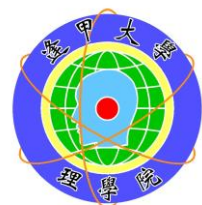
學號：D0310622、D0356211、D0356179、D0390705

開課老師：林碩泰 老師

課程名稱：雷射加工實作專題

開課系所：光電學系

開課學年：106 學年度 第 1 學期



中文摘要

本次雷射加工終端實作內容為，幾何狹縫圖形製作與繞射圖案探討，我們將分別觀察中空三角形、中空六邊形和中空 5 邊星形的狹縫，並以單狹縫繞射為基礎，作為多邊形狹縫之推論與分析參考。狹縫之製作方式，在玻璃基板上利用熱蒸鍍方式，將厚度約 90 nm 的鋁蒸鍍至玻璃表面，並利用一近紅外(1064 nm)脈衝光纖雷射加工機進行多邊形狹縫雕刻，當近紅外雷射照射在金屬鋁上，鋁金屬吸收雷射轉化為熱能，升溫達汽化溫度而剝除，達到雷射雕刻之效果。調整相關加工參數，使狹縫邊緣完整平滑，並且中心圖案能清除乾淨後，後續再架設光繞射/干涉量測裝置，進行繞射圖案的觀察與量測。用氬氬雷射照射多邊形狹縫並產生繞射圖案後，經過一個平凸透鏡將繞射圖案收集，達到遠場繞射條件，再以光束空間分析儀(Beam Profiler)進行空間之雷射光強度觀察，並以單狹縫為例，進行理論值與實驗值之誤差分析，誤差值為 5.3%。

最後我們觀察的光形分佈圖案符合參考文獻的結果，繞射圖案會依據多邊形狹縫的邊長數量而有相對應方向的繞射圖案，同時透過狹長的邊長所產生的繞射圖案會有對稱性，若邊長為互相平行，則有干涉現象出現且有明顯的亮暗條紋。

關鍵字:雷射加工

英文摘要

The practice project on laser material processing is to investigate the production of geometric slits and the study of diffractive patterns. We will observe the slits of hollow triangles, hollow hexagons and hollow five-sided stars, respectively, and use single-slit diffraction as a reference to calculate the error between the experimental and theoretical analysis. The slits are fabricated on the glass substrate coated with aluminum by thermal evaporation. The thickness was estimated ~ 90 nm. The polygonal slit engraving was performed using a 1064 nm pulsed fiber laser processing machine. When the laser is irradiated on the aluminum, the metal absorbs the laser energy and converts it into heat, which is heated up to the vaporization temperature and aluminum is stripped. After adjusting the controlled processing parameters so as to make the edge of the slit more smoothly and the central pattern can be cleaned up, we will observe the diffraction pattern by installing a light diffraction/interference measuring device. After irradiating the polygonal slits with a HeNe laser and generating a diffraction pattern, the diffraction pattern is collected by a plane-convex lens to achieve the far-field diffraction conditions, and then the laser intensity of the space is observed through a beam profiler. Taking the single slit as an example, the calculated error was reached 5.3 % between the theoretical value and the experimental value.

Finally, the diffraction patterns we observed are consistent with the published results. The diffraction patterns have a corresponding pattern with the number of sides of the polygonal slit. If the side length is parallel to each other, then the interference patterns modulated by diffraction will be observed.

Keyword : laser material processing

目錄

一、	目的與動機-----	4
二、	實驗原理-----	4
三、	實驗步驟-----	6
四、	實驗結果與討論-----	10
五、	成本估算-----	15
六、	參考文獻-----	15
七、	修課心得-----	16

一、目的與動機

在修習光學實驗時可發現，光通過與光波長數量級相當之縫隙時，其通過光將會產生繞射現象，若其縫隙為方形狹縫，將會產生橫向的射光型，同時藉由狹縫實驗驗證了光同時具備粒子性以外的波動性，因此決定進一步探討其他幾何圖形孔隙所對應之繞射圖案與其形成原理。

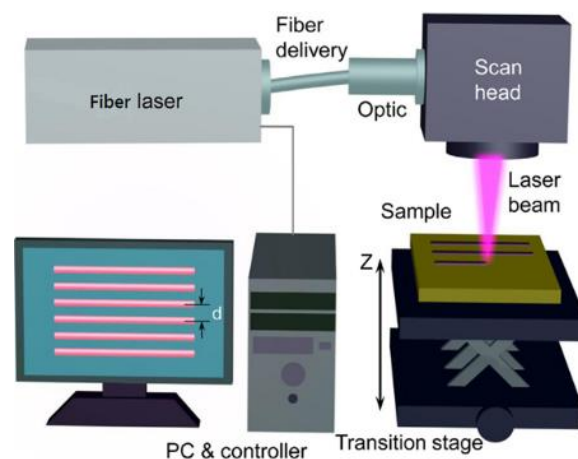
二、實驗原理

本次專題利用 1064 nm 的脈衝光纖雷射對鍍鋁玻璃進行加工，雷射加工裝置如圖一所示[2]，因鋁對光波長 1064 nm 波段吸收率約 10%[1]，當鋁表面吸收雷射能量，進而快速升溫產生汽化剝除效果，其剝除速度受鍍膜厚度、金屬吸收率與雷射加工參數影響，如功率、掃描速度等影響，雷射光束照射位置可透過掃描鏡組(Scan hand)控制，掃描鏡組為一 2 軸電控掃描裝置(Galvo motor)，可透過電腦軟體設定掃描圖案，後續還經過一透鏡組，可經雷射光點聚焦約 60 μm 大小，進行精細的雕刻或相關雷射加工過程。

繞射現象可用惠更斯－菲涅爾原理 (Huygens-Fresnel principle) [3]進行解釋，惠更斯－菲涅耳原理是研究波傳播問題的分析方法，同時適用於遠場極限和近場繞射，根據原理在波動傳播過程中的任一時刻，波面上的每一點都可以看作是一個新的波源，各自發射球面波，

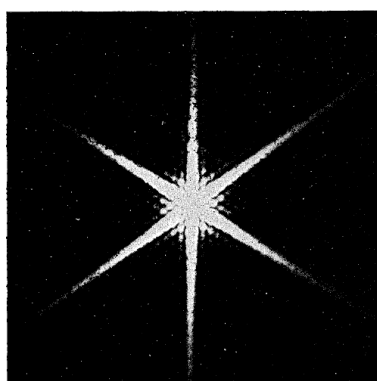
幾何狹縫繞射

所有子波的包絡面，形成下一時刻的新波面，將所有從這些點波源發射出的球面波通過干涉原理進行疊加。

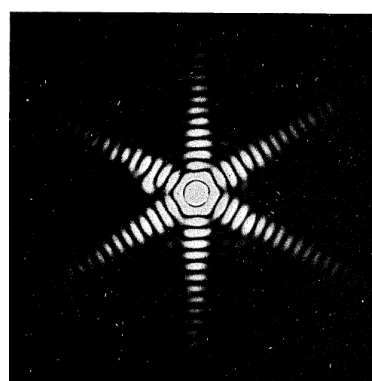


圖一 雷射加工程序示意圖[2].

當光照射在狹縫上，在狹長的邊上會產生繞射現象，而由參考論文中可得知使用 N 邊形狹縫的話，則會產生 N 個路徑方向的繞射條紋，分別以三角形和六邊形狹縫為例，如圖二。而六邊形狹縫的話，雖然有六個邊，但每 2 個邊長互為平行，因此 2 者互相產生干涉且有明顯的亮暗條紋。本次我們再多做出星形狹縫，它有 10 個邊，推測會產生 10 個不同方向的繞射條紋[3]。



圖二 (a)三角形狹縫[3]

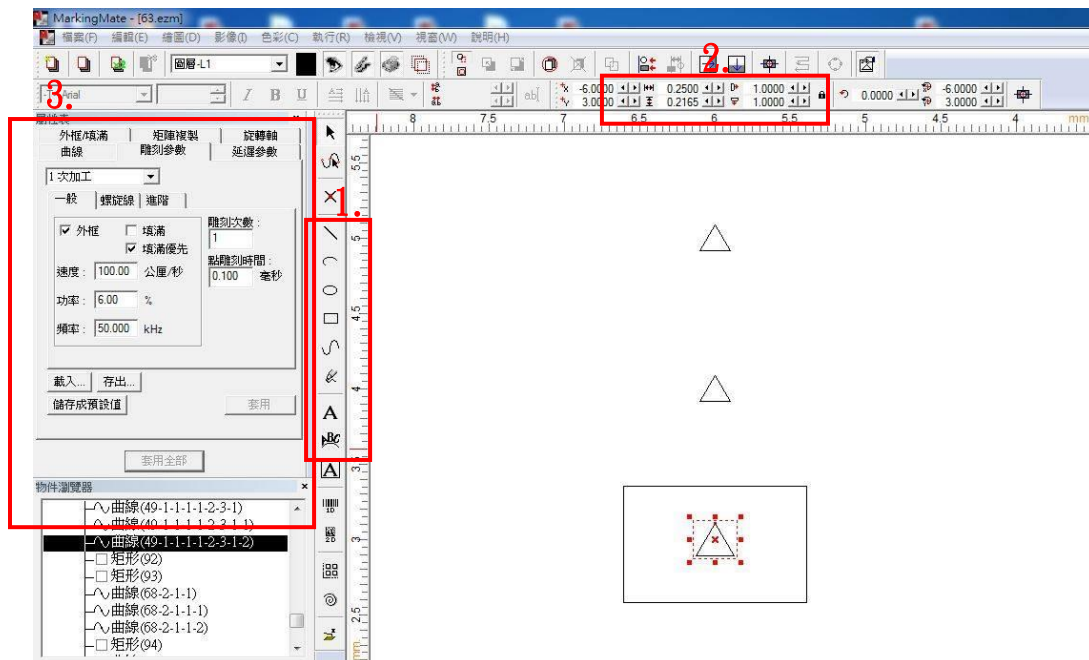


(b)六角形狹縫 [3]

三、實驗步驟

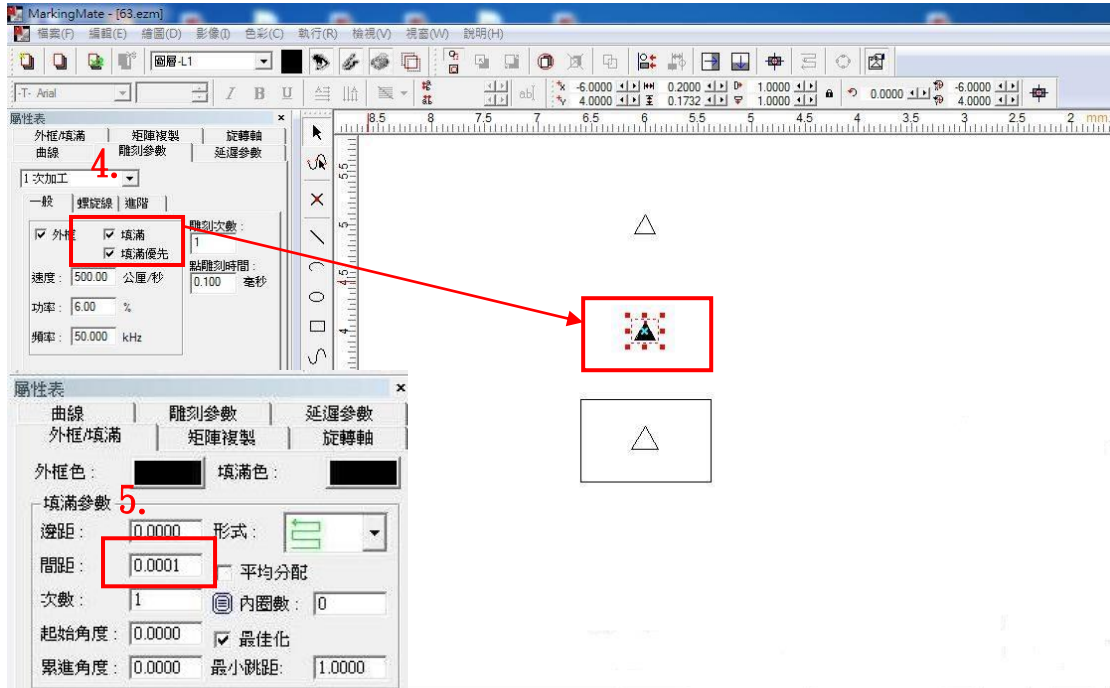
第一部分:雷射加工機介面設定與執行

首先介紹附設雷射加工機軟體 Markingmate 操作介面，我們利用其系統提供的圖案設計製做出想要的圖形後，可移動加工平台至合適位置，點選該圖形並做加工參數的設定，包含雷射功率、雷射重複率、Galvo motor 掃描速度、Galvo motor 掃描間距與雕刻次數，相關操作介面說明如圖三~圖五所示，其中光纖雷射之輸出特性為：中心波長 1064 nm、脈衝寬度:25 ~ 100 ns (六段可調整)、脈衝重複率:30 kHz ~ 2 MHz、聚焦點的直徑: 60 μm 、脈衝最大能量: 1 mJ、最大平均輸出功率:50 W。

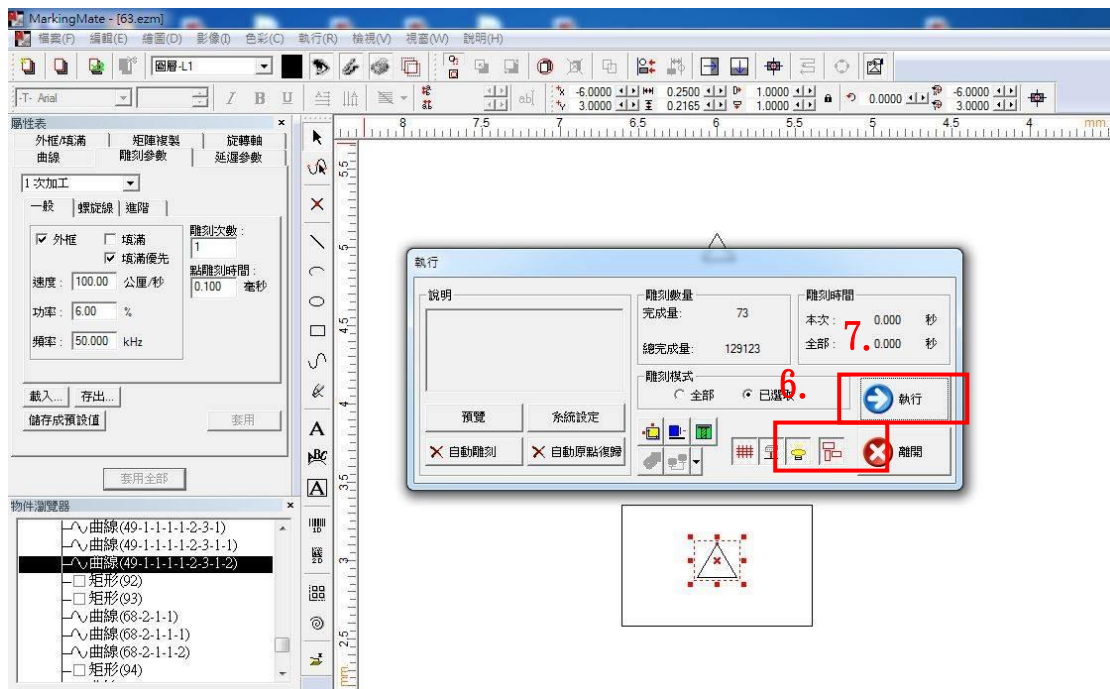


圖三 Markingmate 操作介面標示

幾何狹縫繞射



圖四 繪製填充圖片與掃描間距設定

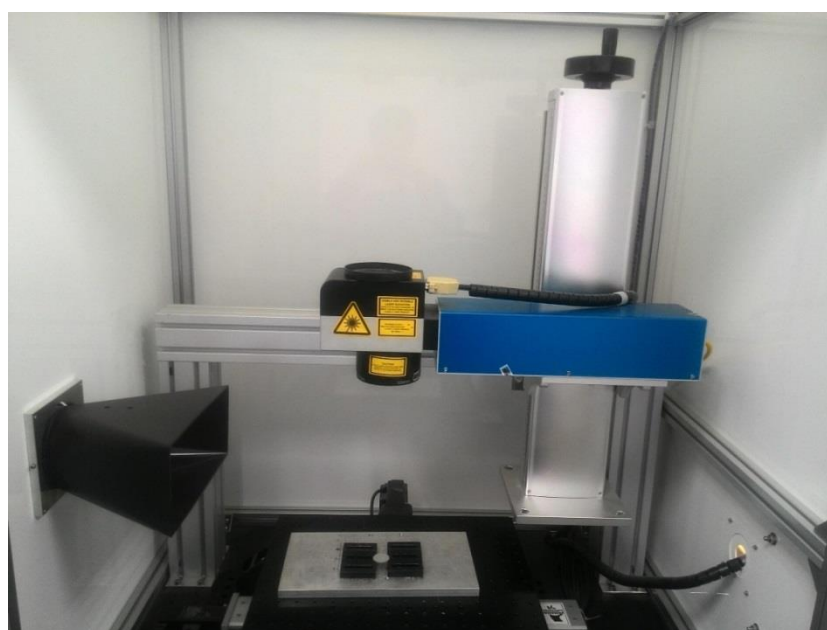


圖五 加工預覽及執行加工介面。

而圖六為雷射加工機的實體配置圖，可利用右側的旋轉鈕，調整聚焦鏡頭的高低位置，達到加工平台在焦平面的位置。

表一. 操作介面說明。

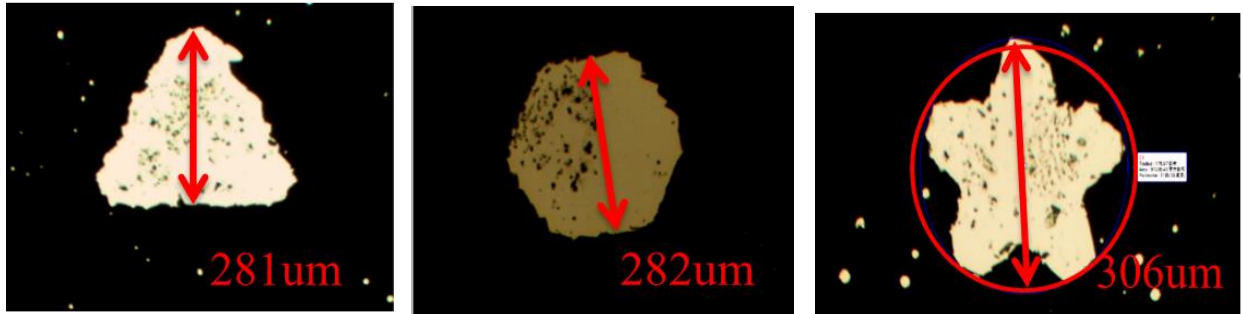
	說明
註 1	利用不同的繪製方式來設計出想要的圖形
註 2	可用來調整圖形長寬的大小及倍率
註 3	點選圖形後可設定雷射依路徑加工時的參數
註 4	點選填滿後可將圖形內部填滿掃描路徑以加工
註 5	調整不同的雕刻間距以達到掃除的效果
註 6	此為預覽功能，可先以導引框看雷射打在哪個位置
註 7	確定相關參數後按下執行鍵即開始加工



圖六. 雷射加工機平台。

第二部分:鍍鋁玻璃加工

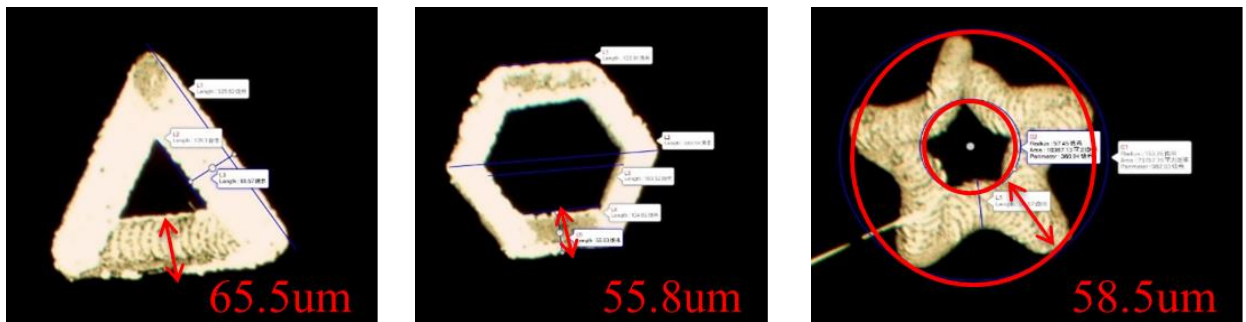
利用雷射加工機附設軟體 Markingmate 介面設計加工的圖形，並設定加工相關參數(設定範圍:一般模式，平均功率 3~5 W，掃描速度 100 ~ 500 mm/s，重複率 50 kHz)。



圖七 (a)實心三角形

(b) 實心六角形

(c) 實心星形



圖八 (a)中空三角形

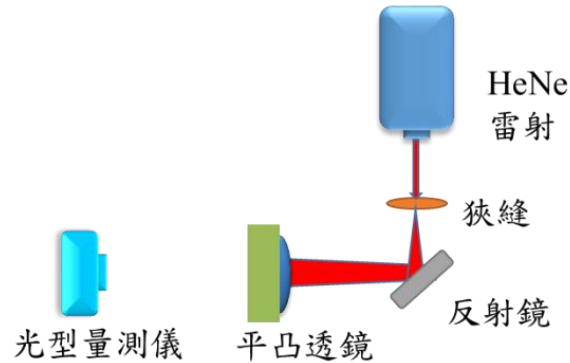
(b) 中空六角形

(c) 中空星形

第三部分:繞射圖形量測

利用一約 5 mW 的 HeNe 雷射光源進行繞射光測量，將上述加工完的幾何繞射圖形，放置於 HeNe 雷射出口，利用一平凸透鏡($f=200$ mm)將繞射光源收集，可達到遠場繞射(Fraunhofer diffraction)的效果，利用光形量測儀(beam profiler)進行繞射光測量與分析，圖九為測量繞射情形時的架構，其中 Beam Profiler 為一類似數位相機底片

(CCD)儀器，可紀錄光強度在空間之分佈行為，可調整曝光時間與放大倍率來記錄光強度分佈。

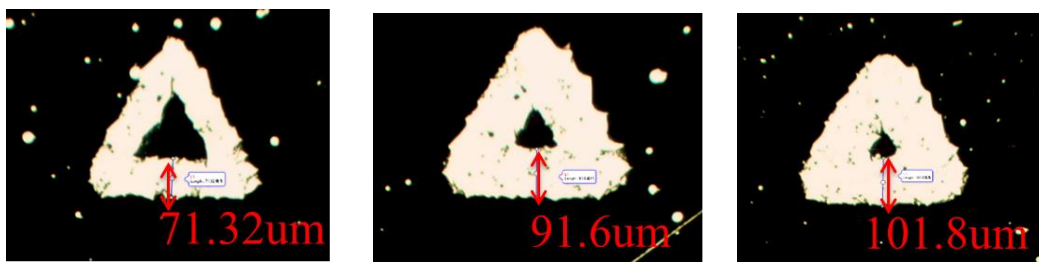


圖九. 量測繞射光空間分佈架構。

四、實驗結果與討論

(一)雷射加工參數:雷射功率與加工孔徑差異

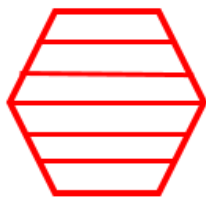
先利用加工機台軟體 Markingmate 設定一正三角形，其邊長為 $250\ \mu\text{m}$ ，加工方式為沿著正三角形掃描，目標為產生一三角型外框，當改變不同的雷射功率下，可以發現雷射功率在 $3\ \text{W}$ 下，鍍鋁基板上可產生線寬約 $70\ \mu\text{m}$ 之三角外框，但功率過高下，則金屬鋁吸收過多能量，溫度上升外擴，反而造成鄰近的鋁達到汽化溫度，線寬達 $\sim 100\ \mu\text{m}$ ，如圖十所示，故 $3\ \text{W}$ 的加工功率已足夠。



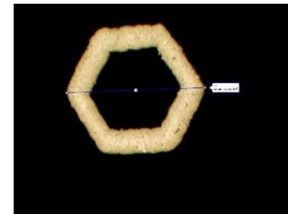
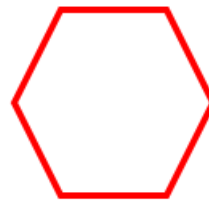
圖十 (a)加工功率 3 W (b)加工功率 5 W (c)加工功率 7.5 W

(二)雷射加工參數:掃描路徑差異

透過前段加工功率的測試，將雷射輸出功率設定在 3 W 平均功率，並測試不同的雷射加工掃描路徑造成之差異性，首先以實心和空心六邊形狹縫的掃描方式為例，如圖十一所示。圖十一(a)設定的掃描方式可形成空心六邊形圖樣，而圖十一(b)設定的掃描方式，會造成一實心六邊形圖樣。

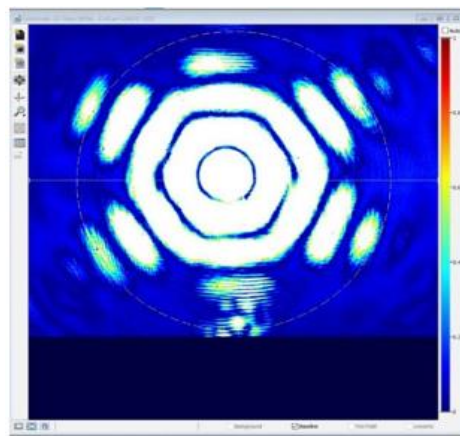
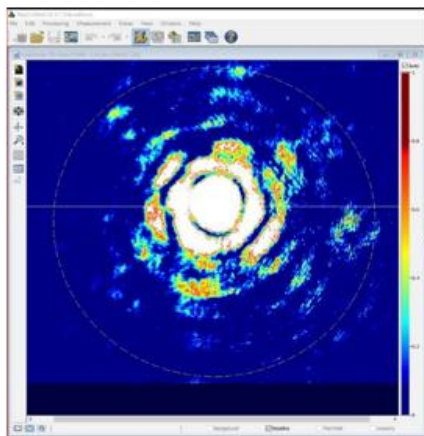


圖十一 (a)實心掃描路徑之狹縫



(b)中空掃描路徑之狹縫

最初我們使用實心圖案的掃描路徑，經 beam profiler 觀察後，其繞射圖案較不明顯，如圖十二(a)。由繞射的原理可知狹縫越窄的話，繞射現象的產生會更為明顯，因此後來以空心圖案做加工後果然其繞射現象較強烈，如圖十二(b)，故後續圖案皆已空心的形式去加工。



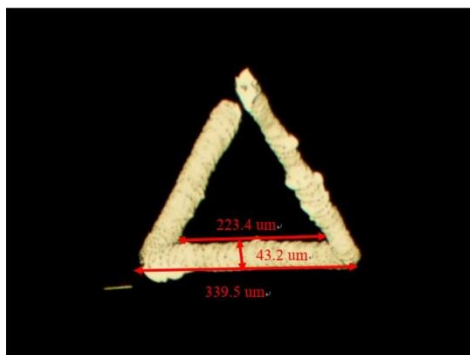
幾何狹縫繞射

圖十二 (a)實心狹縫之繞射圖案

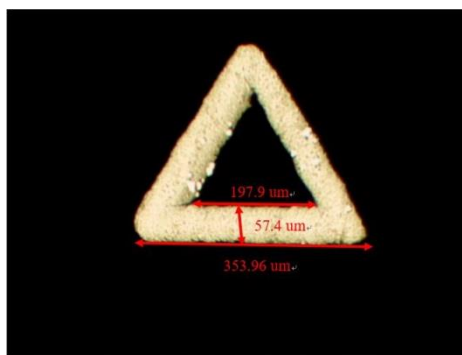
(b) 中空狹縫之繞射圖案

(三)雷射加工參數:掃描速度差異

不同的掃描速度會影響到狹縫邊緣的平滑程度，主要差別在於加工速度越慢，單位時間內累積的雷射功率越多，累積足夠能量，造成金屬鋁溫度上升，達到汽化溫度，進而移除，由圖十三(a)可以看到，在雷射平均功率固定在 3 W 時，當設定掃描速度達 500 mm/s，因雷射光束掃描過快，熱量累積不足，使得線寬較窄，同時容易出現不規則線條，同時有些區域的金屬鋁沒有完整清潔，當掃描速度降至 100 mm/s，合適的雷射光束掃描速度，可以得到完整的狹縫圖案，如圖十三(b)所示。



圖十三 (a)掃描速度 500 mm/s

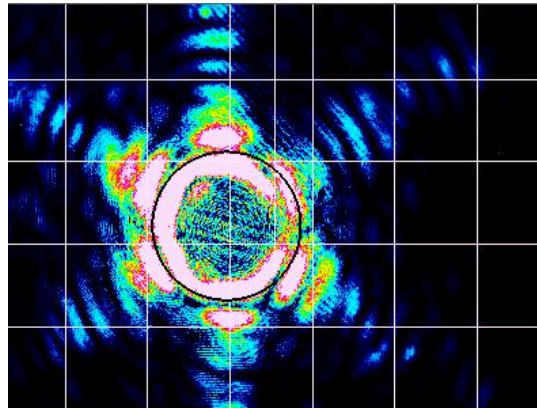


(b)掃描速度 100 mm/s

(四)Beam Profiler 繞射結果

利用圖九的實驗裝置紀錄不同幾何結構的光繞射圖樣，因繞射光的 0 階與高階繞射光強度差異很大，估計落差 100 倍以上，這對利用 beam profiler 進行繞射光的空間分佈是個很大的挑戰，若 0 階繞射光

曝光量不飽和，則高階繞射光記錄不到，故起初為了降低 0 階繞射光強度，因此我們以中心直徑約 100 μm 的圓形金屬鍍鋁圖案去遮擋，但實作後發現，經過遮擋後，繞射現象變得很不穩定，可能原因為振動問題，或是 100 μm 圖形圖案額外造成的繞射現象，如圖十四所示。

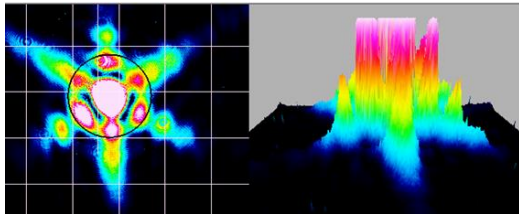


圖十四 受遮擋之繞射能量分佈。

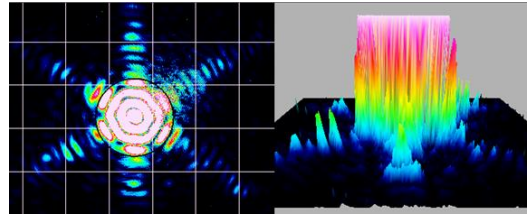
最後為了避免額外的不穩定繞射現象，我們沒有使用額外的圓形金屬鍍鋁削減 0 階繞射，而是調高 Beam Profiler 的曝光時間，讓 0 階繞射過度曝光，高階繞射光可以記錄下來的作法，對繞射現象去做觀測與分析，如圖十五所示。

圖十五量測繞射圖可對應到圖八的中空幾何圖，左側圖表示的 2 維的繞射分佈，而右側的圖形為 3D 的強度分佈，由於 0 階繞射光的強度過強，故過度曝光後呈現白色，可以觀察到繞射圖樣可利用單狹縫繞射與雙狹縫干涉現象來解釋，其中中空三角形與中空 5 邊星形都可以觀察到呈現倍數(6 與 10 邊)的繞射圖樣，因中空 5 邊星形與中空六邊形的對稱結構，又造成干涉現象產生，而干涉的分佈又伴隨著繞

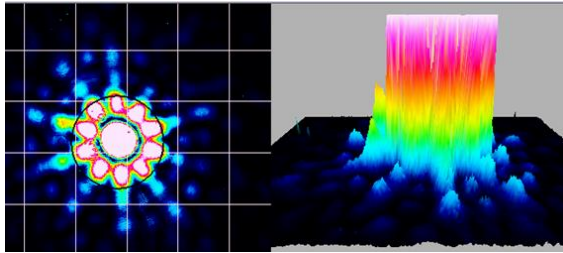
射的強度分佈調制，形成了複雜又美麗的光形圖案。



圖十五 (a)中空三角形繞射



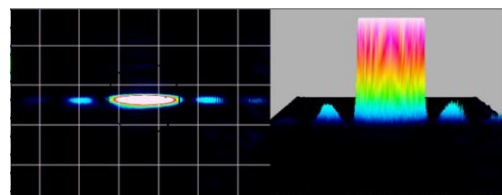
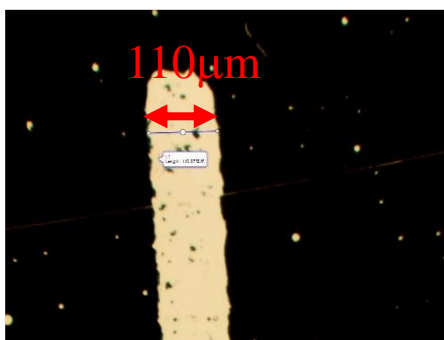
(b)中空六角形繞射



(c)中空 5 邊星形繞射

(三)繞射角度計算 (以單狹縫為例)

多邊形狹縫的繞射圖形分析較不容易，但為了確認我們以雷射加工後的狹縫所產生繞射現象的準確性，因此我們以較為單純的單狹縫去做測試及測量出實際和理論的差距，圖十六(a)顯示的為雷射加工單狹縫之線寬，圖十六(b)利用 beam profiler 量測繞射光之空間分佈，其中中心光點和第一暗紋之間距為 $y_1=1090\ \mu\text{m}$ ，單狹縫寬 $b=110\ \mu\text{m}$ ，量測使用透鏡焦距 $f=200\ \text{mm}$ ，利用中心光點與第一暗紋之角度計算，可以得到量測與理論值之誤差為 5.3%。



圖十六 (a)單狹縫

(b)單狹縫繞射

$$\text{代入 } \lambda_1 = b \sin \theta \rightarrow \theta = \sin^{-1} \left(\frac{632.8 \text{ nm}}{110 \mu\text{m}} \right) = 0.329^\circ \text{ (理論值)} \quad (1)$$

$$\text{再代 } y \cong f \tan \theta \rightarrow \theta = \tan^{-1} \left(\frac{1090 \mu\text{m}}{200 \text{ mm}} \right) = 0.312^\circ \text{ (量測值)} \quad (2)$$

$$\text{誤差: } \frac{|\text{實驗值} - \text{理論值}|}{\text{理論值}} \times 100\% = \frac{|0.312^\circ - 0.329^\circ|}{0.329^\circ} \times 100\% = 5.3\% \quad (3)$$

五、成本估算

此次實驗除玻璃基板為實際購買外，其餘成本皆為研究室內部支出，因此成本費用採用業界實驗室收費進行估算，如表二所示。

表二 成本清單

名稱	單價/元	數目/片	總價格/元
圓形玻璃基板	15	5	75
玻璃鍍鋁	1000	5	5000
總計	5075 元		

六、參考文獻

1. W. M. Steen and J. Mazumder, *Laser Material Processing* (Springer-Verlag 2010), pp. 131~193.
2. T. V. Duong, A. Dunn, T. J. Wasley, R. W. Kay, J. Stringer, P. J. Smith, C. Connaughton, and J. D. Shephard, "Nanosecond laser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications," *Applied Surface Science* **357**, 248 (2015).
3. R. C. Smith and J. S. Marsh, "Diffraction patterns of simple apertures," *J. Opt.*

七、修課心得

(1)這是我們大學中的最後一堂必修，雖然已經結束了，但我們在這過程中也學到了非常多的東西，像是有關成果的知識，團隊合作之類的等等，但最重要的是最終的成果。

而這次我們做的主要是有關狹縫繞射的實驗，雖然我們在大三的光學實驗就做過單狹縫跟雙狹縫，但這次是更深入的，是有關多邊型的繞射圖案，雖然我們看過論文並知道我們必須要做出甚麼樣的圖型，但在一開始就出現了一些狀況，如繞射圖案不明顯，在 beam profile 上功率過低等問題，但是我們在跟老師和助教們討論後，開始一一解決這些問題，也讓我們明白跟老師討論的重要性，且遇到問題不能埋頭苦幹。

其實我們這次的成果也沒有說做到很完美，仍有一些細節沒有處理好，因此在評審老師問出一些問題時，沒有回答好，但也可以藉由評審老師所指出的點，可以知道我們哪些部分沒有做好，並以後可以針對這部分做出改進。

(2)終端課程不僅僅是作為一樣必修課程而修習，更是作為在光電學系中充實學習四年的最後證明，藉由實際操作驗證了自身所學，並與同儕間相互討論、教學相長，可說期間所學更甚於課堂學習。

雖然研究主題狹縫繞射於操作上稍易於其他組別，且在過去光學實驗中做過單雙狹縫相關之探討，但在幾何狹縫上進行繞射對我們來說是相當新鮮的嘗試，且運用 beam profiler 進行採樣觀察及繞射光分析，也頗具挑戰性。雖然最後成果上不盡人意，無法順利根據論文所提供之公式進行適配，及在成果海報上資訊的缺失，但卻藉由指導教授與評審老師的指教與提問，更加了解自身在認知上的疏失與不足。

(3)這門終端課程在完成這個題目後，算是圓滿的完結了。在開始這堂課時為了要讓我們有基本的操作能力，教我們如何使用 solidWorks、Markingmate 來進行基本操作，為之後的實驗立下基礎。

我們主要是在探討幾何圖形的繞射圖案，而在探討過程中，我們遇上了不少的難題，如一開始的繞射效果不佳，使用 beam profiler 時，繞射圖案不明顯，到如何解決光強度的問題等。而我們再自行尋找解決方法外，也會與老師進行討論，讓我們的實驗進度，不會因為想不出解決方法，而陷入進度落後的情況。

雖然我們決了大部分的問題，但是在一些細節方面並沒有做到很好的了解，以至於在進行發表時，無法給予評審老師最佳的解答，這也讓我們知道在未來做研究時，也需要注意一些細節處。

而最後在本課程中除了學習到上述的事情外，我們也學習到了如何做出一份好的簡報以及成果報告書，其中的細節與注意事項等都是

我們在未來會應用到的地方。

(4)在課程的後半段以實作小專題為主，主題為幾何狹縫的繞射現象觀測，過程中操作雷射加工機，以對鍍鋁玻璃基板加工做出不同形狀的狹縫圖案，利用此方法可快速製造出所想要的圖案，是以雷射加工來說相對方便的，但是狹縫的尺寸需要很小才能達成效果，因此做了許多測試及改良。

透過一開始的金屬表面雕刻和切割的測試讓我們對加工機的性能有一定的理解，讓我們能對不同的參數做調整達到需求，並且透過和組員共同討論提供意見來解決問題。除了本身做的題目外也了解其他組別的題目並互相對加工機的參數交換意見，使我們的成品結果更加完整。

課程最後的有成果展發表展現出我們的成果，透過不同老師的評分讓我們理解到自己所做的有哪裡不足，而我們的海報及對老師的講解是否有確實表現出我們所做的也是重點。經過最後的成果發表展讓我們對於成品有確實的收尾，並非單純做出成品後就放著不管，如何讓別人了解你所做的及是否有做出應有的成果都是很重要的。