

國立交通大學
機械工程學系碩士班
碩士論文

雙光束量測藍寶石晶圓曲率及薄膜應力

Measurement of Curvature and Stress in Deposited Sapphire
Substrate Using Dual Beam Optical Method

研究生：吳家宇

指導教授：尹慶中 博士

中華民國一〇〇年八月

雙光束量測藍寶石晶圓曲率及薄膜應力

Measurement of Curvature and Stress in Deposited Sapphire
Substrate Using Dual Beam Optical Method

研究生：吳家宇

Student : Chia-Yu Wu

指導教授：尹慶中 博士

Advisor : Dr. Ching-Chung Yin



Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

August 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇〇年八月

雙光束量測藍寶石基板曲率及薄膜應力

研究生：吳家宇

指導教授：尹慶中 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

氮化鎵發光二極體晶圓在磊晶製程，因為薄膜與基材間的晶格不匹配，造成本質應力。製程中溫度變化產生的熱應力也會形成薄膜殘留應力，使基板彎曲變形。過大的殘留應力使得薄膜品質不穩定，甚至破裂或皺摺而脫落，高品質的磊晶製程需要精確地監測晶圓曲率，以便控制製程參數，降低薄膜殘留應力，提高良率。

本研究採用非接觸之雙光束量測法，測量氮化鎵薄膜覆蓋之藍寶石基板的曲率。量測系統以兩平行雷射光入射翹曲晶圓表面，反射光的平行度改變，採用電荷耦合相機偵測投影至旋轉屏幕上的兩光點中心位置，依據幾何關係計算晶圓表面的曲率。另以古典板理論推導非等向性基材的薄膜應力，修正一般習用的 Stoney 薄膜應力公式。並對雙光束量測法之元件及系統進行測試，降低量測偏差量。曲率量測結果與太曼-格林干涉儀量測之曲率比較，兩者趨勢相符。本研究採用的量測系統不屬於光學干涉儀，反應快，不易受環境擾動影響，所需空間小，適合應用於磊晶製程監測。

關鍵詞：雙光束量測法、晶圓曲率量測、薄膜殘留應力

Measurement of Curvature and Stress in Deposited Sapphire Substrate Using Dual Beam Optical Method

Student : Chia-Yu Wu

Advisor : Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

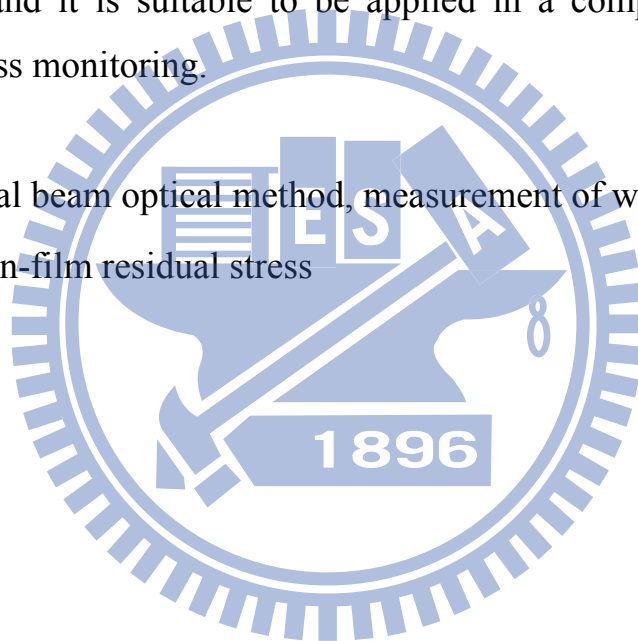
ABSTRACT

Lattice misfit between the gallium nitride thin film and sapphire substrate often induces intrinsic stress in light-emitting diode (LED) wafers in the epitaxial process. Besides, the thermal mismatch also yields wafer bowing and residual stress in the thin film. The quality of thin-film deposition becomes unstable and followed by peeling or wrinkling if large residual stress remains in the thin film. It results in a need for precise evaluation methods to measure wafer curvature during and after the epitaxial deposition process. The process parameters can then be controlled to reduce the thin film residual stress and to increase the yield rate of epitaxial wafers.

This study determines the thin-film residual stress by using the curvature of a GaN-based sapphire wafer measured by a non-contact, dual beam optical method. Two parallel beams of laser light are incident to the warped surface of a test wafer. The laser beams reflected from the curved surface do not remain parallel. A charge-coupled device camera was used to detect the relative distance of two reflected beam spots projected on a rotating ground glass screen. The curvature is determined

in accordance with the geometric relation between the wafer bow and deflection of light beams. In addition, the conventional Stoney formula for thin film residual stress was amended for the anisotropic substrates under bi-axial stresses using the classical plate theory. The measuring components and system were evaluated to reduce the standard deviation of data set. The measured results were compared to those obtained by Twyman-Green interferometer. Both have a good agreement in tendency. Dual beam optical method follows geometric optics and differs from interference method. The present method is not easily interrupted by environment, and it is suitable to be applied in a compact space for epitaxial process monitoring.

Keywords : dual beam optical method, measurement of wafer curvature, thin-film residual stress



誌謝

首先非常感謝指導教授 尹慶中博士給予學生之關心與悉心教導，使學生在兩年獲益良多，並能順利完成本論文。同時感謝楊哲化老師、章明老師及鄭泗東老師撥冗擔任口試委員，對本論文提供建議與指導，使論文能更加完整，學生在此致上由衷感謝。

在交通大學求學期間接觸各種領域的研究，增加學生見聞。感謝非破壞評估實驗室學長游泰和、王多聞、許世明、溫子達、賴佑年、鄭博毅、學姐吳昱瑾在研究過程分享珍貴經驗與幫助，感謝同學湯士杰、王裕太、鄭智遠、黃室維、蔡慶芳、蔡旻軒在研究上協助與生活上的扶持，以及學弟妹吳旻修、李邵遠、梁均帆、郇心慧、李柏勳、黃仲平，讓兩年研究時光充滿歡笑與回憶，在此預祝你們研究順利，並感謝交大提供完善實驗設備，還有許多不及備載幫助我的朋友們，謝謝你們。

感謝我親愛的父母親與弟弟，感謝你們的照顧與支持做為最大的鼓勵，讓我能專心完成學業。最後，謹以此論文獻給我摯愛的家人、師長及朋友。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.2.1 應力量測之文獻.....	2
1.2.2 薄膜應力之文獻.....	3
1.3 內容簡述.....	4
第二章 理論分析.....	6
2.1 殘留應力.....	6
2.2 薄膜應力推導.....	7
2.2.1 Stoney 薄膜應力模型.....	7
2.2.2 古典板理論之薄膜應力.....	9
第三章 雙光束量測曲率之原理.....	15
3.1 雙光束量測法原理.....	15
3.2 雙光束量測法系統架構.....	17
第四章 實驗量測與結果討論.....	19
4.1 雙光束量測程式與機器視覺.....	19
4.2 雙光束量測系統量測與討論.....	21
4.2.1 校正.....	21

4.2.2 量測穩定性	22
4.3 薄膜應力討論	24
第五章 結論與未來展望	27
5.1 結論.....	27
5.2 未來工作	28
參考文獻.....	29
附表.....	32
附圖.....	36



表目錄

表 1 應力計算採用的材料參數(單位：GPa).....	32
表 2 各測量點的 P_x 應力計算值(單位：MPa).....	32
表 3 各測量點的 P_y 應力計算值(單位：MPa)	33
表 4 各測量點的 x 方向曲率量測值(單位： Km^{-1})	33
表 5 各測量點的 y 方向曲率量測值(單位： Km^{-1})	34
表 6 各測量點的 Q_{y0} 應力計算值(單位：Pa).....	34
表 7 量測方法的優缺點比較	35



圖目錄

圖 1.1	LED 之藍寶石磊晶製程之監測曲線[1].....	36
圖 1.2	牛頓環法量測等向性材料之干涉圖形[2].....	36
圖 1.3	牛頓環法量測非等向性材料之干涉圖形[2].....	37
圖 1.4	改良牛頓法之幾何光學實驗架構[3].....	37
圖 1.5	垂直入射之雙光束量測法[5].....	38
圖 1.6	改良式懸臂梁法[7].....	38
圖 1.7	光槓桿法實驗架構[8].....	39
圖 1.8	相位式太曼-格林干涉儀[10].....	39
圖 1.9	雙光束量測法原理示意圖.....	40
圖 2.1	溫度變化所造成基板變形之示意圖.....	41
圖 2.2	薄膜張應力造成基板的變形.....	41
圖 2.3	薄膜壓應力造成基板的變形.....	42
圖 2.4	磊晶過程 CVD 腔體示意圖.....	42
圖 2.5	薄膜成長過程(a)前置物到達、吸附晶圓表面(b)前置物在表面 移動(c)前置物在表面反應(d)成核 (e)島狀物成長(f)島狀物 橫截面(g)島狀物合併(h)形成連續薄膜.....	43
圖 2.6	晶圓剖面圖.....	44
圖 2.7	基板變形前後示意圖.....	44
圖 2.8	角位移變形圖.....	45
圖 2.9	座標示意圖.....	45
圖 3.1	雙光束量測系統模型示意圖.....	46
圖 3.2	單方向曲率量測.....	47
圖 3.3	雙方向曲率量測.....	47
圖 3.4	雙光束量測系統示意圖.....	48

圖 3.5 光束平移晶體	49
圖 3.6 CCD 相機過度曝光	49
圖 3.7 偏光板 2 與光束平移晶體之作用	50
圖 3.8 屏幕兩光點發散現象	50
圖 3.9 本研究自行設計之旋轉屏幕	51
圖 3.10 兩光點直接入射 CCD 相機之影像	51
圖 3.11 晶圓固定方式(a)晶圓夾具(b)夾具與步進馬達固定	52
圖 3.12 步進馬達控連接圖	53
圖 3.13 面掃描標號示意圖	53
圖 3.14 雙光束量測法系統架構	54
圖 4.1 量測程式的面板介面圖像	55
圖 4.2 CCD 相機擷取之原始影像	55
圖 4.3 原始影像經二值化處理後之圖像	56
圖 4.4 無設定面積閾值之錯誤情況	56
圖 4.5 機器視覺程式辨識 CCD 相機擷取之兩光點的邊界，計算兩者中心點的距離	57
圖 4.6 改良解析度之示範架構	57
圖 4.7 入射角參數的校正	58
圖 4.8 工作距離之校正	58
圖 4.9 量測過程平均次數由一次到五次平均之穩定性比較(a)量測無平均之穩定性(b)量測平均 3 次之穩定性(c)量測平均 5 次之穩定性	59
圖 4.10 光點大小變化範圍示意圖(a) 加入透鏡光點縮小前(b) 加入透鏡光點縮小後	60
圖 4.11 不同焦距之透鏡之穩定性分析(a)焦距為 15cm 之凸透鏡(b)	

焦距為 30cm 之凸透鏡	61
圖 4.12 屏幕未旋轉下之屏幕影像	62
圖 4.13 屏幕旋轉下之屏幕影像	62
圖 4.14 不同電壓驅動馬達之旋轉屏幕穩定性分析(a)電壓為 1V(b) 電壓為 1.5V(c)電壓為 2V(d)電壓為 2.7V	63
圖 4.15 晶圓量測範圍	64
圖 4.16 雙光束法量測藍寶石基板之曲率圖(a)x 方向(b)y 方向	65
圖 4.17 雙光束法量測薄膜應力之曲率圖(a)x 方向(b)y 方向	66
圖 4.18 太曼-格林干涉儀量測藍寶石基板曲率(a)x 方向(b)y 方向 ..	67
圖 4.19 太曼-格林干涉儀量測薄膜應力(a)x 方向(b)y 方向	68
圖 4.20 X 光繞射儀量測面外晶格變形	69



第一章 緒論

1.1 研究背景

近年來，人們逐漸意識到節能減碳的重要，提倡使用節能燈泡取代傳統燈泡，其中以發光二極體(light emitting diode, LED)最為省電，在照明的運用上扮演重要角色。

LED 的磊晶製程可分為液相磊晶法(liquid-phase epitaxy, LPE)、分子束磊晶(molecular beam epitaxy, MBE)及氣相磊晶法(chemical vapor deposition, CVD)三種。LPE 製程速度快，但產品品質不穩定，良率不高。MBE 可精準控制磊晶厚度，生產速度慢不適合量產。CVD 能夠精確控制組成物與大量生產，是目前生產 LED 的主要方法。因為 LED 製程導入的前置物種類包含金屬有機物，上述 CVD 製程稱為金屬有機化學氣相磊晶法(metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)。

MOCVD 製程有三項重要的監測參數，分別為溫度、反射率及曲率[1]，圖 1.1 所示為 LED 製程中全程紀錄的檢測參數範例，也是每片 LED 磊晶晶圓的出生證明。不同製程所需要的溫度不盡相同，過高或低的溫度都會導致成長率或良率下降。反射率與試片的輻射率有關，可以修正溫度的測值，還可以監測薄膜成長率，監測是否達到所需膜厚。曲率是業界近期關注的監測參數，因為發現藍寶石晶圓基材會隨磊晶製程溫度變化發生彎曲現象，有些鍍膜材料(如氮化鎵 GaN)於磊晶時，對於基材的翹曲敏感，需要即時監測製程，以控制各組成元素晶格的匹配及熱應力。基材的曲率更對薄膜磊晶成長率有所影響，造成元件電性改變，例如在曝光製程中發生錯位，導致短路。薄膜應力會影響薄膜的附著性，造成薄膜產生剝落(peeling)或皺紋(wrinkling)。

為了獲得高品質的磊晶成品，曲率量測及應力估算已成為一重要課題。溫度、反射率的量測方法已發展完備，故本研究將只著重晶圓曲率的量測。

1.2 文獻回顧

1.2.1 應力量測之文獻

1959年，Finegan 與 Hoffman [2]以牛頓環(Newton's ring)法觀察到試片表面非等向應力的干涉條紋。考量蓋玻片擁有較佳的平整度及厚度，在真空中沉積鐵薄膜於圓形蓋玻片，薄膜應力足以使得基板發生彎曲。分別如圖 1.2 與 1.3 所示，等向性應力作用會造成圓形干涉條紋，非等性應力分佈則會呈現橢圓形干涉條紋。

1982年，Rossnagel *et al* [3]改良牛頓環架構，以幾何光學原理達成快速量測的目的，實驗裝置如圖 1.4 所示。將薄膜沉積在圓形蓋玻片上，表面變形近似拋物面，取代牛頓環實驗裝置中的球面鏡，投影至屏幕之成像隨著試片凹凸，放大或縮小，可計算變形量。

1969年，Klokhholm [4]曾利用微電子天平(electronic microbalance)測量一端固定類似於懸臂梁(cantilever beam)結構的石英棒變形量，連續地量測鍍膜中結構的變形，並求得薄膜內應力與曲率，此方法具有架構簡單與在原位(*in-situ*)量測的優點，但基板必須能夠導電。

1988年，Aoki *et al* [5]以圖1.5所示之光學系統，將一束氦氖雷射經過一個分光鏡，形成兩束相互垂直的光線，一束垂直入射晶圓表面，另一束水平入射夾45度之平面鏡，使垂直入射晶圓表面。由晶圓表面反射光投影至屏幕後，量測兩光點距離，由光路的幾何關係推估變形與薄膜應力。若試片表面無法反射雷射，則需在試片表面鍍上反射層。

1990年，Sahu *et al* [6]提出一種新的光電技術，實驗架構參考圖 1.6 所示，將長方型玻璃基板一端固定，使用電化學反應在基板鍍上一層氫化鈮造成基板彎曲，電鍍過程中採用位置感測元件(position sensitive detector, PSD)，量測雷射光入射翹曲基板後的角度偏移量，估算鍍膜上的應力，具有架構簡易之優點。

1977年，Sinha *et al* [7]設計如圖 1.7 所示之光槓杆法(Laser levered reflection method)裝置，以水平移動之雷射光入射於加熱盤上的基板，翹曲的基板會使得屏幕上的光點產生變化，測量曲率估算矽基板上介電層(dielectric film)的熱應力及本質應力。

1966年，Ennos [8]以麥克森干涉儀量測基板偏移量並對不同薄膜材料、多層薄膜進行應力量測。1975年，Röll、Hoffmann [9]將麥克森干涉儀架構安裝於真空腔體中，並計錄溫度變化下薄膜應力釋放的條紋變形。

2001年，Tien *et al* [10]採用如圖1.8所示之相位移式太曼-格林(Twyman-Green)干涉儀，在已知熱膨脹係數、楊氏係數及蒲松比的BK-7與Pyrex玻璃基板上沉積薄膜，薄膜沉積完成後透過加熱板改變溫度，利用相位變化量測面外位移量，再使用Stoney的應力公式計算應力，繪製應力與溫度的關係圖計算出薄膜應力、熱膨脹係數。

1.2.2 薄膜應力之文獻

1858年，Gore [11]發現在電鍍銻(antimony)的過程會有極度不穩定的狀態，很容易因為振動或局部熱應力造成破壞，主張因內外聚合力(cohesive tension)的不相等，在正負電極處會發生外凸與內凹的現象。

1877年，Mills [12]發現以化學反應鍍於溫度計底部的金屬薄膜

具有應力，使得溫度計內的水銀上升，且薄膜超過一定厚度很容易剝落，並針對不同沉積時間與材料分析。

1909 年，Stoney [13]在鋼尺鍍上一層鎳(nickel)薄膜作為試片，量測鋼尺彎曲變形的位移量，依據力及力矩平衡關係，推導出薄膜應力公式。之後有關薄膜的應力量測或分析，多以 Stoney [13]的薄膜應力公式為準，進行薄膜應力的計算與改良。

1993 年，Riet [14]根據基板的位移量推導非等向性的薄膜應力，將應力應變關係代入平衡方程式，將座標軸旋轉至主力矩 (principle moment)平面，由於基板無外力作用，主力矩平面的力及力矩必須自我平衡(self balance)，求解出主力矩平面的應力。

1.3 內容簡述

光學量測技術具有非破壞性、即時量測及高精確度等優點，本研究以幾何光學量測藍寶石晶圓的曲率，由力平衡推導、計算薄膜內部應力。薄膜內應力不僅使光學鍍膜發生變形，也會使得基板與薄膜的附著力下降，造成光學元件波長偏移，導致製程的良率下降與製造成本的浪費，影響整體產能。

本研究採用雙光束量測法量測晶圓的曲率，光學量測系統如圖 1.9 所示，將兩道平行光束入射於晶圓表面，翹曲的晶圓表面會使得反射光束平行度發生改變，以 CCD 相機擷取反射至旋轉屏幕的兩光點，應用機器視覺法則辨識光點中心，計算中心距離變化量。根據幾何關係計算晶圓表面的曲率及薄膜應力。本研究之光學量測系統並非光學干涉法，具有抵抗外界擾動之優點，且能配合 CVD 機台腔室(chamber)較小的視窗(viewport)使用，即時監測磊晶製程中的晶圓曲率。

本文共分為五章，第一章說明研究背景、目的，回顧晶圓曲率與

薄膜應力量測之文獻，第二章為理論說明，包含薄膜應力產生原因與薄膜應力推導。第三章則為雙光束系統量測原理與實驗架構。第四章則為實驗量測與結果討論，包括機器視覺、系統校正與量測穩定性的討論，第五章則為結論與未來工作展望。



第二章 理論分析

本章介紹薄膜殘留應力之形成原因、應力型態及薄膜成長過程，擴充 Stoney [13]的薄膜應力模型，推導非等向材料之薄膜應力。

2.1 殘留應力

磊晶製程中，薄膜沉積於基材後，薄膜與基板間的晶格相對伸長或縮短，會產生殘留應力(residual stress)，造成晶圓彎曲，如圖2.1所示。試片在無外力作用下，需滿足平衡條件，即薄膜應力由基板的面內應力平衡，兩力偶間的平衡，產生一內力矩作用，導致發生彎曲變形。薄膜的應力可分為張應力(tensile stress)及壓應力(compressive stress)，如圖2.2與圖2.3所示。過大的張應力會使薄膜產生破裂，過大的壓應力則使薄膜起皺、脫落。殘留應力分別由本質應力(intrinsic stress)與熱應力(thermal stress)造成。基板與薄膜間的晶格不匹配，使得內部分子相互拉擠，造成本質應力。熱應力是因為製程的溫度變化，加上薄膜與基材間熱膨脹係數(coefficient of thermal expansion, CTE)的差異產生。殘留應力的存在對薄膜的機械性質、平整度、附著性等都有重要影響。

CVD薄膜成長的過程分為幾個步驟[15]，圖2.4所示為前置物(precursor)以氣態型態傳遞至CVD反應腔室，腔室內產生強制對流區，靠近晶圓的區域稱為邊界層；薄膜形成的過程如圖2.5所示，前置物會以擴散方式到達晶圓表面並吸附[16]，在基板表面移動，發生表面反應，隨著成核作用形成島狀物，島狀物逐漸成長、合併，成長到所需厚度之連續性固態薄膜；反應後產生之副產物則由腔體出口排出。

2.2 薄膜應力推導

2.2.1 Stoney 薄膜應力模型

Stoney [13] 假設基板是等向性(isotropic)材料，薄膜厚度 t 遠小於基板厚度 d ，薄膜與基板完全附著，圖2.6所示為試片因薄膜應力造成的變形剖面，座標原點設在薄膜與基板的接合面上， b 為座標原點距中性軸之距離， L 是基板未變形前的長度， r 是基板變形後之曲率半徑， w 是試片寬度， σ_f 是薄膜的內應力， E_s 是基板的楊氏模數，基板的應變可寫成

$$\varepsilon_x = \frac{L' - L}{L} = \frac{y - b}{r} \quad (2.1)$$

倘若基板厚度與長度比值(d/L)很小，基板的應力可以表示為

$$\sigma_x = E_s \varepsilon_x = \frac{E_s (y - b)}{r} \quad (2.2)$$

由於薄膜厚度極薄，對於座標原點的力矩平衡可近似為

$$\int_0^d y \sigma_x dA = 0 \quad (2.3)$$

故中性軸在距原點 $2d/3$ 處，

$$b = \frac{2d}{3} \quad (2.4)$$

薄膜與基板的力平衡式為

$$\sigma_f t w = \int_0^d \sigma_x dA \quad (2.5)$$

因此薄膜的應力為

$$\sigma_f = \frac{E_s d^2}{6rt} \quad (2.6)$$

考慮基板為二維等向性材料，假設兩正交方向的應力、應變相等，則

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon \quad (2.7)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma \quad (2.8)$$

根據廣義虎克定律，應力與應變有下列關係

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (2.11)$$

假設薄膜與基板的面外正向應力 $\sigma_z = 0$ ，則

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu\sigma_x) \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_z = \frac{-\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.14)$$

$\sigma_z = 0$ 將(2.7)-(2.8)式代入(2.12)-(2.14)式，得

$$\varepsilon = \varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{1-\nu}{E} \sigma \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_z = \frac{-2\nu}{E} \sigma \quad (2.16)$$

令 $E^* = E/(1-\nu)$ 表示雙軸應力模型的楊氏模數。

Stoney以尤拉梁假設建立薄膜應力與曲率之間的關係，倘若基板承受純彎矩(pure bending)作用，各點的變形曲率相同。實際上，非等向性基材或沉積過程造成薄膜與基材的晶格錯排(lattice mismatch)，會導致兩正交方向曲率的不一致，所以Stoney的薄膜應力公式有必要修正。

2.2.2 古典板理論之薄膜應力

本研究以藍寶石基板上沉積氮化鎵薄膜作為薄膜應力分析的對象，推導方式參考Stoney [13]及古典板假設[17]，修正薄膜殘留應力公式。物理問題的假設如下：

- 薄膜厚度遠小於基板厚度(至少差 10 倍)
- 與中平面垂直的截面變形後仍與中平面保持垂直
- 忽略 z 方向剪應力(transverse shear)造成之應變
- 忽略垂直於中性面的正向應力
- 薄膜與基板完美接合

座標原點設在厚度中間的中平面(mid-plane)，此平面上並無任何正向應變。參考圖2.7所示，取出一小段，繪作自由體圖，其中 \overline{AB} 線段表示某一小段的試片，而 $\overline{A'B'}$ 為變形後的 \overline{AB} 線段，應變可寫成

$$\varepsilon_x = \frac{\overline{A'B'} - \overline{AB}}{\overline{AB}} = \frac{[dx + z(\partial \theta / \partial x) dx] - dx}{dx} = -z\kappa_x \quad (2.17)$$

同理， Y 方向應變，表示如下

$$\varepsilon_y = -z\kappa_y \quad (2.18)$$

參考圖2.8所示，由應變的定義，剪應變 γ_{xy} 為

$$\gamma_{xy} = \gamma' + \gamma'' = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = -2z\kappa_{xy} \quad (2.19)$$

κ_x 、 κ_y 與 κ_{xy} 分別代表 $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ 、 $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ 及 $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$ 。

本研究座標系統參考圖2.9所示，基板及薄膜厚度分別為 d 與 t ，座標原點設於薄膜與基板的交界面(interface)，而不是正向應變為零之平面，應變的表示式必須加入伸長(stretching)與彎曲(bending)項，故

應變假設成

$$\varepsilon_x = \alpha - z\kappa_x \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_y = \beta - z\kappa_y \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\gamma - z\kappa_{xy} \quad (2.22)$$

本研究之基板材料是藍寶石，藍寶石屬於三斜晶系(trigonal)，應力與應變關係[18]可以矩陣式表示

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

或展開為

$$\sigma_{xx} = C_{11}\varepsilon_{xx} + C_{12}\varepsilon_{yy} + C_{13}\varepsilon_{zz} + 2C_{14}\varepsilon_{yz} \quad (2.24)$$

$$\sigma_{yy} = C_{12}\varepsilon_{xx} + C_{11}\varepsilon_{yy} + C_{13}\varepsilon_{zz} - 2C_{14}\varepsilon_{yz} \quad (2.25)$$

$$\sigma_{zz} = C_{13}\varepsilon_{xx} + C_{13}\varepsilon_{yy} + C_{33}\varepsilon_{zz} \quad (2.26)$$

$$\sigma_{yz} = C_{14}\varepsilon_{xx} - C_{14}\varepsilon_{yy} - 2C_{44}\varepsilon_{yz} \quad (2.27)$$

$$\sigma_{xz} = 2C_{44}\varepsilon_{xz} + 2C_{14}\varepsilon_{xy} \quad (2.28)$$

$$\sigma_{xy} = 2C_{14}\varepsilon_{xz} + (C_{11} - C_{12})\varepsilon_{xy} \quad (2.29)$$

考慮古典板的假設

$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0 \quad (2.30)$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad (2.31)$$

將(2.20)-(2.22)式、(2.30)-(2.31)式代入(2.24)-(2.29)式，獲得

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{C_{13}}{C_{33}}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \quad (2.32)$$

$$\sigma_{xx} = C_{11}(\alpha - z\kappa_x) + C_{12}(\beta - z\kappa_y) - \frac{C_{13}^2[\alpha + \beta - z(\kappa_x + \kappa_y)]}{C_{33}} \quad (2.33)$$

$$\sigma_{yy} = C_{12}(\alpha - z\kappa_x) + C_{11}(\beta - z\kappa_y) - \frac{C_{13}^2[\alpha + \beta - z(\kappa_x + \kappa_y)]}{C_{33}} \quad (2.34)$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad (2.35)$$

$$\sigma_{yz} = C_{14}(\alpha - \beta - z\kappa_x + z\kappa_y) \quad (2.36)$$

$$\sigma_{xz} = C_{14}(\gamma - 2z\kappa_{xy}) \quad (2.37)$$

$$\sigma_{xy} = (C_{11} - C_{12})\left(\frac{1}{2}\gamma - z\kappa_{xy}\right) \quad (2.38)$$

本研究的薄膜材料為氮化鎵，屬於六方晶系(hexagonal)。應力與應變關係[19]可以矩陣式表示

$$\begin{bmatrix} \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{zz} \\ \sigma'_{yz} \\ \sigma'_{xz} \\ \sigma'_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C'_{12} & C'_{11} & C'_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C'_{13} & C'_{13} & C'_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C'_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C'_{11} - C'_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon'_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

或展開為

$$\sigma'_{xx} = C'_{11}\varepsilon_{xx} + C'_{12}\varepsilon_{yy} + C'_{13}\varepsilon'_{zz} \quad (2.40)$$

$$\sigma'_{yy} = C'_{12}\varepsilon_{xx} + C'_{11}\varepsilon_{yy} + C'_{13}\varepsilon'_{zz} \quad (2.41)$$

$$\sigma'_{zz} = C'_{13}\varepsilon_{xx} + C'_{13}\varepsilon_{yy} + C'_{33}\varepsilon'_{zz} \quad (2.42)$$

$$\sigma'_{yz} = 2C'_{44}\varepsilon_{yz} \quad (2.43)$$

$$\sigma'_{xz} = 2C'_{44}\varepsilon_{xz} \quad (2.44)$$

$$\sigma'_{xy} = (C'_{11} - C'_{12})\varepsilon_{xy} \quad (2.45)$$

相似於先前的推導，考慮古典板假設

$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0 \quad (2.46)$$

$$\sigma'_{zz} = 0 \quad (2.47)$$

將(2.20)-(2.22)式、(2.46)-(2.47)式代入(2.40)-(2.45)式，可獲得

$$\varepsilon'_{zz} = -\frac{C'_{13}}{C'_{33}}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{xx} = & C'_{11}(\alpha - z\kappa_x) + C'_{12}(\beta - z\kappa_y) \\ & - \frac{C'_{13}{}^2}{C'_{33}} \left[\alpha + \beta - z(\kappa_x + \kappa_y) \right] \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{yy} = & C'_{12}(\alpha - z\kappa_x) + C'_{11}(\beta - z\kappa_y) \\ & - \frac{C'_{13}{}^2}{C'_{33}} \left[\alpha + \beta - z(\kappa_x + \kappa_y) \right] \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\sigma'_{zz} = 0 \quad (2.51)$$

$$\sigma'_{yz} = 0 \quad (2.52)$$

$$\sigma'_{xz} = 0 \quad (2.53)$$

$$\sigma'_{xy} = (C'_{11} - C'_{12})(0.5\gamma - 2z\kappa_{xy}) \quad (2.54)$$

假設晶圓沒有受到外力作用，滿足力平衡式，

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0 \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \quad (2.57)$$

將(2.55)-(2.57)對試片厚度(-d~t)積分，為簡化算式，以代號表示

$$\frac{\partial}{\partial x}(N_x + N'_x) + \frac{\partial}{\partial y}(N_{xy} + N'_{xy}) + T_{xz} = 0 \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(N_{xy} + N'_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(N_y + N'_y) + T_{yz} = 0 \quad (2.59)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (2.60)$$

各項代號定義如下：

$$N_x = \int_{-d}^0 \sigma_x dz, \quad N_y = \int_{-d}^0 \sigma_y dz, \quad N_{xy} = \int_{-d}^0 \sigma_{xy} dz,$$

$$N'_x = \int_0^t \sigma'_x dz, \quad N'_y = \int_0^t \sigma'_y dz, \quad N'_{xy} = \int_0^t \sigma'_{xy} dz,$$

$$T_{xz} = \int_{-d}^0 \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} dz, \quad T_{yz} = \int_{-d}^0 \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} dz, \quad Q_x = \int_{-d}^0 \sigma_{xz} dz,$$

$$Q_y = \int_{-d}^0 \sigma_{yz} dz.$$

在平衡條件下，力矩也必須滿足平衡關係式。將(2.55)-(2.57)式乘上 z ，再對試片厚度($-d \sim t$)積分，可得

$$\frac{\partial}{\partial x}(M_x + M'_x) + \frac{\partial}{\partial y}(M_{xy} + M'_{xy}) - Q_x = 0 \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(M_{xy} + M'_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(M_y + M'_y) - Q_y = 0 \quad (2.62)$$

其中

$$M_x = \int_{-d}^0 z \sigma_x dz, \quad M_y = \int_{-d}^0 z \sigma_y dz, \quad M_{xy} = \int_{-d}^0 z \sigma_{xy} dz$$

$$M'_x = \int_0^t z \sigma'_x dz, \quad M'_y = \int_0^t z \sigma'_y dz, \quad M'_{xy} = \int_0^t z \sigma'_{xy} dz.$$

因晶圓無受外力，需滿足自我平衡，故

$$N_x + N'_x = 0 \quad (2.63)$$

$$N_y + N'_y = 0 \quad (2.64)$$

$$N_{xy} + N'_{xy} = 0 \quad (2.65)$$

$$M_x + M'_x = 0 \quad (2.66)$$

$$M_y + M'_y = 0 \quad (2.67)$$

$$M_{xy} + M'_{xy} = 0 \quad (2.68)$$

$$Q_x + Q_{x0} = 0 \quad (2.69)$$

$$Q_y + Q_{y0} = 0 \quad (2.70)$$

因為薄膜很薄，假設薄膜應力為均勻應力($\sigma'_{xx} = P_x$ 、 $\sigma'_{yy} = P_y$ 、 $\sigma'_{xy} = P_{xy}$)。事實上，磊晶過程因為晶格差異，薄膜會產生本質應力， P_x 、 P_y 與 P_{xy} 的假設已包括本質應力在內，故在(2.69)與(2.70)式中加入 Q_{x0} 與 Q_{y0} 。利用(2.63)-(2.64)式、(2.66)-(2.67)式求解，可得

$$P_x = -\frac{h^3 C_{13}^2 \kappa_x - h^3 C_{11} C_{33} \kappa_x + h^3 C_{13}^2 \kappa_y - h^3 C_{12} C_{33} \kappa_y}{6h(h+t)C_{33}} \quad (2.71)$$

$$P_y = -\frac{h^3 C_{13}^2 \kappa_x - h^3 C_{12} C_{33} \kappa_x + h^3 C_{13}^2 \kappa_y - h^3 C_{11} C_{33} \kappa_y}{6h(h+t)C_{33}} \quad (2.72)$$

$$\alpha = -\frac{h(4h+3t)\kappa_x}{6(h+t)} \quad (2.73)$$

$$\beta = -\frac{h(4h+3t)\kappa_y}{6(h+t)} \quad (2.74)$$

使用(2.65)、(2.68)-(2.70)式，可分別解得 γ 、 P_{xy} 、 Q_{x0} 及 Q_{y0} 。

第三章 雙光束量測曲率之原理

本章將詳細說明本研究架設之雙光束量測系統、基本原理與實驗架構。雙光束量測系統基本原理係利用兩束平行光束入射翹曲的晶圓表面，由晶圓表面反射的兩光束投影至旋轉的屏幕，形成兩光點，使用CCD相機擷取光點影像，利用機器視覺測量兩光點距離，根據幾何關係計算曲率。實驗系統參考Zettler *et al* [13]量測架構，並做改良。

3.1 雙光束量測法原理

本節將以一維曲率量測系統模型，說明雙光束量測法原理，如圖3.1所示， $f(x, y)$ 代表晶圓表面的輪廓函數，雷射經過光束平移晶體 (beam displacer)後，所形成之兩平行光束分別以 $\overline{AA'}$ 與 $\overline{BB'}$ 表示， D 為兩平行光束 $\overline{AA'}$ 與 $\overline{BB'}$ 相對距離， $\overline{AA'}$ 與 $\overline{BB'}$ 以角度 α 入射於晶圓表面， $\overline{A'A''}$ 與 $\overline{B'B''}$ 為自晶圓表面反射至旋轉屏幕的光路， θ 則表示 A' 點在輪廓函數 $f(x, y)$ 之切線與水平線的夾角， $d\theta$ 為 A' 點與 B' 點在 $f(x, y)$ 之切線角度差， ρ 則表示 $\overline{A'B'}$ 的曲率半徑， $\overline{A'A'_{\perp}}$ 與 $\overline{B'B'_{\perp}}$ 分別是通過 A' 點與 B' 點垂直於 X 軸的垂線， u 則是量測屏幕上兩光點中心距離，其單位為像素(pixel)，如圖3.2所示。因為 A' 點與 B' 點的切線與水平線夾角分別為 θ 與 $\theta+d\theta$ ，由幾何關係可知入射光 $\overline{A'A''}$ 與 $\overline{B'B''}$ 在晶圓表面的入射角分別是 $\alpha+\theta$ 與 $\alpha+\theta+d\theta$ ， $\angle A''A'A'_{\perp}$ 與 $\angle B''B'B'_{\perp}$ 的角度為 $\alpha+2\theta$ 與 $\alpha+2\theta+2d\theta$ ，為簡化公式，令 $\angle A''A'A'_{\perp} = \alpha' = \alpha + 2\theta$ 、 $\angle B''B'B'_{\perp} = \alpha'' = \alpha + 2\theta + 2d\theta$ 。

由幾何關係可得 $\overline{A'B'}$ 的曲率 κ ，表示為

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \quad (3.1)$$

ρ 為曲率半徑， ds 為兩平行光束入射於晶圓表面 $\widehat{A'B'}$ 的弧長。由於 $\overline{AB''}$ 為一定值，則 u 可表示為

$$u = \frac{D}{\cos \alpha} + (y_2 - y_1) \tan \alpha + y_2 \tan(\alpha'') - y_1 \tan(\alpha') \quad (3.2)$$

當 $y = y_1 \cong y_2$ 時，可簡化成

$$u = \frac{D}{\cos \alpha} + y[\tan(\alpha'') - \tan(\alpha')] \quad (3.3)$$

當 θ 極小，且 $d\theta$ 遠小於 θ ，(3.3) 式可簡化為

$$u = \frac{D}{\cos \alpha} + y \left(\frac{2d\theta}{\cos^2 \alpha} \right) \quad (3.4)$$

此時， $d\theta$ 可以整理如下

$$d\theta = \frac{(u \cos \alpha - D) \cos \alpha}{2y} \quad (3.5)$$

在 $y = y_1 \cong y_2$ 條件下， $\widehat{A'B'}$ 約等於 AB ，並可寫成

$$\widehat{A'B'} \cong \overline{AB} = ds = \frac{D}{\cos \alpha} \quad (3.6)$$

將(3.5)-(3.6)式代入(3.1)式關係式中，可得

$$\kappa = \frac{(u \cos \alpha - D) \cos^2 \alpha}{2Dy} \quad (3.7)$$

(3.7) 式為本研究雙光束量測法之重要公式，量測投影至屏幕的兩光點中心距離 u 與各項參數，即可計算晶圓曲率。

假若入射光以垂直入射晶圓表面，改寫(3.7)式得

$$\kappa \cong \frac{(u - D)}{2Dy} \quad (3.8)$$

若在同一位置測量不同方向曲率，可將水平兩光點傾斜排列(圖 3.3)，由兩光點的水平與垂直方向距離變化量求得曲率。

3.2 雙光束量測法系統架構

圖 3.4 所示為雙光束量測法實驗架構示意圖。光束平移晶體為方解石晶體(calcite)具雙折射性質，如圖 3.5 所示，隨著入射光偏振方向的不同，有不同的折射角，可使光束分離，晶體長度決定兩光束分離的距離，根據晶體幾何設計形成兩平行的光束。考量雷射光具有光強穩定、光束直徑較小與不易發散特性，實驗系統以波長為 633nm 偏極雷射光作為光源。為避免光源過強造成 CCD 相機過度曝光，無法量測曲率(圖 3.6)，置入偏光板 1 配合偏極雷射光，達到調制光強之目的。另一方面，不同材料的表面反射率不盡相同，光強的可調性使實驗系統適用於不同表面反射率之試片。參考圖 3.7 所示，偏光板 2 可使光束偏振方向與光束平移晶體光軸夾 45 度，使投影至屏幕之 2 光點光強一致，配合後續影像處理，有效增加量測準確度，倘若入射光之水平與垂直分量不同，屏幕上可觀察到兩光點大小不一，甚至只有單一光點情況。所使用的雷射光源仍有些許發散現象(圖 3.8)，光束的發散會造成屏幕上兩光點過於靠近或重疊，導致無法計算兩光點中心距離，故在系統中加一透鏡，將雷射光束直徑縮小。為避免光束在透鏡與光束平移晶體間相互反射、干擾，在兩者間放入光圈(iris)隔絕干擾。屏幕的旋轉是為了平均投影至屏幕上的光點散斑(speckle)，讓 CCD 相機擷取清晰影像，降低雷射光強與方便 CCD 相機對焦。圖 3.9 顯示本研究設計之單面磨砂之壓克力圓盤，固定於直流 DC 馬達，以電源供應器直接驅動。考量 CCD 相機的過度曝光及擷取影像雜訊過多(圖 3.10)的現象，所以光束不直接入射 CCD 相機，若晶圓變形較大，兩光點可能超出 CCD 感光元件範圍無法量測，所以在 CCD 相機前加入鏡頭，不但可避免曝光過度，對系統解析度也有助益。另外，可調小鏡頭上的光圈減少外界光害，提高機器視覺的辨別度。本研究

以 Labview 圖控程式，控制 CCD 相機擷取旋轉屏幕上的兩光點影像，利用機器視覺程式辨識、量測兩光點中心距離，代入(3.7)式得到量測點曲率。各元件對系統之影響將於第四章討論。

雙光束量測法僅能量測局部區域的曲率，若要評估晶圓薄膜殘留應力的分佈，則需要描掃晶圓表面。本研究利用步進馬達(steping motor)驅動之平台移動晶圓，圖 3.11 所示為自行設計之夾具與試片與步進馬達結合之情形。選用步進馬達的考量如下：

1. 具有瞬間啟動、快速停止特性。
2. 靜止時有很高的保持轉距(holding torque)，且不需煞車裝置。
3. 旋轉角度與輸入脈波數成正比，以開迴路(open loop)控制即可達到高精確角度。
4. 每一步的角度誤差極小，並無累積誤差。
5. 改變激磁的順序，可以簡便地控制步馬達的轉動方向。

步進馬達的轉子由永久磁鐵構成，定子部份為四組線圈，旋轉一圈 360 度分為 200 步，故一步角為 1.8 度，旋轉一圈驅動平台前進之距離稱為螺距(pitch)。本研究採用之步進馬達驅動方式為雙相激磁，馬達螺距為 2mm。連接方式參考圖 3.12 所示。本研究以 Labview 圖控程式控制 NI-7344 運動控制卡，配合 UMI-7764 接線盒輸出脈波，以驅動器(driver)驅動步進馬達。掃描路徑類似於「之」字形，以相等間距量測晶圓表面曲率，將每一量測點編號(圖 3.13)存檔，量測數據代入第二章所推導薄膜應力公式求解，並以 Matlab 程式繪出應力分佈。

實際應用可加入平面鏡改變光束行進方向，或是其他光學元件，以符合實際機台視窗大小，本實驗裝置為垂直入射的配置，如圖 3.14 所示，將機台視窗使用空間減至最少。

第四章 實驗量測與結果討論

本章將說明雙光束量測法之量測程式與機器視覺、各項元件的影響與應力量測實驗結果，並與湯士杰[21]以太曼-格林干涉儀進行之相關研究比較及討論。

4.1 雙光束量測程式與機器視覺

本研究採用 LabVIEW 圖控軟體撰寫雙光束量測程式，程式包含曲率量測與機器視覺，操作介面如圖 4.1 所示，由面板介面輸入量測範圍、量測間距與平均次數，自翹曲晶圓反射的雙光束投影至旋轉屏幕形成兩光點，圖 4.2 所示為 CCD 相機擷取之光點原始影像，即時呈現於程式面板介面的左上角。圖 4.3 所示為應用二值化程式處理後的原始影像，該圖可顯示於圖 4.1 之面板介面的左下角。透過機器視覺演算程序辨識兩光點影像，分別找到兩光點位置，計算光點個別的質心位置，求得兩光點中心的距離，其單位以像素(pixel)表示，尚未轉換為實際物理量，量測得到之中心距離與其位置編號一起儲存成文字檔。完成量測後，以 Matlab 程式讀取檔案，轉換為實際物理量的曲率，進一步計算薄膜應力。

量測程式可設定 CCD 相機擷取光點影像大小的閾值，實際量測偶然會發生雜點，雜點相較於光點面積小，小於面積閾值的光點將不被辨別，藉此有效消除可能擷取的雜點。如圖 4.4 所示，機器視覺演算程序辨視出三個光點，設定面積閾值後可有效去除雜點。本研究不僅透過面積閾值獲得有效數據，並於量測程式加入判斷法則克服其他問題。在正常情況下，程式辨別光點數量為兩個，任何干擾造成光點數量多或少於兩個即為異常，標記量測數值為零，以便後續數據處理之依據。

二值化[22]的演算過程必須先設定影像灰階的閾值(threshold)，根據每點像素的灰階值大小，將數位影像的灰階轉換為黑或白的二值影像，還可區分成單一閾值與雙重閾值，單一閾值只需設定一個閾值，判斷法則如下：

灰階值大於閾值，則該點像素轉換為白色

灰階值小於閾值，則該點像素轉換為黑色

至於雙重閾值具有二個閾值，其轉換依據為

灰階值介於兩閾值區間內，則該點像素轉換為白色

灰階值在兩閾值區間外，則該點像素轉換為黑色

二值化的應用可以去除影像中不需要的部份，留下影像的基本要素，凸顯影像中不明顯的特性。一般來說，必須要設定合適的閾值，過高的閾值會使影像損失過多資訊，反之，過低的閾值則無過濾效果，二值化在基礎影像分割處理上扮演重要角色，也是機器視覺處理之重要關鍵。本研究由 CCD 相機擷取的光點影像比較單純，因為光點的光強相較其他背景值較強，只需要單一閾值即可，利用二值化將光點從原始影像中分離。

機器視覺辨別光點中心的方法可分為兩種，第一種為光點邊界辨別，量測兩光點的外邊界與內邊界，利用簡單數學計算可以求得，如圖 4.5 所示。第二種是直接計算光點質心的位置，以第二種辨識方式較為準確、穩定。在變形較小的情況下，以第一種方式計算光點中心會有所誤差，第二種方式計算的質心偏差量較小，因為雷射的光強呈現近似高斯分佈，光點周圍的光強較不穩定，經二值化處理後，光點邊緣不平滑，若使用邊界辨識的方法，量測出光點邊界容易跳動，造成不準確。計算質心的方式是以整體像素位置來計算，若邊緣有些許跳動，影響會較小。

4.2 雙光束量測系統量測與討論

4.2.1 校正

本研究原理是將兩道平行光束入射翹曲的晶圓表面，反射至屏幕形成兩光點，再以 CCD 相機擷取影像並辨別。依據前面所述，量測兩光點中心距離的單位是像素，必須轉換成實際物理長度，兩者的換算關係稱為比例常數。校正過程首先在試片位置，放置一個平整度為十分之一波長之平面鏡，以機器視覺量測投影至屏幕的兩光點中心像素距離，實際情況即為雷射光束經由光束平移晶體形成兩光束之相對位移量。例如由平面鏡反射至旋轉屏幕之兩光點中心距離為 84 個像素，而由光束平移晶體所產生的兩光束位移是 2mm，即比例常數為 42 pixel/mm。

比例常數在本量測系統解析度扮演很重要的因素，系統的解析度是由量測系統的工作距離及 CCD 相機像素所決定。量測系統的工作距離即第三章雙光束量測原理中的參數 y ，在較長工作距離下，兩光點產生之位移會較為分開，這並不代表需要將整體架構的距離加長，可由系統光路方面改良，例如加入反射鏡(如圖 4.6 所示)，即可在一定空間內提高系統解析度。CCD 相機的解析度與每單位長度多少個像素有關，即參數中的比例常數，使用面積較大之 CCD 感光元件可改善解析度，也可利用 CCD 相機鏡頭將兩光點區域放大，放大的影像在單位長度內包含更多像素，意即提高解析度，本研究使用之 CCD 相機鏡頭的比例常數至多可達 45。

雙光束量測系統在量測前必須經過校正，才能達到精密量測的目的。首先，最重要參數是雙光束的入射角 α ，入射角的變化將導致結果有很大誤差。校正過程及原理如圖 4.7 所示，在試片位置先放置一

平面鏡，以分離卡將反射鏡移動一段距離 v ，使得投影至屏幕的光點產生位移 d ，以 CCD 相機量測位移，並由幾何關係計算入射角，

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2v}{d} \quad (4.1)$$

得到的入射角可代入 (3.7) 式中，進行曲率的量測與計算。

其次需要校正的重要參數為平面鏡至屏幕的工作距離，參考圖 4.8 所示，藉由量測投影至旋轉屏幕的光點變化，將平面鏡旋轉一小角度 θ 得到轉動前與轉動後的光點位移量 S ，依幾何關係計算得到工作距離 y 。可得(4.2)式，

$$\rho = \frac{S}{2\theta} \quad (4.2)$$

假若入射光點並非入射於旋轉中心，會產生一微小距離 d ，但與工作距離相比極小可忽略，利用上述得到之入射角 α 可以得到工作距離

$$y = \rho \cos \alpha \quad (4.3)$$

4.2.2 量測穩定性

每種儀器在量測都會有量測誤差範圍，因此本研究針對雙光束量測法進行誤差範圍的界定，配置上以平面鏡為試片，在平面鏡同一點量測 100 次，而每次量測做一、三及五次平均，繪製出變化曲線，圖 4.9 所示曲線以縱軸為兩光點中心距、橫軸為量測次數，將 100 次實驗量測值統計算標準差(standard deviation)以 S 代表，統計學中標準差意義為系統中每一個資料點與平均值差異，標準差越大意謂資料點與平均值差異越大。本研究中 S 代表量測數據的差異性，雖然是量測同一點但結果卻因為雷射光之穩定性、外界擾動等有所變化。在沒有平均的情況下可以看出數據的曲線圖變動量較大，標準差為 0.059，如圖 4.9(a)所示。若將每一組數據都經過三次量測及平均，由圖 4.9(b)

所示的曲線圖與標準差，可以看出變化量較沒有平均的情況下好，其標準差降至 0.042。更進一步將平均次數增加至五次，計算標準差降為 0.038，觀察曲線圖發現變化量趨近於正負 0.1 個像素內，如圖 4.9(c) 所示。由以上的試驗得知增加量測的平均次數確實有降低雜訊的作用，但也會延長量測的時間，本研究之後量測得到的數據都經過 5 次平均。

在未加入透鏡的量測架構中，可以看到投影至屏幕的兩光點幾乎重合(圖 3.8)，無法有效辨識兩光點中心距離。置入透鏡之主要目的為縮小光束直徑大小，不僅使投影至屏幕上的兩光點不要重合，使機器視覺能成功辨識，透鏡還會讓屏幕上光點強度更集中，在二值化過程獲得更佳的雜訊過濾效果。另一方面，能夠減少光源產生不穩定的作用。參考圖 4.10 所示，格子代表 CCD 相機所擷取的像素，根據前面所述，雷射光呈高斯分佈，在光點周圍的光強較不穩定，其變化範圍以虛線表示，較大光點的光強不穩定範圍較大，如圖 4.10(a)所示。反之，在較小光點的光強不穩定範圍較小，如圖 4.10(b)所示。透鏡的選擇取決於工作距離，不合適的透鏡不僅無法有效降低光點直徑，更會造成光點變大的反效果。本研究曾對 2 種不同焦距之透鏡做 100 次的穩定度分析，如圖 4.11(a)所示，焦距為 15 cm 之凸透鏡的標準差為 0.031，而焦距為 30 cm 之凸透鏡的標準差為 0.041，如圖 4.11(b)所示。因為本研究架設實驗系統之工作距離約為 20 cm，焦距為 15 cm 之凸透鏡的不穩定範圍較焦距為 30 cm 者的標準差小。理論上應使用焦距為 20 cm 之透鏡，但實際上，雷射光源會有些微發散的現象，故使用距焦能力比焦距為 20 cm 稍強之透鏡以獲得較佳效果。

屏幕旋轉的作用在於平均散斑，使 CCD 相機能擷取到清晰的影像，在屏幕沒有旋轉的情況下，所看到的光點並非完整的圓形(圖 4.12)，

而投影於旋轉的屏幕(圖 4.13)，光點影像呈現完整的圓形。屏幕旋轉的原理類似於視覺暫留，旋轉速度大於 CCD 相機取像速度，清晰的影像有助於邊界辨識。本研究以直流馬達轉動屏幕，透過電壓可控制馬達轉速。馬達的轉速會影響屏幕產生晃動，在轉速較高的情況下，屏幕旋轉不易發生晃動，可降低量測誤差。本研究也針對供給直流馬達不同電壓的量測做穩定性分析，電壓由 1 伏特增加至 2.7 伏特，標準差呈現遞減，由電壓為 1 伏特的標準差由 0.042 減至 0.035。如圖 4.14 所示，電壓增至 2V 後，標準差的變化趨於平緩，即使電壓增至 2.7 伏特，標準差也無法有效降低，可知設定電壓僅需高於 2 伏特即可，若屏幕轉速高，穩定性也會較好。

配合前述的比例常數與第三章曲率的計算公式，可得曲率量測的誤差值，屏幕的光點中心距離量測之穩定度對於整體量測的精確度有關，好的量測系統必須有較小的誤差範圍。當量測變形很小的試片，屏幕上兩光點中心距離的變化也很小，若與誤差範圍接近，則無法有效區分。

4.3 薄膜應力討論

本研究將量測試片配合第二章薄膜應力計算公式，以 Matlab 軟體進行數據分析，繪出薄膜應力、曲率分佈圖，並將各個資料點的數值與湯士杰[21]所採用太曼-格林干涉儀進行相同研究的結果比較及討論。太曼-格林干涉儀主要量測試片的面外輪廓，藉由曲面擬合 (curve fitting) 得到變形函數，對面外變形兩次差分得到曲率。事實上，差分獲得之曲率為近似值，因為薄膜厚度、變形量極小，所以做此近似。雙光束量測法係以一定間隔量測，量測範圍相對於整片晶圓的位置如圖 4.15 所示，太曼-格林干涉法得到的是連續性函數，湯士杰[21]將會配合本研究雙光束量測之間距，將座標代入函數得到晶圓的曲率，

並以圖表比較每一點量測值的偏差量。比較內容包含兩個正交方向的曲率與薄膜應力，雙光束量測法量測到兩正交方向的曲率最小值皆發生於中心部份，最大值則落在邊緣處，如圖 4.16 所示。薄膜應力與兩正交方向之曲率有關，應力分佈的趨勢與曲率相似，中心區域的應力值較小(圖 4.17)。如表 2、3 所列，x 方向的應力最大值為 486.9 MPa，最小值為 -63.8 MPa，y 方向應力的最大值為 1,297 MPa，最小值為 322.4 MPa。雖然 y 方向之最大值應力已超過 1 GPa，但氮化鎵的降伏應力為 15 GPa [23]，上述應力值仍屬合理範圍。圖 4.18 所示為太曼-格林干涉儀量測面外變形插分得到曲率分佈圖，圖 4.19 則為薄膜應力分佈。比較兩方法，發現晶圓中心區域之數值都有較低之情形，而且晶圓在 x 方向與 y 方向的曲率不同，各量測數值如表 4 與表 5 所列。若依照 Stoney [13] 假設兩正交方向的曲率相同，與現實情況不符，應力也會產生誤差。

在第二章求解應力的過程中，曾假設 Q_{x0} 與 Q_{y0} 極小但卻保留該兩項，此時將所量測與求解得到之參數代入 Q_{y0} 中驗證，確定 Q_{y0} 遠小於兩方向之薄膜應力(表 6)。本系統無法測量面外變形，故 Q_{x0} 無法估算。本研究將試片委託國家奈米元件實驗室，以 X 光繞射儀(XRD)量測晶格尺寸，採用的機型為 PANalytical X'Pert PRO MRD，量測結果如圖 4.20 所示，因為該儀器只能量測面外方向的晶格變形，故無法據以計算薄膜應力。

本研究與湯士杰[21]採用的方法不同，量測得到的晶圓曲率及應力值也有所出入，可能的原因是太曼-格林干涉儀量測得到之面外變形經過曲面擬合，再以差分法計算曲率，會導致誤差的增加。雙光束量測曲率的誤差來自於校正之準確度與儀器之穩定性。雙光束量測法

得到是離散的曲率分佈，而非連續函數，故不似干涉儀可獲得較平滑的曲線。

雙光束量測法具有抗擾動之特性，同時有一定之精確度，並可以配合 MOCVD 機台視窗大小使用。一般來說，干涉儀只適用量測十個波長以內的變形，較大變形的試片不適合以干涉儀量測輪廓。雙光束量測法在大變形的試片上較為適用，雙光束量測法為點量測，太曼-格林干涉儀則是全域的面量測，毋需機械掃描，兩種方法的比較如表 7 所列。



第五章 結論與未來展望

本研究採用雙光束量測法，非接觸地量測翹曲的藍寶石晶圓表面，並計算晶圓曲率及薄膜應力。雙光束量測法非光學干涉法，不易受到環境擾動影響，且能配合MOCVD機台較小視窗使用，在有限空間中，即時監測磊晶製程中的晶圓曲率，適合製程監測。本研究的結果與湯士杰[21]採用的太曼-格林干涉儀進行相同研究的量測結果進行比對。本章綜合實驗結果，提出結論，以便作為日後研究參考依據。

5.1 結論

本研究對藍寶石晶圓進行面掃描得到整體應力分佈，其結果趨勢與太曼-格林干涉儀相符，兩種方法都可觀察到中心區域為最小值。兩者數值差異的原因在於雙光束量測系統校正不夠準確，太曼-格林干涉儀量測的晶圓面外變形經過曲線擬合、差分法及影像處理過程造成誤差。雙光束量測法能夠有效測量晶圓表面曲率，進而計算薄膜應力，並能克服干涉法無法適用於大變形試片與製程監測之不足。

本研究也探討雙光束量測系統的穩定性，針對各種不同元件以曲線與標準差進行數據分析，歸納如下：

- (1) 造成量測不穩定可能來自於雷射光源強度不穩定與外界干擾。每次量測數值經過多次平均，可有效降低系統不穩定，但也會增加量測時間。
- (2) 根據量測工作距離，使用不同聚焦能力之凸透鏡，縮小投影至旋轉屏幕上光點大小，避免雷射光源發散使得兩光點過於靠近，導致機器視覺程式無法辨識，同時減少光點不穩定範圍與增加光點光強。經二值化過程，使兩光點與背景值區隔，減少外界

光害提高系統穩定性。

- (3) 旋轉屏幕可能因為馬達軸有些微偏心，或是兩者的連接點沒有通過質心，造成系統的共振頻率改變等因素，使得屏幕些微晃動，以較高電壓驅動馬達減少屏幕晃動，驅動電壓大於 2 伏特以上，系統趨於穩定。

5.2 未來工作

本研究尚未將雙光束量測法模組化，也未能實際進行線上 (on-line) 監測，未來可應用於不同的磊晶機台，將各元件模組化安裝於機台上，藉以量測製程中的晶圓變形，獲得腔體中製程溫度與薄膜厚度，推算薄膜應力。

實驗系統可依本文第四章討論中的相機感光元件大小、鏡頭焦距與工作距離等要素改進解析度，量測穩定度可依光源穩定度、屏幕旋轉穩定性進行改良，針對使用者需求置換元件達到監測之目的。本研究缺乏與其他儀器量測結果進行比較，未來可與其他適當的儀器進行結果比對，確認系統及量測數值的可信度。

參考文獻

- [1] R. van den Hende, V. Merai, and R. Parekh (2009), "Use of in-situ deflectometer metrology for Gan MOCVD reduces development time and optimizes product yield," Veeco instruments Inc, New York.
- [2] J. D. Finegan and R. W. Hoffman (1959), "Stress anisotropy in evaporated Iron films," *J. Appl. Phys.*, **30**, 597-598.
- [3] S. M. Rosnagel, P. Gilstrap, and R. Rujkorakarn (1982), "Stress measurement in thin films by geometrical optics," *J. Vac. Sci. Technol.*, **21**(4), 1045-1046.
- [4] E. Klokholm (1969), "An apparatus for measuring stress in thin films," *Rev. Sci. Instrum.*, **40**, 1054-1058.
- [5] T. Aoki, Y. Nishikawa, and S. Kato (1989), "An improved optical lever technique for measuring film stress," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, 299-300.
- [6] S. N. Sahu, J. Scarminio, and F. Decker (1990), "A laser beam deflection system for measuring stress variations in thin film electrodes," *J. Electrochem. Soc.*, **137**, 1150-1154.
- [7] A. K. Sinha, H. J. Levinstein, and T. E. Smith (1977), "Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates," *Appl. Phys.*, **49**, 2423-2426.
- [8] A. E. Ennos (1966), "Stress developed in optical film coatings," *Appl. Opt.*, **5**, 51-61.
- [9] K. Roll and H. Hoffmann (1976), "Michelson interferometer for deformation measurements in an UHV system at elevated temperatures," *Rev. Sci. Instrum.*, **47**, 1183-1185.
- [10] C. L. Tien, C. C. Lee, Y. L. Tsai, and W. S. Sun (2001), "Determination of the mechanical properties of thin films by digital

- phase shifting interferometry,” *Opt. Comm.*, **198**, 325-331.
- [11] G. Gore (1858), “On the properties of electro-deposited antimony,” *Trans. Roy. Soc.*, **1**, 185.
- [12] E. J. Mills (1877), “On electrostriction,” *Proc. Roy. Soc.*, **26**, 504.
- [13] G. G. Stoney (1909), “The tension of metallic films deposited by electrolysis,” *Proc. Roy. Soc.*, **82**, 172-175.
- [14] E. van de Riet (1993), “Deflection of a substrate induced by an anisotropic thin-film stress,” *J. Appl. Phys.*, **76**(1), 584-586.
- [15] 羅文雄、蔡榮輝、鄭岫盈 (2006)，*半導體製造技術*，滄海書局，台灣。
- [16] 劉柏村 (2009)，*薄膜沉積製程技術*，國立交通大學，台灣。
- [17] R. Szilard (1983), *Theory and analysis of plates: classical and numerical methods*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- [18] T. M. Regan, D. C. Harris, D. W. Blogett, K. C. Baldwin, J. A. Miragliotta, M. E. Thomas, M. J. Linevsky, J. W. Giles, T. A. Kennedy, M. Fatemi, D. R. Black, and K. P. D. Lagerlöf (2002), “Neutron irradiation of sapphire for compressive strengthening. II. physical properties changes,” *Journal of Nuclear Materials.*, **300**, 45-56.
- [19] A. Polian, M. Grimsditch, and I. Grzegory (1996), “Elastic constants of gallium nitride,” *J. Appl. Phys.*, **79**(6), 3343-3344.
- [20] T. Zettler, G. Strassburger, A. Dadgar, and A. Krost (2009), “Device and method for the measurement of the curvature of a surface,” *United State Patent*, US 7505150 B2.
- [21] 湯士杰 (2011)，*太曼-格林干涉儀量測藍寶石晶圓薄膜變形及應力*，國立交通大學機械工程學系碩士論文，新竹市，台灣。
- [22] 徐曉珮 (2005)，*數位影像處理*，高立圖書有限公司，台灣。
- [23] R. Nowak, M. Pessa, M. Suganuma, M. Leszczynski, I. Grzegory, S.

Porowski, and F. Yoshida (1999), “Elastic and plastic properties of GaN determined by nano-indentation of bulk crystal,” *Applied Physics Letters*, **75**(14), 2070-2072.



附表

表 1 應力計算採用的材料參數(單位：GPa)

	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₃₃	C ₄₄	C ₁₄	C ₆₆
藍寶石[18]	490.2	165.4	113.0	490.2	145.4	-23.2	
氮化鎵[19]	390.0	145.0	106.0	398.0	105.0		123.0

表 2 各測量點的 P_x 應力計算值(單位：MPa)

	x \ y	0	5	10	15	20	25	30
	30	470.6	350.9	182.7	123.9	88.2	142.2	189.8
	25	454.2	271.7	140.7	66.9	51.5	74.8	118.4
	20	397.7	250.9	62.9	18.2	-15.2	16.3	97.2
	15	342.3	198.0	13.4	-63.8	-13.8	25.4	136.7
	10	143.3	20.3	34.7	-15.6	51.2	100.7	271.7
	5	137.2	42.5	18.8	-1.0	19.8	136.9	308.3
	0	216.5	154.1	90.6	102.4	157.4	303.6	486.9

表 3 各測量點的 P_y 應力計算值(單位：MPa)

y \ x	0	5	10	15	20	25	30
30	689.6	812.8	680.7	623.4	560.5	630.4	632.4
25	697.9	646.7	486.4	463.9	459.8	451.8	429.5
20	670.6	510.1	420.4	404.7	384.2	322.4	386.7
15	613.9	416.3	407.2	385.3	379.9	512.0	459.2
10	508.6	432.1	468.4	487.9	404.7	439.4	646.3
5	432.9	518.0	596.9	646.7	660.4	730.9	860.2
0	506.2	656.9	822.5	719.1	853.8	959.2	1297

表 4 各測量點的 x 方向曲率量測值(單位： Km^{-1})

y \ x	0	5	10	15	20	25	30
30	35.5	15.2	-1.8	-7.4	9.7	5.2	0.9
25	33.1	11.1	0	-8.8	-10.7	-7.3	-0.7
20	26.7	13.5	-7.7	-12.9	-16.5	-10.1	-1.9
15	21.6	10.2	-13.7	-22.9	-16.2	-16.0	0.5
10	-0.5	-13.7	-13.2	-20.5	-8.6	-3.4	11.1
5	1.6	-14.0	-20.1	-24.6	-22.4	-9.7	7.8
0	9.2	-4.7	-19.3	-13.8	-11.7	3.5	14.7

表 5 各測量點的 y 方向曲率量測值(單位： Km^{-1})

y \ x	0	5	10	15	20	25	30
30	72.5	93.2	82.2	76.9	70.1	77.2	75.6
25	74.2	74.4	58.4	58.2	56.3	56.3	51.8
20	72.8	57.3	52.7	52.3	50.9	41.6	47.0
15	67.4	47.0	52.8	52.9	50.3	66.1	55.0
10	61.2	55.8	60.0	64.5	51.1	53.7	74.4
5	51.5	66.2	77.5	84.7	85.7	90.5	101.0
0	58.1	80.2	104.3	90.3	105.9	114.1	151.4

表 6 各測量點的 Q_{y0} 應力計算值(單位：Pa)

y \ x	0	5	10	15	20	25	30
30	28.5	29.0	35.9	26.7	26.8	23.9	21.5
25	49.4	46.7	40.4	21.4	25.5	36.8	45.4
20	71.9	56.8	42.4	38.7	35.1	33.9	48.9
15	60.6	63.6	49.4	44.1	38.0	39.0	49.1
10	68.4	62.9	34.7	38.7	39.2	40.1	46.4
5	64.4	58.3	33.3	47.8	30.1	37.0	47.9
0	79.6	54.2	36.8	31.7	28.4	30.5	43.5

表 7 量測方法的優缺點比較

比較項目	雙光束曲率量測	太曼-格林干涉儀
光學干涉量測	否	是
精確度	高	很高
量測試片變形	大	小
量測範圍	點	面
適合監測	是/反應快	否/易受振動干擾



附圖

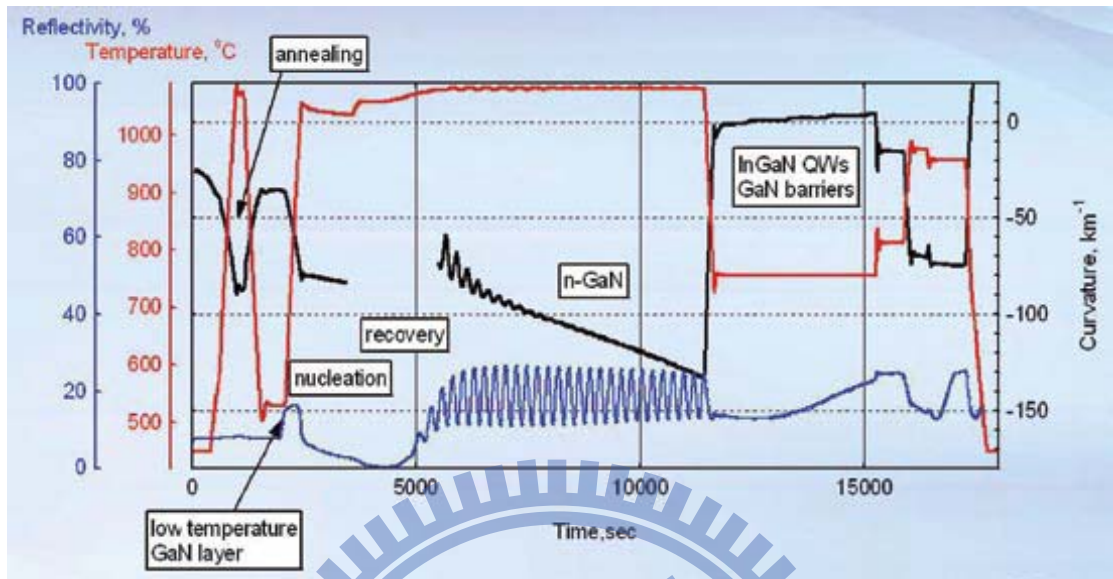


圖 1.1 LED 之藍寶石磊晶製程之監測曲線[1]

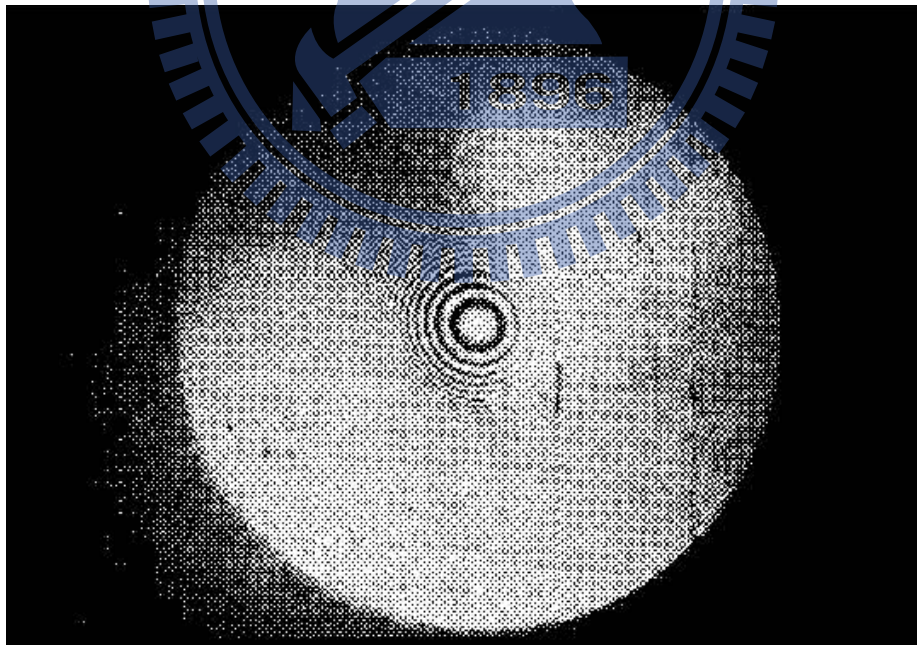


圖 1.2 牛頓環法量測等向性材料之干涉圖形[2]

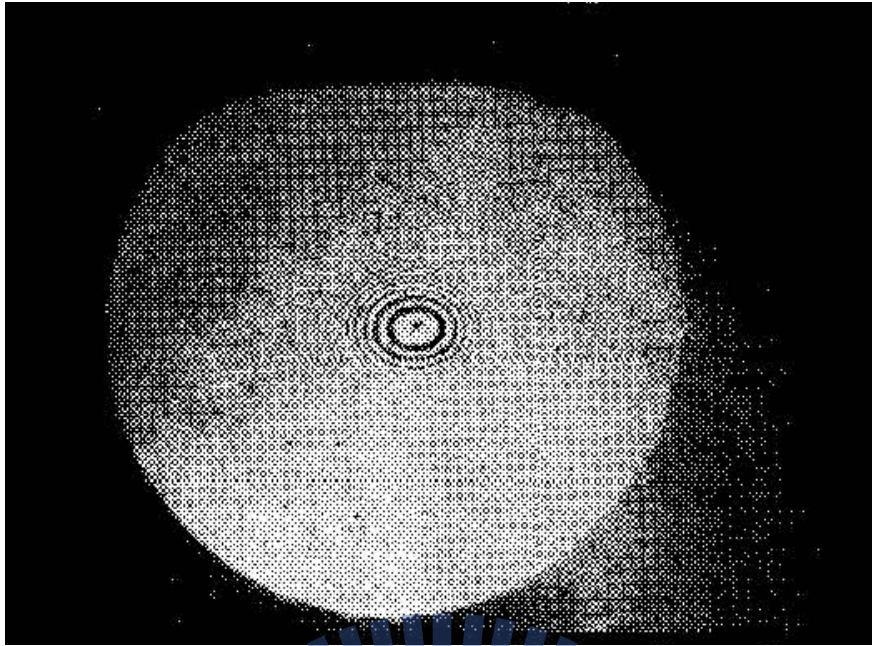


圖 1.3 牛頓環法量測非等向性材料之干涉圖形[2]

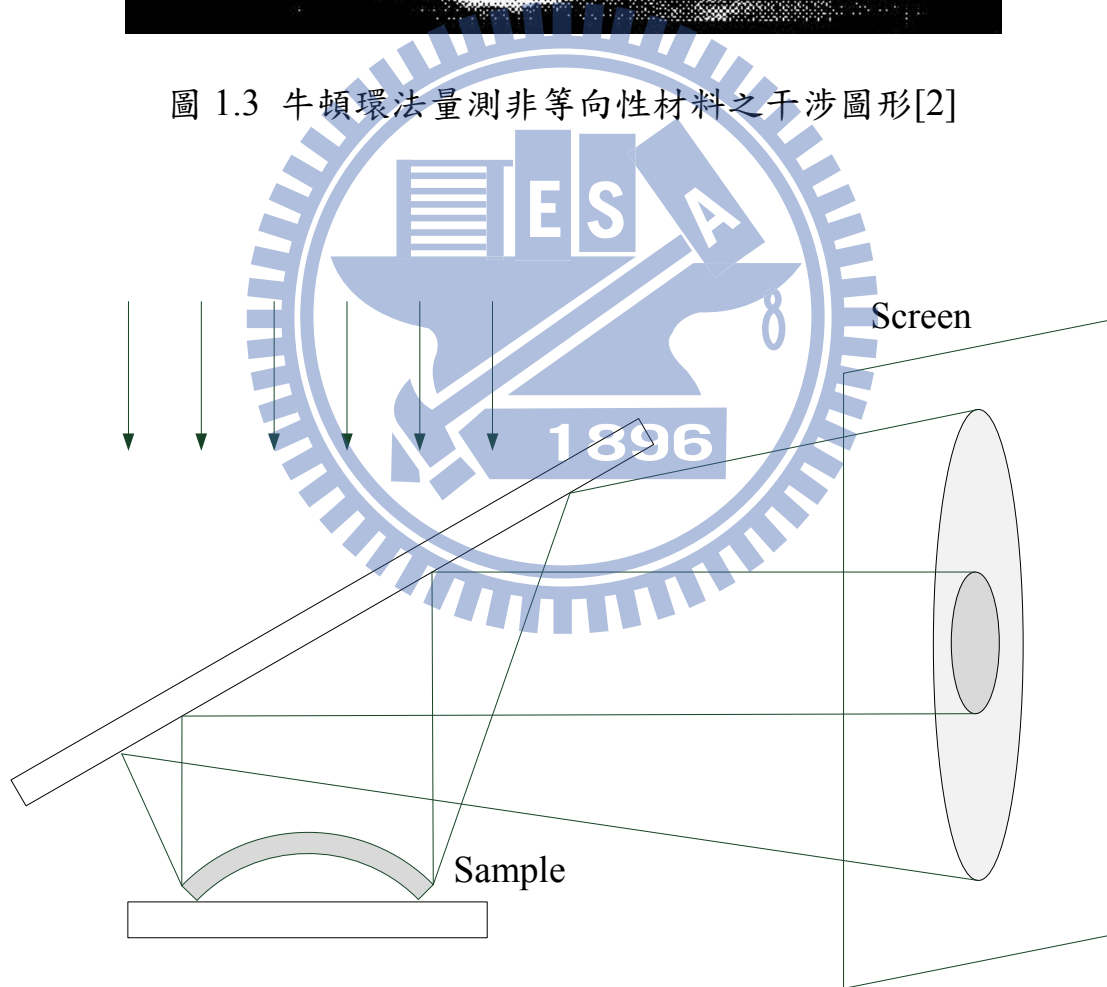


圖 1.4 改良牛頓法之幾何光學實驗架構[3]

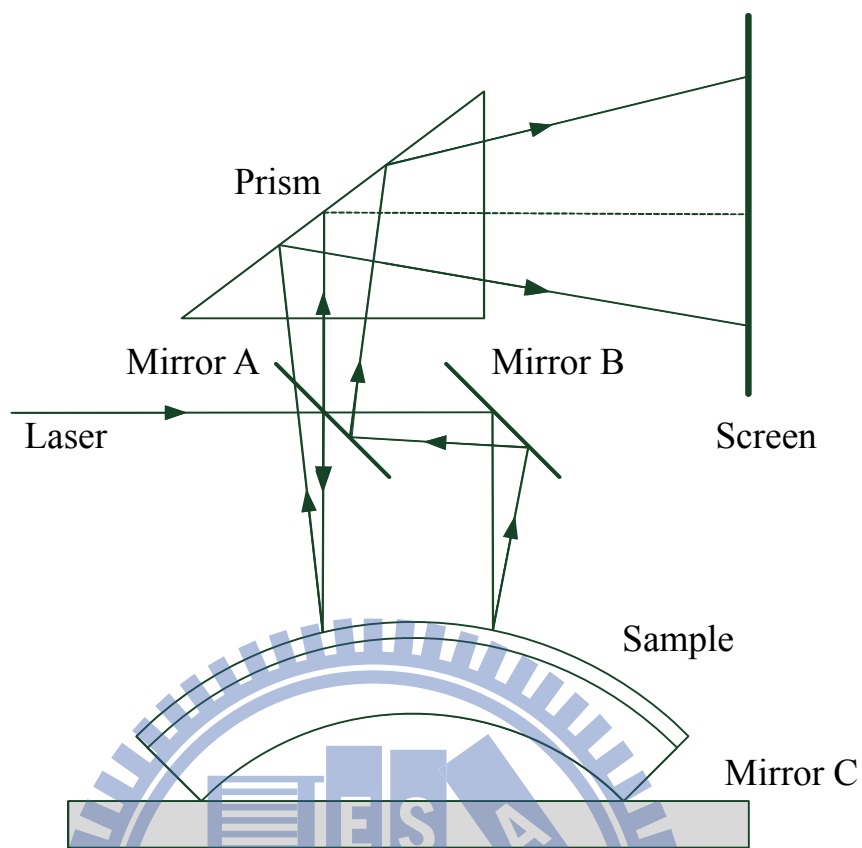


圖 1.5 垂直入射之雙光束量測法[5]

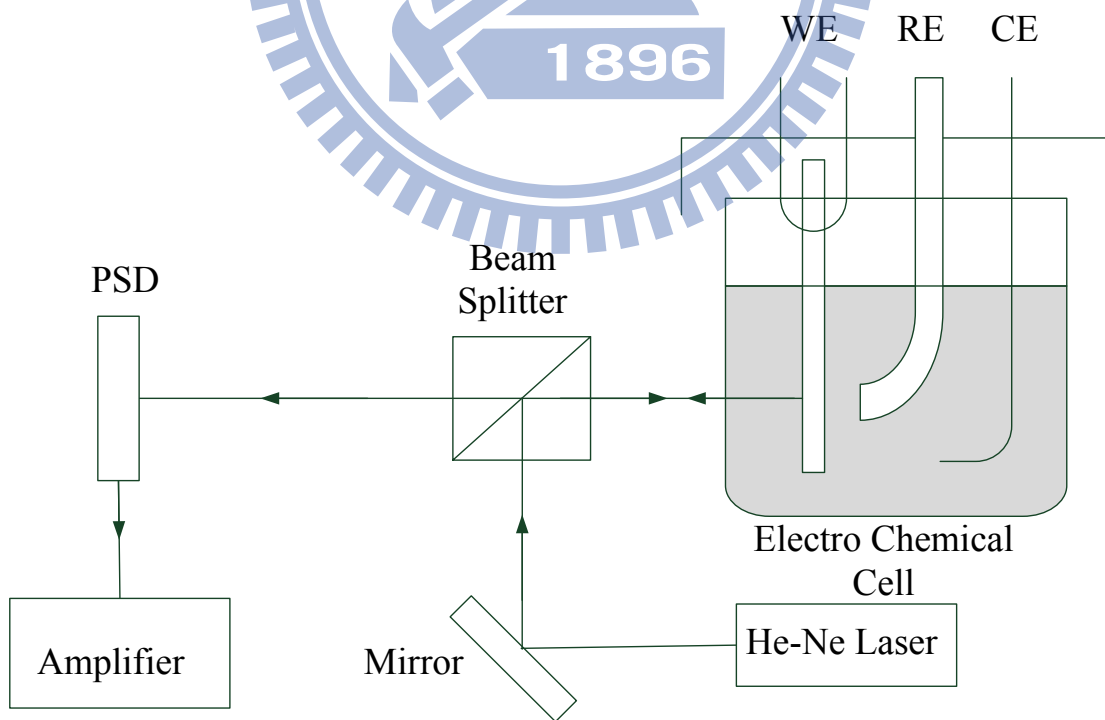


圖 1.6 改良式懸臂梁法[7]

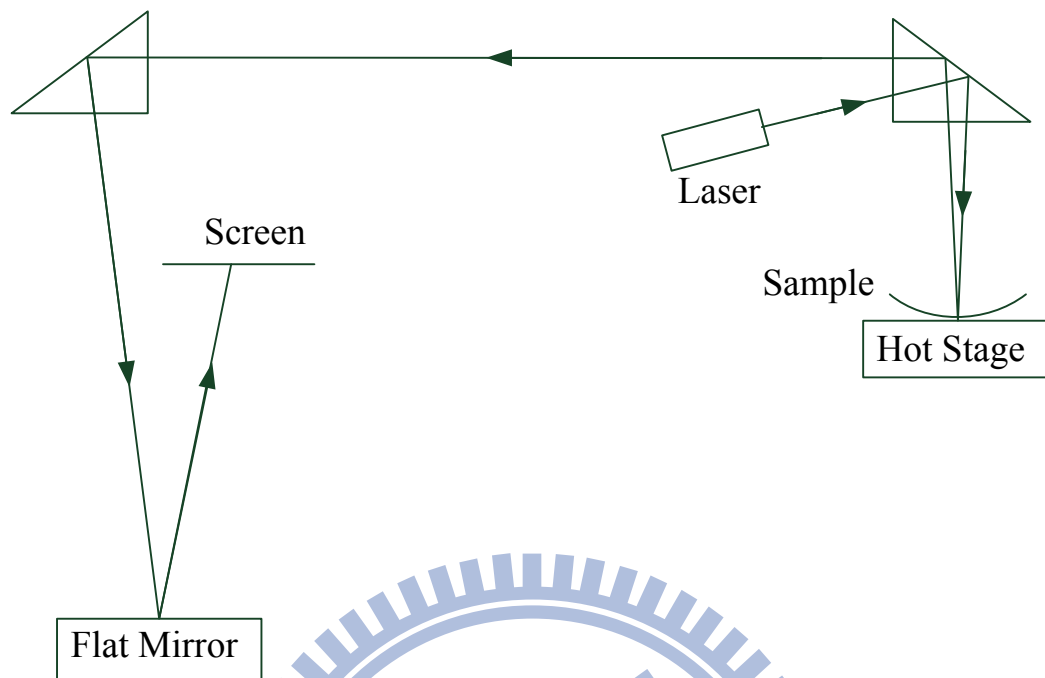


圖 1.7 光槓桿法實驗架構[8]

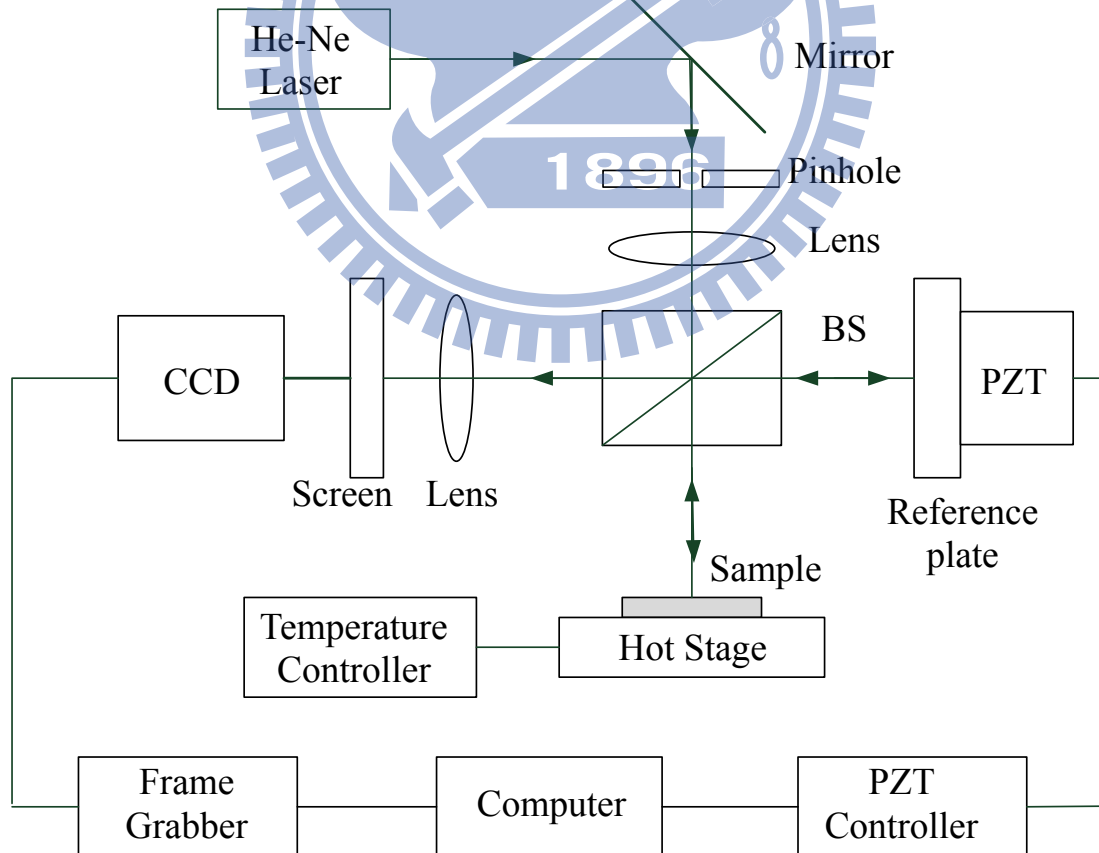


圖 1.8 相位式太曼-格林干涉儀[10]

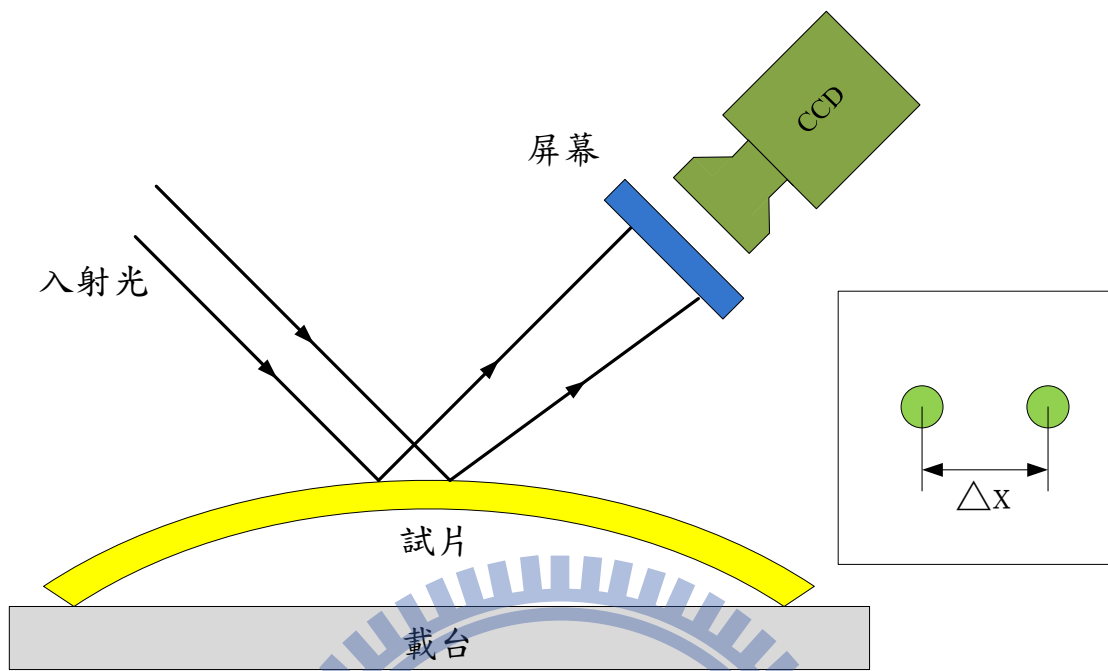


圖 1.9 雙光束量測法原理示意圖

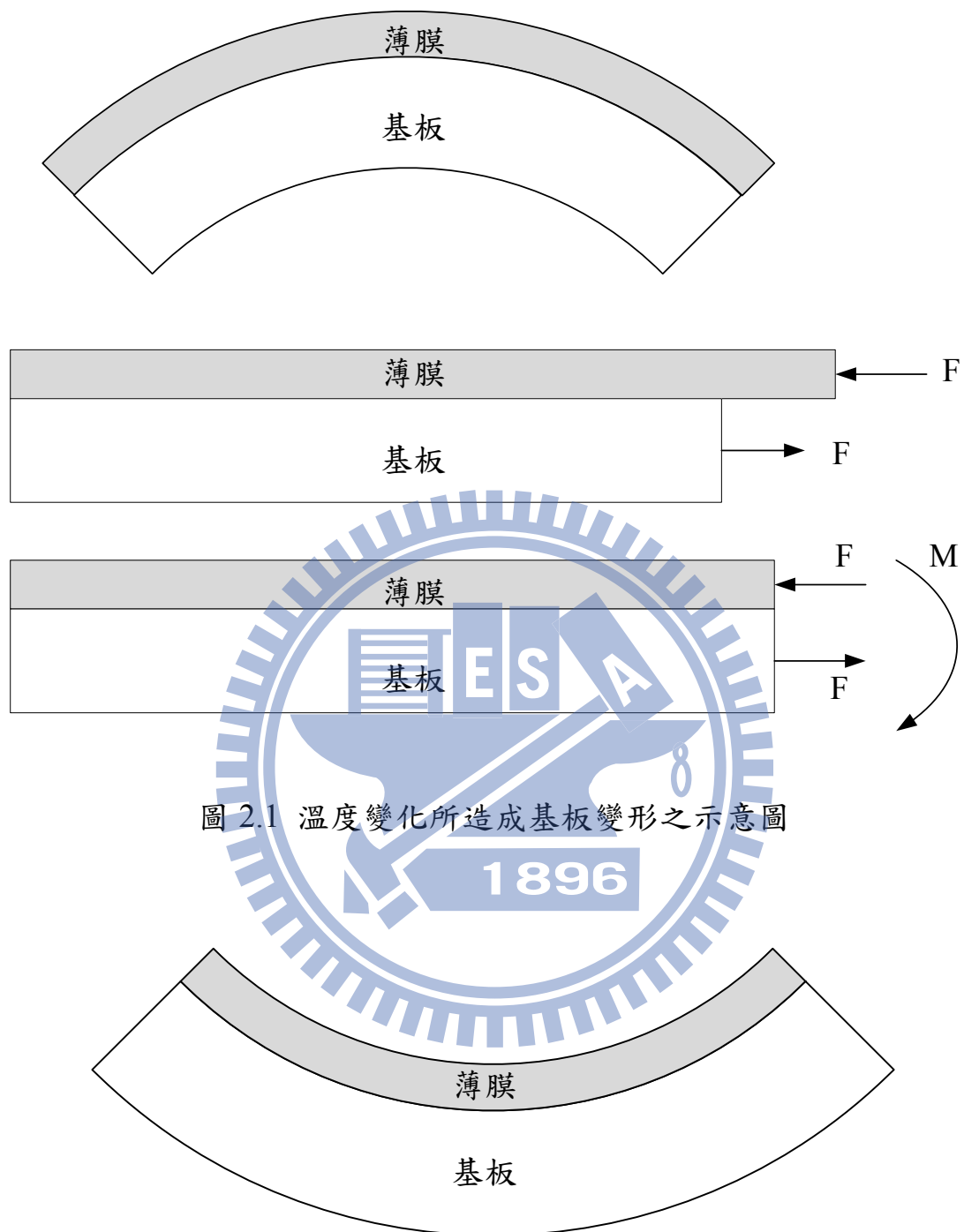


圖 2.1 溫度變化所造成基板變形之示意圖

圖 2.2 薄膜張應力造成基板的變形

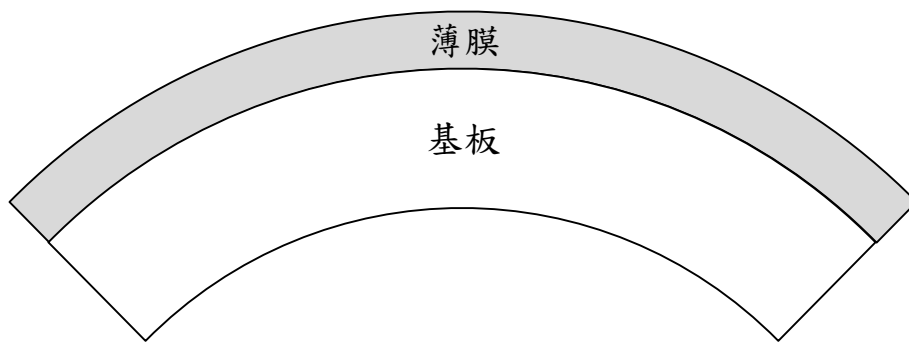


圖 2.3 薄膜壓應力造成基板的變形

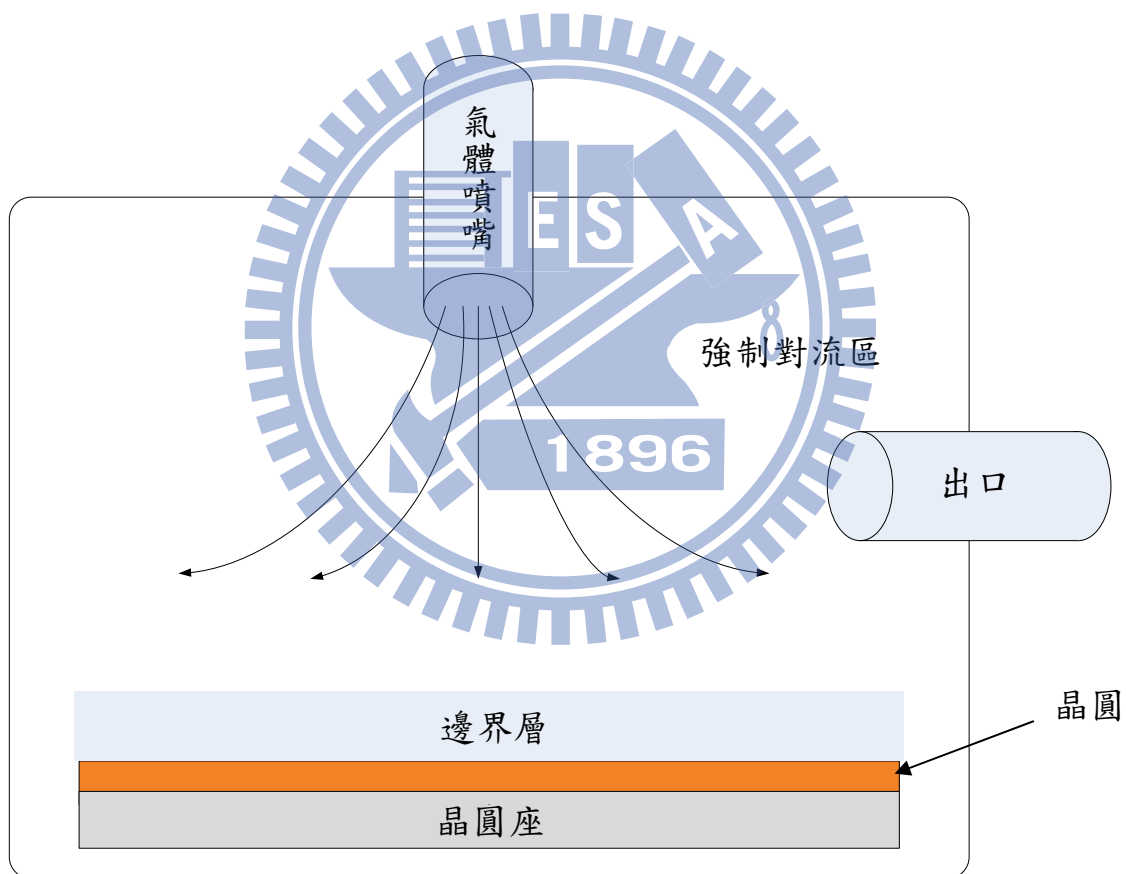


圖 2.4 磊晶過程 CVD 腔體示意圖

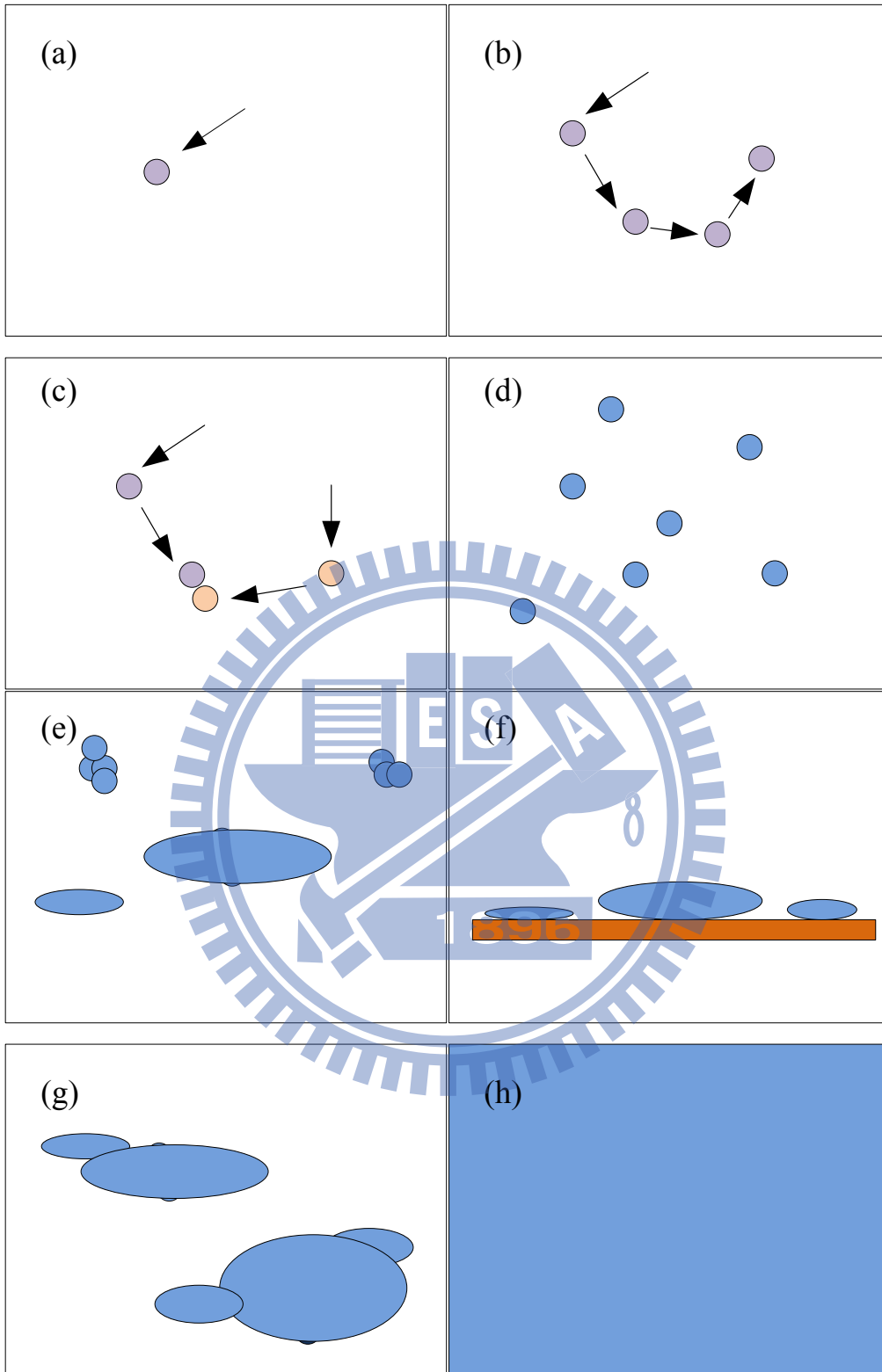


圖 2.5 薄膜成長過程(a)前置物到達、吸附晶圓表面(b)前置物在表面移動(c)前置物在表面反應(d)成核 (e)島狀物成長(f)島狀物橫截面(g)島狀物合併(h)形成連續薄膜

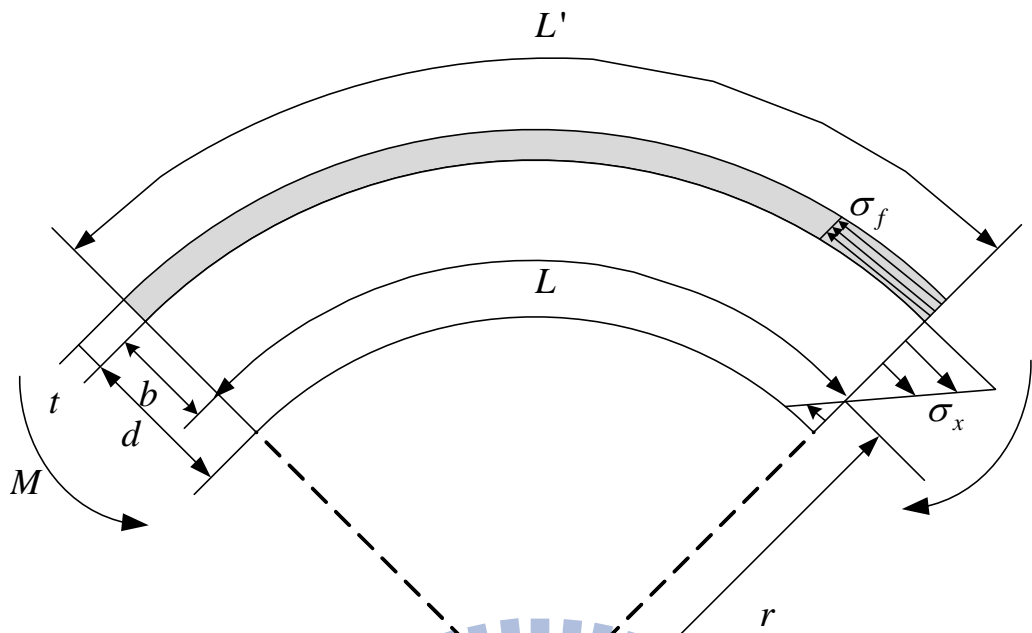


圖 2.6 晶圓剖面圖

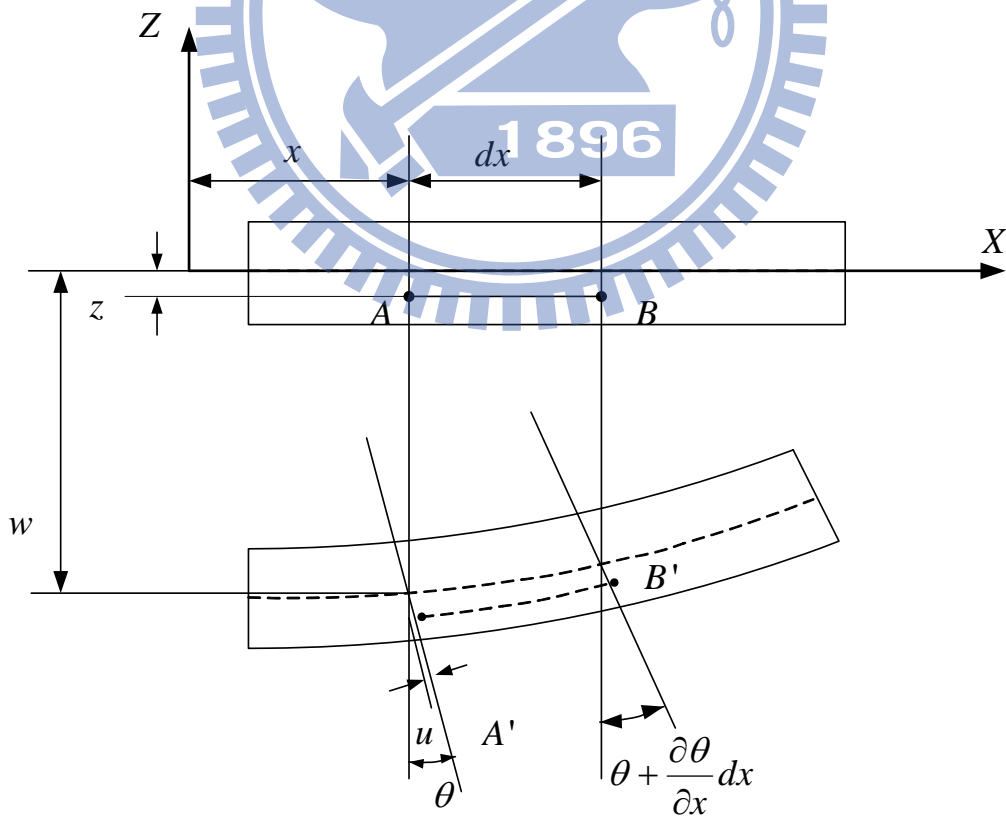


圖 2.7 基板變形前後示意圖

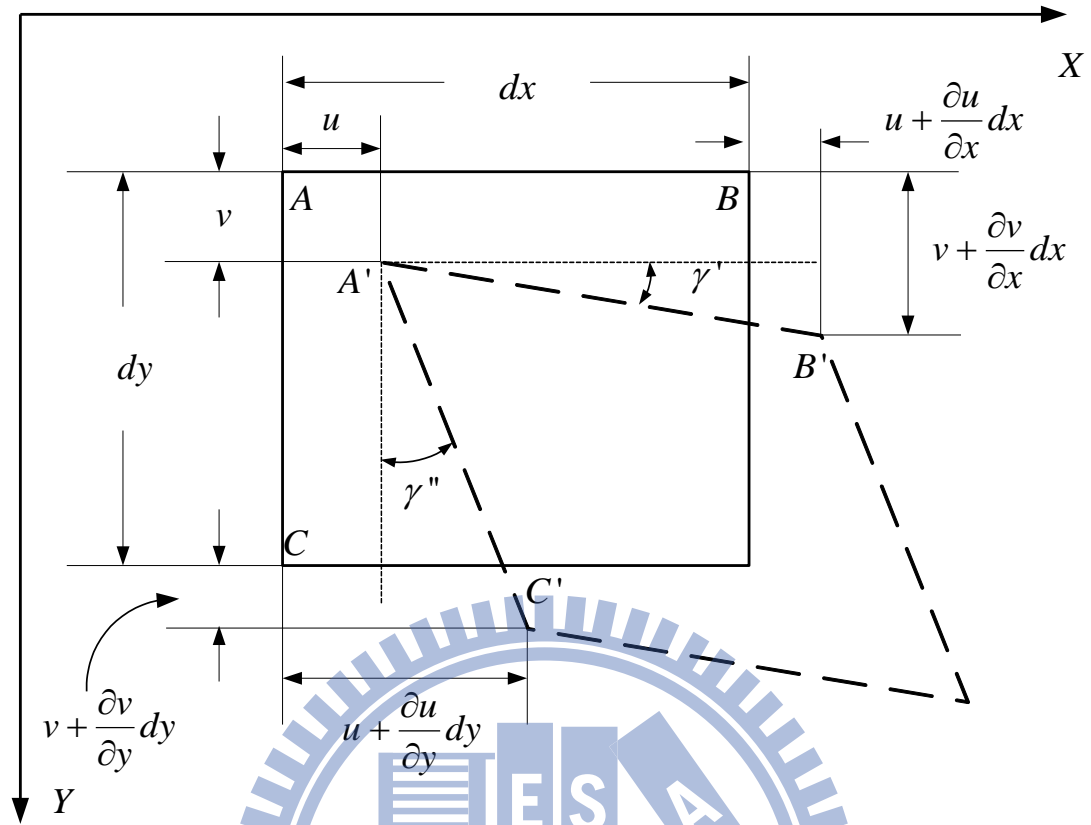


圖 2.8 角位移變形圖

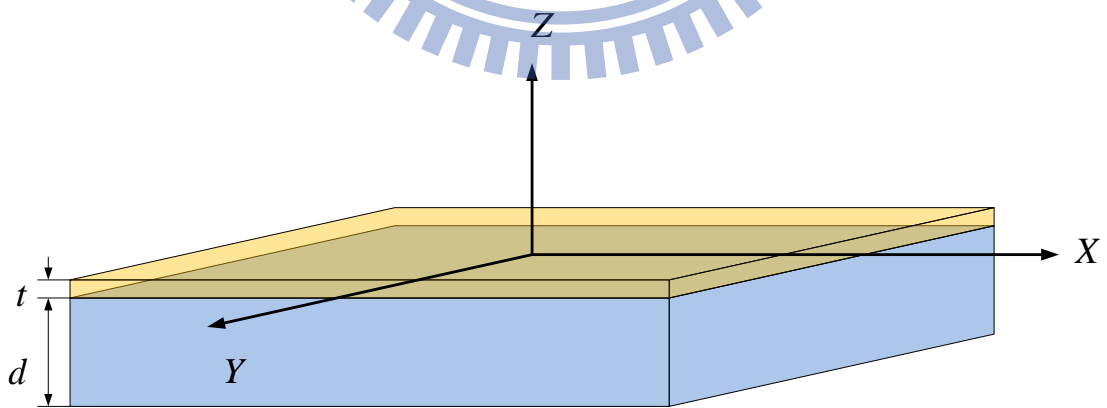


圖 2.9 座標示意圖

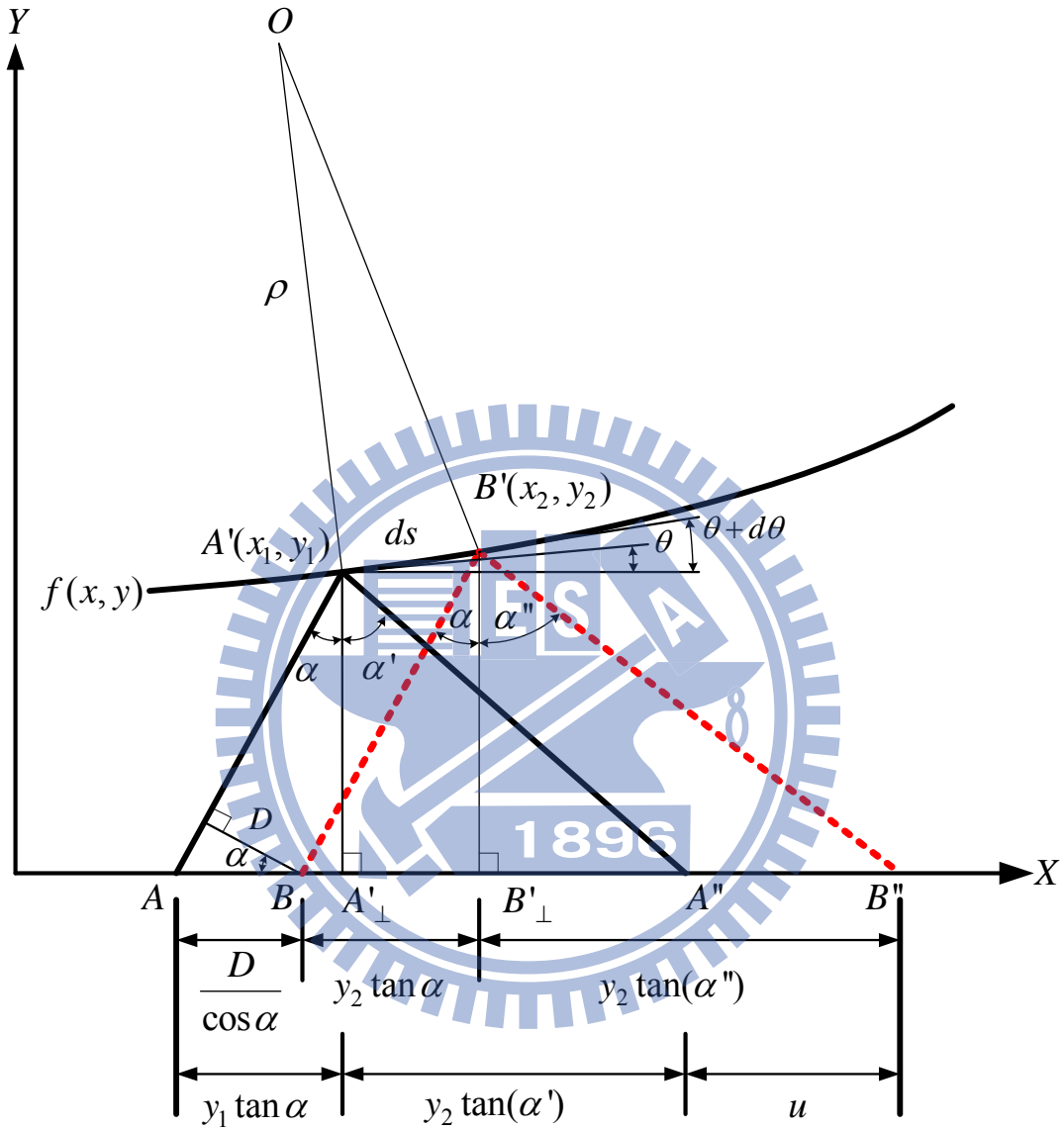


圖 3.1 雙光束量測系統模型示意圖

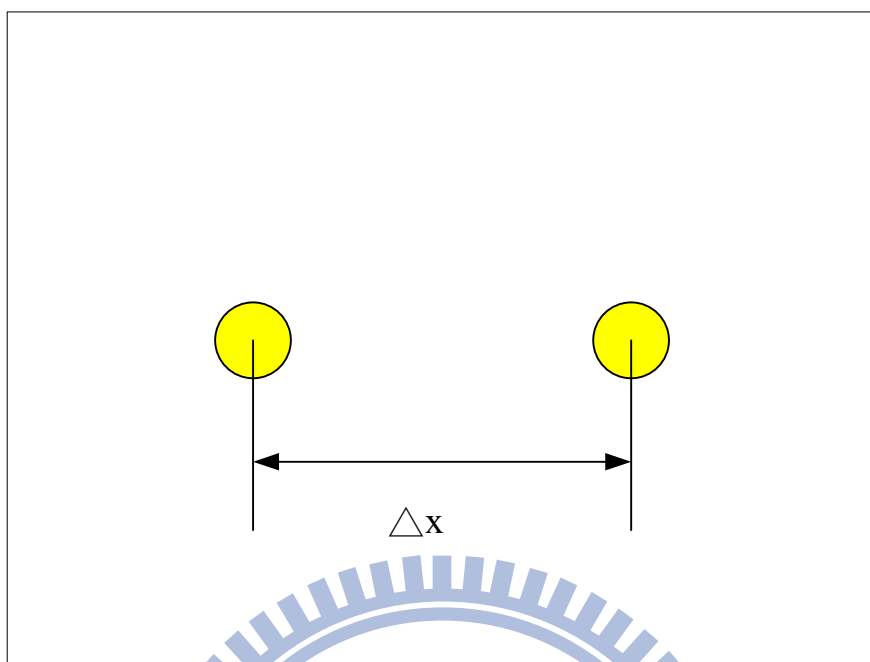


圖 3.2 單方向曲率量測

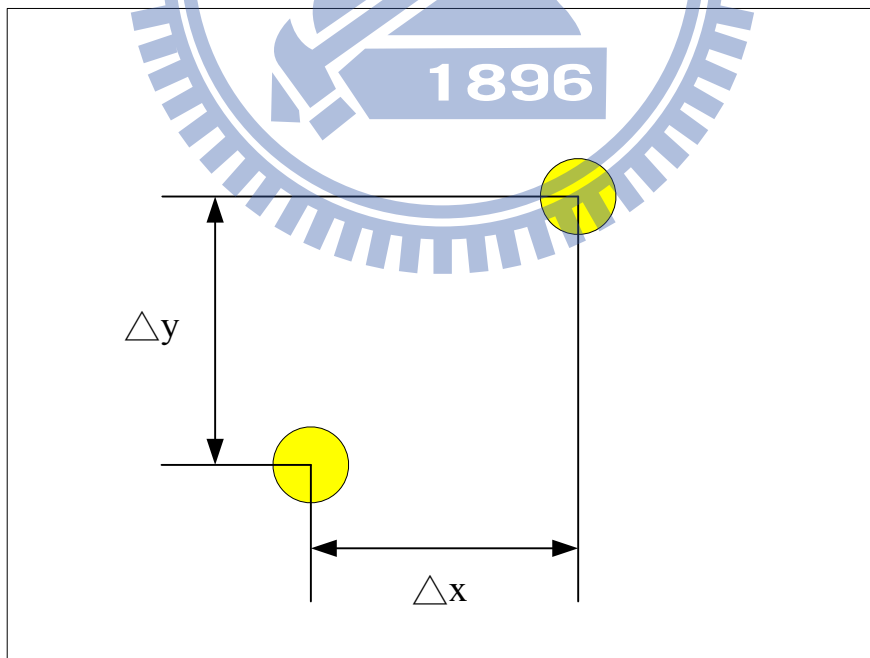
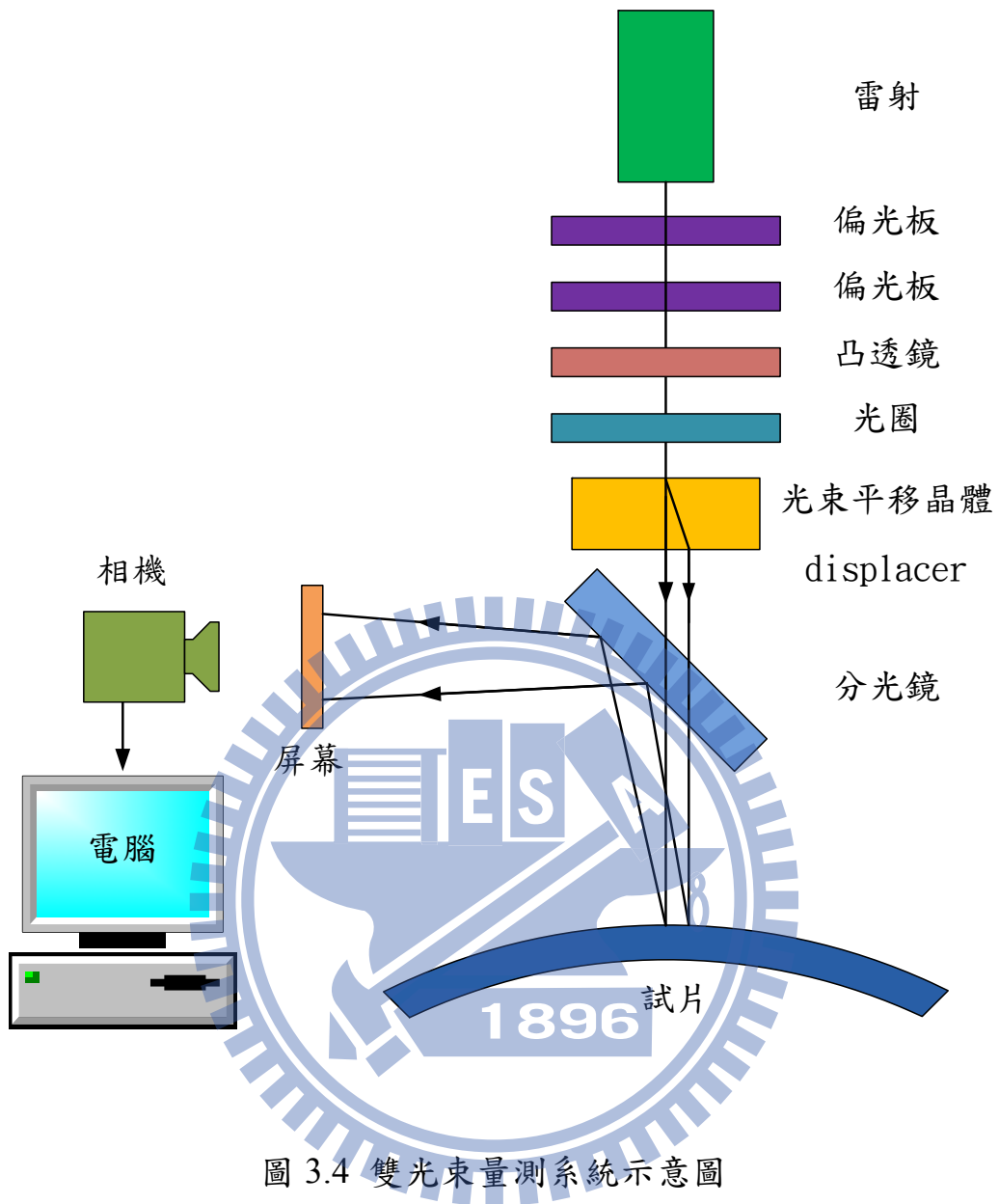


圖 3.3 雙方向曲率量測



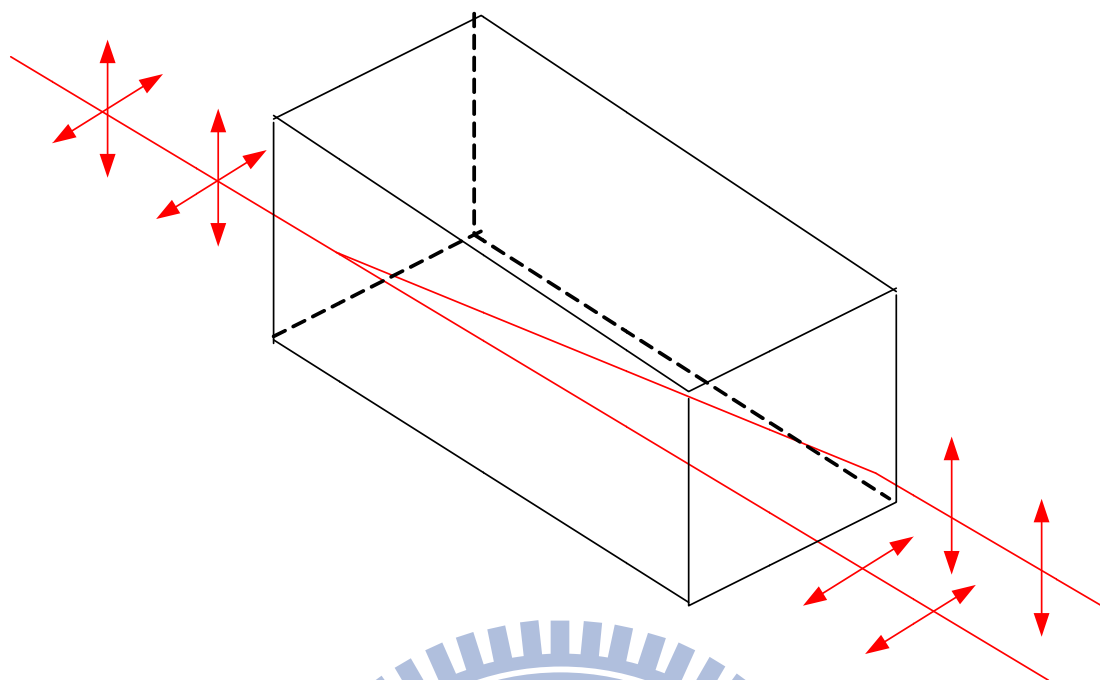


圖 3.5 光束平移晶體

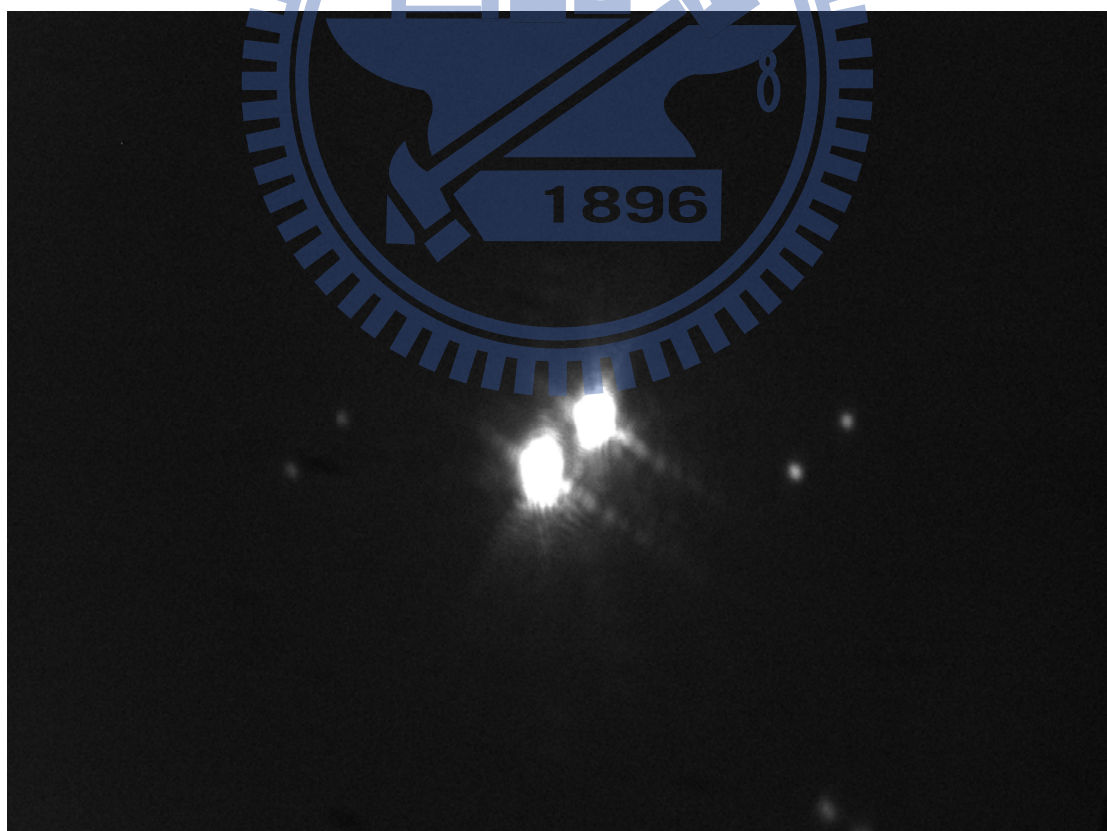


圖 3.6 CCD 相機過度曝光

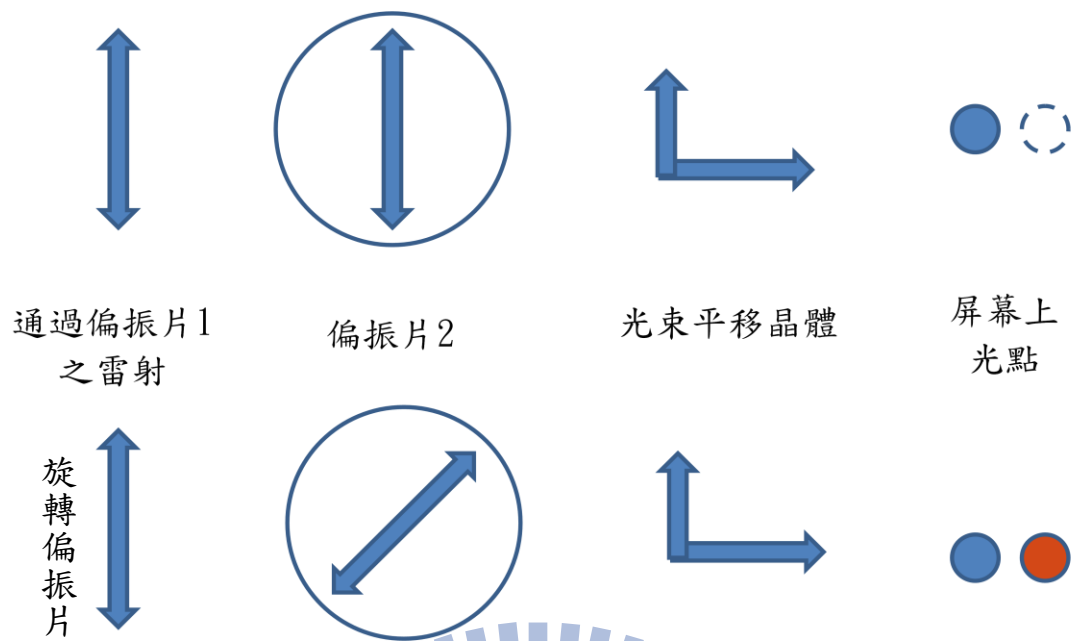


圖 3.7 偏光板 2 與光束平移晶體之作用

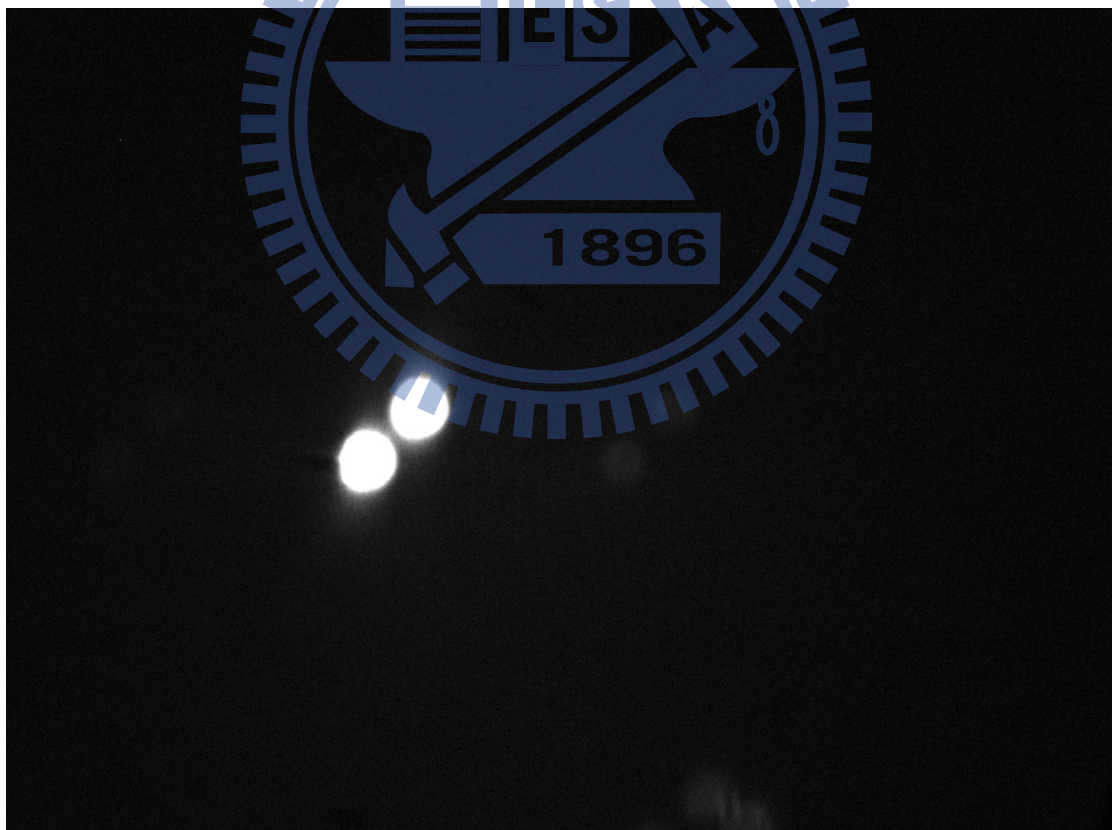


圖 3.8 屏幕兩光點發散現象

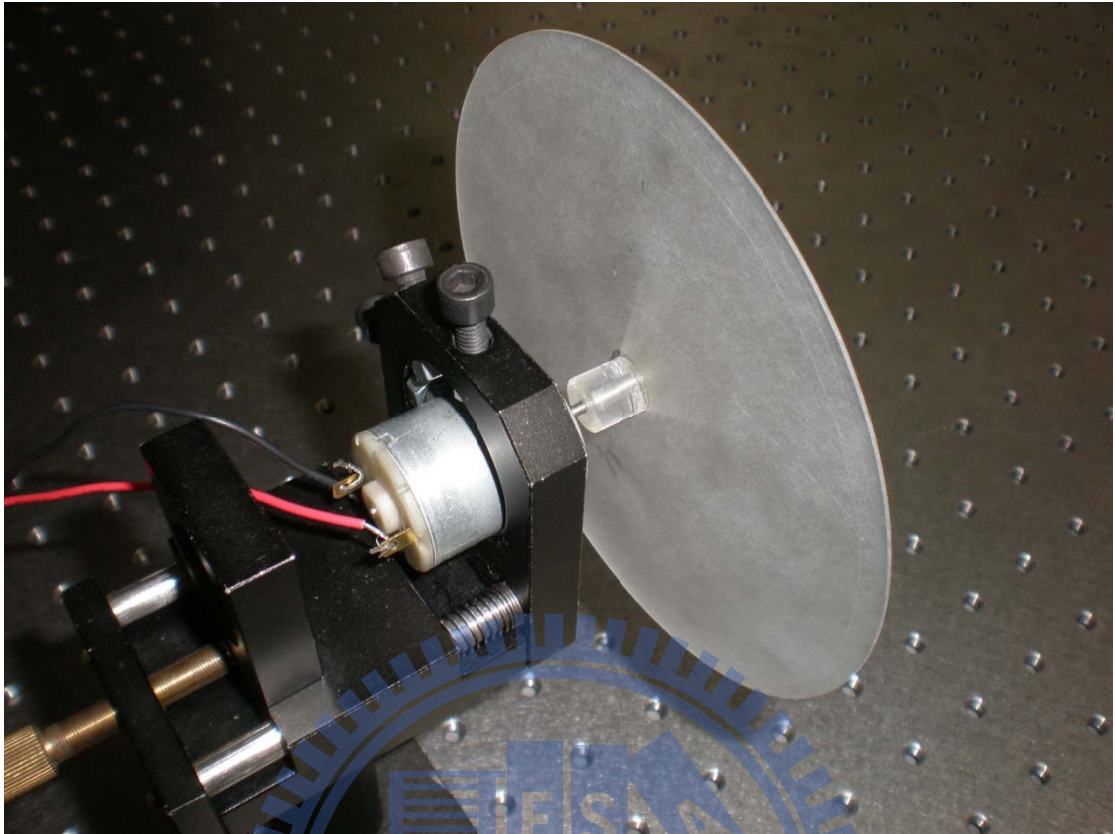


圖 3.9 本研究自行設計之旋轉屏幕

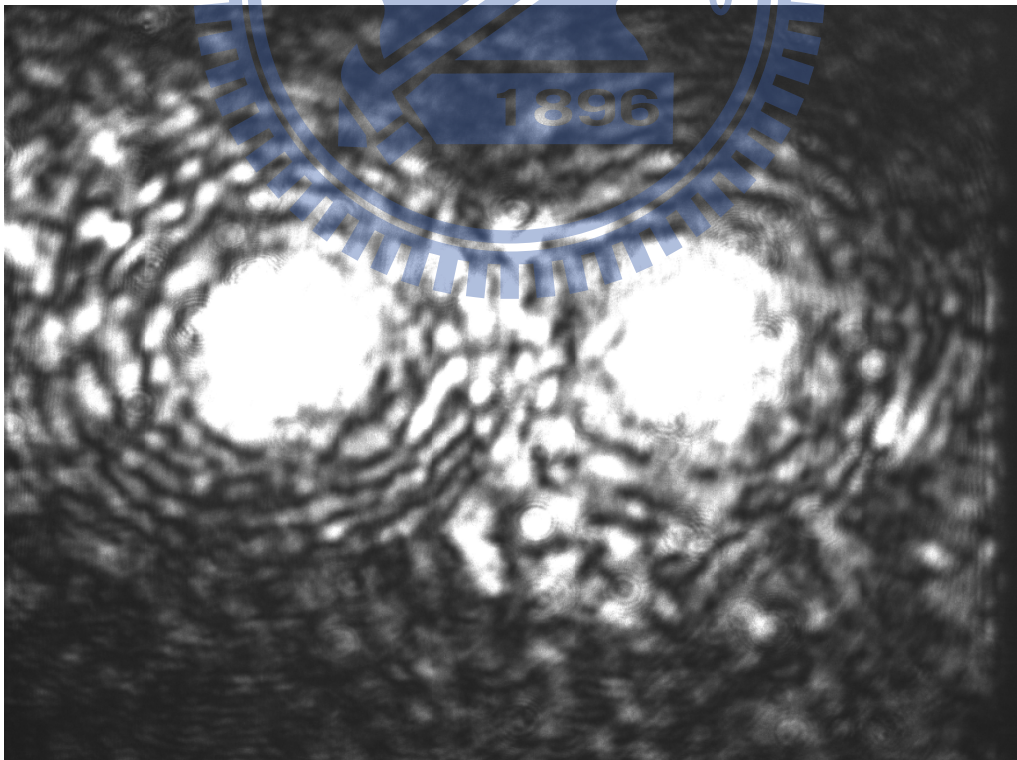
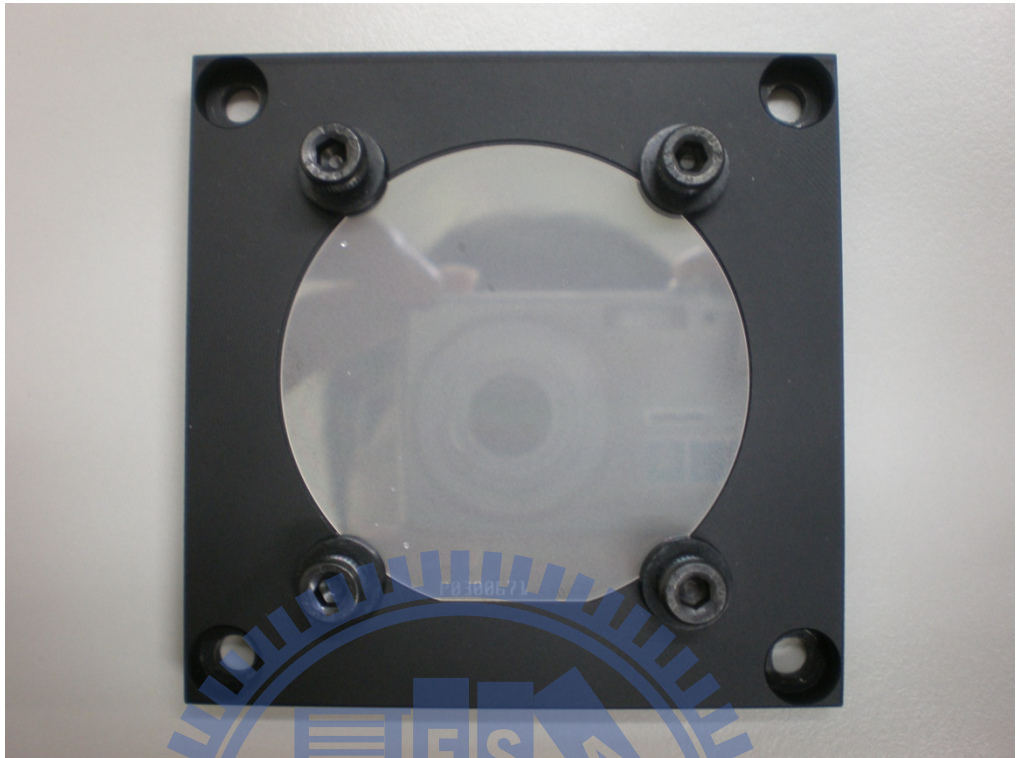


圖 3.10 兩光點直接入射 CCD 相機之影像

(a)



(b)

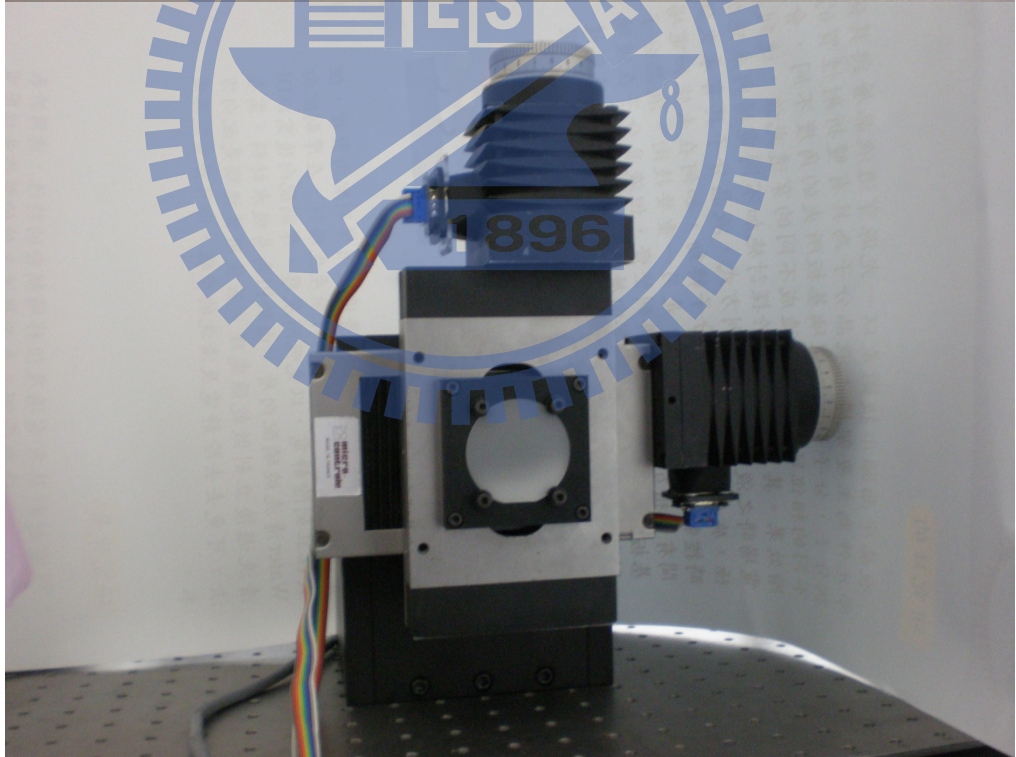


圖 3.11 晶圓固定方式(a)晶圓夾具(b)夾具與步進馬達固定

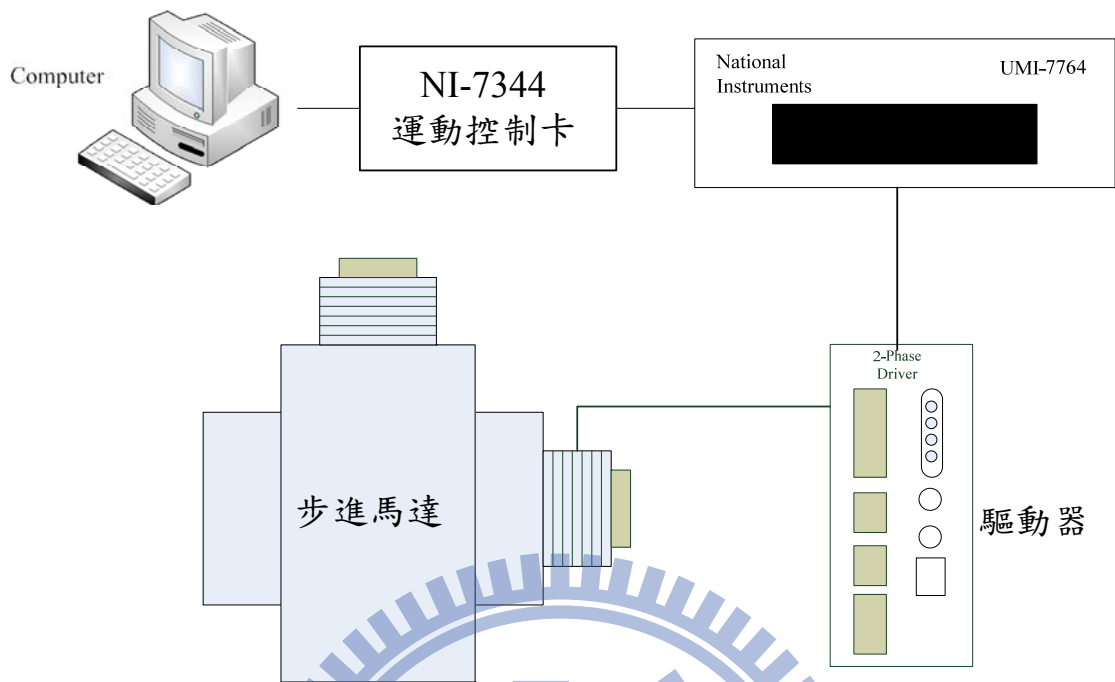


圖 3.12 步進馬達控連接圖

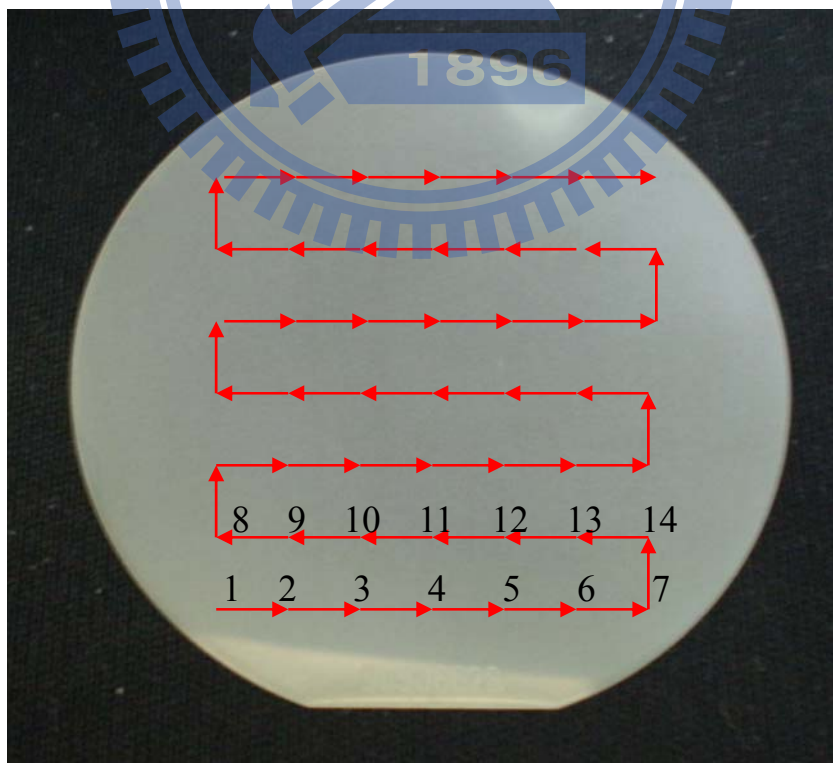


圖 3.13 面掃描標號示意圖

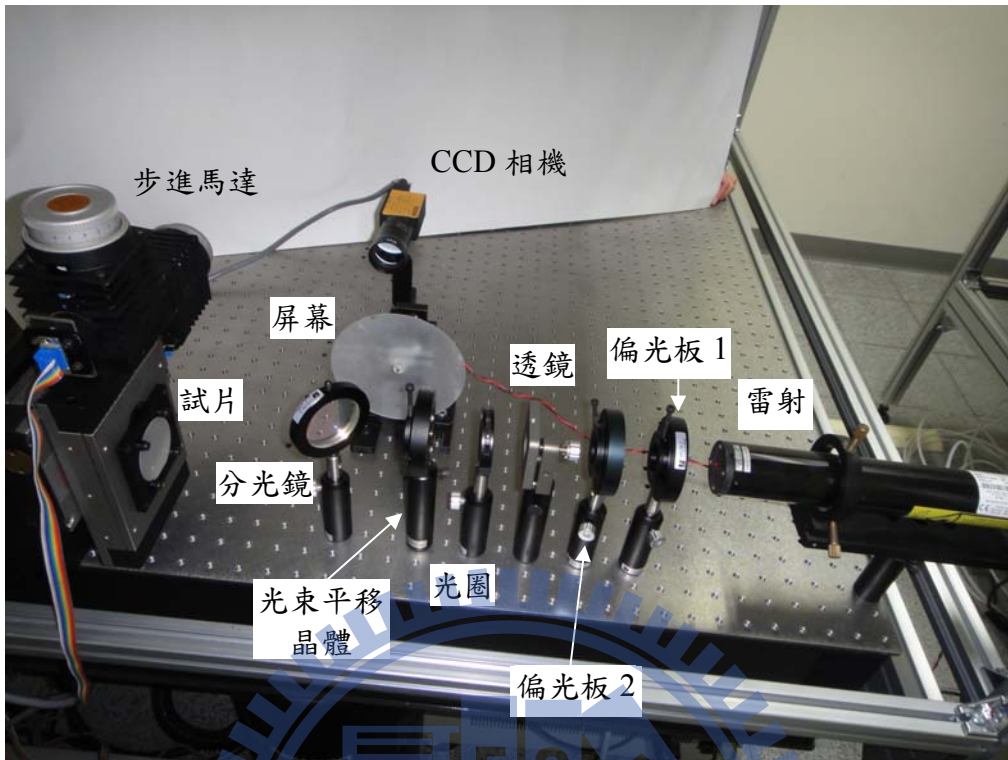


圖 3.14 雙光束量測法系統架構

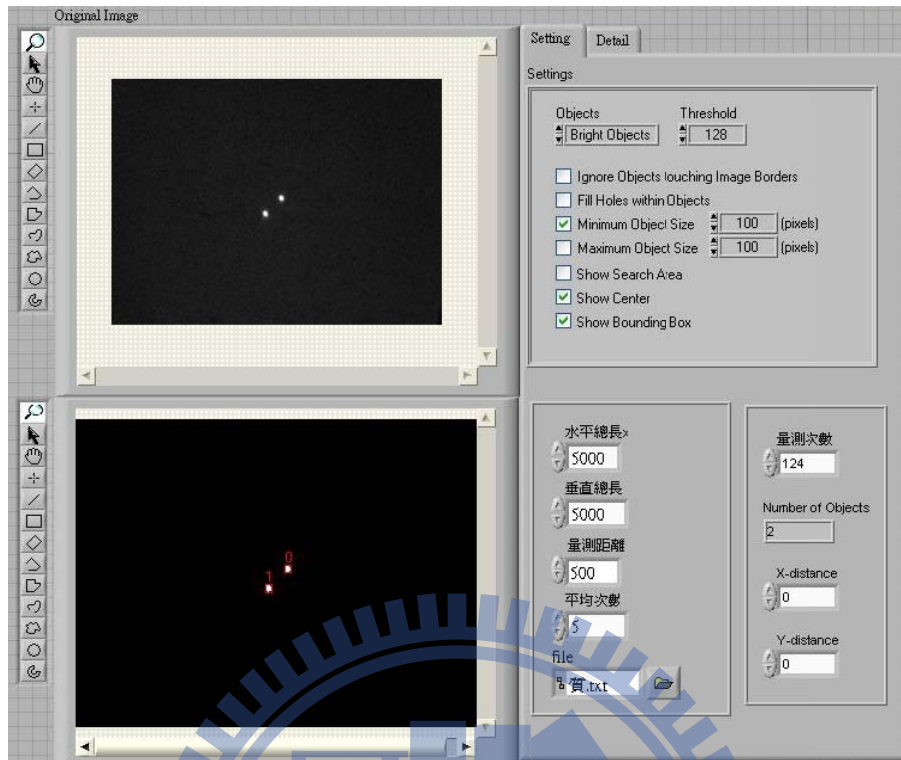


圖 4.1 量測程式的面板介面圖像

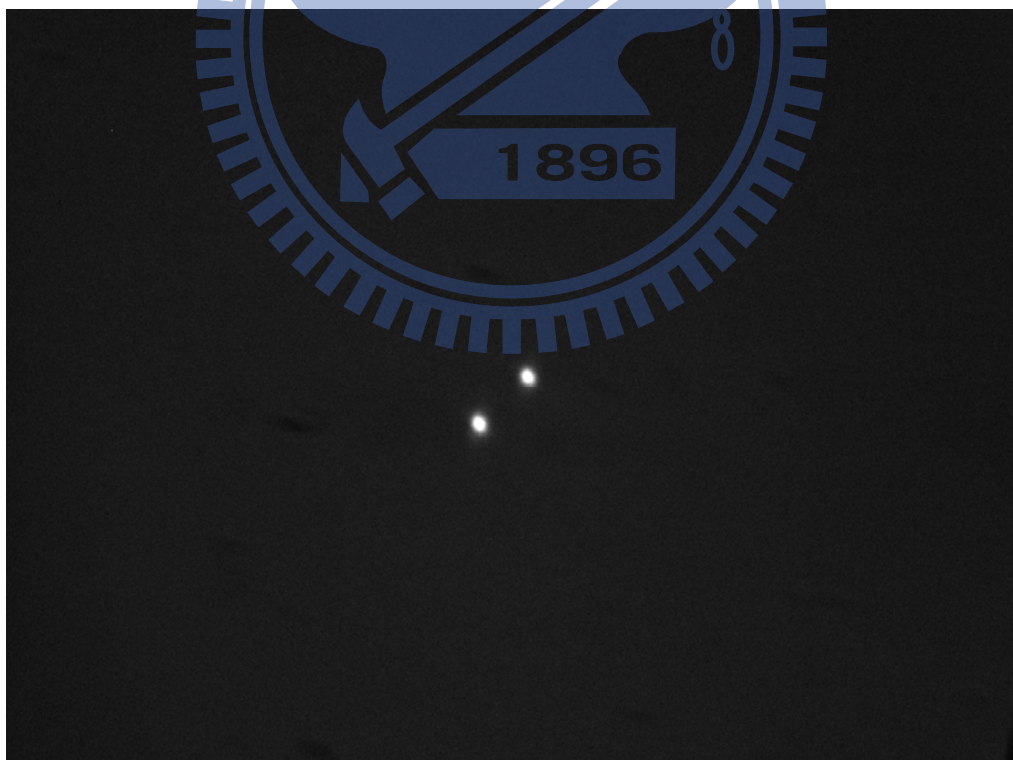


圖 4.2 CCD 相機擷取之原始影像

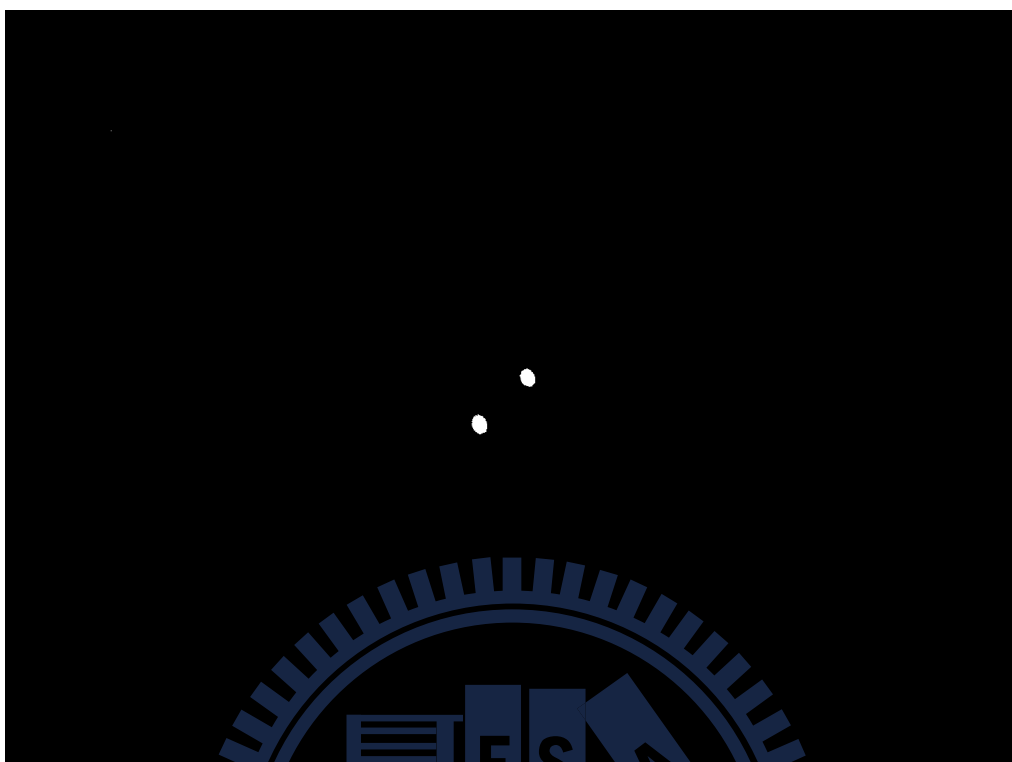


圖 4.3 原始影像經二值化處理後之圖像

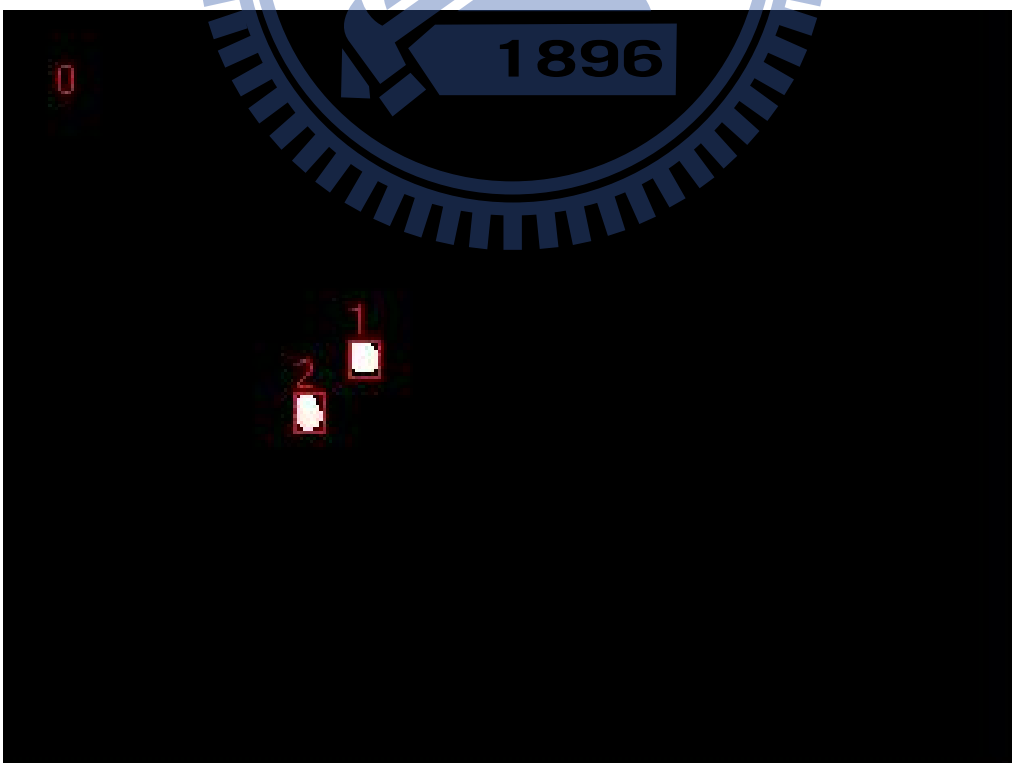


圖 4.4 無設定面積閾值之錯誤情況

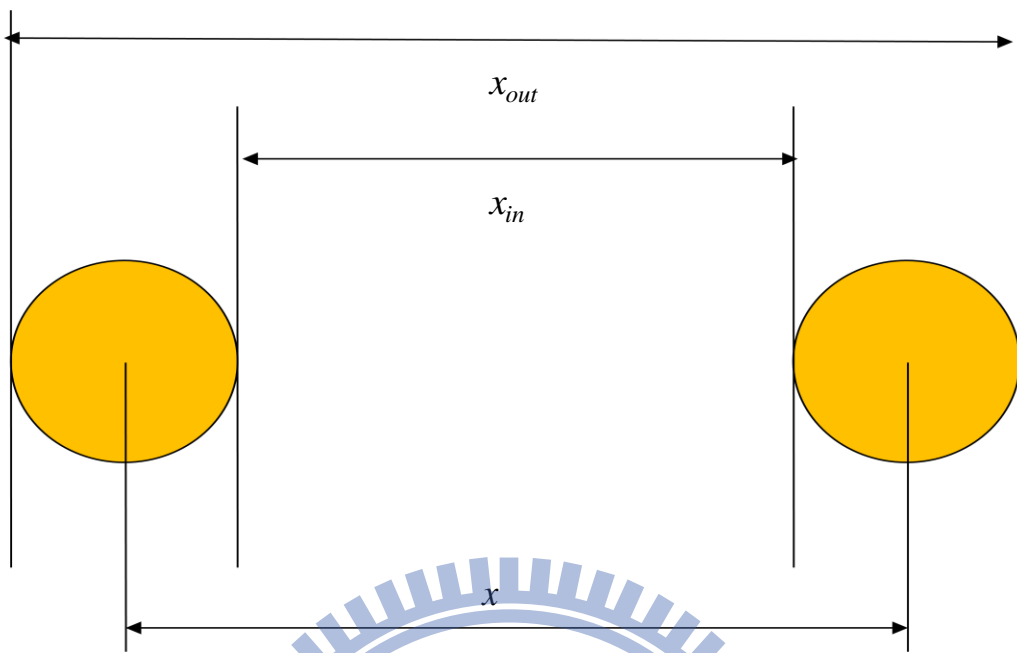


圖 4.5 機器視覺程式辨識 CCD 相機擷取之兩光點的邊界，計算兩者中心點的距離

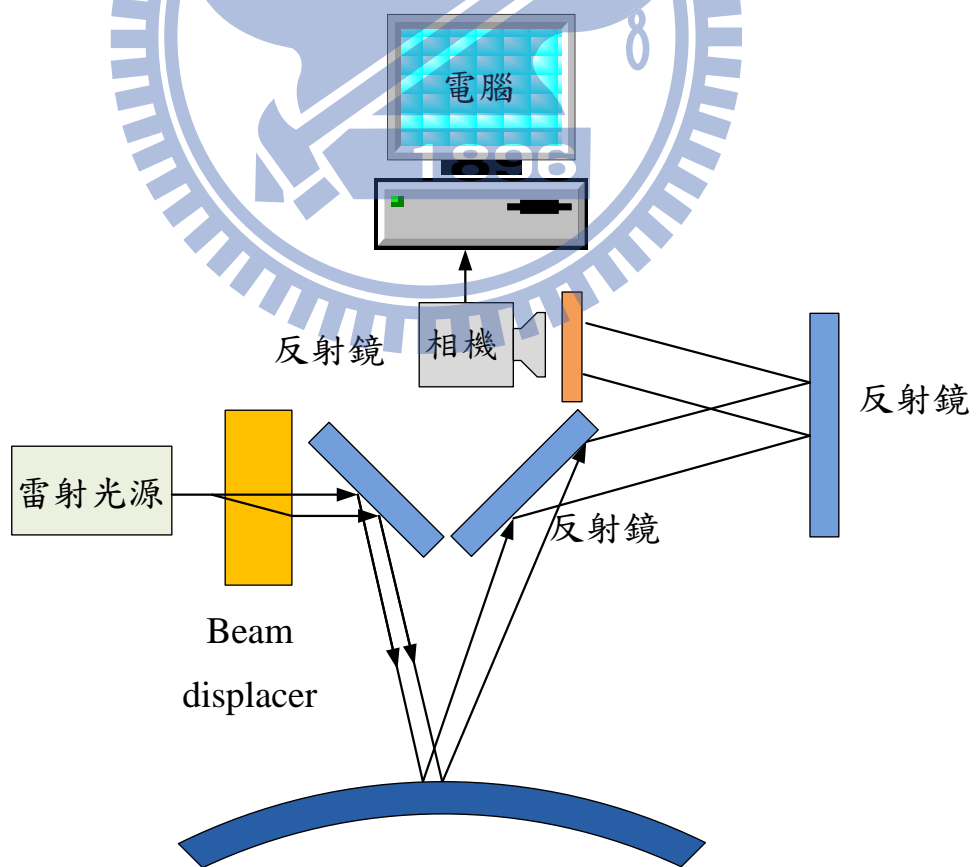


圖 4.6 改良解析度之示範架構

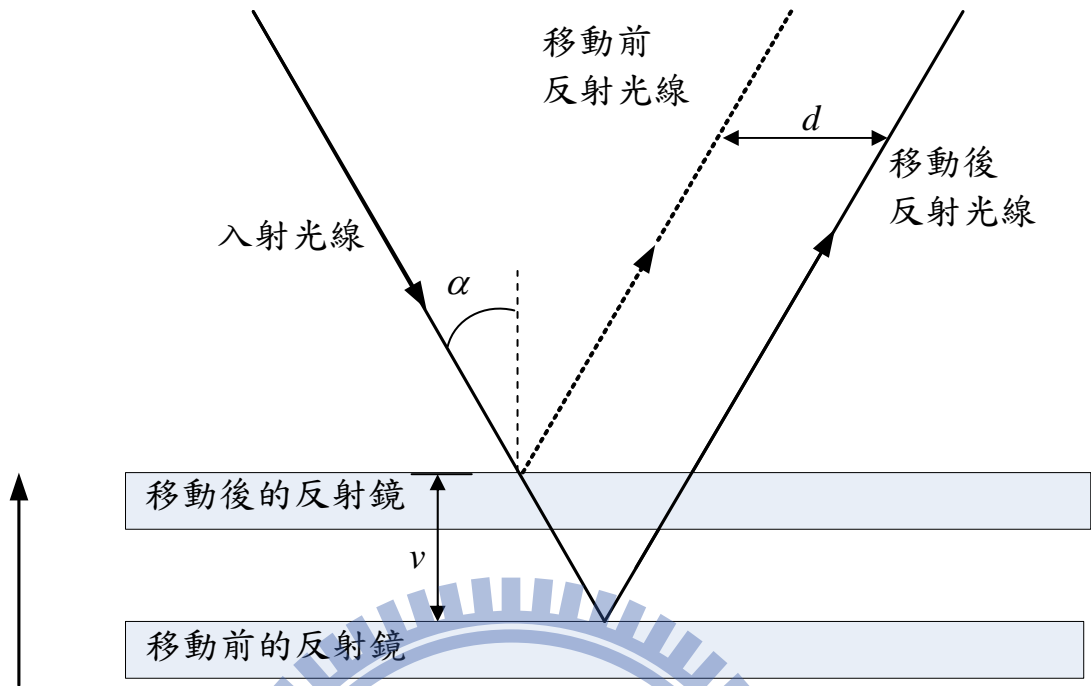


圖 4.7 入射角參數的校正

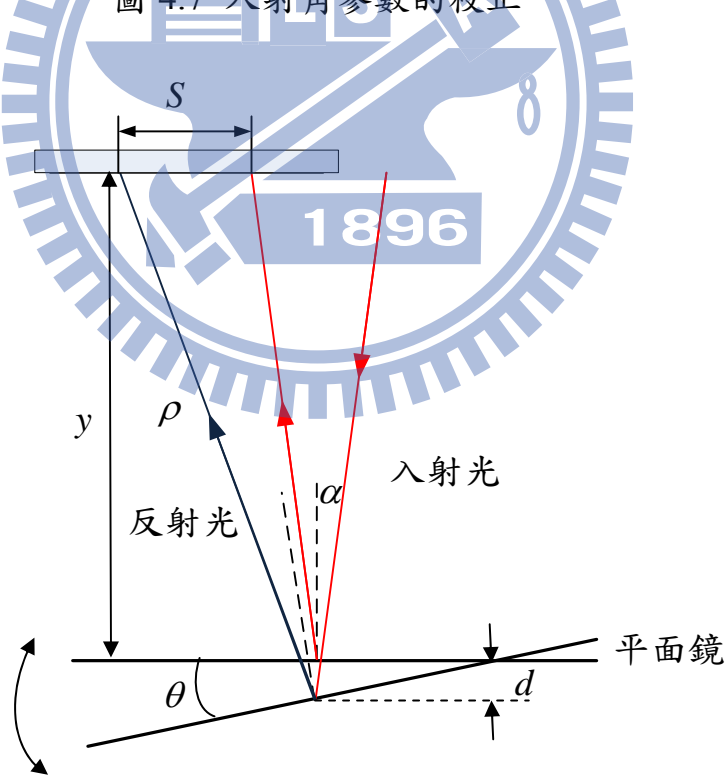


圖 4.8 工作距離之校正

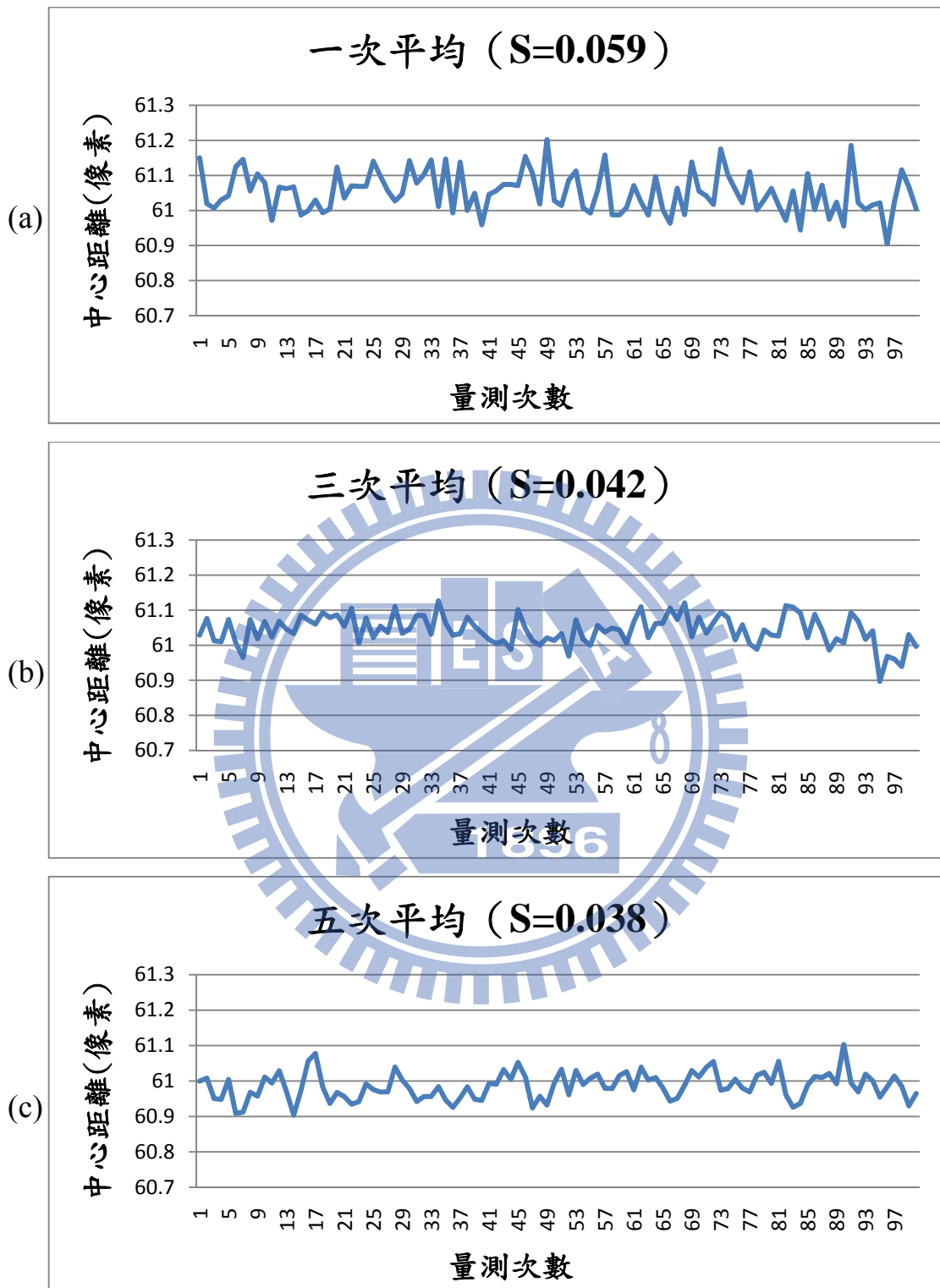


圖 4.9 量測過程平均次數由一次到五次平均之穩定性比較(a)量測無平均之穩定性(b)量測平均 3 次之穩定性(c)量測平均 5 次之穩定性

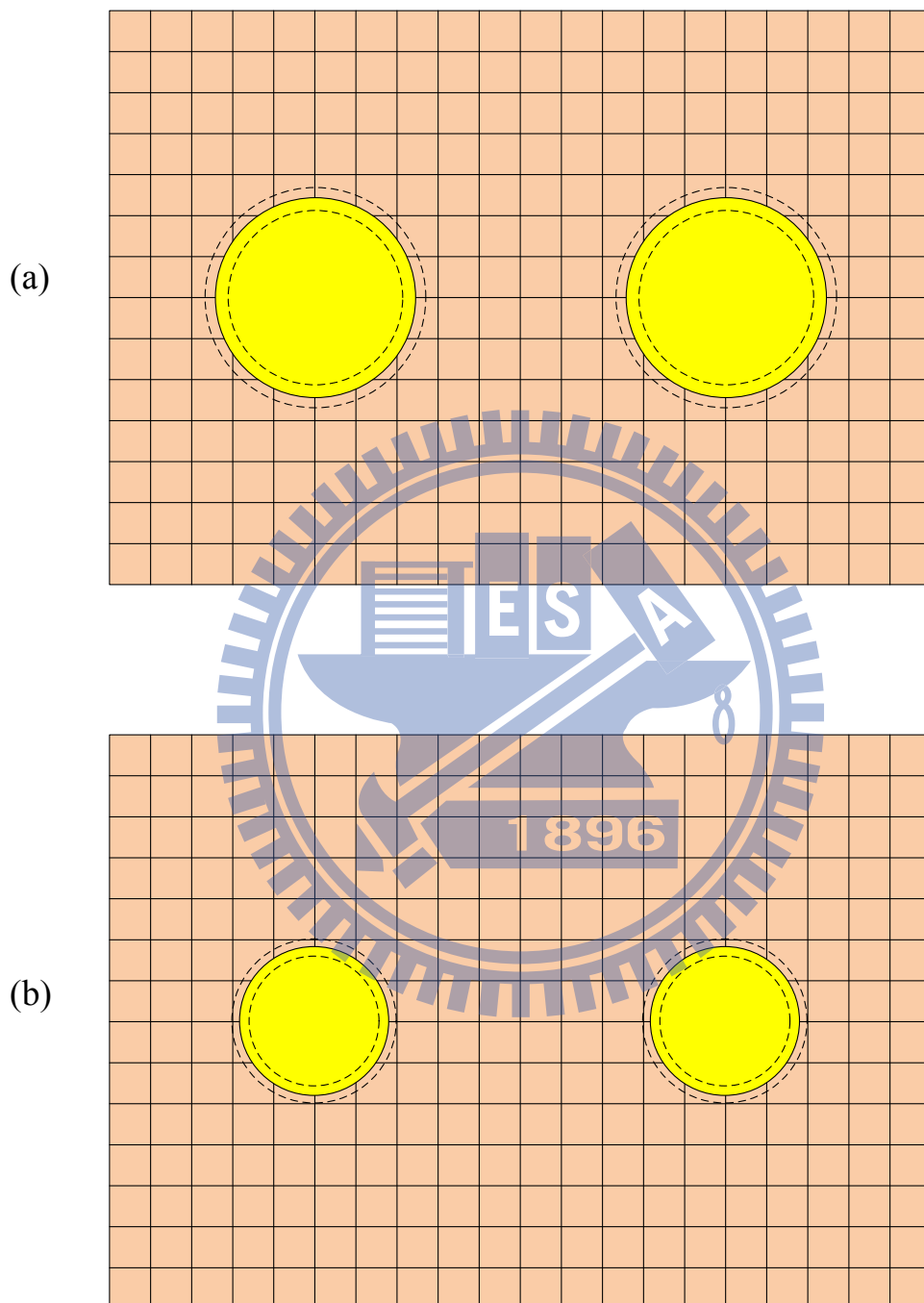


圖 4.10 光點大小變化範圍示意圖(a) 加入透鏡光點縮小前(b) 加入透
鏡光點縮小後

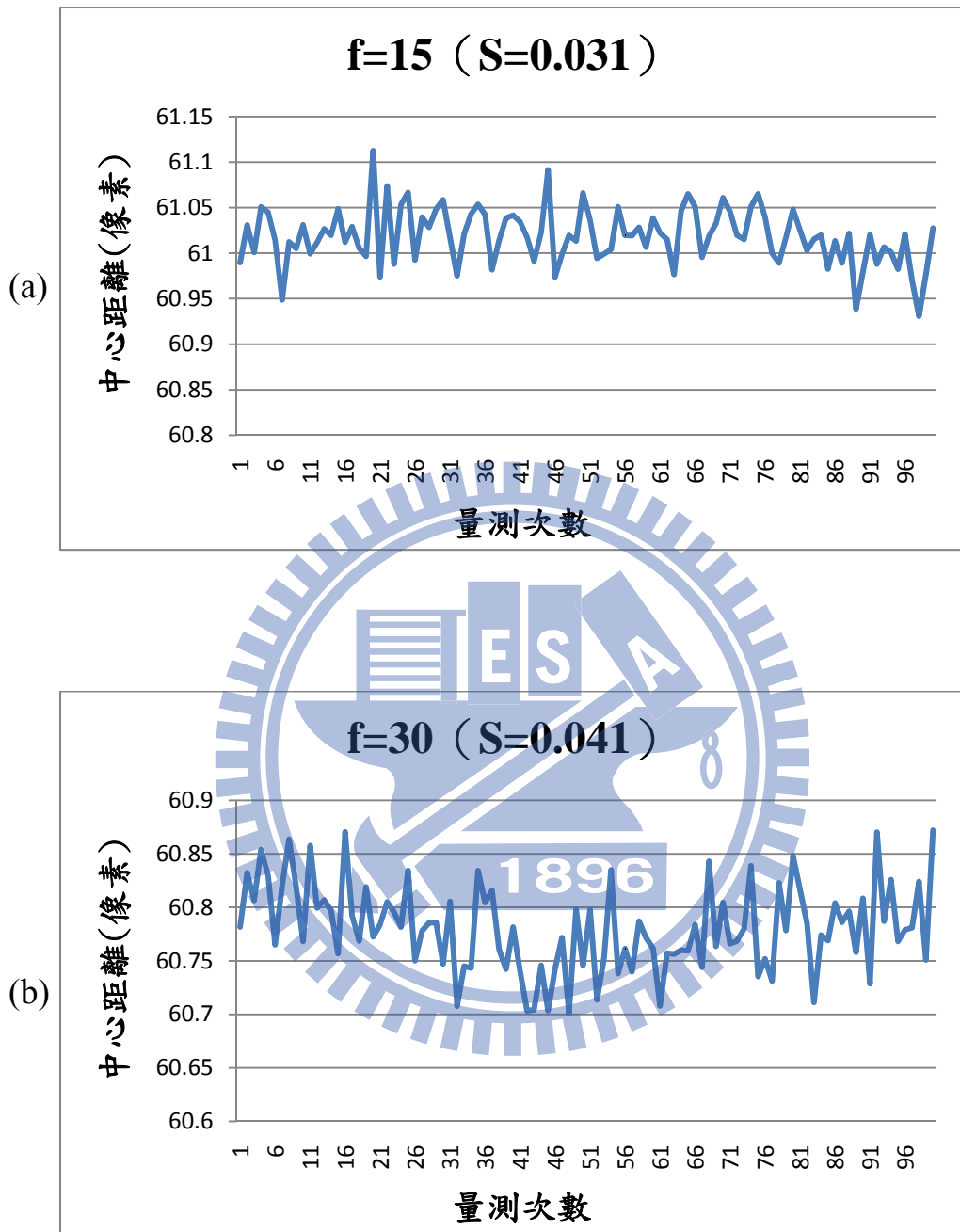


圖 4.11 不同焦距之透鏡之穩定性分析(a)焦距為 15cm 之凸透鏡(b)焦距為 30cm 之凸透鏡

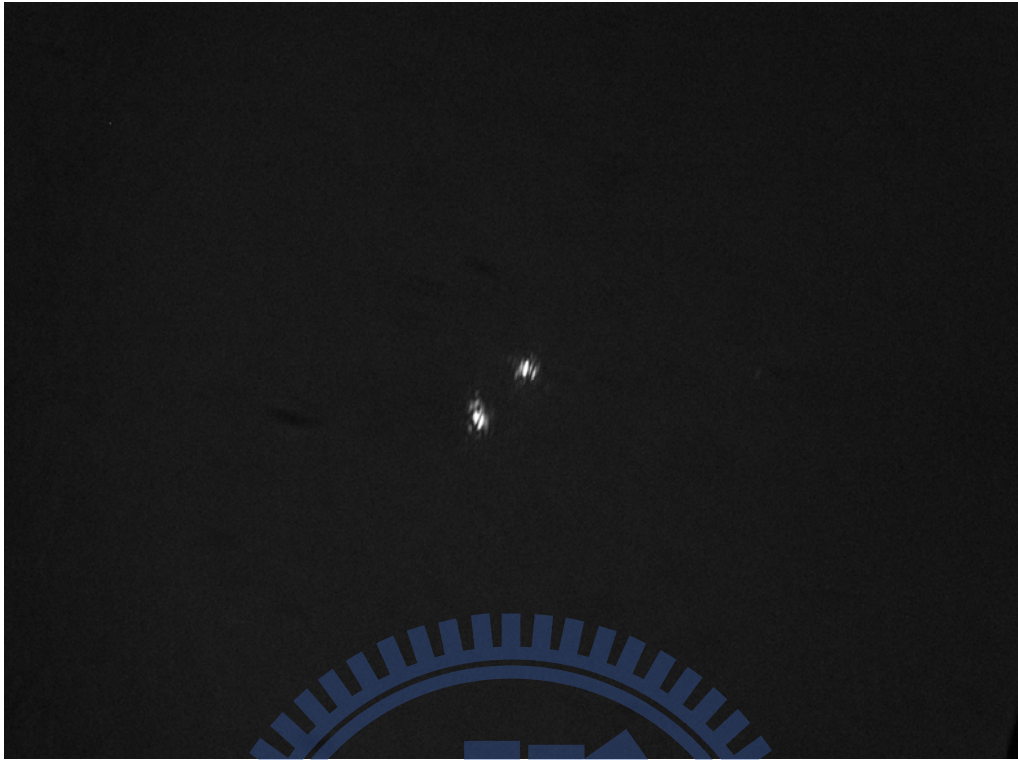


圖 4.12 屏幕未旋轉下之屏幕影像

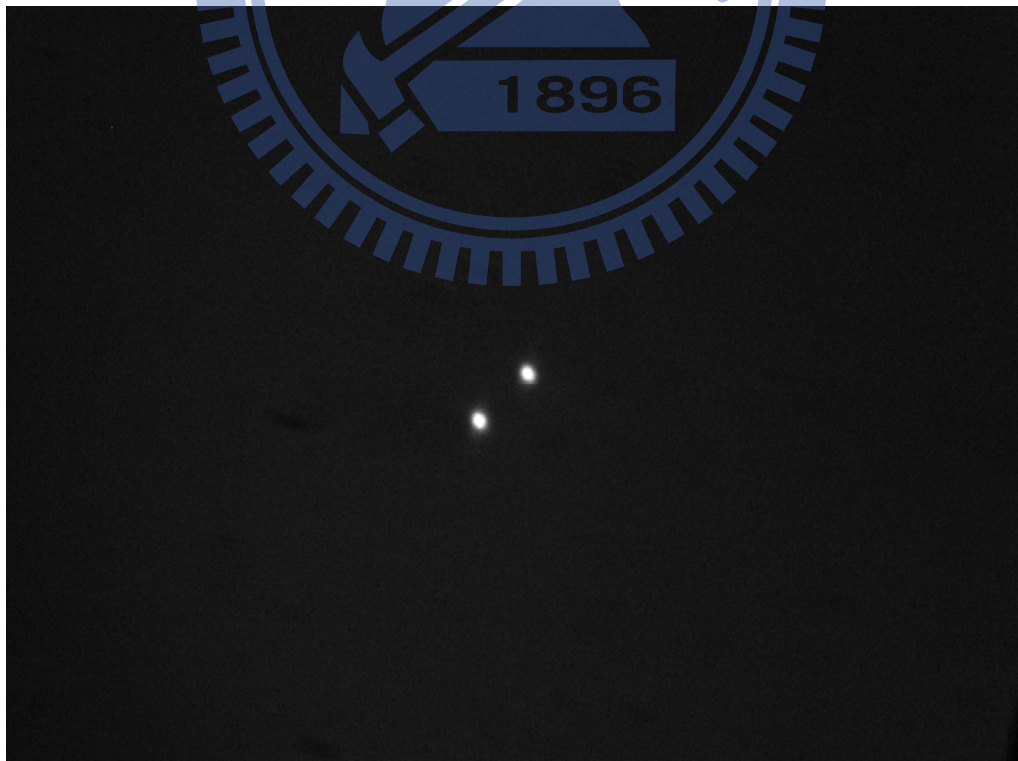


圖 4.13 屏幕旋轉下之屏幕影像

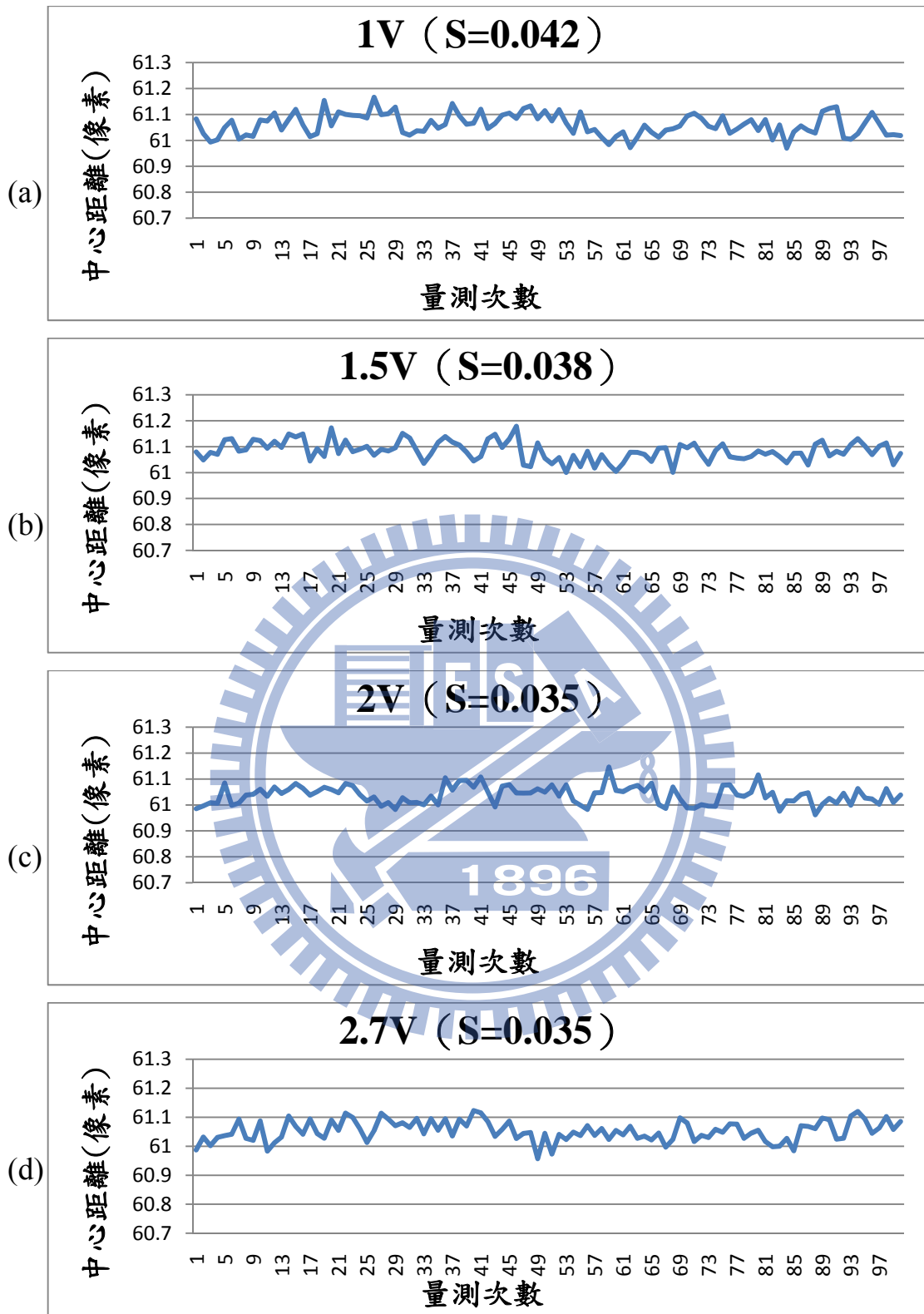


圖 4.14 不同電壓驅動馬達之旋轉屏幕穩定性分析(a)電壓為 1V(b)電壓為 1.5V(c)電壓為 2V(d)電壓為 2.7V

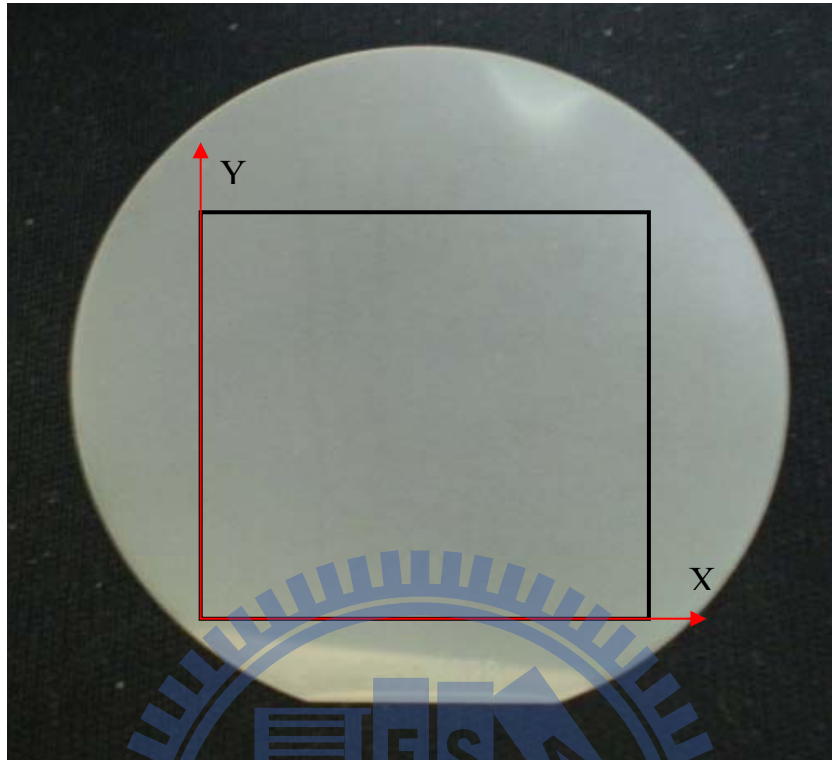
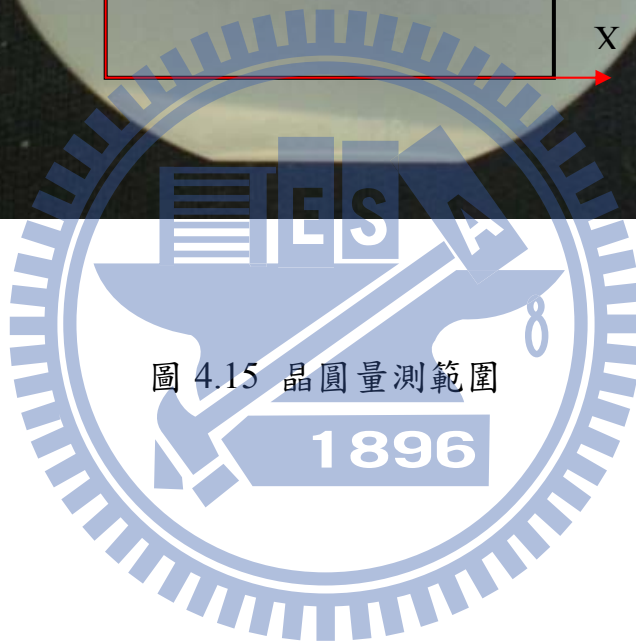


圖 4.15 晶圓量測範圍



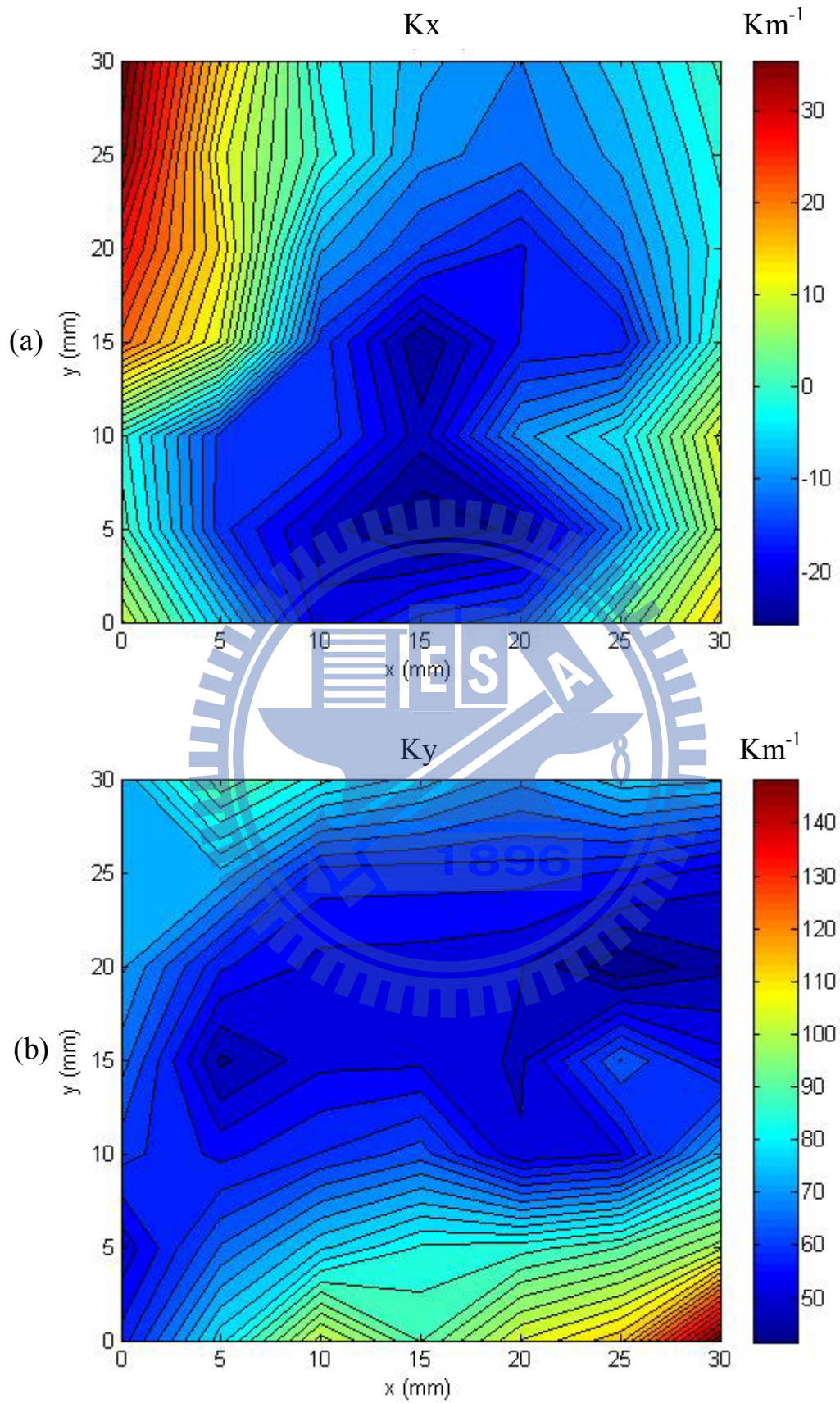


圖 4.16 雙光束法量測藍寶石基板之曲率圖(a)x 方向(b)y 方向

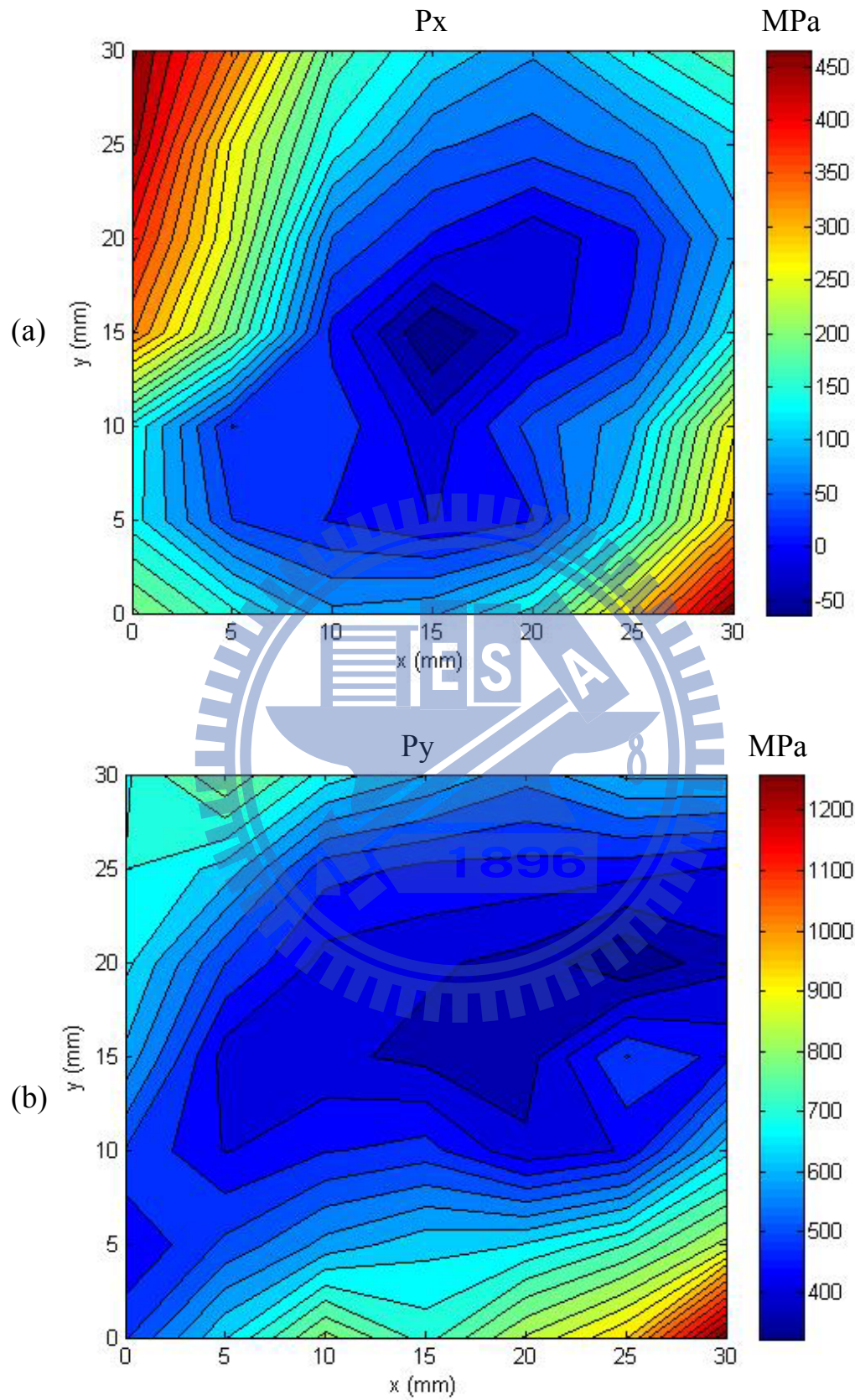


圖 4.17 雙光束法量測薄膜應力之曲率圖(a)x 方向(b)y 方向

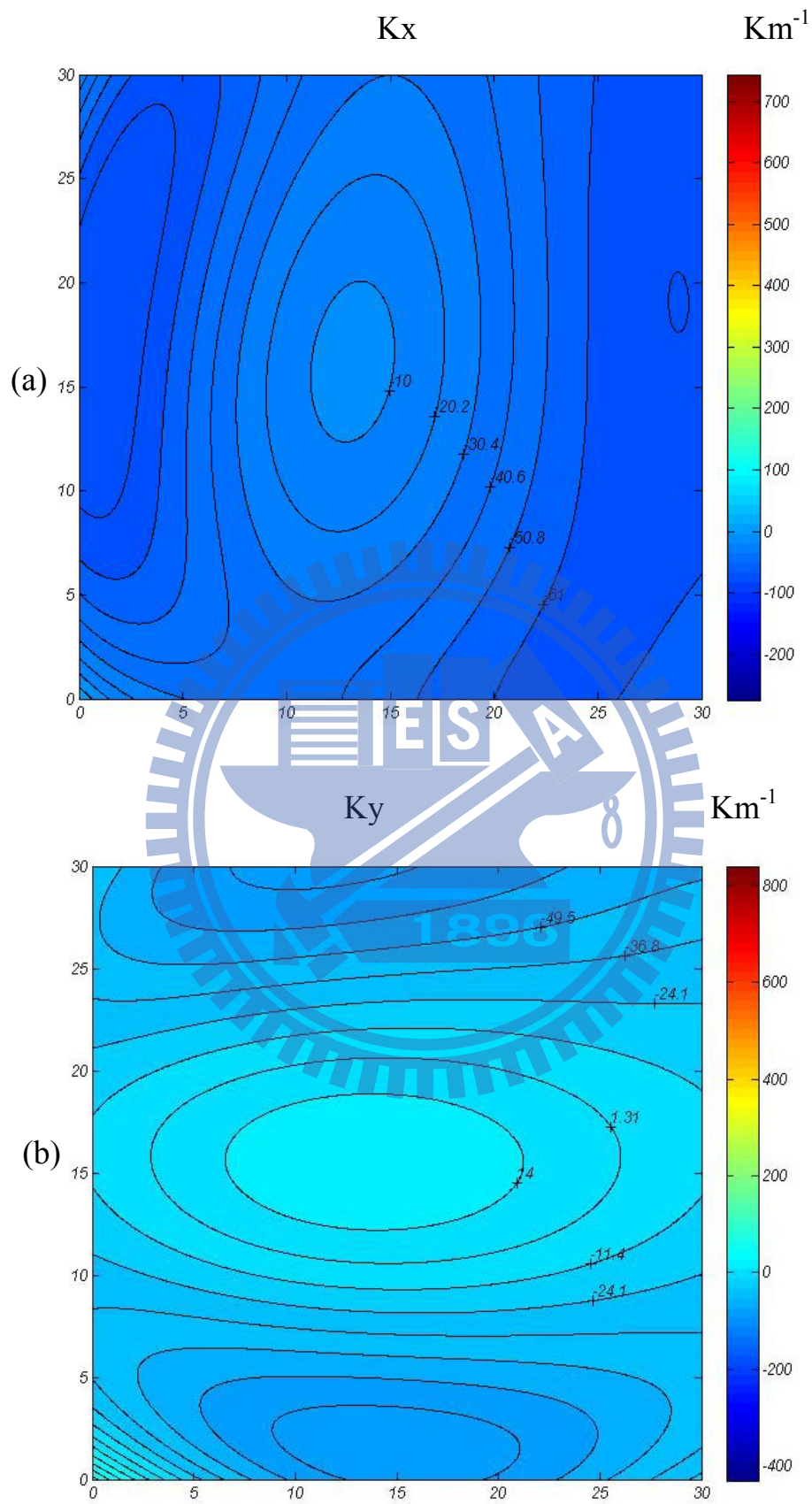


圖 4.18 太曼-格林干涉儀量測藍寶石基板曲率(a)x 方向(b)y 方向

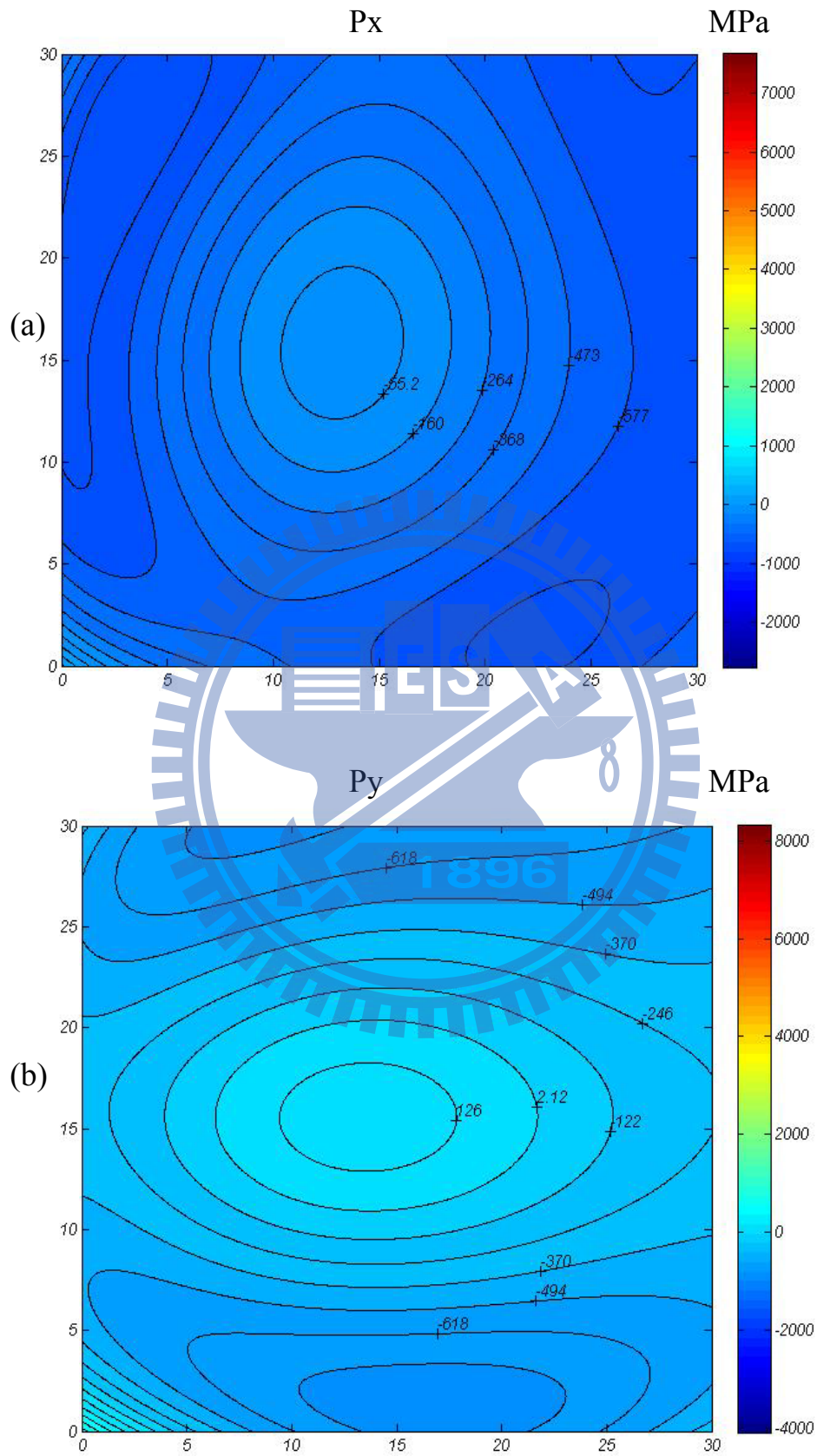


圖 4.19 太曼-格林干涉儀量測薄膜應力(a)x 方向(b)y 方向

0 0 2

Omega 18.75000
2Theta 18.75000

Phi 0.00
Psi 0.00

X 0.00
Y 0.00

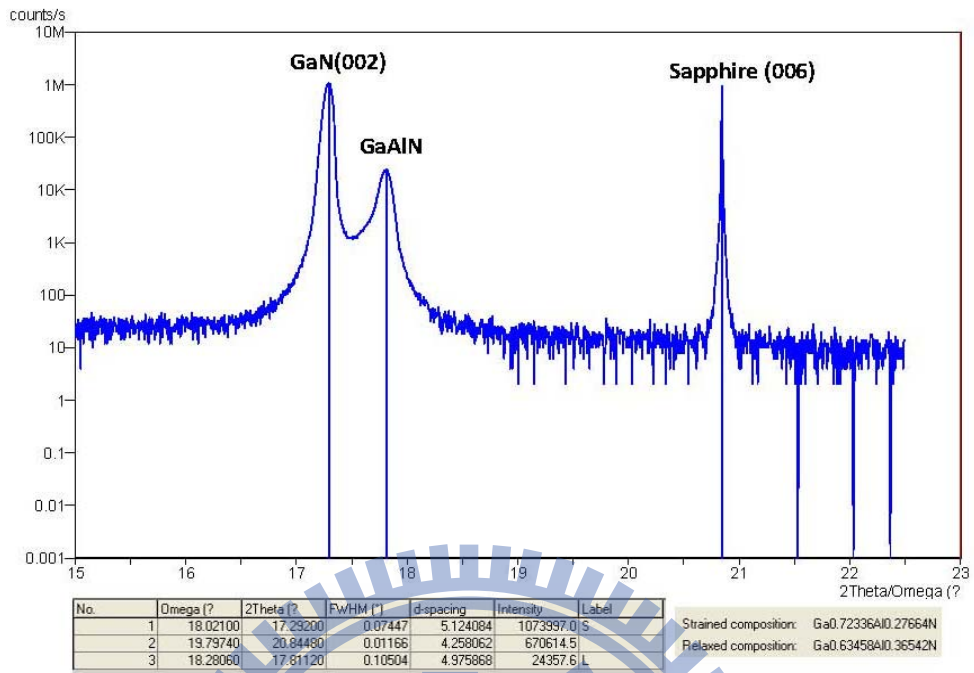


圖 4.20 X 光繞射儀量測面外晶格變形

