

國立清華大學

博士論文

具高運動穩定性與大驅動力之
電磁式微掃描面鏡設計與實現

**Design and Implementation of
Electromagnetic Micro Scanning Mirrors with
High Motion Stability and Large Driving Force**

系別：動力機械工程學系

學號姓名：9633817 湯宗霖 (Tsung-Lin Tang)

指導教授：方維倫 博士 (Dr. Weileun Fang)

中華民國一百年九月

摘要

本論文首先針對微掃描面鏡之應用需求進行介紹，由微掃描面鏡之系統端切入瞭解其特色，並以光學考量為設計基礎，延伸到微掃描面鏡之結構設計，進而提出雙面電鍍、內嵌磁性材料、複合電磁致動力之微掃描面鏡設計。針對雙面電鍍之微掃描面鏡設計，具有兩大特色：(1)定義磁性材料為細長圖形以增加本身的磁化強度，(2)在元件層背面以選擇性電鍍的方式增加磁性材料的體積。針對內嵌磁性材料之微掃描面鏡設計，主要具有三個特色：(1)製作矽鍍致動外環以提供大致動力與優越的機械材料特性，(2)內嵌鍍結構可增加磁性材料體積與磁化強度以提升靜磁致動力矩，(3)出平面軸對稱之矽鍍複合結構可減少鏡面操作時不必要的擺盪問題，以增加元件運動穩定性。針對複合電磁致動力之微掃描面鏡設計，具有兩大特色：(1)整合勞侖茲力與靜磁力以實現複合電磁致動力驅動微掃描面鏡，(2)採用三維磁鐵陣列以得到高強度之集中磁場。為了實現本論文所提出之微掃描面鏡設計，因此開發雙面電鍍製程技術與內嵌磁性材料製程技術，雙面電鍍製程技術具有兩個特色：(1) SOI 晶片的基板層可當作遮蔽擋罩來定義元件層背面的電鍍起始層圖形，(2) SOI 晶片的元件層可當作電鍍時的陰極板，以實現雙面選擇性電鍍的概念。而內嵌磁性材料製程技術則是利用單晶矽模子同時電鍍並定義厚結構鍍，以成功製作矽鍍複合致動外環。量測結果中除了成功驗證此本論文所提出之元件設計外，還可以分別以 Lissajous 掃描與循序掃描方式投影出二維影像，並配合上雷射訊號編碼進行系統驗證，成功證明本論文之元件特性足以提供雷射投影顯示系統之應用需求。

關鍵字: 微掃描面鏡、靜磁力、勞侖茲力、雙面電鍍技術、內嵌磁性材料、複合電磁致動力

Abstract

This thesis introduces the applied requirements of the micro scanning mirror firstly. The mechanical designs of the micro scanning mirror based on optical considerations are proposed, including double-side electroplating design, embedded magnetic material design and compound electromagnetic actuating force design. The double-side electroplating design has two merits: (1) the ferromagnetic material is patterned to slender shape to increase the magnetization strength, (2) the backside selective electroplating of the ferromagnetic film increases the volume of the ferromagnetic materials. The embedded magnetic material design has three merits, (1) the *Si-Ni* compound actuating frame provides superior mechanical properties and large magnetostatic force, (2) the embedded *Ni* structures not only increase the ferromagnetic material volume but also enhance magnetization strength to enlarge magnetostatic torque, (3) the axial symmetric *Si-Ni* compound structures can increase the motion stability. The compound electromagnetic actuating force design has two merits: (1) integrate Lorentz force and magnetostatic force to realize the compound actuation, (2) employ the 3D magnet array to get the large concentrated magnetic field. In order to implement the proposed design, the fabrication techniques of double-side electroplating technique and embedded magnetic material are developed. The double-side electroplating technique has two merits: (1) the handle-layer is exploited as the shadow mask to pattern the seed-layer at the backside of the device layer, (2) the device layer acts as the cathode to enable simultaneous double-side electroplating. The embedded magnetic material technique employs a *Si* mold to simultaneously electroplate and pattern thick *Ni* to fabricate *Si-Ni* compound structures. The measurement results successfully demonstrate the proposed designs. In applications, the micro scanning mirrors are used to project 2D Lissajous patterns and raster scan patterns. Moreover, the micro scanning mirrors are operated with pulse laser to verify the system integration. The test results show the device characteristics are sufficient to satisfy the basic requirements of laser scanning display systems.

Key words: micro scanning mirror, magnetostatic force, Lorentz force, double-side electroplating technique, embedded magnetic material, compound electromagnetic actuating force

致謝

論文能順利的完成，首先要感謝我的指導教授方維倫老師，老師不僅提供了相當好的資源與設備，在每次與老師的討論中，都可獲得許多新的想法，並且老師給予百分之百的信任與支持，更是讓我在研究的過程中能無後顧之憂，勇往直前；而老師不分晝夜的認真研究，實在令我佩服，讓我不得不更要求自己更加的努力。

其次是感謝亞太優勢林敏雄榮譽董事長、奈微所范龍生教授、台大機械楊耀州教授、交大電機邱一教授、美商高通林弘毅博士、清大動機陳榮順教授、清大動機陳政寰教授，於博士口試與資格考時所提出之寶貴意見與指導，使本論文能更加豐富與完整。同時感謝清大奈材中心、自強基金會半導體實驗室、交大奈材中心、台大奈材機電系統研究中心提供製程設備之協助，使本論文能順利完成。

還要感謝微機電實驗室所有的成員，特別是弘毅學長在我博士班求學的過程中，提供了很多元件實務應用上的經驗與指導，使我更能了解文獻中並無提及的奧秘之處；也特別感謝智群，協助我進行雷射投影系統之架設，若沒有你的協助，我的論文也無法呈現出最好之成果。

在這研究所這幾年當中，最令我難忘的是每逢投稿期間，大家一起挑燈夜戰，全力奮鬥的革命情感，以及與大家一起遠征巴黎、里昂、索倫多、羅馬、舊金山、丹佛、紐約、東京、坎昆的美好時光，在此得到的不僅是知識的增長，對於國際視野也有大幅的拓展。而在求學過程中，也很幸運的有這麼多學長姐、學弟妹的相互陪伴，使嚴肅的研究過程增色不少，特別是不正經的明翰、愛毛手毛腳的侑道、人超客氣的協伸、永遠在瞎搞的志帆，雖然我們彼此的交集只有講不完的垃圾話，但這些卻是研究過程中不可或缺的重要元素。感謝許多學長姐，家保、煜哲、炯玚、信瑤、源棟、家民、志銘、啟琮、竣凱，在平日的協助與指導，讓我研究功力大增。另外還有學弟妹，文健、智群、漢堂、俊羿、育嘉、奕碩、芃昕、緯倫、孜育、昶宏、遠和、豐宇、照霖、文雄、之好、廷漢、恩湛、佳漢、晉沅，你們在背後的貢獻，我由衷的感謝，而且你們的沒大沒小，讓實驗室的氣氛總是熱熱鬧鬧充滿活力。

最重要的是要感謝我的家人，爸爸、媽媽，從小就沒有給我學業上的壓力，讓我選擇我想要的方向，如今也開創出屬於自己的一條路，順利的從博士班畢

業，每當研究壓力太大時，來自家裡的一通電話，總是能溫暖我的心。感謝哥哥在每階段的升學時，給予寶貴的意見，還有妹妹在國外唸書時，幫我從台灣遠端購物。感謝俞秀這麼多年來的陪伴，在沒日沒夜的忙碌生活當中，還時常叮嚀我要照顧身體，讓我感到非常的窩心。

在 28 歲的這一年，我終於完成了我的學業，在求學過程中，除了知識的增長之外，更重要的是學習到待人處事的進退道理，博士畢業代表在未來的日子所需負的責任越重，畢業不是結束，而是另一個全新的開始，期勉自己能保持剛進清華的學習態度，邁向人生的下一個階段。

最後，將此論文獻給我最摯愛的父母、家人、朋友。



目錄

摘要	II
Abstract	III
致謝	IV
目錄	VI
圖目錄	VIII
表目錄	XII
第 1 章 序論	1
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	3
1-3 研究動機	7
1-4 全文架構	8
第 2 章 微掃描面鏡之設計考量	19
2-1 掃描軌跡	19
2-1.1 Lissajous 掃描	19
2-1.2 循序掃描	20
2-1.3 掃描機制比較	22
2-2 影像解析度	22
2-3 雷射脈衝時間與時脈頻率	24
2-4 鏡面動態變形	26
2-5 結構動態分析	27
2-6 結構破壞應力	30
2-7 小結	30
第 3 章 雙面電鍍之微掃描面鏡設計	45
3-1 前言	45
3-2 元件設計	46
3-2.1 靜磁力致動原理	46
3-2.2 高長寬比之磁性材料圖形	47
3-2.3 選擇性雙面電鍍製程技術	48

3-3	製作流程與結果.....	49
3-4	量測與討論.....	50
3-5	小結.....	51
第 4 章	內嵌磁性材料之微掃描面鏡設計.....	64
4-1	前言.....	64
4-2	元件設計.....	65
4-2.1	致動外環擺盪現象之理論推導.....	66
4-2.2	內嵌鎳結構製程技術.....	68
4-2.3	熱應力分析.....	69
4-3	製作流程與結果.....	70
4-4	量測與討論.....	71
4-5	小結.....	73
第 5 章	複合電磁致動力之微掃描面鏡設計.....	86
5-1	前言.....	86
5-2	元件設計.....	87
5-2.1	勞侖茲力致動原理.....	87
5-2.2	複合電磁致動力設計.....	88
5-2.3	三維磁鐵陣列設計.....	89
5-3	製作流程與結果.....	90
5-4	量測與討論.....	91
5-5	小結.....	94
第 6 章	結論與未來工作.....	112
6-1	結論.....	112
6-2	未來工作.....	114
參考文獻	123
附錄 A	符號對照表.....	133
附錄 B	雷射投影系統之驗證.....	136
論文著作	143

圖目錄

圖 1-1	微型雷射投影顯示器系統架構.....	10
圖 1-2	微掃描面鏡模型.....	10
圖 1-3	Lissajous 掃描軌跡	11
圖 1-4	循序掃描軌跡.....	12
圖 1-5	單晶矽微掃描面鏡.....	13
圖 1-6	利用絞接支承技術之微光學桌.....	13
圖 1-7	Lucent Technology 所製作利用殘餘應力自組裝之為光開關.....	14
圖 1-8	Milanović 利用 SOI 晶片所製作出的微掃描面鏡.....	14
圖 1-9	Analog Device Inc. 整合 CMOS 電路之微掃描面鏡.....	15
圖 1-10	MOSBE 製程平台所製作之微掃描面鏡.....	15
圖 1-11	勞侖茲力驅動微掃描面鏡.....	16
圖 1-12	Ahn 提出具有互補電流繞線的微掃描面鏡.....	16
圖 1-13	45 度斜向磁場驅動雙軸微掃描面鏡.....	17
圖 1-14	Judy 所提出以靜磁力致動微結構.....	17
圖 1-15	Okano 以靜磁力驅動單軸微掃描面鏡.....	18
圖 1-16	整合靜磁力與勞侖茲力的驅動架構.....	18
圖 1-17	Yalcinkaya 以靜磁力驅動雙軸微掃描面鏡.....	18
圖 2-1	循序掃描快軸驅動訊號.....	35
圖 2-2	循序掃描慢軸驅動訊號.....	35
圖 2-3	雙向循序掃描軌跡.....	36
圖 2-4	單向循序掃描軌跡.....	36
圖 2-5	單一畫素大小定義方式.....	37
圖 2-6	計算影像解析度之模型.....	38
圖 2-7	影像解析度對照圖.....	39
圖 2-8	循序掃描之影像解析度計算方式.....	39
圖 2-9	不同位置之雷射脈衝時間.....	40
圖 2-10	雷射路徑折返所需時間.....	41
圖 2-11	鏡面之動態變形模型.....	41

圖 2-12	單軸矩形鏡面微掃描面鏡模型.....	42
圖 2-13	單軸圓形鏡面微掃描面鏡模型.....	42
圖 2-14	頻率響應圖.....	43
圖 2-15	扭轉彈簧之應力分析.....	43
圖 2-16	微掃描面鏡相關應用之規格比較圖.....	44
圖 3-1	靜磁式微掃描面鏡致動概念側視圖.....	54
圖 3-2	雙面電鍍微掃描面鏡設計架構.....	55
圖 3-3	電鍍鍍圖形設計.....	56
圖 3-4	定義元件層背面之電鍍起始層方法示意圖.....	57
圖 3-5	選擇性雙面電鍍架構示意圖.....	58
圖 3-6	製作流程圖.....	59
圖 3-7	製程結果之電子顯微鏡照片.....	60
圖 3-8	驅動載具.....	61
圖 3-9	磁場分佈上視圖.....	61
圖 3-10	轉動角度與不同設計圖形之關係.....	62
圖 3-11	掃描角度與單面/雙面電鍍元件之關係.....	62
圖 3-12	驅動載具.....	63
圖 3-13	二維 Lissajous 掃描圖形.....	63
圖 4-1	靜磁式微掃描面鏡致動概念測試圖.....	76
圖 4-2	內嵌磁性材料微掃描面鏡之設計概念.....	77
圖 4-3	分析鏡面擺盪之動態模型.....	78
圖 4-4	內嵌磁性材料製程技術.....	79
圖 4-5	不同溫度下之應力狀態.....	80
圖 4-6	內嵌磁性材料之微掃描面鏡製作流程圖.....	81
圖 4-7	傳統微掃描面鏡之製作流程圖.....	82
圖 4-8	製程結果之電子顯微鏡照片.....	83
圖 4-9	驅動載具.....	84
圖 4-10	光學掃描角度量測平台.....	84
圖 4-11	致動外環出平面擺盪之動態響應.....	85
圖 5-1	電磁力產生機制.....	95

圖 5-2	勞侖茲力致動概念圖.....	95
圖 5-3	複合電磁致動力之微掃描面鏡設計架構.....	96
圖 5-4	平面線圈之磁場強度.....	97
圖 5-5	Halbach array 原理.....	98
圖 5-6	磁鐵陣列組裝架構.....	99
圖 5-7	磁鐵配置與磁場分佈情形.....	100
圖 5-8	磁場強度模擬結果.....	101
圖 5-9	製作流程.....	102
圖 5-10	電子顯微鏡照片.....	103
圖 5-11	複合電磁力致動概念驗證元件.....	104
圖 5-12	磁鐵陣列驅動載具.....	105
圖 5-13	磁鐵陣列驅動載具側視圖.....	106
圖 5-14	平面線圈驅動之量測結果.....	107
圖 5-15	驅動電流與掃描角度之量測結果.....	107
圖 5-16	靜止時之鏡面表面形貌.....	108
圖 5-17	光學掃描角度 30 度時之鏡面表面形貌.....	108
圖 5-18	鏡面動態變形.....	109
圖 5-19	投影影像量測平台.....	110
圖 5-20	影像測試圖形.....	111
圖 6-1	可滿足之相關應用規格.....	118
圖 6-2	相關文獻之規格比較.....	119
圖 6-3	封閉磁路設計之驅動載具.....	120
圖 6-4	現有驅動載具磁場分佈.....	121
圖 6-5	封閉磁路設計之驅動載具磁場分佈.....	121
圖 6-6	內嵌驅動線圈之微掃描面鏡設計.....	122
圖 B-1	雷射投影驗證之系統架構.....	138
圖 B-2	微掃描面鏡驅動訊號.....	138
圖 B-3	人機介面.....	139
圖 B-4	程式區視窗.....	139
圖 B-5	測試圖形與投影結果.....	140

圖 B-6	灰階風景照投影結果.....	141
圖 B-7	慢軸與快軸操作頻率錯誤之投影結果.....	142
圖 B-8	快軸操作頻率錯誤或雷射脈衝起始點錯誤之投影結果.....	142



表目錄

表 2-1	微掃描面鏡不同模態之等效質量、等效質量慣性矩與彈簧剛性.....	32
表 2-2	微掃描面鏡之相關設計規格.....	33
表 2-3	設計規格與設計參數之關係表.....	34
表 3-1	選擇性電鍍測試結果.....	53
表 4-1	矽鍍複合致動外環與現有設計之比較.....	74
表 4-2	不同溫度下共振模態之頻率飄移量.....	74
表 4-3	不同鍍結構配置之量測結果比較表.....	75
表 4-4	不同元件設計之偏心力比較.....	75
表 6-1	本論文所提出之微掃描面鏡比較表.....	116
表 6-2	相關元件規格比較.....	117
表 A-1	本論文所使用之符號對照表.....	133



第1章 序論

1-1 前言

近年來半導體產業的迅速發展，微機電系統(microelectromechanical system, MEMS)技術也隨之趨於成熟，此技術主要是利用微機械結構來調變各種不同的物理量，如聲、光、電、熱、磁，進而製作出具有特定功能的晶片，另外還可整合不同功能的晶片，利用系統晶片化(system on chip, SOC)或系統級封裝(system in package, SIP)的概念，來實現多功能晶片的製作。微機電系統技術主要是建立在面型微加工(surface micromachining)與體型微加工(bulk micromachining)的製程技術上，面型微加工技術即是利用半導體製程的薄膜沉積、黃光微影、蝕刻技術來得到薄膜堆疊的結構，而體型微加工技術則是利用蝕刻技術，移除矽基材本身，使微結構達到懸浮或是得到高深寬比(aspect ratio)的結構，利用這樣的微機電系統技術可將半導體技術的應用範圍更進一步的延伸，製作出各種類型的感測器、致動器或光學元件，除了使元件微小化之外，還可保有批量製造的優點，使元件的製作成本大幅的降低。

目前使用微機電系統技術成功的商品化的元件有 Hewlett-Packard 的噴墨頭[1]、Analog Devices 的慣性感測器[2]、德州儀器(Texas Instruments, TI)的數位光處理技術(digital light process, DLP)[3]、Knowles 的微機電麥克風[4]等，這些元件不但證明了微機電系統技術的實用價值外，也使此技術更廣泛的應用於各種不同的產品，近年來更因智慧型手機與體感遊樂器等消費性電子產品的蓬勃發展，使得產品除了需要輕、薄、短小的基本特性外，還要高整合性、低消耗功率與多功能性之特色，因此微機電系統技術除了可滿足以上的需求之外，還具備了高精度、良好特性、可批量製造等優點，是一種具有極高附加價值的技術。

光學微機電(optical MEMS)技術是微機電系統技術中相當重要的一個課題，主要是整合光學、電學與微機械結構，進而製作出可動的微機械元件，直接調變光束，可達到高品質、快速響應等優點，如微光學開關(micro optical switch) [5-6]、微掃描面鏡[7]、光衰減器[8]、微快門[9]等元件，其中最具代表性的即是德州儀器所開發的投影顯示技術，稱做數位光處理技術，其技術核心在於數位微反射鏡元件(digital micromirror device, DMD)上[10]，主要利用大量微小的金屬鏡面來組

成陣列，每一個鏡面即為一個顯示單元，並且鏡面本身由微扭轉軸所支撐，由底部的互補式金氧化物半導體(complementary metal-oxide-silicon, CMOS)電路來控制每個鏡面的偏擺頻率，利用單位時間內光線經微鏡面反射到屏幕上次數的多寡，就能控制此顯示單元的亮暗程度，至於顏色的顯示，可以利用由三原色濾光片所組成的色輪(color wheel)高速旋轉時，使入射光以三色交替的方式依序投射到為鏡面陣列上，同樣利用頻率的調變來控制影像的色彩比例，以便顯示出全彩的畫面。數位微反射鏡元件為光學微機電技術中最具代表性的元件之一，已廣泛地應用在家用及商用投影機領域。此外光學微機電技術還可製作出許多微光學元件，如微透鏡[11]、光柵[12]等，這些微光學元件除了可提供具有高光學品質與高精度的特色之外，還能透過微矽光學平台(silicon optical bench, SiOB)[13]做整合，進而大幅改善系統光學效率與縮小體積。

目前在光學微機電技術的領域當中，另一極具發展潛力的元件即是微掃描面鏡(micro scanning mirror)，其不同於德州儀器數位微反射鏡元件的陣列形式，而是以單一鏡面做不同角度的偏斜，來達到調變光束路徑之目的。使用微掃描面鏡調變光束除了具有光學微機電技術本身的高品質、快速響應、低消耗功率、可批量製造等優點之外，還有大轉角與高共振頻率之特色。早期微掃描面鏡的發展較集中於投影顯示之用，主因於目前顯示器的主流為液晶顯示器(liquid crystal display, LCD)與電漿顯示器(plasma display panel, PDP)，雖然擺脫了傳統陰極射線管(cathode ray tube, CRT) 體積、重量與尺寸等因素，但是不可避免的都需要顯示基板的存在，因此有許多人著手發展另一類的顯示技術，也就是利用投影的方式來提供大尺寸畫面的顯示。

在技術的相互競爭下，液晶顯示的技術也被應用到投影機上，液晶投影機跟液晶顯示器的工作原理相同，僅將背光板用高亮度的燈泡取代，並透過光學透鏡的組合，將影像投影成像在屏幕上，以得到大尺寸的畫面。隨之也開發出另外一種形式的液晶投影機，稱為反射式液晶投影機，其基本構造與穿透式的液晶投影機有所不同，主要是利用矽晶片做為電路基板與反射層，再將液晶層用玻璃基板封住，光線射入液晶層之後再經由矽基板上的電極將光反射出來，投影至屏幕上，因此反射式液晶又稱做矽液晶(liquid crystal on silicon, LCoS)。

近年來各家廠商更嘗試將投影機微小化整合進攜帶式的電子產品當中，如相機、攝影機、智慧型手機、筆記型電腦等，期望能以更小的系統體積提供更大的

影像尺寸，配合上紅、綠、藍三色發光二極體(light emitting diode, LED)或雷射二極體(laser diode, LD)的光源改良，目前能達到系統微小化的技術分別為數位微反射鏡元件、反射式液晶與微掃描面鏡，然而微掃描面鏡的微投影技術相對於其他兩種技術所具有的優勢為更小的系統體積、更簡單的光學系統與更好的光學效率，並且具有影像永久聚焦之特點，因此微掃描面鏡應用於攜帶式電子產品上之投影技術極具發展潛力。然而除了投影顯示的用途之外，微掃描面鏡還可以應用於其他的系統當中，如雷射印表機(laser printer)[14]、條碼掃描器(barcode scanner)[15]、共軛焦顯微鏡(confocal microscopy)[16]、內視鏡(endoscopy)[17]、光學同調斷層掃描技術(optical coherence tomography, OCT)[18]、三維雷達(3D radar)[19]等，都可利用微掃描面鏡具有快速響應、低功率損耗、以及高精確度的優點，可改善過去許多系統之特性，不論是縮小系統體積或提升效能上，都有極大的幫助。

1-2 文獻回顧

微機電技術所製作之微掃描面鏡應用於調變光束時，其基本系統架構如圖 1-1 所示，包括雷射二極體光源、光學系統、微掃描面鏡與控制電路四大部分，此四部分彼此相互配合即可實現光束調變之功能。首先雷射二極體提供光源，可依照應用之不同選擇可見光或不可見光之光源，例如要應用於全彩之影像顯示時，則會具有紅、綠、藍三色雷射二極體，使用雷射二極體之好處除了低消耗功率、高亮度、高調控速度之外，還可利用簡單的透鏡即可將其調整為近乎準直之光束，並且利用合束鏡(combiner)將三色雷射光束合併，經過反射面鏡後會聚於微掃描面鏡上，此時當微掃描面鏡進行一維或二維掃描時，經微掃描面鏡反射之雷射光束則會於屏幕上顯示所對應之一維或二維雷射掃描軌跡。

此外還需要控制電路進行雷射二極體與微掃描面鏡之驅動控制，並且彼此要能相互配合驅動。以雷射投影系統為例，此控制電路則需具有影像編碼與微掃描面鏡控制之兩大功能，影像編碼的目的是在將所欲顯示圖形之每一畫素依照雷射掃描軌跡順序編排，並將全彩之影像分為三原色，依照每一畫素之強度不同，分別輸入至所對應之雷射二極體，再以脈衝之方式輸出，如此一來當此脈衝雷射經微掃描面鏡反射至屏幕上時，每一次的雷射脈衝即為投影影像之單一

畫素。但控制電路只有影像編碼的功能是不夠的，因為微掃描面鏡在操作時，會因為外在環境或元件本身之不穩定造成掃描頻率與角度的飄移，因此需要控制電路針對微掃描面鏡進行迴授控制，以達到正確的操作頻率與角度，如此藉由控制電路才能將雷射二極體與微掃描面鏡兩者彼此之間的運作同步，使脈衝雷射在正確的時間顯示於正確的影像位置上。

屏幕上之影像位置由雷射依特定軌跡重複掃描而產生的，而此雷射軌跡又是由微掃描面鏡反射入射雷射光束所產生，因此若要設計微掃描面鏡與進行影像編碼，則需對其掃描軌跡有所了解，如此才能設計出符合應用需求之微掃描面鏡。一般常見的二維微掃描面鏡結構模型如圖 1-2 所示，通常稱之為雙環(gimbal)結構，分別提供快軸與慢軸之掃描，一般定義投影畫面之水平方向為快軸(即鏡面沿 x 軸向扭轉)，垂直方向為慢軸(即鏡面沿 y 軸向扭轉)，最常見的兩種掃描軌跡分別為 Lissajous 掃描軌跡與循序掃描(raster scan)軌跡，其示意圖分別如圖 1-3 與圖 1-4 所示，其中藍色線條為雷射掃描軌跡，灰色線條則為掃描影像之畫面大小，只要雷射掃描軌跡可以完整經過每一個影像畫素之位置，就能利用脈衝雷射將特定解析度之畫面投影於屏幕上。Lissajous 掃描軌跡為交錯式掃描，影像畫素位置為掃描線之交點，而循序掃描軌跡是由畫面上至下，一系列進行掃描，詳細的 Lissajous 掃描軌跡與循序掃描軌跡將於本論文第二章進行詳細之說明與比較。

利用微掃描面鏡進行光束調變之應用，最早出現在 1980 年，Petersen 首先發表以矽基材本身為結構，利用晶片接合技術所製作的微掃描面鏡，如圖 1-5(a) 所示[20]，其驅動方式主要是利用下電極板與微掃描面鏡本身施加不同的電壓，產生靜電力來驅動結構，如圖 1-5(b)所示，像這樣一維方向的掃描，主要可以應用於掃描器、條碼掃描器、雷射印表機等應用上，若將這樣的概念延伸下去，製作出一對彼此互相正交的轉軸，一組轉軸負責水平方向的高頻掃描，另一組負責垂直方向的低頻掃描，此時使用一雷射光入射到微掃描面鏡上，並且同時驅動微掃描面鏡在兩個軸向運動，就能提供一個二維的掃描路徑。

在 1980 年代的末期，由於 Fan 成功的利用多晶矽面型微加工製程技術發展出微馬達[21]，帶動了大量以多晶矽為結構的相關研究，進而發展出以靜電力為致動力的梳狀致動器(comb-drive)[22]，使許多具有連桿的機構元件有了動力源。面型微加工技術通常是以多晶矽為結構層，結構的懸浮是靠移除多晶矽底下的二

氧化矽層，但是礙於面型微加工技術本身是以薄膜的堆疊來組成微結構，薄膜厚度大多都不會超過 $2\mu\text{m}$ ，對於微掃描面鏡的應用，會使出平面的運動空間受到限制，因此在 1994 年 Wu 的研究團隊發展出微光學桌的技術，如圖 1-6 所示[23-25]，這樣的觀念提供了光學微機電技術突破性的發展，可利用微絞接支承(micro hinge)[26-28]與自組裝(self assembly)的技術，將原本的薄膜結構在懸浮之後，可以直立於晶片表面上，且元件的運動空間不再被矽基材所限制。

以上所提及的微掃描面鏡製作技術，都需要微致動器或是後續製程才有辦法將微結構組裝起來，因此在 2000 年時，Lucent Technology 發展出一套利用薄膜本身的殘餘應力(residual stress)，當移除犧牲層時，應力臂會因殘餘應力被釋放而翹起，讓面鏡結構被應力臂抬起約 $50\mu\text{m}$ 左右，使元件本身能達到真正的自組裝功能，並且同時提供面鏡所需的運動空間，如圖 1-7 所示[29-31]。總而言之，利用面型微加工技術所製作的微掃描面鏡，礙於鏡面操作時之運動空間不足，都需要額外的機構設計、致動器與微組裝技術來克服此缺點，且面型微加工大多使用多晶矽薄膜來當作結構主體，最難避免的就是薄膜本身殘餘應力所造成的影響，會在結構懸浮之後使面鏡平面的彎曲，使光學品質大大的降低[32]。此外，當面鏡在運動時，會因薄膜結構本身的剛性不足，造成微面鏡產生動態變形，降低光學解析度[33-34]。基於以上的這些原因，對於使用面型微加工技術製作的微掃描面鏡，有著無法克服的缺點存在。

近年來隨著 SOI(silicon on insulator)晶片與深式反應離子蝕刻(deep reactive ion etching, DRIE)技術的發展成熟，許多高深寬比的結構可以被輕易的被製作出來，使用 SOI 晶片除了可使製程步驟單純化之外，結構本身具有單晶矽優越的機械性質，如此一來就能大幅改善面型微加工技術所面臨到薄膜殘餘應力與鏡面動態變形的問題，進而可以得到較佳的光學品質。Adriatic Research Institute 的 Milanović 利用 SOI 晶片搭配 DRIE 蝕刻技術成功的製作出雙軸微掃描面鏡[35-36]，並且利用連桿機構間的高低差，可以使致動器所提供的水平位移轉換為扭轉力矩，提供鏡面轉動，如圖 1-8 所示。Analog Device Inc.更進一步的將 SOI 晶片與 CMOS 電路做整合，可直接做電路迴授控制元件，如圖 1-9 所示[37]。使用 SOI 晶片雖然可以得到較佳的光學品質，但可能會因為面鏡本身結構過於厚重，使得元件高頻的動態響應受到抑制。

為了避免薄膜結構的剛性不足以及 SOI 晶片結構過於厚重等問題，Wu 開發

出結合面型微加工與體型微加工的 MOSBE(bolded surface-micromachining and bulk etch release)製程平台來製作雙軸微掃描面鏡，如圖 1-10(a)所示[38-40]，其製程平台最大特色在於使用孔道回填(trench refill)來製作垂直梳狀致動器，如圖 1-10(b)所示，以及肋補強(reinforced ribs)結構以增加薄膜剛性，如圖 1-10(c)所示。以上所介紹利用靜電力致動的微掃描面鏡，都具有一無法避免的問題，也就是達到大轉角或側向不穩定時所發生的吸附效應(pull-in effect)，使結構瞬間通過大電流而燒毀，因此在微掃描面鏡的發展過程中，有些團隊利用不同的致動方式來驅動微掃描面鏡。

1994 年時 Esashi 的研究團隊將勞倫茲力(Lorentz force)用於驅動微掃描面鏡，如圖 1-11 所示[41]，微掃描面鏡上利用電鑄技術佈上導線，當電流方向與磁場方向互相垂直時，會在與這兩個方向互相垂直的方向產生勞倫茲力，並且由於微掃描面鏡的兩端電流方向相反，所處的外界磁場方向相同，最後則會產生一對大小相等方向相反的勞倫茲力，相對於扭轉軸則是一扭轉力矩，若通入一交變電流時，微掃描面鏡就會產生高速的往復擺盪。利用同樣的概念，Ferreira 於 1999 年提出以體型微加工技術製造微掃描面鏡[42]，由於鏡面的驅動是靠電流通於導線中，因此焦爾熱(joule heat)會隨之產生，為了降低焦爾熱的產生，必須要把導線的厚度增加，以降低其阻值，並且還需要以跳線(jumper)的方式將螺旋狀的導線由內往外拉出。2004 年時 Ahn 提出以電流繞線配合放射型磁場產生勞倫茲力驅動微掃描面鏡，圖 1-12 為其架構[43]，並且利用多層導線堆疊，進行微掃描面鏡操作時之致動力補償，以減少兩個軸向獨立操作時所產生之干擾問題(crosstalk)。2006 年 Yalcinkaya 利用與扭轉軸夾 45 度的磁場配合載有電流之驅動線圈，產生勞倫茲力同時作用於兩個掃描軸向，如圖 1-13 所示，並且設計快軸之共振頻率於反相位之擺盪模態(rocking mode)，使元件在高頻運動時也能保持大轉角運動[7]。以勞倫茲力驅動的微掃描面鏡其設計較為單純，大多都是建立在體型微加工的製程平台上，且無梳狀致動器會因吸附效應產生的失效問題，但其主要關鍵是必須在微小的鏡面與彈簧上製作複雜的電流繞線，但又必須避免驅動電流過大所產生的焦爾熱問題，並且還要配合外部的磁鐵封裝，因此在導線製作與元件封裝為此驅動方式最重要的設計考量。

不論以靜電力或勞倫茲力驅動微掃描面鏡，元件的製作都具有相當之複雜度，並且驅動時會有造成元件毀壞的風險存在，早在 1995 年 Judy 提出在多晶矽

的撓性結構上電鑄磁性材料，當結構上施加一外部磁場的時候，磁性材料本身會被感應而磁化(magnetization)，此時因外部磁場所感應出的靜磁力(magnetostatic force)與本身可撓性多晶矽結構產生力平衡，就能使結構產生同平面(in-plane)位移，如圖 1-14(a)所示[44-45]，或是出平面(out-of-plane)位移，如圖 1-14(b)所示[46]，靜磁力強度主要與材料本身之性質有關，舉例來說，鐵、鈷、鎳或其合晶等這些鐵磁性材料材料，經過磁化過程後本身具有磁性，若同時處於特定磁場的環境下時，則會產生靜磁力而做動。應用靜磁力驅動微掃描面鏡的最大特色即是不需要複雜的導線與絕緣層的沉積，具有製程簡單的優點，並且是利用外部磁場以超距力的方式驅動元件，也可降低晶片封裝時的困難度，因此利用靜磁力驅動微掃描面鏡之方式，也成為近年來另一研究方向。

2002 年時 Okano 利用靜磁力驅動單軸微掃描面鏡[47]，如圖 1-15 所示，並探討使用硬磁性與軟磁性材料製作的差異，指出以硬磁材料製作之元件特性較為穩定。另外一種以超距力驅動微掃描面鏡的方法為感應電流產生勞倫茲力，為 2005 年 Yang 提出以渦電流產生勞倫茲力驅動微掃描面鏡[48]，利用低功率的交變磁場，在電鑄鎳的微鏡面上產生感應電流，並且此電流配合外加的永久磁場可產生勞倫茲力來驅動微掃描面鏡，但這種感應出來的勞倫茲力會礙於尺寸效應，隨著尺度的縮小迅速縮減，因此進一步提出整合靜磁力與感應勞倫茲力的元件驅動架構[49]，架構如圖 1-16 所示，並詳細分析探討此兩種磁力的強度差異，在其討論中可得知靜磁力相較於感應勞倫茲力大。2007 年 Yalcinkaya 提出以靜磁力驅動雙軸微掃描面鏡[50]，如圖 1-17(a)所示，針對磁性材料沉積厚度與其致動力之關係做討論，由於使用的是軟磁性材料，因此在驅動架構上需有一永久磁鐵來保持軟磁性材料的磁化方向與磁化強度，如圖 1-17(b)所示，並提出磁性材料磁化方向對於靜磁力的產生有著相當重要的影響。目前以靜磁力驅動微掃描面鏡的相關研究仍有許多設計上能改善的空間，本研究將同時針對以勞倫茲力與靜磁力驅動之微掃描面鏡進行設計，期望能提升元件操作特性，更進一步增加其應用價值。

1-3 研究動機

微掃描面鏡發展至今主要以靜電力與電磁力兩大方式來致動，以靜電力驅動

的微掃描面鏡雖然具有低消耗功率之特色，但因微掃描面鏡本身即為一種大位移之扭轉致動器，因此若在大轉角操作時發生側向不穩定之情況，則會產生吸附效應使元件損壞，雖然電磁式微掃描面鏡可以避免以上敘述之缺點，但本身仍具有一些問題需要改善。例如利用靜磁力驅動的微掃描面鏡，雖可避免製作複雜的絕緣層與電流導線，但對於增加驅動力與掃描角度仍具有很大的挑戰。而對於利用勞侖茲力驅動之微掃描面鏡，雖然有著較佳的操作特性，導線通入電流時所產生之焦爾熱則會影響元件特性，並且不論是使用靜磁力或勞侖茲力驅動微掃描面鏡，通常需外部組裝磁鐵或線圈，使封裝體積大幅增加。因此本論文針對以上問題進行探討與改良，並且根據高解析度微掃描面鏡之高操作頻率與大掃描角度的設計考量，分別提出三種電磁式微掃描面鏡設計，利用增加磁性材料磁化量與體積之方式增強靜磁力，另外以整合靜磁力與三維磁鐵陣列之方式提升勞侖茲力驅動效能。此外，針對現有電磁式微掃描面鏡設計，不論是磁性材料或電流繞線皆是製作於晶片表面，有時會搭配剛性補強結構於鏡面背面，當元件大角度操作時則會產生不必要擺盪現象，會造成經鏡面反射之雷射光束發生抖動，降低光學解析度，因此本論文以單軸靜磁式掃描面鏡為例，並配合上複合結構致動外環，除了可提升靜磁致動力外，還可增加微掃描面鏡操作時之運動穩定性。為實現上述之目標，本論文配合製程開發與磁路設計進行元件設計，並針對元件特性進行完整的量測分析與系統驗證，期望本論文之研究成果能提供未來相關研究作為參考依據。

1-4 全文架構

本文以電磁式微掃描面鏡開發為主軸，並建立相關製程技術應用於微掃描面鏡之製作，據此發展出三種微掃描面鏡設計，使其分別具有高運動穩定性與大致動力之特性。本論文於第一章中，首先陳述微機電系統技術之發展與特色，特別針對光學微機電技術於投影系統之應用進行介紹，並於文獻回顧中整理微掃描面鏡之系統架構與發展歷程，以了解各種驅動方式所面臨到的問題，而本論文將針對微掃描面鏡之電磁致動力與運動穩定性進行探討與設計，並配合雷射光源進行系統驗證，以展現本論文所設計之微掃描面鏡應用價值。

在第二章中，針對微掃描面鏡之設計規格與需求進行詳盡介紹。首先由微掃

描面鏡所提供之掃描軌跡切入，進而了解其特色與優勢，並針對影像解析度、雷射脈衝時間、鏡面動態變形、結構動態分析與結構破壞應力之計算進行探討，以了解微掃描面鏡結構的設計考量，以便於後續章節中設計出符合不同應用需求之微掃描面鏡。

在第三章中，提出雙面電鍍之微掃描面鏡設計，利用細長磁性材料圖形與雙面電鍍方式，分別增加磁化強度與磁性材料之體積，進而提升靜磁致動力矩。並且以 SOI 晶片之基板層與元件層，分別作為製程中的遮蔽擋罩與電鍍陰極板，以建立選擇性雙面電鍍技術來實現此設計。量測結果顯示此設計能有效增加微掃描面鏡之靜磁致動力矩，並且可利用此雙軸微掃描面鏡投影出二維 Lissajous 掃描圖形。

在第四章中，提出內嵌磁性材料之微掃描面鏡設計，以第三章中所提出增加磁化量之方式為基礎，更進一步地將磁性材料內嵌於單晶矽結構中以增加磁性材料之體積，除了提升靜磁致動力外，還使此致動外環結構於厚度方向對稱於扭轉軸，因此可降低操作時不必要的擺盪問題，提升鏡面的運動穩定性。此外，本章節建立內嵌磁性材料製程技術以實現此設計，量測結果除了驗證此設計之外，此單軸靜磁式微掃描面鏡可達到 90° 之光學掃描角度。

於第五章中，提出複合電磁致動力之微掃描面鏡設計，除了利用勞倫茲力致動微掃描面鏡外，位於鏡面側邊之致動懸臂也會產生靜磁力作用於鏡面上，因此可在單一晶片上同時整合勞倫茲力與靜磁力以致動元件。此外，利用磁路分析建立三維磁鐵陣列，提供高強度的集中磁場使元件產生勞倫茲力，同時也大幅減少外部磁鐵組裝之體積。量測結果除了驗證此設計之外，還針對結構頻率響應與鏡面動態變形進行量測，並且可利用此雙軸微掃描面鏡以循序掃描方式投影出二維影像測試圖形。

最後於第六章中，將本論文所提出之電磁式掃描面鏡設計作總結，並說明未來工作項目。而論文中包含兩項附錄，附錄 A 為符號對照表，整理本論文使用於公式推導之符號定義與單位；附錄 B 為雷射投影系統之驗證，針對第四章中投影系統之驗證進行詳細之介紹，包括實施方式、訊號編碼與影像分析。期望將本論文所提出之元件設計與系統架設經驗，提供給其他相關研究做為參考。

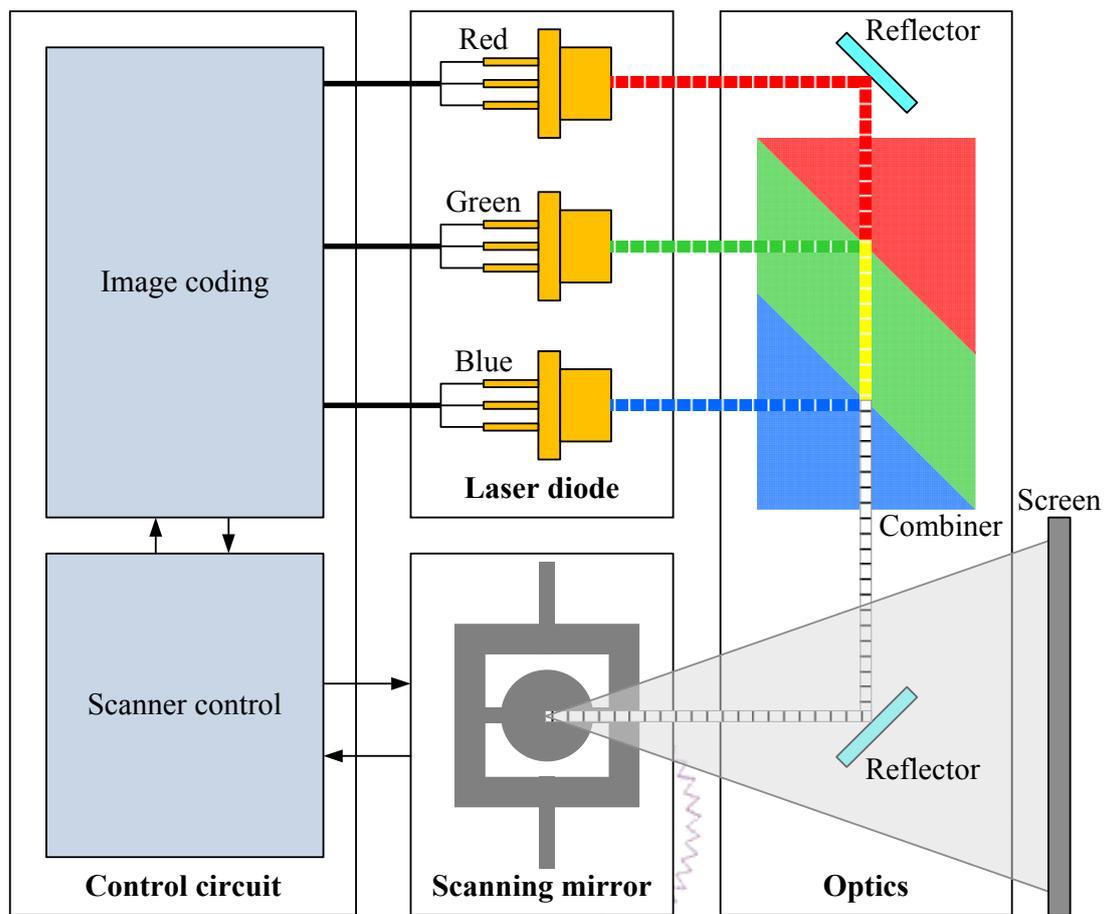


圖1-1 微型雷射投影顯示器系統架構

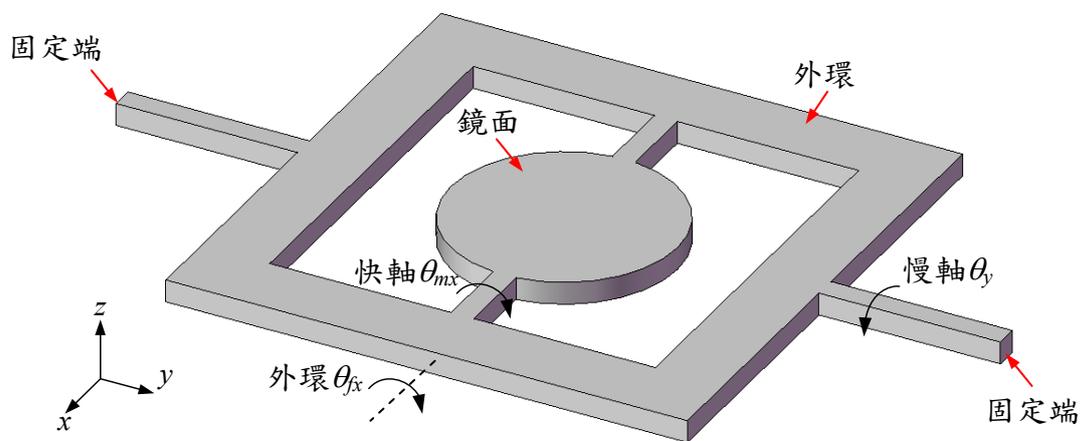
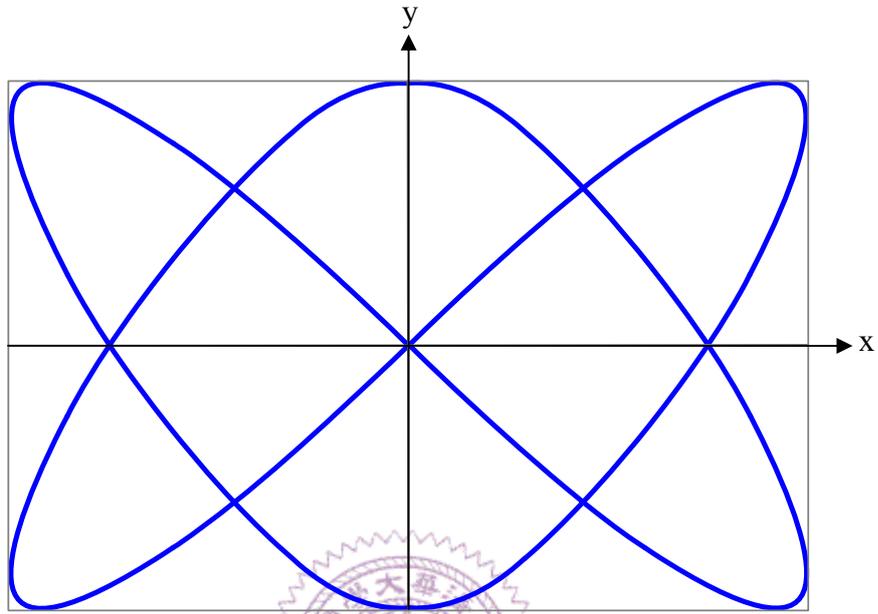


圖1-2 微掃描面鏡模型

(a)



(b)

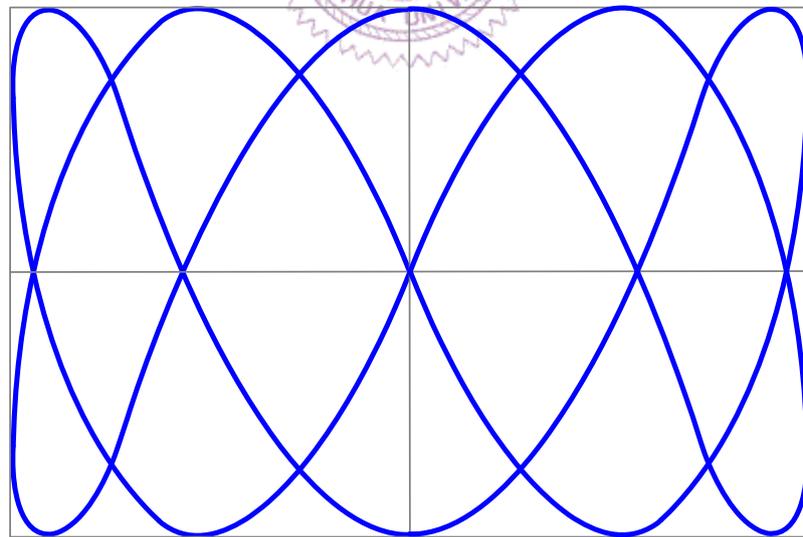
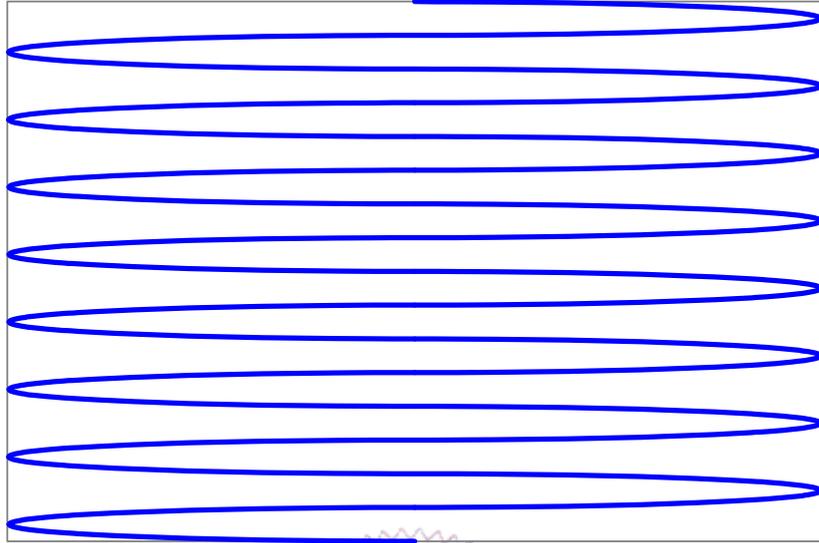


圖1-3 Lissajous 掃描軌跡

(a)



(b)

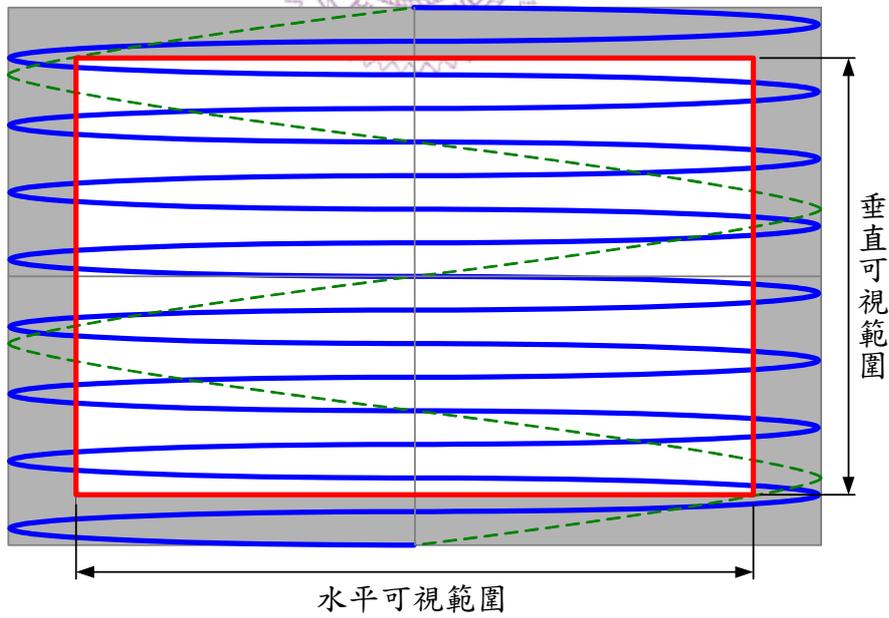
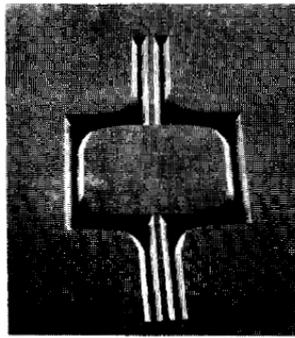


圖1-4 循序掃描軌跡

(a)



500 μm

(b)

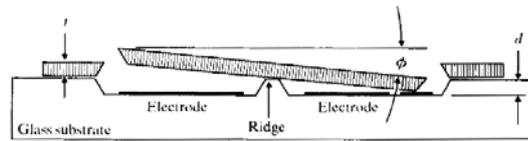


圖1-5 單晶矽微掃描面鏡[20]

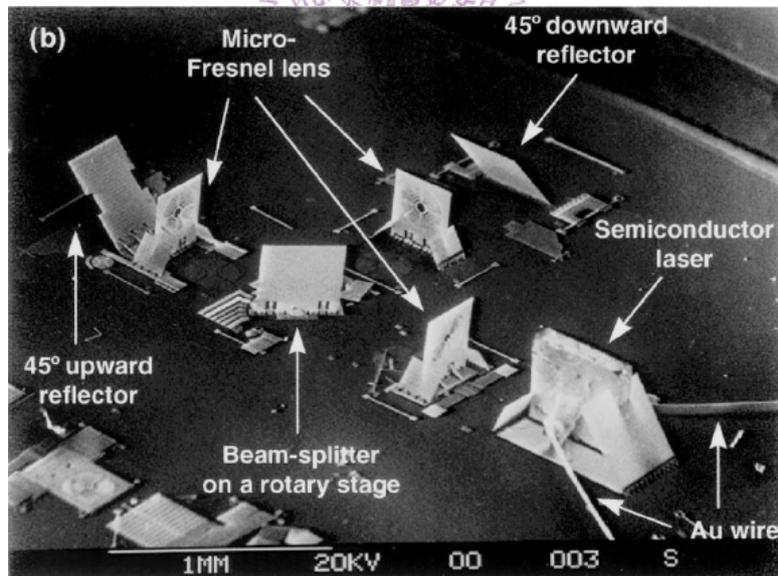


圖1-6 利用絞接支承技術之微光學桌[24]

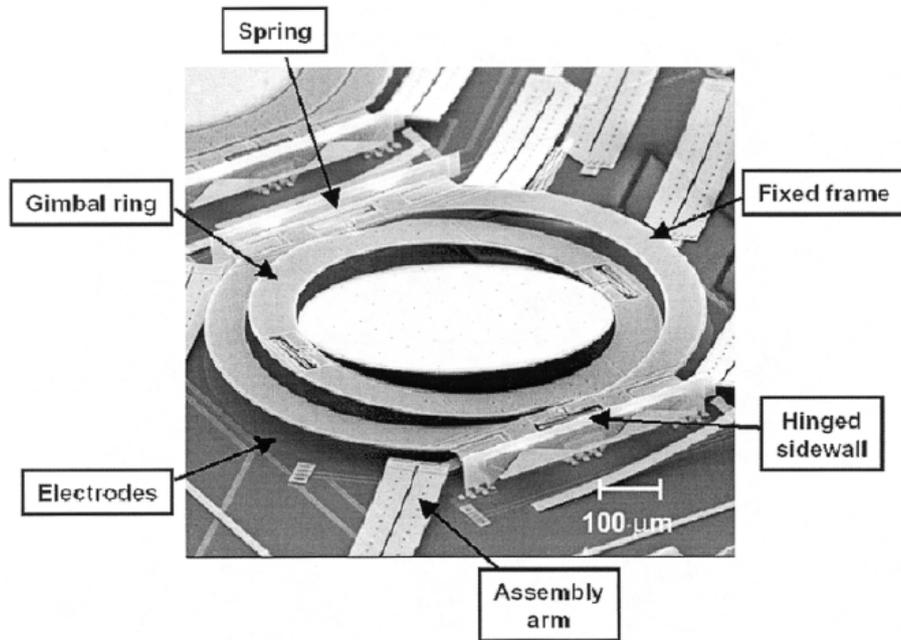


圖1-7 Lucent Technology 所製作利用殘餘應力自組裝之為光開關[31]

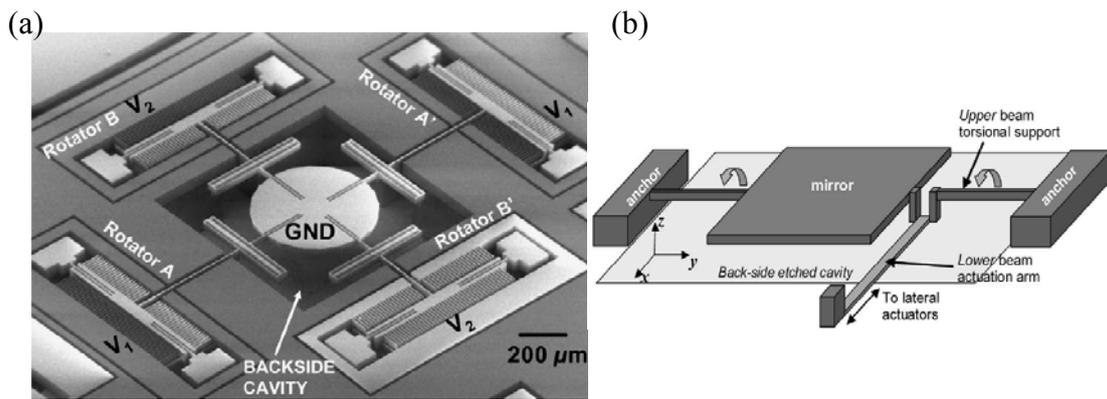


圖1-8 Milanović 利用 SOI 晶片所製作出的微掃描面鏡[35]

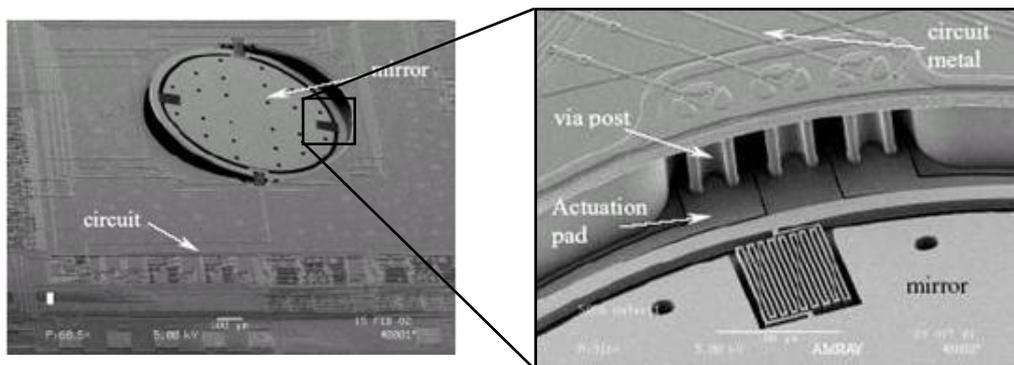


圖1-9 Analog Device Inc. 整合 CMOS 電路之微掃描面鏡[37]

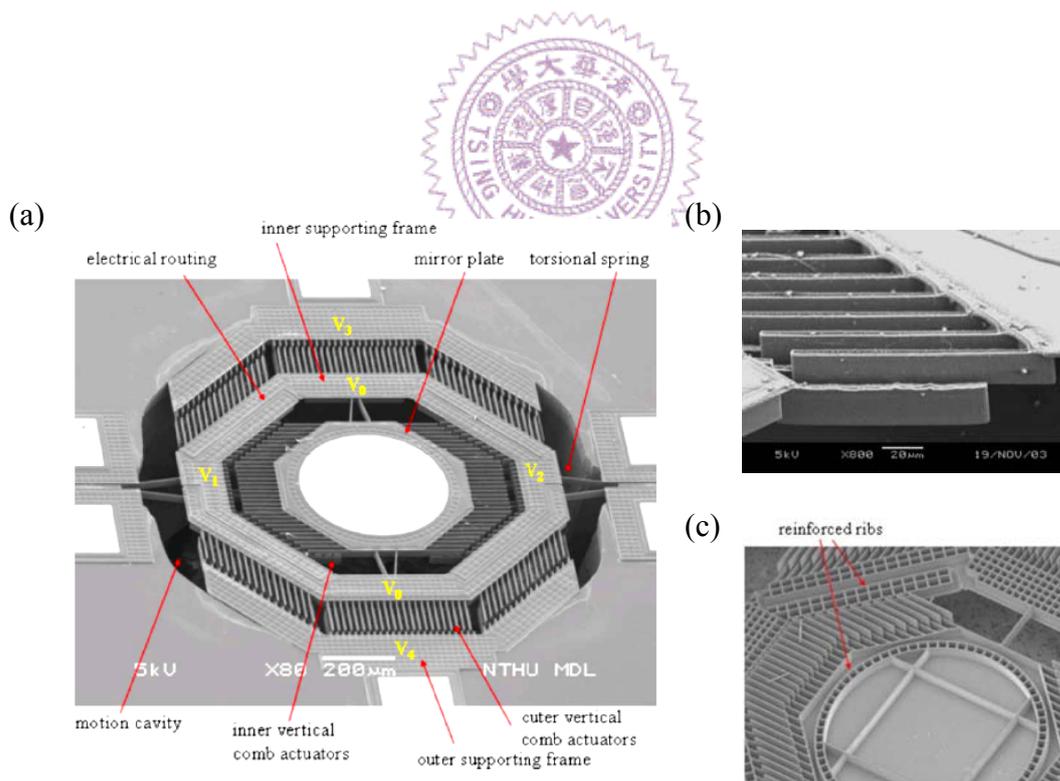


圖1-10 MOSBE 製程平台所製作之微掃描面鏡[38,40]

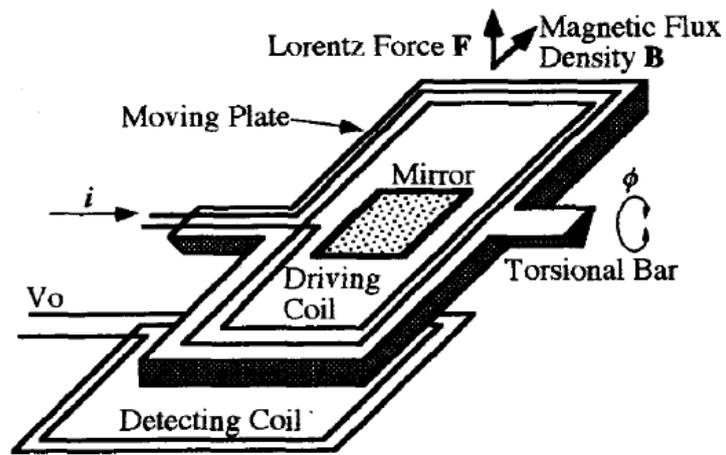


圖1-11 勞侖茲力驅動微掃描面鏡[41]

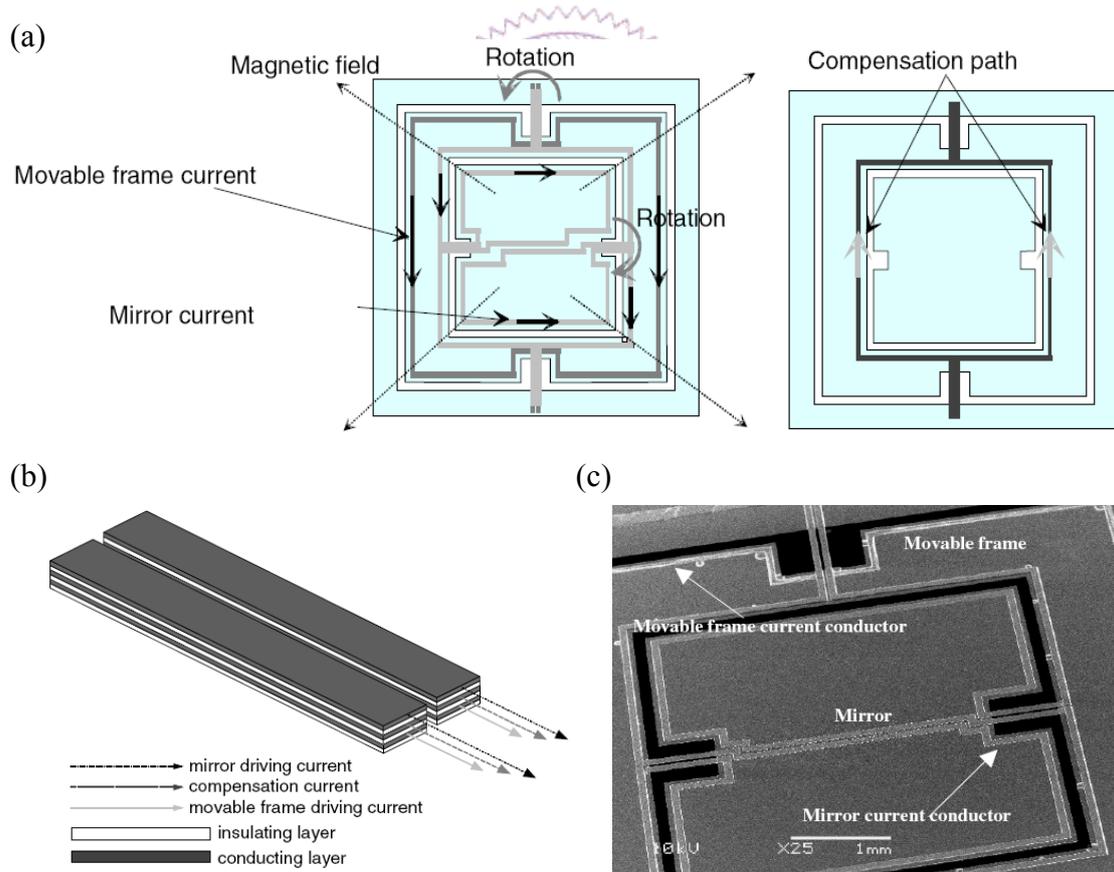


圖1-12 Ahn 提出具有互補電流繞線的微掃描面鏡[43]

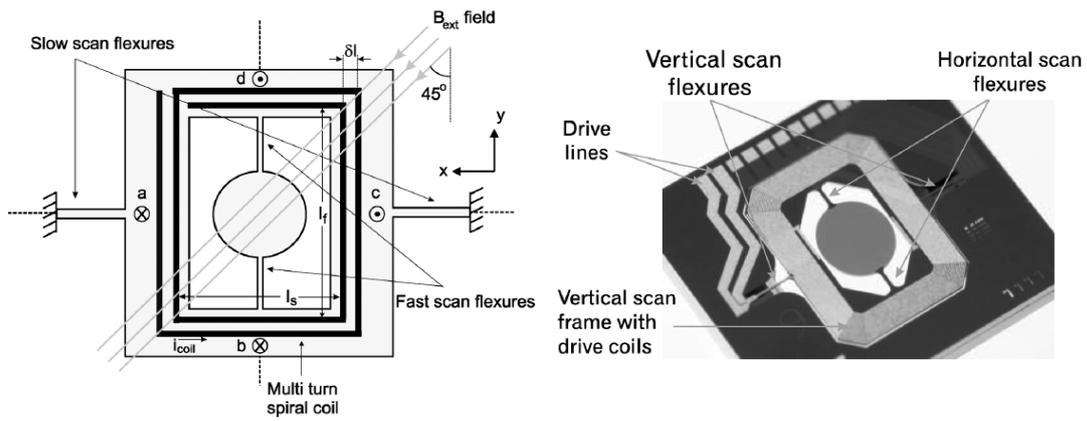


圖1-13 45度斜向磁場驅動雙軸微掃描面鏡[7]

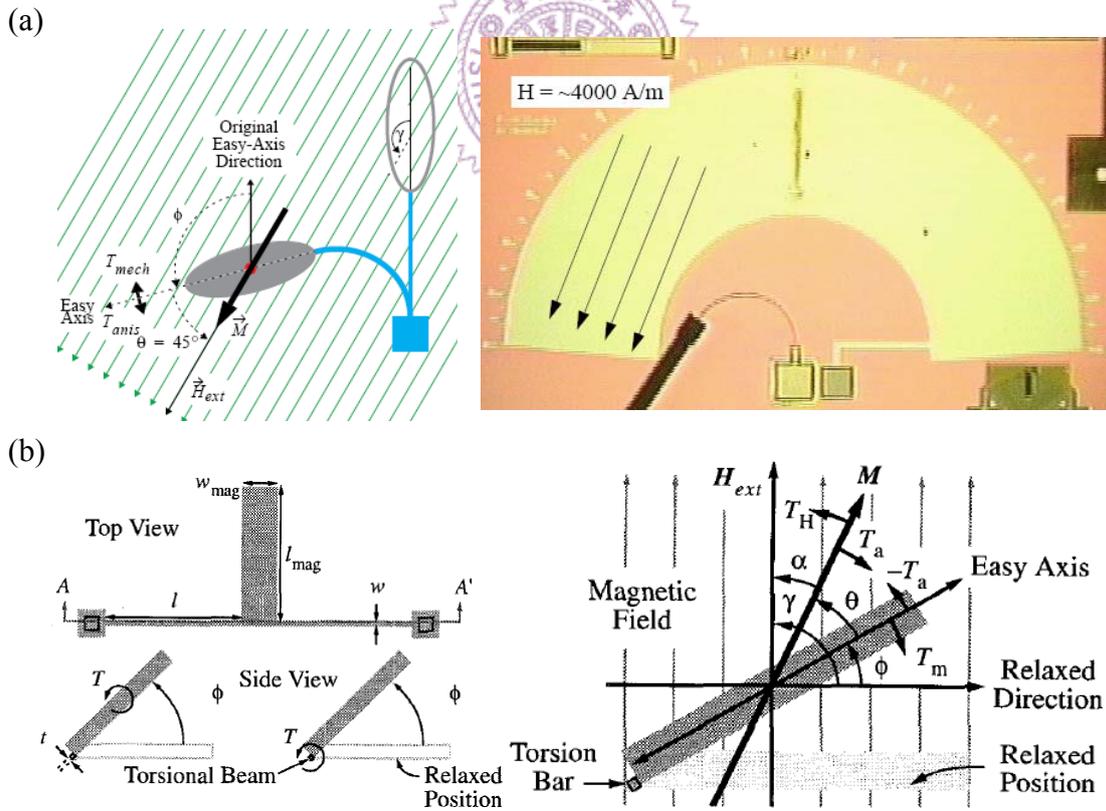


圖1-14 Judy 所提出以靜磁力致動微結構[44-46]

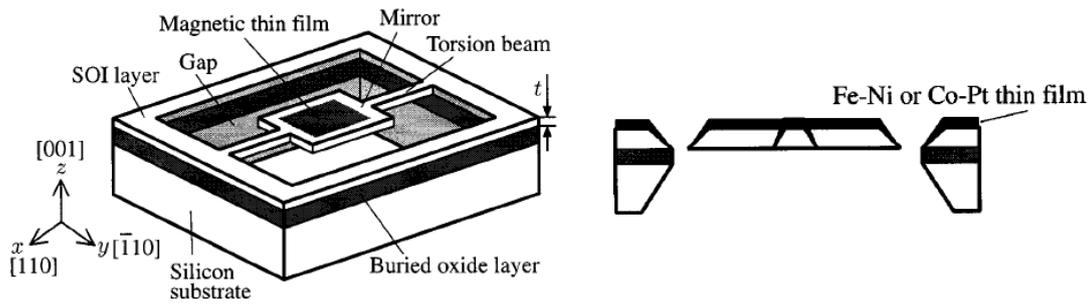


圖1-15 Okano 以靜磁力驅動單軸微掃描面鏡[47]

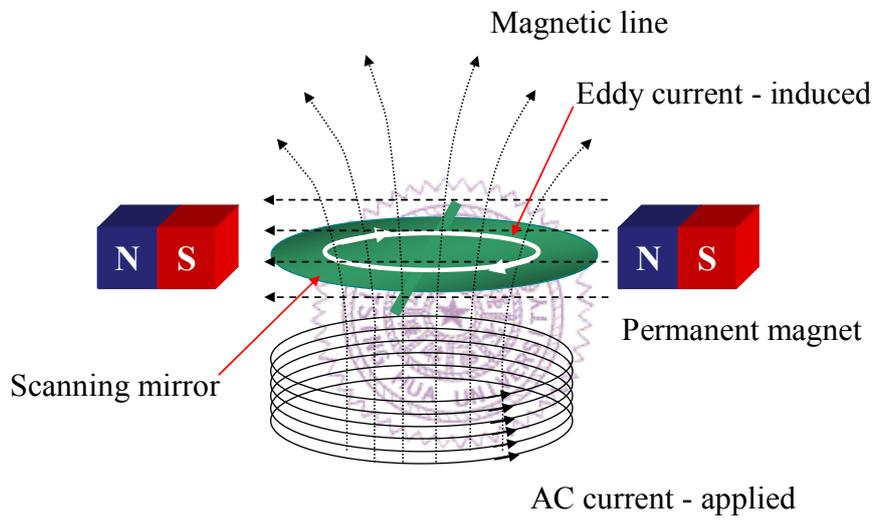


圖1-16 整合靜磁力與勞倫茲力的驅動架構[49]

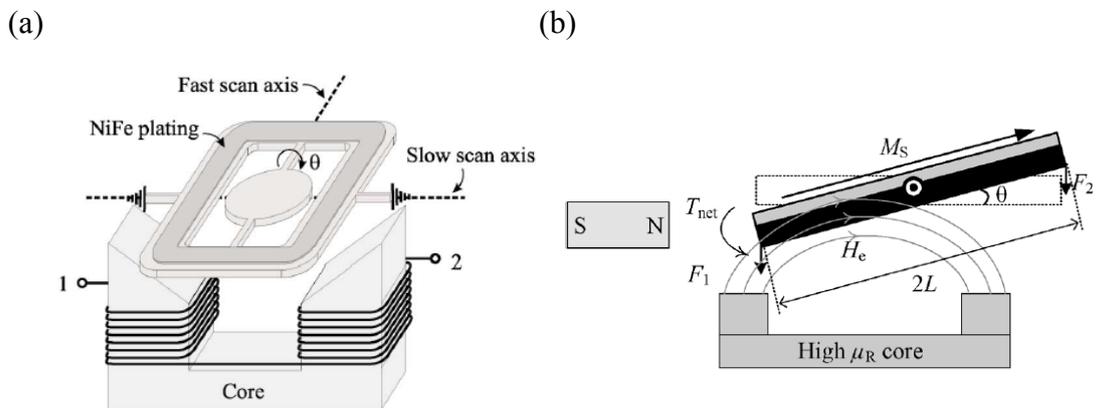


圖1-17 Yalcinkaya 以靜磁力驅動雙軸微掃描面鏡[50]

第2章 微掃描面鏡之設計考量

利用微機電技術所製作之微掃描面鏡，具有小體積、高反應速度與低消耗功率等特色，對於改善傳統光學系統具有相當大的潛力，其應用範圍廣泛，如抬頭顯示器[51]、雷射印表機[14]與微光開關 [6]。若是將微掃描面鏡結合上影像感測器，則可將其應用範圍更進一步地延伸至各種不同的光學系統上，如條碼掃描器[15]、光譜儀(spectrometer)[52]、共軛焦顯微鏡[16]與內視鏡[17]。由此可知，微掃描面鏡已成為改良各種光學系統時最重要的核心元件，然而這些應用其基本架構皆是以微掃描面鏡反射入射光源，達到一維或二維的影像投影，若要設計微掃描面鏡，則需先了解其應用端之光學與系統需求，才有辦法設計出符合其應用目的之元件，因此本章節將會以雷射掃描顯示器為例，由微掃描面鏡所能提供之掃描軌跡切入，進而了解其特色與優勢，並以基本的光學考量為設計基礎，延伸到微掃描面鏡之結構設計，以建立完整之微掃描面鏡之設計能力，因此可針對不同之應用需求，設計出符合規格之微掃描面鏡。



2-1 掃描軌跡

微掃描面鏡主要是用來調變光束之行進方向，因此藉由改變結構設計可得到不同之光束掃描軌跡，而雙環形式之微掃描面鏡通常可以提供 Lissajous 掃描軌跡或循序掃描軌跡，以下將針對此兩種掃描軌跡進行詳細的介紹與比較。

2-1.1 Lissajous 掃描

Lissajous 掃描軌跡主要是由鏡面同時進行兩個軸向的簡協運動(harmonic motion)所形成，通常可用下列公式以參數化的方式表示雷射點的位置(x, y)

$$\begin{cases} x = A \sin(2\pi f_h t + \phi) \\ y = B \sin(2\pi f_v t) \end{cases} \quad (2-1)$$

其中 A 與 B 分別為 x 方向(水平)與 y 方向(垂直)之最大振幅， f_h 與 f_v 分別為 x 方

向與 y 方向之共振頻率， t 為時間， ϕ 為兩簡協運動彼此間之相位差。當此兩簡協運動之頻率比不同時，就會造成不同密集度之 Lissajous 圖形，如圖 1-3(a) 水平與垂直方向之頻率比為 2: 3，而圖 1-3(b) 之頻率比為 2: 5，因此若能形成越密集之 Lissajous 圖形時，則能達到越高之影像解析度。

要達到以 Lissajous 圖形掃描方式之微掃描面鏡在設計上較為簡單，主要因為當機械結構本身操作於共振頻率時，本身即呈現簡協運動，同時利用結構本身之品質因子(quality factor)放大振幅，可以降低操作電壓與提升掃描角度，因此對於微掃描面鏡之設計則較為寬鬆與容易。但以 Lissajous 圖形掃描方式用於影像顯示時，可先定義兩個軸向之掃描頻率比 k ，可表示為

$$k = \frac{f_y}{f_x} \quad (2-2)$$

若將分子分母分別乘以不同之正整數，使掃描頻率比可以化為一正整數的情況下，則可得到一穩定不飄移之 Lissajous 掃描路徑。由於其掃描軌跡為斜向依序偏移，因此在影像訊號編碼之演算法較為複雜且不直觀[53,54]。

2-1.2 循序掃描

循序掃描軌跡主要是由微掃描面鏡的快軸進行共振態之簡協運動操作，慢軸進行非共振態之鋸齒波操作，兩者彼此相互配合所形成之掃描軌跡，如圖 1-4(a) 所示。循序掃描軌跡最大特色即是依序由畫面上至下，一系列一列一列的進行掃描，如此的軌跡適合常見之二維訊號編碼，其演算法相對於 Lissajous 掃描顯得簡單且直觀，但由於循序掃描之慢軸需進行非共振態之操作，因此其致動力要足以使元件達到大轉角之操作，此為採用循序掃描機制之一大考量。然而，不論是 Lissajous 掃描軌跡或循序掃描軌跡，掃描軌跡皆是往復式的來回掃描，因此會造成雷射光點於最大振幅之處速度最慢，最小振幅處速度最快，若以相同入射雷射亮度進行投影時，則可清楚地看到整體畫面外框亮度會明顯大於畫面中心亮度，因此不論何種掃描機制，通常都會將其雷射光點移動速度最慢處捨棄不用，如圖 1-4(b) 灰色區域所示，因此可以定義過度掃描常數 K_{os} (over scan factor)，其為可視區域

(visible region)與最大掃描區域(maximum scan region)之比值，可表示為

$$K_{os} = \frac{\text{visible region}}{\text{maximum scan region}} \quad (2-3)$$

並且根據水平簡協運動與垂直非共振運動之不同，可以分別定義水平方向之過度掃描常數 K_{os_h} ，通常介於 0.7 到 0.9 之間，而垂直方向之過度掃描常數 K_{os_v} ，通常介於 0.9 到 0.95 之間[55]。

仔細拆解循序掃描之驅動訊號，快軸驅動振幅與時間之關係如圖 2-1 所示，為標準的簡協運動，慢軸驅動振幅與時間之關係如圖 2-2 所示，近似為一鋸齒波，其中藍色線段於顯示影像，綠色虛線部分則是讓完成單一畫面之雷射掃描路徑，可以重新回到畫面之起始點(flyback)，接著進行下一個畫面之掃描。若將快軸與慢軸訊號同時繪製在二維平面上時，則可看到如圖 1-4(b)之狀態，雷射線段由畫面上方往下進行往復掃描，當畫面結束時則沿著綠色虛線回到畫面起始點進行下一個畫面掃描，如此重複一樣的過程，就能在屏幕上投影出圖片或動畫。

循序掃描最大特色為往復式的掃描，因此不論是順掃或逆掃之路徑都可以用於顯示影像，如圖 2-3 所示，此為雙向循序掃描(bidirectional raster scan)用於投影英文字母「A」之情況，依據循序掃描軌跡可定義出每一個畫素之位置，只要利用脈衝雷射在所對應之位置點亮即可顯示圖形。雙向循序掃描是以相當有效率之方式利用掃描軌跡於影像顯示，但仔細觀察每條軌跡彼此之間距，可發現畫面中心與畫面邊界之間距大小不同，如此會造成投影畫面之解析度降低，因此若要修正雙向循序掃描之軌跡路徑，則需針對慢軸驅動訊號做更細部的修正，以達到較均勻之掃描軌跡[56]。另外也有一種方法可提升掃描軌跡之均勻性，即是採用單向循序掃描(unidirectional raster scan)的方式，如圖 2-4 所示，僅使用奇數列或偶數列於顯示影像，如此一來每條用於顯示之掃描軌跡(藍色實線)則具有相同間距，但由圖中可明顯看到以相同的掃描路徑，可用之影像解析度則會減半，因此目前業界主要採用雙向循序掃描方式進行應用。

2-1.3 掃描機制比較

不論是 Lissajous 掃描或循序掃描由於其雷射路徑產生的方式不同，因此各具其優缺點，可以分別從控制編碼、畫面均勻性、操作頻率這幾點做討論。首先控制編碼的部分，循序掃描路徑是以簡單二維的方式排列，相較於 Lissajous 掃描路徑之斜向排列而言，其影像轉換之演算法則較為簡單。循序掃描是採用簡協運動與非共振運動兩者搭配而成，與 Lissajous 掃描之兩軸簡協運動相比，循序掃描之投影畫面具有較佳之均勻性。另外掃描機制本身也會直接影響到元件之操作頻率，例如要達到畫面更新頻率(frame rate)60Hz 之 VGA(640×480)影像解析度，使用 Lissajous 掃描其快軸頻率需 45238Hz，使用雙向循序掃描其快軸頻率只需 15750Hz 即可[53]，此意味著 Lissajous 掃描方式對於微掃描面鏡之規格需求較為嚴格，因此當影像解析度提升時，使用 Lissajous 掃描之微掃描面鏡則會越難設計。較高之結構操作頻率代表掃描軌跡使用效率較低，並且雷射脈衝時間需要更短，因此這些考量不論對於微掃描面鏡結構或雷射二極體而言，都是挑戰其性能之極限。

就上述之觀點，雖然循序掃描機制較佔優勢，但並不是完全沒有缺點，由於循序掃描機制需要有一軸進行非共振操作，無法像 Lissajous 掃描利用結構之品質因子將振幅放大，因此需要一個在非共振態能大轉角操作之微掃描面鏡，大幅增加了元件製作之困難性，雖然可以降低結構扭轉彈簧剛性來提升鏡面轉角，但過度使用此方法會造成元件共振頻率過低，使元件抗衝擊能力降低，在後端系統應用時則很容易損壞，所以要設計以循序掃描方式運作之微掃描面鏡，就必須藉由一些特殊的製程或是外在的磁鐵組裝才有辦法實現。雖然循序掃描機制仍具有一些設計上之難度，但相較於影像顯示機制之原理限制，目前產業界所設計之微掃描面鏡皆以循序掃描機制進行發展，因此以下章節將針對循序掃描規格進行介紹。

2-2 影像解析度

由定義一個畫素的大小可得到投影系統之光學解析度，如圖 2-5 所示，若以一具有圓形孔徑(aperture)之完美光學透鏡進行聚焦，由於繞射極限之關係，其聚

焦光點則會呈現以中心最亮之圓形圖形，此稱作為艾里圓盤(Airy disk)，往外則具有同心之圓形光環，因此整體圖形稱做艾里圖形(Airy pattern)，其整體光強度與半徑之關係近似於高斯分佈，且通常定義其半高寬(full width of half maximum, FWHM)處為一個畫素之大小，如圖 2-5 中藍色框線所標明之處。而微掃描面鏡在投影系統中之所扮演之角色與圓形孔徑相當，其功能同樣都是控制光學系統中進光量之大小，因此可依照相同方式進行解析度之計算。

在光學成像系統中，若要定義其影像解析度，可以透過瑞利極限(Rayleigh criterion)來計算，其基本原則為兩個相鄰之獨立光點彼此相互接近，在最小能分辨出兩個光點且還能解析之距離為其極限，如圖 2-6 所示，通常為第二光點強度(綠色框線)最強處位於第一光點(紅色框線)之第一暗紋處，此距離剛好就是艾利圓盤之半徑 R_A ，可表示為

$$R_A = \frac{1.22 f \lambda}{D} \quad (2-4)$$

其中 D 為圓形孔徑或微掃描面鏡之直徑， f 為透鏡之焦距或微掃描面鏡與屏幕之距離， λ 為入射光之波長。由於透鏡成像系統與微掃描面鏡之投影機制一樣，因此可以透過簡單之幾何關係，定義可解析之最小角度 $\Delta \theta_{resolution}$ 為

$$\Delta \theta_{resolution} \approx \frac{R_A}{f} = \frac{1.22 \lambda}{D} \quad (2-5)$$

假設微掃描面鏡的機械扭轉角度為 θ_{mech} ，由於光槓桿效應之關係，光學掃描角度 $\theta_{optical}$ 與機械掃描角度 θ_{mech} 之關係為

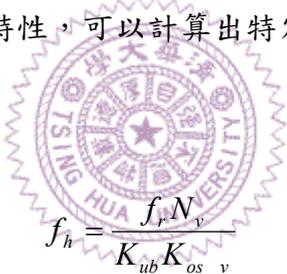
$$\theta_{optical} = 4\theta_{mech} \quad (2-6)$$

透過公式(2-5)與公式(2-6)之關係，可以計算出角度解析度 N

$$N = \frac{\theta_{optical}}{\Delta \theta_{resolution}} \approx \frac{4\theta_{mech} \cdot D}{1.22 \lambda} \propto \theta_{mech} \cdot D \quad (2-7)$$

由此可知，在固定入射光波長的情況下，當微掃描面鏡之鏡面越大，或其掃描角度越大，則能提供較佳之影像解析度，因此公式(2-7)為評斷微掃描面鏡特性之重要指標，同時也可藉此公式計算出特定解析度之微掃描面鏡設計規格。但此解析度是根據光學繞射極限所計算出來的，若元件在操作時產生鏡面變形或運動不穩定之情況，則會使此解析度降低。

針對使用循序掃描路徑之微掃描面鏡，要訂定其垂直軸向(慢軸)之結構共振頻率較為寬鬆，但其設計困難點在於要能在 60Hz 之操作頻率下達到足夠之掃描角度，水平軸向(快軸)之結構共振頻率則就相對嚴格，主要是因為此頻率會直接影響投影畫面之垂直解析度。常見之影像解析度規格如圖 2-7 所示，主要可以分為長寬比為 4:3 與 16:9 兩大類，配合上循序掃描軌跡可以計算出所對應之影像解析度，如圖 2-8 所示，灰色區域為掃描速度過慢而無法使用之區域，水平解析度主要由雷射脈衝閃爍快慢之速度來決定，垂直解析度則是由快軸與慢軸之操作頻率比值來決定，因此依照此特性，可以計算出特定解析度所需之水平操作頻率 f_h ，可表示為



$$f_h = \frac{f_r N_v}{K_{ub} K_{os_v}} \quad (2-8)$$

其中 f_r 為畫面更新頻率， N_v 為畫面垂直解析度， K_{ub} 為單向($K_{ub}=1$)或雙向($K_{ub}=2$)循序掃描方式， K_{os_v} 為垂直方向過度掃描常數。由公式(2-8)中也可觀察出若是使用雙向循序掃描方式，能使水平操作頻率降低兩倍，此點對於微掃描面鏡之結構設計而言極具優勢。

2-3 雷射脈衝時間與時脈頻率

如 2-2 節中所敘述，影像之水平解析度是由雷射脈衝閃爍快慢之速度來決定，然而礙於水平軸向本身的往復運動，因此在畫面中心與邊界處，所要顯示單一畫素之雷射脈衝時間則會有所不同，如圖 2-9 所示，可以利用水平可視範圍(藍色線段)之距離除以中心或邊界處之光點移動速度(綠色線段)即可得到所需雷射

脈衝時間，因此在畫面中心處所需之雷射脈衝時間 t_c 可表示為

$$t_c = \frac{K_{os_h}}{\pi f_h N_h} \quad (2-9)$$

其中 N_h 為畫面水平解析度， K_{os_h} 為水平方向過度掃描常數。在畫面邊界處所需之雷射脈衝時間 t_e 可表示為

$$t_e = \frac{K_{os_h}}{\pi f_h N_h \sqrt{1 - K_{os_h}^2}} \quad (2-10)$$

因此在訊號編碼時還需要針對此脈衝時間差異進行修正，以保持畫面各位置上之畫素大小一致。

另外針對循序掃描軌跡之垂直方向訊號作分析，如圖 2-10 所示，為了讓人眼能保持視覺暫留，通常會使畫面更新頻率為 60Hz，此即為垂直方向之驅動訊號頻率 f_v ，因此藉由一個畫格所需時間減去投影所需時間(藍色線段)，就可計算出雷射光點折返時間(綠色虛線) t_{ret} ，可表示為

$$\begin{aligned} t_{ret} &= \frac{1}{f_v} - \frac{N_v}{K_{ub} f_h} \\ &= \frac{1}{f_v} \left(1 - \frac{N_v f_v}{K_{ub} f_h} \right) \end{aligned} \quad (2-11)$$

由觀察公式(2-11)可得知，若能降低垂直訊號上之雷射光點折返時間，就能有效爭取投影所能使用之時間，如此一來僅需較低之水平掃描頻率 f_h 就可達到相同之影像解析度。

藉由公式(2-9)至公式(2-11)之計算，可更進一步推得整體系統之最低時脈頻率 f_{clock} 需求，可表示為

$$f_{clock} = \frac{1}{\min(t_c, t_e, t_{ret})} \quad (2-12)$$

此意味著系統不論是控制電路或雷射二極體，其反應頻率都要大於此時脈頻率，如此才能使系統運作正常，以 VGA(640x280)影像解析度為例，其系統時脈頻率至少需要 25.2MHz。

2-4 鏡面動態變形

介紹完微掃描面鏡相關光學與系統參數之設計考量之後，接著針對機械結構本身進行探討。機械結構之設計方式基本上是由內而外，也就是由鏡面本身開始設計，在決定好鏡面大小與所欲達到的掃描角度之後，進而與扭轉彈簧搭配以達到適合之結構共振頻率。鏡面大小之設計需要滿足光學解析度與雷射二極體光束聚焦大小(通常為 1mm 左右)的需求外，還需要特別考慮鏡面本身的動態變形(dynamic deformation)，其產生原因為當微掃描面鏡在高速轉動時，會因本身質量所造成之慣性分佈力使鏡面變形，其慣性力分佈如圖 2-11(a)所示，隨著半徑增加而越大，此微小的變形量稱為鏡面動態變形 δ 如圖 2-11(b)所示，可表示為

$$\delta = \frac{0.288\rho\theta_{mech}\omega^2 L^5}{Et_m^2} \quad (2-13)$$

其中 ρ 為鏡面之密度， θ_{mech} 為鏡面機械掃描角度， ω 操作時之角頻率， L 為垂直扭轉軸之半徑方向長度， E 為楊氏模數(Young's modulus)， t_m 為鏡面厚度[57]。由觀察公式(2-13)可找出影響鏡面動態變形之材料參數為密度與楊氏模數，若要動態變形量越小，則需 ρ/E 之比值越小，可發現微機電技術最常使用之單晶矽的 ρ/E 之比值最小，也就是為何目前製作微掃描面鏡的材料還是以單晶矽為主之原因。除此之外，鏡面也會因為扭轉彈簧所產生之反作用力造成變形，使得鏡面動態變形增加，因此扭轉彈簧與鏡面之連結方式也需特別考量。鏡面動態變形由於瑞利極限(Rayleigh criterion)之限制，為避免產生光學繞射需滿足

$$2\delta < \frac{\lambda}{5} \quad (2-14)$$

為了降低鏡面在高頻運動時所產生之動態變形，因此許多微掃描面鏡製作了剛性補強結構於鏡面背面，以提升鏡面剛性[58-59]。但公式(2-13)僅適用於基本矩形鏡面結構，若是要分析圓形或是其他具有肋補強結構之特殊鏡面形狀，以及考慮彈簧作用力所造成的鏡面變形，則需要藉由有限元素分析軟體才能推算出其動態變形。此外，掃描鏡面表面一般都會沉積一層金屬以提高鏡面反射率，通常為鋁，此金屬薄膜本身之殘餘應力會造成鏡面之預變形，因此在討論鏡面動態變形時也需考慮到本身預變形之狀況。

2-5 結構動態分析

當鏡面結構符合動態變形之設計規範後，就可著手進行扭轉彈簧之設計，以搭配出所需之結構扭轉共振頻率。典型之單軸微掃描面鏡可簡化成扭轉系統下之彈簧質量塊系統，其結構扭轉共振頻率 f_m 可以表示為

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_s}{I}} \quad (2-15)$$

其中 K_s 為等效彈簧剛性， I 為等效扭轉慣性矩。隨著元件結構設計之不同，所對應之彈簧剛性與扭轉慣性矩則會隨之改變，因此先以基本形式之微掃描面鏡結構進行討論，以矩形截面之扭轉彈簧配合上矩形鏡面與圓形鏡面，分別如圖 2-12 與圖 2-13 所示，並討論沿著 x 軸與 y 軸方向之等效質量、等效質量慣性矩(moment of inertia)與等效扭轉剛性，可以整理如表 2-1 所示[60-61]，其中 G 為結構之剪力模數(shear modulus)， a 為扭轉彈簧長邊之半， b 為扭轉彈簧短邊之半， L_f 為扭轉彈簧之長度， L_m 為沿著彈簧方向(y 軸)之鏡面大小，若鏡面為圓形時，則 $L_m = D$ 。當鏡面沿著 x 軸扭轉時，對於彈簧而言為標準之扭轉模態，但若當鏡面沿著 y 軸扭轉時，鏡面兩端之彈簧則呈現彎曲模態(bending mode)，此為一高階模態。若鏡面結構是由圓形與矩形之剛性補強結構所組成，則可以利用平行軸定理(parallel axis theorem)來進行修正計算

$$I' = I + M_m r^2 \quad (2-16)$$

其中 I' 為修正後之質量慣性矩， M_m 為結構之質量， r 為轉動軸心之偏移距離。利用公式(2-15)可以計算出單軸微掃描面鏡之共振頻率。

若結構為雙軸微掃描面鏡時，則需列出整個雙質量塊系統之運動方程式 (equation of motion)，才能完整描述鏡面與外環彼此之間的耦合行為。雙軸微掃描面鏡模型如圖 1-2 所示，針對快軸方向之外環轉動角度 θ_{fx} 與鏡面轉動角度 θ_{mx} 其矩陣形式之運動方程式可表示為

$$\begin{bmatrix} I_f & 0 \\ 0 & I_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_{fx} \\ \ddot{\theta}_{mx} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_f + C_{mf} & -C_{mf} \\ -C_{mf} & C_{mf} + C_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_{fx} \\ \dot{\theta}_{mx} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_f + K_m & -K_m \\ -K_m & K_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{fx} \\ \theta_{mx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_f \\ T_m \end{Bmatrix} \quad (2-17)$$

其中 I_f 與 I_m 分別為外環與鏡面之等效質量慣性矩， C_f 與 C_m 為外環與鏡面相對於靜止空氣之阻尼常數， C_{mf} 為鏡面相對於外環之阻尼常數， K_f 與 K_m 分別為外環與鏡面彈簧之等效扭轉剛性， T_f 與 T_m 分別為施加於外環與鏡面上之力矩。為簡化表示，則將公式(2-17)中之各項分別定義為

$$\begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{12} & I_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{12} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{12} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} \quad (2-18)$$

假設外界施加力矩 $T_j(t)$ 與所產生之角位移 $\theta_j(t)$ 分別為

$$T_j(t) = T_{j0} e^{i\omega t}, \quad j = 1, 2 \quad (2-19)$$

$$\theta_j(t) = \theta_{j0} e^{i\omega t}, \quad j = 1, 2 \quad (2-20)$$

將公式(2-19)與公式(2-20)代入公式(2-18)中，則可推導出

$$\begin{bmatrix} (-\omega^2 I_{11} + i\omega C_{11} + K_{11}) & (-\omega^2 I_{12} + i\omega C_{12} + K_{12}) \\ (-\omega^2 I_{12} + i\omega C_{12} + K_{12}) & (-\omega^2 I_{22} + i\omega C_{22} + K_{22}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{10} \\ \theta_{20} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_{10} \\ T_{20} \end{Bmatrix} \quad (2-21)$$

在此定義機械阻抗 (mechanical impedance) $Z(i\omega)$ 為

$$Z_{rs}(i\omega) = -\omega^2 I_{rs} + i\omega C_{rs} + K_{rs}, \quad r, s = 1, 2 \quad (2-22)$$

因此公式(2-21)可表示為

$$[Z(i\omega)]\vec{\theta} = \vec{T}_0 \quad (2-23)$$

其中

$$[Z(i\omega)] = \begin{bmatrix} Z_{11}(i\omega) & Z_{12}(i\omega) \\ Z_{12}(i\omega) & Z_{22}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

$$\vec{\theta} = \begin{Bmatrix} \theta_{10} \\ \theta_{20} \end{Bmatrix} \quad (2-25)$$

$$\vec{T}_0 = \begin{Bmatrix} T_{10} \\ T_{20} \end{Bmatrix} \quad (2-26)$$

藉由上述推導，以操作頻率為變數(frequency domain)之鏡面與外環轉動的角度為

$$\vec{\theta} = [Z(i\omega)]^{-1} \vec{T}_0 \quad (2-27)$$

若要得到以時間為變數(time domain)之鏡面與外環轉動角度，則將公式(2-27)代入公式(2-20)即可。因此利用公式(2-27)繪製出此微掃描面鏡之頻率響應圖，如圖 2-14 所示，藉此除了可得知此系統之共振頻率與模態之外，還可了解鏡面與外環間同相位(in-phase)與反相位(out-of-phase)之關係，另外也可使用有限元素分析軟體直接針對特殊形狀設計之微掃描面鏡實體模型進行分析，在圖 2-14 中第一個峰值代表鏡面與外環同相位之扭轉，第二的峰值則代表反相位之扭轉。此外若針對結構本身處於無阻尼且無外力(undamped free vibration)之狀況下，則可利用特徵值問題(eigenvalue problem)直接求解，可得到無阻尼狀況下之自然頻率(natural frequency)與其對應之模態(mode shape)[62]。

2-6 結構破壞應力

微掃描面鏡是一種大位移之扭轉致動器，當操作角度過大，產生之應力超過其材料降伏強度(yield strength)時，結構則產生破壞，如圖 2-15(a)所示，因此在設計結構時需特別針對所欲達到的操作角度進行最大應力之分析，一般針對矩形截面之扭轉彈簧，當 $a > b$ 時，其最大應力 τ_{max} 可表示為[63]

$$\tau_{max} = \frac{3K_s \theta_{mech}}{8ab^2} \left(1 + 0.6095\left(\frac{b}{a}\right) + 0.8865\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1.8023\left(\frac{b}{a}\right)^3 + 0.91\left(\frac{b}{a}\right)^4 \right) \quad (2-28)$$

且應力最大值則會發生在長邊之中心，如圖 2-15(b)所示。在考慮安全係數之狀況下，以單晶矽為結構材料之微掃描面鏡最大降伏強度(yield strength)通常設定為 1GPa，但單晶矽本身為脆性材料，若更進一步考慮矽晶片非等向性蝕刻所造成之應力集中現象，其破壞張應力約為 200MPa~300MPa[64-65]。藉由公式(2-28)可得知扭轉彈簧產生之最大應力直接與機械掃描角度和彈簧幾何尺寸有關，因此可以利用調變彈簧幾何尺寸來有效降低其最大應力，基本上當扭轉彈簧之截面近似正方形時，能達到最小之扭轉應力值。

2-7 小結

本章節介紹了微掃描面鏡之設計考量，從微掃描面鏡之掃描軌跡切入，接著了解設計機械結構之考量與依據，因此根據本章節之公式推導，可針對現有之影像顯示格式計算並定義其規格，整理如表 2-2 所示，主要針對光學、機械、致動力三大部分討論，本章節已對於光學與機械特性需求有詳細之介紹，而對於致動力之需求為能達到非共振操作為目標，期望能以最小之驅動功率達到最大之致動力。更進一步針對本章節所介紹各種微掃描面鏡設計規格與設計參數進行比較，可整理如表 2-3 所示，可觀察到並無任何的獨立參數位於各項設計規格中，此意味著必須依設計參數之重要性，先行固定某些參數，接著才有辦法決定出其他參數之設計值。除此之外，為了針對各種不同應用需求所製作之微掃描面鏡進行比較，假設以循序掃描為例，且入射光波長相同，依照所需之解析度可繪製出圖

2-16，水平方向為微掃描面鏡操作頻率 f_h ，垂直軸向為光學掃描角與鏡面之乘積 $\theta_{optical}D$ ，因此可以將表 2-2 中不同顯示規格所適用之範圍可繪製於圖 2-16 中，越往右上角代表微掃描面鏡規格越嚴格。此外，還可將一維微掃描面鏡之需求規格範圍同樣繪製於圖 2-16 中，以解析度 300dpi 與畫面更新頻率 500Hz 之條碼器為例，可繪製出圖中藍色區域；另外也可以解析度 1200dpi 與列印速度 40pages/min 之雷射印表機為例，可繪製出圖中橘黃色區域，此時微掃描面鏡之操作頻率則會直接影響更新頻率或列印速度，因此根據此圖可針對不同應用之需求，設計出符合規格之微掃描面鏡。本論文將在後續章節有針對電磁式微掃描面鏡進行設計，並以增加致動力矩與改善元件運動穩定性為主要設計目標。



表 2-1 微掃描面鏡不同模態之等效質量、等效質量慣性矩與彈簧剛性

項目 公式	等效質量慣性矩		等效扭轉剛性
	方形鏡面	圓形鏡面	
沿 x 軸	$I_m = \frac{M_m}{12}(D^2 + t_m^2)$	$I_m = \frac{M_m}{12}\left(\frac{3}{4}D^2 + t_m^2\right)$	$K_s = \frac{2Gab^3(5.33 - 3.36\frac{b}{a}(1 - \frac{b^4}{12a^4}))}{L_f}$ 此處 a>b
沿 y 軸	$I_m = \frac{M_m}{12}(L_m^2 + t_m^2)$	$I_m = \frac{M_m}{12}\left(\frac{3}{4}D^2 + t_m^2\right)$	$K_s = \frac{4Eab^3(2 + 6(1 + \frac{L_m}{L_f})^2)}{3L_f}$ 此處 a 為彈簧半寬，b 為彈簧半高
等效質量	$M_m = \rho L_m D t_m$	$M_m = \frac{\pi}{4} \rho D^2 t_m$	

表 2-2 微掃描面鏡之相關設計規格

設計規格		Symbol	Unit	VGA	SVGA	XGA	SXGA	WVGA
Optical requirements	Frame rate (raster scan)	f_v	Hz	60	60	60	60	60
	Horizontal scan pixel number	N_h	-	640	800	1024	1280	854
	Vertical scan pixel number (Number of lines)	N_v	-	480	600	768	1024	480
	Horizontal scan frequency	f_h	Hz	16000	20000	25600	34133	16000
	Fraction of the scan line length used for writing	K_{os}	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	Maximum retrace timing allow for vertical scanner	t_{ret}	msec	1.43	1.04	0.99	1.61	1.67
	Pixel-time at the center for horizontal scan line	t_c	nsec	28.4	18.7	11.4	6.6	21.0
	Pixel-time at the edge for horizontal scan line	t_e	nsec	65.2	42.8	26.2	15.1	48.1
	Maximum pixel clock frequency	f_{clock}	MHz	35.2	53.6	87.6	151.9	47.7
	Optical scan angle \times mirror size	$\theta_{optical} D$	deg-mm	30.00	37.48	48.00	60.00	39.36
Mechanic	Dynamic deformation	δ	nm	< $\lambda/10$				
	Maximum stress	τ_{max}	MPa	<200MPa				
	Reflectivity	-	-	>85% (635~780nm)				
Force	Driving force	-	-	Achieve required scan angle w/o resonance				
	Driving voltage	-	V	As low as possible				
	Driving current	-	mA	As low as possible				
	Power consumption	-	W	As low as possible				

表 2-3 設計規格與設計參數之關係表

設計規格 \ 設計參數	θ	D	t_m	a, b	L_f	l	ρ, E, G
光學解析度	✓	✓				✓	
共振頻率		✓	✓	✓	✓		✓
鏡面動態變形	✓	✓	✓			✓	✓
扭轉彈簧最大應力	✓			✓	✓		✓
晶片大小		✓			✓		

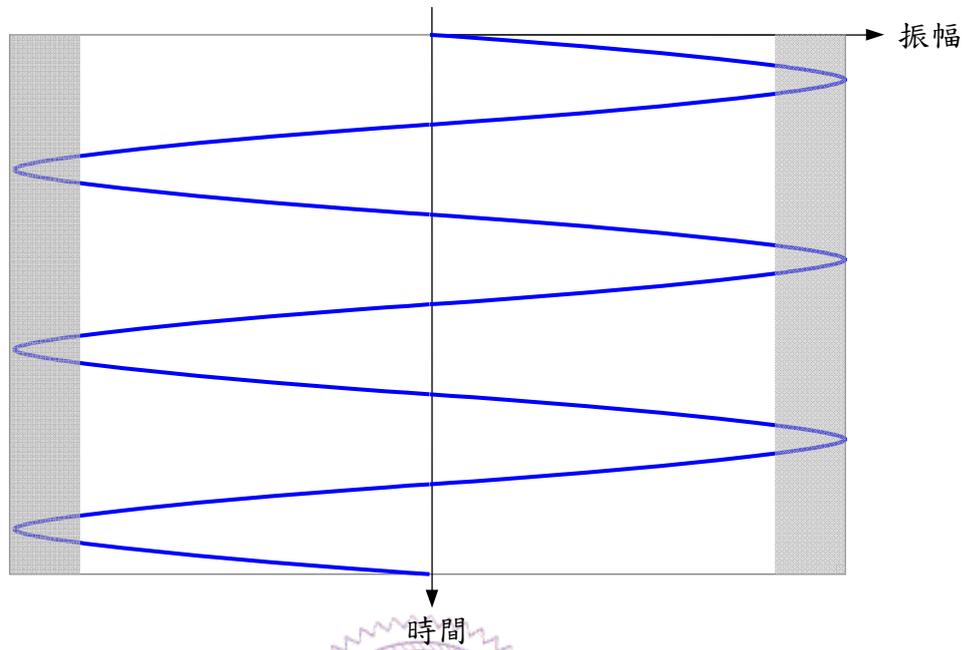


圖2-1 循序掃描快軸驅動訊號

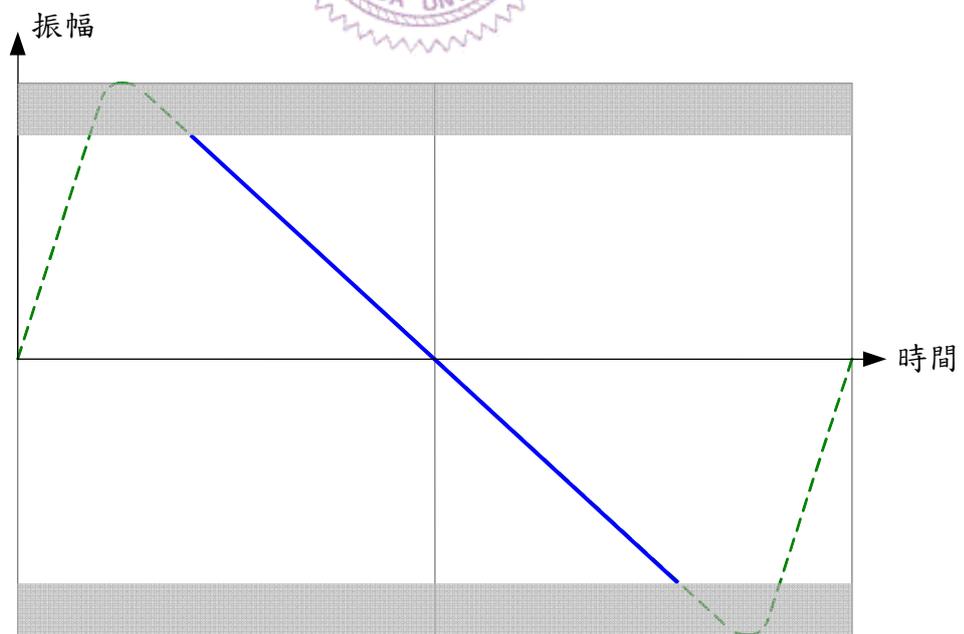


圖2-2 循序掃描慢軸驅動訊號

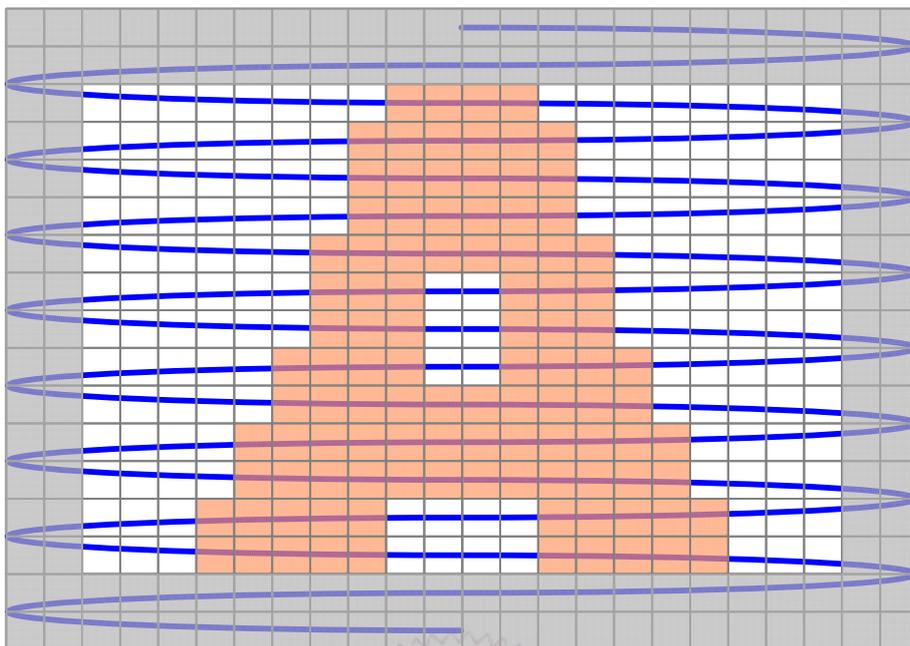


圖2-3 雙向循序掃描軌跡

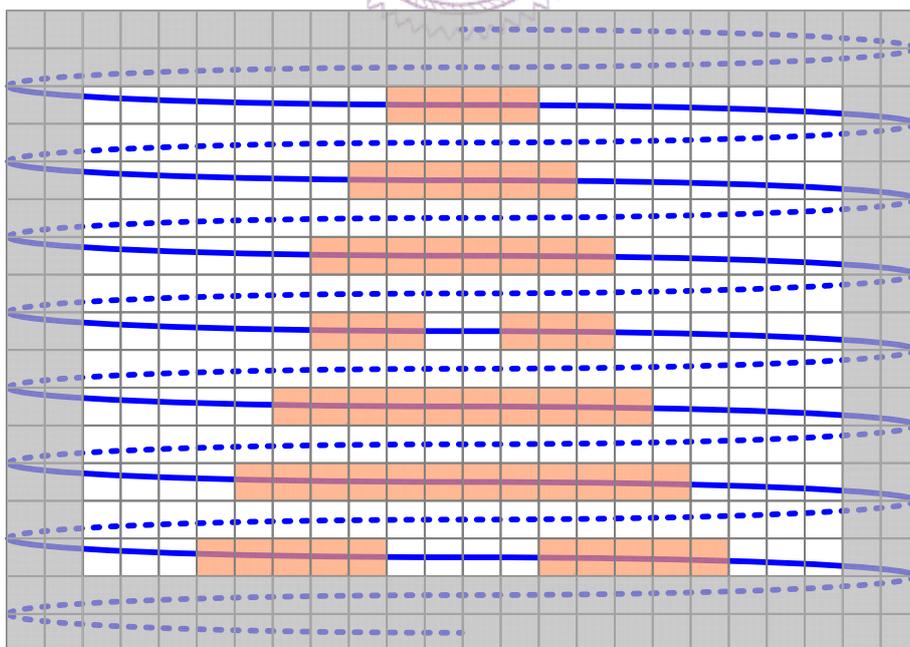


圖2-4 單向循序掃描軌跡

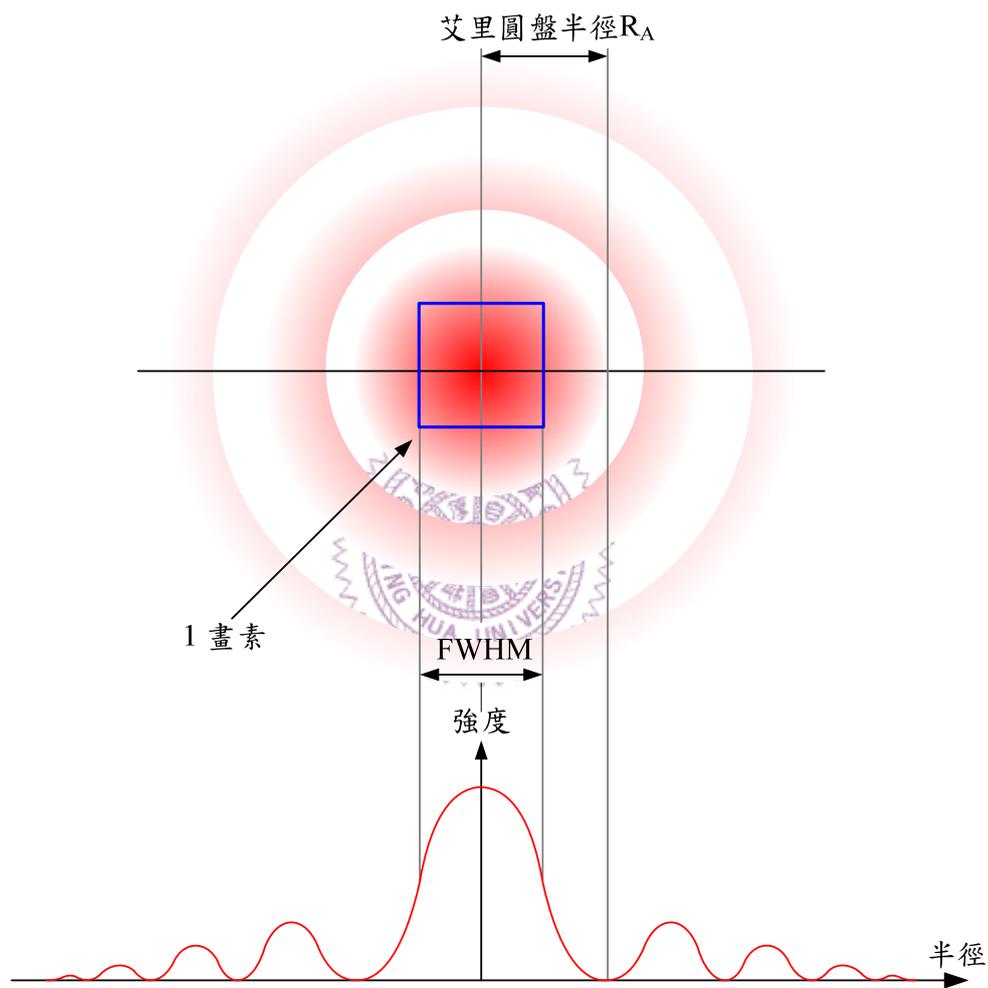


圖2-5 單一畫素大小定義方式

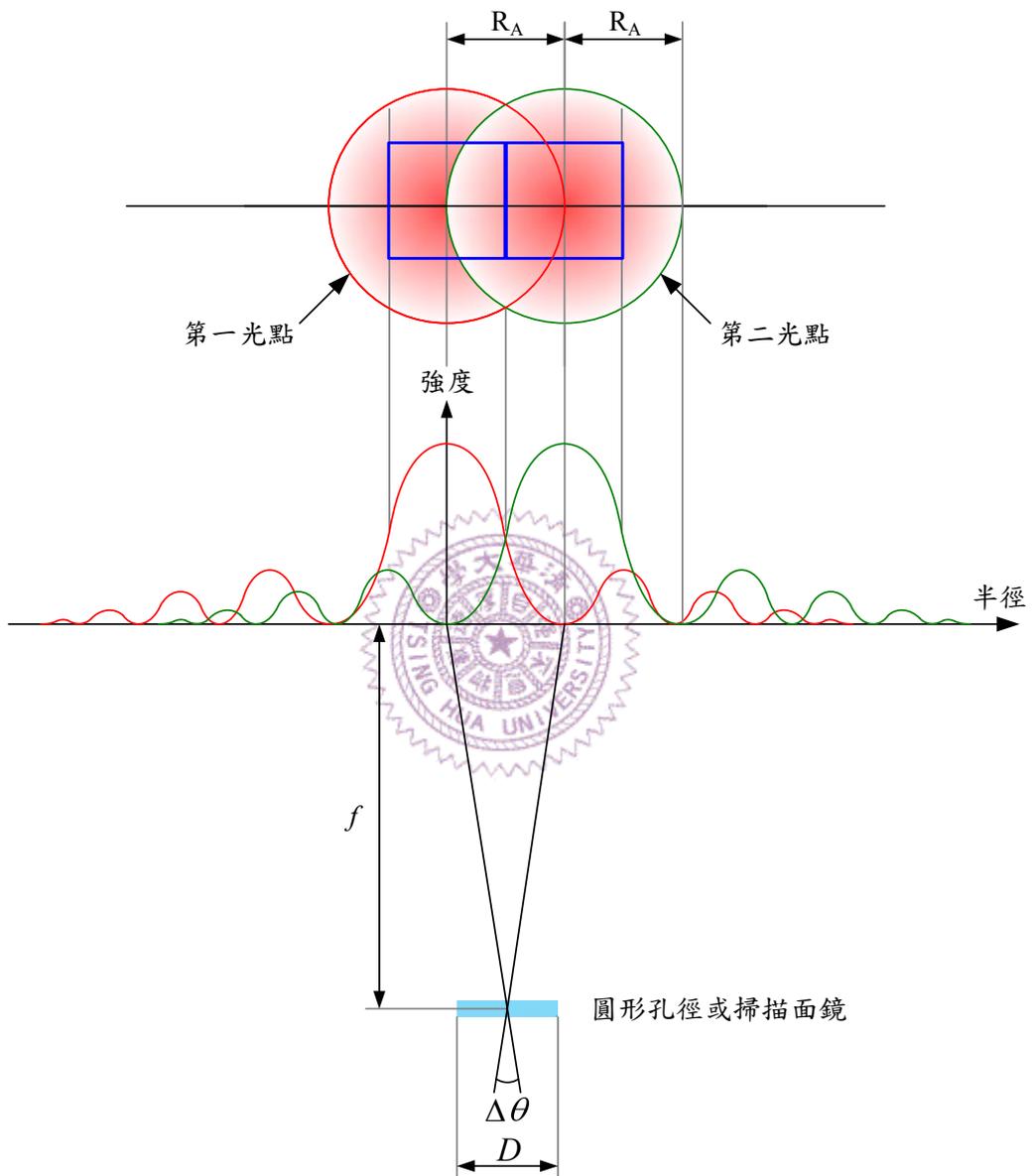


圖2-6 計算影像解析度之模型

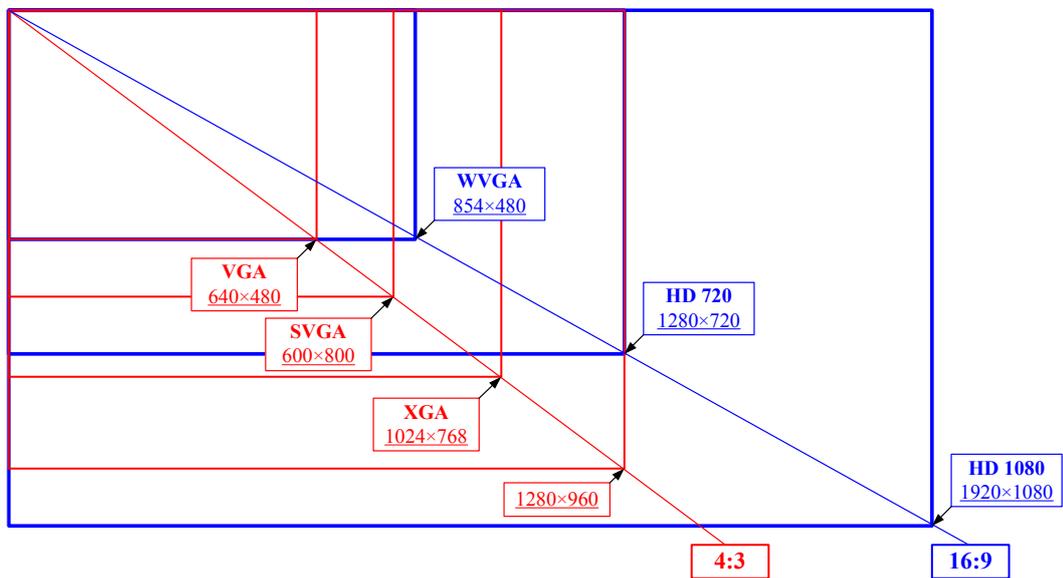


圖2-7 影像解析度對照圖

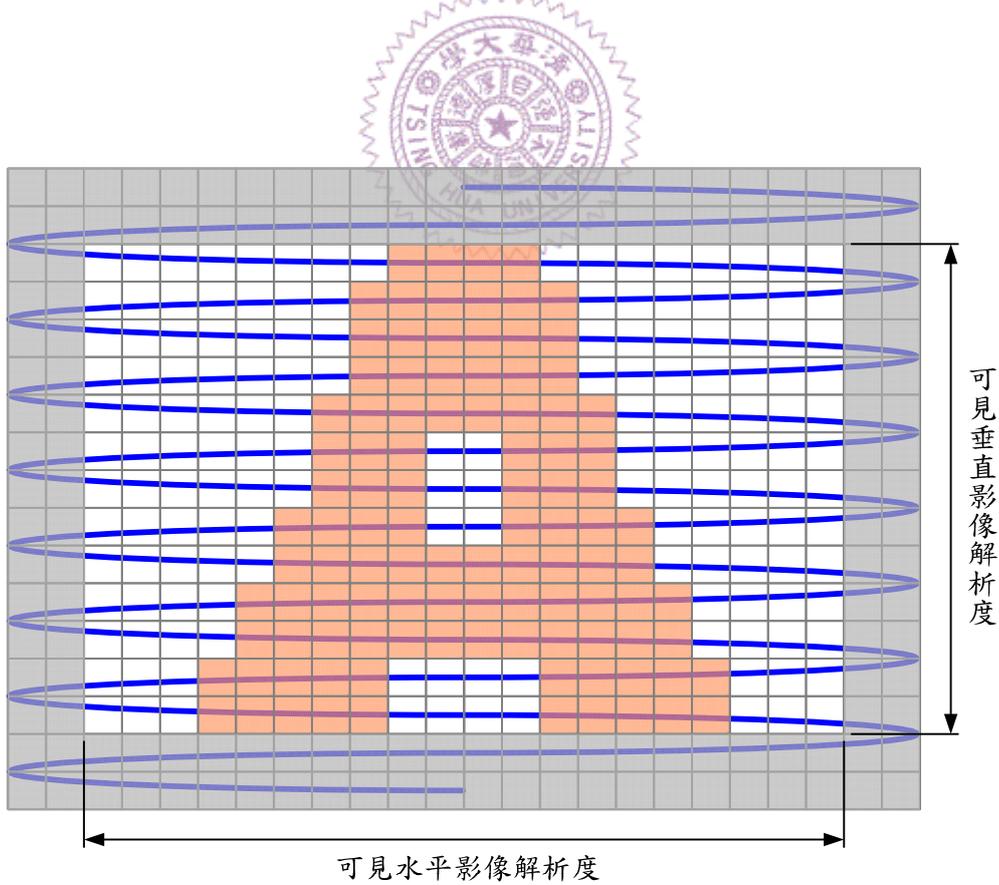


圖2-8 循序掃描之影像解析度計算方式

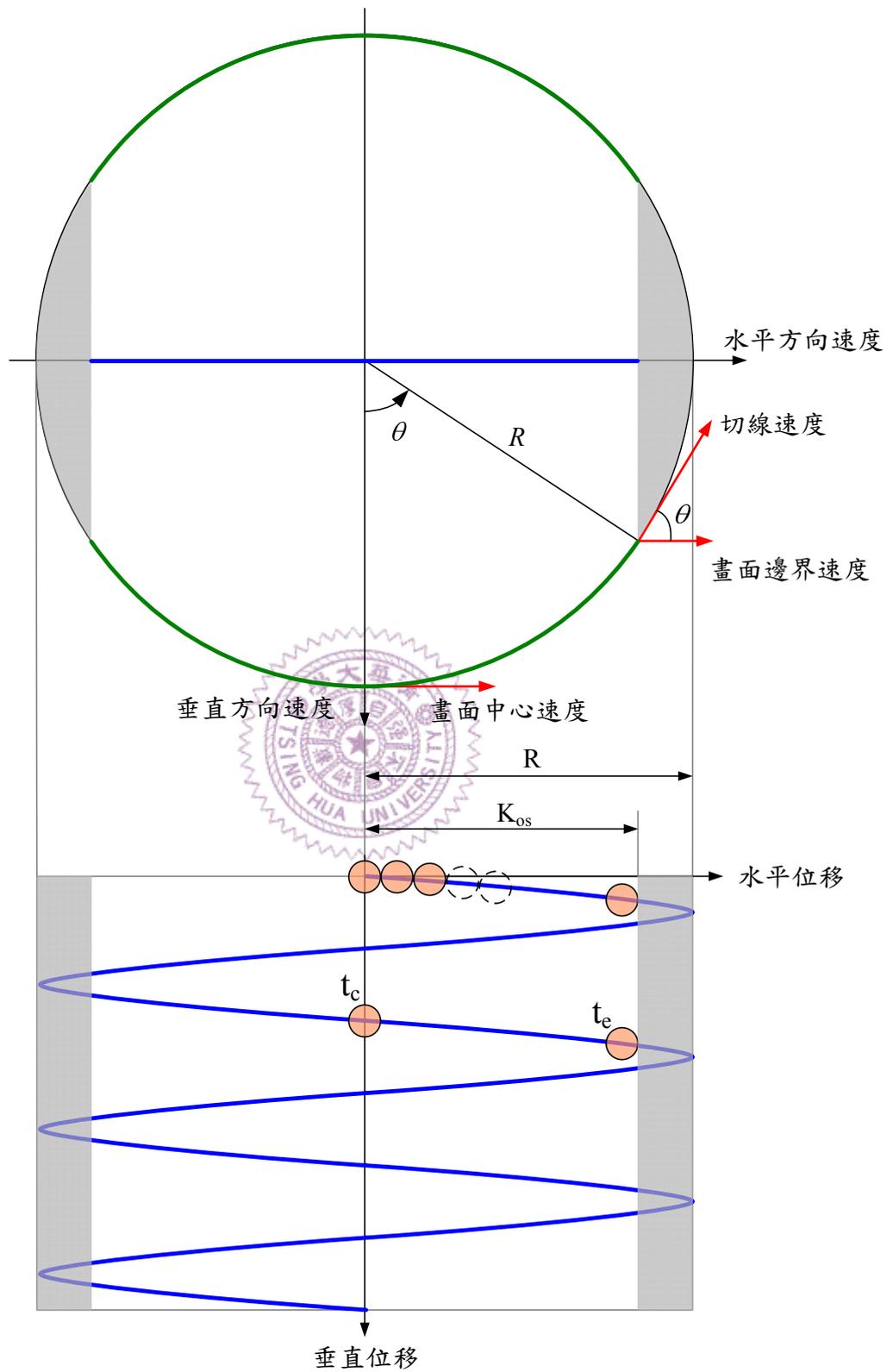


圖2-9 不同位置之雷射脈衝時間

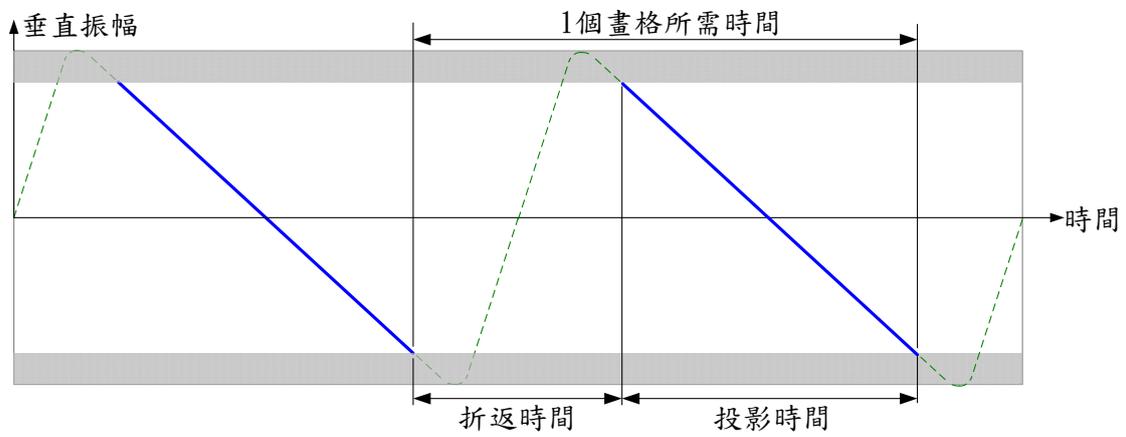


圖2-10 雷射路徑折返所需時間

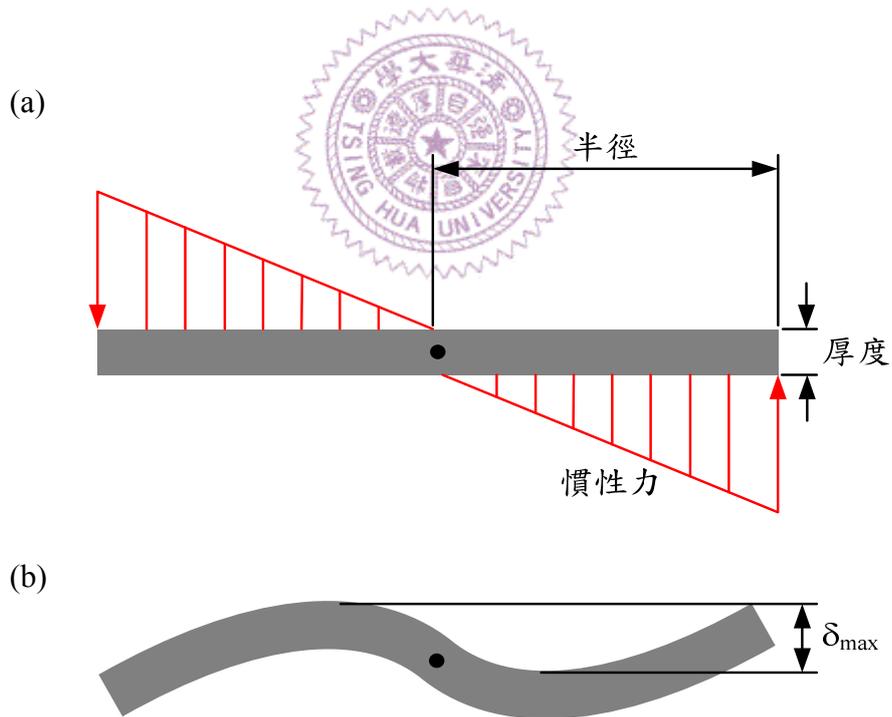


圖2-11 鏡面之動態變形模型

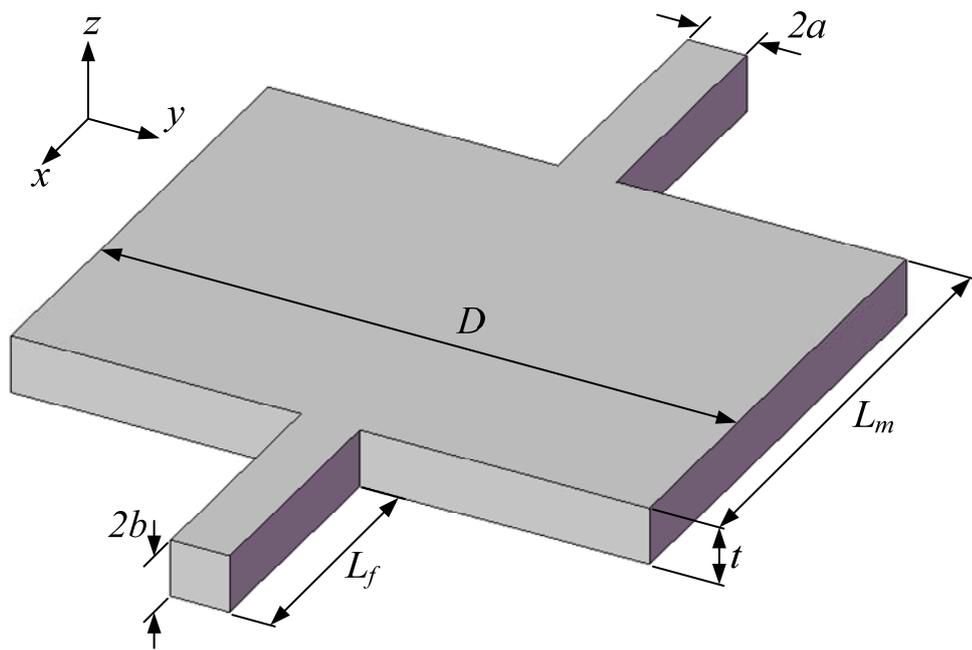


圖2-12 單軸矩形鏡面微掃描面鏡模型

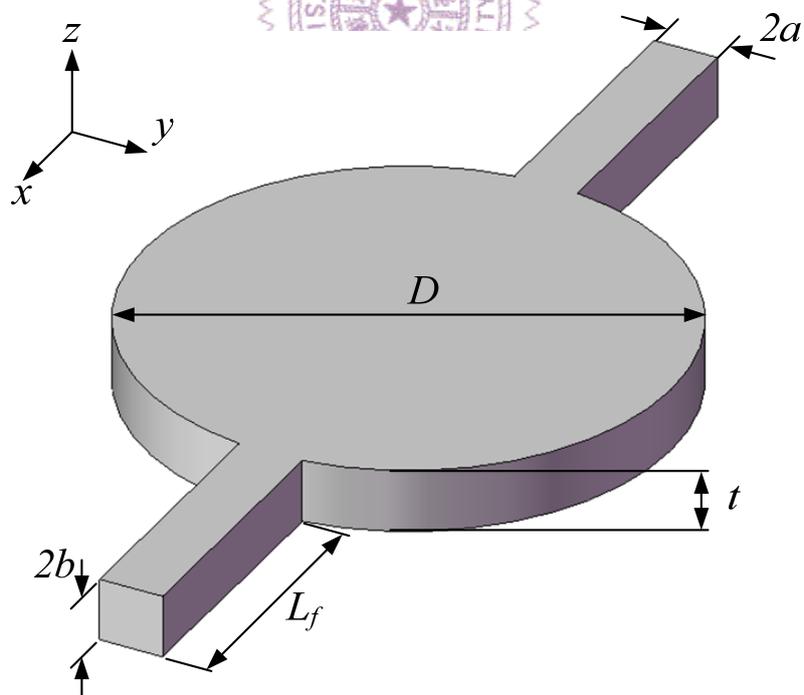


圖2-13 單軸圓形鏡面微掃描面鏡模型

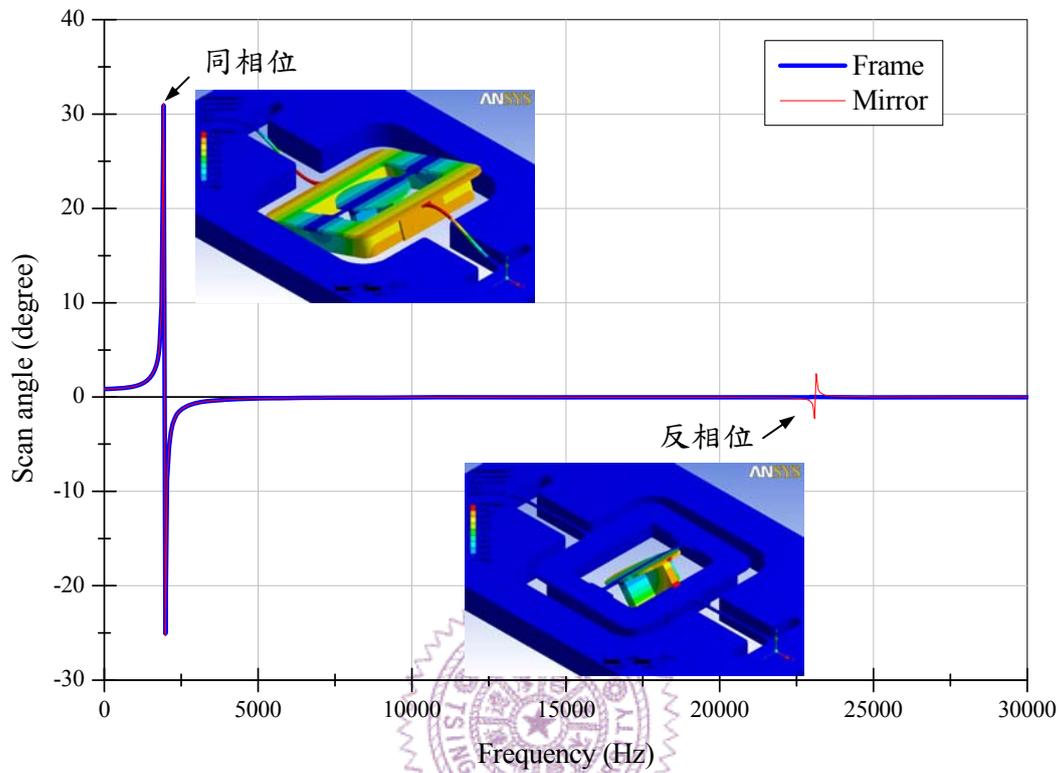


圖2-14 頻率響應圖

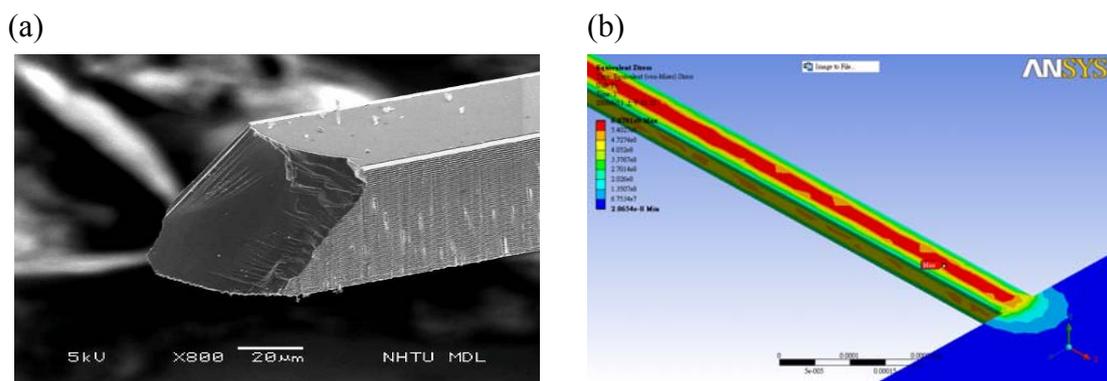


圖2-15 扭轉彈簧之應力分析

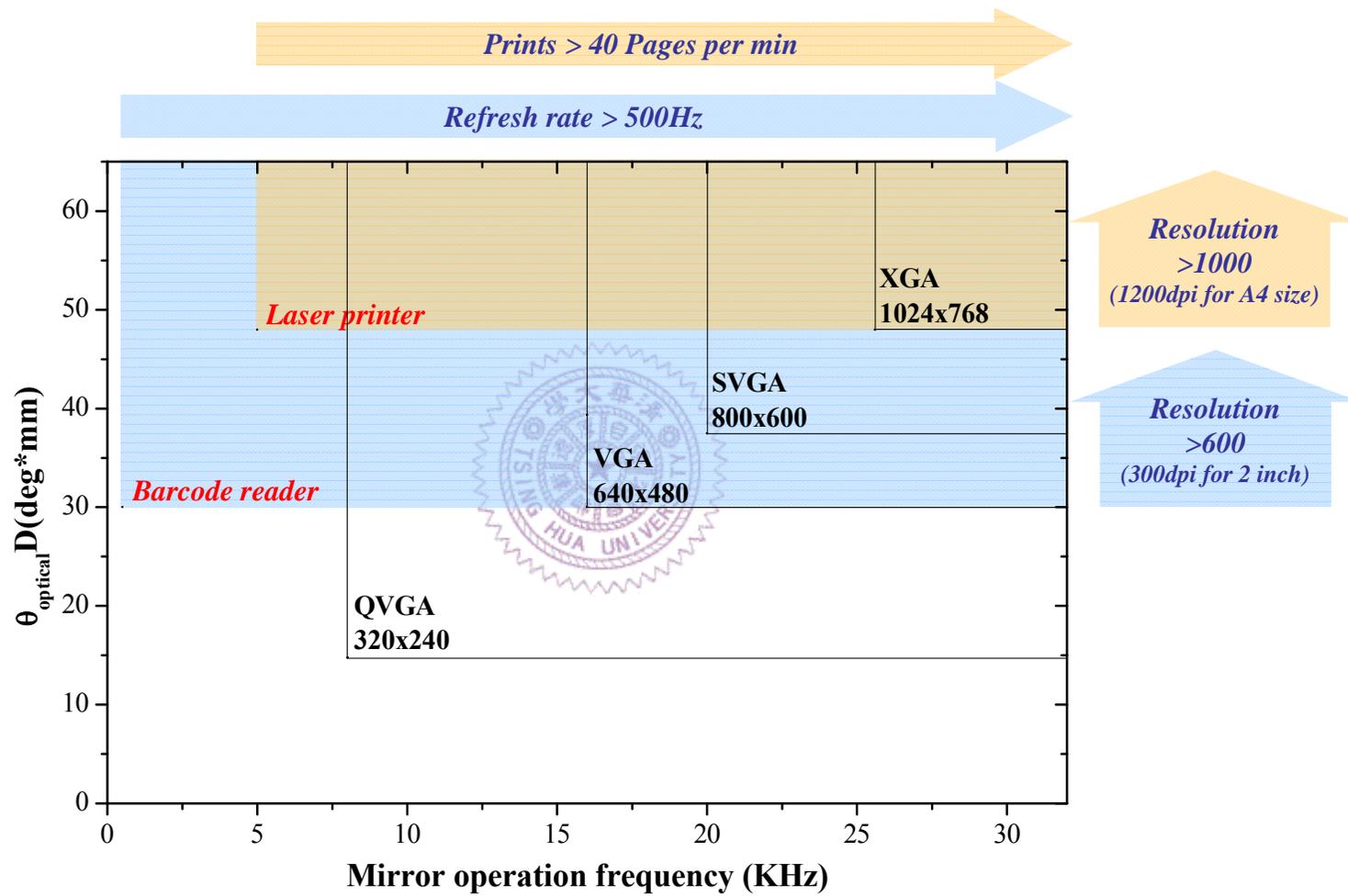


圖2-16 微掃描面鏡相關應用之規格比較圖

第3章 雙面電鍍之微掃描面鏡設計

本章節主旨在實現雙面電鍍之微掃描面鏡設計，進而產生靜磁力驅動元件，主要是利用雙面電鍍細長磁性材料的技術來實現增強扭轉力矩之目的，本技術在設計方面主要有兩個特色：(1)在相同的外環結構上將磁性材料定義為高長寬比的細長圖形，用以增加本身的磁化強度，(2)利用在元件層背面電鍍的技術增加磁性材料的體積。本技術也建立了選擇性雙面電鍍製程技術來實現此設計，製程方面主要有兩個特色：(1)利用晶片的基板層當作遮蔽擋罩來定義元件層背面之電鍍起始層的形狀，(2)利用晶片的元件層來當作電鍍時的陰極板，以實現雙面選擇性電鍍的概念。量測結果成功驗證此雙面電鍍微掃描面鏡可以有效增加其致動力矩。在應用方面，雙軸微掃描面鏡可利用此技術實現，並且投影出 Lissajous 掃描圖形。

3-1 前言

由於微掃描面鏡之小體積與低消耗功率特色，已被廣泛用於改善各種光學系統，並且利用微機電系統技術批量製造之特色製作微掃描面鏡，使其未來的發展極具潛力。早期微掃描面鏡是利用面型微加工技術製造，通常都需要一些附加的機構、致動器與自組裝技術來達到鏡面掃描時所需之運動空間，此外，利用薄膜製作之鏡面當在高速運動時，因其剛性不足因此會產生鏡面動態變形，為改善此缺點，並隨著微機電系統技術之發展，目前以廣泛應用 SOI 晶片製作微掃描面鏡，主要是因後續製程簡單且本身具有單晶矽之優異機械特性，且鏡面之剛性與平坦度也可大幅提升。

目前以 SOI 晶片製作之微掃描面鏡主要以靜電力與電磁力兩種致動力為主，靜電力驅動具有低消耗功率之特色，但本身會因鏡面大角度時運動不穩定產生吸附效應，且製作雙軸微掃描面鏡時，需要特殊製程技術來實現電性絕緣[66]與垂直梳狀器[67]之製作。另外一類致動力為電磁力，尤其勞倫茲力是目前最受歡迎之電磁力驅動方式，其特色為大出力，使得鏡面可以在非共振之狀態下達到較大之掃描角度，但是製程上則需要製作絕緣層與電流繞線[68]，此外操作時伴隨而

生的焦爾熱也會影響到元件之操作特性[69]，為了避免以上提及之缺點，因此靜磁力也逐漸被使用於微掃描面鏡之驅動上[47, 50]，靜磁力可利用沉積於元件上之磁性薄膜受外部磁場感應產生[45]，可以避免製作複雜之絕緣層與電流繞線，使得製程相對簡單，但磁性薄膜的厚度通常有限，因此也有研究團對利用組裝之方式直接將永久磁鐵黏附於鏡面背面[70]，以提供較大的致動力，但不論是何種方式所製作之靜磁式微掃描面鏡，通常都需要線圈或永久磁鐵於晶片外部組裝，因此若要在不增加外部封裝體積之狀況下，對於增加驅動力與掃描角度仍具有很大的挑戰。

本章節提出雙面電鍍之微掃描面鏡設計，此微掃描面鏡利用靜磁力驅動，並且將元件上之磁性薄膜定義為細長圖形以增加磁化強度，另外更進一步利用雙面電鍍的方式增加鐵磁性材料之沉積體積，因此微掃描面鏡上之靜磁力能被有效增加，其掃描角度也會隨之增加。本章節同時建立了選擇性雙面電鍍製程技術，並且以測試結果驗證致動力矩增加效果。



3-2 元件設計

首先針對靜磁力致動原理進行理論分析與推導，並對本力矩增強技術在設計方面的兩大特色：(1)高長寬比之磁性材料圖形設計概念，(2)選擇性雙面電鍍技術進行詳細的討論，以了解此設計概念與實現方法。

3-2.1 靜磁力致動原理

當鐵磁性材料處於一外加磁場環境下時，本身會被感應而磁化，如圖 3-1(a) 所示，在材料端點所感應出的靜磁力可以表示為

$$\begin{aligned} F_N &= MA_{mag} H_{ext} \\ F_S &= -MA_{mag} H_{ext} \end{aligned} \quad (3-1)$$

其中 F_N 與 F_S 為磁性材料兩端所感應出的靜磁力，並且大小相等方向相反， M 為磁化量， A_{mag} 為磁性材料的截面積， H_{ext} 為外加磁場強度[44-45]。磁化量為一種

非等向性的參數，跟材料本身與幾何尺寸有關，也會因材料製作的時候，隨晶格排列或本身內應力之作用造成材料的非等向性，但影響磁化量強度最主要的原因還是磁性材料的幾何尺寸，以及受外界磁場作用下所造成的磁區重新排列的影響。磁化量可以表示為

$$M \approx \min \left[\frac{\mu_0 H_{ext} \cos(\gamma - \phi_m - \theta)}{(N_l^2 \cos^2 \phi_m + N_t^2 \sin^2 \phi_m)^{1/2}}, M_s \right] \quad (3-2)$$

其中 μ_0 為真空中的導磁常數(permeability)，通常可定義為 $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)， γ 為外加磁場與初始位置的夾角， ϕ_m 為磁化量方向與易軸(easy axis)的夾角， M_s 為材料本身的飽和磁化量。此外 N_l 與 N_t 分別為沿著長度方向與厚度方向的形狀異向常數(shape-anisotropy constant)。對矩形的磁性材料而言，長軸方向的形狀異向性通常會最小，因此沿著長軸的方向磁化量會有最大值[45]。

本研究利用靜磁力致動微掃描面鏡，其架構側視圖如圖 3-1(b)所示，施加電流於驅動線圈上產生磁場 H_{ext} 於微掃描面鏡上，會產生靜磁力矩 T 於此微掃描面鏡上，可表示為



$$T = V_{mag} \cdot M \times H_{ext} \quad (3-3)$$

其中 V_{mag} 為鐵磁性材料的體積。微掃描面鏡主要由扭轉彈簧所支撐，若其剛性為 K_s ，則可產生的角位移為 θ ，可表示為

$$\theta = T/K_s \quad (3-4)$$

觀察公式(3-3)中各項參數之關係，本研究提出利用增加鐵磁性材料體積 V_{mag} 與磁化量 M 的方式，來達到力矩增強的目的。

3-2.2 高長寬比之磁性材料圖形

本研究將此力矩增強設計實現於 SOI 晶片所製作出的微掃描面鏡上，其 SOI 晶片的元件層、內埋二氧化矽層(buried oxide layer)與基板層的厚度分別為

40 μm 、2 μm 與 370 μm ，其元件架構如圖 3-2 所示。圖 3-2(a)為此微掃描面鏡的正面示意圖，是由 SOI 晶片的元件層所製作而成，主要由鏡面、扭轉彈簧與支撐外環所組成，鏡面的直徑為 1250 μm ，慢軸扭轉彈簧尺寸為 1800 μm ×41 μm ，快軸扭轉彈簧尺寸為 200 μm ×50 μm ，支撐外環的內部尺寸為 1490 μm ×1956 μm ，且寬度為 500 μm 。本研究以電鍍鎳的方式沉積磁性材料於支撐外環上，配合上外加磁場產生靜磁力，由圖 3-2(a)中可看到支撐外環上的鎳薄膜被定義為細長形狀，進而能利用磁性材料形狀異向性的特性，於長軸方向提升磁化量的強度來增加致動力矩。為了驗證此特性，本研究設計了三種不同的電鍍鎳圖形於支撐外環上，如圖 3-3 所示。圖 3-3(a)為支撐外環上被完整覆蓋填滿了電鍍鎳薄膜，稱為填滿圖形設計(full-pattern design)，此種設計也為文獻中最常見的傳統設計[50]。圖 3-3(b)為與慢軸扭轉彈簧成 45 度的斜向圖形設計(tilt-pattern design)，圖 3-3(c) 為與慢軸扭轉彈簧成 90 度垂直圖形設計(vertical-pattern design)，本研究將會於後續章節討論在相同的磁場分佈下，不同圖形設計彼此間磁化強度的差異，以驗證可利用細長的磁性材料圖形來增加磁化量強度。

3-2.3 選擇性雙面電鍍製程技術

圖 3-2(b)為此微掃描面鏡的背面示意圖，可利用 SOI 晶片基板層所製作出的肋補強結構來加強鏡面與支撐外環的結構剛性，除此之外，還可利用選擇性電鍍鎳的技術，在鏡面與支撐外環的背面沉積磁性材料，來達到增加磁性材料體積的目的，進而增強致動力矩。一般而言，為了避免雙層結構所產生的殘餘應力變形與熱膨脹係數的不匹配，因此在扭轉彈簧的正背面會避免鎳薄膜的沉積，並且也能避免雙層結構因操作時，所產生的交變應力造成脫層與疲勞的問題。

本研究更進一步的建立新的製程方法於 SOI 晶片實現上選擇性雙面電鍍的設計概念，如圖 3-4 與圖 3-5 所示。圖 3-4 為定義電鍍起始層之方法示意圖，當 SOI 晶片定義完正面電鍍起始層圖形與背面基板層結構後，利用基板層本身當作背面沉積電鍍起始層的遮蔽擋罩(shadow mask)，以定義其圖形，如圖 3-4(a)所示。隨後，可利用蝕刻液對於內埋二氧化矽層的底切作用(undercut)將矽遮蔽擋罩懸浮，如圖 3-4(b)所示。一般而言，要在 SOI 晶片的元件層背面定義圖形相當困難，主要因為有基板層所形成數百微米深的凹槽，通常需要相當複雜的製程或

昂貴的設備才可克服，如噴塗光阻(spray coating)[71]的技術，因此藉由此製程技術可輕易在元件層背面定義電鍍起始層。

為實現選擇性雙面電鍍的製程，本研究選用低阻值的 SOI 晶片元件層當作電鍍製程時的陰極板，並且先針對其阻值特性作量測，如圖 3-5(a)所示，利用探針量測不同介面的阻值，量測結果顯示元件層上無沉積鉻/金電鍍起始層處之阻值為 $2.23\text{M}\Omega$ ，有沉積鉻/金電鍍起始層處之阻值為 $50\text{k}\Omega$ ，造成此差異的主要原因為金半接觸(metal-semiconductor contact)之特性所造成，由於在沉積鉻/金電鍍起始層後其電阻值衰減到原來的 2.2%，因此本研究可利用此阻值差異達到選擇性電鍍的目的。圖 3-5(b)為選擇性雙面電鍍的架構示意圖，利用元件層當作陰極板與外部鎳板當作陽極互相搭配，由於元件層上不同介面處的電阻值差異，因此主要的電流會分佈於鉻/金介面處，只要選擇適當的電流密度大小(約 0.02ASD)，即可完成選擇性的雙面電鍍，如圖 3-5(c)所示。

3-3 製作流程與結果

為實現本研究提出之雙面電鍍微掃描面鏡設計，所設計出的製作流程整合如圖 3-6 所示。首先選用低阻值($0.03\Omega\text{-cm}$)之 SOI 晶片來進行製程，接著沉積鉻/金的電鍍起始層於晶片正面，並定義為細長的圖形，如圖 3-6(a)所示。分別沉積二氧化矽(SiO_2)於晶片正面與背面，以做為深式反應離子蝕刻之擋罩，如圖 3-6(b)所示。並以深式反應離子蝕刻技術定義元件正面與背面的結構，如圖 3-6(c)所示。利用氫氟酸(HF)將晶片正面、背面與內埋二氧化矽層移除後，利用電子束蒸鍍(E-gun evaporation)沉積鉻/金電鍍起始層於元件層背面，如圖 3-6(d)所示，此時即可利用 SOI 晶片元件層所製作出來的遮蔽擋罩，定義晶片背面的電鍍起始層圖形。隨後再利用氫氟酸的底切效應將此遮蔽擋罩懸浮移除，如圖 3-6(e)所示。最後利用 3-2.3 節所提及的電鍍技術，將鎳同時選擇性電鍍於元件層的正面與背面，如圖 3-6(f)所示，以完成元件製作。

針對選擇性電鍍製程技術，製作測試元件進行觀察，其製程結果如表 3-1 所示，此測試元件是定義鉻/金電鍍起始層於低阻值晶片上，圖形為邊長 $5\mu\text{m}$ 到 $40\mu\text{m}$ 之正方形，由表中可明顯觀察到此製程方法能成功地選擇性電鍍鎳，由於

無光阻當作電鍍時的模子(mold)，因此可明顯看到電鍍鎳的邊角呈現圓弧的邊角。在成功驗證選擇性電鍍的可行性後，實際元件的製程結果如圖 3-7 之電子顯微鏡照片所示，圖 3-7(a)與圖 3-7(b)分別可看到元件正面與背面的製程結果，由圖中可清楚的看到鏡面、支撐外環、扭轉彈簧與肋補強結構被成功的製作出來，在支撐外環的正面有斜向設計之電鍍鎳圖形，而在鏡面與支撐外環的背面也具有電鍍鎳的薄膜，以增加致動力矩強度，此電鍍鎳薄膜的平均厚度為 $13\mu\text{m}$ 。在圖 3-7(c)的電子顯微鏡照片中可看到支撐外環的正面放大圖，斜向設計的鎳圖形可成功的被選擇性電鍍沉積。圖 3-7(d)為移除遮蔽擋罩前之電子顯微鏡照片(可對照於製作流程圖 3-6(d)之步驟)，可清楚地觀察到快軸與慢軸之扭轉彈簧的背面都被遮蔽擋罩所覆蓋，以避免電鍍起始層沉積於扭轉彈簧之背面。圖 3-7(e)的放大圖中可看到遮蔽擋罩能成功地定義元件層背面的電鍍起始層，並且在電鍍製程結束後，可發現扭轉彈簧的背面無鎳薄膜沉積於其上(可對照於製作流程圖 3-6(f))，如圖 3-7(f)所示。

3-4 量測與討論

用以驗證此雙面電鍍微掃描面鏡設計的驅動載具如圖 3-8 所示，在圖 3-8 中可看到本研究所製作出之雙軸微掃描面鏡被固定於載具中央，並且左右兩側有一對永久磁鐵(磁通量密度為 0.30Tesla)，以確保鏡面上鐵磁性材料的磁化方向，並且使用高斯計量測晶片所在位置之磁場強度為 18.02kA/m 。驅動線圈內嵌於載具側面，若通入電流可提供晶片所在位置一特定磁場。利用此驅動載具可將微掃描面鏡的慢軸與永久磁鐵彼此間的相對位置固定，其上視圖如圖 3-9 所示，如此的驅動架構能更精確的比較圖 3-3 中不同圖形設計的力矩差異，並降低實驗架設時所產生的人為誤差。若驅動線圈通入一直流電流時，則會提供一固定大小的磁場，此得鏡面有一固定的角位移產生，換而言之，可藉由通入直流電流的大小，來改變鏡面的轉動角度。針對圖 3-3 中不同圖形設計，圖 3-10 為驅動線圈通入直流電流的情況下，量測每單位磁性材料體積之慢軸機械轉動角度結果，因此可由此量測結果比較磁化強度的大小。由於圖 3-3 中不同圖形設計的總磁性材料體積也會隨之不同，因此本研究利用機械角除以磁性材料體積的方式將其標準化，以求得客觀的比較結果。由量測結果的趨勢顯示，隨著驅動線圈所給的磁場強度

增加，單位體積的機械掃描角度也是呈現線性增加的趨勢，符合公式(3-3)中致動力矩與外加磁場強度之關係，比較填滿圖形設計與垂直圖形設計的結果，每單位體積之靜磁力矩約增強 211%，接著針對斜向圖形設計的量測結果比較，由於永久磁鐵所提供的磁化方向與斜向圖形設計的長軸方向不同，且斜向圖形設計之長寬比也比較小，因此量測出來每單位體積之機械角才會最小。

圖 3-11 為驅動線圈通入直流電流的情況下，單面電鍍與雙面電鍍設計之機械轉動角度差異，量測結果顯示雙面電鍍設計之靜磁力矩約是單面電鍍設計之 149%，由公式(3-3)與公式(3-4)中可得知靜磁力矩的大小應正比於磁性材料體積之關，本研究透過表面形貌的量測計算得到磁性材料之體積增加量為 162%，比較靜磁力矩與磁性材料體積增加比例，造成此差異之主要原因是本研究使用的電鍍鎳為一種軟磁性材料，因此其磁化方向與易軸方向彼此間有著微小角度差異，因此造成靜磁力矩增強之比例並不同於磁性材料體積增加之比例。

在應用方面，以本研究製作出來的雙軸微掃描面鏡進行 Lissajous 掃描圖形之投影驗證。圖 3-12 為驅動微掃描面鏡進行投影驗證之載具，一具有斜向圖形設計之微掃描面鏡固定於載具中央，驅動線圈內嵌於載具側邊，一組永久磁鐵(磁通量密度為 0.3Tesla)與晶片慢軸扭轉彈簧約呈 45 度角擺放，目的是提供斜向圖形設計之電鍍鎳材料有最大的磁化強度，並且使其靜磁力矩能同時作用於微掃描面鏡之快軸與慢軸扭轉彈簧，此時放置晶片處之磁場強度為 20.37 kA/m，且驅動電流為 0.40 安培(方均根值)的正弦波，以提供 1.05kA/m 大小的交變磁場。所投影出來之二維掃描圖形如圖 3-13 所示，在投影平面距離微掃描面鏡 25 公分處時，投影出來的二維影像大小約 4.8cm(水平)×5.8cm(垂直)，且慢軸掃描共振頻率為 584Hz，此時垂直方向光學掃描角為 13.2 度，與快軸掃描共振頻率為 11148Hz，此時水平方向光學掃描角為 11.0 度。此元件在 1 大氣壓的環境下，慢軸與快軸扭轉彈簧之品質因子(quality factor)分別為 119 與 799，透過文獻[54]的 Lissajous 解析度計算方式，可得知圖 3-13 之掃描解析度為 429×429 像素(pixels)，並且畫面更新頻率(refresh rate)為 48.7Hz。

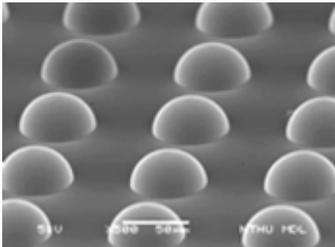
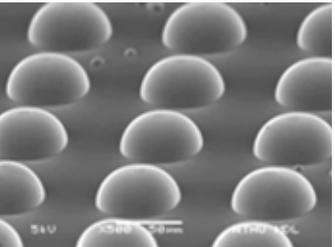
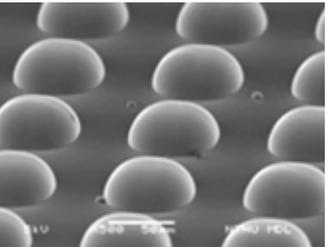
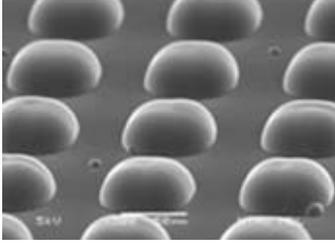
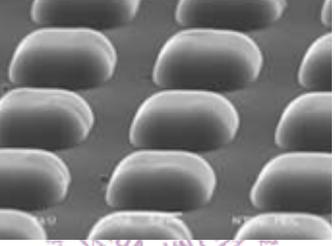
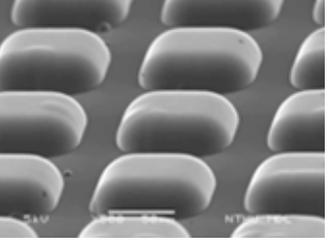
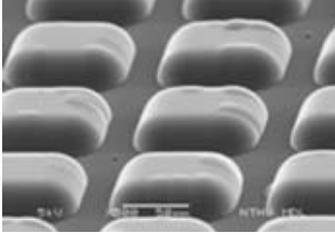
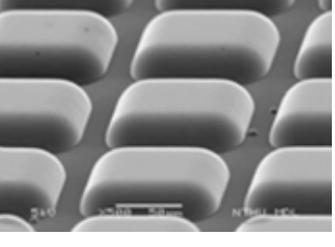
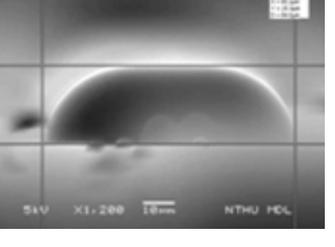
3-5 小結

本章節提出雙面電鍍之微掃描面鏡設計，利用細長磁性材料圖形與雙面電鍍

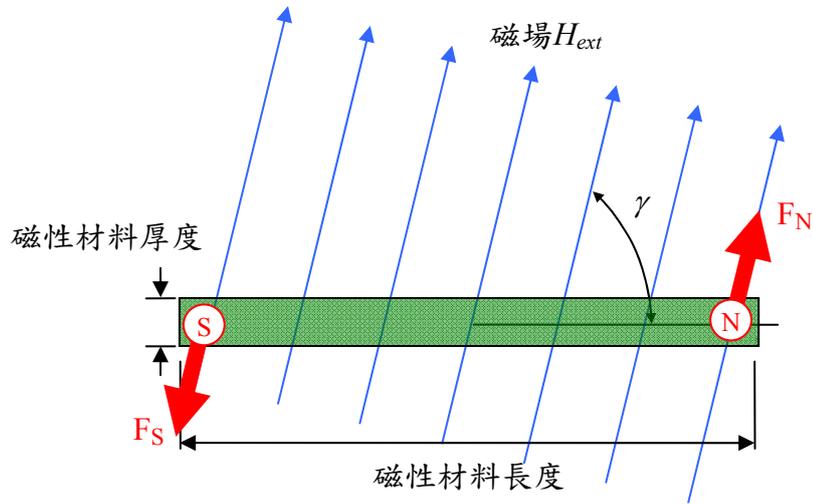
鍍的方式分別來增加磁化強度與鐵磁性材料的體積，並且從量測結果可驗證此設計的確有效地增強靜磁力矩。在製程技術方面，元件層所製作之遮蔽擋罩與選擇性雙面電鍍的技術成功的被用來實現此微掃描面鏡設計。相較於傳統填滿圖形之設計，量測結果顯示利用細長電鍍鍍圖形設計可將靜磁力矩提升 211%，除此之外，雙面電鍍的製程技術還能使靜磁力矩提升 149%，並且此設計之元件能成功地驅動雙軸掃描，投影出 Lissajous 二維掃描圖形，且掃描解析度可達到 429x429 像素。



表 3-1 選擇性電鍍測試結果

<p>5μm square array</p> 	<p>10 μm square array</p> 	<p>15 μm square array</p> 
<p>20 μm square array</p> 	<p>25 μm square array</p> 	<p>30 μm square array</p> 
<p>35 μm square array</p> 	<p>40 μm square array</p> 	<p>Profile</p> 

(a)



(b)

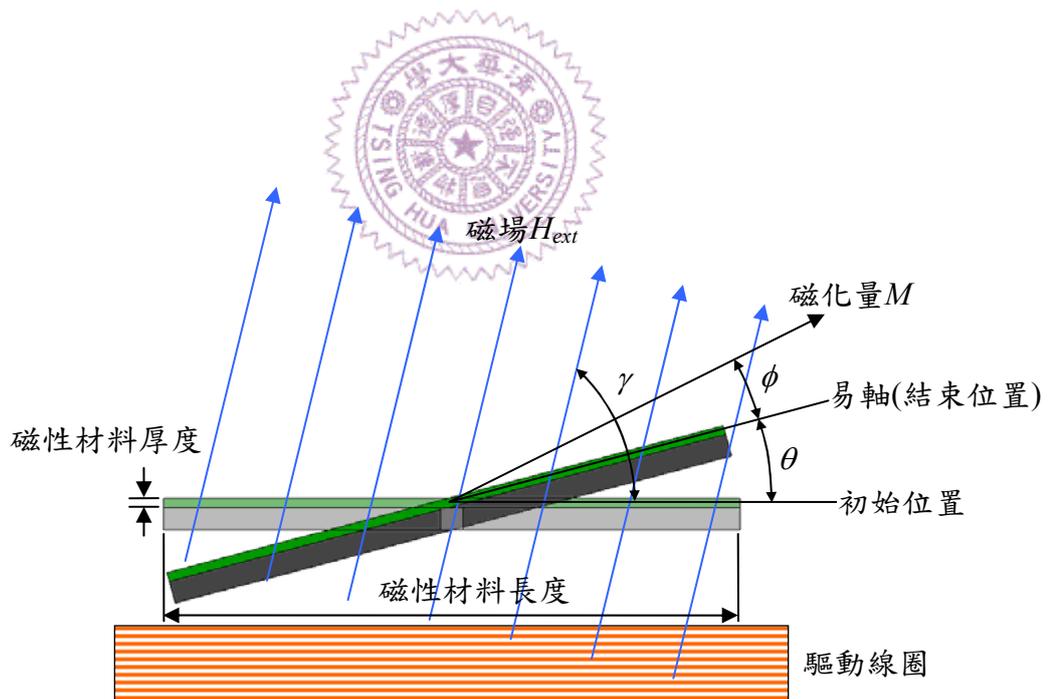


圖3-1 靜磁式微掃描面鏡致動概念側視圖

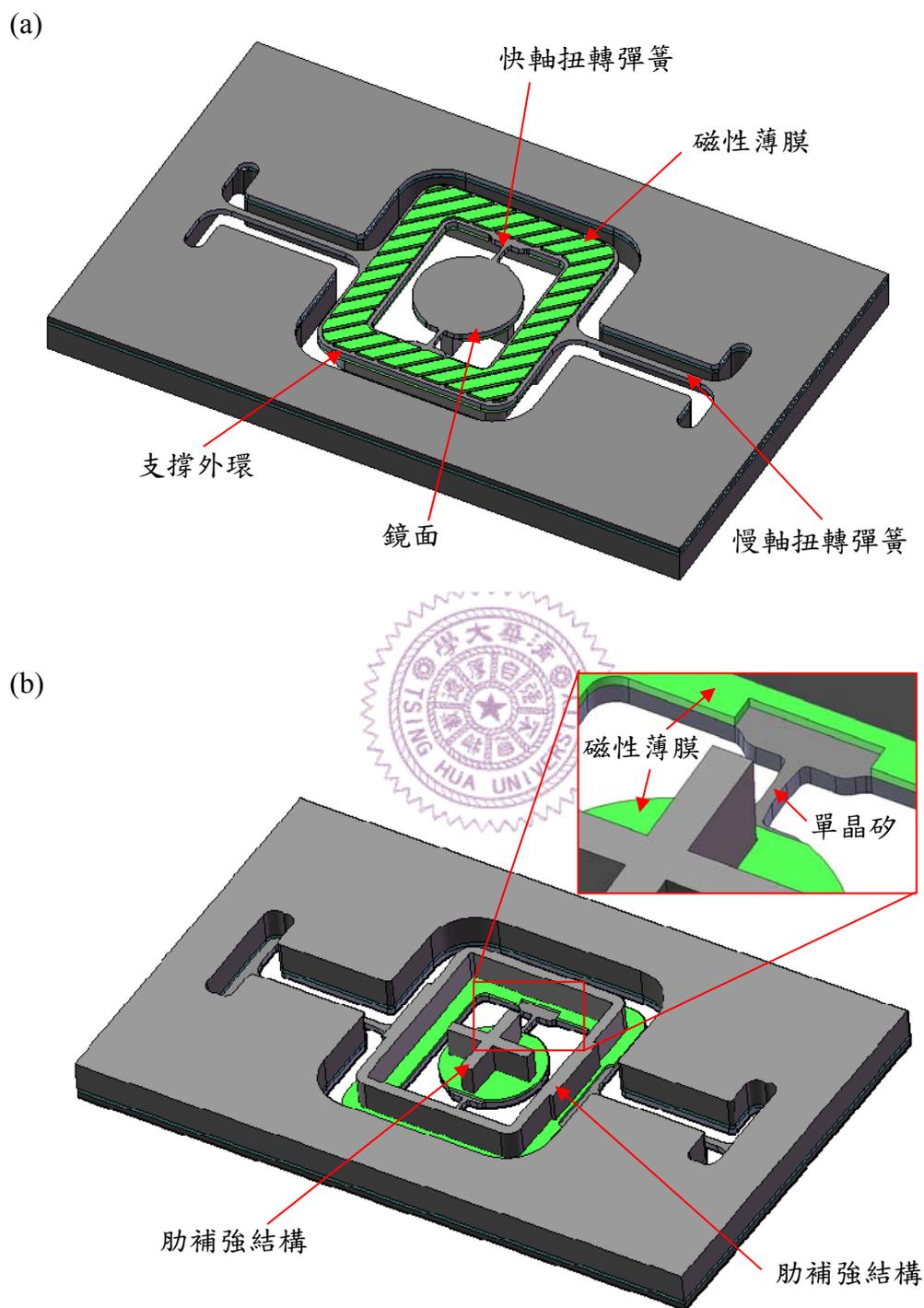
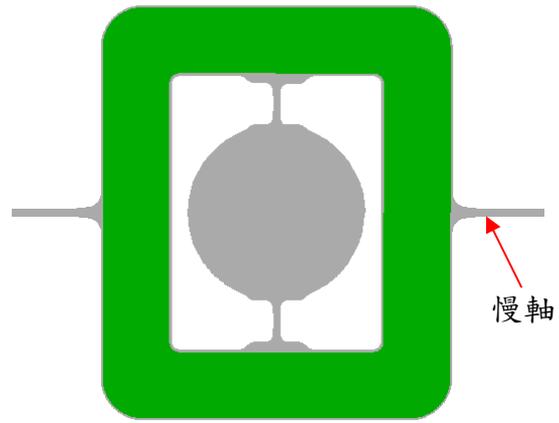


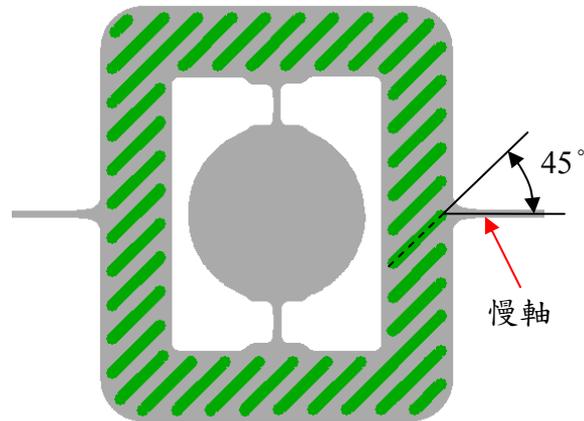
圖3-2 雙面電鍍微掃描面鏡設計架構

(a)



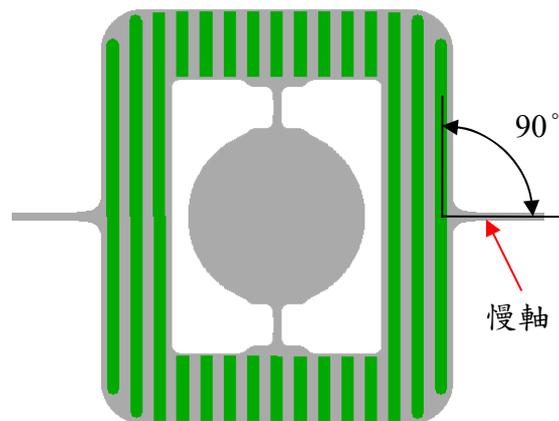
填滿圖形設計
(Full-pattern design)

(b)



斜向圖形設計
(Tilt-pattern design)

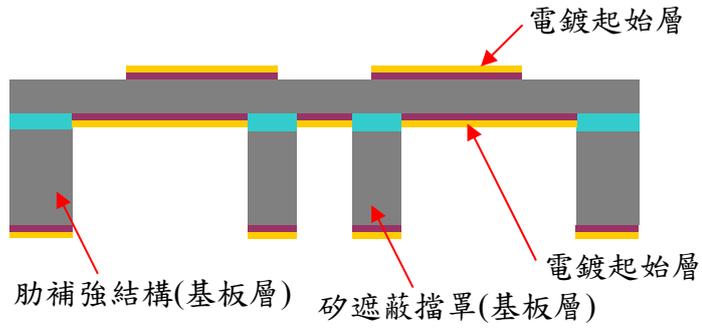
(c)



垂直圖形設計
(Vertical-pattern design)

圖3-3 電鍍鎳圖形設計

(a)



(b)

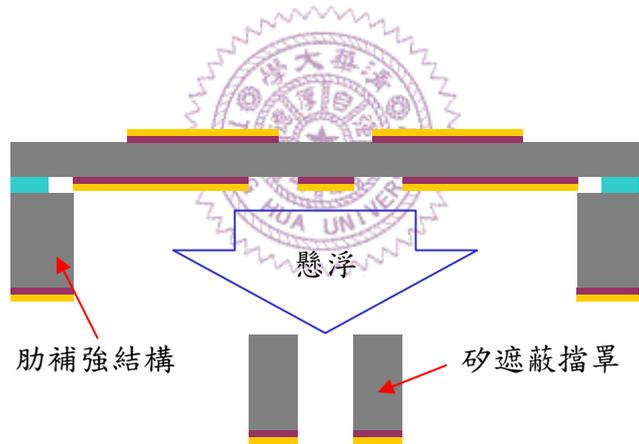


圖3-4 定義元件層背面之電鍍起始層方法示意圖

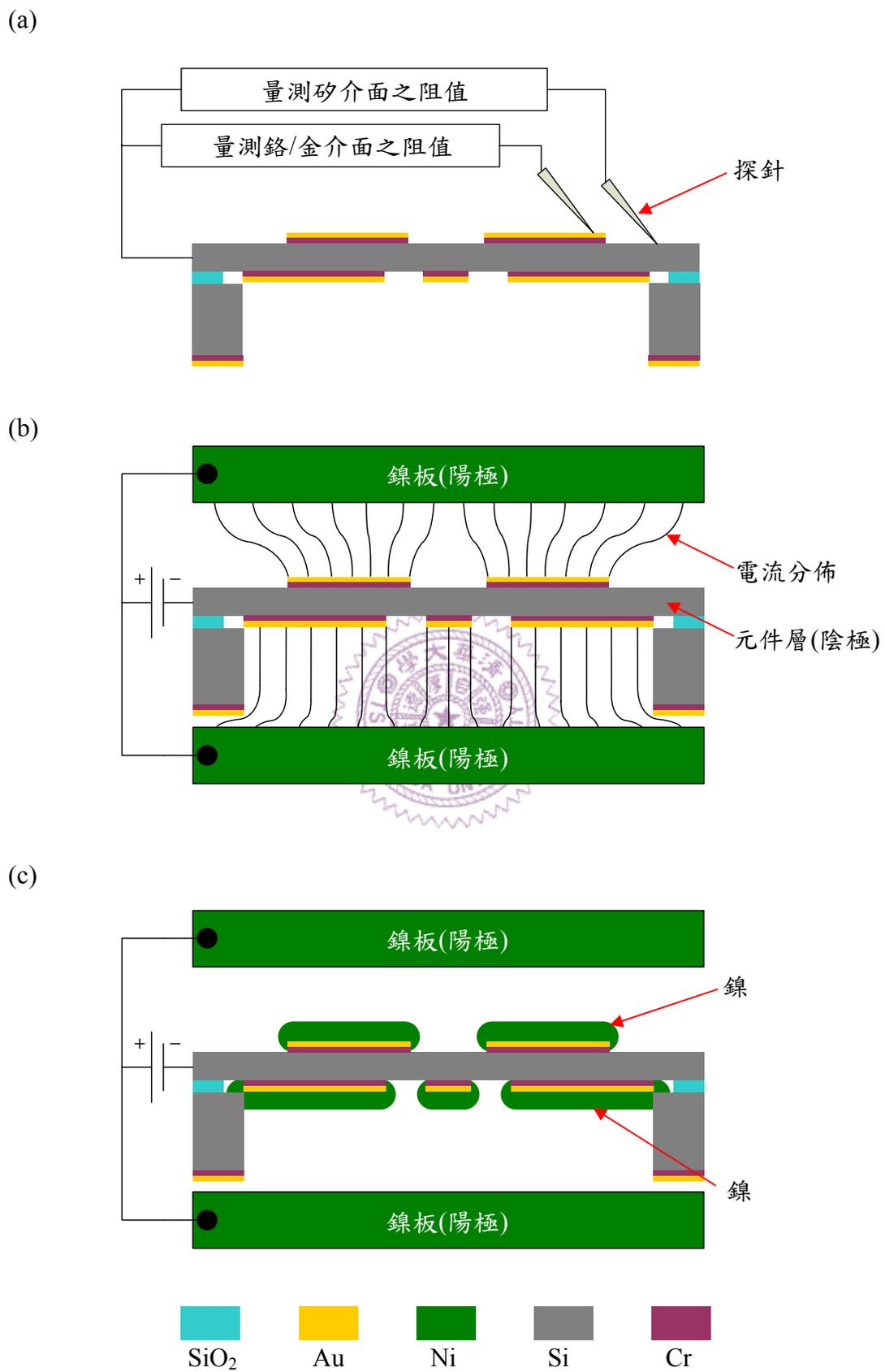


圖3-5 選擇性雙面電鍍架構示意圖

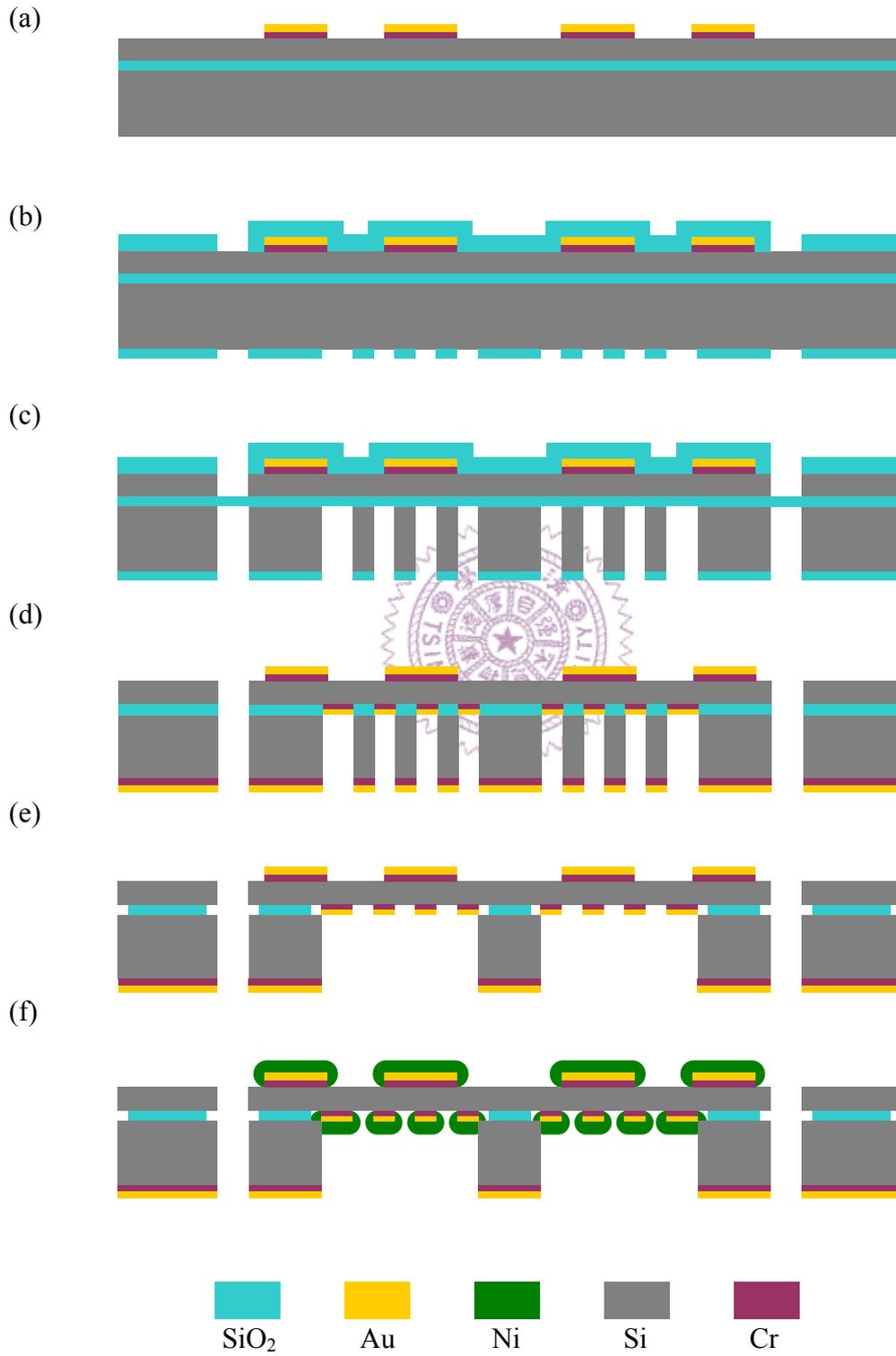


圖3-6 製作流程圖

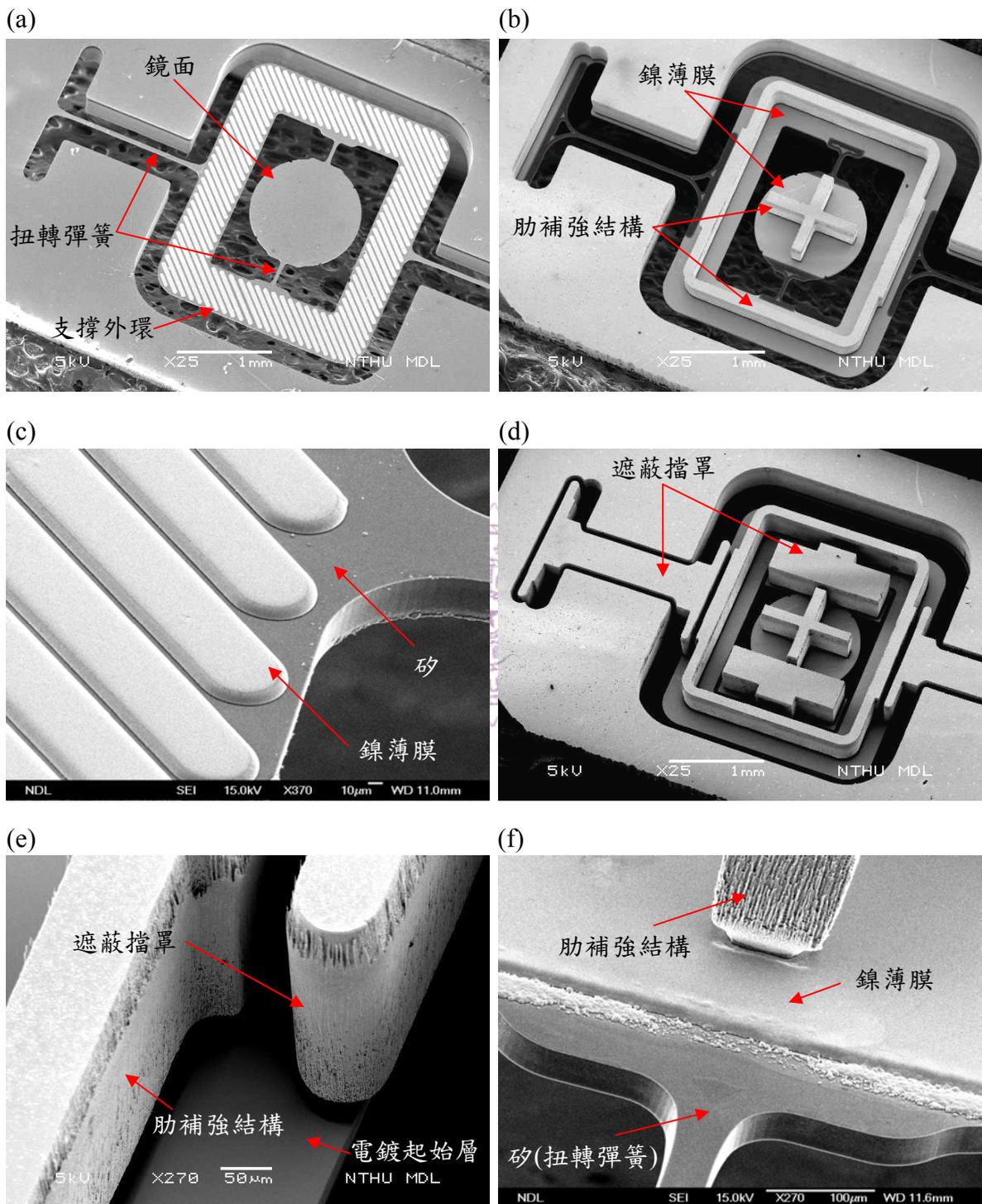


圖3-7 製程結果之電子顯微鏡照片

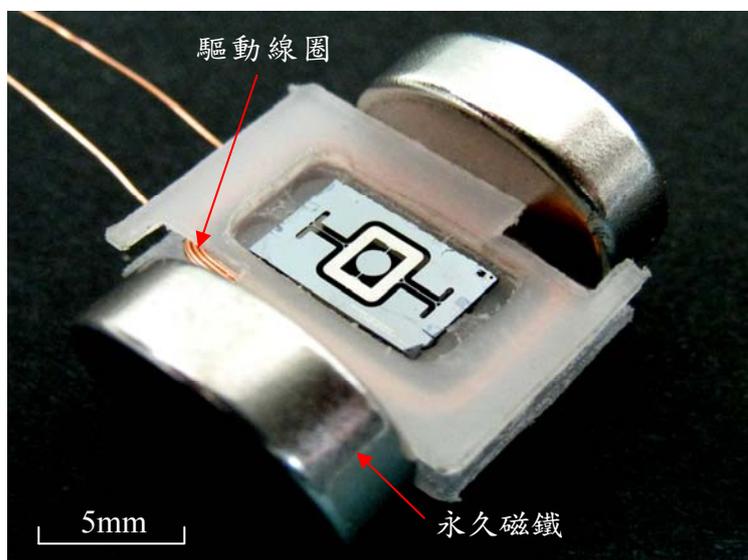


圖3-8 驅動載具

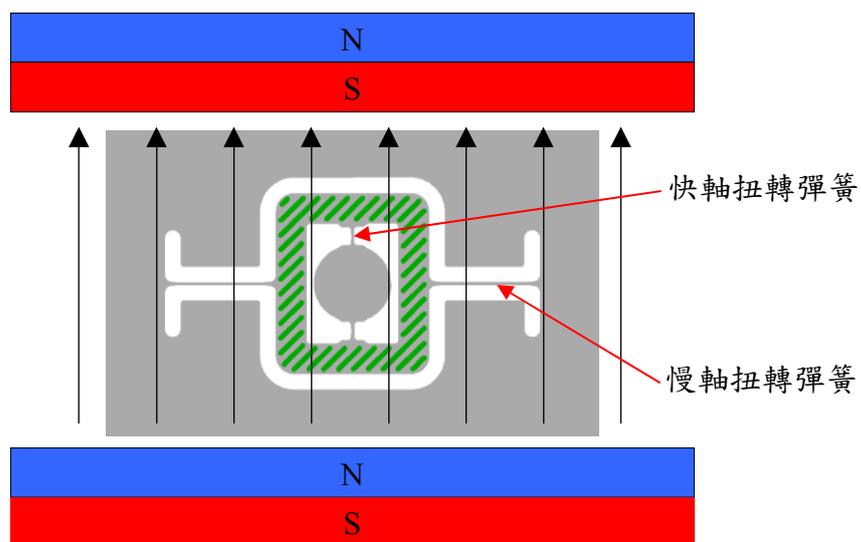


圖3-9 磁場分佈上視圖

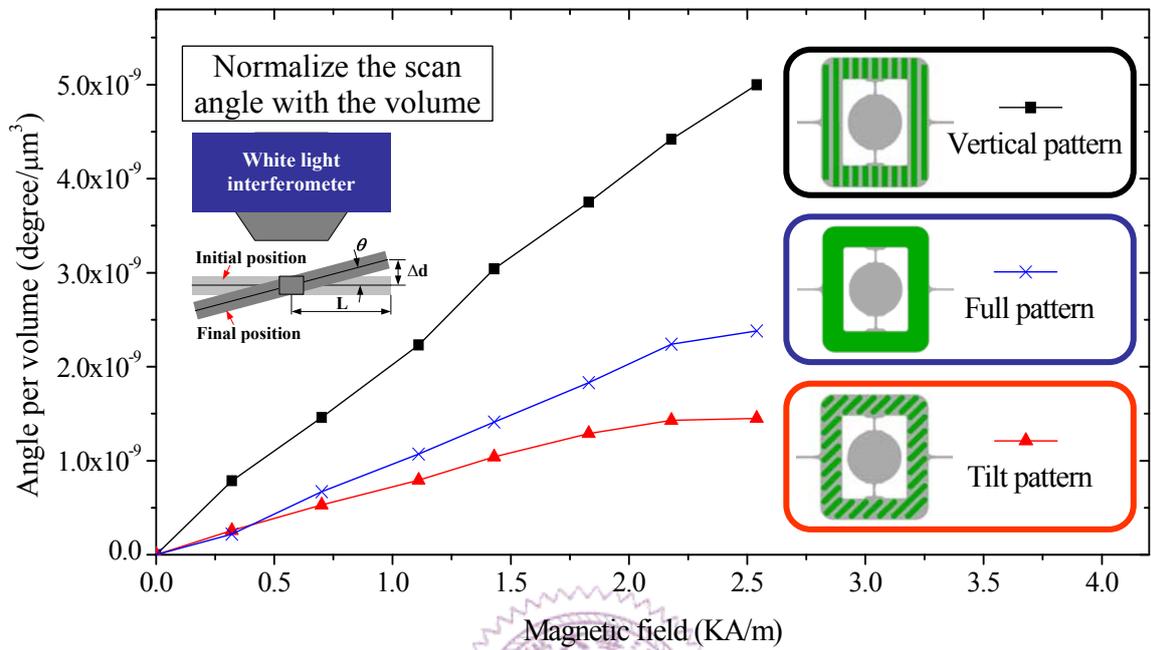


圖3-10 轉動角度與不同設計圖形之關係

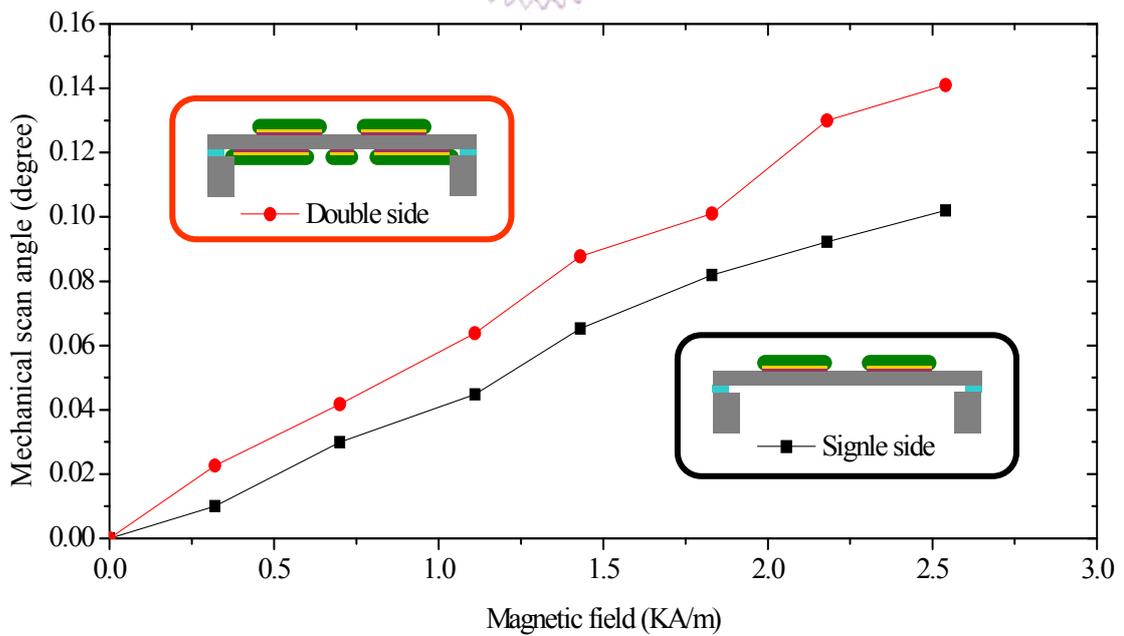


圖3-11 掃描角度與單面/雙面電鍍元件之關係

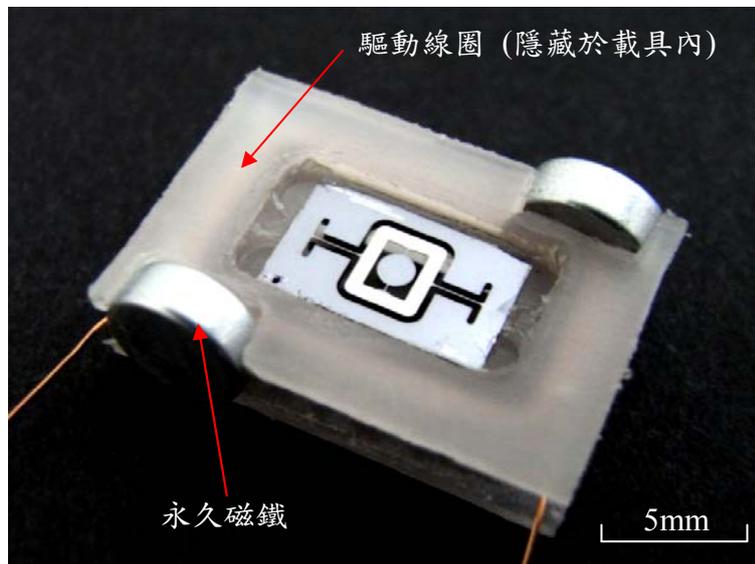


圖3-12 驅動載具

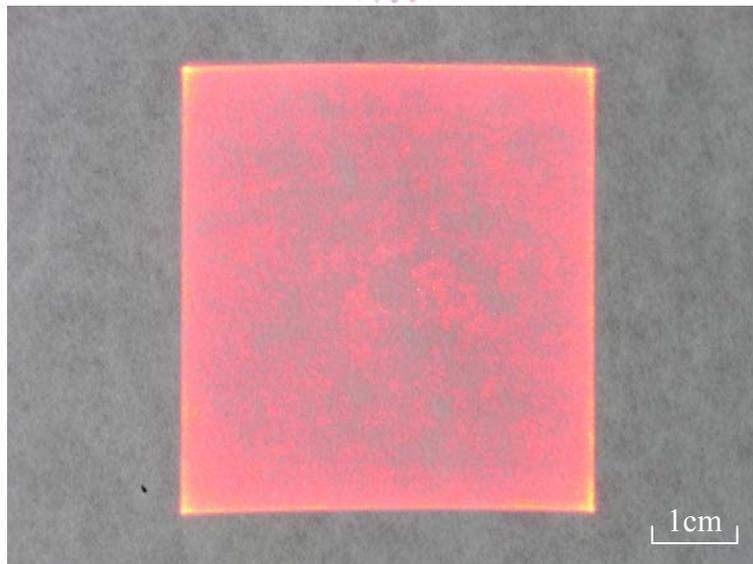


圖3-13 二維 Lissajous 掃描圖形

第4章 內嵌磁性材料之微掃描面鏡設計

本章節主旨是利用內嵌(embed)磁性材料的技術，應用在靜磁式微掃描面鏡結構上，以實現增強致動力矩與提高運動穩定性之目的。本章節利用第3章中所提及以細長磁性材料圖形增加磁化強度，與增加磁性材料體積提升致動力矩之方式，更進一步提升微掃描面鏡之靜磁致動力矩。除此之外，由於磁性材料內嵌於結構內部，因此還可降低鏡面不必要的擺盪(wobble motion)問題，提升鏡面運動穩定性。本技術使用鎳為磁性材料，因此具有三個主要特色：(1) 利用單晶矽模子同時電鍍並定義厚結構鎳，並且鎳結構與單晶矽結構可分別提供大致動力與優越的機械材料特性；(2)內嵌細長形狀之鎳結構不只增加了磁性材料的體積，同時也增加了本身磁化強度，進而提升其靜磁致動力矩；(3)矽鎳複合結構本身具有近乎軸對稱之結構，因此除了可以降低元件本身之質量慣性矩之外，更重要的是可減少鏡面不必要的擺盪問題，提升運動穩定性。本章節以一單軸靜磁式微掃描面鏡來實現並驗證此設計。



4-1 前言

電磁式致動器本身具有大出力大位移之特性，因此被廣泛使用在微掃描面鏡的驅動上，目前最主要以勞倫茲力與靜磁力為最主要之電磁驅動力，一般而言，使用勞倫茲力驅動的元件必須要有電流繞線製作於晶片表面[7]，而使用靜磁力驅動的元件則需要鐵磁性材料沉積於晶片表面[50]，不論是電流繞線或磁性材料，增加其厚度能有效的增大致動力矩，然而此厚度通常會受限於元件製作流程。此外，當微掃描面鏡於大角度運動時，若鏡面產生不必要的擺盪則會使反射之雷射光束產生抖動[72-73]，為解決此問題可由軸對稱鏡面結構或提供純扭(pure torque)之致動力兩方面進行改善。一般位於晶片表面的電流繞線與磁性材料會造成重心的偏移產生偏心力，為解決此問題可使用雙層 SOI 晶片製作軸對稱結構[73]；另外若是扭轉軸上之致動力不對稱，則易造成鏡面之擺盪，為解決此問題可設計機械連桿結構提供純扭之致動力矩於鏡面上[74]，以上之作法都可抑制鏡面不必要之擺盪，進而提升其運動穩定性。

本章節提出內嵌磁性材料之微掃描面鏡設計，利用靜磁力驅動微掃描面鏡，並以鎳當作磁性材料內嵌於單晶矽結構內，以實現矽鎳複合致動外環。本研究將內嵌鎳結構定義為細長之形狀，因此磁性材料的體積與磁化強度都可被增加，並且由於此矽鎳複合結構於出平面方向近乎軸對稱，因此元件的出平面擺盪問題可以有效的被抑制，因此本設計除了可以增加靜磁致動力矩外，還可提升元件之運動穩定性。本章節建立了此內嵌磁性材料微掃描面鏡設計之相關製作流程，並於量測結果驗證此設計相對於現有設計之改善差異。

4-2 元件設計

本節以第 3 章所討論之力矩增強方式為基礎，更進一步的延伸其設計概念，利用內嵌磁性材料製程技術來改善微掃描面鏡之元件特性，其致動原理如圖 4-1 所示，當驅動線圈通入電流時產生一磁場 H_{ext} 作用於微掃描面鏡上，進而產生靜磁力矩 T 使元件致動，同樣可利用公式(3-3)了解其致動原理，其中 V_{mag} 在此為內嵌磁性材料之體積，且微掃描面鏡左右兩側之永久磁鐵則提供一固定磁場，使元件上之磁性材料磁化方向固定。透過公式(3-3)可知，此內嵌磁性材料技術一樣可藉由增加磁性材料體積 V_{mag} 與磁化量 M 的方式，來提升元件靜磁致動力矩。

內嵌磁性材料之微掃描面鏡設計如圖 4-2(a)所示，此微掃描面鏡由扭轉彈簧、致動外環(矽鎳複合結構)、鏡面與內嵌鎳結構所組成。此設計將磁性材料鎳定義為細長之條狀結構，並且內嵌於單晶矽結構內，以實現矽鎳複合致動外環。由圖 4-2(a)中之 A-A' 截面可發現，矽晶片背面經非等向性濕蝕刻所產生之凹槽(cavity)，可提供足夠的運動空間讓微掃描面鏡進行大角度之操作。本設計直接定義矽基材本身當作電鍍磁性材料之模子，可避免如第 3 章中雙面電鍍微掃描面鏡設計之電鍍鎳薄膜的體積不確定性(電鍍過程中會同時往上與往側向沉積)，因此厚結構之磁性材料可以藉此單晶矽模子成功電鍍定義，並同時內嵌於單晶矽模子當中，此方法可以有效地增加其體積 V_{mag} 。除此之外，藉由光罩圖形定義單晶矽模子之幾何形狀，可以將此內嵌磁性材料電鍍成細長之條狀鎳，進而增加本身之磁化量 M 。本微掃描面鏡之致動外環是由矽鎳複合結構所構成，若與外界磁場相互作用則能產生靜磁力來致動元件，因此致動外環上之單晶矽結構與鎳結構分別提供了優越的機械特性與致動力。為了驗證此設計之特點，本論文同時製作了典

型之靜磁式微掃描面鏡設計[50]，如圖 4-2(b)所示，亦即將磁性材料沉積於矽晶片表面。

4-2.1 致動外環擺盪現象之理論推導

本論文針對現有微掃描面鏡設計建立一動態模型，如圖 4-3(a)所示，分別為上視圖與 B-B' 截面圖。此動態模型可用來分析致動外環因結構非軸對稱所產生之偏心力，使致動外環在操作時產生不必要的擺盪現象。此模型之元件正面有金屬薄膜，通常為電流繞線[7]或磁性薄膜[50]，背面具有雙面電鍍微掃描面鏡設計之肋補強結構，上述之結構皆會造成結構之質心偏離扭轉中心，當微掃描面鏡操作時，則產生偏心力作用於致動外環上。當此微掃描面鏡針對扭轉中心 O 進行掃描運動時，假設掃描之機械角度為 $t\theta$ 時，此角度 θ 可表示為

$$\theta = \theta_0 \sin(\omega_0 t) \quad (4-1)$$

其中 θ_0 為最大機械掃描角度， ω_0 為此微掃描面鏡之操作頻率。因此角速度 ω 與角加速度 α 可表示為

$$\omega = \omega_0 \theta_0 \cos(\omega_0 t) \quad (4-2)$$

$$\alpha = -\omega_0^2 \theta_0 \sin(\omega_0 t) \quad (4-3)$$

由圖 4-3(a)之 B-B' 截面可看到，此致動外環的等效質心位置與扭轉軸中心之偏移距離為 d ，且此致動外環之自由體圖(free-body diagram)與運動圖(kinetic diagram)如圖 4-3(b)所示，其中向心加速度 $(a_G)_n$ 與切線加速度 $(a_G)_t$ 可分別表示為

$$(a_G)_n = \omega^2 d \quad (4-4)$$

$$(a_G)_t = \alpha d \quad (4-5)$$

當致動外環進行角度掃描運動時，同時會產生同平面作用力 $(F_O)_x$ 與出平面作用力 $(F_O)_y$ 施加於扭轉彈簧上，這些作用力可分別表示為

$$(F_O)_x = M_m (a_G)_n \sin(\theta) - M_m (a_G)_t \cos(\theta) \quad (4-6)$$

$$= M_m d \omega_0^2 (\theta_0^2 \cos^2(\omega_0 t) \sin(\theta_0 \sin(\omega_0 t)) + \theta_0 \sin(\omega_0 t) \cos(\theta_0 \sin(\omega_0 t)))$$

$$(F_O)_y = -M_m g - M_m (a_G)_n \cos(\theta) - M_m (a_G)_t \sin(\theta) \quad (4-7)$$

$$= -M_m g - M_m d \omega_0^2 (\theta_0^2 \cos^2(\omega_0 t) \cos(\theta_0 \sin(\omega_0 t)) - \theta_0 \sin(\omega_0 t) \sin(\theta_0 \sin(\omega_0 t)))$$

其中 M_m 為致動外環質量，由於最大之機械角度 θ_0 為光學掃描角之四分之一，因此可利用下列關係式來將推導的公式簡化

$$\sin(\theta_0 \sin(\omega_0 t)) \approx \theta_0 \sin(\omega_0 t) \quad (4-8)$$

$$\cos(\theta_0 \sin(\omega_0 t)) \approx 1 \quad (4-9)$$

同時因為機械角度 θ_0 之三次方項會遠小與一次方項，因此公式(4-6)與公式(4-7)可改寫為

$$(F_O)_x = M_m d \omega_0^2 \theta_0 \sin(\omega_0 t) \quad (4-10)$$

$$(F_O)_y = -M_m g - M_m d \omega_0^2 \theta_0^2 \cos(2\omega_0 t) \quad (4-11)$$

觀察公式(4-10)與公式(4-11)可得知，時變偏心力之量值正比於致動外環質量 M_m 與質心偏心距離 d 。且彈簧之同平面剛性 $(k_O)_x$ 與出平面剛性 $(k_O)_y$ 分別為

$$(k_O)_x = \frac{2Ew^3h}{L_f^3} \quad (4-12)$$

$$(k_O)_y = \frac{2Ewh^3}{L_f^3} \quad (4-13)$$

其中 E 為彈簧之楊氏模數， w 為彈簧寬度， h 為彈簧厚度， L_f 為彈簧長度。當公式(4-10)與公式(4-11)中的偏心力作用於彈簧上時，此動態模型之運動方程式可表示為

$$M_m \ddot{x} + C\dot{x} + (K_o)_x x = M_m d \omega_0^2 \theta_0 \sin(\omega_0 t) \quad (4-14)$$

$$M_m \ddot{y} + C\dot{y} + (K_o)_y y = -M_m g - M_m d \omega_0^2 \theta_0^2 \cos(2\omega_0 t) \quad (4-15)$$

其中 C 為此動態系統的阻尼常數(damping constant)。因此致動外環之同平面擺盪 $x(t)$ 與出平面擺盪 $y(t)$ 可分別表示為

$$x(t) = \frac{M_m d \omega_0^2 \theta_0}{[(K_o)_x - M_m \omega_0^2]^2 + C^2 \omega_0^2}^{1/2} \sin(\omega_0 t - \phi_x) \quad (4-16)$$

$$y(t) = -\frac{M_m g}{(K_o)_y} - \frac{M_m d \omega_0^2 \theta_0^2}{[(K_o)_y - 4M_m \omega_0^2]^2 + 4C^2 \omega_0^2}^{1/2} \cos(2\omega_0 t - \phi_y) \quad (4-17)$$

其中相位角 ϕ_x 與 ϕ_y 分別為

$$\phi_x = \tan^{-1}\left(\frac{C \omega_0}{(K_o)_x - M_m \omega_0^2}\right) \quad (4-18)$$

$$\phi_y = \tan^{-1}\left(\frac{2C \omega_0}{(K_o)_y - 4M_m \omega_0^2}\right) \quad (4-19)$$

觀察公式(4-17)可知，致動外環出平面擺盪之頻率為操作頻率 ω_0 之兩倍。假設內嵌磁性材料微掃描面鏡設計之單晶矽結構(包括致動外環、扭轉彈簧、鏡面)與電鍍鎳結構皆為 $80\mu\text{m}$ ，並比較此設計與圖 4-2(b)之現有典型設計之特性差異，可整理如表 4-1 所示，當 $80\mu\text{m}$ 鎳結構由單晶矽結構表面內嵌到單晶矽結構內部時，其總質量慣性矩可減少至 83%。除此之外，由於矽鎳複合結構的致動外環本身近乎對稱於扭轉軸，因此可使偏心距離 d 減少，進而使致動外環的擺盪也可以大幅度的減低。

4-2.2 內嵌鎳結構製程技術

為實現矽鎳複合致動外環之製造，本研究發展內嵌鎳結構製程技術，其詳細製程步驟如圖 4-4 所示。首先將二氧化矽層沉積於單晶矽結構正面，並定義為深式反應離子蝕刻之硬式遮罩(hard mask)，接著分別將黏著層(adhesion-layer)鉻、電鍍起始層(seed-layer)金、支撐層(supporting-layer)鎳分別沉積於單晶矽結構背

面，如圖 4-4(a)所示。利用深式反應離子蝕刻技術定義單晶矽模子，以便更進一步定義內嵌鎳結構之幾何形狀，同時將露出之黏著層鉻(約 $0.02\mu\text{m}$ 厚)利用蝕刻液移除，如圖 4-4(b)所示。由於電鍍起始層金厚度只有 $0.2\mu\text{m}$ ，相當容易於後續製程中產生破損，有鑑於此，本研究於電鍍起始層金之背面加上約 $15\mu\text{m}$ 厚的支撐層鎳，以用於支撐並保護此電鍍起始層，接著以脈衝電鍍之方式將厚結構之鎳內嵌於單晶矽結構當中，如圖 4-4(c)所示。最後將二氧化矽、支撐層鎳、電鍍起始層金與黏著層鉻分別以蝕刻液移除，即可成功將鎳結構內嵌於單晶矽結構中，如圖 4-4(d)所示。此內嵌鎳結構之製程技術可以避免單晶矽模子中電鍍起始層沉積不均勻之問題，因此可避免電鍍空孔(plating voids)與洞口擠壓(pinch-off)之問題產生[75]。除此之外，此製程技術需採用之高阻值晶片製作單晶矽模子，以脈衝電鍍方式避免長時間深孔電鍍開口處的離子過度累積，使電鍍液有足夠的離子對流，避免兔耳效應(rabbit ears effect)所造成的影響[76-77]。

4-2.3 熱應力分析

本研究的結構部分是由矽內嵌電鍍鎳所組成，由於鎳之熱膨脹係數約為 $13.4 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，而矽之熱膨脹係數約為 $2.6 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，兩者之熱膨脹係數約差 5 倍，因此當元件操作環境有溫度改變時，熱應力即伴隨而生，尤其驅動外環上有大面積的鎳嵌於其中，因此因溫度改變所產生之熱應力的大小，為此元件是否產生操作特性飄移或結構破壞的重要因素之一。本研究利用有限元素分析軟體 ANSYS 進行其元件特性之分析比較，在假設 22°C 為無應力狀態的條件下，模擬出 0°C 與 100°C 時其因熱膨脹係數所造成之最大主應力分別為 81.55MPa 與 163.52MPa ，其應力分佈狀態分別如圖 4-5(a)與圖 4-5(b)所示，應力最大值位於支撐外環之邊緣，除此之外，可發現其內嵌鎳所造成之應力並不會影響到鏡面中央區域，因此鏡面能保持平整。可將 0°C 至 100°C 之應力分佈情形整理如圖 4-5(c)所示，在此溫度區間中最大等效應力發生在 100°C 時，若考慮矽晶片非等向性蝕刻所造成之應力集中現象，其破壞張應力約為 $200\text{MPa} \sim 300\text{MPa}$ [64-65]，溫度改變所產生之應力並未超過 200MPa ，因此熱膨脹係數差異所造成之等效應力並不會使單晶矽結構產生破壞。本研究更進一步利用此等效應力做為模態分析之預應力狀態，即可模擬出不同溫度下共振模態之頻率飄移狀態，如表 4-2 所示，此元件操作於其第 1

模態，隨溫度由將 0°C 至 100°C 時共振頻率由 460.3Hz 飄移至 458.8Hz，計算其頻率飄移量為 0.3%，有此可知本設計之扭轉模態對 0°C 至 100°C 之熱應力改變並不敏感。

4-3 製作流程與結果

本研究也建立如圖 4-6 所示之製程，實現前述內嵌鎳結構之微掃描面鏡。首先選用(100)晶片來進行製程，經高溫爐管成長二氧化矽層於晶片正背面，並且定義晶片正面的蝕刻尺與背面的濕蝕刻擋罩，接著利用氫氧化四甲基銨(tetramethylammonium hydroxide, TMAH)之濕式體蝕刻加工薄化晶片，利用蝕刻尺可即時觀測晶片剩餘厚度，如圖 4-6(a)所示。以電子束蒸鍍機分別沉積黏著層鉻與電鍍起始層金於元件背面之凹槽中，並電鍍約 15 μm 厚之鎳以作為支撐層，如圖 4-6(b)所示。利用 4-2.2 節中所提及的內嵌鎳結構製程技術，先定義內嵌鎳結構之幾何形狀於晶片正面的二氧化矽層上，配合上深式反應離子蝕刻技術定義單晶矽模子，在除去黏著層鉻以露出電鍍起始層金後，以電鍍鎳的方式將此區域嵌入鎳結構，如圖 4-6(c)所示。接著移除背面之支撐層鎳與電鍍起始層金，僅留下黏著層鉻來當作蝕刻停止層，再定義微掃描面鏡正面幾何形狀於正面的二氧化矽層上，以深式反應離子蝕刻至鉻層來定義單晶矽機械結構，如圖 4-6(d)所示。最後利用鉻蝕刻液與緩衝氧化物蝕刻液(buffer oxide etching, BOE)分別移除鉻與二氧化矽薄膜，即可完成元件製作，如圖 4-6(e)所示。

為了驗證此內嵌鎳結構之靜磁式微掃描面鏡設計特色，本論文同時製作了圖 4-2(b)中將磁性材料沉積於矽晶片表面之靜磁式微掃描面鏡[50]，其製作流程如圖 4-7 所示。首先使用(100)晶片經高溫爐管成長二氧化矽層於晶片正背面，並定義正面的蝕刻尺與背面的濕蝕刻擋罩，接著利用氫氧化四甲基銨之濕式體蝕刻加工薄化晶片，可於蝕刻尺處可即時觀測晶片剩餘厚度。晶片正面的二氧化矽層經黃光製程定義最後單晶矽結構之幾何形狀，同時作為製程最後反應離子蝕刻之硬式遮罩，接著沉積金屬層鉻與金分別作為黏著層與電鍍起始層，以上製程步驟如圖 4-7(a)所示。利用黃光製程製作 40 μm 厚的光阻(AZ4260)模子，並利用此模子電鍍同樣 40 μm 厚度的鎳結構，如圖 4-7(b)所示。接著在不移除上一道黃光製程

之光阻的情況下，同樣以黃光製程進行第二道的模造製程，此連續兩階段的電鍍製程可使鎳結構的厚度達到 80 μm 厚，如圖 4-7(c)所示。將光阻移除後，以 13 μm 厚的光阻旋塗於 80 μm 厚的鎳結構上，並且用以定義黏著層鉻與電鍍起始層金，以裸露出二氧化矽硬式遮罩，如圖 4-7(d)所示。最後利用深式反應離子蝕刻機定義並懸浮單晶矽結構，並將光阻、金、鉻、與二氧化矽層依序移除，如圖 4-7(e)所示。

此內嵌鎳結構微掃描面鏡之掃描電子顯微鏡照片如圖 4-8 所示，圖 4-8(a)與圖 4-8(b)分別為元件正面與背面之標準製程結果，可以清楚觀察到鏡面、致動外環、扭轉彈簧與背面之晶格面。致動外環上有嵌入細長的條狀鎳結構，以達到增強致動力矩之目的。圖 4-8(c)與圖 4-8(d)分別為矽鎳致動外環之表面與剖面之放大電子顯微鏡照片，可以清楚地看到電鍍鎳結構可以成功地被單晶矽結構模造成形，並且其單晶矽結構與電鍍鎳結構同樣約為 80 μm 厚，且其電鍍鎳結構之深寬比(aspect ratio)約為 2。圖 4-8(e)為典型靜磁式微掃描面鏡之設計，其鎳結構電鍍於晶片表面，製程示意圖如圖 4-7(e)所示。圖 4-8(f)為典型靜磁式微掃描面鏡之側視放大圖，可觀察到兩階段的電鍍模造成形使鎳結構厚度約為 80 μm 。

4-4 量測與討論

內嵌磁性材料之靜磁式微掃描面鏡之驅動載具如圖 4-9 所示，其中包括一 5mm \times 8mm 之微掃描面鏡晶片，固定於一塑膠載具上並藉此與永久磁鐵、驅動線圈組裝整合，該永久磁鐵提供一特定磁場以固定內嵌鎳結構之磁化方向，驅動線圈則是內嵌於驅動載具的側邊以提供週期性交變磁場來驅動微掃描面鏡。圖 4-10 為此微掃描面鏡利用掃描角度量測平台進行驅動測試之照片，綠光雷射透過載具右上方之入射區域聚焦於微掃描面鏡上，並且其反射光則反射到曲面屏幕上，因此微掃描面鏡的光學掃描角則可直接被曲面屏幕上之尺規直接讀出，圖中為典型的測試結果，當以輸入功率 $P_{input}=81\text{ mW}$ 操作於元件共振頻率 619Hz 時，其光學掃描角 $\theta_{optical}$ 為 90 度。此測試結果可與文獻[50]之測試結果相互比較，文獻中之微掃描面鏡當以輸入功率 170mW 操作於共振頻率 367Hz 時，其光學掃描角度為 88 度，儘管本論文設計之微掃描面鏡具有較高之扭轉彈簧剛性，但在操作於

相同光學掃描角之情況下，卻只需較少的輸入功率即可達到。

利用雷射都普勒測振儀(Laser Doppler Vibrometer, LDV)量測此微掃描面鏡之動態響應，如圖 4-11 所示，雷射都普勒測振儀之雷射光束聚焦於 A 點(位於此扭轉模態之節點線上)時，可量測出致動外環出平面之擺盪現象，另外當移動雷射光束之位置聚焦於 B 點時，可量測出致動外環之掃描角度。當微掃描面鏡以光學角 15 度的情況下操作，所量測到得出平面擺盪為 44nm，另外值得注意的是偏心力的頻率為微掃描面鏡操作頻率的兩倍，因此出平面擺盪位移之頻率為掃描面鏡操作頻率的兩倍。

為了驗證內嵌鎳結構微掃描面鏡之設計特色，本研究同時製作並量測圖 4-2(b)中之典型微掃描面鏡設計做為對照組，此設計有分別有 40 μ m 與 80 μ m 厚的鎳結構於單晶矽結構表面。為了達到公平的比較，因此這些微掃描面鏡的扭轉剛性皆相同，分別以下列兩種驅動條件進行測試：(1)相同的輸入功率 81mW，與(2)相同的光學掃描角 15 度。光學掃描角與出平面擺盪之量測結果可以整理如表 4-3，當固定輸入功率時，電鍍鎳結構厚度由 40 μ m 增加到 80 μ m 時，其光學掃描角由 65 度增加到 90 度(增加 138%)，由此量測結果可以得知藉由增加電鍍鎳結構之厚度可以有效的增加其光學掃描角度，亦即能有效增加其致動力矩。另外，不同鎳結構配置所造成之出平面擺盪也可由表 4-3 整理得知，透過公式(4-17)可得知微掃描面鏡出平面擺盪位移會正比於二次方操作頻率，因此這些微掃描面鏡皆操作於其共振頻率約 600Hz 左右，因此元件出平面擺盪位移會隨其操作頻率增高而變大。由表 4-3 之量測結果可得知，內嵌鎳結構微掃描面鏡的出平面擺盪位移只有 44nm，然而將鎳結構配置於致動外環表面之設計則具有較大得出平面擺盪。雖然理想上內嵌鎳結構之設計應無任何的出平面擺盪，但在此會因電鍍鎳的厚度與晶片薄化厚度不均造成此結構不對稱，經量測估計誤差量最大值約為 10 μ m，因此產生出平面擺盪。比較鎳結構配置於致動外環表面之設計，當電鍍鎳的厚度由 80 μ m 減低至 40 μ m 時，此出平面擺盪位移則由 76nm 減低至 52nm。若是比較同樣都是 80 μ m 的鎳結構，當由配置於致動外環表面改為內嵌於致動外環內部時，出平面擺盪位移則減少約 58%。

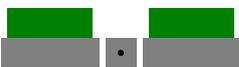
此外，本研究也將此內嵌鎳結構微掃描面鏡與第 3 章製作之雙面電鍍之微掃描面鏡設計做比較，其結果整理如表 4-4 所示。同樣操作於光學掃描角 15 度之情況下，雙面電鍍微掃描面鏡之出平面擺盪位移為 720nm，而內嵌鎳結構微掃描

面鏡的出平面擺盪位移只有 44nm，但由於此兩種微掃描面鏡具有不同之彈簧剛性，為了達到公平的比較，因此透過公式(4-17)可計算出其等效偏心力，計算結果如表 4-4 所示，雙面電鍍微掃描面鏡之等效偏心力為 3.39×10^{-5} N，而內嵌鎳結構微掃描面鏡之等效偏心力為 1.70×10^{-5} N，此結果顯示此內嵌鎳結構設計能減低等效偏心力約 50%。簡而言之，本章所提出之內嵌鎳結構設計不但能增加元件驅動力矩，同時還能抑制其出平面擺盪以提升元件運動穩定性。

4-5 小結

本章節提出以矽鎳複合結構為致動外環之靜磁式微掃描面鏡，並且利用矽基材為模子進行電鍍鎳的模造成形。此矽鎳複合結構具有足夠厚度與細長的形狀定義，因此可用來增加磁性材料的體積與磁化強度，進而使微掃描面鏡的靜磁致動力矩可以被有效的增加。測試結果顯示出，具有矽鎳複合致動外環之微掃描面鏡，當驅動於其共振頻率 619Hz 的情況下，以 81mW 的輸入功率能達到 90 度的光學掃描角，與現有之靜磁微掃描面鏡設計相比，在達到 90 度光學掃描角的情況下，輸入功率約減少 2 倍(由 170mW 減少為 81mW)。此外，由矽鎳複合結構組成之致動外環於截面上近乎軸對稱於其扭轉軸，因此操作時的擺盪現象可以有效的被抑制住，進而提升元件之運動穩定性，與第 3 章之雙面電鍍微掃描面鏡設計相比，在操作時所產生的等效偏心力約減少兩倍(由 3.39×10^{-5} N 減少為 1.70×10^{-5} N)。

表 4-1 矽鎳複合致動外環與現有設計之比較

外環形式	質量慣性矩 ($10^{-3} \text{ g} \cdot \text{mm}^2$)			偏心距離 (μm)	共振頻率 (Hz)
	鎳	矽	總和		
現有典型設計 	5.84	3.42	9.26	50	630
矽鎳複合結構 	5.81	1.90	7.71	0	690

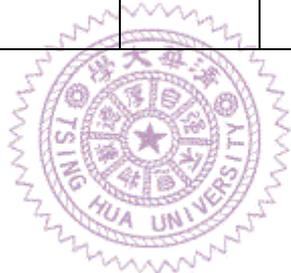


表 4-2 不同溫度下共振模態之頻率飄移量

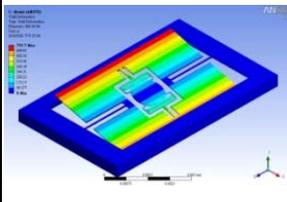
溫度	0°C	22°C	40°C	60°C	80°C	100°C	最大 飄移量 (%)
共振頻率 	460.3 Hz	460.3 Hz	460.2 Hz	459.9 Hz	459.5 Hz	458.8 Hz	-0.3

表 4-3 不同鍍結構配置之量測結果比較表

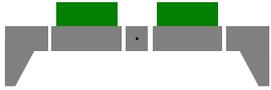
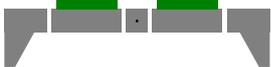
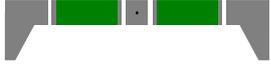
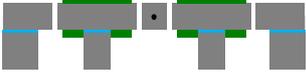
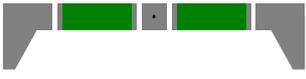
量測項目 (條件) 元件配置	光學掃描角度(度) (當 $P_{input} = 81\text{mW}$)	共振頻率(Hz) (當 scanning mode)	出平面擺盪位移(nm) (當 $\theta_{optical} = 15^\circ$)
表面 80 μm 鍍結構 	90	532.8	76
表面 40 μm 鍍結構 	65	606.6	52
內嵌 80 μm 鍍結構 	90	619.1	44

表 4-4 不同元件設計之偏心力比較

量測項目 元件種類	出平面擺盪位移 (nm)	出平面彈簧剛性 (N/m)	等效偏心力 (N)
雙面電鍍設計 	720	1.81×10^2	3.39×10^{-5}
內嵌 80 μm 鍍結構設計 	44	8.03×10^2	1.70×10^{-5}

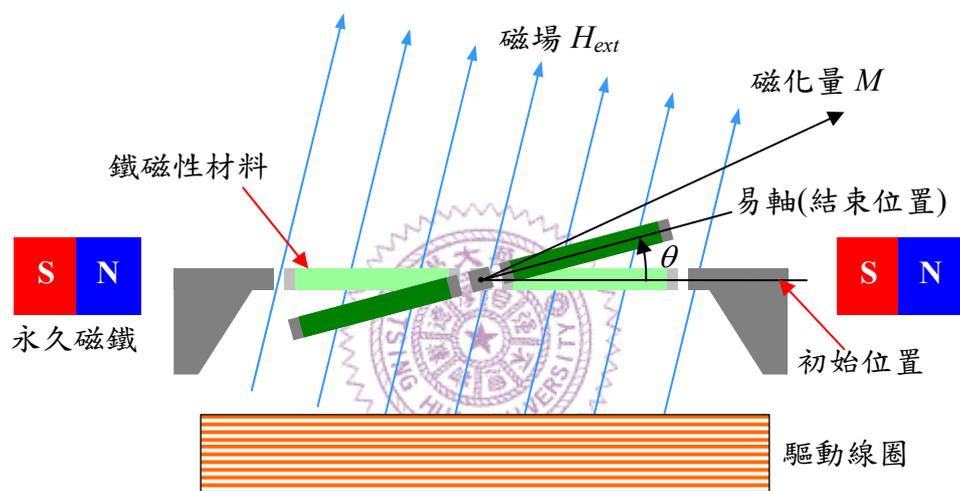
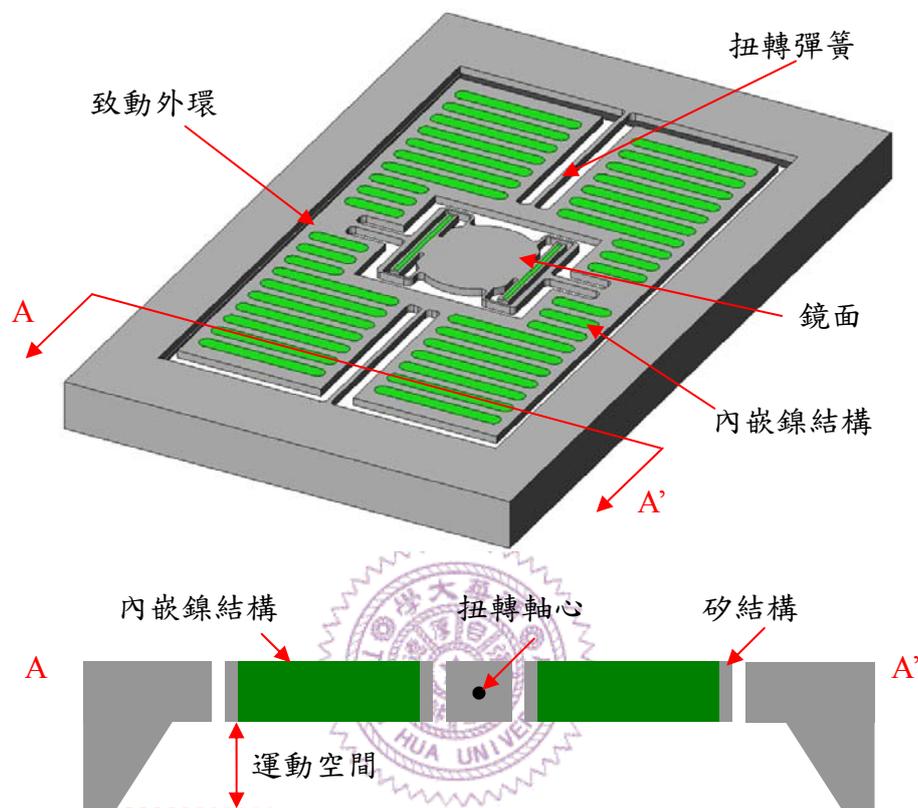


圖4-1 靜磁式微掃描面鏡致動概念測試圖

(a)



(b)

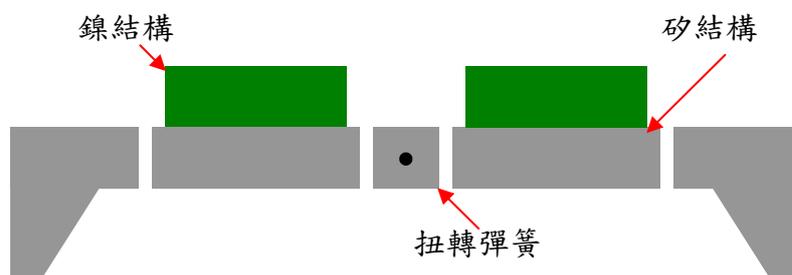


圖4-2 內嵌磁性材料微掃描面鏡之設計概念

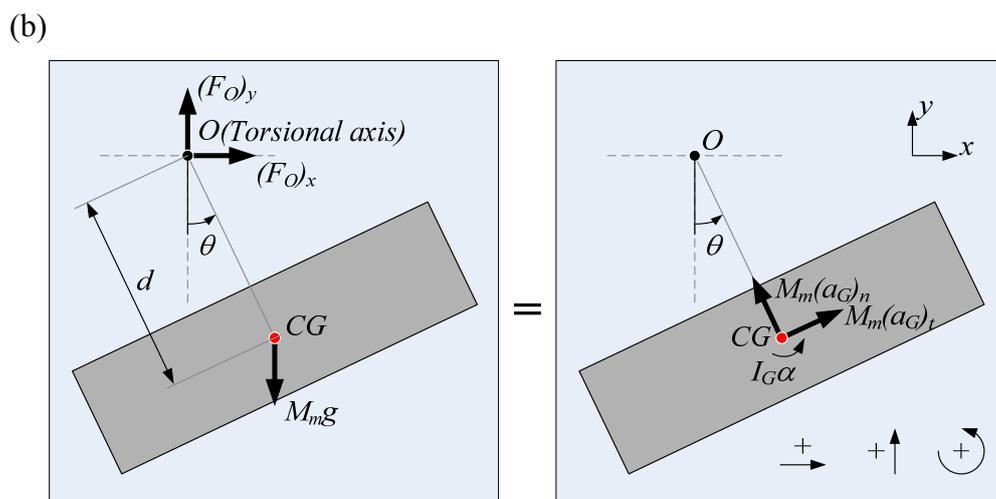
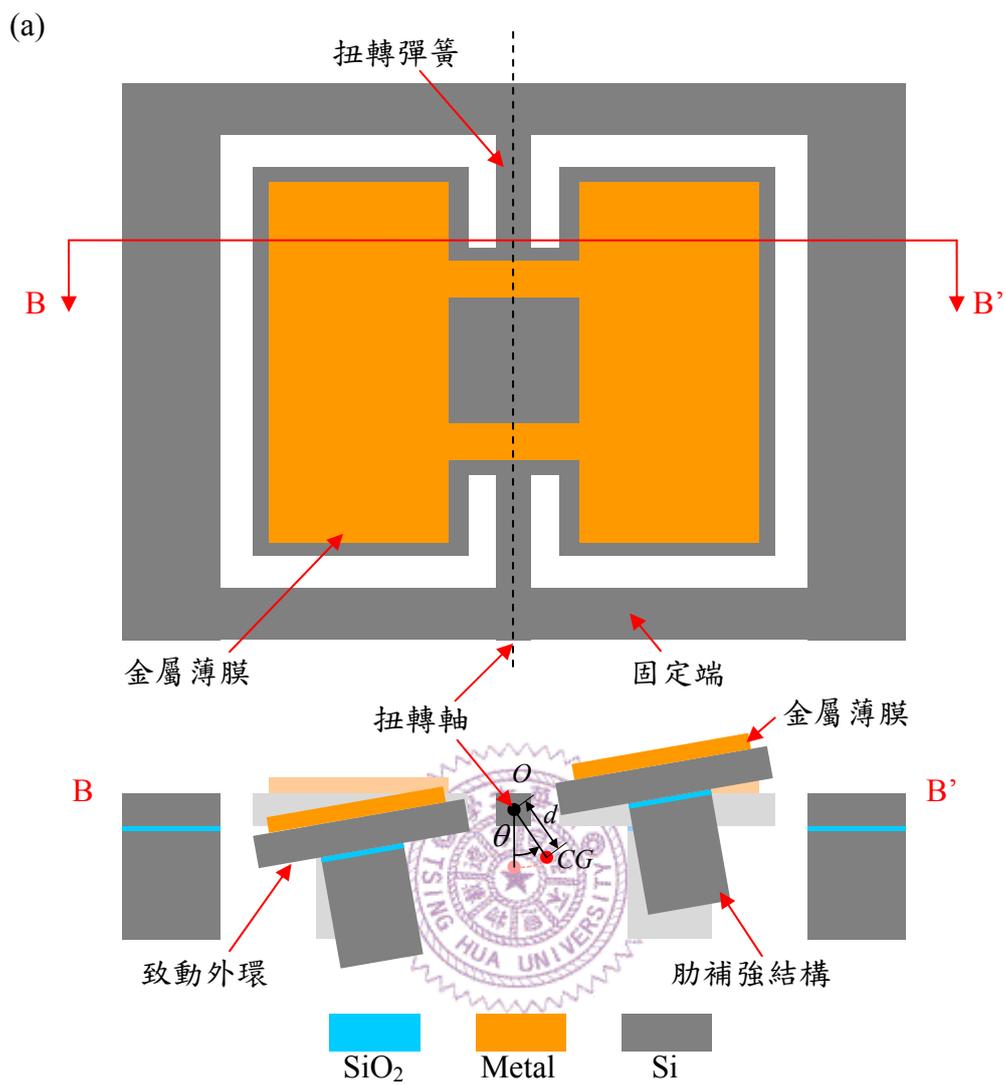


圖4-3 分析鏡面擺盪之動態模型

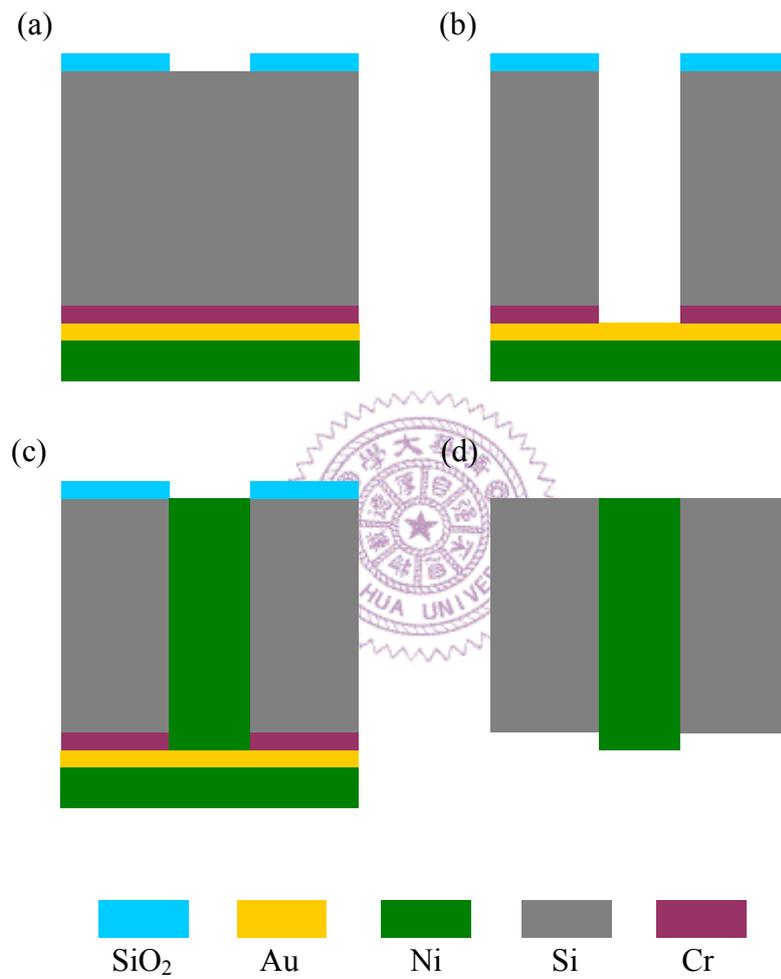
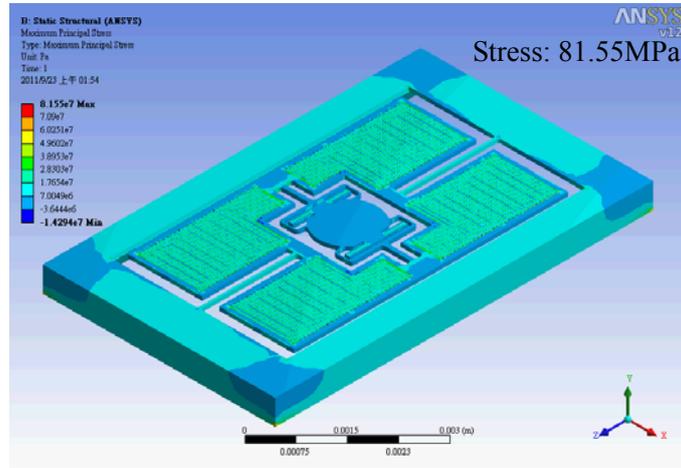
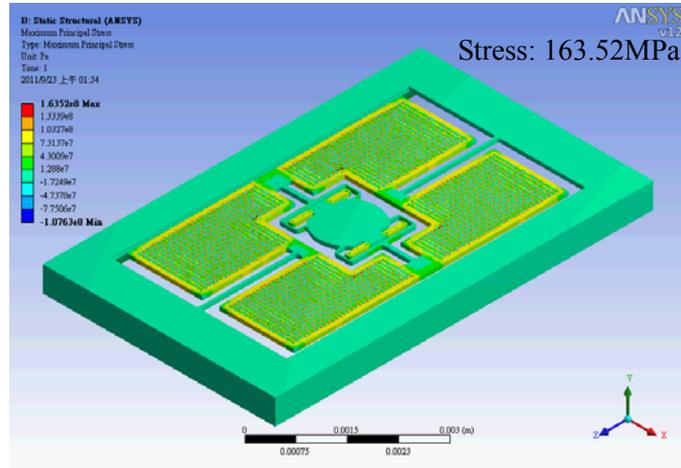


圖4-4 內嵌磁性材料製程技術

(a)



(b)



(c)

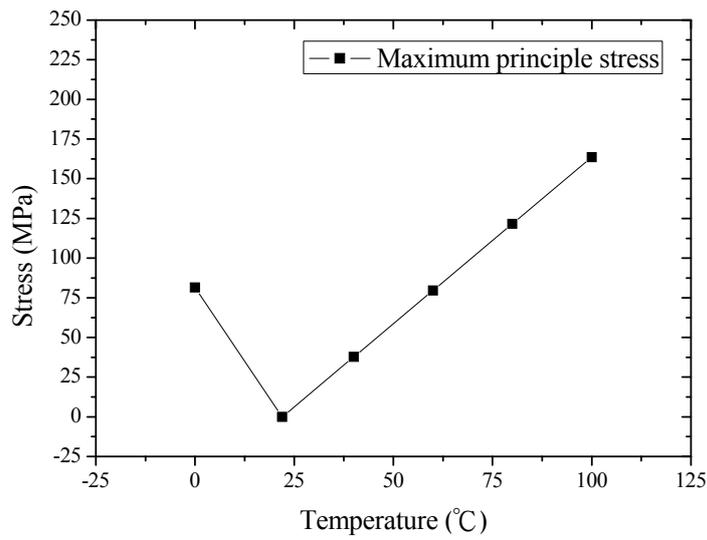


圖4-5 不同溫度下之應力狀態

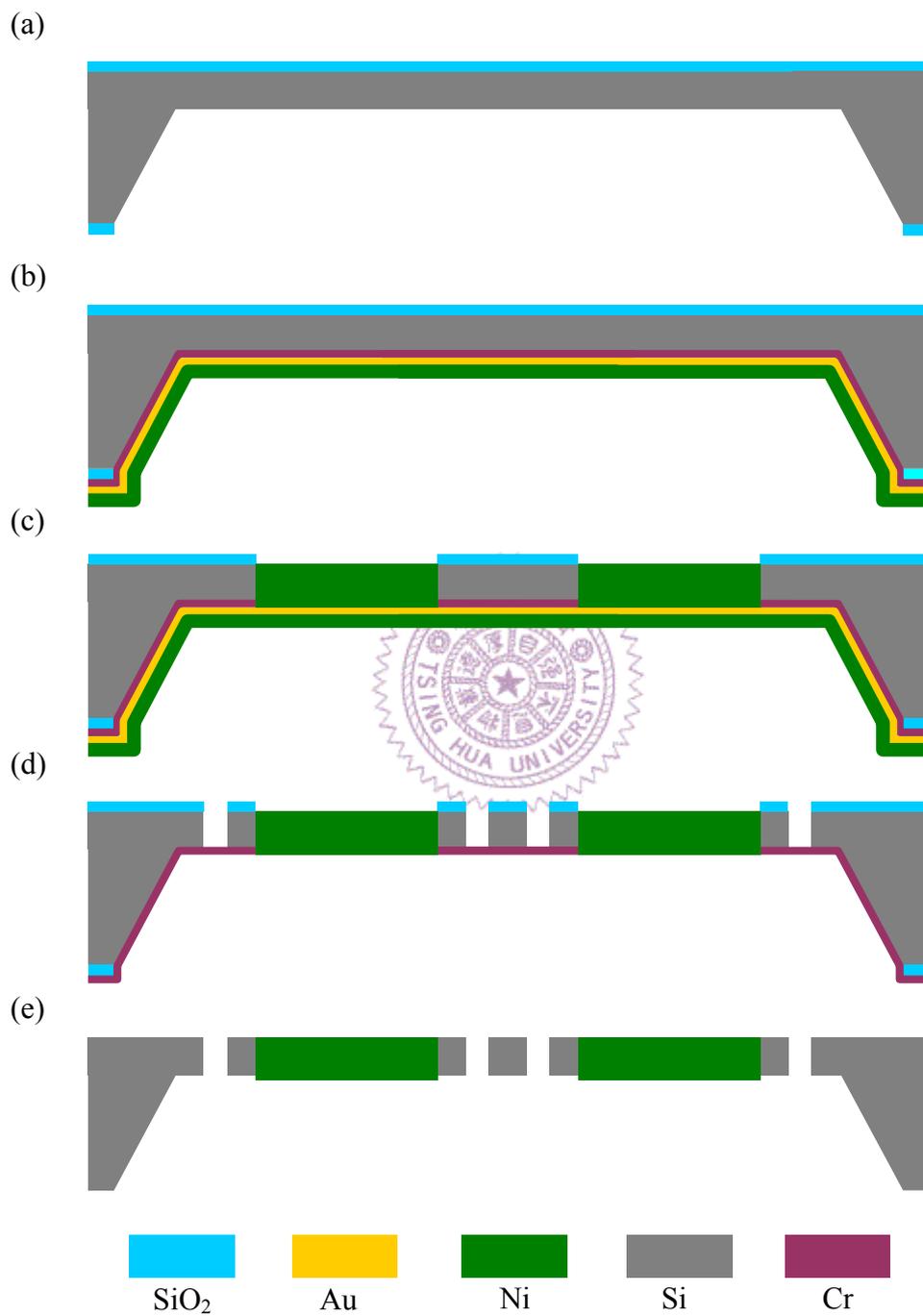


圖4-6 內嵌磁性材料之微掃描面鏡製作流程圖

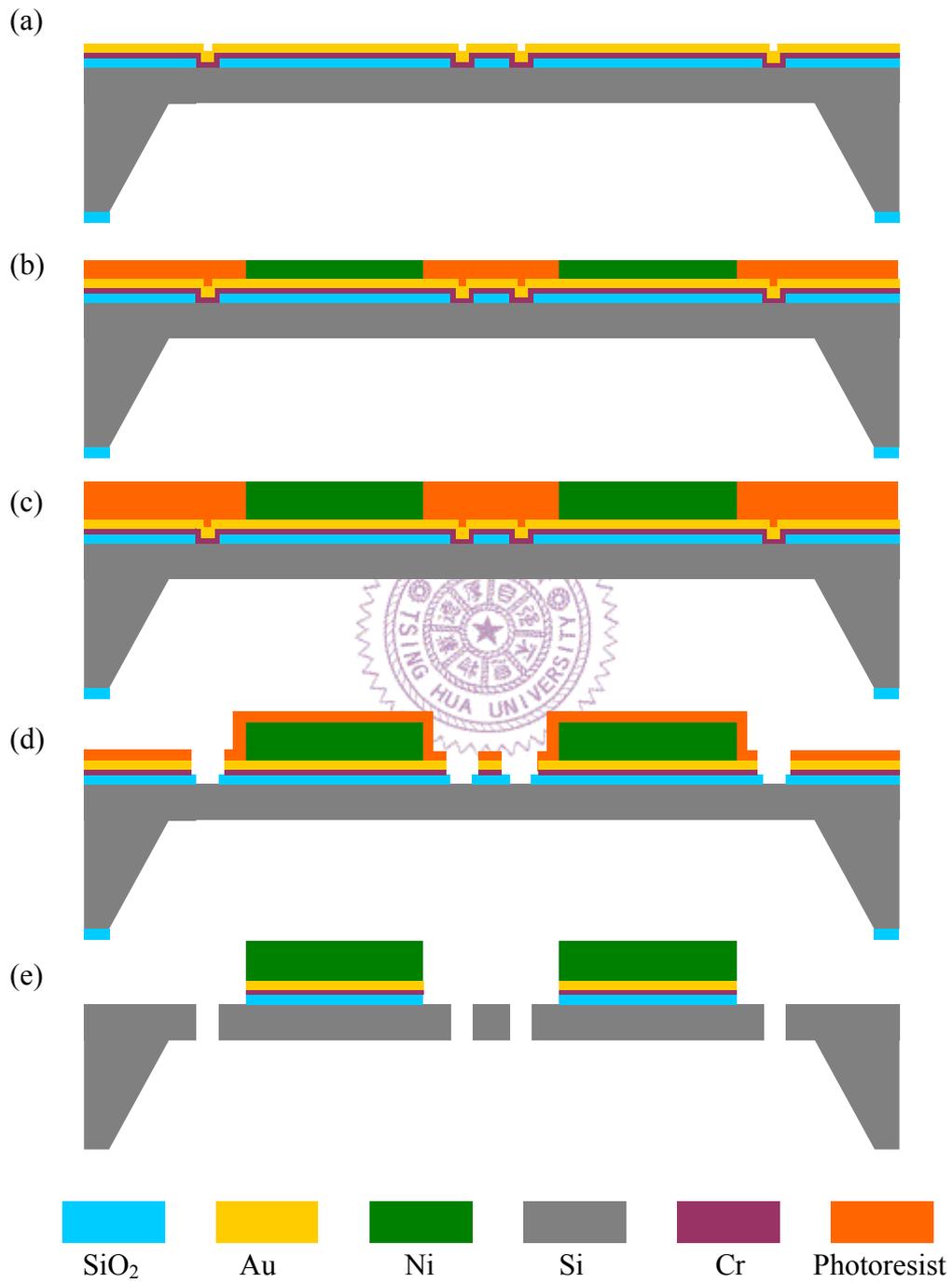


圖4-7 傳統微掃描面鏡之製作流程圖

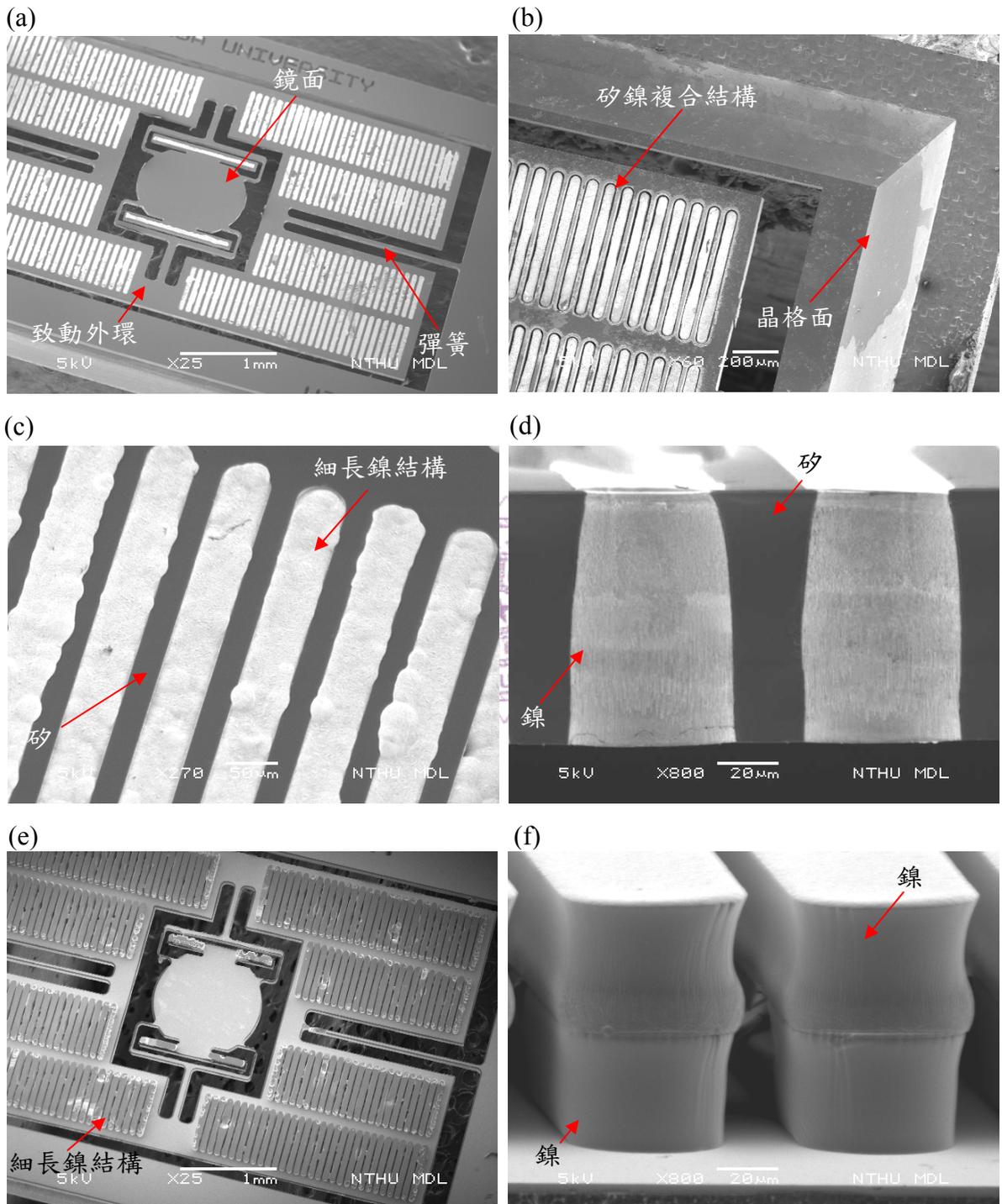


圖4-8 製程結果之電子顯微鏡照片

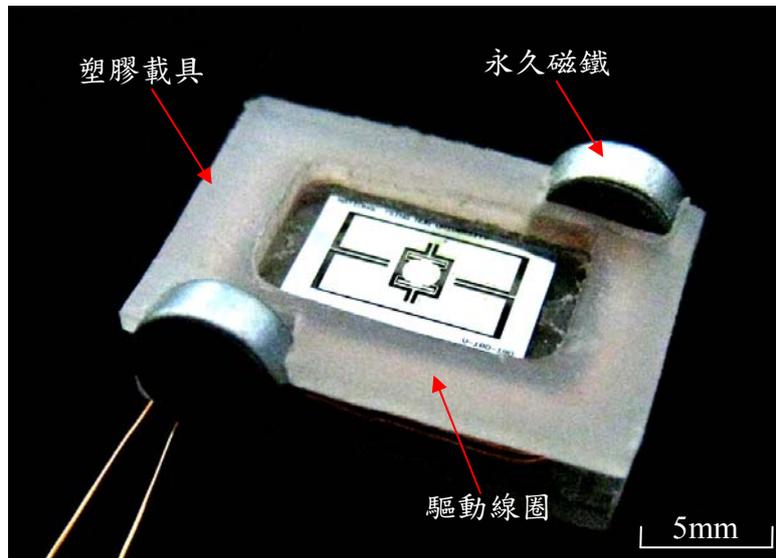


圖4-9 驅動載具

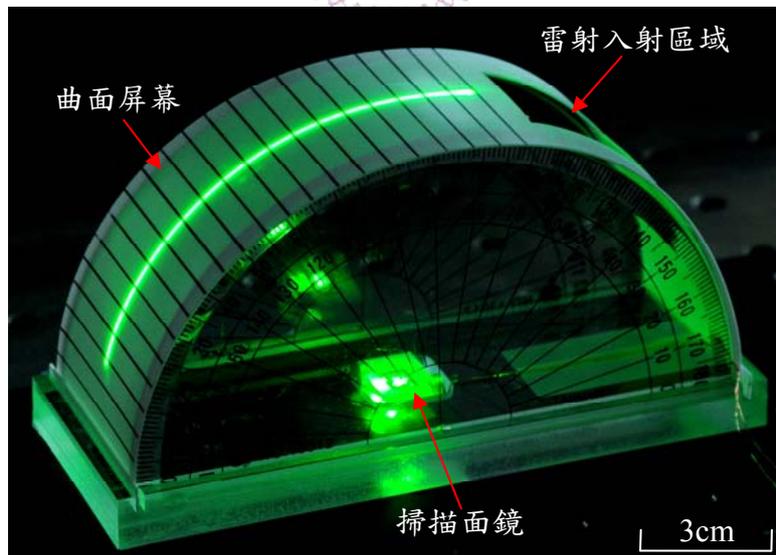


圖4-10 光學掃描角度量測平台

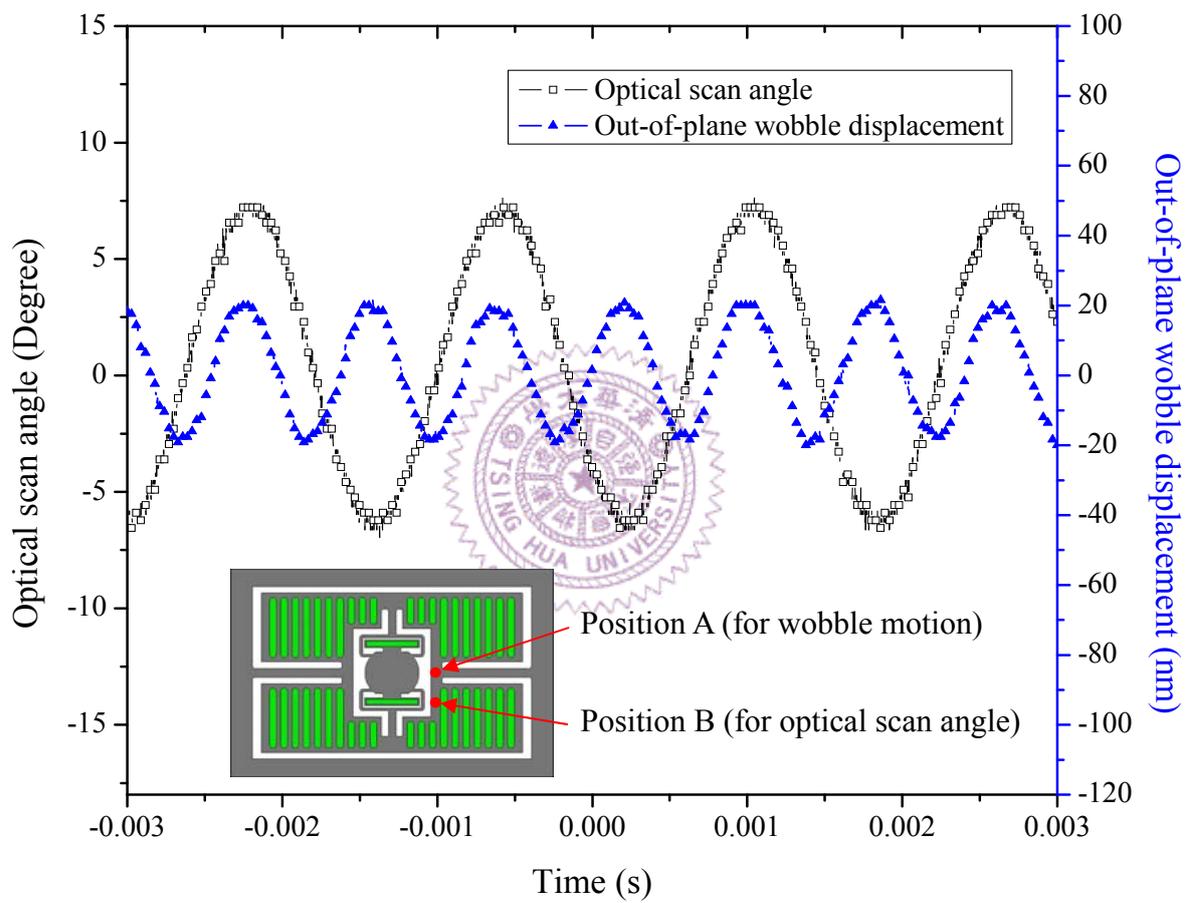


圖4-11 致動外環出平面擺盪之動態響應

第5章 複合電磁致動力之微掃描面鏡設計

前述章節已提出具有大致動力之靜磁式掃描面鏡，但其靜磁致動力於高操作頻率下要達到足夠之大轉角仍略顯不足，因此本章節擬進一步利用勞侖茲力驅動微掃描面鏡，並整合鏡面上之致動懸臂產生之靜磁力，以達到複合電磁致動力設計，並藉由特殊磁路設計，提供高集中度之磁場，使元件可達到循序掃描軌跡。本設計具有兩個主要特色：(1)整合勞侖茲力與靜磁力之致動方式於單一晶片上，實現複合電磁致動力設計，(2)採用三維磁鐵陣列以得到高強度之集中磁場，同時避免需要龐大外部磁鐵之問題。本章節針對複合致動概念與磁路設計進行分析，並量測掃描角度以驗證此設計。在應用方面，此微掃描面鏡以循序掃描的方式配合上雷射訊號編碼，可投影測試圖形於屏幕上，以實現微投影顯示之基本架構。

5-1 前言

以微機電技術所製作之電磁式致動器，其運作原理基本上皆是藉由通以電流之線圈與磁性材料彼此的交互作用產生驅動力，但由於磁場強度會隨距離的平方衰減，為了提升電磁致動器之效能，除了可使驅動線圈或磁性材料能產生更強之磁場外，還可使線圈與磁性材料之間距越小越好，因此有多種微型驅動線圈設計可驅動微磁性元件[78-79]。但製作於晶片上之微型線圈效能與磁性材料所能提供的磁場通常有限，為了達到更好之元件操作特性，通常都是使用外部組裝的方式，將永久磁鐵或高匝數之線圈與晶片整合[80-82]，而整體封裝的磁路設計，則會直接影響到元件所在位置之磁場強度與分佈，進而改變元件致動效率。

本章節提出複合電磁致動力之微掃描面鏡設計，主要有兩種致動力來源，第一為線圈與永久磁鐵所提供之磁場交互作用所產生的勞侖茲力，另一為線圈所提供之交變磁場與致動懸臂交互作用所產生的靜磁力。由於具有致動懸臂之鏡面位於致動線圈中心，因此能使磁場源與磁性材料之間距達到最小，以最佳之致動效率實現整合勞侖茲力與靜磁力之複合致動概念。此外，利用改良式 Halbach 三維磁鐵陣列提供外部磁場，以封閉磁路之設計方式將磁鐵封裝體積減小，磁場強度

增強。本章節建立了此複合電磁致動力設計之相關製作流程，並於量測結果驗證此設計。

5-2 元件設計

首先針對勞倫茲力致動原理進行理論分析與推導，並對此設計之兩大特色：(1)複合電磁致動力設計，(2)三維磁鐵陣列設計進行討論，以了解此設計概念與實現方法。

5-2.1 勞倫茲力致動原理

當一帶電粒子於電磁場中運動時，則會產生一電磁力 F_{EM} 於粒子上，如圖 5-1 所示，通常可以表示為[83]

$$F_{EM} = q(E_{field} + v \times B_{field}) \quad (5-1)$$

其中 q 為粒子所帶之電荷量， E_{field} 為粒子所在位置之電場， v 為粒子移動速度向量， B_{field} 為粒子所在位置之磁場向量。此作用力主要包含電力(electric force)與磁力(magnetic force)兩項，電力為公式(5-1)中之 qE_{field} ，其施加方向與電場方向相同；磁力為公式(5-1)中之 $qv \times B_{field}$ ，即為勞倫茲力，其方向垂直於速度和磁場方向，一般可遵照右手定則來得知其方向。延伸公式(5-1)，若有一導線通以電流 $I_{current}$ 並位於磁場 B_{field} 之環境下，做用於其上之勞倫茲力 $F_{Lorentz}$ 可表示為

$$F_{Lorentz} = I_{current} \int dL_{current} \times B_{field} \quad (5-2)$$

其中 $L_{current}$ 為導線長度向量，其方向與電流方向相同。一般以勞倫茲力致動之微掃描面鏡，通常如圖 5-2 所示，具有平面線圈製作於外環上，呈現螺旋型之環繞線圈，假設此平面線圈有 n 匝，且磁場方向與 y 軸之夾角為 θ_{mag} ，作用於 y 軸之力矩可表示為

$$T_{Lorentz} = I_{current} B_{field} \sin \theta_{mag} \sum_{n=0}^{n-1} (L_0 + 2n \cdot \Delta L)(W_0 + 2n \cdot \Delta W) \quad (5-3)$$

其中 L_0 為第一匝線圈之長邊長度， ΔL 為線圈長邊間距， W_0 為第一匝線圈之短邊長度， ΔW 為線圈短邊間距。當磁場與 y 軸間具有特定夾角時，會造成外環上側與右側產生沿 $+z$ 方向面之力，下側與左側產生沿 $-z$ 方向之力，簡而言之，此夾角可以使產生的勞倫茲力力矩能同時作用於微掃描面鏡之兩個扭轉軸上，並可藉由調整夾角 θ_{mag} 來改變作用於兩個掃描軸上之力矩分量。由圖 5-2 中可發現鏡面上並無驅動線圈，而其致動方式則是利用 x 軸上之力矩分量，使外環沿著 x 軸有微小的扭轉振動，進而激振鏡面達到其共振模態，因此可得到圖 2-14 中之典型同相位與反相位模態。藉由觀察公式(5-3)中各項參數之關係，得知可利用增加外部磁場強度 B_{field} 與導線匝數 n 來提升致動力矩，並且所產生之力矩與驅動電流成正比，配合公式(3-4)則可計算出此微掃描面鏡所能達到的機械掃描角度 θ_{mech} 。



5-2.2 複合電磁致動力設計

本研究將此複合電磁致動力設計實現於(100)晶片上，其元件架構如圖 5-3 所示，圖 5-3(a)為此微掃描面鏡之正面示意圖，主要結構由鏡面、扭轉彈簧與致動外環所組成。鏡面周圍有四組靜磁力致動懸臂，具有磁性材料沉積於其上，致動外環上具有螺線型之電流繞線，利用電極通入電流後可與外部磁場交互作用產生勞倫茲力，除此之外，此電流繞線即可視為一平面線圈，本身亦可產生一出平面磁場作用於鏡面所在區域，因此配合鏡面上的致動懸臂設計，則可更進一步的產生靜磁力作用於鏡面上，以實現複合電磁致動力之微掃描面鏡設計。圖 5-3(b)為此微掃描面鏡背面示意圖，可觀察到(100)矽晶片經蝕刻加工技術薄化結構，使鏡面本身為一平板結構，且晶片四個邊角利用濕蝕刻凸角補償技術保留下來，以避免晶片進行打線接合(wire bonding)時造成薄化之平板結構破損。

利用有限元素分析軟體 Ansoft Maxwell 對致動外環上之平面線圈進行磁場模擬，以 12 匝之平面線圈，通以最大電流 80mA 的條件下進行模擬，其模擬結果如圖 5-4 所示，本研究為了提升平面線圈之磁場集中度，因此設計了兩種形狀

之線圈，分別為圖 5-4(a)中之環形線圈與圖 5-4(b)中之十字形線圈，環形線圈與致動懸臂端點之最近距離為 150 μm ，而十字形線圈與致動懸臂最近距離為 100 μm 。由模擬結果可觀察到鏡面所在區域之磁場強度隨著距離線圈越遠而衰減，且環形線圈與十字形線圈之平均強度分別為 730A/m 與 950A/m，因此十字形線圈所產生的磁場相較於環形線圈有較佳之磁場集中度。本研究將會於後續章節製作此兩類型之驅動線圈，以驗證十字形線圈具有較佳的靜磁致動力。

5-2.3 三維磁鐵陣列設計

Halbach 陣列為一種增加磁場強度之永久磁鐵排列方式，過去已廣泛的應用在各式馬達與發電機上，其概念如圖 5-5 所示，假設一永久磁鐵所能提供之強度為 B_{field} ，並將兩顆磁鐵磁化方向排列如圖 5-5(a)所示，則會於磁鐵上方與下方都產生強度 B_{field} 之磁場，其磁力線方向如紅色箭頭所示，若是於兩個永久磁鐵間加入另一顆磁化方向朝左之磁鐵如圖 5-5(b)所示，其磁力線方向如藍色箭頭所示，則可發現磁鐵陣列上方之磁力線方向相同，因此磁場強度加倍約為 $2B_{field}$ ，同理磁鐵陣列下方之磁力線方向相反，磁場則會相互抵消，造成磁鐵陣列磁場強度近似於零。本研究利用 Halbach 磁鐵陣列之特性，進行磁路設計，將一維陣列之概念延伸為三維陣列，提供致動微掃描面鏡所需之高強度磁場。

本研究使用鈹鐵硼燒結之永久磁鐵(Nd-Fe-B sintered magnet)製作 Halbach 陣列，磁鐵材料之殘磁密度(residual flux density)約為 1.22Tesla，矯頑力(coercive force)大小約為 860KA/m。一般磁場強度會隨距離平方衰減，因此元件要能離磁極越近則越佳，此外磁鐵配置之設計要盡可能達到封閉磁路，以避免不必要的磁力線發散而產生電磁干擾。根據上述原則，本論文利用壓克力載具固定磁鐵陣列，其架構與配置如圖 5-6(a)所示，綠色區域為切割剖面，以便了解載具內部配置。上下的壓克力載具可利用載具外框調整彼此間距 d_{gap} ，微掃描面鏡則放置於載具中央，鏡面上方之磁鐵陣列保留一區域，提供雷射入射與反射所需路徑，詳細的三維磁鐵陣列如圖 5-6(b)所示。

利用有限元素分析軟體 Ansoft Maxwell 可以模擬此磁鐵陣列之磁場方向與強度分佈。圖 5-7 為本論文所設計之磁鐵陣列模擬結果，圖 5-7(a)為磁鐵陣列之側視圖，紅色箭頭表示各磁鐵之磁化方向，藉由圖中紅色箭頭之配置方式，將上

下兩組磁鐵陣列之強磁側互相靠近，以壓縮磁場之方式強迫提升此間隙中的磁通量密度，得到高強度之磁場，同時也可使原本出平面方向(z 軸方向)之磁場轉變成與晶片同平面方向(x 軸方向)。圖 5-7(b)為晶片所在位置之磁場分佈上視圖，紅色箭頭表示下層磁鐵陣列之磁化方向，由其模擬結果可以看出中心磁場呈現斜向分佈，因此微掃描面鏡上之勞侖茲力力矩可因此斜向磁場同時作用於兩個掃描軸向上。若是改變上下兩組磁鐵陣列之間距 d_{gap} ，則可於晶片表面位置得到不同之磁場強度，因此沿著圖 5-7(b)中紅色虛線之方向，可繪製出不同位置 d_{mag} 之磁場分佈狀況，如圖 5-8 所示，灰色區域為微掃描面鏡驅動線圈所在位置，當磁鐵陣列間距 d_{gap} 由 3mm 縮小至 1mm 時，磁場強度則由 0.59 Tesla 提升至 0.73 Tesla，且除了 1mm 陣列間距之情況外，其他條件之磁場分佈強度具有相當之均勻度。

5-3 製作流程與結果

為實現本研究提出之複合電磁致動力之微掃描面鏡，其製程整合如圖 5-9 所示，首先選用(100)晶片來進行製程，經過高溫爐管成長 $1\mu\text{m}$ 二氧化矽層於晶片正反面，並定義正面之對準圖形(alignment key)與背面的濕蝕刻遮罩，並以電子束蒸鍍法沉積 $0.5\mu\text{m}$ 之鋁於晶片表面，且定義為第一層金屬導線，如圖 5-9(a)所示。利用電漿輔助化學氣相沉積法沉積 $0.5\mu\text{m}$ 二氧化矽於鋁導線上，並以反應離子蝕刻機定義電流通孔(via)之位置，如圖 5-9(b)所示。以電子束蒸鍍法沉積 150\AA 黏著層鈦與 1500\AA 電鍍起始層銅於晶片表面，以電鍍鎳的方式製作第二層金屬導線，厚度約 $10\mu\text{m}$ ，接著利用蝕刻液將電鍍起始層金與黏著層鎳移除，如圖 5-9(c)所示。以黃光製程定義微掃描面鏡之結構形狀，同時以反應離子蝕刻機定義正面二氧化矽層，此時光阻暫不移除以當作結構之蝕刻遮罩，如圖 5-9(d)所示。使用特製夾具保護晶片正面之結構，以氫氧化四甲基銨之濕式體蝕刻加工技術薄化晶片，使微掃描面鏡之單晶矽結構厚度約為 $75\mu\text{m}$ ，再以深式反應離子蝕刻機進行正面結構之定義，懸浮結構後再移除表面之光阻，如圖 5-9(e)所示。最後使用反應離子蝕刻機移除晶片表面之二氧化矽層，以裸露出第一層鋁導線，提供後續打線接合之用，即可完成晶片製作，如圖 5-9(f)所示。

圖 5-10 之電子顯微鏡照片為典型製程結果，圖 5-10(a)與圖 5-10(b)分別為環

形線圈與十字形線圈設計，元件本身為雙環結構，致動線圈製作於外環上，且鏡面之邊緣有四組靜磁力致動懸臂。圖 5-10(c)與圖 5-10(d)分別為鏡面區域與驅動線圈之放大電子顯微鏡照片，可清楚地看到四組致動懸臂上具有與驅動線圈相同厚度之鎳結構，且鏡面上沉積鋁薄膜以提升鏡面反射率。圖 5-10(e)為晶片背面之電子顯微鏡照片，可清楚看到晶片經蝕刻加工後薄化為一平板結構，此外圖 5-10(f)為晶片背面邊角之局部放大圖，可以觀察到利用濕蝕刻凸角補償技術所產生之晶格面，且照片右上方之邊角仍具有原始晶片 525 μm 之厚度，可避免晶片進行打線結合時產生破損。

本研究同時製作了複合電磁力致動概念之驗證元件，如圖 5-11 所示，其結構幾何尺寸與圖 5-10 中之標準製程結果皆相同，但在此致動外環並未懸浮，亦即僅有鏡面與靜磁力致動懸臂為懸浮結構。在圖 5-11(a)與圖 5-11(b)中分別為環形線圈與十字形線圈設計之驗證元件，且可看到外環結構與基材本身相連。在圖 5-11(c)與圖 5-11(d)中分別為環形線圈與十字形線圈設計之細部放大圖，可以清楚看到靜磁力致動懸臂與線圈之間距差異，在後續章節中會以此驗證元件證明十字形線圈設計有較佳之磁場集中能力。

5-4 量測與討論

複合電磁致動力設計之微掃描面鏡驅動載具上視圖如圖 5-12 所示，主要由內含磁鐵陣列之壓克力載具、微掃描面鏡、電路板與電性連接插槽所組成，製作完成之壓克力載具外部尺寸為 16mm \times 16mm \times 14mm，鏡面上方之雷射入射/反射區域大小為 4mm \times 4mm，可提供微掃描面鏡於 60 度光學掃描角度以內之操作狀況下使用。此外晶片藉由打線接合之方式將電性與電路板相連，且電路板利用電性連接插槽將外部驅動元件之電訊號傳入晶片。為了提供磁場方向之多變性，亦即可改變不同鏡面軸向之驅動力矩大小，因此可將圖 5-12(a)中的磁鐵陣列載具旋轉 90 度，如圖 5-12(b)所示，即可以不同的配置方式與電路板上之微掃描面鏡結合。圖 5-13(a)為此磁鐵陣列驅動載具之側視圖，可觀察到電路板經特殊加工技術薄化其厚度，使其由電性連接插槽處之 2mm 厚，減低至晶片所在位置的 300 μm 厚，再由右側插入至壓克力載具中，圖 5-13(b)為載具區域之局部放大圖，可清楚觀察到微掃描面鏡晶片黏著於薄化之電路板上，且利用打線接合之方式進

行電性連結，此外上下方之磁鐵陣列間距約為 1.5mm，可利用載具外框來調整此間距，進而藉此調整間隙處之磁場強度，利用磁力計直接量測晶片所在位置之磁場強度，約為 0.54Tesla，此量測結果驗證此三維磁鐵陣列的確可以有效的提供高強度之集中磁場，且晶片也能以插卡之模組化方式配置於此磁鐵陣列間隙中。

首先針對圖 5-11 中之複合致動概念驗證元件進行量測，為了確保所有靜磁力致動懸臂皆具有相同的殘磁強度，因此晶片在量測前都先經過強度約 0.54Tesla 的外界磁場進行磁化，再將驅動電流通入線圈，並量測共振狀況下之光學掃描角，十字形驅動線圈與環型線圈操作頻率皆約為 16440Hz，量測結果如圖 5-14 所示，在相同的驅動電流下，由於十字形驅動線圈有著較佳之磁場集中度，因此所產生的交變磁場能驅動致動懸臂得到較大的光學掃描角度。當驅動電流大於 60mA 時，可發現掃描角度呈現不穩定之增加趨勢，且當電流大於 80mA 後，電流強度增加卻造成掃描角度減小，造成此現象之主要原因為高電流會造成導線生熱，使得結構剛性因高溫而降低，當溫度過高時線圈則產生脫層，因此致動力減小造成角度衰減。本量測結果成功驗證此兩種設計之平面線圈皆能有效產生磁場作用於致動懸臂上，進而驅動微掃描面鏡，但其光學掃描角則過小，進一步比較此平面線圈與圖 3-12 中之驅動載具所產生之交變磁場強度同樣約為 1000A/m 左右，因此造成此角度過小之主要原因為此鏡面扭轉剛性過大與致動懸臂上之鐵磁性材料不足。

針對複合電磁致動力設計之雙軸微掃描面鏡進行結構動態量測，根據圖 5-14 中之量測結果可發現當驅動電流超過 60mA 時，元件開始呈現不穩定之狀態，因此設定後續量測之最大操作電流為 45mA。本文分別量測環形與十字形驅動線圈之驅動電流與掃描角度關係，此兩種設計除了致動外環與驅動線圈之形狀不同外，其餘尺寸皆相同，量測結果如圖 5-15 所示。為使元件達到循序掃描軌跡路徑，因此使微掃描面鏡操作於非結構共振頻率的 60Hz 下，掃描角度隨驅動電流增加而線性增加，環形線圈與十字形線圈於 45mA 之驅動電流下可分別達到 6.4 度與 4.9 度的光學掃描角，因環形線圈相對於扭轉軸而言有較長之力臂，因此相較於十字形線圈有較大的光學掃描角度。另外針對微掃描面鏡快軸掃描角度進行討論，當結構操作於共振頻率時，環形線圈與十字形線圈於 45mA 之驅動電流下皆可達到 36 度的光學掃描角，由於不同形狀的驅動線圈對於致動懸臂所產生的致動力差異不大，因此大角度的操作情況下，還是以勞倫茲力為主要致動力，造

成掃描角度相同之量測結果。

當微掃描面鏡高頻且大角度操作時，鏡面會因為本身的慣性力與扭轉彈簧造成的反作用力會使鏡面變形，因此可使用白光干涉儀(white light interferometer)之動態微機電元件量測模組(DMEMS module)，利用閃頻(stroboscope)的方式進行鏡面動態變形之量測。首先針對鏡面未致動時之靜止狀態進行量測，其量測結果如圖 5-16 所示，可發現鏡面表面已有明顯預變形，其曲率半徑為 0.49m，此為鏡面結構上二氧化矽與鋁反射層本身薄膜應力所造成的結構變形。當元件操作於 20883Hz 與光學掃描角 30 度之狀況下時，量測鏡面動態變形之狀況，結果如圖 5-17 所示，可發現鏡面變形呈現三角形的輪廓。若是僅考慮慣性力與彈簧反作用力造成之鏡面變形，可將圖 5-17 與圖 5-16 的量測結果相減，可得到圖 5-18(a)之結果，由於快軸扭轉彈簧主要位於鏡面之左右兩端，因此可發現鏡面邊緣與快軸彈簧連接處之變形較為嚴重，由圖 5-18(b)中更能清楚觀察到此現象，量測結果顯示慣性力與彈簧反力所造成之鏡面動態變形為 178nm，與 $\lambda/10$ 之設計規範仍有一段差距，在未來可利用多接點結構或剛性補強結構來降低鏡面動態變形 [84-85]。

由於此微掃描面鏡可以達到循序掃描軌跡，因此本研究嘗試以此元件進行影像投影，其影像量測平台架設如圖 5-19 所示，圖 5-19(a)為商用雷射光學模組與微掃描面鏡模組相對位置關係，此雷射光學模組可以靠外界訊號編碼提供脈衝雷射入射至微掃描面鏡上，雷射之入射角越小越佳，以避免投影至屏幕上之畫面產生扭曲(distorsion)，實際投影出之二維影像如圖 5-19(b)所示，投影影像之四邊因雷射掃描速度最慢，因此造成亮度較亮。本研究進一步利用圖形化程式語言軟體 LabVIEW 進行雷射脈衝訊號編碼，配合上任意波形產生器(NI 5411)控制雷射光學模組，並同時與驅動微掃描面鏡之訊號源同步，即可達到影像投影之目的，其結果如圖 5-20 所示，文字與灰階圖塊皆可成功投影於屏幕上，此畫面編碼可達到 WVGA 854x480 之影像解析度，但可發現影像有些許之模糊，主要是因為鏡面結構本身之預變形，會使入射於鏡面上之光點輕微發散，可將鏡面上之二氧化矽層去除來提升鏡面平坦度。

5-5 小結

本章節提出複合電磁致動力設計，除了使用勞侖茲力驅動微掃描面鏡外，還在鏡面側邊加上四組致動懸臂，且有細長之磁性材料沉積於其上，因此產生勞侖茲力的線圈本身還可產生磁場作用於中心鏡面區域，進而產生靜磁力作用於鏡面上，因此可在單一晶片上同時整合勞侖茲力與靜磁力，實現複合電磁致動力之微掃描面鏡設計。另外於驅動載具方面，設計三維磁鐵陣列以得到高強度之集中磁場，可達到 0.54Tesla 之磁場強度，相較於過去技術而言可大幅減少外部組裝磁鐵之體積。量測結果顯示，此微掃描面鏡能以循序掃描方式進行影像投影，於 45mA 之驅動電流下，快軸與非共振慢軸最大掃描角度分別為 36 度與 6.4 度，且慣性力造成之鏡面動態變形為 178nm。本研究也結合商用雷射光學模組與訊號編碼，實現投影測試圖形之系統驗證，其編碼解析度可達到 WVGA 之影像規格。



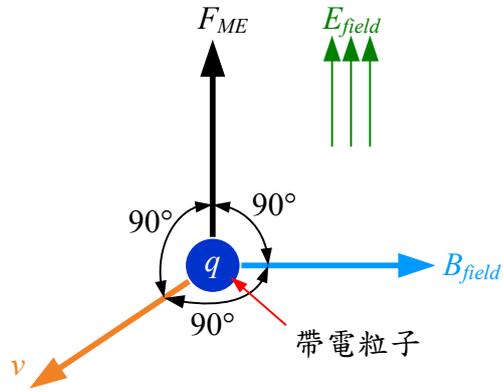


圖5-1 電磁力產生機制

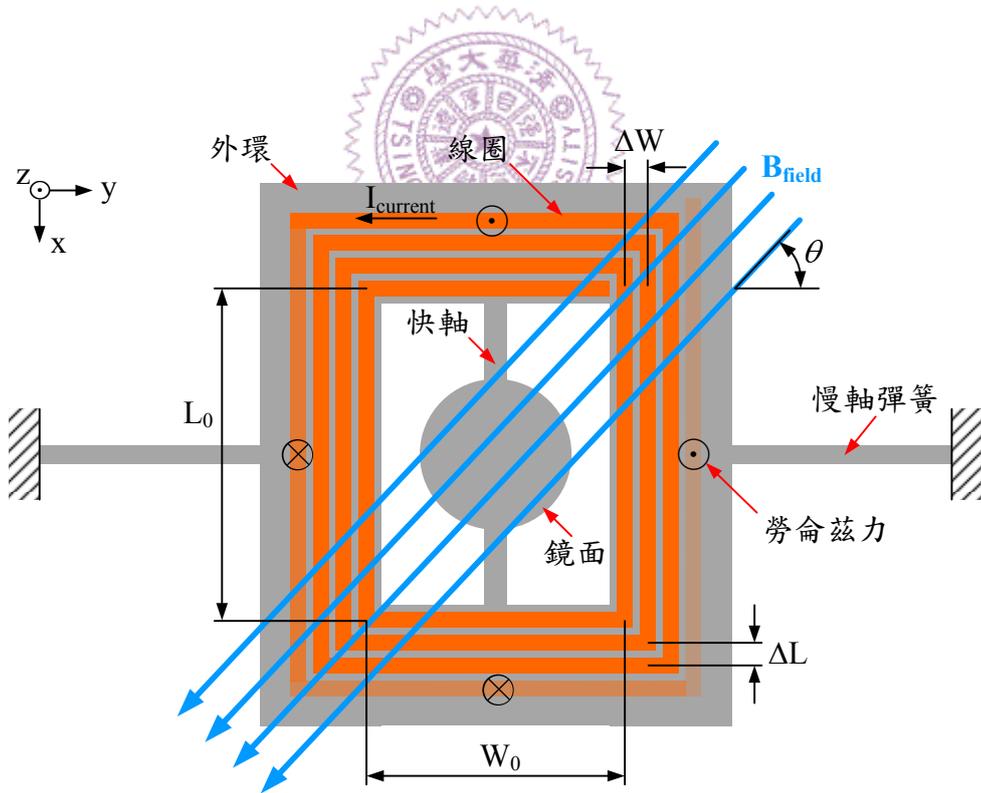


圖5-2 勞侖茲力致動概念圖

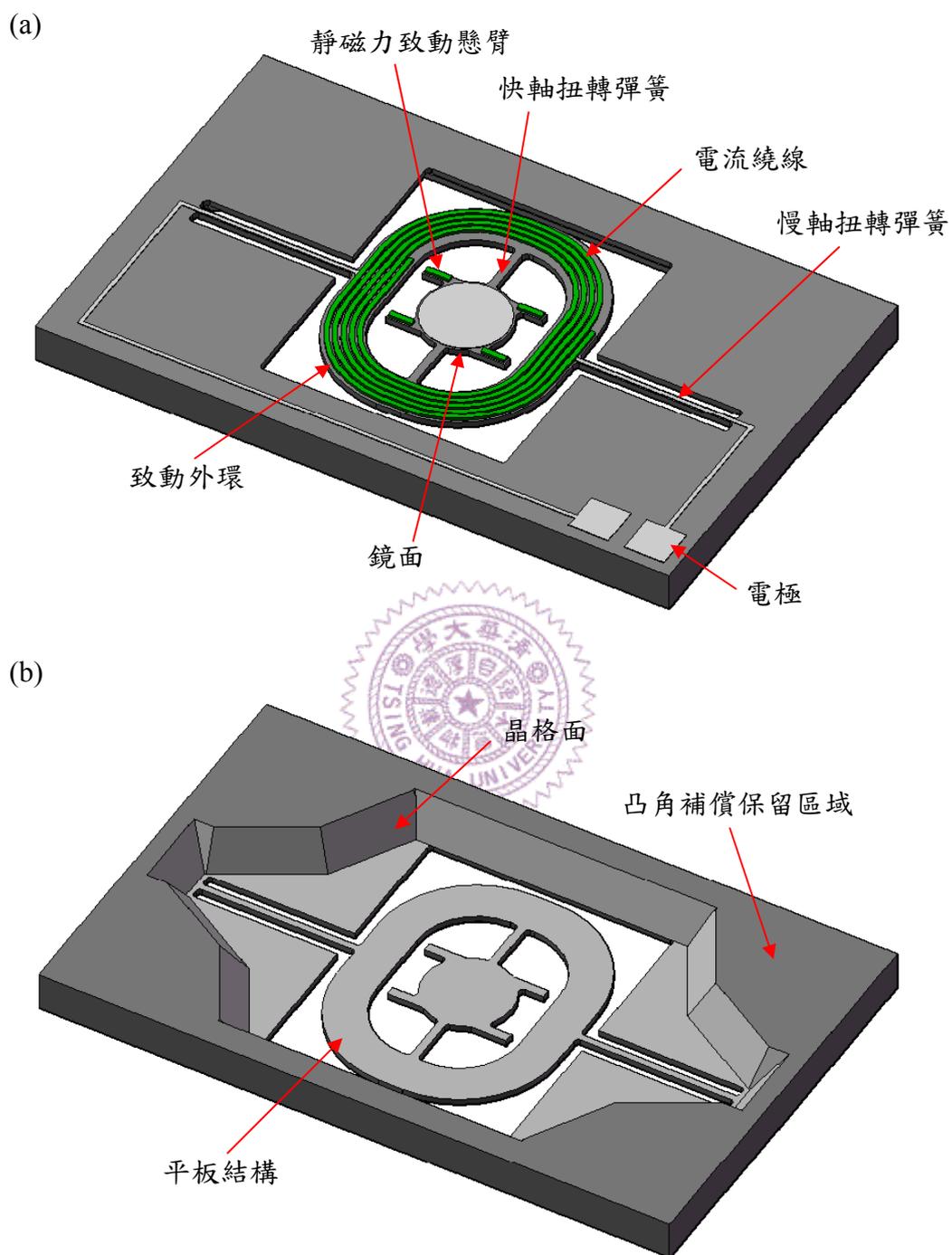


圖5-3 複合電磁致動力之微掃描面鏡設計架構

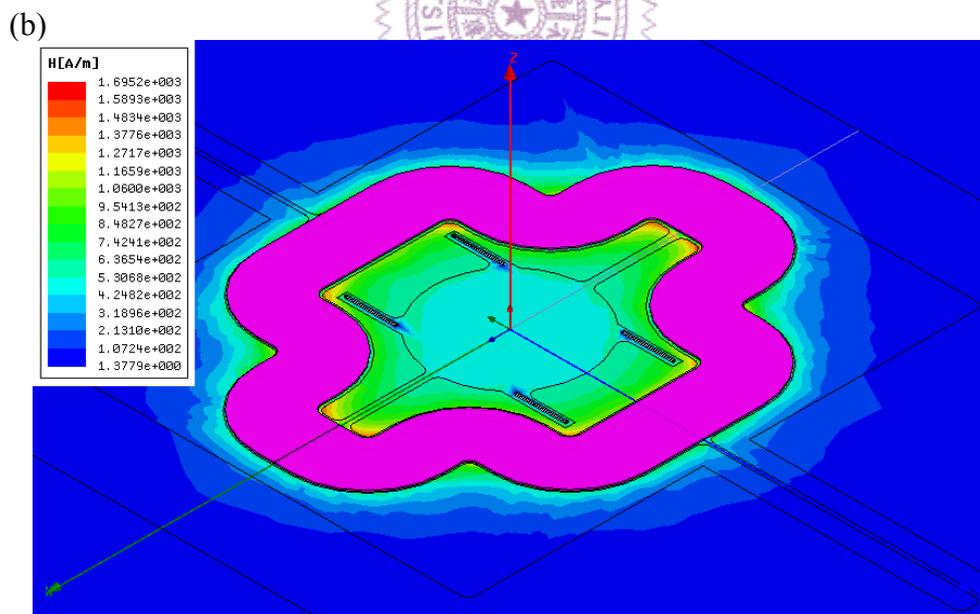
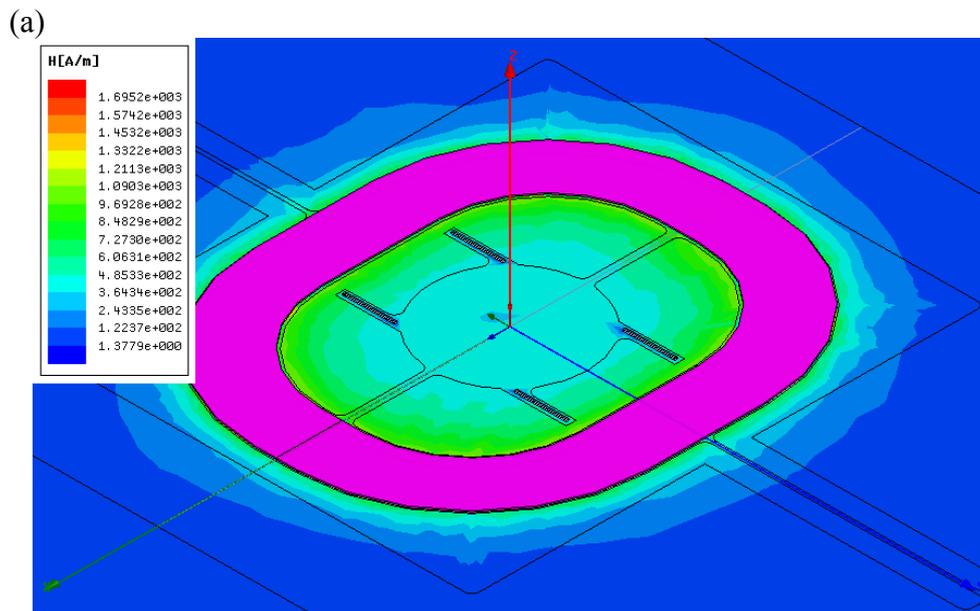


圖5-4 平面線圈之磁場強度

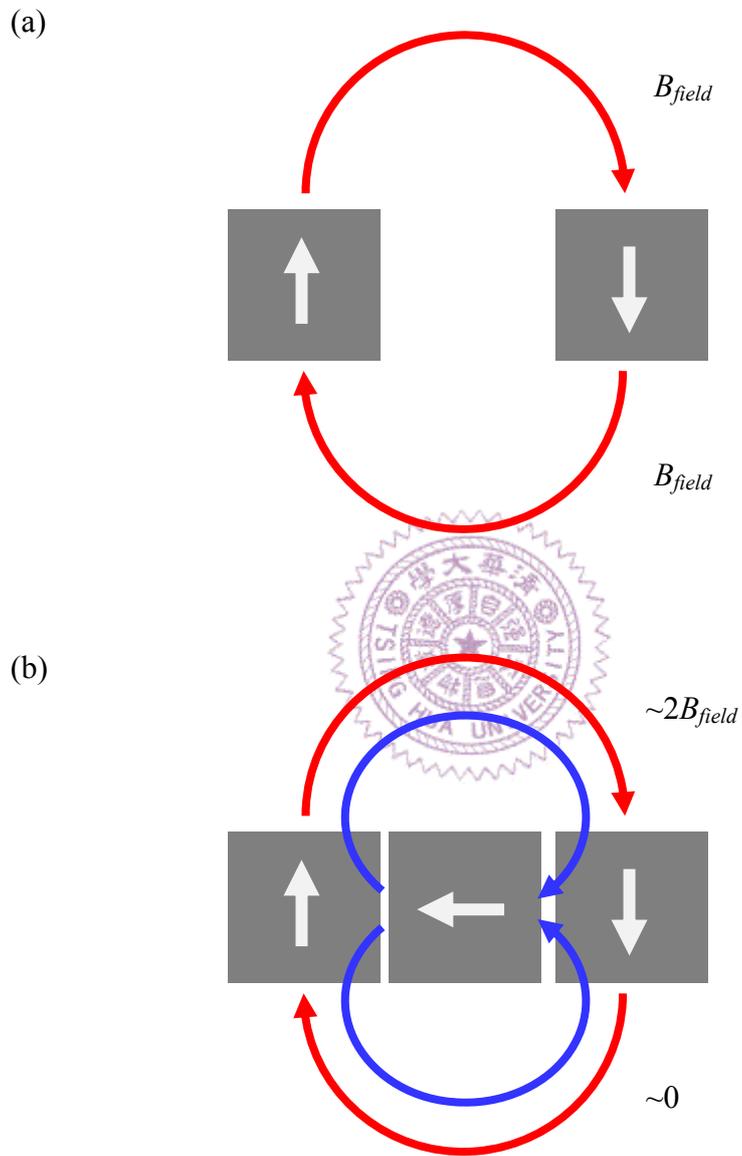


圖5-5 Halbach array 原理

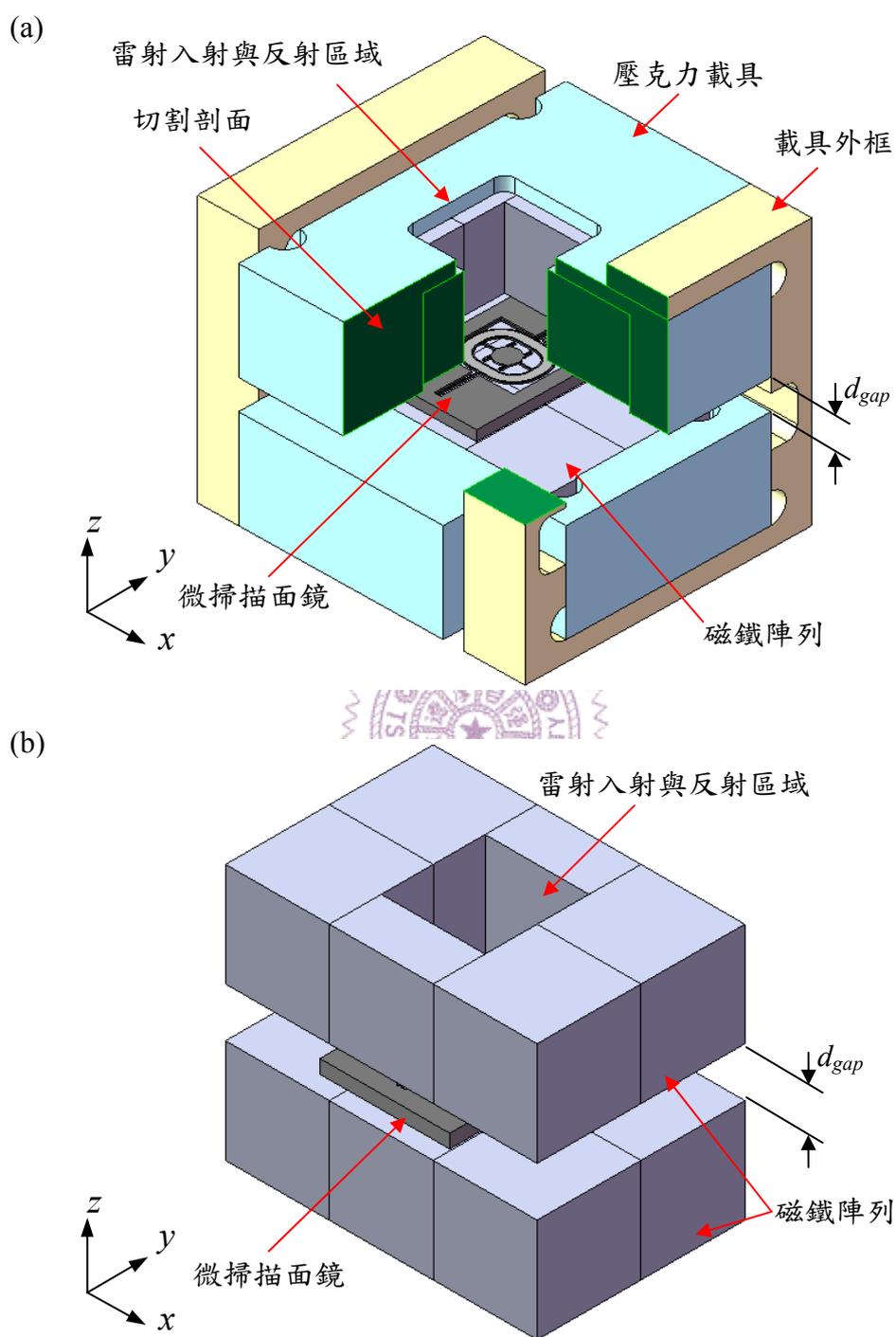


圖5-6 磁鐵陣列組裝架構

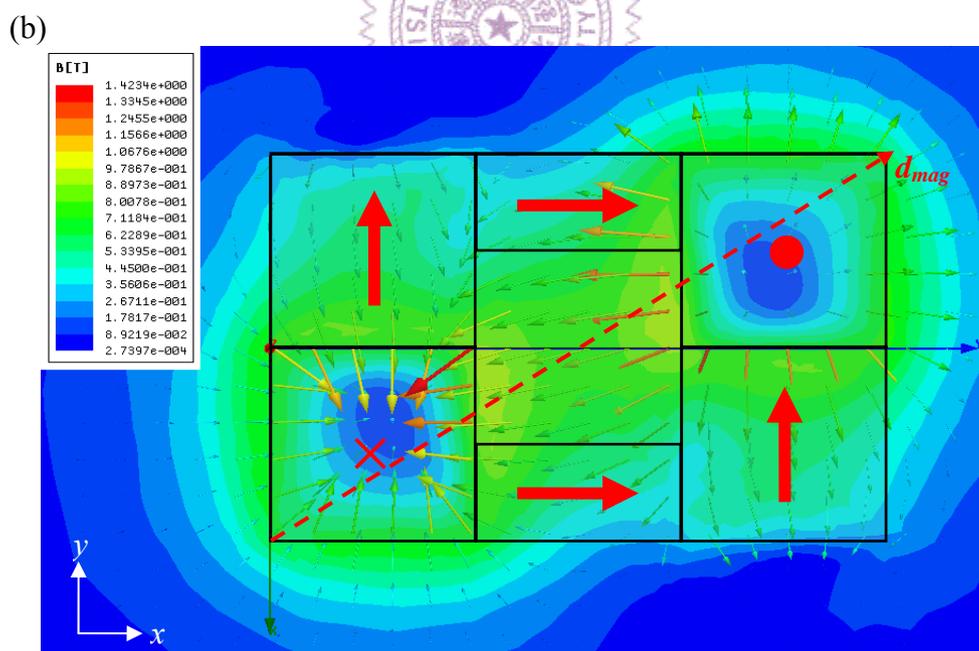
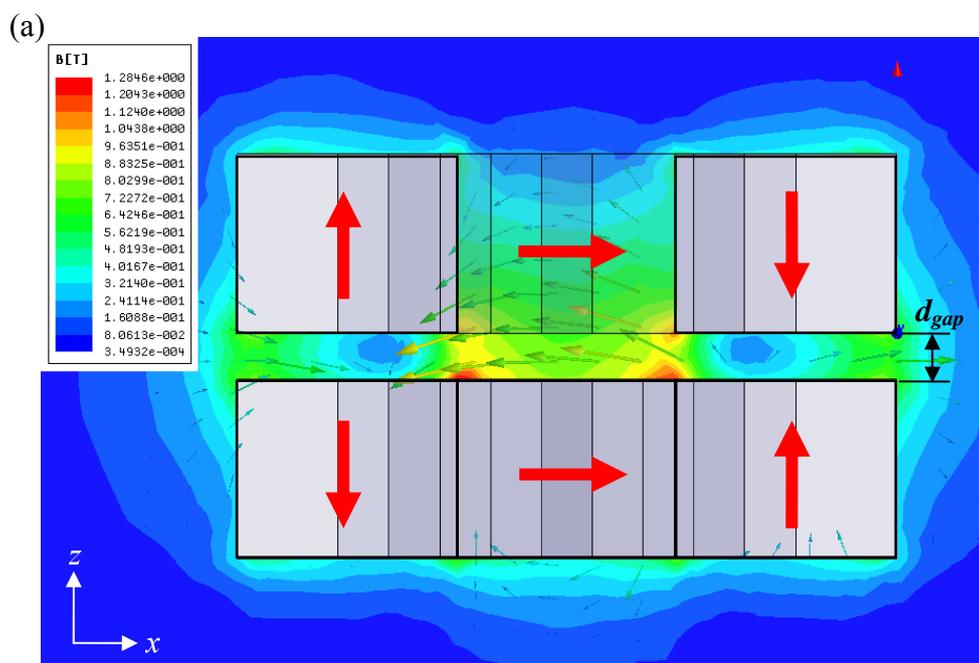


圖5-7 磁鐵配置與磁場分佈情形

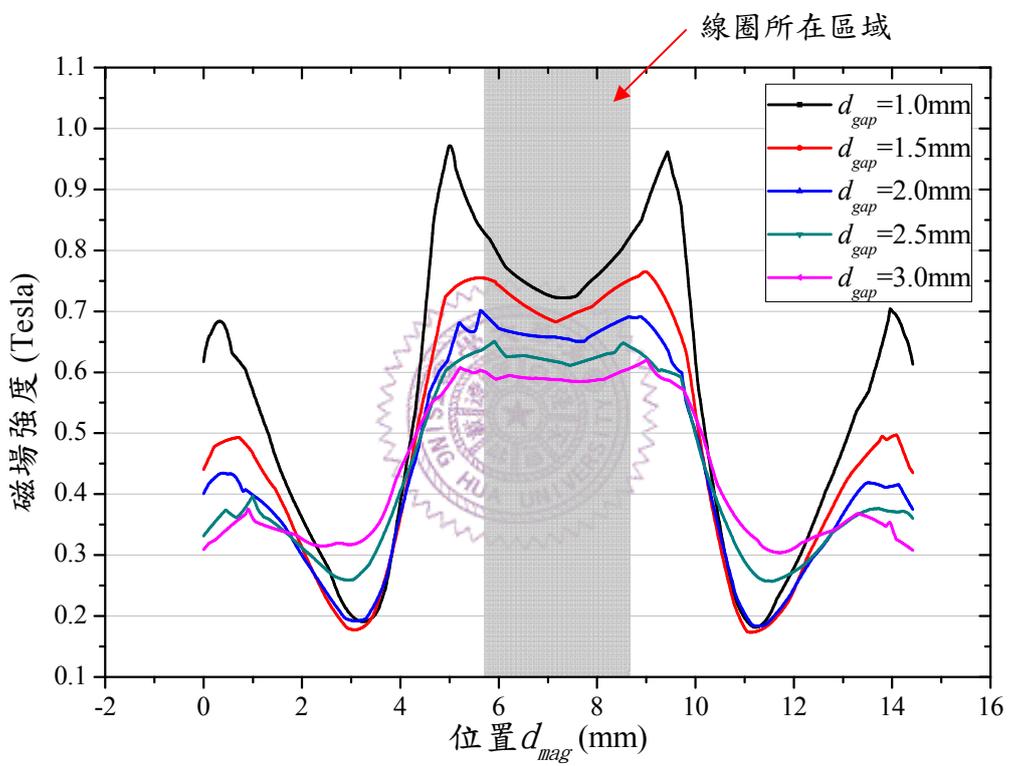


圖5-8 磁場強度模擬結果

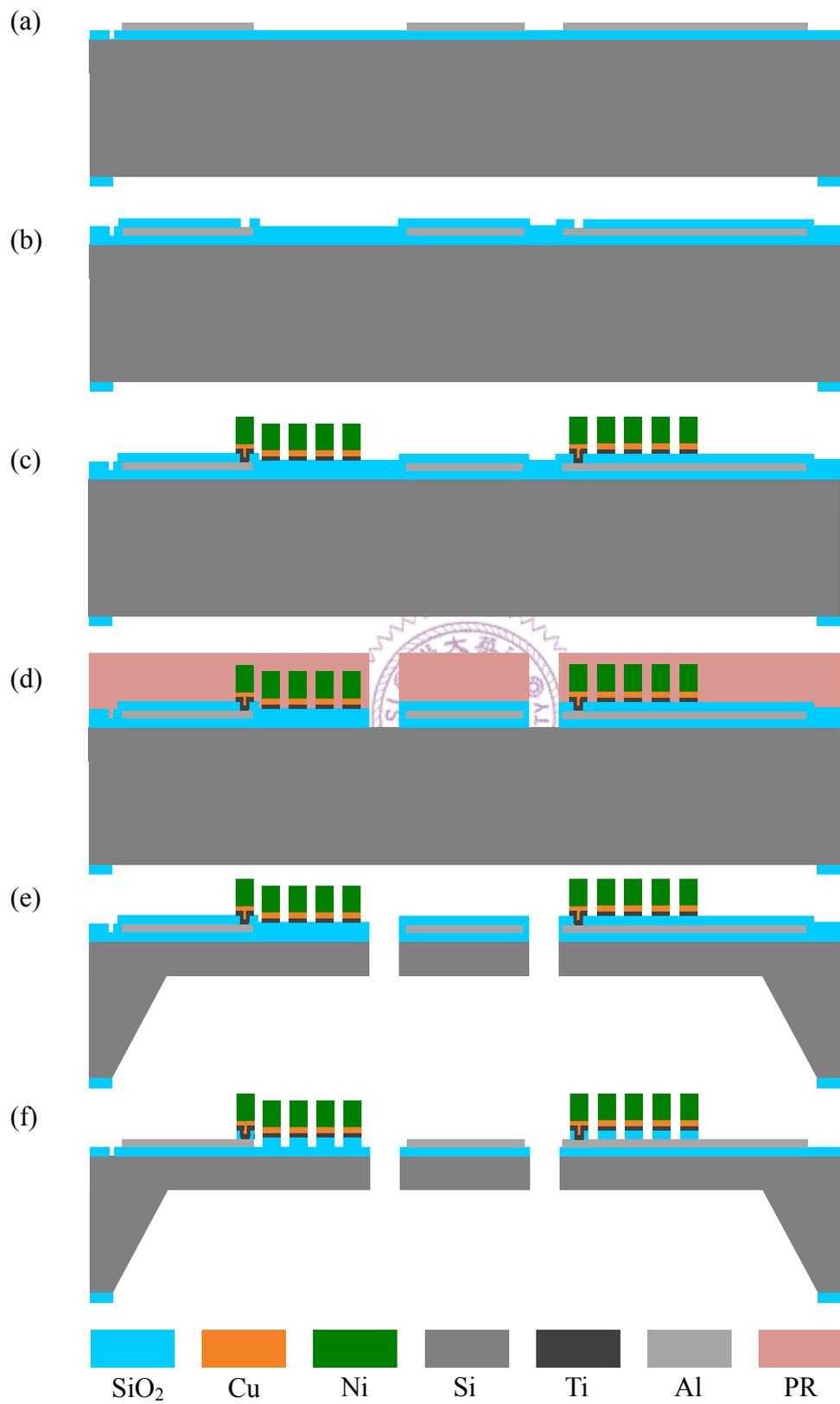


圖5-9 製作流程

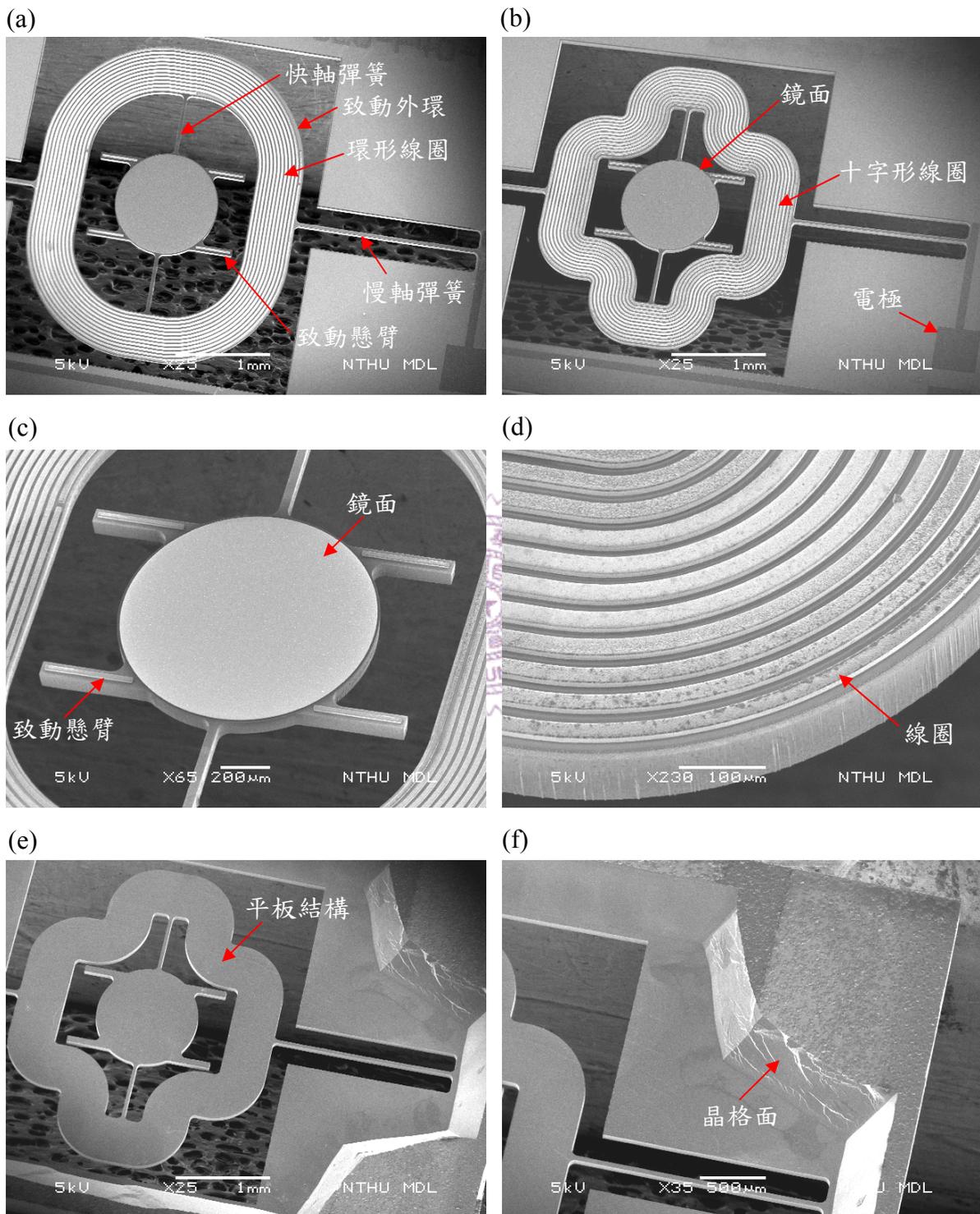


圖5-10 電子顯微鏡照片

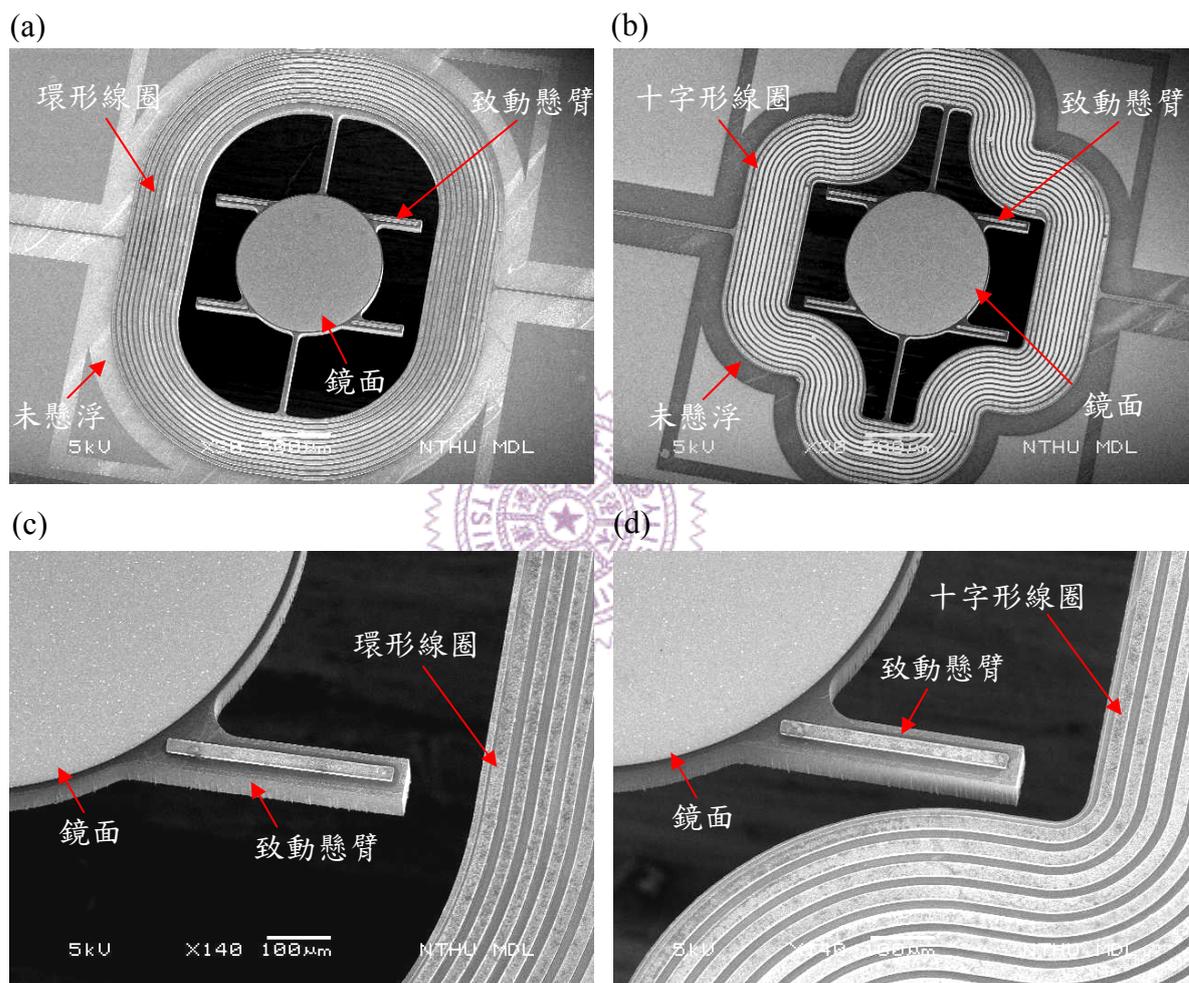
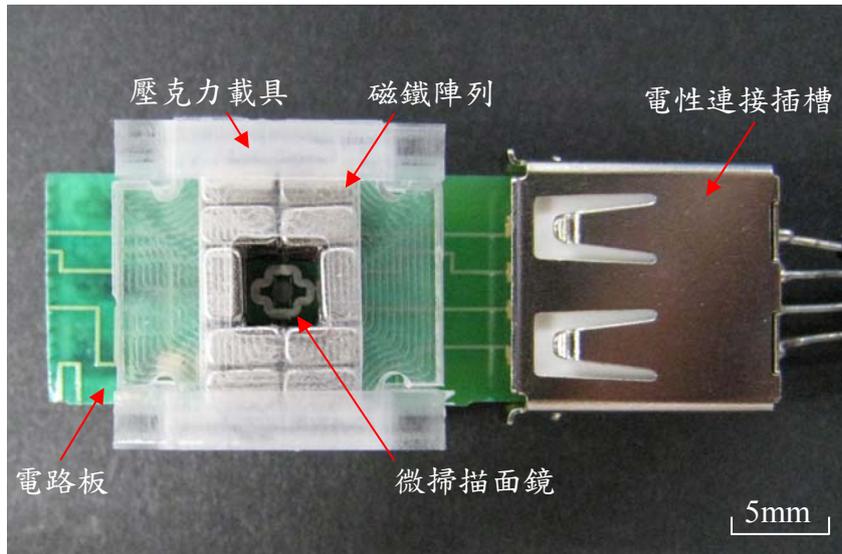


圖5-11 複合電磁力致動概念驗證元件

(a)



(b)

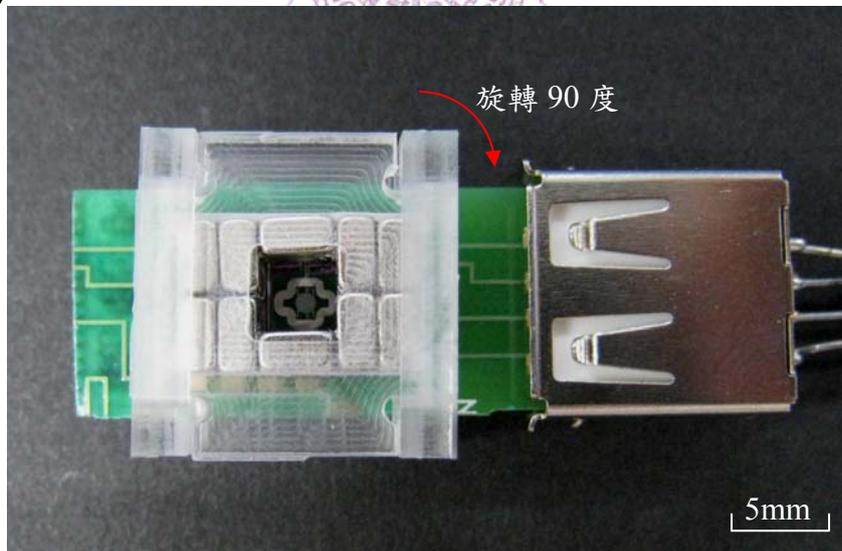


圖5-12 磁鐵陣列驅動載具

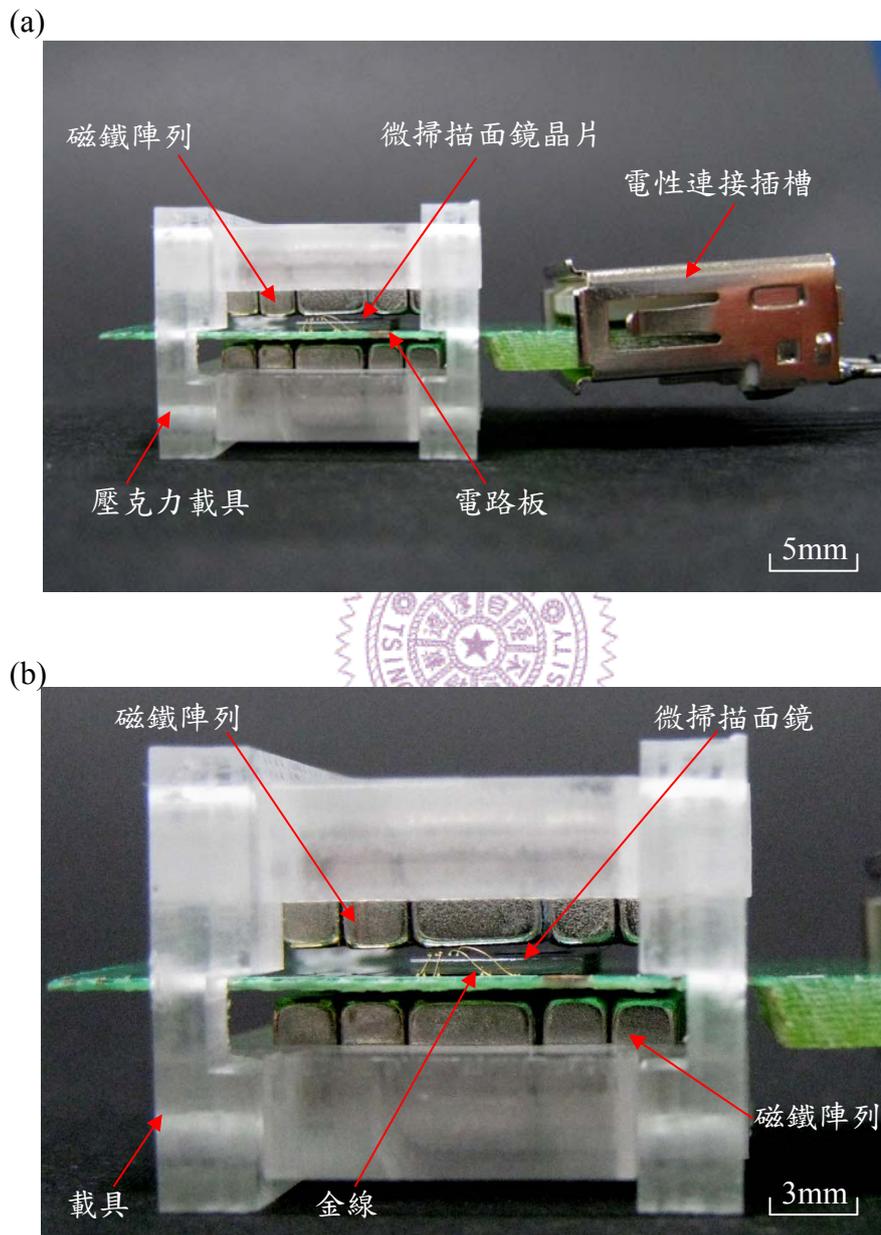


圖5-13 磁鐵陣列驅動載具側視圖

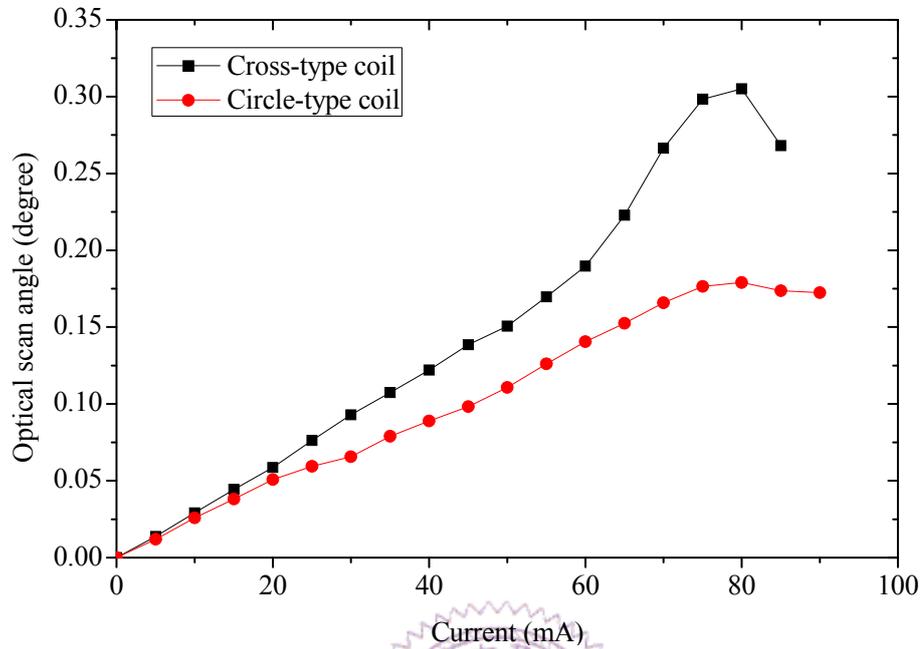


圖5-14 平面線圈驅動之量測結果

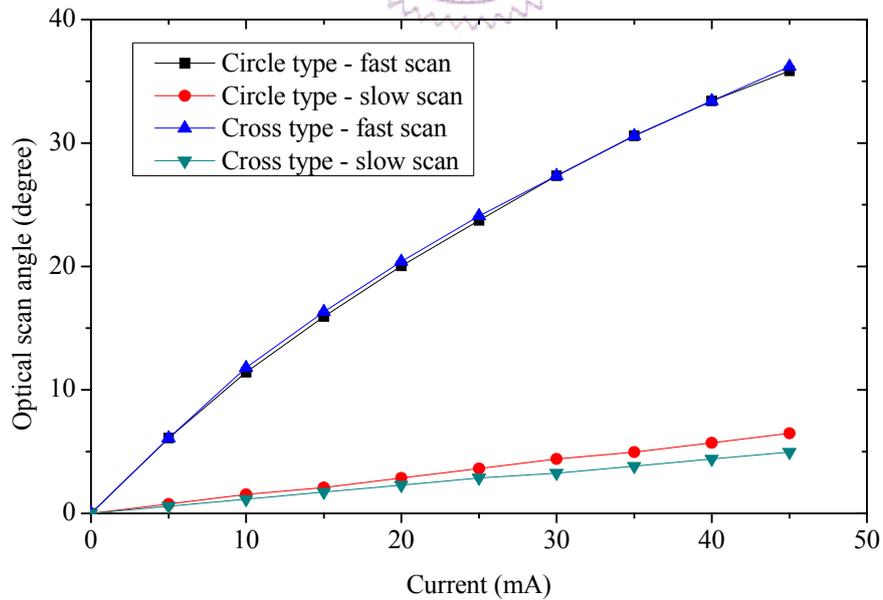


圖5-15 驅動電流與掃描角度之量測結果

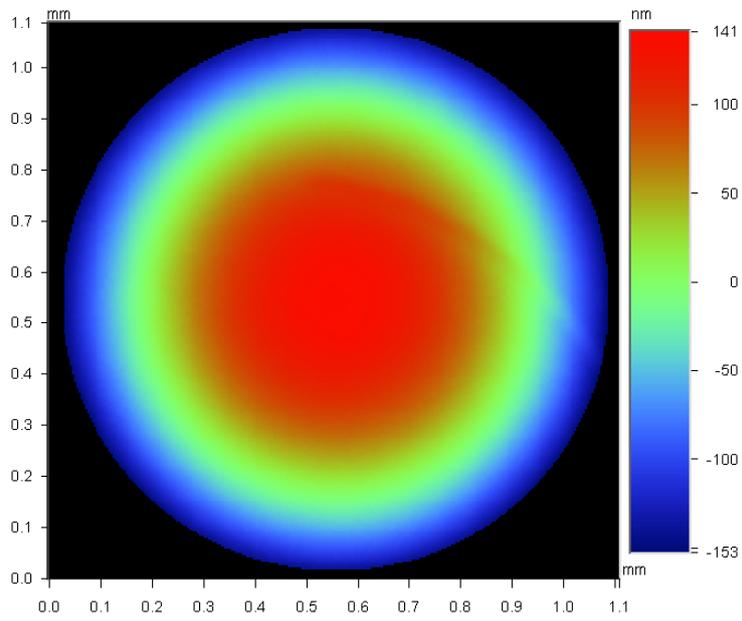


圖5-16 靜止時之鏡面表面形貌

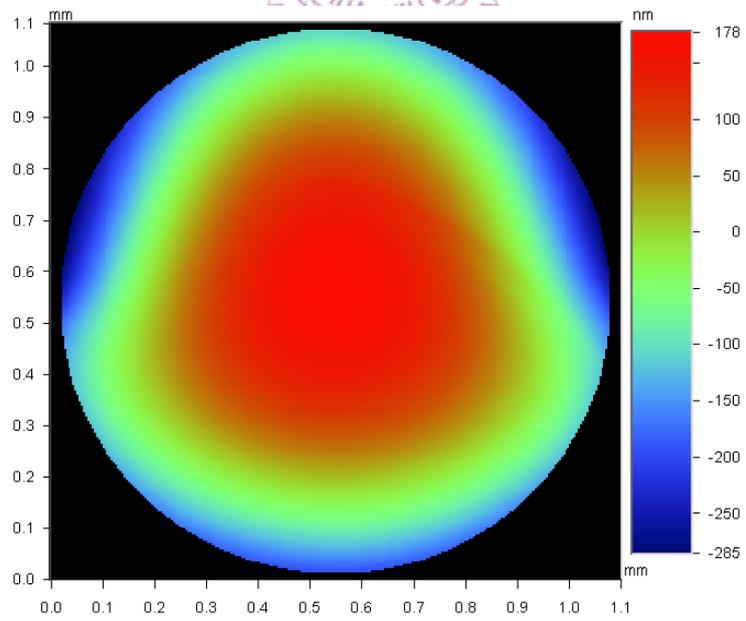


圖5-17 光學掃描角度 30 度時之鏡面表面形貌

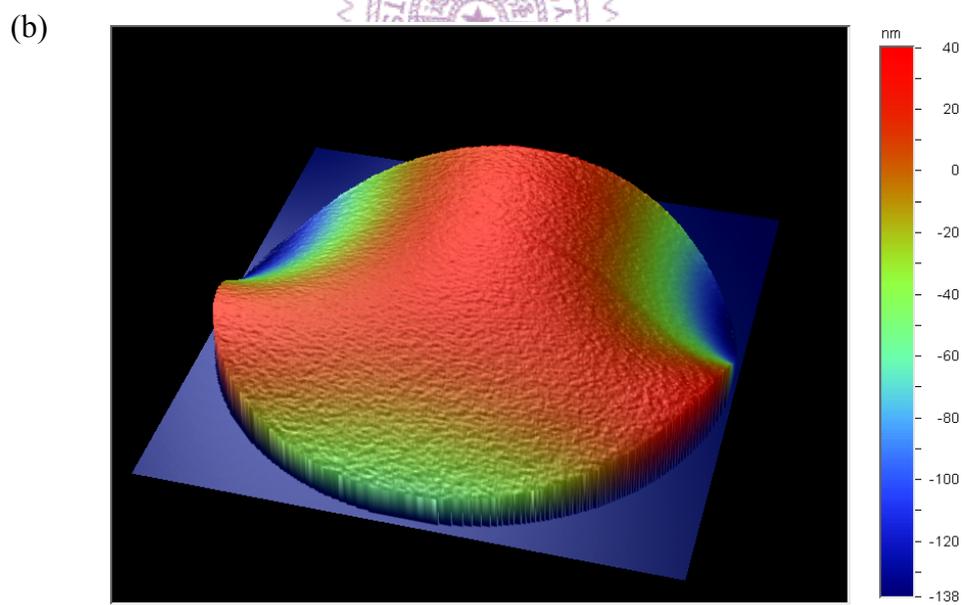
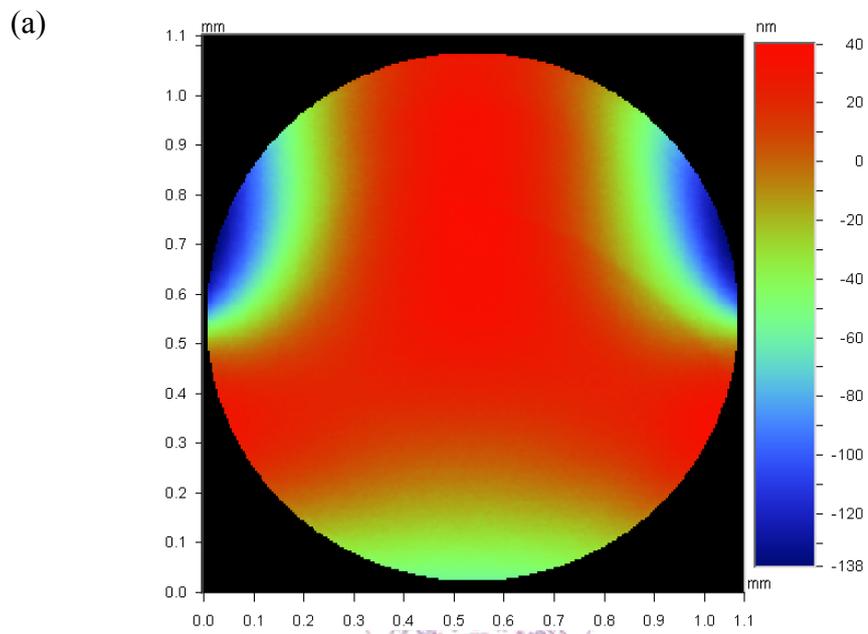
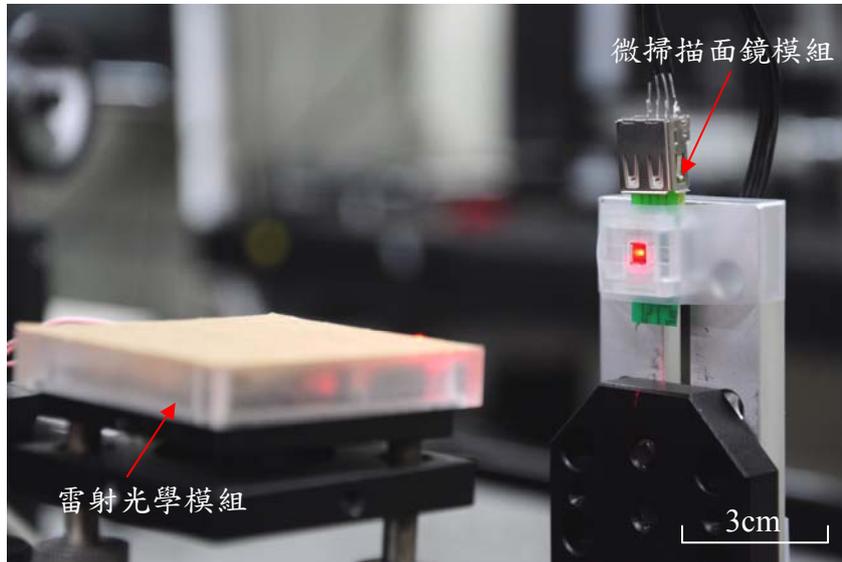


圖5-18 鏡面動態變形

(a)



(b)

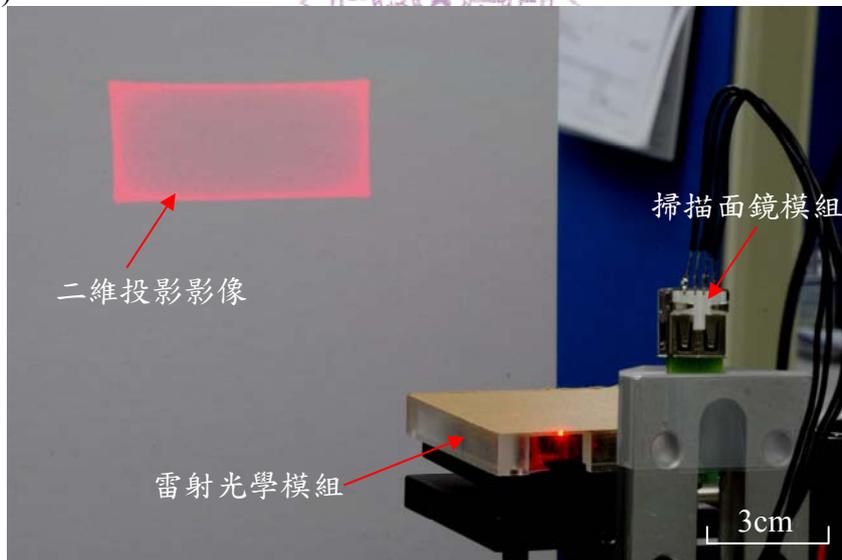


圖5-19 投影影像量測平台

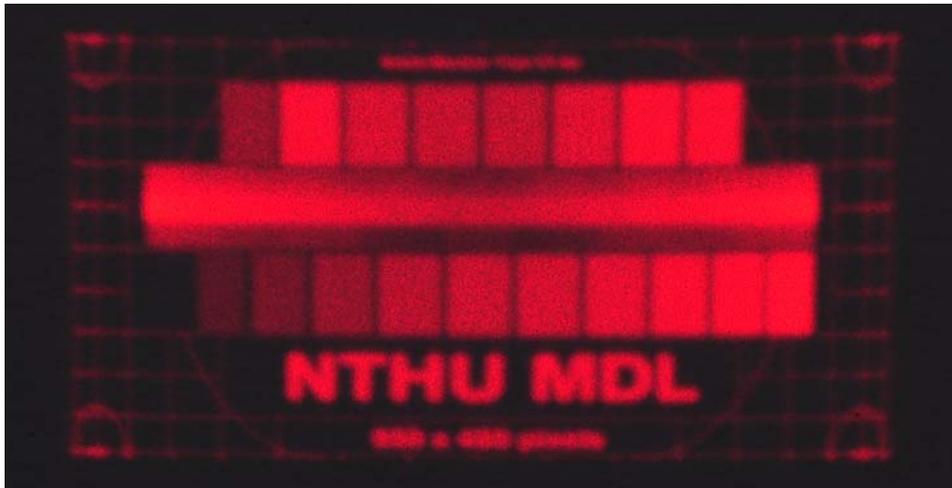


圖5-20 影像測試圖形

第6章 結論與未來工作

本章節針對目前之研究成果作總結，歸納出各微掃描面鏡設計之具體貢獻，並針對元件製程與量測上之改善空間提出想法，規劃於未來工作當中。

6-1 結論

本論文首先針對微掃描面鏡之應用需求進行介紹，由微掃描面鏡之系統架構切入了解其特色，並以光學考量為設計基礎，延伸到微掃描面鏡之機械結構設計，進而於後續章節提出雙面電鍍、內嵌磁性材料、複合電磁致動力之微掃描面鏡設計。本文以電磁致動力之微掃描面鏡為主軸，根據其致動力產生方式進行分析，提出雙面電鍍、內嵌磁性材料與複合電磁致動力之微掃描面鏡設計，分別實現二維 Lissajous 掃描、一維大角度掃描與二維循序掃描投影，並根據微掃描面鏡在大角度運動時所產生之偏心擺盪問題進行討論，以內嵌磁性材料之微掃描面鏡設計，以提升鏡面運動穩定性。

針對雙面電鍍之微掃描面鏡設計，主要是利用雙面電鍍細長磁性材料之方式，來達到力矩增強之目的，具有兩個特色：(1)將鐵磁性材料定義為高長寬比的細長圖形，以增加本身的磁化強度，(2)在元件層背面電鍍以增加磁性材料的體積，以提升致動力。針對內嵌磁性材料之微掃描面鏡設計，主要是將磁性材料為內嵌於單晶矽結構內部，實現矽鎳複合致動外環，因此還可降低鏡面不必要的擺盪問題，具有兩個主要特色：(1)內嵌鎳結構同時也增加了本身體積與磁化強度，進而提升靜磁致動力矩；(2)矽鎳複合結構本身具有近乎軸對稱之結構，可減少鏡面不必要的擺盪問題，提升運動穩定性。針對複合電磁致動力之微掃描面鏡設計，主要是利用勞侖茲力驅動微掃描面鏡，並結合鏡面上之致動懸臂產生之靜磁力，以實現複合電磁致動力之微掃描面鏡，具有兩個主要特色：(1)整合勞侖茲力與靜磁力之致動方式於單一晶片上，達到複合電磁致動力設計，(2)採用三維磁鐵陣列以得到高強度之集中磁場，同時避免需要龐大外部磁鐵之問題。

此外為了實現本論文所提出之微掃描面鏡設計，因此開發了許多關鍵的製程技術，如雙面電鍍製程技術，主要具有兩個特色：(1)利用晶片的基板層當作遮

蔽擋罩，以定義元件層背面的電鍍起始層圖形，(2)利用晶片的元件層來當作電鍍時的陰極板，以實現雙面選擇性電鍍的概念。而內嵌磁性材料製程技術則是利用單晶矽模子同時電鍍並定義厚結構鍍，以成功製作矽鍍複合致動外環。此外在製作元件的同時也製作驗證元件，以最客觀之方式進行量測比較。

在雙面電鍍微掃描面鏡設計中，量測結果證明利用細長電鍍鍍圖形設計可使靜磁力矩提升 211%，雙面電鍍的製程技術還能使靜磁力矩提升 149%，且此設計之雙面電鍍微掃描面鏡能成功地投影出 Lissajous 掃描圖形。在內嵌磁性材料微掃描面鏡設計中，其量測結果與典型靜磁式微掃描面鏡相比，輸入功率約減少兩倍，且因結構於出平面方向近乎軸對稱之原因，操作時的等效偏心力約減少兩倍。在複合致動微掃描面鏡設計之量測結果中，成功由驗證元件證明其複合致動概念，並配合上三維磁鐵陣列所提供之 0.54Tesla 之高強度集中磁場，可使元件實現循序掃描圖形，其解析度可達 WVGA 之影像規格。

針對本論文所提出之三種電磁式微掃描面鏡設計進行比較，可整理如表 6-1 所示，可觀察到內嵌磁性材料設計所能提供之力矩，約比雙面電鍍設計大一個數量級，雖然內嵌磁性材料設計已有效增加致動力矩，但增加的幅度仍然有限，因此於複合致動力設計中更進一步整合勞侖茲力驅動微掃描面鏡，使致動力矩可再提升一個數量級。根據本論文所提出之三種微掃描面鏡設計，找出目前所適合之應用，如圖 6-1 所示，雙面電鍍微掃描面鏡設計可滿足 QVGA 之顯示規格，內嵌磁性材料微掃描面鏡設計可滿足條碼器之應用，複合電磁致動力設計可滿足 SVGA 與 WVGA 之顯示規格。此外，本論文所提出之微掃描面鏡設計不只侷限於上述之應用，還可將此一維或二維掃描之光調變功能延伸，整合影像感測器進行其他應用，如雷射印表機、虛擬鍵盤、共軛焦顯微鏡、雷射二維測距儀等。將本論文提出之三種設計與現有國際研究團隊或公司所發表之微掃描面鏡進行比較，如表 6-2 與圖 6-2 所示，可發現目前本研究之元件規格雖無法超越國際大廠，但已可與國際團隊的水準相互競爭，並且本論文由電磁式微掃描面鏡之設計、製造、量測進行完整的分析與討論，並延伸至雷射掃描投影之系統驗證，成功地證明本論文之元件特性足以提供雷射投影顯示系統之應用需求，期望本論文所提出之設計概念能提供後續相關研究之應用。

6-2 未來工作

本論文之未來工作以提升目前元件操作特性為主，包括靜磁式微掃描面鏡驅動載具之改良、內建感測器進行迴授控制與鏡面平坦度之改善，期望能使本論文之微掃描面鏡設計更加完整，此外，還可整合目前之研究成果，提出內嵌驅動線圈微掃描面鏡設計，將本論文所提出之設計概念持續延伸，發展元件特性更為優秀之微掃描面鏡。

首先針對靜磁式微掃描面鏡驅動載具方面，由本論文之量測結果可發現，靜磁力於 10KHz 以下之共振態操作可具有足夠之致動力，但隨著操作頻率增高或在非共振態操作下，靜磁力則略顯不足，因此除了元件本身設計以外，另一個相當重要的即是驅動載具之效率問題，目前用來驅動靜磁式微掃描面鏡的載具如圖 3-12 所示，載具本身以塑膠製作，驅動線圈與永久磁鐵內嵌於載具側邊，當通入電流時會因開放磁路之特性造成磁場發散。因此本研究期望能改良元件驅動載具，以封閉磁路設計來提升電流利用效率，圖 6-3(a)即為具有封閉磁路設計之驅動載具，圖 6-3(b)為其截面圖，載具外殼由高導磁係數之鐵磁材料製作而成，驅動線圈捆繞於內部鐵芯上。為了解此兩種設計所能提供之磁場強度差異，可藉由磁場模擬軟體驗證，圖 6-4 為目前使用載具之磁場分佈狀況，其晶片所在位置強度約為 786A/m，而圖 6-5 為具有封閉磁路設計之磁場模擬結果，晶片所在位置之磁場強度約為 8862A/m，比較結果顯示在相同的驅動電流與線圈匝數下，可發現晶片所在位置之磁場分佈有大幅度的差異，並且其磁場強度約增強一個數量級，除此之外，磁場僅分佈於載具內部，可避免對其他元件產生電磁干擾。

針對內建感測器進行迴授控制做討論，本論文所製作之微掃描面鏡雖已成功驗證雷射投影顯示系統概念，但於長時間操作時元件之掃描角度會產生些許飄移，造成影像之模糊，其問題在於元件本身並無掃描角度感測機制，掃描角度無法即時回饋至控制電路做出補償反應，因此若要製作感測器於微掃描面鏡上，目前主要有電容感測與壓阻感測兩種機制。電容感測主要可靠製作於鏡面邊緣之垂直梳狀致動器進行電容感測，但其技術瓶頸在於需在結構上切割出不同的電性[66]，通常需要靠相當複雜的製程才有辦法完成。壓阻感測主要是利用摻雜(doping)的方式在彈簧扭轉時產生最大應力處製作壓阻感測器，當應力產生時壓阻感測器的阻值則隨之改變[100-101]，最後再利用晶片表面之金屬導線將電性導

引出，因此不需要切割單晶矽基材本身進行電性分隔。通常靜電式微掃描面鏡會採用電容感測方式，由於本身感測電極可與驅動電極時同時製作完成，因此不需要額外附加的製程，而電磁式致動器較常採用的是壓阻感測機制，可避免需要額外電性切割與電容感測電路。本論文規劃將使用磊晶片(EPI wafer)配合上壓阻感測機制製作雙軸微掃描面鏡，除了可承襲目前元件之設計與製程經驗外，電化學蝕刻停止機制與壓阻沉積技術都與目前相當成熟之技術，可大幅提昇元件製造上之穩定性。

針對鏡面平坦度之改善，本論文中除了雙面電鍍微掃描面鏡設計之外，其他設計皆是使用濕蝕刻進行晶片薄化製程，因此鏡面結構本身呈現一平板結構，使得鏡面在靜態時容易受到表面薄膜應力之影響造成變形，而在高頻操作時則會受到本身結構慣性力之影響產生動態變形，為了改善鏡面平坦度，於靜態狀況下可利用移除二氧化矽層之方法減低結構變形，於動態狀況下可使用多接點連接結構分散傳統單一接點對鏡面造成之反力來降低鏡面動態變形[84]，然而不論靜態或是動態變形，若是以上改善方式無法達到足夠的鏡面平坦度時，最有效的改善方式即是在鏡面背面增加剛性補強結構，為配合濕式體蝕刻加工之晶片薄化製程方式，無法像使用深式反應離子蝕刻技術製作形狀多變之剛性補強結構，因此只能利用凸角補償技術設計相容於製程之剛性補強結構，藉由非等向性濕蝕刻可得到尖錐狀之剛性補強結構。

針對本論文所提出雙面電鍍、內嵌磁性材料、複合電磁致動力之微掃描面鏡設計概念，可進一步整合其特色並發展內嵌驅動線圈之微掃描面鏡設計，並結合上述之內建感測器與剛性補強結構，如圖 6-6(a)所示，此微掃描面鏡基本由雙環結構所組成，並使用複合電磁致動力之方式驅動，圖 6-6(b)為 C-C' 截面立體圖，於快軸扭轉彈簧固定端處具有壓阻感測器，且鏡面背面具有尖錐狀之剛性補強結構，此設計最主要特色是將驅動線圈內嵌於單晶矽結構當中，同時致動懸臂上之細長電鍍鎳圖形也可內嵌於結構中。此內嵌驅動線圈微掃描面鏡設計，具有雙面電鍍磁性材料設計中，利用細長磁性材料圖形與增加體積之方式提升致動懸臂上之靜磁致動力；具有內嵌磁性材料設計中，利用矽鎳複合致動外環減低運動時之出平面擺盪現象；具有複合電磁致動力設計中，利用線圈與致動懸必分別產生勞侖茲力與靜磁力之特色。因此內嵌驅動線圈之微掃描面鏡設計可延伸本論文所提出之設計概念，發展更具特色之電磁式微掃描面鏡。

表 6-1 本論文所提出之微掃描面鏡比較表

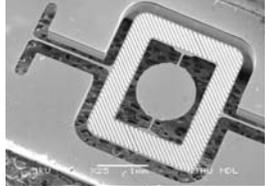
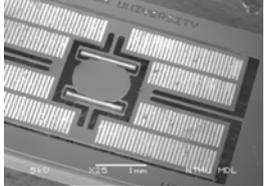
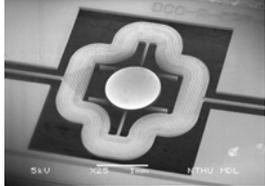
微掃描面鏡設計	雙面電鍍設計 	內嵌磁性材料設計 	複合致動力設計 
力矩	2.17×10^{-8} Nm	2.57×10^{-7} Nm	2.60×10^{-6} Nm
驅動電流	400 mA	230 mA	45 mA
輸入功率	240 mW	81 mW	133 mW
鏡面大小	1.25 mm	1.20 mm	1.10 mm
光學掃描角	13 degree	90 degree	36 degree
操作頻率	11149 Hz	619 Hz	20358 Hz

表 6-2 相關元件規格比較

研究單位/公司	第一作者	頻率(Hz)	光學角(degree)	鏡面大小(mm)	$\theta_{optical}D$ (deg*mm)	致動力	掃描維度	年份	參考文獻
MDL_DEP	T. L. Tang	11149	13	1.25	16.25	EM	2D	2010	本論文
MDL_EMM	T. L. Tang	619	90	1.2	108	EM	2D	2011	本論文
MDL_CAF	T. L. Tang	20358	36	1.1	39.6	EM	2D	2011	本論文
Mirrorcle	V. Milanovic	4500	40	0.6	24	ES	1D	2004	[86]
LG	C. H. Ji	19700	8.8	1.5	13.2	EM	2D	2007	[82]
Japen	M. Lebedev	15800	18	1	18	PZT	1D	2004	[87]
Berkely	J. Kim	4130	50	0.72	36	ES	1D	2005	[88]
Samsung	Y. C. Ko	22100	32	1	32	ES	1D	2005	[89]
Seiko Epson	M. Yoda	22300	30	1	30	ES	1D	2005	[90]
Philips	A. A. Kuijpers	23500	40	1	40	ES	1D	2009	[91]
Franhofer	S. Hsu	30840	40	1	40	ES	1D	2008	[59]
Samsung	J. W. Cho	24750	48	1.6	76.8	ES	1D	2007	[92]
Microvision	A. D. Yalcinkaya	21300	53	1.5	79.5	EM	2D	2006	[7]
Microvision	A. Arslan	21800	76	1	76	ES	1D	2010	[93]
Brother	N. Asai	33400	25	1	25	PZT	1D	2003	[94]
Franhofer & Microvision	C. Drabe	16000	112	0.5	56	ES	2D	2007	[95]
Hiperscan	Hiperscan	19000	20	1	20	ES	2D	2010	[96]
LG	I. W. Ji	19550	34	1.5	51	ES	1D	2006	[97]
Olympus	H. MiyaJima	4000	16	4.5	72	EM	1D	2004	[98]
Fraunhofer	Fraunhofer	23500	38	1.2	45.6	ES	2D	2011	[99]
DEP: Double side electroplating design					ES: Electrostatic scanning mirror				
EMM: Embedded magnetic material design					EM: Electromagnetic scanning mirror				
CAF: Compound actuating force design									

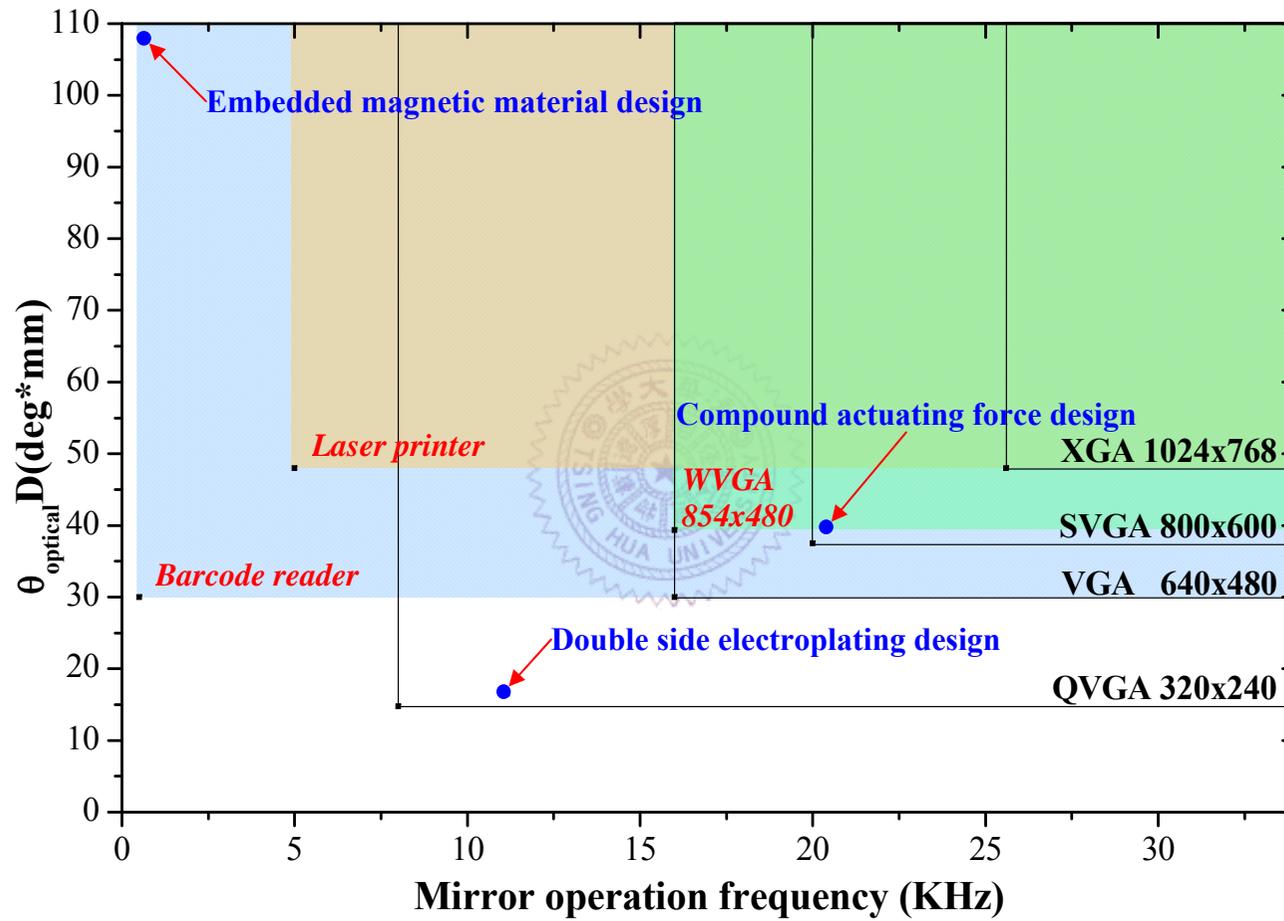


圖6-1 可滿足之相關應用規格

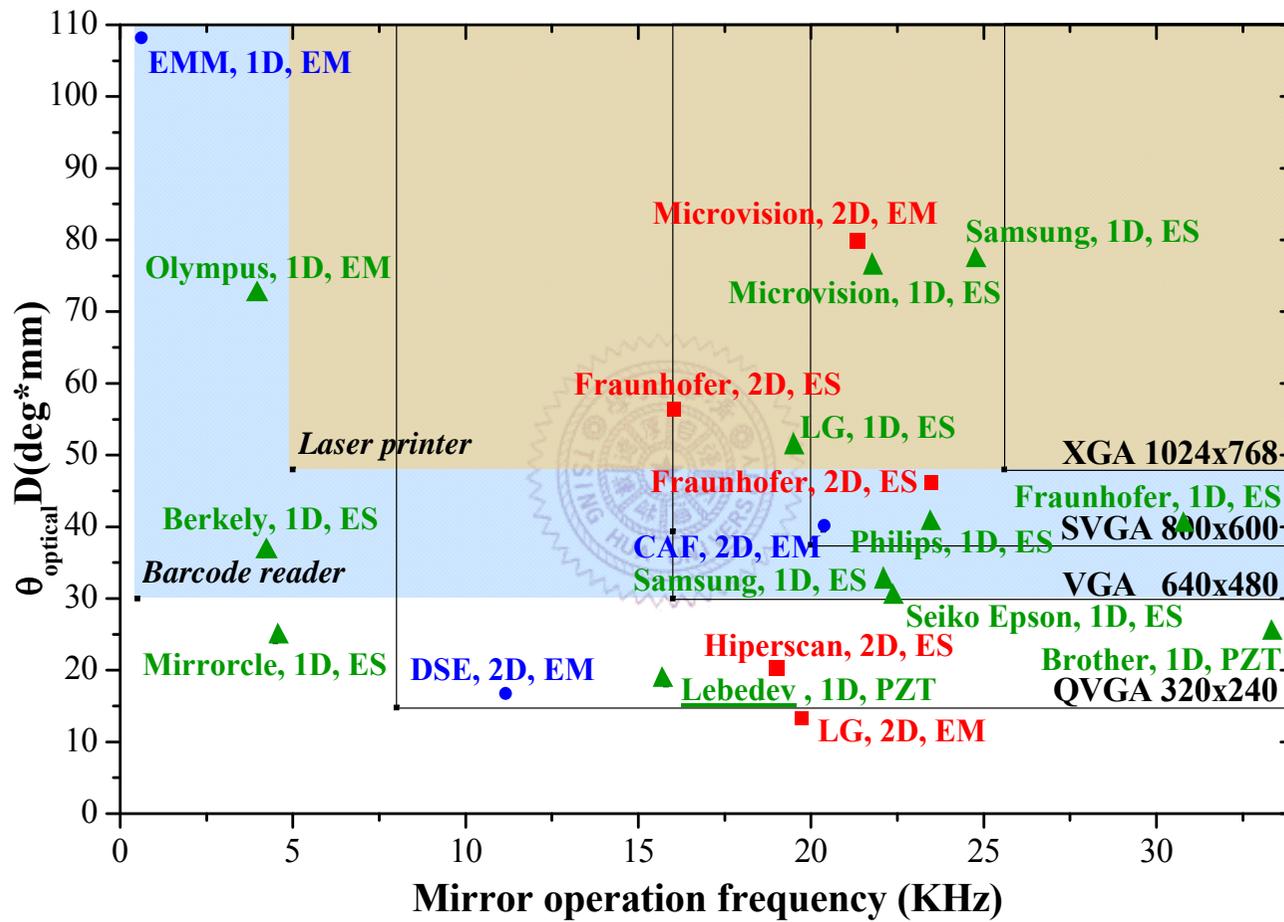


圖6-2 相關文獻之規格比較

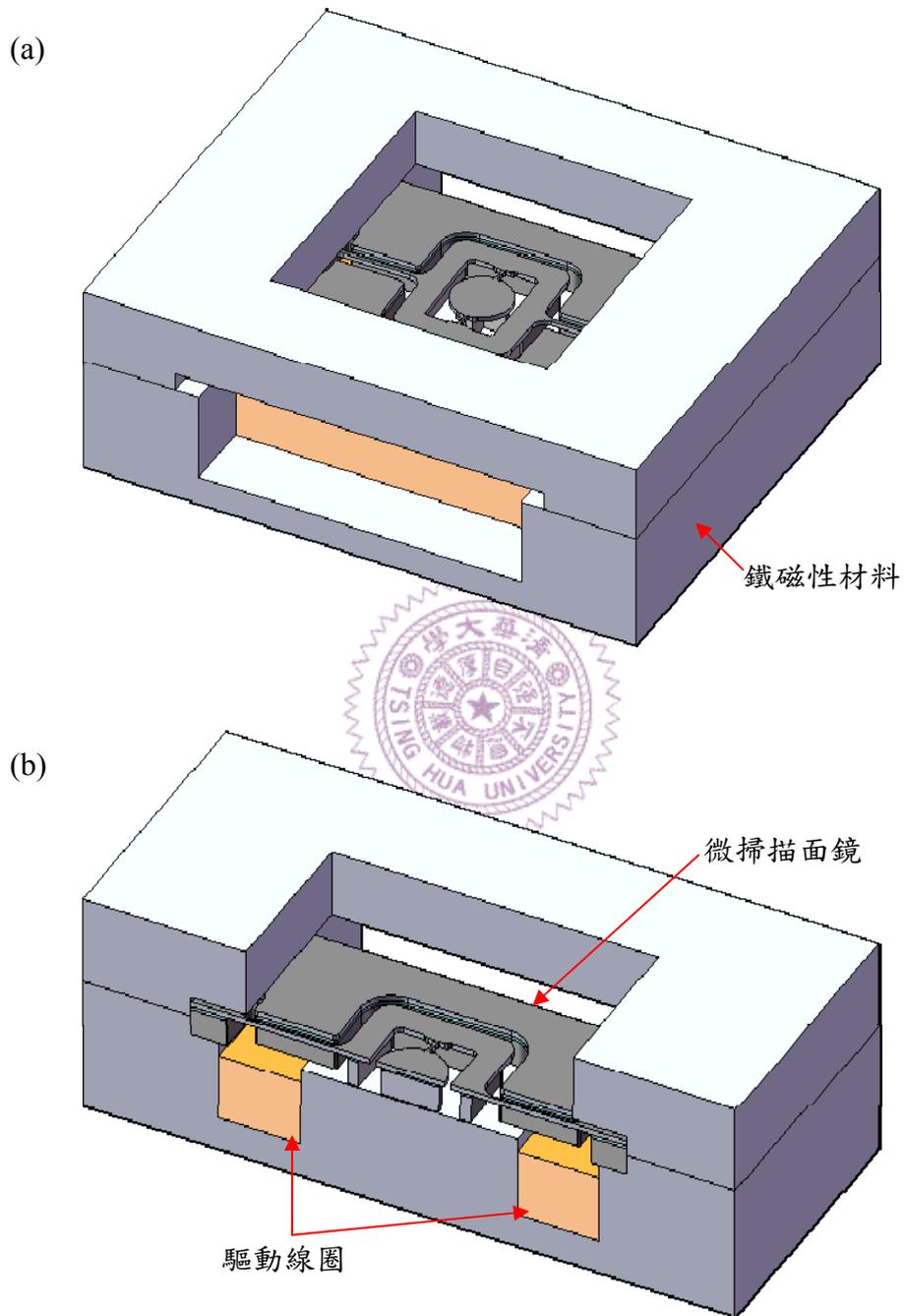


圖6-3 封閉磁路設計之驅動載具

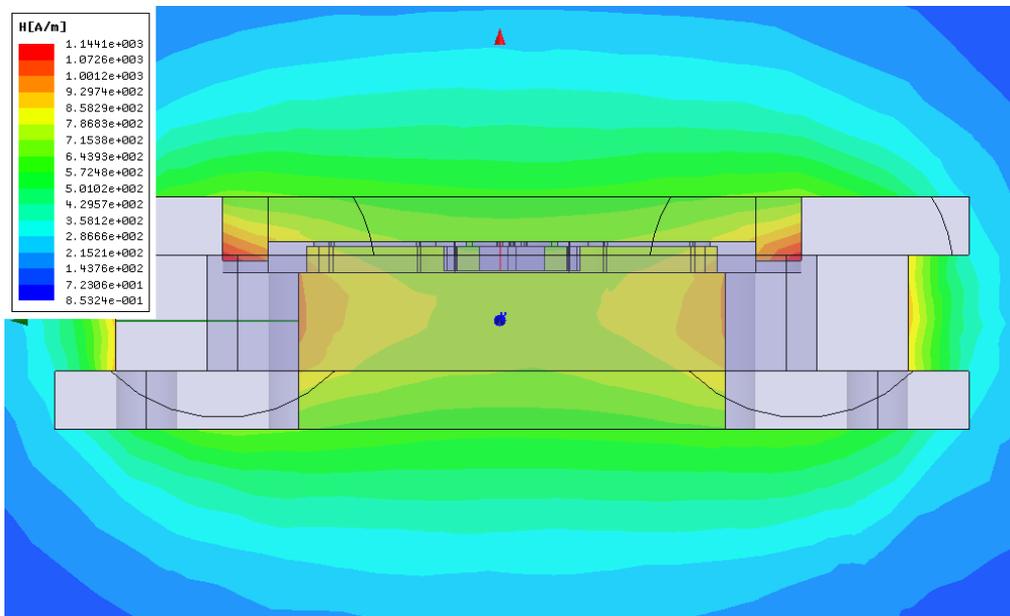


圖6-4 現有驅動載具磁場分佈

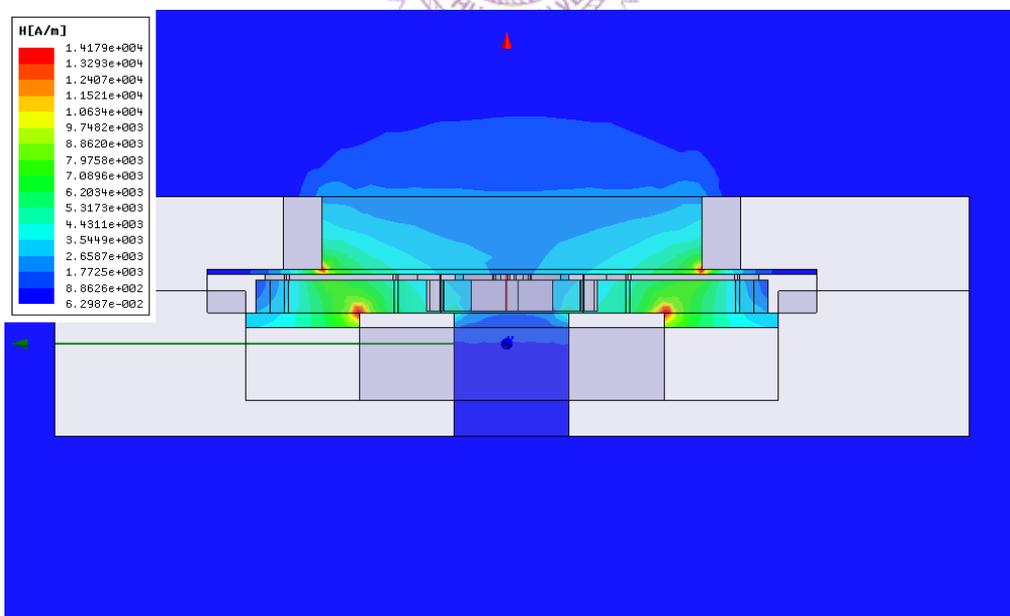


圖6-5 封閉磁路設計之驅動載具磁場分佈

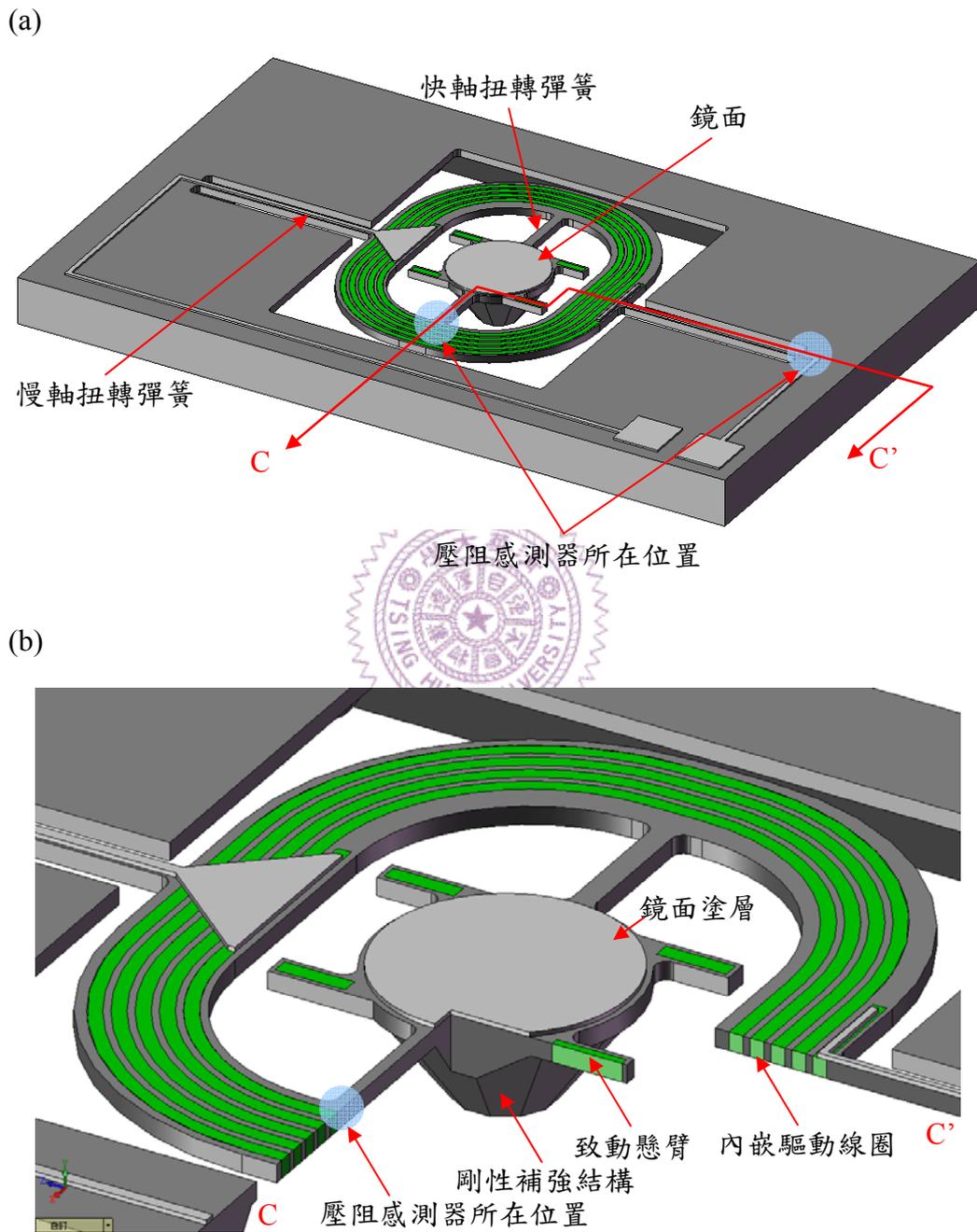


圖6-6 內嵌驅動線圈之微掃描面鏡設計

參考文獻

- [1] <http://www.hp.com/>, Hewlett-Packard
- [2] <http://www.analog.com/index.html>, Analog Devices
- [3] <http://www.dlp.com>, Texas Instruments
- [4] <http://www.knowles.com/search/>, Knowles
- [5] V. A. Aksyuk, F. Pardo, D. Carr, D. Greywall, H. B. Chan, M. E. Simon, A. Gasparyan, H. Shea, V. Lifton, C. Bolle, S. Arney, R. Frahm, M. Paczkowski, M. Haueis, Ronald Ryf, David T. Neilson, J. Kim, C. Randy Giles, D. Bishop, "Beam-Steering Micromirrors for Large Optical Cross-Connects," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, pp. 634-642, 2003.
- [6] P. B. Chu, S.-S. Lee, and S. Park, "MEMS: the path to large optical crossconnects," *Communications Magazine*, vol. 40, pp. 80-87, 2002.
- [7] A. D. Yalcinkaya, H. Urey, D. Brown, T. Montague, and R. Sprague, "Two-axis electromagnetic microscanner for high resolution displays," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. 786-794, 2006.
- [8] C. Marxer, P. Griss, and N. F. de Rooij, "A variable optical attenuator based on silicon micromechanics," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 233-235, 1999.
- [9] H. Kim, K.-D. Jung, and W. Kim, "A wafer-level micro mechanical global shutter for a micro camera," *IEEE MEMS International Conference*, Sorrento, Italy, January, 2009, pp. 156-159.
- [10] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass, "A MEMS-based projection display," *Proceeding of the IEEE*, vol. 86, pp.1687-1704, 1998.
- [11] H.-W. Tung, S.-Y. Lee, W.-C. Chen, and W. Fang, "A novel solid state tunable micro lens," *IEEE MEMS International Conference*, Hyoko, Japan, January, 2007, pp. 747-750.
- [12] M. Tormen, Y.-A. Peter, P. Niedermann, A. Hoogerwerf, and R. Stanley, "Deformable MEMS grating for wide tunability and high operating speed,"

- Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 8, pp. S337-S340, 2006.
- [13] R. S. Muller and K. Y. Lau, "Surface-micromachined microoptical elements and systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, pp. 1705-1720, 1998.
- [14] W. O. Davis, D. Brown, M. Helsel, R. Sprague, G. Gibson, A. Yalcinkaya, and H. Urey, "High-performance silicon scanning mirror for laser printing," in *Proc. SPIE- MOEMS and Miniaturized Systems VI*, vol. 6466, San Jose, CA, January, 2007, pp. 64660D.
- [15] A. D. Yalcinkaya, O. Ergeneman, and H. Urey, "Polymer magnetic scanners for bar code applications," *Sensors and Actuators A*, vol. 135, pp. 236-243, 2007.
- [16] H. Miyajima, N. Asaoka, T. Isokawa, M. Ogata, Y. Aoki, M. Imai, O. Fujimori, M. Katashiro, and K. Matsumoto, "A MEMS electromagnetic optical scanner for a commercial confocal laser scanning microscope," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, pp. 243-251, 2003.
- [17] C. Chong, K. Isamoto, and H. Toshiyoshi, "Optically modulated MEMS scanning endoscope," *Photonics Technology Letters*, vol. 18, pp. 133-135, 2006.
- [18] W. Jung, J. Zhang, L. Wang, P. Wilder-Smith, Z. Chen, D. T. McCormick, N. C. Tien, "Three-dimensional optical coherence tomography employing a 2-axis microelectromechanical scanning mirror," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 11, pp. 806-810, 2005.
- [19] J. P. Siepmann and A. Rybaltowski, "Integrable ultra-compact, high-resolution, real-time MEMS LADAR for the individual soldier," *IEEE Military Communications Conference*, vol. 5, Atlantic City, NJ, October, 2005, pp. 3073-3079.
- [20] K. E. Petersen, "Silicon torsional scanning mirror," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 24, pp. 631-637, 1980.
- [21] L.-S. Fan, Y.-C. Tai, and R. S. Muller, "IC-processed electrostatic micromotors," *IEEE Int. Electron Devices Meeting*, San Francisco, CA, December, 1988, pp. 666-669.
- [22] W. C. Tang, T.-C. H. Nguyen, and R. T. Howe, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures," *Sensors and Actuators A*, vol. 20, pp. 25-32, 1989.

- [23] L. Y. Lin, S. S. Lee, K. S. J. Pister, and M. C. Wu, "Micro-machined threedimensional micro-optics for integrated free-space optical system," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 6, pp. 1445-1447, 1994.
- [24] L. Y. Lin, J. L. Shen, S. S. Lee, and M. C. Wu, "Realization of novel monolithic free-space optical disk pickup heads by surface micromachining," *Optical Letters*, vol. 21, pp. 155-157, 1996.
- [25] L. Y. Lin, J. L. Shen, S. S. Lee, and M. C. Wu, "Surface-micromachined micro-XYZ stages for free-space microoptical bench," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, pp. 345-347, 1997.
- [26] K. S. J. Pister, "Hinged polysilicon structures with integrated CMOS TFTs," *Technical Digest of the 1992 Solid State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, June, 1992, pp. 136-139.
- [27] L. Fan, and M. C. Wu, "Self-assembled micro-XYZ stages for optical scanning and alignment," *the 10th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, San Francisco, CA, November, 1997, pp. 266-267.
- [28] L. Fan and M. C. Wu, "Two-dimensional optical scanner with large angular rotation realized by self-assembled micro-elevator," *Digest of 1998 IEEE/LEOS Summer Topical Meeting*, Monterey, CA, July 1998, pp. II/107-108.
- [29] V. A. Aksyuk, F. Pardo, C. A. Bolle, C. R. Giles, and D. J. Bishop, "Lucent Microstar™ micromirror array technology for large optical crossconnects," *Proceedings of SPIE*, Santa Clara, CA, September 2000, vol. 4178, pp. 320-324.
- [30] V.A. Aksyuk, F. Pardo, and D.J. Bishop, "Stress-induced curvature engineering in surface-micromachined devices," in *Proc. SPIE- Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS*, Paris, France, March, 1999, vol. 3680, pp. 984-993.
- [31] V. A. Aksyuk, F. Pardo, D. Carr, D. Greywall, H. B. Chan, M. E. Simon, A. Gasparyan, H. Shea, V. Lifton, C. Bolle, S. Arney, R. Frahm, M. Paczkowski, M. Haueis, Ronald Ryf, David T. Neilson, J. Kim, C. Randy Giles, D. Bishop, "Beam-steering micromirrors for large optical cross-connects," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, pp. 634-642, 2003
- [32] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, and R. W. Tkach, "On the expandability of free-space

- micromachined optical cross connects,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, pp. 482-489, 2000.
- [33] R. Conant, J. Nee, K. Lau, R. Muller, “Dynamic deformation of scanning micromirrors,” *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS*, Kauai, Hawaii, August 2000, pp. 49-50.
- [34] M. Hart, R.A. Conant, K.-Y. Lau, and R.S. Muller, “Stroboscopic interferometer system for dynamic MEMS characterization,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, pp. 409-418, 2000.
- [35] V. Milanović, “Multilevel-beam SOI-MEMS fabrication and applications,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, pp. 19-30, 2004.
- [36] V. Milanović, M. Last, and K.S.J. Pister, “Torsional micromirrors with lateral actuators,” *Transducers '01*, Munich, Germany, June, 2001, pp.1298-1301.
- [37] T. J. Brosnihan, S. A. Brown, A. Brogan, C. S. Gormley, D. J. Collins, S. J. Sherman, M. Lemkin, N. A. Polce, and M. S. Davis, “Optical IMEMS® – a fabrication process for MEMS optical switches with integrated on-chip electronics,” *Transducers '03*, Boston, MA, June, 2003, pp.1638-1642.
- [38] M. Wu and W. Fang, “Design and fabrication of MEMS devices using the integration of MUMPs, trench-refilled molding, DRIE and bulk silicon etching processes,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 3, pp.535-542, 2005.
- [39] M. Wu and W. Fang, “A molded surface-micromachining and bulk etching release (MOSBE) fabrication platform on (1 1 1) Si for MOEMS,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no. 2, pp.260-265, 2006.
- [40] M. Wu, H. Y. Lin and W. Fang, “A poly-Si-based vertical comb-drive two-axis gimbaled scanner for optical applications,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, pp. 2111-2113, 2006.
- [41] N. Asada, H. Matsuki, K. Minami and M. Essashi, “Silicon micromachined two-dimensional alvano optical scanner,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 30, pp. 4647–4649, 1994.
- [42] L. O. S. Ferreira and S. Moehlecke, “A silicon micromechanical galvanometric scanner,” *Sensors and Actuators A*, vol. 73, pp. 252–260, 1999.

- [43] S. H. Ahn and Y. K. Kim, "Silicon scanning mirror of two DOF with compensation current routing", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, pp. 1455–1461, 2004.
- [44] J.W. Judy, "Magnetic microactuators with polysilicon flexures," *Masters Thesis*, Department of EECS, University of California, Berkeley, 1994.
- [45] J.W. Judy, and R.S. Muller, "Magnetic microactuation of torsional polysilicon structures," *Transducers '95*, vol. 1, June, 1995, pp. 332-335.
- [46] J.W. Judy, R.S. Muller, and H.H. Zappe, "Magnetic microactuation of polysilicon flexure structures," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 4, pp. 162-169, 1995.
- [47] Y. Okano and Y. Hirabayashi, "Magnetically actuated micromirror and measurement system for motion characteristics using specular reflection" *IEEE Journal on Selected Topic in Quantum Electronics*, vol. 8, pp. 19-25, 2002.
- [48] H. A. Yang and W. Fang, "A novel coil-less Lorentz force 2D scanning mirror using Eddy current," *IEEE MEMS International Conference*, Istanbul, Turkey, January, 2006, pp.774-777.
- [49] H. A. Yang, T. L. Tang, S. T. Lee, and W. Fang, "A novel coil-less scanning mirror using Eddy current Lorentz force and magnetostatic force," *Journal of Microelectromechanical System*, vol. 16, pp.511-520, 2007.
- [50] A. D. Yalcinkaya, H. Urey, and S. Holmstrom, "NiFe plated biaxial MEMS scanner for 2-D imaging," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, pp. 330-332, 2007.
- [51] R. Sprague, T. Montague, and D. Brown, "Bi-axial magnetic drive for Scanned Beam Display mirrors," in *Proc. SPIE- MOEMS Display and Imaging Systems III*, vol. 5721, San Jose, CA, January, 2005, pp. 1-13.
- [52] Ç. Ataman and H. Urey, "Magnetic actuated FR4 scanners for compact spectrometers," in *Proc. SPIE- MEMS, MOEMS, and Micromachining III*, vol. 6993, Strasbourg, France, April, 2008, pp. 699303.
- [53] U. Hofmann, M. Oldsen, H.-J. Quenzer, J. Janes, M. Heller, M. Weiss, G. Fakas, L. Ratzmann, E. Marchetti, F. D'Ascoli, M. Melani, L. Bacciarelli, E. Volpi, F. Battini, L. Mostardini, F. Sechi, M. D. Marinis, B. Wagner, "Wafer-level vacuum

- packaged micro-scanning mirrors for compact laser projection displays,” in *Proc. SPIE- MOEMS and Miniaturized Systems VII*, vol. 6887, pp. 688706, 2008.
- [54] K.-U. Roscher, H. Grätz, H. Schenk, A. Wolter, and H. Lakner, “Low-cost projection device with a 2D resonant micro scanning mirror,” in *Proc. SPIE- MOEMS Display and Imaging Systems II*, vol. 5348, pp. 22-23, 2004.
- [55] H. Urey, D. W. Wine, T. D. Osbo, “Optical performance requirements for MEMS-scanner based micro display,” in *Proc. SPIE- MOEMS and Miniaturized Systems*, vol. 4178, pp. 176-185, 2008.
- [56] K. Powell, H. Urey, M. Bayer, ”Multi-beam bidirectional raster scanning in retinal scanning displays,” in *Proc. SPIE- Helmet- and Head-Mounted Display VI*, vol. 7694, pp.77-88, 2001.
- [57] R. A. Conant, J. T. Nee, K. Y. Lau, R. S. Muller, “Dynamic deformation of scanning mirrors” *Optical MEMS*, Kauai, HI, 2000, pp. 49-50.
- [58] C. H. Ji, M. Choi, S. C. Kim, S. H. Lee, S. H. Kim, Y. Yee and J. U. Bu, ” An electrostatic scanning mirror with diaphragm mirror plate and diamond-shaped reinforcement frame” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp.1033-1039, 2006.
- [59] S. T. Hsu, T. Klose, C. Drabe, and H. Schenk, “Fabrication and characterization of a dynamically flat high resolution micro-scanner,” *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* , pp.1-8, 2008.
- [60] H. Urey, “Torsional MEMS scanner design for high-resolution display systems,” in *Proc. SPIE*, vol. 4773, pp.27-37, 2002.
- [61] H. Urey, “MEMS scanners for Display and Imaging Application,” in *Proc. SPIE– Optomechanronic Micro/Nano Components, Devices, and Systems*, vol. 5604, pp. 218-229, 2004.
- [62] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*. 4th Ed., Singapore, Prentice, 2005.
- [63] W. C. Young and R. G. Budynas, *Roark’s Formulas for Stress and Strain*. 7th Ed., New York, NY, McGraw-Hill, 2002.
- [64] C. Sooriakumar., Savage and Fugate, “A Comparative Study of Wet vs. Dry Isotropic Etch To Strengthen Silicon Micro-Machined Pressure Sensor”, *Proc.*

Electrochem. Soc., vol. 27, pp. 259, 1995.

- [65] R. K. Fettig, J. K. Kuhn, D. H. Moseley, A. S. Kuttyrev, J. Orloff, "Fracture Probability of MEMS Optical Devices for Space Flight Applications," *NASA*, 1999.
- [66] H. Schenk, P. Dürr, D. Kunze, H. Lakner, and H. Kück, "A Resonantly Excited 2D-micro-scanning-mirror with Large Deflection," *Sensors and Actuators A*, vol. 89, pp. 104-111, 2001.
- [67] D. Hah, C.-A. Choi, C.-K. Kim, and C.-H. Jun, "A Self-aligned Vertical Comb-drive Actuator on an SOI Wafer for a 2D Scanning Micromirror," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, pp. 1148-1156, 2004.
- [68] T. Mitsui, Y. Takahashi, and Y. Watanabe, "A 2-axis optical scanner driven nonresonantly by electromagnetic force for OCT imaging," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp. 2482-2487, 2006.
- [69] H.-M. Jeong, Y.-H. Park, Y.-C. Cho, J. Hwang, S.-M. Chang, S.-J. K., H.-K. Jeong, J. O Kim, and J.-H. Lee, "Slow scanning electromagnetic scanner for laser display," in *Proc. SPIE- Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, vol. 7, pp. 043003, 2009.
- [70] K. H. Kim, B. H. Park, G. N. Maguluri, T. W. Lee, F. J. Rogomentich, M. G. Bancu, B. E. Bouma, J. F. de Boer, and J. J. Bernstein, "Two-axis magnetically-driven MEMS scanning catheter for endoscopic high-speed optical coherence tomography," *Optics Express*, vol. 15, pp. 18130-18140, 2007.
- [71] N. P Pham , J. N Burghartz, and P. M Sarro, "Spray coating of photoresist for pattern transfer on high topography surfaces," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. 691-697, 2005.
- [72] H. R. Seren, O. Ferhanoglu, G. Hatipoglu, M. Boyman, S. Olcer, C. Ataman, H. Urey, "Miniaturized FR4 spectrometers," *International Symposium on Optomechatronic Technologies*, Istanbul, September, 2009, pp. 158-163.
- [73] Y. Mizoguchi and M. Esashi, "Design and Fabrication of A Pure-Rotation Microscanner with Self-Aligned Electrostatic Vertical Combdriives in Double SOI Wafer," in *Digest Tech. Papers Transducers'05 conference*, Seoul, June, 2005, pp.65-86.

- [74] H.-Y. Lin and W. Fang, "A Rib-Reinforced Micro Torsional Mirror Driven by Electrostatic Torque Generators," *Sensors and Actuators A*, vol. 105, pp.1-9, 2003.
- [75] D. Malta, C. Gregory, D. Temple, C. Wang, T. Richardson, and Y. Zhang, "Optimization of Chemistry and Process Parameters for Void-Free Copper Electroplating of High Aspect Ratio Through-Silicon Vias for 3D Integration," *Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, May, 2009, pp.1301-1306.
- [76] L. T. Romankiw, "A path: from electroplating through lithographic masks in electronics to LIGA in MEMS," *Electrochemical Microsystem Technologies*, vol. 42, pp. 2985-3005, 1997.
- [77] D. Sander, R. Hoffmann, V. Relling, and J. Muller, "Fabrication of metallic microstructures by electroplating using deep-etched silicon molds", *Journal of Microelectromechanical System*, vol. 4, pp.81-86, 1995.
- [78] C. H. Ahn and M. G. Allen, "Micromachined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, pp. 866-876, 1998.
- [79] M. Ruan, J. Shen, and C. B. Wheeler, "Latching Micromagnetic Relays," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 10, pp.511-517, 2001.
- [80] J. Yan, S. Luanava, and V. Casasanta, "Magnetic actuation for MEMS scanners for retinal scanning displays," in *Proc. SPIE- MOEMS Display and Imaging Systems*, vol. 4985, pp. 115-120, 2003.
- [81] J. J. Bernstein, T. W. Lee, F. J. Rogomentich, M. G. Bancu, Ki H. Kim, G. Maguluri, B. E. Bouma, and J. F. DeBoer, "Scanning OCT Endoscope with 2-Axis Magnetic Micromirror," in *Proc. SPIE- Endoscopic Microscopy II*, vol. 6432, pp. 64320L, 2007.
- [82] C.-H. Ji, M. Choi, S.-C. Kim, K.-C. Song, J.-U. Bu, and H.-J. Nam, "Electromagnetic Two-Dimensional Scanner Using Radial Magnetic Field," *Journal of Microelectromechanical System*, vol. 16, pp.989-996, 2007.
- [83] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman lectures on physics*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1964.

- [84] A. Wolter, T. Klose, S.-T. Hsu, H. Schenk, and H. Lakner, "Scanning 2D micromirror with enhanced flatness at high frequency," in *Proc. SPIE- MOEMS Display, Imaging, and Miniaturized Microsystems IV*, vol. 6114, pp. 61140L, 2006.
- [85] Shu-Ting Hsu, Thomas Klose, Christian Drabe, and Harald Schenk, "Two dimensional microscanners with large horizontal-vertical scanning frequency ratio for high-resolution laser projectors," in *Proc. SPIE- MOEMS and Miniaturized Systems VII*, vol. 6887, pp. 688703, 2008.
- [86] V. Milanovic, G. A. Matus, D. T. McCormick, "Gimbal-less monolithic silicon actuators for tip-tilt-piston micromirror applications," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, pp. 462-471, 2004.
- [87] M. Lebedev, H. Sato, J. Akedo, "Optical micro-scanner fabricated on stainless steel by aerosol deposition method," *IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, Tsukuba, Japan, August, 2004, pp. 165-168.
- [88] J. Kim and L. Lin, "Electrostatic scanning micromirrors using localized plastic deformation of silicon," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. 1777-1785, 2005.
- [89] Y.-C. Ko, J.-W. Cho, Y.-K. Mun, H.-G. Jeong, W. K. Choi, J.-W. Kim, Y.-H. Park, J.-B. Yoo, J.-H. Lee, "Eye-type scanning mirror with dual vertical combs for laser display," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 126, pp. 218-226, 2005.
- [90] M. Yoda, K. Isamoto, C. Chong, H. Ito, A. Murata, H. Toshiyoshi, "Design and fabrication of a MEMS 1-D optical scanner using selfassembled vertical combs and scan-angle magnifying mechanism," *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Their Applications Conference*, Finland, August, 2005, pp. 19-20.
- [91] A. A. Kuijpers, D. Lierop, R. H. M. Sanders, J. Tangenberg, H. Moddejonge, J. W. Th. Eikenbroek, T. S. J. Lammerink, R. J. Wiegerink, "Towards embedded control for resonant scanning MEMS micromirror," *Proceedings of the Eurosensors XXIII conference*, vol. 1, pp.1301-1310, 2009.
- [92] J.-W. Cho, Y.-H. Park, Y.-C. Ko, B.-L. Lee, S.-J. Kang, S.-W. Chung, W.-K. Choi, Y.-C. Cho, S.-M. Chang, J.-H. Lee, and J. Sunu, "Electrostatic 1D microscanner

- with vertical combs for HD resolution display,” in *Proc. SPIE- MOEMS and Miniaturized Systems VI*, vol. 6466, pp. 64660B, 2007.
- [93] A. Arslan, D. Brown, W. O. Davis, S. Holmstrom, S. K. Gokce, H. Urey, “Comb-Actuated Resonant Torsional Microscanner With Mechanical Amplification,” *Journal of Microelectromechanical System*, vol. 19, pp.936-943, 2010.
- [94] N. Asai, R. Matsuda, M. Watanabe, H. Takayama, S. Yamada, A. Mase, M. Shikida, K. Sato, M. Lebedev, J. Akedo, “Novel high resolution optical scanner actuated by aerosol deposited PZT films,” *IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS’03)*, Kyoto, Japan, January, 2003, pp. 247-250.
- [95] C. Drabe, R. James, T. Klose, A. Wolter, H. Schenk, H. Lakner, “A new microlaser camera,” in *Proc. SPIE- MOEMS and Miniaturized Systems VI*, vol. 6466, pp. 64660I, 2007.
- [96] <http://www.hiperscan.com/>, Hiperscan
- [97] C.-H. Ji, M. Choi, S.-C. Kim, S.-H. Lee, S.-H. Kim, Y. Yee and J.-U. Bu, “An electrostatic scanning micromirror with diaphragm mirror plate and diamond-shaped reinforcement frame,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp. 1033-1039, 2006.
- [98] H. Miyajima, “Development of a MEMS electromagnetic optical scanner for a commercial laser scanning microscope,” *J. Microlithogr. Microfabrication, Microsyst.*, vol. 3, pp. 348-357, 2004.
- [99] <http://www.ipms.fraunhofer.de/de/applications/mems-scanners.html>, Fraunhofer
- [100] D. E. Fulkerson, “A silicon integrated circuit force sensor,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 16, pp. 867–870, 1969.
- [101] J. Grahmann, T. Graßhoff, H. Conrad, T. Sandner, and H. Schenk, ”Integrated piezoresistive position detection for electrostatic driven micro scanning mirrors,” in *Proc. SPIE - MOEMS and Miniaturized Systems X*, vol. 7930, pp. 79300V, 2011.

附錄 A_符號對照表

表 A-1 本論文所使用之符號對照表

符號	說明	慣用單位
a	扭轉彈簧長邊之半	m
$(a_G)_n$	向心加速度	m/s^2
$(a_G)_t$	切線加速度	m/s^2
A	x 方向之最大振幅	m
A_{mag}	磁性材料的截面積	m^2
b	扭轉彈簧短邊之半	m
B	y 方向之最大振幅	m
B_{field}	粒子所在位置之磁場向量	Tesla
C	系統阻尼常數	Nm/s
C_f	外環相對於靜止空氣之阻尼常數	Nm/s
C_m	鏡面相對於靜止空氣之阻尼常數	Nm/s
C_{mf}	鏡面相對於外環之阻尼常數	Nm/s
d	質心偏心距離	m
d_{gap}	上下磁鐵陣列間距	m
d_{mag}	磁鐵陣列間隙中紅色虛線所在位置	m
D	圓形孔徑或微掃描面鏡之直徑	m
E	楊氏模數	Pa
E_{field}	粒子所在位置之電場	V/m
f	透鏡之焦距或微掃描面鏡與屏幕之距離	m
f_h	x 方向(水平)結構共振頻率	Hz
f_v	y 方向(垂直)結構共振頻率	Hz
f_r	畫面更新頻率	Hz
f_{clock}	系統之最低時脈頻率需求	Hz
f_m	結構扭轉共振頻率	Hz
F_N, F_S	磁性材料兩端所感應出的靜磁力	N
F_{EM}	電磁力	N
$F_{Lorentz}$	勞倫茲力	N
$(F_O)_x$	同平面作用力	N
$(F_O)_y$	出平面作用力	N
G	結構之剪力模數	Pa
h	彈簧厚度。當彈簧厚度為彈簧截面短邊時，則 $h=2b$	m
H_{ext}	外加磁場強度	A/m
I	等效扭轉慣性矩	$kg \cdot m^2$
I'	修正後之質量慣性矩	$kg \cdot m^2$
I_f	外環之等效質量慣性矩	$kg \cdot m^2$
I_m	外環之等效質量慣性矩	$kg \cdot m^2$

$I_{current}$	導線上之電流	A
k	x 軸向與 y 軸向之頻率比	-
K_f	外環彈簧之等效扭轉剛性	Nm
K_m	鏡面彈簧之等效扭轉剛性	Nm
K_s	彈簧等效扭轉剛性	Nm
K_{os}	過渡掃描常數	-
$K_{os\ h}$	水平方向過渡掃描常數	-
$K_{os\ v}$	垂直方向過渡掃描常數	-
K_{ub}	單向($K_{ub}=1$)或雙向($K_{ub}=2$)循序掃描	-
$(K_O)_x$	同平面剛性	N/m
$(K_O)_y$	出平面剛性	N/m
L	垂直扭轉軸之半徑方向長度	m
L_f	扭轉彈簧之長度	m
L_m	沿著彈簧方向(y 軸)之鏡面大小	m
$L_{current}$	導線長度向量	m
L_0	螺旋型線圈第一匝線圈之長邊長度	m
ΔL	螺旋型線圈長邊間距	m
M	磁化量	Tesla
M_m	結構之質量	kg
M_s	材料飽和磁化量	Tesla
N_h	畫面水平解析度	-
N_v	畫面垂直解析度	-
N_l	沿著長度方向的形狀異向常數	-
N_t	分別厚度方向的形狀異向常數	-
n	線圈匝數	-
P_{input}	輸入功率	W
q	粒子所帶之電荷量	coulomb
r	轉動軸心之偏移距離	m
R_A	艾利圓盤之半徑	m
t	時間	s
t_m	鏡面厚度	m
t_c	畫面中心處所需之雷射脈衝時間	s
t_e	畫面邊界處所需之雷射脈衝時間	s
t_{ret}	雷射光點折返時間	s
T_f	施加於外環上之力矩	Nm
T_m	施加於鏡面上之力矩	Nm
$T_j(t)$	外界施加力矩	Nm
$T_{Lorentz}$	勞侖茲力所產生之力矩	Nm
v	粒子移動速度向量	m/s
V_{mag}	鐵磁性材料的體積	m^3
w	彈簧寬度。當彈簧寬度為彈簧截面長邊時，則 $w=2a$	m
W_0	螺旋型線圈第一匝線圈之短邊長度	m

ΔW	螺旋型線圈短邊間距	m
$x(t)$	同平面擺盪位移	m
$y(t)$	平面擺盪位移	m
$Z(i\omega)$	機械阻抗	N/m
α	角加速度	rad/s ²
ρ	鏡面之密度	kg/m ³
γ	外加磁場與初始位置間之夾角	degree
δ	鏡面動態變形	m
λ	入射光之波長	m
τ_{max}	扭轉最大應力	Pa
ω	角頻率或角速度	rad/s
ω_0	微掃描面鏡之操作頻率	rad/s
$\Delta\theta_{resolution}$	可解析之最小角度	rad
θ, θ_{mech}	機械掃描角度	rad
θ_0	最大機械掃描角度	rad
$\theta_{optical}$	光學掃描角度	rad
θ_{fx}	針對快軸方向之外環轉動角度	rad
θ_{mx}	針對快軸方向之鏡面轉動角度	rad
$\theta_f(t)$	角位移	rad
θ_{mag}	磁場方向之夾角	degree
ϕ_m	磁化量方向與易軸間之夾角	degree
π	圓周率=3.14159	-
μ_0	真空中的導磁常數 $4\pi \times 10^{-7}$	H/m

附錄 B_雷射投影系統之驗證

本論文於 5-4 節中有進行雷射投影系統之驗證，在此附錄中將針對其實施方法進行介紹與討論。主要針對系統架構、影像編碼與投影測試結果進行討論。

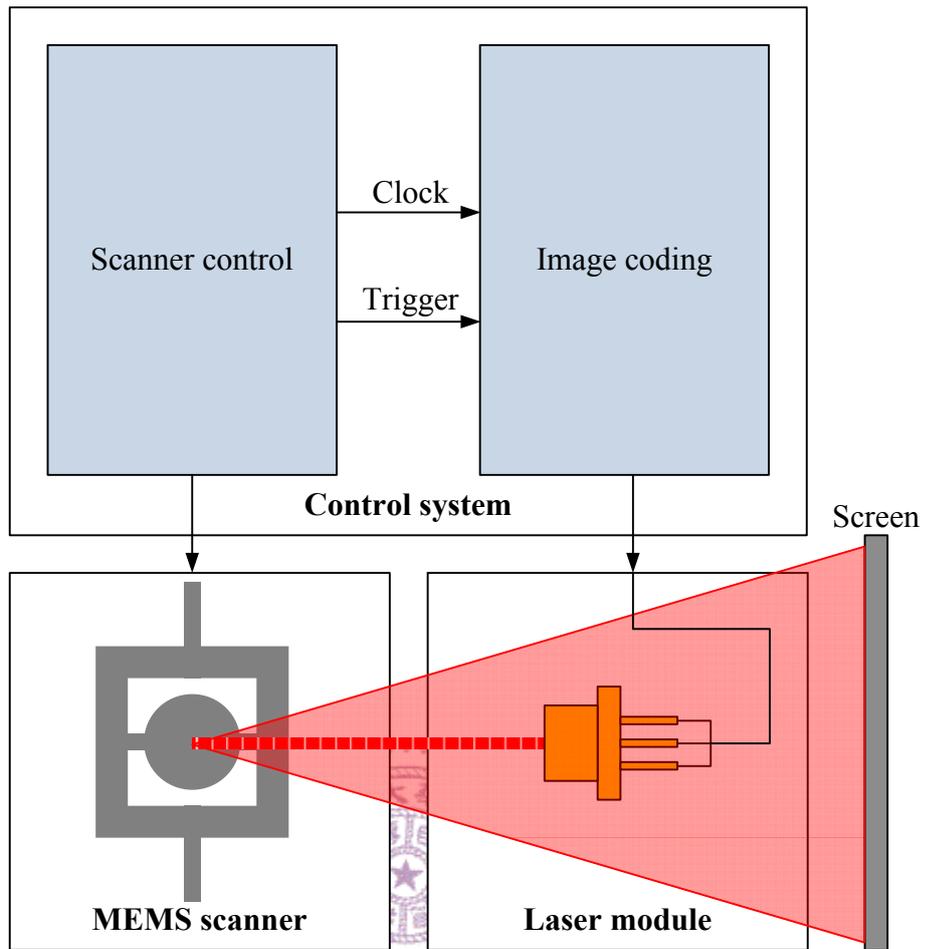
實際之雷射投影系統架構如圖 B-1 所示，基本架構與圖 1-1 之架構相同，但在此之除了使用商用雷射脈衝模組(包含光源與光學系統)之外，因微掃描面鏡元件本身並無內建角度感測機制，此系統驗證在此僅為開迴路控制系統。控制系統部分包含微掃描面鏡之驅動控制與影像編碼，硬體皆是使用任意波形產生器來實現，由圖 B-1 中之系統架構可看到，此系統以微掃描面鏡之訊號產生為主控者，除了本身產生訊號驅動微掃描面鏡之外，也分別提供 10MHz 之時脈與同步訊號，輸入至負責影像編碼之任意波形產生器以進行儀器同步。

針對微掃描面鏡驅動訊號方面，本論文自行編輯驅動波形，基本上由低頻訊號加上一高頻訊號所組成，如圖 B-2 所示，此特殊波形可定義為一個週期，且高頻與低頻訊號之頻率比為 300，因此若將此訊號用以驅動複合電磁致動力設計之微掃描面鏡，低頻訊號可用來驅動慢軸達到非共振操作，高頻訊號則可激振快軸達到共振操作。影像編碼則使用裝載於個人電腦上之圖形化程式語言軟體 LabVIEW 來進行，其軟體之人機介面與程式區視窗分別如圖 B-3 與圖 B-4 所示。此雷射編碼程式功能主要是將一特定解析度之圖片讀入程式，並將其每個畫素之位置與明暗轉為二維數值陣列，接著將此二維陣列之偶數列進行翻轉，以符合循序掃描軌跡之順序，由圖 B-3 之圖形翻轉預覽視窗中，可看出測試圖形之文字與灰階色塊由左方視窗變為右方視窗之左右對稱圖形。將翻轉過之二維數值陣列轉換為一維數值陣列輸出，此一維數值陣列即為雷射之驅動訊號，可利用圖 B-3 中雷射編碼波形預覽視窗看出驅動訊號之大小，此即為脈衝雷射之強弱。此外，本程式中也撰寫了一些儀器設定參數運算公式，如取樣頻率、系統水平解析度、系統總畫素、垂直掃描頻率等，提供在實際投影時能快速的修正各項參數。此雷射編碼程式之程式區視窗如圖 B-4 所示，可對應人機介面有著圖片輸入、圖形翻轉、雷射波形預覽與輸出、儀器設定參數運算之圖形化程式語言。

利用上述之系統架構與程式編碼，可以實現雷射投影顯示系統，可輸入簡單的測試圖形並觀察其投影結果，如圖 B-5 所示，圖 B-5(a)為輸入影像圖形，其編碼解析度為 WVGA 854×480 格式，基本上由文字、圖塊與格線所組成，圖 B-5(b)

為經雷射投影至屏幕上之結果，影像雖然能呈現出來，但由於鏡面本身平坦度不佳，造成光點些微發散，因此影像銳利度不足。觀察圖中央之灰階圖塊，則可呈現亮度由 0% 至 100% (由左而右依序排列) 之差異，另外可觀察畫面中之格線，發現畫面邊緣因雷射掃描速度較慢，因此較輸入格線寬度較窄，此為雷射掃描系統本身運作機制所產生之像差，通常可以藉由光學透鏡或影像編碼來修正此像差。圖 B-6 為灰階風景照投影結果，可看到背景之漸層效果能清楚的呈現出來。

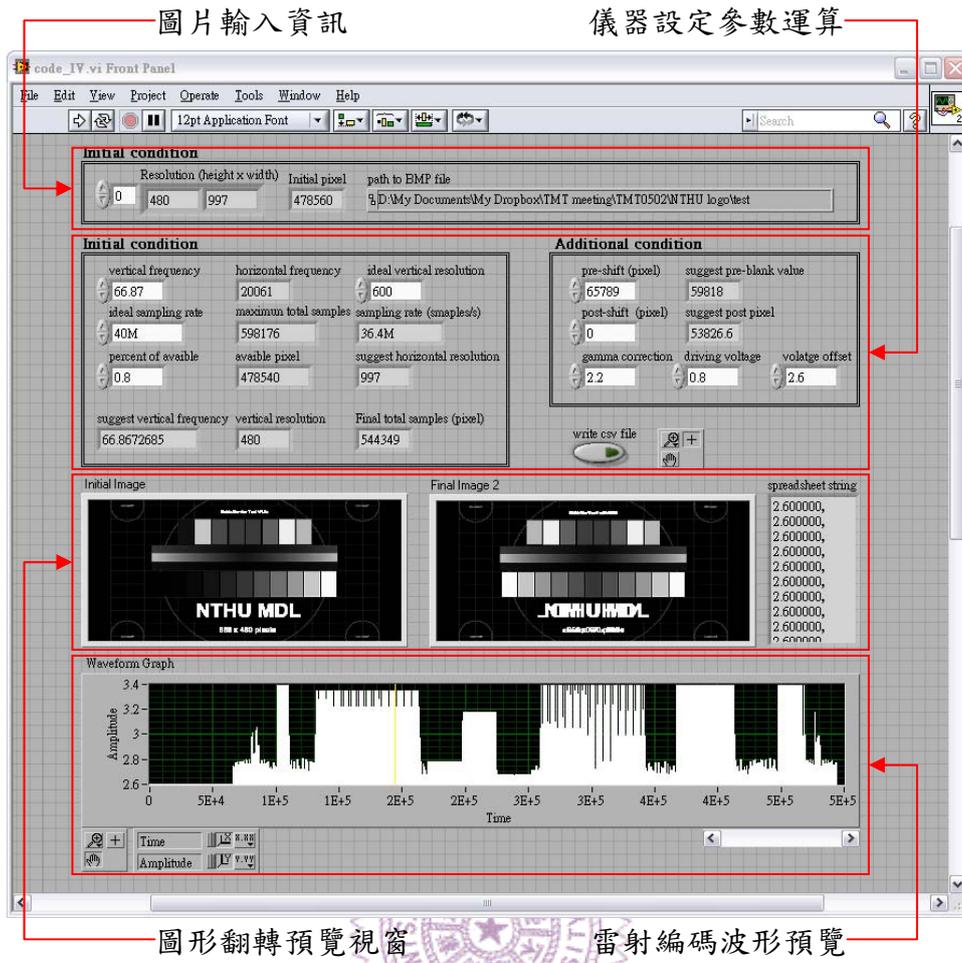
此圖形轉換為雷射編碼之過程，為一龐大資料運算過程，以 WVGA 854x480 的編碼規格而言，光是可見之圖形解析度約 40 萬畫素，亦即在一個約 1/60 秒之畫面更新時間內有 40 萬次之雷射脈衝輸出，且最短雷射脈衝時間約為 21ns，因此若元件本身之操作頻率有些許之飄移，則很容易就會造成雷射脈衝無法於正確位置上顯示，如圖 B-7 所示，此為慢軸與快軸之操作頻率錯誤時的投影結果，會造成圖形之偏斜，且因雷射軌跡為雙向循序掃描，因此偏斜情形分別有朝左跟朝右之影像交錯之情形。當僅快軸操作頻率錯誤或雷射脈衝起始點錯誤時，其投影結果如圖 B-8 所示，會造成雙向循序掃描之基數列與偶數列之影像交錯分開，造成有兩個影像相鄰重疊。若要減少操作頻率與操作振幅之差異，使用閉迴路方式控制系統則是解決此問題的最佳選擇。本論文成功地將雷射投影掃描系統實現，且針對投影之基本特性與遭遇到的問題進行討論，期望此系統架設經驗能提供後續相關研究應用。



圖B-1 雷射投影驗證之系統架構



圖B-2 微掃描面鏡驅動訊號



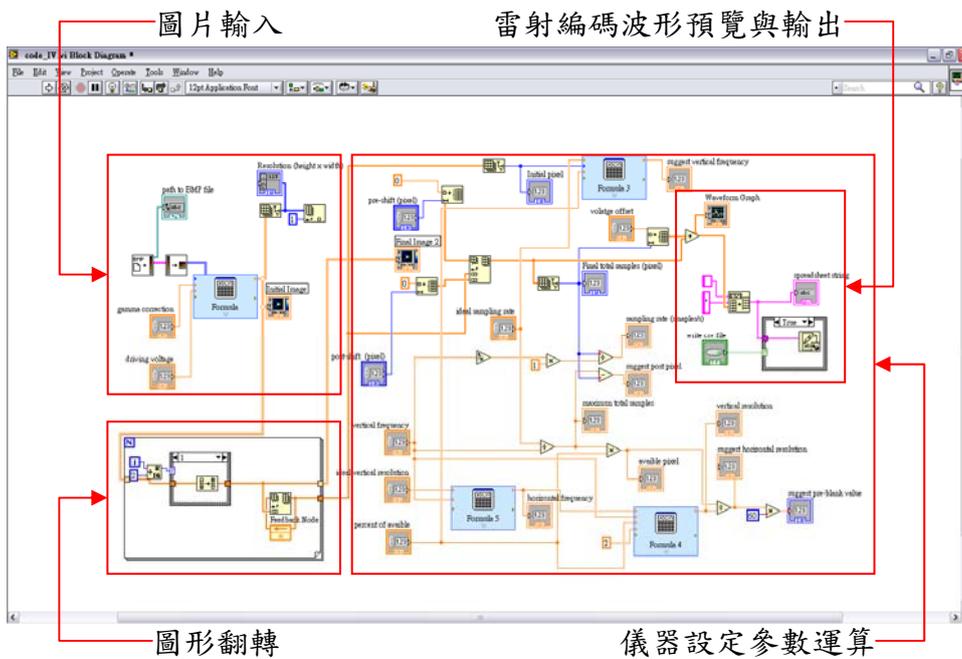
圖片輸入資訊

儀器設定參數運算

圖形翻轉預覽視窗

雷射編碼波形預覽

圖B-3 人機介面



圖片輸入

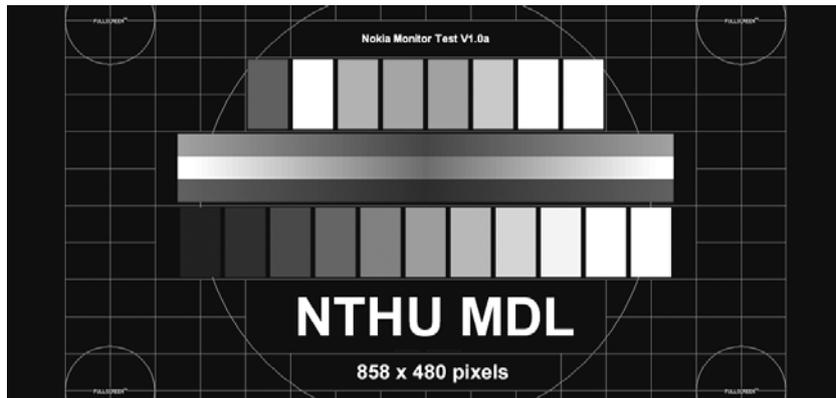
雷射編碼波形預覽與輸出

圖形翻轉

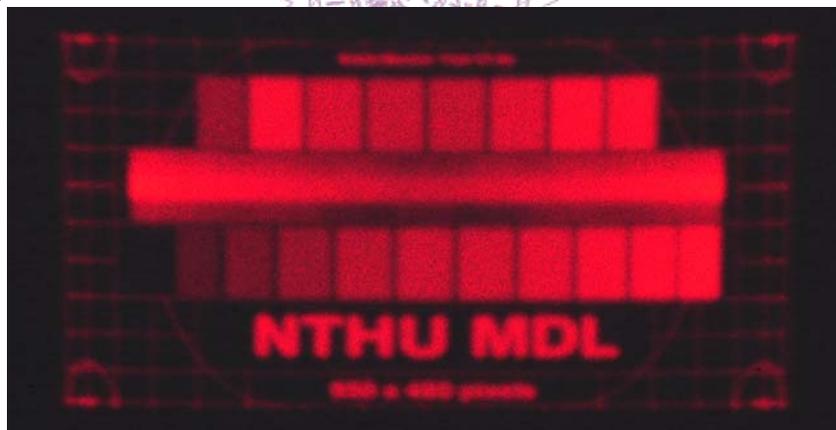
儀器設定參數運算

圖B-4 程式區視窗

(a)



(b)

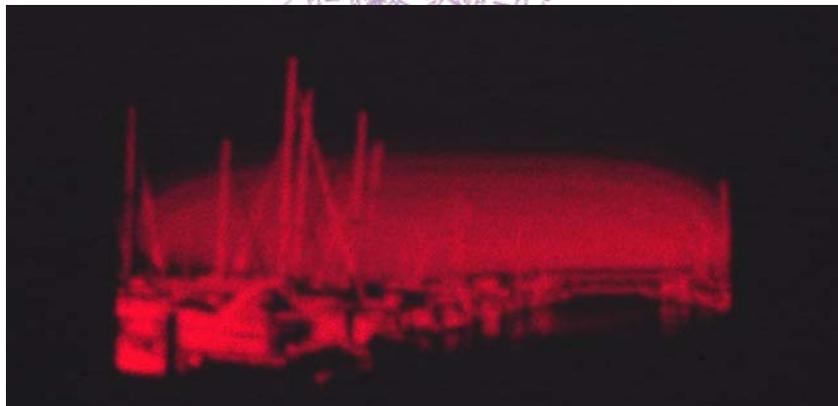


圖B-5 測試圖形與投影結果

(a)



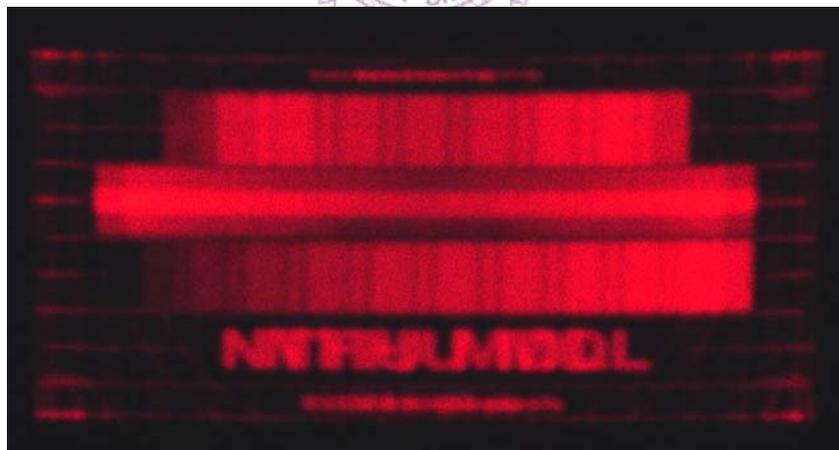
(b)



圖B-6 灰階風景照投影結果



圖B-7 慢軸與快軸操作頻率錯誤之投影結果



圖B-8 快軸操作頻率錯誤或雷射脈衝起始點錯誤之投影結果

論文著作

國際期刊論文

1. Hsueh-An Yang, Tsung-Lin Tang, Sheng Ta Lee, and Weileun Fang, “A Novel Coil-less Scanning Mirror Using Eddy Current Lorentz Force and Magnetostatic Force,” *Journal of Microelectromechanical System*, vol. 16, pp.511-520, 2007. (Impact factor: 1.964)
2. Tsung-Lin Tang, Chia-Pao Hsu, Wen-Chien Chen, and Weileun Fang, “Design and Implementation of Torque-Enhancement 2-axis Magnetostatic SOI Optical Scanner,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, pp.025020, 2010. (Impact factor: 2.276)
3. Tsung-Lin Tang and Weileun Fang, “Magnetostatic Torsional Actuator with Embedded Nickel Structures for the Improvement of Driving Force and Wobble Motion,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 21, pp. 095007, 2011. (IOP Select*)
4. Yu-Chia Liu, Ming-Han Tsai, Tsung-Lin Tang, and Weileun Fang, “Post-CMOS selective electroplating technique for the improvement of CMOS-MEMS accelerometers,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 21, 2011. (Accepted)

* IOP Select: Articles have been chosen by IOP editors for their novelty, significance and potential impact on future research.

國際研討會論文

1. Tsung-Lin Tang, Hsueh-An Yang, Han-Tang Su, and Weileun Fang, “A Magnetic Repulsive Force MEMS Actuator,” *The 14th International Conference in Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers'07)*, Lyon, France, June, 2007, pp. 2235-2238.
2. Tsung-Lin Tang, Wen-Chien Chen, Rongshun Chen, and Weileun Fang, ”The Torque-Enhancement Design for Magnetostatic Scanner,” *Optical MEMS & Nanophotonics*, Freiburg, Germany, August, 2008, pp.164-165.
3. Chia-Pao Hsu, Wen-Chien Chen, Tsung-Lin Tang, Ming-Chuen Yip, Weiluen Fang, ” The two-axis magnetostatic-drive single-crystal-Si micro scanner driven by back-side electroplating Ni film,” *Optical MEMS & Nanophotonics*, Freiburg, Germany, August, 2008, pp.152-153.

4. Hsin-Yu Huang, Tsung-Lin Tang, Hsiu-Ting Hsu, and Weileun Fang, “An epitaxial silicon scanning mirror driven using magnetostatic force,” *EUROSENSORS XXII*, Dresden, Germany, September, 2008, pp. 354-357.
5. Han-Tang Su, Tsung-Lin Tang, and Weileun Fang, “A Novel Underwater Actuator Driven by Magnetization Repulsion/Attraction,” *The 22nd IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS’09)*, Sorrento, Italy, January, 2009, pp.1051-1054.
6. Tsung-Lin Tang, Chia-Pao Hsu, Wen-Chien Chen, and Weileun Fang, “The Double-Side Electroplating and Slender Ferromagnetic Patterns Torque-Enhancement Design for Magnetostatic actuator,” *The 15th International Conference in Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers’09)*, Denver, CO, June, 2009, pp. 873-876.
7. Yi-Shuo Ting, Chih-Chun Lee, Chi-Tsung Hong, Hung-Yi Lin, Tsung-Lin Tang, Rongshun Chen, Weileun Fang, “Implementation of polymer-dispersed liquid crystal microprism array for LED radiation pattern application,” *The 23rd IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS’10)*, Hong Kong, China, January, 2010, pp.192-195.
8. Tsung-Lin Tang, Rongshun Chen, Weileun Fang, “Magnetostatic torsional actuator with embedded nickel structures for pure rotation,” *The 24th IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS’11)*, Cancun, Mexico, January, 2011, pp. 1249-1252.
9. Hsin-Yu Huang, Tsung-Lin Tang, Wei-Lun Sung, Hung-Yi Lin, and Weileun Fang, “A Magnetostatic 2-axis MEMS Scanner with I-section Rib-reinforcement and Slender Permanent Magnet Patterns,” *The 16th International Conference in Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers’11)*, Beijing, China, June, 2011, pp. 2366-2369.
10. Yu-Chia Liu, Ming-Han Tsai, Tsung-Lin Tang, and Weileun Fang, “Improvement of CMOS-MEMS accelerometer using post-CMOS selective electroplating technique,” *Proc. 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers’11)*, Beijing, China, June, 2011, pp. 1002-1005.

國內研討會論文

1. 楊學安, 湯宗霖, 方維倫, “利用渦電流產生勞倫茲力驅動無線圈式微掃描面鏡,” 第十屆奈米工程暨微系統技術研討會, 新竹, 台灣, 十一月, 2006, 1d-1。

2. Tsung-Lin Tang, Hsueh-An Yang, Sheng Ta Lee, and Weileun Fang, “Dual-axis Raster Scanning Mirror Driven Using Magneto-static Force and Lorentz Force,” *Symposium on Nano Device Technology*, HsinChu, Taiwan, May, 2007, T6-27.
3. 湯宗霖, 楊學安, 蘇漢堂, 方維倫, “電磁斥力致動器,” 第十一屆奈米工程暨微系統技術研討會, 台中, 台灣, 八月, 2007, PC7.
4. 湯宗霖, 徐家保, 陳文健, 方維倫, “靜磁式致動器之力矩增強設計,” 第十三屆奈米工程暨微系統技術研討會, 新竹, 台灣, 七月, 2009, 07-1112.
5. 黃信瑀, 湯宗霖, 許琇婷, 方維倫, “靜磁力驅動之磊晶矽雙軸微掃描面鏡,” 第十三屆奈米工程暨微系統技術研討會, 新竹, 台灣, 七月, 2009, 08-1305.
6. Tsung-Lin Tang, Rongshun Chen, Weileun Fang, “Magnetostatic torsional actuator with embedded nickel structures for pure rotation,” *Symposium on Nano Device Technology*, HsinChu, Taiwan, May, 2011, NB26.

專利

1. 楊學安, 方維倫, 湯宗霖, “微型掃描器極其製程、驅動架構以及驅動方法,” 中華民國專利, 發明, 專利編號I304394號.
2. 楊學安, 方維倫, 湯宗霖, “磁性元件的驅動方法,” 中華民國專利, 發明, 申請案號96106288號.
3. 楊學安, 方維倫, 湯宗霖, “磁性元件及其製程,” 中華民國專利, 發明, 專利編號I341602號.
4. Hsueh-An Yang, Weileun Fang, and Tsung-Lin Tang, “MICRO SCANNER AND MANUFACTURING PROCESS, DRIVING STRUCTURE AND DRIVING METHOD THEREFOR,” 美國專利, 發明, 申請案號11/650,402.

獲獎記錄

1. Tsung-Lin Tang and Weileun Fang, Outstanding Paper Award, Symposium on Nano Device Technology, National Nano Device Laboratories (NDL), 2007.
2. Tsung-Lin Tang and Weileun Fang, Commendation, 2nd TSMC Outstanding Student Research Award, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), 2007.
3. 湯宗霖, 方維倫, 銀質獎, 第四屆上銀科技機械碩士論文獎, 上銀科技, 2007.
4. 湯宗霖, 口頭報告組第三名, 工學院第八屆研究生論文發表競賽, 國立清華大學, 2007.