

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

定置樣品式原子力顯微鏡之設計與特性研究

The Design and Characteristic Research of
a Stationary-Sample-Type Atomic Force Microscope

研究生：林建宇

指導教授：洪紹剛 博士

中華民國九十九年七月

定置樣品式原子力顯微鏡之設計與特性研究

The Design and Characteristic Research of a Stationary-Sample-Type
Atomic Force Microscope

研究生：林建宇

Student: Jian-Yu Lin

指導教授：洪紹剛

Advisor: Dr. Shao-Kang Hung



A Thesis Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master

in

Mechanical Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

定置樣品式原子力顯微鏡之設計與特性研究

學生：林建宇

指導教授：洪紹剛

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

摘 要

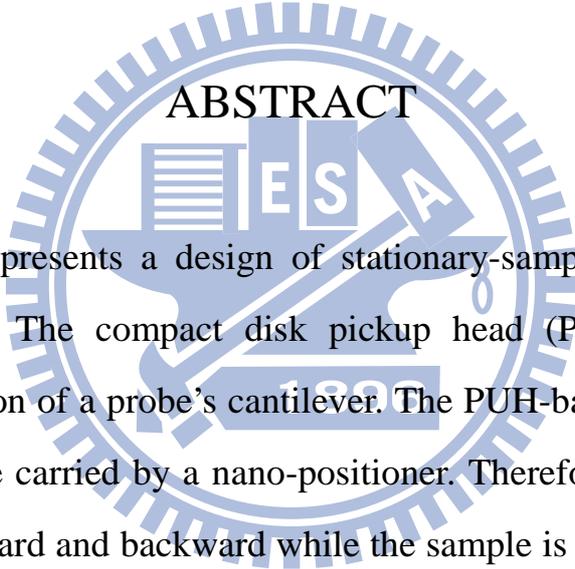
本論文旨在設計一組適用於定置樣品之原子力顯微鏡（Atomic Force Microscope, AFM）利用光碟機讀取頭量測探針微懸臂的撓曲。基於光碟機讀取頭所設計的量測系統，整體重量足夠輕巧以固定於奈米定位器之上。因此在運作期間，探針可來回於完全定置的樣品上方掃描，此種設計適用於產業界的較大且重的樣品。論文中提出一種高精密致動的三自由度慣性馬達，用以將探針微懸臂與光碟機讀取頭雷射光點做光路對正，並且利用電動位移平台定位奈米定位器於三維空間中的位置。實驗結果證明所提出的定置樣品式 AFM 可正確的運作。

The Design and Characteristic Research of a Stationary-Sample-Type
Atomic Force Microscope

Student: Lin , Jian-Yu

Advisor: Dr. Hung , Shao-Kang

Department (Institute) of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University



ABSTRACT

This thesis presents a design of stationary-sample-type atomic force microscope (AFM). The compact disk pickup head (PUH) is modified to measure the deflection of a probe's cantilever. The PUH-based detecting system is light enough to be carried by a nano-positioner. Therefore, during operation, the probe scans forward and backward while the sample is completely stationary. This design is suitable for large/heavy industrial samples. A high precision three degree-of-freedom inertia motor is also proposed to align the optical path between the probe and the PUH. A 3-dimensional motorized stage is adopted to locate the nano-positioner. The experimental results proves the validity of the proposed stationary-sample-type AFM.

誌謝

兩年的碩士時間稍縱即逝，在這段時間裡，學到了許多寶貴的經驗與生活態度，在此獻上最深的感謝給予每一個幫助過我的人。

能夠完成碩士學位最感謝的是指導教授 洪紹剛老師，在實驗室成立初期，老師親自帶領第一屆的我們作實驗以及教導電路設計相關知識。老師不單只是教我們作研究的方法，平時更以亦師亦友的身份告訴我們在社會上作人處事的方法，在我們犯錯的時候，更是有耐心的糾正我們，很幸運的能夠在交大跟隨老師作研究。感謝口試委員呂宗熙教授與陳仁浩教授對論文內容的指點，使研究能夠更加完善。

感謝一路走來家人對我的支持，不論是在學業或是生活上，因為有你們而使我能夠順利完成學業，獻上最深的祝福給予你們。

精密機電工程實驗室第一屆的同學們，感謝遊戲王在軟體使用以及資料搜尋上的大力幫助。論文實驗硬體電路以及軟體程式碼的撰寫，感謝瓜瓜不遺餘力的幫忙。感謝菘哥在遭遇困難的時候，可以給予指引的方向。兩年同窗的時間，修課的時候互相幫忙，一起作研究，閒暇之餘一起玩樂，充實了我的研究生生活。

實驗室的學弟喬華、立岡、盧奕與杰緯，在你們加入之後，多了許多歡笑。尤其口試的時候，感謝你們熱心的幫忙準備，希望未來你們的研究能夠順利，特別謝謝瓜瓜回來幫忙並且提供許多建議。機械系的同學炫和、

駱哥、小林，感謝你們在日常生活中的幫助。初來交大時，感謝同學譯徵帶領我熟悉環境，並且給予許多幫助。

在實驗室成立初期，感謝系辦行政人員的協助，使得在設備購買、硬體空間規劃上，能夠順利進行。感謝許美麗小姐在剛進來研究所什麼都不懂的情況下，詳細教導經費報支與行政業務，感謝有趣的美玲與玉妃姐，不單只是在行政業務處理上的幫忙與教導，也使研究生活增添了許多樂趣。

感謝乖女兒美嬌的支持與鼓勵，在失落的時候，能夠聽我的抱怨並且為我加油打氣，與我分享生活中大大小小的事情。在撰寫論文期間，持續盯著進度，妳是個很棒的女兒。

最後，感謝韻芹，與妳牽手在一起的日子，是我在交大最深刻的回憶。雨後的天空，妳是最耀眼的那道彩虹。



2010年7月

林建宇

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
一、緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究背景.....	1
1.3 定置樣品式 AFM.....	5
1.4 論文架構.....	6
二、預備知識.....	7
2.1 AFM 基本原理.....	7
2.1.1. 探針與樣品間作用力感測.....	8
2.1.2. 探針懸臂形變感測.....	9
2.1.3. 電子系統.....	12
2.2 AFM 操作模式.....	13
2.3 慣性馬達致動原理.....	17
三、系統設計.....	18
3.1 硬體系統設計.....	18
3.1.1. 傳統 AFM 系統架構.....	18
3.1.2. 定置樣品式 AFM 設計系統架構.....	22
3.1.3. 探針光路對正模組.....	25
3.1.4. 探針懸臂撓曲感測模組.....	31

3.1.5.	電路系統.....	35
四、	實驗結果.....	37
4.1	實驗方法.....	37
4.1.1.	掃描模式.....	37
4.1.2.	操作方法.....	38
4.2	實驗特性數據.....	41
4.2.1.	探針.....	41
4.2.2.	掃描樣品.....	43
4.2.3.	掃描方式.....	45
4.2.4.	軟體後處理.....	46
4.3	實驗結果.....	47
4.3.1.	實驗數據.....	47
4.3.2.	校正片掃描結果.....	49
4.3.3.	PSS 樣品掃描結果.....	51
4.3.4.	小結.....	55
五、	結論與展望.....	56
	參考文獻.....	57



圖目錄

圖 1.2.1 STM 操作原理 [10].....	3
圖 2.1.1 AFM 原理示意圖	7
圖 2.1.2 兩原子間的距離與交互作用力的關係示意圖	8
圖 2.1.3 AFM 操作模式分類	9
圖 2.1.4 光槓桿式 PSD 偵測示意圖.....	10
圖 2.1.5 光像散式偵測示意圖	11
圖 2.1.6 光像散式聚焦誤差訊號圖 S-curve	12
圖 2.1.7 回饋系統操作示意圖.....	13
圖 2.2.1 暫接觸式或輕敲模式示意圖.....	14
圖 2.2.2 品質因子示意圖.....	15
圖 2.2.3 探針之頻率-振幅關係圖.....	16
圖 2.3.1 慣性馬達位移原理圖.....	17
圖 3.1.1 傳統 AFM 試片置於掃描載台圖	18
圖 3.1.2 探針撓曲感測模組與掃描載台組裝圖.....	19
圖 3.1.3 傳統接觸式 AFM 探針置放處	19
圖 3.1.4 傳統樣品移動式 AFM 工作示意圖	20
圖 3.1.5 交大貴儀中心掃描探針顯微鏡實體圖	21
圖 3.1.6 定置樣品式 AFM 掃描設計圖	22
圖 3.1.7 定置樣品式硬體系統架構示意圖.....	23
圖 3.1.8 硬體設計實體圖	24
圖 3.1.9 三維掃描平台與探針懸臂撓曲感測模組組裝圖	24
圖 3.1.10 慣性馬達 3D 模型圖	25
圖 3.1.11 慣性馬達 Z 軸平移示意操作圖.....	26
圖 3.1.12 慣性馬達 Z 軸平移實體圖 (側視圖)	26

圖 3.1.13 慣性馬達平移示意圖	27
圖 3.1.14 慣性馬達實體圖 (側視圖)	28
圖 3.1.15 慣性馬達旋轉作動示意圖	28
圖 3.1.16 慣性馬達實體圖 (前視圖)	29
圖 3.1.17 慣性馬達驅動電路 (整體+X 平移)	30
圖 3.1.18 慣性馬達驅動電路 (持針頭順時針旋轉)	30
圖 3.1.19 光碟機讀取頭	31
圖 3.1.20 光碟讀取頭雷射光路結構圖	32
圖 3.1.21 像散現象示意圖	33
圖 3.1.22 探針懸臂撓曲感測模組示意圖 (俯視圖)	33
圖 3.1.23 探針懸臂撓曲感測模組示意圖 (仰視圖)	34
圖 3.1.24 探針懸臂撓曲感測模組示意圖 (側視圖)	34
圖 3.1.25 PUH 解析電路實體圖	35
圖 3.1.26 PUH 訊號處理與控制電路圖	36
圖 4.1.1 定置樣品式 AFM 定力掃描模式示意圖	37
圖 4.1.2 定置樣品式 AFM 定高掃描模式示意圖	38
圖 4.1.3 AFM 基本操作流程	40
圖 4.2.1 暫接觸式探針外觀 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)	41
圖 4.2.2 實驗中所使用探針 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)	41
圖 4.2.3 暫接觸式探針針尖側視圖 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)	42
圖 4.2.4 暫接觸式探針針尖正視圖 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)	42
圖 4.2.5 掃描樣品實體圖 PSS	44
圖 4.2.6 PSS 樣品表面形貌	44
圖 4.2.7 柵狀掃描	45
圖 4.2.8 X 與 Y 掃描電壓訊號變化示意圖	45
圖 4.2.9 AFM 數據後處軟體 Gwyddion 擷圖	46

圖 4.3.1 S-curve 圖	47
圖 4.3.2 探針共振頻率圖	48
圖 4.3.3 探針力圖	48
圖 4.3.4 校正片表面形貌 (廠商資料)	49
圖 4.3.5 校正片外觀	49
圖 4.3.6 校正片掃描圖樣	50
圖 4.3.7 校正片掃描圖樣立體圖	50
圖 4.3.8 AFM 掃描 PSS 樣品實際情形	51
圖 4.3.9 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣	51
圖 4.3.10 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣立體圖	52
圖 4.3.11 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣	52
圖 4.3.12 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣立體圖	53
圖 4.3.13 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣	53
圖 4.3.14 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣立體圖	54
圖 4.3.15 P 與 I 增益值調整不當的 PSS 樣品掃描圖樣	54
圖 4.3.16 P 與 I 增益值調整不當的 PSS 樣品掃描圖樣立體圖	55

表目錄

圖表 3.1.1 PUH 控制接腳資料 (廠商資料)	35
圖表 4.2.1 暫接觸式探針懸臂特性資料 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)	42
圖表 4.2.2 暫接觸式探針針尖特性資料 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)	43
圖表 4.3.1 校正片規格資料 (廠商資料)	49

一、緒論

1.1 研究動機

在科學發展史上，顯微鏡扮演了極重要的角色，其中以光學式顯微鏡歷史最為悠久。但是隨著探測微觀奈米世界，光學顯微鏡受可見光繞射的限制，很難解析 $1\mu\text{m}$ 以下的特徵。能突破此限制達成奈米解析度的顯微術，有電子顯微術[1]與掃描探針顯微術[2]兩大分支，它們的發明者共享了 1986 年諾貝爾物理獎的榮耀。其中電子顯微術因價格與樣品製備的種種限制而緊縮了它的應用範圍，但掃描探針顯微術因樣品製備簡單且價格相對低廉，二十餘年來有著快速的發展，其中又以原子力顯微術的演變最為多元。

原子力顯微鏡可進行奈米探測，使工程師以較經濟的方式來處理上述重要的問題，其檢測應用範圍非常廣泛，如光碟片與硬碟片品質檢測、半導體元件品質檢測、矽晶圓玻璃基板表面粗糙度量測以及在生物醫學方面如生物細胞修整與結構驗證等。

傳統原子力顯微鏡僅適用於小樣品，如試片若樣品太大超過一定尺寸，則需切割。切割樣品，不僅麻煩耗時，而且在切割過程中容易破壞與污染樣品，還會使檢測結果失真。

適用於定置樣品之原子力顯微鏡則可避免此種情形，不但省掉樣品切割過程中的麻煩，檢驗結果也可將失真結果降到最低。並且檢驗對於樣品是非破壞性的，因此樣品可以再度使用。

1.2 研究背景

在近期的科學研究發展中，奈米尺度以下的科學研究已經是現今重要的研究領域之一。奈米結構及材料有幾個特色：(1) 尺寸很小：一般儀器很難觀測得到，僅有少數幾項先進顯微術達到足夠解析力。(2) 獨特的物理、化學性質：奈米結構的性質與大尺寸材料不同，而且不同尺寸有不同的特性。因此，如何觀察到單一奈米結構，並對單一奈米結構作物性、化性的量測，甚至觀察到奈米材料的表面原子結構，是研究奈米科技一項相當關鍵且極具挑戰的工作。

顯微成像術在微觀尺度科學發展上一直扮演著重要的角色，舉凡物理、化學、醫學及各種工程的應用都與其相關。顯微術，係指可以將人眼無法看見的微小結構，以技術性的方法，顯微放大該區域樣品表面的影像。在奈米尺度的科技研究中，掃描探針顯微術（scanning probe microscopy, SPM）是一種可以有效量測材料在奈米尺度以下各種物理性質與化學性質的顯微技術。有別於傳統的光學顯微技術，其特點是操作一隻末端極尖的探針非常靠近樣品表面，進行掃描及局部量測，解析度主要取決於針尖的大小，最好的情況下可達到原子級解析度。

光學顯微鏡及掃描電子顯微鏡（scanning electron microscope, SEM）是目前常使用的兩項顯微儀器。SPM 在空間解析度上優於其二者，尤其是 z 方向，電子顯微鏡不太能分辨 20 nm 以下的高度差[3]，不過目前很多薄膜的厚度在 20 nm 或更小，用 SPM 就不難達到 0.01 nm 的解析度。再者，放入 SEM 觀察之前，非金屬樣品需事先做鍍金屬處理，但有些樣品如生物分子，在乾燥及鍍導電膜等程序處理過後，往往與原始狀態有所不同。另一方面，SEM 的高能量電子束對某些樣品(尤其是脆弱的生物分子)具有破壞性。SPM 則不具破壞性，樣品也通常不需事先處理，更可在真空、空氣、水溶液等各種環境下操作，限制很少。另一個特點是，SPM 的設計彈性比電子顯微鏡大很多，可以隨環境、用途、空間做不同的設計，並與不同儀器或設備整合進行特殊的量測。當然，SPM 也有些缺點，如表面高度落差過大的材料就不適用於 SPM，因為壓電材料的 Z 軸全行程不大（1—100 μm ）[4-5]；另外，SPM 的表面形貌成像只針對暴露在最外層的結構，無法對下層結構成像，掃描電子顯微鏡則無此限制；掃描電子顯微鏡還可對材料作成分分析，SPM 現今仍無此能力，期待將來有所突破。

不同顯微術的差異在於探針的結構不同、量測的物理量不同以及量測的技術不同，這些物理量包括電流、電阻、電荷、原子力、靜電力、磁力、磁場、溫度、光學性質、共振頻率等[6-8]。我們可選取適當探針做不同特性的奈米級量測，這是 SPM 與其他奈米級顯微術相較，最獨特的一項優點。

SPM 包含一系列相關科技，而掃描穿隧顯微術（scanning tunneling microscopy, STM）是其中最早發展出來的技術，它在導電材料的表面可達原子解析度。此一顯微技術的研

發最早起始於 1982 年 IBM 蘇黎世研究所的 Gerd Binnig 及 Heinrich Rohrer 共同發明了掃描式穿隧顯微鏡，使得科學家在原子尺寸的量測及操作上，有了革命性的進展。STM 相對於光學顯微鏡而言，STM 沒有接物鏡及接目鏡，也不需要光源。圖 1.2.1 所示為 STM 運作基本原理，其操作方式是利用一支極細的探針，沿材料表面進行掃描，過程中穿隧電流因為試片表面高低起伏不同而變化成像，經電腦運算可得材料表面的三維圖形。相異於 SEM 的樣品，STM 的樣品不需要經過繁複的處理步驟，也不會對樣品造成破壞，並且可以在真空、空氣及水溶液下操作，更重要的是，其在水平方向的解析度可達到 0.1-1.0nm，在垂直方向可達到 0.1nm，非常適合於奈米結構的量測[9]。

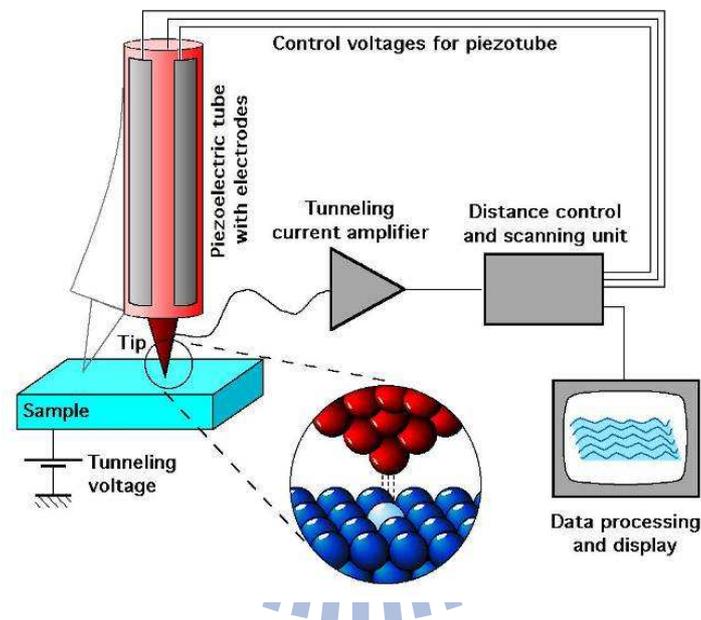


圖 1.2.1 STM 操作原理 [10]

雖然掃描式穿隧顯微鏡具有上述的優點，本身還是有一些限制，對於不能導電及表面落差太大的樣品，並不適用。然而在 1986 年，G. Binnig 及 Quate 等人利用原子間的作用力，發明了原子力顯微術 (atomic force microscopy, AFM) [11]，成功於大氣中測得水平解析度為 30 埃 (\AA)，垂直解析度為 1 埃 (\AA) 之材料表面圖像。AFM 改善了 STM 的缺點，使其不再侷限於導電性材料的量測，並可於大氣、真空、常溫、低溫甚至液體環境中操作，因而應用範圍增廣，可應用至各個不同領域作表面形貌性質量測及研究。

另外，雖然 AFM 適用於非導體樣品，但 STM 有項優點，就是 STM 比 AFM 容易達到原子解析度[12]。這是因為針尖末端只要有一顆原子比其他原子突出 1 埃以上，穿

隧電流就主要經過此一原子，其他原子對穿隧電流的貢獻微不足道。因此，在平坦表面上，即使針形不是很尖細，有一顆稍突出的原子就可達到原子解析。反觀 AFM 所利用的原子力，因同時有長程力及短程力的作用，針尖與表面的交互作用區域就不限於幾顆原子而已；即使利用短程力可得到較佳的解析度，但來自於整個針尖末端數十 nm 的區域及其下方的表面原子間的長程力，也對全部交互作用力有不小的貢獻，因此解析度難與 STM 相比，但針的尖端越細，探針與表面交互作用的區域越小，解析度自然也就越佳。

除此之外，AFM 技術的改良衍生出許多類型的探針顯微鏡，像是可觀測磁性材料上細微磁區分佈的磁力顯微鏡 (magnetic force microscope, MFM) [13]；可提供材料光學資訊的近場光學顯微鏡 (scanning near-field optical microscope, SNOM) [14]；測知材料表面電性的掃描電容式顯微鏡 (scanning capacitance microscope, SCM) [15]；可測知材料表面性質的摩擦力顯微鏡 (friction force microscopy, FFM) [16] 等等儀器，其基本架構和 AFM 相似，主要差異在探針的結構及信號感測系統不同，這些技術和 STM 被統稱為掃描探針顯微術。

AFM 為現階段研究奈米微機電科技領域的一極為重要的研究工具，其特殊的操作原理與良好的生物影像掃描功能[17]，使研究人員對奈米尺度的生物現象與科技研究能有深入的探討與了解。各種 SPM 技術的陸續誕生與進展，給予人類前所未有的能力，從最小、最基礎的層級去探討、瞭解自然界及材料相關領域的很多現象及問題。1990 年後，由於電腦運算與控制技術的進步，AFM 不只侷限於表面量測，更發展出其他如高速即時動態掃描成像[18]、表面奈米粒子操控[19]、表面奈米結構元件製作等功能。在 21 世紀，SPM 技術將還會有更長足的進步，它的應用也會更普及到各種不同的領域，甚至在不同的操作環境中，以奈米尺度直接觀察動態過程的演變細節，並作極精密的操控。SPM 對人類科學與技術的發展，有極重大的貢獻，未來甚至 SPM 有可能如光學顯微鏡，成為每一實驗室中必備的工具。

1.3 定置樣品式 AFM

從 AFM 發明以來，已有許多不同類型的發展，除了基本量測原理之外，在機構設計也有許多不同的改進。由於探針需要作極精確的三維定位[20]，其關鍵元件三維奈米位移定位器，也發展出許多不同形式設計[21-22]。由於壓電材料具有體積小，定位精準度高之優點，所以各家廠商之三維奈米位移定位器，大多使用壓電材料為驅動元件。傳統 AFM 將樣品放置於三維奈米位移定位器上，移動樣品以供探針掃描。由於三維奈米定位器對於樣品有最大重量、體積的限制，因此樣品若是超過限制的尺寸或重量，本身就需要做切割等處理，實屬不便。如果今天我們欲掃描的樣品重量輕且薄（例：矽晶圓切片，重量約 1 克），那麼我們可以選用掃描樣品式 AFM，將樣品置於掃描平台上移動，固定感測模組。此種形式的 AFM，廣泛應用於學術研究以及實驗室當中。但是今天業界並不常使用此型式的 AFM，因為對於產業界檢測，其樣品體積通常大且重（例：12 吋晶圓基板，重量約 340 克），並且不允許做破壞性切片。所以定置樣品式 AFM 有其研究發展的必要性。

改良式 AFM 結構設計為樣品定置，探針懸臂撓曲感測模組固定於三維奈米位移定位器上[23-24]。如此一來，樣品本身尺寸、重量即可不受奈米位移定位器限制，可免於切割破壞樣品。然而光學偵測模組，包含了雷射光源（laser diode, LD）、位移偵測裝置（position sensitive detector, PSD）、對正機構等，還需設計加工件予以組裝。對於掃描平台來說，往往無法支撐整體重量。

再者，一般量測探針微懸臂撓曲最常使用的方法為雷射光路追蹤，在此種追蹤設計當中，定置 LD 發射雷射光點投射至微懸臂上方，再由 PSD 讀取反射光路變化，藉此得到探針微懸臂撓曲變化。如果 PSD 在掃描工作時，讀取到變化訊號，但是微懸臂本身其實並沒有撓曲形變，此種情況稱之偽撓曲或是追蹤誤差。由於追蹤誤差會限制 AFM 的解析度，並且造成掃描影像誤差，因此為了解決此種問題，提出一維雷射光路追蹤方法，使 PSD 與探針同步移動[25]，如此一來，追蹤誤差可降至幾乎為零。

在此種系統設計當中，最初僅應用於水平方向而非垂直方向，也就是說追蹤功能是

為了管狀壓電掃描平台而設計，而不適用於彈性平面壓電掃描平台使用。由於彈性平面壓電掃描平台，在平面上有較佳的準確度，因此提出利用鏡面追蹤方式的三維追蹤系統 [26]。在此種系統設計裡，當探針進行掃描時，LD 與探針上的雷射光反射點之間的工作距離，是不斷改變的。這意謂著投射在探針微懸臂上的雷射光點如果未準確聚焦於其上，其亮度訊號本身就會改變。在此種狀況下，PSD 也會偵測到微懸臂本身形狀的彎曲造成的訊號變化，這對偵測位置變化來說是個相當不利的影響。因此，為了克服此種情形，使用了特別形狀的探針，其具有大面積鏡面反射，可避免雷射光點未能準確打在懸臂上的問題。但是，若使用此種形式探針，則限制住影像尺寸，並且在掃描的時候，PSD 與此型式探針之間的距離無法固定，如此一來，PSD 的訊號變化與探針的形變訊號無法被保證。

所以，定置樣品式 AFM 此種設計技術關鍵在於，探針懸臂撓曲感測模組本身重量要輕，感測系統要精準，如此一來方可將其固定於三維奈米位移平台上 [27-28]，在本論文中設計以光碟機讀取頭 (pick up head, PUH) 作為感測模組，利用 PUH 作為探針懸臂撓曲感測模組除了有輕巧優點外，其所使用的雷射光感測原理可使追蹤誤差幾乎為零。

1.4 論文架構

在第二章中，我們介紹 AFM 運作原理，以及在實驗中所使用的慣性馬達其致動的原理。而在第三章中，則說明了定置樣品式 AFM，系統設計理念及硬體架構。包含了機構設計，以及實驗操作方法。第四章則為實驗結果，硬體架設完成後，我們掃描已知樣品以驗證其可行性，定置樣品式 AFM 特性與實驗數據及樣品掃描結果，皆於此章中表述。最後，第五章總結實驗設計及實驗結果，並且規劃未來研究工作方向。

二、預備知識

2.1 AFM 基本原理

原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 之量測原理如圖 2.1.1 所示，當微懸臂探針靠近樣品表面時，探針末端原子與樣品表面原子產生交互作用力，此交互作用力造成探針撓曲或是運動特性改變，再以一感測模組量測探針微懸臂受作用力所造成的訊號變化，將偵測所得訊號經處理後，輸入回饋系統維持探針與樣品間等作用力，進而獲得樣品表面資訊[29]。

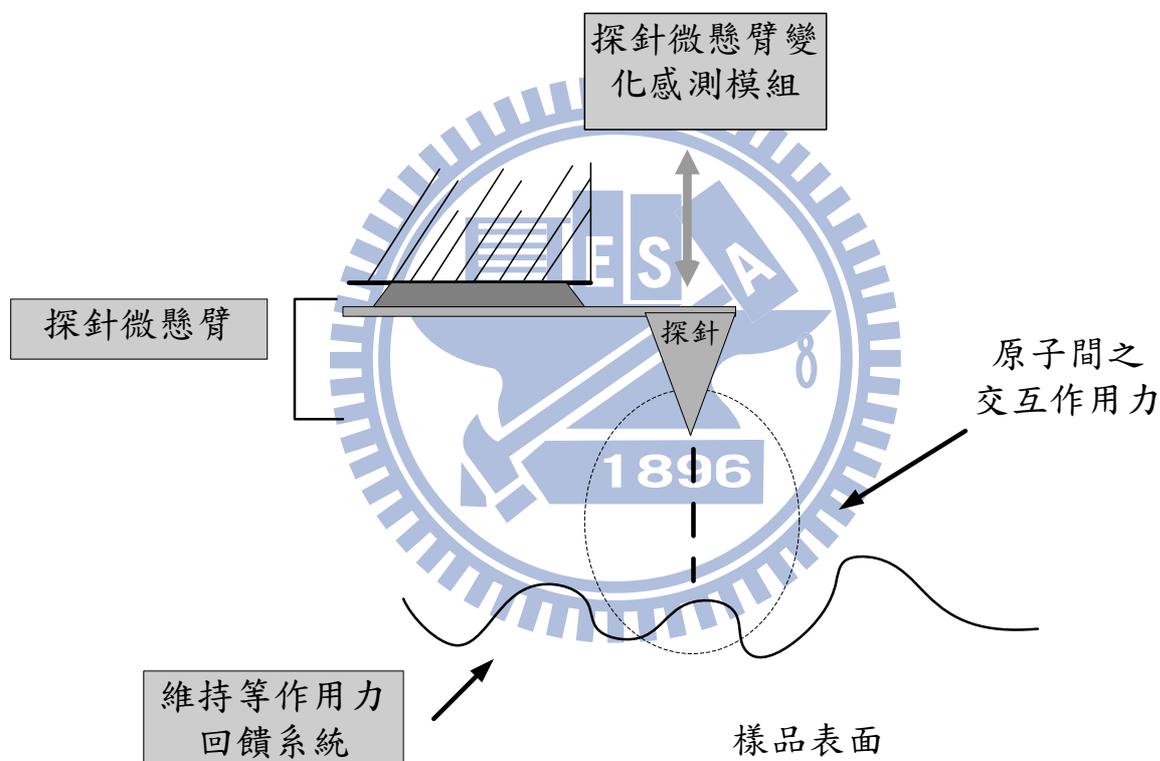


圖 2.1.1 AFM 原理示意圖

以下分三部份描述其原理細節，包含：

探針與樣品間作用力感測，

探針懸臂形變感測，

與電子控制系統。

2.1.1. 探針與樣品間作用力感測

在 AFM 系統中，使用微懸臂（cantilever）來感測原子之間力的變化量。微懸臂有一定的規格，例如：長度、寬度、彈力係數以及尖端形狀，一般懸臂的彈性係數約為 0.1–1 N/m，而這些規格的選擇是依照樣品特性，以及操作模式的不同，就會有不同探針的選擇。探針末端原子與樣品表面原子間所產生的交互作用力，會隨著距離遠近、探針特性不同以及樣品表面性質差異等因素而有所變化。一般可將作用力分為短程力與長程力。短程力牽涉的原子數較少，作用範圍小；長程力作用距離較遠，所以牽涉到的原子數也較多。

一般而言，長程力主要來源為凡得瓦爾力，在真實的量測環境下，還可能因材料特性或電荷累積而受到靜電力、靜磁力等作用力，甚至在濕度高的環境下，還可能產生有虹吸力。因此，為了簡化表示探針與表面原子間的作用力，暫不考慮凡得瓦爾力以外的作用力。

圖 2.1.2 為典型針尖原子與樣品表面原子間的距離-作用力關係示意圖。當探針由遠處接近樣品表面的過程中，彼此間受到吸引力（長程力）的作用，隨著距離的接近，吸引力逐漸增加，但當距離更加接近時，此吸引力會變小，排斥力（短程力）隨著距離減少而急速上升，此時探針已接觸到樣品表面，因此交互作用力轉變成斥力[30]。

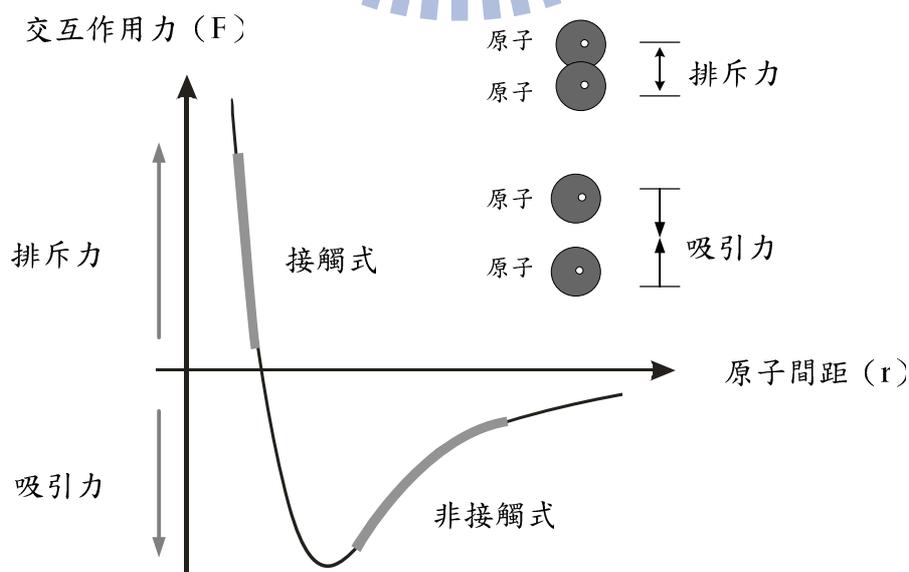


圖 2.1.2 兩原子間的距離與交互作用力的關係示意圖

圖 2.1.3 示意，依作用力範圍的不同，可大致將 AFM 操作模式分成三類基本操作 [31-32]：

接觸式：利用樣品與針尖原子間短程斥力變化，量測表面形貌，兩者之間距離約為數個 Å。

非接觸式：利用樣品與針尖原子間長程吸引力變化量測表面形貌，兩者之間距離約為數十到數百個 Å。

半接觸式：輸入一交流訊號，使懸臂上下擺動輕敲樣品表面，再藉由運動振幅特性改變以量測表面形貌。

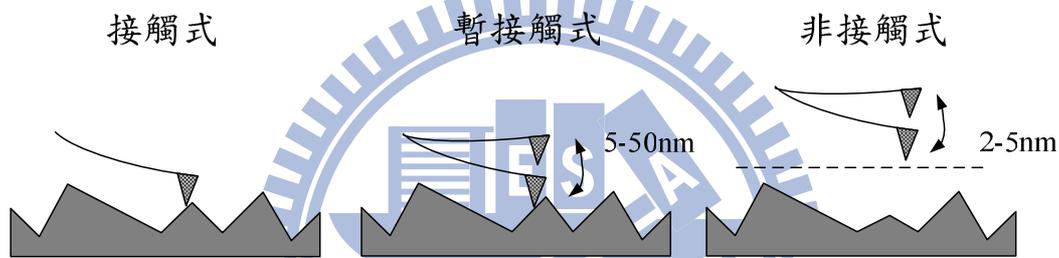


圖 2.1.3 AFM 操作模式分類

2.1.2. 探針懸臂形變感測

在 AFM 的系統中，當探針尖端與樣品表面之間有了交互作用力之後，會使得微懸臂變形。探針懸臂受作用力所造成的訊號變化，其偵測方式大致可分為光學與非光學兩種。光學偵測普遍有光干涉式、光槓桿式[26, 33]、光散像式；非光學有壓電效應[34]、壓阻效應[35]、電容感測等方式。光槓桿為目前 AFM 最普遍使用的量測方法，而在本論文中則以光像散偵測機制為主。

光槓桿偵測機制，當微懸臂在掃描樣品時，因為針尖原子與樣品之間交互作用，導致微懸臂擺動，其擺動的方向可大至分為二個方向，一是垂直方向，另一是水平方向。利用雷射光及四象限光二極體位移感測器（position sensitive detector, PSD）即可同時偵測出懸臂垂直方向與水平方向的角度偏折變化量。它有能感測到次原子級的距離變化，可以「懸臂偏折量」、「振幅」、及「相位差」或「共振頻率變化」等物理量呈現。

一般來說，PSD 所感測到垂直方向的變動，所呈現出的是樣品表面形態，而在水平方向所感測到的信號，則是因為物質表面上的材料特性的不同，其摩擦係數也相對不同，所以在掃描的過程中，導致微懸臂左右擺動的程度不同，藉由擺動程度的不同來將樣品的材料特性給呈現出來。

圖 2.1.4 為光槓桿方式原理示意圖。光槓桿方式主要技術特徵，係利用一雷射光源，透過聚焦透鏡，將雷射光聚焦於懸臂針尖背面處，再由該背面（通常鍍有一層反射材料）將雷射光反射至 PSD 光位移感測器。

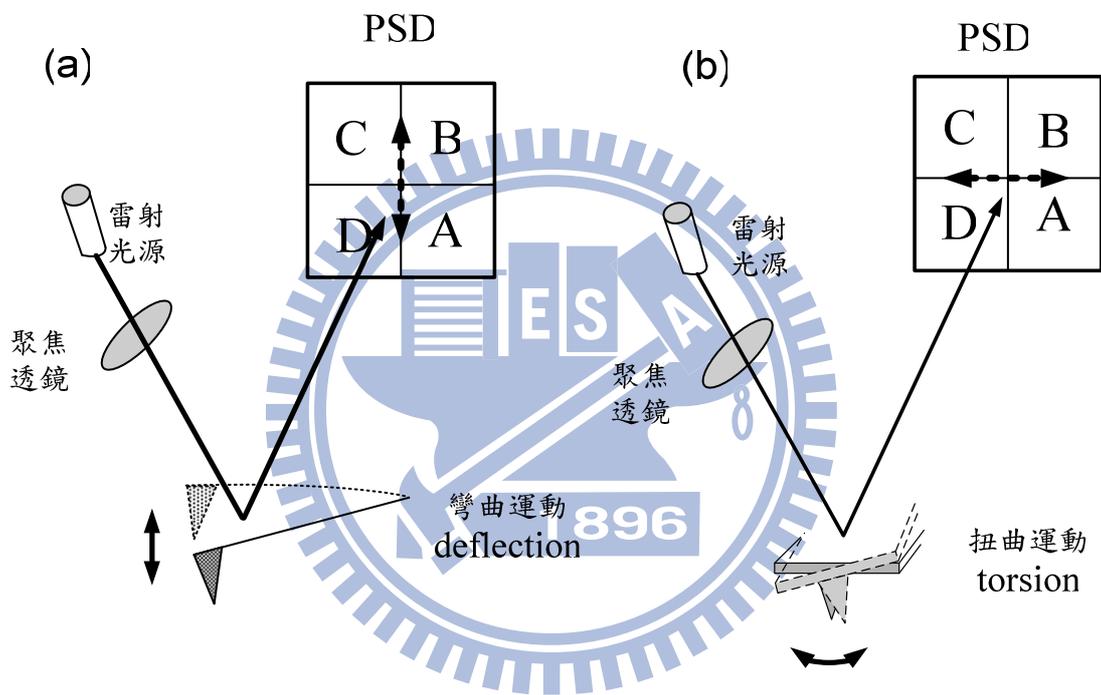


圖 2.1.4 光槓桿式 PSD 偵測示意圖

當探針懸臂受到垂直方向作用力影響，懸臂產生垂直方向偏移量，造成雷射光點在垂直方向上變動，如圖 2.1.4 (a) 所示，其 PSD 訊號處理如下列公式

$$\Delta I_{\text{vertical}} = (I_B + I_C) - (I_A + I_D)$$

其中 I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D 為 PSD 上 A、B、C、D 四象限光電流訊號

若是探針懸臂受到側向力作用，懸臂產生水平方向偏折位移量[36]，因而造成雷射光點在水平方向上變動，如圖 2.1.4 (b) 所示，其 PSD 訊號處理如下列公式

$$\Delta I_{\text{horizontal}} = (I_A + I_B) - (I_C + I_D)$$

除了傳統的光槓桿偵測機制外，光像散機制近年來也被用在 AFM 微懸臂形變的偵測。圖 2.1.5 為光像散式偵測機制原理示意圖。光像散偵測機制主要技術特徵係利用一雷射光、光像散元件及一 PSD，即可偵測出懸臂的撓曲。在本論文中，此光路量測系統乃是採用目前以大量生產之 CD/DVD 讀寫頭，利用一雷射光源透過聚焦透鏡，將雷射光聚焦於懸臂針尖背面處，再由該背面將雷射光反射至 PSD 光位移感測器中心位置 [37-38]。

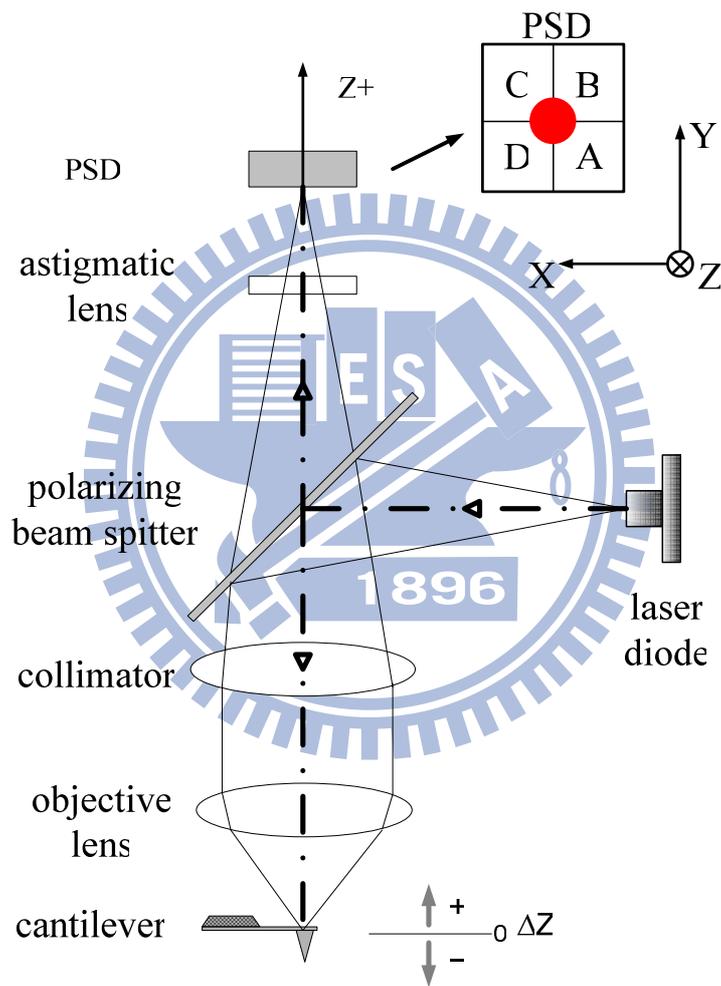


圖 2.1.5 光像散式偵測示意圖

當雷射光恰好聚焦於探針懸臂背面時，此時反射於光偵測器 PSD 上形狀為正圓形。一旦微懸臂發生形變，造成聚焦面過高或過低時，經過像散元件之後的光點形狀便會發生變化，其形狀將變為拉長之橢圓。

如圖 2.1.6 所示，當探針懸臂產生垂直方向之偏折形變，此時因為聚焦面的差異造成雷射光點的改變，其所量測到的訊號變化稱為聚焦誤差訊號 (focus error signal, S_{FE})

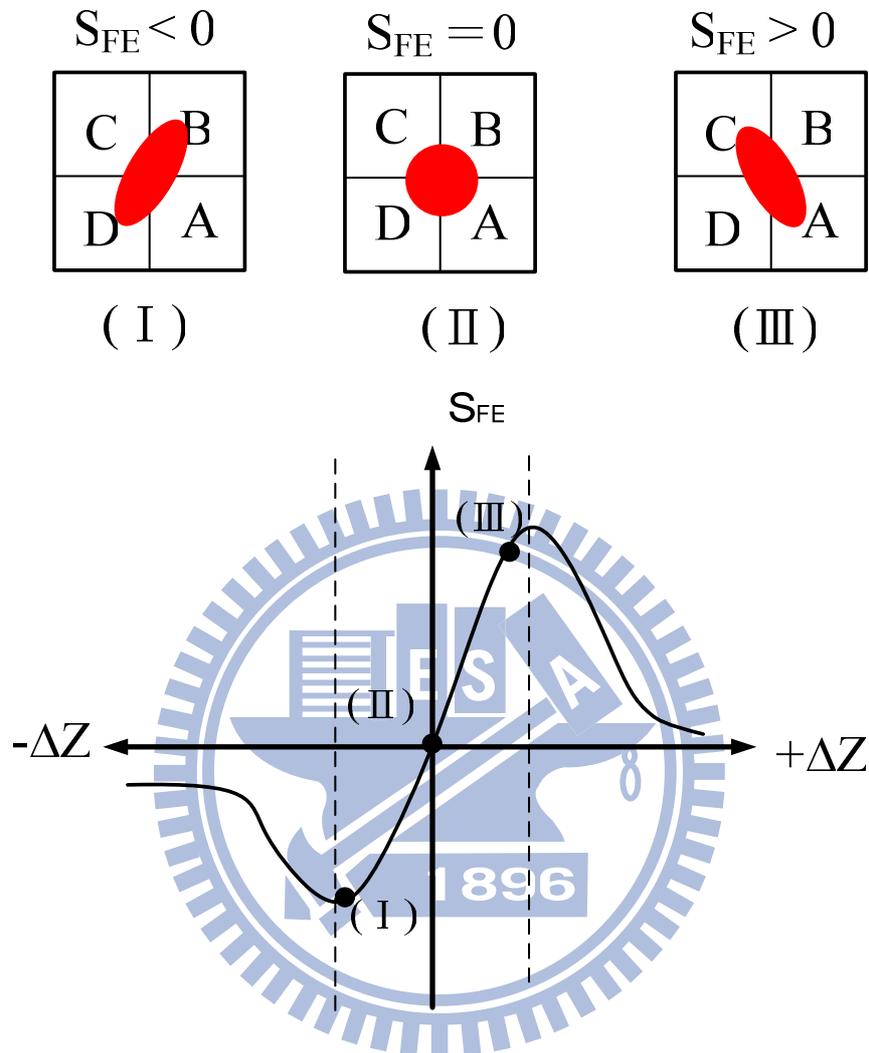


圖 2.1.6 光像散式聚焦誤差訊號圖 S-curve

其 PSD 訊號處理如下列公式

$$S_{FE} = (S_A + S_C) - (S_B + S_D)$$

其中， S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 分別表示 PSD 四象限的光電流放大訊號。

此聚焦誤差訊號與離焦距離的關係為一典型的 S 曲線，如圖 2.1.6 所示，其中間某一區段為線性變化區，可利用此線性區作為高度或垂直距離的量測。

2.1.3. 電子系統

如圖 2.1.7 所示，在 AFM 系統中，懸臂撓曲形變經由感測模組量測之後，將訊號輸

入至回饋控制系統，在回饋系統中會將此信號當作回饋信號，作為內部的調整，這會趨使三維位移掃描平台做適當的移動，以達成系統的設定[39]。

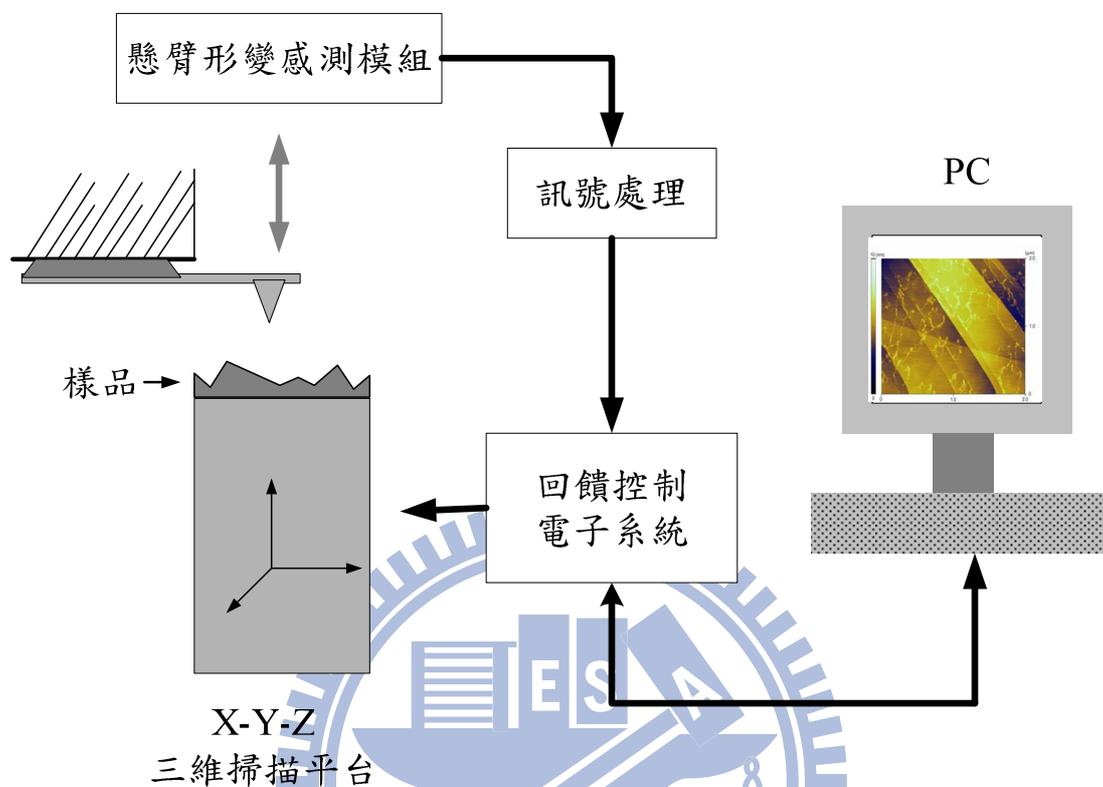


圖 2.1.7 回饋系統操作示意圖

在回饋系統中，三維位移掃描平台是其中最為重要的元件，其解析度與全行程決定了掃描圖樣清晰度與大小。因此其控制致精準度需要相當高，傳統的致動器無法符合需求，因此一般奈米定位器的致動器常使用壓電式致動器 (piezoelectric actuator)，壓電式致動器具有下列優點：體積小、精度高、反應速率快、機電轉換效率高、位移解析度高、熱膨脹補償很小、產生推力大、不會產生電磁訊號干擾。

2.2 AFM 操作模式

AFM 操作在原子間作用力不同的區段上，可將操作模式大致分成以下三類：

(一) 接觸式：

接觸式 AFM 是將探針「直接接觸」樣品表面，利用針尖原子與樣品原子之間的斥力作用，呈現樣品表面形貌影像，而表面影像的呈現乃是利用 PSD 偵測微懸臂的偏折量所推算出來的。

由於探針與樣品相當接近，所以可以有很高的空間解析度。但也因為探針極接近樣品表面，在掃描過程中，探針與樣品表面間會有很強的側向力，對於樣品表面非常容易造成傷害，甚至影響探針的壽命與特性，所以此模式適用於較軟之探針（彈力常數 $\sim 0.1\text{N/m}$ ）

（二）暫接觸式：

又稱作輕敲模式，或是半接觸式，其特點是 AFM 是利用壓電致動器將探針懸臂持續振動於其共振頻率附近之一固定頻率，並產生一固定振幅，探針懸臂共振所需的持續振動源，由振盪器（訊號產生器）驅動壓電致動器提供。根據圖 2.2.1 所示，訊號產生器的交流訊號輸入鎖相放大器作為參考端，而代表探針懸臂偏折的電壓訊號，也同時進入鎖相放大器的輸入端，則鎖相放大器可以產生兩項重要的輸出訊號：一是探針懸臂的振動振幅，二是探針懸臂振動相對於驅動訊號的相位差。

這兩種訊號提供了充足的資訊來代表探針懸臂的動態特性，探針樣品間微小的作用力變化都可以藉此靈敏地被感測出來。

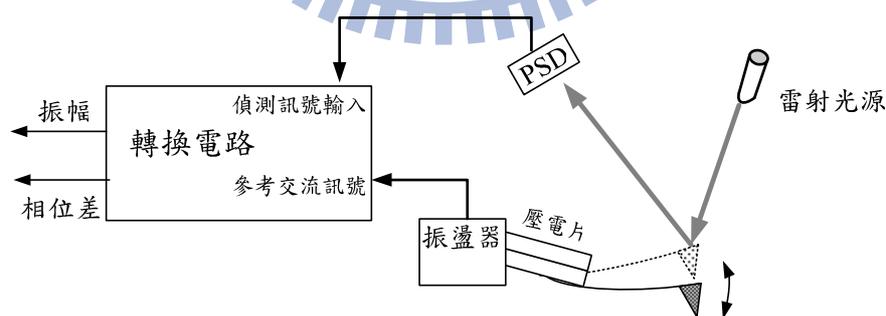


圖 2.2.1 暫接觸式或輕敲模式示意圖

在使用該模式時，探針以很高的振動頻率(約 200—400 kHz)及上下快速擺動的方式(振幅為數 nm 至 50 nm)，與樣品表面做瞬間的接觸，這個接觸讓探針尖與表面原子間發生了原子之間的作用力，即探針尖穿過凡得瓦吸力區並進入斥力區，因而改變了探針原

有的共振頻率、振幅及相位，而這個改變量即隱藏了樣品表面的物理特徵，如凹凸的形貌，或者是軟硬的程度。

圖 2.2.2 所示為品質因子 (quality factor, Q factor) 示意圖，品質因子為一無因次參數，常用於物理與工程上形容震盪、共振等關係，其特別用來形容共振帶頻寬與其共振頻率的關係。因此在暫接觸模式的 AFM 中，以品質因子為參數來調控 AFM 探針[40]。

其定義 $Q = f_0 / \Delta f$

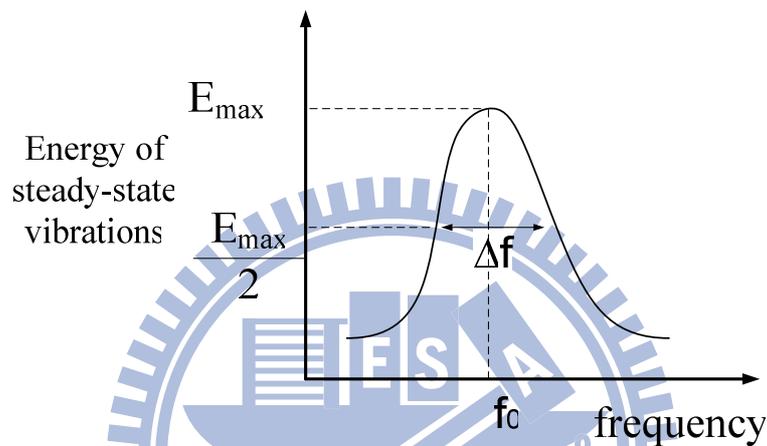


圖 2.2.2 品質因子示意圖

懸臂的共振頻率由懸臂的三維尺寸、形狀及材料所決定，AFM 在取影像之前，應先掃頻以尋找共振頻率，及振幅與頻率的關係。

驅動訊號在共振頻率 f_0 時，振幅達到最大值 A_0 ，AFM 的工作頻率常選在些微偏離共振頻率，其頻率為 f_D 。當探針遠離樣品(即無交互作用力)時，振幅為 A' ，但當探針因接近表面而感受到吸引力時，由圖 2.2.3 頻率-振幅關係圖可以看出共振頻率受吸引力影響而變小為 f_0' ，而在工作頻率 f_D 的振幅也變小為 A'' 。在掃描過程中，以此振幅大小改變作為回饋電路輸入訊號，使探針懸臂振動振幅保持一設定值，藉此量測樣品表面形貌，所以此模式也稱為振幅調制模式[41]。

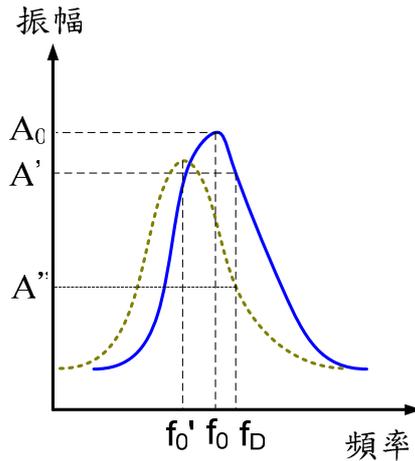


圖 2.2.3 探針之頻率-振幅關係圖

上述接觸式與暫接觸式，以 PSD 所偵測到的偏折量來呈現樣品的表面形態又可延伸出兩種操作方式：

(1) 定力模式：在此模式中，微懸臂的偏移量被當作回饋訊號，此信號使三維位移掃描平台在 z 軸上下移動來保持原來的一設定值，同時也利用位移掃描平台的移動量將樣品的表面形態給呈現出來，此方法可適用於表面起伏大的樣品，但缺點為掃描速度慢，所需掃描時間較久。

(2) 定高模式：在此模式中，系統關閉回饋機制，以微懸臂本身在掃描過程中所造成的偏移量，來呈現整個樣品的表面形態。而掃描過程中，位移掃描平台保持在一定的高度，其解析度較定力模式高，但其缺點為僅適用於較平坦樣品。

(三) 非接觸模式

在此模式下探針與樣品表面並不接觸，利用分子間微弱的凡得瓦爾力造成微懸臂上的振動頻率改變並將其轉換成力梯度 (force gradient)，當探針愈接近樣品表面時，其所受的力梯度則愈大，此時懸臂的共振頻率值將變得愈小，故回饋系統可藉由此關係將參考共振頻率 f_0 與偵測得的懸臂擺動頻率 f 做比較而得到表面形貌的影像，所以此方式亦稱為頻率調制模式。在實際操作上，探針不能距離樣品表面太遠，且探針的振幅也不能太大，否則會有敲到樣品的危險；再加上由於作用力較接觸式小，故掃描速度需較慢，操作起來要比較小心。在頻率調制模式下，探針懸臂的頻率改變與作用力梯度成正比，因此在真空中，由於探針懸臂的品質因子極大，所以會有很高的力靈敏度。

2.3 慣性馬達致動原理

在本論文中使用了由壓電材料設計之慣性馬達步進裝置，用以調整探針使其位於 S-curve 線性工作區。

圖 2.3.1 所示為使用壓電材料作為致動裝置，慣性馬達步進原理示意圖。連續步進器之設計主要以鋸齒波形之電壓驅動，在狀態 1 至狀態 2 過程中，壓電材料通以斜率較緩之電壓，使定子與動子同時緩慢伸長移動一距離。接下來狀態 2 至狀態 3，通以斜率陡峭許多的電壓，如此一來定子快速縮回原處，而動子由於本身質量造成的慣性力，並不隨定子縮回原處，保持於壓電材料伸長時的位置。如此週而復始，慣性馬達即可步進至我們所需要的位置。

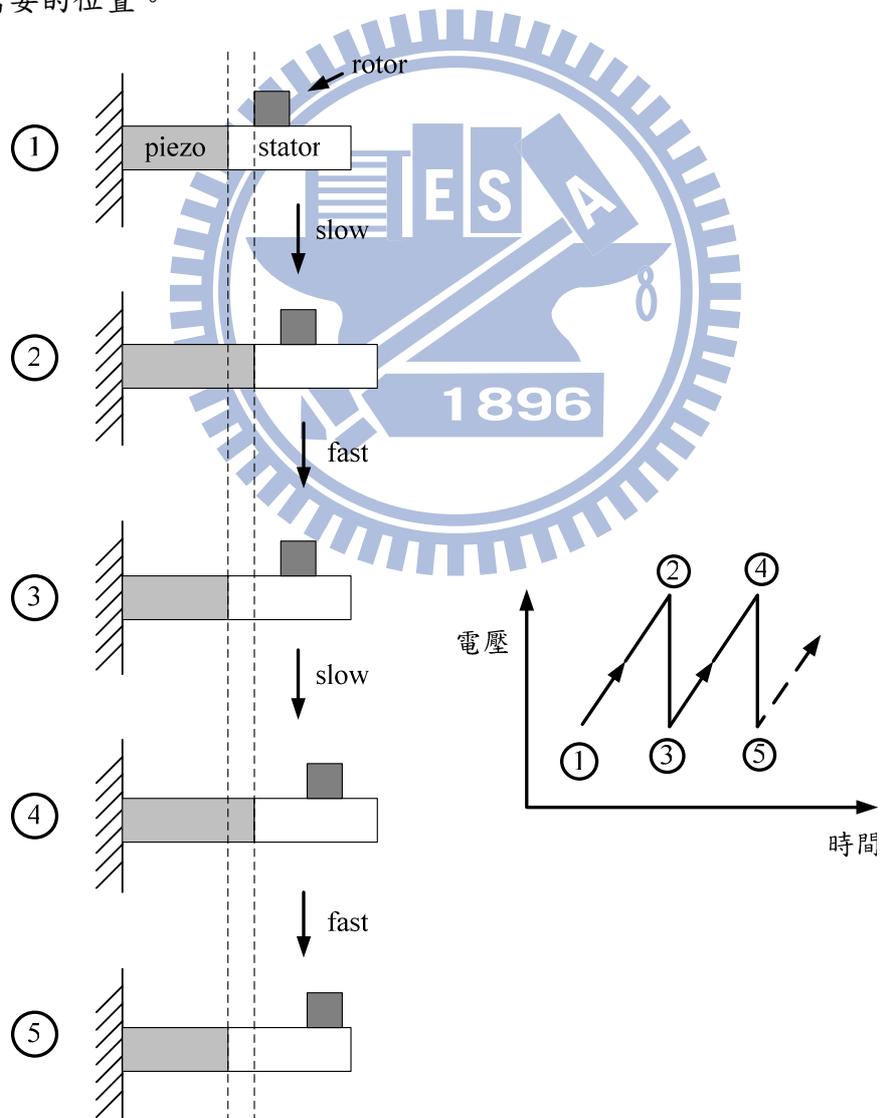


圖 2.3.1 慣性馬達位移原理圖

三、系統設計

3.1 硬體系統設計

3.1.1. 傳統 AFM 系統架構

圖 3.1.1 所示為傳統 AFM 掃描樣品示意圖。傳統 AFM 如交大貴儀中心所購買之 AFM (接觸式)，樣品置放於三維奈米掃描載台之上，如圖中可看出，樣品尺寸不可大於載台面積範圍。根據儀器規格所示，試片不得超過 10mm(長)×10mm(寬)×2.5 mm(高)，而根據此限制，現今許多欲檢測物件，如半導體晶圓尺寸大約為 12 吋，即無法適用於傳統 AFM。

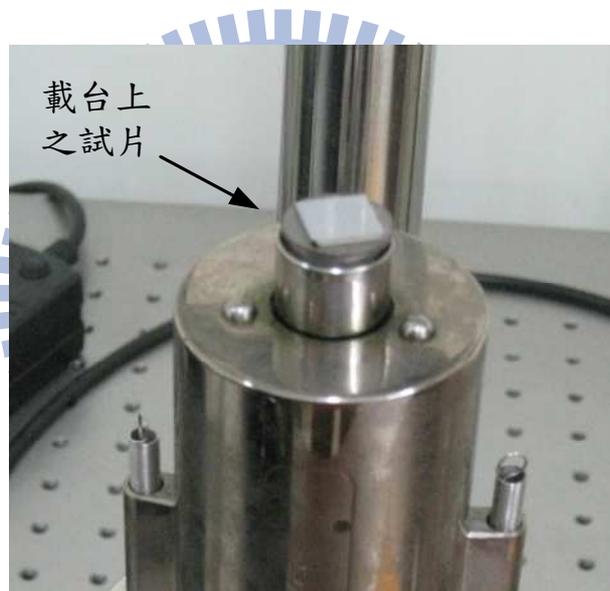


圖 3.1.1 傳統 AFM 試片置於掃描載台圖

圖 3.1.2 所示為探針撓曲感測模組與掃描載台組裝圖。此類型 AFM 的探針懸臂撓曲感測組偵測微懸臂形變方法，為光槓桿式偵測機制。

傳統接觸式 AFM 探針固定於懸臂感測模組上，如圖 3.1.3 所示，因此每次更換探針之後，其校準動作，為利用旋鈕調整反射鏡的方法，將雷射光點準確投射到懸臂背面，並且調整反射雷射光束至 PSD 正中央。

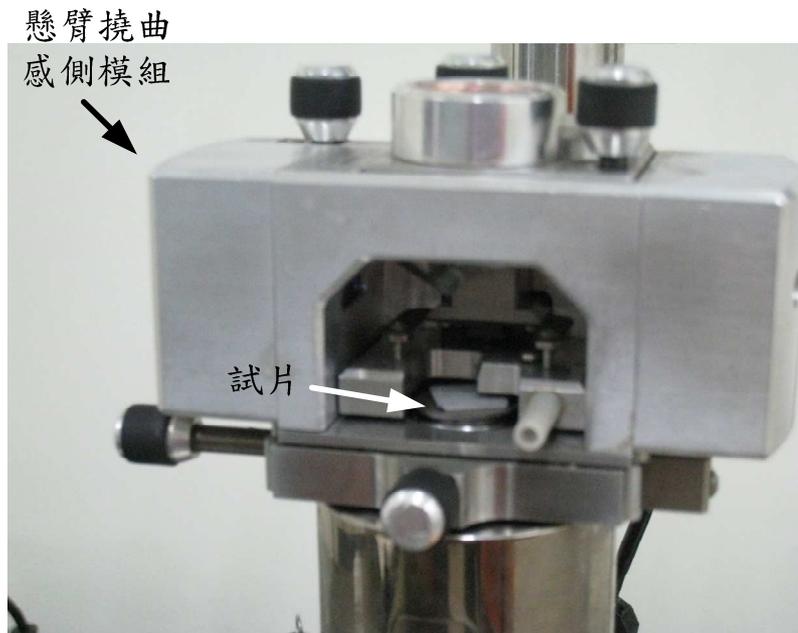


圖 3.1.2 探針撓曲感測模組與掃描載台組裝圖

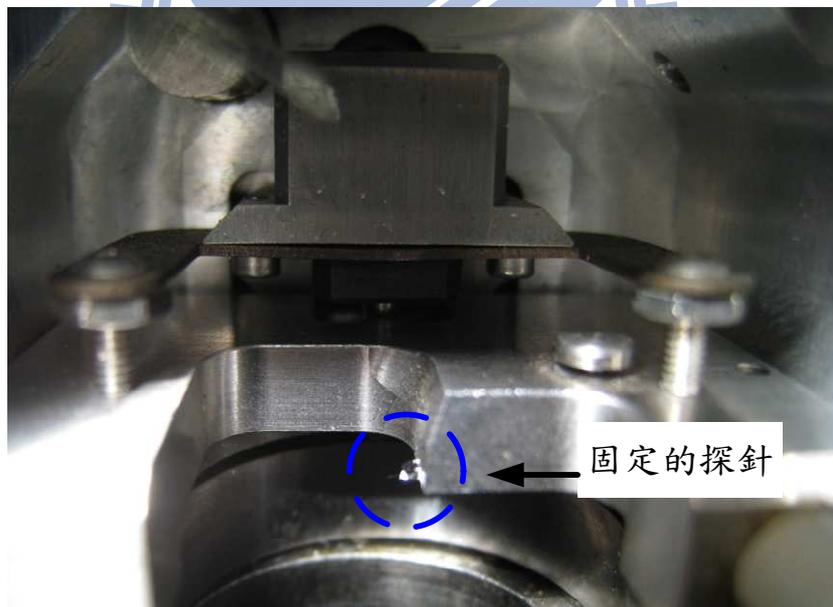


圖 3.1.3 傳統接觸式 AFM 探針置放處

圖 3.1.4 所示為傳統樣品移動式 AFM 工作示意圖。其操作方法如下：將樣品試片置放於三維掃描平台上後，以 Z 軸步進馬達移動掃描平台至其 Z 軸壓電致動器行程範圍內。設定 XY 掃描範圍與掃描模式後，程式輸入控制訊號予高壓放大器，驅動掃描平台移動樣品試片進行掃描，在此同時 PSD 將偵測所得到的懸臂撓曲訊號經由訊號處理電路處理過後回傳至回饋控制器。若為定高掃描模式，則回饋控制器關閉不作用，僅將懸臂撓曲訊號回傳至顯示器成像。若掃描模式為定力模式，則訊號一方面於顯示器上成像，一方面經由回饋控制器將 Z 軸控制訊號輸入高壓放大器做掃描平台的 Z 軸回饋控制。

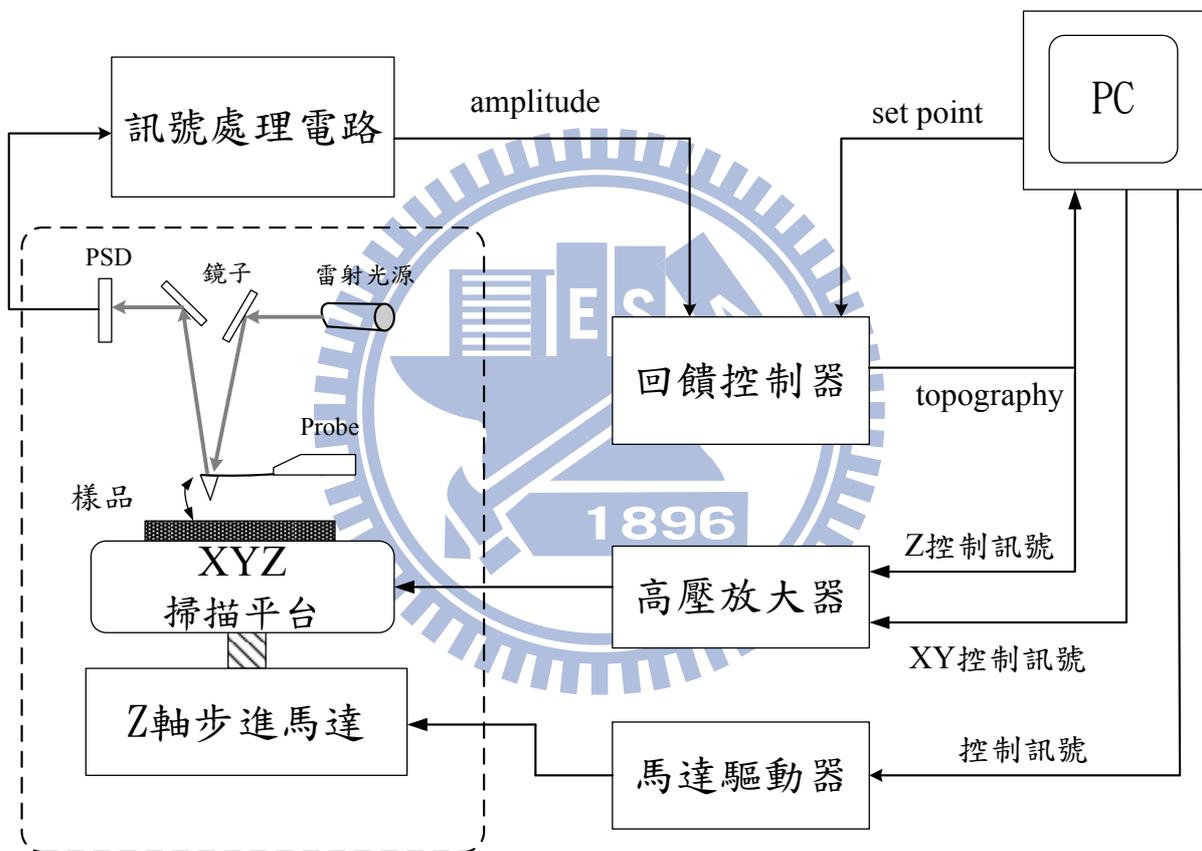


圖 3.1.4 傳統樣品移動式 AFM 工作示意圖

圖 3.1.5 所示為交大貴儀中心掃描探針顯微鏡實體圖。照片所示為圖 3.1.4 中虛線框部份。

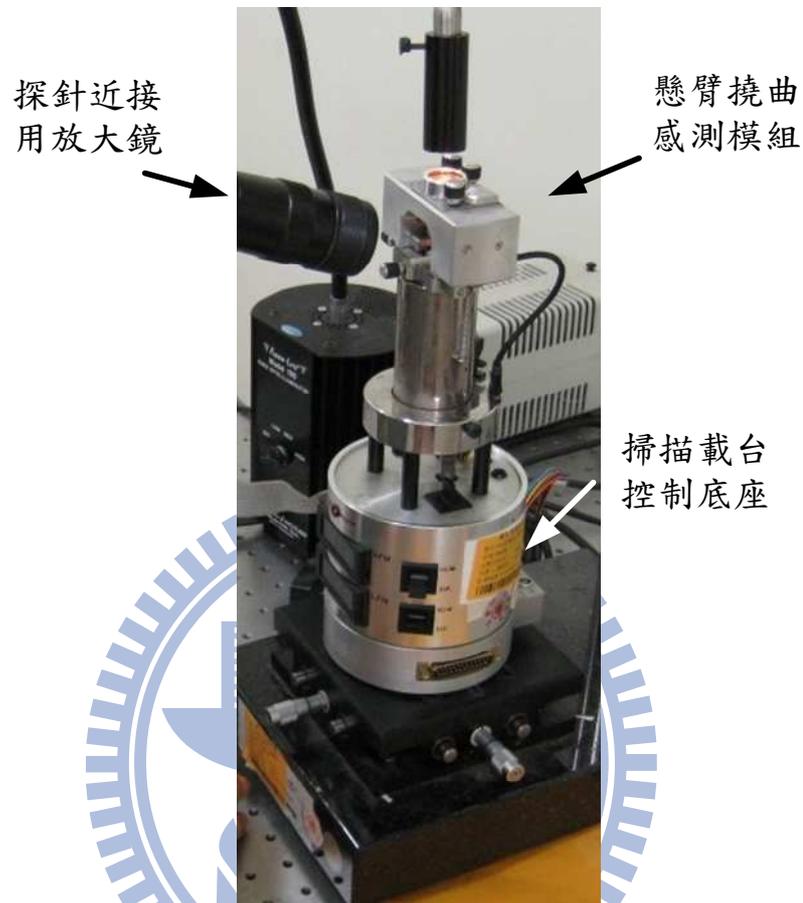


圖 3.1.5 交大貴儀中心掃描探針顯微鏡實體圖

由上述傳統移動樣品式 AFM 工作原理可知，目前待解決方向有以下幾樣：

1. 樣品尺寸、重量遭到限制
2. 懸臂撓曲感測模組體積與重量大於掃描平台所能承受範圍，

3.1.2. 定置樣品式 AFM 設計系統架構

有鑑於上述問題，因此定置樣品式 AFM 設計上架構如圖 3.1.6 所示。其中虛線框部份為掃描樣品主要硬體機構。在本論文中設計與傳統 AFM 不同特點處為，將三維掃描平台與懸臂撓曲感測模組加裝於 XYZ 粗調平台之上，如此一來，樣品尺寸與重量即可不受限制。另外，在本論文中以光碟機讀取頭作為懸臂撓曲感測模組，因此有效的縮小了體積與重量，使其可置放於三維掃描平台上。

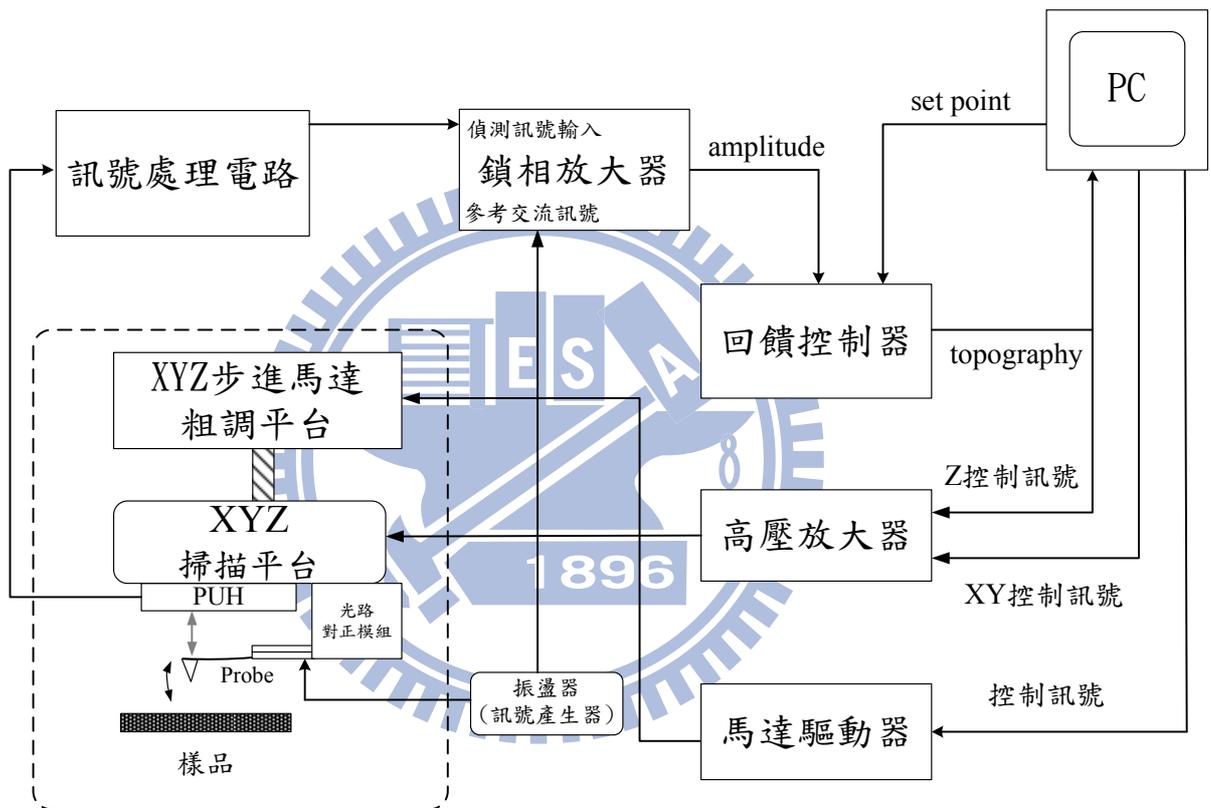


圖 3.1.6 定置樣品式 AFM 掃描設計圖

定置樣品式 AFM 設計操作方法如下：控制 XY 粗調平台移動三維掃描平台至待量測樣品上方，定位後，再以 Z 軸步進馬達移動掃描平台至其 Z 軸壓電致動器行程範圍內。設定 XY 掃描範圍與掃描模式，由程式輸入控制訊號予高壓放大器，驅動掃描平台移動探針與微懸臂感測模組對樣品表面進行掃描，在此同時 PSD 將偵測所得到的微懸臂撓曲訊號經由一連串電路處理過後回傳至回饋控制器。

若為定高掃描模式，則回饋控制器關閉不作用，僅將懸臂撓曲訊號回傳至顯示器成像。若掃描模式為定力模式，則訊號一方面於顯示器上成像，一方面經由回饋控制器將 Z 軸控制訊號輸入高壓放大器做掃描平台的 Z 軸回饋控制。

定置樣本式 AFM 在設計實施上，其中關鍵技術在於如何能縮小探針懸臂撓曲感測模組體積與重量，使其能夠固定於三維掃描平台之上。本論文中使用光像散式偵測機制光碟機讀取頭替代傳統雷射光槓桿式感測模組，在偵測微懸臂形變上，獲得良好的成效，並且有效的縮小體積與重量，使其可固定於三維掃描平台之上。

另外，傳統接觸式 AFM 探針為固定於感測模組上，因此更換探針後，校準方法為調整反射鏡，使雷射光點與反射光點能夠位於正確的位置。而定置樣品式 AFM 探針為可動式，因此每次更換探針之後，本論文實驗設計以一精密致動的裝置，探針光路對正模組，能夠操控探針懸臂至 PUH 雷射光點最佳感測位置。

圖 3.1.7 所示為定置樣品式 AFM 硬體設計架構模型圖。X、Y、Z 軸向粗調平台以微米等級解析度的電動平台架設，而三維掃描平台與探針懸臂撓曲感測模組固定於 Z 軸向電動平台上。附錄 A 為 X、Y、Z 軸向電動平台規格資料，附錄 B 為三維掃描平台規格資料，經過計算，各平台負重量均在容許範圍內。

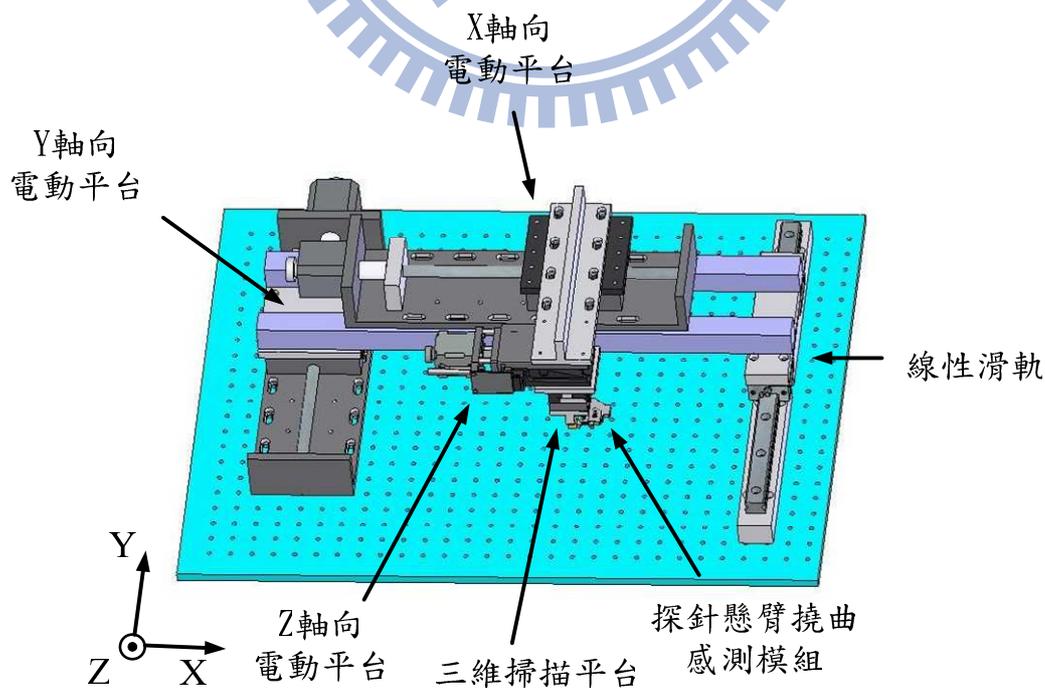


圖 3.1.7 定置樣品式硬體系統架構示意圖

圖 3.1.8 所示為定置樣品式 AFM 硬體設計實體圖。使用鋁擠型做為支撐 X 軸向電動平台支柱，而 Z 軸向電動平台與 X 軸向電動平台組合，則為不鏽鋼加工件，並且特別於鋼板上加一肋板以增加其強度與穩定性。

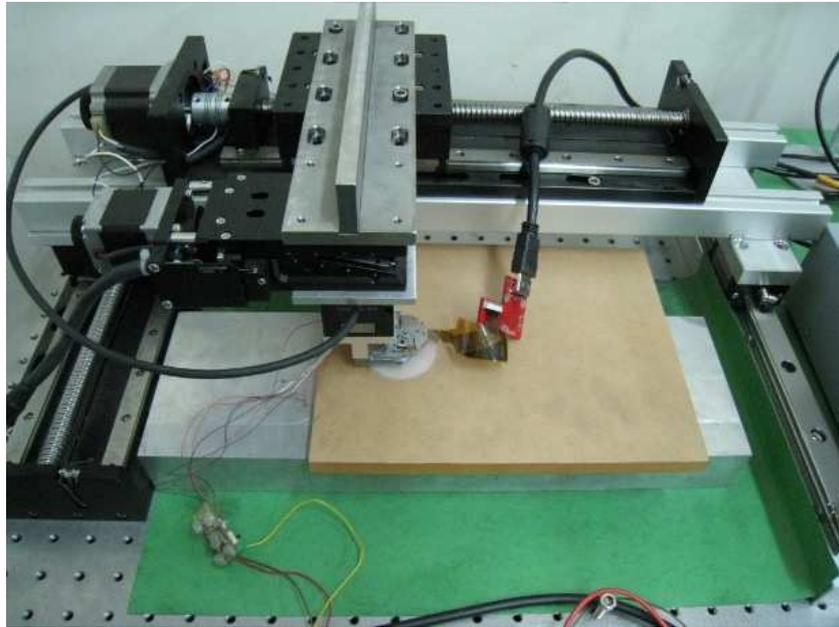


圖 3.1.8 硬體設計實體圖

圖 3.1.9 所示為三維掃描平台與探針懸臂撓曲感測模組組裝圖近照。其中探針光路對正模組先與探針懸臂撓曲感測模組接合後，再以加工金屬件與三維掃描平台組合。

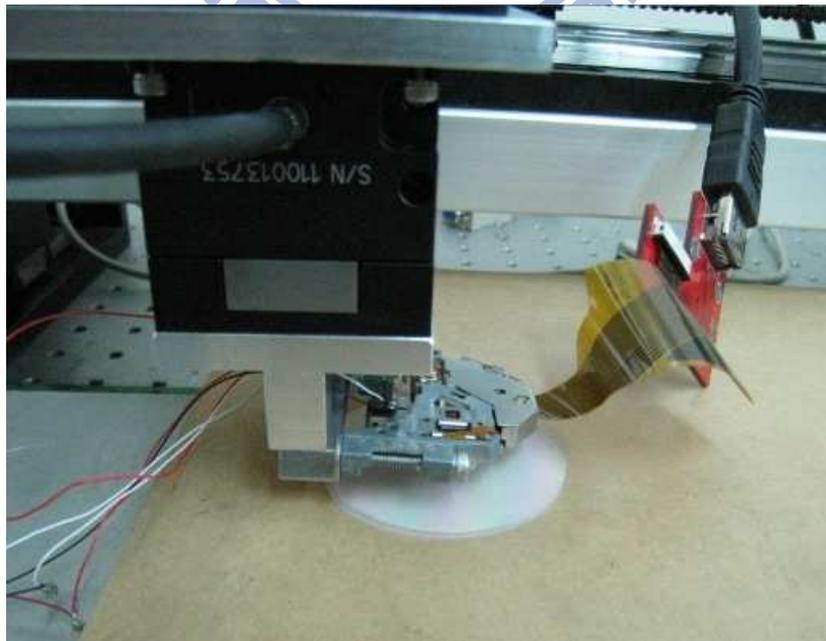


圖 3.1.9 三維掃描平台與探針懸臂撓曲感測模組組裝圖

3.1.3. 探針光路對正模組

上文中提到，為使探針懸臂能夠移至正確位置以反射雷射光點（直徑約 $0.4\mu\text{m}$ ），本論文設計一精密致動裝置，光路對正模組，用以移動探針至最佳感測位置。

光路對正模組以使用壓電材料之慣性馬達構成，如圖 3.1.10 所示，有三自由度方向，二為平移，另一為旋轉，可移動探針於前後左右與上下的方向，用以對正光路，使雷射光點能夠正確投射至探針懸臂背面上。

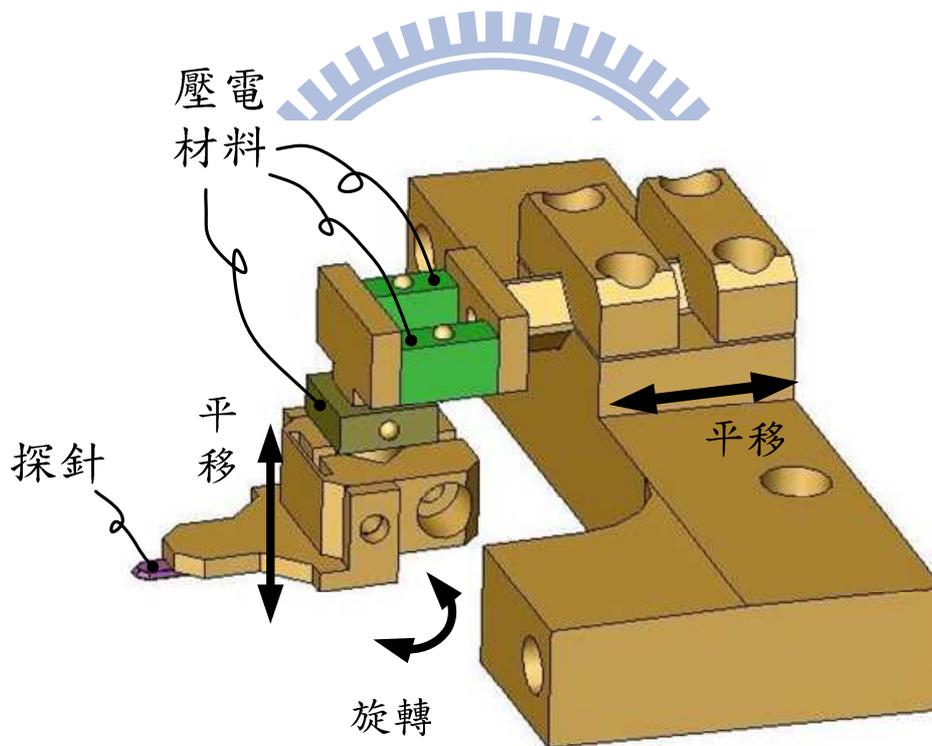


圖 3.1.10 慣性馬達 3D 模型圖

圖 3.1.11 所示為持針頭於 Z 軸上下移動原理示意圖，此方向移動，主要為調整探針反射雷射光點訊號在 Z 軸的高度，此方向決定了探針在 S-curve 線性區域中工作點。

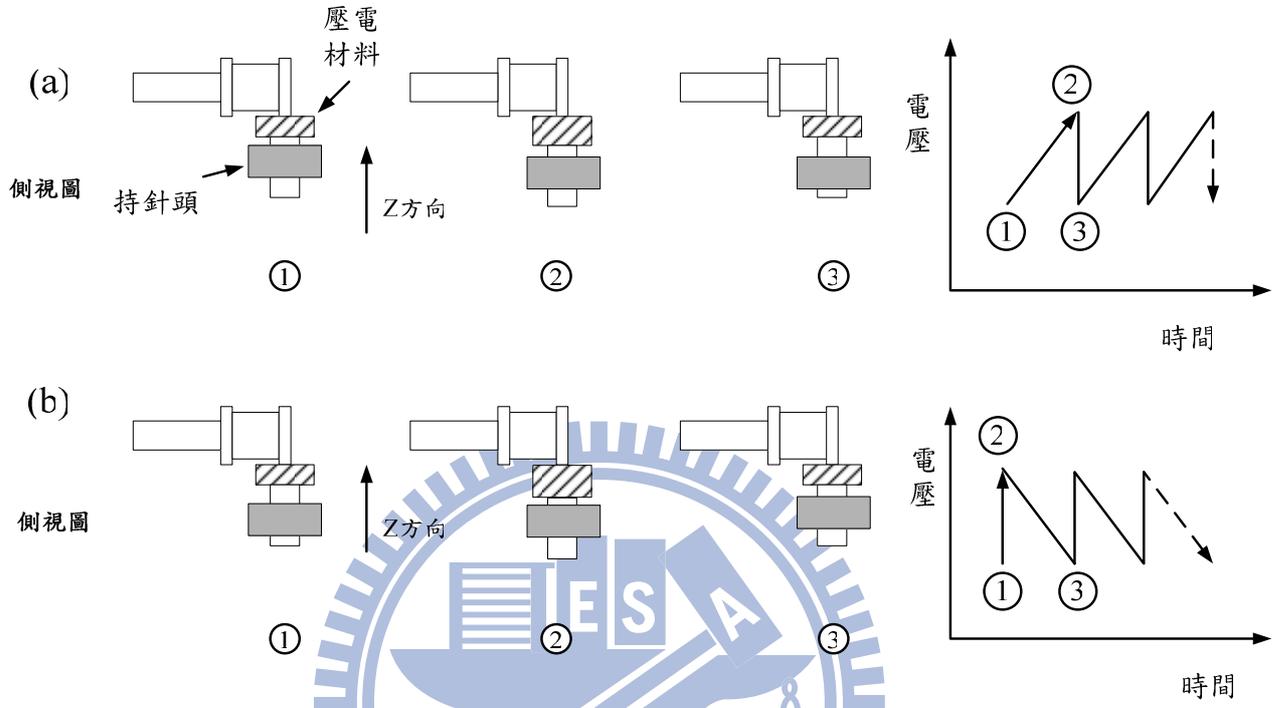


圖 3.1.11 慣性馬達 Z 軸平移示意操作圖

Z 軸平移：圖 3.1.11 (a) 當對壓電材料施加一連續鋸齒波形電壓，驅動其以較緩速率伸長，快速縮短，則持針頭與壓電材料即可向 -Z 行走一微小位移。

反之，如圖 3.1.11 (b) 當對壓電材料施加一連續鋸齒波形電壓使其快速伸長，較緩速率縮短，則持針頭與壓電材料向 +Z 行走一微小位移。

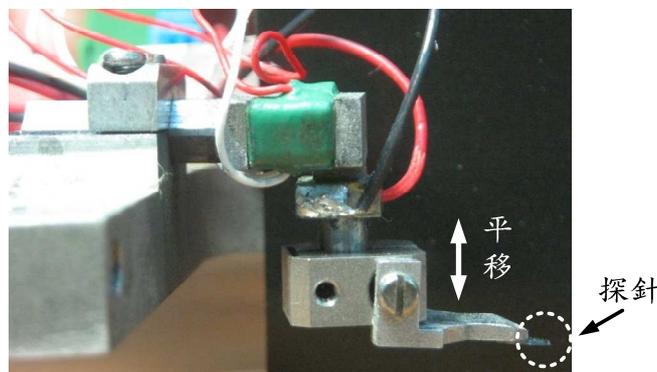


圖 3.1.12 慣性馬達 Z 軸平移實體圖 (側視圖)

圖 3.1.13 所示為持針頭於 X 軸向前後移動原理示意圖，此方向移動，主要為調整雷射光點投射在懸臂位置上時，靠近針尖或是懸臂固定端處。如果雷射光點愈靠近針尖，由於懸臂振動時，針尖振幅為最大，因此訊號會愈來的敏感與清晰。

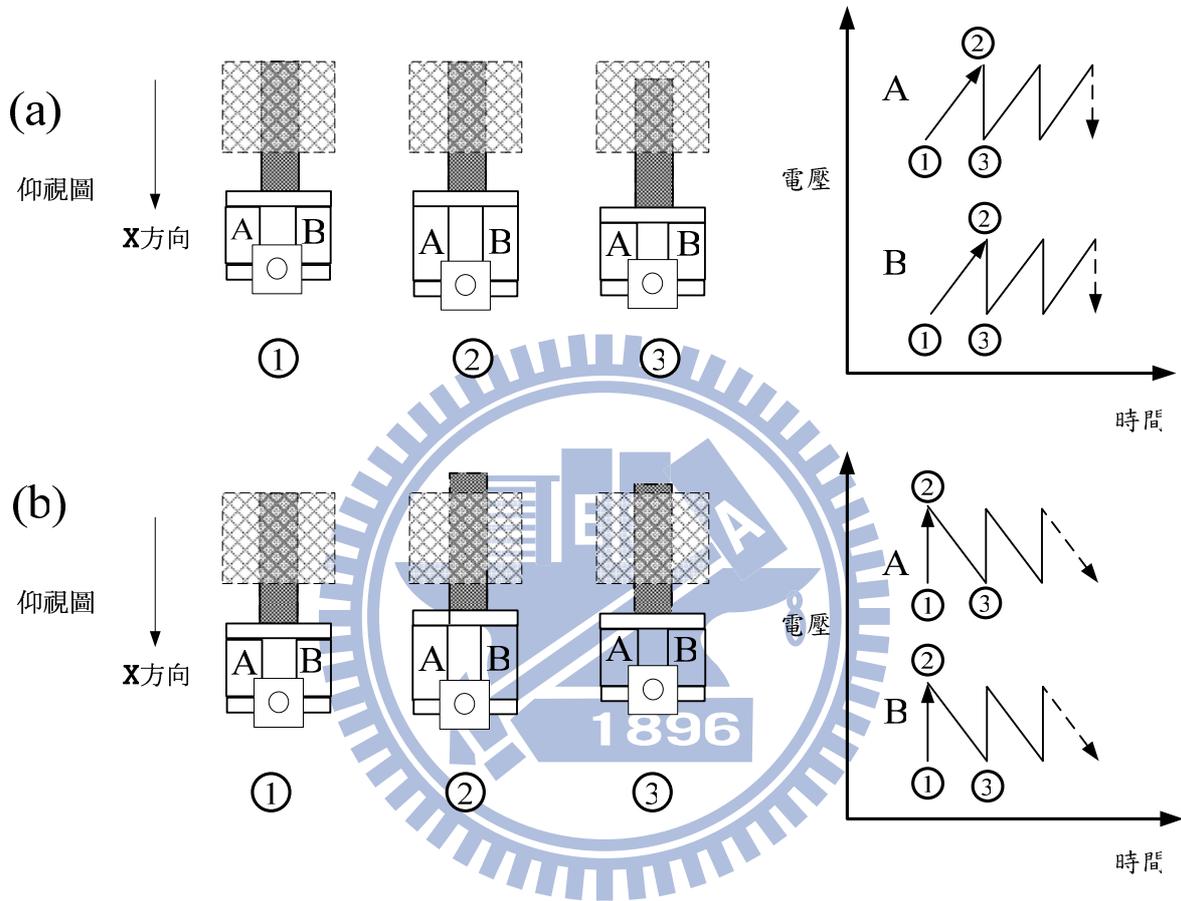


圖 3.1.13 慣性馬達平移示意圖

平移：圖 3.1.13 (a) 當對 A、B 壓電材料同時施加一連續鋸齒波形電壓，驅動 A、B 同時以較緩速率伸長，快速縮短，則持針頭與壓電材料即可向 +X 行走一微小位移。

反之，如圖 3.1.13 (b) 當對 A、B 同時施加一連續鋸齒波形電壓使 A、B 同時快速伸長，較緩速率縮短，則持針頭與壓電材料向 -X 行走一微小位移。

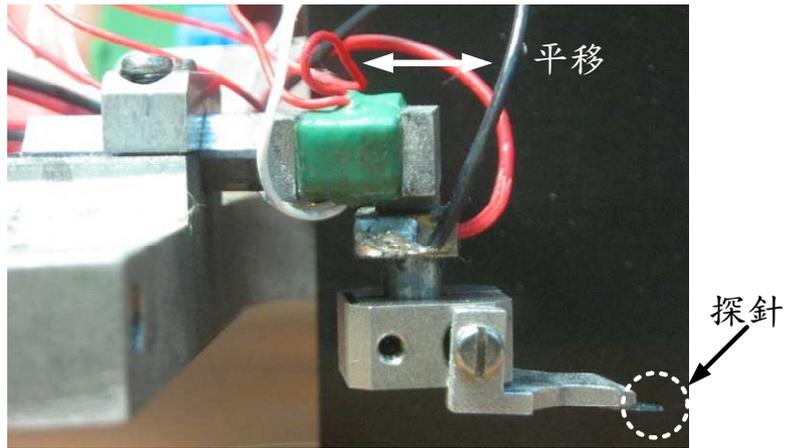


圖 3.1.14 慣性馬達實體圖 (側視圖)

圖 3.1.15 所示為持針頭旋轉原理示意圖，此旋轉方向，決定雷射光點是否投射於懸臂寬的正中央。

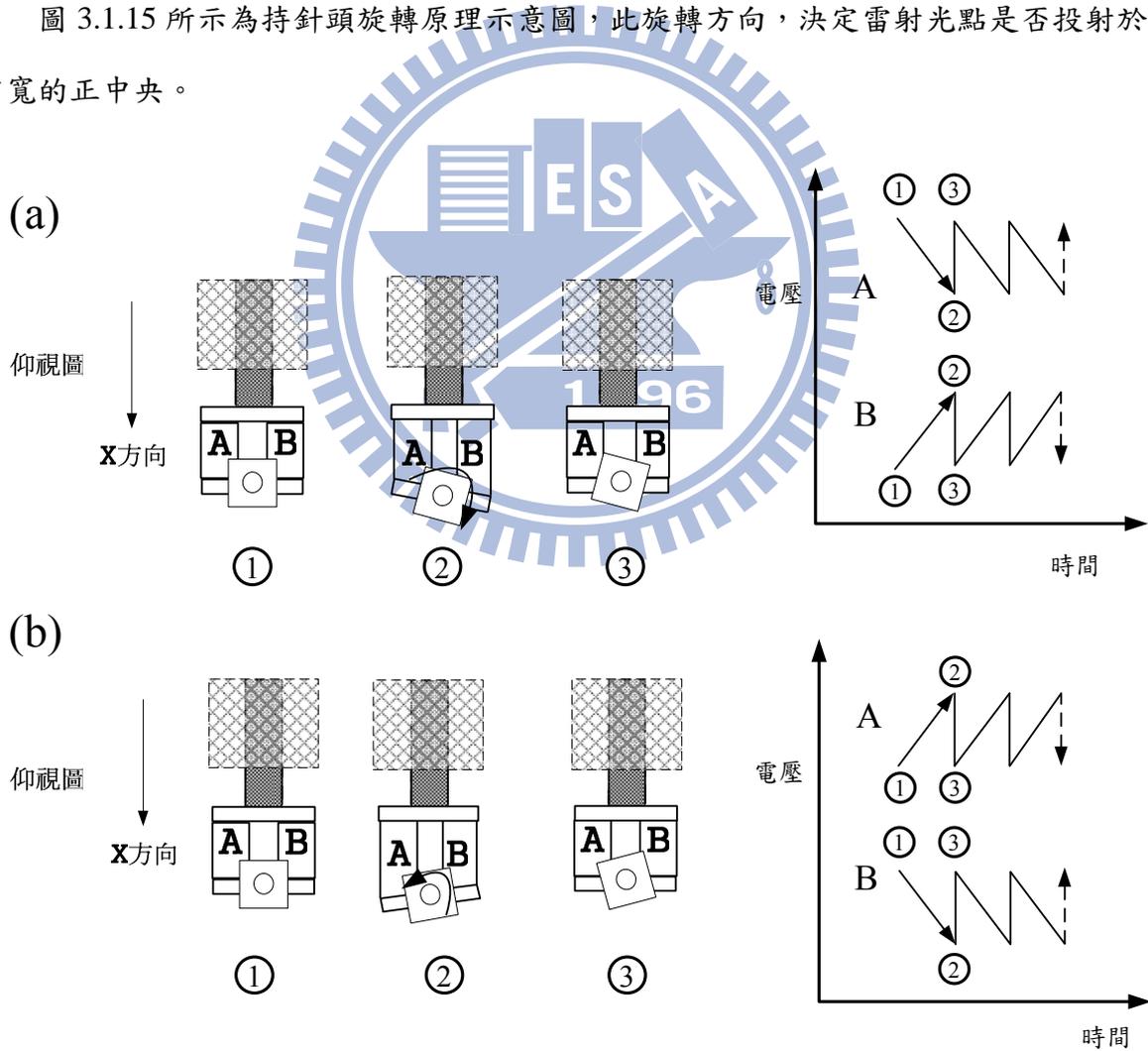


圖 3.1.15 慣性馬達旋轉作動示意圖

旋轉：圖 3.1.15 (a) 當對 A、B 壓電材料分別施加不同鋸齒波形電壓，使 A 壓電

材料以較緩速率縮短，快速伸長；B 壓電材料以較緩速率伸長，快速縮短，則持針頭在順時針方向旋轉一微小 θ 角度。

反之，如圖 3.1.15 (b) 當對 A、B 壓電材料分別施加不同鋸齒波形電壓，使 A 壓電材料，較緩速率伸長，快速縮短；B 壓電材料較緩速率縮短，快速伸長，則持針頭在逆時針方向旋轉一微小 θ 角度。

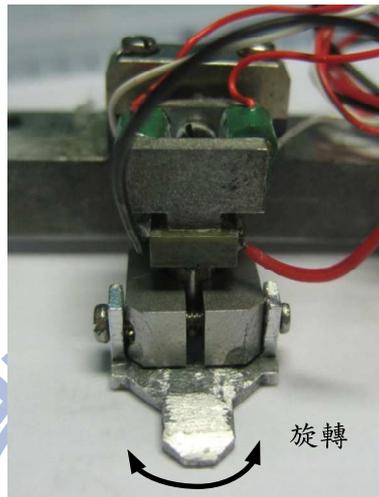


圖 3.1.16 慣性馬達實體圖 (前視圖)

在驅動慣性馬達進行平移旋轉等動作時，需特別注意壓電材料必須同時做動才有效果，若是兩者之間有時間差的話，則慣性馬達無法發生作用，輕則做動情況不如預期，重則無法移動。由之前所述可知，平移所需驅動電壓，A、B 壓電材料為一致。但是使探針頭旋轉之驅動電壓，A、B 壓電材料則恰好相反。若是以兩組電壓訊號驅動，則考慮到電腦運算或是硬體之間的時間誤差，則未必可恰好同時以相反方向的電壓驅動。所以最好的方法是可以一組控制訊號，同時驅動 A、B 壓電材料。

因此，論文中設計如圖 3.1.18 所示特殊的電路接法，搭配以電路切換，即可以一組控制訊號達到我們所想的做動效果。當探針頭需要旋轉時，壓電材料可以同時間以相反的電壓訊號驅動，而需要平移時，只要切換電路開關，更改為並聯模式，則壓電材料同時以相同電壓訊號驅動。

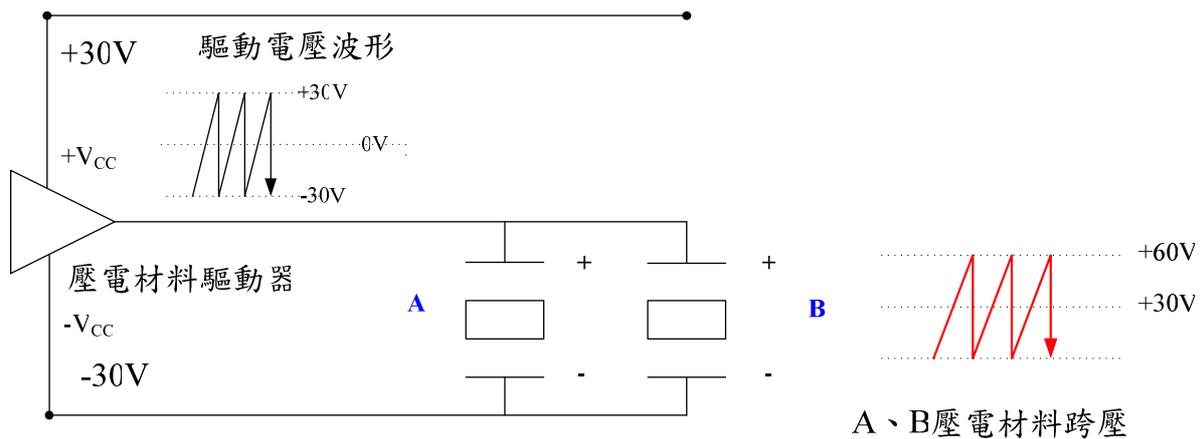


圖 3.1.17 慣性馬達驅動電路（整體+X 平移）

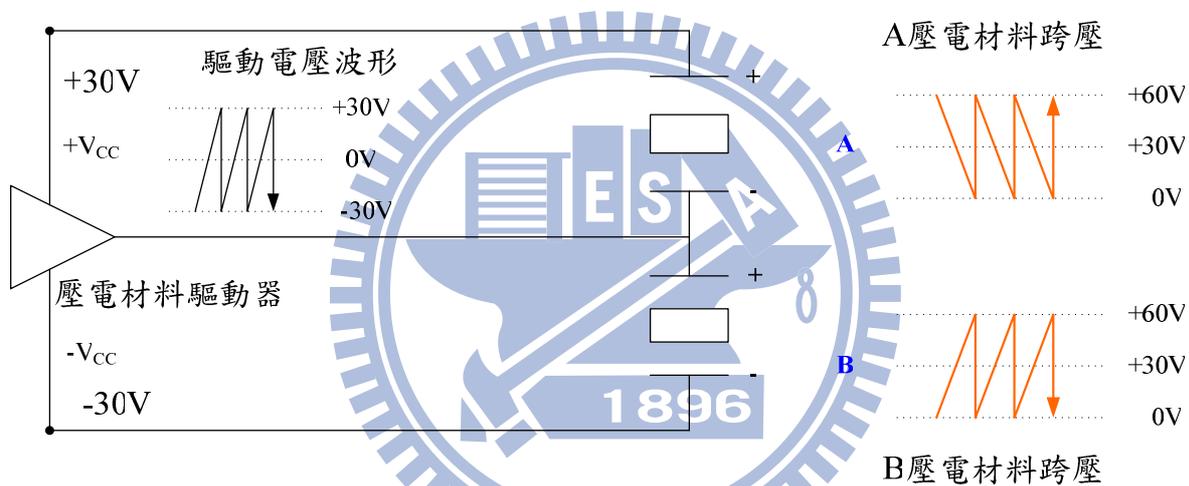


圖 3.1.18 慣性馬達驅動電路（持針頭順時針旋轉）

圖 3.1.17 所示為慣性馬達運作實際電路圖。輸入訊號經運算放大器用以驅動壓電材料，A、B 壓電材料並聯，如此可同時以同波形電壓驅動，使慣性馬達平移。

圖 3.1.18 所示則為持針頭旋轉，壓電材料連接電路圖。將 A、B 壓電材料串聯，再利用正負 30V 固定電壓，可使 A、B 壓電材料，恰好同時以不同方向波形電壓驅動，達到持針頭旋轉之目的。

3.1.4. 探針懸臂撓曲感測模組

縮小化探針懸臂撓曲感測模組，採用了目前已大量生產之 CD/DVD 讀寫頭，所使用的光碟機讀取頭型號為 TOP1100S , TopRay Technologies，如圖 3.1.14 所示。

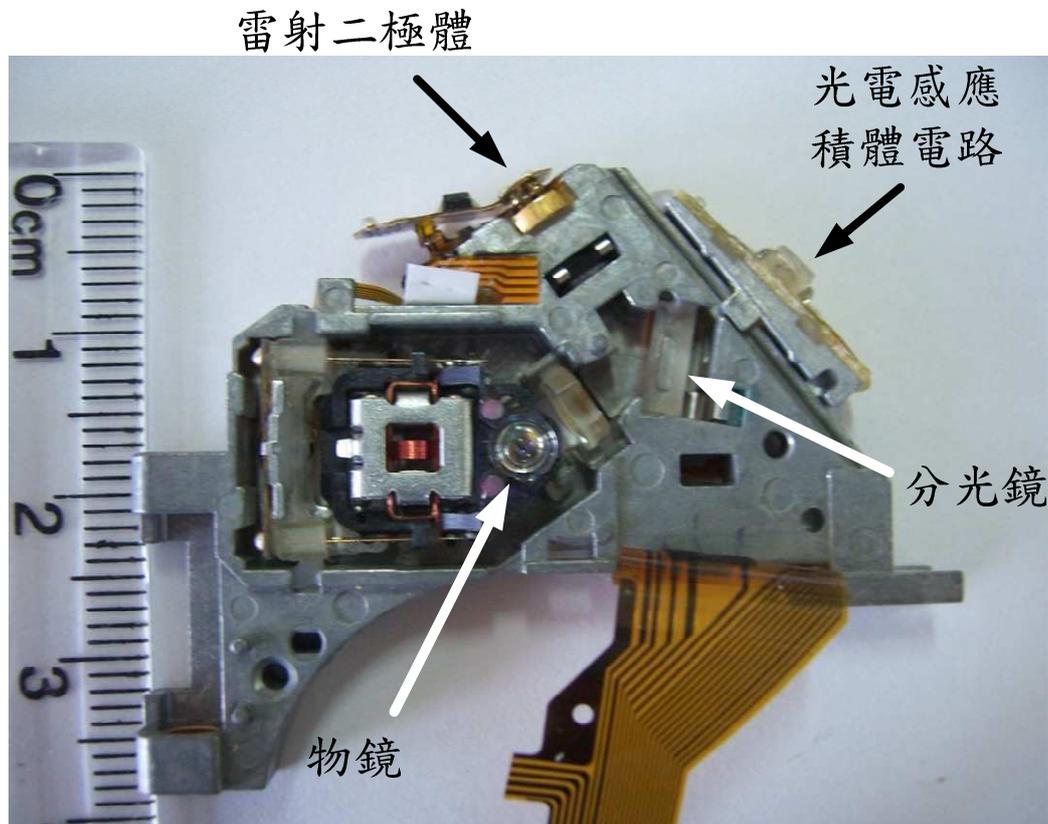


圖 3.1.19 光碟機讀取頭

依論文中所使用的功能，光碟機讀取頭大至上的結構可以區分成：雷射光源系統、光電感應積體電路（opto-electric integrated circuit, OEIC）

雷射光源系統：TOP1100S 型可供使用的雷射光源總共有兩種，分別為供 DVD 使用的波長 655 nm 與供 CD 使用的波長 790 nm，兩者皆供可使用，在論文中使用 DVD 光源作為偵測微懸臂撓曲之用。

光電感應積體電路(OEIC)：光電感應積體電路的基本原理是將雷射光訊號轉換為電壓訊號，再經由量測電壓訊號的變化得知光訊號的改變。雷射光透過物鏡聚焦於反射物表面，其反射回來的雷射光經由分光鏡反射聚焦在光碟讀取頭內建的 OEIC 上，如圖 3.1.20 所示。此光電感測器被分成 A-F 等六個區塊，其中 E 與 F 的區塊只有在使用於讀

取 CD 時，用來輔助尋軌。A-D 的部份則是使用於 CD 或 DVD 真正有焦點變化所用的區塊，因此在本論文中使用的區塊為 A-D。

雷射光之路徑如圖 3.1.20 所示，LD 產生出的雷射光束經由光柵產生繞射後經過偏極分光鏡 (polarization beam splitter)，透過雙物鏡後聚焦於反射物表面上，反射後的雷射光束經由偏極分光鏡反射投影到 OEIC 上，當反射物與物鏡之間距離有所變化，OEIC 上光訊號也會有所改變，藉此可偵測物鏡到反射物表面的距離。

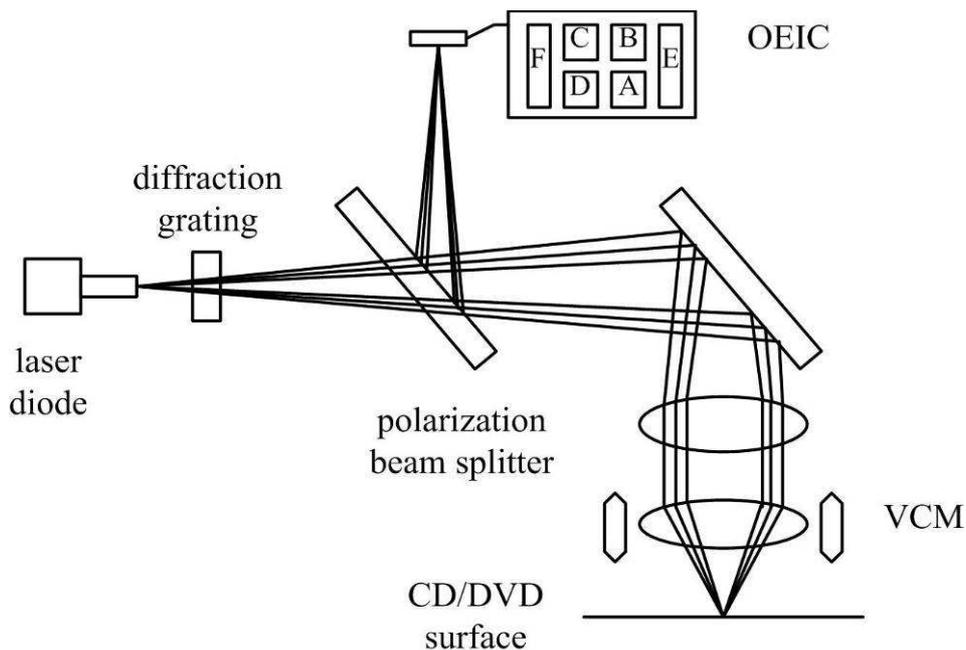


圖 3.1.20 光碟讀取頭雷射光路結構圖

在實際使用的時候，A-D 四個區塊會因為所受到反射雷射光投射的大小與強度不同，而分別輸出四組不同的電壓訊號。由於物鏡與反射物表面距離的改變，而使投影到 OEIC 上的形狀受到雷射光像散的特性影響。如圖 3.1.21 所示，雷射光經由透鏡折射後，因為折射角度的不同，由 (a) 區域至 (b) 區域之間的光點形狀會從橢圓變化成圓形，在此我們定義聚焦雷射光點形狀為圓形的地方為焦點，而由 (b) 區域至 (c) 區域雷射光點形狀由圓形變成另一軸向橢圓。

此為前文所提過之光像散式偵測機制，在本論文中，反射物為探針微懸臂背面，探針微懸臂背面通常鍍有一層高反射係數材質，如金或銀等材質，以供反射雷射光點。

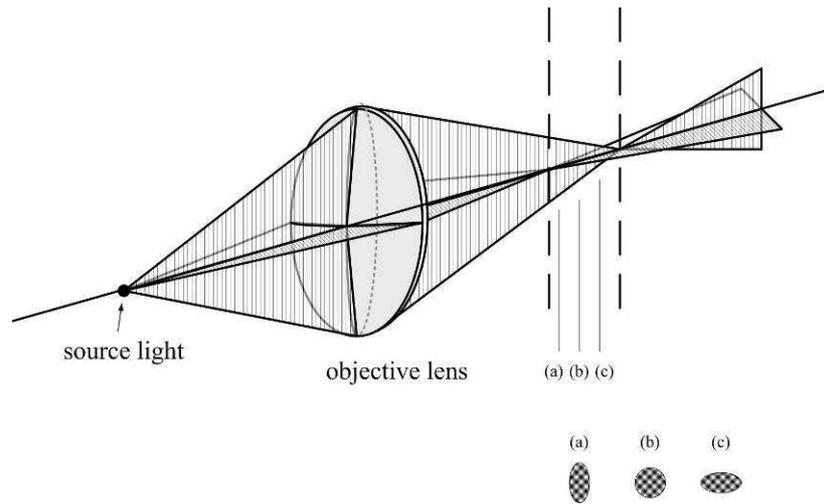
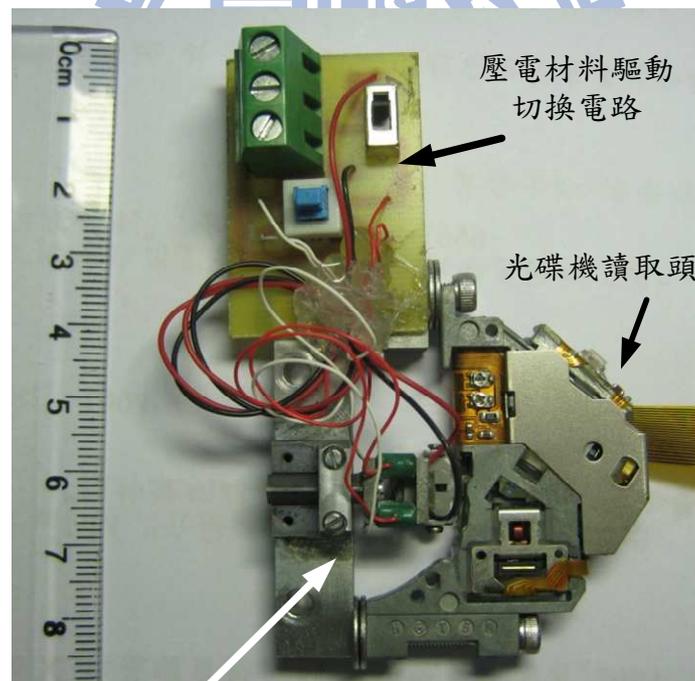


圖 3.1.21 像散現象示意圖

圖 3.1.22 所示為探針懸臂撓曲感測模組與光路對正模組組合實體圖。此模組將會裝於三維位移掃描平台上，以對定置樣品作掃描[42]。



光路對正
慣性馬達

圖 3.1.22 探針懸臂撓曲感測模組示意圖（俯視圖）

圖 3.1.23 所示為探針與物鏡對焦實體圖。探針經由光路對正模組移動後，其微懸臂應置於物鏡下方雷射光點恰好聚焦處，此處為最佳感測位置。

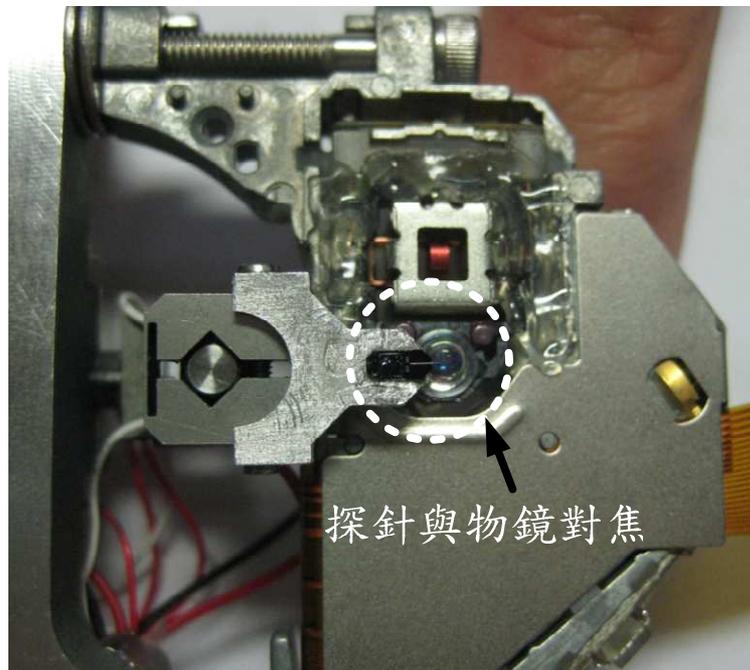


圖 3.1.23 探針懸臂撓曲感測模組示意圖（仰視圖）

圖 3.1.24 所示為探針與物鏡對焦實體圖。由側視圖中可看出探針懸臂撓曲感測模組其光路路徑，偵測懸臂於 Z 軸方向的形變。

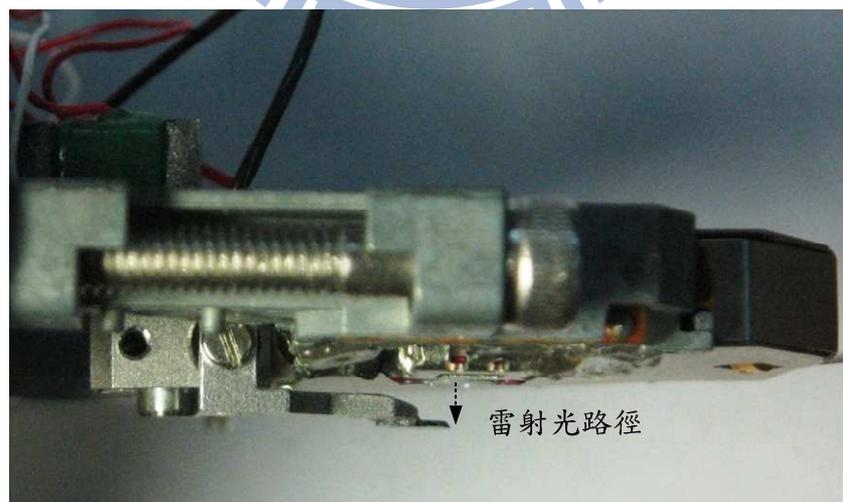


圖 3.1.24 探針懸臂撓曲感測模組示意圖（側視圖）

3.1.5. 電路系統

表 3.1.1 所列為所使用的光碟機讀取頭 (pick up head, PUH) 控制接腳資料
其中 pin 20~pin23 為 PSD 訊號輸出，圖 3.1.26 所示為 PUH 解析電路實體圖。

圖表 3.1.1 PUH 控制接腳資料 (廠商資料)

Pin (PUH)	Comp	Name	Pin (PUH)	Comp	Name
1	Act	Fo+	13	PDIC	GND (PD)
2	Act	TR-	14	PDIC	Vc
3	Act	TR+	15	PDIC	Vcc
4	Act	Fo-	16	PDIC	E
5	LD	NC	17	PDIC	F
6	LD	NC	18	PDIC	RF
7	LD	LD (DVD)	19	PDIC	CD/DVD SW
8	LD	Gnd (LD)	20	PDIC	A/a
9	LD	LD (CD)	21	PDIC	B/b
10	LD	MD	22	PDIC	C/c
11	LD	VR (DVD)	23	PDIC	D/d
12	LD	VR (CD)	24	PDIC	NC

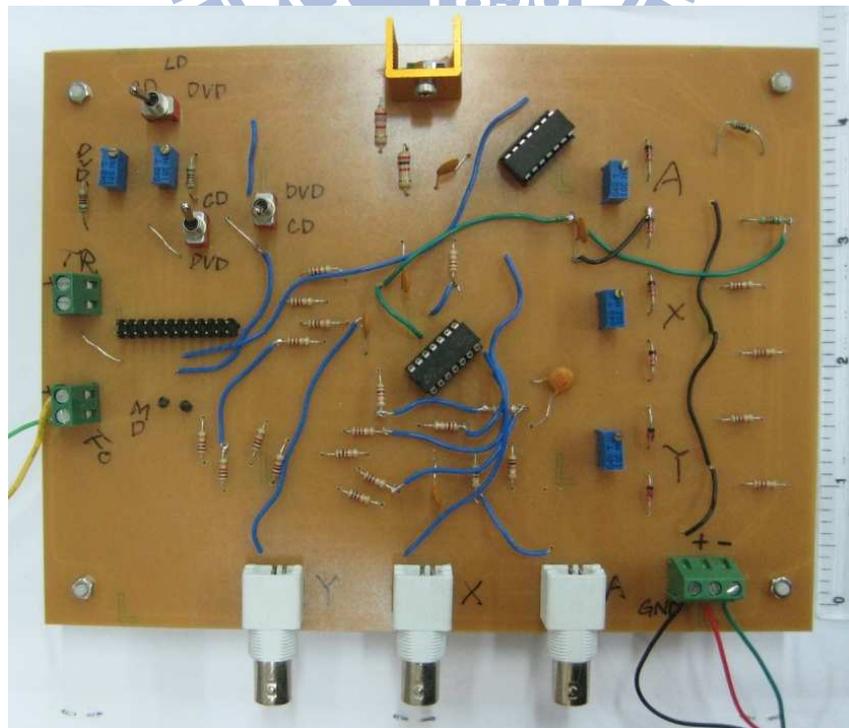


圖 3.1.25 PUH 解析電路實體圖

圖 3.1.26 所示為 PUH 訊號處理電路線路圖

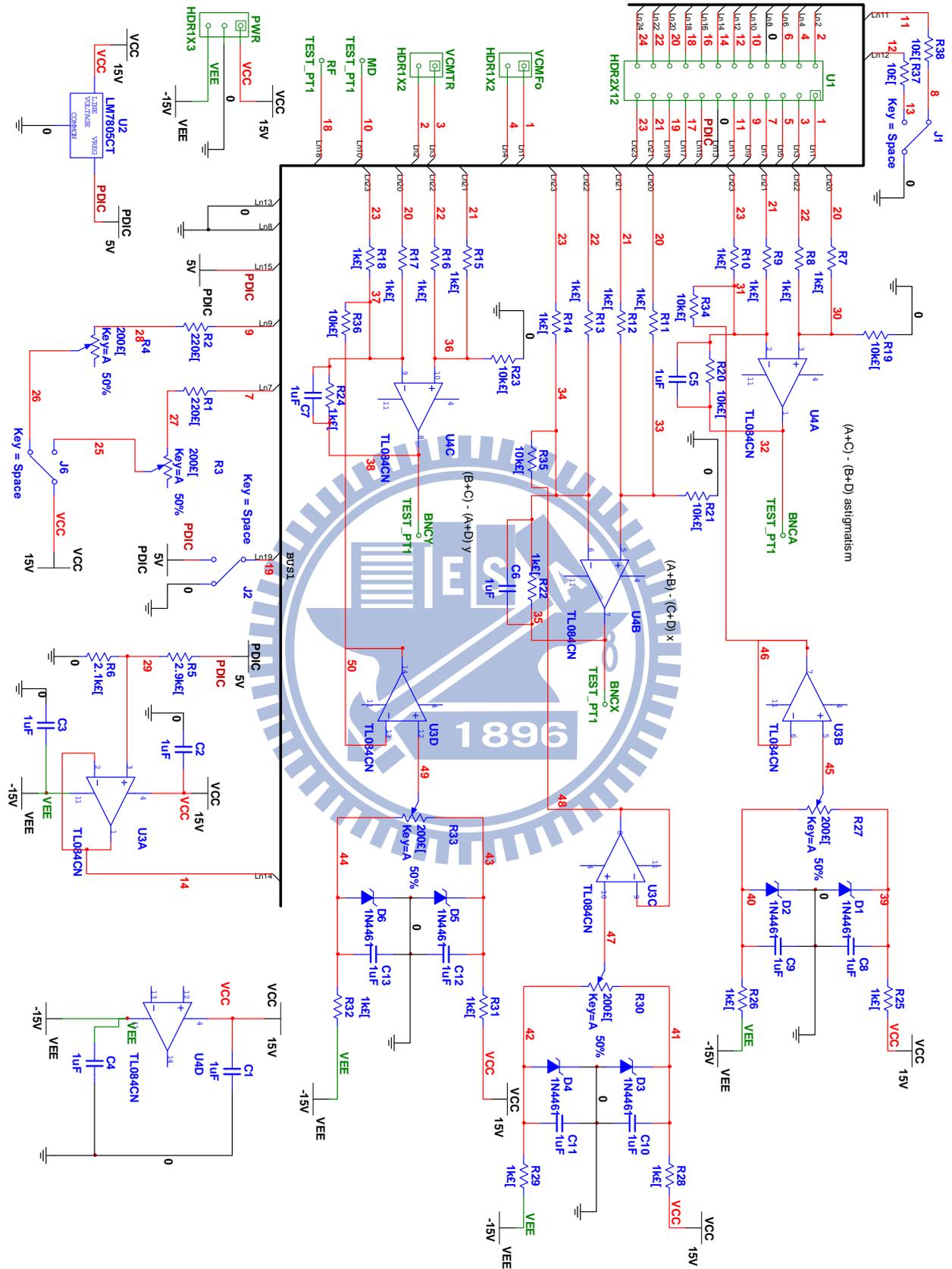


圖 3.1.26 PUH 訊號處理與控制電路圖

四、實驗結果

4.1 實驗方法

4.1.1. 掃描模式

論文實驗中 AFM 系統使用 LabView 與 Simulink 軟體搭配電壓擷取卡，輸出與擷取控制訊號。掃描模式分別使用

(1) 定力模式：如圖 4.1.1 所示，掃描樣品表面期間，擷取鎖相放大器輸出之振幅電壓變化訊號至電腦，使用正比-積分-微分控制器 (proportional-integral-derivative controller, PID controller) 作回饋控制，控制 Z 軸方向位移，使其振幅訊號保持在預設之 set point 值，而 Z 軸變化之調整量即為樣品表面形貌。

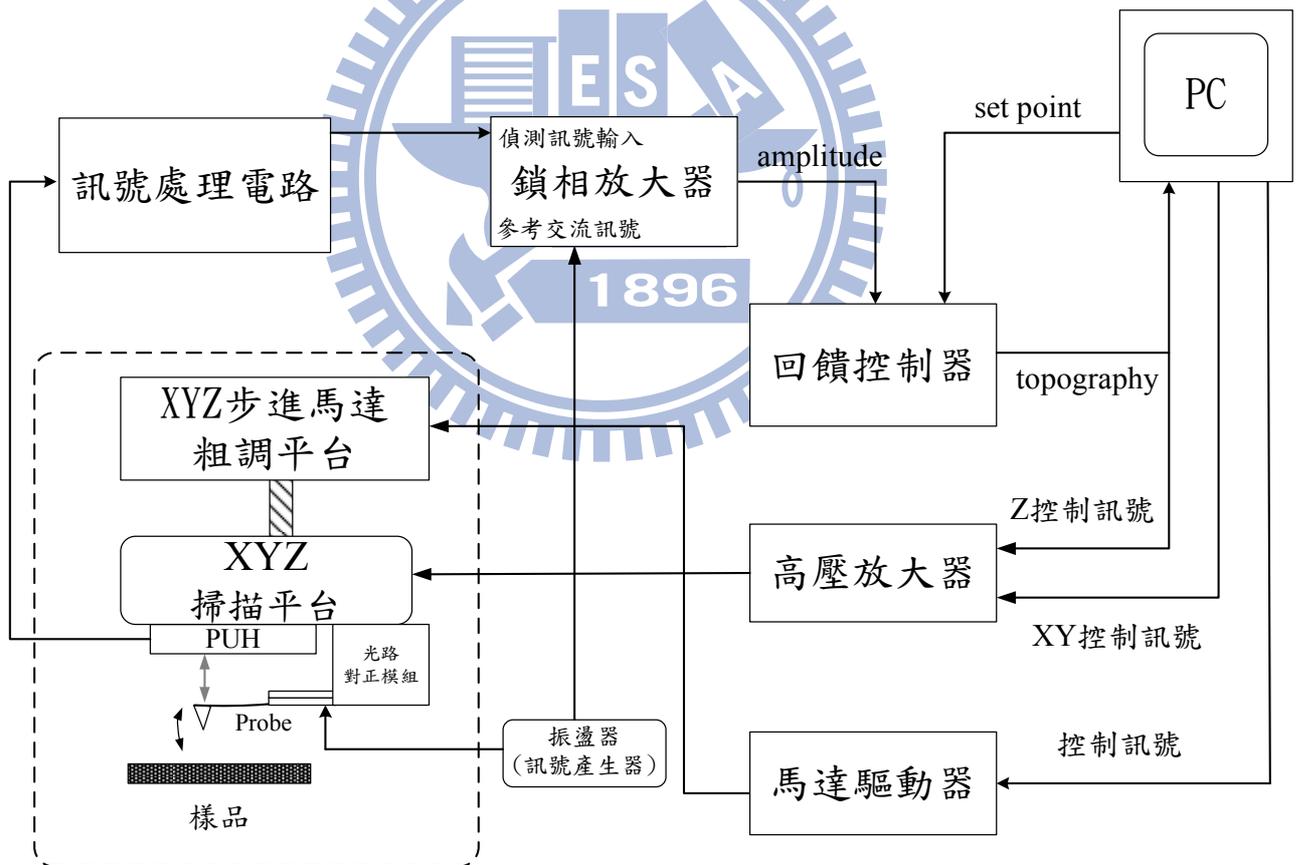


圖 4.1.1 定置樣品式 AFM 定力掃描模式示意圖

(2) 定高模式：如圖 4.1.2 所示，關閉回饋控制器，將探針近接至樣品表面，使針尖與樣品之間作用力位於線性變化曲之內。掃描樣品表面期間，擷取鎖相放大器輸出之振幅電壓變化訊號，作為樣品表面形貌。

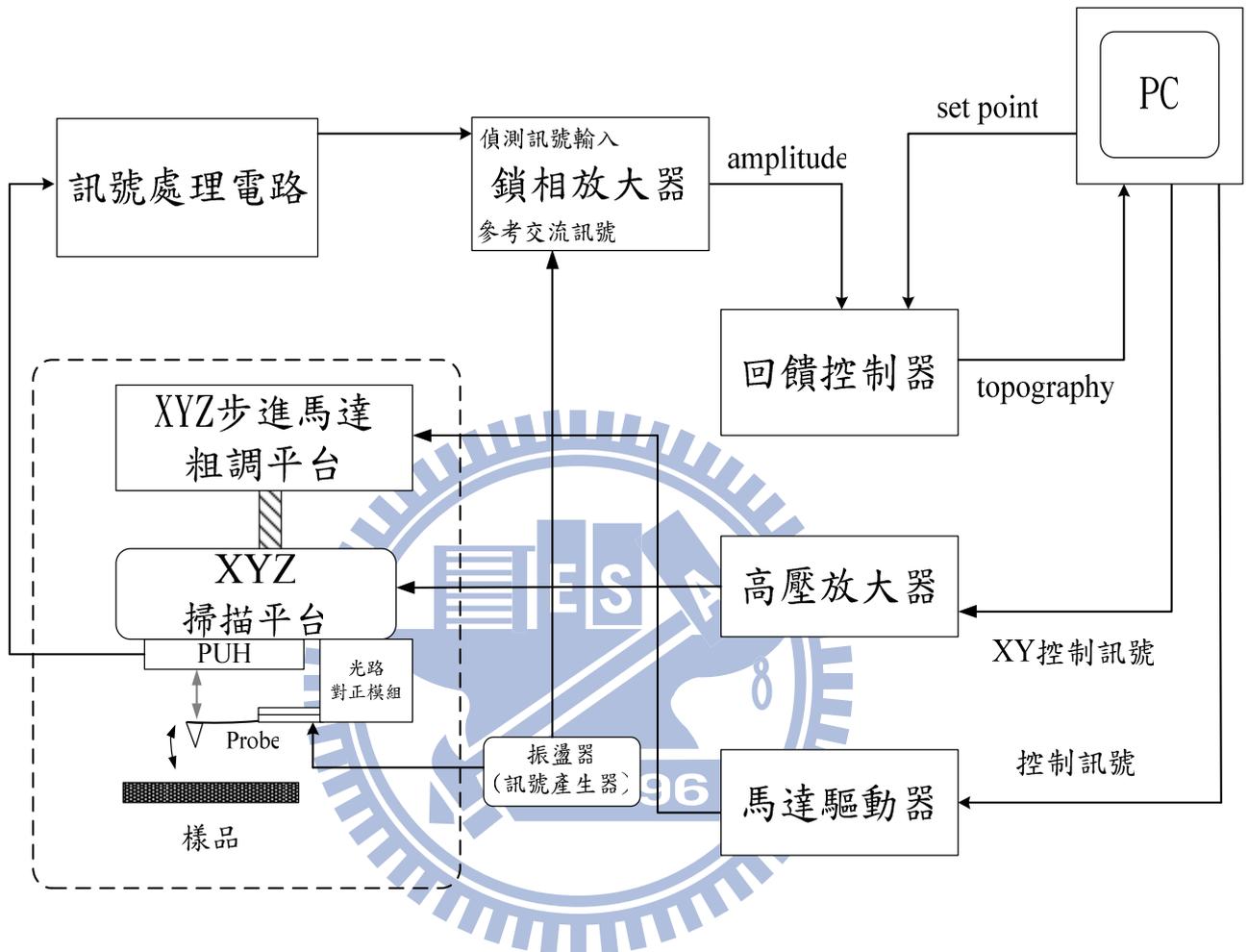


圖 4.1.2 定置樣品式 AFM 定高掃描模式示意圖

4.1.2. 操作方法

雖然使用接觸模式可取得解析度較佳之影像，但由於此法容易造成探針針尖及樣品表面之損傷，且探針對表面材質較軟與附著力較差的待測樣品（如生物樣品），容易產生損害、刮動的現象，所以並不適合。另外，非接觸模式一般需操作於超高真空之穩定的環境中，以避免大氣中溼氣及其他原因的環境干擾，才能讓探針運作於凡得瓦力區。所以相較於輕敲模式，接觸式與非接觸模式較少運用。

輕敲模式是目前 AFM 最為廣泛使用的操作模式，由於輕敲模式可以很有效的減少側向力影響，可施以較小的作用力（相較於接觸式），對表面材質較軟或附著力較差的物質進行掃描成像，而不至於對其造成傷害，因此在本實驗中所採用的操作模式為輕敲模式。

在操作輕敲模式時，必須使探針微懸臂於共振頻率附近擺動振盪，如此其振幅訊號才夠敏感以供使用。使探針微懸臂擺動的方法，一般是將探針微懸臂的固定基座與壓電陶瓷片結合，再對壓電陶瓷片以訊號產生器輸入正弦波訊號，使其有一微小同正弦波驅動電壓頻率的伸縮，進而帶動探針微懸臂與輸入訊號有相同頻率的振動。在本論文中，乃是將探針固定基座以瞬間膠黏至探針夾持頭上，以光路對正模組 Z 軸之壓電材料作為振盪來源。控制輸入壓電材料的訊號振幅與頻率，可同時使探針微懸臂的擺動振幅與頻率改變。

另外，以訊號產生器的交流訊號輸入鎖相放大器作為參考端，而代表探針懸臂偏折的電壓訊號，也同時進入鎖相放大器的輸入端，則探針懸臂共振振幅的改變，由鎖相放大器以電壓 V_{amp} 形式輸出，因此我們可用此電壓訊號，作為探針針尖與樣品表面間的距離改變訊號。

圖 4.1.2 所示為實驗操作 AFM 基本流程示意圖。我們假定探針為更換過，需做光路對正的步驟，首先利用光路對正模組前後與旋轉自由度，將雷射光點準確投影至探針懸臂針尖中央處，完成光路對正的步驟。接下來再以 Z 軸上下移動的自由度，移動探針至 S-curve 工作的線性區域。

接下來，以訊號產生器輸入壓電陶瓷片一正弦波訊號，將探針微懸臂以前文所述方法擺動起來，並讓其具有一定的振幅。接下來進行掃頻的動作，根據廠商所提供探針資料特性，從共振可能最低頻率，以 kHz 為間隔單位，向上增加至共振可能最高頻率。其中，輸入頻率若靠近共振頻率附近，則鎖相放大器輸出 V_{amp} 會增加至一明顯的電壓值，這時再以 100Hz 為單位微調頻率改變，使得 V_{amp} 在輸入電壓振幅不改變的情況下，擁有最大電壓值輸出，則此頻率即可作為 AFM 掃描時的工作頻率。

下一步驟為利用 XY 粗調平台，將探針移至欲掃描樣品上方定位後，再以 Z 軸步進

馬達將掃描平台近接至其 Z 軸壓電致動器行程範圍內，此時即可以掃描平台 Z 軸行程，將探針近接至樣品表面做出力與距離線性關係圖。當我們得到力與距離線性關係圖後，接下來就可開始做掃描樣品的程序。根據掃描模式的不同，定高模式或是定力模式，我們設定適當的掃描參數，並查看回饋訊號值是否良好，如果與預期符合的話，即可設定掃描範圍與像素開始進行樣品表面形貌掃描。

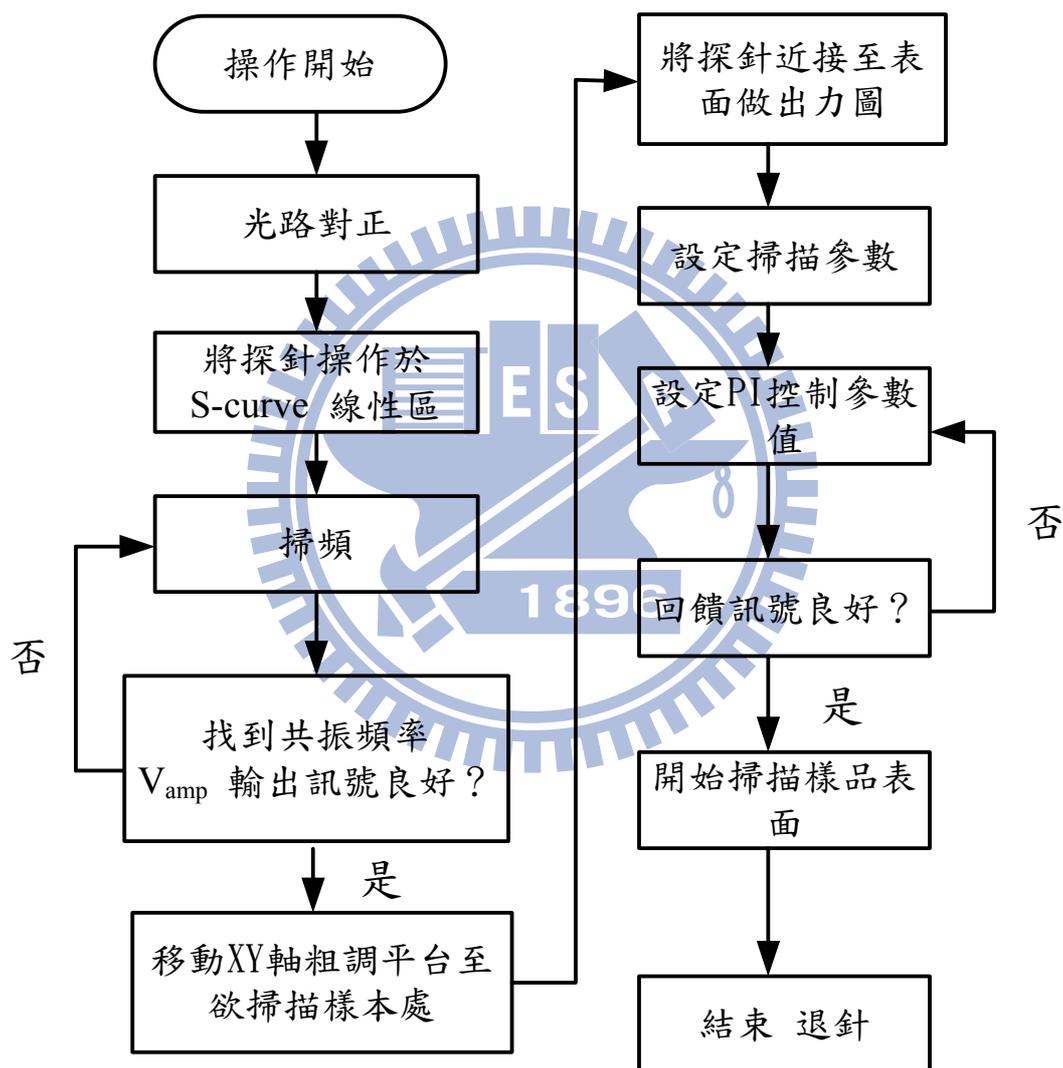


圖 4.1.3 AFM 基本操作流程

4.2 實驗特性數據

4.2.1. 探針

本實驗所使用之探針為暫接觸式（Tapping mode）圖 4.2.1 所示為使用之探針外觀。

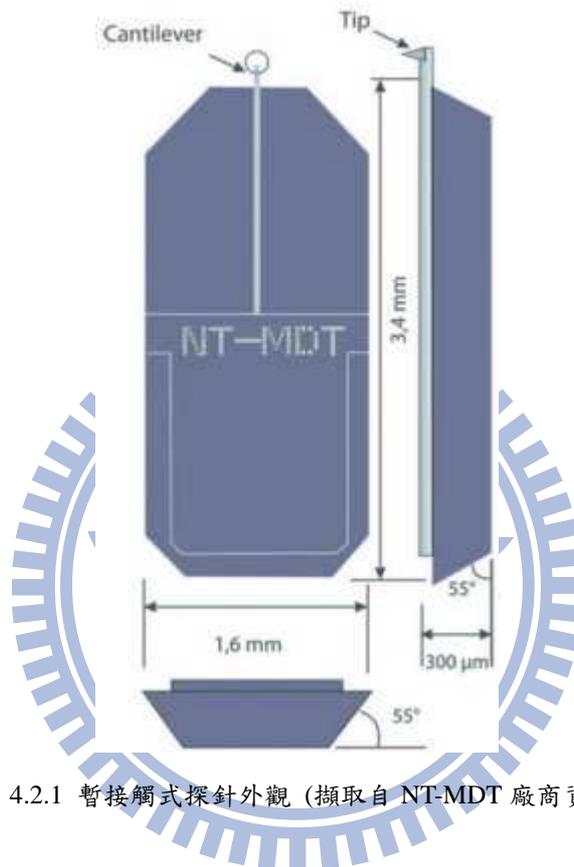


圖 4.2.1 暫接觸式探針外觀 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)

圖 4.2.2 所示為微懸臂外觀形貌，表 4.2.1 為探針微懸臂樑特性資料。

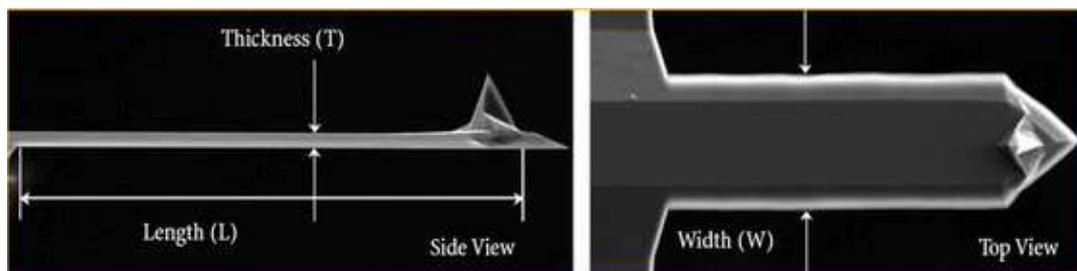


圖 4.2.2 實驗中所使用探針 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)

圖表 4.2.1 暫接觸式探針懸臂特性資料 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)

item	value	unit
Length (L)	95 ± 5	μm
Width (W)	30 ± 3	μm
Thickness (T)	2.0 ± 0.5	μm
Resonant frequency	140 min~390 max	kHz
Force constant	3.1 min~37.6 max	N/m

圖 4.2.3 與圖 4.2.4 所示為探針針尖外觀形貌，表 4.2.2 為探針針尖特性資料。

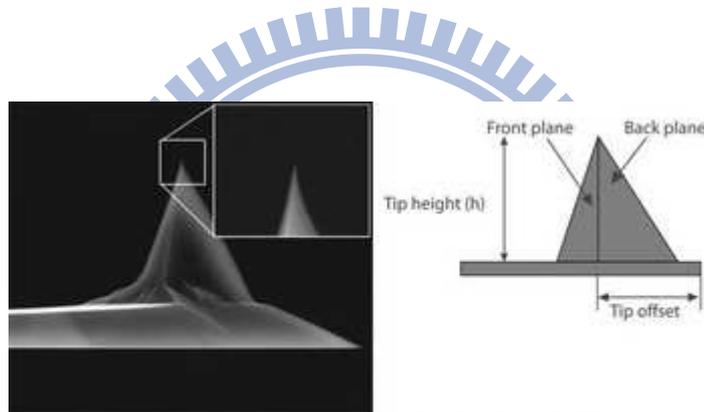


圖 4.2.3 暫接觸式探針針尖側視圖(擷取自 NT-MDT 廠商資料)

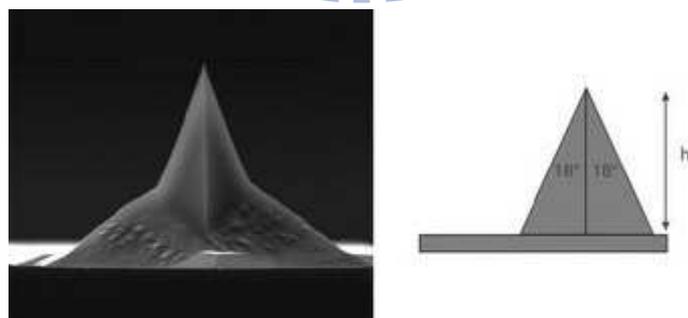


圖 4.2.4 暫接觸式探針針尖正視圖 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)

圖表 4.2.2 暫接觸式探針針尖特性資料 (擷取自 NT-MDT 廠商資料)

item	value	unit
Tip height	14 – 16	μm
Tip offset	5 – 20	μm
Tip aspect ratio	3:1 – 7:1	degree
Front plane angle	10 ± 2	degree
Back plane angle	30 ± 2	degree
Side angle (half)	18 ± 2	degree
Cone angle at the apex	7 – 10	degree

4.2.2. 掃描樣品

發光二極體 (light emitting diode, LED) 相較於鎢絲燈泡等傳統發光元件，其具有高發光效率、反應時間快、重量輕、節省能源...等特點，近年來已成為取代傳統照明新光源的研究重點。

隨著發光強度需求的提升，LED 元件必須增加面積，才可將其操作在較高的電流之中而不致燒毀，而現階段利用 LED 產生白光的方式之一為利用藍光 LED 激發黃色螢光粉的組合以產生白光。而圖案化藍寶石基板 (patterned sapphire substrate, PSS) 為製作藍光 LED 關鍵元件之一。

目前業界檢測 PSS 所使用最為廣泛的儀器為 AFM，但傳統 AFM 僅適用於小樣品，實驗中所使用之掃描樣品，為 2 吋之 PSS，超過傳統 AFM 的適用尺寸。圖 4.2.5 所示為實驗主要檢測樣品，2 吋 PSS，同時有部份領先廠商已導入 4 吋製程。

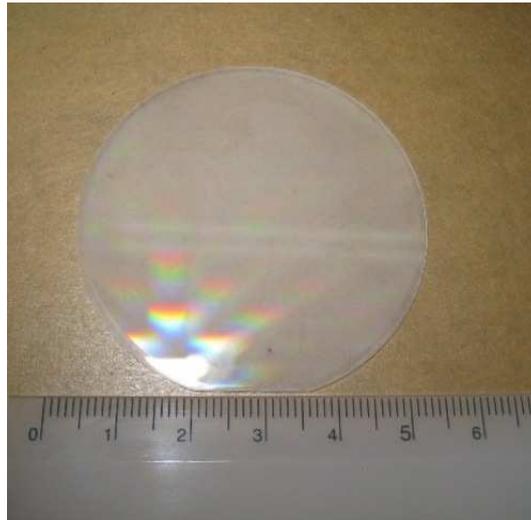


圖 4.2.5 掃描樣品實體圖 PSS

圖 4.2.6 所示為 PSS 樣品表面示意圖，以半導體微影蝕刻製程製造

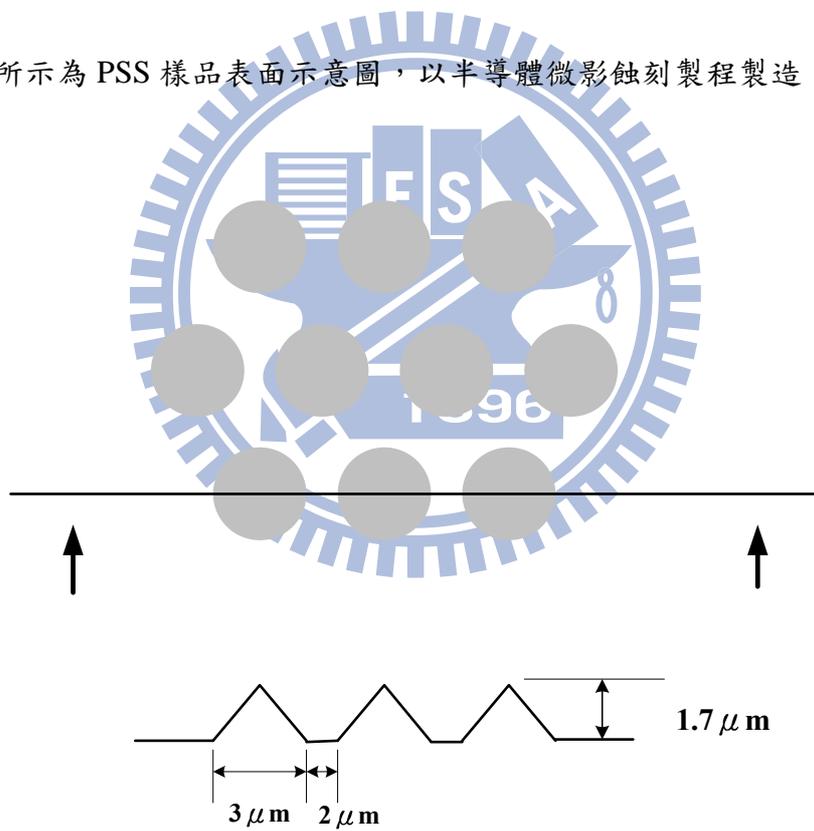


圖 4.2.6 PSS 樣品表面形貌

4.2.3. 掃描方式

實驗中，掃描樣品表面使用柵狀掃描方式，如圖 4.2.7 所示，X 軸向來回在樣品表面移動，同時紀錄 Z 軸向電壓變化訊號，成像於顯示器。當 X 軸單線掃描完畢，Y 軸向移動一單位，X 軸向重複單線掃描動作。圖 4.2.8 所示為 X 與 Y 軸向控制訊號示意圖。

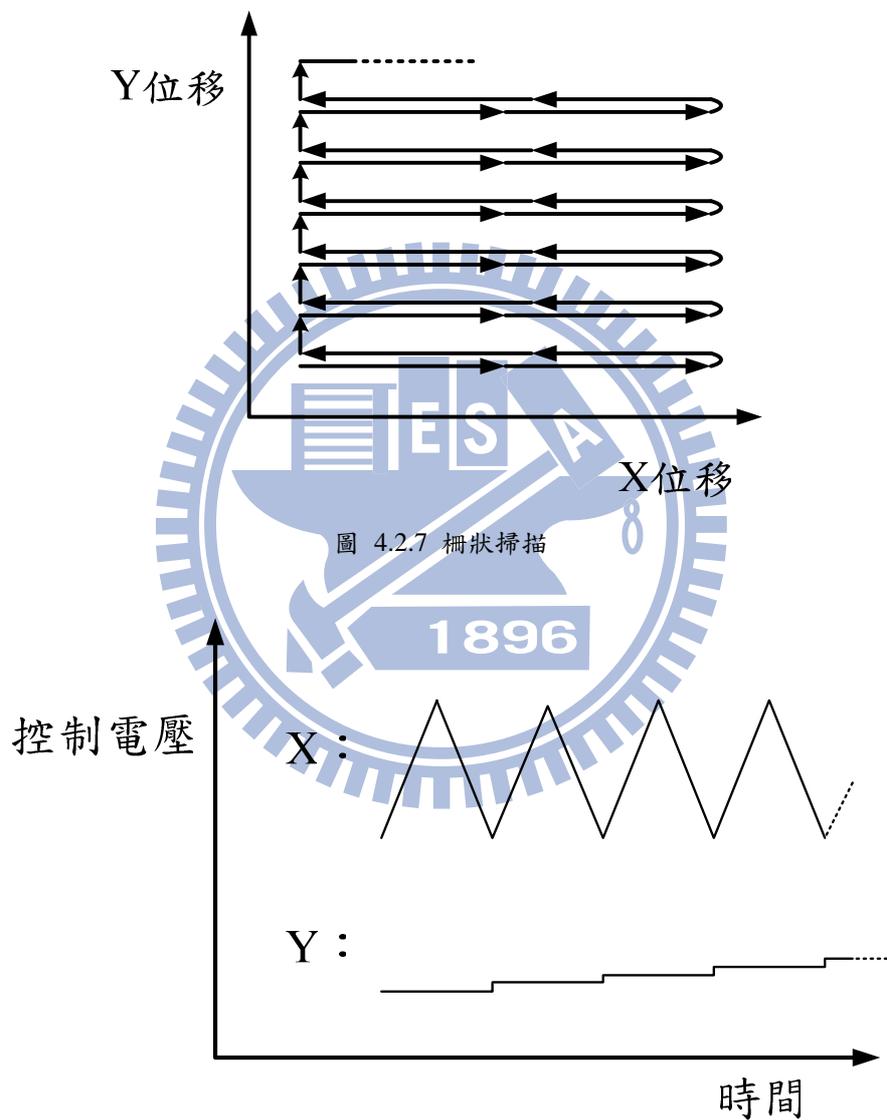


圖 4.2.8 X 與 Y 掃描電壓訊號變化示意圖

4.2.4. 軟體後處理

由於針和樣品不是完全垂直，可能會傾斜一個面，因此需要做攤平（flatten）的動作，使得掃描出來的圖可以吻合實際平面狀況。

Flatten 有兩種方法，一是 frame flatten，其處理方法為找出整張圖原始資料的回歸平面，再將整張圖原始資料減去該回歸平面。另一為 line flatten，亦即找出每一條線原始資料的回歸直線，再將每一條線原始資料減去該回歸直線，再把每一條處理後的直線組成一張圖。

Gwyddion 是一套可處理 SPM 掃描數據的免費軟體，軟體本身內建許多模組，可對掃描所擷取的 Z 軸高度資料，做運算分析的處理，並且可將掃描數據結果視覺化成二維與三維圖像。實驗所得原始數據，由於探針特性以及雜訊等影響，其直接所呈現的二維或三維圖樣會呈現模糊以及扭曲，因此我們將實驗原始數據以圖 4.2.9 所示的 Gwyddion 軟體做後處理動作，其中 flatten 的運算，軟體中內建上述兩種方法，而在本實驗中使用第二種 line flatten 的方法。

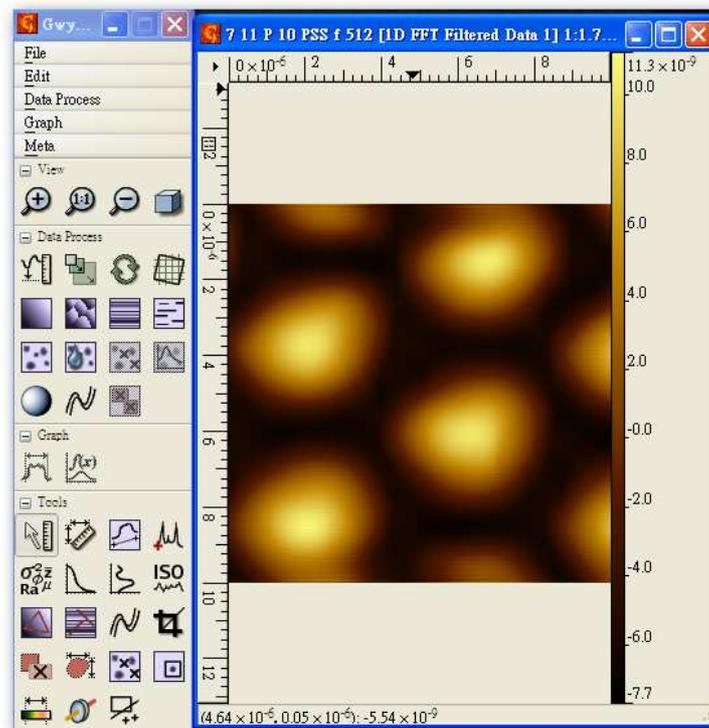


圖 4.2.9 AFM 數據後處軟體 Gwyddion 擷圖

4.3 實驗結果

4.3.1. 實驗數據

圖 4.3.1 所示為 S-curve 圖，此圖是由 PUH 訊號處理與控制電路輸出 FES 訊號數據至電壓擷取卡，再以電腦繪製。圖中 FES 線性區域約為 $6\mu\text{m}$ ，電壓變化約為 7V ，用於偵測 AFM 探針懸臂在垂直方向的撓曲，已具有足夠的量測範圍。

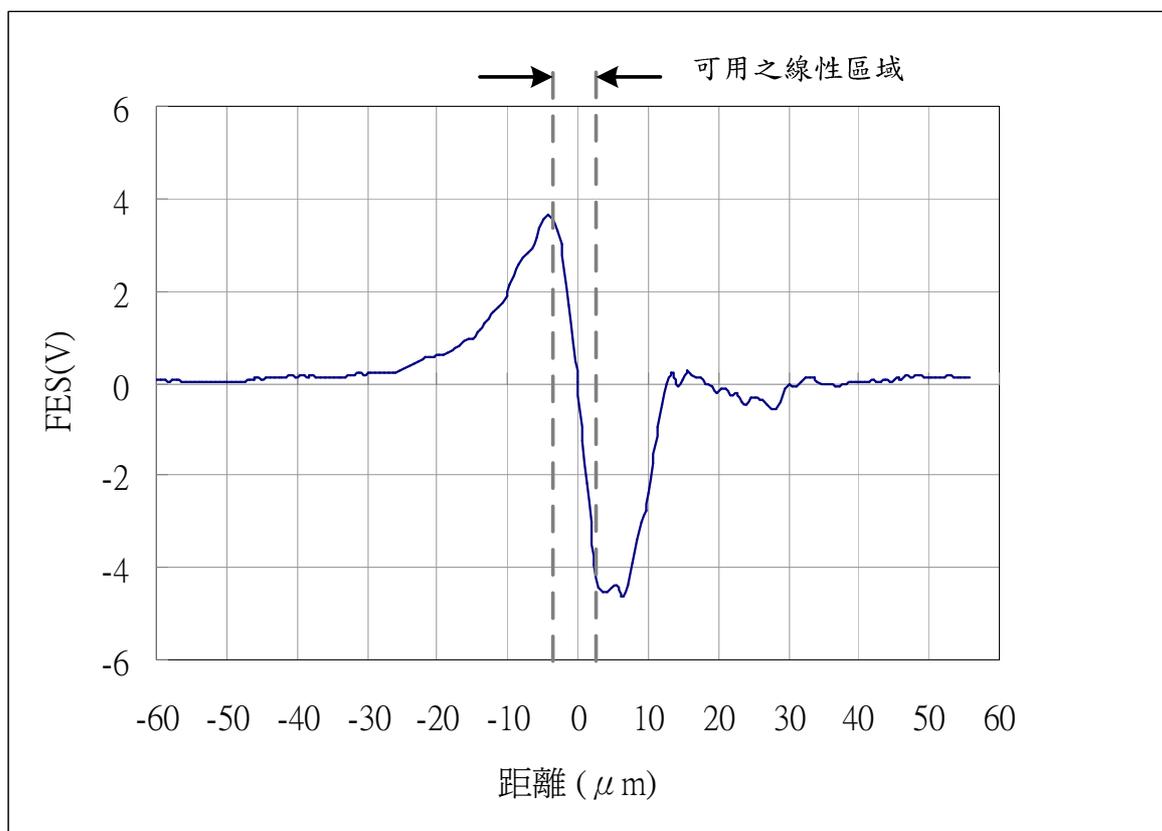


圖 4.3.1 S-curve 圖

圖 4.3.2 所示為探針共振頻率圖，其共振頻率大約為 287.5 kHz。輕敲模式操作時，探針於共振頻率附近操作，輸入驅動壓電材料的正弦波電壓訊號值約為 0.4V，鎖相放大器輸出訊號 V_{amp} 可至將近 10V。

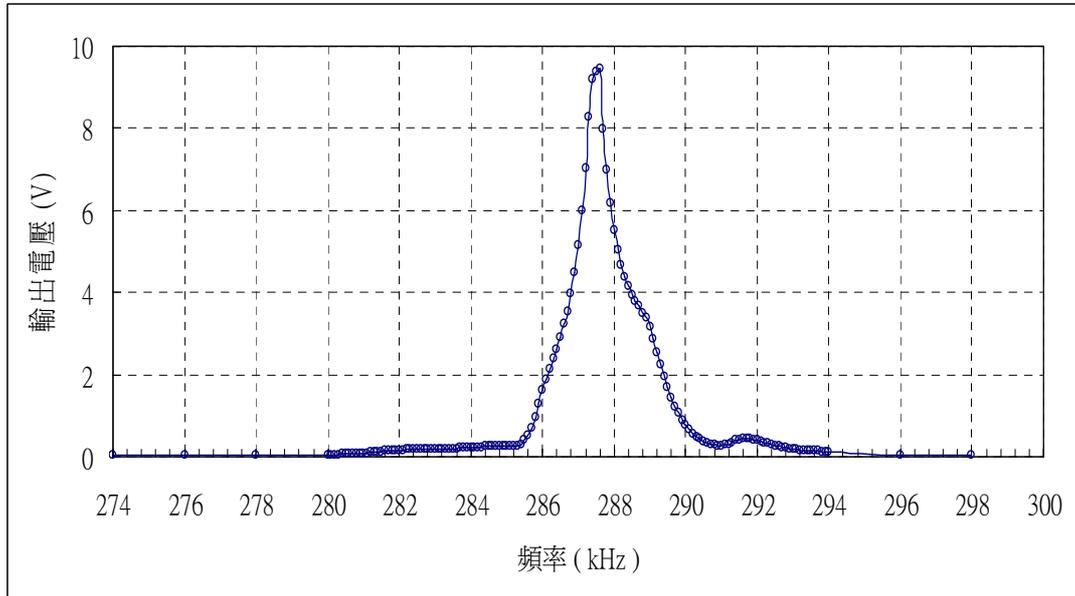


圖 4.3.2 探針共振頻率圖

圖 4.3.3 所示為探針力圖，由鎖相放大器輸出振幅電壓改變訊號 V_{amp} ，其主要呈現探針針尖與樣品表面距離改變成線性關係。

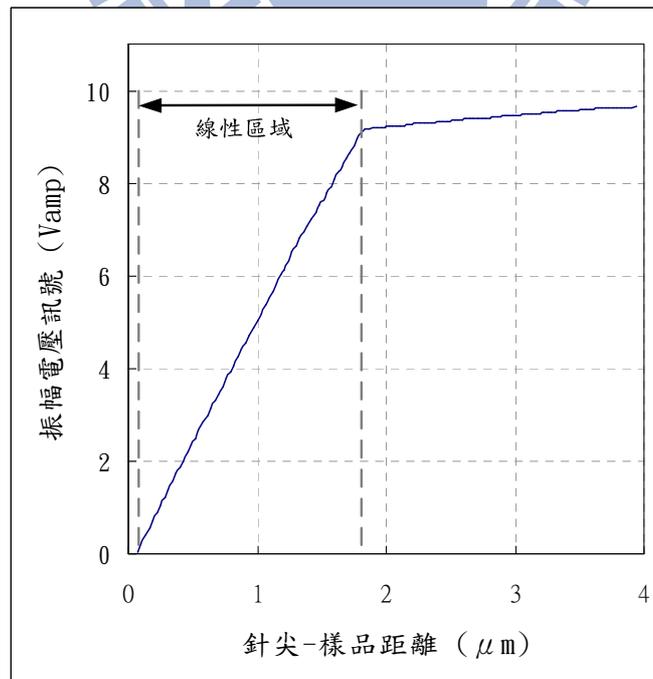


圖 4.3.3 探針力圖

4.3.2. 校正片掃描結果

一般 AFM 在掃描前，會先行掃描校正片 (grating)，以測試其是否正常運作，本實驗用校正片為向 NT-MDT 公司購買的直條紋柵狀校正片。圖 4.3.4 所示為柵狀校正片表面形貌，表 4.3.4 所列為校正片規格資料，圖 4.3.5 所示為校正片實體圖

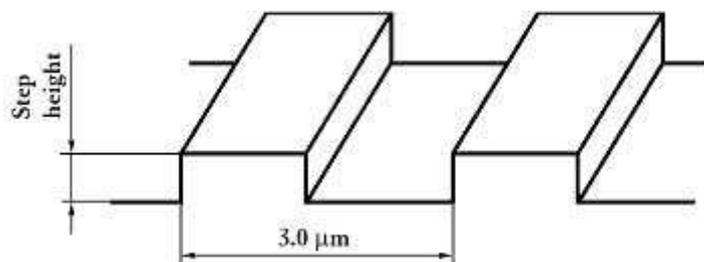


圖 4.3.4 校正片表面形貌 (廠商資料)

圖表 4.3.1 校正片規格資料 (廠商資料)

item	value	unit
Material	SiO ₂	
Step height	107 ± 1.8	nm
Period	3 ± 0.01	μm
Chip size	5×5×0.5	mm ³
Effective area	Central 3×3	mm ²

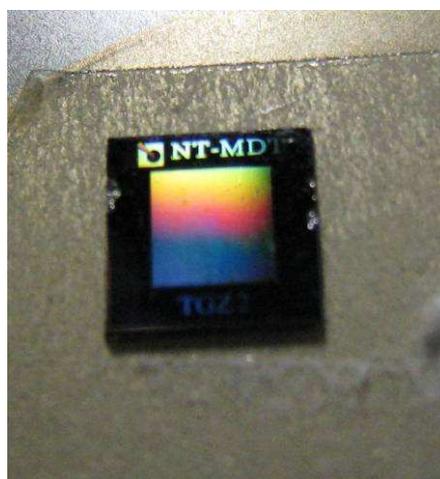


圖 4.3.5 校正片外觀

圖 4.3.6 與圖 4.3.7 所示為校正片掃描結果，由於校正片在拿取或實驗過程中暴露在空氣中，致使表面有落塵等原因，掃描圖樣也會一併顯現出來。

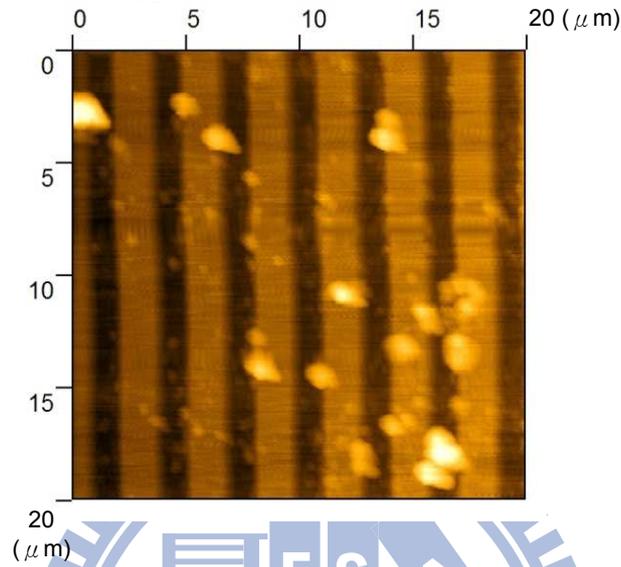


圖 4.3.6 校正片掃描圖樣
20 μm \times 20 μm 樣品表面步階高度 107nm 週期 3 μm

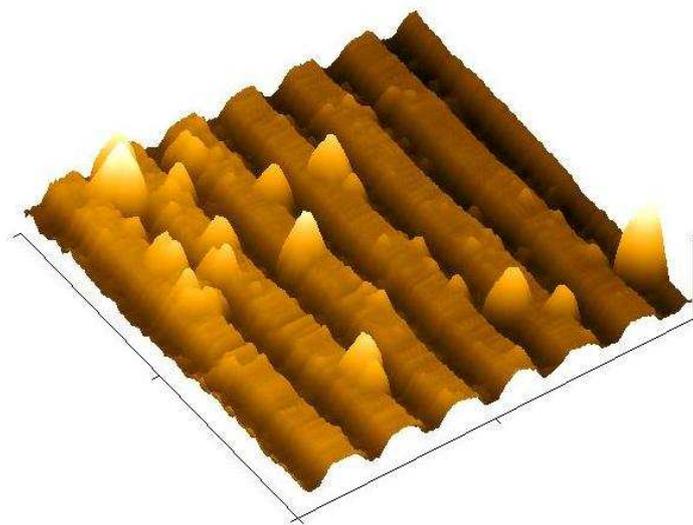


圖 4.3.7 校正片掃描圖樣立體圖

20 μm \times 20 μm 樣品表面步階高度 107nm 週期 3 μm

4.3.3. PSS 樣品掃描結果

圖 4.3.8 所示為 AFM 實際運作情形，以 Z 軸步進馬達將三維掃描平台近接於樣品表面，再以三維掃描平台操作掃描樣品表面。

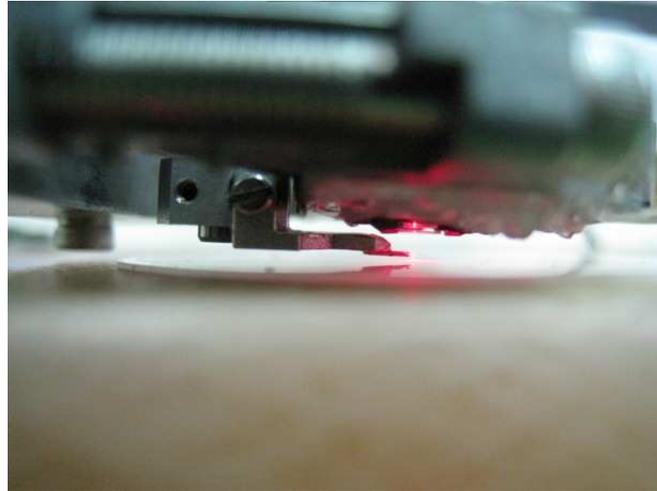


圖 4.3.8 AFM 掃描 PSS 樣品實際情形

PSS 樣品掃描分別設定四種不同掃描範圍，測試其性能。

圖 4.3.9 與圖 4.3.10 所示為掃描範圍 $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$, PSS 表面形貌平面與立體圖樣

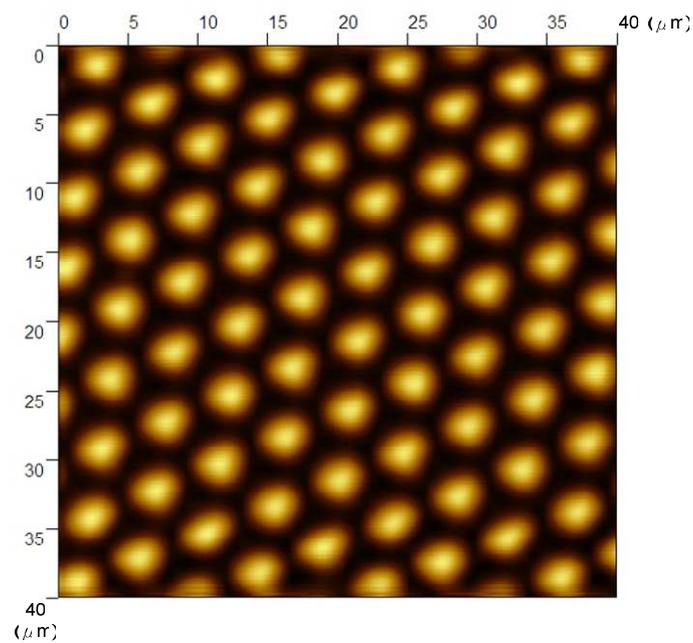


圖 4.3.9 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣

$40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ 圓錐高度 $1.7\mu\text{m}$ 週期 $5\mu\text{m}$

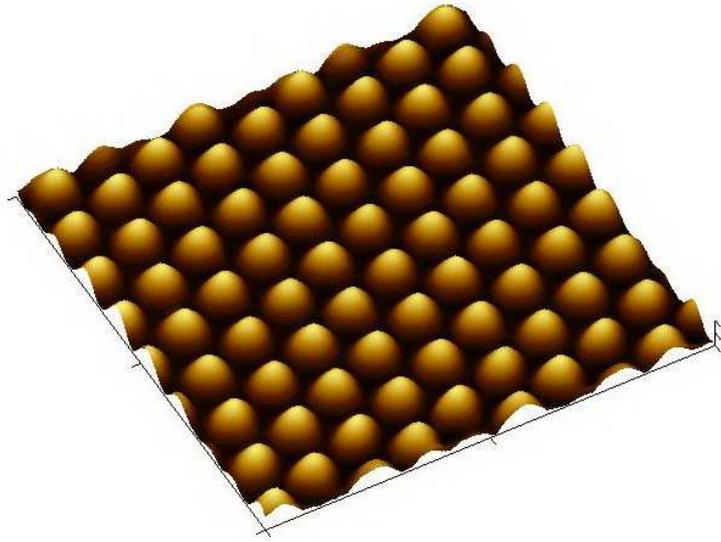


圖 4.3.10 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣立體圖

40 μm × 40 μm 圓錐高度 1.7 μm 週期 5 μm

圖 4.3.11 與圖 4.3.12 所示為掃描範圍 20 μm × 20 μm, PSS 表面形貌平面與立體圖樣

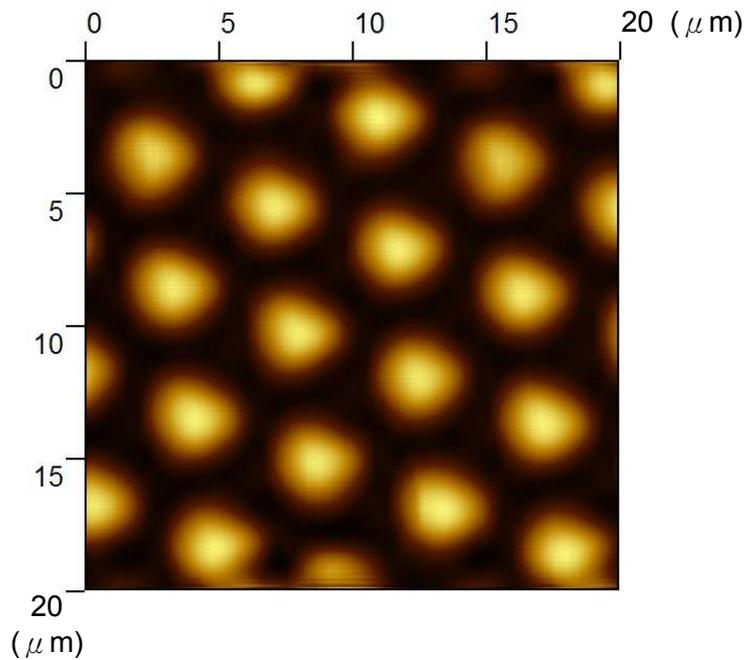


圖 4.3.11 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣

20 μm × 20 μm 圓錐高度 1.7 μm 週期 5 μm

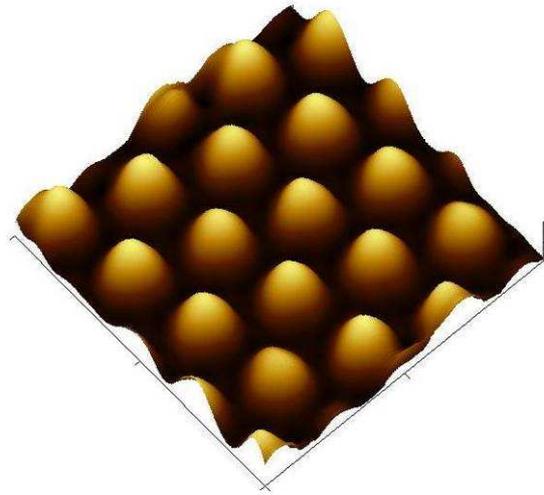


圖 4.3.12 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣立體圖

$20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 圓錐高度 $1.7\mu\text{m}$ 週期 $5\mu\text{m}$

圖 4.3.13 與圖 4.3.14 所示為掃描範圍 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, PSS 表面形貌平面與立體圖樣

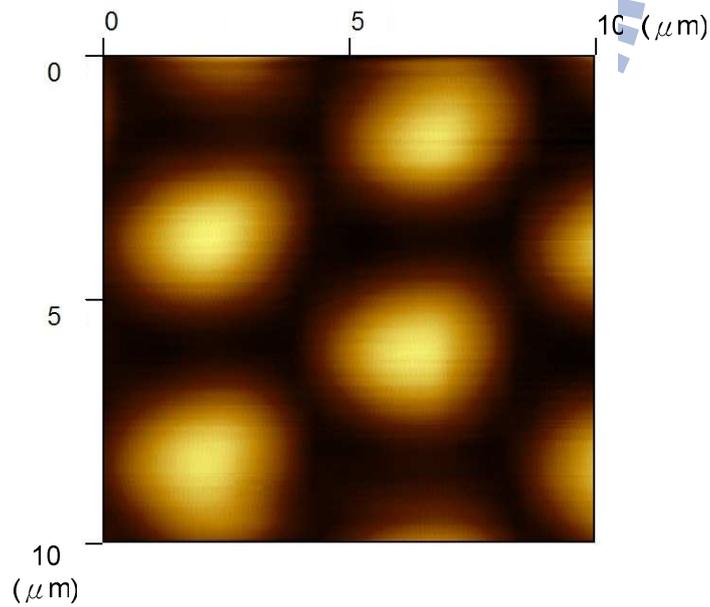


圖 4.3.13 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣

$10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 圓錐高度 $1.7\mu\text{m}$ 週期 $5\mu\text{m}$

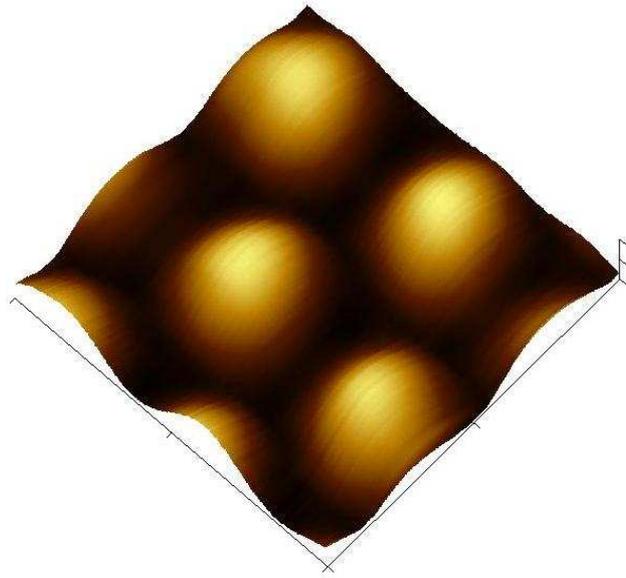


圖 4.3.14 PSS 樣品 AFM 掃描圖樣立體圖

10 μm × 10 μm 圓錐高度 1.7 μm 週期 5 μm

在開啟回饋控制掃描時，需特別注意 PID 控制器的 P 增益與 I 增益參數值的設定，如果 P 與 I 增益值設定太大，則會造成震盪的情形，若是 P 與 I 增益值設定太小，則會造成回饋過慢，無法即時調整，造成影像有斷層差，且模糊不清。

圖 4.3.16 與圖 4.3.17 所示為 PI 值調整不當所造成影像扭曲與斷層之結果

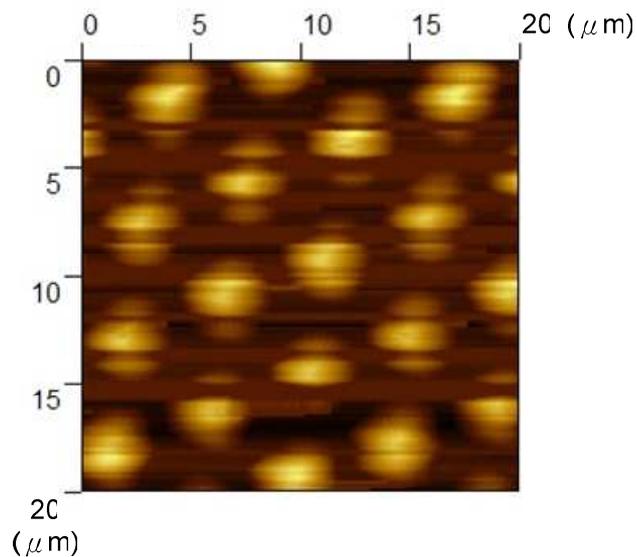


圖 4.3.15 P 與 I 增益值調整不當的 PSS 樣品掃描圖樣

20 μm × 20 μm 圓錐高度 1.7 μm 週期 5 μm

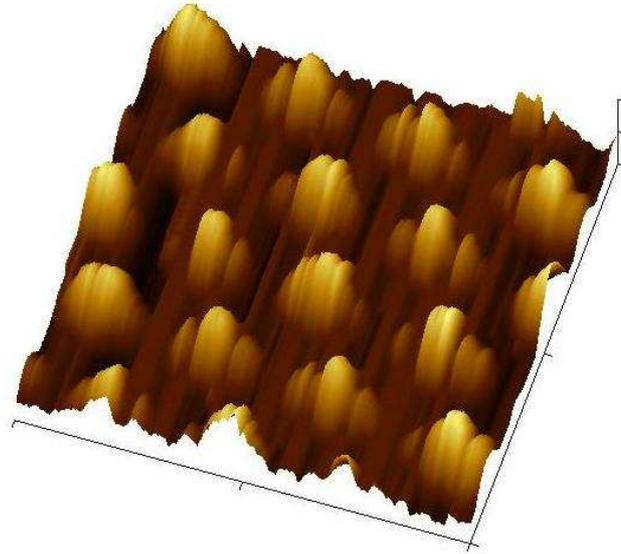


圖 4.3.16 P 與 I 增益值調整不當的 PSS 樣品掃描圖樣立體圖

20 μm \times 20 μm 圓錐高度 1.7 μm 週期 5 μm

4.3.4. 小結

在論文實驗中，根據樣品表面高低形貌的不同，我們可選擇定置樣品式 AFM 操作於定高或是定力模式。使用定高模式時，需特別注意樣品表面高低差不可超出探針工作的線性範圍，否則掃描出的影像並不足以代表樣品表面的真實形貌，並且還可能有將針撞斷的風險。而使用定力模式時，P 與 I 增益值於剛開始掃描樣品時需做微調，一旦調整至適合之值，則接下來掃描樣品沿用原值即可。

另外，由鎖相放大器輸出的振幅電壓改變訊號所繪製的探針力圖中可看出，其線性區域的電壓訊號變化，足以達到奈米等級的量測範圍。從本章實驗結果中得知，定置樣品式 AFM 在掃描已知樣品上，所獲得的二維平面圖樣與三維立體影像皆與預期結果相符合。

五、結論與展望

由於傳統 AFM 對於尺寸、重量超過載台限制之樣品，需先做切割等破壞性處理。對於檢測來說，增加不便與失真等考量。本論文中闡述定置樣品式 AFM 的可行性，如此一來，對於尺寸較大之樣品，則不需做切割等動作，可避免樣品的破壞與失真。

能夠達到定置樣品式 AFM 的關鍵技術之一，為利用光碟機讀取頭作為量測探針懸臂撓曲的模組。由於其具有準確、輕巧等優點，因此可置放於三維奈米定位平台之上，達成對樣品表面掃描之目的。另一關鍵元件為探針光路對正模組，使探針能夠準確定位於 PUH 量測區域之內。

實驗設計為掃描已知樣品，觀察所設計 AFM 成像是否如預期。檢測樣品 PSS 為目前 LED 產業中的重要元件之一，實驗中所用之 PSS 面積為 2 吋，其尺寸非傳統 AFM 所能檢測。實驗結果所掃描出來之圖樣，範圍從 $10\mu\text{m}$ ~ $40\mu\text{m}$ ，其所呈現圖樣，符合已知蝕刻圖樣，可驗證其性能。

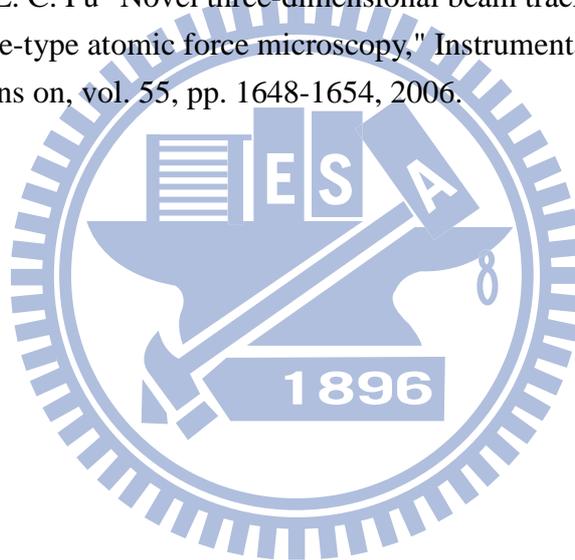
由於樣品掃描範圍取決於三維奈米平台，因此圖樣尺寸最大為 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 。未來希望可以發展接圖的技術，亦即除了使用三維奈米平台作為掃描之外，XY 粗調平台亦加入掃描的作用之中，而不只是作為定位用。

參考文獻

- [1] M. R. Scheinfein, et al., "Scanning electron-microscopy with polarization analysis (sempa)," *Review of Scientific Instruments*, vol. 61, pp. 2501-2526, Oct 1990.
- [2] G. Binnig and H. Rohrer, "Scanning tunneling microscopy - from birth to adolescence," *Reviews of Modern Physics*, vol. 59, pp. 615-625, Jul 1987.
- [3] J. Liu and J. M. Cowley, "High-resolution scanning electron-microscopy of surface-reactions," *Ultramicroscopy*, vol. 23, pp. 463-472, 1987.
- [4] S. Verma, et al., "Multi-axis maglev nanopositioner for precision manufacturing and manipulation applications," pp. 1159-1167.
- [5] S. C. Chen and M. L. Culpepper, "Design of a six-axis micro-scale nanopositioner - mu hexflex," *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, vol. 30, pp. 314-324, Jul 2006.
- [6] A. Layson, et al., "Resistance measurements at the nanoscale: Scanning probe ac impedance spectroscopy," pp. 2207-2213.
- [7] L. Fourdrinier, et al., "Electrical properties measurements on individual carbon nanofibers by scanning spreading resistance microscopy," *Journal of Applied Physics*, vol. 104, Dec 2008.
- [8] P. Grütter, et al., "Magnetic imaging by atomic force microscope (invited) (abstract)," *Journal of Applied Physics*, vol. 63, p. 2947, 1988.
- [9] X. W. Wang, et al., "Stm images of guanine on graphite surface and the role of tip-sample interaction," *Journal of Chemical Physics*, vol. 105, pp. 3747-3752, Sep 1996.
- [10] M. Schmid. http://www.lap.tuwien.ac.at/www/surface/stm_gallery/stm_schematic [Online].
- [11] G. Binnig, et al., "Atomic force microscope," *Physical Review Letters*, vol. 56, pp. 930-933, Mar 1986.
- [12] S. H. Ke, et al., "First-principles studies of tip-sample interaction and stm-afm image formation on $\text{TiO}_2(110)-1 \times 1$ and $\text{TiO}_2(110)-1 \times 2$ surfaces," *Physical Review B*, vol. 65, Mar 2002.
- [13] U. Hartmann, "Magnetic force microscopy - some remarks from the micromagnetic point of view," *Journal of Applied Physics*, vol. 64, pp. 1561-1564, Aug 1988.
- [14] A. Bek, et al., "Apertureless scanning near field optical microscope with sub-10 nm resolution," *Review of Scientific Instruments*, vol. 77, p. 043703, 2006.
- [15] J. R. Matey and J. Blanc, "Scanning capacitance microscopy," *Journal of Applied Physics*, vol. 57, pp. 1437-1444, 1985.
- [16] J.-A. Ruan and B. Bhushan, "Atomic-scale and microscale friction studies of graphite and diamond using friction force microscopy," *Journal of Applied Physics*, vol. 76, p.

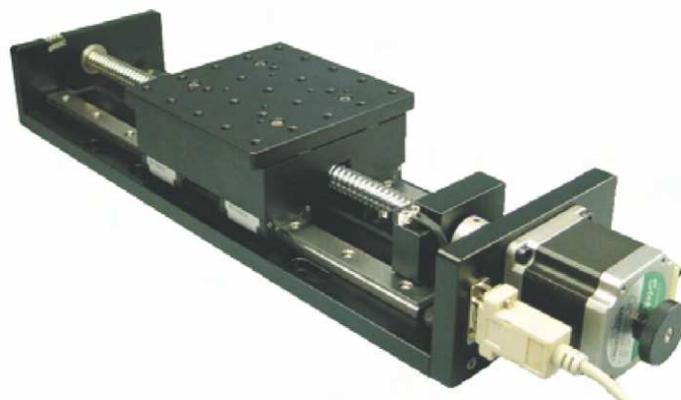
- 5022, 1994.
- [17] W. Haberle, et al., "Force microscopy on living cells," pp. 1210-1213.
- [18] D. M. Carberry, et al., "Mapping real-time images of high-speed afm using multitouch control," *Nanotechnology*, vol. 20, Oct 2009.
- [19] M. Sitti and H. Hashimoto, "Controlled pushing of nanoparticles: Modeling and experiments," pp. 199-211.
- [20] G. M. Clayton and S. Devasia, "Conditions for image-based identification of spm-nanopositioner dynamics," *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics*, vol. 14, pp. 405-413, Aug 2009.
- [21] C. Meyer, et al., "Slip-stick step-scanner for scanning probe microscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, Jun 2005.
- [22] J. Y. Shim and D. G. Gweon, "Piezo-driven metrological multiaxis nanopositioner," *Review of Scientific Instruments*, vol. 72, pp. 4183-4187, Nov 2001.
- [23] P. S. Jung and D. R. Yaniv, "Novel stationary-sample atomic force microscope with beam-tracking lens," *Electronics Letters*, vol. 29, pp. 264-266, Feb 1993.
- [24] B. J. Eves, "Design of a large measurement-volume metrological atomic force microscope (afm)," *Measurement Science & Technology*, vol. 20, Aug 2009.
- [25] J. Kwon, et al., "Atomic force microscope with improved scan accuracy, scan speed, and optical vision," *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, pp. 4378-4383, Oct 2003.
- [26] K. Nakano, "Three-dimensional beam tracking for optical lever detection in atomic force microscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, pp. 137-141, Jan 2000.
- [27] S. K. Hung, et al., "Novel three-dimensional beam tracking system for stationary-sample type atomic force microscopy," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE, 2004*, pp. 1985-1989 Vol.3.
- [28] F. J. Giessibl, "Advances in atomic force microscopy," *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, p. 949, 2003.
- [29] 黃英碩, "掃描探針顯微術的原理及應用," *科儀新知*, p. 11, 2005.
- [30] 黃英碩, et al., "生根在中研院物理所的掃描探針顯微術," *科儀新知*, p. 10, 2005.
- [31] 林明彥, et al., "原子力顯微儀的原理 (上)," *科儀新知*, p. 12, 2005.
- [32] 林明彥, et al., "原子力顯微儀的原理 (下)," *科儀新知*, p. 11, 2005.
- [33] P. K. Hansma, et al., "A new, optical-lever based atomic-force microscope," *Journal of Applied Physics*, vol. 76, pp. 796-799, Jul 1994.
- [34] S. C. S. C. Minne, *Bringing scanning probe microscopy up to speed*. Boston: Kluwer, 1999.
- [35] M. Tortonese, et al., "Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection," *Applied Physics Letters*, vol. 62, pp. 834-836, Feb 1993.
- [36] O. Pfeiffer, et al., "Lateral-force measurements in dynamic force microscopy,"

- Physical Review B, vol. 65, Apr 2002.
- [37] E. T. Hwu, et al., "Measurement of cantilever displacement using a compact disk/digital versatile disk pickup head," pp. 2368-2371.
- [38] L. Meng-Hu, et al., "Measuring the deflection of the cantilever in atomic force microscope with an optical pickup system," in Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on, 2006, pp. 592-596.
- [39] P. Ge and J. Musa, "Tracking control of a piezoceramic actuator," Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol. 4, pp. 209-216, 1996.
- [40] T. R. Rodriguez and R. Garcia, "Theory of q control in atomic force microscopy," Applied Physics Letters, vol. 82, pp. 4821-4823, Jun 2003.
- [41] H. Holscher and U. D. Schwarz, "Theory of amplitude modulation atomic force microscopy with and without q-control," International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 42, pp. 608-625, May 2007.
- [42] S. K. Hung and L. C. Fu "Novel three-dimensional beam tracking system for stationary-sample-type atomic force microscopy," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 55, pp. 1648-1654, 2006.



附錄 A

三維粗調平台



PMT120-Series

XY 軸向電動位移平台

上圖所示為 XY 平面定位所使用之電動位移平台 PMT-120-200。

由國內廠商匠星公司製造，表列為其規格：

平面定位所使用之電動位移平台規格（廠商資料）

解析度	2.5 μ m
重現度	$\pm 2.5\mu$ m
位移精準度	$\pm 0.05/300$ mm
平直度	± 0.015 mm
全行程	200mm
最大負載	30kg
本體重量	4.9kg



Z 軸向電動位移平台

上圖所示為 Z 軸向定位使用之電動位移平台

由日本廠商駿河精機株式會社製造，表列為其規格：

Z 軸向定位電動位移平台規格（廠商資料）

解析度	0.25 μ m/pulse (Full step)
	0.125 μ m/pulse (Half step)
重現度	$\pm 0.5\mu$ m
位移精準度	7 μ m
線性度	30 μ m or less
全行程	4mm
最大負載	7kg
本體重量	1.14 kg

附錄 B

三維掃描壓電平台(nm)



三維向奈米定位器

上圖所示為三維向奈米定位器，由國外PI公司製造，表列為其規格：

三維奈米定位器規格（廠商資料）

Open-loop travel	120/axis μm
Control Input Voltage	-2V to +10V
Closed-loop travel	100/axis μm
Control Input Voltage	0V to +10V
Open-loop resolution	0.2 nm
Closed-loop resolution	1 nm
Linearity	0.1%
Repeatability	< 10nm
Pitch (X,Y)	< $\pm 5\mu\text{rad}$
Yaw in X	< $\pm 20\mu\text{rad}$
Yaw in Y	< $\pm 10\mu\text{rad}$
Load capacity	15N
Mass	0.32 kg

附錄 C



鎖相放大器

上圖所示為將偵測訊號與參考交流訊號轉換為振幅與相位差之鎖相放大器，由國內先鋒科技代理，表列為鎖相放大器規格資料。

鎖相放大器規格（廠商資料）

Input impedance	50 Ω or 1 M Ω + 30 pF
Bandwidth	25 kHz to 200 MHz
Sensitivity	<1 MHz 100 nVrms to 1 Vrms full scale <50 MHz 1 μ Vrms to 1 Vrms full scale <200 MHz 10 μ Vrms to 1 Vrms full scale
Gain accuracy	<50 MHz ± 0.25 dB <200 MHz ± 0.50 dB
Gain stability	0.2 %/ $^{\circ}$ C
Dynamic reserve	up to 80 dB
External reference	25 kHz to 200 MHz
Internal reference	25 kHz to 200 MHz
Reference outputs	Phase locked to int./ext. reference