

國立臺灣大學工學院機械工程研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



結合像散式輪廓儀高度成像之雷射直寫加工系統

Laser Direct Writing System Combining Height Imaging
with Astigmatic Profilometer

黃暄文

Hsuan-Wen Huang

指導教授：廖先順 博士

Advisor: Hsien-Shun Liao, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July 2023

致謝

兩年碩士班時光轉瞬即逝，過程有挫折也有歡笑，首先必須感謝廖先順教授願意讓我進入實驗室進行研究。老師不僅在實驗上給予我眾多協助，有不懂的部分老師都會親自教導，甚至我中途研究受挫時，幫忙思考更換研究題目，讓我能順利完成論文，著實是碩士研究的路上最大的貴人。

其次我必須感謝實驗室的同學與學長學弟妹們，感謝博班的鎡權、政融、亞康學長對我的研究提出的建議和幫助，才讓我在短時間內完善我的系統架構；感謝前一屆的建源、式新、沂浩、心平、柏魁學長，讓我能短時間內融入實驗室的氛圍，並留下了許多實驗的資料可以參考，讓我在他們的研究基礎上走得更遠；感謝同屆的邑華、守程、俊佑，大家互助互利，平時一起做實驗、改論文，閒暇時一起打牌逛街玩遊戲，開心愉快的度過了兩年的碩士時光；感謝凱彥、起雲、彥瑋、泓升、沛宸等學弟妹的幫忙，讓碩士生活與研究過程變得更加充實順利。

接著必須感謝中研院物理所的精工室，每次都能將我需要的工件準確的製作出來，讓我能迅速且順利地將我的系統架設起來。

最後必須感謝我的家人，他們無條件的支持與鼓勵，讓我能心無旁騖地專心在研究上。還有許多親朋好友礙於篇幅無法一一感謝，只能一言以蔽之，但因為有了大家的幫助，我才能順利完成我的論文。

摘要

雷射直寫加工技術(Laser Direct Writing)具有構造簡單、加工快速、可控性高等優勢，是被廣泛運用在進行微奈米尺度下圖案刻劃和精細加工的重要技術；光學輪廓儀相較於接觸式表面輪廓儀，具有速度快、不會傷害樣品、不需使用耗材等優點，因此被廣泛運用在晶圓檢測和生醫工程等領域。其中像散式輪廓儀可使用市售光學讀取頭作為主要量測元件，不僅成本低、體積小，解析度亦相當優秀，可使用聚焦誤差訊號(Focus Error Signal, FES)與 Z 軸高度位置計算出樣品表面的反射率與高度。現有針對雷射直寫加工系統的加工成果量測，大多使用光學或電子顯微鏡觀察樣品表面影像，鮮少有結合加工與量測的系統可提供即時檢驗。因此本實驗提出一架設在倒立式顯微鏡上，結合雷射直寫加工技術與量測樣品表面結構高度和反射率的系統設計。本系統利用一共振式掃描器帶動讀取頭物鏡產生垂直位移，掃描成像同時以鎖相放大器擷取各像素點之聚焦誤差訊號與振幅大小，透過此振幅與反射率之間的正比關係推算獲得反射率成像，並藉由聚焦誤差訊號平均值與反射率，推算出樣品表面之高度成像。

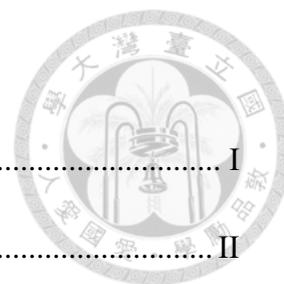
關鍵字：光學輪廓儀、像散式輪廓儀、雷射直寫加工技術、光學讀取頭

Abstract

Laser direct writing technique has advantages of simple configuration, fast processing, and high controllability, which has been widely used in patterning and fine processing at the micro-nano scale. Compared with the contact type surface profilometer, non-contact optical profilometer has advantages of fast measurement, no damage to the sample, and no need to use consumables, so it is widely used in the fields of wafer inspection and biomedical engineering. The astigmatic profilometer can use a commercial optical pickup head as the main measuring element. Optical pickup head has advantages of low cost, small size, and excellent resolution. The reflectivity and height of the sample surface can be calculated by the focus error signal(FES) and the Z-axis height position. Optical and electron microscopes are commonly used to examine the processing results of the laser direct writing. However, very few integrated systems are available for real-time examination. In this thesis, an integrated system between a laser direct writing system and an astigmatic profilometer was proposed based on an inverted microscope, which allows to measure the height and reflectivity of the surface structure of the sample. This system equips a resonant scanner to oscillate the pickup head objective lens in vertical direction, and uses a lock-in amplifier to capture the FES and amplitude at each image pixel. Due to the proportional relationship between the amplitude and reflectivity, reflectivity image can be calculated from the FES amplitude. Moreover, by using the average value of the FES and the reflectivity, the height image of the sample surface can also be calculated.

Keywords: optical profilometer, astigmatic profilometer, laser direct writing, optical pickup head

目錄

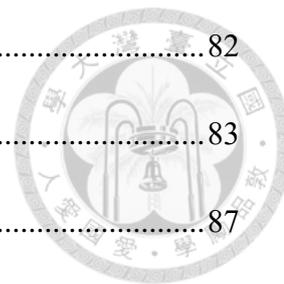


致謝.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XIII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻探討.....	2
1.2.1 雷射直寫加工技術.....	2
1.2.2 雷射直寫圖案化技術.....	4
1.2.3 接觸式表面輪廓儀.....	7
1.2.4 非接觸式表面輪廓儀.....	10
1.2.5 像散式光學輪廓儀.....	13
1.3 研究目的.....	18
1.4 內容簡介.....	19
第二章 實驗原理.....	20
2.1 雷射加工原理與參數.....	20
2.1.1 材料吸收率或反射率.....	20
2.1.2 脈衝寬度.....	21
2.1.3 雷射功率.....	21
2.1.4 雷射模態.....	21



2.1.5 光斑重疊性.....	22
2.1.6 雷射聚焦位置.....	23
2.2 像散式光學輪廓儀原理.....	24
第三章 系統架構與實驗流程.....	26
3.1 整體系統架構.....	26
3.2 像散式輪廓儀系統.....	26
3.2.1 商用紅光 DVD 讀取頭和共振掃描器	27
3.2.2 讀取頭放大電路.....	28
3.3 雷射直寫加工系統.....	29
3.3.1 綠光 532 nm 脈衝雷射.....	30
3.3.2 XYZ 壓電平台	31
3.4 控制系統.....	32
3.4.1 控制板.....	32
3.4.2 鎖相放大器.....	33
3.5 實驗流程.....	34
3.5.1 單點 S-curve 量測實驗	34
3.5.2 雷射加工掃描實驗.....	36
第四章 實驗結果與分析.....	40
4.1 系統掃描範圍.....	40
4.2 單點 S-curve 量測實驗	42
4.2.1 數據分析.....	45
4.3 雷射加工參數分析.....	53
4.4 雷射加工掃描實驗.....	66
4.4.1 實驗結果.....	66
4.4.2 數據分析.....	68

第五章 結論與未來展望.....	82
參考文獻.....	83
附錄.....	87
附錄 A 紅光 DVD 讀取頭規格表	87
附錄 B 共振掃描器壓電塊規格表.....	88
附錄 C 讀取頭放大電路規格表.....	89
附錄 D 脈衝雷射規格表.....	90
附錄 E 壓電平台與控制器	91
附錄 F R2L2S1P1 規格表.....	92



圖目錄



圖 1.1 Kawata 等人製造的公牛模型，(a)和(b)代表不同加工路徑 [9]。.....	3
圖 1.2 (a)Hao 等人實驗流程示意圖及(b)成果 CCD 影像 [10]。.....	3
圖 1.3 (a)未處理和(b)經雷射退火之 ITO 沉積薄膜的蝕刻線條 CCD 影像圖，以 及(c)光穿透率與(d)薄膜電阻值與雷射退火強度關係圖 [11]。.....	4
圖 1.4 電子顯微鏡觀察到 TCO 薄膜上之雷射直寫刻痕 [12]。.....	5
圖 1.5 (a)不同雷射功率與掃描次數對微流道深度關係圖，及(b)在 30 mW 功率下 以 0.25 mm/s 速度進行不同次數掃描的成果 SEM 影像 [13]。.....	5
圖 1.6 (a)Chen 等人系統架構圖與(b)電壓電流與加工時間之關係圖 [14]。.....	6
圖 1.7 微流道 BGWs 監測示意圖 [15]。.....	7
圖 1.8 探針式輪廓儀示意圖 [16]。.....	8
圖 1.9 探針式輪廓儀量測值(虛線)與樣品形貌(實線)之誤差示意圖 [16]。.....	8
圖 1.10 探針針尖和樣品表面的距離與交互作用力之關係圖 [17]。.....	9
圖 1.11 AFM 簡易架構圖 [17]。.....	9
圖 1.12 Mirau 白光干涉儀架構示意圖 [25]。.....	10
圖 1.13 (a)光程差與亮度示意圖(b)白光干涉儀高度量測示意圖 [26]。.....	11
圖 1.14 條紋投影法示意圖 [23]。.....	12
圖 1.15 共軛焦顯微術架構示意圖 [24]。.....	13
圖 1.16 Ehrmann 等人所研發之光學輪廓儀架構圖 [33]。.....	14
圖 1.17 雙功能表面輪廓儀(a)架構圖(b)AFM 模式(c)光學輪廓儀模式 [34]。.....	15
圖 1.18 相同反射率樣品之(a)高度與位置關係圖和(b)對應的 S-curve，以及不同 反射率樣品之(c)高度與位置關係圖和(d)對應的 S-curve [35]。圖中 $UFES =$ $VFES$ 。.....	16
圖 1.19 (a)掃描軌跡示意圖(b)樣品高度換算示意圖 [35]。.....	16
圖 1.20 共振物鏡掃描器(a)結構示意圖(b)撓性機構尺寸圖 [36]。.....	17

圖 1.21 掃描 R2L2S1N1 之即時反射率(a)影像圖及(b)截面圖 [37]。	18
圖 2.1 不同材料對不同雷射光波長之吸收率關係圖 [39]。	20
圖 2.2 各種雷射模態示意圖 [38]。	22
圖 2.3 光斑重疊性示意圖。	22
圖 2.4 對 1018 低碳鋼不同焦距和聚焦位置與雷射穿透深度之關係圖 [40]。	23
圖 2.5 像散原理示意圖。	24
圖 2.6 像散式光學輪廓儀光路示意圖。	25
圖 2.7 FES 與樣品表面 Z 軸位移之關係圖。	25
圖 3.1 本研究整體系統架構圖。	26
圖 3.2 像散式輪廓儀系統實體圖。	27
圖 3.3 紅光 DVD 讀取頭。	27
圖 3.4 共振掃描器。	28
圖 3.5 讀取頭放大電路。	29
圖 3.6 雷射直寫加工系統實體圖。	29
圖 3.7 (a)脈衝雷射與控制器(b)正面和(c)反面實體圖。	30
圖 3.8 三軸壓電平台。	31
圖 3.9 壓電平台控制器。	32
圖 3.10 sbRIO-9637 控制板。	33
圖 3.11 SR830 鎖相放大器。	33
圖 3.12 單點 S-curve 量測實驗流程圖。	35
圖 3.13 不同反射率之樣品 S-curve 示意圖。	36
圖 3.14 雷射加工掃描實驗流程圖。	38
圖 3.15 (a)不同高度和反射率的樣品之 FES，和共振掃描器開啟時的(b)FES 以及 (c)鎖相放大器輸出振幅示意圖。	39
圖 4.1 R2L2S1P1 測試片的局部條紋 CCD 影像。	40

圖 4.2 R2L2S1P1 測試片(a)由上往下掃描和(b)由下往上掃描的 FES 成像。.....	41
圖 4.3 雷射沿掃描範圍邊界和對角線進行加工後的 CCD 影像。.....	41
圖 4.4 已知反射率樣品實體圖。.....	42
圖 4.5 鍍金層厚度分別為 10 nm(上)、50 nm(左下)、100 nm(右下)的鍍金玻片。	43
圖 4.6 規格反射率為(a)5%、(b)40%、(c)60%、(d)80%的青板玻璃，與 (e)RR6070、(f) R2L2S1P1 鍍鉻層，以及(g)10 nm、(h) 50 nm 和(i) 100 nm 鍍 金玻片之 S-curve 關係圖。.....	45
圖 4.7 規格反射率為(a)5%、(b)40%、(c)60%、(d)80%的青板玻璃，與 (e)RR6070、(f) R2L2S1P1 鍍鉻層，以及(g)10 nm、(h) 50 nm 和(i) 100 nm 鍍 金玻片之 S-curve 與線性擬合直線圖。.....	49
圖 4.8 規格反射率對 FES 峰對峰值關係圖。.....	50
圖 4.9 規格反射率對線性區間斜率絕對值關係圖。.....	50
圖 4.10 廠商實測反射率對 FES 峰對峰值關係圖。.....	51
圖 4.11 廠商實測反射率對線性區間斜率絕對值關係圖。.....	51
圖 4.12 設定脈衝頻率 1000 Hz、光圈設定值 0%的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅 光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	53
圖 4.13 設定脈衝頻率 1000 Hz、光圈設定值 10%的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅 光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	54
圖 4.14 設定脈衝頻率 1000 Hz、光圈設定值 30%的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅 光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	54
圖 4.15 設定脈衝頻率 1000 Hz、光圈設定值 50%的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅 光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	55
圖 4.16 設定脈衝頻率 2000 Hz、光圈設定值 0%的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅 光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	55

圖 4.17 設定脈衝頻率 2000 Hz、光圈設定值 10%的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	56
圖 4.18 設定脈衝頻率 2000 Hz、光圈設定值 30%的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	56
圖 4.19 設定脈衝頻率 2000 Hz、光圈設定值 50%的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	57
圖 4.20 雷射加工殘影產生原因示意圖。.....	58
圖 4.21 設定脈衝頻率 2000 Hz、加工時長 1 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	58
圖 4.22 設定脈衝頻率 2000 Hz、加工時長 3 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	59
圖 4.23 設定脈衝頻率 2000 Hz、加工時長 5 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	59
圖 4.24 設定脈衝頻率 1000 Hz、加工時長 1 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	60
圖 4.25 設定脈衝頻率 1000 Hz、加工時長 3 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	60
圖 4.26 設定脈衝頻率 1000 Hz、加工時長 5 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	61
圖 4.27 設定脈衝頻率 500 Hz、加工時長 1 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	61
圖 4.28 設定脈衝頻率 500 Hz、加工時長 3 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	62
圖 4.29 設定脈衝頻率 500 Hz、加工時長 5 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	62

圖 4.30 設定脈衝頻率 100 Hz、加工時長 1 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	63
圖 4.31 設定脈衝頻率 100 Hz、加工時長 3 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	63
圖 4.32 設定脈衝頻率 100 Hz、加工時長 5 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。.....	64
圖 4.33 光圈設定值與實際功率衰減比例圖。.....	65
圖 4.34 雷射加工路徑示意圖。.....	66
圖 4.35 10 nm 鍍金玻片加工後之(a)CCD 影像與(b)鎖相放大器振幅成像圖。...	67
圖 4.36 50 nm 鍍金玻片加工後之(a)CCD 影像與(b)鎖相放大器振幅成像圖。...	68
圖 4.37 100 nm 鍍金玻片加工後之(a)CCD 影像與(b)鎖相放大器振幅成像圖。...	68
圖 4.38 10 nm 鍍金玻片加工後之反射率成像圖。.....	69
圖 4.39 50 nm 鍍金玻片加工後之反射率成像圖。.....	70
圖 4.40 100 nm 鍍金玻片加工後之反射率成像與截面圖。.....	71
圖 4.41 各像素點截取之 FES 資訊示意圖。.....	72
圖 4.42 鍍層 10 nm 之鍍金玻片(a)擷取 FES 平均值成像與(b)兩標記像素點之擷取 FES 資訊。.....	73
圖 4.43 鍍層 50 nm 之鍍金玻片(a)擷取 FES 平均值成像與(b)兩標記像素點之擷取 FES 資訊。.....	73
圖 4.44 鍍層 100 nm 之鍍金玻片(a)擷取 FES 平均值成像與(b)兩標記像素點之擷取 FES 資訊。.....	73
圖 4.45 10 nm 鍍金玻片加工後之高度成像與截面圖。.....	74
圖 4.46 50 nm 鍍金玻片加工後之高度成像與截面圖。.....	75
圖 4.47 100 nm 鍍金玻片加工後之高度成像與截面圖。.....	76
圖 4.48 10 nm 厚鍍金玻片(a)在焦點附近之 FES 雜訊與(b)共振狀態下之 FES。...	77

圖 4.49 自製低通濾波器(a)電路示意圖與(b)波德圖。	78
圖 4.50 新讀取頭之廠商實測反射率與線性區間斜率絕對值關係圖。	79
圖 4.51 新讀取頭量測之 10 nm 鍍金玻片加工後之(a)反射率成像和(b)高度成像與 兩者之截面圖。	80
圖 4.52 新讀取頭量測之 50 nm 鍍金玻片加工後之(a)反射率成像和(b)高度成像與 兩者之截面圖。	80
圖 4.53 新讀取頭量測之 100 nm 鍍金玻片加工後之(a)反射率成像和(b)高度成像 與兩者之截面圖。	81



表目錄

表 1 已知反射率樣品規格表。.....	42
表 2 反射率回歸式相關係數整理。.....	52
表 3 各樣品 FES 斜率與廠商實測反射率和推算反射率整理。.....	52
表 4 雷射加工參數與加工點大小及加工功率整理。.....	57
表 5 畫線測試之加工時長換算壓電平台移動線速度整理。.....	64
表 6 雷射加工參數與平均加工功率和加工線寬整理。.....	65
表 7 鎖相放大器振幅值與共振掃描器位移整理。.....	67
表 8 掃描成像反射率與線性擬合反射率比較。.....	72
表 9 掃描成像高度與理論鍍層厚度數據整理。.....	77
表 10 新讀取頭量測之各樣品 S-curve 線性區間斜率與反射率整理。.....	79
表 11 新讀取頭量測之雷射加工掃描實驗反射率整理。.....	81
表 12 新讀取頭量測之雷射加工掃描實驗高度整理。.....	81



第一章 緒論



1.1 研究背景

隨著科技發展日新月異，業界對於工件的尺寸要求逐漸縮小，精密工業的需求隨之而生。特別是國內的機械與半導體產業以製造高精度、高附加價值的產品為目標，許多傳統加工技術無法達成的精度和尺寸都須仰賴非傳統加工的技术來完成，雷射加工技術便是其中之一。雷射加工為非接觸型加工，沒有刀具磨耗的問題，同時具有快速、高精度、熱效應小、對環境污染小等諸多優點，而雷射直寫圖案化技術相較於半導體業常用的傳統蝕刻技術，減低了濕式蝕刻中的化學性汙染與生產設備的重量，並增加了生產速度，逐漸被廣泛應用在材料表面的刻畫紋理、切削加工與圖案化製程中 [1], [2]。

為驗證各種精密加工的可靠度，精密量測的技術也越來越重要。表面輪廓儀作為精密量測的工具之一，主要用途為測量各種物體表面之形貌或粗糙度，在半導體產業、生醫工程、光電工程等諸多領域均有廣泛應用。現今所使用的表面輪廓儀有許多種，大致可分為接觸式與非接觸式兩類。接觸式表面輪廓儀是利用小型探針接觸掃描物品表面 [3]，其優點為量測不受表面光學或導電性質影響、解析度可達奈米等級等，缺點是因量測時針尖需接觸樣品，樣品硬度和表面交互作用力大小等物理性質會影響測量結果。非接觸式表面輪廓儀是利用光學原理進行量測，量測較接觸式表面輪廓儀快速，且不會傷害到樣品，但解析度會受限於光繞射現象，通常僅有微米等級，且易受到表面光學性質影響 [4]。

本研究所使用之像散式光學輪廓儀是一種非接觸式表面輪廓儀，具有快速、不損傷樣品等優勢，且使用市售 Digital Video Disc (DVD)讀取頭作為主要量測元件，在保有高解析度的同時大幅降低建構整體光路的價格，此外 DVD 讀取頭的訊號頻寬最高可達 100 MHz，可以偵測元件高頻的震動或機械運動 [5]。

1.2 文獻探討

以下將針對雷射直寫加工技術和雷射直寫圖案化技術，以及接觸式與非接觸式表面輪廓儀、像散式光學輪廓儀進行更進一步的文獻探討。



1.2.1 雷射直寫加工技術

雷射(Laser)，全稱為 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation，是藉由激發放射而產生光放大現象的一種裝置。雷射光為人工光源，相較於一般自然光具有單色性 (Monochromaticity)、指向性 (Directionality)、同調性 (Coherence)、高能量強度等特性。自 1960 年 T. H. Maiman 製作出世上第一個紅寶石雷射開始 [6]，雷射被廣泛應用到電子、機械、材料和醫學等領域，如表面處理、精密加工、定位測量、光碟讀取等。

雷射直寫加工技術是利用雷射的熱效應以高能量將物品表面材料去除，或是聚焦於物件改變其材料成型或性質的加工過程。歷年來利用雷射直寫加工進行的研究相當多元，一般常見被用於切割、3D 微結構成形、表面蝕刻、材料改質等加工上 [7]-[8]。加法製造方面，2001 年，Satoshi Kawata 等人利用雷射直寫加工進行 3D 列印的研究，如圖 1.1 所示。透過程式控制雷射焦點位置，將光點聚焦在光阻劑特定位置使其固化，掃描進行 3D 結構的成形，並探討了掃描路徑不同產生的結果 [9]。而在減法製造加工上，2012 年，Hao Fatt Teoh 等人利用雷射直寫技術使氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)塗層轉變為還原石墨烯(reduced-GO, rGO)，再經由超音波處理去除材料，並重複步驟製作出多層次的蝕刻圖案，如圖 1.2 所示 [10]。

材料性質改變的研究，如 Wonsuk Chung 等人於 2004 年時使用雷射退火技術，對氧化銻錫(Indium Tin Oxide, ITO)薄膜進行處理，有效降低蝕刻時的邊緣粗糙度，並且改變其電性和光穿透率等性質，如圖 1.3 所示 [11]。

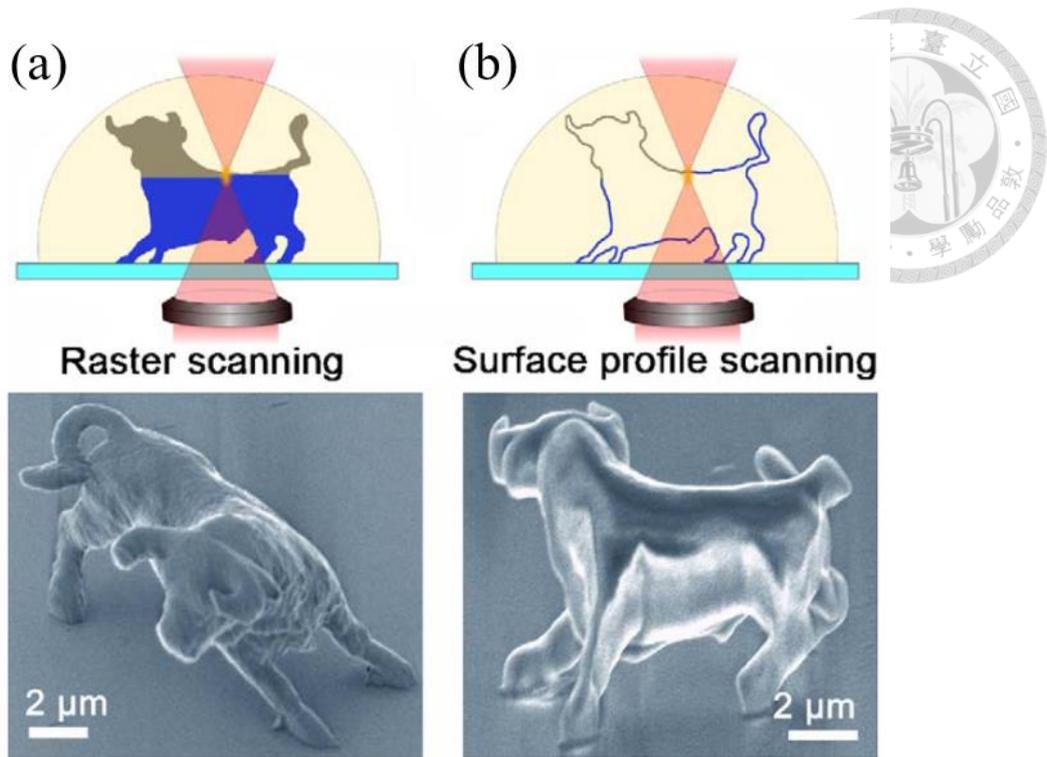


圖 1.1 Kawata 等人製造的公牛模型，(a)和(b)代表不同加工路徑 [9]。

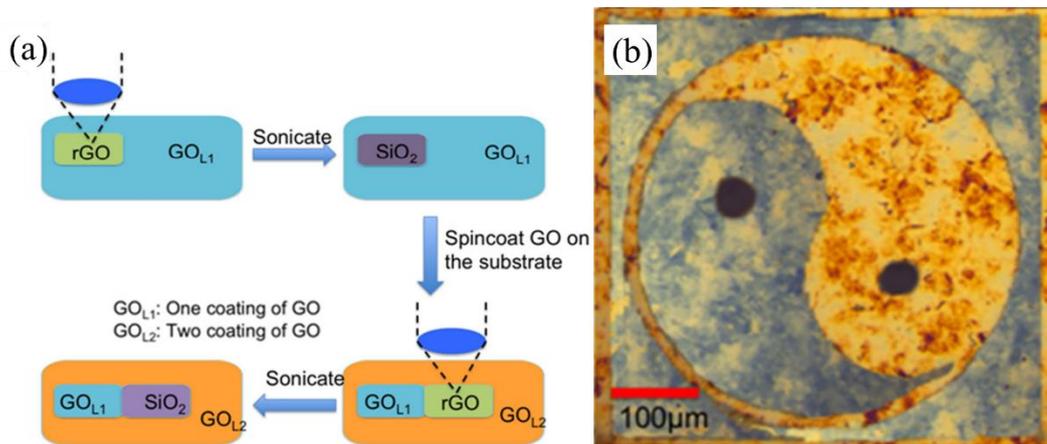


圖 1.2 (a)Hao 等人實驗流程示意圖及(b)成果 CCD 影像 [10]。

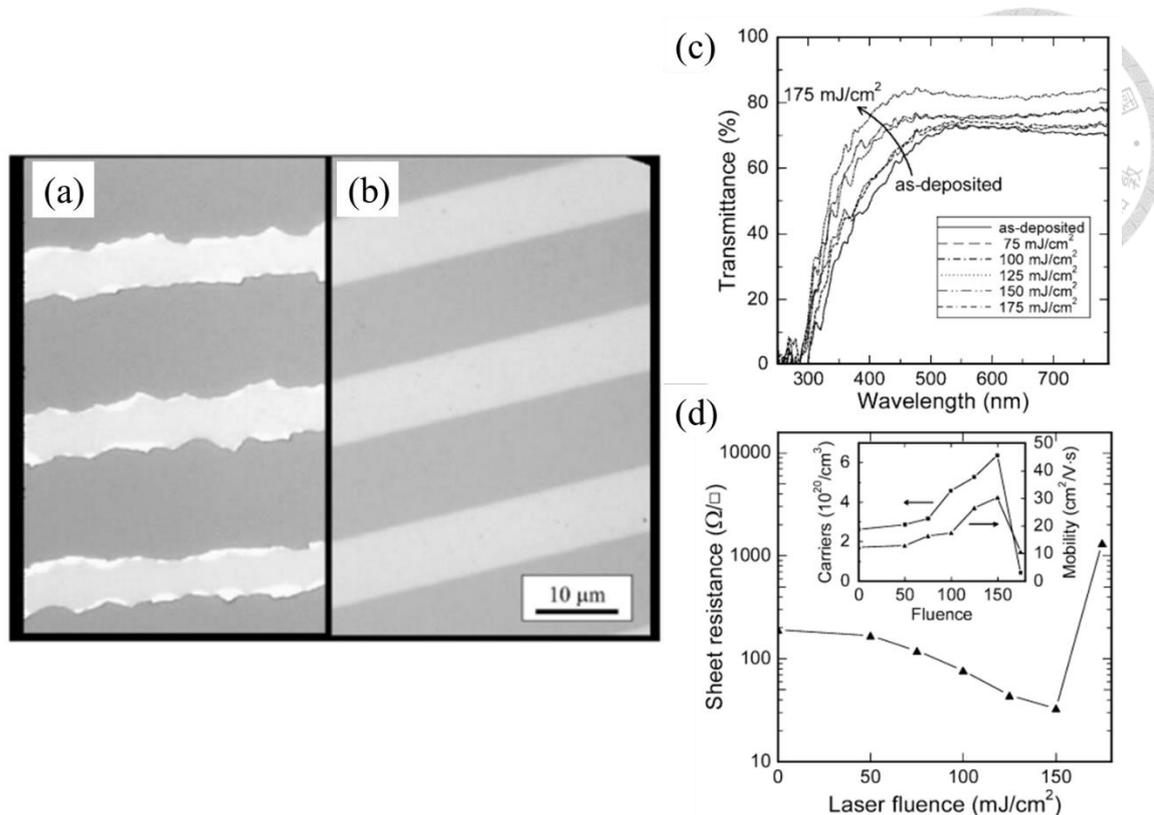


圖 1.3 (a)未處理和(b)經雷射退火之 ITO 沉積薄膜的蝕刻線條 CCD 影像圖，以及(c)光穿透率與(d)薄膜電阻值與雷射退火強度關係圖 [11]。

1.2.2 雷射直寫圖案化技術

雷射直寫圖案化技術(Laser Direct Write Patterning)是將雷射光束直接聚焦於加工物品表面，移除不需要的材料或改變材料性質，把想要的圖案轉印到目標物表面上。此技術並不需要傳統蝕刻的曝光、顯影等步驟，節省了加工所需的時間和設備重量，目前多被用於物件表面的紋理、圖案刻劃。

近來雷射直寫圖案化技術被應用在各種材料表面製程，如薄膜上的電極製作，或微流道的精細加工等，再配合不同的檢測方式，得知加工成品樣貌或效果是否達到要求。

2007 年，Ming-Fei Chen 等人將雷射直寫技術應用在刻劃透明導電薄膜(Transparent Conductive Oxide, TCO)上，並使用電子顯微鏡觀察，如圖 1.4 所示 [12]。

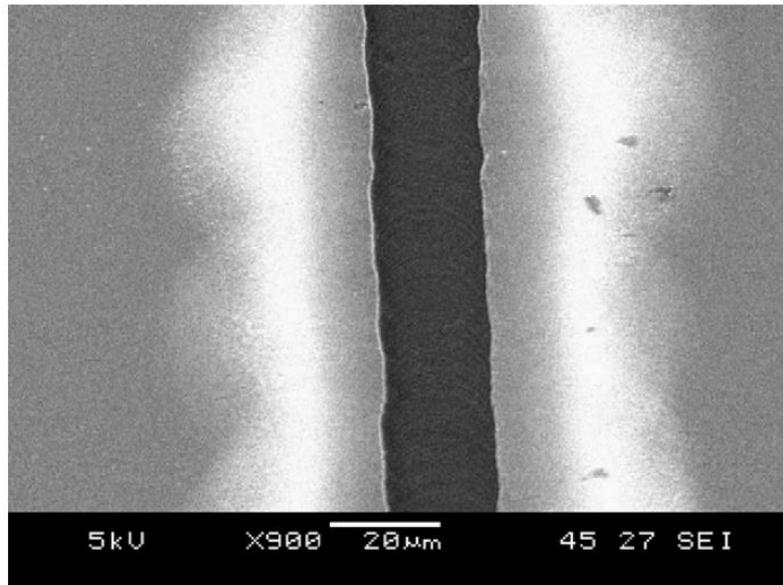


Fig. 3. SEM photograph of the laser direct writing on TCO thin film by THG Nd: YAG laser with a 10 mm/s feeding speed and 5 kHz pulse repetition rate.

圖 1.4 電子顯微鏡觀察到 TCO 薄膜上之雷射直寫刻痕 [12]。

2009 年，Ming-Feng Li 等人透過 1 kHz 的飛秒雷射在玻片上製作出具有高深寬比的微流道，並藉由 SEM 影像針對不同雷射功率或掃描次數的結果進行討論，如圖 1.5 所示，可以應用在微奈米尺度元件的製作 [13]。

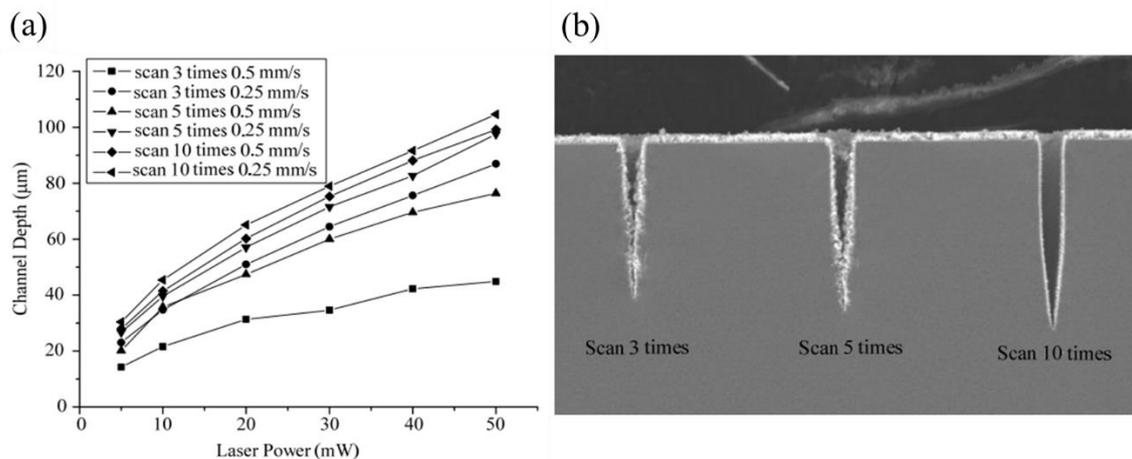


圖 1.5 (a)不同雷射功率與掃描次數對微流道深度關係圖，及(b)在 30 mW 功率下以 0.25 mm/s 速度進行不同次數掃描的成果 SEM 影像 [13]。

2014 年，Hao-Yan Chen 等人利用飛秒雷射直寫加工 GO 薄膜，同時透過 CCD 觀察加工狀況，使其能在常溫大氣條件下還原成均勻的 rGO 層，並針對不同加工時間的成果量測電壓和電流曲線，結果如圖 1.6 所示，對基於石墨烯的微電路製造和設計有很大的幫助 [14]。

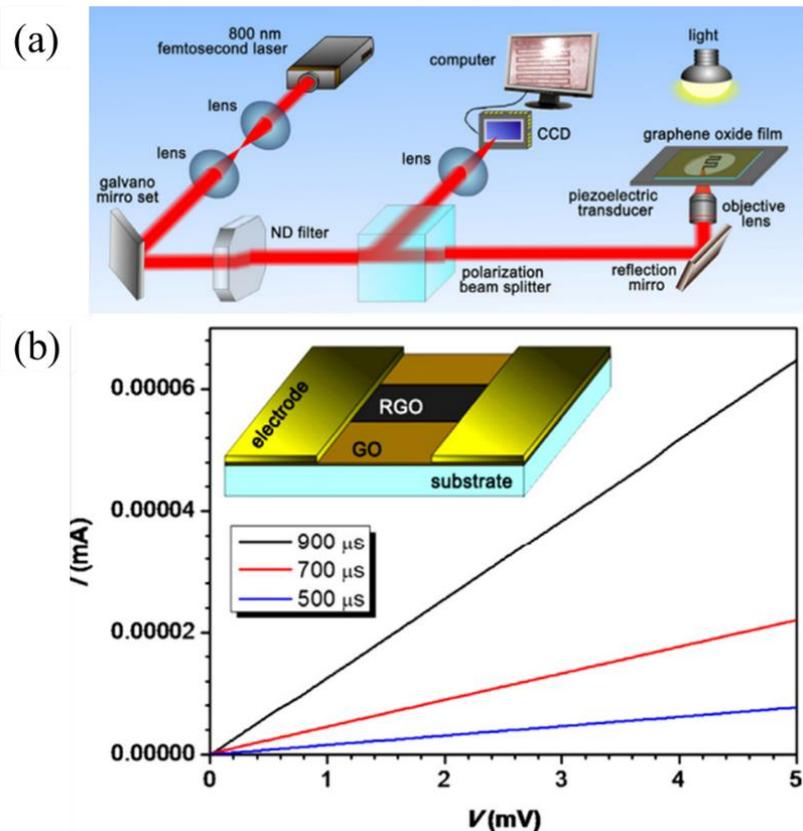


圖 1.6 (a)Chen 等人系統架構圖與(b)電壓電流與加工時間之關係圖 [14]。

2017 年，J.M. Maia 等人則透過雷射直寫技術進行微流道加工，並透過布拉格光柵(Bragg Grating Waveguides, BGWs)配合感光耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)監測其蝕刻過程。藉由 BGWs 反射波長和強度變化，進而仔細控制 BGWs 和微流體通道之間的距離，如圖 1.7 所示 [15]。

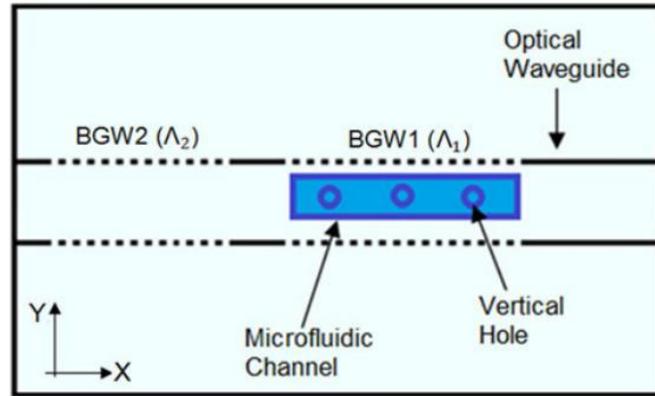


圖 1.7 微流道 BGWs 監測示意圖 [15]。

1.2.3 接觸式表面輪廓儀

現今較常見的接觸式表面輪廓儀有探針式輪廓儀(Stylus Profiler)和原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy, AFM)。

探針式輪廓儀是利用探針的針尖接觸樣品表面進行掃描，藉此獲得樣品表面形貌。以圖 1.8 的系統為例 [16]，透過差動可變位移器(Linear Variable Differentiable Transformer, LVDT)將量測到的探針懸臂之偏移量轉換為樣品表面高度訊號。探針式輪廓儀的量測方法簡單，且不受樣品表面的光電性質影響，但其量測結果會受到探針針尖之半徑大小和探針量測角度等因素影響而產生誤差，如圖 1.9 所示 [16]。

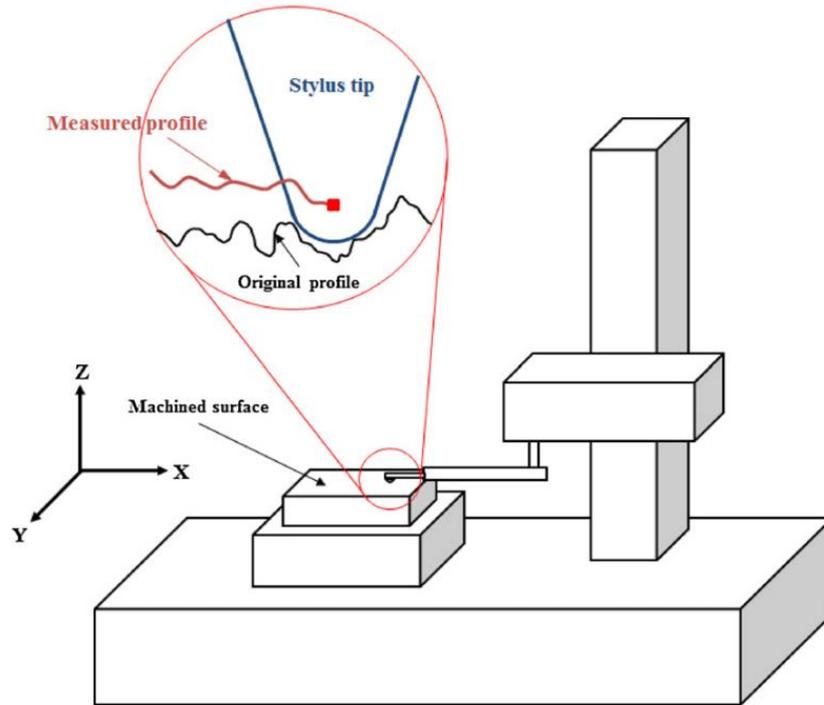


圖 1.8 探針式輪廓儀示意圖 [16]。

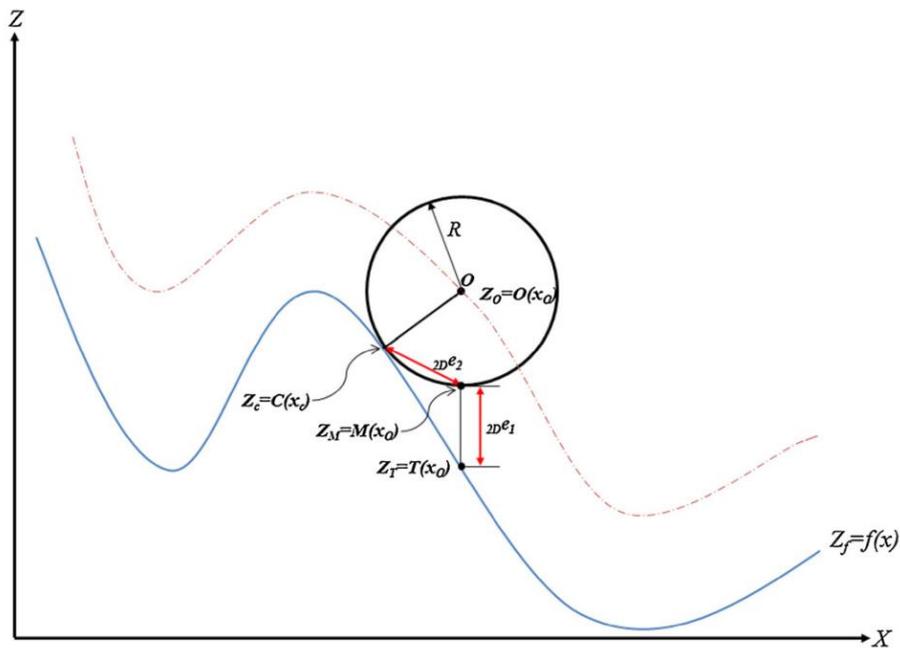


圖 1.9 探針式輪廓儀量測值(虛線)與樣品形貌(實線)之誤差示意圖 [16]。

原子力顯微鏡是利用一微小的探針，在針尖極接近樣品表面的狀態進行掃描，此時探針針尖與樣品表面之間會受到交互作用力影響，其關係圖如圖 1.10 所示 [17]。使用一雷射光束照射在探針懸臂，再用一光電位置感測器(Position

Sensitive Detector, PSD)接收反射光，藉由量測探針因交互作用力產生的偏折所對應之 PSD 訊號，經轉換後即可獲得樣品表面形貌 [17]。因其解析度可達奈米等級，且可額外量測摩擦力、靜電力等物理性質，應用範圍相當廣泛，基本結構如圖 1.11 所示。

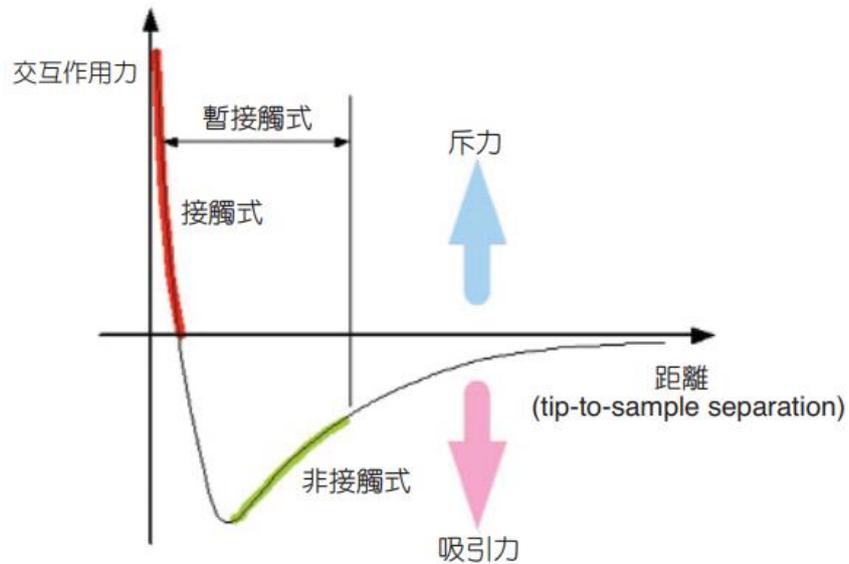


圖 1.10 探針針尖和樣品表面的距離與交互作用力之關係圖 [17]。

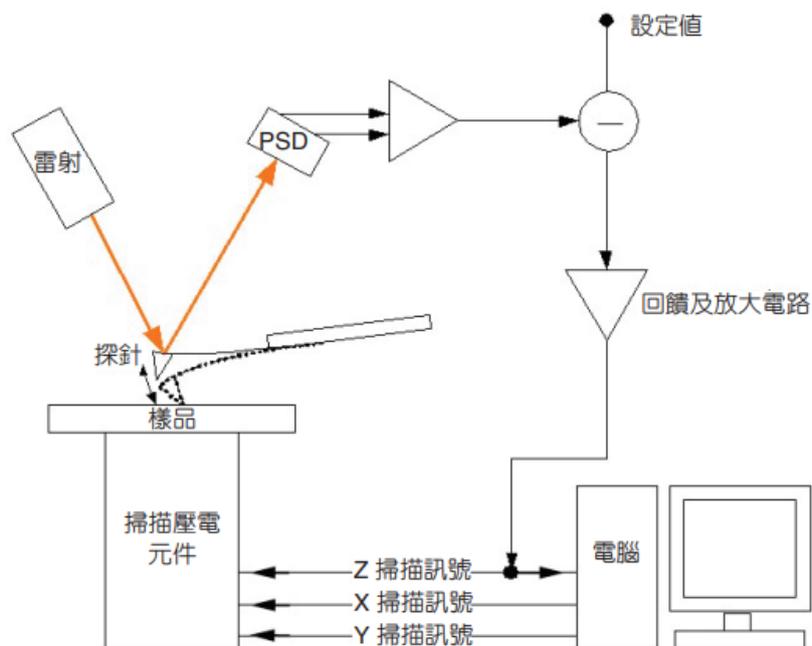


圖 1.11 AFM 簡易架構圖 [17]。

1.2.4 非接觸式表面輪廓儀

非接觸式表面輪廓儀主要利用光學原理進行量測，在量測時不會傷害樣品表面，因此成為量測應用的主要方法 [18] - [20]。常見的非接觸式表面輪廓儀依據使用的光學原理不同，可以大致分為干涉式 [21], [22]、投影式 [23]、聚焦光點掃描式 [24]三種。

干涉式輪廓儀是利用兩道光產生干涉，利用干涉的光程差達到量測表面輪廓的目的。以圖 1.12 的 Mirau 白光干涉儀為例 [25]，利用分光鏡(Beamsplitter)將經過顯微鏡聚焦物鏡(Microscope Objective)的光源分成圖中光程 1 和光程 2 兩束，分別聚焦於參考面(Reference)和樣品面(Sample)。當兩束光之間的光程差為零時，亮度會有極大值，如圖 1.13 (a)所示，透過量測樣品表面各點亮度最大值的位置，即可得知樣品表面形貌如圖 1.13 (b)所示 [26]。

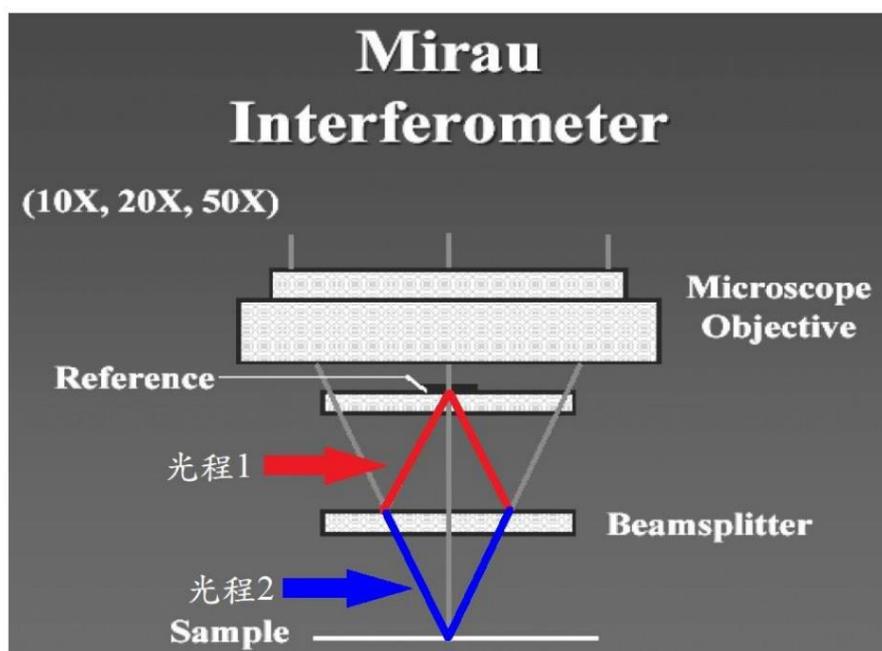


圖 1.12 Mirau 白光干涉儀架構示意圖 [25]。

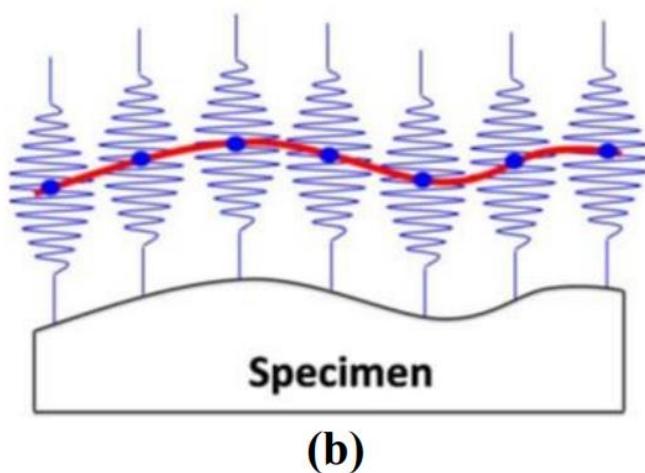
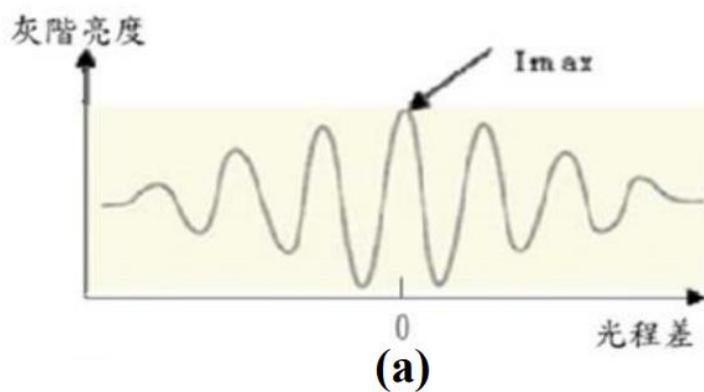


圖 1.13 (a)光程差與亮度示意圖(b)白光干涉儀高度量測示意圖 [26]。

投影式輪廓儀主要有條紋投影法輪廓儀、光學投影儀等。圖 1.14 為條紋投影法輪廓儀示意圖 [23]，利用準直鏡將點光源轉成平行光，再經過光柵和一凸透鏡後投射在樣品表面上。投影的條紋會因樣品表面起伏而產生扭曲變形，透過此變形與表面形貌的關係，便可回推樣品表面實際樣貌。

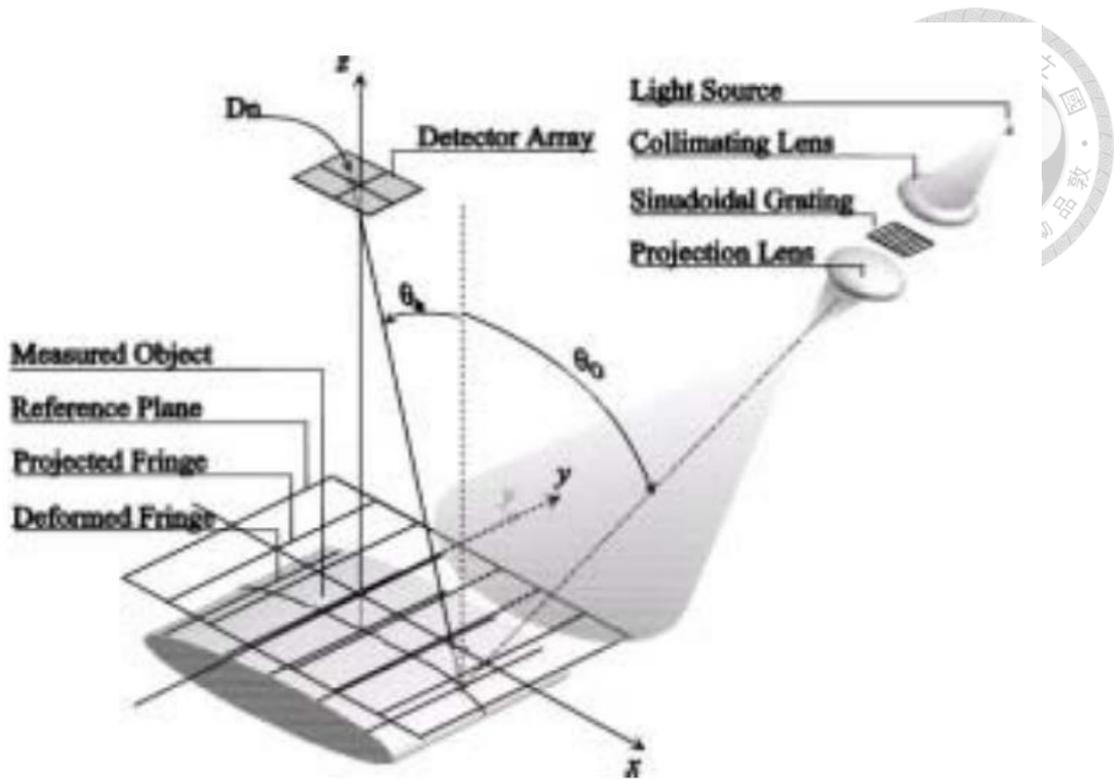


圖 1.14 條紋投影法示意圖 [23]。

聚焦光點掃描式輪廓儀則有共軛焦顯微術(Confocal Microscopy) [24]，如圖 1.15 的架構所示，透過將一小孔置於物鏡焦點位置，阻擋其餘非聚焦平面的光源，使光電感測器僅接收來自聚焦平面(Focal plane)的光。藉由量測感測器所收到各點光強度最大值的高度位置，便可得知樣品表面形貌。

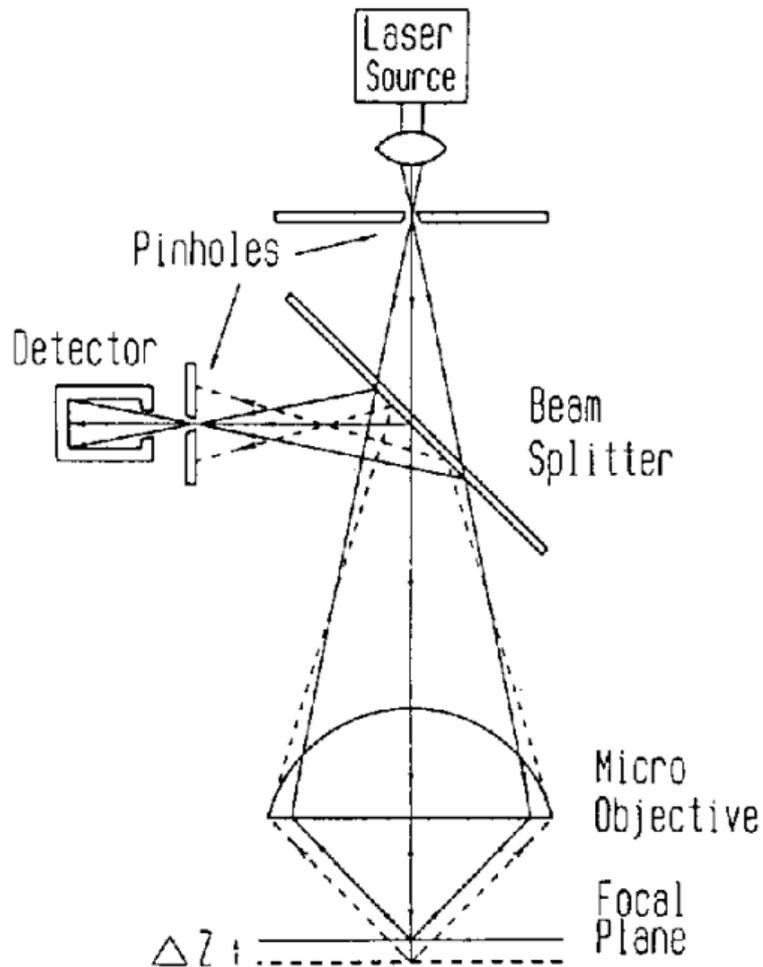


圖 1.15 共軛焦顯微術架構示意圖 [24]。

1.2.5 像散式光學輪廓儀

本研究所使用之像散式輪廓儀為非接觸式表面輪廓儀的一種，其原理會於第二章進行詳細說明。如今 DVD 讀取頭設計大多使用像散式原理，其技術已相當成熟，且價格相對便宜，因此許多研究人員都使用 DVD 讀取頭作為感測器來架構精密量測系統 [27][28][29][30][31] - [32]。

1998 年，Ehrmann 等人製作出以像散式光學讀取頭為主體的光學輪廓儀，如圖 1.16 所示 [33]。利用雷射聚焦位置和樣品表面之間距離所產生的聚焦誤差訊號(Focus Error Signal, FES)來量測樣品。當焦點很接近樣品表面時，FES 訊號與樣品高度呈線性關係，因此可以將訊號轉換為樣品表面的高度。

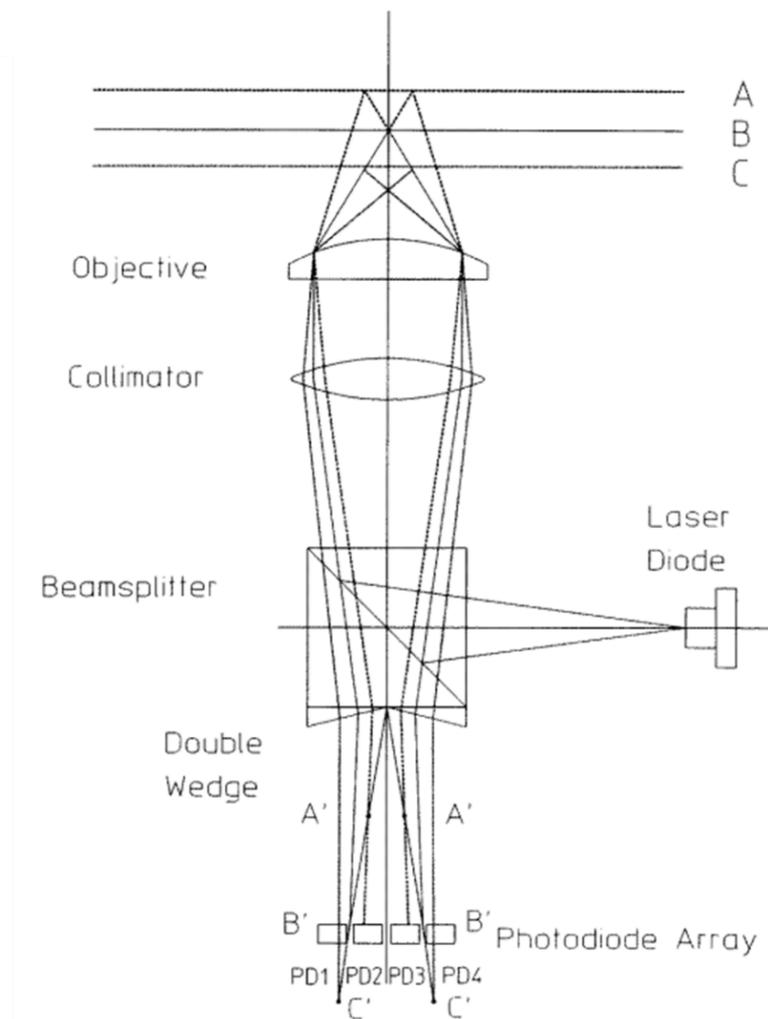


圖 1.16 Ehrmann 等人所研發之光學輪廓儀架構圖 [33]。

En-Te Hwu 等人於 2009 年時進一步將 DVD 讀取頭與原子力顯微鏡結合，研發出一套雙功能的表面輪廓儀，其架構如圖 1.17 所示 [34]。系統主要光路使用 DVD 讀取頭，使用讀取頭本身的雷射作為光源，並以讀取頭內部的 PSD 作為感測元件。在 AFM 模式下，透過外部顯微鏡的 CCD 影像確認 DVD 讀取頭的雷射光源確實聚焦在探針上，藉由量測探針偏折時產生的 FES 訊號變化來獲取樣品表面高度。在光學輪廓儀模式下，則直接將 DVD 讀取頭的雷射聚焦在樣品表面，透過 FES 訊號來量測表面高度變化。

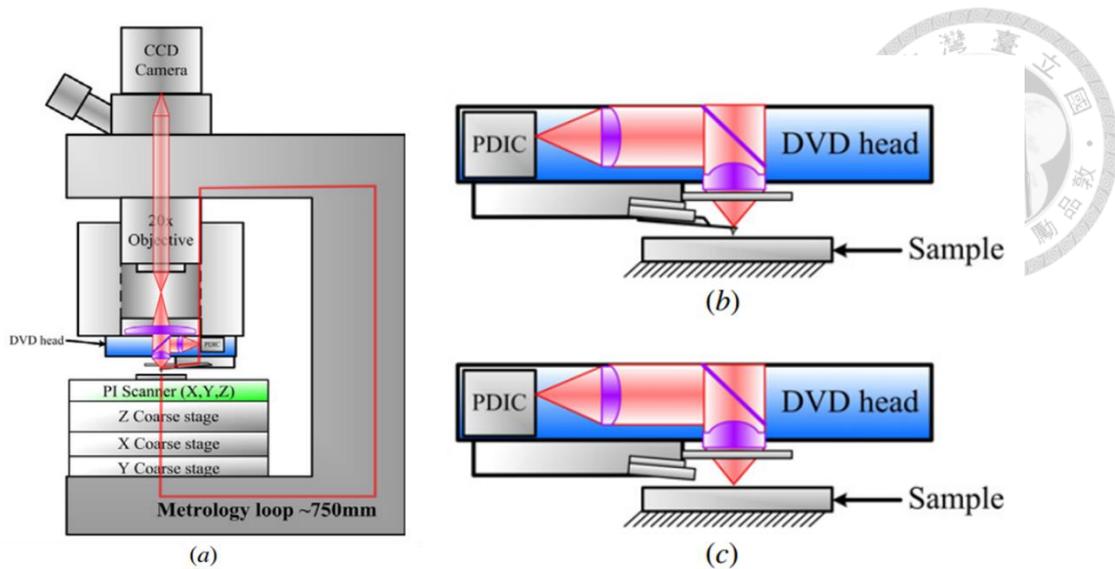


圖 1.17 雙功能表面輪廓儀(a)架構圖(b)AFM 模式(c)光學輪廓儀模式 [34]。

為解決像散式光學輪廓儀對複合材料平面的量測問題，Liao 等人於 2018 年提出了定量高度量測方法 [35]。此研究透過將 FES 訊號對樣品表面 Z 軸高度作圖，得到一 S 形曲線(S-curve)。當雷射光源聚焦在樣品表面時，其接收訊號 $V_{FES} = 0$ ，且在焦點位置附近之 V_{FES} 與高度呈線性關係，利用此特性便可得知樣品表面高度，如圖 1.18 (a)(b)所示。但 S-curve 的線性區間斜率與樣品反射率有關，若量測複合材料樣品會產生失真，如圖 1.18 (c)(d)所示。

Liao 等人提出的定量高度量測方法為在進行 XY 掃描時，在每一像素點位置皆做一次對 Z 軸高度的掃描，如所示。如此一來便可得到各點完整的 S-curve 曲線。藉由找到每個像素點的 S-curve 線性區間中 $V_{FES} = 0$ 的位置，便可得知此處樣本的實際高度位置，還原樣品真實表面形貌，如圖 1.19 所示。

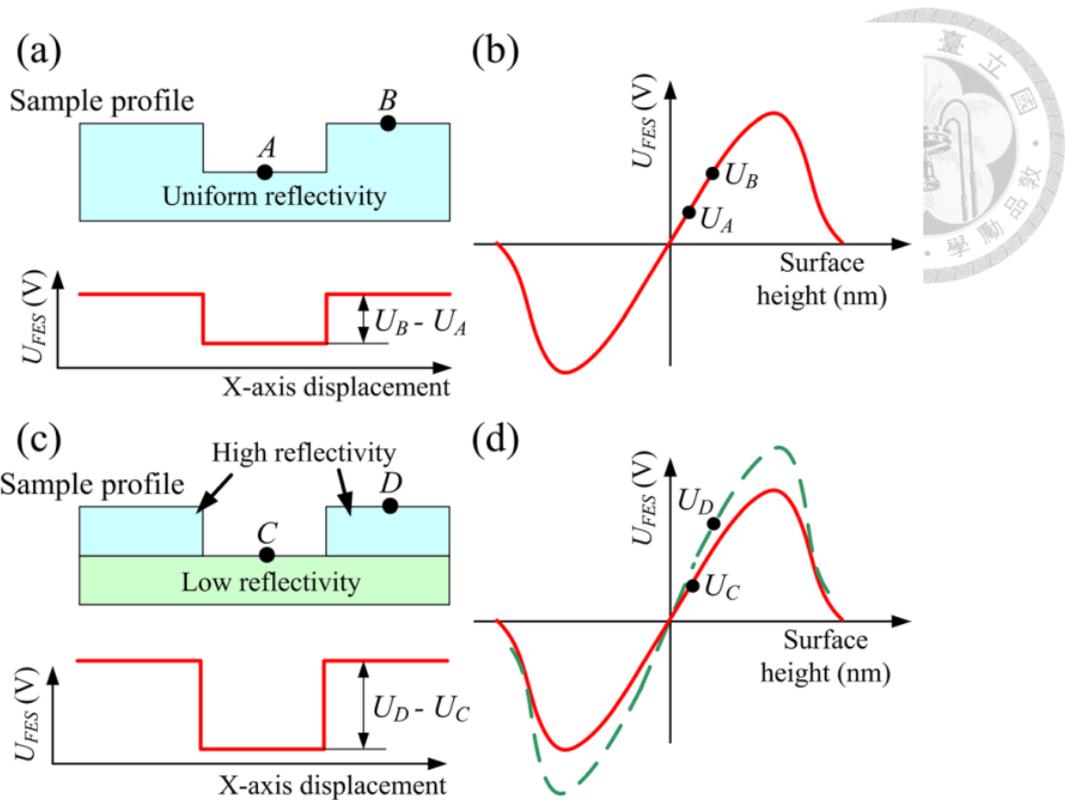


圖 1.18 相同反射率樣品之(a)高度與位置關係圖和(b)對應的 S-curve，以及不同反射率樣品之(c)高度與位置關係圖和(d)對應的 S-curve [35]。圖中 $U_{FES} = V_{FES}$ 。

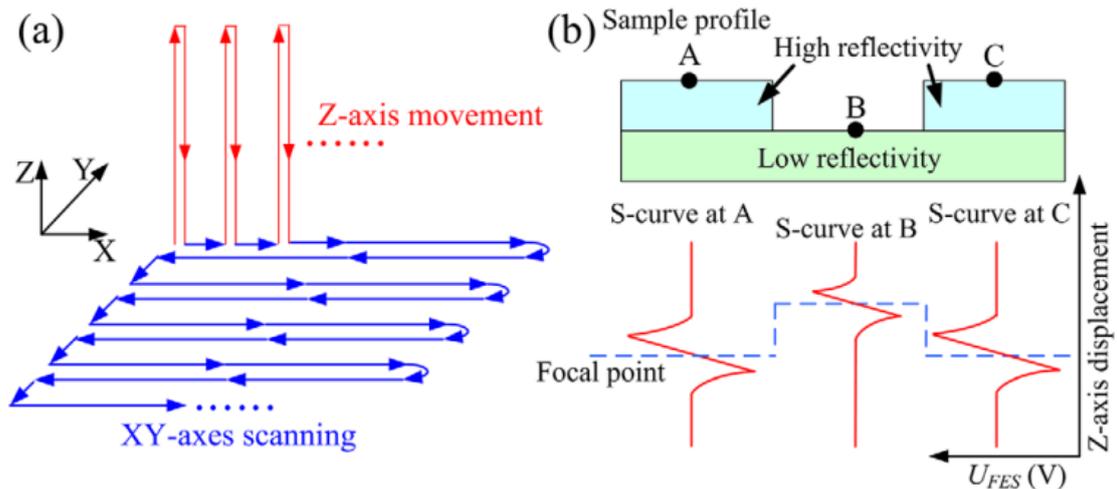


圖 1.19 (a)掃描軌跡示意圖(b)樣品高度換算示意圖 [35]。

2021 年時，Liao 等人為了提升前述研究之掃描速度，在先前架構的基礎上增加了自行設計的撓性機構作為共振物鏡掃描器，如圖 1.20 所示 [36]。利用共

振掃描器提供 Z 軸上的掃描位移，成功將整體影像的掃描速度從 3.5 hr/frame 提
升至 256 s/frame，縮短了約 50 倍的時間。

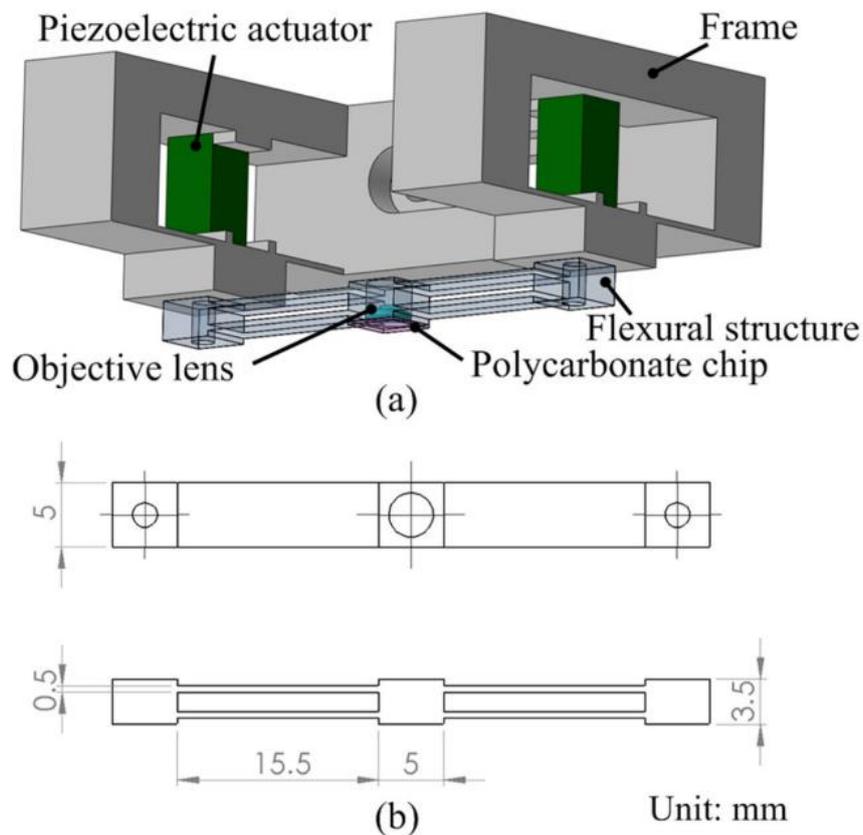


圖 1.20 共振物鏡掃描器(a)結構示意圖(b)撓性機構尺寸圖 [36]。

基於 Liao 等人的研究，已知樣品表面反射率與其 FES 訊號之振幅成正比，
2022 年，徐辜建源開發出即時呈現反射率之量測方法。透過鎖相放大器量測
FES 訊號的振幅大小，經校正後可即時得到未知樣品之表面反射率，並進行即
時反射率成像，如圖 1.21 所示 [37]。

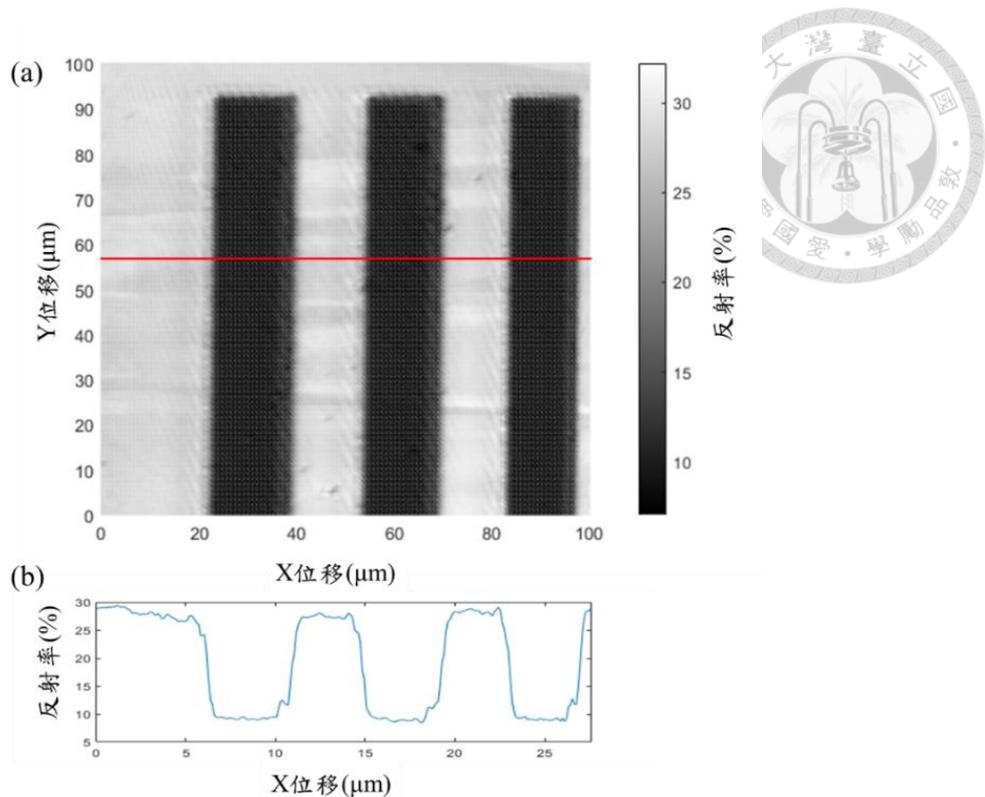


圖 1.21 掃描 R2L2S1N1 之即時反射率(a)影像圖及(b)截面圖 [37]。

1.3 研究目的

目前雷射加工技術與精密量測技術皆已成熟，然而加工程序和成果檢驗兩者仍是分開進行。現有結合加工和量測之系統，大多是以 CCD 影像或其他量測方法間接觀察。少數即時監測系統僅針對雷射功率輸出以確保加工過程穩定，或以光學方法即時檢測加工是否達到要求，但其原理和架構較繁瑣，且無加工時的樣品高度影像。

本研究之主要目的在於建構一套結合雷射直寫加工和像散式表面輪廓儀的系統，使其在實驗室內部便能進行簡易的光罩製作或圖案繪製，並能及時觀察加工後的線寬和表面粗糙度等性質是否符合預期。預期加工精度可達到微米等級，影像範圍約 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 大小，獲取加工過後的材料表面反射率及高度影像。

本系統以倒立式光學顯微鏡為基礎，使用原本光學顯微鏡的聚焦物鏡架設波長 532 nm 之綠光脈衝雷射，對鍍金玻片表面進行雷射直寫加工。同時顯微鏡

樣品台上方以市售 DVD 讀取頭作為像散式表面輪廓儀進行樣品表面的反射率量測，藉由玻片反射率變化得知即時表面形貌。



1.4 內容簡介

本論文共分五章，本章為緒論，內容包含介紹研究背景及與實驗相關的文獻，最後講述本論文的研究目的。

第二章為實驗原理，介紹雷射直寫加工技術的相關參數和像散光學原理。

第三章為系統架構與實驗流程，介紹本研究所使用到的各項儀器以及整體系統架構，並講述本研究所進行的各項實驗流程。

第四章為實驗結果與分析，詳細討論本研究中雷射加工實驗和像散式輪廓儀掃描實驗的數據並分析其結果。

第五章為結論與未來展望，總結本研究的實驗成果，並提出未來可行的研究改進方向。

第二章 實驗原理



2.1 雷射加工原理與參數

雷射直寫加工的原理是透過雷射光對目標物體進行熱熔融、熱燒結等效應，對材料進行破壞或改變性質。主要影響雷射加工的參數有材料吸收率或反射率、脈衝寬度、雷射功率、雷射模態、光斑重疊性以及雷射聚焦位置等，以下針對各項依序進行說明 [38]：

2.1.1 材料吸收率或反射率

當雷射聚焦於材料上時，部分光被表面反射，其餘光束進入材料內部被吸收，不同材料對於不同雷射光波長的吸收率與反射率都不盡相同，如圖 2.1 所示。假設材料表面反射率為 R ，則吸收率 A 可用式(2.1)表示，吸收率越高，材料加工越容易。

$$A = 1 - R \quad \text{式(2.1)}$$

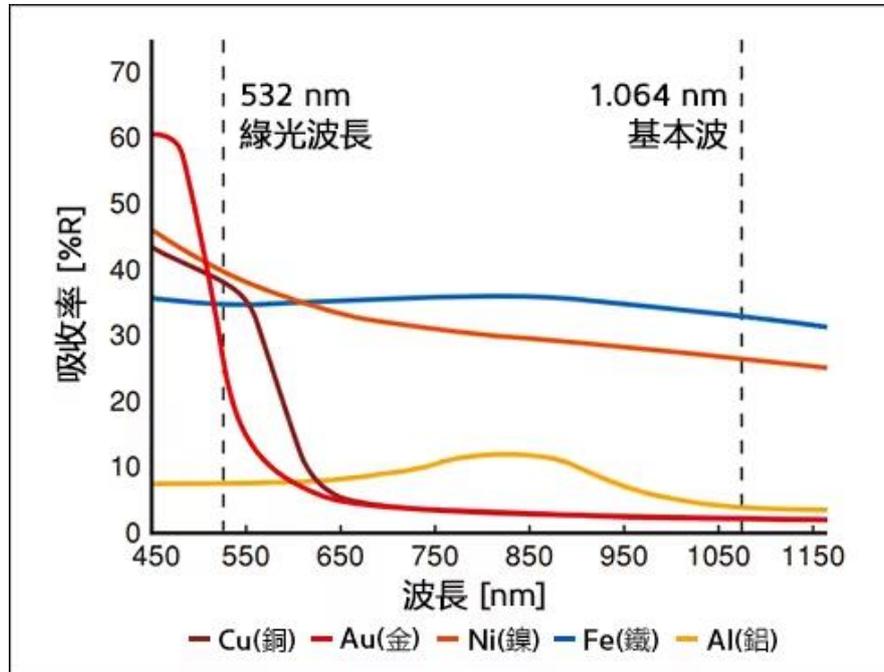


圖 2.1 不同材料對不同雷射光波長之吸收率關係圖 [39]。

除了上述公式外，亦可使用菲涅耳公式(Fresnel Equations)計算樣品材料的反射率，如式(2.2)所示，假定雷射垂直材料表面入射，其中 n_R 和 n_I 為樣品材料的實部折射率與虛部折射率。

$$R = \frac{(n_R - 1)^2 + n_I^2}{(n_R + 1)^2 + n_I^2} \quad \text{式(2.2)}$$

2.1.2 脈衝寬度

脈衝寬度是指雷射光束對樣品表面施加一發(Shot)雷射所需要的時間。脈衝寬度越短代表單位時間內的能量密度越高，加工的深度和強度也增加，反之則減弱。

2.1.3 雷射功率

雷射的輸出功率與照射時間決定了材料表面所吸收的能量多寡，而雷射光的輸出模式又分為連續 (Continuous Wave, CW) 脈衝和單一脈衝兩種。對 CW 式雷射來說，單位面積的材料所接收到的能量是由雷射的掃描速率和樣本載台的進給速率來決定的，掃描或移動速率越快，單位面積所能收到的能量越少；對單一脈衝式雷射而言，單位面積吸收的能量則由脈衝寬度決定，脈衝寬度越短能量越強。不論是何種模式的雷射，輸出功率越強，單位面積所能接收的能量也越多，能加工的材料厚度也越厚。

2.1.4 雷射模態

雷射模態主要分為縱模和橫模兩種，分別代表雷射光沿傳播方向水平與垂直軸向上的能量分布情況，通常以 TEM_{mn} 表示，其中 m 代表 X 方向節點數， n 代表 Y 方向節點數，如圖 2.2 所示 [38]。

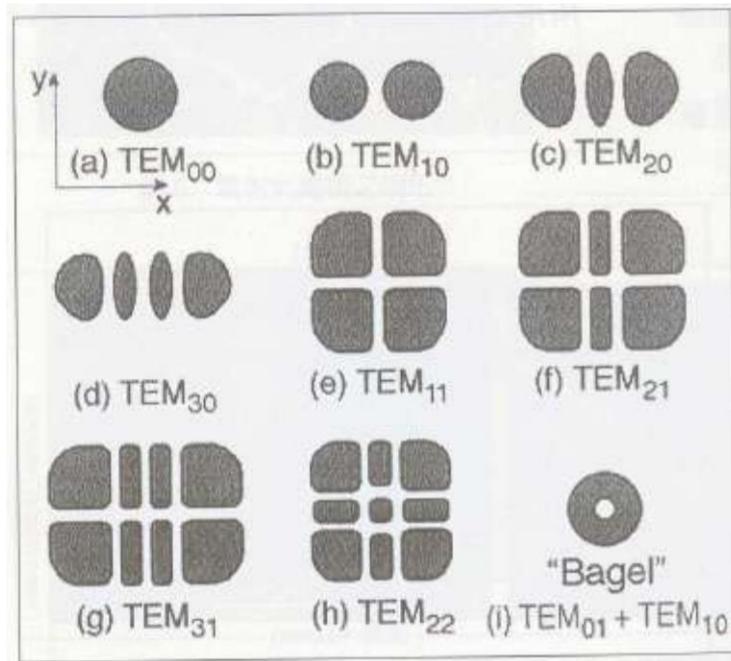


圖 2.2 各種雷射模態示意圖 [38]。

2.1.5 光斑重疊性

雷射光斑的重疊性會影響加工的品质，影響光點重疊性的因素包括雷射掃描速率、雷射頻率、光斑直徑、雷射光點咬合距離等，其光斑咬合距離與雷射掃描方向示意圖如圖 2.3 所示。

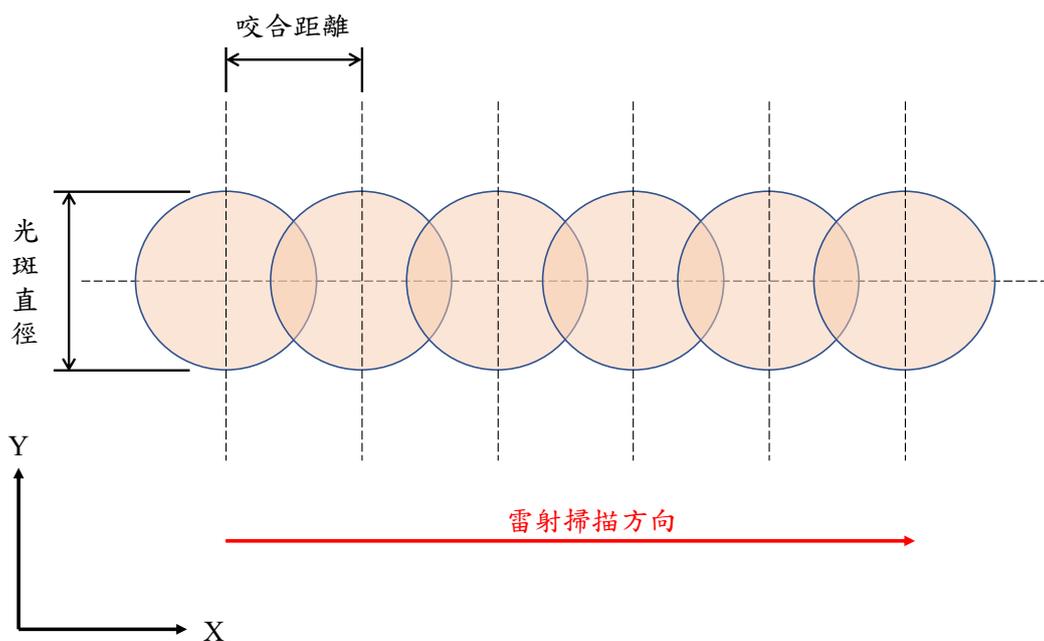


圖 2.3 光斑重疊性示意圖。

光斑的咬合距離 B_s (mm)計算如式(2.3)所示，其中 F 是雷射掃描速率(mm/s)， f 是雷射的重複頻率(Hz)。而雷射的重疊率 $Overlap(\%)$ 可以透過式(2.4)計算得知， SD 代表光斑直徑(mm)。

$$B_s = \frac{F}{f} \quad \text{式(2.3)}$$

$$Overlap(\%) = \frac{SD - B_s}{SD} \times 100 \quad \text{式(2.4)}$$

2.1.6 雷射聚焦位置

雷射在加工過程中，光束聚焦處與材料表面的相對位置會對加工的切割深度和表面粗糙度造成影響。如圖 2.4 數據所示 [40]，針對 1018 低碳鋼進行雷射焊接實驗，雷射燒熔時的穿透深度，會隨焦距長度和聚焦位置有關。

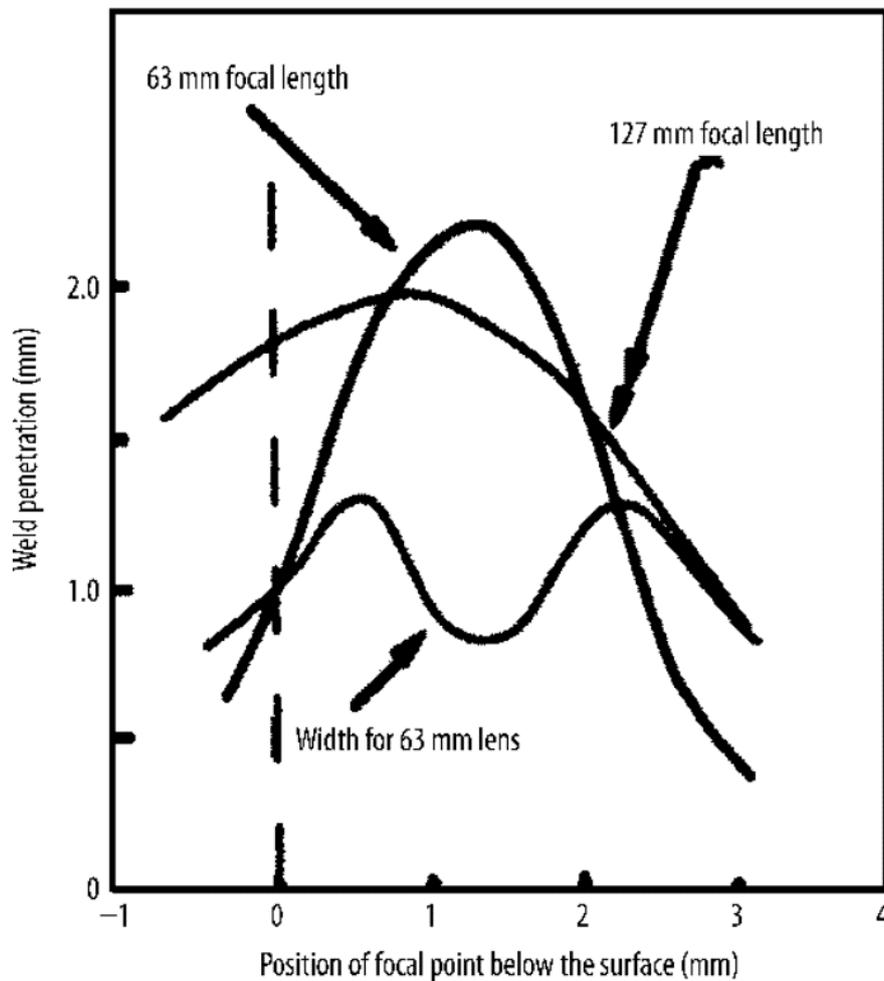


圖 2.4 對 1018 低碳鋼不同焦距和聚焦位置與雷射穿透深度之關係圖 [40]。



2.2 像散式光學輪廓儀原理

本研究主要使用像散式光學輪廓儀作為量測手段，其原理如圖 2.5 所示。當光線經過圓柱透鏡時，因透鏡在 X 和 Y 方向上的曲率不同，會在鏡後產生兩個焦點，而兩焦點之間的光斑形狀會根據其與焦點距離產生變化。當光斑位置較靠近其中一個焦點時，光斑形狀會沿另一軸向拉伸呈橢圓形，像散式光學輪廓儀即是透過光斑形狀變化來量測樣品表面形貌。

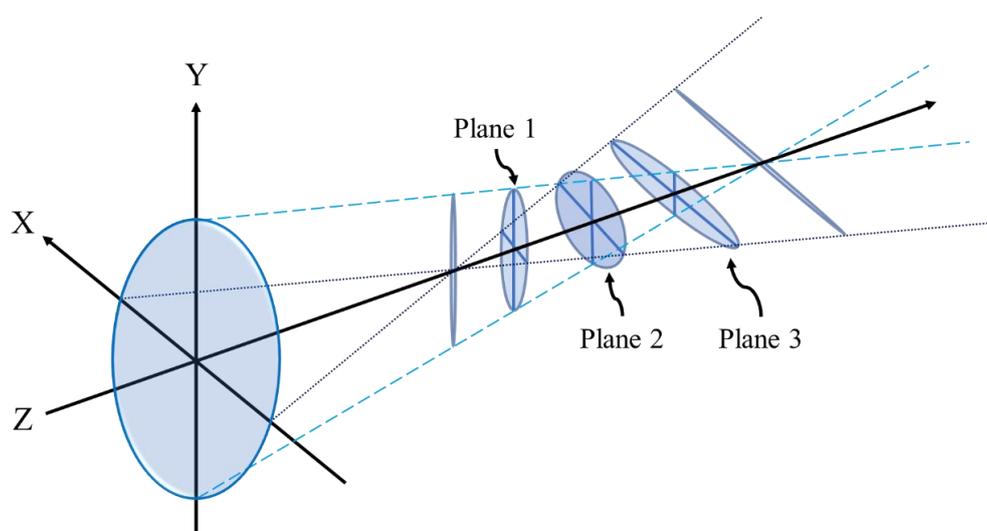


圖 2.5 像散原理示意圖。

本研究使用之像散式光學輪廓儀光路如圖 2.6 所示。雷射光由雷射二極體發出，經分光鏡反射後再由準直透鏡轉成平行光，接著透過聚焦物鏡聚焦於樣品表面上。樣品表面反射光束沿原光路返回至分光鏡，由分光鏡內含之像散元件產生像散現象後，以四象限位置感測器接收雷射光，將光強度轉換成電壓進行計算。

四象限位置感測器的四個感光元件分別為 A、B、C、D，其個別輸出電壓訊號為 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D ，經由放大電路運算出聚焦誤差訊號(Focus Error Signal, FES)電壓 V_{FES} 和感測訊號總和(SUM)電壓值 V_{SUM} ，如式(2.5)、式(2.6)所示。

$$V_{FES} = (V_B + V_D) - (V_A + V_C) \quad \text{式(2.5)}$$

$$V_{SUM} = V_A + V_B + V_C + V_D \quad \text{式(2.6)}$$

V_{FES} 的變化與樣品在 Z 軸方向的位移有關，如圖 2.7 所示。當樣品位於近焦區時，光斑呈現橢圓形，且大部分光斑落在 A、C 兩區，使得 $V_{FES} < 0$ ；當樣品剛好位於焦點附近時，光斑形狀接近圓形，且均勻分布在感測器四個象限上，使得 V_{FES} 趨近於 0；當樣品離焦時，光點呈橢圓形，且大部分光斑位於 B、D 兩區，使 $V_{FES} > 0$ 。 V_{FES} 訊號與 Z 軸位移的關係曲線被稱為 S-curve，S-curve 在聚焦點附近的變化接近線性關係，且靈敏度較高，藉由量測此線性區間內的電壓變化，即可得知樣品表面高度。

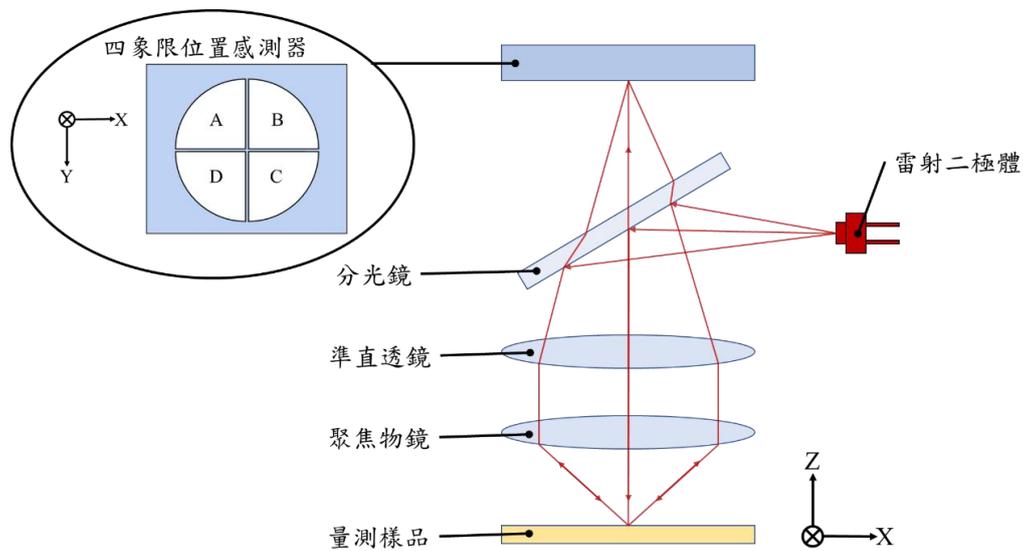


圖 2.6 像散式光學輪廓儀光路示意圖。

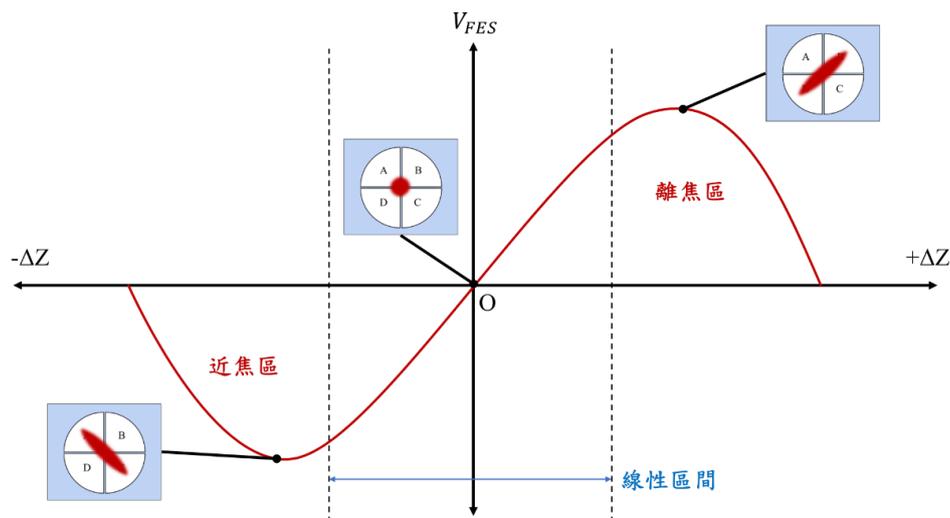


圖 2.7 FES 與樣品表面 Z 軸位移之關係圖。

第三章 系統架構與實驗流程



3.1 整體系統架構

本研究整體系統架構如圖 3.1 所示，主要可以分為像散式輪廓儀系統、雷射直寫加工系統、以及控制系統三個部分。由控制系統輸出驅動壓電平台和脈衝雷射的訊號；雷射加工系統收到開關和脈衝頻率訊號後，射出雷射聚焦到樣品進行直寫加工；像散式輪廓儀訊號將量測到的電壓訊號傳回控制系統進行後續計算和高度或反射率成像。

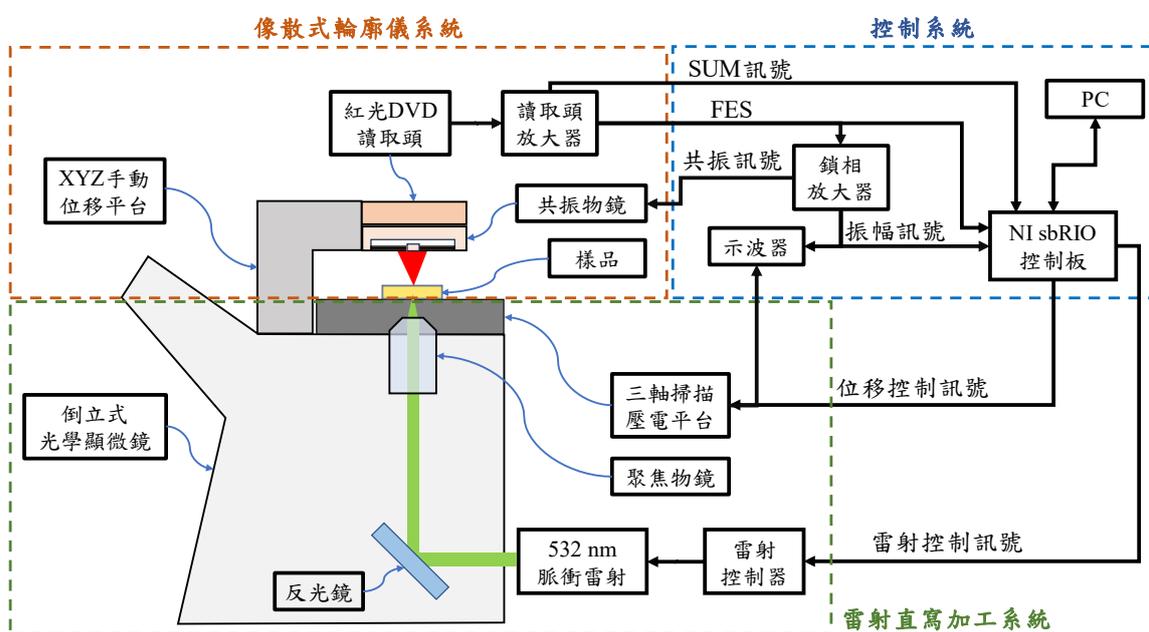


圖 3.1 本研究整體系統架構圖。

3.2 像散式輪廓儀系統

像散式輪廓儀系統位在倒立式光學顯微鏡 (IX73, Olympus) 上方，主要由固定在 XYZ 手動位移平台 (XC4-60SMW, TWIN NINES) 上的商用紅光 DVD 讀取頭、共振物鏡和放大電路板所組成，負責量測樣品表面 FES 的變化，實體照片如圖 3.2 所示。

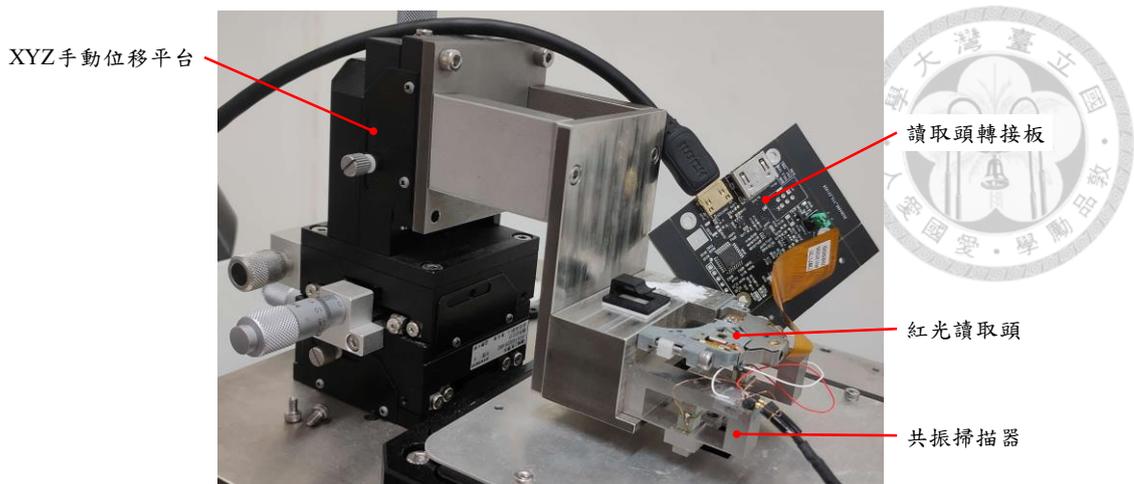


圖 3.2 像散式輪廓儀系統實體圖。

3.2.1 商用紅光 DVD 讀取頭和共振掃描器

本研究使用市售紅光讀取頭(TOP1100s, TopRay Technologies)作為主要光學量測元件，如圖 3.3 所示[附錄 A]，其內部結構由雷射二極體(Laser Diode)、準直透鏡(Collimator Lens)、分光鏡(Beam Splitter)、物鏡(Objective Lens)、反射鏡(Reflected Mirror)、音圈馬達(Voice Coil Motor, VCM)、四象限位置感測器(Position Sensitive Detector, PSD)所組成，在本研究中，除了將物鏡拆下裝在自製的共振掃描器上以外，其餘光路使用讀取頭本身設計。

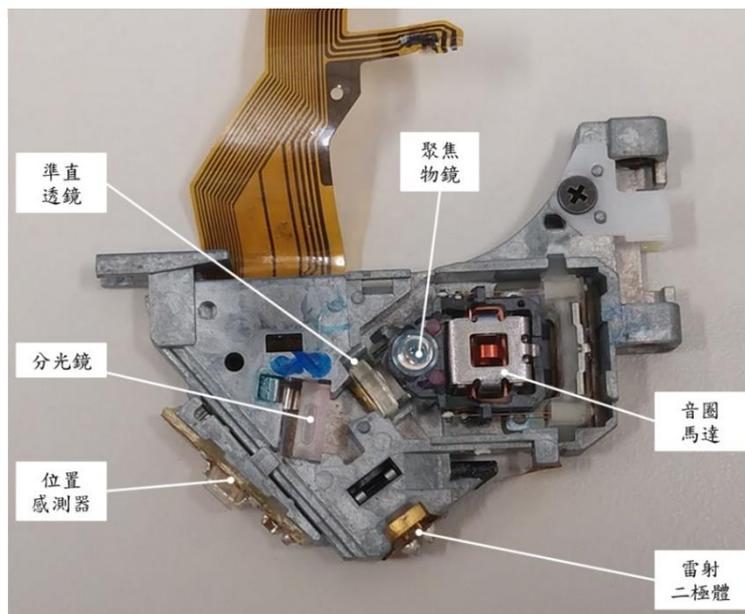


圖 3.3 紅光 DVD 讀取頭。

共振掃描器如圖 3.4 所示，由兩個壓電塊(AE0505D08DF, Tokin)[附錄 B]、壓電塊固定座及一個撓性振動件所組成。壓電塊安裝在固定座上並施予一預壓力使其固定，撓性振動件則以瞬間膠黏在固定座下方，從讀取頭拆下的物鏡安裝在撓性振動件中間，並在其下方黏上一小片聚碳酸酯芯片增強訊號。當驅動壓電塊以撓性振動件的共振頻率振動時，物鏡便會跟著上下移動進行掃描。

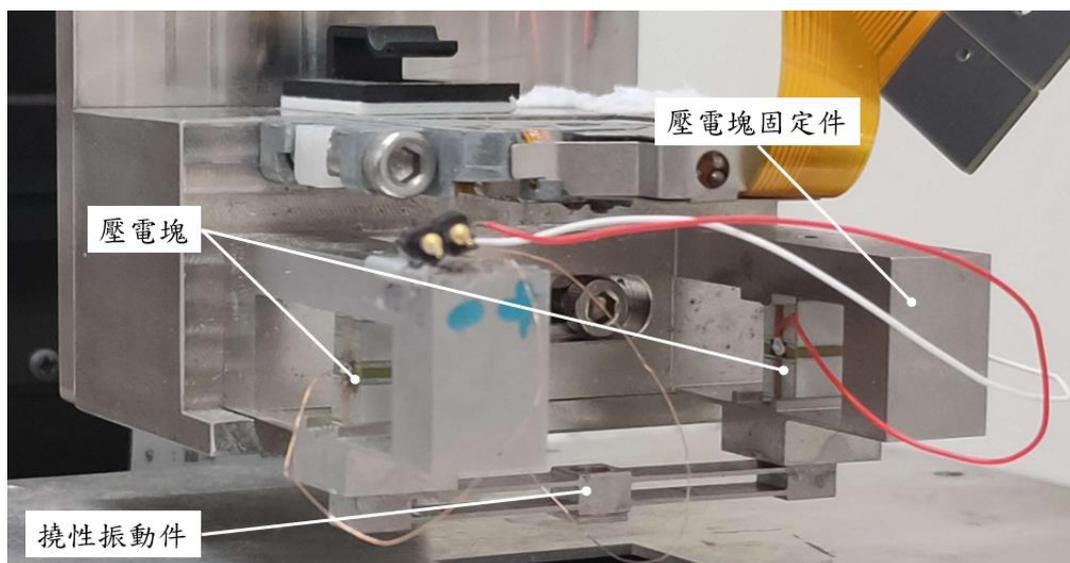


圖 3.4 共振掃描器。

3.2.2 讀取頭放大電路

本研究使用讀取頭放大電路(MPro OPU Driver rev1, MPro GmbH)如圖 3.5 所示[附錄 C]，負責驅動紅光讀取頭，並將四象限 PSD 的感測訊號進行計算放大後，輸出 FES 和 SUM 值的電壓訊號。電路板上附有調整輸出偏移量的 Offset 可變電阻和改變輸出 Gain 值倍率的開關，可以針對輸出訊號進行細部調整。

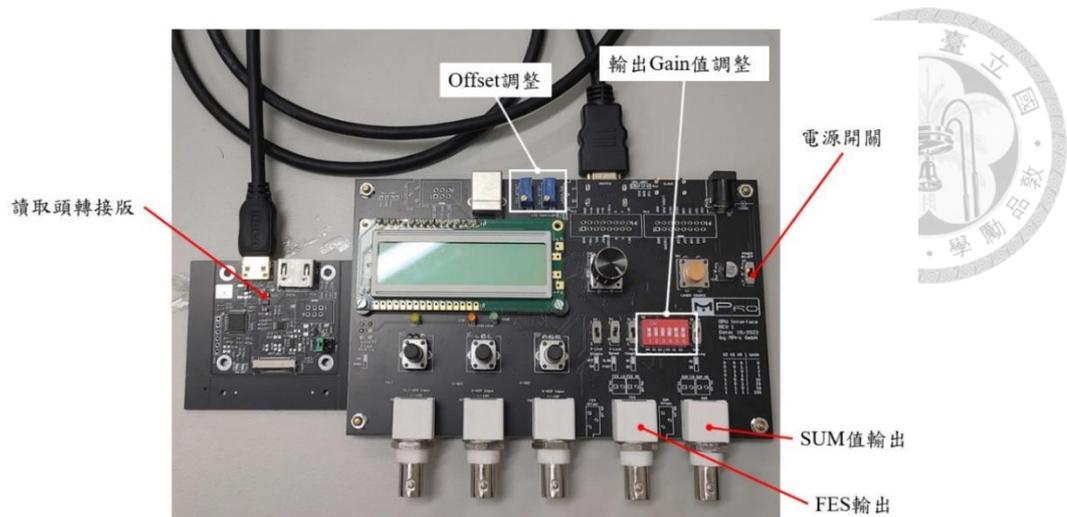


圖 3.5 讀取頭放大電路。

3.3 雷射直寫加工系統

雷射直寫加工系統主要由一波長 532 nm 的脈衝雷射和其控制器組成，雷射從顯微鏡右側開口處射入，經內部光路反射後透過聚焦物鏡(PLN 10X, Olympus)聚焦於樣品表面，樣品藉由三軸壓電平台移動掃描進行雷射直寫圖案化加工，實體架構如圖 3.6 所示。

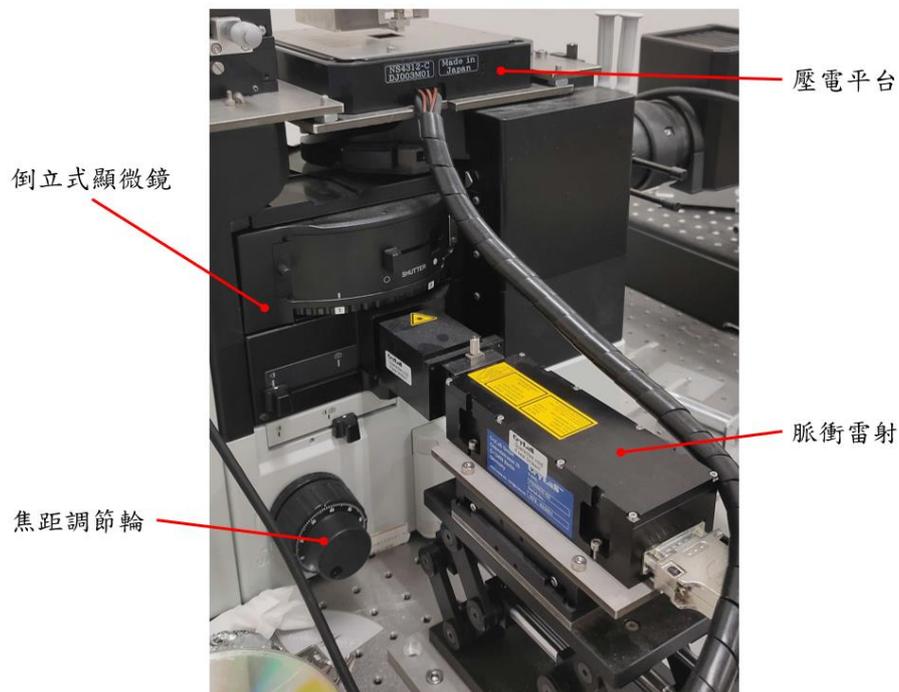


圖 3.6 雷射直寫加工系統實體圖。

3.3.1 綠光 532 nm 脈衝雷射

本研究使用之脈衝雷射為 Crylas 公司的 FDSS532-Q3 型號，如圖 3.7 所示[附錄 D]，其輸出為 532 nm 的綠光雷射，最大輸出脈衝頻率為 2.5 kHz，脈衝寬度為 1.12 ns，輸出端光點尺寸約為 0.4 mm，在脈衝頻率為 1 kHz 時的功率峰值可達 21.43 kW。連接控制器上的外部輸入接頭，可以藉由電腦端的程式進行雷射開關、脈衝頻率、脈衝寬度等參數的控制，且雷射輸出端前方加裝了光圈模組，可以透過電腦程式控制光圈，物理性調整雷射輸出功率大小，達到本研究的實驗需求。

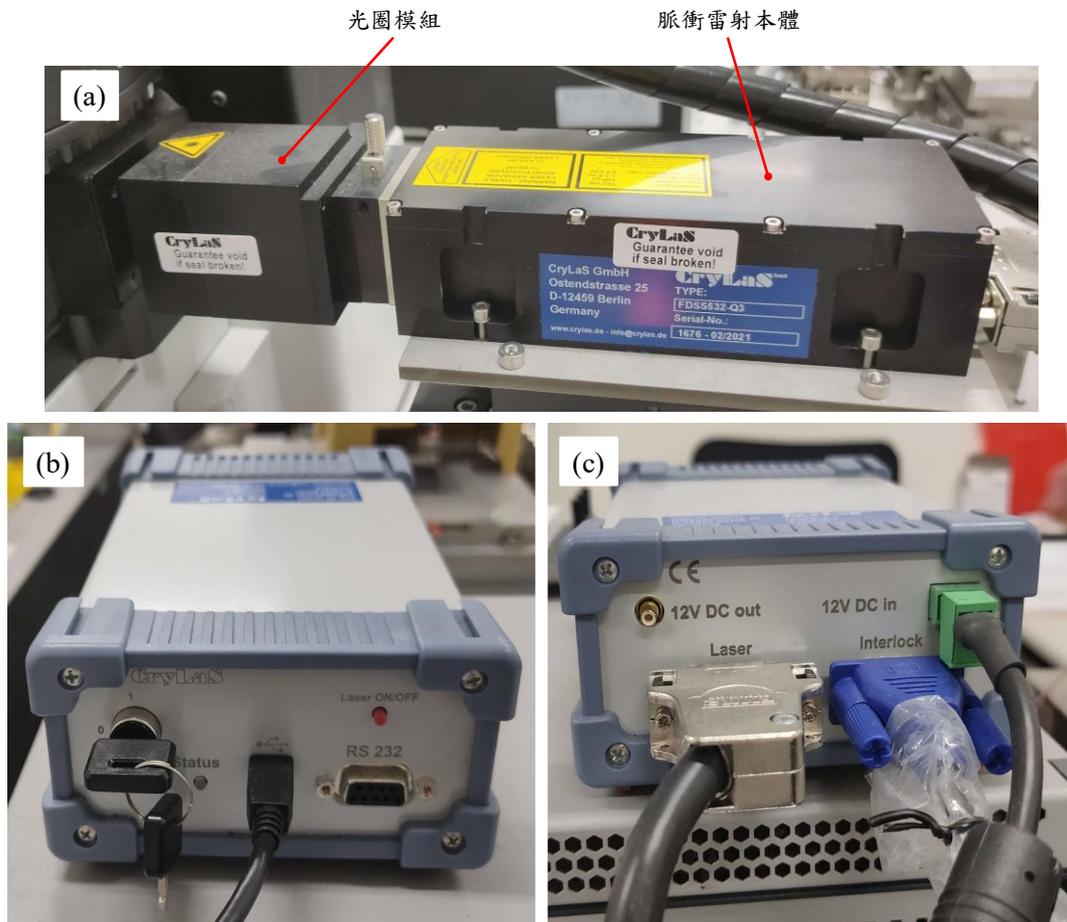


圖 3.7 (a)脈衝雷射與控制器(b)正面和(c)反面實體圖。

3.3.2 XYZ 壓電平台

本實驗使用之三軸壓電平台與其控制器(NS4312-C, driven by NC3000 feedback controller, Nano Control Co., Ltd, Japan)如圖 3.8 和圖 3.9 所示。[附錄 E] 控制器輸入為0~10 V電壓訊號，放大後輸出0~150 V電壓給壓電平台中的壓電塊。

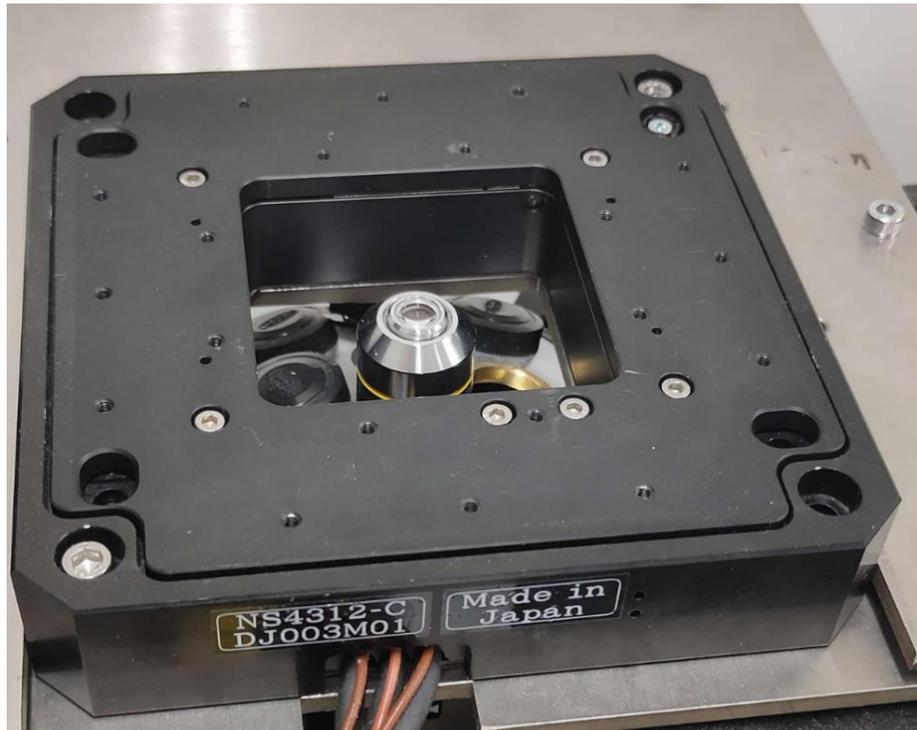


圖 3.8 三軸壓電平台。



圖 3.9 壓電平台控制器。

3.4 控制系統

控制系統主要由電腦和控制板組成，負責將讀取頭放大電路回饋的 FES 轉換成樣品高度進行成像，以及雷射加工時控制壓電平台的移動和脈衝雷射的開關及輸入。

3.4.1 控制板

本實驗使用之控制板(sbRIO-9637, National Instruments)如圖 3.10 所示，包括一塊主控制板和一塊分線板(Breakout Board)。sbRIO-9637 作為一嵌入式控制器，在單一電路板上整合了 NI Linux Real-Time 即時處理器和一組現場可程式化邏輯閘陣列(Field Programmable Gate Array, FPGA)，透過 RJ-45 乙太網端口連接電腦，可藉由 LabView 控制多個類比或數位輸出，同時擷取資料進行運算。

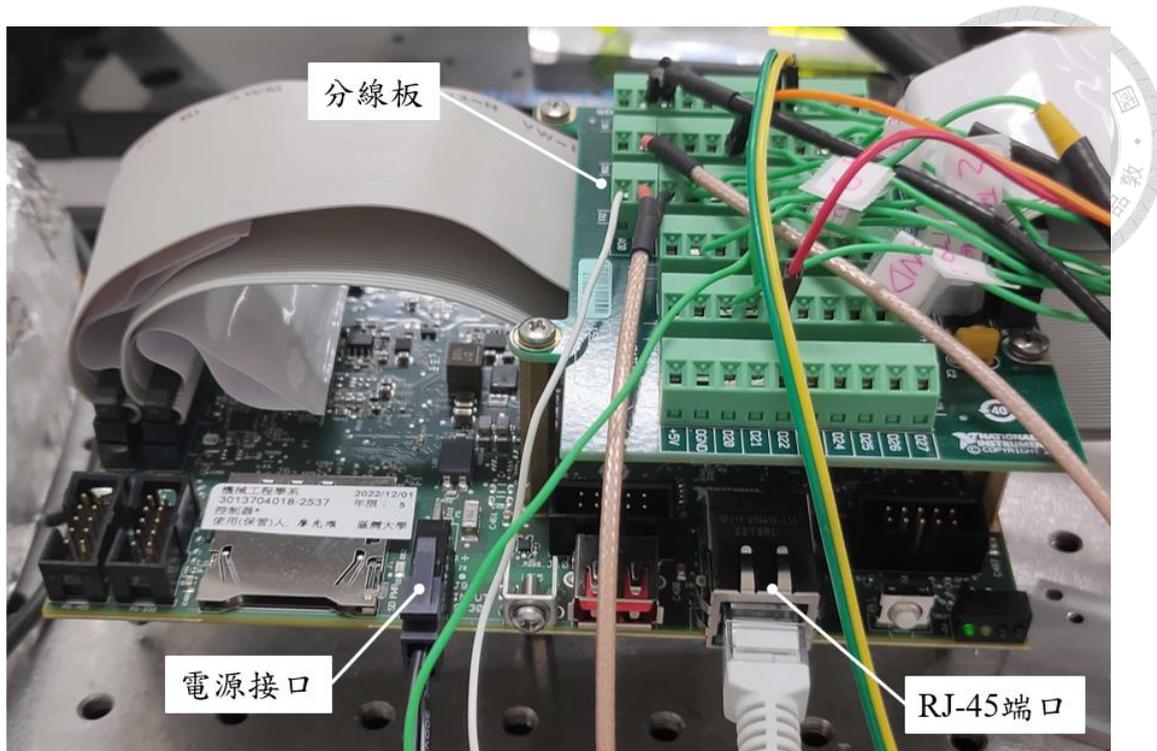


圖 3.10 sbRIO-9637 控制板。

3.4.2 鎖相放大器

本研究使用的鎖相放大器(SR830, Stanford Research Systems)如圖 3.11 所示，其頻率範圍為 1 mHz~102.4 kHz，穩定性達到 5 ppm/°C，且擁有 0.01° 的相位解析度，內含參考訊號源，具有 GPIB 和 RS232 等多種通訊介面，本研究實驗中負責輸出特定頻率與振幅的弦波以驅動共振掃描器，同時接收紅光讀取頭的 FES 訊號，鎖定其振幅值回傳給控制系統。



圖 3.11 SR830 鎖相放大器。



3.5 實驗流程

本研究進行之實驗主要為兩種，第一種是為了針對不同樣品反射率進行的單點 S-curve 量測實驗，透過量測單點 S-curve，針對不同反射率下 FES 振幅和線性區間斜率建立關係式；第二種是針對雷射直寫加工成果進行的雷射加工掃描實驗，透過程式控制脈衝雷射進行畫線，並用像散式輪廓儀進行掃描成像，透過反射率改變導致的 FES 振幅與斜率變化，回推樣品表面的高度影像。

3.5.1 單點 S-curve 量測實驗

單點 S-curve 量測實驗是在樣品上進行單點的 Z 軸掃描，以獲得樣品表面完整 S-curve，後續透過計算得知樣品反射率。單點 S-curve 量測實驗流程如下：將樣品放置在壓電平台上方，並透過顯微鏡 CCD 確認讀取頭光點位在樣品上方，手動調整讀取頭高度，使雷射光點靠近近焦區後，設定 Z 軸壓電行程和速度，使 Z 軸逐漸上升至設定高度後返回，過程中持續記錄 Z 軸高度及對應的 FES 和 SUM 訊號，記錄存檔以利後續數據處理。詳細流程圖如圖 3.12 所示。

在此實驗中，反射率越大的樣品其 S-curve 線性區間的峰對峰值和斜率也越大，反之，反射率較小的樣品峰對峰值和斜率也較小，示意圖如圖 3.13 所示。將實驗過程中記錄的資料透過 Matlab 計算出不同樣品的峰對峰值和斜率，便可得到反射率與斜率和峰對峰值的回歸直線關係式。

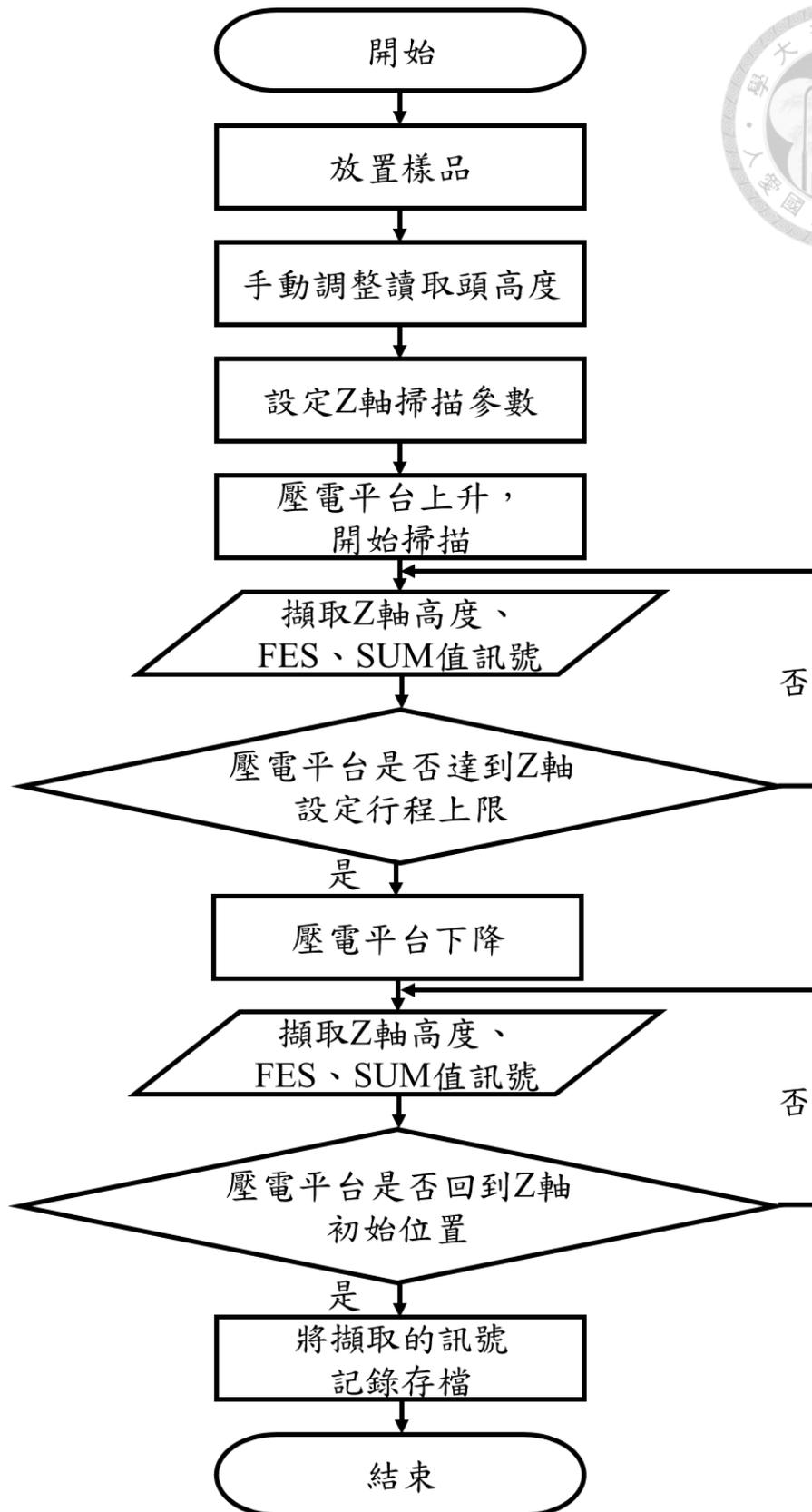


圖 3.12 單點 S-curve 量測實驗流程圖。

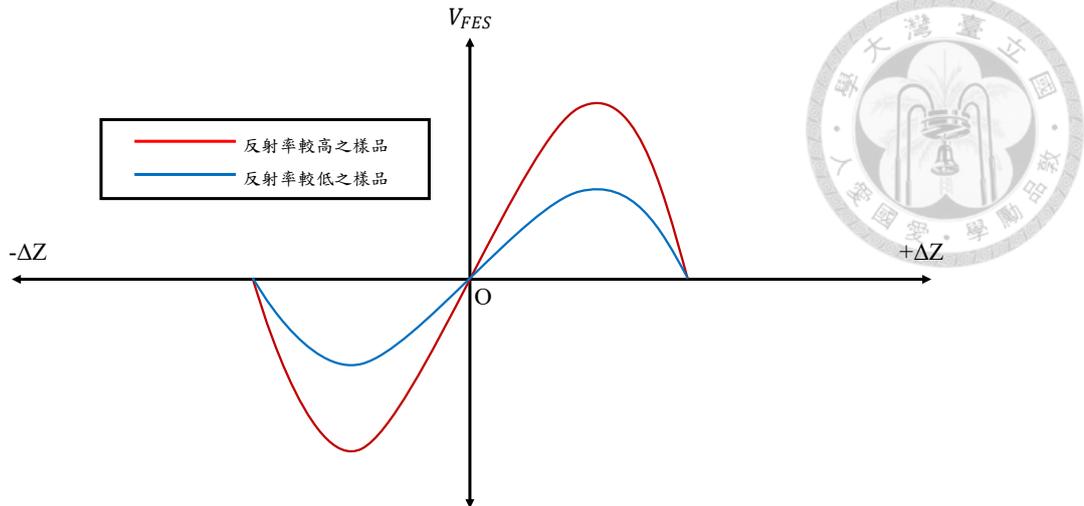


圖 3.13 不同反射率之樣品 S-curve 示意圖。

3.5.2 雷射加工掃描實驗

雷射加工掃描實驗是透過脈衝雷射在鍍金玻片上畫線，再藉由移動壓電平台 XY 軸進行掃描，獲得樣品表面的 FES 和反射率。詳細實驗流程如下：先將樣品放在壓電平台上，手動調整紅光讀取頭高度至 S-curve 焦點位置，再透過 CCD 觀察樣品，調整顯微鏡的焦距調節輪，使樣品調整至脈衝雷射的最佳聚焦高度後，將顯微鏡光源切換至脈衝雷射輸入口，設定好脈衝雷射頻率和光圈大小、壓電平台的移動行程後進行雷射加工。加工完畢後壓電平台再進行 XY 方向掃描，同時開啟鎖相放大器擷取 FES 與其振幅 V_{Amp} ，並儲存 XY 位置和對應的 FES 與振幅訊號進行成像。詳細流程如圖 3.14 所示。

樣品在不同高度和不同反射率下，各像素點 S-curve 的高度和峰對峰值會有所不同，進而影響到開啟共振掃描器後量到的 FES 以及鎖相放大器輸出之振幅，如圖 3.15 所示。透過單點 S-curve 量測實驗中得到的樣品反射率與其 S-curve 線性區間斜率之回歸直線關係式，在固定共振掃描器位移振幅的情況下，可以將雷射加工掃描實驗中得到的各像素點之 FES 振幅換算成各點反射率進行成像，其換算關係式如式(3.3)所示。

令樣品反射率與其 S-curve 線性區間斜率之回歸直線關係式為：

$$S = aR + b \quad \text{式(3.1)}$$

$$|S| = \frac{2V_{Amp}}{\Delta z} \quad \text{式(3.2)}$$

則樣品表面反射率與鎖相放大器振幅之間關係式為：

$$R = \frac{\left(\frac{2V_{Amp}}{\Delta z}\right) - b}{a} = \frac{2}{a\Delta z}V_{Amp} - \frac{b}{a} \quad \text{式(3.3)}$$

其中 S 為 S-curve 線性區間斜率， R 為樣品反射率， a 、 b 為回歸直線係數， V_{Amp} 為鎖相放大器振幅， Δz 為共振掃描器振動位移。

此外透過各像素點的 S-curve 線性區間斜率與 FES，可以計算出共振掃描範圍與讀取頭焦點($V_{FES} = 0$)位置的相對高度 H ，獲得樣品表面的高度成像，其關係式為：

$$H = \frac{\overline{V_{FES}}}{S} \quad \text{式(3.4)}$$

其中 $\overline{V_{FES}}$ 為各像素點之 FES 在共振頻率下的電壓平均值，透過從各像素點的 FES 數據中，擷取一個振動週期後將波峰和波谷電壓值進行平均得到。



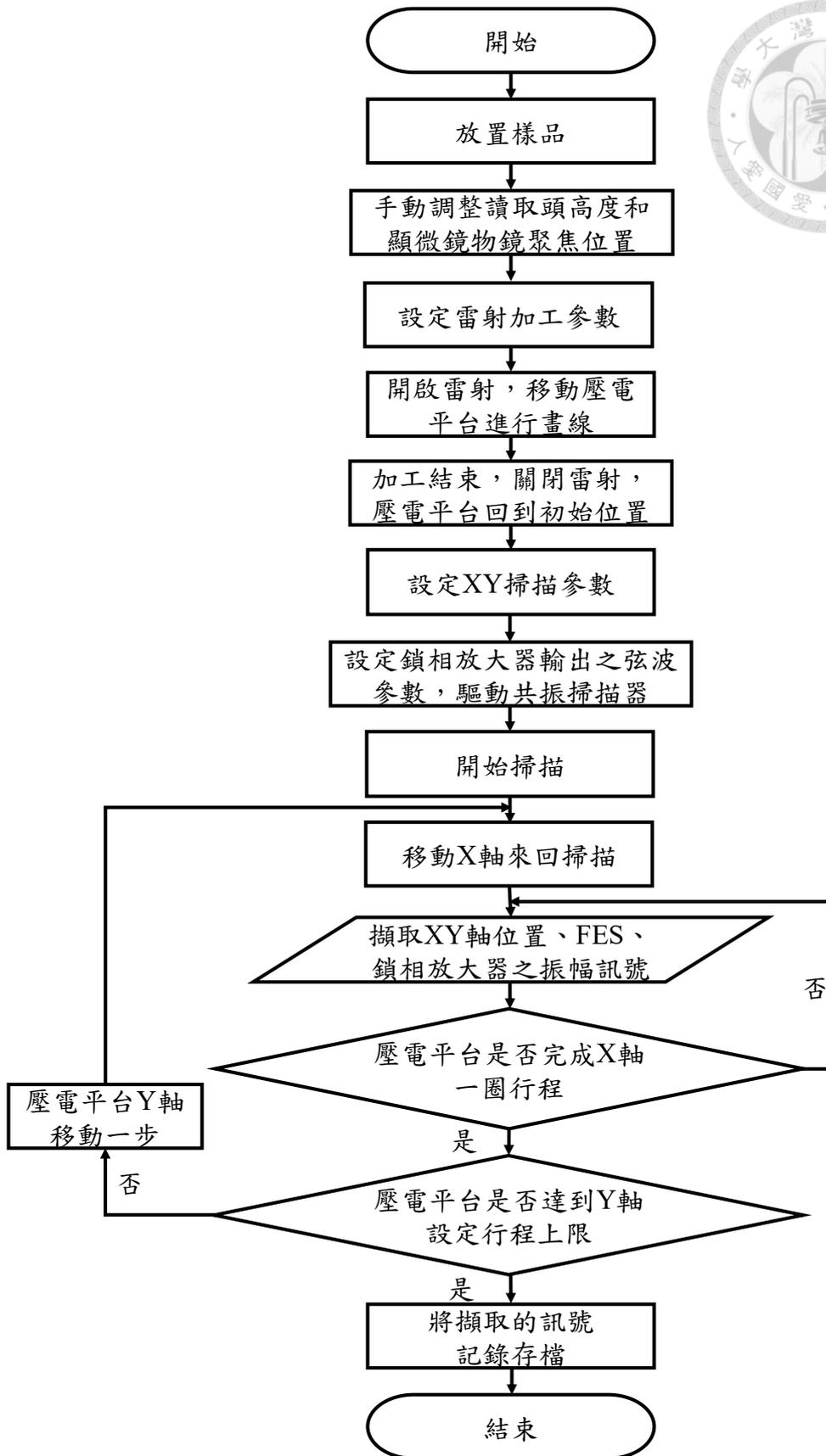


圖 3.14 雷射加工掃描實驗流程圖。

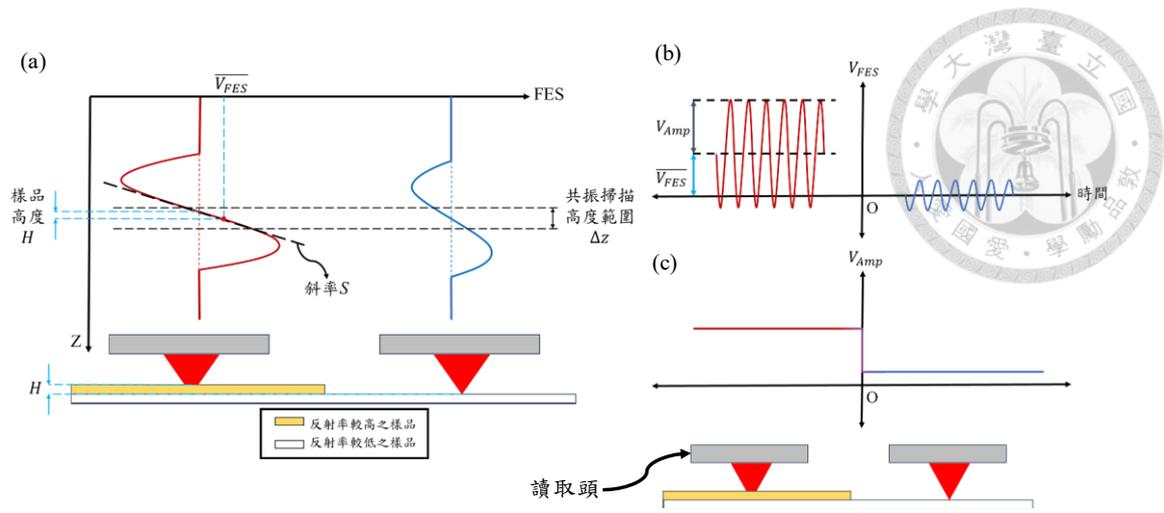


圖 3.15 (a)不同高度和反射率的樣品之 FES，和共振掃描器開啟時的(b)FES 以及 (c)鎖相放大器輸出振幅示意圖。

第四章 實驗結果與分析

本研究之實驗結果分為四個部分：(1)以像散式輪廓儀量測解析度測試片(R2L2S1P1, Thorlabs)[附錄 F]上鍍鉻層之條紋，推算壓電平台的掃描範圍；(2)透過單點 S-curve 量測實驗量測已知反射率樣品，分析數據後求得樣品反射率與 S-curve 線性區間斜率的關係式，並推算未知反射率樣品的反射率；(3)針對不同雷射加工參數，比較加工後的樣品形貌，找出最適合的加工參數；(4)透過雷射加工掃描實驗對不同鍍層厚度的鍍金玻片進行加工，並對其結果成像進行分析，推算出對應的反射率和高度影像。

4.1 系統掃描範圍

本實驗量測 R2L2S1P1 解析度測試片上編號 181 的條紋圖案，代表在 1 mm 內共有 181 組條紋。測試片在橫豎方向各有 5 組條紋，每組條紋為 $1\text{ mm} \div 181\text{ cycles} \cong 5.5\text{ }\mu\text{m/cycle}$ ，如圖 4.1 所示。



圖 4.1 R2L2S1P1 測試片的局部條紋 CCD 影像。

本實驗以 1 Hz 的線掃描速度，每條線 256 個像素點進行掃描，用讀取頭的 FES 做成像，結果如圖 4.2 所示，(a)和(b)分別為由上往下和由下往上掃描的結

果。由於實驗中並未使用壓電掃描器的閉迴路控制，導致壓電塊行程出現遲滯現象，使影像在兩軸都有一定程度的非線性，Y 軸受到的影響較大。

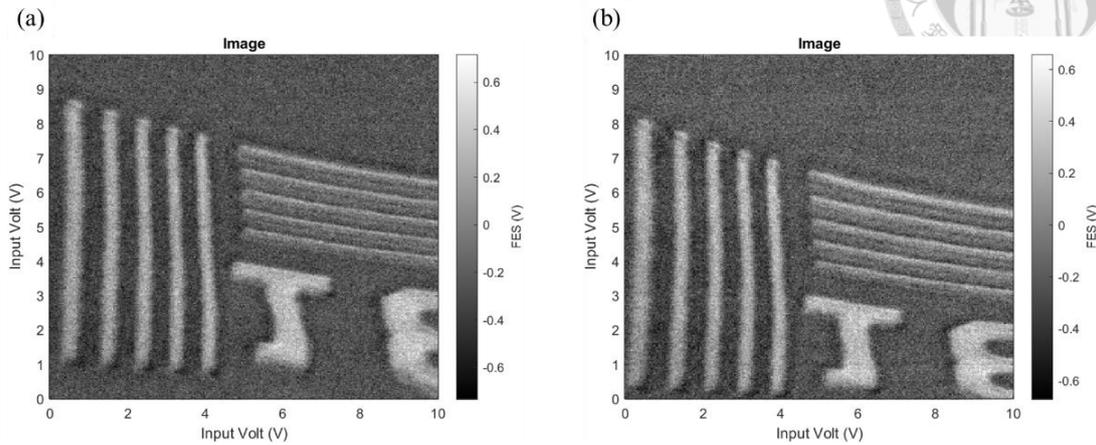


圖 4.2 R2L2S1P1 測試片(a)由上往下掃描和(b)由下往上掃描的 FES 成像。

透過脈衝雷射沿掃描邊界和對角線進行畫線加工後，再透過 CCD 觀察可獲得實際壓電平台移動範圍大小與 X、Y 軸同動時的直線度，如圖 4.3 所示。根據圖 4.3 的結果可以看出兩軸壓電行程出現耦合，且耦合情況與壓電塊伸長量有關，導致掃描範圍呈現出不規則四邊形，且 X、Y 軸同動時出現不自然的轉折，代表兩軸壓電塊輸入電壓與位移量的非線性狀況並不相同。

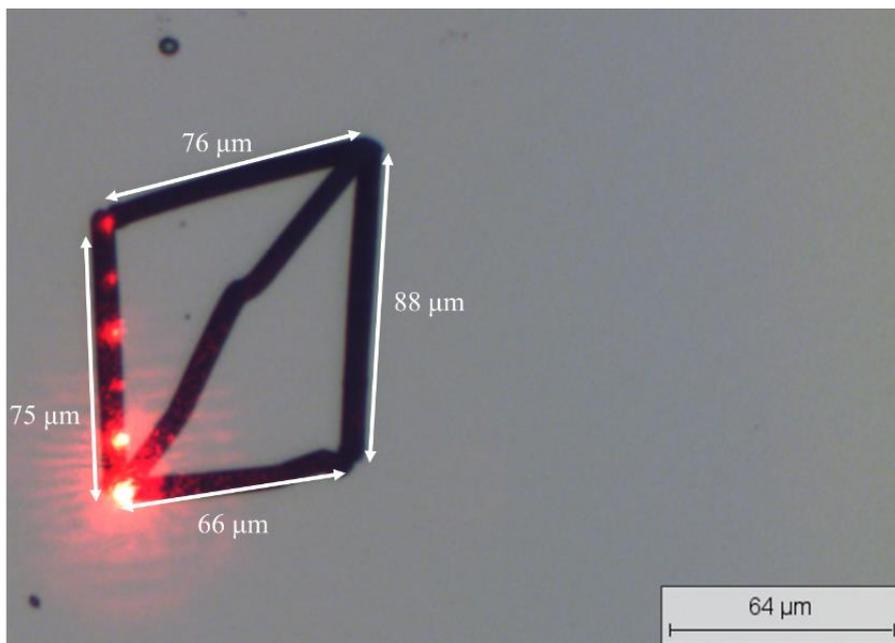


圖 4.3 雷射沿掃描範圍邊界和對角線進行加工後的 CCD 影像。

透過上述結果和測試片條紋寬度可以推算出本實驗架構的壓電平台掃描範圍，在給予 0~10 V 電壓的情況下，X 軸行程約介於 66~76 μm 之間，Y 軸行程約介於 75~88 μm 之間。



4.2 單點 S-curve 量測實驗

本實驗中使用的已知反射率之樣品為向岳華展光電股份有限公司(ROCOES Electro-Optics CO.)購買的 4 種規格之青板玻璃和一塊紅光反射鏡(RR6070)，如圖 4.4 所示，其規格反射率與廠商實測反射率如表 1 所示。

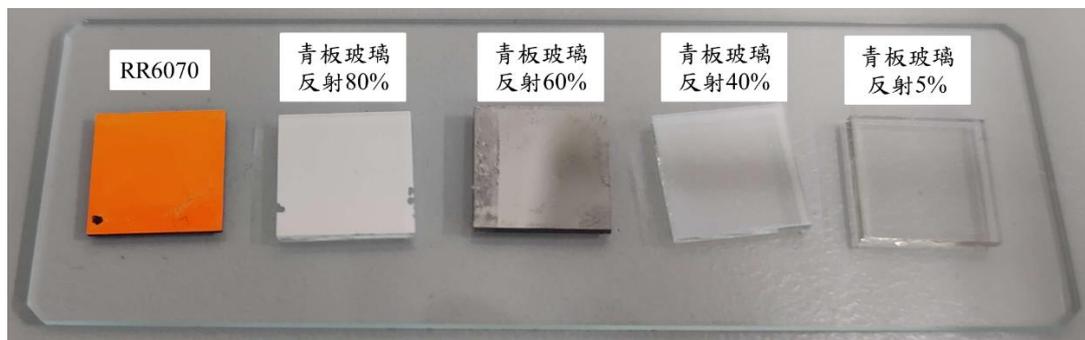


圖 4.4 已知反射率樣品實體圖。

表 1 已知反射率樣品規格表。

樣品名稱	規格反射率 (波長 655 nm)	廠商實測反射率 (波長 655 nm)
青板玻璃反射 5%	5%	8.00%
青板玻璃反射 40%	40%	37.51%
青板玻璃反射 60%	60%	50.87%
青板玻璃反射 80%	80%	62.77%
紅光反射鏡 RR6070	>98%	97.72%

未知反射率樣品為 R2L2S1P1(Thorlabs)的鍍鉻層表面，和三種不同鍍金厚度的蓋玻片。鍍金玻片委託中研院進行製作，在蓋玻片表面分別濺鍍 10、50、100 nm 厚的金原子，如圖 4.5 所示。

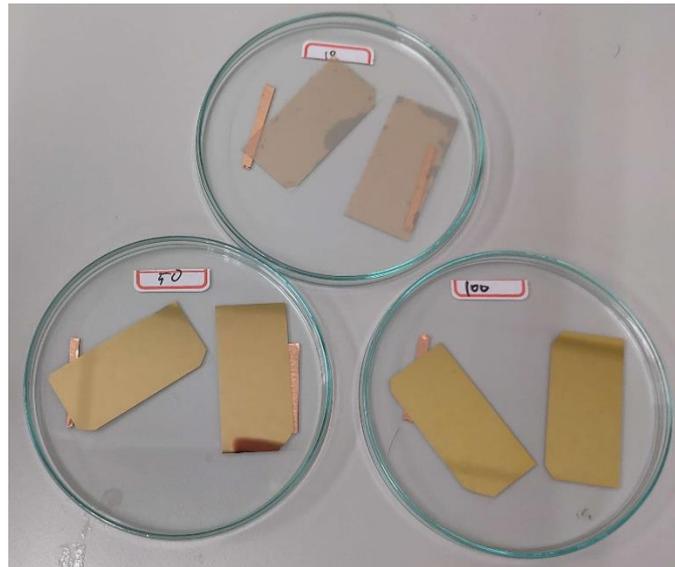
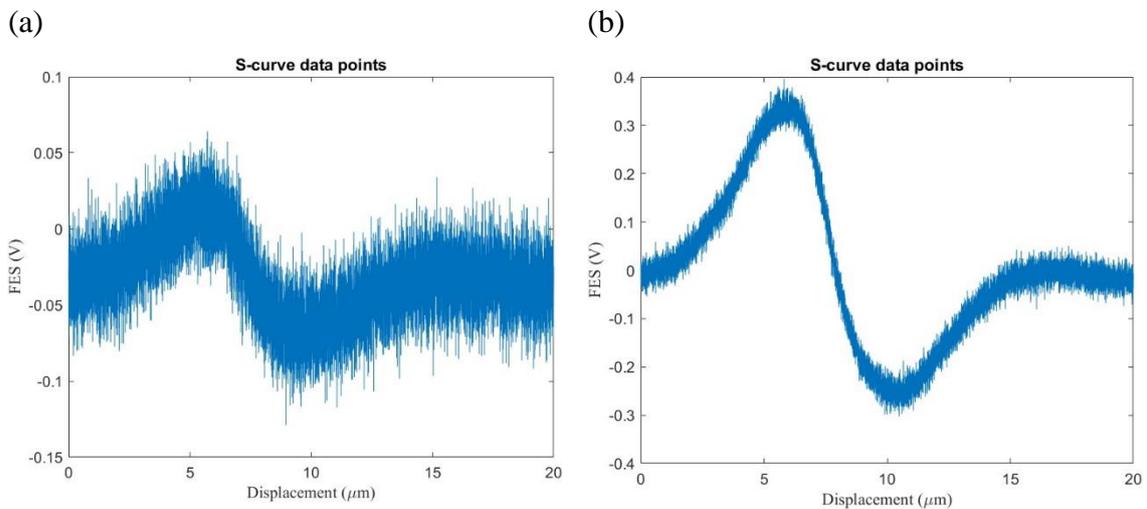
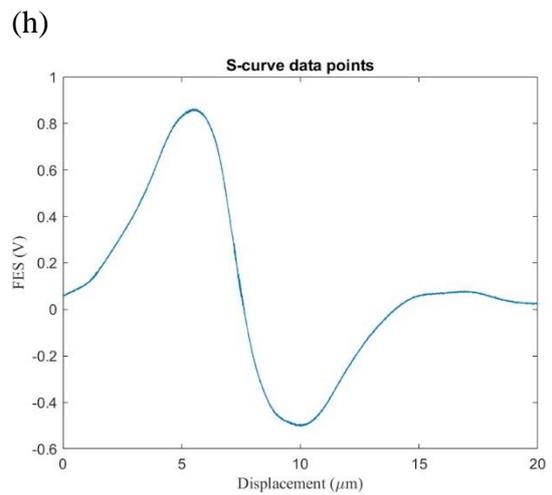
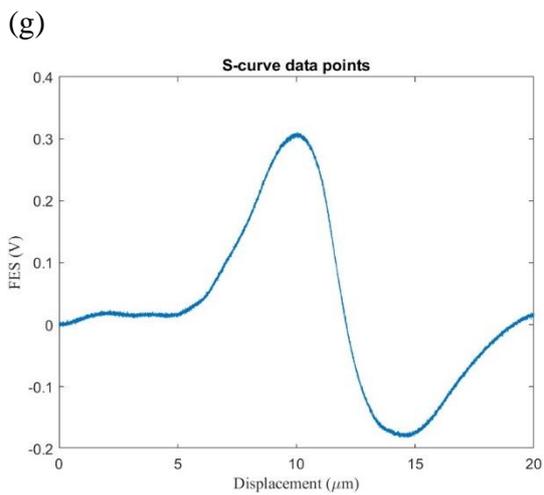
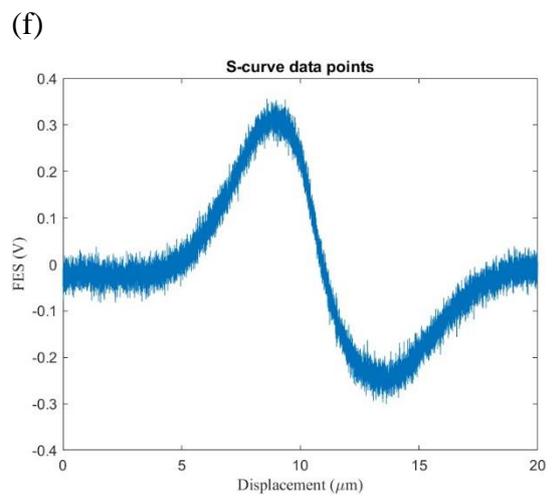
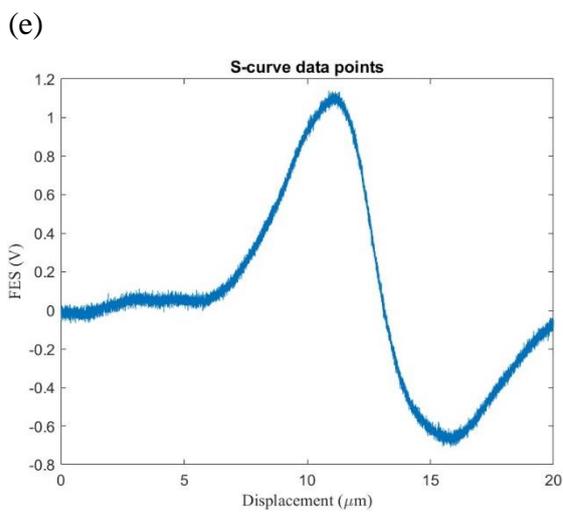
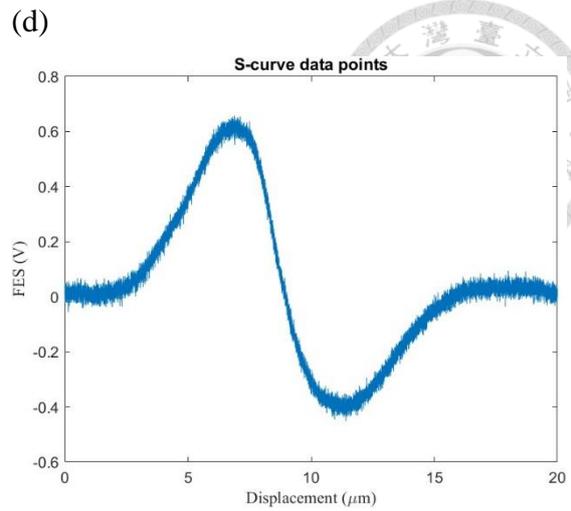
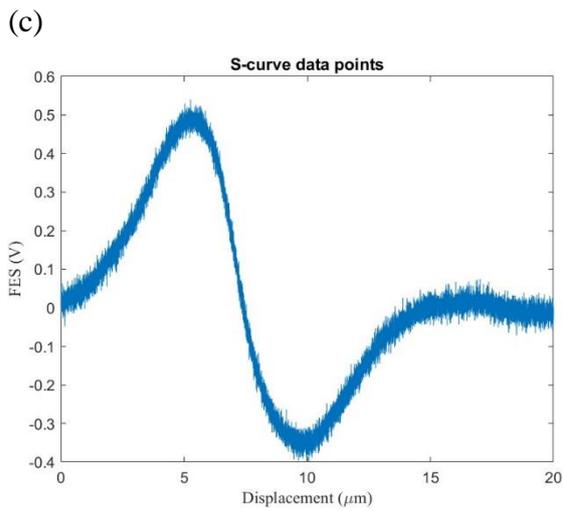


圖 4.5 鍍金層厚度分別為 10 nm(上)、50 nm(左下)、100 nm(右下)的鍍金玻片。

以上述 9 種樣品進行單點 S-curve 量測實驗，將樣品放置在壓電平台上，調整讀取頭焦點逐漸接近至 S-curve 電壓開始變化處，設定壓電總行程為 $20\ \mu\text{m}$ ，分為 32768 個點進行紀錄。各樣品的 S-curve 圖形如圖 4.6(a)~(i)所示。





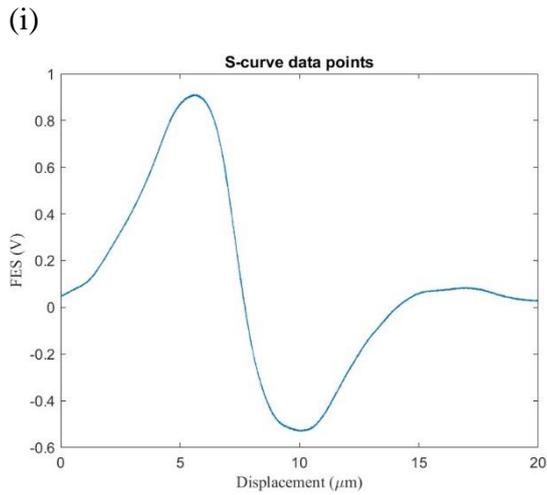
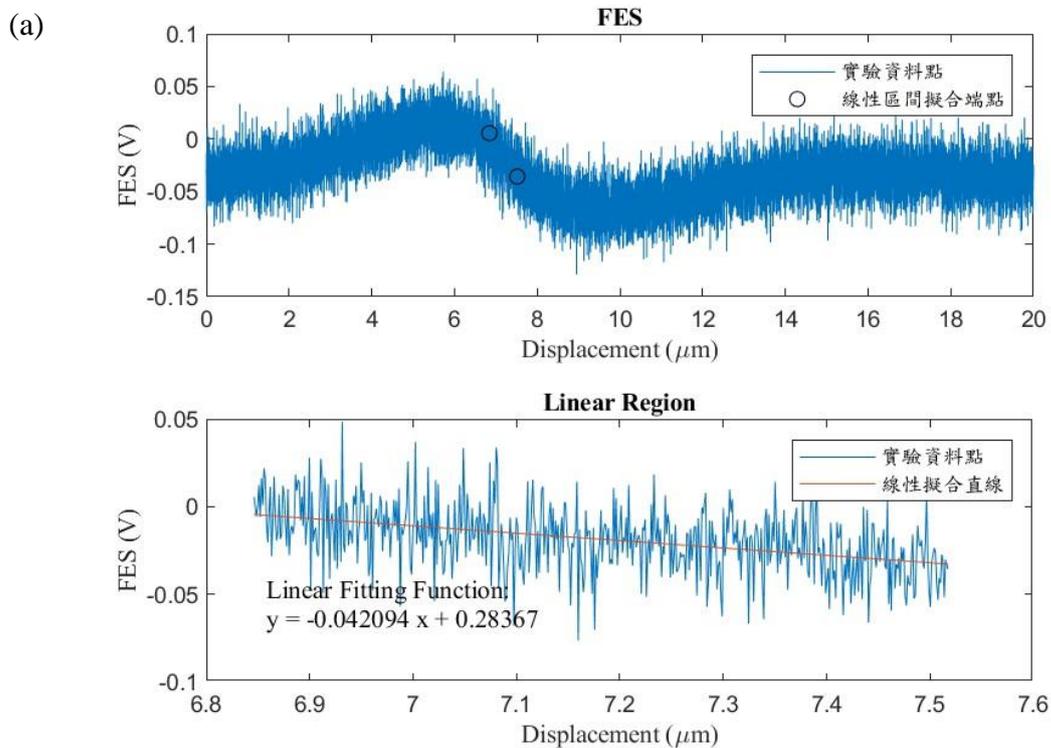


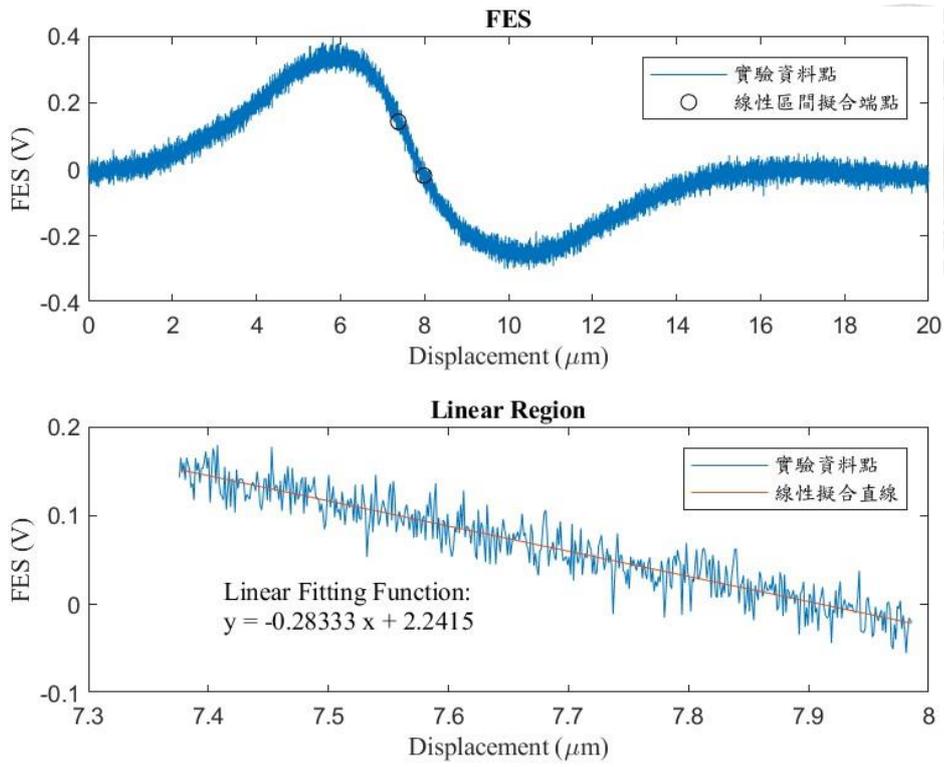
圖 4.6 規格反射率為(a)5%、(b)40%、(c)60%、(d)80%的青板玻璃，與 (e)RR6070、(f) R2L2S1P1 鍍鉻層，以及(g)10 nm、(h) 50 nm 和(i) 100 nm 鍍金玻片之 S-curve 關係圖。

4.2.1 數據分析

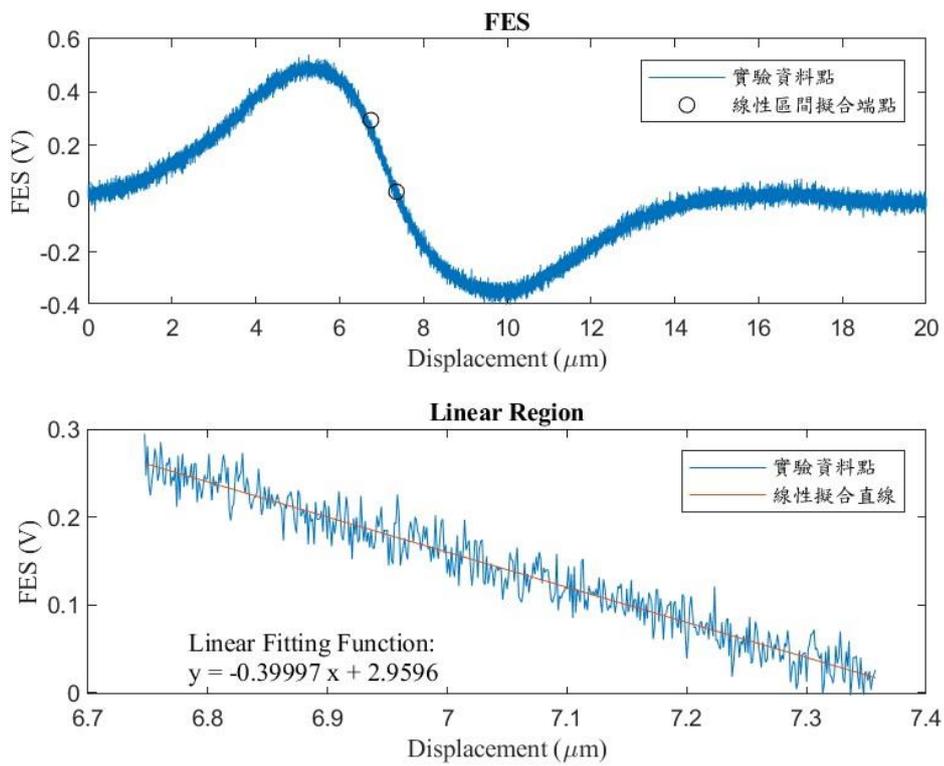
從上述實驗結果樣品的 S-curve 線性區間中取 500 個點，透過 Matlab 進行線性擬合找出各樣品的線性區間斜率，如圖 4.7 所示。



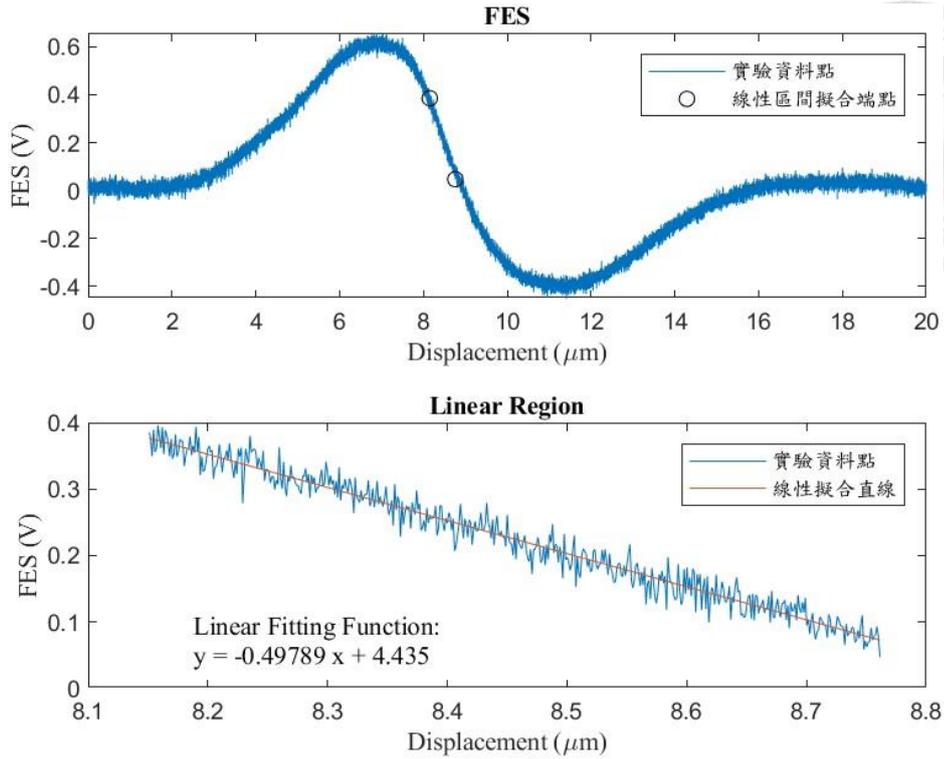
(b)



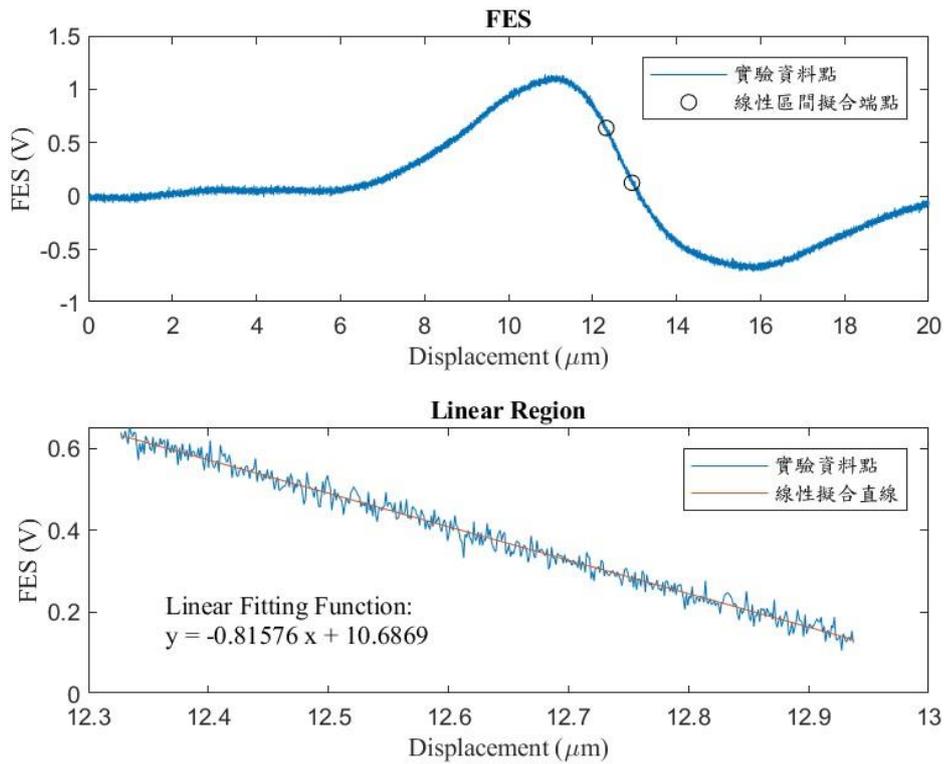
(c)



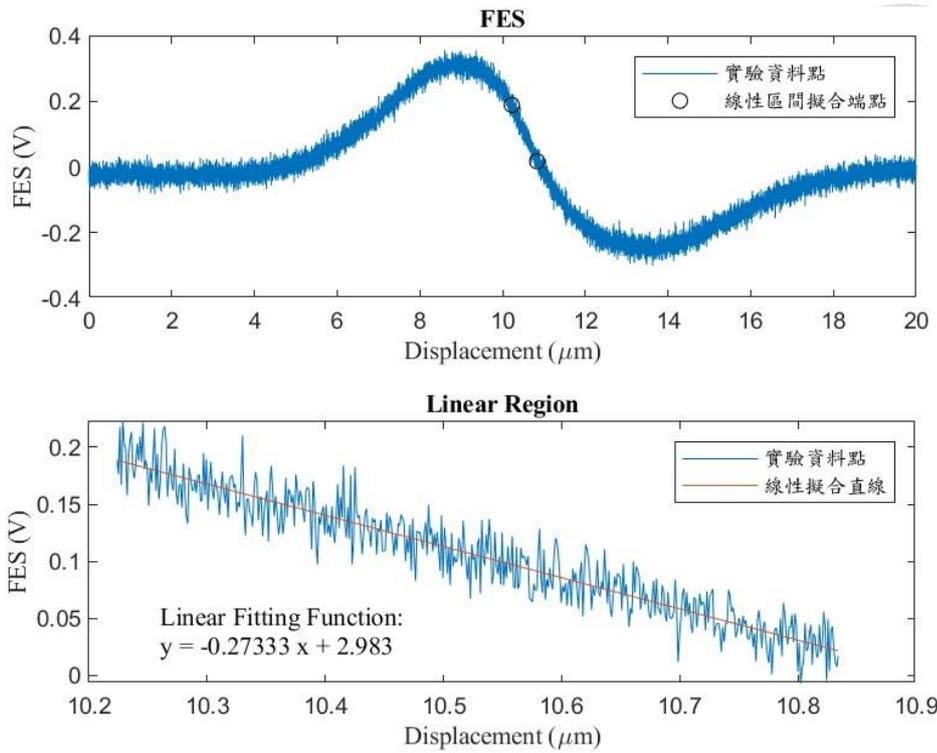
(d)



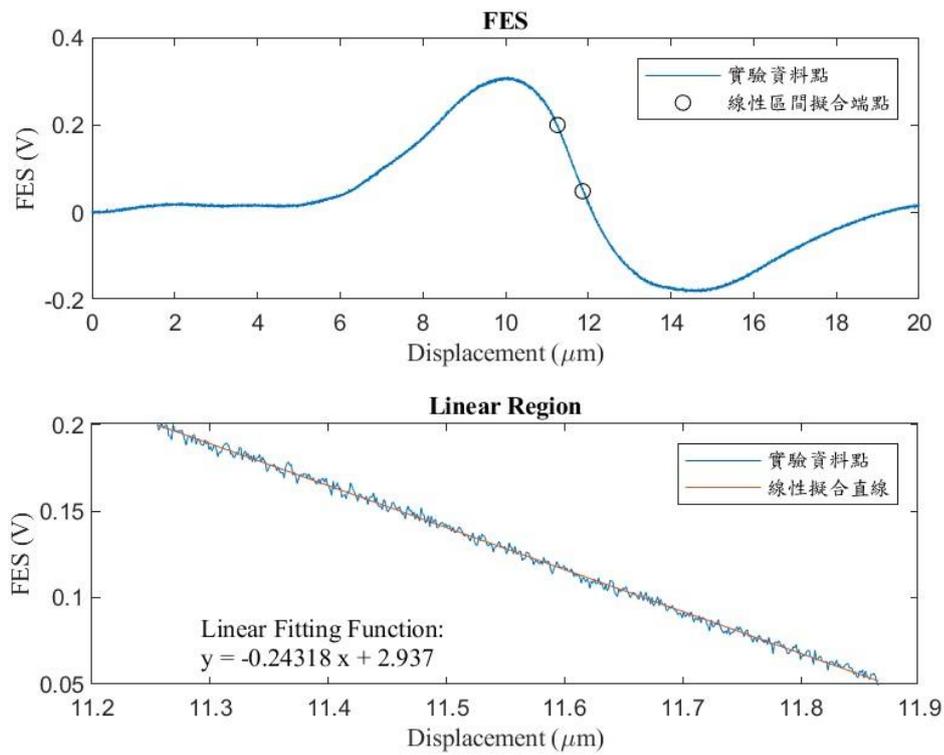
(e)



(f)



(g)



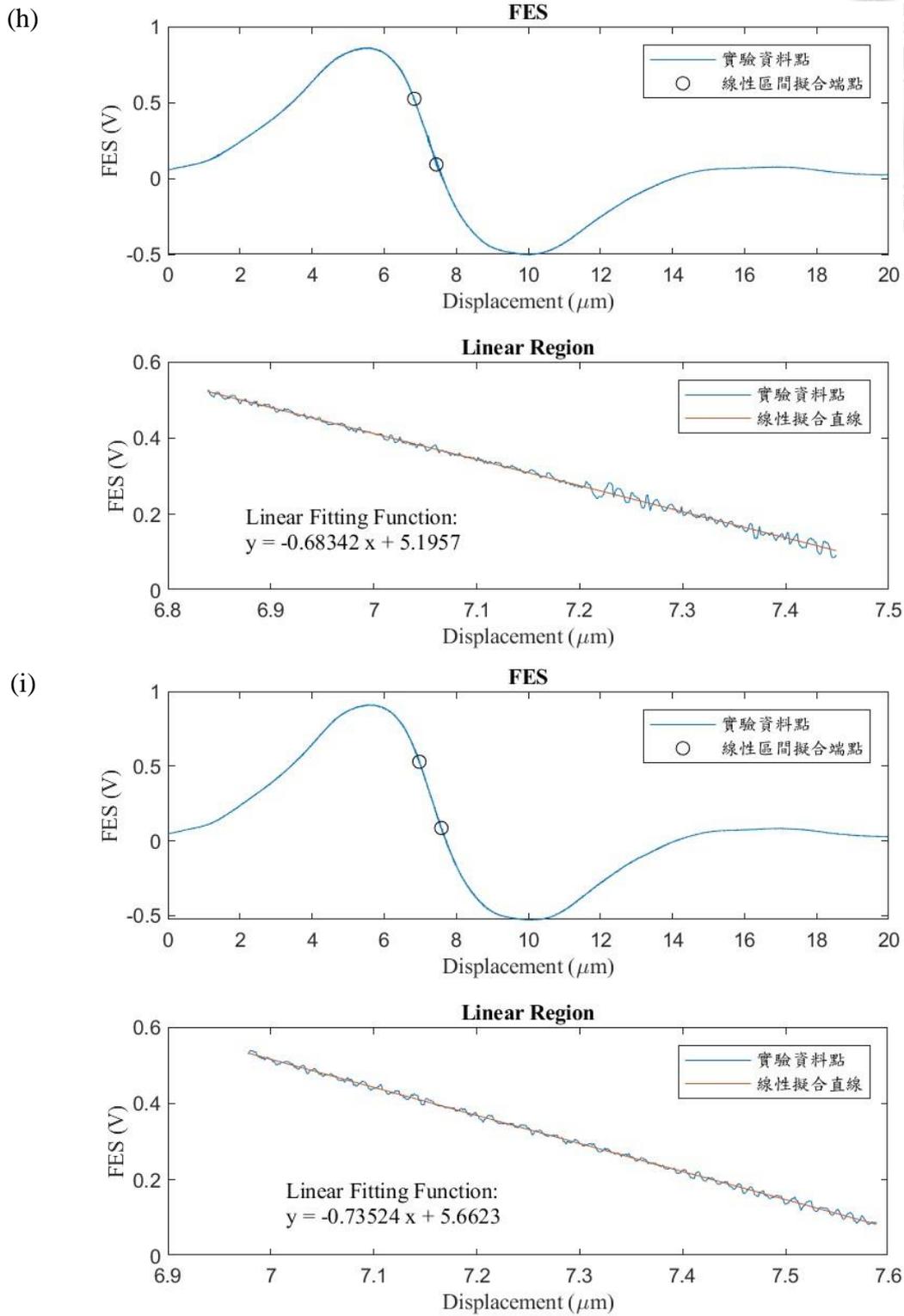


圖 4.7 規格反射率為(a)5%、(b)40%、(c)60%、(d)80%的青板玻璃，與 (e)RR6070、(f) R2L2S1P1 鍍鉻層，以及(g)10 nm、(h) 50 nm 和(i) 100 nm 鍍金玻璃之 S-curve 與線性擬合直線圖。

將已知反射率之樣品的斜率絕對值與 FES 峰對峰值分別與其規格反射率和廠商實測反射率作圖，並找出其線性回歸線計算式和相關係數，其結果如圖 4.8~圖 4.11 所示。

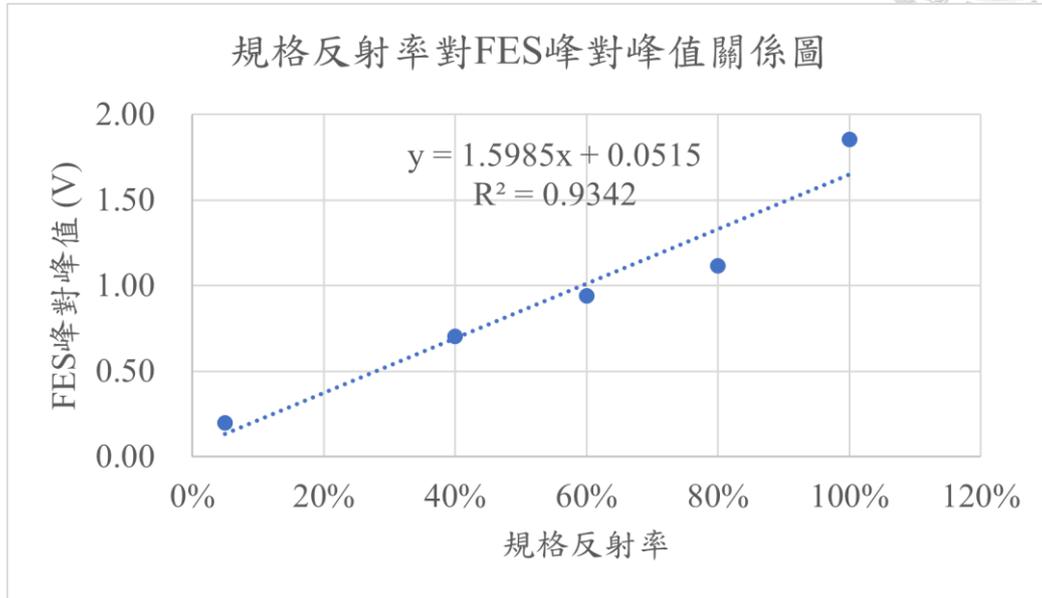


圖 4.8 規格反射率對 FES 峰對峰值關係圖。

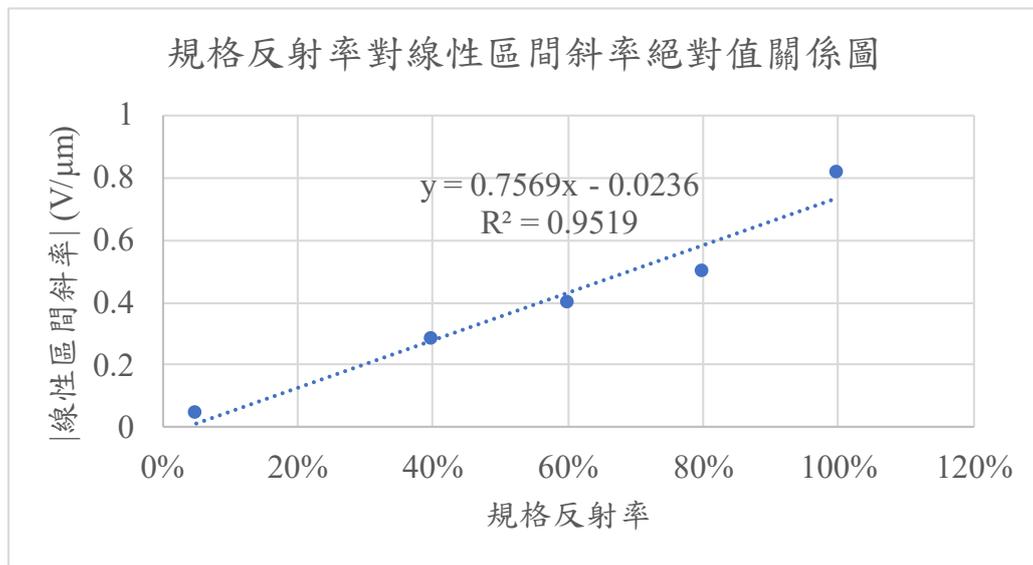


圖 4.9 規格反射率對線性區間斜率絕對值關係圖。

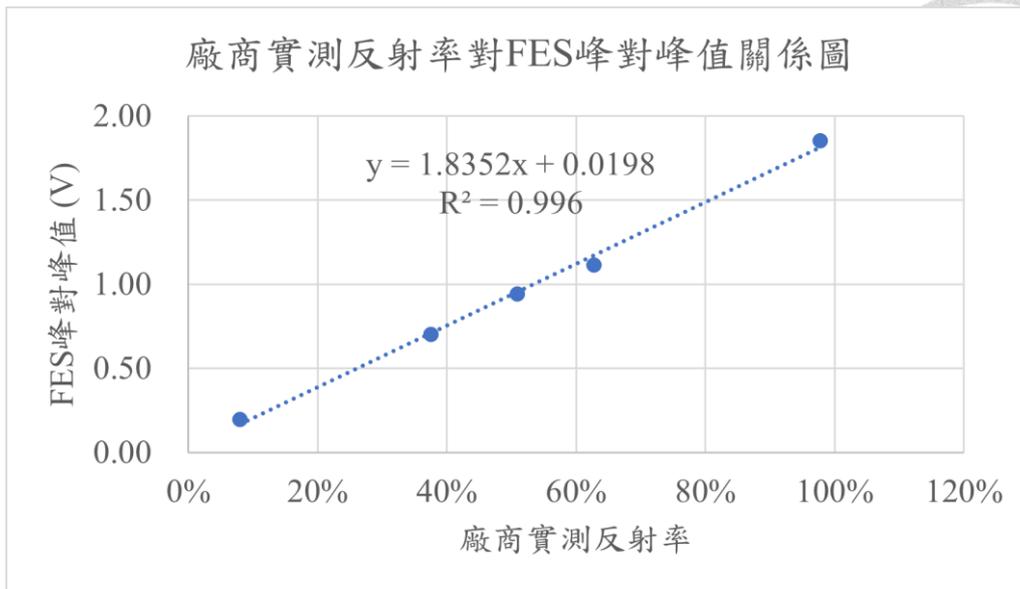


圖 4.10 廠商實測反射率對 FES 峰對峰值關係圖。

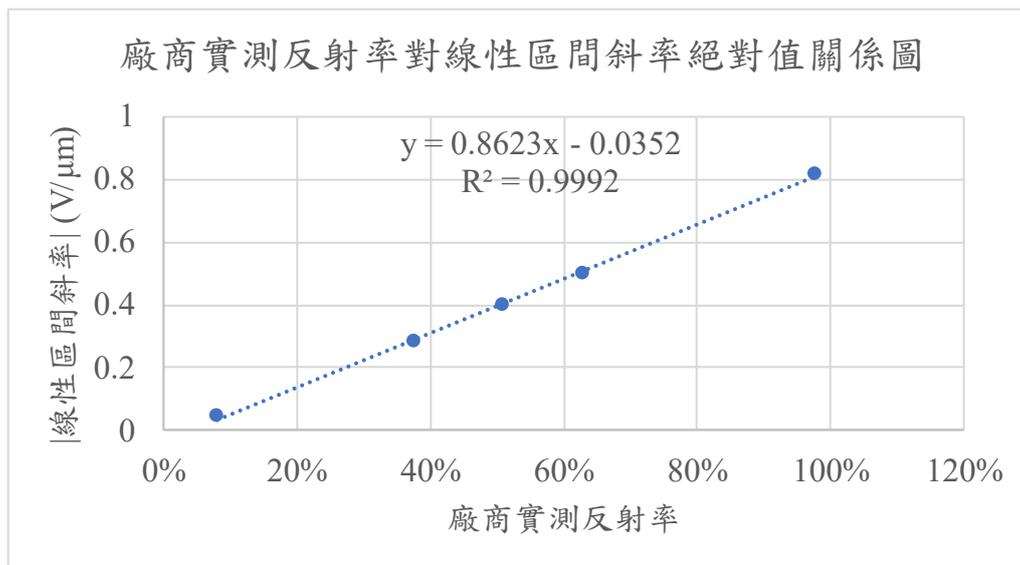


圖 4.11 廠商實測反射率對線性區間斜率絕對值關係圖。

將四種關係式與其相關係數整理如表 2 所示，可以得知利用廠商實測反射率與 FES 線性區間斜率擬和的回歸式相關係數最高。將未知反射率之樣品的 S-curve 斜率 S 帶入回歸式中，便可透過式(4.1)推算未知的樣品反射率 R ，其結果如表 3 所示。

表 2 反射率回歸式相關係數整理。

	規格反射率對 FES 峰對峰值 關係式	規格反射率對 線性區間斜率 關係式	廠商實測反射率 對 FES 峰對峰 值關係式	廠商實測反射率 對線性區間斜率 關係式
相關 係數	0.9342	0.9519	0.996	0.9992

未知樣品反射率對線性區間斜率絕對值的計算式為：

$$R = (|S| + 0.0352)/0.8623 \quad \text{式(4.1)}$$

表 3 各樣品 FES 斜率與廠商實測反射率和推算反射率整理。

樣品名稱	FES 斜率 (V/μm)	廠商實測反射率	實測反射率回歸線 推算反射率 R
青板玻璃 反射 5%	0.042094	8.00%	8.96%
青板玻璃 反射 40%	0.283328	37.51%	36.94%
青板玻璃 反射 60%	0.399974	50.87%	50.47%
青板玻璃 反射 80%	0.49789	62.77%	61.82%
紅光反射鏡 RR6070	0.815756	97.72%	98.68%
R2L2S1P1 鍍鉻層	0.273331	未知	35.78%
鍍金玻片 100 nm	0.735234	未知	89.35%
鍍金玻片 50 nm	0.6834186	未知	83.34%
鍍金玻片 10 nm	0.2431806	未知	32.28%

4.3 雷射加工參數分析

本實驗首先根據不同脈衝頻率、光圈大小對 100 nm 厚鍍金玻片進行 1 s 時長的單點雷射加工，加工完後記錄顯微鏡 CCD 影像和以 2 Hz 線掃描速度、每條線 256 個像素點用紅光讀取頭進行定高度 FES 掃描成像，其結果整理如圖 4.12~圖 4.19 所示，可以看到光圈設定值為 0% 的成果對加工區域的破壞性最小，能完成最精確的加工成果，在光圈設定值 $\geq 10\%$ 的條件下，雷射的能量過強會對加工點周遭造成破壞。不同脈衝頻率與光圈大小的雷射功率與其所產生的加工點大小整理如表 4 所示。

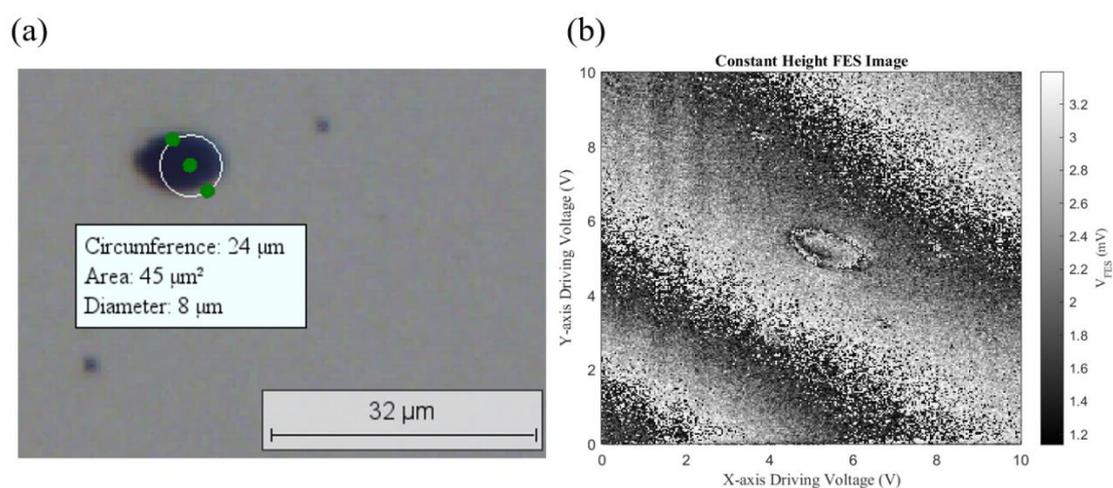


圖 4.12 設定脈衝頻率 1000 Hz、光圈設定值 0% 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

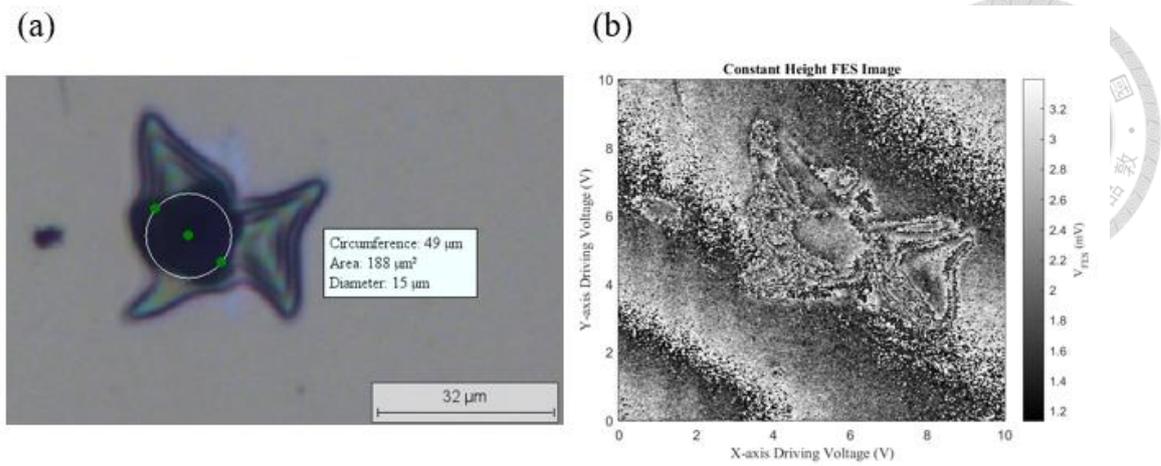


圖 4.13 設定脈衝頻率 1000 Hz、光圈設定值 10% 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

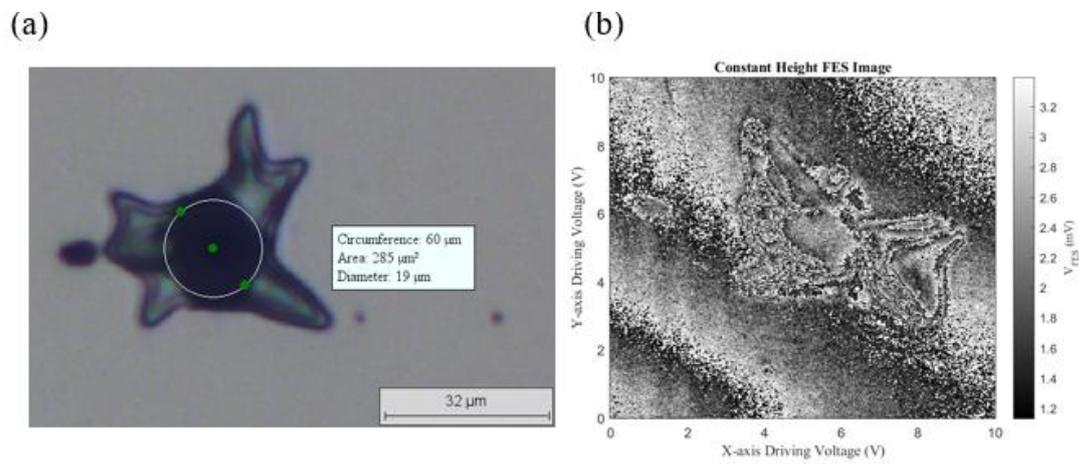


圖 4.14 設定脈衝頻率 1000 Hz、光圈設定值 30% 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

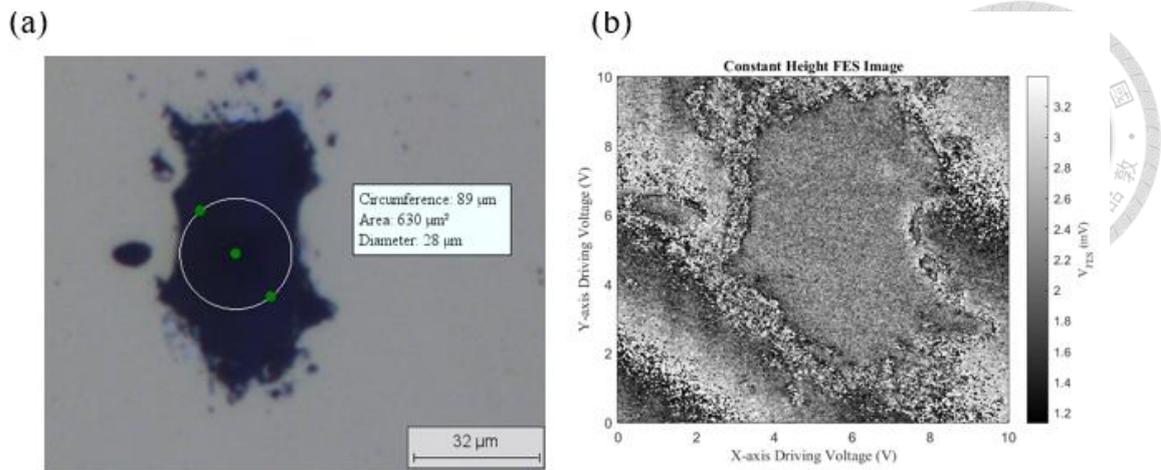


圖 4.15 設定脈衝頻率 1000 Hz、光圈設定值 50% 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

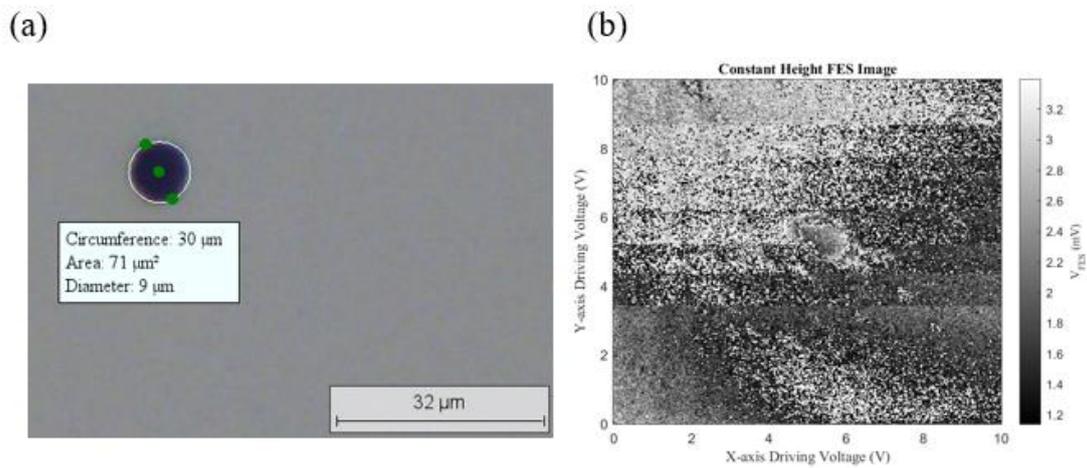


圖 4.16 設定脈衝頻率 2000 Hz、光圈設定值 0% 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

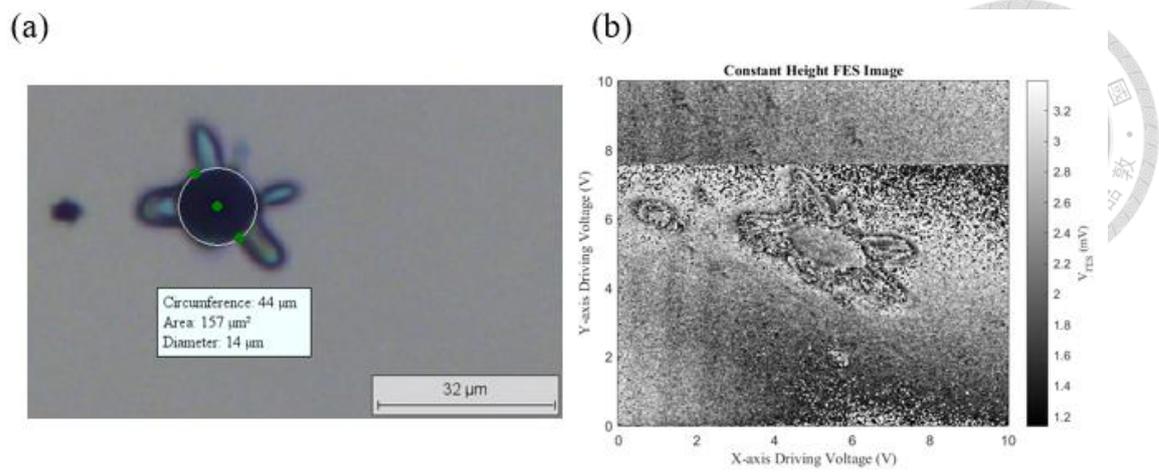


圖 4.17 設定脈衝頻率 2000 Hz、光圈設定值 10% 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

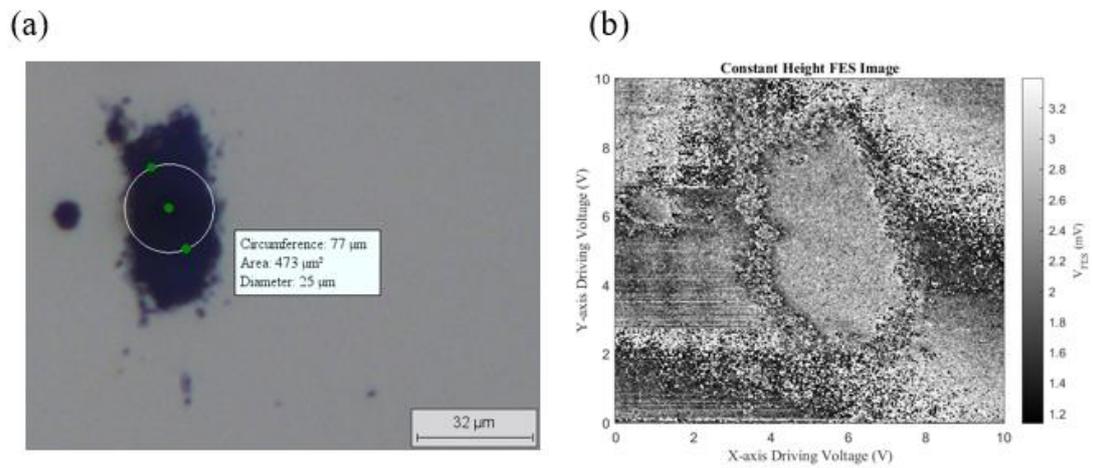


圖 4.18 設定脈衝頻率 2000 Hz、光圈設定值 30% 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

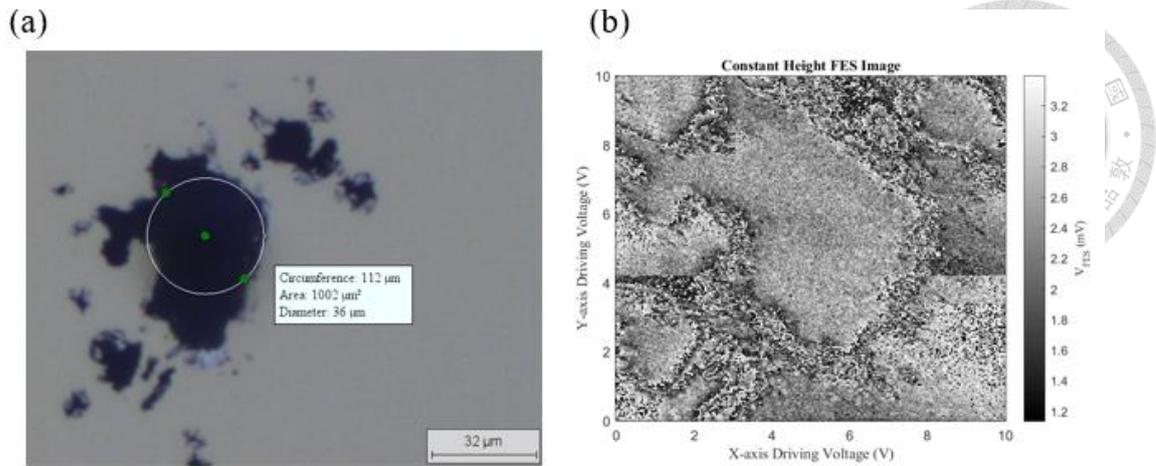


圖 4.19 設定脈衝頻率 2000 Hz、光圈設定值 50% 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

表 4 雷射加工參數與加工點大小及加工功率整理。

光圈設定值		0%	10%	30%	50%	
脈衝頻率	1000 Hz	加工點大小	8 μm	15 μm	19 μm	28 μm
		加工功率	1.2 mW	3.4 mW	7.8 mW	12.2 mW
	2000 Hz	加工點大小	9 μm	14 μm	25 μm	36 μm
		加工功率	2.4 mW	6.8 mW	15.6 mW	24.4 mW

從上述結果可看到，當雷射加工功率高於一定程度時，會在加工點左側產生一個較小的殘影，推測出現此殘影的原因是雷射加工時的入射角度並非垂直樣品表面，造成雷射從樣品下方射入時，在鍍金層與蓋玻片的玻璃基層介面產生反射，再次於玻璃層內反射後於原加工點左側產生殘影。因為雷射經反射後能量衰減，造成的殘影痕跡會比原加工點尺寸較小，如圖 4.20 所示。透過降低脈衝雷射的加工功率可以避免此殘影產生。

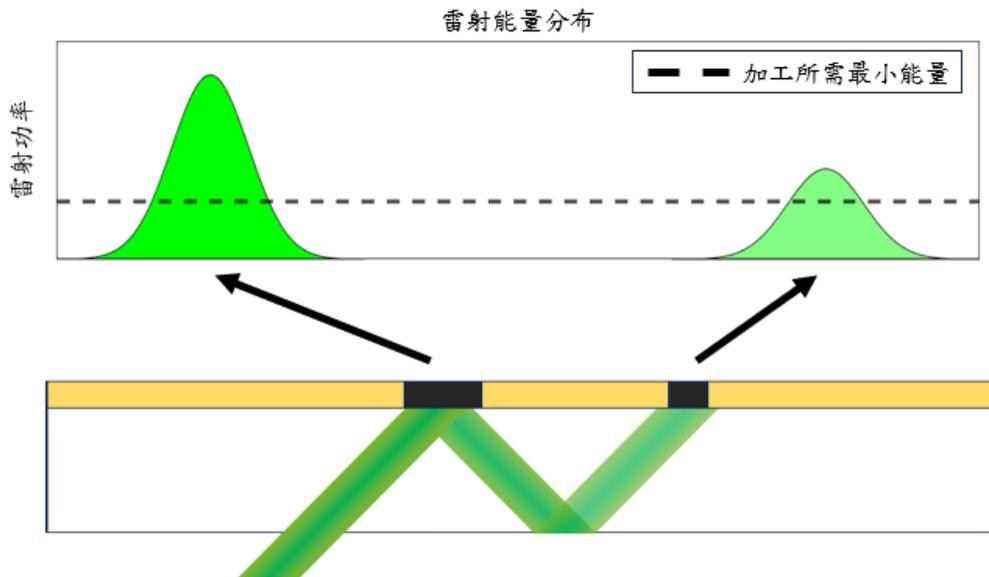


圖 4.20 雷射加工殘影產生原因示意圖。

接著固定光圈設定值為 0%，更改脈衝頻率，對 100 nm 厚鍍金玻片進行雷射畫線測試。透過固定加工起點和終點，從 XY 軸驅動電壓皆為 0 V 的位置開始，到兩軸驅動電壓皆為 10 V 的位置，從加工範圍的左下向右上畫線，設定不同畫線時長進行不同線速度的加工，並記錄顯微鏡 CCD 影像和以 2 Hz 的線掃描速度、每條線 256 個像素點進行紅光讀取頭的定高度 FES 掃描成像，其結果整理如圖 4.21~圖 4.32 所示。

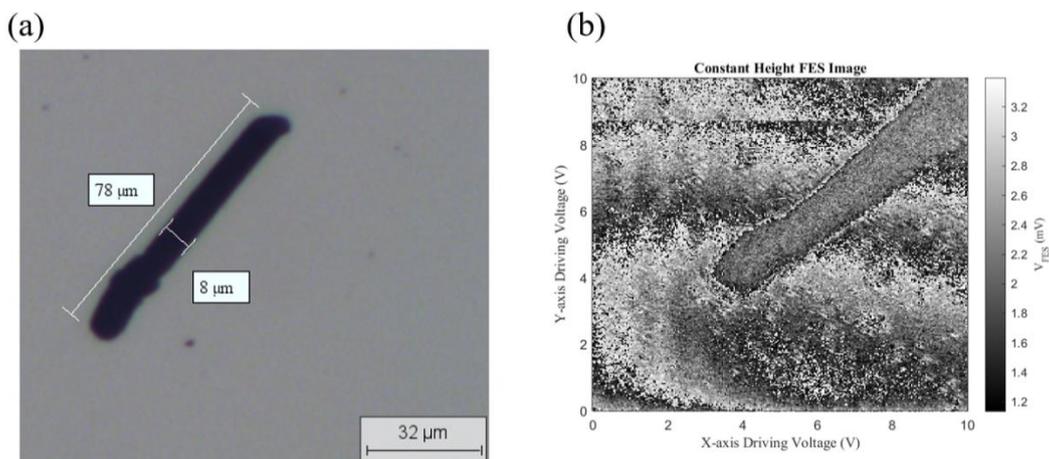


圖 4.21 設定脈衝頻率 2000 Hz、加工時長 1 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

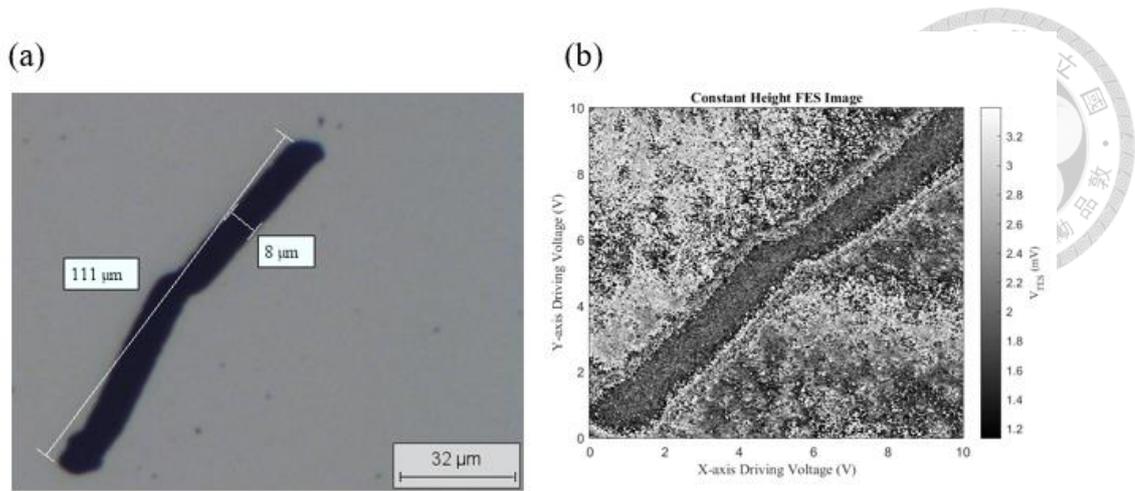


圖 4.22 設定脈衝頻率 2000 Hz、加工時長 3 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

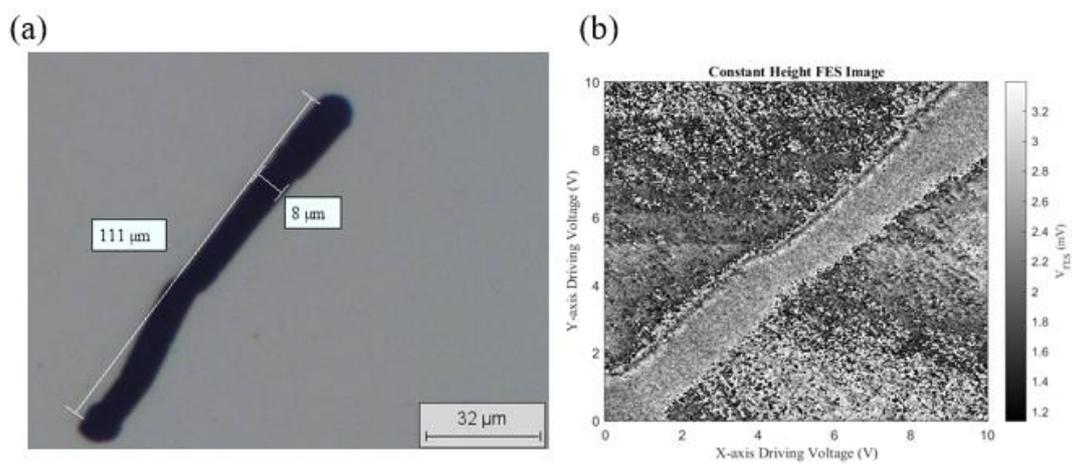


圖 4.23 設定脈衝頻率 2000 Hz、加工時長 5 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

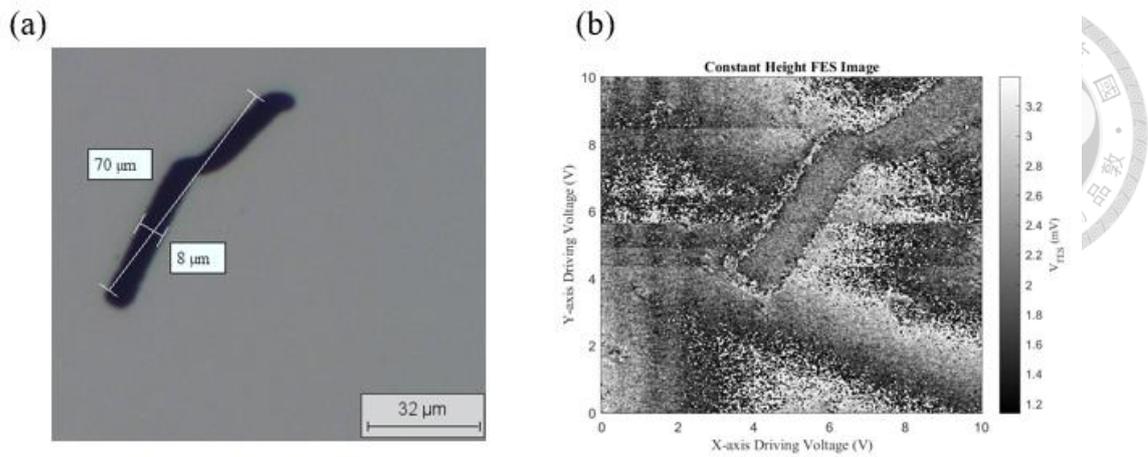


圖 4.24 設定脈衝頻率 1000 Hz、加工時長 1 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

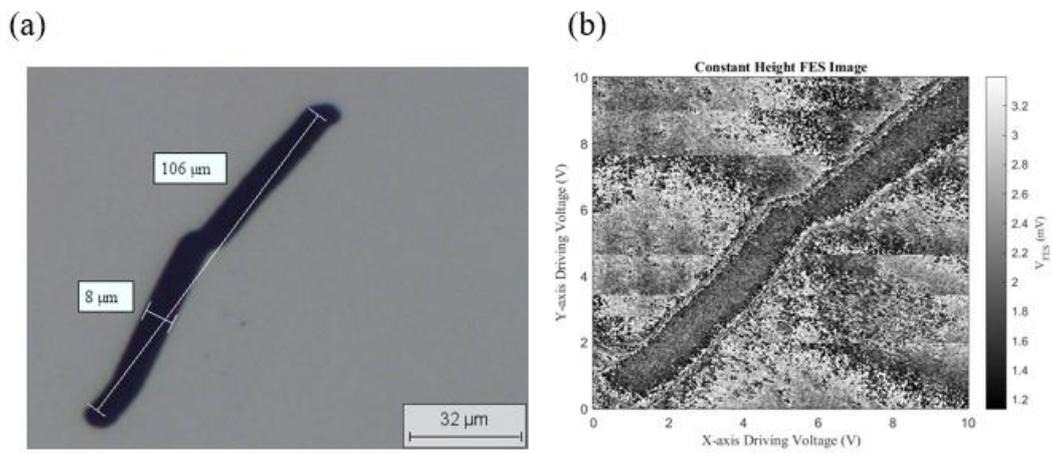


圖 4.25 設定脈衝頻率 1000 Hz、加工時長 3 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

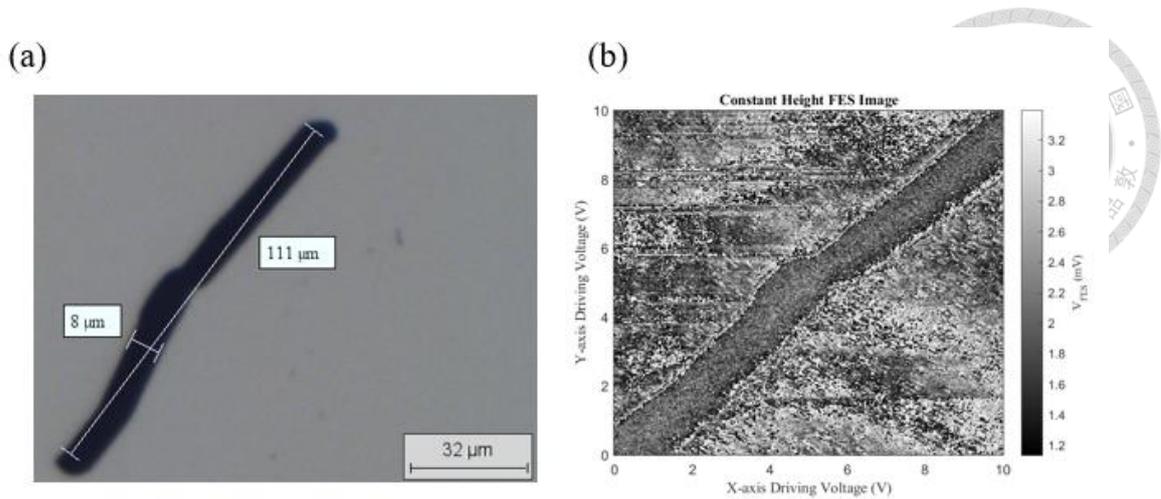


圖 4.26 設定脈衝頻率 1000 Hz、加工時長 5 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

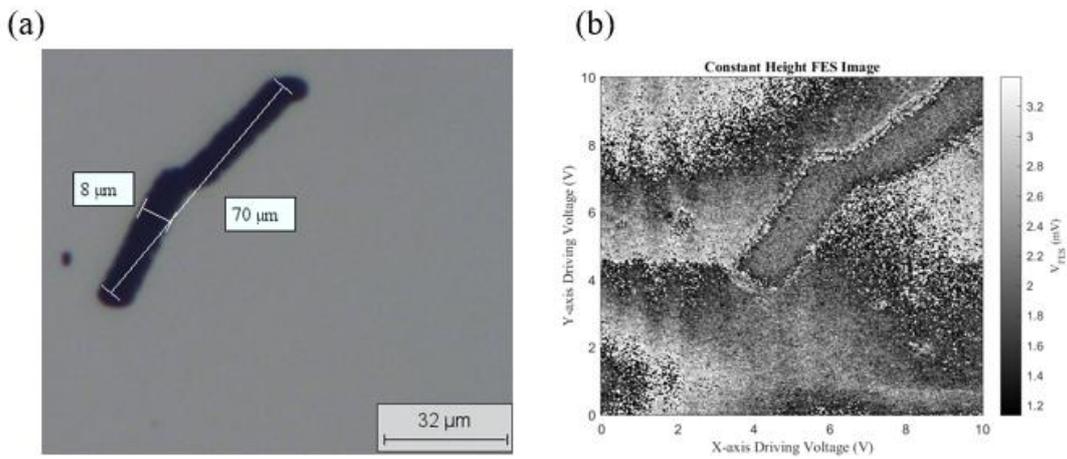


圖 4.27 設定脈衝頻率 500 Hz、加工時長 1 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

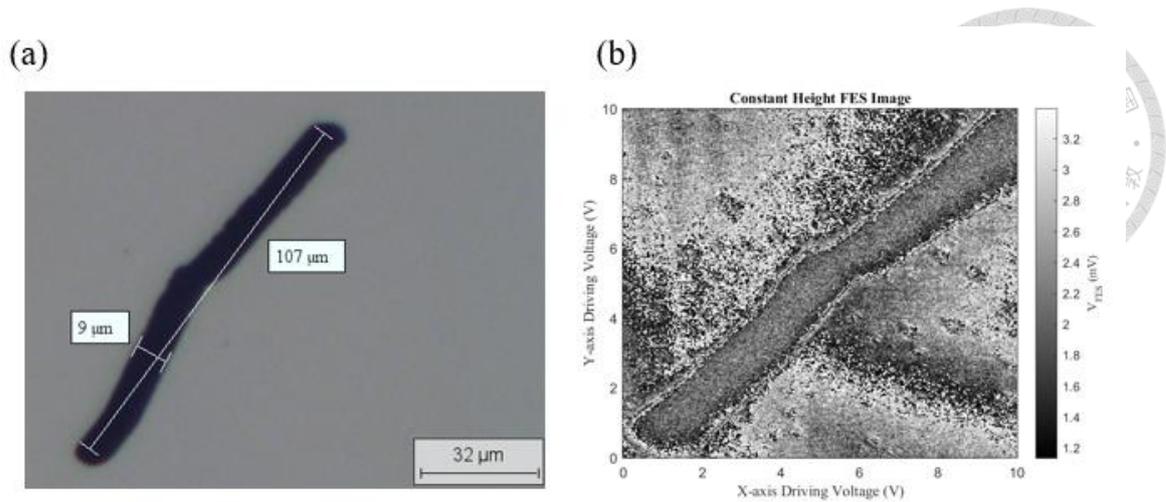


圖 4.28 設定脈衝頻率 500 Hz、加工時長 3 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

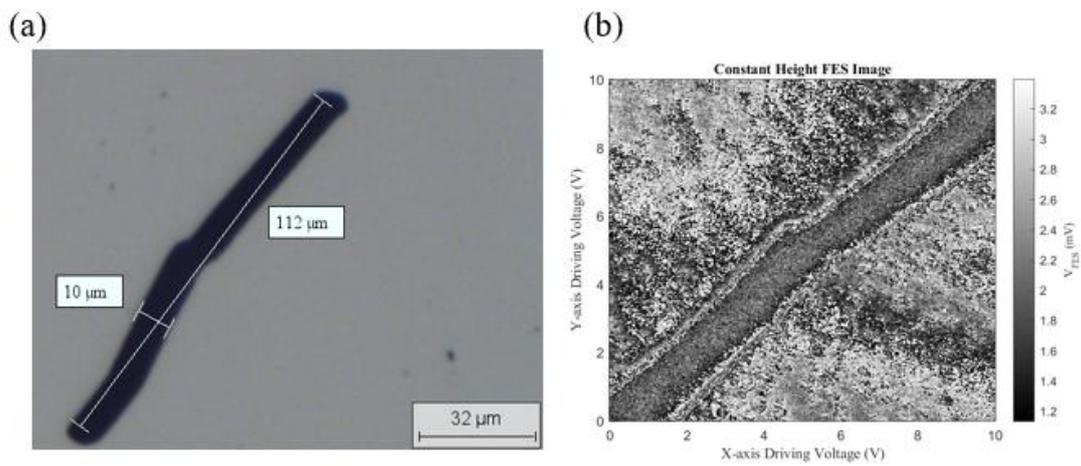


圖 4.29 設定脈衝頻率 500 Hz、加工時長 5 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

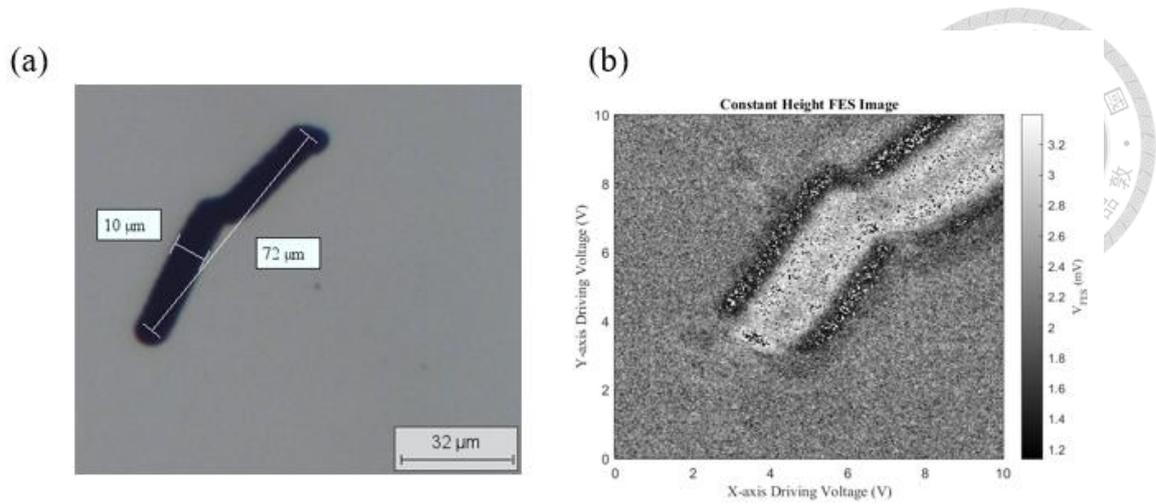


圖 4.30 設定脈衝頻率 100 Hz、加工時長 1 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

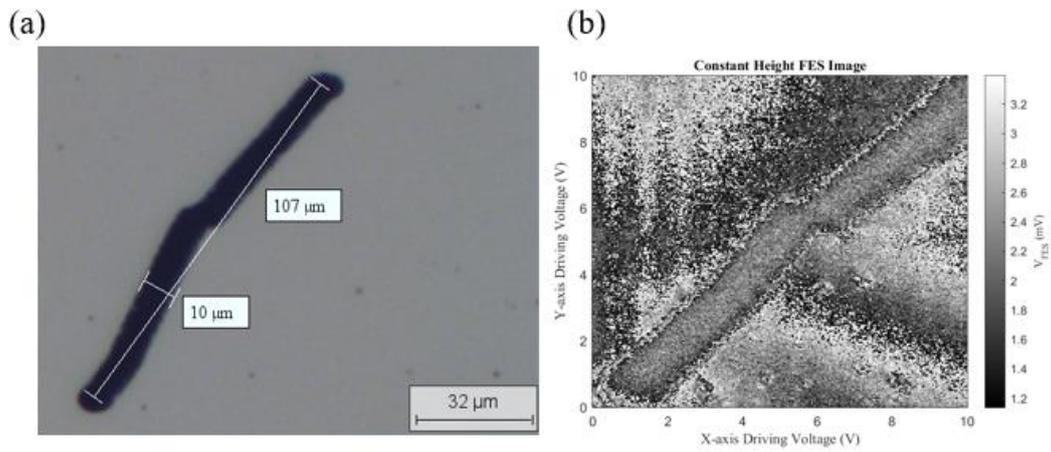


圖 4.31 設定脈衝頻率 100 Hz、加工時長 3 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

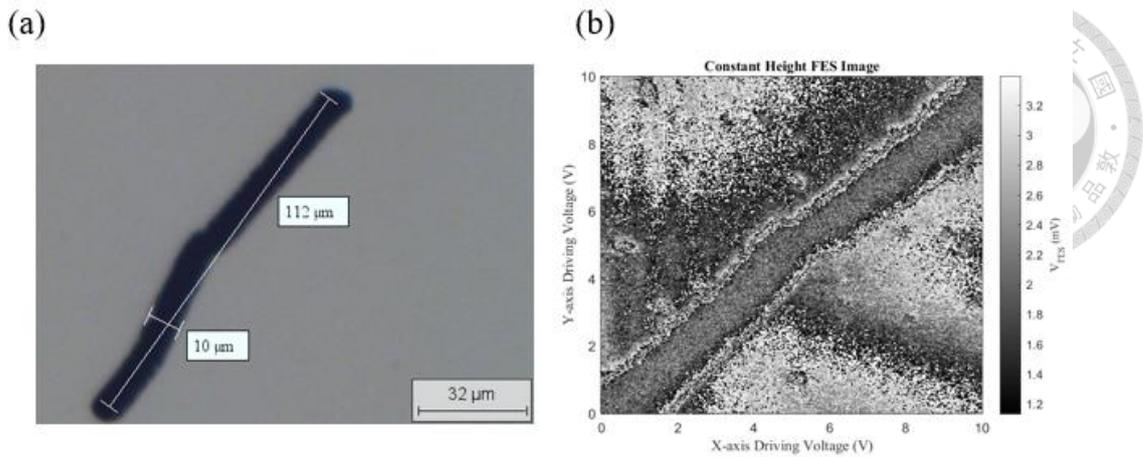


圖 4.32 設定脈衝頻率 100 Hz、加工時長 5 s 的加工結果(a)CCD 影像與(b)紅光讀取頭 FES 掃描成像圖。

加工範圍對角線長度根據圖 4.3 的影像測量約 120 μm，以此將不同加工時長轉換成對應的線速度，整理如表 5 所示。

表 5 畫線測試之加工時長換算壓電平台移動線速度整理。

加工時長	1 s	3 s	5 s
換算線速度(μm/s)	120	40	24

由於脈衝雷射開關反應時間有一定的延遲，導致壓電平台開始移動時，脈衝雷射還沒開啟，此延遲約在 0.3 ~ 0.4 秒之間。壓電平台移動線速度越快，因延遲問題產生的未加工線段越長，當設定加工時長為 1 s 時，加工線段約少了 $120 \mu\text{m/s} \times 0.4 \text{ s} = 48 \mu\text{m}$ ，造成如圖 4.30 的結果，實際加工線段僅約 $120 - 48 = 72 \mu\text{m}$ 長。當加工時間越長，線速度越慢，壓電平台每一步的移動距離縮小，左下角的未加工區域便越短，如圖 4.32 所示，當畫線時長為 5 s 時，掃描成像中已看不到有線段缺失，實際缺失線段約 8 μm。

透過圖 4.33 的雷射廠商提供之光圈設定值與實際功率衰減比例圖和雷射脈衝能量值可以計算出不同脈衝頻率和光圈大小下的平均雷射加工功率，將上述

結果所繪製的線段寬度和依加工參數計算出來的雷射加工功率整理如表 6 所示，可以看出加工功率對加工線寬並無明顯影響，CCD 影像中的線寬和誤差落在 $9 \pm 1 \mu\text{m}$ 之間。

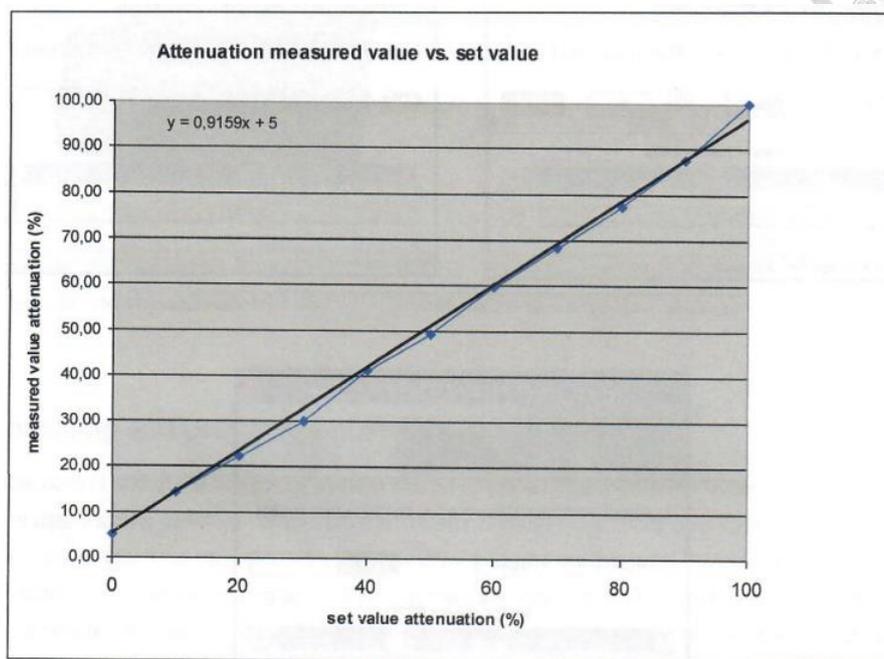


圖 4.33 光圈設定值與實際功率衰減比例圖。

雷射脈衝能量值約為 $24.00 \mu\text{J}$ ，光圈設定 0% 時的實際功率衰減比例約原始值的 5%，則雷射加工的平均功率為：

$$\text{平均加工功率} = \text{脈衝能量} \times \text{脈衝頻率} \times \text{光圈功率衰減值} \quad \text{式(4.2)}$$

表 6 雷射加工參數與平均加工功率和加工線寬整理。

脈衝頻率 \ 加工時長	加工時長			平均加工功率 (mW)
	1 s	3 s	5 s	
2000 Hz	8 μm	8 μm	8 μm	2.4
1000 Hz	8 μm	8 μm	8 μm	1.2
500 Hz	8 μm	9 μm	10 μm	0.6
100 Hz	10 μm	10 μm	10 μm	0.12



4.4 雷射加工掃描實驗

考量加工時的圖案完整性、雷射功率對加工點周邊的破壞程度以及避免加工時殘影的產生，本實驗以脈衝頻率 30 Hz、每條線加工時長 5 s、光圈 0% 設定加工參數，分別對鍍金 100、50、10 nm 奈米的蓋玻片進行雷射加工，以分三段劃線方式刻寫出英文字母 N，其加工路線示意圖如圖 4.34 所示。接著開啟鎖相放大器激振共振物鏡掃描器，以鎖相放大器輸出的 FES 振幅進行掃描，同時在每個像素點各擷取一段 FES 資料點，用於進行高度影像換算。

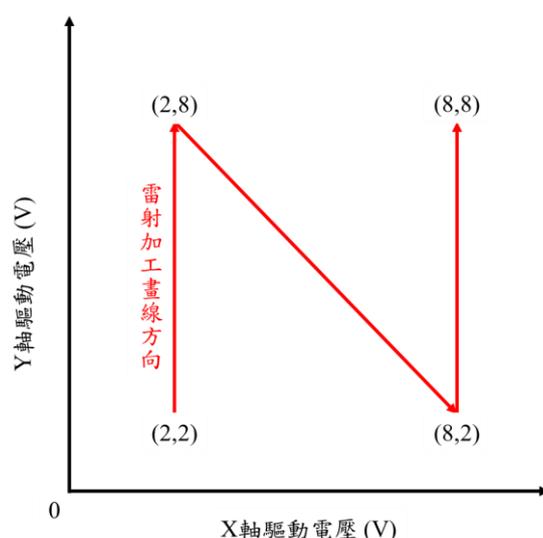


圖 4.34 雷射加工路徑示意圖。

4.4.1 實驗結果

為了得到共振掃描器激振時的位移，將讀取頭聚焦在樣品表面後，開啟鎖相放大器，以頻率 1.620 kHz、振幅 2.000 V 對共振掃描器進行激振，擷取鎖相放大器輸出的 FES 方均根(Root Mean Square, RMS)振幅值，乘以 2 倍後除以圖 4.7 中該樣品的 S-curve 線性區間回歸式斜率，便可得此激振條件下的共振掃描器位移 Δz ，對不同樣品以相同激振條件激振所得到的數據整理如表 7 所示。

表 7 鎖相放大器振幅值與共振掃描器位移整理。

樣品	V_{Amp} (V)	對應位移 (nm)
RR6070	0.155050	380
鍍金玻片 10 nm	0.051245	421
鍍金玻片 50 nm	0.155955	456
鍍金玻片 100 nm	0.160077	435

將上述各樣品的對應位移量進行平均得到423 nm，作為後續計算時的共振掃描器位移量 Δz 。

對 100、50、10 nm 鍍金玻片的雷射加工結果，以 1 Hz 線速度、每條線 128 個像素點由下往上進行共振掃描，其鎖相放大器輸出 RMS 振幅成像如圖 4.35~圖 4.37 所示。

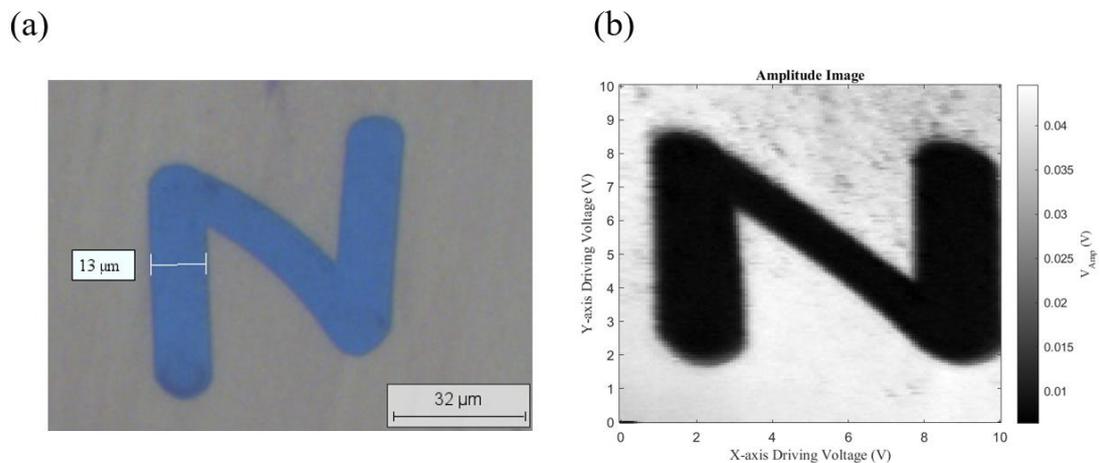


圖 4.35 10 nm 鍍金玻片加工後之(a)CCD 影像與(b)鎖相放大器振幅成像圖。

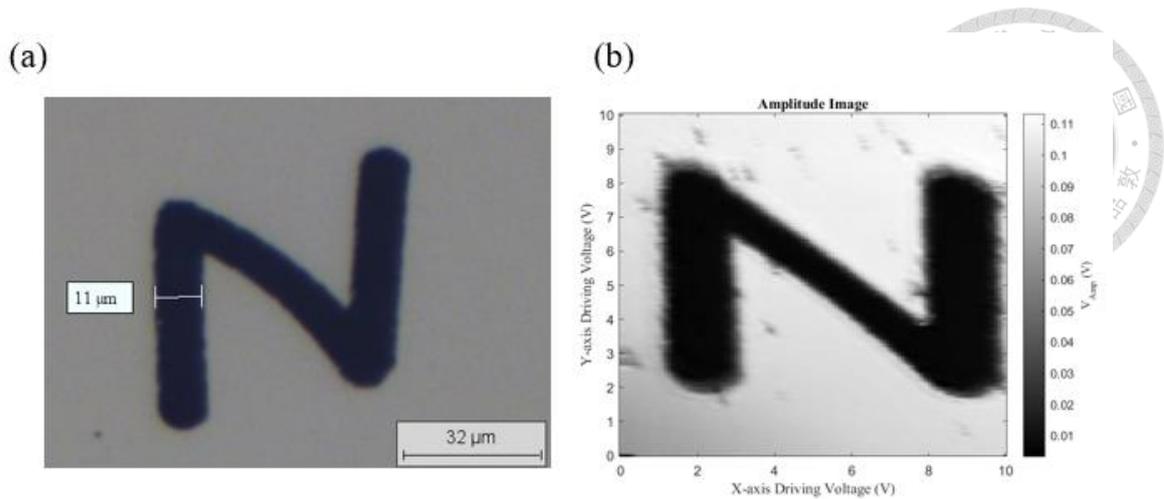


圖 4.36 50 nm 鍍金玻片加工後之(a)CCD 影像與(b)鎖相放大器振幅成像圖。

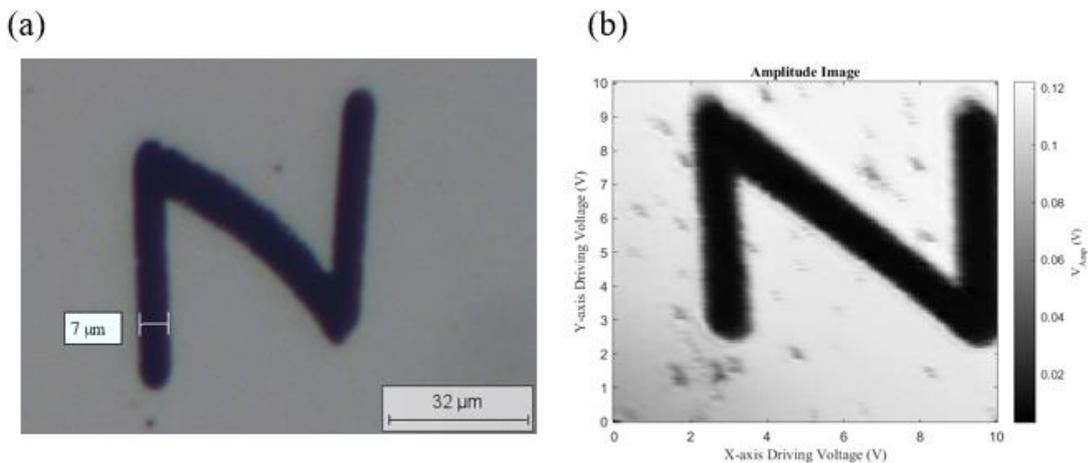


圖 4.37 100 nm 鍍金玻片加工後之(a)CCD 影像與(b)鎖相放大器振幅成像圖。

4.4.2 數據分析

將上述獲得的振幅成像藉由式(3.3)換算成對應反射率，其中 $\Delta z = 0.423 \mu\text{m}$ 、 $a = 0.8623$ 、 $b = -0.0352$ ，參數代入後反射率 R 與鎖相放大器 RMS 振幅 V_{Amp} 的換算公式如式(4.3)所示。

$$R = \frac{2}{a\Delta z} V_{Amp} - \frac{b}{a} = 5.4832 V_{Amp} + 0.0408 \quad \text{式(4.3)}$$

經轉換後的反射率成像如圖 4.38~圖 4.40 所示，在各圖像中取一水平線(圖中藍線)，線上取未加工和雷射加工後的表面各一點(圖中紅圈處)，比較兩者反射率是否合理。

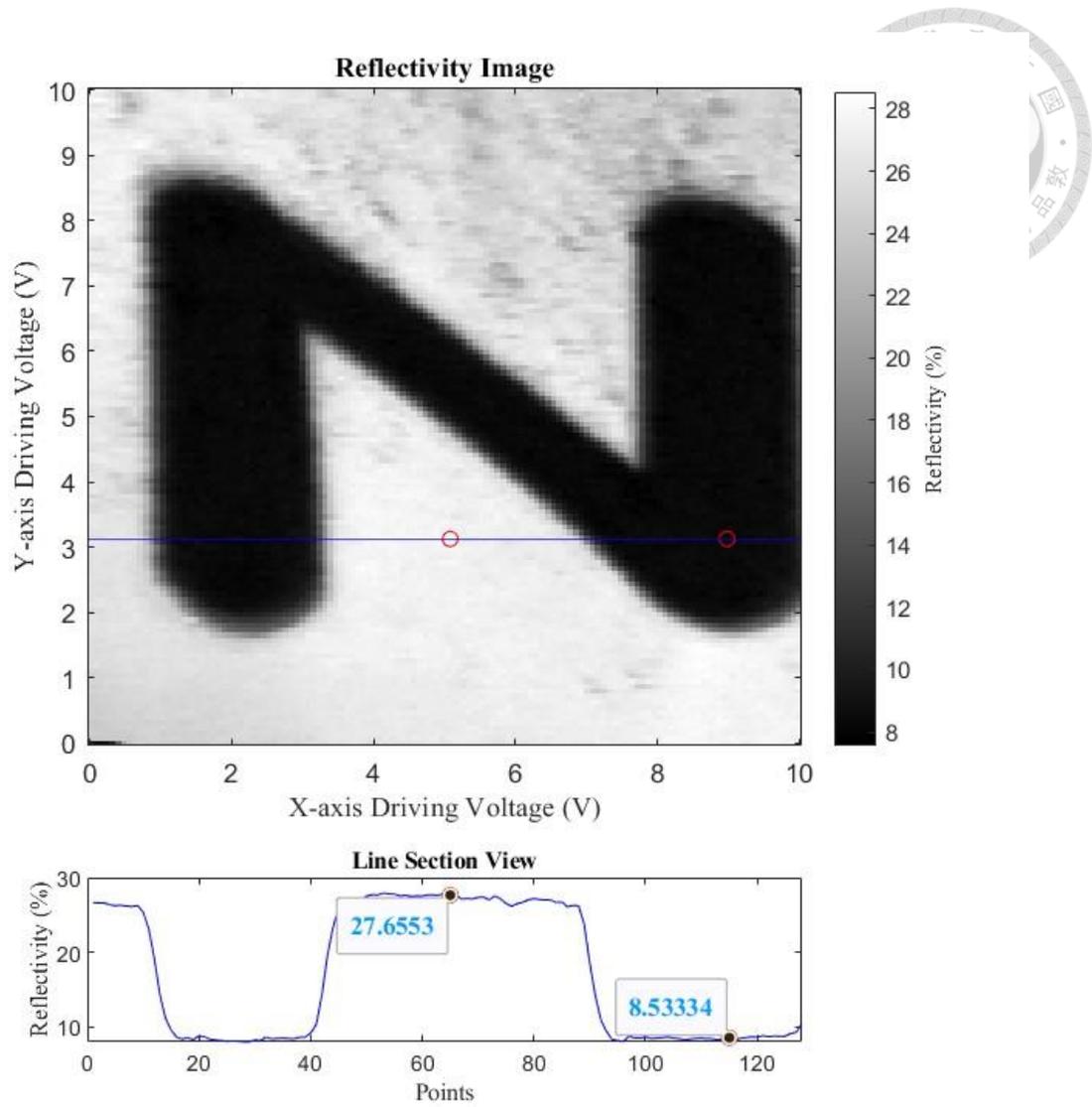


圖 4.38 10 nm 鍍金玻片加工後之反射率成像圖。

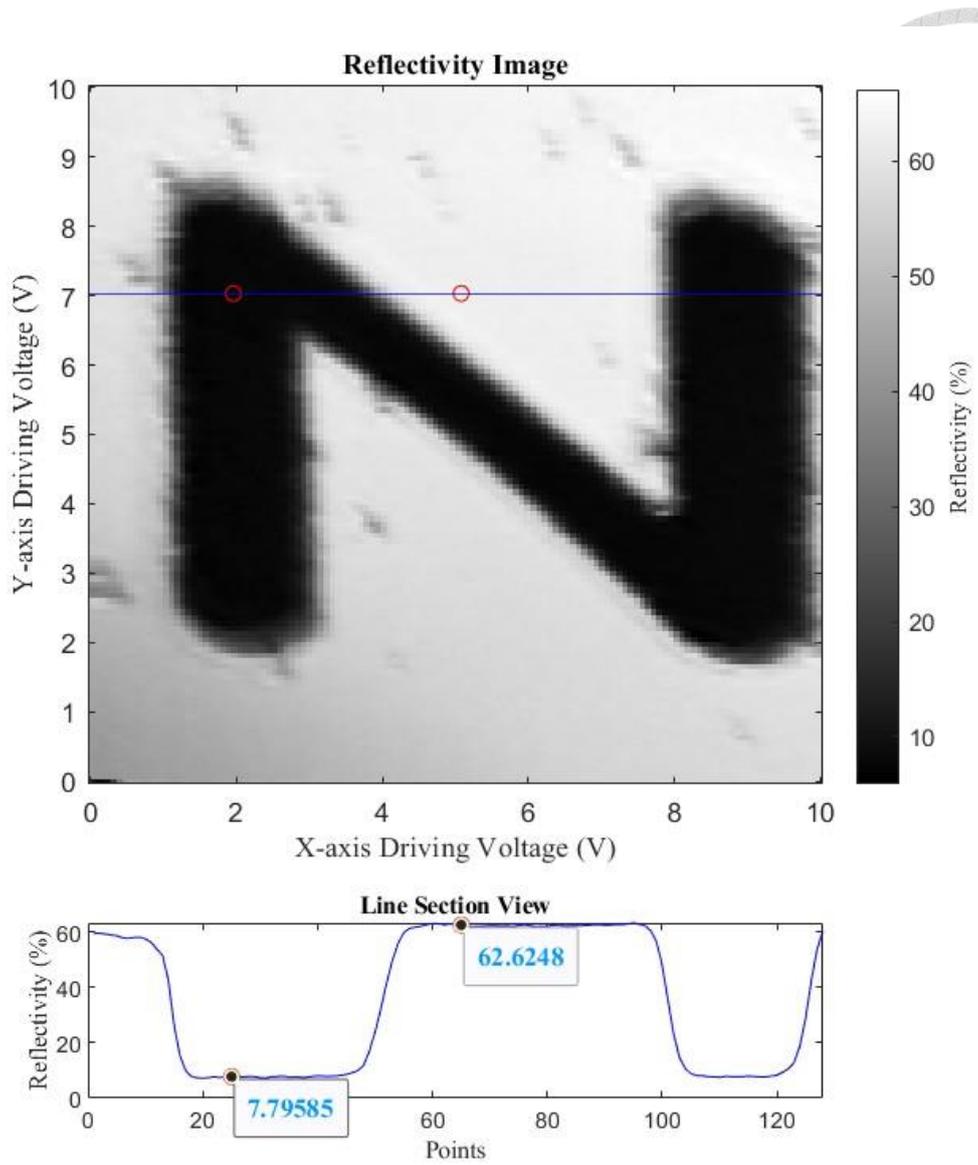


圖 4.39 50 nm 鍍金玻片加工後之反射率成像圖。

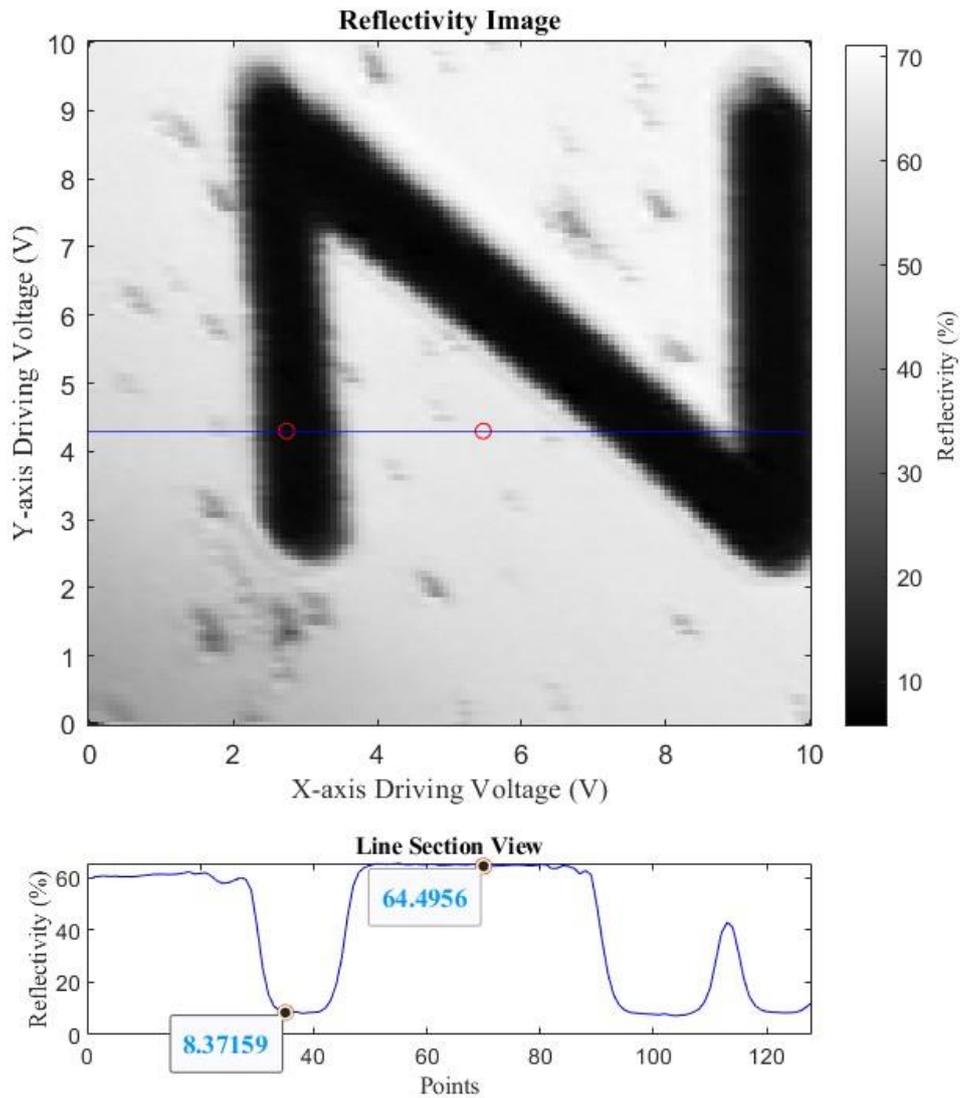


圖 4.40 100 nm 鍍金玻片加工後之反射率成像與截面圖。

從上述結果可以看出，加工後的區域量測到的反射率約 7 ~ 9%，不同樣品所得到的結果較接近，而未經加工的表面反射率相較於表 3 中計算的結果，三者的反射率成像皆比單點 S-curve 量測實驗中線性擬合的反射率數值低，其誤差量在 14% ~ 28% 左右，整理如表 8 所示。

表 8 掃描成像反射率與線性擬合反射率比較。

樣品	掃描成像反射率	線性擬合反射率	誤差
鍍金玻片 10 nm	27.66%	32.28%	14.33%
鍍金玻片 50 nm	62.62%	83.34%	24.86%
鍍金玻片 100 nm	64.50%	89.35%	27.82%

在掃描成像同時，透過 LabView 程式以 FIFO (First In First Out)方式在每個像素以 $43.4 \mu\text{s}/\text{point}$ ($1736 \text{ ticks}/\text{point} @ 40 \text{ MHz Clock}$)的速度取 92 個 FES 資料點，在共振頻率 1620 Hz 下約可擷取 6.5 個週期的共振 FES 資訊，如圖 4.41 所示。將擷取的 FES 進行平均後得到圖形如圖 4.42~圖 4.44 的(a)所示，在加工後的區域與未加工區域各取一點，透過兩點的 FES 平均值和對應的反射率成像換算成相較於讀取頭焦點的高度影像，結果如圖 4.45~圖 4.47 所示。

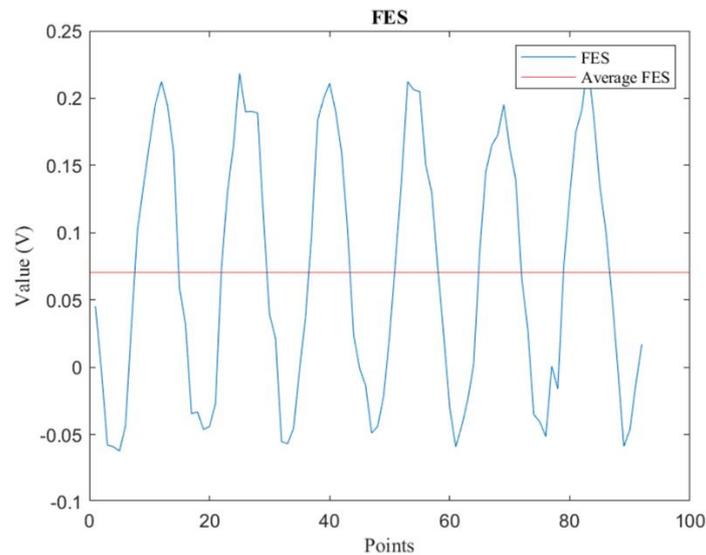


圖 4.41 各像素點截取之 FES 資訊示意圖。

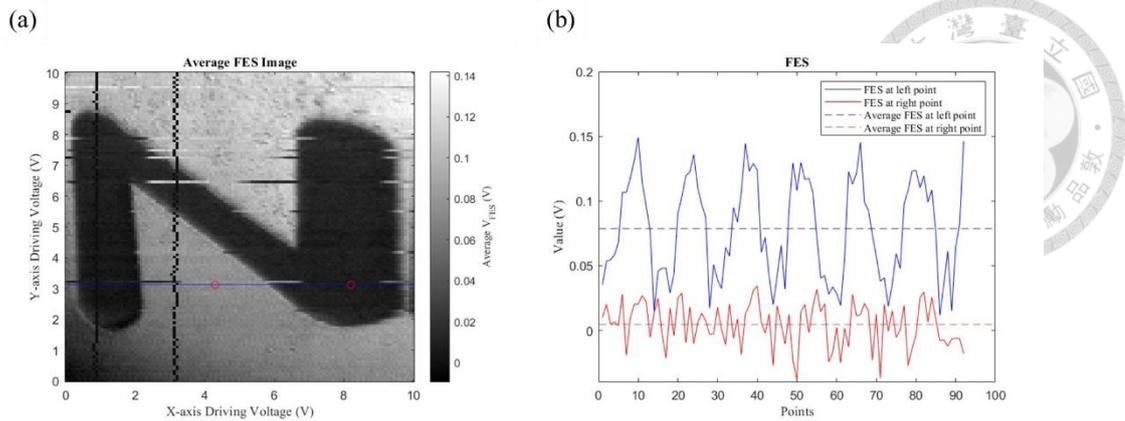


圖 4.42 鍍層 10 nm 之鍍金玻片(a)擷取 FES 平均值成像與(b)兩標記像素點之擷取 FES 資訊。

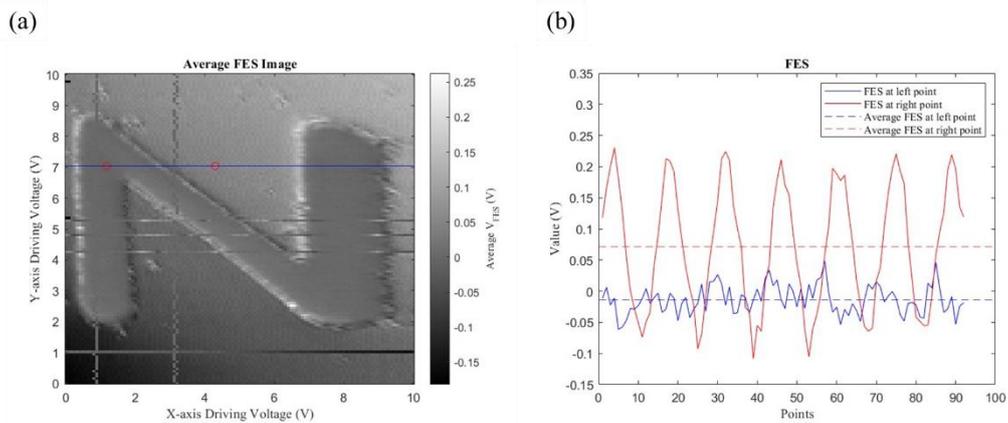


圖 4.43 鍍層 50 nm 之鍍金玻片(a)擷取 FES 平均值成像與(b)兩標記像素點之擷取 FES 資訊。

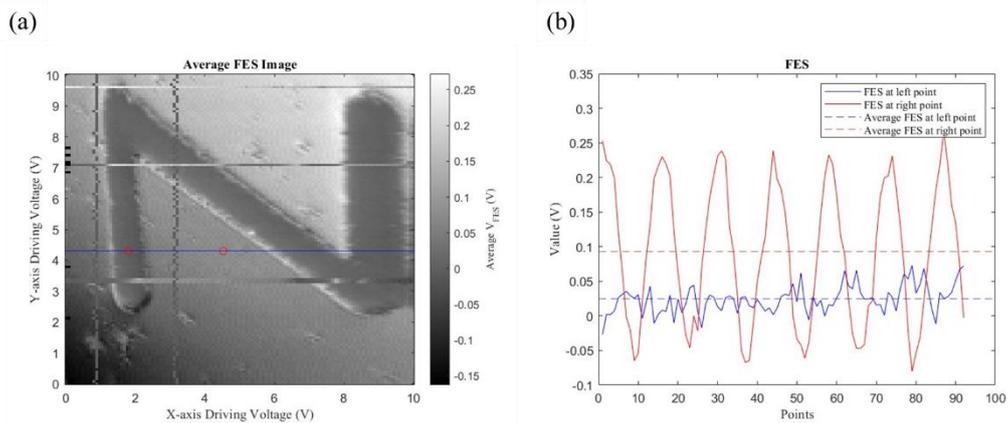


圖 4.44 鍍層 100 nm 之鍍金玻片(a)擷取 FES 平均值成像與(b)兩標記像素點之擷取 FES 資訊。

高度與 FES 平均值的換算公式如式(3.4)所示，其中反射率對應的斜率 S 可以用式(3.1)從反射率得到，整理後高度 H 的換算公式如式(4.4)所示，其中 a 、 b 為反射率對 S-curve 線性區間斜率的回歸式係數、 R 為樣品反射率、 $\overline{V_{FES}}$ 為各像素點的 FES 平均值。

$$H = \frac{\overline{V_{FES}}}{a \times R + b} \quad \text{式(4.4)}$$

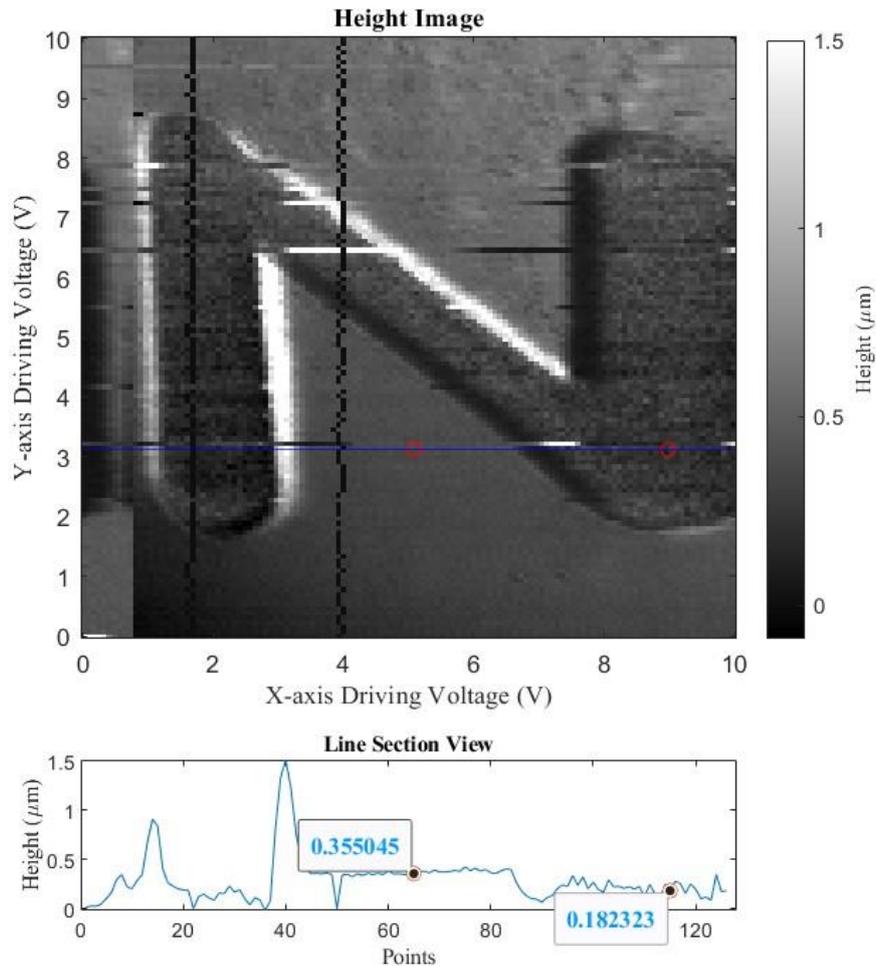


圖 4.45 10 nm 鍍金玻片加工後之高度成像與截面圖。

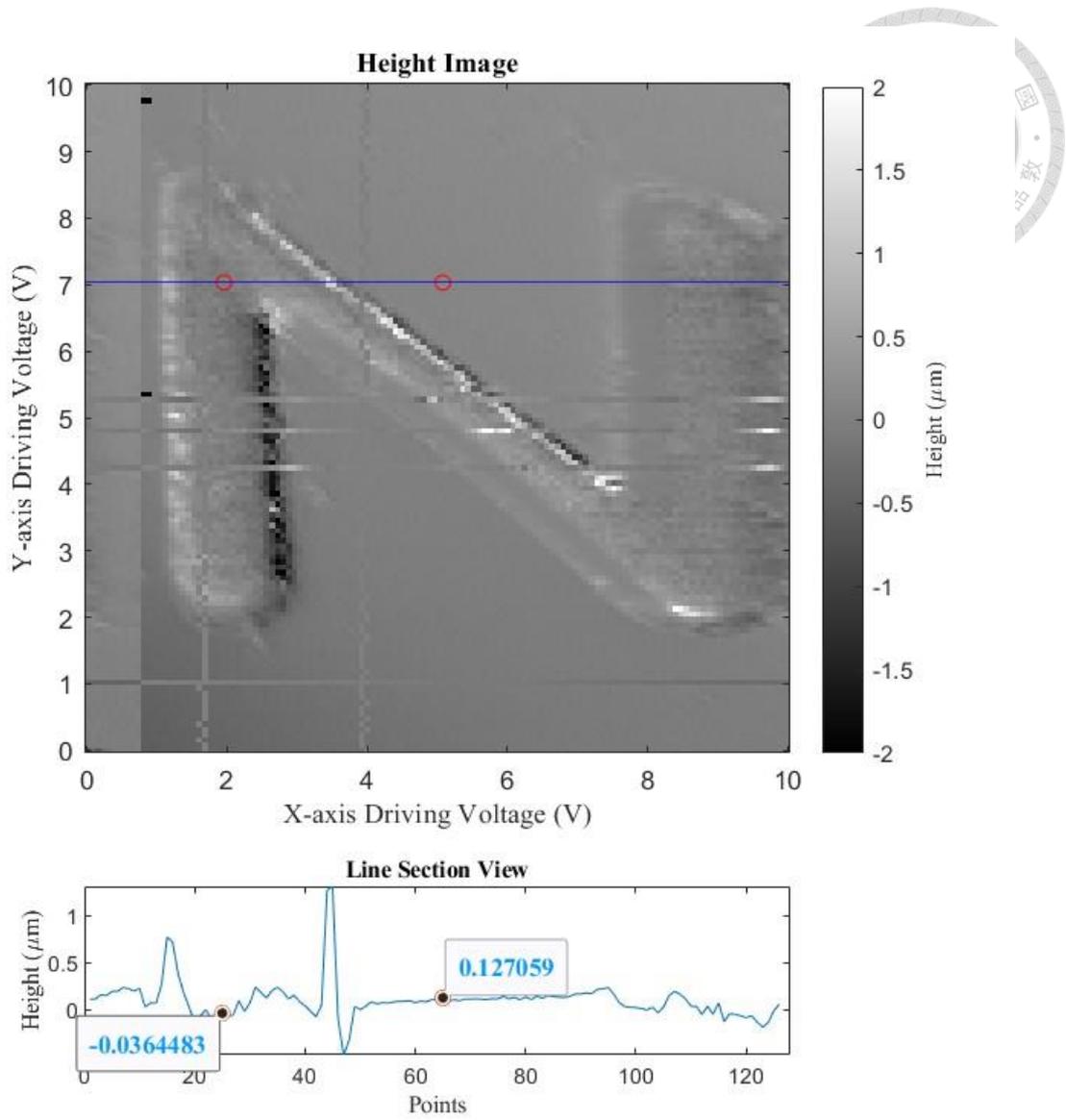


圖 4.46 50 nm 鍍金玻片加工後之高度成像與截面圖。

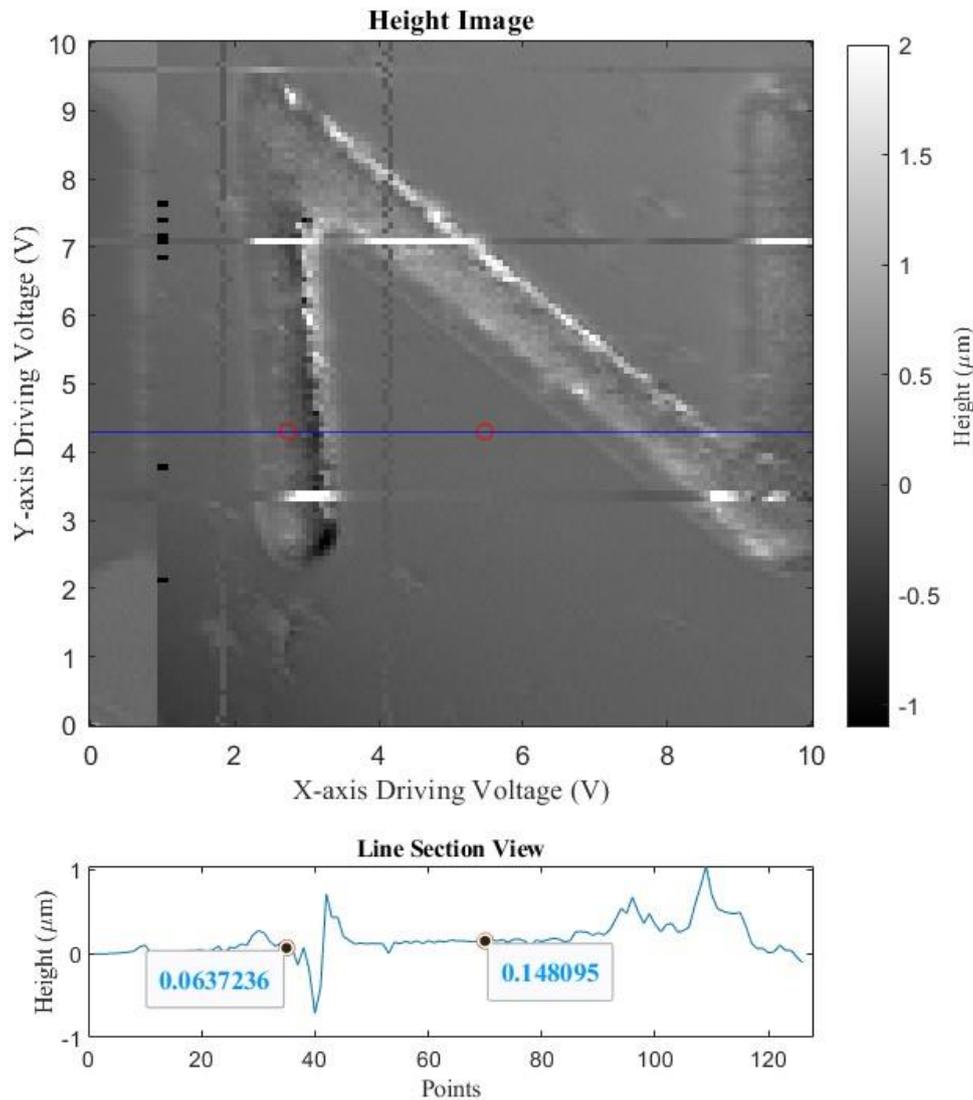


圖 4.47 100 nm 鍍金玻片加工後之高度成像與截面圖。

由上述結果可以看到，在加工痕跡邊緣處的換算高度有失真的現象，推測為此處 FES 較不穩定，無法計算出正確的反射率和 FES 平均值，且部分像素點的 FES 資料點在截取時有缺失，推測是程式端抓取與儲存資料點的的迴圈時間差導致。

在上述結果的截面圖中，取未經加工和雷射加工後的表面各一點，相減後可以得到掃描圖像的鍍層高度，與實際樣品的鍍層厚度進行比較，整理如表 9 所示，可以發現鍍金層的理论厚度越薄，透過 FES 所得出的高度誤差越大，推測原因為鍍金層較薄時，FES 受雜訊影響較大，如圖 4.48 所示，當量測 10 nm

後的鍍金玻片時，共振狀態下的 FES 訊雜比太小，導致實際 FES 不明顯，抓取資料時產生誤差，如圖 4.42~圖 4.44 中加工後區域標記點的 FES 資訊，幾乎看不出對應的共振週期。

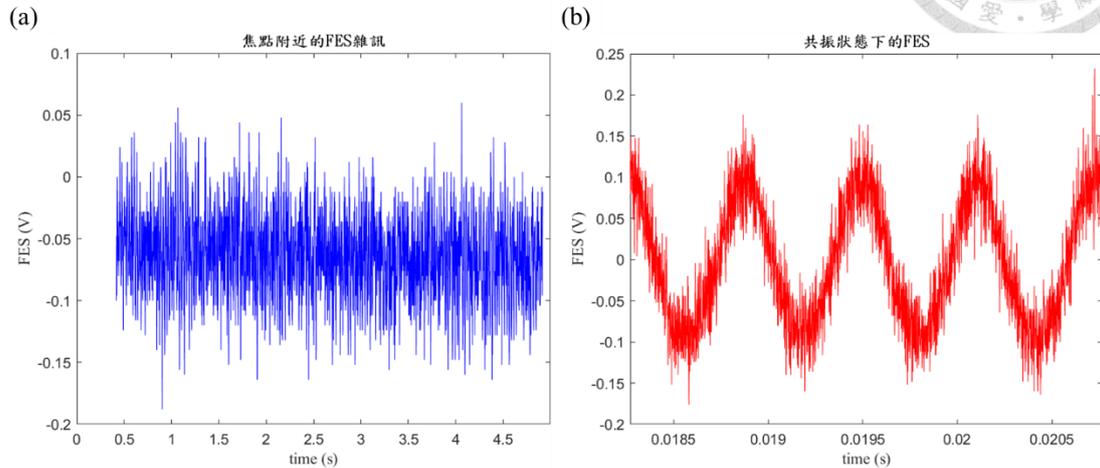


圖 4.48 10 nm 厚鍍金玻片(a)在焦點附近之 FES 雜訊與(b)共振狀態下之 FES。

表 9 掃描成像高度與理論鍍層厚度數據整理。

樣品	加工後區域高度 (nm)	未經加工區域高度 (nm)	掃描成像高度 (nm)	理論鍍層厚度 (nm)	誤差
鍍金玻片 10 nm	182.323	355.045	172.722	10	1627.22%
鍍金玻片 50 nm	-36.4483	127.059	163.5073	50	227.01%
鍍金玻片 100 nm	63.7236	148.095	84.3714	100	15.63%

為降低雜訊造成的影響，更換一個雷射功率較高之新讀取頭以獲得峰對峰值更高的 FES，同時改為將共振的 FES 接入一自製 RC 低通濾波器，輸出低頻的直流訊號代替 FES 訊號平均值進行成像。所使用的低通濾波器電阻值為 100 k Ω 、電容值為 0.1 μ F，截止頻率約為 15.9155 Hz，其電路示意圖與波德圖如圖 4.49 所示。

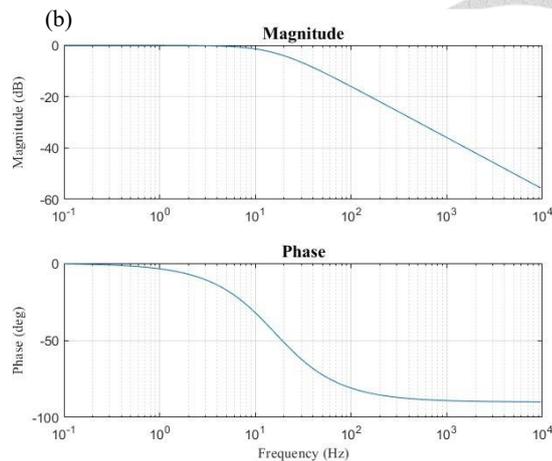
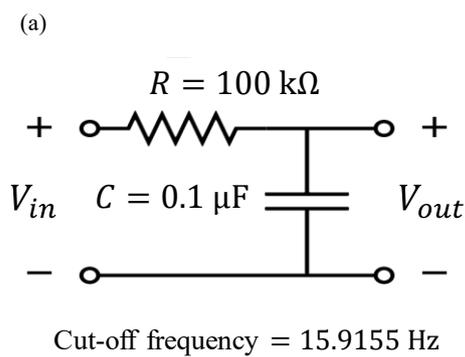


圖 4.49 自製低通濾波器(a)電路示意圖與(b)波德圖。

針對新讀取頭所量測之 S-curve，其線性區間斜率絕對值與廠商實測反射率推算的回歸直線如圖 4.50 所示，其關係式如式(4.5)，相關係數為 0.8968：

$$|S| = 7.77 \times R - 1.2375 \quad \text{式(4.5)}$$

計算出的未知樣品之反射率整理如表 10 所示，可以看出新讀取頭所得到之 S-curve 線性區間斜率與廠商實測反射率之關係式相關係數並未超過圖 4.11 的數據，且部分反射率較高之樣品在進行擬合後，其反射率會超過 100%，並不符合實際狀況。

以新讀取頭數據所計算出之反射率與高度成像結果如圖 4.51~圖 4.53 所示，數據整理如表 11 和表 12 所示，可以看到在鍍層 50 nm 和 100 nm 後的鍍金玻片未加工區域反射率超過 100%，並不符合現實狀況，推測是透過新讀取頭量測到的單點 S-curve 量測實驗結果有誤，導致線性區間斜率與反射率關係式的相關係數不夠高進而使後續反射率推算產生誤差。透過新讀取頭和低通濾波器所得到的高度成像誤差較原先表 9 的結果有大幅改進，但考量到反射率成像並不準確，推測可能仍有其他誤差影響，實際誤差應比表 12 中所得到的結果更大。

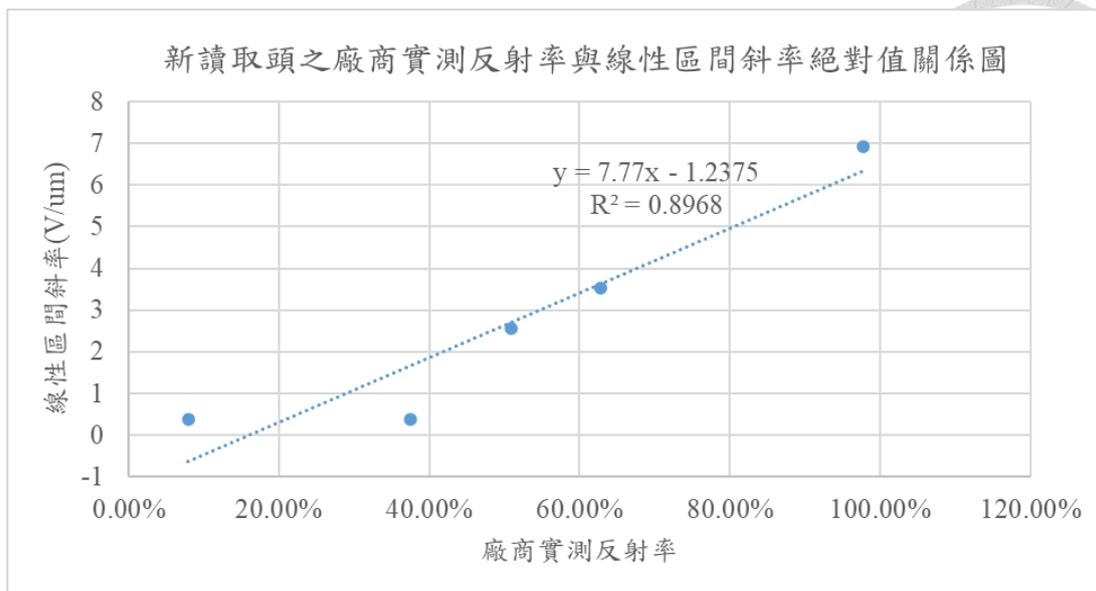


圖 4.50 新讀取頭之廠商實測反射率與線性區間斜率絕對值關係圖。

表 10 新讀取頭量測之各樣品 S-curve 線性區間斜率與反射率整理。

樣品	斜率	斜率絕對值	廠商實測反射率	推算反射率
紅光反射鏡 RR6070	-6.9219	6.9219	97.72%	105.01%
青板玻璃反射 5%	-0.3779	0.3779	8.00%	20.79%
青板玻璃反射 40%	-0.38185	0.38185	37.51%	20.84%
青板玻璃反射 60%	-2.5541	2.5541	50.87%	48.80%
青板玻璃反射 80%	-3.5353	3.5353	62.77%	61.43%
R2L2S1P1 鍍鉻層	-2.5382	2.5382	未知	48.59%
鍍金玻片 10 nm	-2.4111	2.4111	未知	46.96%
鍍金玻片 50 nm	-6.4355	6.4355	未知	98.75%
鍍金玻片 100 nm	-6.8464	6.8464	未知	104.04%

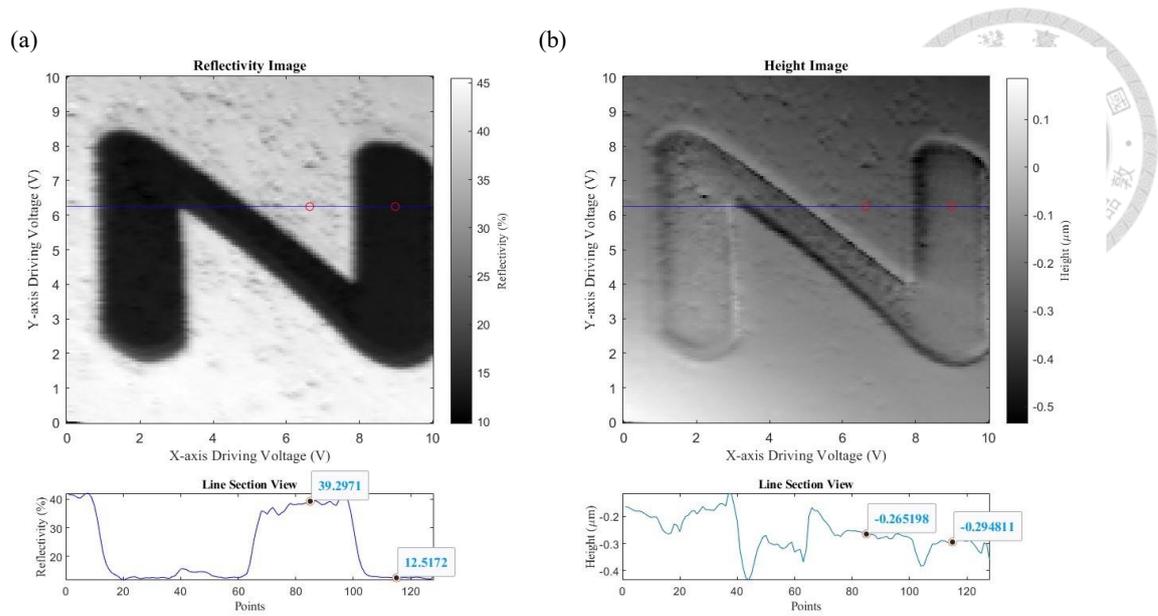


圖 4.51 新讀取頭量測之 10 nm 鍍金玻片加工後之(a)反射率成像和(b)高度成像與兩者之截面圖。

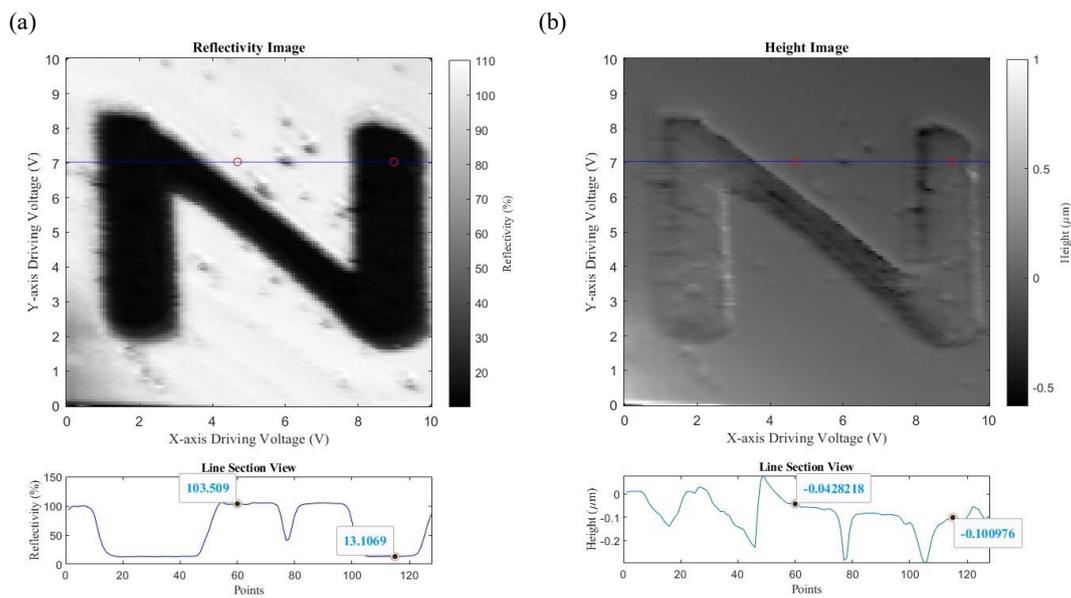


圖 4.52 新讀取頭量測之 50 nm 鍍金玻片加工後之(a)反射率成像和(b)高度成像與兩者之截面圖。

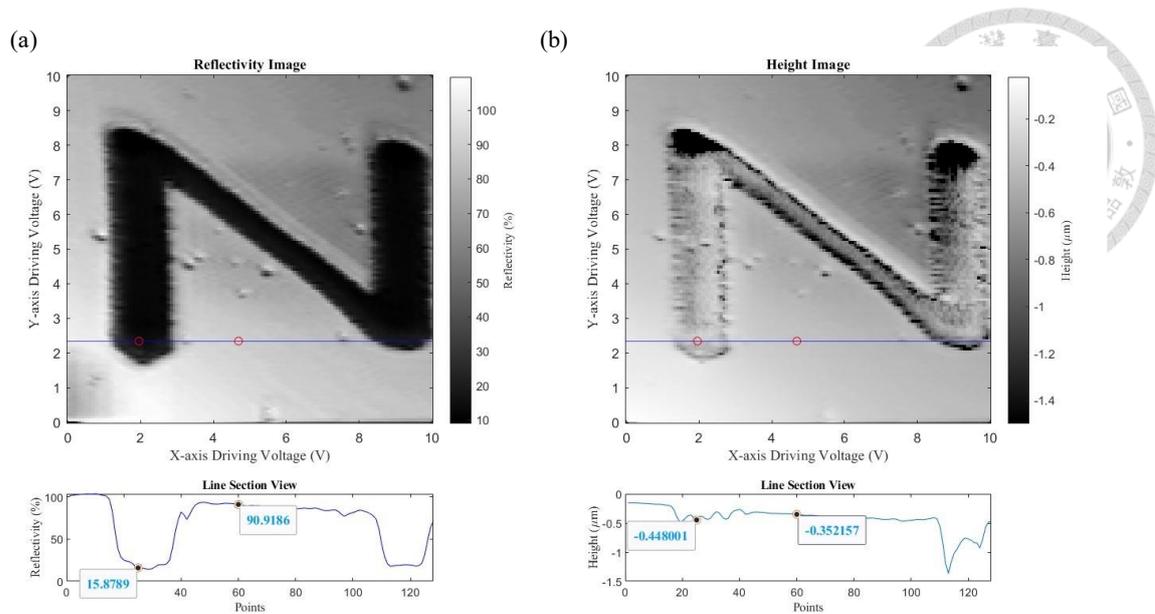


圖 4.53 新讀取頭量測之 100 nm 鍍金玻片加工後之(a)反射率成像和(b)高度成像與兩者之截面圖。

表 11 新讀取頭量測之雷射加工掃描實驗反射率整理。

樣品	加工後區域反射率	未加工區域反射率	關係式推算反射率	誤差
鍍金玻片 10 nm	12.52%	39.30%	47%	16.31%
鍍金玻片 50 nm	13.11%	103.51%	99%	4.82%
鍍金玻片 100 nm	15.88%	90.92%	104%	12.61%

表 12 新讀取頭量測之雷射加工掃描實驗高度整理。

樣品	加工後區域高度(nm)	未加工區域高度(nm)	影像高度差(nm)	理論鍍層厚度(nm)	誤差
鍍金玻片 10 nm	-294.811	-265.198	29.613	10	196.13%
鍍金玻片 50 nm	-100.976	-42.8218	58.1542	50	16.31%
鍍金玻片 100 nm	-448.001	-352.157	95.844	100	4.16%

第五章 結論與未來展望



本論文成功於倒立式顯微鏡上建構出一套結合雷射直寫加工與像散式輪廓儀之系統，以雷射直寫加工技術進行簡易的圖案繪製後，能透過像散式輪廓儀進行掃描，獲得對應的反射率和高度成像，及時觀察加工後的線寬和表面粗糙度等性質是否符合預期。

由單點 S-curve 量測實驗的結果顯示，實驗所獲得之 FES 峰對峰值與線性區間斜率 S 皆和樣品實測反射率呈線性關係，透過實驗獲得的線性回歸式相關係數最高為 0.9992，可以藉此推測出未知樣品之反射率。

本論文所使用之雷射直寫加工系統成功於三種不同鍍層厚度的鍍金玻片上進行打點和清晰的圖案刻畫，最小線寬約為 $8\ \mu\text{m}$ 。

對上述雷射加工成果進行像散式輪廓儀掃描成像，並進行反射率和高度換算，成功得到對應的微米級別反射率和高度影像。10、50、100 nm 三種鍍層厚度鍍金玻片的掃描成像反射率與單點 S-curve 實驗推測的反射率誤差值分別為 14.33%、24.86% 和 27.82%，掃描成像高度與理論鍍層厚度的誤差分別為 1627.22%、227.01% 和 15.63%。若以 FES 通過低通濾波器後的直流電壓取代由程式擷取的 FES 資訊，並更換新讀取頭後所得到的反射率誤差值分別為 16.31%、4.82% 和 12.61%，高度誤差減少至 196.13%、16.31% 和 4.16%。

本論文的未來展望如下：

1. 將移動樣品的三軸壓電平台更換為大行程之掃描器，提高雷射加工和掃描成像範圍，並解決壓電平台行程非線性的問題。
2. 修改雷射加工系統光路設計，縮小雷射光點以提高加工精度。
3. 量測更多已知反射率之樣品，提高 S-curve 線性區間斜率與反射率的擬合結果準確性。
4. 控制系統程式優化，降低讀取頭放大電路雜訊以及提升 FES 資訊的採樣速率，以改善掃描成像時推算反射率和高度成像的準確性。

參考文獻



- [1] 蕭文澤, “雷射微加工系統研發暨相關產業應用,” *儀科中心簡訊*, 編號 143, pp. 9-10, 31 10 2017.
- [2] 陳明飛, “雷射加工系統研發與應用,” *研究與創新*, pp. 4-8, 31 03 2007.
- [3] E. Morrison, "A prototype scanning stylus profilometer for rapid measurement of small surface areas," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, no. 2, pp. 325-331, 1995.
- [4] Chau-Hwang Lee, Hong-Yao Mong, and Wan-Chen Lin, "Noninterferometric wide-field optical profilometry with nanometer depth resolution," *Optics Letters*, vol. 27, no. 20, pp. 1773-1775, 2002.
- [5] 黃英碩、胡恩德、黃光裕、張嘉升、廖先順、王偉珉、陳彥宏、陳敬修、鄭仲翔、黃宣富, “像散式光學偵測系統：奈米量測新利器,” *科儀新知*, 編號 200, pp. 46-65, 2014.
- [6] T. H. Maiman, R. H. Hoskins, I. J. D'Haenens, C. K. Asawa, and V. Evtuhov, "Stimulated Optical Emission in Fluorescent Solids. II. Spectroscopy and Stimulated Emission in Ruby," *PHYSICAL REVIEW*, vol. 123, no. 4, pp. 1151-1157, 1961.
- [7] 曾釋鋒, “雷射直寫透明導電薄膜技術,” *儀科中心簡訊*, 編號 110, pp. 6-7, 30 4 2012.
- [8] 劉誼凱；李明蒼；黃萌祺；王裕銘, “先進雷射微奈米可撓式電路板製作技術,” *機械工業雜誌*, 編號 414, pp. 15-27, 01 09 2017.
- [9] Kawata, S., Sun, HB., Tanaka, T. et al., "Finer features for functional microdevices.," *Nature*, vol. 412, pp. 697-698, 2001.
- [10] Hao Fatt Teoh, Ye Tao, Eng Soon Tok, Ghim Wei Ho, Chorng Haur Sow, "Direct laser-enabled graphene oxide–Reduced graphene oxide layered structures with micropatterning," *Journal of Applied Physics*, vol. 112, p. 064309, 15 9 2012.
- [11] Wonsuk Chung, Michael O. Thompson, Paul Wickboldt, Daniel Toet, Paul G. Carey, "Room temperature indium tin oxide by XeCl excimer laser annealing for flexible display," *Thin Solid Films*, vol. 460, no. 1-2, pp. 291-294, 2004.

- 
- [12] Ming-Fei Chen, Yu-Pin Chen, Wen-Tse Hsiao, Zhi-Peng Gu, "Laser direct write patterning technique of indium tin oxide film," *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 24, pp. 8515-8518, 2007.
- [13] 李銘峯, 許芳文, 吳秉翰, 蘇信嘉, 曹宏熙, 胡杰, “利用飛秒雷射微奈米加工技術於玻片上製作高深寬比之微流道結構,” *科學與工程技術期刊*, 第 5 冊, 編號 4, pp. 49-55, 2009.
- [14] Hao-Yan Chen, Dongdong Han, Ye Tian, Ruiqiang Shao, Shu Wei, "Mask-free and programmable patterning of graphene by ultrafast laser direct writing," *Chemical Physics*, vol. 430, pp. 13-17, 2014.
- [15] J. M. Maia, V. A. Amorim, D. Alexandre and P. V. S. Marques, "Real-Time Optical Monitoring of Etching Reaction of Microfluidic Channel Fabricated by Femtosecond Laser Direct Writing," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 11, pp. 2291-2298, 2017.
- [16] Dong-Hyeok Lee and Nahm-Gyoo Cho, "Assessment of surface profile data acquired by a stylus profilometer," *Measurement Science and Technology*, vol. 23, no. 10, p. 105601, 2012.
- [17] 黃英碩, “掃描探針顯微術的原理及應用,” *科儀新知*, 編號 144, pp. 7-17, 2005.
- [18] Qingxiang Li, Hong Gao, Shifu Xue, Yuhe Li, "Optical profilometer based on the principle of differential interference," *Optical Engineering*, vol. 40, no. 5, pp. 833-836, 2001.
- [19] Dong, S., Dapino, M., "Experiments on Ultrasonic Lubrication Using a Piezoelectrically-assisted Tribometer and Optical Profilometer.," *Journal of Visualized Experiments*, vol. 103, 2015.
- [20] Azeem Ahmad, Vishesh Dubey, Gyanendra Singh, Veena Singh, and Dalip Singh Mehta, "Quantitative phase imaging of biological cells using spatially low and temporally high coherent light source," *Optics Letters*, vol. 41, no. 7, pp. 1554-1557, 2016.
- [21] L. Deck, P. de Groot, "High-speed non-contact profiler based on scanning white light interferometry," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, no. 2, pp. 147-150, 1995.

- 
- [22] T. Nishimura, M. Tsukiji and S. IshiiKoh, "Encoder for forming interference fringes by re-diffracted lights from an optical type scale and photoelectrically converting the interference fringes to thereby detect the displacement of the scale". US Patent US4930895A, 10 6 1988.
- [23] 郭哲佑, "相位移條紋投影輪廓儀之特性與分析," 國立中山大學材料科學研究所碩士論文, 2005.
- [24] Th. Zapf, R.W. Wijnaendts-van-Resandt, "Confocal laser microscope for submicron structure measurement," *Microelectronic Engineering*, vol. 5, no. 1-4, pp. 573-580, 1986.
- [25] 洪文明, "白光相移干涉術之三維表面量測," 國立交通大學光電工程研究所碩士畢業論文, 2003.
- [26] 廖界程, 張維哲, 羅文期, "白光干涉三維檢測系統介紹與應用," 於 *AOI Forum & Show*, 2008.
- [27] S. H. Lee, "High precision deflection measurement of microcantilever in an optical pickup head based atomic force microscopy.," *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, no. 11, p. 113703, 2012.
- [28] Wei-Min Wang, Chung-Hsiang Cheng, Gabor Molnar, Ing-Shouh Hwang, Kuang-Yuh Huang, Hans-Ulrich Danzebrink, En-Te Hwu, "Optical imaging module for astigmatic detection system.," *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, no. 5, p. 053706, 2016.
- [29] B. -C. Chang, R. -F. Ding, B. -J. Juang and K. -Y. Huang, "Development of electromagnetic scanning stage for astigmatic profilometer," in *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Beijing, China, 2015.
- [30] En-Te Hwu and Shao-Kang Hung and Chih-Wen Yang and Kuang-Yuh Huang and Ing-Shouh Hwang, "Real-time detection of linear and angular displacements with a modified DVD optical head," *Nanotechnology*, vol. 19, no. 11, p. 115501, 2008.
- [31] Wen-Shing Sun and Yan-Nan Lin and Jenq-Yang Chang, "Optical Design and Analysis of a Laser Expander for a Blu-ray Pickup Head for Synchronous

- Detection of the Tilt Angle and Displacement on the Test Plane," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 9S1, p. 09MA03, 2011.
- [32] Jih-Wei Chieh and S. -K. Hung, "Transforming a CD/DVD pick-up-head into an accelerometer," in *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore, 2009.
- [33] Klaus Ehrmann and Arthur Ho and Klaus Schindhelm, "A 3D optical profilometer using a compact disc reading head," *Measurement Science and Technology*, vol. 9, no. 8, p. 1259, 1998.
- [34] E-T Hwu and H Illers and L Jusko and H-U Danzebrink, "A hybrid scanning probe microscope (SPM) module based on a DVD optical head," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 8, p. 084005, 2009.
- [35] Hsien-Shun Liao and Guan-Teng Huang and Ho-Da Tu and Ting-He Lin and En-Te Hwu, "A novel method for quantitative height measurement based on an astigmatic optical profilometer," *Measurement Science and Technology*, vol. 29, no. 10, p. 107002, 2018.
- [36] H. -S. Liao, S. -H. Cheng and E. -T. Hwu, "Development of a Resonant Scanner to Improve the Imaging Rate of Astigmatic Optical Profilometers," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 1172-1177, 2021.
- [37] 徐辜建源, "基於像散式光學輪廓儀之即時反射率量測方法," 國立臺灣大學碩士畢業論文, 2022.
- [38] 陳育斌, 蕭文澤, 陳明飛, "CO₂ 雷射加工系統介紹與應用," *機械月刊*, vol. 32, no. 3, pp. 106-120, 2006.
- [39] "如何依據用途選擇雷射刻印機," KEYENCE, [線上]. Available: <https://www.keyence.com.tw/ss/products/marketing/selecting/features03.jsp>. [存取日期: 30 5 2023].
- [40] William M. Steen, Jyotirmoy Mazumder, "Focal Position," in *Laser Material Processing*, 4th Edition ed., Springer, pp. 218-219. , 2010
- [41] 林志郎, "以雷射直寫製造技術為基礎的 3D 微列印," *科儀新知*, 編號 197, pp. 5-13, 01 12 2013.

附錄



附錄 A 紅光 DVD 讀取頭規格表

Item	Specifications		
	DVD	CD	Unit
Laser diode wavelength	655	790	nm
Objective lens	Aspheric plastic lens	Aspheric plastic lens	
Numerical aperture	0.6	0.47	
Working distance	1.28	0.91	mm
Focal length	2.33	2.35	mm
Emission power			
Typical power	0.23	0.17	mW
Maximum power	0.373	0.297	mW
Detection method			
Focusing	Astigmatism	Astigmatism	
Tracking	DPD	3-spot	
Photo detector	PDIC with I/V Amp	PDIC with I/V Amp	
PDIC Response Frequency	80	45	MHz
Dimensions	48.7(W) x 36.7(D) x 7.5(H) mm		
Unit weight	~18g		
Operating temperature	0~60°C		
Storage temperature	-30~70°C		

附錄 B 共振掃描器壓電塊規格表



Category	Piezoelectric Device Laminated Piezoelectric Actuator
Manufacturer	TOKIN
Manufacture	TOKIN
Series	AE
Maximumdrivingvoltage	150V
Generationforce	850N
Displacement	9.1μm
ResonanceFrequency	138kHz
Capacitance	0.75μF
Capacitance Tolerance	±20%
InsulationResistance	50Mohms
TemperatureRange	-25 ~ 85°C
Overall Length	10mm

附錄 C 讀取頭放大電路規格表



MPro GmbH
Zum Bahnhof 9
98593 Floh-Seligenthal

Power Supply:

Input Voltage: 12 VDC
Input Current: 1.0A max
Connector: 1.5mm Power Jack
center Pin is VCC, shell is GND

Functions:

VCM Driver: for X,Z and Tilt
Anti Drift function: for Z-Axis
Interface: HDMI to miniHDMI for Main functions
miniHDMI to HDMI for feature functions
Supported Adapter: TOP1100, KES860

- FES, SUM signal calculation and amplification
- Laser Source switch
- VR-Based or External +/-10V VCM control signals
- Selectable Gain for SUM and FES
- Selectable AC or DC signal coupling
- Digital Control Interface for Sony KEM860 OPU
- USB Interface for digital Configuration
- VR-Based Offset Correction for SUM and FES

Warnings:

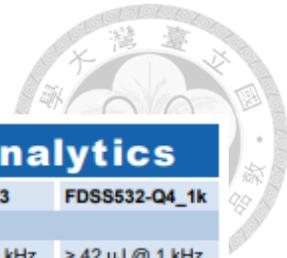
OPUs contain up to three class 1 diode laser sources. **Avoid direct eye contact when operating the device.**



Handelsregister Jena HRB 509185
Geschäftsführer Christian Werner

Tel: +49 (0) 160 7244892
Email: info@mpro-gmbh.de
Web: www.mpro-gmbh.de

附錄 D 脈衝雷射規格表



biology · biomedicine · chemistry · analytics					
		FDSS532-Q1	FDSS532-Q2	FDSS532-Q3	FDSS532-Q4_1k
Optical Data	Wavelength	532 nm			
	Pulse Energy	> 2 μJ @ 15 kHz	> 6 μJ @ 10 kHz	> 20 μJ @ 1 kHz	> 42 μJ @ 1 kHz
	Peak Power	> 1.5 kW @15kHz	> 4.5 kW @10kHz	> 15 kW @ 1kHz	> 30 kW @ 1 kHz
	Pulse Repetition Rate	≤ 20 kHz	≤ 10 kHz	≤ 2.5 kHz	≤ 1 kHz
	Pulse Width, FWHM	≤ 1.3 ns			
	Polarization Ratio	> 100:1 vertical			
	Pulse Energy Drift ¹⁾	< ± 5 %	< ± 5 %	< ± 5 %	< ± 5 %
	Pulse-To-Pulse RMS ²⁾	< 3% @15kHz	< 2% @10kHz	< 2% @1kHz	< 2% @1kHz
	Laser Classification	3B / IIIb	3B / IIIb	3B / IIIb	3B / IIIb
Optical Output	Spatial Mode	TEM ₀₀ (Main Axis Divergence Ratio < 1.3)			
	Beam Divergence, 2θ	< 3.5 mrad	< 3.5 mrad	< 5.0 mrad	< 4.5 mrad
	Beam Diameter	250 ± 50 μm	260 ± 50 μm	400 ± 100 μm	400 ± 100 μm
Electrical Data	Power Consumption	15 W (max.40 W)	17 W (max.40 W)	20 W (max.70 W)	40 W (70 W)
	Operating Voltage	12 V DC			
	Line Voltage	90 - 265 V AC			
	Marking	CE			
Interfaces	RS 232, USB				
	External Trigger (TTL, rising edge) single shot (pulse on demand) – max. repetition rate Interface for TTL-control and power monitor				
Miscellaneous	Warm-up Time	< 5 min			
	Operating Temperature	18 - 38 °C			
Options	Stand-alone system (incl. key-switch, heat-sink, manual shutter; CDRH compliant)				
	Synchronization signal output (rise time < 2 ns)				
	Fiber coupling for fiber with core diameter > 70 μm (Q4 ≥ 100μm)				
	Manual shutter or electrical beam blocker				
	External beam expander (e.g. 3x)				
	Manual or electrical attenuator on request				
	Manual or electrical driven wavelength switch 532 nm / 1064 nm Closed loop operation for pulse energy on request				
¹⁾ Drift over 6 hours, energy averaged over 10 sec after 5 min of continuous operation, temperature variation ± 3 °C and < 3 °C/hour.					
²⁾ RMS over 1000 pulses after 5 min of continuous operation.					

附錄 E 壓電平台與控制器



Calibration Sheet

Controller	Model: NC3311-C Serial No.: DJ003E01
Nano Servo Stage	Model: NS4312-C Serial No.: DJ003M01

A	ANALOG INPUT Full travel range per 10V analog input	100 μ m/10V input
	SENSOR MONITOR Sensor sensitivity	0.1000V/μm

B	ANALOG INPUT Full travel range per 10V analog input	100 μ m/10V input
	SENSOR MONITOR Sensor sensitivity	0.0999V/μm

C	ANALOG INPUT Full travel range per 10V analog input	25 μ m/10V input
	SENSOR MONITOR Sensor sensitivity	0.2000V/μm

The stage and the controller were inspected respectively before shipment, and indicated the measurement results.

Displacement:

It is a displacement of the stage when the analog voltage 10V is input to the terminal "Input" (full travel range at the closed loop control).

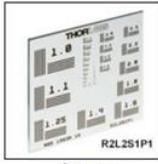
Sensitivity

It is an analog voltage (voltage that applies to the terminal "Input") necessary for one-micron movement.

附錄 F R2L2S1P1 規格表



High-Frequency NBS 1963A Resolution Test Targets, 2" x 2"



- Frequencies from 1 to 228 cycles/mm (See List Below)
- Determine Resolution of an Optical System
- 2" x 2" (50.8 mm x 50.8 mm) Soda Lime Glass Substrate
- Positive and Negative Targets Available

Thorlabs' 2" x 2" (50.8 mm x 50.8 mm) high-frequency NBS 1963A resolution test targets offer 48 line sets with frequencies from 1 to 228 cycles/mm, corresponding to cycle sizes from 1.0 mm to 4.4 μ m (see the table below and the *Resolution Targets* tab for more information). Each set of lines on the pattern contains five horizontal and five vertical lines and is labeled with the frequency of the lines in cycles/mm, as shown in the images to the right. The resolution of an optical system can be determined by identifying the highest frequency line set that the system is able to resolve.



[Click for Details](#)

Line sets with frequencies of 32 and 29 cycles/mm on the R2L2S1P1 positive target. The enlarged image shows line sets of 7.1 through 228 cycles/mm.



[Click for Details](#)

Line sets with frequencies of 32 and 29 cycles/mm on the R2L2S1N1 negative target. The enlarged image shows line sets of 7.1 through 228 cycles/mm.

Optical Specifications		
Item #	R2L2S1P1	R2L2S1N1
Pattern	Chrome	Clear
Background	Clear	Chrome
Surface Flatness	$\leq 15 \mu$ m	
Chrome Optical Density ^a	≥ 3.0	

a. Specified at 430 nm.

Frequencies (cycles/mm)																																															
• 1	• 1.1	• 1.25	• 1.4	• 1.6	• 1.8	• 2.0	• 2.2	• 2.5	• 2.8	• 3.2	• 3.6	• 4.0	• 4.5	• 5.0	• 5.6	• 6.3	• 7.1	• 8.0	• 9.0	• 10	• 11	• 12.5	• 14	• 16	• 18	• 20	• 23	• 25	• 29	• 32	• 36	• 40	• 45	• 51	• 57	• 64	• 72	• 81	• 91	• 102	• 114	• 128	• 144	• 161	• 181	• 203	• 228

See the *Resolution Targets* tab above for more details on the test patterns.

Based on your currency / country selection, your order will ship from Newton, New Jersey

Features

- Positive, Negative, and Birefringent 1951 USAF and NBS 1963A Resolution Test Targets
- Positive NBS 1952 Resolution Test Targets
- Sector Star Targets
- Ronchi Ruling Targets
- Variable Line Grating Targets
- High-Contrast Positive Reflective Versions Available
- Combined Resolution and Distortion Target

Resolution test targets are typically used to measure the resolution of an imaging system. They consist of reference line patterns with well-defined thicknesses and spacings and are designed to be placed in the same plane as the object being imaged. By identifying the largest set of non-distinguishable lines, one determines the resolving power of a given system. Thorlabs offers resolution test targets with 1951 USAF, NBS 1952, and NBS 1963A patterns. Targets are also available with sector star (also known as Siemens star) patterns, Ronchi rulings, a variable line grating, or a combination of patterns for resolution and distortion testing. For more information on each pattern, see the *Resolution Targets* tab.

All of our resolution test target patterns are available as positive targets, and many have negative versions as well. We also offer several versions of high-contrast positive reflective targets. The positive targets consist of low-reflectivity, vacuum-sputtered chrome patterns plated on clear substrates and are useful for front-lit and general applications. The negative targets use chrome to cover the substrates, leaving the patterns clear, and work well in back-lit and highly illuminated applications. The positive reflective targets are composed of an antireflection-coated (AR-coated) chrome pattern etched on soda lime glass with an uncoated chrome background for high contrast in reflective applications. See the *Graphs* tab for spectral data of the materials used in these test targets. Each pattern is manufactured using photolithography, allowing for edge features to be resolved down to approximately 1 μ m.

Mounting

These resolution test targets can be mounted in one of four of our microscopy slide holders. Our **MAXSLH Fixed Slide Holder** provides two spring clips to mount the optic and can be mounted to any of our **3-axis translation stages**. The MAXSLH is only compatible with test targets greater than or equal to 2" wide and provides a clear aperture of 1", which may cover the chrome pattern on some of the test targets. Thorlabs also offers our **XYF1(M) Test Target Positioning Mount** (see photo to the right) capable of translating a 1" to 3" wide rectangular target over a 50 mm x 30 mm area. The mount offers five 8-32 (M4) taps for six post-mountable orientations. The XYF1 uses nylon-tipped screws to secure the optic. Please note that the mount's support arms overlap the optic by 4.4 mm on each side. For users of the **MLS203 Microscopy stage** we offer the **MLS203P2** Slide Holder for Inverted Microscopes, which can mount slides 25 mm to 26.5 mm wide and petri dishes 30 mm to 60 mm in diameter.



[Click to Enlarge](#)

An R2L2S1N NBS 1963A Resolution Target Mounted in an XYF1 Test Target Positioner

Photolithographic Target Manufacturing

Our extensive production capabilities enable us to provide solutions for imaging system calibration and measurements. We use contact photolithography with a mask aligner to define the pattern on the glass substrate. Once the pattern is defined, we chemically etch the substrates and clean them in a class 100 cleanroom.

Birefringent Target Manufacturing

Our R2L2S1B and R2L2S1P Birefringent Resolution Targets have a pattern that is invisible unless viewed through a pair of crossed **polarizers**, making them ideal for calibration of polarization-sensitive systems. The pattern is created by using a photo alignment process to set the fast axis of the liquid crystal polymer layer, which is protected by two layers of glass. These devices are engineered so that the fast axis of the overall target is aligned parallel to the side of the glass covers, whereas the fast axis for the patterned area is aligned 45° to this edge. The entire targets have a retardation of 280 ± 20 nm. Additionally, they can display both positive and negative patterns by changing the orientation of the crossed polarizers. If the crossed polarizers are aligned with the sides of the target, the positive image will be formed. If the crossed polarizers are aligned at 45° to the sides of the target, the negative image will be formed.

Thorlabs also offers a complete line of **reticles** for superimposing a reference pattern onto an object.

Targets Selection Guide			
Resolution Test Targets	Distortion Test Targets	Slant Edge MTF Resolution Test Targets	Calibration Targets

NBS 1963A Targets

- Positive, Negative, and Birefringent Targets Available
- High-Frequency Option
- 2" x 2" Size for Dedicated Targets, 1" x 3" Size for Combined Target

NBS 1963A Targets have line sets of five vertical and five horizontal lines. Each line and the space between it and the next line can be thought of as a line pair or a cycle. The resolution that each target is able to test is given by the frequency of the cycles in cycles/mm. On Thorlabs' NBS 1963A targets, each line set is labeled with its frequency. By determining the smallest lines that are distinguishable (highest cycles/mm), you can determine the resolution of an imaging system.

Our standard NBS 1963A targets offer 26 line sets with resolutions scaled from 1.0 cycles/mm to 18.0 cycles/mm. For more rigorous resolution testing, our high-frequency NBS 1963A targets have 48 line sets with frequencies from 1.0 cycles/mm to 228 cycles/mm, and our R1L3SSP combined resolution and distortion test target has 35 line sets with frequencies from 4.5 cycles/mm to 228 cycles/mm. The size of each cycle is simply the reciprocal of the frequency and is given for all available frequencies in the table below. For the individual line width, divide the cycle size in half.

Cycles/mm	Cycle Size						
1.0	1.00 mm	4.0	0.250 mm	16.0	0.063 mm	64.0	0.016 mm
1.1	0.909 mm	4.5	0.222 mm	18.0	0.056 mm	72.0	0.014 mm
1.25	0.800 mm	5.0	0.200 mm	20.0	0.050 mm	80.0	0.012 mm
1.4	0.714 mm	5.6	0.179 mm	23.0	0.043 mm	91.0	0.011 mm
1.6	0.625 mm	6.3	0.159 mm	25.0	0.040 mm	102	0.010 mm
1.8	0.556 mm	7.1	0.141 mm	29.0	0.034 mm	114	0.009 mm
2.0	0.500 mm	8.0	0.125 mm	32.0	0.031 mm	128	0.008 mm
2.2	0.455 mm	9.0	0.111 mm	36.0	0.028 mm	144	0.007 mm
2.5	0.400 mm	10.0	0.100 mm	40.0	0.025 mm	161	0.0062 mm
2.8	0.357 mm	11.0	0.091 mm	45.0	0.022 mm	181	0.0055 mm
3.2	0.313 mm	12.5	0.080 mm	51.0	0.020 mm	203	0.0049 mm
3.6	0.278 mm	14.0	0.071 mm	57.0	0.018 mm	228	0.0044 mm



[Click to Enlarge](#)

Microscope Image of R2L2S1N Negative Test Target