

結合微陣列式熱致動器之新型微光學元件抬升結構的探討

蔡健忠 范振豪 陳仁杰 林培豪

明新科技大學光電系統工程系

摘要

本文藉由結合微陣列式熱致動器 (Micro Array Thermal Actuator, MATA) 做為主要驅動牽制式抬升結構的動力, 並設計出單支彈簧來牽制微面鏡傾斜, 且由改變彈簧結構的節數、節距及寬度以及牽制式抬升結構的長度與寬度, 探討微面鏡抬升時之最大位移量及其平穩度等特性, 並依照國家晶片系統設計中心 (National Chip Implementation Center, CIC) 之製程設計元件規範下, 進行微面鏡之運動模式模擬分析, 以期找出最佳抬升微面鏡之位移量及其角度。研究結果顯示, 彈簧結構之變化, 在微面鏡抬升時最大位移量及平穩度的分析中, 節數越多, 節距越長, 寬度越寬, 有助於抬升時之最大位移量, 再將牽制式抬升結構與彈簧結構之變化做比較, 得知彈簧結構之變化, 對微面鏡抬升時之最大位移量之變化影響比牽制式抬升結構變化來得顯著, 而針對微面鏡平穩度之影響分析, 則以改變彈簧結構的節數及牽制式抬升結構的寬度較為明顯。由兩層金屬層為支撐臂的結構模擬分析結果中顯示, 平穩度在 $0.6\sim 0.9\mu\text{m}$ 之間, 且隨著操作電壓的增加, 平穩度也越差, 因此為了改善微面鏡抬升的平穩度, 使金屬層增加至三層結構的支撐臂設計, 其剛性較強, 平穩度有大幅度的改善。將條件整合後, 本研究所提出之新型抬升結構之設計, 其微面鏡最大位移量約為 $58.6\mu\text{m}$, 而微面鏡可運用的最大之角度為 17.04° , 因此本元件將可廣泛應用為控制微光學元件大角度變化的抬升與精密定位等用途。

關鍵詞：微陣列式熱致動器，牽制式抬升結構，彈簧結構，微面鏡，微光學元件

Investigation of a Novel Elevating Structure Combined with MATA for Micro Optical Devices

Chien-Chung Tsai Zhen-Hao Fan Jen-Chieh Chen Pei-Hao Lin

Department of Opto-Electronic System Engineering, Ming Hsin University of Science and Technology

Abstract

The paper proposed a novel curb structure to elevate the micro optical device by the driving force of micro array thermal actuator, MATA. The effects of spring structure and curb structure on the maximum displacement and the variation of surface level of the elevated micro mirror varied with operation voltage are investigated. The motion behaviors of the elevated micro mirror are stimulated and analyzed to get the maximum displacement and inclined angle of the device. The results show the wider width, the longer pitch and the more pitch numbers of spring structure are; the maximum displacement of the elevated micro mirror is larger. Compared the effects of spring structure and curb structure on the maximum displacement of the elevated micro mirror, there are more influence on the variation of maximum displacement due to the varied spring structures

than the varied curb structures. On the other hand, the variations of surface level of the elevated micro mirror are significant by the varied pitch number of spring structure and the varied width of curb structure. However, the variation of surface level is between $0.6\mu\text{m}$ and $0.9\mu\text{m}$ based upon the two metal layers design of the elevating arm. Nevertheless, the variation of surface level is improved to $0.3\mu\text{m}$ by the three metal layers design of elevating arm due to the high rigidity. The maximum displacement and inclined angle of the proposed micro optical device are $58.6\mu\text{m}$ and 17.04° , respectively.

Keywords : Micro Array Thermal Actuator, Curb Structure, Spring Structure, Micro Mirror, Micro Optical Devices

一、前言

從 1956 年蕭克力(Shockly)、巴丁(Bardeen)和布拉頓(Brattain)三人因為發明電晶體而得到諾貝爾獎，開啓了微小化的時代，因電晶體取代了真空管，而電晶體亦導致了積體電路的快速發展，使電腦的普及一日千里。80 年代，傳統工業面臨著極需轉型為精密工業的時刻，微機電系統 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 也慢慢開始在歐美日等國家受到重視，因為微機電系統所構成之元件或系統其微小化可和電路訊號整合在單一晶片上，同時可配合半導體製程進行大量生產，並且具有高精密度、高可靠度的特性 [1, 2]。

而近年來，微光機電 (Optical MEMS, MOEMS) [3] 技術日漸成熟，其利用微機電製程及相關之微加工技術，發展出各種高精度、高穩定性之微光機電元件，如微面鏡系統、光纖切換器和微光學移動系統等 [4, 5]，且由於元件設計與製程技術日新月異，加上目前研究多利用共用製程 (Common Process) 平台發展，使元件於研發階段便可進行大量生產，加快了研究者的腳步，亦使科技不斷快速的成長。

二、研究動機

在各式微致動元件中，微陣列式熱致動器具有結構簡單、輸出位移大、輸出力量大等諸多特點，為近年來微機電領域之重要研究課題，本研究利用歷年已設計之對接式型及平行式型微陣列式熱致動器，作為驅動來源，設計出可應用於抬升微光學元件之新型抬升結構與致動系統，此抬升結構創新之設計可使微陣列式熱致動器由同平面 (In plane) 方向運動轉為出平面 (Out of plane) 方向，以做為控制微光學元件高角度的抬升與精密定位等功能，並可將之整合成爲一微光機電系統。

本研究利用積體電路設計的輔助軟體 (Tanner Tools) 和微機電設計模擬軟體 (IntelliSuite) 設計出微陣列式熱致動器應用在微光學元件之抬升結構運動上的模型及結構，並制定出參數，分析其結果後，再依最佳設計送國科會晶片中心，以 CMOS MEMS 共用製程製作出所設計之元件。

三、微抬升結構及微面鏡之光罩尺寸設計及模擬

3.1 微陣列式熱致動器

本實驗室於第 29、30 期明新學報〔6, 7〕已充分探討微陣列式熱致動器的運動行為模式，瞭解以 $\{1 \times N\}$ 平行式及 $\{2 \times N\}$ 對接式微陣列式熱致動器施加電壓與位移量的關係，而其所設計單體之場發射式電子顯微鏡下之照片，如圖 1(a)及圖 1(b)，平面尺寸規格，則如圖 2 所示。研究結果顯示，欲得到微陣列式熱致動器最大之位移量，在不熔毀元件情況下，最高操作電壓之極限為 10 伏特，此時位移量最大值約為 $5.8 \mu\text{m}$ ，元件最高溫度之值僅與微結構層材料—複晶矽 (Poly-silicon) 材料性質有直接關連，其熔點約 1410°C ，而材料的熔毀溫度與幾何尺寸大小及元件串接的方式無關。但當微陣列式熱致動器使用鋁為電極或導線時，因鋁的熔點僅為 660.3°C ，故必須將最高操作電壓極限降至 8V，使溫度降至鋁的熔點，〔8, 9〕。整體上，相同電壓下，平行式微陣列式熱致動器之位移量較對接式為高，且平行式串接數目愈大，位移量有些微的減少；而在對接式中，則有些微的增加。在微陣列式熱致動器運動方向精準度的研究上顯示，平行式之偏方向位移量，明顯大於對接式之偏方向位移量，因此，對接式之設計，雖然在相同操作電壓下，主要運動方向之位移量較小，但卻能較準確的推動目標。

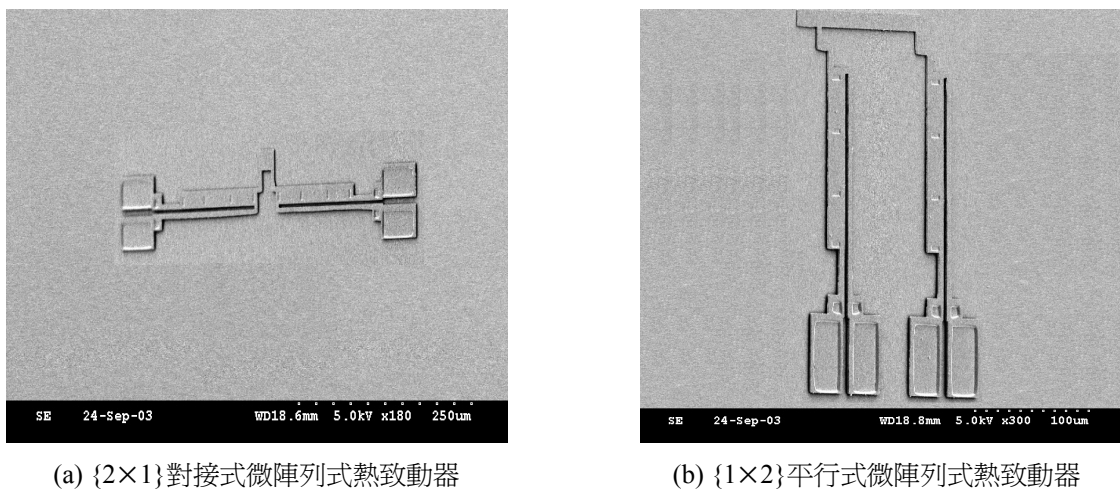


圖 1 微陣列式熱致動器之 FE-SEM 圖

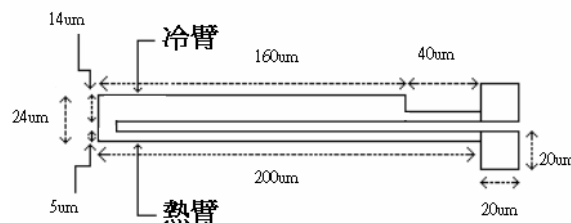


圖 2 平面尺寸圖 (單位： μm)

3.2 牽制式抬升結構

牽制式抬升結構的設計是使用一個口型(Metal 1)結構，並在口型結構頂端設計一個與推擠臂相連結的牽制點 A，且推擠臂與微陣列式熱致動器是相同之沉積層 Poly 2，另在口型結構末端設計兩個固定端 B、C，當驅動微陣列式熱致動器使其向 Y 軸方向推擠時，受到牽制點 A 的牽制，以使運動方向轉為出平面運動，可應用於抬升微光學元件與精密定位等用途，其示意圖如圖 3 所示。

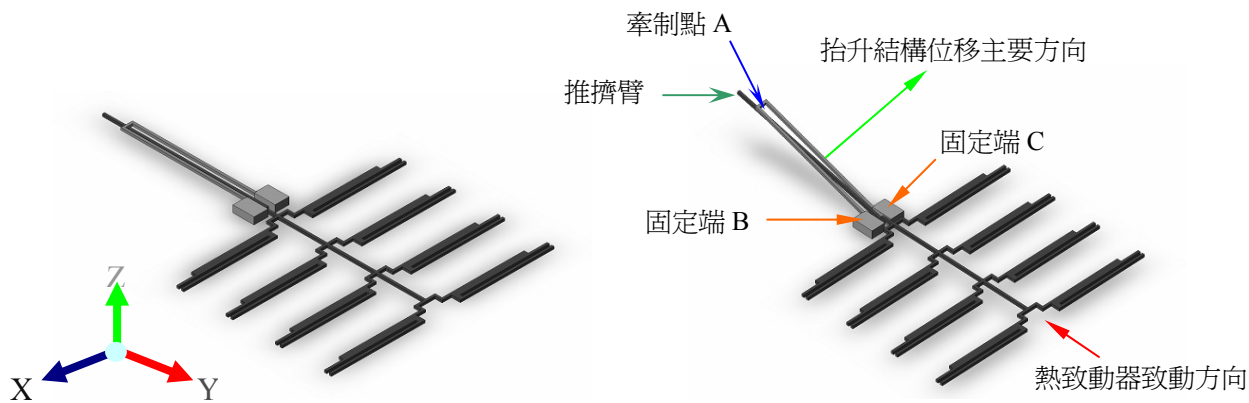
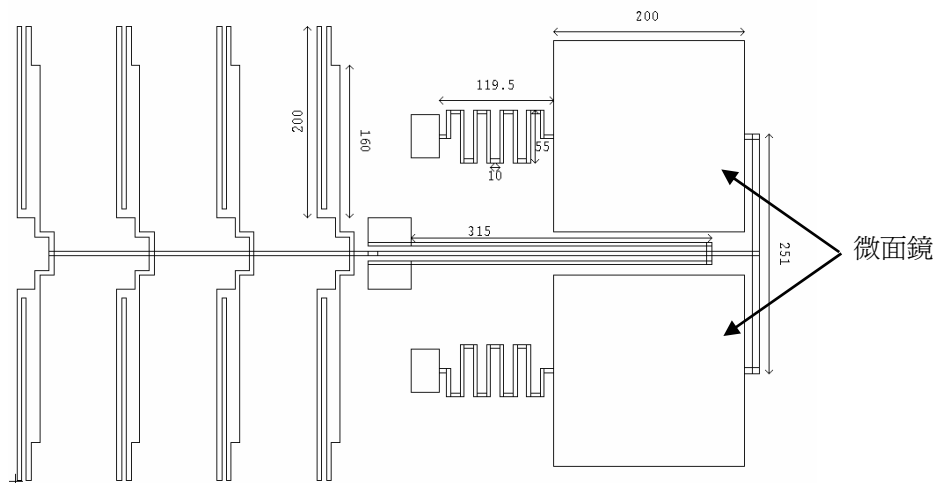


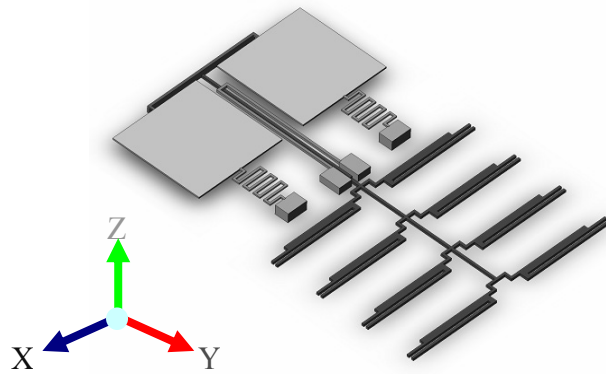
圖 3 牽制式抬升結構示意圖

3.3 整合牽制式抬升結構與微面鏡的彈簧結構

本元件的目的是使微面鏡傾斜抬升，因此將設計之牽制式抬升結構加上微面鏡，使微面鏡一邊與牽制式抬升結構連接，而對邊連接彈簧結構。當牽制式抬升結構抬升時，彈簧結構會牽制微面鏡，使微面鏡產生傾斜角度。元件平面幾何尺寸及立體圖示及座標，如圖 4(a)(b)所示。



(a) 元件平面幾何尺寸 (單位: μm)



(b) 立體圖示及座標

圖 4 微面鏡平面尺寸及立體圖

3.4 元件模擬的步驟

以 L-Edit 繪製設計微系統結構光罩，定義使用所需之製程條件和步驟，並且與 IntelliSuite 軟體結合，以進行微結構的各種模擬分析。茲將本研究的模擬步驟簡述說明如下：

第一步驟：由 L-Edit 建立光罩檔。

第二步驟：由 IntelliSuite 之 IntelliFab 建立與實際製程相符合之製程。本研究之微陣列式熱致動器之製程以 CIC 之製程為規範。

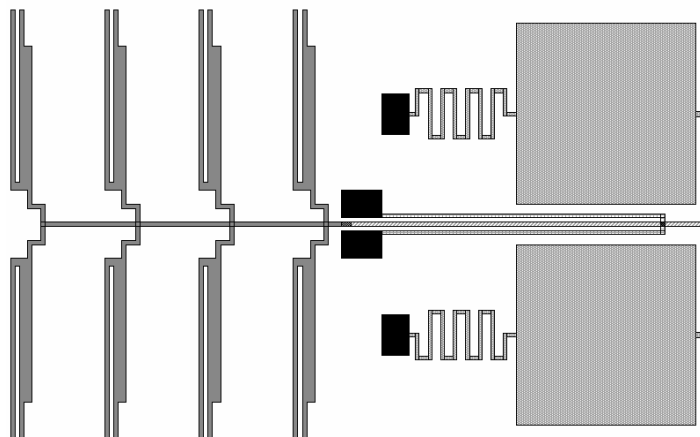
第三步驟：設定邊界條件，如設定微陣列式熱致動器之電極部位之電壓，起始溫度，及設定微面鏡端點之位移量。

第四步驟：進行微陣列式熱致動器之電壓與位移量分析，觀察微面鏡運動及其是否有干涉現象。

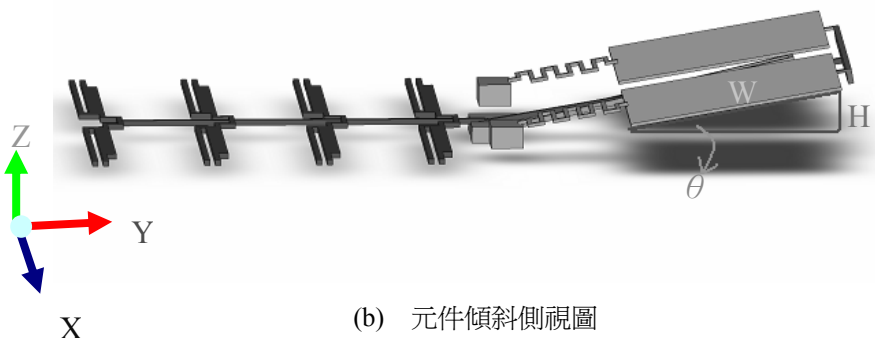
3.5 微面鏡之基本分析

由 L-Edit 繪製設計之微面鏡光罩圖，如圖 5(a)所示。當微陣列式熱致動器於抬升結構施力時，微面鏡傾斜高度定為 H ，而面鏡寬為 W ，如圖 5(b)所示，因此每當微面鏡產生 $1\ \mu\text{m}$ 傾斜高度時，則傾斜角度

$$(\theta)\text{爲 } \sin^{-1} \frac{H}{W} = \sin^{-1} \frac{1\ \mu\text{m}}{200\ \mu\text{m}} = 0.286^\circ$$



(a) 元件俯視光罩圖



(b) 元件傾斜側視圖

圖 5 微面鏡傾斜相關圖示

四、分析與模擬結果

本節針對所設計出的元件，依微面鏡傾斜之牽制結構、彈簧結構變化、牽制式抬升結構就微面鏡抬升時的最大位移量及平穩度，進行模擬變化分析，再以微機電模擬軟體 IntelliSuite 並參考元件材料特性下〔10〕進行性能分析，藉由分析結果了解元件的運動模式及特徵。圖 6 為元件各部位示意圖，圖 7(a)(b) 分別為彈簧結構與牽制式抬升結構細部示意圖。

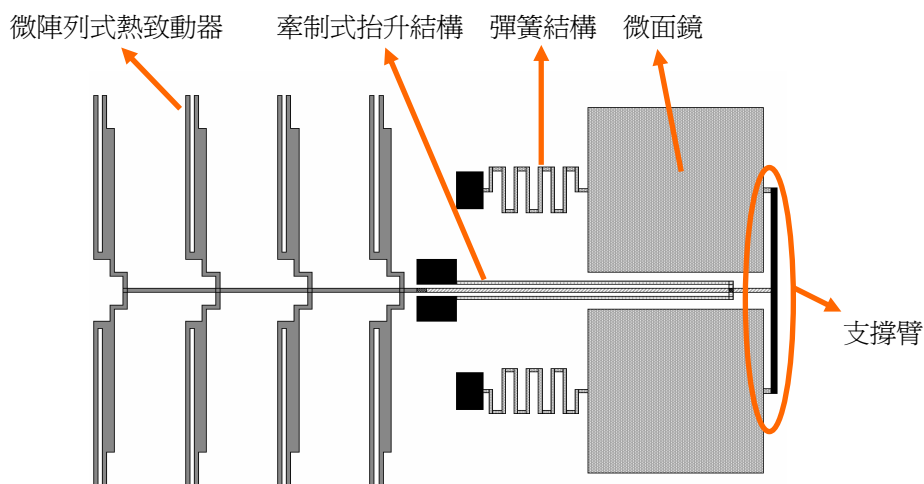
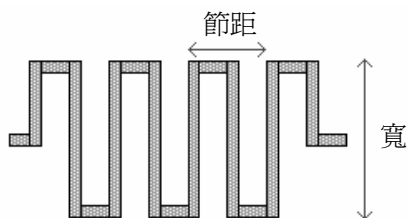
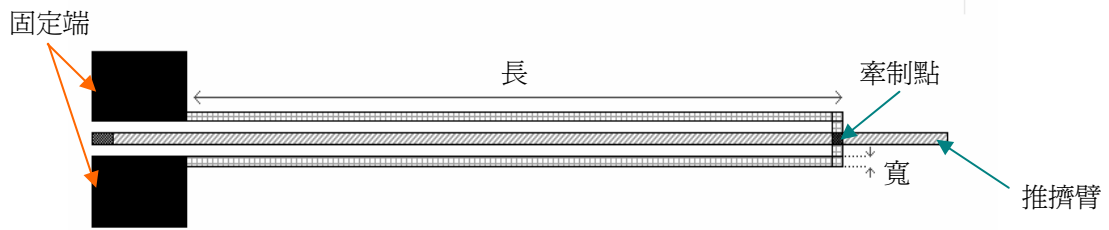


圖 6 元件各部位示意圖



(a) 彈簧結構示意圖



(b) 牽制式抬升結構示意圖

圖 7 彈簧結構與牽制式抬升結構示意圖

4.1 微面鏡傾斜之牽制結構

當抬升結構將微面鏡一端抬升後，要如何牽制微面鏡另一端，使微面鏡傾斜，且必需顧慮到微面鏡的抬升高度及平穩性，因此，設計出單支臂、單支彈簧、對接雙彈簧三種型式變化，並固定微熱致動器數量為 $\{2 \times 4\}$ 、抬升結構幾何尺寸及材質等參數，如圖 8(a)、(b)及(c)所示。藉改變操作電壓 1 至 9 伏特，觀察其微面鏡於支撐臂端抬升的最大移量、平穩度及操作電壓對元件最高溫度的影響。

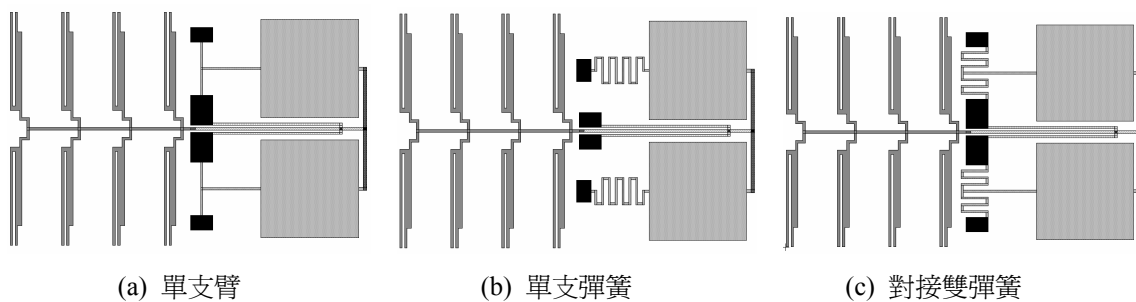


圖 8 微面鏡傾斜之牽制結構的變化

由圖 9 所示，為三種牽制微面鏡之結構與微面鏡最高抬升位移量之關係變化圖，結果顯示單支彈簧在相同電壓下可以得到較高的微面鏡抬升位移量。

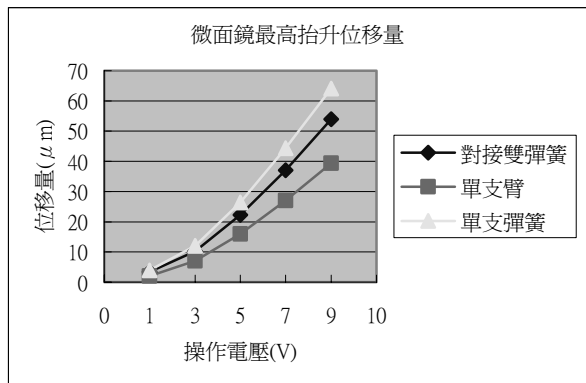
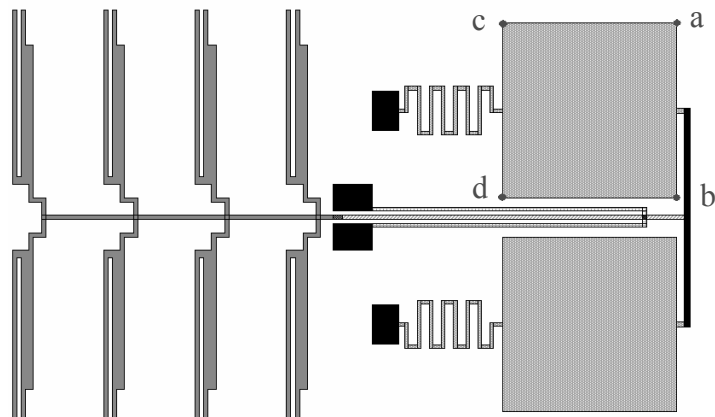


圖 9 微面鏡傾斜之牽制結構與微面鏡最高抬升位移量之關係變化圖

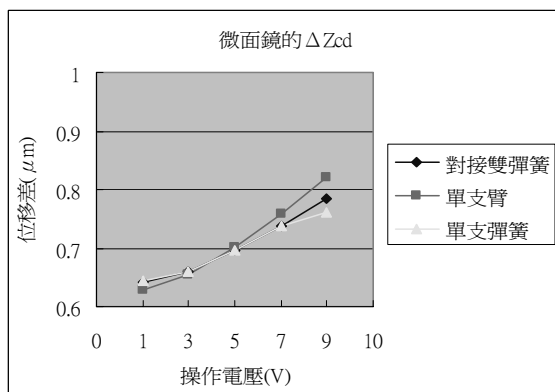
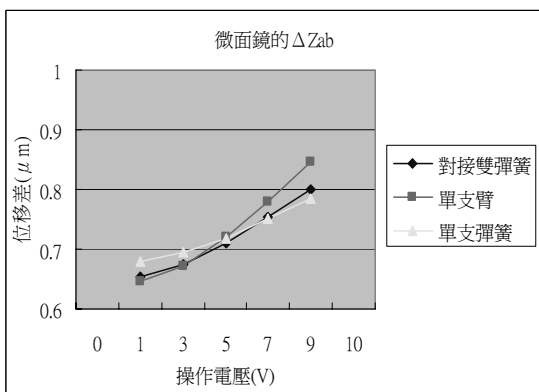
根據微面鏡上四個端點 a、b、c、d，如圖 10 所示意，由其 Z 軸位移量，利用(4.1)及(4.2)公式計算微面鏡抬升後，所產生的不平穩差距，其差距 ΔZ 越小，表示微面鏡抬升時越平穩。三種微面鏡傾斜之牽制結構的平穩度差異分析結果，如圖 11(a)及(b)所示，單支彈簧的平穩度，較其餘二種結構佳。



$$\Delta Z_{ab} = Z_b - Z_a \tag{4.1}$$

$$\Delta Z_{cd} = Z_d - Z_c \tag{4.2}$$

圖 10 點 a、b、c、d 的位置示意圖及計算式



(a)牽制微面鏡之結構與微面鏡端點 ΔZ_{ab} 之關係 (b)牽制微面鏡之結構與微面鏡端點 ΔZ_{cd} 之關係

圖 11 微面鏡抬升的平穩度分析

圖 12 為元件最高溫度與電壓變化圖，經模擬，元件上最高溫度均約為 940°C，且最高溫度部分均集中於熱致動器的熱臂上，因此發現元件最高溫度並不會因牽制微面鏡傾斜之結構的變化，而有所改變。

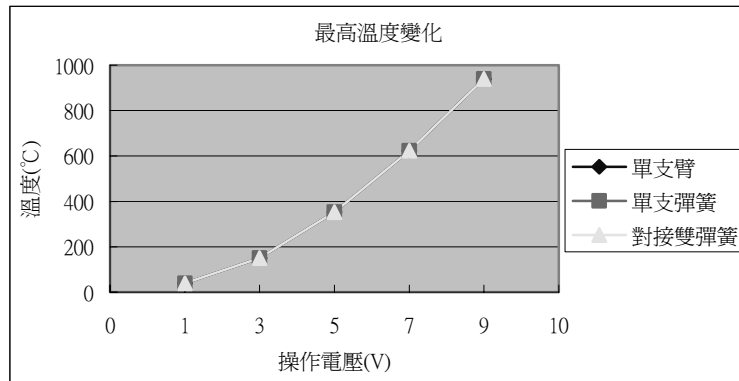


圖 12 微面鏡傾斜之牽制結構對元件最高溫度在不同操作電壓下之變化圖

4.2 彈簧結構變化分析

經 4.1 節的模擬分析後發現單支彈簧的牽制微面鏡結構，在微面鏡抬升高度較高時其平穩度亦較佳，因此本文針對彈簧結構，依其節數、節距及寬度，如圖 7(a)所示，進行進一步模擬。

4.2.1 彈簧結構節數的影響

首先將微陣列式熱致動器數目 {2x4}，抬升結構幾何尺寸及材質固定，且彈簧結構寬度為 55 μm 及節距為 28 μm 時，依節數為 1、2、3 等三種變化，改變彈簧結構的節數，如圖 13(a)、(b)及(c)所示。改變操作電壓由 1 至 9 伏特後，比較彈簧結構的節數與微面鏡抬升位移量之關係及微面鏡的平穩度，結果如圖 14、15(a)及(b) 所示，當彈簧結構的節數愈多，微面鏡最高抬升位移量愈大，且微面鏡的平穩度較佳。

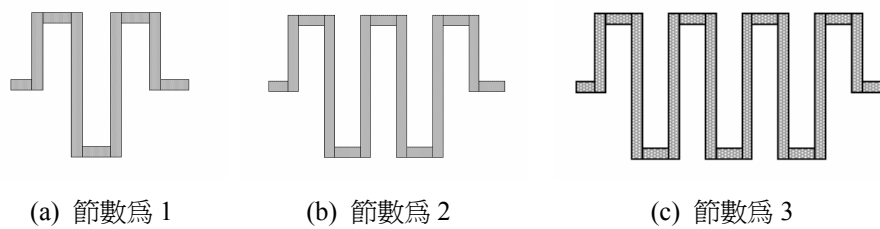


圖 13 彈簧結構的節數變化示意圖

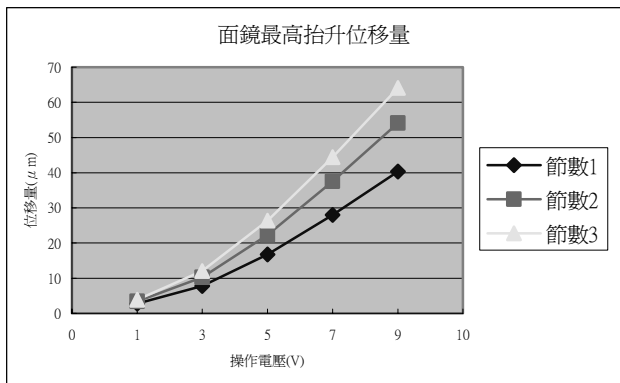
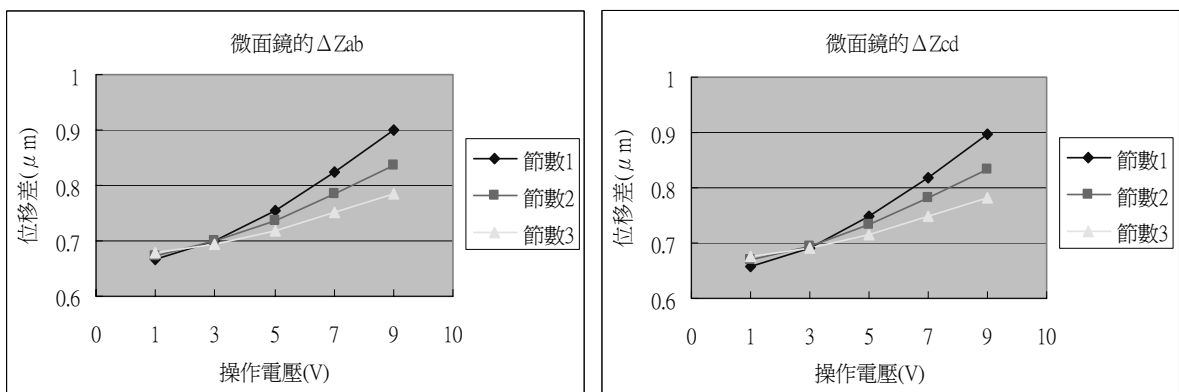


圖 14 彈簧結構的節數與微面鏡抬升位移量之關係



(a) 彈簧結構的節數與微面鏡端點 ΔZ_{ab} 之關係 (b) 彈簧結構的節數與微面鏡端點 ΔZ_{cd} 之關係

圖 15 微面鏡抬升時的平穩度分析

4.2.2 彈簧結構節距的影響

微陣列式熱致動器數目 {2x4}，抬升結構幾何尺寸及材質固定，且彈簧結構寬度為 55 μm，節數為 3 時，依 28 μm、23 μm、18 μm 等三種變化，改變彈簧結構的節距，如圖 7(a)所示。在改變操作電壓由 1 至 9 伏特後，比較彈簧結構的節距與微面鏡抬升位移量之關係及微面鏡的平穩性，結果如圖 16、17(a)及 (b)所示，當彈簧結構的節距愈長，微面鏡最高抬升位移量愈大，微面鏡的平穩度亦較佳。

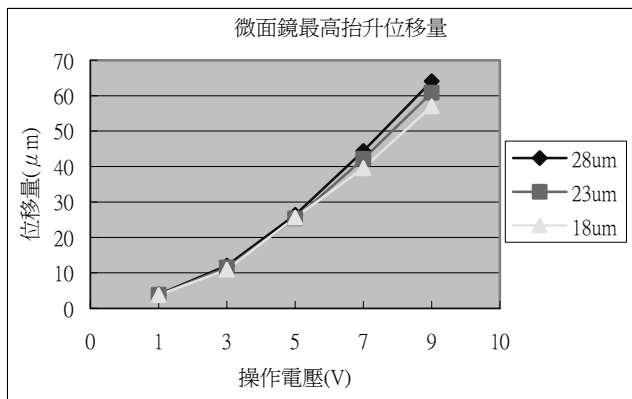
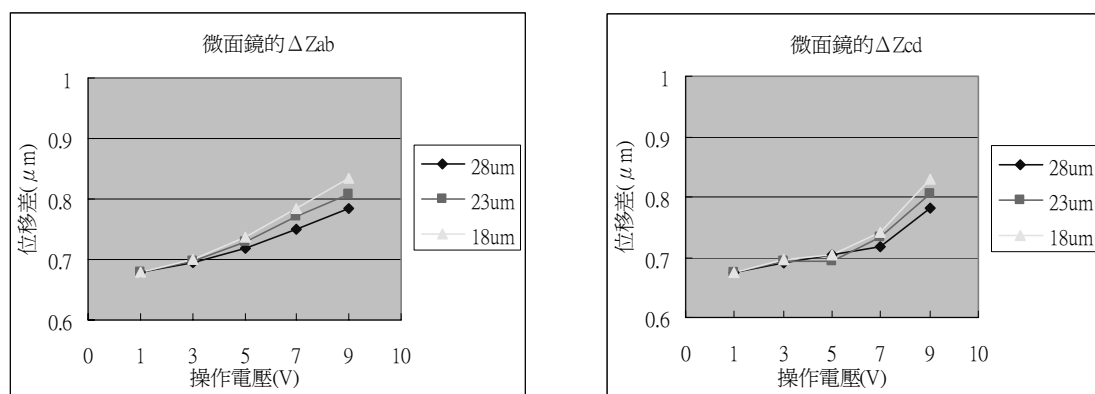


圖 16 彈簧結構的節距與微面鏡抬升位移量之關係



(a) 彈簧結構的節距與微面鏡端點 ΔZ_{ab} 之關係 (b) 彈簧結構的節距與微面鏡端點 ΔZ_{cd} 之關係

圖 17 微面鏡抬升時的平穩度分析

4.2.3 彈簧結構寬度的影響

微陣列式熱致動器數目 {2x4}，抬升結構幾何尺寸及材質固定，且彈簧結構節距為 28 μm ，節數為 3 時，依 55 μm 、45 μm 、35 μm 等三種變化，改變彈簧結構的寬度，如圖 7(a)所示。在改變操作電壓由 1 至 9 伏特後，比較彈簧結構的寬度與微面鏡抬升位移量之關係及微面鏡的平穩度，結果如圖 18、19(a)及 (b)所示，當彈簧結構的寬度愈寬，微面鏡最高抬升位移量愈大，且微面鏡的平穩度也較佳。

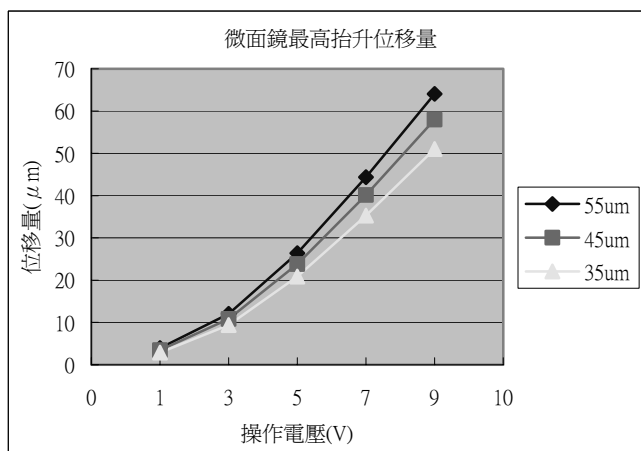
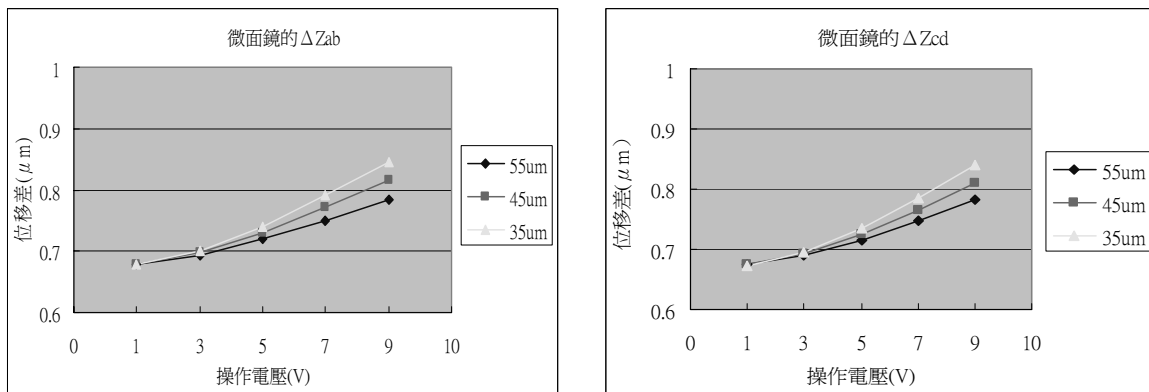


圖 18 彈簧結構的寬度與微面鏡抬升位移量之關係



(a) 彈簧結構的寬度與微面鏡端點 ΔZ_{ab} 之關係 (b) 彈簧結構的寬度與微面鏡端點 ΔZ_{cd} 之關係

圖 19 微面鏡抬升時的平穩度分析

綜觀，彈簧結構對微面鏡抬升時最大位移量及平穩度的分析，節數越多，節距越長，寬度越寬，有助於抬升時之最大位移量，且節數的改變對微面鏡抬升時平穩性的變化影響較顯著。

4.3 牽制式抬升結構之影響

本元件抬升的動力來源，主要是來自微陣列式熱致動器推擠臂的運動所造成，因此針對牽制式抬升結構，依其長度及寬度，並固定微陣列式熱致動器數目 {2x4} 及彈簧結構節數為 3、節距為 28 μm、寬度為 55 μm 等參數情況下，如圖 7(b)所示，作進一步分析。

4.3.1 牽制式抬升結構的長度的影響

首將抬升結構的寬度固定為 4 μm 時，依 350 μm、320 μm、290 μm 等三種變化，改變牽制式抬升結構的長度，如圖 7(b)所示。在改變操作電壓由 1 至 9 伏特後，比較牽制式抬升結構的長度與微面鏡抬升位移量之關係及微面鏡的平穩度，結果如圖 20、21(a)及(b)所示，當牽制式抬升結構的長度愈長，其微面鏡最高抬升位移量較大，且微面鏡抬升時的平穩度較佳。

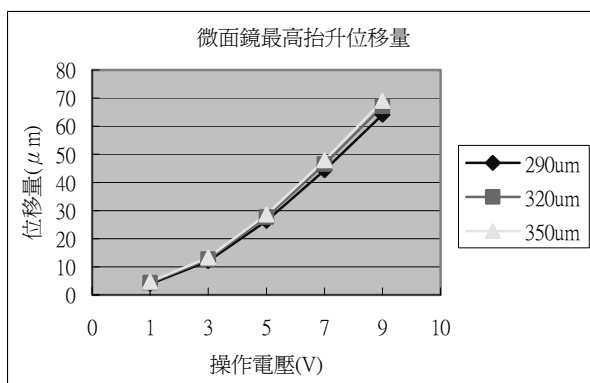
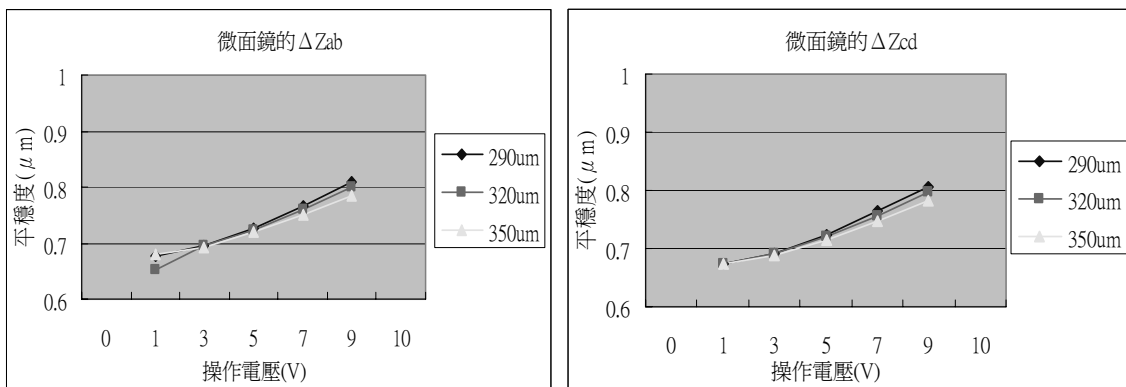


圖 20 牽制式抬升結構的長度與微面鏡抬升位移量之關係



(a)牽制式抬升結構的長度與微面鏡端點 ΔZ_{ab} 之關係 (b)牽制式抬升結構的長度與微面鏡端點 ΔZ_{cd} 之關係

圖 21 微面鏡抬升時的平穩度分析

4.3.2 牽制式抬升結構寬度的影響

將抬升結構長度固定為 350 μm 時，依 4 μm 、5 μm 、6 μm 等三種變化，改變牽制式抬升結構的寬度，如圖 7(b)所示。在操作電壓由 1 至 9 伏特時，比較牽制式抬升結構的寬度與微面鏡抬升位移量之關係及微面鏡的平穩度，結果如圖 22、23(a)及(b)所示，牽制式抬升結構的寬度變化，對微面鏡最高抬升位移量幾乎無影響，但寬度越窄微面鏡的平穩度越佳，唯受限於 CIC 製程規範，寬度最小僅至 4 μm 。

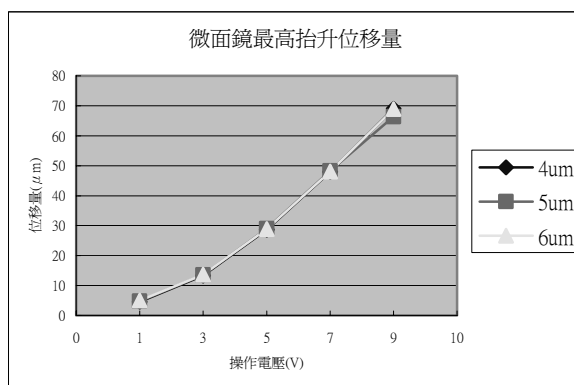
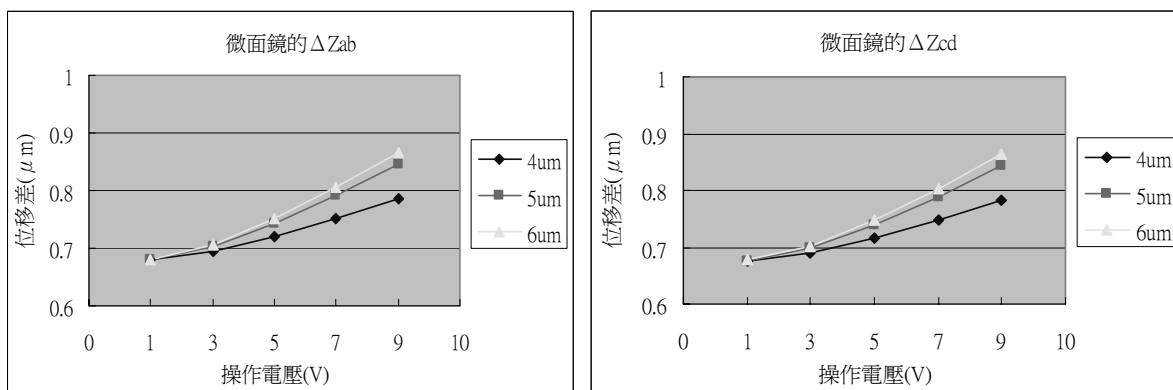


圖 22 牽制式抬升結構的寬度與微面鏡抬升位移量之關係



(a)牽制式抬升結構的寬度與微面鏡端點 ΔZ_{ab} 之關係 (b)牽制式抬升結構的寬度與微面鏡端點 ΔZ_{cd} 之關係

圖 23 微面鏡抬升時的平穩度分析

綜觀，牽制式抬升結構與彈簧結構對微面鏡抬升時之最大位移量及平穩度的影響分析中，比較得知彈簧結構之變化，對微面鏡抬升時之最大位移量之變化影響比牽制式抬升結構變化來得顯著，而針對微面鏡平穩度之影響，則以改變彈簧結構的節數及牽制式抬升結構的寬度較為明顯。

4.4 微面鏡平穩度的改善

由前面幾節的模擬分析結果中，發現微面鏡的平穩度範圍大約在 0.6~0.9 μm 之間，且隨著操作電壓的增加，平穩度也越差，因此爲了進一步改善微面鏡抬升時的平穩度，且在須遵守 CIC 製程的規範下，可將先前幾節均以兩層金屬層 (Metal 4, Metal 3) 爲結構的支撐臂，如圖 6 所示，改以設計爲一層 (Metal 4) 及三層 (Metal 4, Metal 3, Metal 2) 結構的支撐臂，然後比較三種不同層數的結構對於微面鏡抬升時平穩度影響的差異。在改變操作電壓由 1 至 9 伏特後，比較支撐臂結構的層數與微面鏡抬升位移量之關係圖，如圖 24 所示，微面鏡最高抬升位移量並不受支撐臂結構的層數所影響，但於平穩度的分析中顯示，如圖 25(a)及(b)，支撐臂結構之層數變化對微面鏡抬升時的平穩度影響很顯著，三層結構的支撐臂設計，其剛性較強，平穩度有大幅度的改善，相對之下，單層結構的設計，其剛性弱，因此平穩度的變化受操作電壓變化之影響遠比雙、三層之結構顯著。

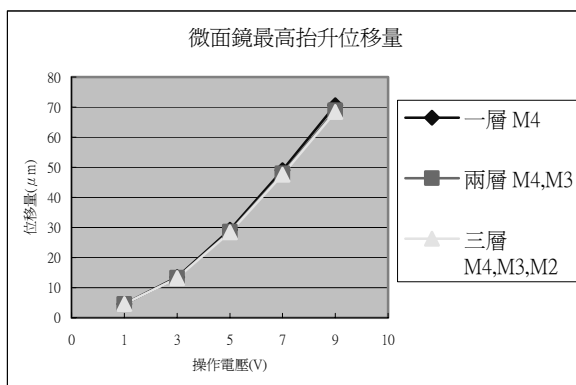
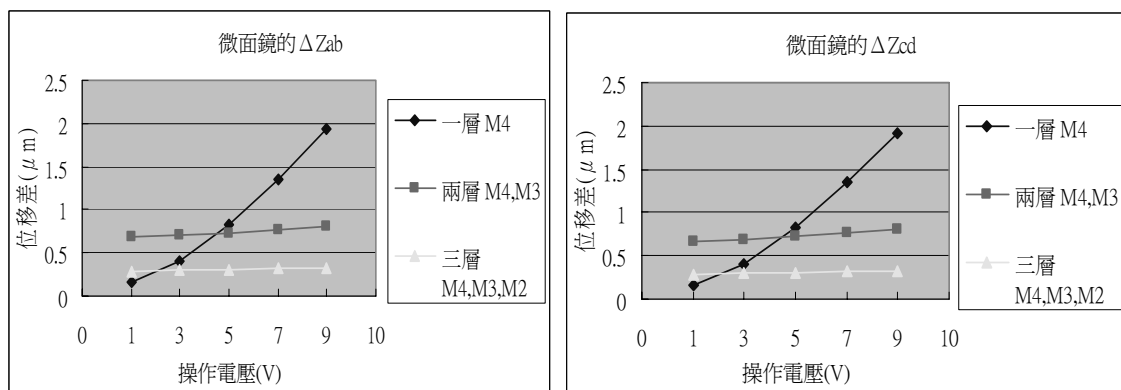


圖 24 支撐臂結構的層數與微面鏡抬升位移量之關係



(a) 支撐臂結構的層數與微面鏡端點 ΔZ_{ab} 之關係 (b) 支撐臂結構的層數與微面鏡端點 ΔZ_{cd} 之關係

圖 25 微面鏡抬升時的平穩度分析

五、結論

本文藉由微機電分析軟體 IntelliSuite 建立新型微光學元件抬升結構之性能分析模型，以探討不同操作電壓時，微面鏡抬升之最大位移量及其平穩度。經三種微面鏡傾斜之牽制結構分析，得知以單支彈簧方式之牽制結構，於高操作電壓下抬升時有較大的位移量且平穩度較佳，因此針對以單支彈簧為微面鏡傾斜之牽制結構為主體下，進一步就彈簧結構及牽制式抬升結構進行其變化模擬分析。研究結果顯示，欲得到微面鏡最大之抬升位移，在不熔毀元件情況下，最高通入電壓之極限為 8 伏特，此時元件位移量最大值約為 $58.6\ \mu\text{m}$ ，而微面鏡可運用的最大之傾斜角度為 17.04° 。在彈簧結構變化對微面鏡抬升時最大位移量及平穩性的分析結果中顯示，節數越多，節距越長，寬度越寬，有助於抬升時之最大位移量，且節數的改變對微面鏡抬升時平穩性的影響較顯著，而就牽制式抬升結構與彈簧結構對微面鏡抬升時之最大位移量及平穩度的影響分析中，比較得知彈簧結構之變化，對微面鏡抬升時之最大位移量之變化影響，比牽制式抬升結構變化來得顯著，而針對微面鏡平穩度之影響，則以改變彈簧結構的節數及牽制式抬升結構的寬度較為明顯。由兩層金屬層為支撐臂的結構模擬分析結果中，顯示微面鏡的平穩度範圍大約在 $0.6\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 之間，且隨著操作電壓的增加，平穩度也越差，因此為了改善微面鏡抬升時的平穩度，且在遵守 CIC 製程的規範下，發現當金屬層增加至三層結構的支撐臂設計，其剛性較強，平穩度有大幅度的改善，相對之下，單層結構的設計，其剛性弱，因此平穩度的變化受操作電壓變化之影響遠比雙、三層之結構顯著，所以三層結構的支撐臂設計，可使得微面鏡抬升時更為平穩。

六、致謝

本研究感謝國科會及明新科技大學專題研究計畫之經費補助以及國家晶片中心計畫的支持，才使研究得以完成。

七、參考文獻

- 〔1〕歐憲章(1997)，熱動式微致動器尺寸最佳化之探討，國立成功大學碩士論文。
- 〔2〕余志誠(1998)，三層多晶矽電熱式微致動器與微滑桿致動系統之製作、分析與研究，國立交通大學碩士論文。
- 〔3〕M. Mehregany(1993), Microelectromechanical Systems, IEEE Circuits and Devices, pp. 14-22.
- 〔4〕Guo-Dung J. Su, Shi-Sheng Lee, and Ming C. Wu (1999), Member, IEEE, Optical Scanners Realized by Surface-Micromachined Vertical Torsion Mirror, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 11, NO. 5.
- 〔5〕郭耀輝(2001)，新型微致動閃耀式光柵之研究，國立臺灣大學應用力學研究所碩士論文。
- 〔6〕蔡健忠(2003)，微陣列式熱致動器在微光機電之應用研究，明新學報 29 期，27-36 頁。
- 〔7〕蔡健忠(2004)，微陣列式熱致動器應用在微光學元件運動模式之探討，明新學報 30 期，137-147 頁。
- 〔8〕Sara E. Rosenberg, Peter Y. Wong, and Ioannis N. Miaoulis(1996), Rapid Thermal Annealing of High-Melting-Point Films on Low-Melting-Point Substrates, IEEE Transactions On Semiconductor Manufacturing, pp. 249-256.
- 〔9〕J. W. Judy, T. Tamagawa, and D. L. Polla(1990), Surface Micromachined Linear Thermal Microactuator, IEEE, pp. 26.5.1-26.5.4.
- 〔10〕M. Gad-el-Hak(2001), The MEMS Handbook, CRC Press, Chapter 3.