

國立臺灣大學工學院機械工程研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



提升像散式原子力顯微鏡靈敏度之研究

Study on Improving Sensitivity of Astigmatic Atomic
Force Microscope

鄭守程

Shou-Cheng Jheng

指導教授：廖先順 博士

Advisor: Hsien-Shun Liao, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July, 2023

致謝



短短兩年的碩士生涯轉瞬即逝，首先感謝廖先順教授的指導，給予我在研究上許多幫助，不僅親自帶領我做實驗，對我在研究上遇到的問題也總是有耐心的為我解惑、提供建議，並且在研究陷入困難時提供許多方向，使我能夠順利完成這篇碩士論文。

感謝實驗室的同學們，鉉權、政融、亞康、式新、柏魁、心平、建源、沂浩學長的研究經驗分享，給予我 AFM 機構設計上許多幫助。同屆的邑華、暄文、俊佑從一起修課、一起在實驗室為了論文而奮鬥，到閒暇之餘打球、打遊戲與出門遊玩等，令我兩年碩士生活過得相當充實。還有泓升、凱彥、彥瑋、起雲、沛宸學弟妹們平時的各種幫忙，讓我能夠順利完成實驗。此外還要感謝我的朋友們晨聿、睿恆、哲誌等，每次與你們打遊戲、聊天總是令我壓力減輕不少。

感謝中研院精工室，完美完成我的許多加工工件，使我能夠順利架設出實驗系統。

最後要感謝我的父母親與家人們，給予我衣食無缺的碩士生活，對在外地的我也經常給予支持、關懷與祝福，讓我順利完成碩士學位。

摘要



原子力顯微鏡(Atomic Force Microscope, AFM)具有奈米級解析度、不受真空環境限制等優點，因此經常被應用於生醫領域。高速原子力顯微鏡(High-Speed AFM, HS-AFM)為了對動態生物樣品進行成像，必須具備可量測高共振頻率之超小型微懸臂探針的微懸臂感測系統。商用像散式光學讀取頭因具有光點小、頻寬高等優點，可用於高速原子力顯微鏡量測超小型微懸臂。由於微懸臂感測系統之量測靈敏度對成像解析度至關重要，本研究透過改變藍光讀取頭內部之準直鏡位置、以及替換紅光讀取頭光源為穩定的氦氖雷射等不同方式進行靈敏度性能比較。其中在使用氦氖雷射替換紅光讀取頭光源，並使用鍍金微懸臂探針 FMAuD 時可得到較佳之靈敏度 0.65 mV/nm，系統雜訊峰對峰值 2.7 mV，雜訊對應位移量 4.2 nm，其位移解析度可高於原商用紅光讀取頭。

關鍵字：高速原子力顯微鏡、光學讀取頭、像散、靈敏度

Abstract



Atomic Force Microscope (AFM) has nanoscale resolution and can be operated in ambient, liquid and vacuum environments. These advantages make AFM widely used in the field of biomedicine. In order to image dynamic biomedical phenomena, high-speed AFM (HS-AFM) requires a cantilever detection system which can measure ultra-small cantilever with high resonance frequency. Commercial astigmatic optical pickup head has advantages of small laser spot size and high bandwidth, which is suitable for measuring ultra-small cantilever in HS-AFM. The sensitivity of the cantilever detection system is crucial for achieving high imaging resolution. In this study, different optical configurations including changing the position of the collimator inside the blue-ray pickup head and replacing the light source of the red-light pickup head with a stable He-Ne laser were tested for optimizing the sensitivity. The experimental results show that using the red-light pickup head with the He-Ne laser to measure a gold-coated cantilever tip FMAuD had a highest sensitivity of 0.65 mV/nm. The peak-to-peak noise of the system was 2.72 mV, which corresponded to 4.2 nm in displacement. The displacement resolution of the modified optical configuration was higher than the original red-light pickup head.

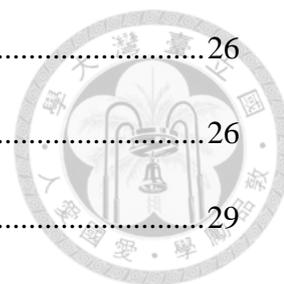
Keywords: High-speed atomic force microscope, Optical pickup head, Astigmatism, Sensitivity

目錄

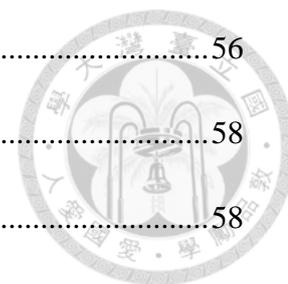


致謝.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	1
1.2.1 AFM 之歷史及原理.....	1
1.2.2 HS-AFM 之發展.....	3
1.2.3 像散式光學檢測法.....	9
1.2.4 AFM 微懸臂量測靈敏度.....	13
1.3 研究目的.....	16
1.4 內容簡介.....	17
第二章 原子力顯微鏡原理與靈敏度.....	18
2.1 AFM 原理與架構.....	18
2.2 AFM 與樣品間作用力.....	19
2.3 微懸臂探針.....	21
2.4 光偏折式微懸臂感測系統靈敏度.....	22

第三章	實驗架構與設計.....	26
3.1	像散式光路設計.....	26
3.2	整體架構設計.....	29
3.2.1	氦氖雷射固定機構.....	30
3.2.2	光纖對位與調控機構.....	31
3.2.3	光纖輸出端對位機構.....	32
3.2.4	光路固定支架.....	33
3.2.5	微懸臂機構.....	34
3.3	實驗儀器.....	37
3.3.1	功率計.....	37
3.3.2	位置感測器.....	38
3.3.3	壓電掃描器與控制器.....	39
3.3.4	讀取頭放大電路.....	41
3.3.5	Z軸步進滑台.....	42
3.3.6	控制系統.....	43
3.4	實驗架構.....	43
3.4.1	光強與訊雜比量測實驗.....	44
3.4.2	靈敏度量測實驗.....	45
第四章	實驗流程與結果.....	48
4.1	光強與訊雜比量測實驗.....	48
4.1.1	光強與訊雜比量測實驗流程.....	48
4.1.2	光強與訊雜比量測結果.....	49



4.1.3	光強與訊雜比量測結果討論.....	56
4.2	靈敏度量測實驗.....	58
4.2.1	靈敏度量測實驗流程.....	58
4.2.2	靈敏度量測結果.....	61
4.2.3	靈敏度量測結果討論.....	75
第五章	結論與未來展望.....	78
	參考文獻.....	79
附錄 A	紅光讀取頭規格表.....	82
附錄 B	氦氖雷射規格表(HNL150LB).....	83
附錄 C	PDQ80A.....	85
附錄 D	微懸臂探針規格表(FMAuD).....	87
附錄 E	微懸臂探針規格表(AC240TS).....	88
附錄 F	微懸臂探針規格表(SCM-PIC).....	90
附錄 G	微懸臂探針規格表(MLCT-A).....	91



圖目錄

圖 1.1 G. Binnig 與 H. Rohrer 等人開發之 STM 結構示意圖[1]。.....	2
圖 1.2 G. Binnig 與 C. F. Quate 等人設計之 AFM 架構[2]。.....	2
圖 1.3 C. F. Quate 與 R. C. Barrett 等人開發之 HS-AFM 以 3 frames/s 量測 GaAs MESFET 圖像[3]。.....	3
圖 1.4 S. R. Manalis 等人開發之 HS-AFM 示意圖[4]。.....	4
圖 1.5 S. R. Manalis 等人以探針尖端速度 3 mm/s 掃描之積體電路圖像[4]。.....	4
圖 1.6 M. B. Viani 等人開發之新型 HS-AFM 架構[5]。.....	5
圖 1.7 M. B. Viani 等人以輕敲式 HS-AFM 在 (a)5.6 秒，(b)1.7 秒拍攝之雲母表面 DNA 圖像[5]。.....	5
圖 1.8 T. Ando 等人研發之物鏡型偏轉檢測系統示意圖[6]。.....	6
圖 1.9 以 12.5 frame/s 的速度成像肌球蛋白 V 於雲母表面進行布朗運動[6]。.....	7
圖 1.10 Y. Suzuki 等人開發的高速掃針式掃描器之(a)上視圖，(b)右視圖[7]。.....	8
圖 1.11 雷射對準示意圖之(a) z'方向，(b) x'與 y'方向[7]。.....	8
圖 1.12 S. Fukuda 等人開發之掃針式 HS-AFM 其(a)內部光路，(b)整體架構示意 圖[9]。.....	9
圖 1.13 二向色鏡傾架機構之(a)原理示意圖，(b)整體解構示意圖，(c)側視圖[9]。	9
圖 1.14 像散原理示意圖。.....	10
圖 1.15 像散式系統光路架構示意圖。.....	11
圖 1.16 聚焦誤差訊號曲線圖。.....	11
圖 1.17 基於像散偵測系統之 HS-AFM(a)系統架構圖，(b)實體架構圖[10]。.....	12
圖 1.18 使用微懸臂 USC-F5-k30 在不同掃描速度下之影像(a)10 lines/s，(b)100 lines/s[10]。.....	13
圖 1.19 Y. C. Shiu 開發的微懸臂感測系統之(a)光路圖，(b)設計圖[11]。.....	14

圖 1.20 A. T. Wu 開發的微懸臂感測系統之(a)光路圖，(b)設計圖[12]。	15
圖 1.21 S. S. Chen 開發的微懸臂感測系統之(a)光路圖，(b)設計圖[13]。	16
圖 2.1 AFM 系統架構示意圖。	18
圖 2.2 微懸臂探針與樣品間交互作用力與距離之關係圖[14]。	20
圖 2.3 (a)接觸式、(b)非接觸式與(c)輕敲式掃描示意圖。	20
圖 2.4 微懸臂探針示意圖。	21
圖 2.5 光偏折式檢測法於(a)空氣中，(b)水溶液中量測示意圖[16]。	23
圖 2.6 在(a)空氣中與(b)水中之靈敏度差異[16]。	24
圖 2.7 在(a)空氣中與(b)水中之雜訊密度差異[16]。	24
圖 3.1 藍光讀取頭之(a)正面，(b)內部結構，以及(c)紅光讀取頭結構。	27
圖 3.2 本研究所用像散式光路之(a)紅光讀取頭，(b)藍光讀取頭，(c)藍光讀取頭 改準直鏡位置與(d)氦氖雷射紅光讀取頭。	29
圖 3.3 (a) AFM 整體架構圖，(b)AFM 局部架構圖。	30
圖 3.4 氦氖雷射固定機構。	31
圖 3.5 光纖對位與調控機構。	32
圖 3.6 光纖輸出端對位機構。	32
圖 3.7 (a)紅光與(b)藍光讀取頭光路固定支架機構。	33
圖 3.8 光路固定支架整體機構。	34
圖 3.9 紅光讀取頭用微懸臂機構之(a)整體，(b)局部結構圖。	35
圖 3.10 藍光讀取頭用微懸臂機構之(a)整體，(b)局部結構圖。	36
圖 3.11 微懸臂機構及位移平台。	37
圖 3.12 功率計與功率探頭。	38
圖 3.13 PDQ80A。	39
圖 3.14 Z 軸壓電定位平台。	40
圖 3.15 E-665 掃描控制器。	40
圖 3.16 自製放大器。	41

圖 3.17 (a)紅光讀取頭放大電路，(b)藍光讀取頭放大電路。	42
圖 3.18 Z 軸步進滑台。	42
圖 3.19 PXIe 控制系統。	43
圖 3.20 光強與訊雜比實驗架構圖。	44
圖 3.21 第 5 組之光強與訊雜比量測實驗架構實體照片。	44
圖 3.22 (a)紅光讀取頭，(b)藍光讀取頭、(c)藍光讀取頭改準直鏡位置以及(d)氦氖雷射紅光讀取頭靈敏度量測實驗架構圖。	46
圖 3.23 靈敏度量測實驗架構實體照片，以圖 3.22(d)為例。	47
圖 4.1 光強與訊雜比量測實驗流程。	48
圖 4.2 光功率量測位置示意圖。	50
圖 4.3 光功率量測位置實體照片。	50
圖 4.4 紅光讀取頭訊雜比量測結果。	51
圖 4.5 藍光讀取頭訊雜比量測結果。	51
圖 4.6 藍光讀取頭改準直鏡位置訊雜比量測結果。	52
圖 4.7 氦氖雷射紅光讀取頭使用(a)40%，(b)60%與(c)80%青板玻璃反射片之訊雜比量測結果。	54
圖 4.8 氦氖雷射光源在使用(a)60%與(b)80%青板玻璃反射片之訊雜比量測結果。	55
圖 4.9 PDQ80A 響應率與波長關係圖。	56
圖 4.10 靈敏度量測結果示意圖。	58
圖 4.11 (a)不合理與(b)合理之 FES 情況。	59
圖 4.12 靈敏度量測實驗流程。	60
圖 4.13 紅光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。	61
圖 4.14 紅光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之系統雜訊圖。	61
圖 4.15 紅光讀取頭使用微懸臂探針 AC240TS 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬	

合圖。.....	62
圖 4.16 紅光讀取頭使用微懸臂探針 AC240TS 之系統雜訊圖。.....	62
圖 4.17 紅光讀取頭使用微懸臂探針 SCM-PIC 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。.....	63
圖 4.18 紅光讀取頭使用微懸臂探針 SCM-PIC 之系統雜訊圖。.....	63
圖 4.19 紅光讀取頭使用微懸臂探針 MLCT-A 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。.....	64
圖 4.20 紅光讀取頭使用微懸臂探針 MLCT-A 之系統雜訊圖。.....	64
圖 4.21 藍光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。.....	65
圖 4.22 藍光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之系統雜訊圖。.....	65
圖 4.23 藍光讀取頭使用微懸臂探針 AC240TS 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。.....	66
圖 4.24 藍光讀取頭使用微懸臂探針 AC240TS 之系統雜訊圖。.....	66
圖 4.25 藍光讀取頭使用微懸臂探針 SCM-PIC 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。.....	67
圖 4.26 藍光讀取頭使用微懸臂探針 SCM-PIC 之系統雜訊圖。.....	67
圖 4.27 藍光讀取頭使用微懸臂探針 MLCT-A 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。.....	68
圖 4.28 藍光讀取頭使用微懸臂探針 MLCT-A 之系統雜訊圖。.....	68
圖 4.29 光路模組藍光讀取頭改準直鏡位置，內部準直鏡固定位置。.....	69
圖 4.30 藍光讀取頭改準直鏡位置使用微懸臂探針 AC240TS 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。.....	70
圖 4.31 藍光讀取頭改準直鏡位置使用微懸臂探針 AC240TS 之系統雜訊圖。.....	70
圖 4.32 氦氖雷射紅光讀取頭不使用青板玻璃反射片之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。.....	71

圖 4.33 氦氖雷射紅光讀取頭不使用青板玻璃反射片之系統雜訊圖。.....	71
圖 4.34 氦氖雷射紅光讀取頭使用 40%青板玻璃反射片之(a)靈敏度量測結果，(b) 線性擬合圖。.....	72
圖 4.35 氦氖雷射紅光讀取頭使用 40%青板玻璃反射片之系統雜訊圖。.....	72
圖 4.36 氦氖雷射紅光讀取頭使用 60%青板玻璃反射片之(a)靈敏度量測結果，(b) 線性擬合圖。.....	73
圖 4.37 氦氖雷射紅光讀取頭使用 60%青板玻璃反射片之系統雜訊圖。.....	73
圖 4.38 氦氖雷射紅光讀取頭使用 80%青板玻璃反射片之(a)靈敏度量測結果，(b) 線性擬合圖。.....	74
圖 4.39 氦氖雷射紅光讀取頭使用 80%青板玻璃反射片之系統雜訊圖。.....	74

表目錄

表 4.1 氦氖雷射 HNL150LB 經不同規格青板玻璃反射片後各位置雷射強度。	49
表 4.2 訊雜比量測結果。	57
表 4.3 本實驗所用 4 種不同微懸臂探針之參數。	76
表 4.4 紅光讀取頭使用 4 種不同微懸臂探針靈敏度量測結果。	76
表 4.5 藍光讀取頭使用 4 種不同微懸臂探針靈敏度量測結果。	76
表 4.6 藍光讀取頭改準直鏡位置使用微懸臂探針 AC240TS 靈敏度量測結果。	77
表 4.7 氦氖雷射紅光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 於不同光源強度下靈敏度量測結果。	77

第一章 緒論



1.1 研究背景

顯微鏡自發明以來，在各種研究上的貢獻推動了文明的發展與科技的進步，而科學家也不被現狀所滿足，不斷追求更高性能的顯微鏡而努力。

顯微鏡根據類型主要可以分為光學顯微鏡、電子顯微鏡以及掃描探針顯微鏡 (Scanning Probe Microscope, SPM)，而原子力顯微鏡為目前最廣泛被使用之一種 SPM。光學顯微鏡的解析度被光繞射現象給限制，放大倍率一般限制在可見光波長範圍，而 AFM 可以提供更高的奈米解析度圖像。電子顯微鏡雖然能提供高解析度圖像，但僅限於二維對比圖像、並一般要求在真空環境下才可得到較佳影像品質。另一方面，AFM 可以形成真正的三維表面圖、在常壓甚至液體環境下都可以正常工作，並且不需要如同電子顯微鏡一樣對樣品進行鍍金等特殊處理，也因此經常被應用於生醫領域用來測量活體生物組織。

然而一般 AFM 其成像速度很慢，可能趕不上活體細胞的變化，因此高速原子力顯微鏡的開發顯得非常重要。

1.2 文獻回顧

1.2.1 AFM 之歷史及原理

1981 年，G. Binnig 與 H. Rohrer 發明了掃描穿隧顯微鏡 (Scanning Tunneling Microscope, STM) [1]，該顯微鏡的原理是以探針尖端接近樣品時所產生之穿隧電流 (Tunneling Current) 來當作參考訊號，如圖 1.1 所示，藉由壓電致動器與回饋機制令探針與樣品之間的距離保持定值，即可掃描取得 3D 表面樣貌。

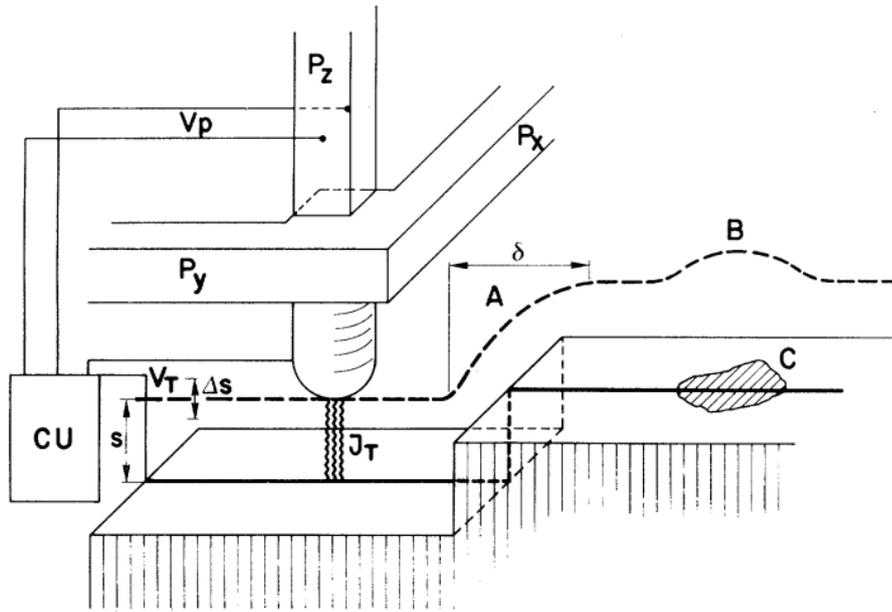


圖 1.1 G. Binnig 與 H. Rohrer 等人開發之 STM 結構示意圖[1]。

STM 問世後不久，G. Binnig 與 C. F. Quate 等人於 1986 年發明了 AFM[2]，其架構如圖 1.2 所示，其原理為藉由一末端有鑽石探針的微懸臂與樣品接近時，會因為與樣品之間的相互作用力而使微懸臂彎曲，再透過 STM 探針感測此變形量。AFM 利用微懸臂變形量做為參考訊號，成功克服 STM 受限於導電樣品的問題，大幅擴展應用範圍。

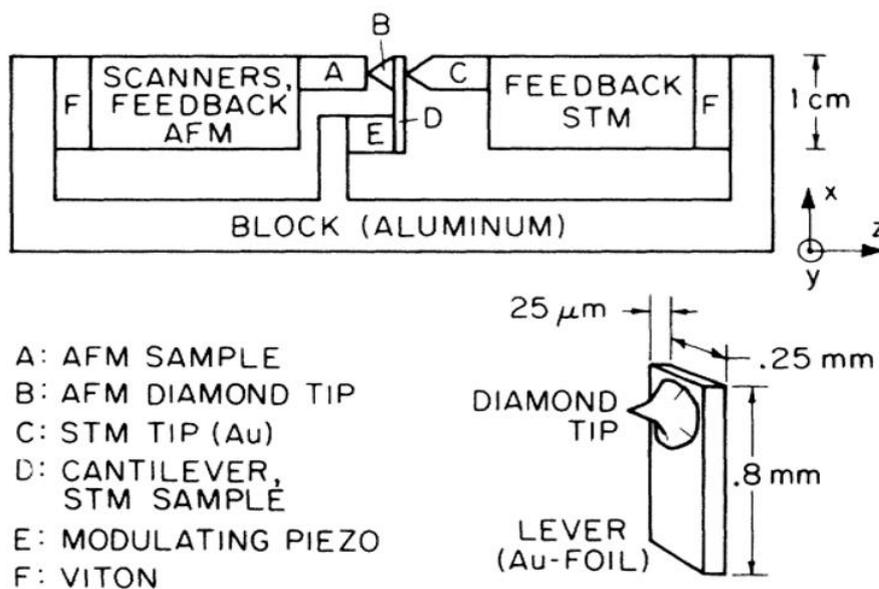


圖 1.2 G. Binnig 與 C. F. Quate 等人設計之 AFM 架構[2]。

1.2.2 HS-AFM 之發展

AFM 具有高解析度、不需對樣品進行處理即可量測的特性，因此經常應用於生醫領域，但是由於傳統 AFM 成像時間慢，無法跟上活體生物分子的變化，因此為了提升 AFM 的量測速度，開啟了 HS-AFM 的一系列發展。

C. F. Quate 與 R. C. Barrett 於 1990 年開啟了 HS-AFM 的發展[3]，透過微加工(Microfabrication)製造微懸臂探針，該探針具有共振頻率 78.7 kHz，彈性常數 0.59 N/m，使得系統取像速率(Frame Rate)達到 3 Hz。

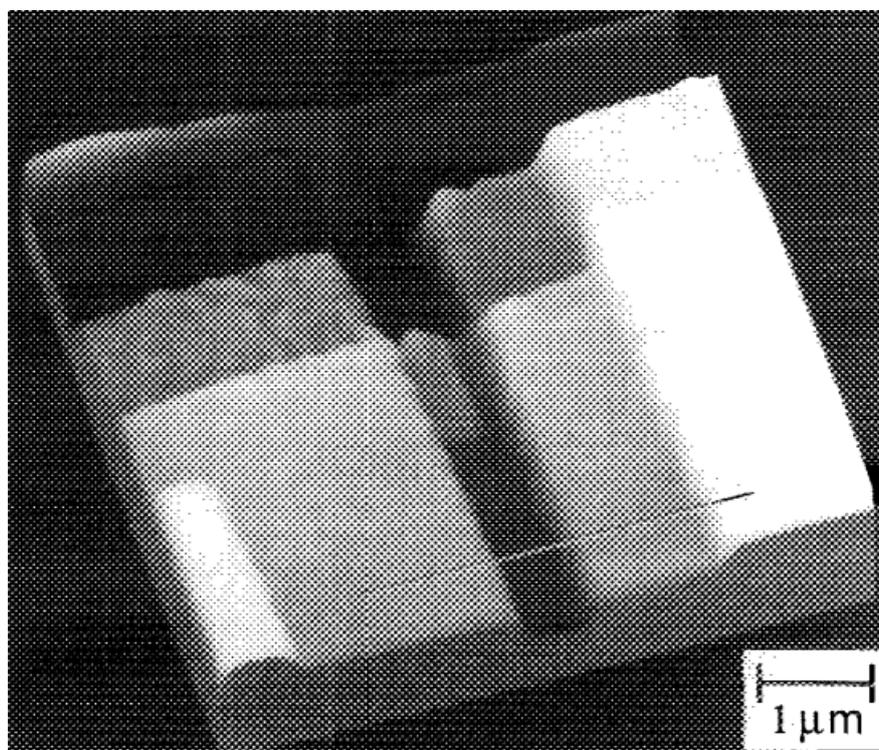


圖 1.3 C. F. Quate 與 R. C. Barrett 等人開發之 HS-AFM 以 3 frames/s 量測 GaAs MESFET 圖像[3]。

1996 年，S. R. Manalis 等人開發之 HS-AFM 改善了因為壓電管機械響應差導致掃描速度無法超過 200 $\mu\text{m/s}$ 的限制[4]，如圖 1.4 所示，該 HS-AFM 透過氧化鋅薄膜壓電致動器(ZnO Piezoelectric Film)提供微懸臂垂直運動以及利用壓阻式感測器(Piezoresistive Sensor)檢測微懸臂彎曲，使得此 HS-AFM 系統探針尖端速度達到 3 mm/s，能夠在 15 秒獲得一張 512 \times 512 pixels 之圖像。

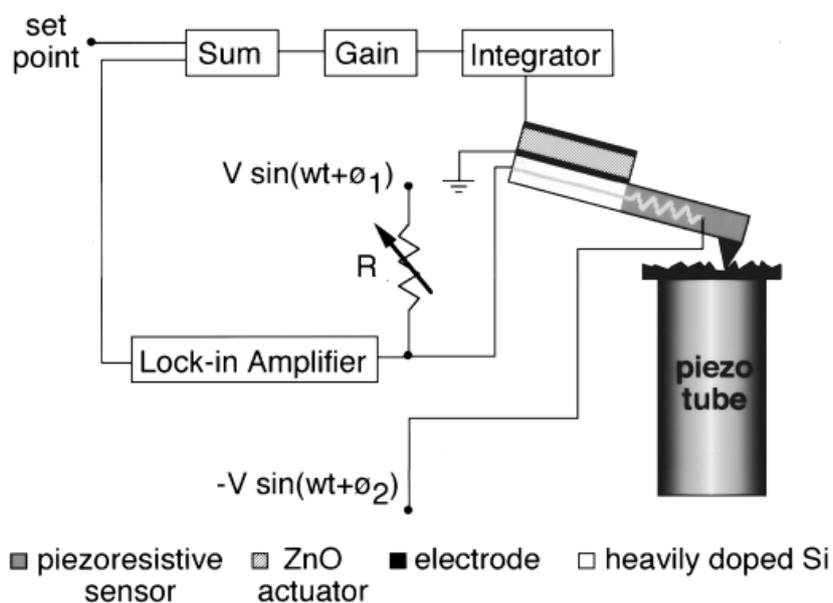


圖 1.4 S. R. Manalis 等人開發之 HS-AFM 示意圖[4]。

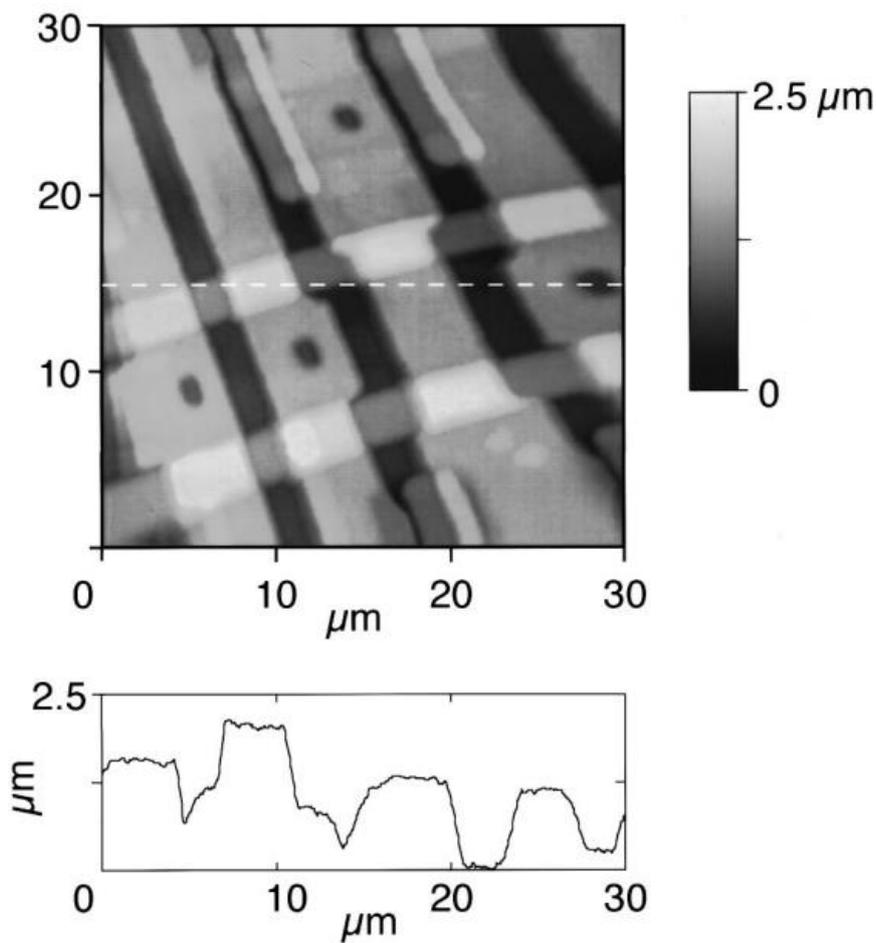


圖 1.5 S. R. Manalis 等人以探針尖端速度 3 mm/s 掃描之積體電路圖像[4]。

為了量測超小型微懸臂的偏折，便需要特製光路，1999 年 M. B. Viani 等人開發出新型 HS-AFM 架構[5]，如圖 1.6 所示，透過光束偏轉檢測微懸臂的移動，此 HS-AFM 在輕敲式下可以在 1.7 秒拍攝到吸附於雲母表面的 DNA 影像。

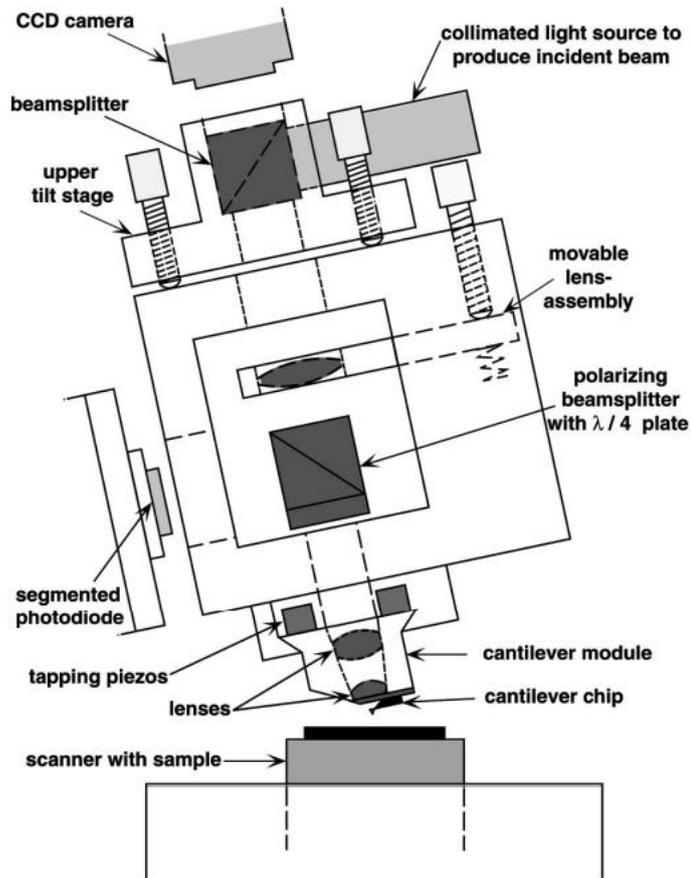


圖 1.6 M. B. Viani 等人開發之新型 HS-AFM 架構[5]。

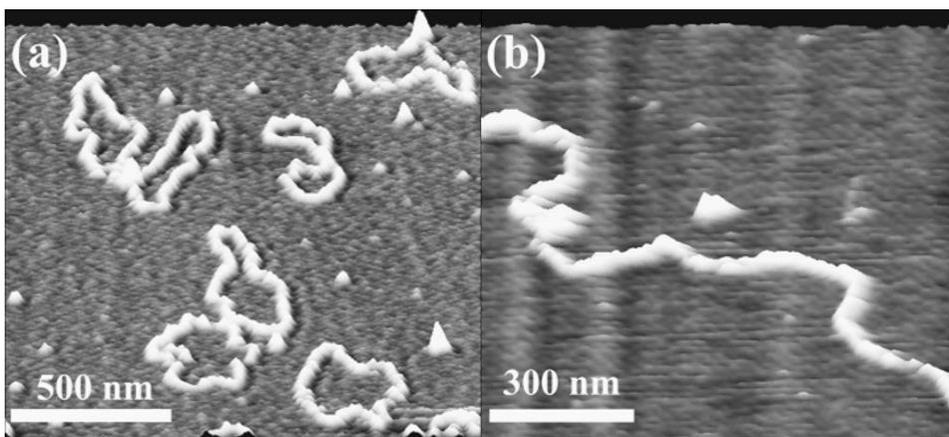


圖 1.7 M. B. Viani 等人以輕敲式 HS-AFM 在 (a)5.6 秒，(b)1.7 秒拍攝之雲母表面 DNA 圖像[5]。

2002 年，T. Ando 等人為了量測厚 140 nm，寬 2 μm ，長 9-11 nm 的超小型微懸臂偏折，開發出了如圖 1.8 所示之物鏡型偏轉檢測系統(Objective-Lens Type of Optical Deflection Detection System)[6]，使用物鏡將入射光聚焦到微懸臂上，而反射光由同一物鏡返回並透過四分之一波片與分光鏡片與入射光束分開。該 HS-AFM 系統能於 80 毫秒成像一張 100 \times 100 pixels 之圖像。T. Ando 等人利用此 HS-AFM 系統觀察活體生物分子的運動，如圖 1.9 所示為以 12.5 frame/s 的速度成像肌球蛋白 V(Myosin V, M5)於雲母表面進行布朗運動(Brownian Motion)。

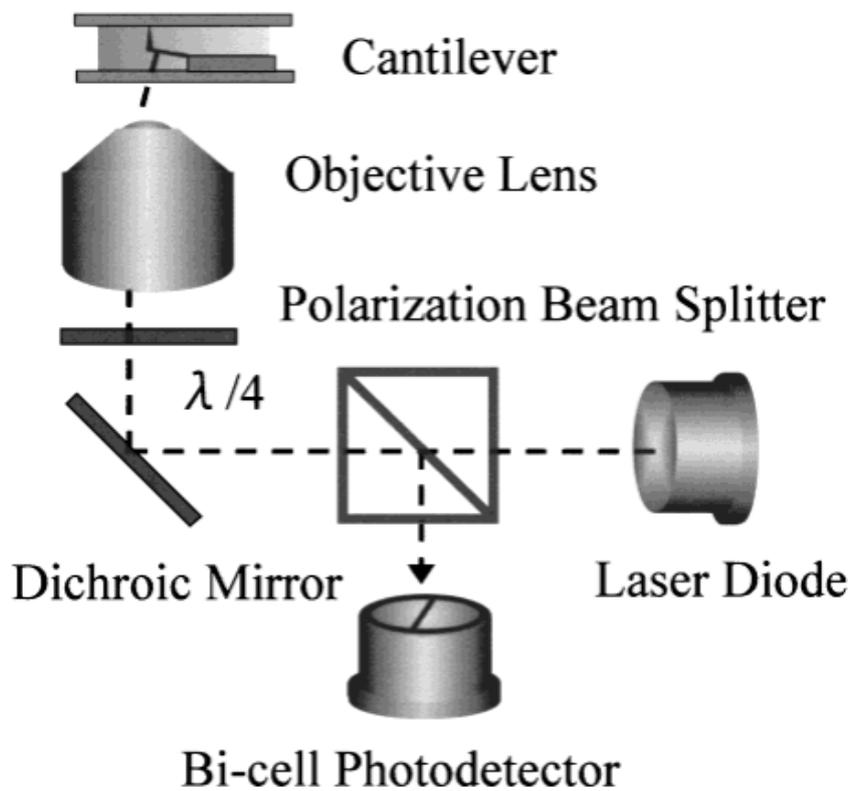


圖 1.8 T. Ando 等人研發之物鏡型偏轉檢測系統示意圖[6]。

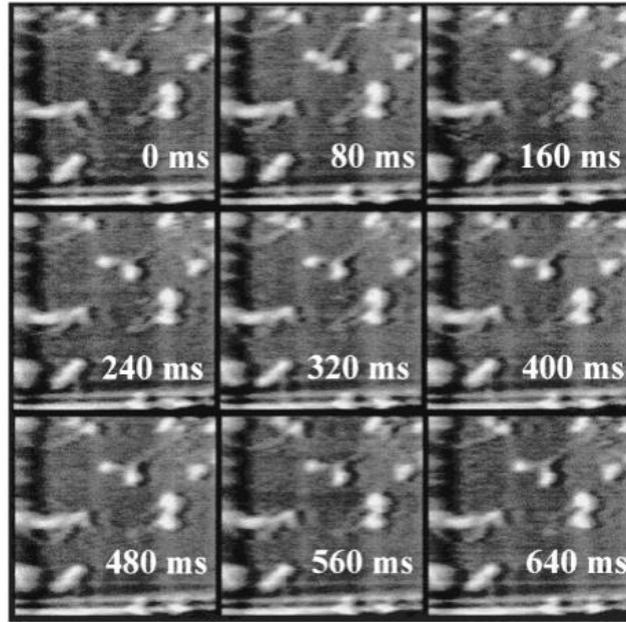


圖 1.9 以 12.5 frame/s 的速度成像肌球蛋白 V 於雲母表面進行布朗運動[6]。

2013 年，Y. Suzuki 等人開發高速掃針式掃描器[7]，如圖 1.10 所示，X 軸透過兩個、Y 軸透過一個壓電致動器驅動撓性機構，而微懸臂探針則置於 Z 軸其中一側壓電致動器上。另外此系統因為是控制微懸臂移動來掃描樣品，而雷射必須在微懸臂移動過程中保持聚焦於微懸臂尖端，因此如圖 1.11 所示，該系統光路藉由調整雷射二極體的位置來改變雷射聚焦的位置，當雷射二極體在 z' 方向上下移動時，聚焦位置沿相同方向改變，而在 x' 與 y' 方向聚焦位置則沿相反方向移動，透過此方法使來自微懸臂的反射光為最大值。利用此掃針式掃描器的 HS-AFM 在掃描範圍為 $4.48 \times 3.36 \times 0.6 \mu\text{m}^3$ 時，其成像速度可達到 0.2 frame/s。

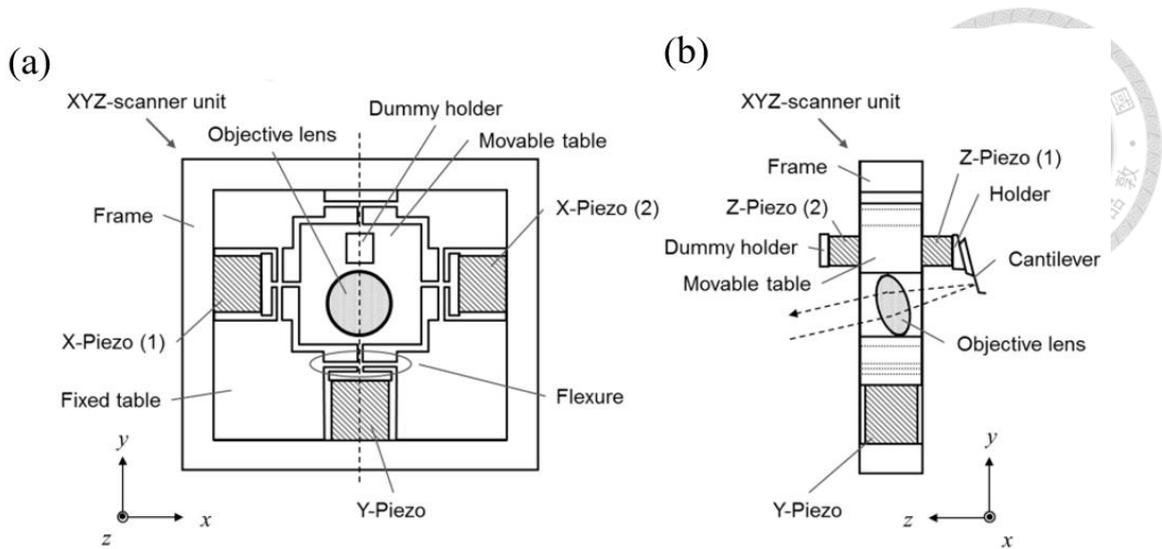


圖 1.10 Y. Suzuki 等人開發的高速掃針式掃描器之(a)上視圖，(b)右視圖[7]。

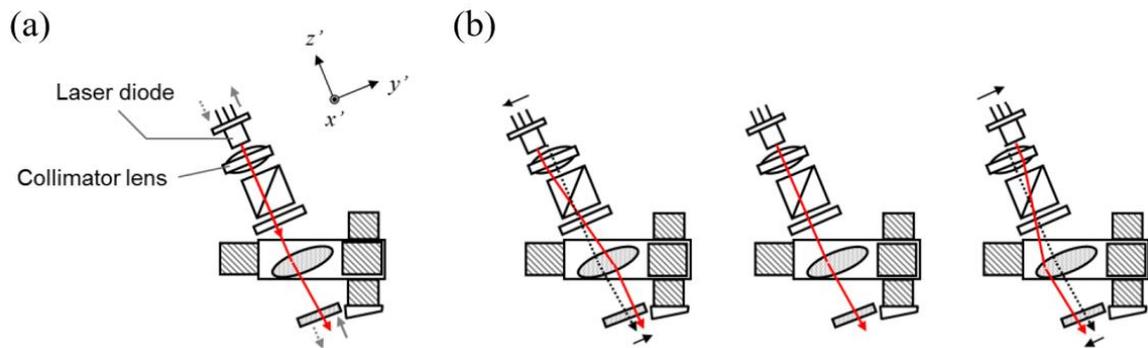


圖 1.11 雷射對準示意圖之(a) z' 方向，(b) x' 與 y' 方向[7]。

2013 年，S. Fukuda 等人開發了一種與全內角反射螢光顯微鏡(Total Internal Reflection Fluorescence Microscope, TIRFM)結合的掃針式 HS-AFM[8][9]，其架構如圖 1.12 所示，TIRFM 能夠辨識分子但無法明確顯示分子結構，而 AFM 能顯示分子表面結構但在多物種系統下無法明確辨識分子，兩種顯微鏡的結合彌補了彼此的缺點。該掃針式 HS-AFM 藉由二向色鏡(Dichroic Mirror)傾架機構控制雷射聚焦位置，如圖 1.13 所示，X 與 Y 軸各藉由一對相反方向位移的壓電致動器改變二向色鏡的傾斜角度使雷射光能同步聚焦於掃描中的微懸臂上。此系統的掃針式 HS-AFM 部分能夠以 5 frame/s 的速度成像。

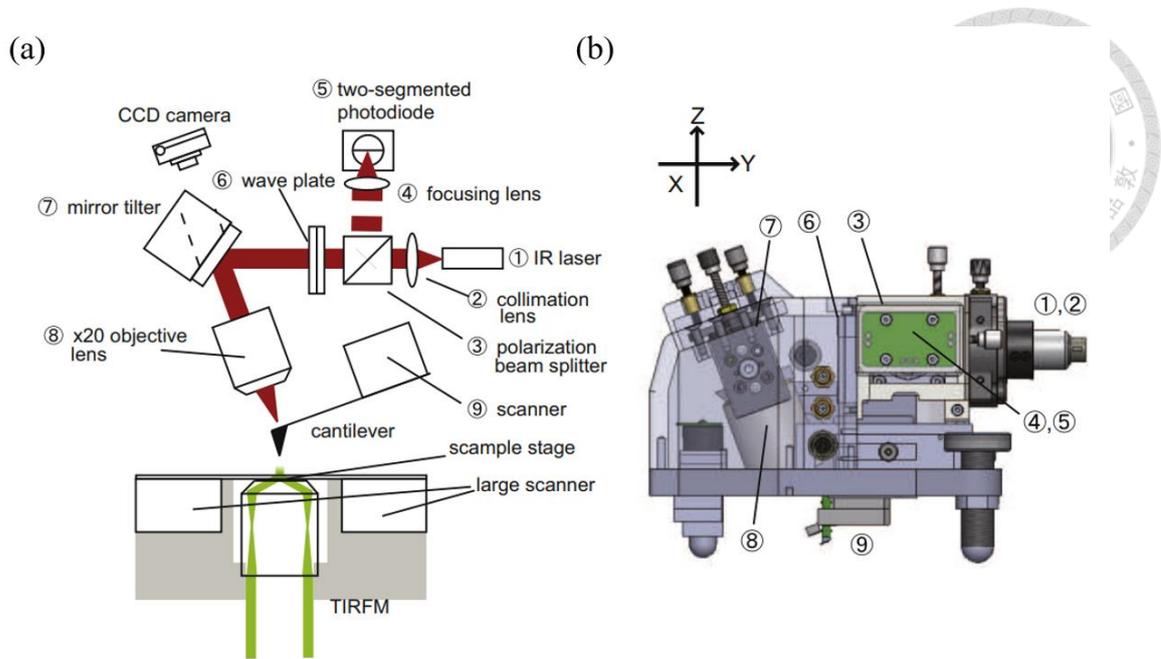


圖 1.12 S. Fukuda 等人開發之掃針式 HS-AFM 其(a)內部光路，(b)整體架構示意圖[9]。

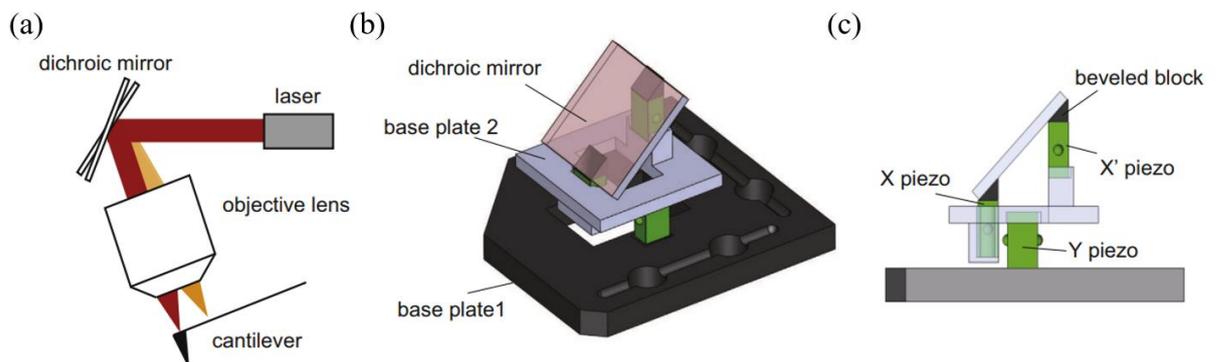


圖 1.13 二向色鏡傾架機構之(a)原理示意圖，(b)整體解構示意圖，(c)側視圖[9]。

1.2.3 像散式光學檢測法

像散(Astigmatism)是一種光學常見現象，也被用於測量 AFM 微懸臂的偏折，其原理如圖 1.14 所示，光束在經過透鏡後因為 X 軸與 Y 軸方向曲率不同，因此光線在兩軸上焦距不同，光束在通過透鏡後，從 X 軸的聚焦點開始至 Y 軸的聚焦點會依序形成 Y 為長軸的橢圓 Plane 1，再變為圓形光點 Plane 2，最後變為 X 軸為長軸的橢圓 Plane 3，此成像變化可以用於檢測微懸臂的偏折。

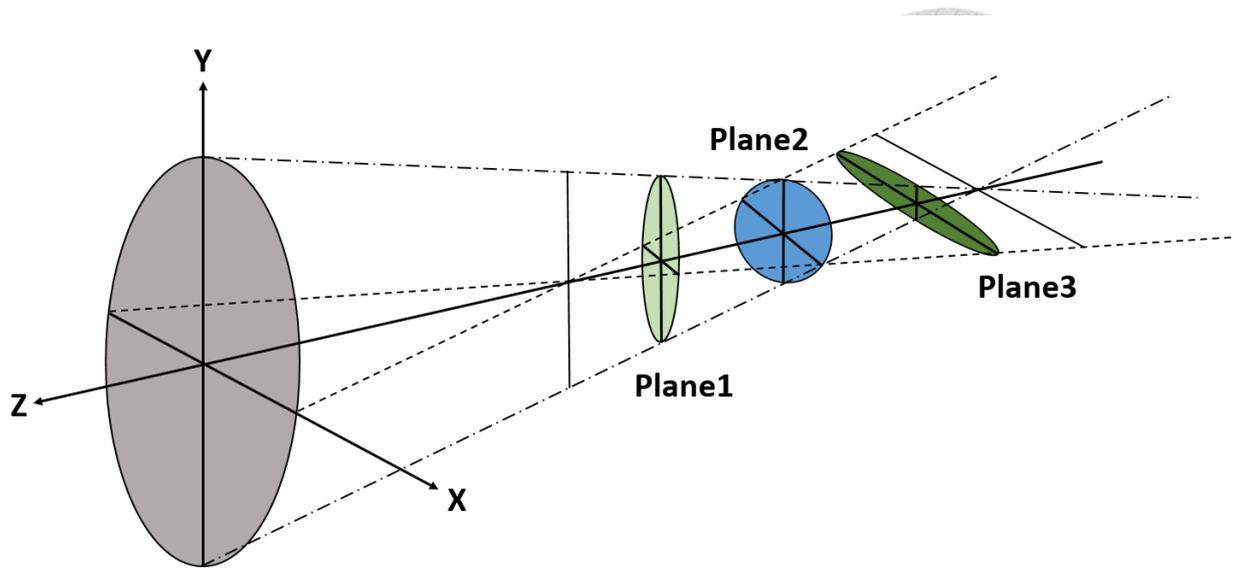


圖 1.14 像散原理示意圖。

像散偵測系統(Astigmatic Detection System, ADS)可以用來偵測微懸臂的偏折與機械共振，經常應用於商用 DVD 光碟機讀取頭內，其光學架構如圖 1.15 所示，雷射光經過透鏡組轉為平行光再經過物鏡聚焦於表面，反射光沿原光路經過一含有像散元件的分光鏡後進入四象限光感測器。如圖 1.16 所示，四象限光感測器 A~D 產生的相對電壓訊號為 V_A 、 V_B 、 V_C 與 V_D ，聚焦誤差訊號(Focus Error Signal, FES) $V_{FES} = (V_A + V_C) - (V_B + V_D)$ 。當樣品表面處於雷射焦點時，四象限光感測器接收之光點為圓形且 $V_{FES} = 0$ ；而雷射離焦時四象限光感測器接收之光點為傾斜橢圓，因此可以透過 V_{FES} 檢測四象限光感測器上光點之形狀變化。 V_{FES} 與樣本表面的關係稱為 S-curve，且在聚焦點附近($V_{FES} = 0$)區域附近幾乎呈現線性，因此可以用於測量樣品高度。

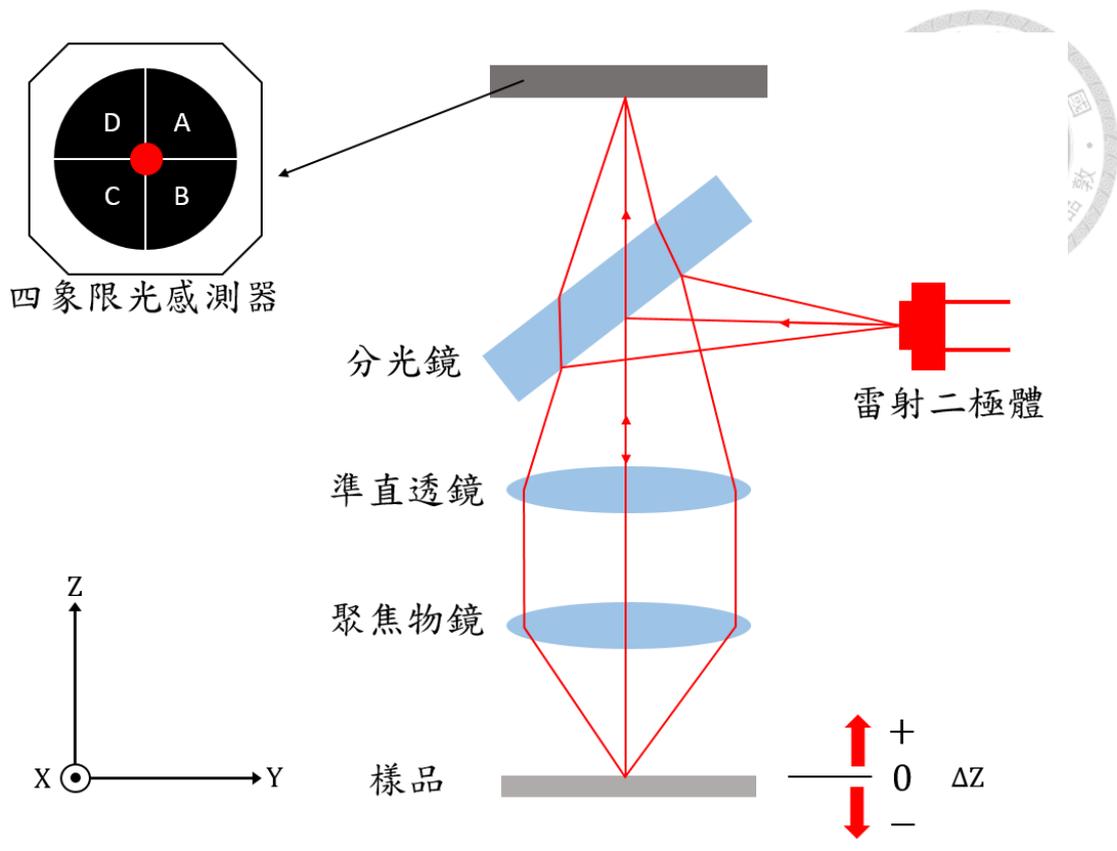


圖 1.15 像散式系統光路架構示意圖。

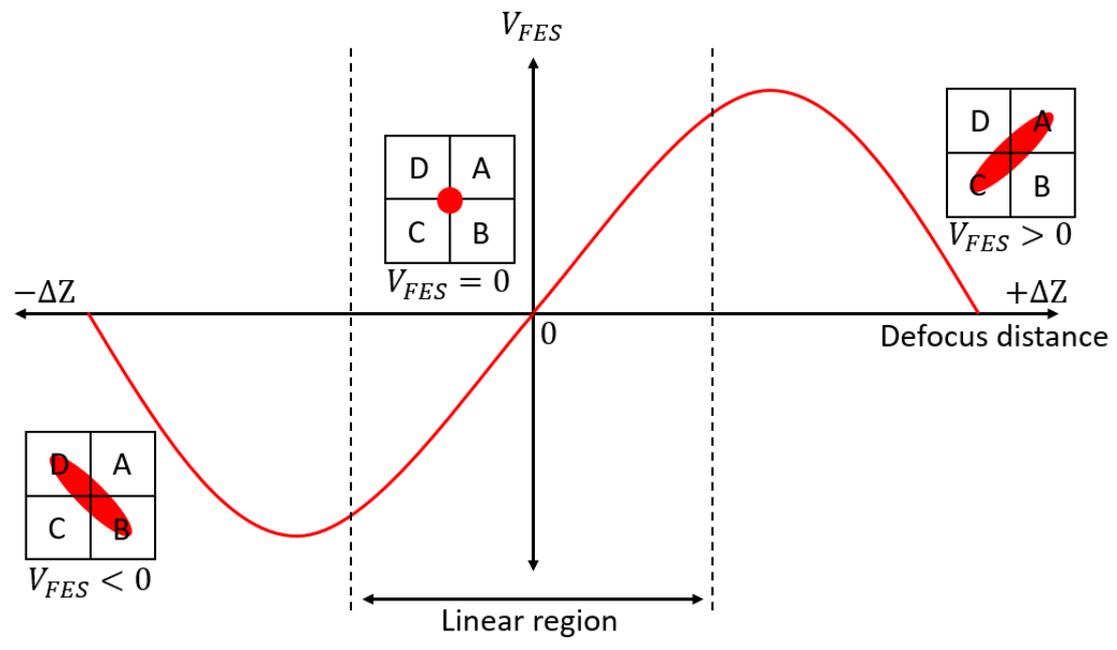


圖 1.16 聚焦誤差訊號曲線圖。

2014 年，H. S. Liao 等人利用商用 DVD 讀取頭內部的像散式光學偵測系統建構出 HS-AFM[10]，其系統架構與實體架構圖如圖 1.17 所示。雷射光束經由讀取頭內部之光路聚焦於微懸臂上，反射後之雷射光束由讀取頭內部的光電感測器集成芯片(Photo Detector Integrated Chip, PDIC)偵測。因為像散效應，PDIC 上之光點形狀會隨著微懸臂偏折而改變，因此 V_{FES} 可以用於檢測微懸臂之偏折量。此系統可以偵測的微懸臂(USC-F5-k30)共振頻率可達 5.5 MHz，利用其於空氣中量測樣品之實驗結果如圖 1.18 所示，圖 1.18 (a)與(b)分別表示在掃描速度 10 lines/s 和 100 lines/s 所得到的影像，結果顯示此系統在高速掃描環境下仍可維持影像品質。

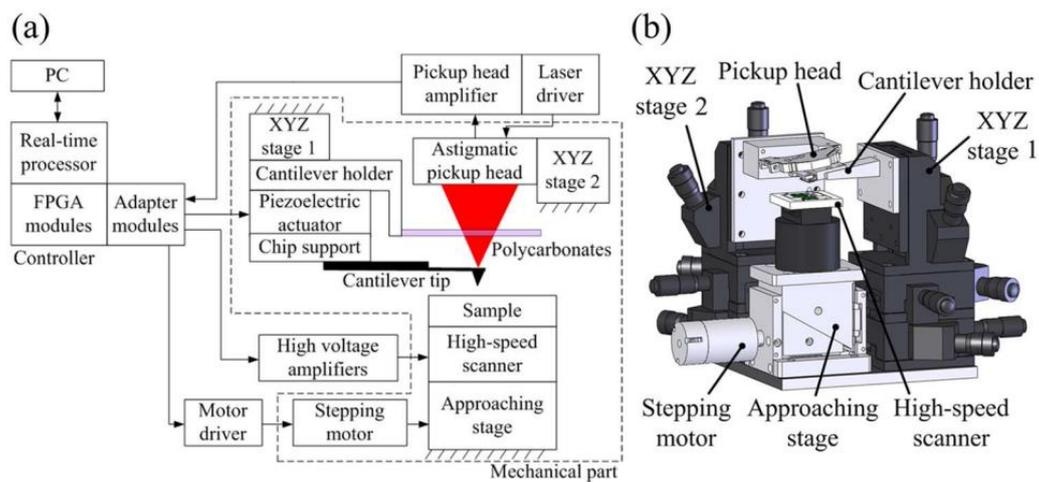


圖 1.17 基於像散偵測系統之 HS-AFM(a)系統架構圖，(b)實體架構圖[10]。

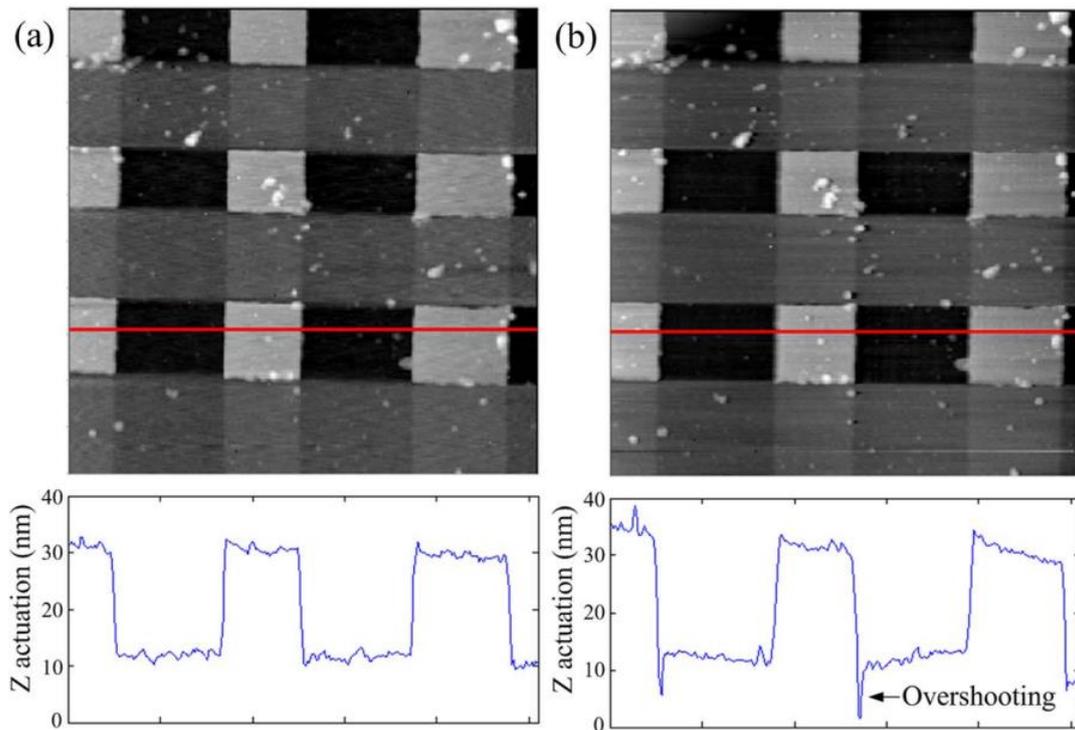


圖 1.18 使用微懸臂 USC-F5-k30 在不同掃描速度下之影像(a)10 lines/s，(b)100 lines/s[10]。

1.2.4 AFM 微懸臂量測靈敏度

靈敏度(Sensitivity)是 AFM 微懸臂感測系統中的重要性能指標，為微懸臂探針之偏折量(nm)與感測系統輸出位移訊號(mV)之關係，此關係能夠用以判斷微懸臂感測系統之性能。

2019 年，本實驗室 Y. C. Shiu 開發具有小光點之微懸臂感測系統[11]，如圖 1.19 所示，利用雷射二極體作為感測光路模組之光源，架構具有體積小且方便更換光學元件之優點，此外還能在模組側面加裝平凸柱面透鏡切換光偏折式或像散式兩種測量方式。其中在使用光偏折式(Beam-Deflection)的非偏振分光鏡模組量測時，微懸臂感測系統之靈敏度為 1.05 mV/nm，系統雜訊峰對峰值為 16.48 mV，對應位移量為 15.7 nm，最小光點直徑 4.2 μm ，符合量測寬度 5 μm 超小型微懸臂之要求。

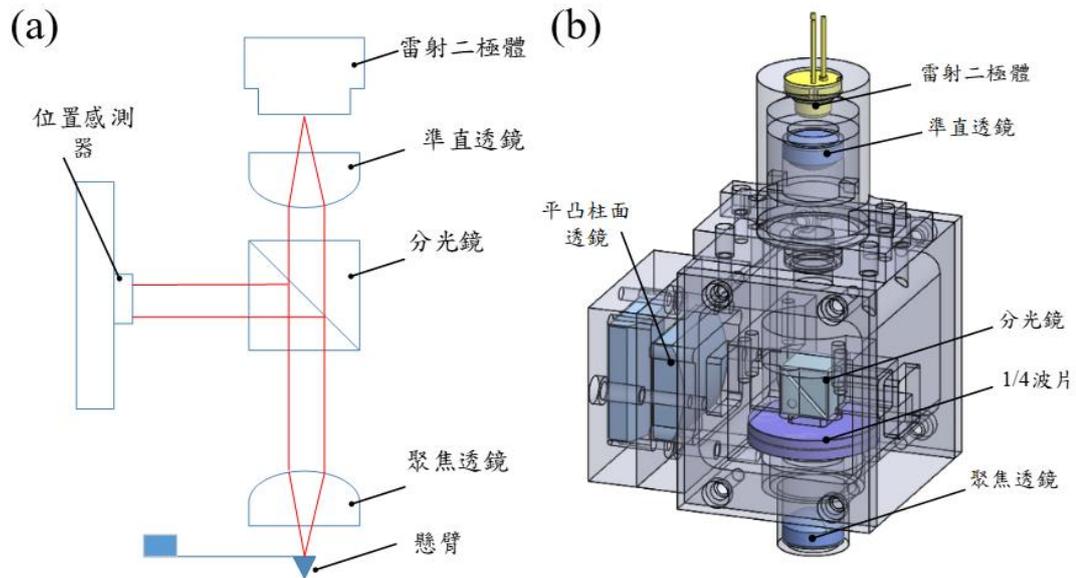


圖 1.19 Y. C. Shiu 開發的微懸臂感測系統之(a)光路圖，(b)設計圖[11]。

2021 年，本實驗室之 A. T. Wu 根據先前 Y. C. Shiu 之光路進行改善[12]，如圖 1.20 所示，改以雷射二極體射入對應波長之二向色鏡將雷射反射 90 度，其中使用二向色鏡可空出上方空間方便觀察內部光路與微懸臂光點對焦情況，並且為了提升微懸臂量測系統靈敏度，以多種不同雷射作為光源。其中在使用紅光雷射 LDM115G 時，可得到最佳之靈敏度 0.45 mV/nm，系統雜訊峰對峰值為 4 mV，對應之位移量為 8.83 nm，最小光點直徑 4.5 μm ，符合量測寬度 5 μm 超小型微懸臂之要求。

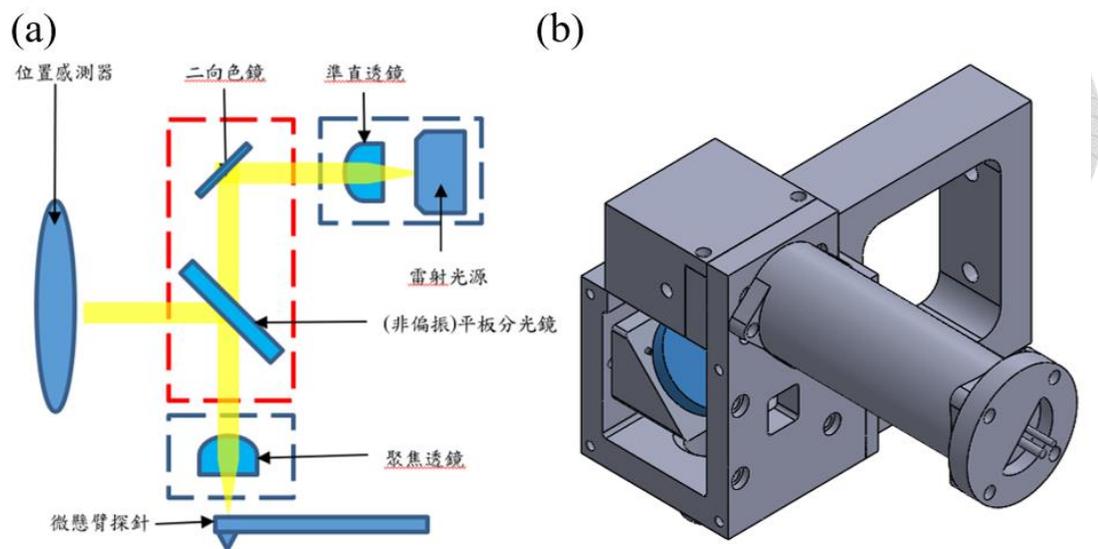


圖 1.20 A. T. Wu 開發的微懸臂感測系統之(a)光路圖，(b)設計圖[12]。

2022 年，本實驗室之 S. S. Chen 接續先前 A. T. Wu 之光路[13]，如圖 1.21 所示，將雷射光源改為穩定且低雜訊之氬氖雷射 HNL150LB 以改善雷射二極體時常出現之不可控雜訊，並測試不同光學元件之組合以提升量測靈敏度。其中使用立體分光鏡 PBS052、聚焦透鏡 A240-A、位置感測器 SPOT-9DMI 以及超小型微懸臂 USC-F2-k3 時可得到最佳之靈敏度 2.5 mV/nm，系統雜訊峰對峰值為 3.6 mV，對應之位移量為 1.44 nm，最小光點直徑 3.6 μm ，符合寬度 5 μm 超小型微懸臂之使用需求。此外以此組合對標準樣品 TGQI 進行高速掃描成像，在不影響影像品質的情況下掃描速度可達 100 lines/s。

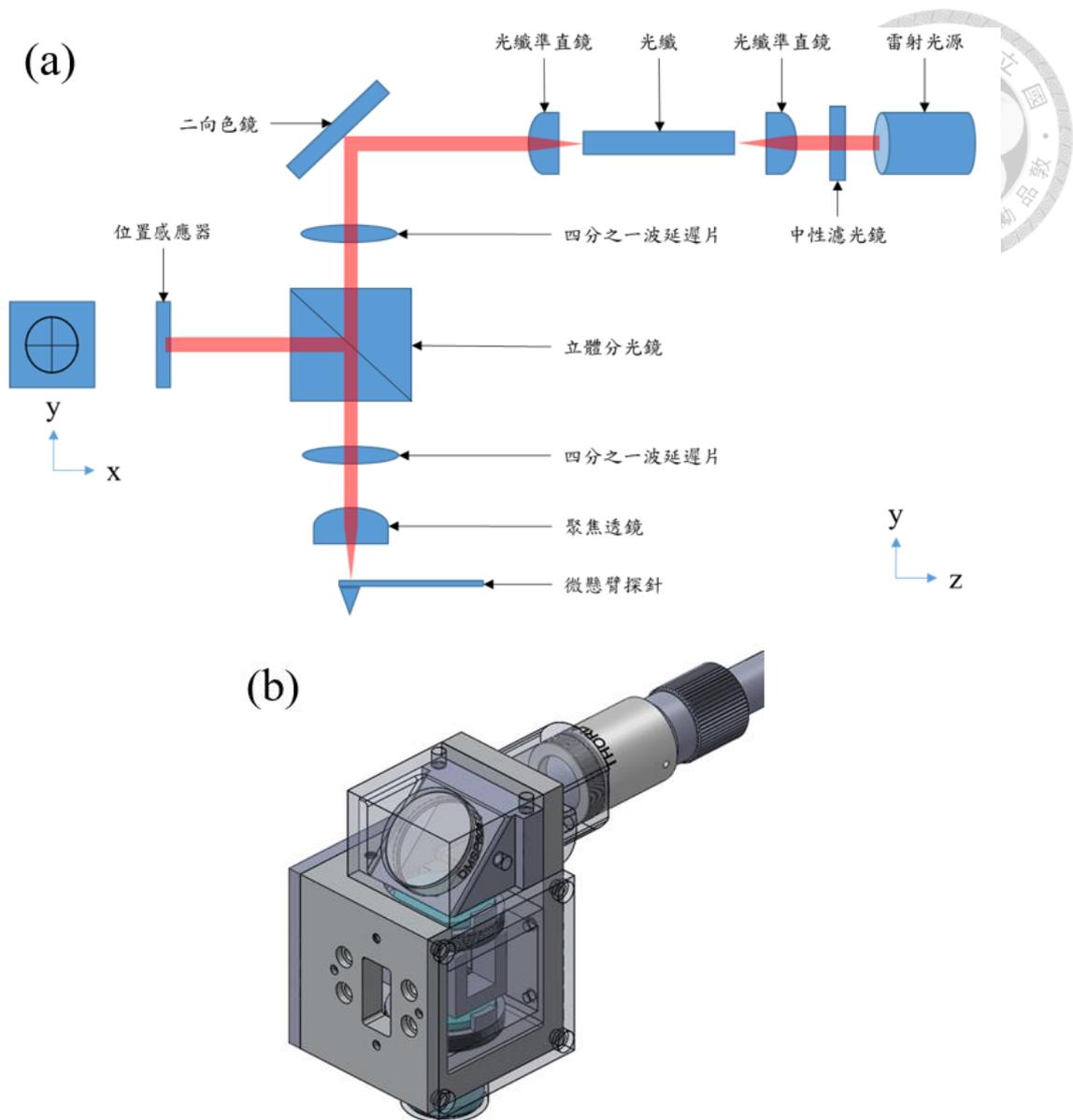


圖 1.21 S. S. Chen 開發的微懸臂感測系統之(a)光路圖，(b)設計圖[13]。

1.3 研究目的

為了 HS-AFM 的高速成像，微懸臂偏折感測器必須具備量測高共振頻率超小型微懸臂探針的能力，為此必須改善其微懸臂感測系統。文獻回顧中，本實驗室的 Y. C. Shiu 所開發的微懸臂感測系統其靈敏度為 1.05 mV/nm，光點直徑為 4.2 μm ，但由於系統雜訊峰對峰值為 16.48 mV，因此可解析之微懸臂偏折量僅 15 nm。而後本實驗室之 A. T. Wu 其系統對光路進行改善並嘗試以不同雷射作為光源，最後得到最佳靈敏度為 0.45 mV/nm，最小光點直徑 4.5 μm ，系統雜訊峰

對峰值為 4 mV，可解析之微懸臂偏折量提升為 8.83 nm，但其使用的雷射二極體常出現不可控之雜訊。而後接續其研究的本實驗室之 S. S. Chen 將光源改為氦氖雷射，其系統得到之靈敏度為 2.5 mV/nm，系統雜訊峰對峰值為 3.6 mV，可解析之微懸臂偏折量進一步提升為 1.44 nm，並可以 100 line/s 的速度進行高速成像。

本研究改使用像散式檢測法之微懸臂感測系統，與光偏折式檢測法相比光點較小但靈敏度不夠高，因此本研究之目的在於提高像散式檢測法之靈敏度。本研究利用商用紅光讀取頭與藍光讀取頭架設微懸臂感測系統，並透過調整藍光讀取頭準直鏡位置、將紅光讀取頭原本的雷射二極體替換為氦氖雷射以進行性能比較，希望進一步提升微懸臂感測系統之靈敏度及可解析之微懸臂偏折量。

1.4 內容簡介

本論文共分為五章，本章為緒論，簡述研究背景與目的，並做相關文獻之回顧。

第二章為 AFM 原理介紹，首先講解 AFM 原理及其架構，接著說明 AFM 與樣品間作用力及操作模式，再簡述微懸臂探針之特性，最後藉由文獻探討 AFM 架構中各個可能影響系統靈敏度的原因。

第三章介紹本研究所使用的系統其架構與設計，首先講解本研究所使用之像散式光路模組，再介紹整體光路模組相對位置及設計思路，接著介紹所使用之儀器，最後簡述所進行的兩個實驗之基本架構。

第四章為實驗流程與結果，分別為光強與訊雜比量測實驗與靈敏度量測實驗，本章詳細介紹各實驗之步驟，並對結果進行分析與討論。永齡

第五章為結論與未來展望，總結本研究之成果，並提出可改進之方向以及未來展望。

第二章 原子力顯微鏡原理與靈敏度



2.1 AFM 原理與架構

AFM 系統架構由雷射(Laser)、位置感測器(Position Sensitive Detector, PSD)、微懸臂探針(Cantilever Tip)與壓電掃描器(Piezoelectric Scanner)組成。如圖 2.1 所示，AFM 藉由壓電掃描器帶動樣品進行掃描，而微懸臂探針會因為與樣品間的原子力變化而產生偏折，而此偏折會導致位置感測器上的雷射光點訊號產生變化，此訊號處理後經由回饋系統維持探針與樣品間距，即可藉由壓電掃描器的位移訊號重建樣品表面。

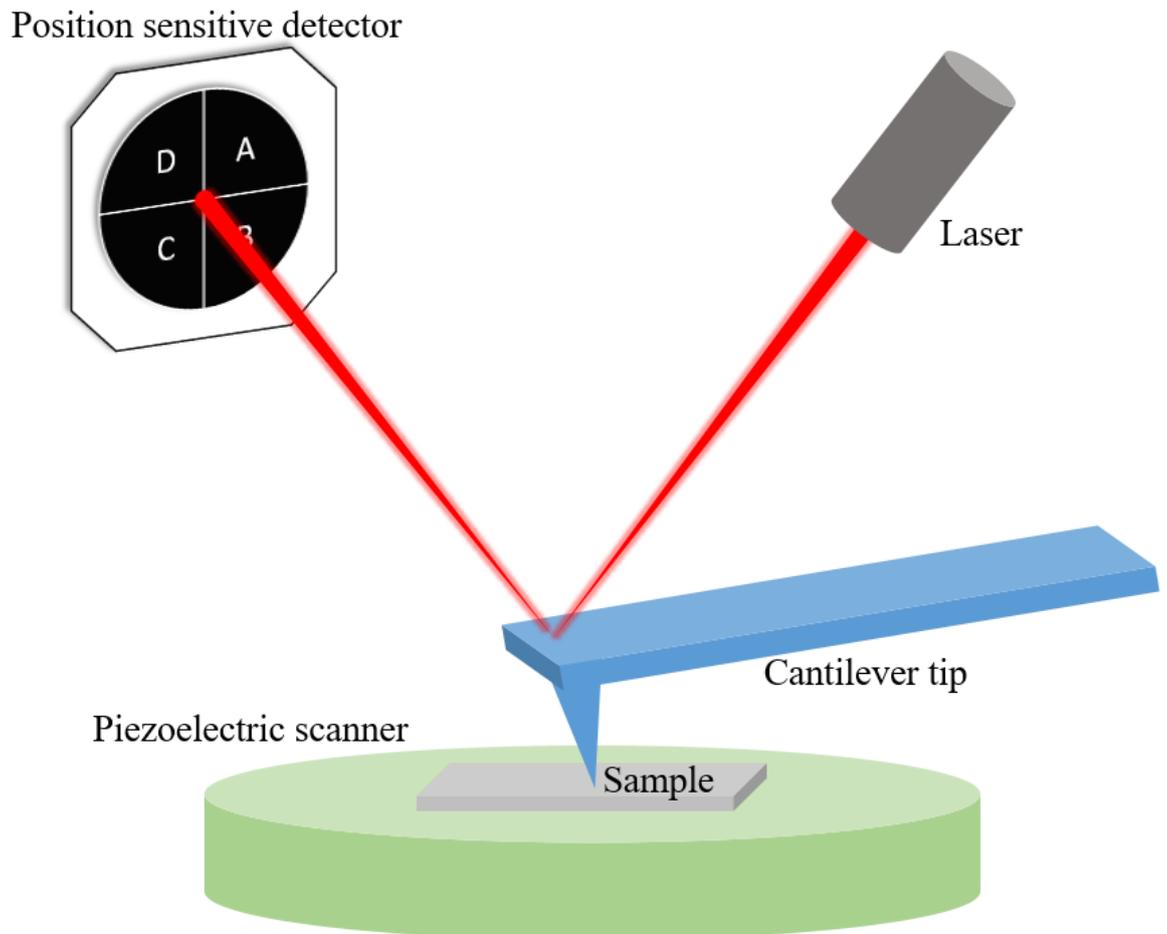


圖 2.1 AFM 系統架構示意圖。

2.2 AFM 與樣品間作用力

AFM 系統中，微懸臂探針與樣品表面原子的交互作用力，根據距離遠近一般可分為長程力(Long Range Forces)與短程力(Short Range Forces)，長程力範圍大且牽扯原子多，反之短程力範圍小且牽扯原子少。而根據探針與樣品間作用力可將 AFM 操作模式分為接觸式(Contact Mode)、非接觸式(Non-Contact Mode)與輕敲式(Tapping Mode)。

接觸式操作於斥力短程力區間，如圖 2.3(a)所示，在掃描過程中探針直接接觸樣本，主要作用力為原子間電子雲斥力，此種斥力對於距離變化非常敏感，具有非常高的空間解析度，但由於掃描過程中的摩擦力，容易造成探針與樣品的損害。

非接觸式操作於吸引力長程力區間，如圖 2.3(b)所示，掃描過程中探針始終不接觸樣本，因此不會造成探針與樣品的損害，但也由於長程力不如斥力敏感導致空間解析度不佳。非接觸式利用原子間吸引力來量測樣品表面，量測時探針處於激振狀態，探針的頻率會因為與樣品間的吸引力變化而改變，透過此頻率偏移來量測樣品表面。

輕敲式操作於接觸式與非接觸式之間，如圖 2.3(c)所示，與非接觸式一樣須先激振探針，但探針在震盪至低點時會短暫接觸樣品表面，掃描過程中因為與樣品的高低變化導致微懸臂的振幅、相位或頻率等動態特性改變，回饋系統透過保持此動態特性進行掃描。此模式接觸樣品時間短，對探針與樣品磨損程度小，也具備良好空間解析度。

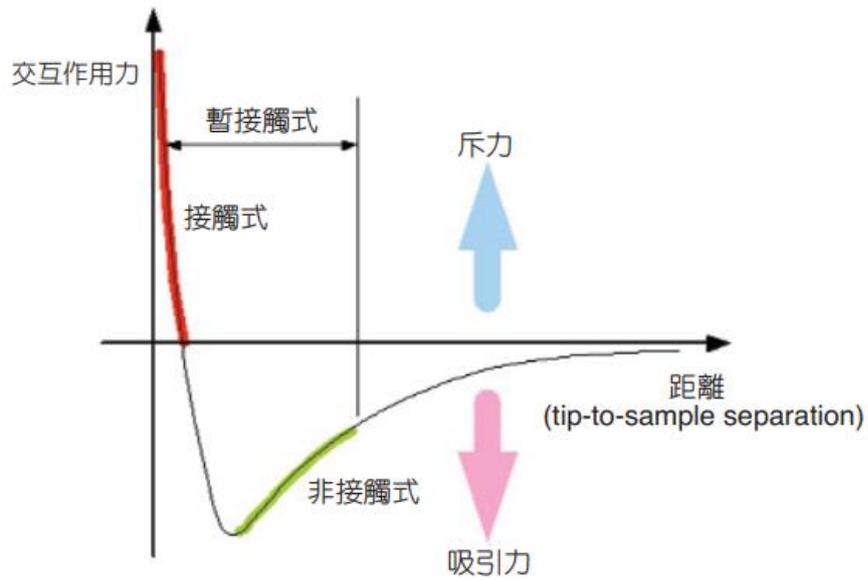
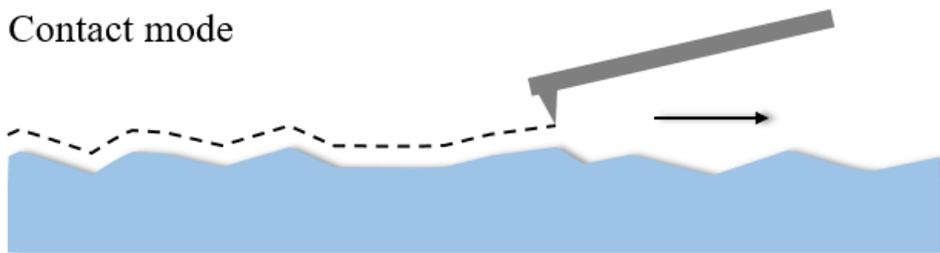
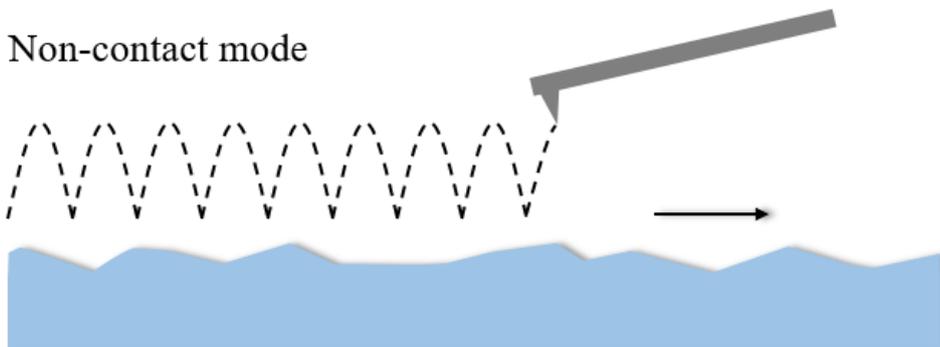


圖 2.2 微懸臂探針與樣品間交互作用力與距離之關係圖[14]。

(a) Contact mode



(b) Non-contact mode



(c) Tapping mode

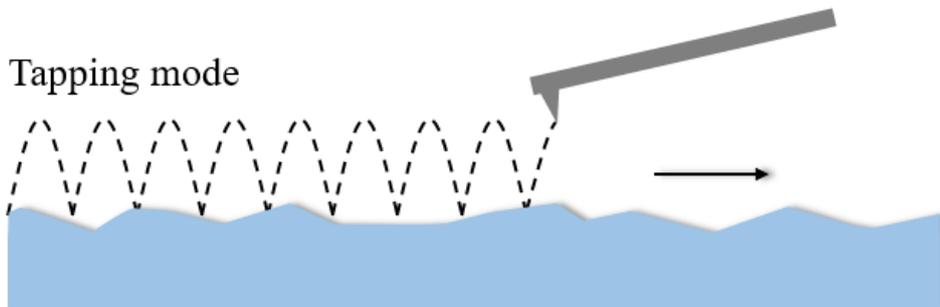


圖 2.3 (a)接觸式、(b)非接觸式與(c)輕敲式掃描示意圖。



2.3 微懸臂探針

微懸臂探針是 AFM 的重要元件，其機械性能很大幅度影響了 AFM 系統的性能。微懸臂探針的機械性能主要由彈性常數 k_c 與共振頻率 f_r 決定，對於固定矩形截面的微懸臂探針，其彈性常數 k_c 與共振頻率 f_r 為[15]：

$$k_c = \frac{Ewt^3}{4L^3} \quad (2.1)$$

$$f_r = 0.162 \sqrt{\frac{E}{\rho_c} \frac{t}{L^2}} \quad (2.2)$$

其中 E 為揚氏模數(Young's Modulus)， ρ_c 為微懸臂之密度，如圖 2.4 所示為微懸臂示意圖，其中 w 、 t 與 L 為微懸臂之寬度、厚度與長度。

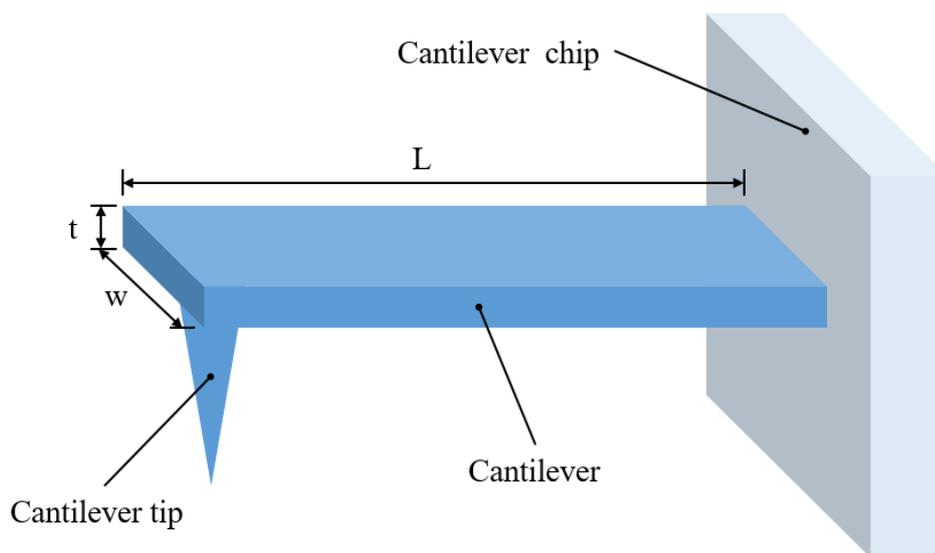


圖 2.4 微懸臂探針示意圖。

對於接觸式而言，為了提升量測時之力靈敏度，即對於相同作用力可產生較大之偏折量，通常會設計較小的彈性常數 k_c ，即較小的厚度長度比 $\frac{t}{L}$ ，因此接觸式之微懸臂通常會設計的長且薄。

而對於非接觸式與輕敲式而言，具有高共振頻率的微懸臂探針可以增加掃描速度、減少響應時間，但具有高共振頻率卻會導致彈性常數增加。若要同時具有高共振頻率與低彈性常數，微懸臂探針通常會設計的短又薄且窄，如高速 AFM

之微懸臂探針其寬度一般約為 5 μm ，要將雷射光點聚焦至微懸臂探針上非常困難，因此 AFM 微懸臂感測系統的設計非常重要。



2.4 光偏折式微懸臂感測系統靈敏度

2006 年，T. Fukuma 發表了對於光偏折式微懸臂感測系統的靈敏度影響因素 [16]，如光電感測器、微懸臂、雷射光源以及環境等，並將之整理成式(2.3)。對於光偏折式微懸臂感測系統，其靈敏度為：

$$S_z = 6\chi\eta\alpha n_m R_{IV} A_{diff} \frac{P_0 l_f}{a_0 l_c} \left(\frac{mV}{nm} \right) \quad (2.3)$$

其中 χ 為光電感測器之感應電流在高斯分布 (Δi_2) 與均勻分布 (Δi_1) 下之比值：

$$\chi = \frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} \quad (2.4)$$

η 為光電感測器之光電轉換效率， α 為照在光電感測器上之光功率 (P) 與微懸臂上光功率 (P_0) 之比值：

$$P = \alpha P_0 \quad (2.5)$$

n_m 為環境折射率， R_{IV} 為電流電壓轉換器之轉阻比， A_{diff} 為差分放大器之 Gain 值， a_0 為準直光之直徑， l_f 為聚焦物鏡之焦距， l_c 為微懸臂長度。透過此式可以知道光偏折式微懸臂感測系統之靈敏度受到哪些因素影響。

2.4.1 雷射光源

在光偏折式微懸臂感測系統中，光電二極體的散粒雜訊 (Shot Noise) 決定了偏轉雜訊密度 (Deflection Noise Density) n_z 的下限， n_z 可以表示為：

$$n_z = \frac{a_0 l_c}{6\chi n_m l_f} \sqrt{\frac{2e}{\eta \alpha P_0}} \quad (2.6)$$

其中 e 為基本電荷，由此式可知提升聚焦物鏡焦距 l_f 與光功率 αP_0 、減小準直光之直徑 a_0 與微懸臂長度 l_c 可改善系統的雜訊密度。

為了光源能夠精確聚焦於微懸臂上需要有高品質的準直光束，光束應具有圓形截面、小像差以及發散角小的特點，較大的 a_0 可以滿足這些需求，但同時較

大的 a_0 會提升系統的雜訊密度 n_z ，而較小的 a_0 有助於設計較為緊湊的機構，因此理想上需要選擇可以產生高品質準直光束的同時又具有較小的 a_0 。實用上單模(Single Mode)光纖是獲得高品質準直光束的簡單方法，但由於光纖末端引起的反射會造成強度波動導致較大的雜訊密度 n_z ，因此經常採用雷射二極體與非球面準直透鏡組合，雖然具有低雜訊密度，但光束截面為橢圓且像差較大，會導致聚焦情況不佳。

2.4.2 光電感測器

光電感測器之光電轉換效率 η 提升有助於提高系統靈敏度 S_z 以及降低雜訊密度 n_z 。對於光偏折式微懸臂感測系統，使用高 NA 物鏡因為發散角較大，光電感測器必須足夠小以靠近微懸臂位置擺放，並且活性區域夠大才能減少功率散失，但是物鏡高 NA 值的同時工作距離也短，會使得架構難以實現。

2.4.3 物鏡焦距

高 NA 值的聚焦透鏡可以使光源更加精確的聚焦，但同時會使聚焦物鏡之焦距 l_f 減小，進而導致靈敏度下降、雜訊密度 n_z 提升，此結果使得架構的設計變得困難。

2.4.4 環境折射率

在折射率 n_m 較大的環境下，例如水溶液環境下光穿過介質因為折射率不同而發生偏折，如圖 2.5 所示，需要對光路進行最佳化。

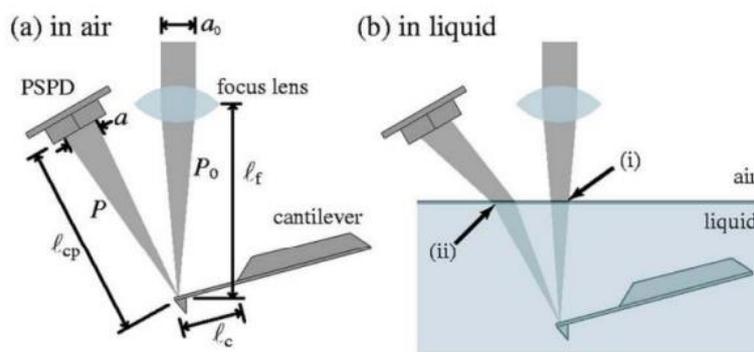


圖 2.5 光偏折式檢測法於(a)空氣中，(b)水溶液中量測示意圖[16]。

如圖 2.6 與圖 2.7 所示，虛線為透過公式計算的理論值，實線為實際量測值，表示在水溶液環境下與理論相符可以得到較佳之靈敏度，但是雜訊密度卻與理論質不同沒有明顯下降，其原因可能為掃描過程中樣品與探針相互移動而使溶液晃動所產生，或是雷射光在通過封閉水溶液的玻璃時產生之散射影響雜訊密度。

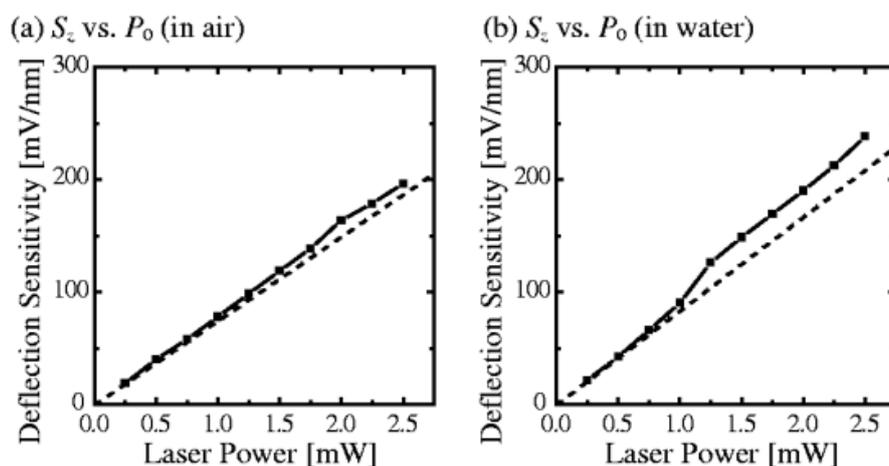


圖 2.6 在(a)空氣中與(b)水中之靈敏度差異[16]。

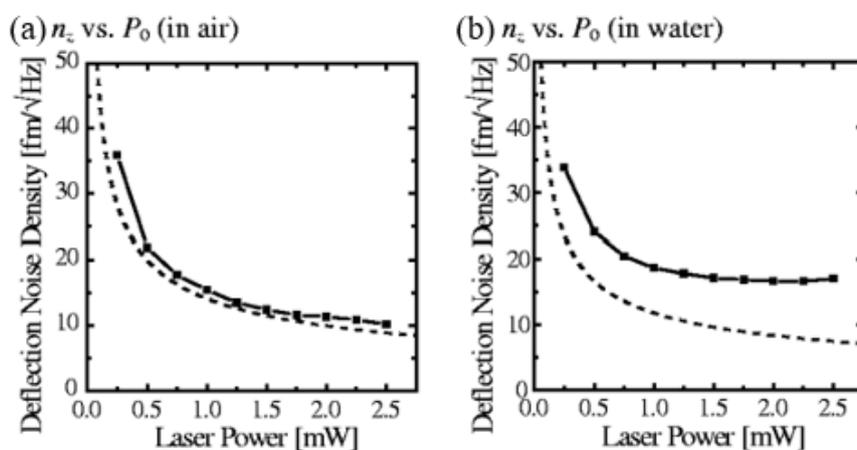


圖 2.7 在(a)空氣中與(b)水中之雜訊密度差異[16]。



2.4.5 可應用在像散式光路的部分

雖然此部分的研究是針對光偏折式微懸臂檢測法，但是大部分仍可以適用於像散式光學檢測法。

雷射光源部分，同樣為了能夠精確聚焦於微懸臂上需要高品質的準直光束，光束應具有較大的 a_0 以滿足圓形截面、小像差以及發散角小的特點，但同時較大的 a_0 會提升系統的雜訊密度 n_z ，因此理想上需要選擇可以產生高品質準直光束的同時又具有較小的 a_0 。

光電感測器部分，同樣需要選擇具有良好光電轉換效率 η 以提高系統靈敏度 S_z 以及降低雜訊密度 n_z 。對於像散式微懸臂感測系統，反射光依照原光路返回且其透過光點形狀變化偵測微懸臂偏折，不會有光偏折式檢測法使用高 NA 物鏡因為發散角較大，光電感測器會有位置擺放的問題。

物鏡焦距部分，為了使光源更加精確的聚焦，高 NA 值的聚焦透鏡仍是理想，但同樣會使聚焦物鏡之焦距 l_f 減小，導致靈敏度下降、雜訊密度 n_z 提升。

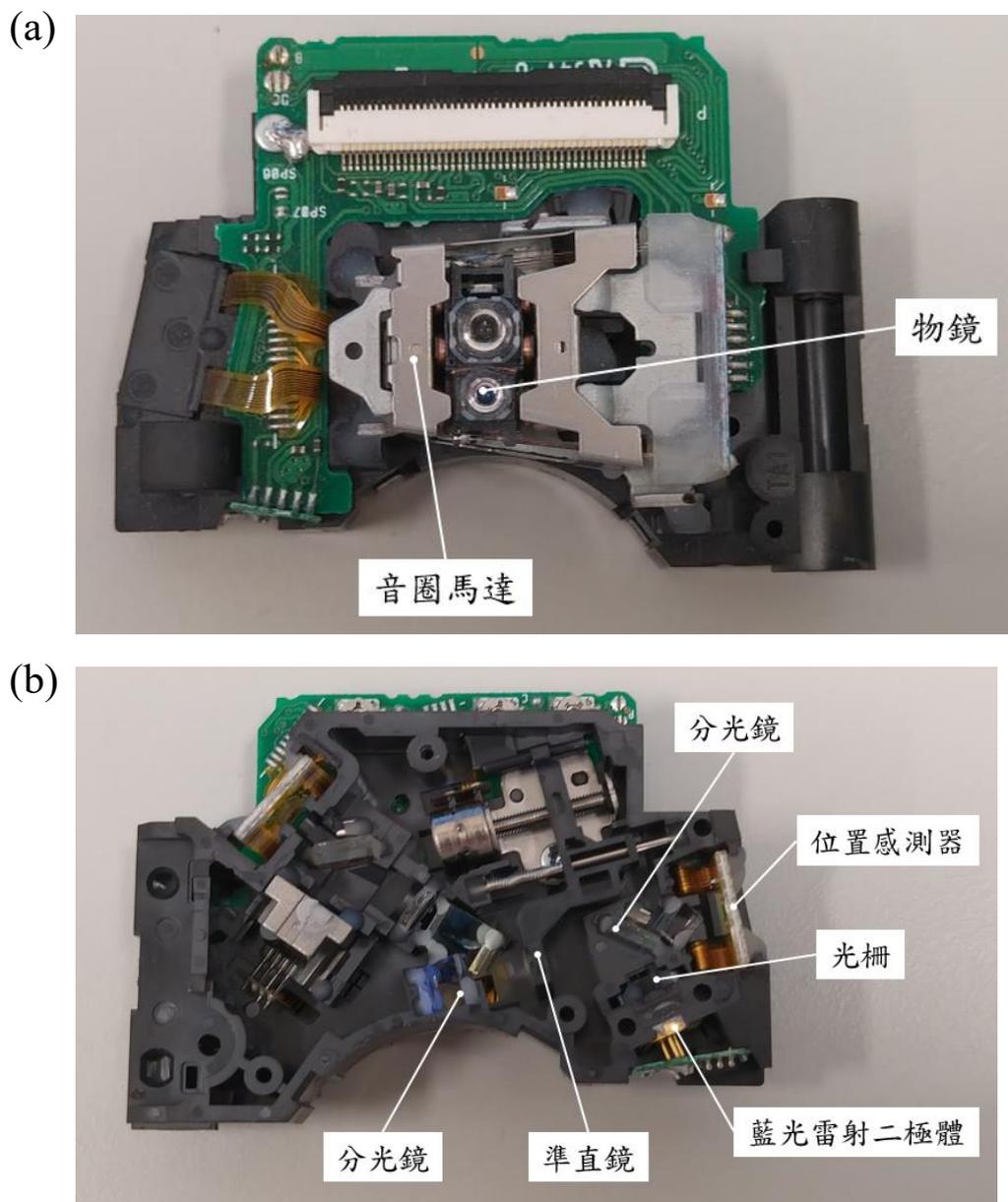
環境折射率部分，與光偏折式檢測法相同，於高折射率環境理論上可以提升系統靈敏度，但同時雜訊密度也可能因此上升。

第三章 實驗架構與設計



3.1 像散式光路設計

本研究使用商用 DVD 讀取頭作為系統像散式光路，其架構如圖 3.1 所示，藍光(SF-BD414, Sanyo)與紅光讀取頭(TOP1100s, TopRay Technologies) [附錄 A] 由雷射二極體(Laser Diode)、音圈馬達(Voice Coil Motor)、分光鏡(Beam Splitter)、準直鏡(Collimator Lens)、物鏡(Objective Lens)、光柵(Grating)與位置感測器(Position Sensitive Detector)組成。



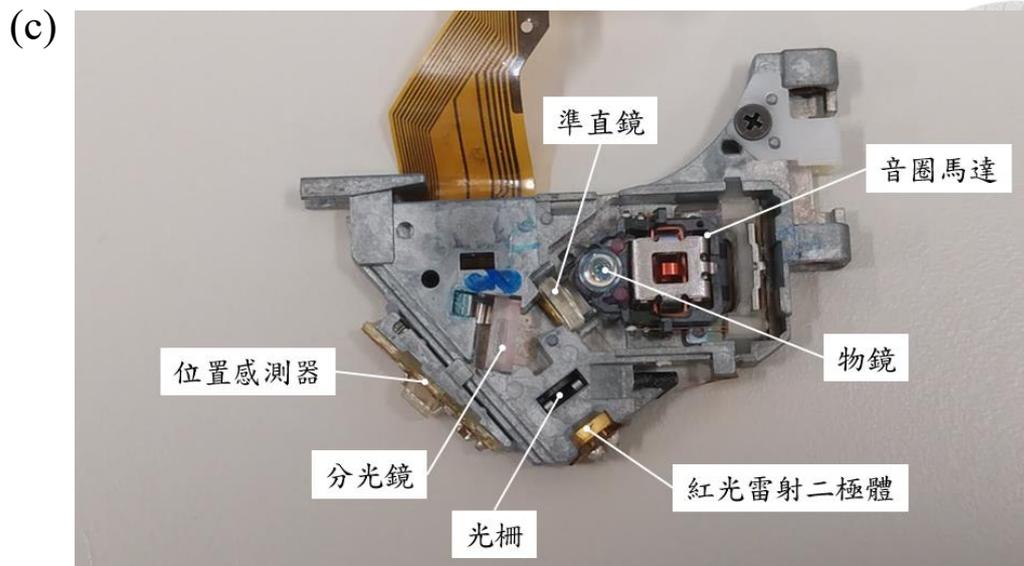
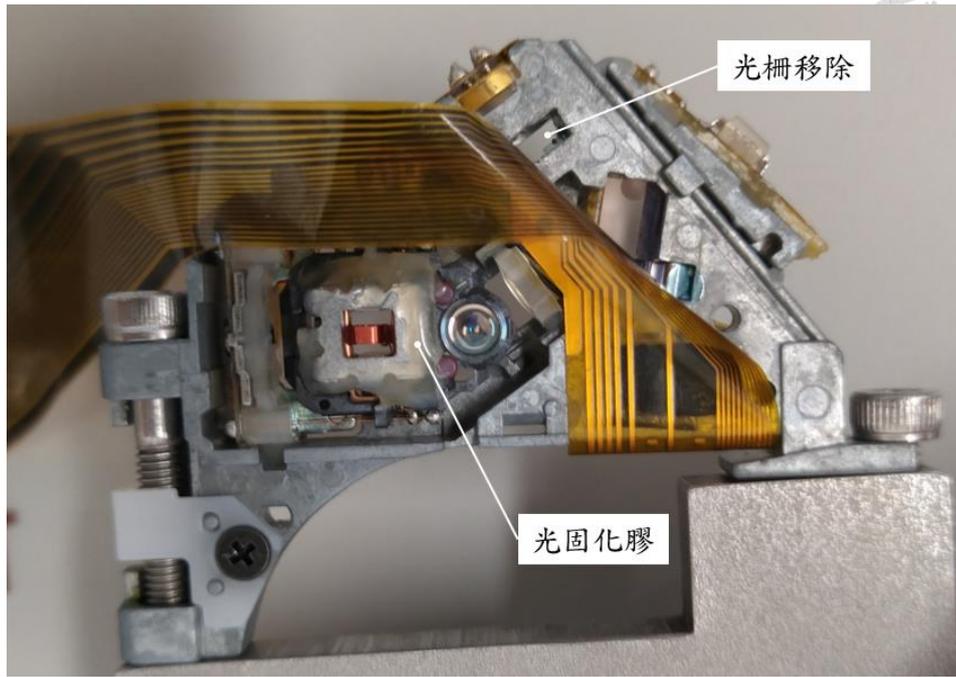


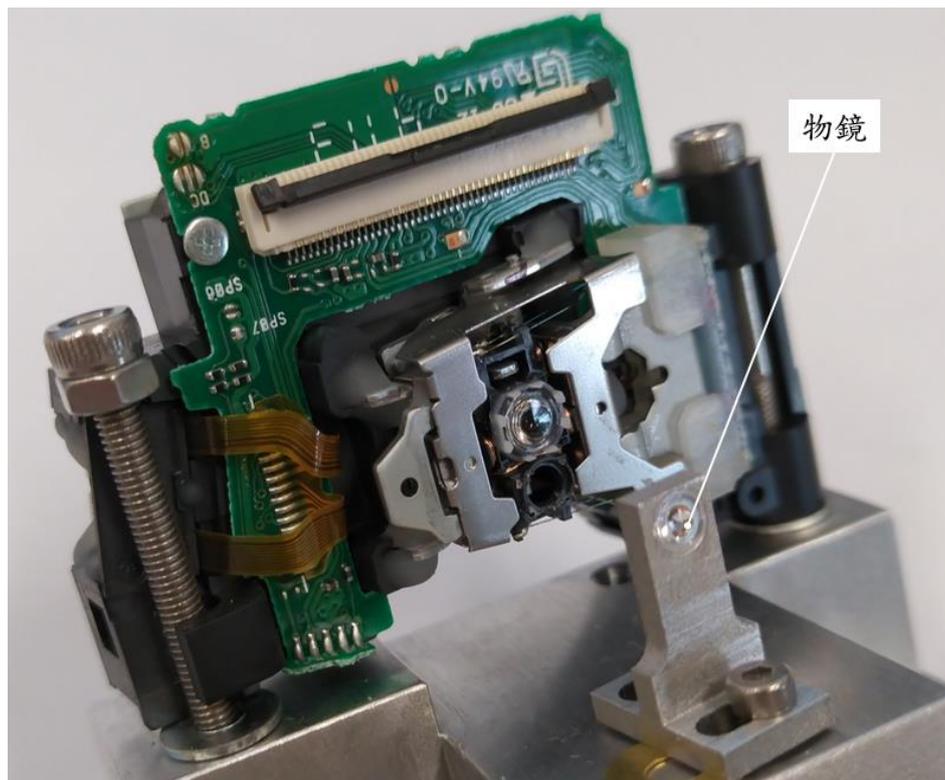
圖 3.1 藍光讀取頭之(a)正面，(b)內部結構，以及(c)紅光讀取頭結構。

本研究一共分為四組像散式光路進行實驗，第一組如圖 3.2(a)所示，命名為紅光讀取頭，為紅光讀取頭將光柵移除並利用光固化膠將音圈馬達固定以避免物鏡震動。第二組如圖 3.2(b)所示，命名為藍光讀取頭，為藍光讀取頭將光柵移除，另將物鏡取下安裝於下方以使微懸臂方便對焦。第三組如圖 3.2(c)所示，命名為藍光讀取頭改準直鏡位置，為第二組破壞其藍光讀取頭內部控制準直鏡的螺桿，使準直鏡處於可控制位置的狀態。第四組如圖 3.2(d)所示，命名為氦氖雷射紅光讀取頭，為紅光讀取頭將光柵與雷射二極體移除，以氦氖雷射作為光源輸出至讀取頭內部光路，音圈馬達同樣利用光固化膠固定。

(a)



(b)



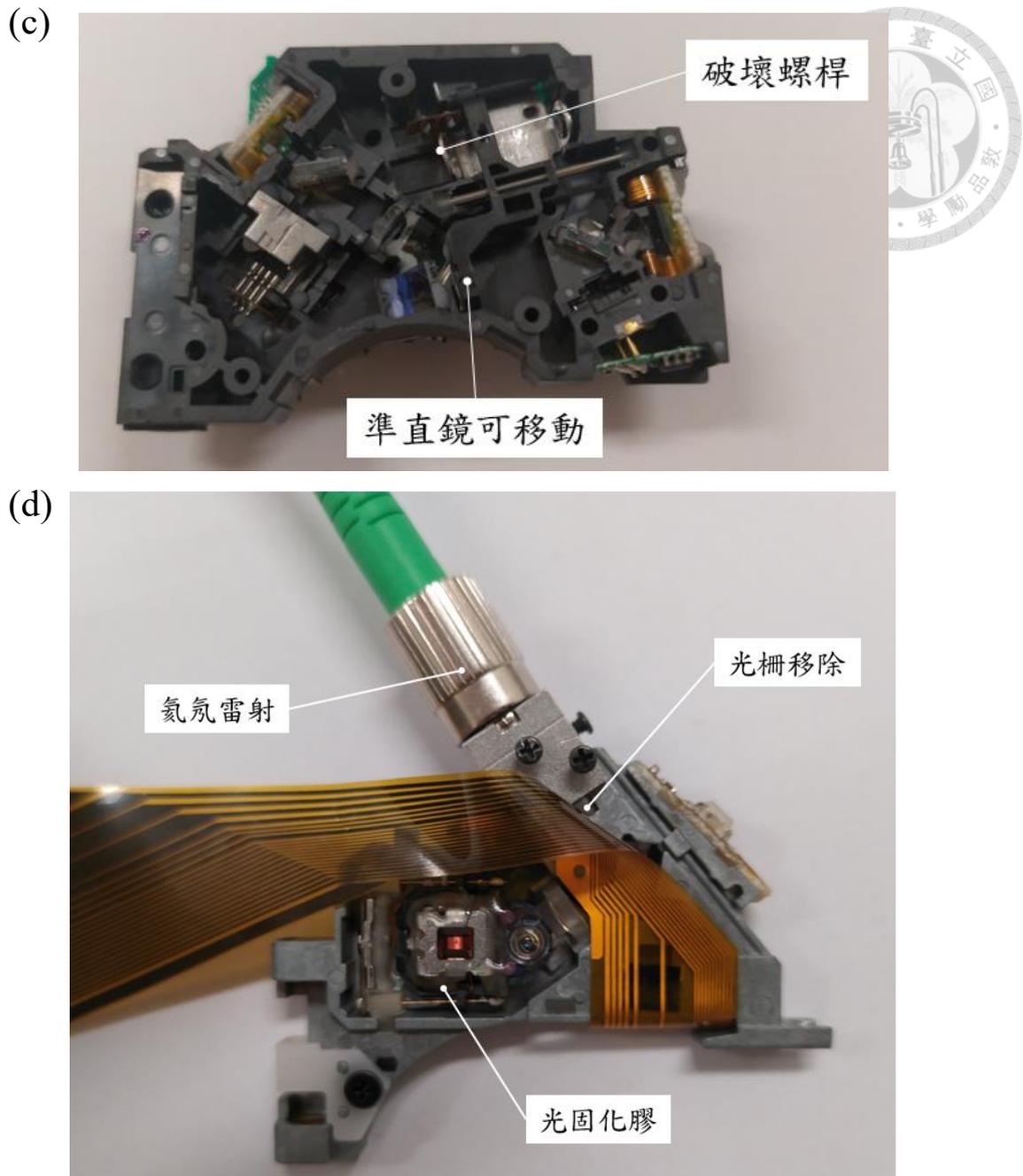


圖 3.2 本研究所用像散式光路之(a)紅光讀取頭，(b)藍光讀取頭，(c)藍光讀取頭改準直鏡位置與(d)氬氖雷射紅光讀取頭。

3.2 整體架構設計

本節將講述整體架構設計，如圖 3.3 所示，其中氬氖雷射固定機構、光纖對位與調控機構與光纖輸出端調控機構用於 3.1 節提到的第四組，光路支架與微懸臂機構則各有兩組分別對應藍光與紅光讀取頭。

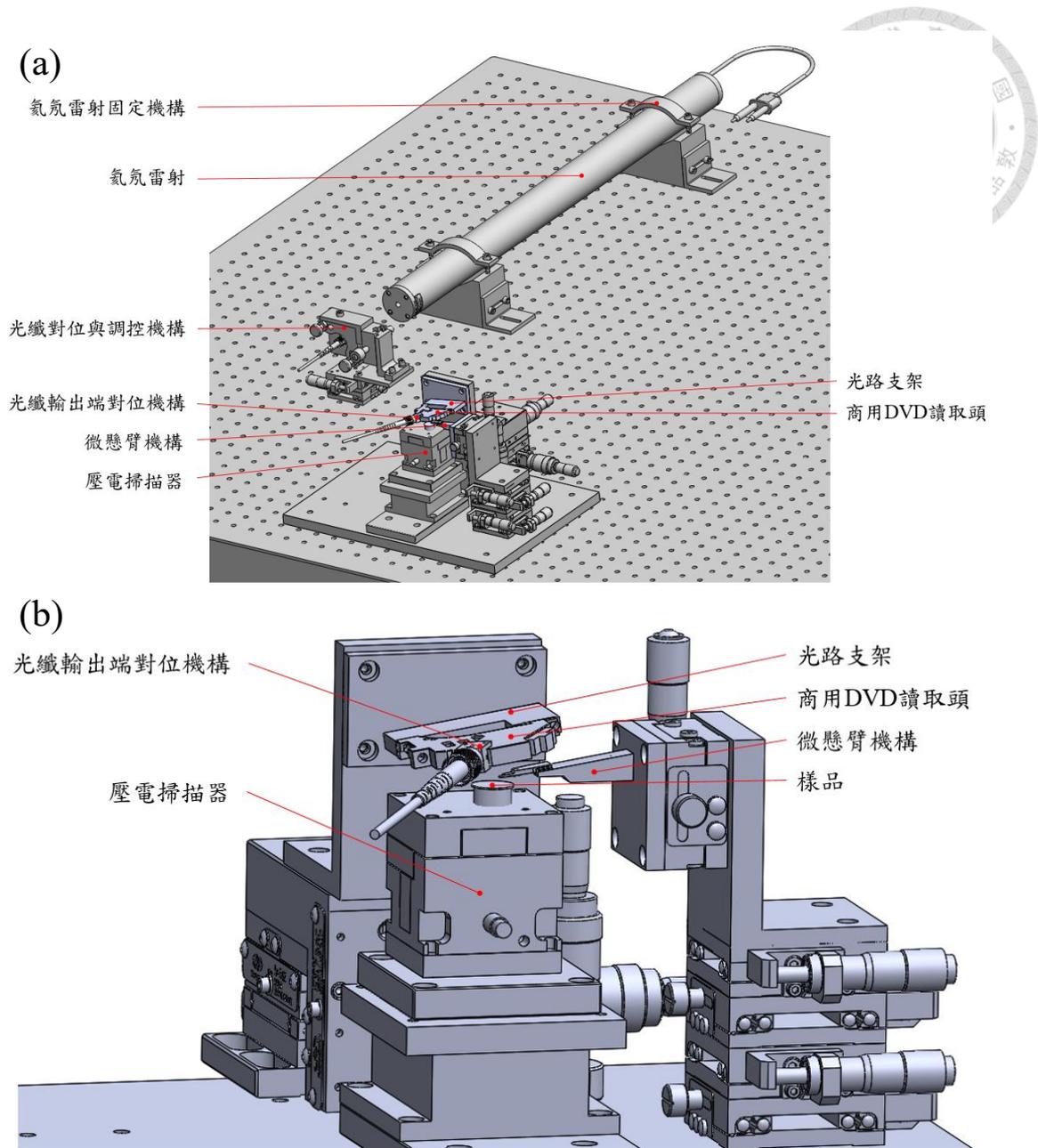


圖 3.3 (a) AFM 整體架構圖，(b) AFM 局部架構圖。

3.2.1 氮氬雷射固定機構

本研究所使用之光源除了商用 DVD 讀取頭內部之雷射二極體外，還有波長 632.8 nm 之紅光氮氬雷射(HNL150LB, Thorlab)[附錄 B]，其額定功率為 21 mW，光點直徑為 0.7 mm，其穩定性與雜訊都優於傳統雷射二極體。其固定方式如圖 3.4 所示，本研究利用 V 字形的底座來固定其圓柱狀外形，再以螺絲將上蓋固定於雷射上方以防止滾動與滑動。

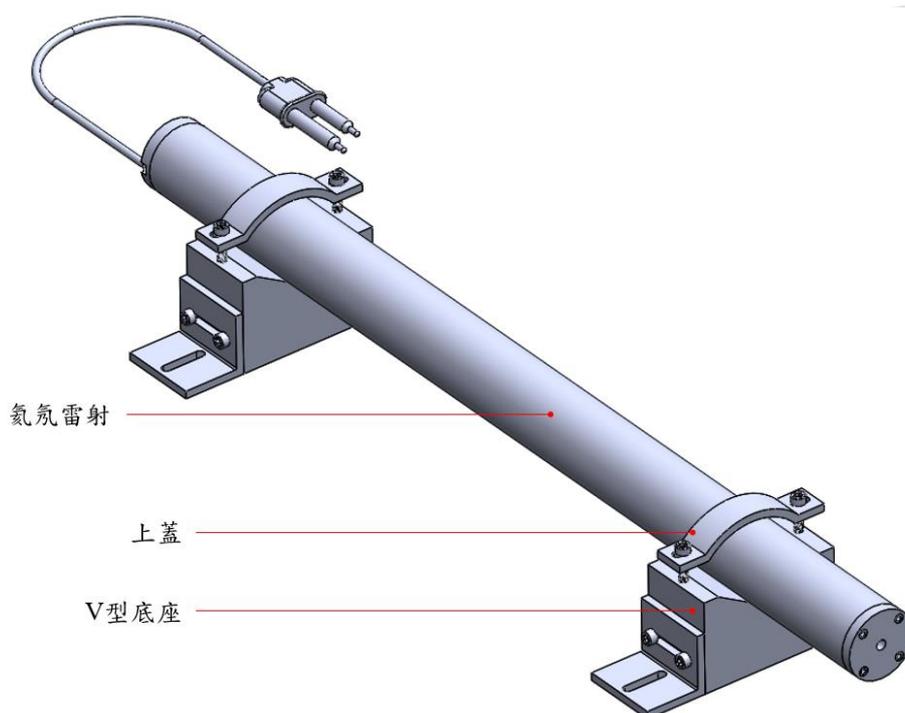


圖 3.4 氮氬雷射固定機構。

3.2.2 光纖對位與調控機構

因為雷射體積過大，因此需要透過光纖將雷射導進讀取頭中，如圖 3.5 所示為光纖對位與調控機構，其中透過 XY 軸精密位移平台(XYSG50, Misumi)、Z 軸精密位移平台(ZLWG50, Misumi)和光學固定器(DM01A, Onset)為光纖準直鏡(F220FC-B, Thorlab)與雷射對位。XY 軸精密位移平台透過分厘卡測頭可達 0.1 mm 精密微調，Z 軸精密位移平台則透過齒輪與小齒條作微調，光纖準直鏡固定於光學固定器，可透過上方的兩個進給螺絲調整雷射入射角度，藉由光纖準直鏡將雷射聚焦至光纖(P3-630A-FC-2, Thorlab)以傳送至讀取頭。

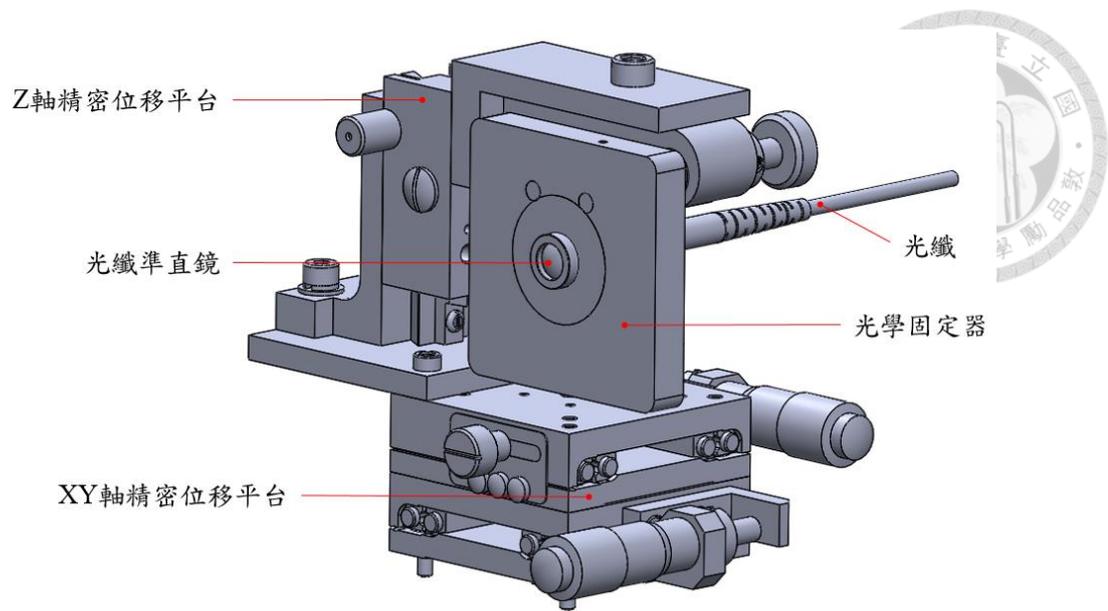


圖 3.5 光纖對位與調控機構。

3.2.3 光纖輸出端對位機構

為了確保光纖輸出端的發散光可以與原雷射二極體相同角度輸入讀取頭內部，透過如圖 3.6 所示的光纖輸出端對位機構，其由 4 個固定螺孔將 U 形結構鎖在讀取頭上，而光纖輸出端則置於內部圓孔，內部圓孔放有軟墊可保護光纖輸出端，圓孔周圍透過 4 個螺絲的進退可以調整光纖輸出端的入射角度。

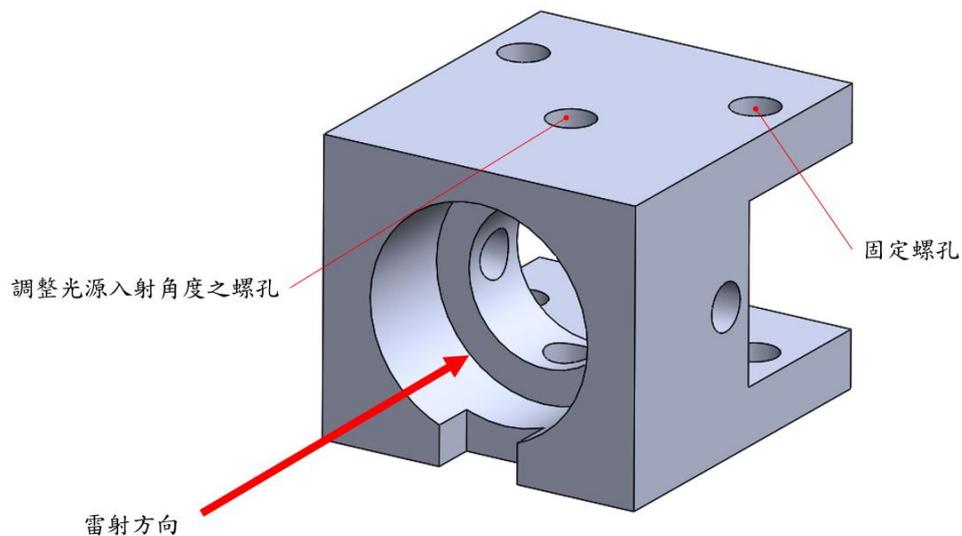


圖 3.6 光纖輸出端對位機構。

3.2.4 光路固定支架

本研究所使用的光路固定支架如圖 3.7 所示，將兩種商用 DVD 讀取頭以其對應固定架鎖附於 L 型支架其中一側。其中藍光讀取頭因為工作距離極短，為防止讀取頭與微懸臂固定機構發生機械干涉，故將物鏡取下並安置於下方物鏡支架。L 型支架另一側如圖 3.8 所示固定於 XYZ 三軸精密位移平台(M-582-XYZ, Newport)以控制光路整體位置，而讀取頭與 XYZ 三軸精密位移平台設有 9 度的夾角以配合微懸臂機構的傾斜。

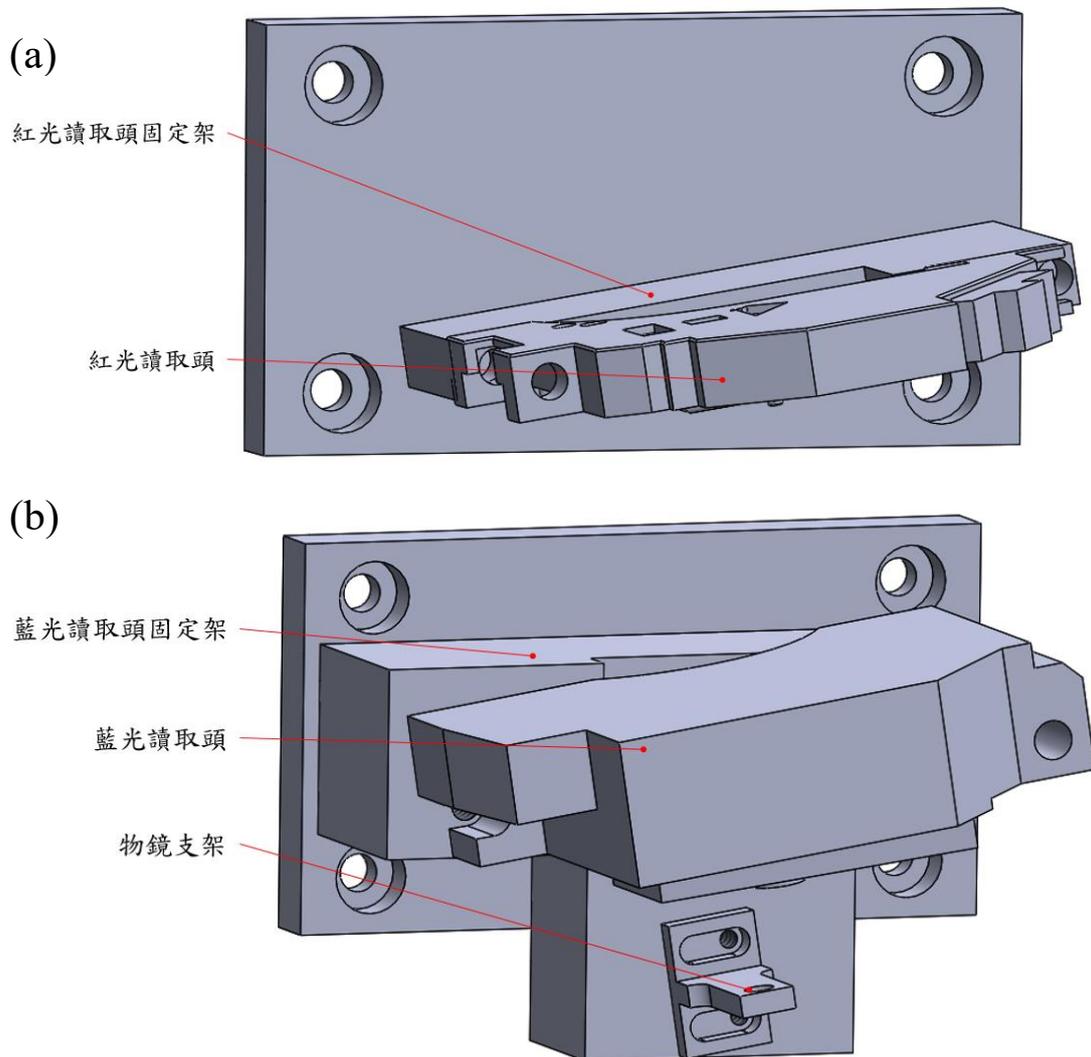


圖 3.7 (a)紅光與(b)藍光讀取頭光路固定支架機構。

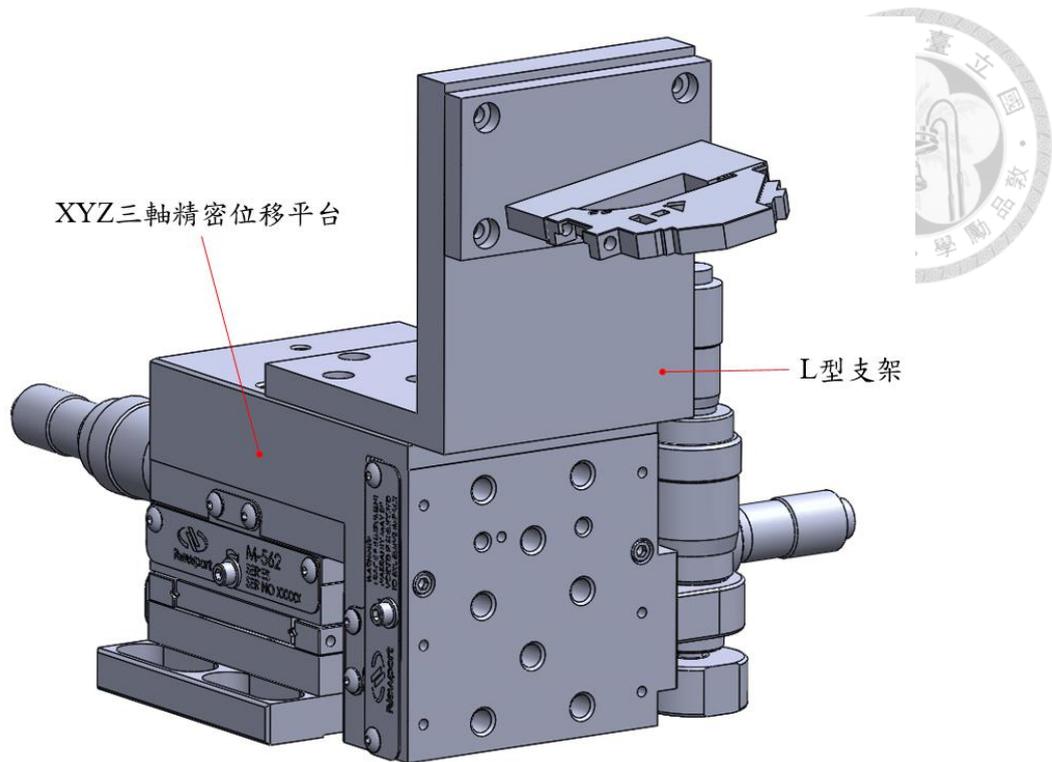


圖 3.8 光路固定支架整體機構。

3.2.5 微懸臂機構

因為藍光與紅光讀取頭兩者物鏡焦距不同，因此本研究分別設計兩組微懸臂機構對應使用。

如圖 3.9 所示為紅光讀取頭用之微懸臂機構，由彈簧夾片將微懸臂芯片夾持於微懸臂支撐件上，只需要將下方 M1 螺絲鬆開即可更換微懸臂探針，微懸臂支撐件上方黏有一片聚碳酸脂芯片增加訊號強度。微懸臂支撐件與壓電片藉由快乾膠固定於楔型支撐件上，壓電片上下各黏有聚醚醚酮(Polyetheretherketone, Peek)製成之絕緣薄片，壓電片用於輕敲模式下以激振微懸臂探針。楔型支撐件傾斜面與水平面有 9 度之夾角將微懸臂探針傾斜 9 度，使微懸臂芯片部分在實驗時不會干涉樣品。

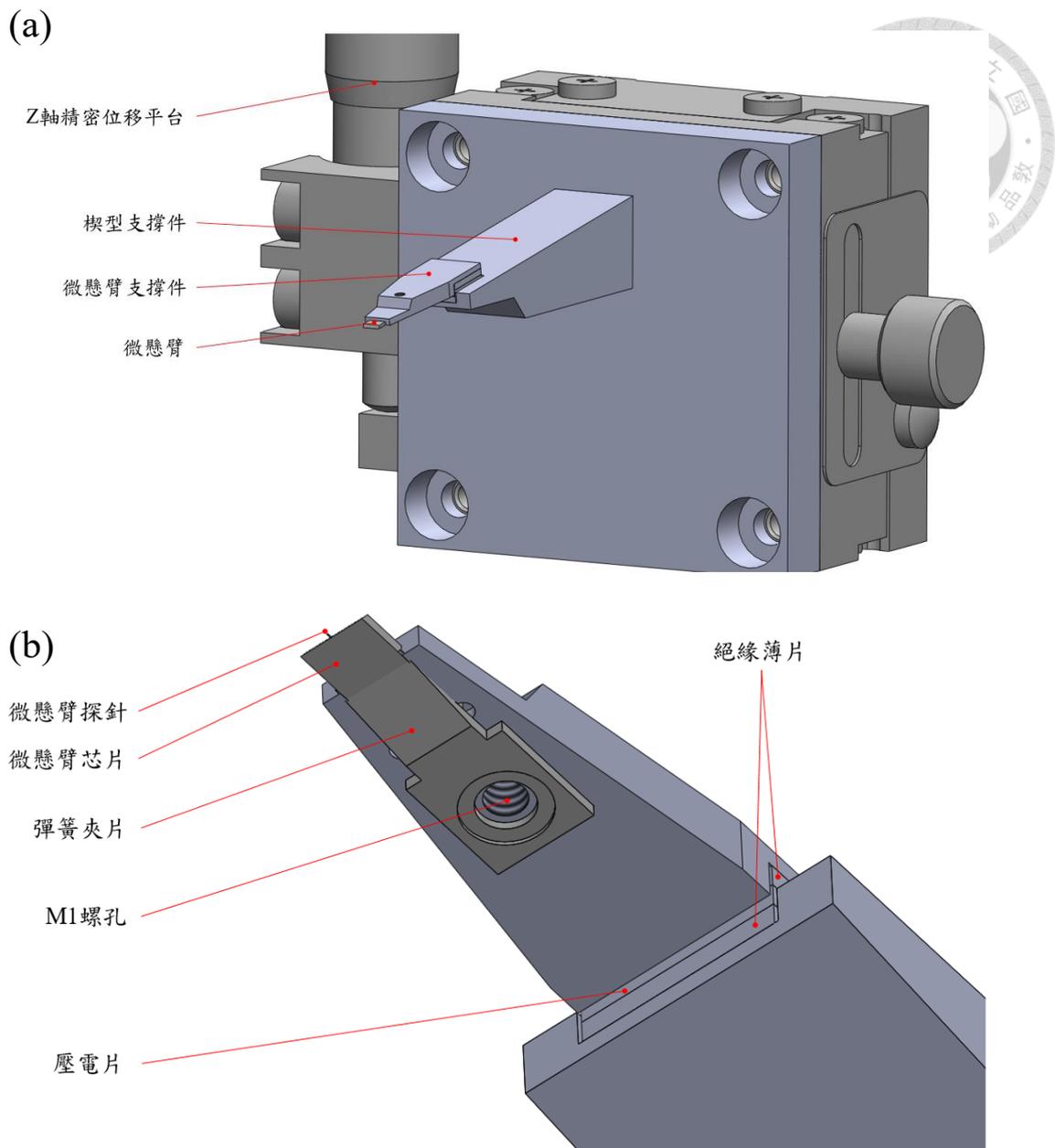


圖 3.9 紅光讀取頭用微懸臂機構之(a)整體，(b)局部結構圖。

如圖 3.10 所示為藍光讀取頭用之微懸臂機構，由於藍光讀取頭物鏡工作距離僅有 0.36 mm，而微懸臂芯片本身之厚度已有 0.3 mm，因此微懸臂機構在設計上為了保持間隙，需要將微懸臂芯片頂部保持於機構最上層，同時為了確保實驗時不會與樣品發生干涉，又需要讓微懸臂探針位於機構最下方。基於以上原因將物鏡從藍光讀取頭上取下移至下方防止微懸臂機構與讀取頭物件的干涉，而微懸臂芯片則使用快乾膠黏於微懸臂支撐件上，微懸臂支撐件與平板支撐件之間也由快乾膠固定，平板支撐件與壓電片一同藉由快乾膠黏於楔型支撐件上，壓電片上

下各黏有聚醚醚酮製成之絕緣薄片用於輕敲模式下激振微懸臂探針。楔型支撐件傾斜面與水平面有 9 度之夾角將微懸臂探針傾斜 9 度，使微懸臂芯片部分在實驗時不會干涉樣品。

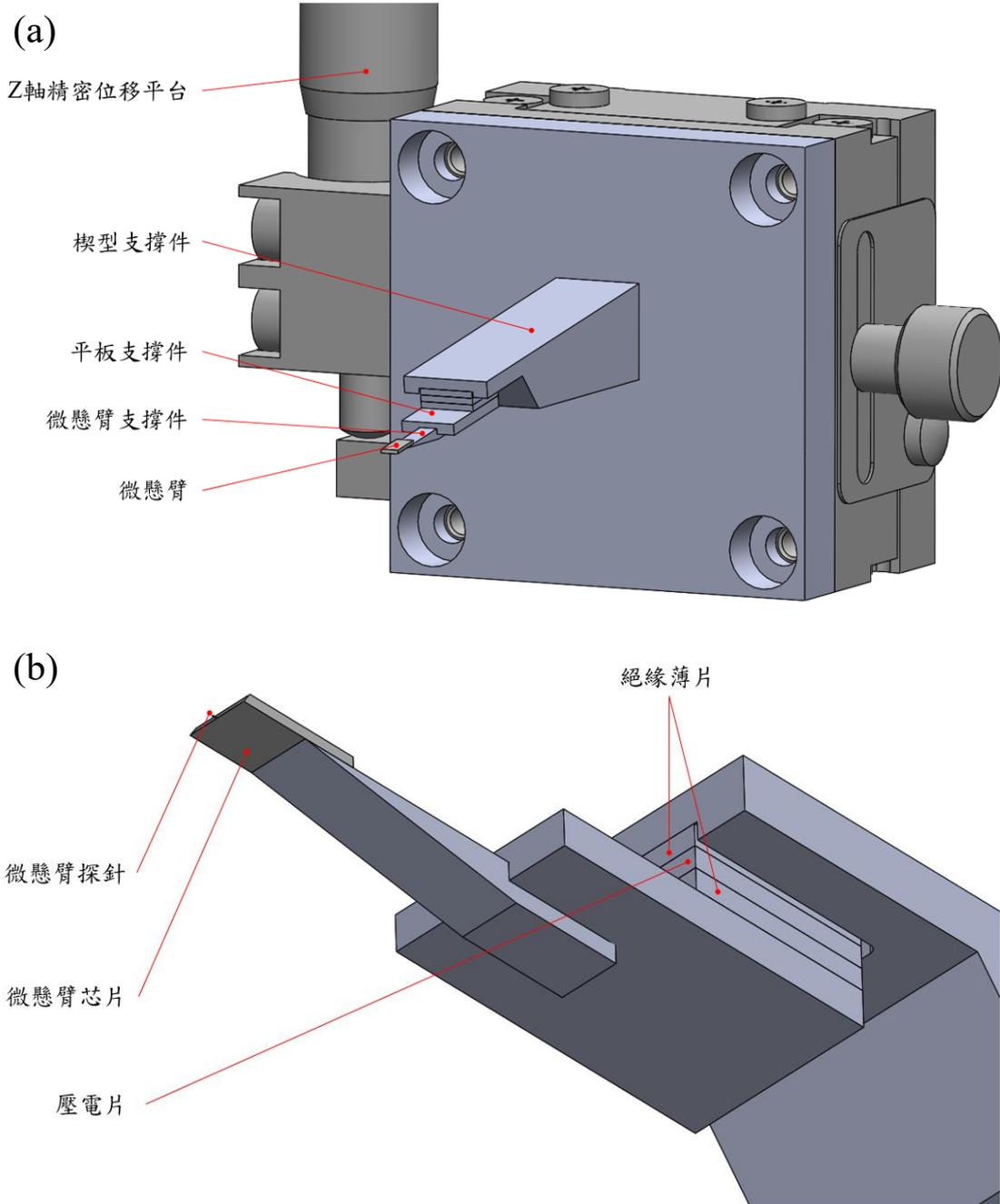


圖 3.10 藍光讀取頭用微懸臂機構之(a)整體，(b)局部結構圖。

如圖 3.11 所示，上述兩組微懸臂機構皆連接於一 Z 軸精密位移平台(XSG50, Misumi)用以調整微懸臂高度方便對焦。Z 軸精密位移平台固定於 L 型支架其中一側，L 型支架另一側則固定於 XY 軸精密位移平台(XYSG50, Misumi)以調整微懸臂機構與雷射光點間相對位置。

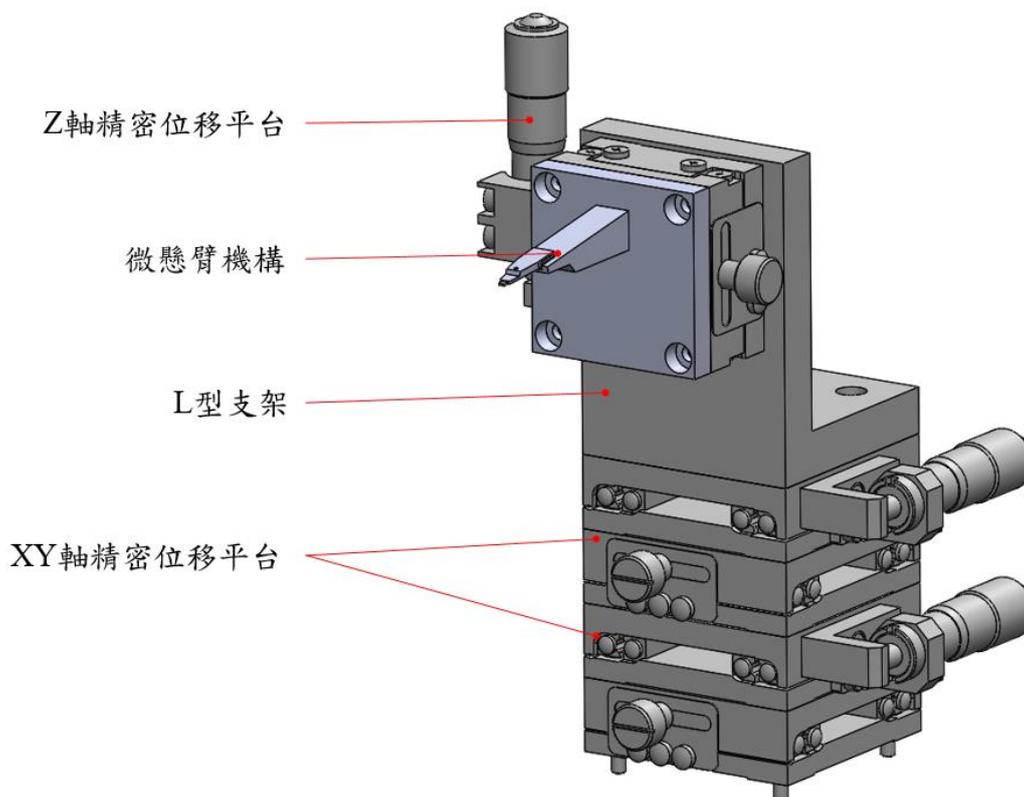


圖 3.11 微懸臂機構及位移平台。

3.3 實驗儀器

3.3.1 功率計

本研究使用之市售功率計(PM100D, Thorlab) 如圖 3.12 所示，搭配標準光電二極體功率探頭(S121C, Thorlab)，可量測波長範圍為 400-1000 nm，功率範圍為 500 nW-500 mW，用於量測商用 DVD 讀取頭之光功率以及調整氦氖雷射之輸出功率。



圖 3.12 功率計與功率探頭。

3.3.2 位置感測器

本研究除了使用讀取頭本身之 PSD 外，亦有使用市售之 PSD(PDQ80A, Thorlab)[附錄 C]來量測光源之訊雜比，其外觀如圖 3.13 所示，PDQ80A 可感測之光波長為 405 nm 至 1050 nm。此外，PDQ80A 內建放大電路，對其輸入電壓 $\pm 5\text{ V}$ 至 $\pm 15\text{ V}$ 之電源即可運作。PDQ80A 三個輸出 Pin 腳分別為 X、Y 方向之電壓差值與四象限電壓 SUM 值，本研究僅利用其 SUM 值腳位來量測雷射光源之訊雜比。



圖 3.13 PDQ80A。

3.3.3 壓電掃描器與控制器

如圖 3.14 所示為本研究使用之市售 Z 軸壓電定位平台(P-611.ZS NanoCube, Physik Instrumente)，Z 軸壓電定位平台具有 100 μm 之位移量，0.2 nm 之移動精度，需透過如圖 3.15 所示之 E-665 掃描控制器(E-665 NanoCube, Physik Instrumente)來驅動，此控制器可透過外部類比訊號驅動，輸入電壓範圍為 -2 V 至 12 V，但由於所使用之控制系統類比輸出電壓範圍為 -1 V 至 1 V，因此透過如圖 3.16 所示之自製放大器將訊號放大後再輸入至掃描控制器。



圖 3.14 Z 軸壓電定位平台。



圖 3.15 E-665 掃描控制器。

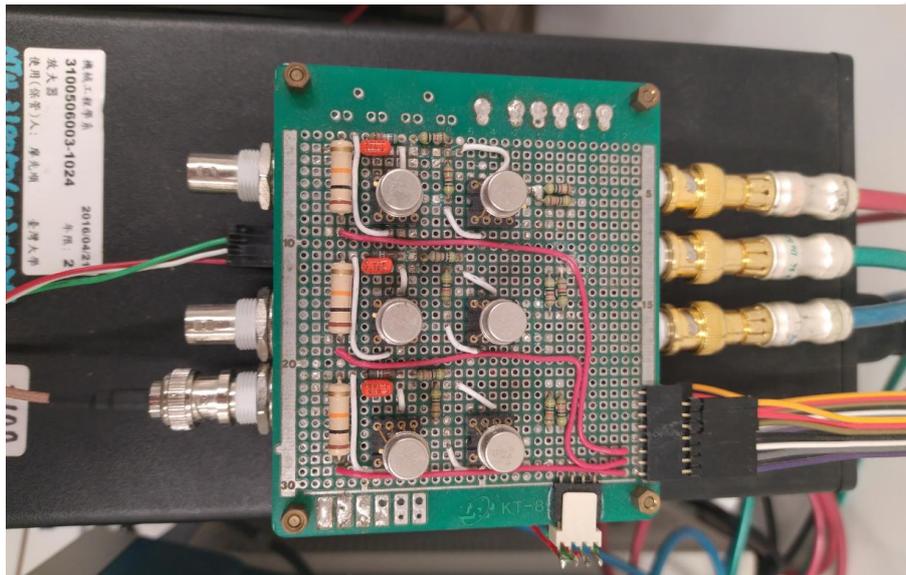
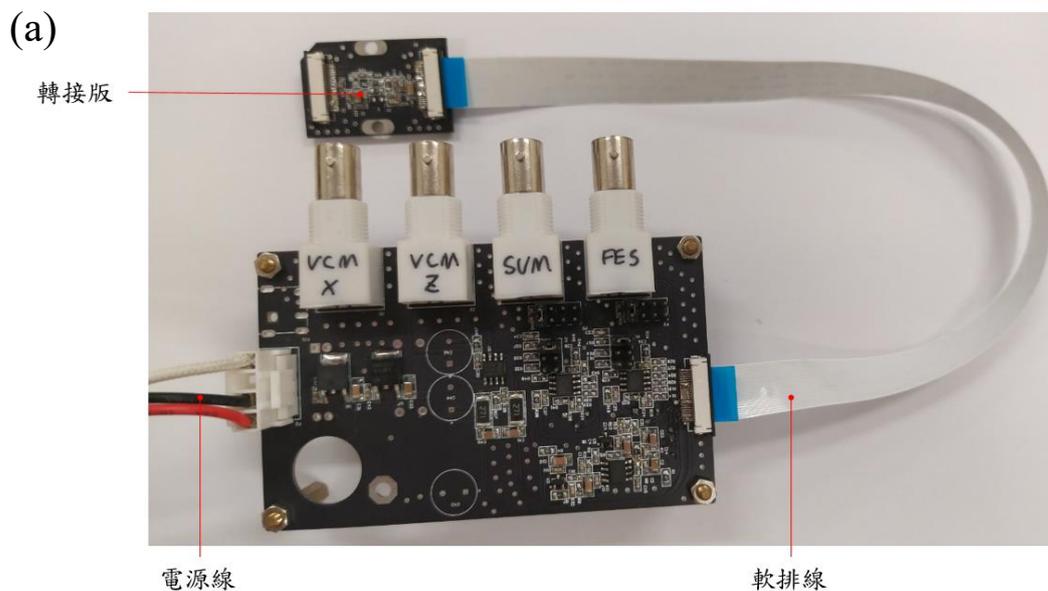


圖 3.16 自製放大器。

3.3.4 讀取頭放大電路

本研究使用之讀取頭放大電路有二，如圖 3.17 所示分別為紅光讀取頭放大電路(Topray 1100s 讀取頭驅動電路, OME Technology)與藍光讀取頭放大電路(OPU_SF-BD415 rev3, MPro GmbH)。紅光讀取頭放大電路輸入電壓 $\pm 10\text{ V}$ 即可運作，可用以驅動雷射二極體以及產生 FES、SUM、VCM-Z 以及 VCM-X 之訊號。藍光讀取頭放大電路輸入電壓 $\pm 9\text{ V}$ 至 $\pm 12\text{ V}$ 即可運作，可用以驅動雷射二極體以及產生 FES 訊號。



(b)

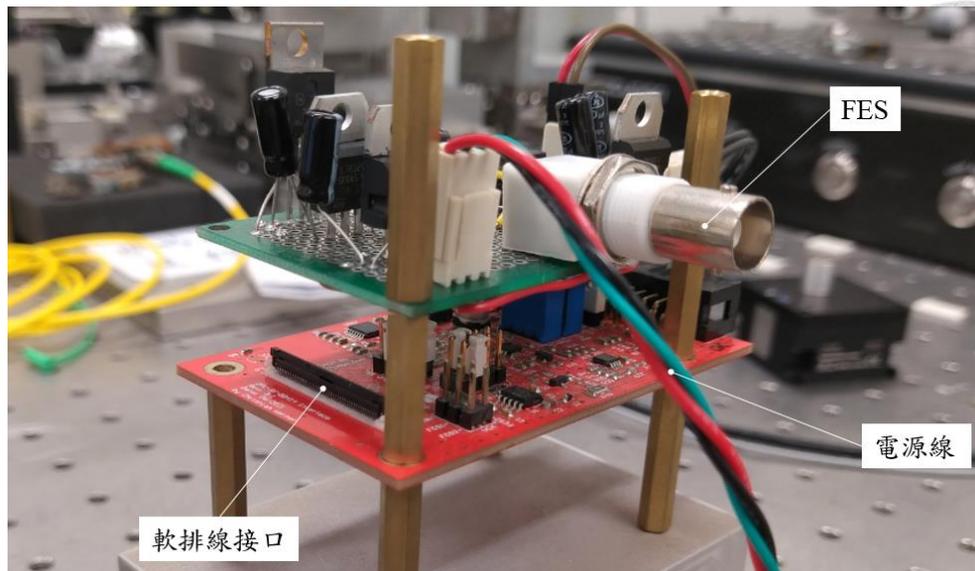


圖 3.17 (a)紅光讀取頭放大電路，(b)藍光讀取頭放大電路。

3.3.5 Z 軸步進滑台

本研究使用如圖 3.18 所示之 Z 軸步進滑台(KH0704-L, SURUGA)帶動樣品做進針，其具有 4 mm 之位移量，位移精度達 0.25 μm ，此滑台具有手動旋轉鈕可調整高度，亦可透過電腦程式配合控制器做精密控制。

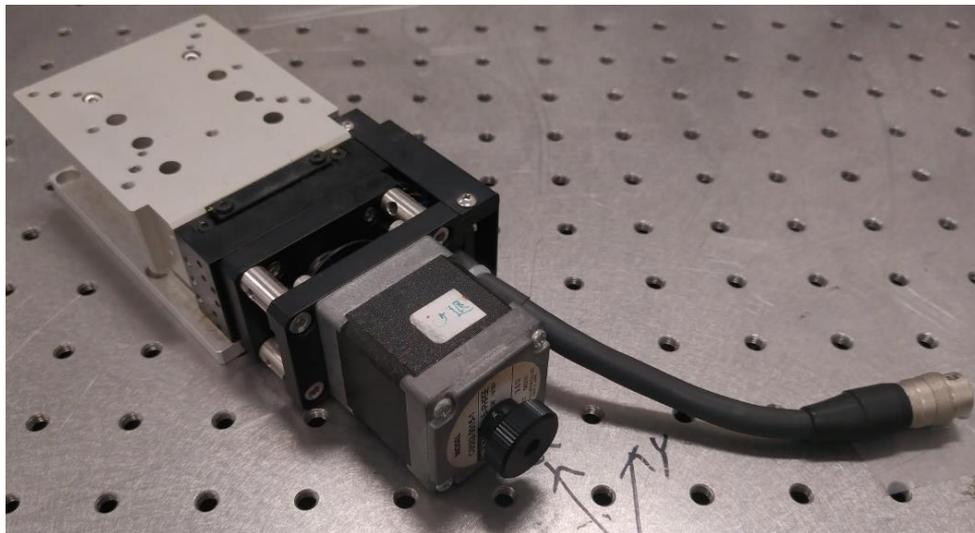
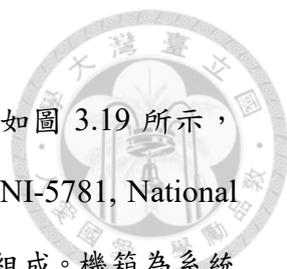


圖 3.18 Z 軸步進滑台。



3.3.6 控制系統

本研究使用之控制系統(PXIe System, National Instruments)如圖 3.19 所示，由一機箱(PXIe-1062Q, National Instruments)、兩組 FPGA 模組(NI-5781, National Instruments)與嵌入式控制器(PXIe-8840, National Instruments)所組成。機箱為系統提供電源、冷卻功能與通訊匯流，具有 4 個 PXI 插槽、1 個提供系統時序功能的 PXI Express 插槽及 2 個混合式插槽。嵌入式控制器可用於大量處理資源、精確模組化的儀器與資料擷取應用。FPGA 模組具有雙輸入與雙輸出通道，可實時處理與擷取訊號以實現高速控制與相關應用。本控制系統透過 Labview 撰寫程式，用於實驗資料的擷取與應用。

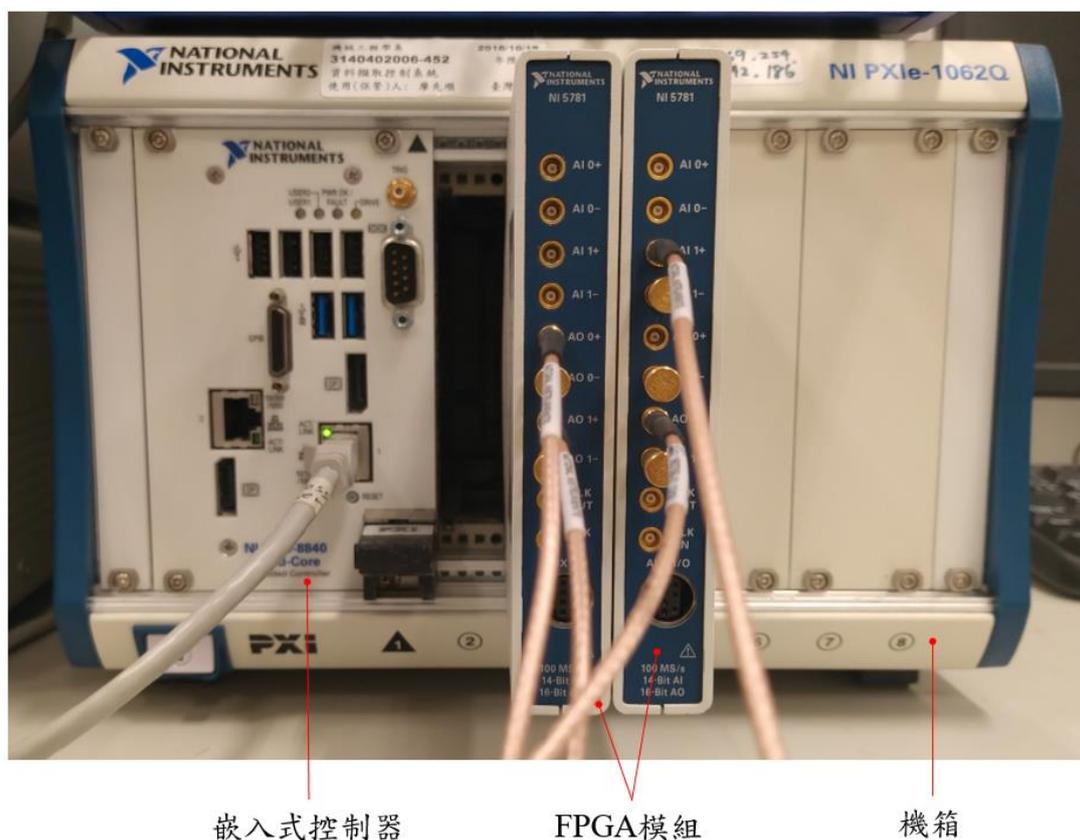


圖 3.19 PXIe 控制系統。

3.4 實驗架構

本研究一共進行兩種實驗，分別為光強與訊雜比實驗以及靈敏度量測實驗，此部分會介紹以上實驗相對應的實驗架構。

3.4.1 光強與訊雜比量測實驗

如圖 3.20 所示為光強與訊雜比量測實驗架構圖，本實驗一共分為 5 組進行，前 4 組為本研究所用光路模組，分別為紅光讀取頭、藍光讀取頭、藍光讀取頭改準直鏡位置以及氦氖雷射紅光讀取頭，第 5 組為光路模組氦氖雷射紅光讀取頭其氦氖雷射光源。

前 4 組透過支架將讀取頭固定，讓讀取頭物鏡端雷射光射入位置感測器 (PDQ80A)，透過示波器觀測其 SUM 值及其對應之雜訊，進而計算出其訊雜比。第 5 組則透過如圖 3.21 所示的專用支架，將氦氖雷射與 PDQ80A 固定於支架上，其中氦氖雷射光源藉由準直鏡產生平行光，利用支架上兩個進給螺絲調整雷射光入射角度以將其對準 PDQ80A，再透過示波器觀測其 SUM 值及對應雜訊以計算其訊雜比。

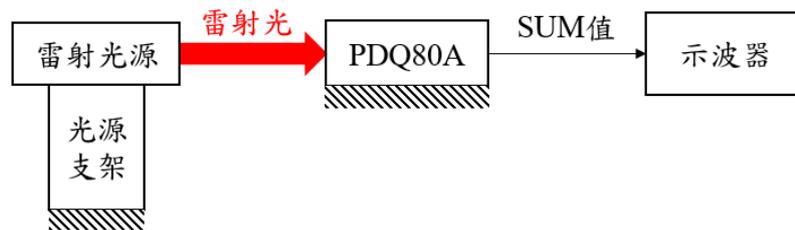


圖 3.20 光強與訊雜比實驗架構圖。

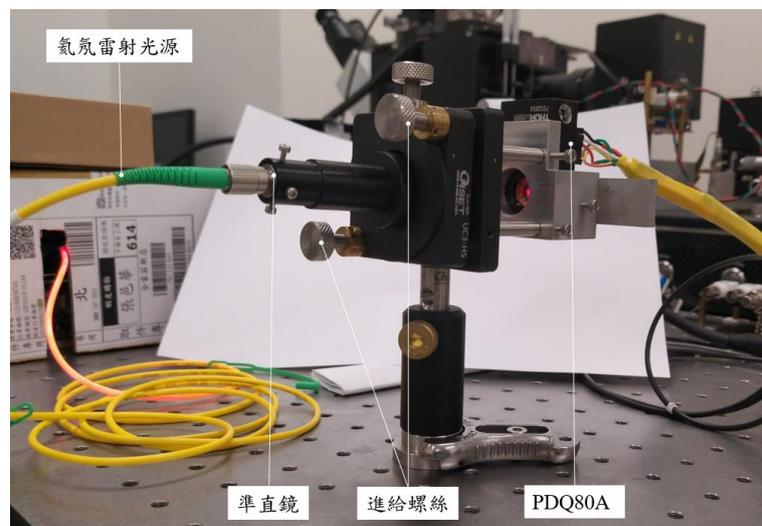


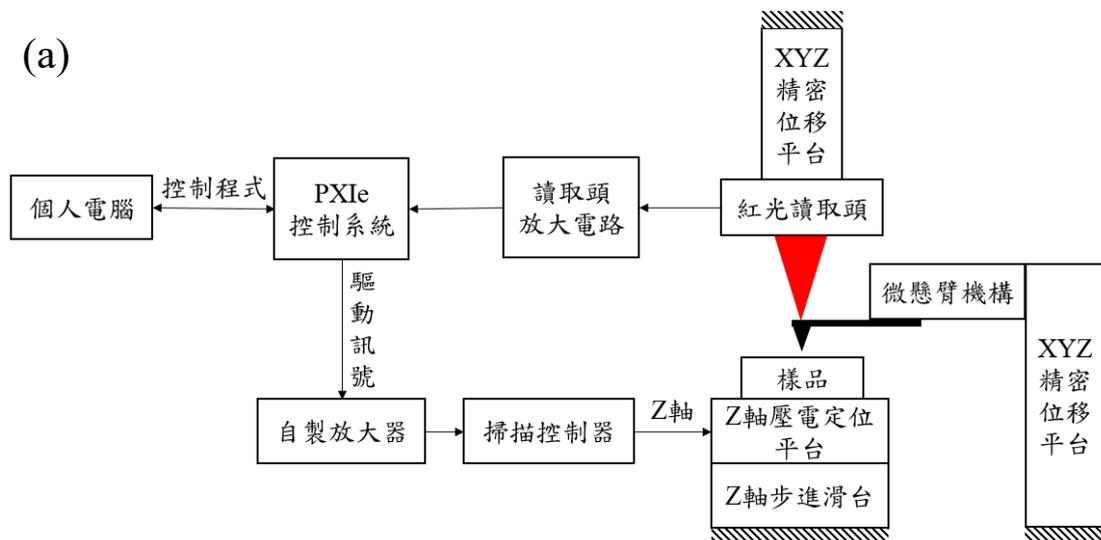
圖 3.21 第 5 組之光強與訊雜比量測實驗架構實體照片。

3.4.2 靈敏度量測實驗

如圖 3.22 所示為靈敏度量測實驗架構圖，本研究使用之紅光讀取頭、藍光讀取頭藍光讀取頭改準直鏡位置與氦氖雷射紅光讀取頭四種光路模組以及對應之微懸臂機構分別安裝於 XYZ 三軸精密位移平台上，用於調整系統間相對位置。本實驗樣品使用雲母，將樣品置於 Z 軸壓電定位平台與 Z 軸步進滑台之上，Z 軸壓電定位平台透過程式控制可帶動樣品往上接近微懸臂探針，但由於此壓電定位平台可移動範圍相當小，因此需先透過手動調整 Z 軸步進滑台，將樣品與微懸臂探針的距離縮小至小於 Z 軸壓電定位平台的行程。

雷射光源經由讀取頭內部的像散式光路後由微懸臂探針反射進入位置感測器，經由讀取頭放大電路將訊號由 PXIe 控制系統擷取傳送至電腦，後續由電腦中的程式對 PXIe 控制系統下達指令，經由自製放大器將訊號放大傳送至掃描控制器，以此來驅動 Z 軸壓電定位平台。Z 軸壓電定位平台高度改變將導致微懸臂探針的反射訊號產生變化，訊號經由相同路徑傳送至電腦由程式進行分析。

本實驗因為對於震動相當敏感，外界震動會導致系統雜訊增大，對實驗結果造成影響，因此實驗架構中 2 個 XYZ 三軸精密位移平台與 Z 軸步進滑台皆固定於同一塊金屬板並置於光學桌上，光學桌可減輕來自地面的震動以減少震動的影響。



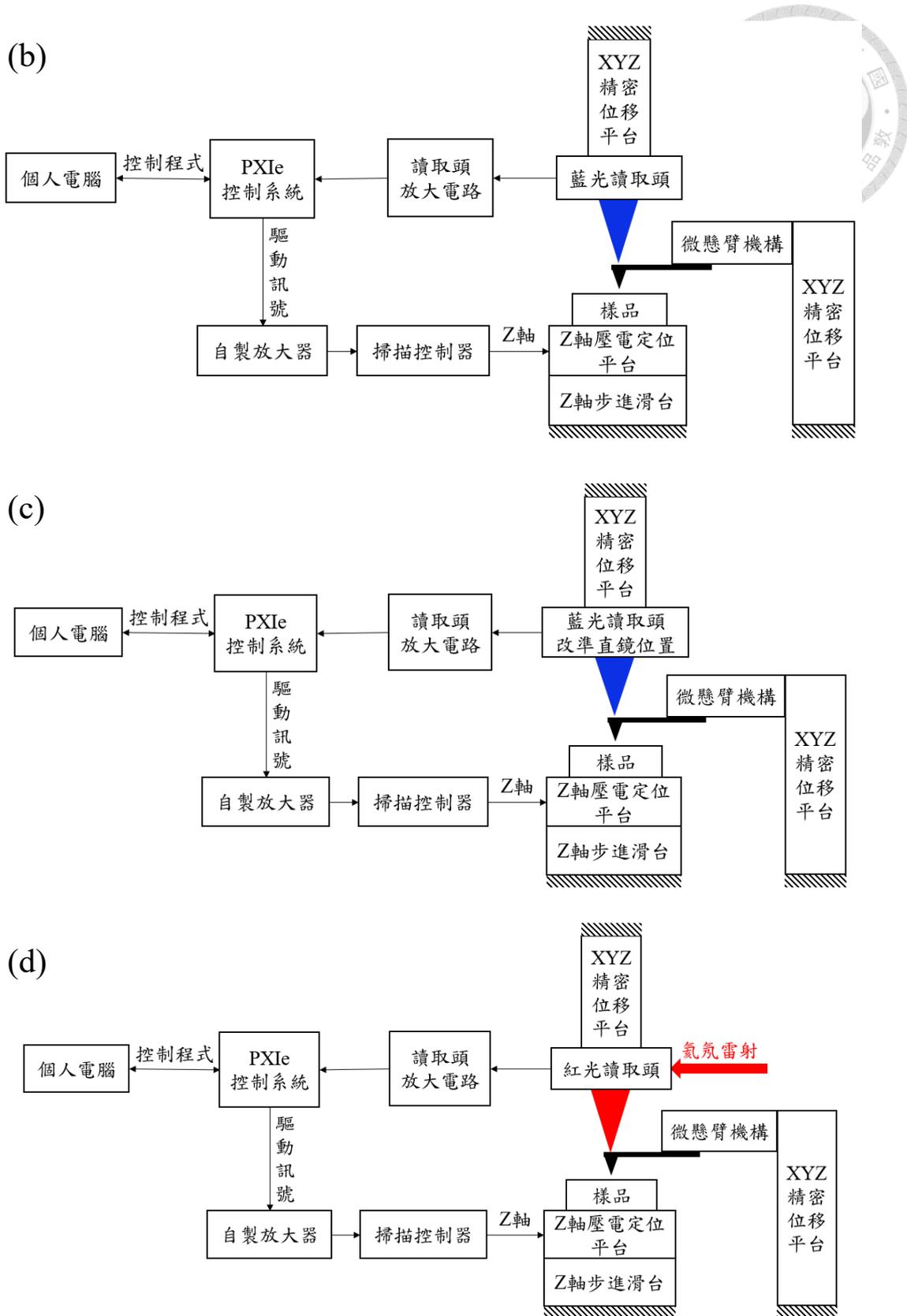


圖 3.22 (a)紅光讀取頭，(b)藍光讀取頭、(c)藍光讀取頭改準直鏡位置以及(d)氦

氦雷射紅光讀取頭靈敏度量測實驗架構圖。

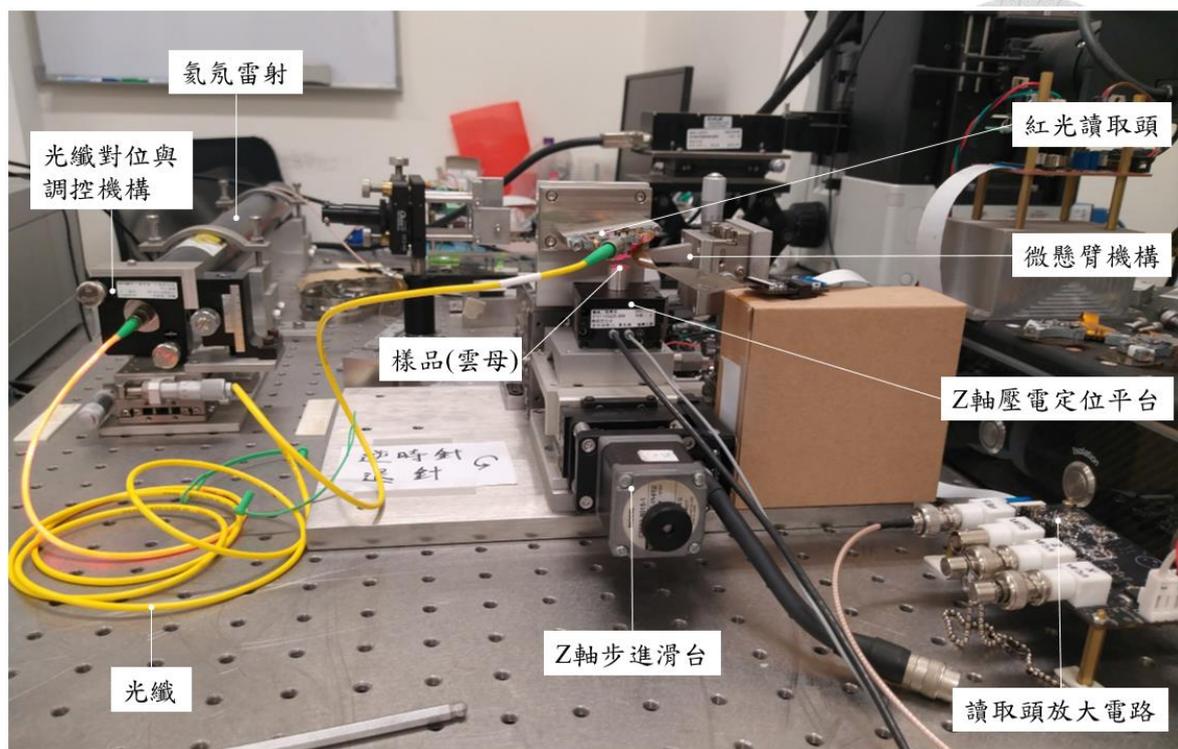


圖 3.23 靈敏度量測實驗架構實體照片，以圖 3.22(d)為例。

第四章 實驗流程與結果



本章節使用前述章節所設計之光路模組、微懸臂機構以及市售儀器，量測系統之訊雜比以及靈敏度。4.1 節為光強與訊雜比量測實驗，4.2 節為靈敏度量測實驗。

4.1 光強與訊雜比量測實驗

訊雜比為訊號功率與雜訊功率的比值。本實驗透過市售 PSD(PDQ80A, Thorlab)，量測前述章節所設計各光路模組之訊雜比，並且透過青板玻璃反射片對氦氖雷射光源進行衰減，以找出最佳訊雜比之光源強度以進行後續實驗。

4.1.1 光強與訊雜比量測實驗流程

本研究光強與訊雜比量測實驗流程如圖 4.1 所示，首先調整 PDQ80A 與光路模組之相對位置，使光路模組之光點完整進入 PDQ80A 之感測器，之後藉由示波器觀記錄其輸出 SUM 值與對應之雜訊，以進行後續訊雜比計算。

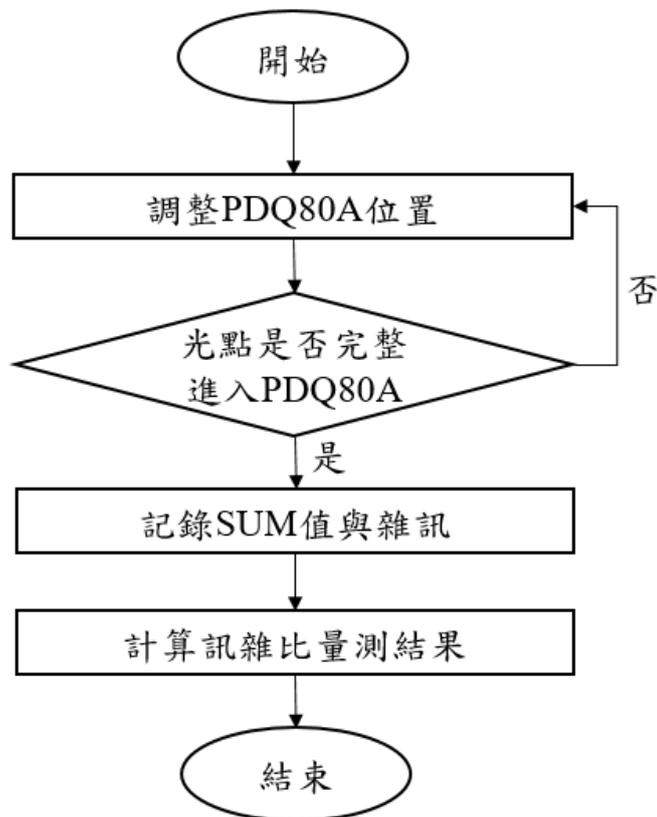


圖 4.1 光強與訊雜比量測實驗流程。

4.1.2 光強與訊雜比量測結果

本實驗測量各光路模組之訊雜比，分別為紅光讀取頭、藍光讀取頭、藍光讀取頭改準直鏡位置、氦氖雷射紅光讀取頭以及氦氖雷射紅光讀取頭其氦氖雷射光源。本實驗利用青板玻璃反射片對氦氖雷射進行衰減，以找出氦氖雷射紅光讀取頭最佳之訊雜比。

由於本實驗是透過青板玻璃反射片之穿透率來對氦氖雷射光源進行衰減，而青板玻璃反射片其對應規格為反射率，因此需先量測雷射光穿透青板玻璃反射片後的實際功率。本實驗使用三種不同規格的青板玻璃，分別為反射率 40%、60% 與 80%，適用波長 655 nm，量測方式為利用功率計於如圖 4.2 所示之各位置量測，其中於量測 3 號位置時由於光纖出口為發散光不易測量，因此裝上對應準直鏡(F220FC-B, Thorlab)後進行量測，最終光強度量測結果如表 4.1 所示。

表 4.1 氦氖雷射 HNL150LB 經不同規格青板玻璃反射片後各位置雷射強度。

	無反射片 (mW)	40%反射片 (mW)	60%反射片 (mW)	80%反射片 (mW)
氦氖雷射輸出(位置 1)	21	21	21	21
反射片後(位置 2)	21	10.3	1.3	5.3
光纖輸出(位置 3)	6.35	1.84	0.3	0.66
微懸臂探針上方(位置 4)	1.04	0.31	0.05	0.11

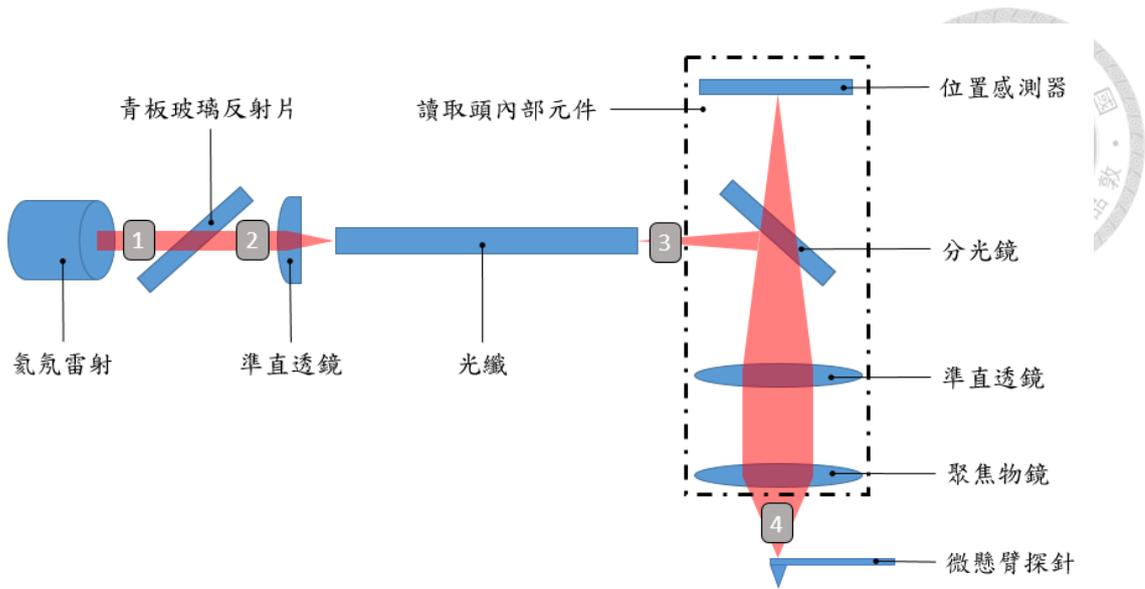


圖 4.2 光功率量測位置示意圖。

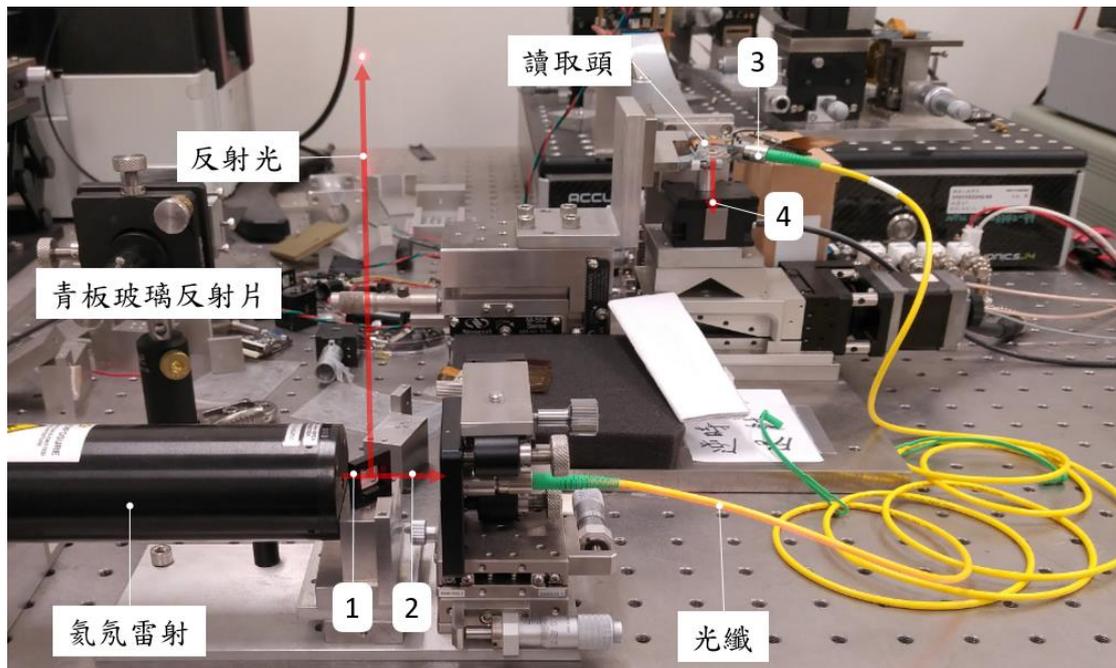


圖 4.3 光功率量測位置實體照片。

氦氖雷射經過青板玻璃後的強度經過驗證後，即可進行後續訊雜比量測實驗。首先第一組為紅光讀取頭，其物鏡端，即微懸臂探針上方光功率為 0.2 mW，照射在 PDQ80A 後量測結果如圖 4.4 所示，其 SUM 值為 821.62 mV，雜訊為 4.24 mV，訊雜比為 193.78。

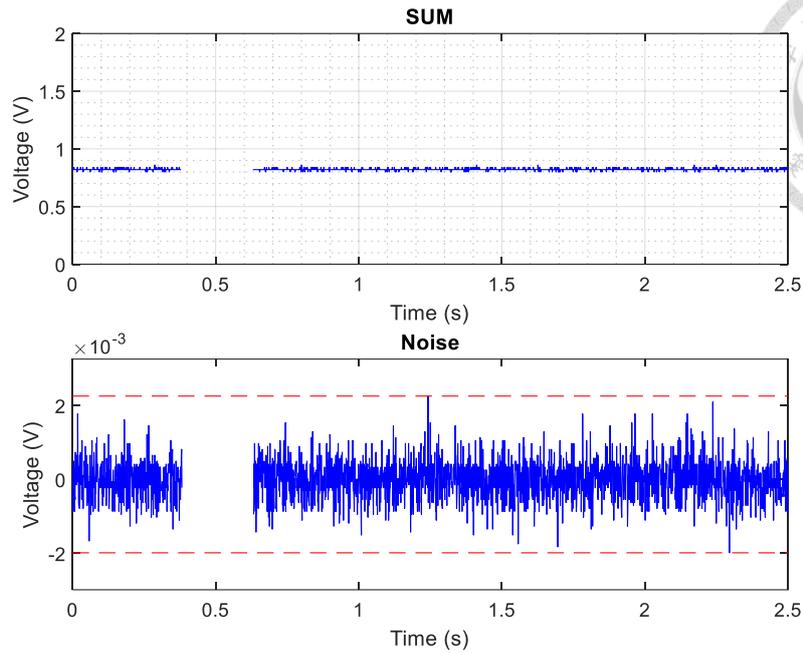
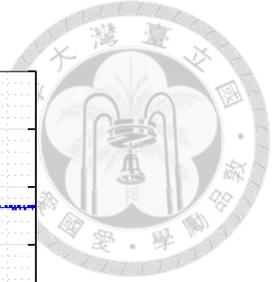


圖 4.4 紅光讀取頭訊雜比量測結果。

第二組為藍光讀取頭，其微懸臂探針上方光功率為 0.39 mW，照射在 PDQ80A 後量測結果如圖 4.5 所示，其 SUM 值為 340.24 mV，雜訊為 2.96 mV，訊雜比為 114.95。

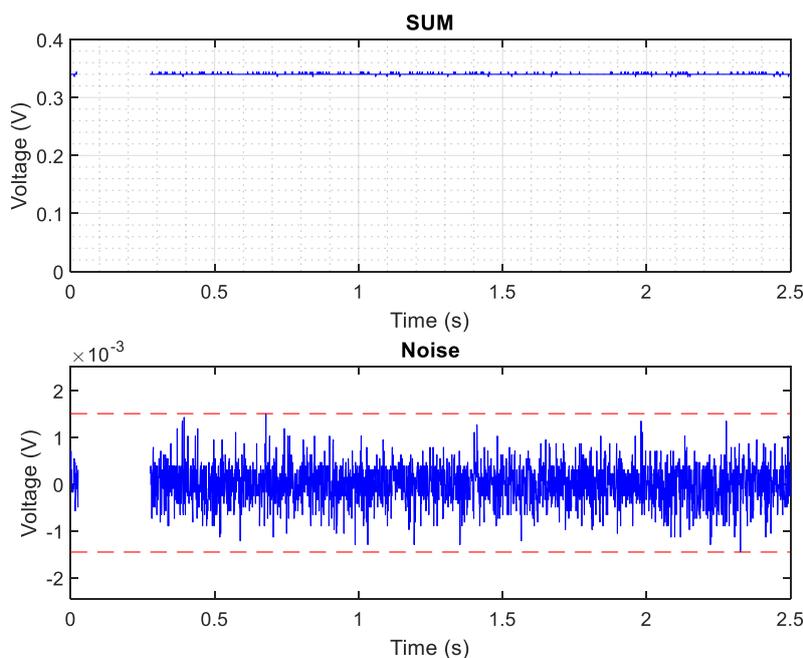


圖 4.5 藍光讀取頭訊雜比量測結果。

第三組為藍光讀取頭改準直鏡位置，經實驗發現改變其準直鏡位置並不會對訊雜比造成太大影響，其微懸臂探針上方光功率為 0.38 mW，照射在 PDQ80A 後量測結果如圖 4.6 所示，其 SUM 值為 337.95 mV，雜訊為 3.04 mV，訊雜比為 111.17。

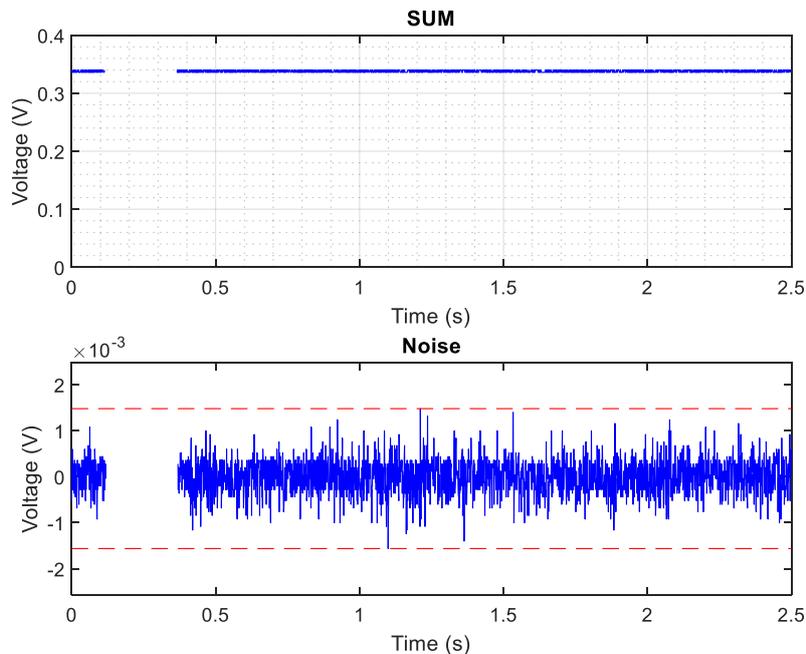
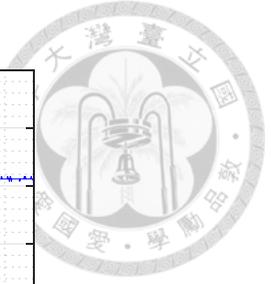
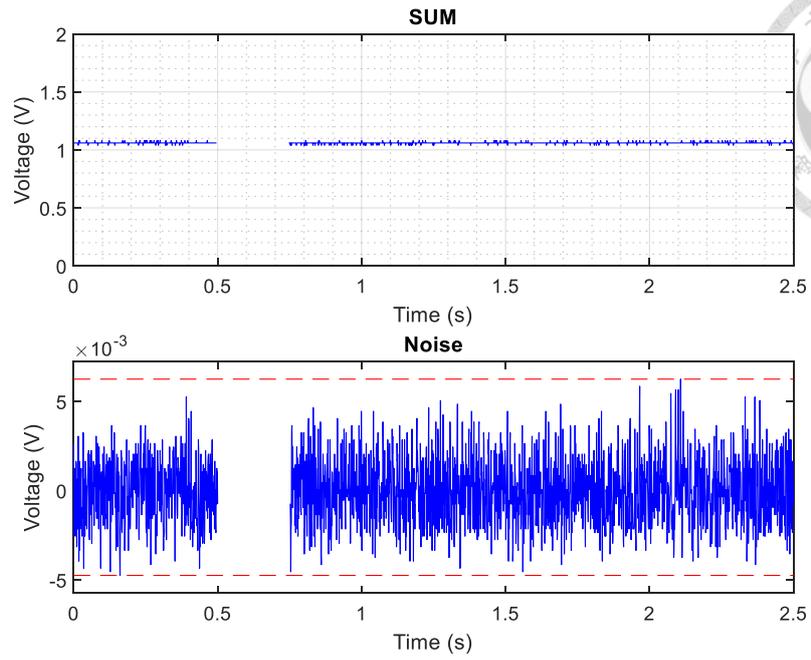


圖 4.6 藍光讀取頭改準直鏡位置訊雜比量測結果。

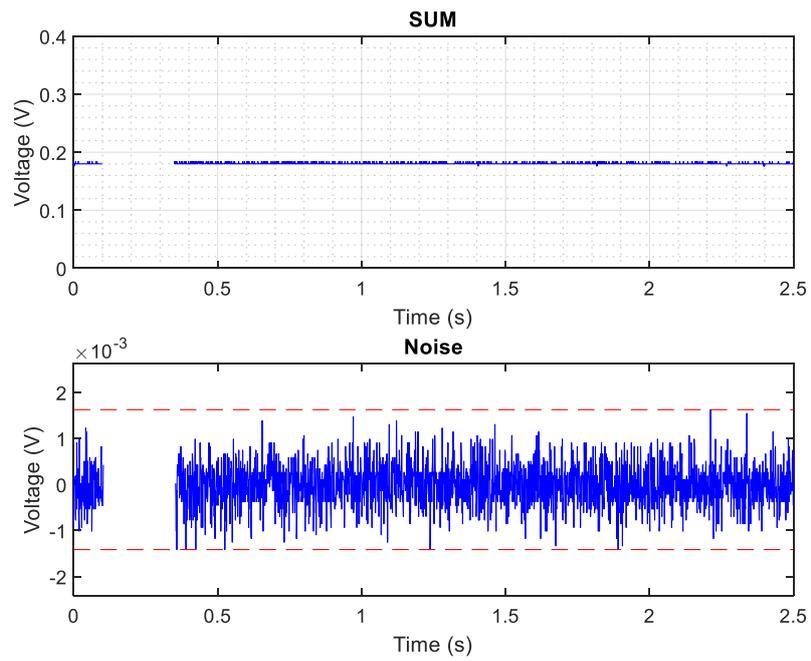
第四組為氬氬雷射紅光讀取頭，在不使用反射片時，其微懸臂探針上方光功率為 1.04 mW，因為光強過高導致 PDQ80A 飽和無法量測。在使用 40%反射片時，其微懸臂探針上方光功率為 0.31 mW，照射在 PDQ80A 後量測結果如圖 4.7(a) 所示，其 SUM 值為 1060.16 mV，雜訊為 11 mV，訊雜比為 96.38。在使用 60% 反射片時，其微懸臂探針上方光功率為 0.05 mW，照射在 PDQ80A 後量測結果如圖 4.7(b)所示，其 SUM 值為 180.66 mV，雜訊為 3.04 mV，訊雜比為 59.43。在使用 80%反射片時，其微懸臂探針上方光功率為 0.11 mW，照射在 PDQ80A 後量測結果如圖 4.7(c)所示，其 SUM 值為 467.52 mV，雜訊為 5.44 mV，訊雜比為 85.94。



(a)



(b)



(c)

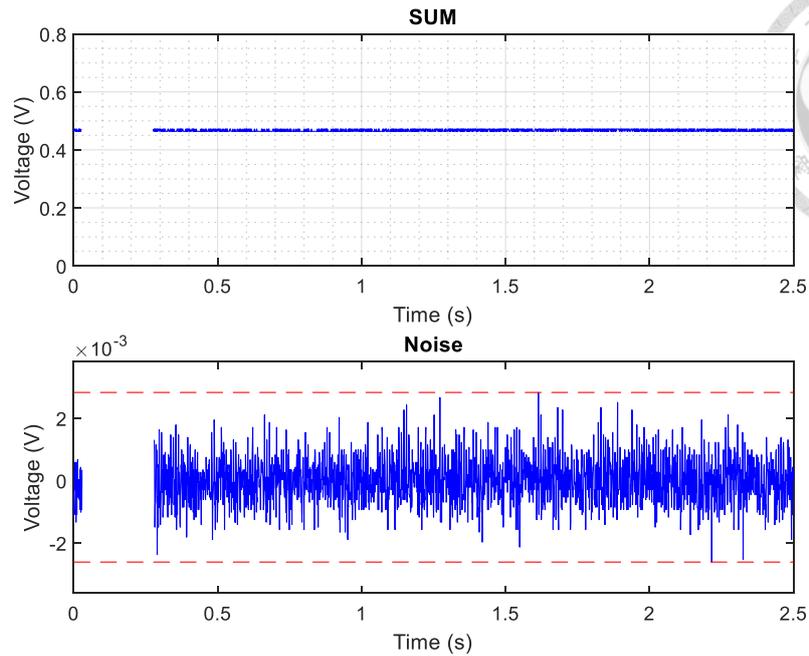


圖 4.7 氦氖雷射紅光讀取頭使用(a)40%，(b)60%與(c)80%青板玻璃反射片之訊雜比量測結果。

第五組為氦氖雷射紅光讀取頭其氦氖雷射光源，在不使用反射片與使用 40% 反射片時，其光功率分別為 6.35 mW 與 1.84 mW，皆因為光強過高導致 PDQ80A 飽和無法量測。在使用 60% 反射片時，其光功率為 0.3 mW，照射在 PDQ80A 後量測結果如圖 4.8(a) 所示，其 SUM 值為 1209.99 mV，雜訊為 8.6 mV，訊雜比為 140.7。在使用 80% 反射片時，其光功率為 0.66 mW，照射在 PDQ80A 後量測結果如圖 4.8(b) 所示，其 SUM 值為 2713.81 mV，雜訊為 15.2 mV，訊雜比為 178.54。

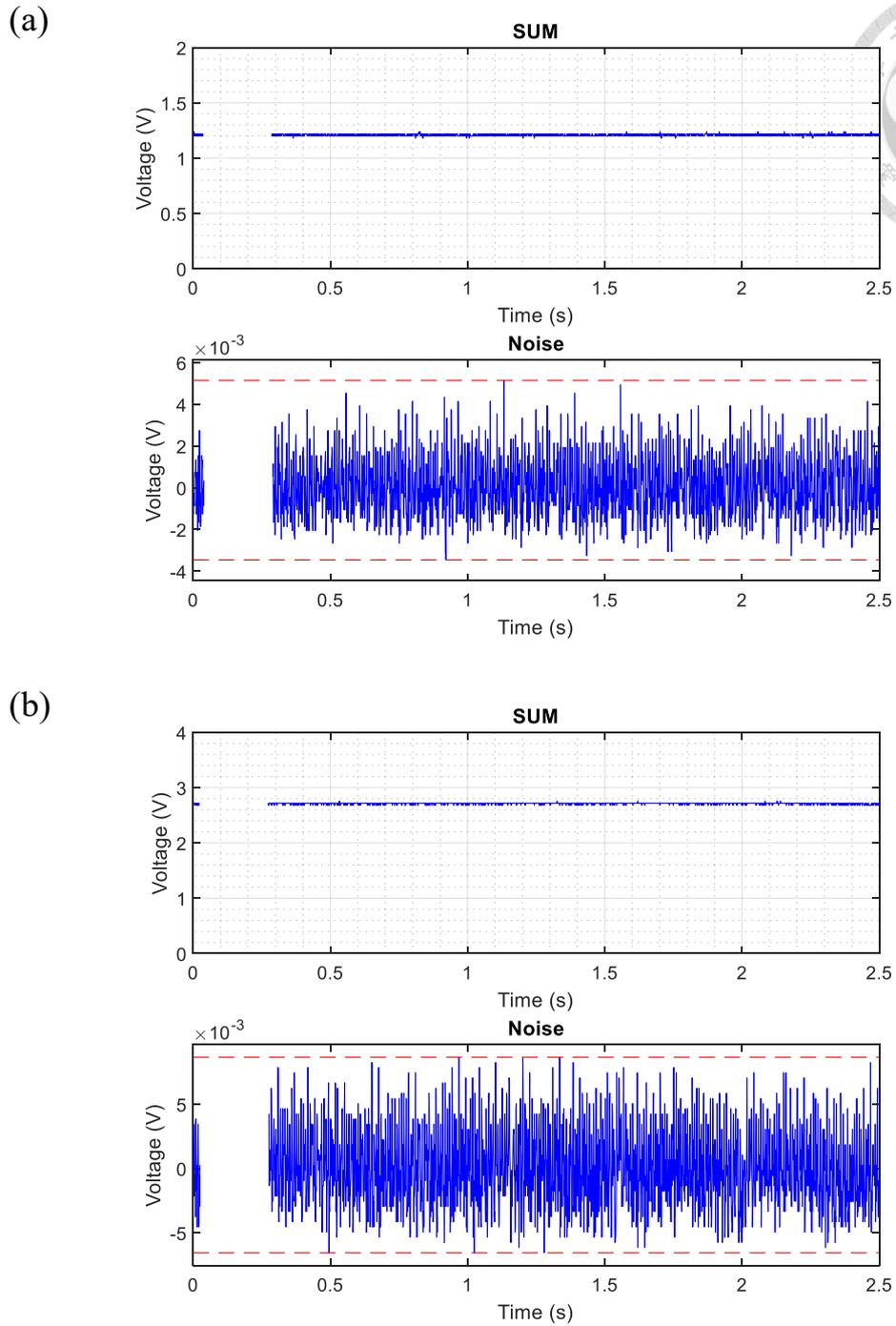
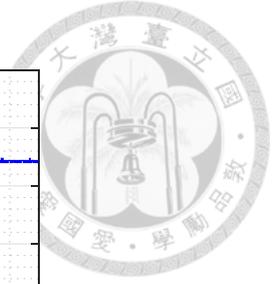


圖 4.8 氦氖雷射光源在使用(a)60%與(b)80%青板玻璃反射片之訊雜比量測結果。

4.1.3 光強與訊雜比量測結果討論

此節量測了本研究所用各種光路模組之訊雜比，其所有結果整理如表 4.2 所示，其中 PDQ80A 的理論 SUM 值計算部分，由光強度、PDQ80A 之轉阻增益 (Transimpedance Gain) 以及對應光波長之響應率相乘計算而得。如圖 4.9 所示為 PDQ80A 之光波長與響應率關係圖，其中紅光讀取頭雷射二極體波長為 655 nm，對應響應率約為 0.425 A/W，藍光讀取頭雷射二極體波長為 405 nm，對應響應率約為 0.075 A/W，氦氖雷射波長為 632.8 nm，對應響應率約為 0.4 A/W，而轉阻增益可由附錄 C 得知為 10 kV/A。

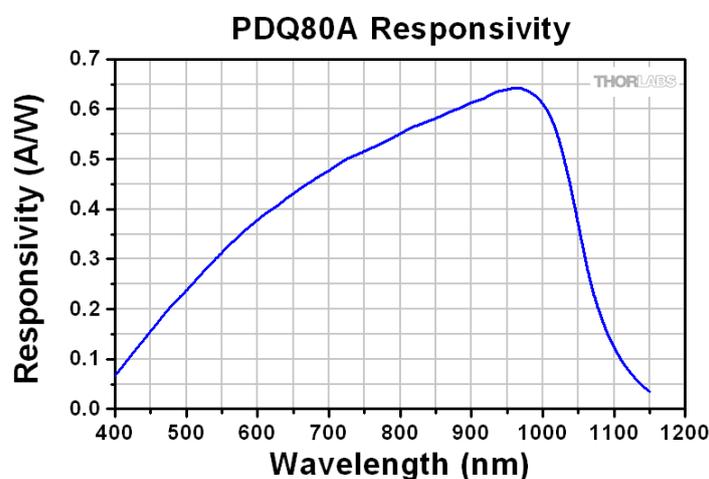


圖 4.9 PDQ80A 響應率與波長關係圖。

訊雜比結果部分，可以發現紅光讀取頭擁有最佳之訊雜比。而藍光讀取頭部分則由於 PDQ80A 對於藍光波長響應較沒有紅光好，因此訊雜比不佳。氦氖雷射紅光讀取頭部分，於使用 40% 與 80% 反射片時擁有較佳之訊雜比，理論上在進行靈敏度量測實驗時應該有較好表現，且光強較高有表現較好的趨勢，無反射片部份因為 PDQ80A 飽和而無法測量，需要實際量測靈敏度才可得知結果。氦氖雷射光源部分，與氦氖雷射紅光讀取頭相互比較可以發現，氦氖雷射光源在經過紅光讀取頭像散式光路後訊雜比明顯下降，推測原因是氦氖雷射無法完全對應原先二極體位置或者與原先二極體發散光之發散角不同，造成光點無法完整進入光路，進而發生干涉所導致。

表 4.2 訊雜比量測結果。

	光強度 (mW)	PDQ80A 理論 SUM 值(mV)	PDQ80A 實際 SUM 值(mV)	雜訊 (mV)	訊雜比
紅光讀取頭	0.2	850	821.26	4.24	193.78
藍光讀取頭	0.39	292.5	340.24	2.96	114.95
藍光讀取頭 改準直鏡位置	0.38	285	337.95	3.04	111.17
氦氖雷射紅光讀取頭 無反射片	1.04	4160	飽和		
氦氖雷射紅光讀取頭 40%反射片	0.31	1240	1060.16	11	93.38
氦氖雷射紅光讀取頭 60%反射片	0.05	200	180.66	3.04	59.43
氦氖雷射紅光讀取頭 80%反射片	0.11	440	467.52	5.44	85.94
氦氖雷射光源 無反射片	6.35	25400	飽和		
氦氖雷射光源 40%反射片	1.84	7360	飽和		
氦氖雷射光源 60%反射片	0.3	1200	1209.99	8.6	140.7
氦氖雷射光源 80%反射片	0.66	2640	2713.81	15.2	178.54

4.2 靈敏度量測實驗

本實驗於接觸式模式下進行靈敏度量測實驗，其原理為透過 Z 軸壓電定位平台帶動樣品接近探針，在樣品碰到探針再遠離的過程中探針會產生偏折，進而使 PSD 之 FES 發生變化，如圖 4.10 所示為本實驗所得到的一張量測結果，縱軸為 PSD 輸出之 FES(mV)，橫軸為 Z 軸壓電定位平台位移量(nm)，此關係圖中線性區間的擬合斜率即是系統靈敏度(mV/nm)，藉由靈敏度可以將系統雜訊換算為長度單位的值，進而得知此系統可以解析的微懸臂偏折量(nm)。

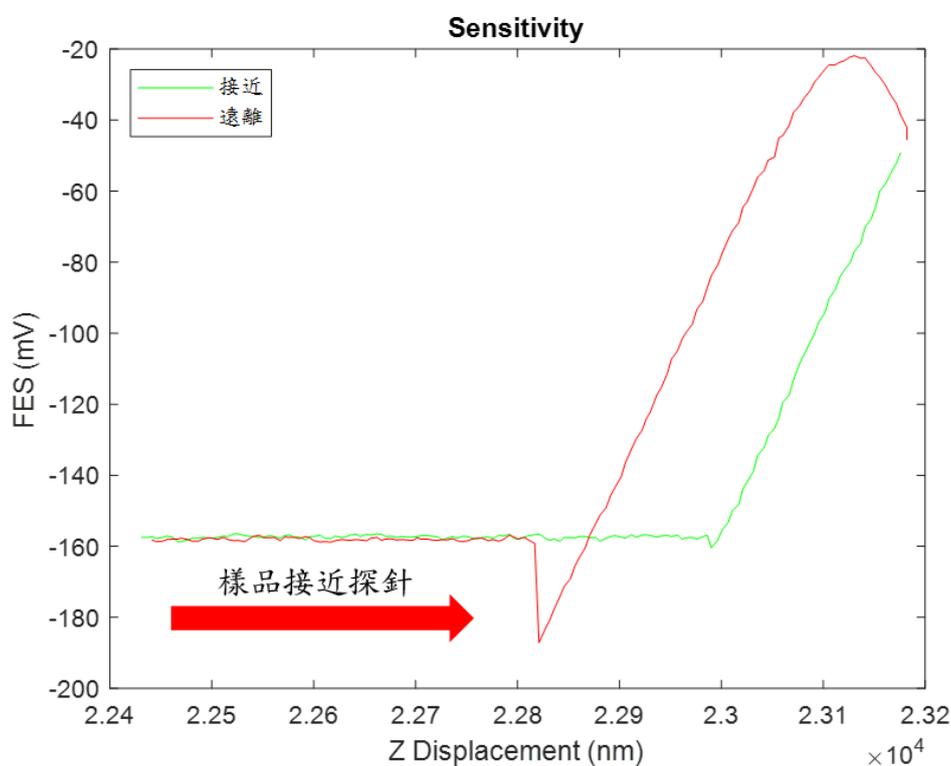


圖 4.10 靈敏度量測結果示意圖。

4.2.1 靈敏度量測實驗流程

本研究靈敏度量測實驗流程如圖 4.12 所示，首先若使用的光路模組為氦氖雷射紅光讀取頭，則需先進行氦氖雷射入射角度的調整，如圖 4.11(a)所示為不合理的 FES 情況，其 S curve 具有不規則抖動，表示光點可能沒有完整進入 PSD，需調整雷射入射角度，使 FES 情況如圖 4.11(b)所示。接著即可將雷射光聚焦至微懸臂探針上，聚焦位置可由示波器觀察為 S curve 中 $V_{FES} = 0$ 之位置。

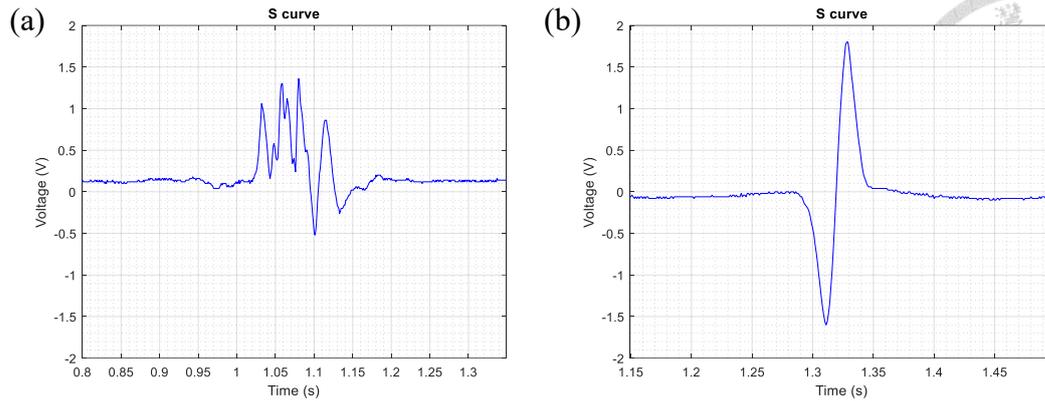


圖 4.11 (a)不合理與(b)合理之 FES 情況。

將雷射光對焦至微懸臂探針後，接著需將樣品與微懸臂探針之距離縮小至 Z 軸壓電定位平台行程內，此步驟透過電腦中 LabVIEW 程式進行，開啟 Z 軸壓電定位平台回饋並設定一 setpoint 值後，此程式便會將 Z 軸壓電定位平台升至最高，其後使用 Z 軸步進滑台調整樣品與微懸臂探針之距離，當樣品與微懸臂探針發生接觸，導致 FES 之電壓值達到設定 setpoint 值時，便可由 LabVIEW 程式中觀察到回饋使 Z 軸壓電定位平台高度降低。因此當 LabVIEW 程式中觀察到回饋時，便代表樣品已在 Z 軸壓電定位平台升至最高時可接觸微懸臂探針，此時關閉 Z 軸壓電定位平台回饋並輕微抬升 Z 軸步進滑台使樣品進入 Z 軸壓電定位平台行程。

完成以上步驟後，即可控制 Z 軸壓電定位平台向上接觸微懸臂探針，此步驟同樣由電腦中 LabVIEW 程式進行，此程式同樣需設定一 setpoint 值，當樣品接觸到微懸臂探針使 FES 電壓值達到 setpoint 值時，Z 軸壓電定位平台便會降低高度，此時電腦中 LabVIEW 程式便會根據 FES 與 Z 軸壓電定位平台位移量繪製結果圖，後續透過 MATLAB 計算圖中線性區間擬合斜率得到系統靈敏度，進而得到系統雜訊對應之位移量。

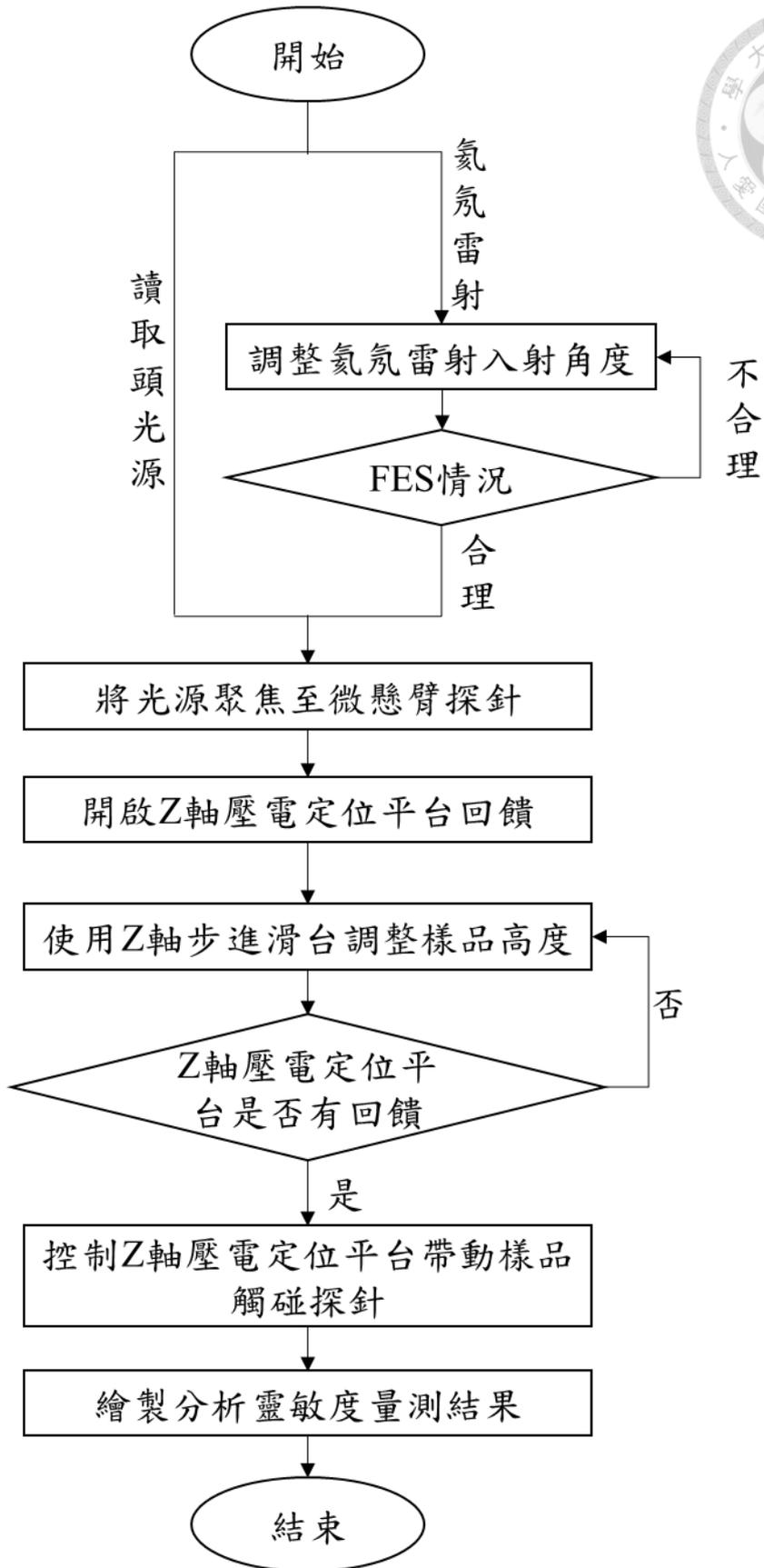


圖 4.12 靈敏度量測實驗流程。

4.2.2 靈敏度量測結果

本實驗先測量光路模組紅光讀取頭以及藍光讀取頭，在使用 4 種不同微懸臂探針，分別為 FMAuD(PPP-FMAuD, Nanosensors)[附錄 D]、AC240TS(OMCL-AC240TS, Olympus) [附錄 E]、SCM-PIC(SCM-PIC, Veeco) [附錄 F]與 MLCT-A(MLCT, Veeco) [附錄 G]時之靈敏度，以找到各自靈敏度及雜訊對應位移量最佳之微懸臂探針。

首先為光路模組紅光讀取頭，第一組使用微懸臂探針 FMAuD，其靈敏度量測結果如圖 4.13(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.5523 mV/nm，如圖 4.13(b)。系統雜訊峰對峰值為 2.64 mV，如圖 4.14。雜訊峰對峰值對應位移量為 4.7803 nm。

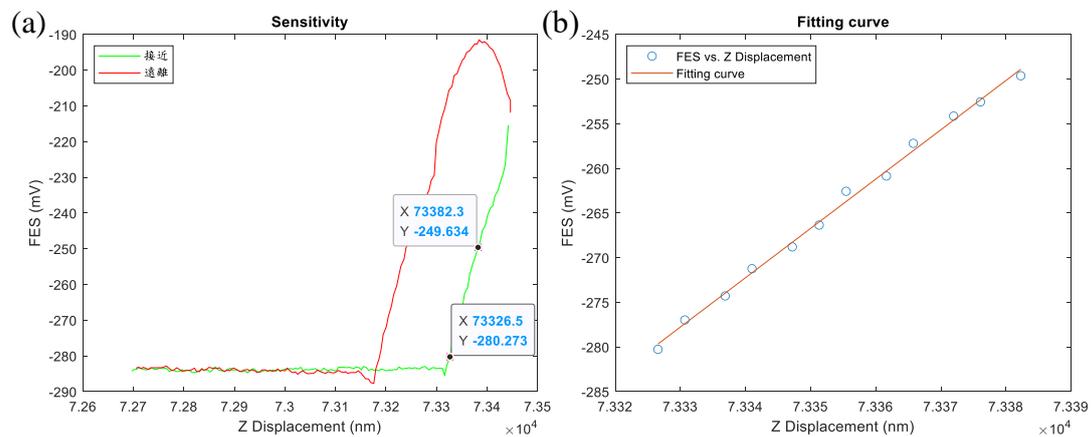


圖 4.13 紅光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

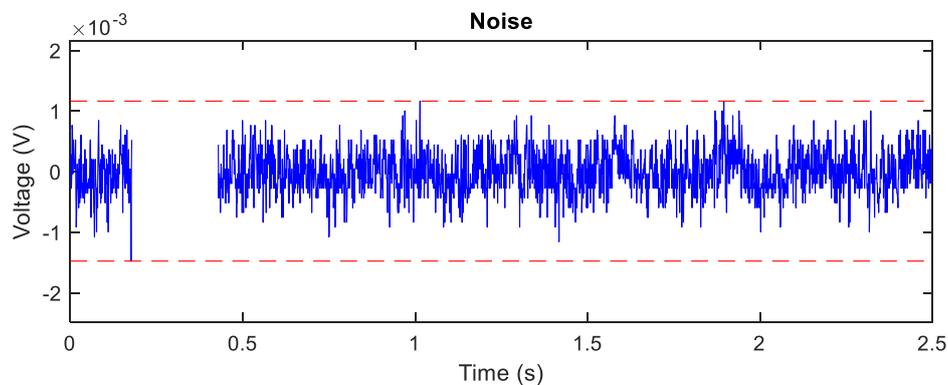


圖 4.14 紅光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之系統雜訊圖。

第二組使用微懸臂探針 AC240TS，其靈敏度量測結果如圖 4.15(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.4830 mV/nm，如圖 4.15(b)。系統雜訊峰對峰值為 2.56 mV，如圖 4.16。雜訊峰對峰值對應位移量為 5.3007 nm。

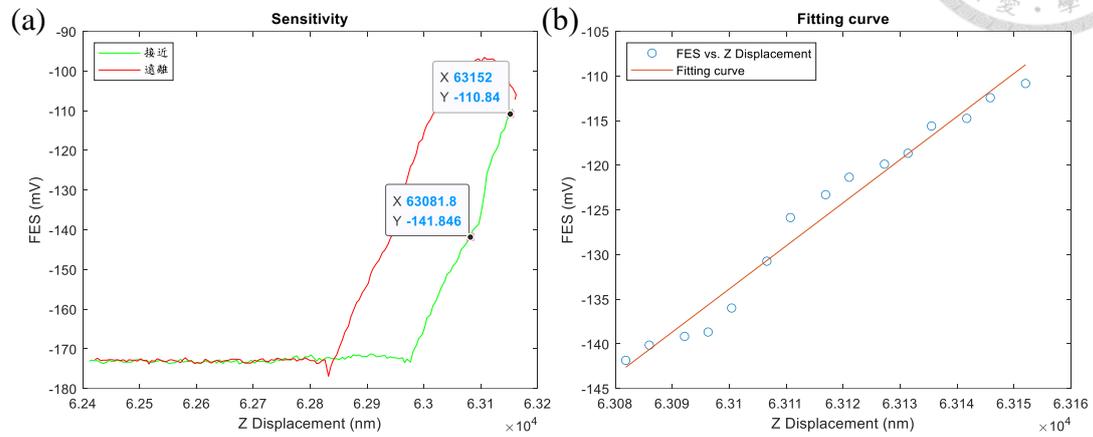


圖 4.15 紅光讀取頭使用微懸臂探針 AC240TS 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

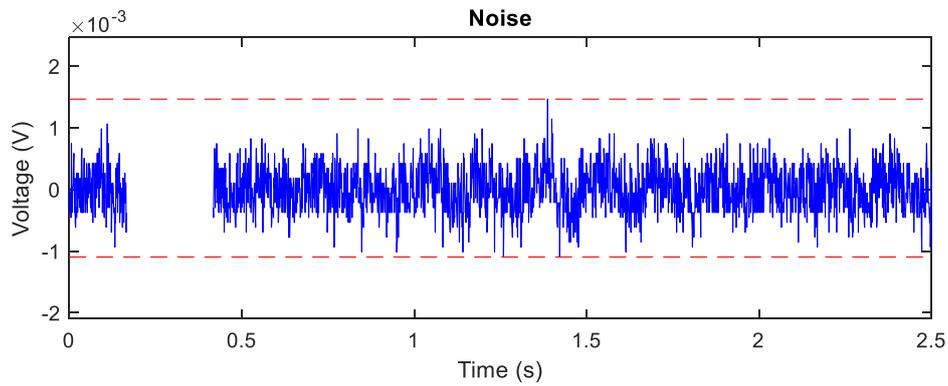


圖 4.16 紅光讀取頭使用微懸臂探針 AC240TS 之系統雜訊圖。

第三組使用微懸臂探針 SCM-PIC，其靈敏度量測結果如圖 4.17(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.4395 mV/nm，如圖 4.17(b)。系統雜訊峰對峰值為 2.24 mV，如圖 4.18。雜訊峰對峰值對應位移量為 5.0972 nm。

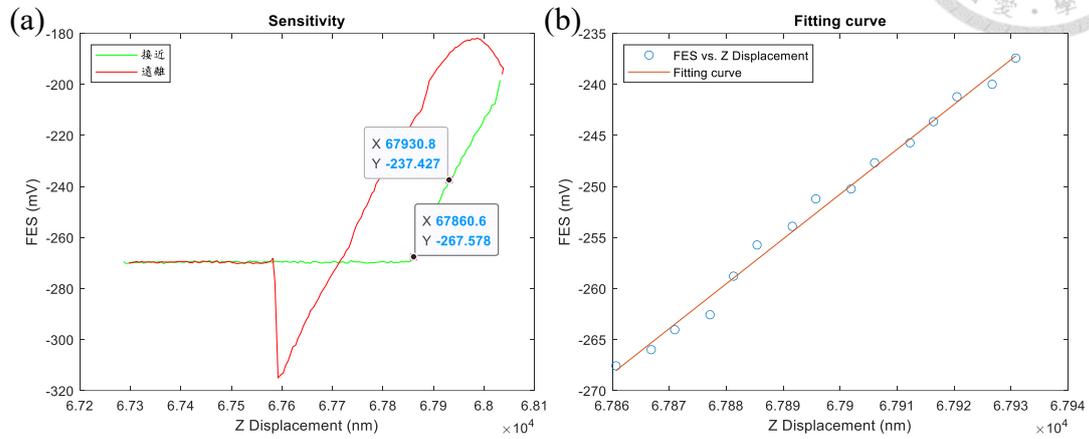


圖 4.17 紅光讀取頭使用微懸臂探針 SCM-PIC 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

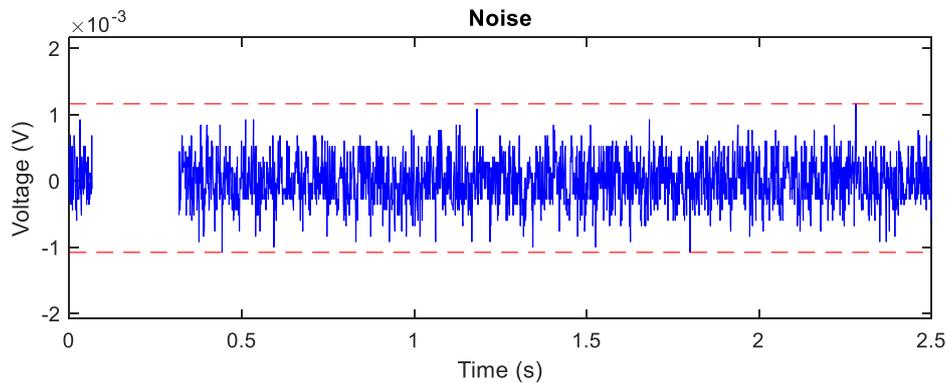


圖 4.18 紅光讀取頭使用微懸臂探針 SCM-PIC 之系統雜訊圖。

第四組使用微懸臂探針 MLCT-A，其靈敏度量測結果如圖 4.19(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.3120 mV/nm，如圖 4.19(b)。系統雜訊峰對峰值為 2.40 mV，如圖 4.20。雜訊峰對峰值對應位移量為 7.6920 nm。

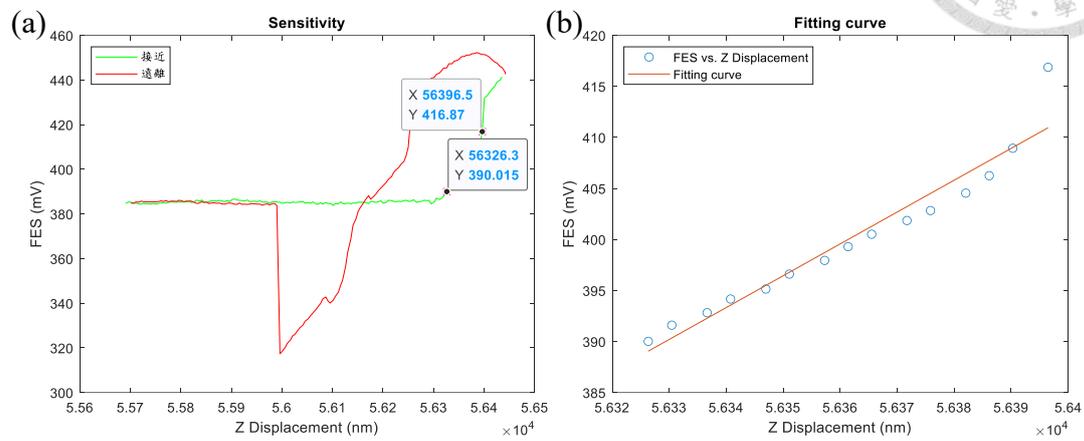


圖 4.19 紅光讀取頭使用微懸臂探針 MLCT-A 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

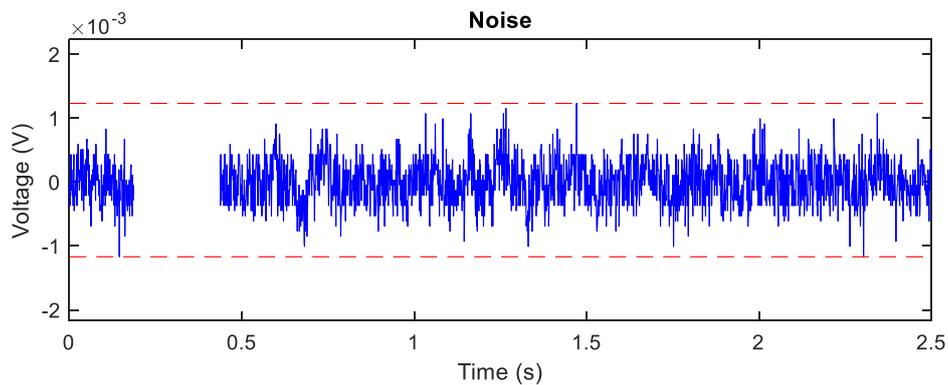


圖 4.20 紅光讀取頭使用微懸臂探針 MLCT-A 之系統雜訊圖。

接著測量光路模組藍光讀取頭，第一組使用微懸臂探針 FMAuD，其靈敏度量測結果如圖 4.21(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.2507 mV/nm，如圖 4.21(b)。系統雜訊峰對峰值為 5.04 mV，如圖 4.22。雜訊峰對峰值對應位移量為 20.0999 nm。

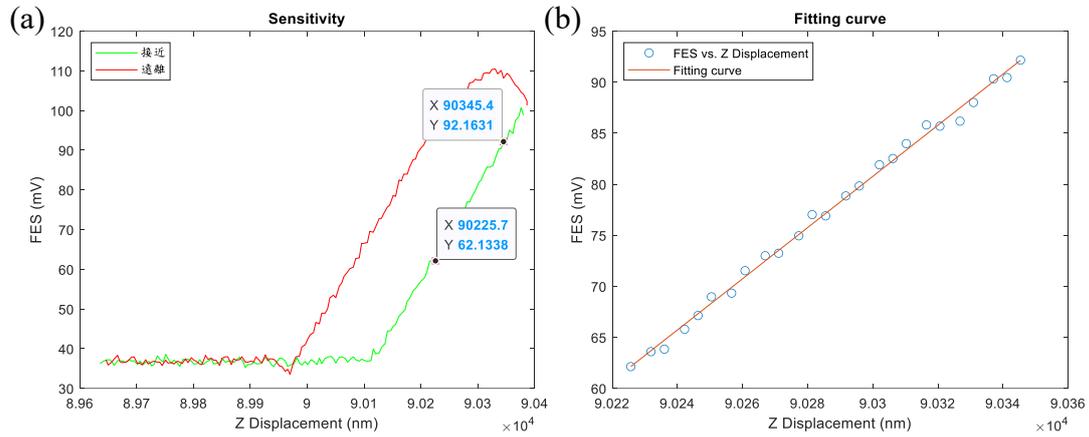


圖 4.21 藍光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

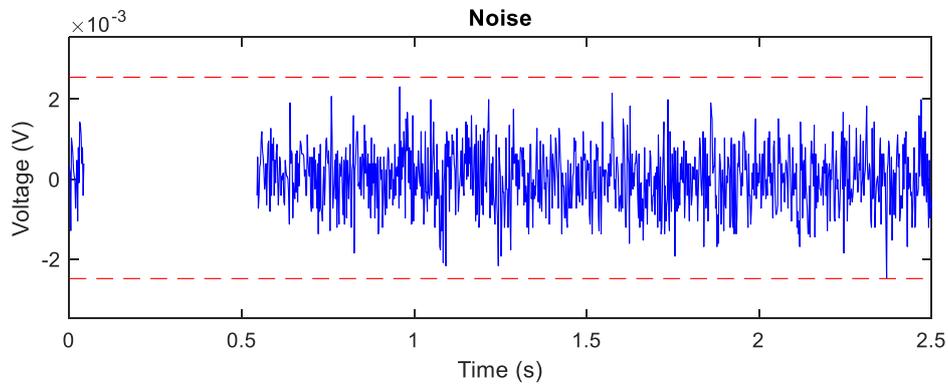


圖 4.22 藍光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之系統雜訊圖。

第二組使用微懸臂探針 AC240TS，其靈敏度量測結果如圖 4.23(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.3342 mV/nm，如圖 4.23(b)。系統雜訊峰對峰值為 6.32 mV，如圖 4.24。雜訊峰對峰值對應位移量為 18.9133 nm。

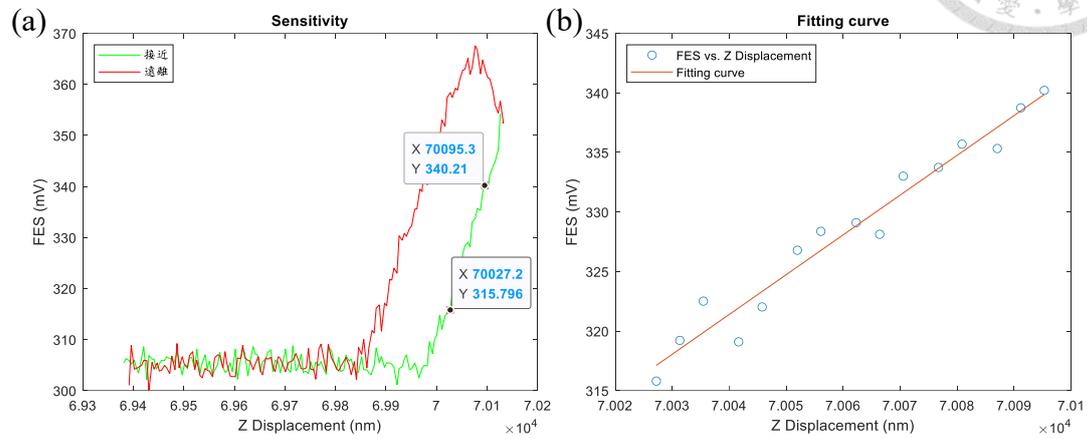


圖 4.23 藍光讀取頭使用微懸臂探針 AC240TS 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

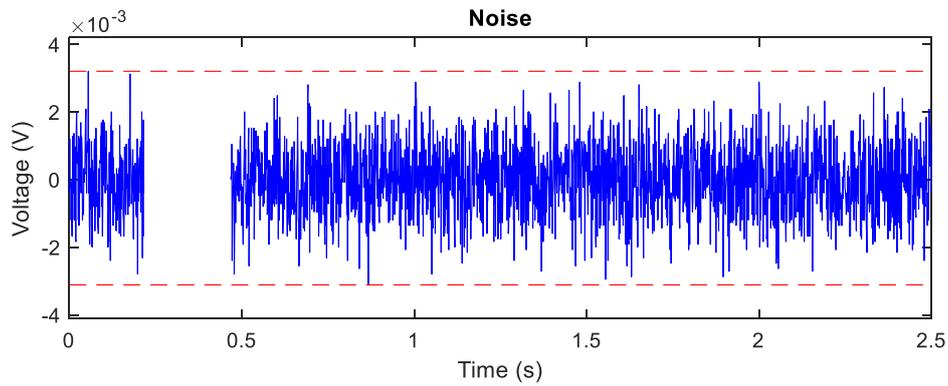


圖 4.24 藍光讀取頭使用微懸臂探針 AC240TS 之系統雜訊圖。

第三組使用微懸臂探針 SCM-PIC，其靈敏度量測結果如圖 4.25(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.1278 mV/nm，如圖 4.25(b)。系統雜訊峰對峰值為 6.88 mV，如圖 4.26。雜訊峰對峰值對應位移量為 53.8175 nm。

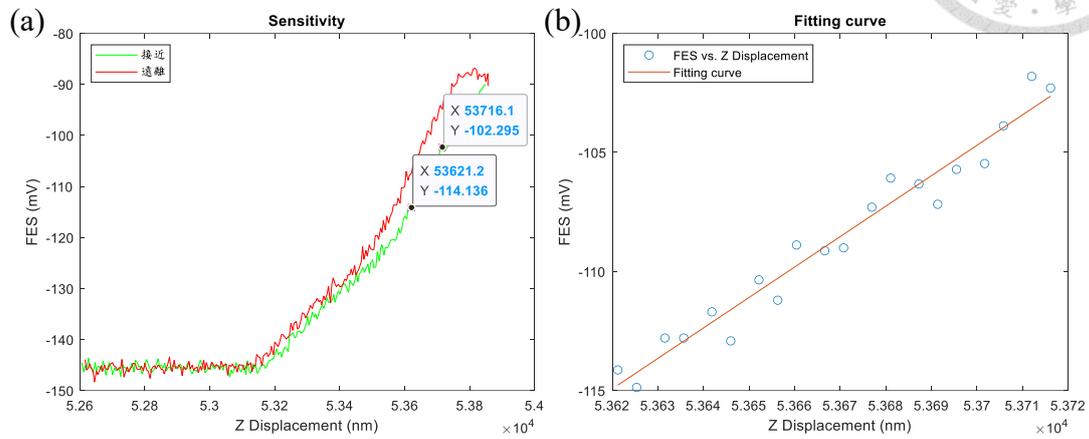


圖 4.25 藍光讀取頭使用微懸臂探針 SCM-PIC 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

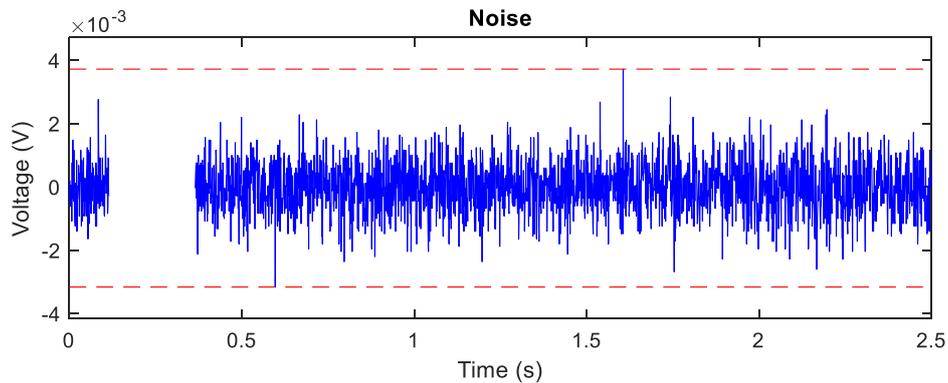


圖 4.26 藍光讀取頭使用微懸臂探針 SCM-PIC 之系統雜訊圖。

第四組使用微懸臂探針 MLCT-A，其靈敏度量測結果如圖 4.27(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.1575 mV/nm，如圖 4.27(b)。系統雜訊峰對峰值為 4.40 mV，如圖 4.28。雜訊峰對峰值對應位移量為 27.9352 nm。

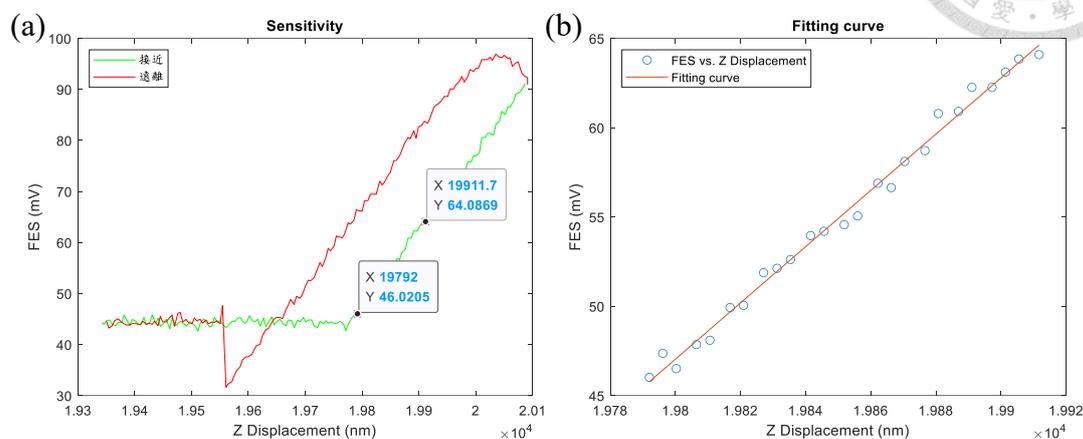


圖 4.27 藍光讀取頭使用微懸臂探針 MLCT-A 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

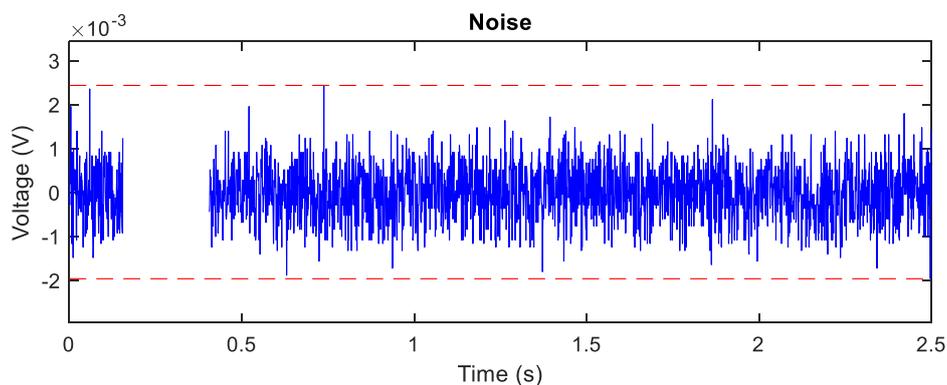


圖 4.28 藍光讀取頭使用微懸臂探針 MLCT-A 之系統雜訊圖。

由以上結果可以發現紅光讀取頭於使用微懸臂探針 FMAuD 時有最佳之靈敏度及雜訊對應位移量，因此後續僅使用其來進行同為紅光之氦氖雷射紅光讀取頭的靈敏度量測實驗。而藍光讀取頭於使用微懸臂探針 AC240TS 時有最佳之靈敏度及雜訊對應位移量，因此後續僅使用其來進行同為藍光之藍光讀取頭改準直鏡位置的靈敏度量測實驗。

在得到光路模組紅光讀取頭與藍光讀取頭對應之最佳微懸臂探針後，接著進行光路模組藍光讀取頭改準直鏡位置，在使用微懸臂探針 AC240TS 時之靈敏度量測實驗。經實驗發現，在將其準直鏡移至如圖 4.29 所示，最靠近圖中左側分光鏡位置時有最佳之靈敏度表現，並透過快乾膠將其準直鏡固定。其靈敏度量測結果如圖 4.30(a)所示。線性區間擬合斜率為 2.4478 mV/nm ，如圖 4.30(b)。系統雜訊峰對峰值為 33.60 mV ，如圖 4.31。雜訊峰對峰值對應位移量為 13.7266 nm 。

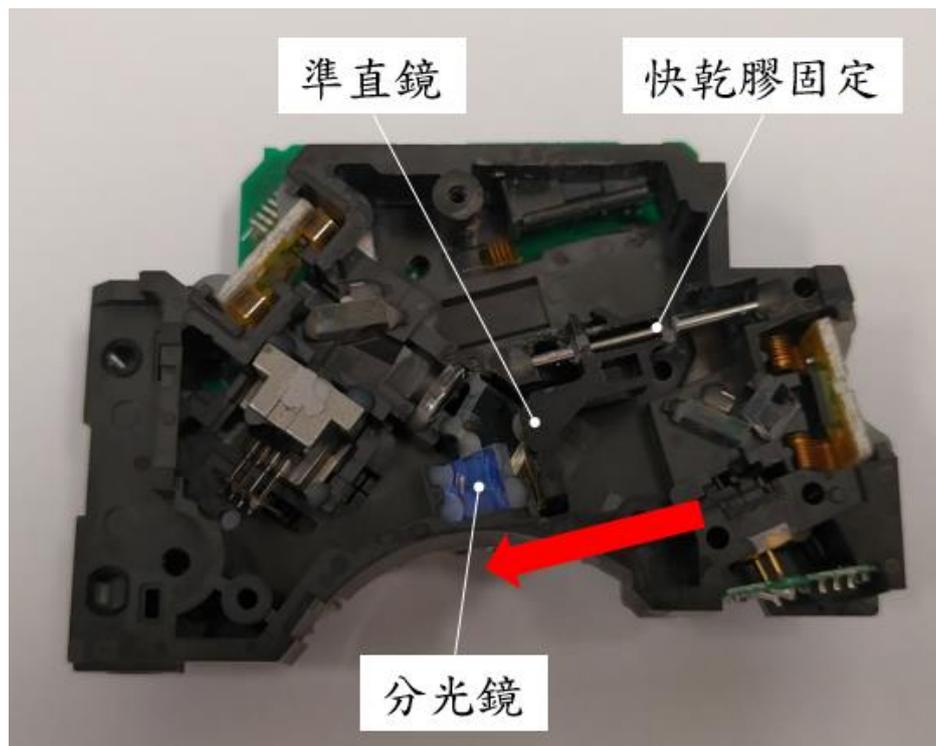


圖 4.29 光路模組藍光讀取頭改準直鏡位置，內部準直鏡固定位置。

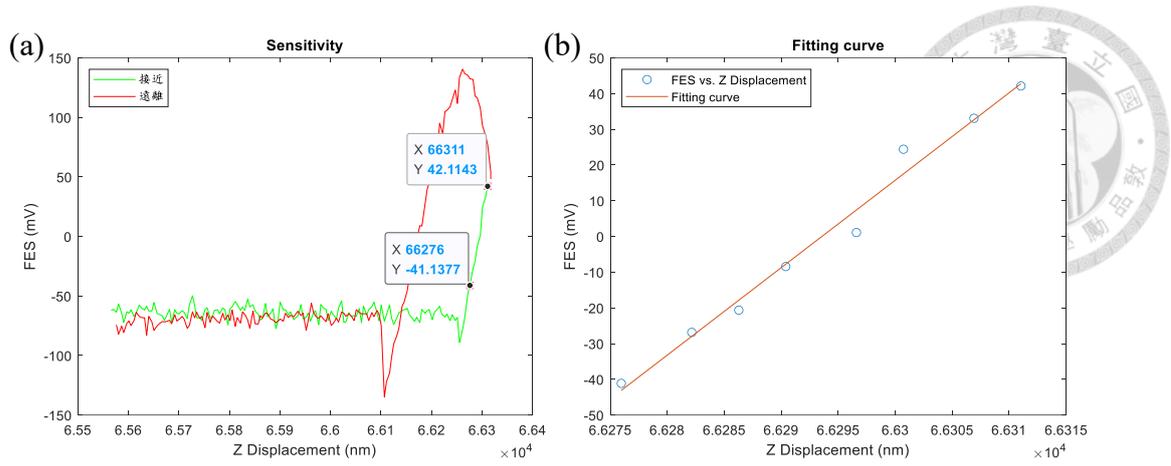


圖 4.30 藍光讀取頭改準直鏡位置使用微懸臂探針 AC240TS 之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

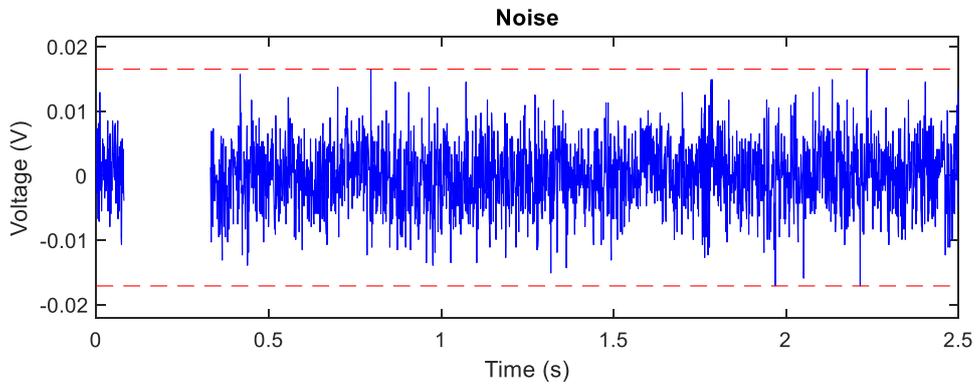


圖 4.31 藍光讀取頭改準直鏡位置使用微懸臂探針 AC240TS 之系統雜訊圖。

最後進行氦氖雷射紅光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 之靈敏度量測實驗，此部分共分為 4 組不同光源強度進行實驗，光源強度如表 4.1 所示，分別為無反射片、40% 反射片、60% 反射片以及 80% 反射片。

第一組為不使用青板玻璃反射片進行衰減，微懸臂探針上方光強度為 1.04 mW。靈敏度量測結果如圖 4.32(a) 所示。線性區間擬合斜率為 1.4652 mV/nm，如圖 4.32(b)。系統雜訊峰對峰值為 8.20 mV，如圖 4.33。雜訊峰對峰值對應位移量為 5.5966 nm。

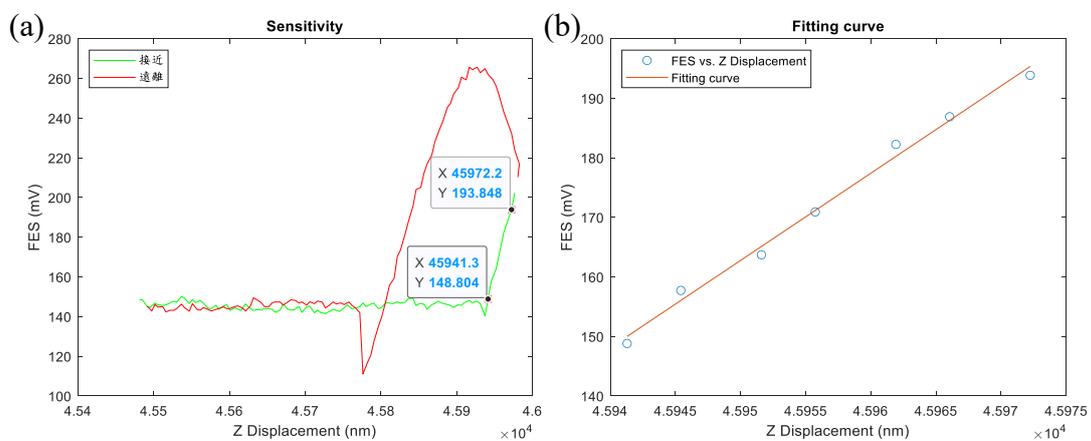


圖 4.32 氦氖雷射紅光讀取頭不使用青板玻璃反射片之(a)靈敏度量測結果，(b)線性擬合圖。

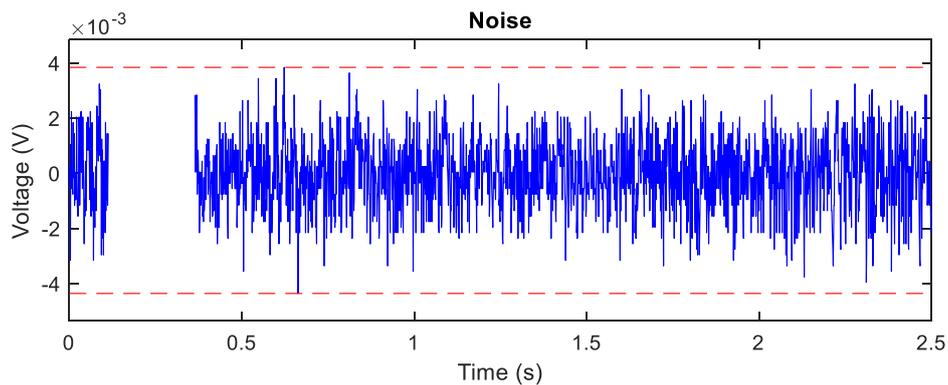


圖 4.33 氦氖雷射紅光讀取頭不使用青板玻璃反射片之系統雜訊圖。

第二組為使用 40%青板玻璃反射片對光源進行衰減，微懸臂探針上方光強度為 0.31 mW。靈敏度量測結果如圖 4.34(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.6504 mV/nm，如圖 4.34(b)。系統雜訊峰對峰值為 2.72 mV，如圖 4.35。雜訊峰對峰值對應位移量為 4.1823 nm。

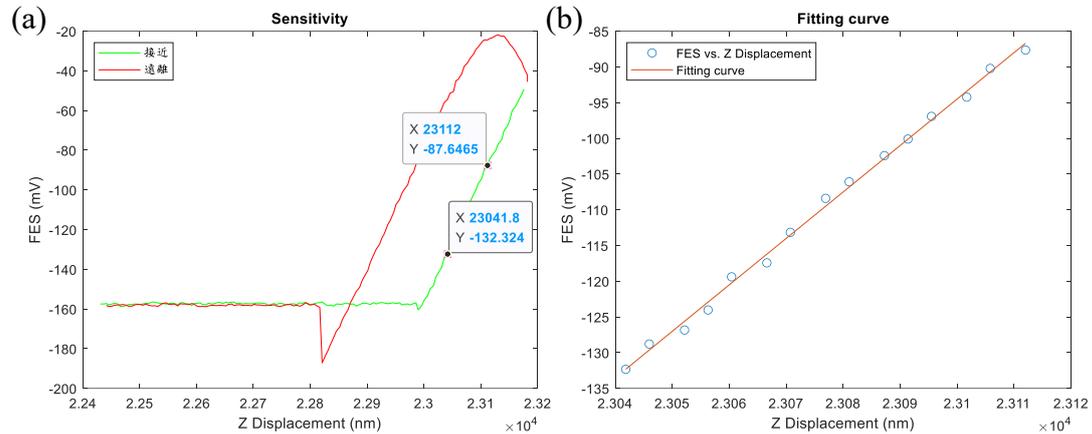


圖 4.34 氦氖雷射紅光讀取頭使用 40%青板玻璃反射片之(a)靈敏度量測結果，
(b)線性擬合圖。

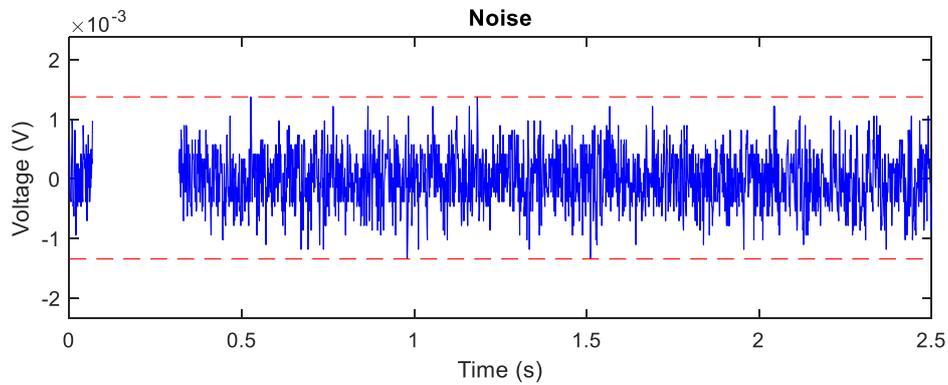


圖 4.35 氦氖雷射紅光讀取頭使用 40%青板玻璃反射片之系統雜訊圖。

第三組為使用 60%青板玻璃反射片對光源進行衰減，微懸臂探針上方光強度為 0.05 mW。靈敏度量測結果如圖 4.36(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.0611 mV/nm，如圖 4.36(b)。系統雜訊峰對峰值為 1.92 mV，如圖 4.37。雜訊峰對峰值對應位移量為 31.4430 nm。

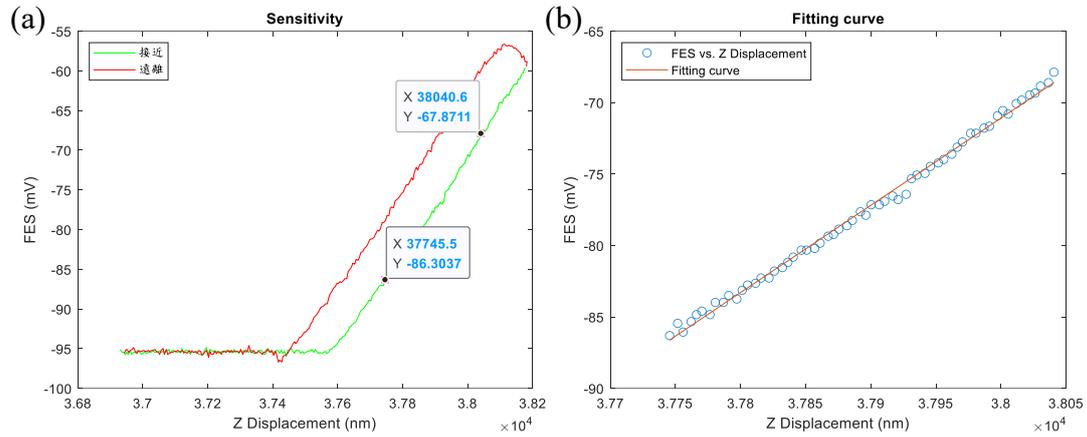


圖 4.36 氦氖雷射紅光讀取頭使用 60%青板玻璃反射片之(a)靈敏度量測結果，
(b)線性擬合圖。

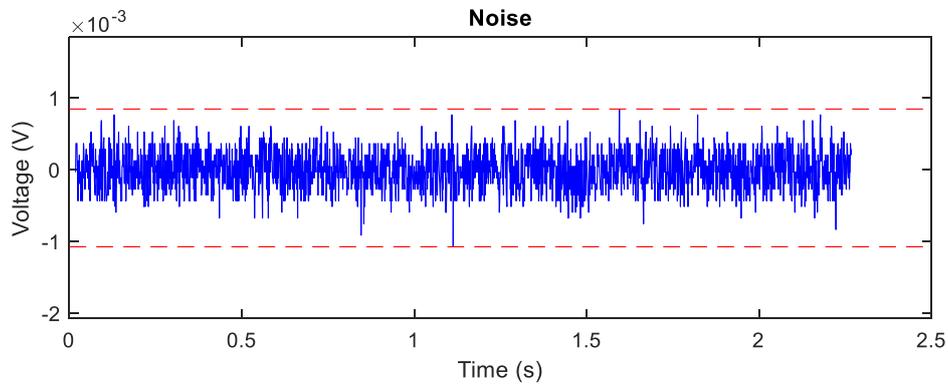


圖 4.37 氦氖雷射紅光讀取頭使用 60%青板玻璃反射片之系統雜訊圖。

第四組為使用 80%青板玻璃反射片對光源進行衰減，微懸臂探針上方光強度為 0.11 mW。靈敏度量測結果如圖 4.38(a)所示。線性區間擬合斜率為 0.1922 mV/nm，如圖 4.38(b)。系統雜訊峰對峰值為 2.40 mV，如圖 4.39。雜訊峰對峰值對應位移量為 12.4866 nm。

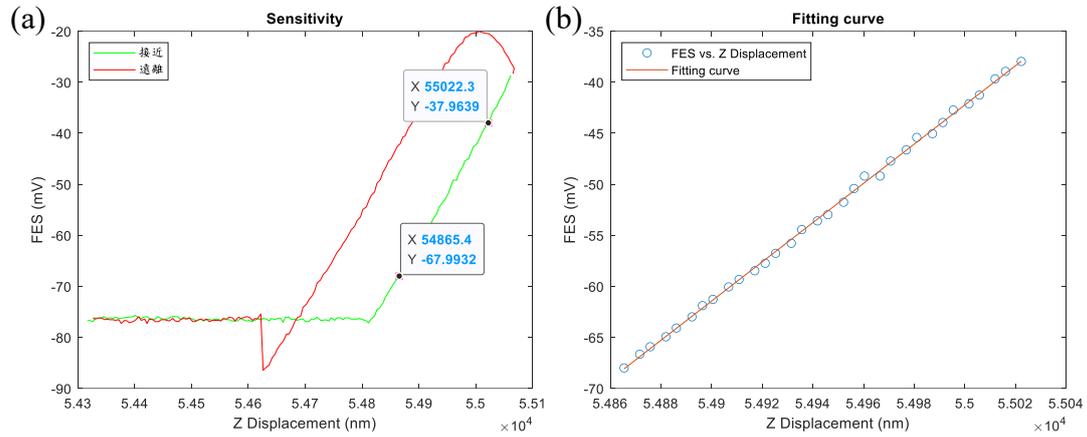


圖 4.38 氦氖雷射紅光讀取頭使用 80%青板玻璃反射片之(a)靈敏度量測結果，
(b)線性擬合圖。

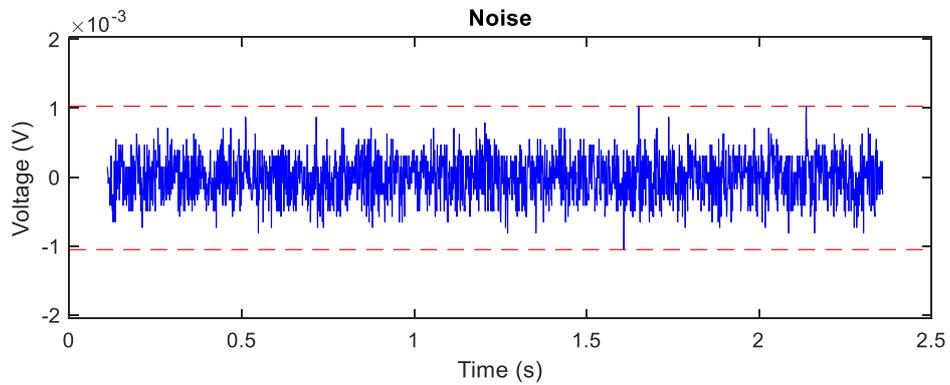


圖 4.39 氦氖雷射紅光讀取頭使用 80%青板玻璃反射片之系統雜訊圖。

4.2.3 靈敏度量測結果討論

此節先量測了紅光讀取頭與藍光讀取頭於使用 4 種不同微懸臂探針時之靈敏度差異，其中 4 種微懸臂探針其參數如表 4.3 所示，而靈敏度量測結果如表 4.4 與表 4.5 所示。量測後得到紅光讀取頭於使用微懸臂探針 FMAuD 時，靈敏度表現最佳且雜訊對應位移量最小，其原因是因為 FMAuD 為鍍金，對於紅光波段反射率佳所導致，而 MLCT-A 同為鍍金而表現不佳的原因，推測為鍍金處理方式不同導致反射率不佳而導致。而藍光讀取頭則是因為 AC240TS 為鍍鋁，對於藍光波段反射率最佳所導致，此外藍光讀取頭於使用 SCM-PIC 的靈敏度量測結果上有兩段斜率，且依據其表面鍍層，其靈敏度量測結果應該表現得比 FMAuD 還要好，推測原因為探針針尖、表面有汙染或探針已有損傷所導致。

而基於紅光讀取頭與藍光讀取頭靈敏度量測結果，又進行了藍光讀取頭改準直鏡位置以及氦氖雷射紅光讀取頭兩組光路模組的量測。藍光讀取頭改準直鏡位置其靈敏度量測結果如表 4.6 所示，其相較藍光讀取頭有大幅提升，但同時系統雜訊峰對峰值也提升很多，推測其雜訊變大的原因，是因為此光路模組在移動其準直鏡位置時，是直接採用物理性破壞，或者是準直鏡移動後來自雷射二極體的發散光無法完整進入，造成的干涉現象。雖然系統雜訊變大，但計算後得到的雜訊對應位移量比改變準直鏡位置前要好。

氦氖雷射紅光讀取頭部分，其靈敏度量測結果如表 4.7 所示。其靈敏度以及系統雜訊與微懸臂探針上方光強度呈現正比關係，於使用 40%青板玻璃反射片，微懸臂探針上方光功率 0.31 mW 時具有本實驗所有數據中最佳之系統雜訊對應位移量，其剛好與 4.1 節光強與訊雜比實驗所預測的吻合。而 60%與 80%反射片部分推測是由於光功率過低，因此靈敏度較差。不使用反射片部分，推測原因可能為光功率過高導致 PSD 飽和，或者過強的光功率使微懸臂探針發生形變或熱飄移。

表 4.3 本實驗所用 4 種不同微懸臂探針之參數。

微懸臂探針	反射面鍍層材料	鍍層厚度(nm)	K 值(N/m)
FMAuD	Au	無資料	2.8
AC240TS	Al	100	2
SCM-PIC	PtIr5	23	0.1
MLCT-A	Au	45	0.07

表 4.4 紅光讀取頭使用 4 種不同微懸臂探針靈敏度量測結果。

微懸臂探針	靈敏度 (mV/nm)	系統雜訊峰對峰值 (mV)	雜訊對應位移量 (nm)
FMAuD	0.5523	2.64	4.7803
AC240TS	0.483	2.56	5.3007
SCM-PIC	0.4395	2.24	5.0972
MLCT-A	0.312	2.4	7.6924

表 4.5 藍光讀取頭使用 4 種不同微懸臂探針靈敏度量測結果。

微懸臂探針	靈敏度 (mV/nm)	系統雜訊峰對峰值 (mV)	雜訊對應位移量 (nm)
FMAuD	0.2507	5.04	20.0999
AC240TS	0.3342	6.32	18.9133
SCM-PIC	0.1278	6.88	53.8175
MLCT-A	0.1575	4.40	27.9352

表 4.6 藍光讀取頭改準直鏡位置使用微懸臂探針 AC240TS 靈敏度量測結果。

微懸臂探針	靈敏度 (mV/nm)	系統雜訊峰對峰值 (mV)	雜訊對應位移量 (nm)
AC240TS	2.4478	33.60	13.7266

表 4.7 氦氖雷射紅光讀取頭使用微懸臂探針 FMAuD 於不同光源強度下靈敏度量測結果。

青板玻璃反射片	靈敏度 (mV/nm)	系統雜訊峰對峰值 (mV)	雜訊對應位移量 (nm)
無	1.4652	8.20	5.5966
40%	0.6504	2.72	4.1823
60%	0.0611	1.92	31.4430
80%	0.1922	2.40	12.4866

第五章 結論與未來展望

本論文成功設計出基於商用紅光讀取頭與藍光讀取頭的像散式微懸臂偏折感測系統，並且透過將紅光讀取頭光源替換為氦氖雷射、藍光讀取頭改變內部準直鏡位置，成功使系統靈敏度更進一步提升。實驗結果顯示，改變藍光讀取頭內部準直鏡位置成功使其系統靈敏度提升。而將紅光讀取頭光源替換為氦氖雷射，在搭配微懸臂探針 FMAuD，使用 40% 青板玻璃反射片對光源進行衰減時，可得到靈敏度 0.6504 mV/nm，系統雜訊峰對峰值 2.72 mV，雜訊對應位移量 4.1823 nm，位移解析度可高於原紅光讀取頭。

總結本論文研究成果如下：

1. 架設基於商用紅光讀取頭與藍光讀取頭的像散式微懸臂偏折感測系統。
2. 改變藍光讀取頭內部準直鏡位置成功提升其系統靈敏度。
3. 將紅光讀取頭光源替換為氦氖雷射且使其性能成功超越原紅光讀取頭。
4. 找出適用於紅光讀取頭像散式光路的最佳氦氖雷射功率。

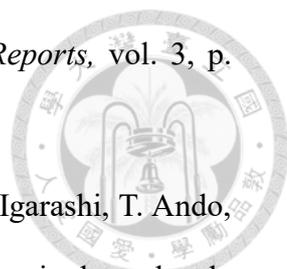
本研究未來展望：

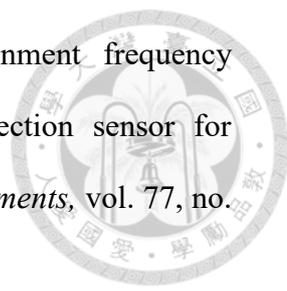
1. 藍光讀取頭內部準直鏡調整方式改為透過程式控制，而不是破壞其結構。
2. 氦氖雷射光纖輸出端對位機構改善，現有架構透過 4 個螺絲改變雷射入射角度，對光過程耗時且不夠精確，可嘗試架設精密光學固定架來調整雷射入射角度。
3. 利用專用紅光衰減片對氦氖雷射進行衰減，找到最佳靈敏度之光功率。
4. 本研究只進行接觸式靈敏度量測，但微懸臂機構設有激振功能，未來可嘗試進行輕敲式靈敏度量測、AFM 成像實驗。

參考文獻



- [1] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, no. 1, pp. 57-61, 7 1982.
- [2] G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber, "Atomic Force Microscope," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 56, no. 9, pp. 990-993, 5 1986.
- [3] R. C. Barrett, C. F. Quate, "High-speed, large-scale imaging with the atomic force microscope," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 9, no. 2, pp. 302-306, 3 1991.
- [4] S. R. Manalis, S. C. Minne, C. F. Quate, "Atomic force microscopy for high speed imaging using cantilevers with an integrated actuator and sensor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 6, pp. 871-873, 5 1996.
- [5] M. B. Viani, T. E. Schäffer, G. T. Palocz, L. I. Pietrasanta, B. L. Smith, J. B. Thompson, M. Richter, M. Rief, H. E. Gaub, K. W. Plaxco, A. N. Cleland, H. G. Hansma, P. K. Hansma, "Fast imaging and fast force spectroscopy of single biopolymers with a new atomic force microscope designed for small cantilevers," *Rev Sci Instrum*, vol. 70, no. 11, pp. 4300-4303, 11 1999.
- [6] T. Ando, N. Kodera, D. Maruyama, E. Takai, K. Saito and A. Toda, "A High-Speed Atomic Force Microscope for Studying Biological Macromolecules in Action," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 41, no. 1, pp. 4851-4856, 7 2002.
- [7] Y. Suzuki, N. Sakai, A. Yoshida, Y. Uekusa, A. Yagi, Y. Imaoka, S. Ito, K. Karaki & K. Takeyasu, "High-speed atomic force microscopy combined with inverted

- 
- optical microscopy for studying cellular events," *Scientific Reports*, vol. 3, p. 2131, 2013.
- [8] S. Fukuda, T. Uchihashi, R. Iino, Y. Okazaki, M. Yoshida, K. Igarashi, T. Ando, "High-speed atomic force microscope combined with single-molecule fluorescence microscope," *Review of Scientific Instruments*, vol. 84, no. 7, p. 073706, 7 2013.
- [9] T. Uchihashi, H. Watanabe, S. Fukuda, M. Shibata, T. Ando, "Functional extension of high-speed AFM for wider biological applications," *Ultramicroscopy*, vol. 160, pp. 182-196, 1 2016.
- [10] H.-S. Liao, Y.-H. Chen, R.-F. Ding, H.-F. Huang, W.-M. Wang, E.-T. Hwu, K.-Y. Huang, C.-S. Chang, I.-S. Hwang, "High-speed atomic force microscope based on an astigmatic detection system," *Review of Scientific Instruments*, vol. 85, no. 10, p. 103710, 10 2014.
- [11] 許逸誠, "具小光點之微懸臂感測系統之設計與開發," 國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文, 2019.
- [12] 吳艾庭, "提升超小型微懸臂感應系統靈敏度之研究," 國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文, 2021.
- [13] 陳式新, "基於氦氖雷射之超小型微懸臂感測系統之設計與開發," 國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文, 2022.
- [14] 黃英碩, "掃描探針顯微術的原理及應用," *科儀新知*, vol. 26, no. 4, 2005.
- [15] G. A. Matei, E. J. Thoreson, J. R. Pratt, D. B. Newell, N. A. Burnham, "Precision and accuracy of thermal calibration of atomic force microscopy cantilevers," *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, no. 8, p. 083703, 8 2006.

- 
- [16] T. Fukuma, S. P. Jarvis, "Development of liquid-environment frequency modulation atomic force microscope with low noise deflection sensor for cantilevers of various dimensions," *Review of Scientific Instruments*, vol. 77, no. 4, p. 043710, 4 2006.
- [17] A. D. L. Humphris, M. J. Miles, J. K. Hobbs, "A mechanical microscope: High-speed atomic force microscopy," *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 3, 1 2005.

附錄 A 紅光讀取頭規格表



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

附錄 B 氦氖雷射規格表(HNL150LB)



Specifications

Item #	HNL100RB	HNL100LB	HNL150RB	HNL150LB	HNL225RB	HNL210LB
Laser Specifications						
Wavelength	632.8 nm		632.8 nm		632.8 nm	
Min Output Power (TEM ₀₀ , 633 nm)	10.0 mW		15.0 mW		22.5 mW	21.0 mW
Min Polarization Ratio	Random	500:1	Random	500:1	Random	500:1
Beam Diameter (TEM ₀₀ , 1/e ² points ± 3%)	0.68 mm		0.70 mm		0.70 mm	
Beam Divergence (TEM ₀₀ , ± 3%)	1.2 mrad		1.15 mrad		1.15 mrad	
Mode Purity (TEM ₀₀)	>95%		>95%		>95%	
Longitudinal Mode Spacing	320 MHz		257 MHz		257 MHz	
Max Noise (RMS) (30 Hz to 10 MHz)	1.0%		0.5%		0.5%	
Max Drift with Respect to Mean Power, Over 8 hr	±3.0%		±2.0%		±2.0	
Max Mode Sweeping Contribution	2%		1%		1%	
Beam Pointing Stability (25 °C)						
From Cold Start	<0.10 mrad		<0.20 mrad		<0.20 mrad	
After 15 min Warm-up	<0.02 mrad		<0.03 mrad		<0.03 mrad	
Operating Voltage (±100 V)	3100 VDC		3800 VDC		3800 VDC	
Operating Current (±0.1 mA)	6.5 mA		6.5 mA		6.5 mA	
Max Starting Voltage	10 kVDC		10 kVDC		10 kVDC	
Physical/Mechanical Characteristics						
Maximum Warm-Up Time (95% Power)	15 minutes		20 minutes		20 minutes	
Expected Operating Lifetime	>40,000 hours		>40,000 hours		>40,000 hours	
Storage Lifetime	Indefinite (Hard-Sealed)		Indefinite (Hard-Sealed)		Indefinite (Hard-Sealed)	
Static Alignment	Center to Outer Cylinder within ±0.01" Parallel to Outer Cylinder within ±1 mrad					
Laser Head Weight	1.5 lbs (0.68 kg)		2.6 lbs (1.2 kg)		2.6 lbs (1.2 kg)	
Environmental Specifications						
Operating Temperature	-40 to 70 °C					
Non-Operating Temperature	-40 to 150 °C					
Operating Altitude	0 to 10,000 feet					
Non-Operating Altitude	0 to 70,000 feet					
Relative Humidity (Non-Condensing)	0 to 100%					
Shock	25 g for 11 ms; 100 g for 1 ms					
Safety Specifications						
CDRH/IEC 60825-1 Class	IIIb / 3B		IIIb / 3B		IIIb / 3B	

Drawings

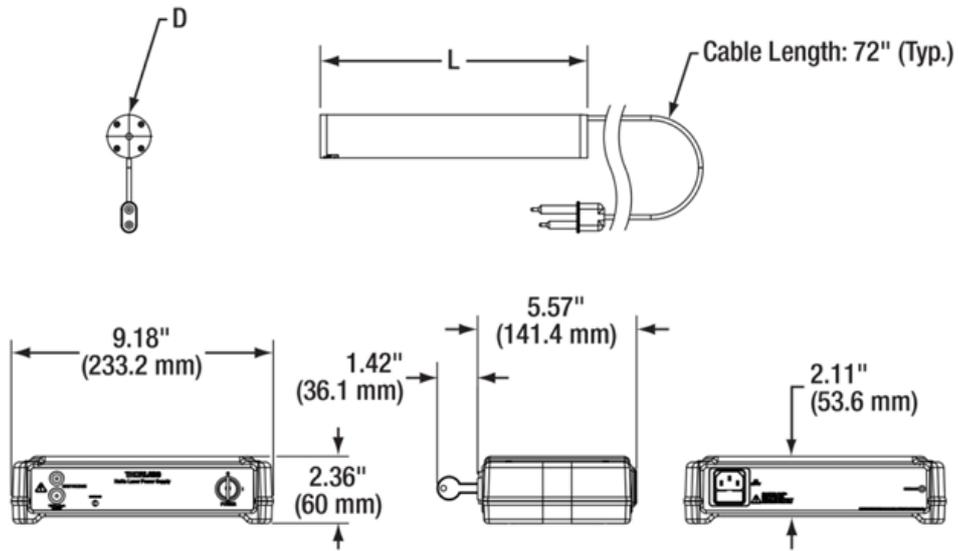
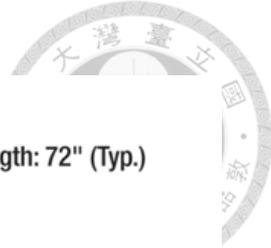


Figure 7 Dimensional Drawing

Item #	Diameter (D)	Length (L)
HNL008LB / HNL008RB	1.245" (31.6 mm)	6.905" (175.4 mm)
HNL020LB / HNL020RB	1.74" (44.20 mm)	10.70" (271.78 mm)
HNL050LB / HNL050RB		15.77" (400.56 mm)
HNL100LB / HNL100RB		19.11" (485.39 mm)
HNL150LB / HNL150RB		24.93" (633.22 mm)
HNL210LB / HNL225RB		24.93" (633.22 mm)



THORLABS

Position-Sensing Detector



PDQ80A

Description

The PDQ80A detector is a segmented, position sensing, silicon, quadrant detector for precise path alignment of light in the 400 to 1050 nm range. The device is capable of measuring beams with a spot size smaller than 7.8 mm, which is the diameter of the quadrant photodiode array. However, to prevent beam walk-off, we recommend that the beam diameter be less than 3.9 mm. Also, since the detected signal strength decreases significantly when large portions of the spot cross the boundary between the quadrants, beam diameters greater than 1 mm are suggested. Therefore, we recommend this device to be used with beams with a diameter between 1 mm and 3.9 mm.

Specifications

Electrical Specifications	Value
Wavelength Range	400 - 1050 nm
Peak Responsivity	0.4 A/W @ 633 nm 0.64 A/W @ 900 nm
Transimpedance Gain	10 kV/A
Max Photocurrent	200 μ A
Output Voltage Range	± 2 V _{min}
Signal Output Offset	100 mV _{max}
Bandwidth	150 kHz
Recommended Spot Size	$\varnothing 1.0$ mm to $\varnothing 3.9$ mm
Supply Voltage Requirement	± 5 VDC to ± 15 VDC
Operating Temperature	10 to 40 °C
Storage Temperature	-20 to 80 °C

Physical Specifications	Value
Sensor Size	$\varnothing 7.8$ mm
Clear Aperture	$\varnothing 1/2"$ ($\varnothing 12.7$ mm)
Aperture Thread	SM05 (0.535" -40)
Dimensions	2.00" x 1.20" x 0.65" (50.8 x 30.5 x 16.5 mm)
Mounting Thread	8-32 x 0.25" Min Depth
Metric Adapter	M4 to 8-32 Adapter (Item # AS4M8E)
Cable Length	5.0' (1.5 m)
Connector Plug	Hirose HS10A-7P-6P
Main Receptacle	Hirose HR10A-7R-6S
Weight	0.25 lbs. (114 g)

Instructions

1. Unpack the PDQ80A sensor. Install the adapter if metric mounting is preferred.
2. Plug the connector into one port of a PDQ80S1 hub.
3. Follow the directions for operation of the hub as described in its operating manual.
4. Place a spot onto the detection window for measurement. The input beam spot size should be between $\varnothing 0.2$ mm and $\varnothing 7$ mm. For best results the spot should be located within 80% (7.2 mm x 7.2 mm) of the center of the detector. Adjust the power level so that the sum output voltage is less than or equal to 4 V. This will ensure the best signal to noise ration and that the system is not saturated.



Specifications Subject to Change without Notice

September 17, 2021
13183-S01, Rev E

✉ www.thorlabs.com/contact

Application Note

For best results low power levels should be used for the position sensor. For the PDQ80A the max photocurrent is $2\text{ V} / 10\text{ kV/A} = 200\text{ }\mu\text{A}$. Using the photosensitivity curve below, the system saturation power can be calculated as:

$$P_{max} = \frac{200\text{ }\mu\text{A}}{\text{Photosensitivity (A/W)}}$$

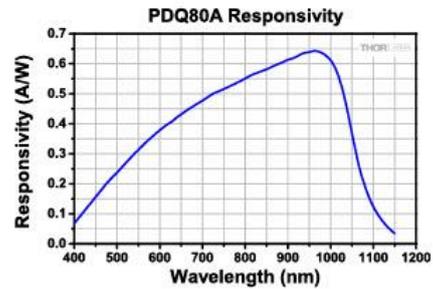
The PDQ80S1 hub has a sample resolution of 12 bits with an input voltage range of $\pm 5\text{ V}$ (10 V range), or a voltage resolution of:

$$V_{step} = \frac{10\text{ V}}{2^{12}} = 2.44\text{ mV}$$

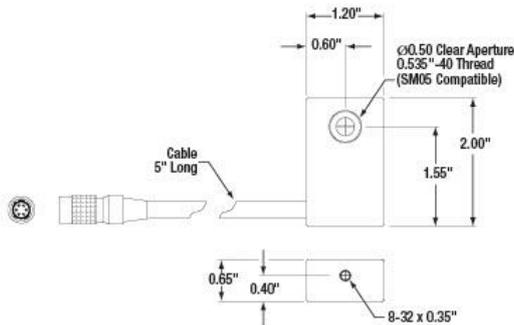
$$I_{step} = \frac{V_{step}}{10\text{ kV/A}} = 244\text{ nA}$$

From this the minimum power required can be determined based on the required accuracy. For example if the user requires an accuracy of 1% then the reading must be accurate to 1 part in 100. The minimum photocurrent is therefore the $I_{step} \times 100$, or $24.4\text{ }\mu\text{A}$. Use the Formula below to find the minimum optical power for a given wavelength.

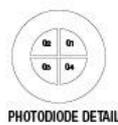
$$P_{min} = \frac{24.4\text{ }\mu\text{A}}{\text{Photosensitivity (A/W)}}$$



Drawings



Pin Assignments	
Pin 1	X-Axis (Q2 + Q3) - (Q1 + Q4)
Pin 2	Y-Axis (Q1 + Q2) - (Q3 + Q4)
Pin 3	SUM (Q1 + Q2 + Q3 + Q4)
Pin 4	+V (+5 to +15V)
Pin 5	Common
PIN 6	-V (-5 to -15V)

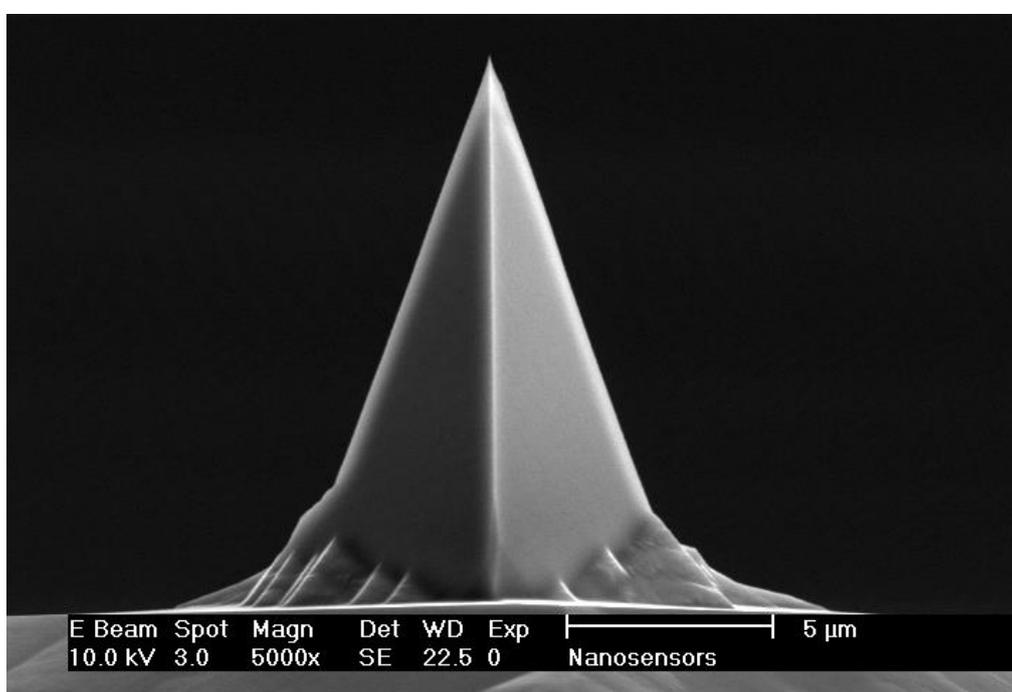


附錄 D 微懸臂探針規格表(FMAuD)



Cantilever data:

Property	Nominal Value	Specified Range
Resonance Frequency [kHz]	75	45 - 115
Force Constant [N/m]	2.8	0.5 - 9.5
Length [μm]	225	215 - 235
Mean Width [μm]	28	20 - 35
Thickness [μm]	3	2 - 4



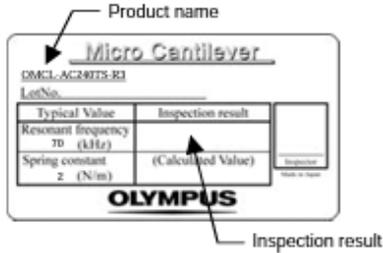


Micro cantilever

Product name

OMCL-AC240TS-R3

Silicon cantilever with a sharpened tetrahedral tip



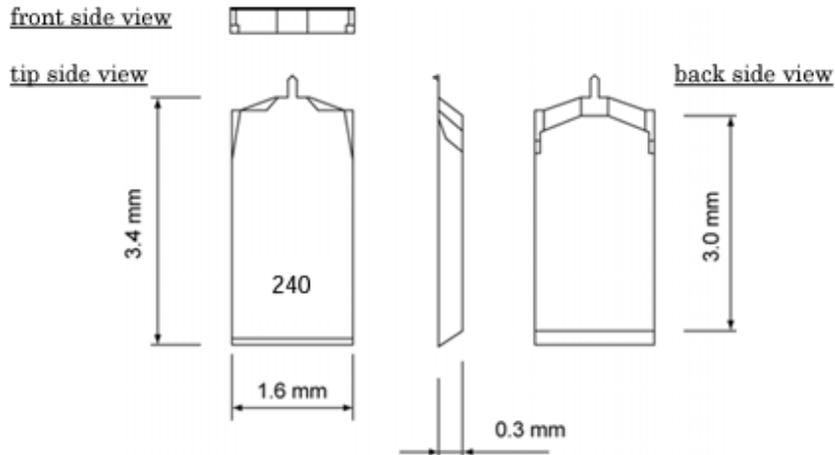
OMCL · AC 240 T S - R 3

- OMCL : Olympus Micro Cantilever
- AC : main application is AC mode measurement
- 240 : Lever length of 240 μm
- T : sharpened Tetrahedral tip
- S : Aluminum reflex coating (Single side)
- R : 100 chips / unit
- 3 : Chip thickness 0.3 mm, Rectangular cross section chip

Chip

There is a rectangular cantilever on one side of the silicon chip.

Dimension

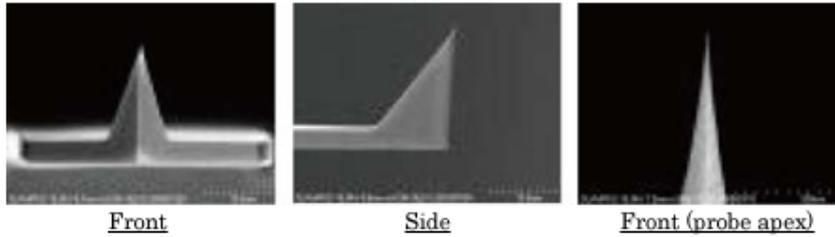


Material

Tip & Lever	Silicon (0.01 – 0.02 ohm.cm)
Metal coating (tip side)	Non
Metal coating (ref ; ex side)	Aluminum on Silicon cantilever
Chip	Silicon (0.01 – 0.02 ohm.cm)

Probe

The probe is a sharpened tetrahedral. The probe is fabricated on the exact end of each cantilever.



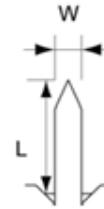
Dimensions

	Typical value	Typical range
Probe length (μm)	14	9 · 19
Tip radius (nm)	7	4 · 10
Probe tip half angle (deg.)	(axis) less than 17.5 (side) less than 17.5	
Probe side tip angle (deg.)	(front) 0, (back) 35 (side) 18, 18	

Cantilever

Dimensions

Cantilever length L (μm)	240 (± 15)
Cantilever width W (μm)	40 (± 2)
Cantilever thickness t (μm)	2.3 (± 0.7)
Thickness of Metal Coat tm (μm)	Aluminum 0.1 (± 0.04)



Calculated mechanical properties

	Typical value	Typical range
Resonant frequency (kHz)	70	50 · 90
Spring constant (N/m)	2	0.6 · 3.5

OLYMPUS

OMCL-AC240TS-R3

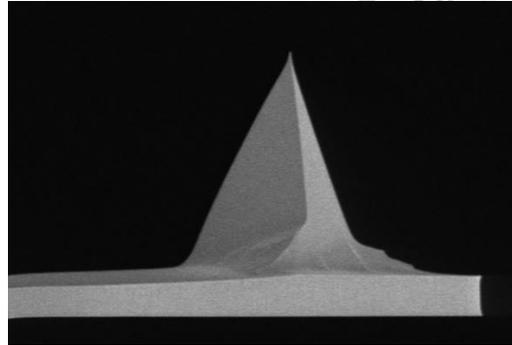
Ver.1.2 Nov. 16, 2009

附錄 F 微懸臂探針規格表(SCM-PIC)



AFM Tip

Tip Height (h): 10 - 15 μm
Front Angle (FA): $17.5 \pm 2.5^\circ$
Back Angle (BA): $25 \pm 2.5^\circ$
Side Angle (SA): $20 \pm 2.5^\circ$



AFM Cantilever

Geometry
 Rectangular

Tip Radius (nm)
 Nom: 25

Frequency (KHz)

Nom: 10

Min: 4

Max: 16

Length (μm)

Nom: 450

Min: 440

Max: 460

Spring Const (N/m)

Nom: 0.10

Min: 0.03

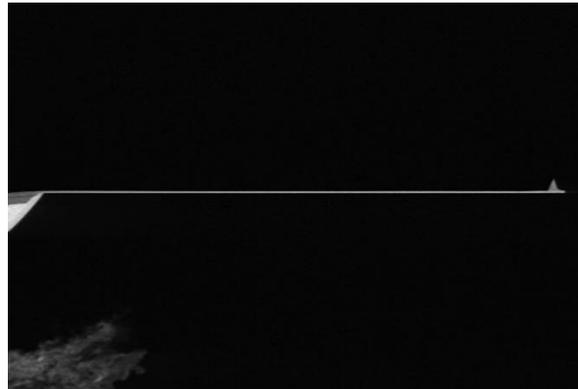
Max: 0.20

Width (μm)

Nom: 35

Min: 33

Max: 37



Material: 0.01 - 0.025 Ωcm Antimony (n) doped Si

Geometry: Rectangular

Cantilevers Number: 1

Cantilever Thickness (Nom): 1.8 μm

Cantilever Thickness (RNG): 1.05 - 2.55 μm

Back Side Coating: Reflective PtIr

附錄 G 微懸臂探針規格表(MLCT-A)



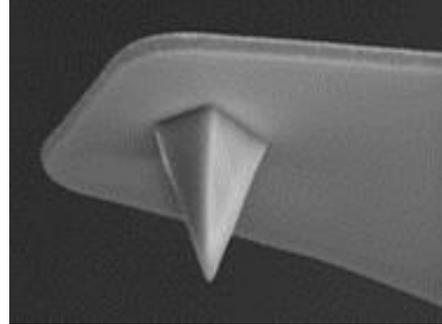
AFM Tip

Tip Height (h): 2.5 - 8.0 μm

Front Angle (FA): $15 \pm 2.5^\circ$

Back Angle (BA): $25 \pm 2.5^\circ$

Side Angle (SA): $17.5 \pm 2.5^\circ$

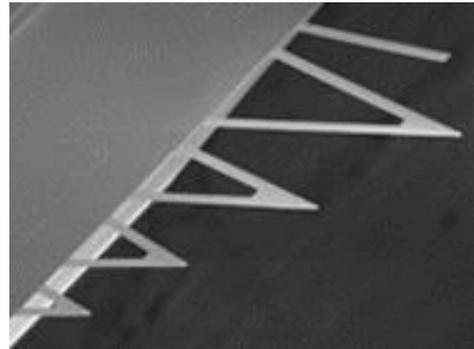


AFM Cantilever

Geometry	Tip Radius (nm)
▼ A Triangular	Nom: 20 Max: 60

Frequency (KHz)	Length (μm)
Nom: 22	Nom: 175
Min: 15	Min: 170
Max: 30	Max: 180

Spring Const (N/m)	Width (μm)
Nom: 0.07	Nom: 22
Min: 0.025	Min: 17
Max: 0.14	Max: 27



Material: Silicon Nitride

Geometry: Rectangular & Triangular

Cantilevers Number: 6

Cantilever Thickness (Nom): 0.55 μm

Cantilever Thickness (RNG): 0.5 - 0.6 μm

Back Side Coating: Reflective Gold

Top Layer Back: 45 ± 5 nm of Ti/Au