

# 國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

新型抓爬式微致動器製程與特性之研究

Fabrication and characterization of new-type  
Scratch Drive Actuator

研究生：張家維

指導老師：徐文祥 教授

中華民國九十六年七月

新型抓爬式微致動器製程與特性之研究

**Fabrication and Characterization of new-type**

**Scratch Drive Actuator**

研 究 生：張家維

Student : Chia-Wei Chang

指 導 教 授：徐文祥

Advisor : Wensyang Hsu



A Thesis

Submitted to Institute of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Mechanical Engineering

June 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

# 新型抓爬式微致動器製程與特性之研究

研究生：張家維

指導教授：徐文祥

國立交通大學機械工程學系 碩士班

## 摘 要

本論文研究重點在於做出新式抓爬式微致動器(SDA)元件與分析其特性，結構設計是根據本實驗室學長提出低驅動電壓抓爬式致動器，在一般傳統 SDA 主板靠近前爪的位置挖空，形成兩邊撓性接頭，由於撓性接頭的彈簧常數遠小於傳統的設計，使得摩擦樑較易吸附底貼到基板上；因此，能有效降低摩擦貼底的操作電壓，減少多餘的功率消耗。在製程方面，利用微機電系統製程的面型微加工技術，再配合電鑄製程做出以鎳金屬為材料的 SDA 元件。

模擬方面是利用 Solidworks<sup>®</sup> 建立 SDA 組合模型，再以 COSMOS 做非線性模組分析，模擬結果 LVSDA 相較傳統 SDA 有較大的步進尺寸。在實驗方面，新式 LVSDA 很明顯在 54V 以下電壓即可驅動，相較傳統 SDA 需 84V 驅動電壓要來的小很多。至於輸出力方面，在相同板長下，LVSDA 在 50~80V 之內即可產生大小不等的輸出力，傳統 SDA 則必須超過 80V 以上才有力的輸出，LVSDA 根據不同尺寸的撓性接頭設計，可能產生最大輸出力在 60~90V 之間，而 LVSDA 較佳應用範圍為 95V 以內，一旦電壓超過 95V 輸出力即無法超越傳統 SDA。

# **Fabrication and Characterization of new-type Scratch Drive Actuator**

Student : Chia-Wei Chang

Advisor : Wensyang Hsu

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

## **Abstract**

---

This study demonstrates the fabrication and characterization of a low driving voltage scratch drive actuator (LVSDA), proposed by our laboratory in previous research. With flexible joints design on main plate of LVSDA near the bushing, the driving voltage can be reduced effectively. Due to smaller spring constant at the joints, this design can reduce driving voltage effectively and decrease the power consumption. In the fabrication process, LVSDA is made by the surface micromachining and nickel electroplating techniques.

The analysis begins at solid assembled modeling of the SDA structure, insulator and substrate by Solidworks<sup>®</sup>. Then the model is analyzed by Cosmosworks<sup>®</sup>. The results of simulation reveal that LVSDA has larger step size than traditional SDA. However, the experimental results reveal that LVSDA can be driven below 54 volts obviously less than 84 volts of traditional SDA. In the same plate length, output force of LVSDA can be generated at driving voltage from 50 to 80 volts ; however, the force of traditional SDA is required over 80 volts. According to the different size of flexible joint, LVSDA may export the larger force between 60 to 90 volts. Therefore, the operating range of LVSDA is from 50 to 90 volts. Over 95 volts, output force of traditional SDA exceeds the force of LVSDA.

## 誌 謝

兩年時光匆匆地過去，也是我最後兩年的學生生活，讀了兩年碩士班完成了有生以來第一本論文，很辛苦但很充實。實驗室團體的生活，有點類似外面社會一般的小型公司，除得自己分內研究工作要做好外，實驗室一些實驗儀器管理與研究室雜務等事項，都要幫忙分擔處理，這就是所謂的團體生活，互相依存互相供養。

能順利完成我的碩士論文，要感謝許多人，首先感謝我的指導教授：徐文祥老師給我這個機會帶領我們學習微機電這領域，在實驗上提供無匱乏的儀器與金費，讓我們無後顧之憂的完成實驗；再來實驗室這群厲害的學長們：鍾君煒、楊涵評、張駿偉、黃家聖、李毅家、黃元德、葉昌旗、金彥宏，在我遇到困難時給我寶貴的意見與製程經驗上的傳授；還有一起奮鬥的同學：魏仁宏、張耕碩，努力不懈完成實驗與論文，一起埋頭做實驗也能一同分享快樂；而岳剛、昶志與啟煥學弟在我忙碌時能替我分擔實驗室雜務，相當貼心。沒有他們的幫忙與陪伴，我無法完成我的碩士學位，感謝他們在這段時間對我的關心與照顧。

最後，要感謝無時無刻都在關心我的爸爸與媽媽，從大學四年加上兩年碩士離家念書，當我心情低落或實驗不順時能給我最溫馨的鼓勵，每當我回家都能享用美好的餐點，由於你們無私的奉獻，並給予我精神與生活上的支持，我才能順利完成學業，在此，僅以這本論文獻給照顧我的人，謝謝你們。

家維 謹予 風城交大

# 目 錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
誌謝 .....	iii
目錄 .....	iv
圖目錄 .....	vii
表目錄 .....	ix
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 研究動機 .....	2
1.3 文獻回顧 .....	4
1.3.1 抓爬式致動器 .....	4
1.3.2 SDA 光學方面的應用 .....	5
1.3.3 SDA 平台組裝應用 .....	6
1.3.4 SDA 特殊設計應用 .....	7
1.3.5 SDA 文獻整理 .....	8
1.4 研究目標 .....	10
第二章 新式 SDA 之設計與分析 .....	12
2.1 設計概念 .....	12
2.2 LVSDA 工作原理 .....	13
2.3 SDA 輸出力分析 .....	14
2.4 等效彈簧系統 .....	16
2.4.1 懸臂樑等效彈簧常數 .....	16
2.4.2 兩端固定橫樑等效彈簧常數 .....	18

2.5	模擬與分析	19
2.5.1	分析設定	20
2.5.2	尺寸設計	21
2.5.3	模擬結果討論	21
<b>第三章 製程流程</b>		<b>23</b>
3.1	前爪製作流程	23
3.1.1	前爪製作	23
3.1.2	光阻選用	25
3.2	電鍍鎳流程	25
3.2.1	黏著層與種子層的選擇	26
3.2.2	黃光製程	26
3.2.3	電鍍製程	27
3.3	沾黏	28
3.4	製程流程	29
3.5	製程結果	31
<b>第四章 量測結果與討論</b>		<b>33</b>
4.1	量測設置	33
4.2	量測結果	34
4.2.1	驅動電壓量測	34
4.2.2	輸出力量測	38
4.2.3	LVSDA 與傳統 SDA 性能比較	43
4.3	量測誤差	44
<b>第五章 總結與未來規劃</b>		<b>46</b>
5.1	總結	46
5.2	近期改善工作	47

5.3 未來工作.....	47
參考文獻.....	48





# 圖目錄

圖 1-1	抓爬式微致動器[3]	4
圖 1-2	利用 SDA 切換旋轉反射鏡	5
圖 1-3	可雙向作動 SDA	5
圖 1-4	SDA 推動光學元件 (a)作動原理 (b)SDA 陣列抬升元件	5
圖 1-5	SDA 陣列組裝微鏡	6
圖 1-6	3-D 自我組裝概念設計	6
圖 1-7	SDA 組裝應用 (a)SDA 推動懸臂樑 (b)SDA 陣列推動平台上升	7
圖 1-8	(a)以 SDA 作為轉子 (b)SDA 操作凸輪結構 (c)SDA 操作微夾爪	8
圖 2-1	LVSDA 概念設計	13
圖 2-2	LVSDA 操作原理圖	14
圖 2-3	陣列式四個 SDA 板長與輸出力關係	15
圖 2-4	懸臂樑受力圖	17
圖 2-5	兩端固定橫樑受力圖	18
圖 2-6	兩端固定橫樑分解圖	18
圖 2-7	兩組橫樑並連	19
圖 2-8	LVSDA 尺寸參數	21
圖 3-1	前爪製作方法	24
圖 3-2	製程步驟	30
圖 3-3	元件 SEM 側視照 (a)傳統 SDA (b)LVSDA	32
圖 3-4	元件 SEM 俯瞰照 (a)傳統 SDA (b)LVSDA	32
圖 3-5	SDA 元件爪高與厚度 SEM 照片	32
圖 4-1	量測設置 (a)實體照片 (b)示意圖	34
圖 4-2	SDA 驅動電壓測試 (a)未施加電壓前 (b)施加電壓作動後	35
圖 4-3	單一 SDA 結構 (a)起始未施加電壓前 (b)施加電壓後主板被吸附	35

圖 4-4	四種板長與驅動電壓關係圖 .....	36
圖 4-5	LVSDA 驅動電壓 (a) $W_j=3\mu\text{m}$ (b) $W_j=6\mu\text{m}$ .....	37
圖 4-6	四個箱型彈簧系統 (a)彈簧示意圖 (b)元件實體圖 .....	38
圖 4-7	四種板長輸出力與電壓關係圖 .....	39
圖 4-8	傳統 SDA 輸出力與板長關係圖 .....	40
圖 4-9	操作電壓 100V 下傳統 SDA 輸出力與板長關係圖 .....	40
圖 4-10	三種尺寸輸出力與操作電壓圖 (a) $W_j=6\mu\text{m}$ (b) $W_j=3\mu\text{m}$ .....	41
圖 4-11	撓性接頭寬度 $W_j=6\mu\text{m}$ 與 $3\mu\text{m}$ 輸出力與電壓關係圖 .....	42
圖 4-12	種尺寸輸出力與操作電壓圖 .....	43
圖 4-13	LVSDA 與傳統 SDA 輸出力與電壓關係圖 .....	44



# 表 目 錄

表 1-1	五種致動器優缺點比較.....	3
表 1-2	五種致動器性能比較.....	3
表 1-3	SDA 文獻性能比較.....	9
表 2-1	有限元素分析中所使用到的材料參數.....	20
表 3-1	黃光參數表.....	27
表 3-2	電鍍參數表.....	28



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

微機電系統 (Micro-Electro-Mechanical System, 簡稱MEMS) 是目前科技界相當看好, 具有發展潛力及前瞻性的研究領域之一。微機電系統領域中包含了積體電路製造的優勢, 如: 批量製造(Batch fabrication)、體積小、質量輕、與現有的積體電路製程相容及結合性高等優點。此外, 微機電系統製程相較於半導體製程, 微機電系統製程多了X-Ray曝光、電鑄、模造的LIGA技術及其他微加工技術, 再加上特有可製造三維高深寬比結構的體型微機電(Bulk micromachine)技術與表面上疊層製造的面型微機電(Surface micromachine)技術, 可於矽晶片上製造出微米(micron)尺寸可動機械元件。其主要的概念是提升超精密加工技術、應用LIGA(Lithography Galvanoformung)及半導體製造技術, 來製造微小的元件。

在MEMS領域中, 近幾年微致動器的發展逐漸受到重視。所謂的微致動器(Micro-actuator), 是指輸入控制的訊號(如電壓、電流等), 轉換成進行動作的動能, 如水平移動、垂直振動、擺動等, 且尺寸在微米等級的元件。典型微致動器的基本組成有電源供應、媒介材料、動子、靜子、機構等, 一般電源供應主要由外界透過焊墊(contact pad)輸入所需的電流或電壓, 使媒介產生物理現象, 如靜電、發熱、磁場等, 配合靜電吸引、熱膨脹、摩擦、磁力吸引、壓電、形狀記憶等致動原理, 將電能轉換成動能, 進而使微致動器產生作動, 最後透過樑(beam)、鉸鏈(hing)、滑桿(slider)、齒

輪(gear)等機構，將平移、震動、平面旋轉等基本動作，轉變成較複雜且移動尺寸較大之空間作動。目前許多國家正發展各種原理的微致動器，尤其以具有大變形量、大轉動角及頻率響應適中等目標邁進。

## 1.2 研究動機

由微機電加工技術所製造出的微致動器主要有下列五種，分別為靜電式、壓電式、電磁式、熱驅式及記憶合金式等。微致動器具有驅動系統運作的重要功能，在設計上常被要求具有驅動容易、致動力大、製程簡單、節省能源、頻率響應快等特性，而這和致動器的驅動方式有很大的關係，每種原理致動器各有其製程、功能與設計上的特點，依應用需求的不同而分別被使用，除了具備特定的致動功能外，並承襲半導體製程之體積化、微小化、批次生產、平面製程等特性。

Fujita 等人[1]將這五種致動器的性能及特徵分析比較，如表 1-1 與 1-2 所示。靜電力屬於表面力，在巨觀世界裡常因為能量密度太小而未被採用，但對於尺寸縮小的微系統而言，此問題已不復存在，因此在微觀尺度下靜電力常被用來做為致動源，靜電力是與尺寸平方成反比，但質量卻與尺寸三次方成正比，所以單位質量下靜電力是與尺寸成反比，一旦尺寸微小化後，靜電力效能反而增加；但在距離很近時，靜電力與距離間的耦合效應往往會造成吸附現象，這項缺點在設計及控制上必須加以克服。這五種類型致動器中，又以靜電式致動器與積體電路製程相容性最好。

表 1-1 五種致動器優缺點比較

	優點	缺點
靜電式	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 靜電力屬於表面力，微小化沒有表面能量密度太小的問題</li> <li>2. 製程容易，與半導體製程相容性高</li> <li>3. 由電壓控制，控制能力佳</li> <li>4. 可適用於高頻</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 在製造過程中，釋放元件時會有沾黏的現象</li> <li>2. 長時間操作會有磨耗與電荷累積等問題產生，影響結構性能</li> </ol>
壓電式	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 精度高，可達到數十奈米的運動量</li> <li>2. 具高響應頻率</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 運動範圍小</li> <li>2. 製程複雜</li> </ol>
電磁式	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 出力大，可大間距作用</li> <li>2. 不易受外在環境影響</li> <li>3. 頻率響應適中，可適用於高頻</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 需要永久的磁鐵或線圈</li> <li>2. 受限於製程材料，製造裝配不易</li> <li>3. 尺寸越小，驅動力急速下降</li> </ol>
熱驅式	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 有較大的位移及輸出力，運動範圍不受限制</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 易受外在環境影響</li> <li>2. 熱對結構造成微變形，使精度降低</li> <li>3. 較難在高頻驅動，響應時間慢</li> </ol>
記憶合金式	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 元件機構簡單，設計容易</li> <li>2. 力量大</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 頻率低，響應時間慢</li> <li>2. 材料物理特性之變化，尤其是電阻特性，會改變驅動效率</li> </ol>

表 1-2 五種致動器性能比較

項目 (驅動方式)	運動範圍 (相對變形)	旋轉 運動	速度	力量 大小	製程相 容性	驅動電 壓(V)	附註
靜電式 (Electrostatic)	大	可	中高	小 (數 gf)	佳	5~100	因靜電關係 易有雜質沾 黏現象
壓電式 (piezo-stack)	小 (<數 μm)	否	高 (~100k Hz)	大 (400kgf /emf)	難	10~200	有潛變與遲 滯問題
電磁式 (Electromagnetic)	大	否	中	中	可	0.5~1 A	適用於大尺 寸
熱膨脹(Thermal expansion)	小	否	中低	大	可	Heater 0.1~1W	需考慮散熱 問題
記憶合金(Shape memory alloy)	大	難	低	大	難	0.3W	需考慮散熱 問題

### 1.3 文獻回顧

抓爬式致動器(Scratch drive actuator, SDA)從 1993 年發展至今十幾年的時間，有不少的相關文獻應用已提出，本節介紹目前 SDA 的基本原型、致動原理，以及現有的抓爬式微致動器的應用，並將現有的 SDA 文獻性能做比較。

#### 1.3.1 抓爬式致動器

抓爬式微致動器(Scratch drive actuator, SDA)(圖 1-1)最早是由日本上智大學的 Akiyama 與 Shono 於 1993 年所研發出來的[2]。SDA 結構主體為摻雜磷的多晶矽平板以及位於平板前的爪(Bushing)，驅動系統的上電極為 SDA 結構本身，下電極則為低阻值的矽晶片，中間以一層氮化矽做為絕緣層，在兩電極施加電壓產生靜電力作用，機電能轉換為結構彈性變形能，來驅使結構向前作動。

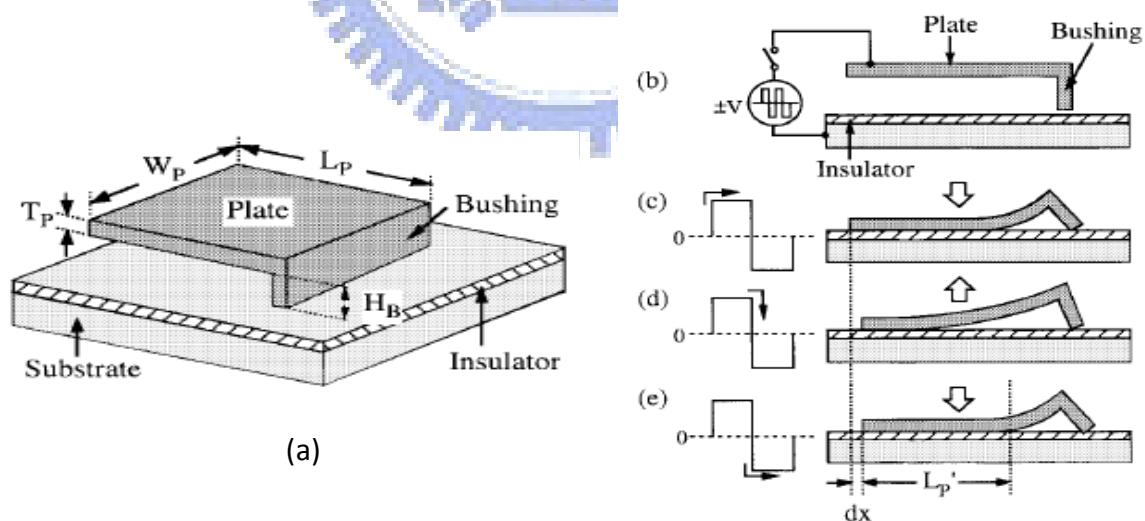


圖 1-1 抓爬式微致動器[3]，(a)基本結構原型，(b)側視圖，未施加電壓時，(c)施加電壓後主樑(plate)受靜電力吸引向下貼底，爪(bushing)向前移動，(d)放電時以爪底部為支點，彈性回復力使主樑板爬升並前進，(e)再度通電使主樑板受靜電力吸引下降貼底，爪前進。

### 1.3.2 SDA 光學方面的應用

關於 SDA 應用方面，在早期主要作為驅動微光開關的致動器，其中較為人所知的應用為 Lin 等人於 1994 年提出的 16×16 頻道微光開關[4]，Lin 利用 SDA 陣列將面鏡立起，然後再以卡榫與鉸鏈進行定位(圖 1-2)，如此可使反射鏡平躺與直立來反射或不反射光線。如果再加上另一組反向運動的 SDA(圖 1-3)，就可以使面鏡反覆切換[5]。

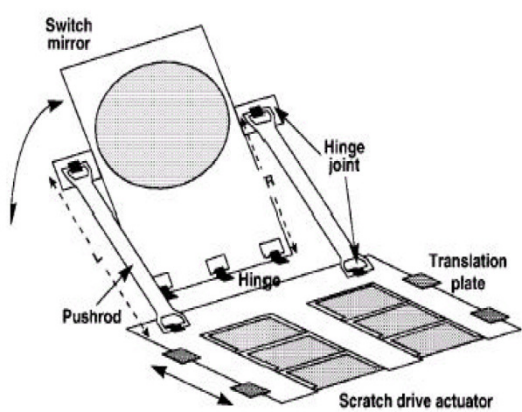


圖 1-2 利用 SDA 切換旋轉反射鏡

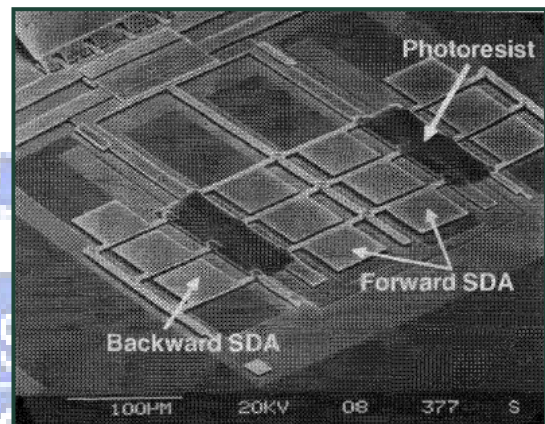
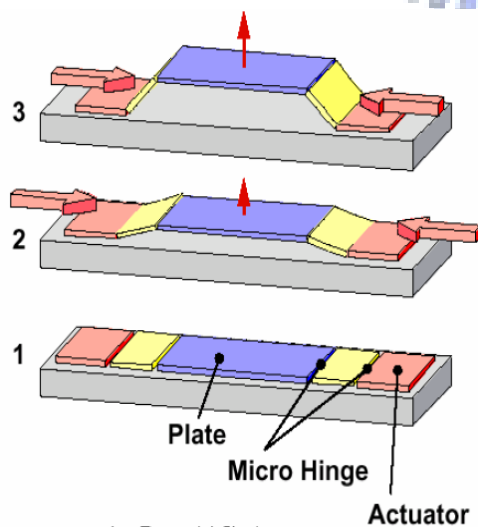


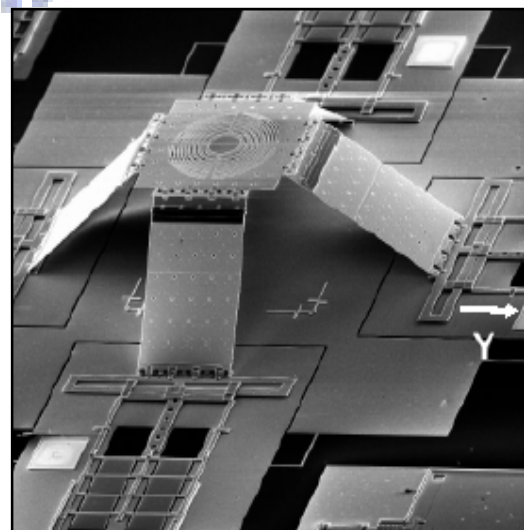
圖 1-3 可雙向作動 SDA

Fan 也利用 SDA 將光學元件架離底材[5]，以避免矽基板的雜散電容影響系統的 Q 值(圖 1-4)。在驅動電壓在 90V 下，步進尺寸為 27nm、移動速度為 1 $\mu$ m/sec。



L. Fan, UCLA

(a)



(b)

圖 1-4 SDA 推動光學元件 (a)作動原理 (b)SDA 陣列抬升元件



Tsay 等人利用 SDA 陣列拖動微鏡元件進行組裝[6]，再以雙穩態機構卡榫固定元件位置來達成精密定位(圖 1-5)，完成自我組裝的概念。驅動電壓在 30~75V 範圍內，步進尺寸約為 30nm、單一個 SDA 輸出力可超過 100 $\mu$ N。

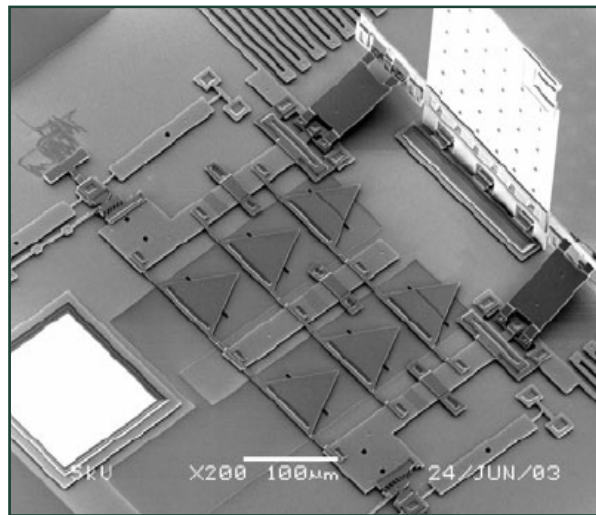


圖 1-5 SDA 陣列組裝微鏡

### 1.3.3 SDA 平台組裝應用

最早 Akiyama 和 Fujita 等人提出一個構想，以 SDA 推動一個掛載微面鏡的懸臂樑 [7]，當力量達到使其挫曲值時可將介於懸臂樑中央的面鏡抬起(圖 1-6)。

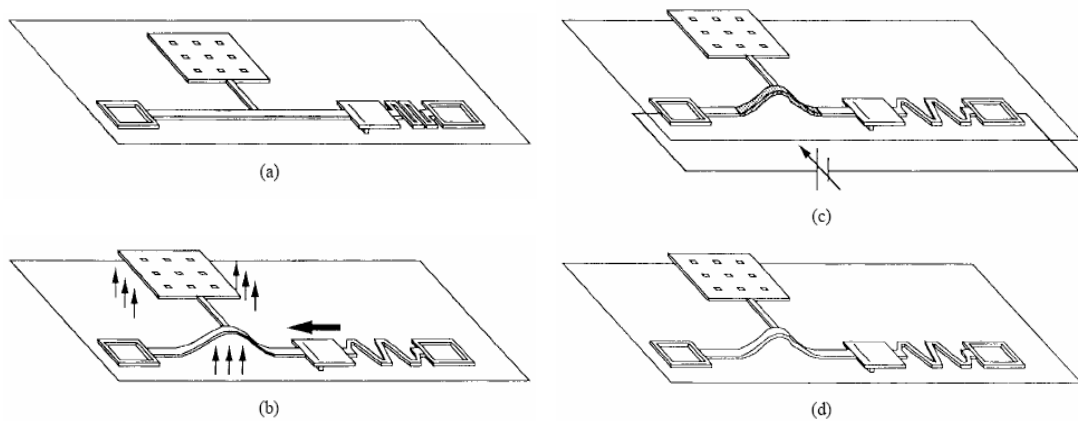


圖 1-6 3-D 自我組裝概念設計

另外他們也利用 SDA 推動一懸臂樑，使其挫曲來推算力的大小(圖 1-7a)。後來 Quevy 等人也利用 SDA 產生壓力使樑挫曲[8]，再由挫曲的形變能帶動平台上升(圖 1-7b)，完成三維自我組裝。其單一個 SDA 出力為  $50\mu\text{N}$ ，最高可使平台上升  $90\mu\text{m}$ 。

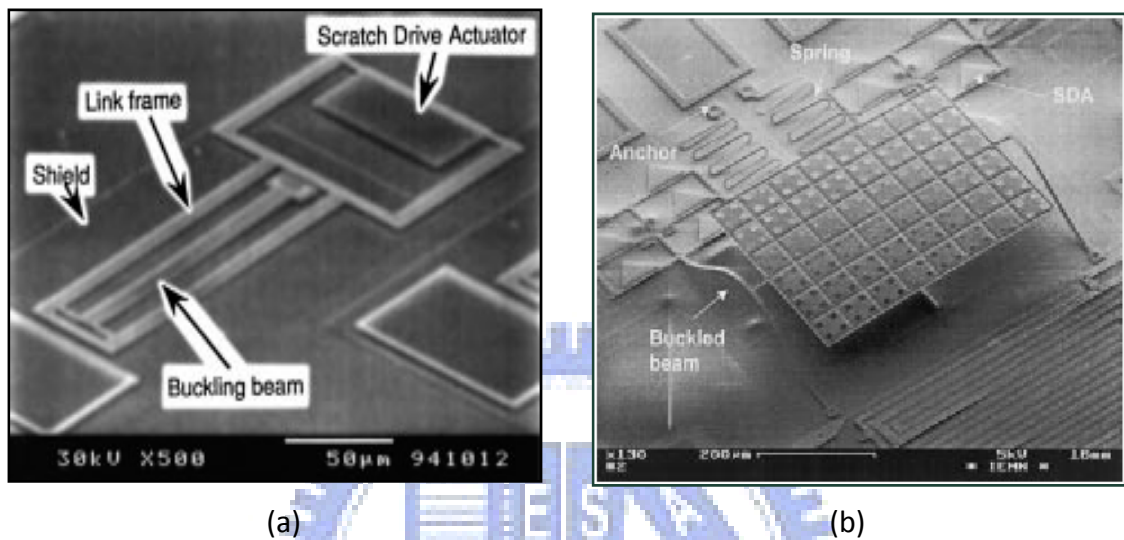


圖 1-7 SDA 組裝應用 (a)SDA 推動懸臂樑 (b)SDA 陣列推動平台上升

### 1.3.4 SDA 特殊設計應用

Bright 等人嘗試將 SDA 以圓形排列作為轉子(類似小馬達)[9]，並在轉子上以錫球迴熔的方式將葉片狀結構立起(圖 1-8a)，作為微小散熱器或微直升機。操作電壓介於  $75\sim 150\text{V}$ ，最大轉速可達  $180\text{rpm}$ 。Kanamori 將 SDA 應用在凸輪馬達來操作光纖開關控制(圖 1-8b)[10]。最小驅動電壓為  $90\text{V}$ ，步進尺寸約  $10\text{nm}$ ，每個 SDA 移動速度可達  $100\mu\text{m}/\text{sec}$ ，轉速  $7.5\text{rpm}$ 。另外，Millet 等人利用 SDA 陣列驅動微夾爪[11]，以帶動微夾爪的開關控制(圖 1-8c)。模擬分析結果單一個 SDA 出力可達  $50\mu\text{N}$ 。

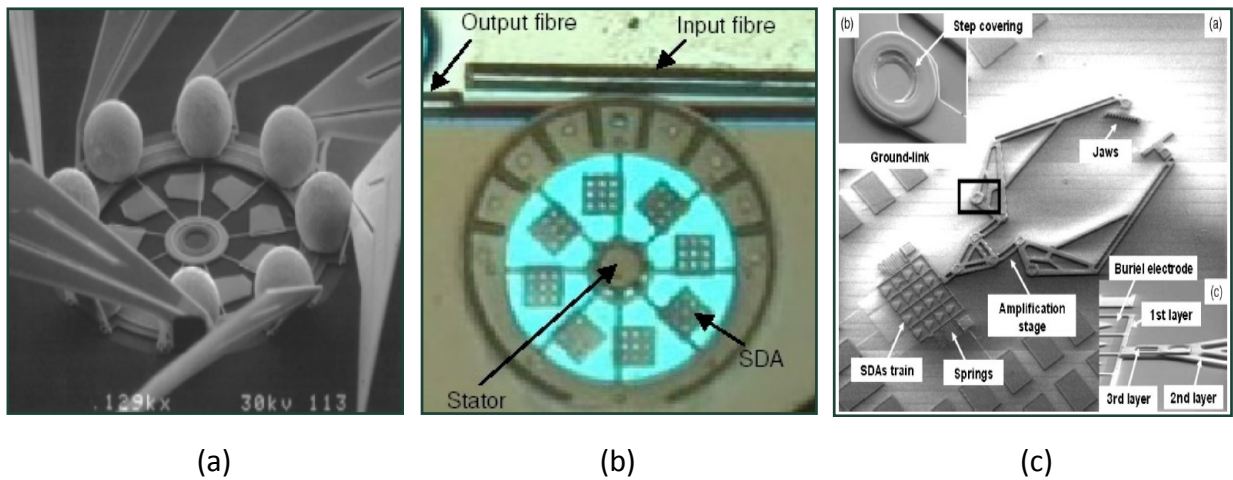








圖 1-8 (a)以 SDA 作為轉子 (b)SDA 操作凸輪結構 (c)SDA 操作微夾爪

近年來 SDA 被廣泛應用於微元件之定位與組裝，例如用 SDA 來擠壓結構使結構產生挫曲變形而抬起元件，或藉由導引滑軌移動將面鏡及射頻元件抬起，或移動平台來回運動以進行定位。但可發現目前主板設計大多沒啥變化，無法有效降低其驅動電壓；而且 SDA 設計都只能做單方向運動，若想要能夠來回反覆作動，就必須設計兩組以上的 SDA 分別做反向運動，來達成元件開關效果。

### 1.3.5 SDA 文獻整理

由表 1-3 可看出 SDA 具有幾個主要的優點：奈米級步進尺寸、微牛頓級輸出力以及毫米級總運動距離、所需面積小、易與其他元件做整合，且應用範圍廣泛，從光學方面的面鏡推動、光學開關；機構方面的平台升降、三維組裝，到推動微夾爪等應用，都是利用 SDA 達成元件精密定位。

表 1-3 SDA 文獻性能比較

項目	性能			SDA 形狀 與排列方式	應用方面	備註
Akiyama and Fujita, 1993、 1997, <i>JMEMS</i>	步進尺寸	驅動電壓	輸出力	 陣列		性能尚未確定，大部分 依賴模擬值與實驗得知 結果
	10~80nm	40~100V	>100μN			
Fan et al., 1997, <i>Sensors and Actuator</i>	步進尺寸	驅動電壓	移動速度	 陣列	光學 (組裝)	一組 SDA 僅能單向作動
	27nm	90V	1μm/sec			
Quevy et.al., 2001, <i>IEEE Electron Devices</i>	單一 SDA 輸出力為 50μN 最高可使平台上升 90μm			 陣列	機構 (組裝)	一組 SDA 僅能單向作動
Bright et al., 2001, <i>IEEE</i>	最大轉速：180rpm 操作電壓：75~150V			 環形排列	散熱器	驅動於 3kHz 會有倒轉的 問題，只能從經驗與試 誤方式來解決
Tsay et al., 2005, <i>JMM</i>	步進尺寸	驅動電壓	輸出力	 陣列	光學 (組裝)	一組 SDA 僅能單向作動
	~30nm	30~75V	>100μN			
Kanamori et al., 2005, <i>JMM</i>	最小驅動電壓：90V 步進尺寸：10nm 移動速度：100μms <sup>-1</sup> (轉 7.5rpm)			 環狀排列	光學 (開關)	SDA 與基底來回接觸摩 擦易磨損，生命週期短

一般而言，目前 SDA 在靜電式微致動器中前景看好，但由於發展歷史相較於其他微致動器來的短，如：熱致動器、梳狀致動器等，尚未有完善精準的理論公式來驗證其步進尺寸及輸出力等性能，大部分為實驗模擬值且很難真正控制。整理一下 SDA 的優缺點有以下幾點。

優點：

- 1、 具有極小的步進尺寸(約數十奈米)但又具備大的總位移行程能力。
- 2、 SDA 製程簡單與 MUMPs 製程結合性高，因此可透過 MUMPs 製程與其他元件整

合。

- 3、單一個 SDA 的出力有限，但可藉由陣列式 SDA 來增加總出力。
- 4、SDA 不需在共振頻率下操作即可運作。
- 5、SDA 非常適用於元件的精確定位，應用範圍廣泛。

可改進之處：

- 1、藉由尺寸、形狀等設計，來有效降低所需的驅動電壓，節省功率。
- 2、改變 SDA 主板形狀設計來使步進尺寸更穩定。
- 3、目前 SDA 尚未有良好往復性操控，希望能設計出單一 SDA 能往復作動。

缺點：

- 1、目前 SDA 尚未有良好往復性操控，比較適用於單次定位元件上。
- 2、SDA 在長時間操作會有磨耗與電荷累積等問題產生，嚴重影響 SDA 的性能。



## 1.4 研究目標

從前人的論文研究中可得知 SDA 的驅動電壓、輸出力與步進尺寸等性能，應用於精密定位的裝置上且製程相容性好，但除此之外，對於 SDA 的基本理論上仍有許多待釐清與進一步研究的地方，其詳細作動機制、驅動訊號對 SDA 的輸出效率等，還尚未完全被了解，目前也沒有一套正確完整的理論公式來驗證，許多結論幾乎都是依照模擬或實驗值來證明其效能。SDA 在效能方面希望能進一步降低其驅動電壓，並以模擬與實驗結果做論證。本論文研究重點為建立新式抓爬式微致動器，藉由改變 SDA 的主

板的幾何形狀，進而改善其驅動電壓與步進尺寸，來執行有效率的操控與定位。在相關文獻中，大部分是沉積多晶矽(polysilicon)做為 SDA 主結構，其結構的導電率相較於金屬材料來的差；因此在本研究中，利用金屬面型微加工技術，以電鍍鎳為材料來製作 SDA 主結構，來改善 SDA 主體導電率。

在本論文的第二章，將對 SDA 結構的設計原理做詳細描述，並利用有限元素軟體，進行輸入電壓對步進尺寸的分析模擬與討論；第三章的部分，將會詳細說明 SDA 元件製造流程與製程參數；第四章的部分，介紹實驗儀器與設備架設，並進行驅動電壓與輸出力測試，記錄實驗結果加以討論；最後第五章，對本論文的研究進行討論與總結，以及未來發展的研究方向。



## 第二章 新式 SDA 之設計與分析

為了有效降低 SDA 驅動電壓，將原始 SDA 主板靠近前爪位置挖空形成撓性接頭，作為新式低驅動電壓 SDA 的基本設計。在本章介紹新式 SDA 的概念設計，並對操作原理、尺寸設計做描述，更進一步分析低電壓驅動 SDA 之挖洞大小與位置，在靜電力作用下產生之形變與輸出力的關係。

### 2.1 設計概念

抓爬式微致動器是由日本上智大學的 Akiyama 與 Shono 於 1993 年所研發出來的。SDA 結構主體為摻雜磷的多晶矽平板以及位於平板前的爪(Bushing)，驅動系統的上電極為 SDA 結構本身，下電極則為低阻值的矽晶片，中間以一層氮化矽做為絕緣層，在兩電極施加電壓產生靜電力作用，機電能轉換為結構彈性變形能，來驅使結構向前作動。

在現有的文獻當中，有些新式設計的 SDA 對主板做形狀上的改變，來改善其步進尺寸與輸出力，但這些設計並不能夠有效降低驅動電壓。所以在這提出一個新式設計，能夠有效降低操作電壓。在結構設計上將主樑中央挖空形成兩邊撓性接頭(圖 2-1)，其中摩擦樑(Friction beam)提供摩擦力以支撐抓爬運動及水平方向的負荷(主板左邊區塊)；抓爬樑(Scratch beam)在放電時可以完成抓爬運動前進的功能(主板右邊區塊)。當始施予一定的電壓時，撓性接頭(主要提供變形的部分)兩端產生相對運動，由於中央撓性

接頭的彈簧常數遠小於傳統的設計，使得摩擦樑較易吸附底貼到基板上；因此，能有效降低摩擦貼底的操作電壓，減少多餘功率的消耗。在適當比例下與尺寸設計最佳化後，能以較短的元件長度提供相同輸出力，進而減少元件使用面積。

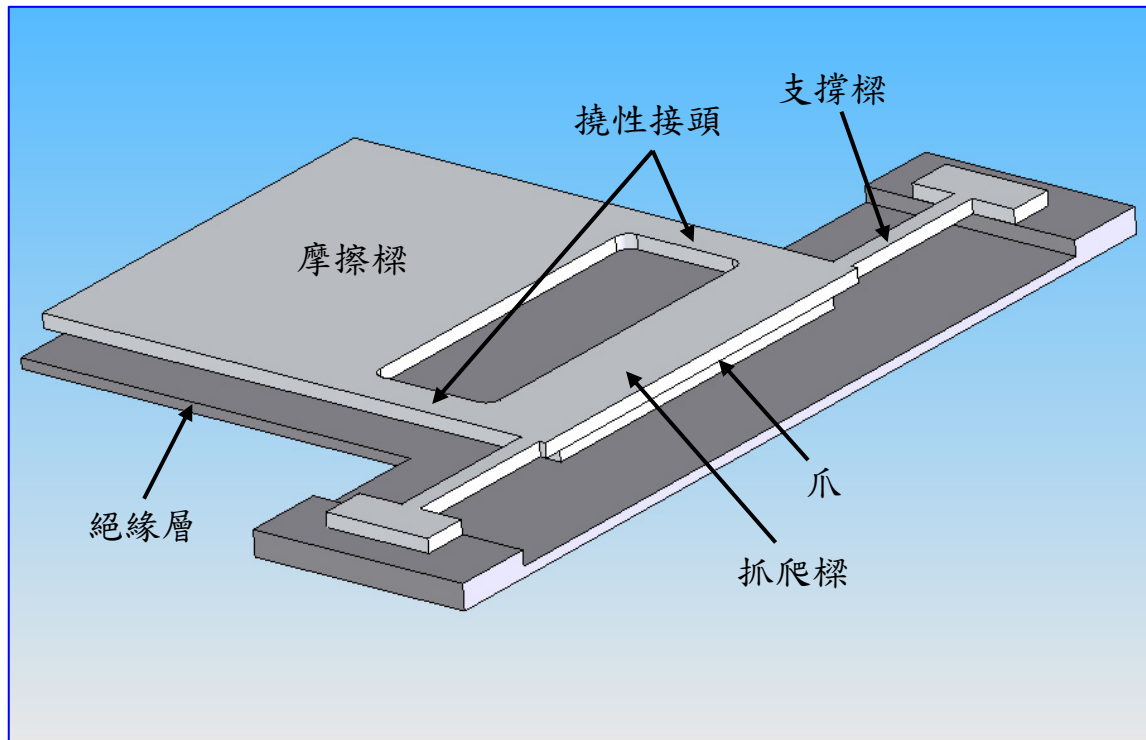


圖 2-1 LVSDA 概念設計

## 2.2 LVSDA 工作原理

低電壓驅動抓爬式致動器(low voltage driven scratch drive actuator, LVSDA)的作動原理與傳統 SDA 大致相同，其作動步驟如圖 2-2 所示。輸入電壓訊號以方波脈衝為例，將撓性接頭視為彈簧(spring)，當開始輸入電壓時，SDA 摩擦樑受靜電力作用而向下扭轉(snapping)，因為能撓性接頭本身彈簧回復力，使得整個主板回復原形而傾斜一個角度，此時前爪被往前推進一些；隨著電壓逐漸上升，SDA 摩擦樑開始貼底吸附，主板上的撓性接頭產生折曲(buckling)，爪子又往前步進一步，能量暫時以形變能的方式儲



存；當電壓訊號降至 0 時，所儲存的形變能釋放，摩擦樑與基板接觸區域逐漸縮小，

以爪子為支點主板恢復初始形狀，完成一次步進運動(step motion)。

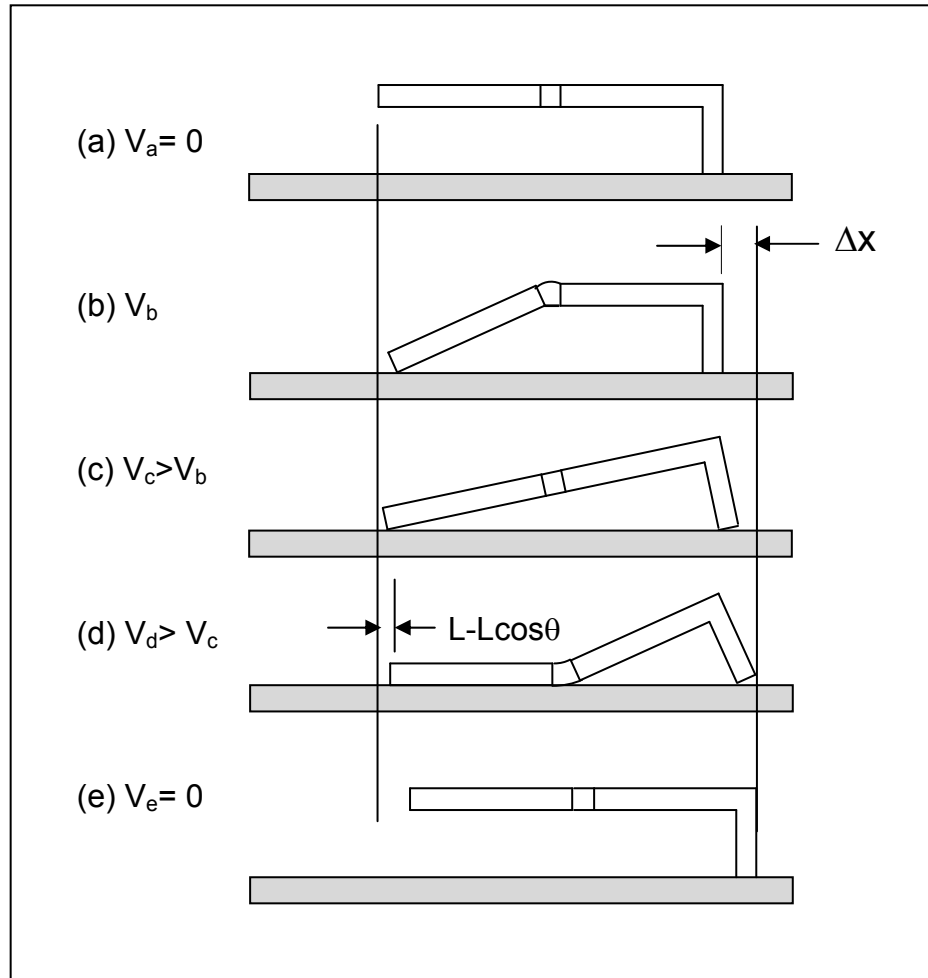


圖 2-2 LVSDA 操作原理圖。(a)初始狀態，(b)衝底(snap-through)，靜電力首度超過彈性回復力，(c)主板回復原形並傾斜一個角度，爪向前移動，(d)貼底反曲(priming)，靜電力再度超過彈性回復力。圖示為額外的步進尺寸，(e)步進完成，回復原初始狀態。

### 2.3 SDA 輸出力分析

在微型致動器中，輸出力是一項重要的效能評估之一，且輸出力大小與穩定性將決定其應用層面。一般來說傳統 SDA 輸出力約為幾十微牛頓，輸出力並不大，但 SDA 可藉由尺寸的設計或多個元件的串連來增加其輸出力。目前增加 SDA 輸出力的方法有

兩種，一種是縮短主板長度來增加輸出力，但相對的需要較高驅動電壓且增加量有限；另一種為利用陣列式 SDA 來增加輸出力，SDA 個數越多合力越大，缺點是增加晶圓的使用面積。依照目前傳統 SDA 來看，想要增加輸出力量，勢必需要較高驅動電壓或是增加晶圓使用面積，無法同時滿足兩者都兼顧，改善一項效能就必須犧牲其他優點，所以想要在兩者間取得一個較佳的權衡，就必須進行最佳尺寸設計。

在 2001 年 Linderman 和 Bright 等人對 SDA 做的實驗量測[12]，主板寬度為  $65\mu\text{m}$ 、厚度與爪高均為  $1.5\mu\text{m}$ ，主板長度從  $55\sim 80\mu\text{m}$  每  $5\mu\text{m}$  為單位逐漸增加，操作電壓為  $200\text{V}$  與頻率為  $1\text{kHz}$ ，板長與輸出力關係圖如圖 2-3 所示。結構上是利用陣列式四個 SDA 來拉動彈簧系統，實驗結果得知當主板長度越短，其產生的輸出力也越大，板長與輸出力成反比的趨勢，但相對的板長越短所需的驅動電壓也越大。

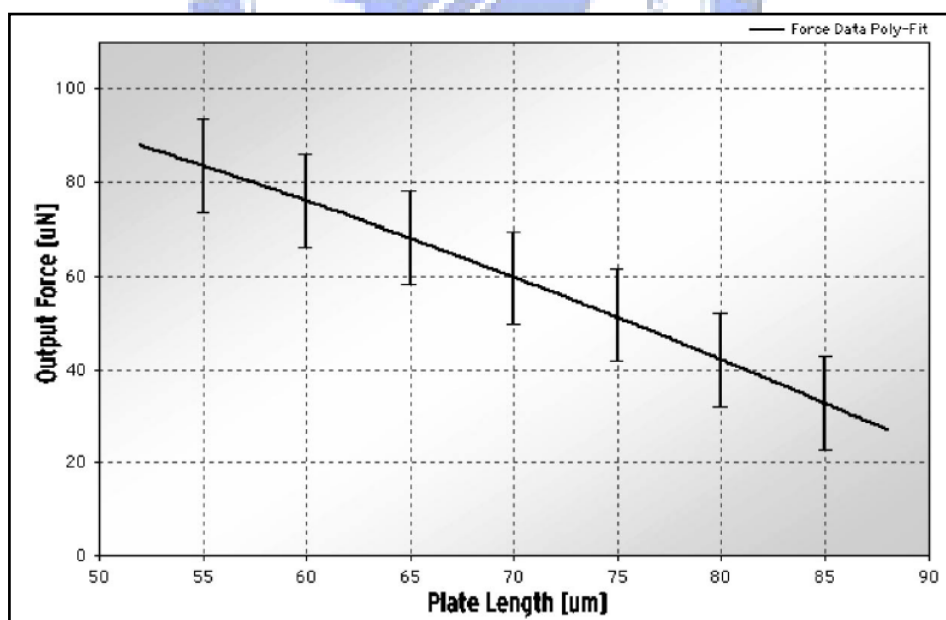


圖 2-3 陣列式四個 SDA 板長與輸出力關係  
(Linderman and Bright, 2001, *Sensors and Actuators*.)

## 2.4 等效彈簧系統

彈簧可將爬行後的 SDA 拉回起始位置使其做往復運動。因此我們的設計是利用 SDA 拉動由多個懸臂樑串連而組成的等效彈簧，此多個懸臂樑組成的彈簧系統，其彈簧係數的計算方法將在本節做詳細介紹，最後再分析不同條件下彈簧在彈性變形內受力與形變的關係，即可換算出 SDA 在不同電壓下能產生多少的輸出力。

### 2.4.1 懸臂樑等效彈簧常數

由虎克定律可得知，線性彈簧在彈性範圍內受一作用力，其彈性係數(Spring constant)的定義為：

$$k = \frac{F}{\delta} \quad (2-1)$$

其中 F 與  $\delta$  是彈性體所受的作用力 (Force) 與形變量 (Deflection)，單位分別為 N 與 m。  
k 單位為 N/m。

至於懸臂樑的等效彈簧常數，可利用材料力學公式可推導出。當施加一力 F 於懸臂樑端點(圖 2-4)，產生的彎曲力矩(Bending moment)為：

$$M = FL \quad (2-2)$$

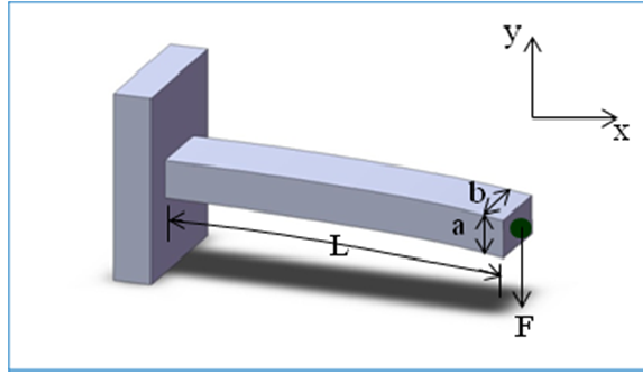


圖 2-4 懸臂樑受力圖

將  $M=FL$  代入經由撓曲方程式(Equation of the deflection curve)可得：

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2-3)$$

接著(2-3)式經過兩次積分，可得懸臂樑受力  $F$  端點的位移量為：

$$\delta = -\frac{FL^3}{3EI} \quad (2-4)$$

最後將位移量公式代入(2-1)式，即可導出單一懸臂樑撓曲時端點位移的等效彈簧

係數為：

$$k(I, L) = \frac{F}{\delta} = \frac{3EI}{L^3} \quad (2-5)$$

$E$  為懸臂樑材料的楊氏係數(Young's modulus)，單位為  $N/m^2$ ； $I$  為慣性矩(Moment of inertia)，單位為  $m^4$ 。

懸臂樑其斷面矩形受力方向為負  $y$  方向作用力，慣性矩為  $I = \frac{a^3b}{12}$ ，將  $I$  代入(2-5)式。等效彈簧常數可以用懸臂樑截面的長、寬與施力點位置的函數來表示：

$$k(a, b, L) = \frac{Ea^3b}{4L^3} = k_0 \quad (2-6)$$

## 2.4.2 兩端固定橫樑等效彈簧常數

若為橫樑(圖 2-5)，可以看成在相同邊界條件下，懸臂樑的自由端改為固定端，成為兩端固定的橫樑，其等效彈簧常數為：

$$k_1 = \frac{F}{\delta_1} = \frac{1}{2} \frac{F}{\delta_1/2} = \frac{1}{2} \frac{Ea^3b}{4(L/2)^3} = 4 \frac{Ea^3b}{4L^3} = 4k_0 \quad (2-7)$$

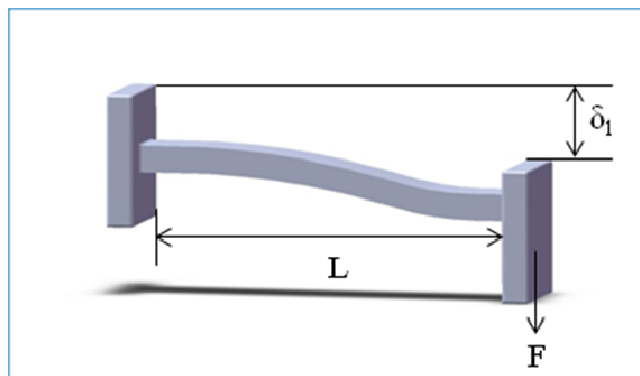


圖 2-5 兩端固定橫樑受力圖

對於橫樑彈簧常數的求法，可將橫樑對切成左右兩個相同的懸臂樑，懸臂樑長度皆為 L/2，端點受作用力 F 位移量均為 delta\_1/2 來分析(圖 2-6)，最後把兩個懸臂樑等效彈簧串連，可得橫樑的等效彈簧常數與等長度懸臂樑彈簧常數的關係。

$$k_1 = \frac{F}{\delta_1} = \frac{1}{2} \frac{F}{\delta_1/2} \quad (2-8)$$

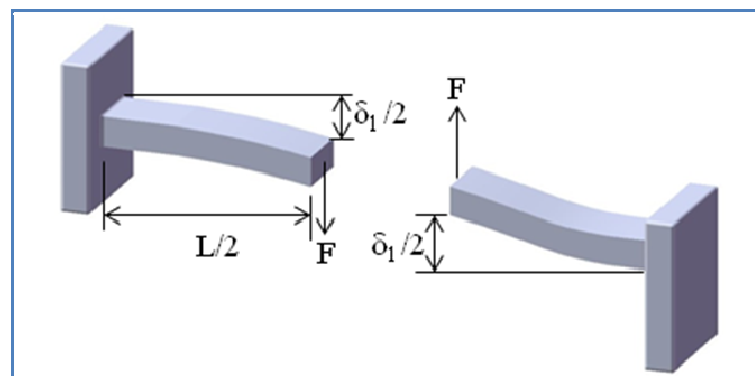


圖 2-6 兩端固定橫樑分解圖

若為兩個橫樑並聯的結構(圖 2-7)，在受力  $F$  且總位移量一樣，其等效彈簧常數為：

$$k_2 = \frac{F}{\delta_1} = \frac{1}{4} \frac{F}{\delta_1/4} = \frac{1}{2} k_1 \quad (2-9)$$

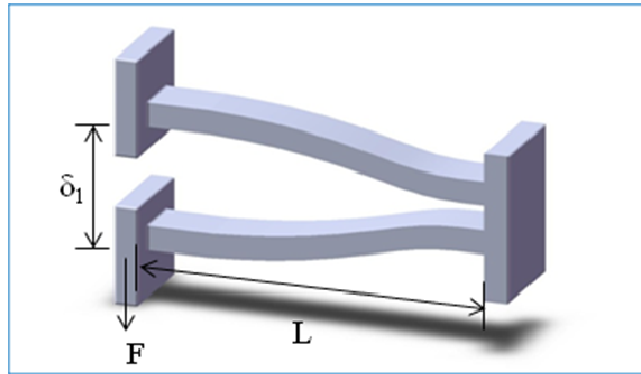


圖 2-7 兩組橫樑並連

由(2-9)式可類推出，當有  $N$  個橫樑並連，其等效彈簧常數為：

$$k_N = \frac{k_1}{N} = 4 \frac{k_0}{N} \quad (2-10)$$

## 2.5 模擬與分析

為了要了解抓爬式微靜電致動器的非線性分析，包含輸出力與步進尺寸，在這裡陳雄章學長利用實體模型軟體 Solidworks<sup>®</sup> 建立 SDA 主體及底板結構的組合模型；再以有限元素軟體 COSMOSWorks<sup>®</sup> 的非線性大形變分析模組進行輸出力與步進尺寸分析。由於軟體提供非貫穿接觸行為及靜電壓力隨變形而保持與作用面垂直的功能，因此採用此類致動器的設計分析。

### 2.5.1 分析設定

首先以 Solidworks® 建立 SDA 組合模型，包括底板與基板的等效模型為 2 $\mu$ m 厚的矽結構以節省數值分析計算時間。再以 COSMOSWorks® 非線性模組分析。先建立拘束條件，包括底板底層固定，主板左緣下側視同銷接以避開剛體運動模式；而瓜子底部左側設定為保持與底板的接觸，即無垂直方向的運動。單位面積靜電吸引力的參考坐標原點設在主板左緣下側中點。有關主板與底板接觸及間隙條件設定為無貫穿，意即觸底後，接觸長度會隨負荷增加而增加。網格化的特徵尺寸約 1 到 2 微米，以保持恰當的分析精度及收斂時間為調整原則。

表 2-1 有限元素分析中所使用到的材料參數

	Nickel	SC-Silicon	Nitride	Dry-Air
E (GPa) Modulus of Elasticity	210	162	210	*
D (Kg/m <sup>3</sup> ) Density	8500	2420	3100	TD : 1.293-0.456 (273K-773K)
$\nu$ Poisson Ratio	0.31	0.28	0.278	*
K Dielectric Constant	*	*	7.9	1

註：TD = Temperature Dependent

## 2.5.2 尺寸設計

為了建立比較基準，分別對傳統 SDA 與 LVSDA 兩種結構做分析；主板結構尺寸均為板長  $80\mu\text{m}$ 、板寬  $65\mu\text{m}$ 、厚度與高度均為  $2\mu\text{m}$ (圖 2-8)。對於 LVSDA 撓性接頭的尺寸設計與位置是關鍵參數，在此先以固定撓性接頭長度  $L_j$  為  $20\mu\text{m}$ 、寬度  $W_j$  為  $6\mu\text{m}$  的尺寸為基礎，抓爬樑長度  $L_s=20\mu\text{m}$ 、摩擦樑長度  $L_f=40\mu\text{m}$ (圖 2-8)來做模擬，驅動電壓由  $50\text{V}$  到  $110\text{V}$ ，以  $10\text{V}$  為增量逐漸增加。再與傳統沒挖洞的 SDA 做模擬比對。

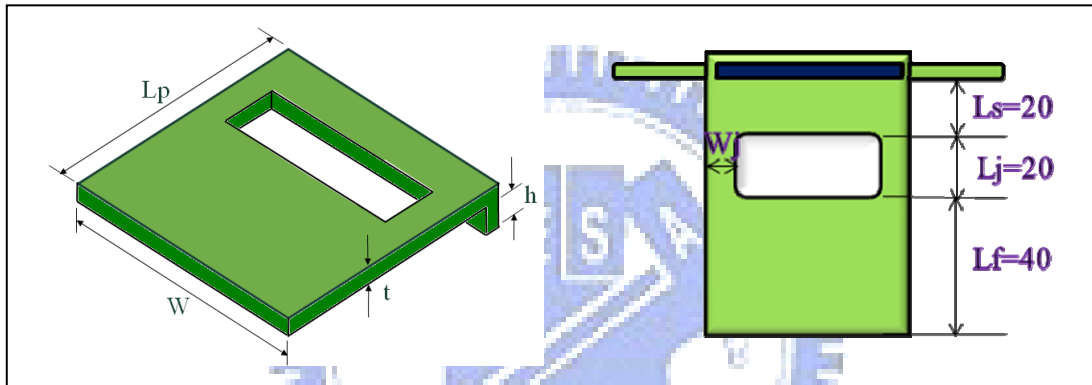


圖 2-8 LVSDA 尺寸參數

## 2.5.3 模擬結果討論

模擬結果如圖 2-9，分析發現撓性接頭的寬度、長度及位置會有規則地影響輸出力與步進尺寸的趨勢(圖 2-10)，當操作電壓越大步進尺寸也越大，LVSDA 與傳統 SDA 相比有較大的步進尺寸，因此作動速度較快。



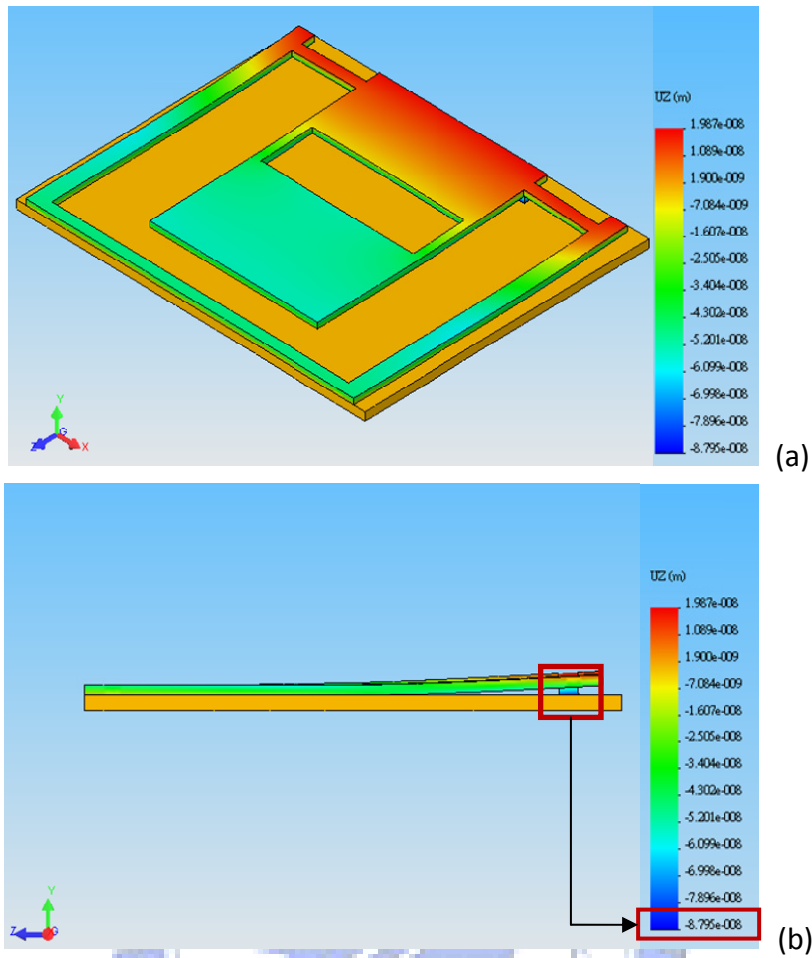


圖 2-9 LVSDA 步進尺寸 COSMOS 模擬結果(a)等角視圖 (b)側視圖

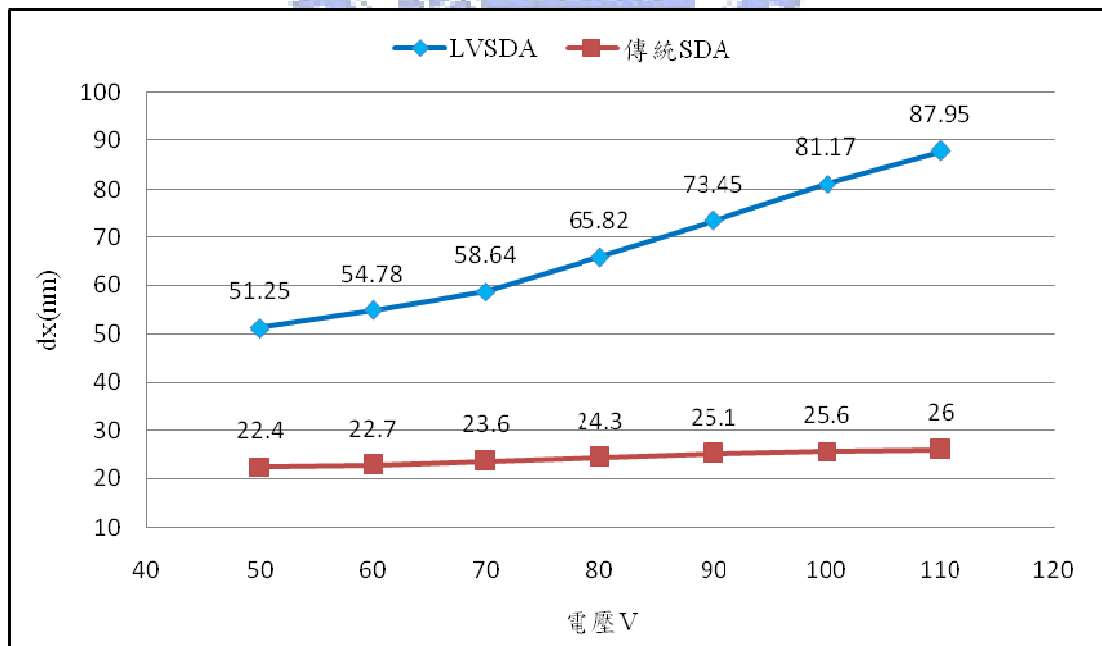


圖 2-10 LVSDA 與傳統 SDA 步進尺寸模擬結果

## 第三章 製程流程

在本章將會詳細解說 SDA 元件的製作過程，使用到微機電系統相關製程，包括低壓化學氣相沉積(low pressure chemical vapor deposition)、黃光微影(lithography)、濺鍍(sputtering)與電鍍(electroplating)等表面金屬微加工技術，其中對於前爪的製作、光阻的選用與電鍍鎳的技術上進行較詳細的介紹，最後對元件的製作成果進行討論。

### 3.1 前爪製作流程

在 SDA 元件的製作過程中，爪子的設計製作是相當重要的一環，爪子做出來的成功與否，將是 SDA 能否向前作動的關鍵。如何製造出精良的爪子，光阻的選用與製程上軟烤、硬烤等參數，都會影響爪子的幾何形狀與精確度，最後如何讓爪子懸浮而不會沾黏(stiction)，將是製程上必須去克服的。

#### 3.1.1 前爪製作

在開始在設計爪子時，必須先仔細思考該如何規劃製程，因為爪子的設計將會影響後面的製作流程，如何讓 SDA 後面電極固定在基板上並且能使前爪懸浮，除此之外，SDA 懸浮高度又不能太高，太高會造成 SDA 結構與基板之間靜電力不足不易吸附，因此光阻的選用、製程參數將是關鍵。

起初我們利用的是部份曝光方式(圖 3-1)，先塗上一層光阻，分別對固定在基板上的接觸電極與懸浮的前爪，控制對光阻的曝光劑量，在相同顯影時間下，因曝光時間不同而達到不同的蝕刻深度，可分別做出固定在基板上的電極與 SDA 前爪，但此種方法有很大的缺點，必須做大量光阻曝光與顯影測試，才能得到較精確的參數，再來就是曝光劑量與顯影時間不易精準拿捏，加上製程需要多曝光一次，增加光罩對準誤差。

後來利用濺鍍黏著層 Ti 與種子層 Cu，直接當作爪子底下的犧牲層(圖 3-3)，根據學長以往的實驗經驗，因為爪子底部面積很小，在釋放元件時，放入震盪器震盪即可把爪子結構震離基板，達成懸浮的效果，且此種方式減少一次對光罩的誤差，降低結構對不準所產生的影響。

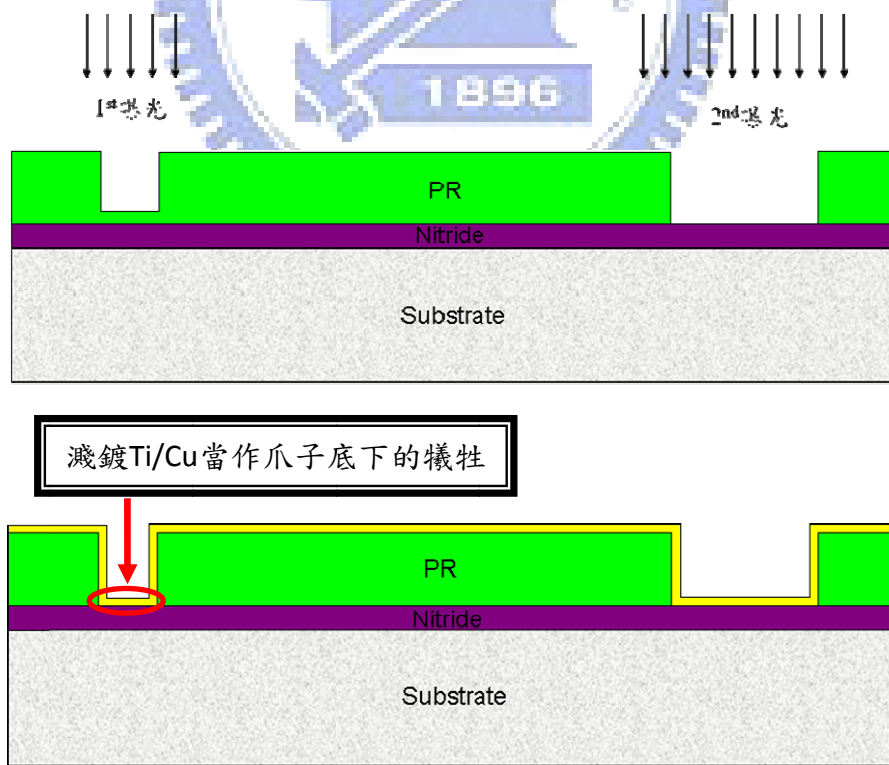


圖 3-1 前爪製作方法

### 3.1.2 光阻選用

爪子的高度是依照塗佈的光阻厚度而定，旋佈光阻後曝光、顯影開出爪子的孔洞，最後電鍍上 SDA 結構，因此光阻的高度就等於爪子的高度。一旦決定好爪子的高度後，則開始選擇合適的光阻製程，一般來說，常用的正光阻 AZ 系列，如 AZ4620 與 AZ9260，最薄也只能達到  $4\mu\text{m}$  左右，爪高設計在  $4\mu\text{m}$  以上即可使用此類光阻；若想要讓爪高低於  $2\mu\text{m}$  以下的高度就必須找尋其他光阻，因此我們採用 FH6400 光阻來做爪子的設計，且 FH6400 光阻製程相較 AZ 系列光阻製程來的簡易、省時，所以最後決定採用 FH6400 作為犧牲層光阻，省去部分曝光步驟與對光罩產生的對準誤差。

### 3.2 電鍍鎳流程

電鍍製程係把原型母模放在陰極上，利用電鍍原理沉積材料至適當的高度，在使其與母模脫離，可用來生產各種金屬模和精密零件組。在本論文中，我們使用了電鍍鎳金屬作為主要元件的製作製程，電鍍品質的好壞將影響 SDA 結構是否精良，而在電鍍製程前還需要搭配其他製程，來做電鍍前的準備工作，如電鍍前需濺鍍黏著層 (adhesion layer) 與種子層 (seed layer)，接著定義電鍍元件區域的模 (mold) 的黃光製程，完成前述步驟方能真正開始電鍍製程。所以，在此將逐一介紹這一系列電鍍相關製程，與最後電鍍品質結果討論。

### 3.2.1 黏著層與種子層的選擇

在進行電鍍製程前，必須先鋪上一層金屬，能夠在電鍍時將電流由陰極板傳遞到電鍍的位置，我們稱之為種子層，為了不影響後面製程平整性，所以種子層盡量要薄且不能夠具有太大的電阻，阻值太大會造成電鍍時電鍍薄膜厚度差異大。在這裡我們選擇銅(Cu)作為種子層，因為銅金屬的電阻率小易導電，很適合作為電鍍時導電的金屬層。但銅與單晶矽基底的黏著性並不是很好，因此必須在種子層與單晶矽基底之間建立促進兩者接合的黏著層，所以選擇了鈦(Ti)金屬當黏著層，因為鈦對銅或矽是單晶矽基底都有相當好的附著性，不會因為釋放結構而產生剝離。最後黏著層與種子層在製程結束後都需要移除，而鈦、銅兩金屬與電鍍結構鍍都有適當的溶液可以產生良好的蝕刻選擇比，也有類似犧牲層的作用。



### 3.2.2 黃光製程

濺鍍上黏著層與種子層後，接下來需要定義出電鍍結構的圖形，也就是建立電鍍的模仁(mold)，在這裡選用正光阻 AZ9260 來作為電鍍的模仁，AZ9260 的光阻深寬比與側壁準直性要比同系列的 AZ4620 來的好，做出來的模仁結構較為精美，不易造成線寬的損失；因為電鍍效應的影響，為了避免厚度不均，所以製程上電鍍模必須要比電鍍結構還要厚，AZ9260 的特性適合做較厚的光阻層，特別是使用在電鍍模仁上。表格 3-1 列出我們所使用的黃光參數。

表 3-1 黃光參數表

光阻種類	FH6400	AZ9260
光阻厚度	2.1 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
旋佈	500 rpm (10 sec) 1200 rpm (25 sec)	1000 rpm (10 sec) 5000 rpm (30 sec)
靜置	5 min	10min
軟烤	2 min	10 min
水合	5 min	> 20 min
曝光	3 sec (+20%) (46mW/cm <sup>2</sup> )	6 sec (+20%) (46mW/cm <sup>2</sup> )
顯影	30 sec (AZ-400k)	2 min 30 sec (AZ-400k)
定影	1 min (DI Water)	1 min (DI Water)
硬烤	10 min	X

### 3.2.3 電鍍製程

電鍍是一種電化學反應，把一種金屬材料鍍在另一個金屬的表面上，形成一層金屬薄膜。電鍍時所獲得電鍍層的析鍍量是根據法拉第定律，電化學反應產物的量正比於所施加的總庫侖數，在定電量下，電化學反應產物的量正比於產物的當量數。因為微結構電鍍的品質，深受結構圖案設計、圖案密度、圖案分布位置、深寬比與電鍍液等因素有很大的關係，在本實驗中使用鎳材料的電鍍，鎳電鍍是最常使用的瓦特浴 (Watt bath)，主要的原因不外乎鍍率高且品質好，因此在這我們使用鎳金屬電鍍瓦特

浴室最適合的方式。

在電鍍過程中最重要的參數是電流密度，因為電流密度將會決定結構的完整性、表面平滑度、結構應力與模厚均勻度等，電流密度提高，可以減少電鍍時間，但易造成電鍍結構表面粗糙；電流密度太低，則容易使電鍍液中的氣泡與雜質停留在電鍍物表面上，造成結構不完整，因此取用可保持結構完整性的最小電流是我們希望的，表格 3-3 列出電鍍所使用的參數。

表 3-2 電鍍參數表

光罩	Mask #2
電鍍金屬	Nickel
電鍍面積	3.526
電流密度	10 mA/cm <sup>2</sup>
電鍍速率	0.2 μm/min

### 3.3 沾黏

最後釋放元件部分，將是整個製程中最困難也是最重要的關鍵步驟，因為面型微加工製程常常會有懸浮結構，又必須以溼式蝕刻方式釋放結構，元件容易因為表面張力在烘乾的過程中，將可動或不受拘束的部分緊緊黏到下方的基材上而黏底(stiction)，容易造成結構的損壞。因此根據學長實驗經驗，在製程方面，將最後蝕刻完的晶片放入去離子水清洗，再浸泡異丙醇(IPA)來取代水，原因是異丙醇是沸點低(82.4°C)的有機

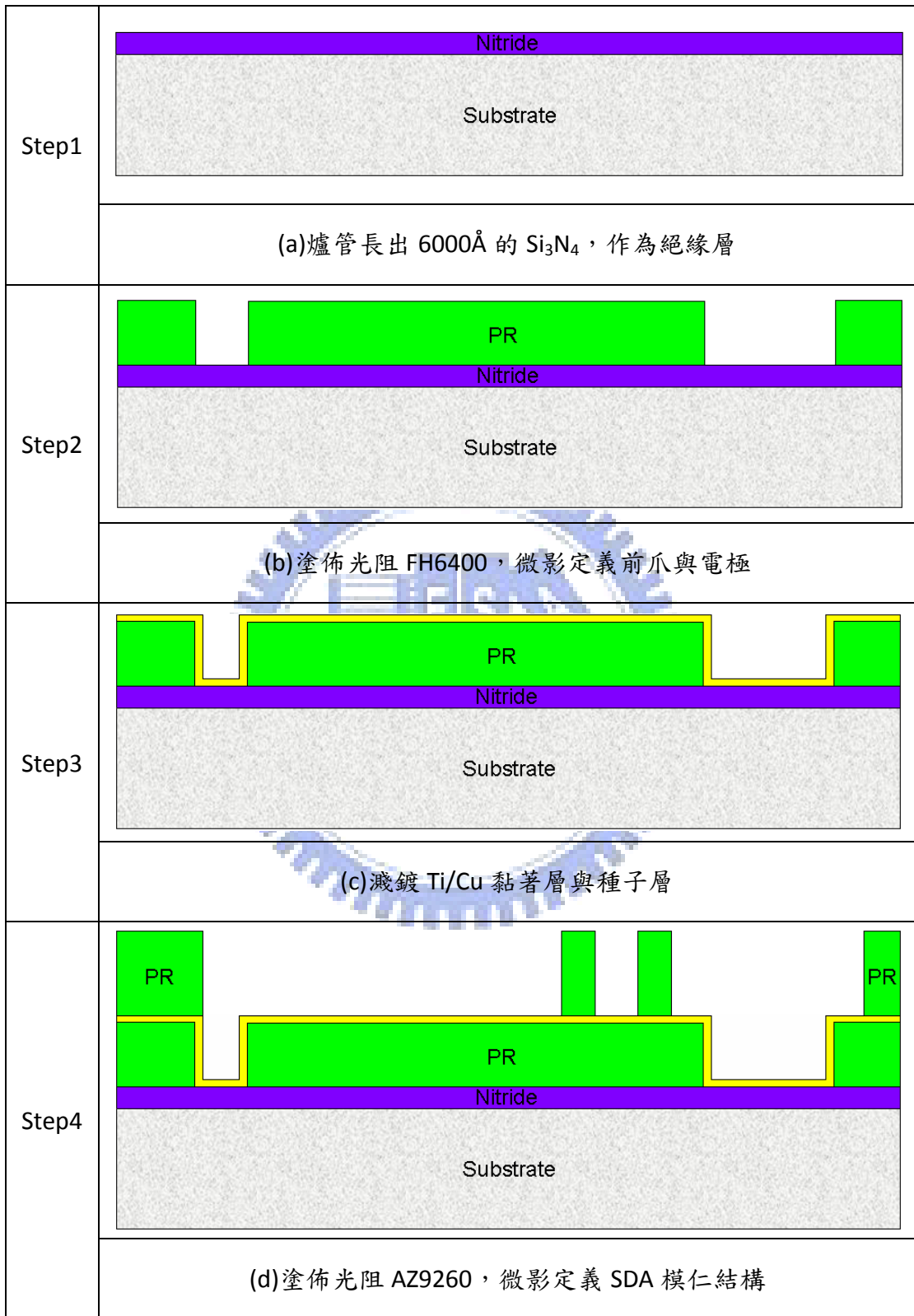
溶液，相較於去離子水容易揮發，最後放在烤盤上直接烤乾，將可改善結構沾黏的情況發生。

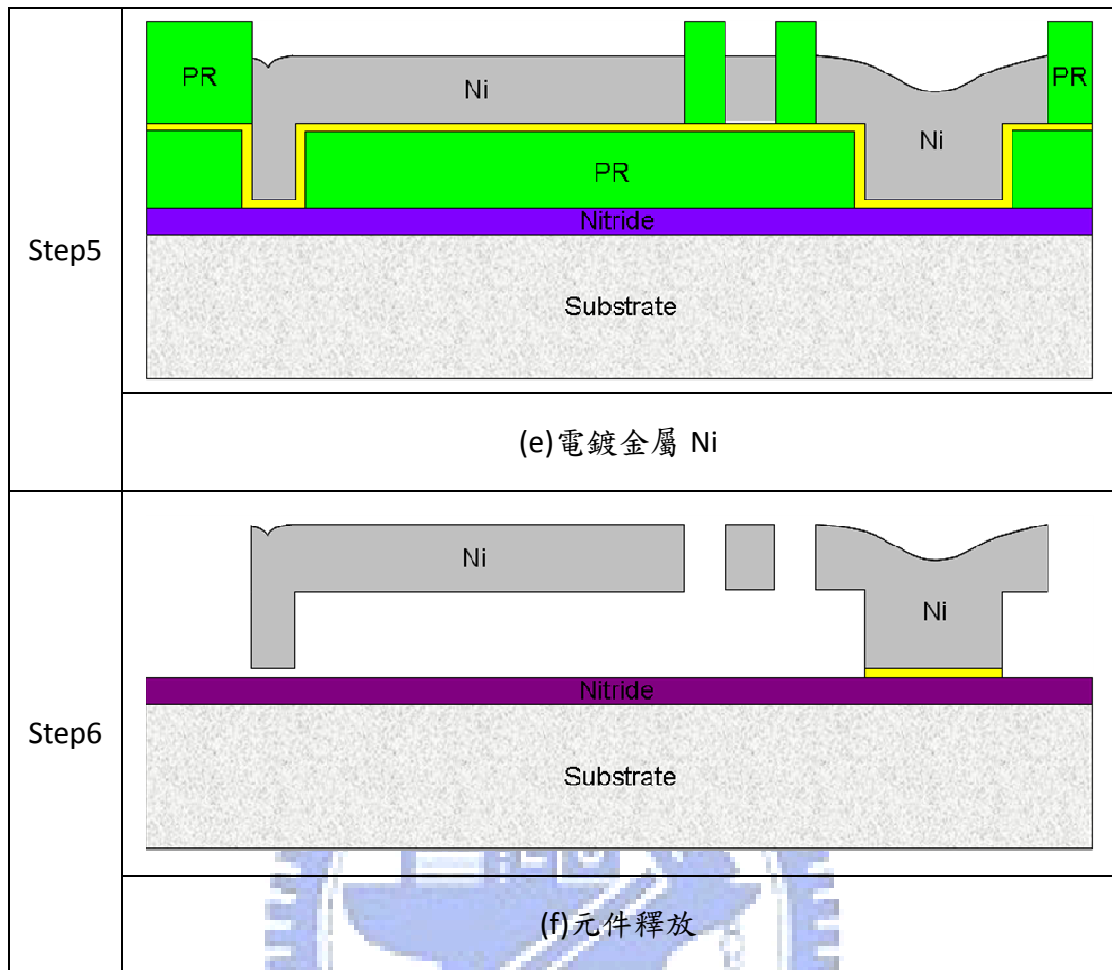
### 3.4 製程流程

利用金屬面型微加工技術進行 SDA 結構製作，步驟如下圖表 3-1 所示。步驟(a)中，將經過 RCA 清潔後的 n-type 矽晶片(阻值  $1\sim 10\Omega\text{-cm}$ )，放入爐管長出  $6000\text{\AA}$  的氮化矽作為電性絕緣層；步驟(b)進行第一道光罩黃光製程，塗佈  $2\mu\text{m}$  左右厚的 FH6400 光阻作為犧牲層， $90^\circ\text{C}$  軟烤 10 分鐘後靜置 20 分鐘讓光阻水合，水合時間將會影響光阻曝光顯影後線寬的好壞，接著進行微影製程開出所要的前爪與接觸電極圖形；因為光阻不導電，無法作為電鍍附著層，所以步驟(c)分別濺鍍 Ti 黏著層  $200\text{\AA}$  與 Cu 種子層  $1500\text{\AA}$ ；步驟(d)進行第二道光罩黃光製程，塗佈  $5\mu\text{m}$  左右厚的 AZ9260 光阻，微影出電鍍所需要的模；步驟(e)電鍍鎳結構，以電流密度  $10\text{ mA/cm}^2$  進行 10 分鐘金屬鎳電鍍，大約生成  $2\mu\text{m}$  左右的結構厚度；最後步驟(f)釋放元件，首先將試片泡進丙酮(ACE)除去電鍍模仁光阻，再分別以溶液 CR-7T 浸泡 20 秒去除種子層 Cu，與溶液 BOE 浸泡 10 秒去除黏著層 Ti，接著放入丙酮浸泡 30 分鐘去除大部份犧牲層光阻，浸泡在異丙醇(IPA)內，放置超音波震盪器中震盪 20 秒，將犧牲層光阻硬烤後產生的薄膜震掉，最後將試片從異丙醇溶液中取出直接  $60^\circ\text{C}$  烤乾。



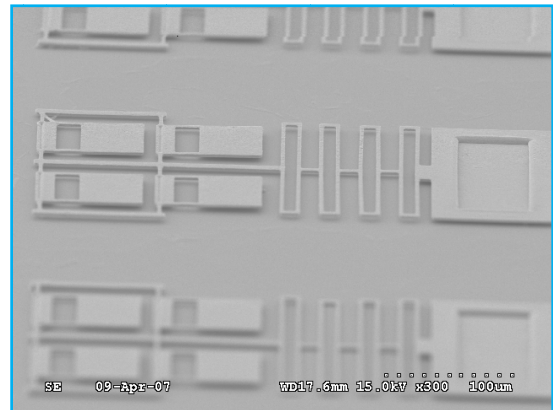
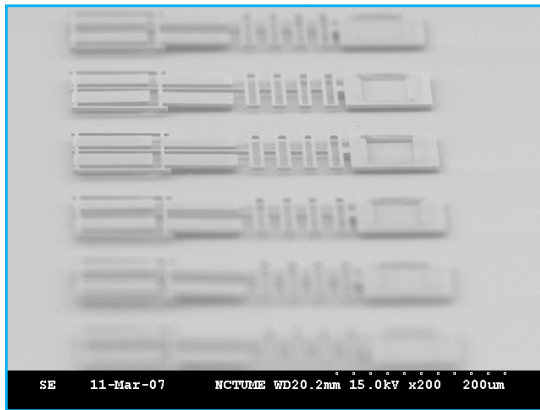
圖 3-2 製程步驟





### 3.5 製程結果

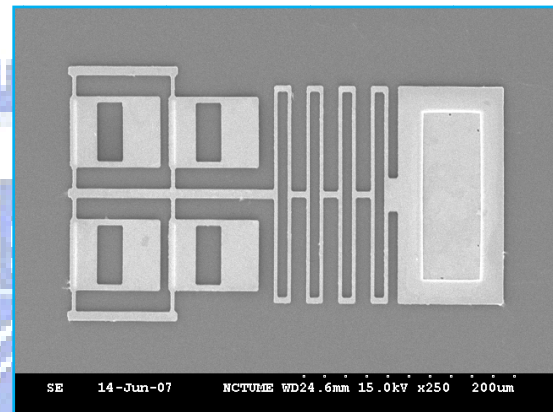
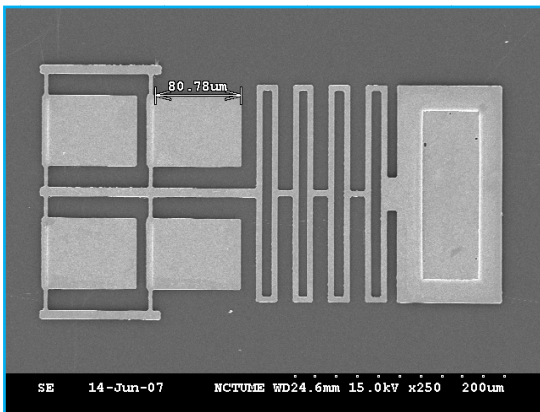
經過上述製程步驟後，可得如圖 3-3 與 3-4 的製作成果，從圖 3-4 可看出有些 SDA 與彈簧被吸附在基板上，有沾黏的現象產生；還有有些 SDA 翹起來，是在電鍍時所產生的應力集中導致結構受力不均產生翹曲。大部分的元件都還算正常，有問題的元件盡量不要去量測使用他。再來觀察前爪是否完整做出，從圖 3-5 可看出，前爪製作沒問題，且高度為 2.24 $\mu\text{m}$ ，接近我們的爪高設計 2 $\mu\text{m}$ ，而電鍍厚度也差不多達到我們所需的 2 $\mu\text{m}$  厚。比較得意的是這批光罩對準非常完美，幾乎沒有對準誤差，算是相當成功的一批。



(a)

(b)

圖 3-3 元件 SEM 側視照 (a)傳統 SDA (b)LVSDA



(a)

(b)

圖 3-4 元件 SEM 俯瞰照 (a)傳統 SDA (b)LVSDA



圖 3-5 SDA 元件爪高與厚度 SEM 照片

## 第四章 量測結果與討論

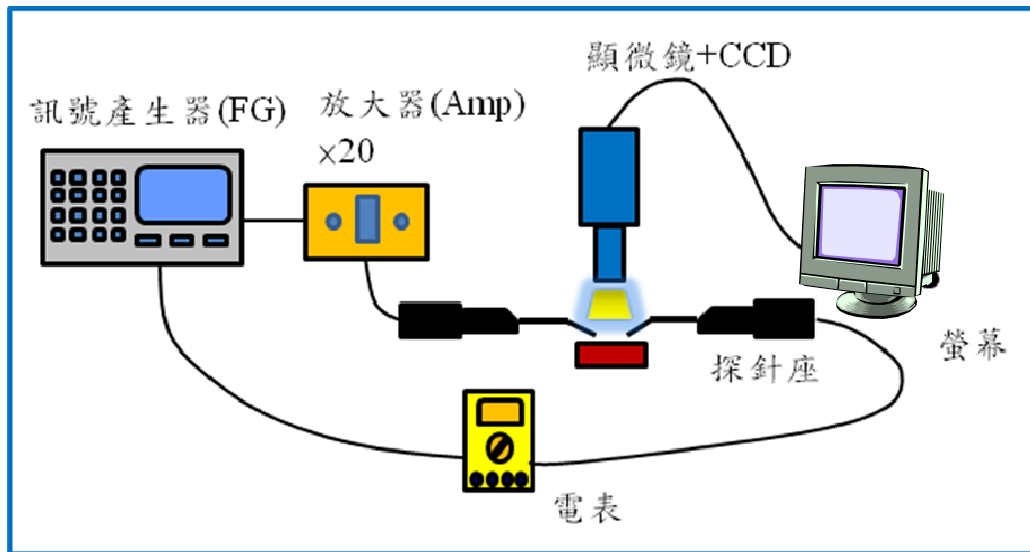
本章將介紹實驗量測設置與實驗量測結果，分別對傳統 SDA 與 LVSDA 的驅動電壓與輸出力做分析討論，並將 LVSDA 效能與傳統 SDA 做評比，最後對量測時可能產生的誤差進行討論。

### 4.1 量測設置

在實驗量測架設上(圖 4-1)，首先分別將兩組探針(probe)接觸到試片上的 SDA 元件電極與矽基材上，接上訊號產生器(Function generator)來產生方波訊號，頻率設為 500Hz，經由手動切換調整所需的電壓大小值，輸入訊號傳入放大器放大 20 倍，經由探針導入元件中，同時可在輸入元件迴路上串連一個三用電表，觀察電壓大小做監控，輸入電壓訊號時元件開始作動，影像畫面藉由 CCD 回傳影像，直接在螢幕上觀察。



(a)



(b)

圖 4-1 量測設置 (a)實體照片 (b)示意圖

## 4.2 量測結果

在量測方面有兩個重點，一個為驅動電壓量測，另一個為輸出力測試，首先針對傳統 SDA 做不同板長驅動電壓與輸出力量測，再來對我們所設計的 LVSDA 在固定板長下，分別對撓性接頭長度、寬度與撓性接頭位置等參數，進行分析討論，最後將量測結果與傳統 SDA 做比較。

### 4.2.1 驅動電壓量測

驅動電壓量測主要判別 SDA 在多大的輸入電壓下能向前作動至少  $10\mu\text{m}$ ，在此利用訊號產生器給 SDA 一個交流方波訊號，起始電壓從 30V 逐漸加大，經由 CCD 直接觀察影像(圖 4-2)，當 SDA 突然向前位移，此時彈簧也有明顯拉伸做為其驅動電壓。在元件製作過程中，因為進行兩道黃光製程與電鍍鎳製程，光罩對準誤差與電鍍厚度不均

的原因，多少會造成尺寸上的誤差，就量測尺寸結果可得：SDA 板寬  $W=65\mu\text{m}$ 、厚度  $t$  與爪高  $h$  均為  $2\mu\text{m}$ 。當開始輸入電壓時，經由 CCD 可明顯看出主板失焦(圖 4-3)，可得知 SDA 主板被往下吸附。

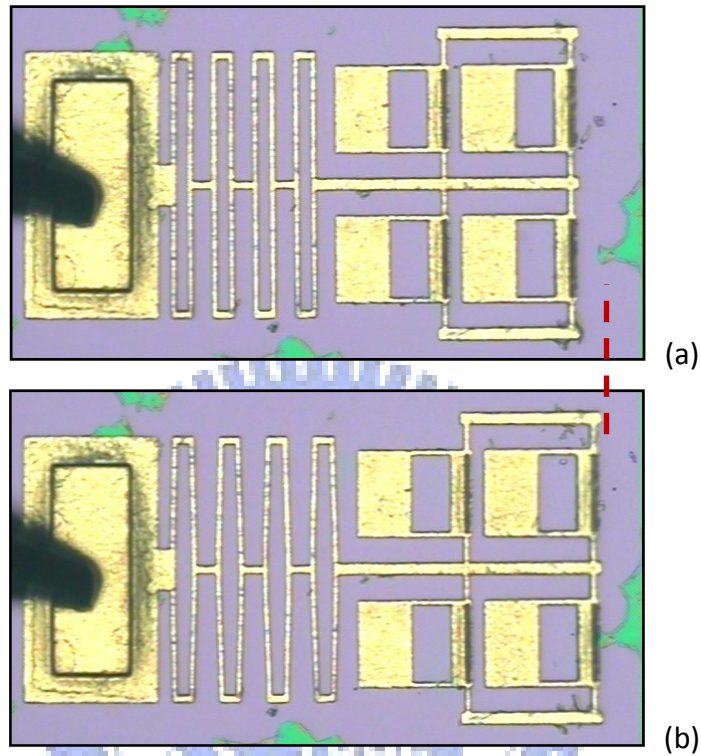


圖 4-2 SDA 驅動電壓測試 (a)未施加電壓前 (b)施加電壓作動後

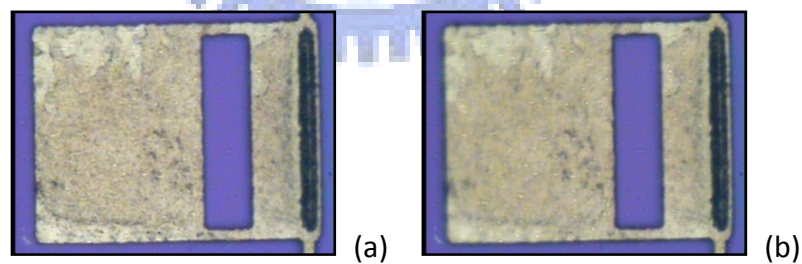


圖 4-3 單一 SDA 結構 (a)起始未施加電壓前 (b)施加電壓後主板被吸附

傳統 SDA 板長從  $65\mu\text{m}$  每  $5\mu\text{m}$  為單位逐漸增加到  $85\mu\text{m}$ ，共 5 種尺寸，實驗量測分別對各種尺寸的元件做 5~9 次量測並取平均，當  $L_p=65\mu\text{m}$  在 200V 以內無法量得驅動電壓，剩下四種板長與驅動電壓的關係如圖 4-4 所示，可看出當  $L_p=80\mu\text{m}$  其驅動電

壓需要 84V，較小的驅動電壓在  $L_p=85\mu\text{m}$  為 78V，因此傳統 SDA 隨著板長增加，所需的驅動電壓有逐漸下降的趨勢。

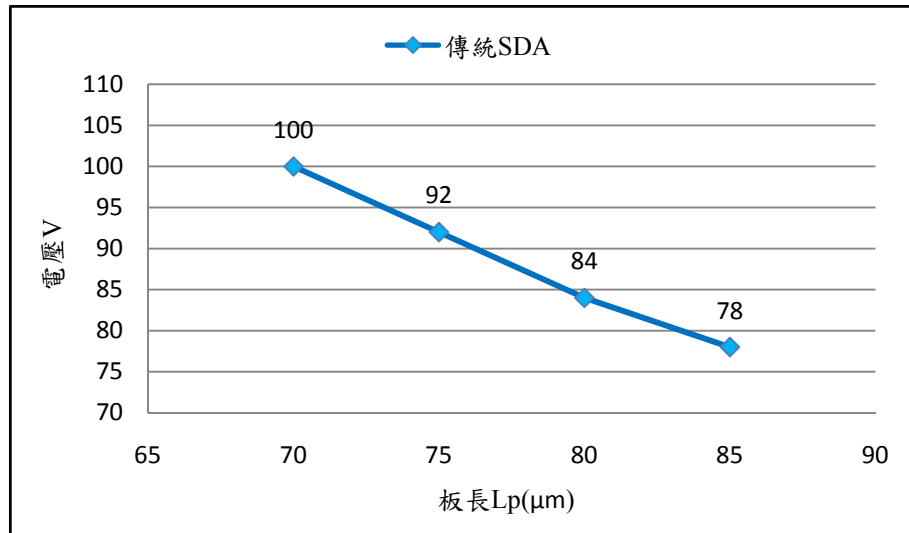
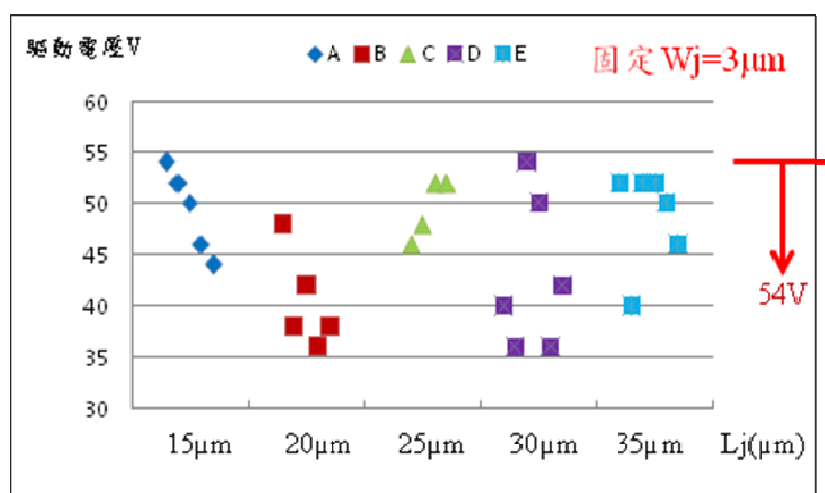


圖 4-4 四種板長與驅動電壓關係圖

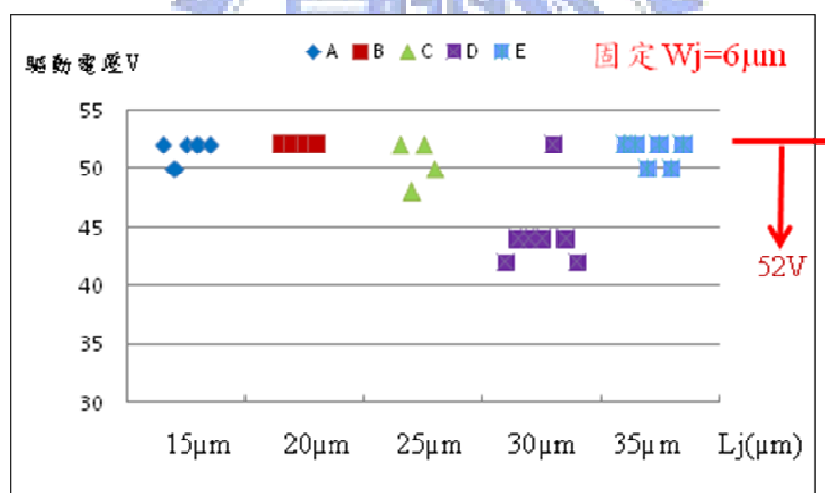
接著量測 LVSDA 的驅動電壓，將板長  $L_p$  固定為  $80\mu\text{m}$ 、板寬  $W=65\mu\text{m}$ 、厚度  $t$  與爪高  $h$  均為  $2\mu\text{m}$ ，量測方式與傳統 SDA 都一樣，由於 LVSDA 多了撓性接頭的設計，主板被分隔成三個部分，分別有四個重要參數：抓爬樑長度  $L_s$ 、摩擦樑長度  $L_f$ 、撓性接頭長度  $L_j$  與寬度  $W_j$ 。因為影響 LVSDA 性能參數很多，想要概略了解此種設計的驅動電壓範圍，只能先固定一項參數來做分析，在此分別只對固定  $W_j=3\mu\text{m}$  與  $W_j=6\mu\text{m}$  兩組數據作量測，當  $W_j$  固定為  $6\mu\text{m}$ ， $L_s$  固定為  $15\mu\text{m}$ ， $L_j$  從  $15\mu\text{m}$  每  $5\mu\text{m}$  增加至  $35\mu\text{m}$ ，相對的  $L_f$  從  $50\mu\text{m}$  遞減至  $30\mu\text{m}$ ，將這五種  $L_j$  尺寸對驅動電壓關係，做成如圖 4-3(a) 所示，從圖可得知所有尺寸大約 54V 以下就能驅動，最小驅動電壓有量到 36V。

當  $W_j$  固定為  $3\mu\text{m}$ ，在其他參數相同情況下，所量得的五種  $L_j$  尺寸對驅動電壓的關係如圖 4-3(b) 所示，從圖得知所有尺寸大約 52V 以下就能驅動，最小驅動電壓有量

到 42V，在這圖表觀察到一件有趣的現象，當尺寸  $L_s=15\mu\text{m}$ 、 $L_j=30\mu\text{m}$ 、 $L_f=35\mu\text{m}$  量得到的驅動電壓大多在 44V 左右，明顯比其他尺寸驅動電壓來的小，這是不是一個最佳驅動電壓值，在未來必須做其他分析來做確認。



(a)



(b)

圖 4-5 LVSDA 驅動電壓 (a) $W_j=3\mu\text{m}$  (b) $W_j=6\mu\text{m}$

在這所有 LVSDA 驅動電壓量測中，因為 SDA 受到彈簧作用力的拘束，還有表面摩擦力、溼度等外在環境的影響，導致 SDA 需要額外的力量去克服這些因素，所以實際 SDA 的驅動電壓應該會比實驗量出結果來的低。



#### 4.2.2 輸出力量測

在輸出力量測上，利用 SDA 拉動彈簧系統，量出位移量來評估其出力大小，在此我們設計四組箱型彈簧系統(圖 4-6)，提供等效彈簧常數的應用公如下：

$$F = kx \quad (4-1)$$

$$k(a, b, L) = \frac{Ea^3b}{4L^3} = k_0 \quad (4-2)$$

其中  $F$  為受力大小，單位為  $N/m$ ； $k$  為等效彈簧系統彈性常數； $E$  為材料楊氏係數，單位為  $N/m^2$ ； $L$  為樑結構長度、 $a$  為樑寬度、 $b$  為樑厚度，單位均為  $m$ 。

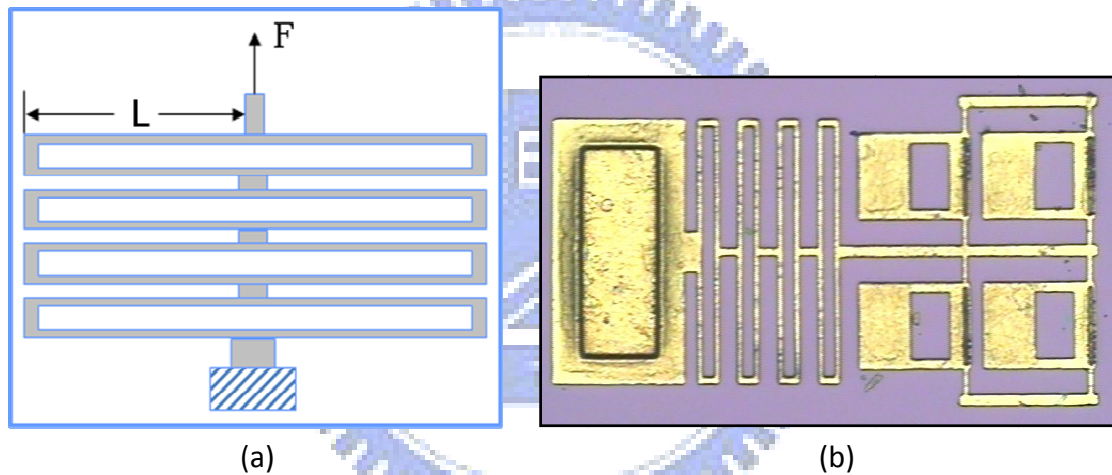


圖 4-6 四個箱型彈簧系統 (a)彈簧示意圖 (b)元件實體圖

如此可計算出此彈簧系統的彈性常數  $K$  值，藉由彈簧拉伸量可計算得知單一 SDA 的輸出力大小。一般傳統 SDA 不同板長下，可測得不同電壓與輸出力的關係，如圖 4-7 所示，從圖可分析出幾點結論：

1. 在同一板長下，操作電壓越大輸出力也越大。
2. 在相同電操作壓下，板長越短有較大的輸出力。
3. 在相同輸出力下，板長越長所需的操作電壓也越大。

4. 若想要較大的輸出力，可減短主板長度，但所需的驅動電壓上升。
5. 就板長為 80 $\mu\text{m}$  來分析，單一傳統 SDA 在 120V 出力可達 24 $\mu\text{N}$ 。若將 SDA 陣列式串連，出力很容易超過 100 $\mu\text{N}$  以上。

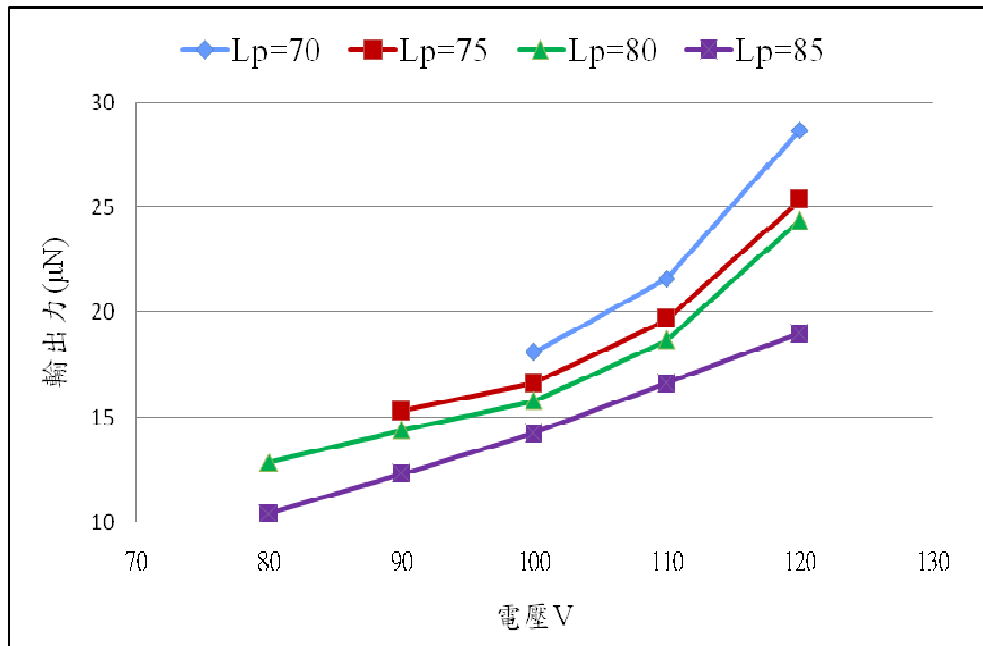


圖 4-7 四種板長輸出力與電壓關係圖

由於 SDA 的運動行為與其板長和操作電壓息息相關，在 2001 年 Liderman 和 Bright 等人實驗做出 SDA 板長與輸出力關係圖[12]，如圖 4-8 所示；在此我們截取圖 4-7 中操作電壓為 100V 的輸出力數據，做出不同板長與輸出力關係圖，如圖 4-9 所示，從這兩張圖皆可證實輸出力隨著板長減少而增加，不一樣的是 Liderman 他們是在操作電壓為 200V 所做出來的結果，且結構厚度只有 1.5 $\mu\text{m}$ ，很明顯要比我們在操作電壓 100V，其輸出力要來的大，此項也證明輸入電壓越大輸出力也就越大。

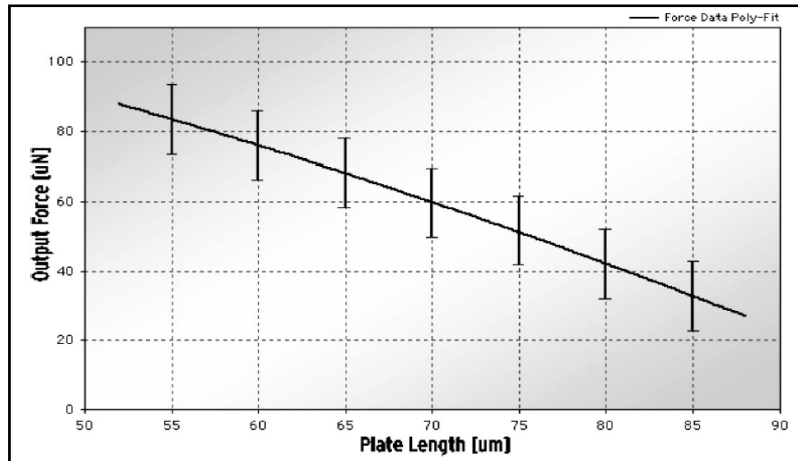


圖 4-8 傳統 SDA 輸出力與板長關係圖  
(Linderman and Bright, 2001, *Sensors and Actuators.*)

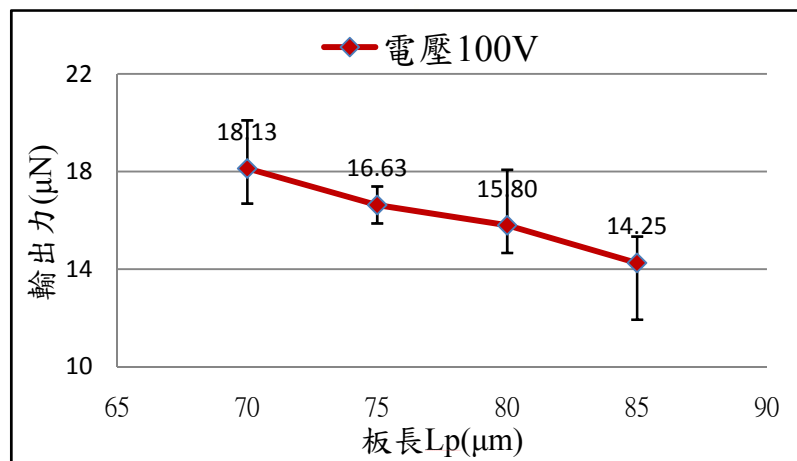


圖 4-9 操作電壓 100V 下傳統 SDA 輸出力與板長關係圖

LVSDA 輸出力在相同板長下，板長  $L_p=80\mu\text{m}$ 、板寬  $W=65\mu\text{m}$ 、厚度  $t$  與爪高  $h$  均為  $2\mu\text{m}$ ，固定  $L_j=20\mu\text{m}$  與  $W_j=6\mu\text{m}$ ，當尺寸  $L_s=10\mu\text{m}$ 、 $L_f=50\mu\text{m}$ ，電壓由 50V 每 10V 為單位增加至 120V，可畫出一條趨勢線，分別再增加  $L_s=15\mu\text{m}$ 、 $L_f=45\mu\text{m}$  與  $L_s=20\mu\text{m}$ 、 $L_f=40\mu\text{m}$  兩種尺寸的趨勢線，得到三種尺寸輸出力與操作電壓關係圖如 4-10(a)所示。從量測結果發現  $L_s$  越短，即撓性接頭越靠近前爪，有較大的輸出力，且各個尺寸似乎有較大輸出力在 60~70V 之間，而超過 100V 輸出力不再有大幅增減，趨於穩定值。

為了想要了解 LVSDA 撓性接頭寬對輸出力的影響，因此將撓性接頭寬度  $W_j$  從  $6\mu\text{m}$  改為  $3\mu\text{m}$ ，其他尺寸皆不變，一樣可得電壓與輸出力關係圖如圖 4-10(b)所示。其量測結果與圖 4-10(a)可得到相似的結論， $L_s$  位置越短即撓性接頭越靠近前爪，有較大的輸出力，且各個尺寸似乎都有較大輸出力在 70V，而超過 100V 輸出力不再有大幅增減，趨於穩定值。

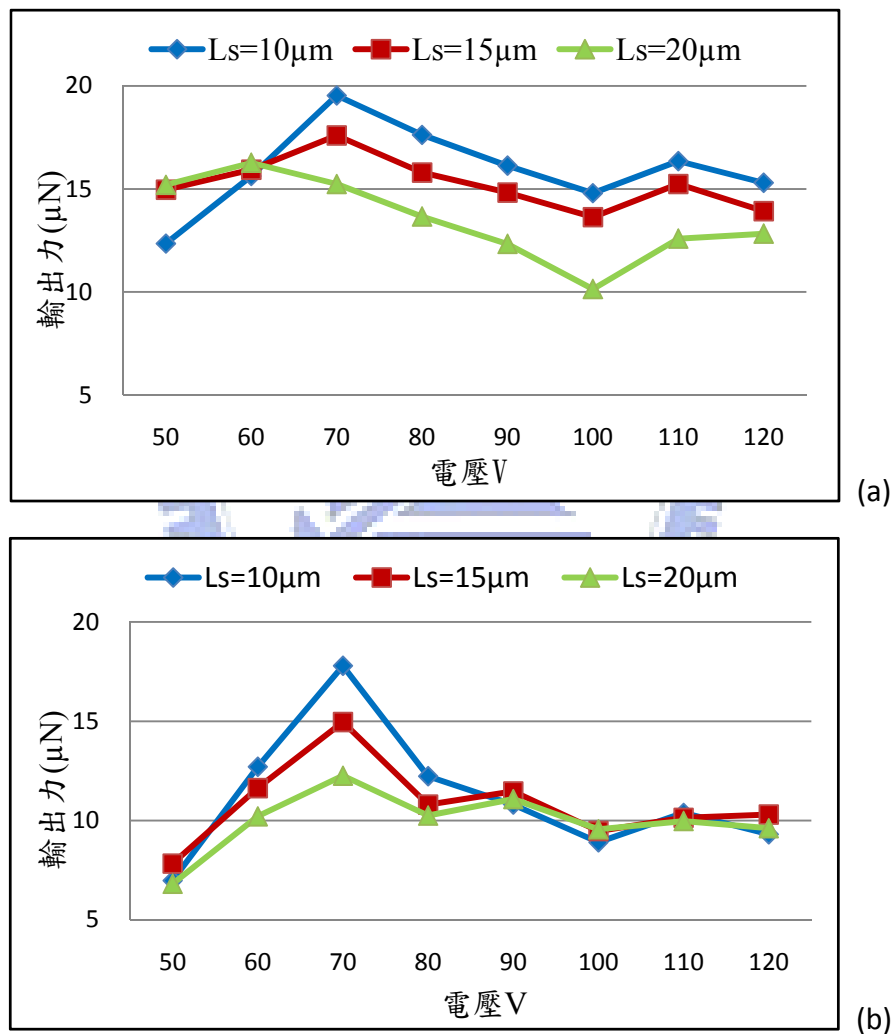
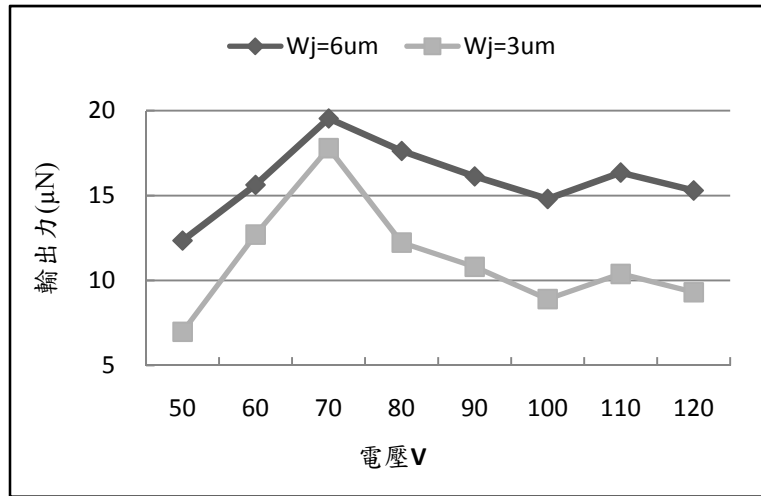


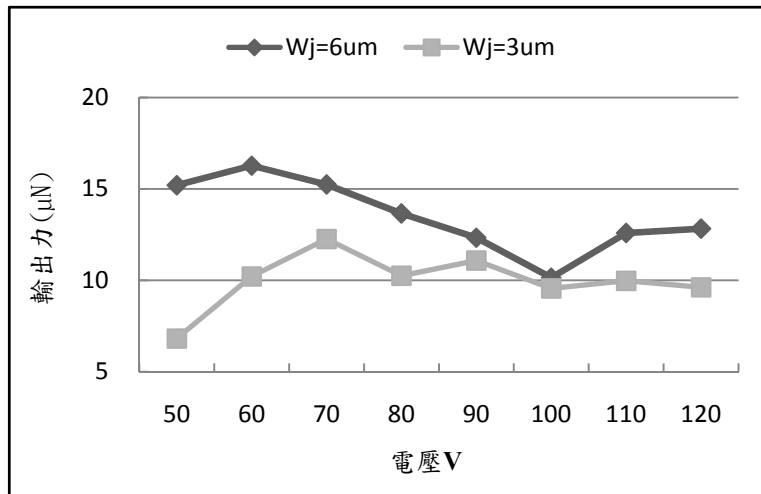
圖 4-10 三種尺寸輸出力與操作電壓圖 (a) $W_j=6\mu\text{m}$  (b) $W_j=3\mu\text{m}$

接著將圖 4-10(a)、(b)相同尺寸下，LVSDA 撓性接頭  $W_j$  分別為  $6\mu\text{m}$  與  $3\mu\text{m}$  做比較，把此二條線各自會成圖表 4-11(a)、(b)和(c)，發現撓性接頭  $W_j=6\mu\text{m}$  相較  $W_j=3\mu\text{m}$  有較

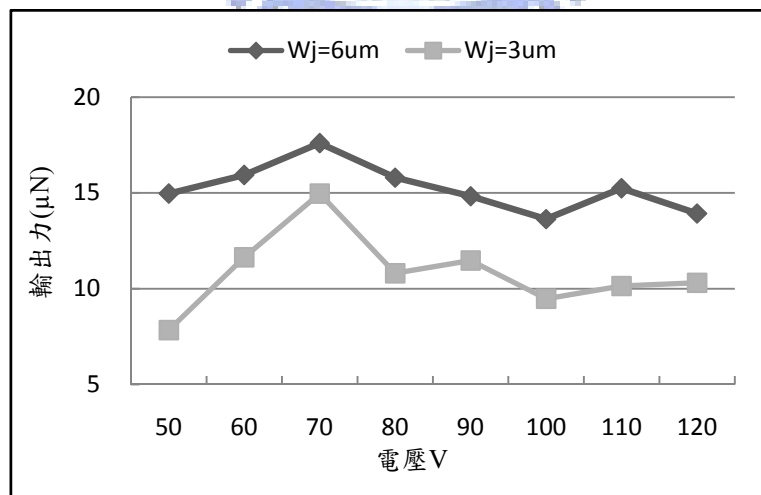
大輸出力，可說明當撓性接頭寬度越大能產生較大的輸出力。



(a)



(b)



(c)

圖 4-11 撓性接頭寬度  $W_j=6\mu\text{m}$  與  $3\mu\text{m}$  輸出力與電壓關係圖  
 (a)  $L_s=10\mu\text{m}$ 、 $L_f=50\mu\text{m}$  (b)  $L_s=15\mu\text{m}$ 、 $L_f=45\mu\text{m}$  (c)  $L_s=20\mu\text{m}$ 、 $L_f=40\mu\text{m}$

了解撓性接頭寬度對輸出力的影響後，接著探討撓性接頭長度對 LVSDA 輸出力的影響，在此固定撓性接頭寬度  $W_j=6\mu\text{m}$ ，將原本撓性接頭  $L_j$  長度從  $20\mu\text{m}$  改成  $15\mu\text{m}$ ，當尺寸  $L_s=10\mu\text{m}$ 、 $L_f=55\mu\text{m}$ ，電壓由  $50\text{V}$  每  $10\text{V}$  為單位增加至  $120\text{V}$ ，可畫出一條趨勢線，分別再增加  $L_s=15\mu\text{m}$ 、 $L_f=50\mu\text{m}$  與  $L_s=20\mu\text{m}$ 、 $L_f=45\mu\text{m}$  兩種尺寸的趨勢線，一樣得到三種尺寸輸出力與電壓關係如圖 4-12 所示，從圖也可看出  $L_s$  越短即撓性接頭越靠近前爪，有較大的輸出力。所以從 4-10(a)、(b)與 4-12 這三張圖，皆可證實 LVSDA 若想要較大的輸出力，可將撓性接頭往前爪的位置靠近。

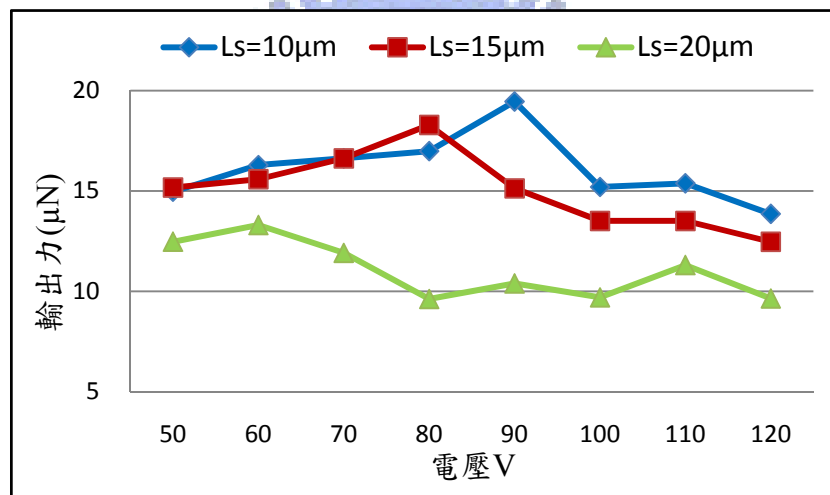


圖 4-12 種尺寸輸出力與操作電壓圖

#### 4.2.3 LVSDA 與傳統 SDA 性能比較

最後將 LVSDA 與傳統 SDA 性能做評比，針對 LVSDA 一組尺寸(圖 4-10a)，板長  $L_p=80\mu\text{m}$ 、板寬  $W=65\mu\text{m}$ 、厚度  $t$  與爪高  $h$  均為  $2\mu\text{m}$ ，固定  $L_j=20\mu\text{m}$  與  $W_j=6\mu\text{m}$ ，與傳統 SDA 板長為  $80\mu\text{m}$  做比較，如圖 4-13 所示，可整理以下幾點結論：

1. 相同板長下( $L_p=80\mu\text{m}$ )，傳統 SDA 需要較大的驅動電壓，約  $80\text{V}$  以上；而 LVSDA 只

需要 50V 左右就能驅動。

2. 傳統 SDA 在 80V 以下無法提供輸出力，而 LVSDA 在 50~80V 範圍內即能提供輸出力。
3. 在同樣約 20  $\mu\text{N}$  的輸出力，傳統 SDA 需要電壓 110V；而對 LVSDA 只需要 70 V，即可達到同等輸出力，就電壓需求來看降低將近 36%。
4. 操作電壓約超過 95V，LVSDA 輸出力無法超越傳統 SDA，所以較佳應用範圍為 95V 以內。

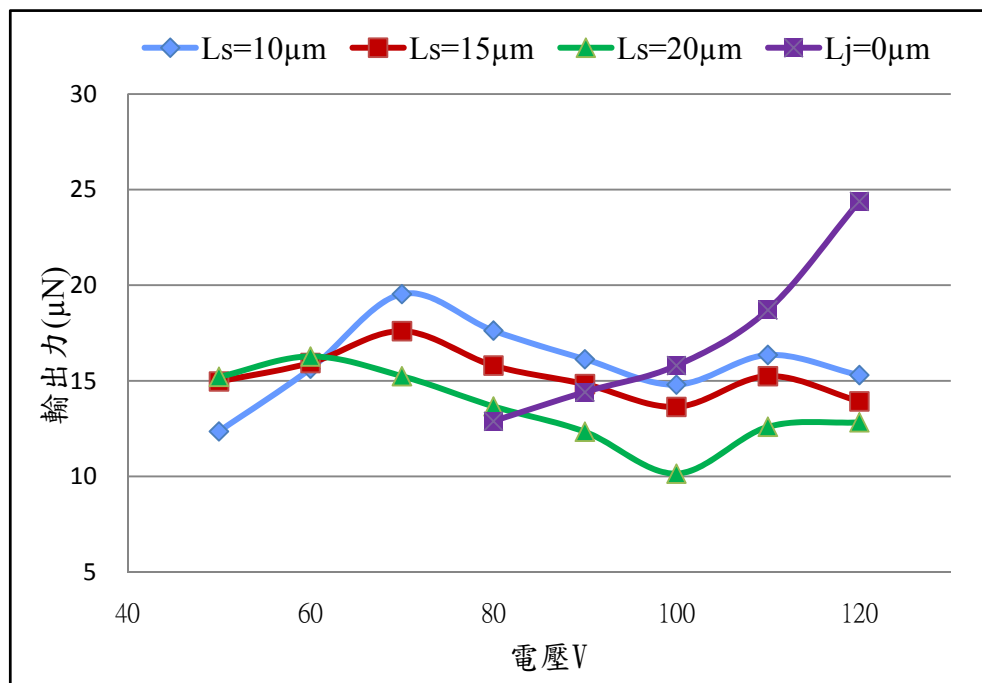


圖 4-13 LVSDA 與傳統 SDA 輸出力與電壓關係圖

### 4.3 量測誤差

1. 在元件實做上，由於黃光製程光罩的對準與電鍍製程厚度的控制等，造成尺寸上的誤差。
2. 元件製造過程中，釋放元件時很容易造成沾黏，導致結構黏附在基板上。

3. 施加操作電壓時，因靜電力的影響，彈簧容易被吸附底貼到基板上，導致彈簧拉動不易，影響量測輸出力的準確性。
4. 長時間操作下，會有電荷累積的問題產生，影響結構性能。
5. 在實做元件時，結構沒釋放乾淨與後續量測造成表面的汙染，導致基板表面磨擦力上升，影響 SDA 爬行距離。
6. LVSDA 的撓性接頭應力集中與磨耗的影響，都會影響 SDA 的效能。

在此希望能盡量避免這些問題產生，有問題的元件也盡量不去使用量測它，實驗值也多量測幾次數據來做平均，來改善實驗所造成的誤差。





## 第五章 總結與未來規劃

### 5.1 總結

雖然抓爬式微致動器發展時間並不長，但由於精密的步進尺寸、微牛頓的輸出力且製程簡易，使得 SDA 在微致動器中相當具有潛力、前景看好。就傳統 SDA 效能來看，其輸出力隨著板長縮短而增加，但所需的驅動電壓上升，這與前人的文獻有相同的實驗結果。在本論文重點提出新式低電壓驅動 SDA 的設計，經實驗證明能有效降低驅動電壓，但輸出力未必會比傳統 SDA 來的好，對低電壓而言 95V 以下，相較傳統 SDA 有較佳的輸出力，且傳統 SDA 在 50~80V 甚至還不能驅動，根本無法提供輸出力，因此我們可得到較佳的使用範圍區域，約 50~95V 之間。

在實驗過程中，輸入電壓頻率也是影響 SDA 很重要的一項參數，目前文獻操作頻率約在 100~10k 赫茲不等，在這裡我們使用 500Hz 的輸出頻率，頻率太低(約為幾十赫茲以下)結構反應太慢，主板或摩擦樑無法持續貼底，與基板之間摩擦力不夠，很容易就被彈簧給拉回原點，無法向前作動；頻率太高(約到達 50k 赫茲)結構反應快，SDA 有停在原地震動或是大弧度的扭曲的現象，這種扭曲震動會造成 SDA 元件的損傷，應盡量避免。

## 5.2 近期改善工作

1. 建立 SDA 模擬並與實驗結果做比較，證實數據的準確性。
2. 改善光罩設計，加入 dimple 結構，防止彈簧元件黏底。
3. 在實做元件時，改善釋放元件試片的潔淨度。

## 5.3 未來工作

低驅動電壓 SDA 因為撓性接頭的設計，可降低摩擦板貼底反曲電壓，撓性接頭會對 LVSDA 驅動電壓與輸出力等效能造成影響，在本論文已討論了一些尺寸設計對 LVSDA 效能的影響，但還有許多參數並尚未做討論，如板長的變化、頻率改變對 LVSDA 的影響等，在未來可針對主板長度、撓性接頭位置、尺寸，甚至形狀做最佳設計；還有輸入訊號頻率的變化明顯影響 SDA 效能，似乎有一個最佳的使用頻率範圍，在哪些頻率範圍能使 SDA 發揮最佳的效能，在未來都將會對這些參數做探討。

## 參考文獻

- [1] [Fujita, Hiroyuki](#), “*Studies of micro actuators in Japan*”, IEEE Int Conf Rob Autom 1989, 1989, p 1559-1564.
- [2] [Akiyama, Terunobu](#); [Shono, Katsufusa](#), “*Controlled stepwise motion in polysilicon microstructures*”, Journal of Microelectromechanical Systems, v 2, n 3, Sep, 1993, p 106-110.
- [3] [Akiyama, Terunobu](#); [Fujita, Hiroyuki](#), “*Quantitative analysis of scratch drive actuator using buckling motion*”, Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 1995, p 310-315.
- [4] [Lin, L.Y.](#); [Goldstein, E.L.](#); [Tkach, R.W.](#), “*Free-space micromachined optical switches with submillisecond switching time for large-scale optical crossconnects*”, IEEE Photonics Technology Letters, v 10, n 4, Apr 1, 1998, p 525-527.
- [5] [Lee, Shi-Sheng](#); [Fan, Li](#); [Wu, Ming C.](#), “*MEMS actuators and micropositioners for the integrated micro-optics*”, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v 3289, 1998, p 152-162.
- [6] [Tsay, Jinni](#); [Su, Liang-Qing](#); [Sung, Cheng-Kuo](#), “*Design of a linear micro-feeding system featuring bistable mechanisms*”, Journal of Micromechanics and Microengineering, v 15, n 1, January, 2005, p 63-70.
- [7] [Akiyama, Terunobu](#) ; [Collard, Dominique](#); [Fujita, Hiroyuki](#), “*Scratch drive actuator with mechanical links for self-assembly of three-dimensional MEMS*”, Journal of Microelectromechanical Systems, v 6, n 1, Mar, 1997, p 10-17.
- [8] [Quevy, E.](#); [Buchailot, L.](#); [Collard, D.](#), “*3-D self-assembling and actuation of electrostatic microstructures*”, IEEE Transactions on Electron Devices, v 48, n 8, August, 2001, p 1833-1839.

- [9] [Kladitis, P.E.](#); [Linderman, R.J.](#); [Bright, V.M.](#), "Solder self-assembled micro axial flow fan driven by a scratch drive actuator rotary motor", Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2001, p 598-601.
- [10] [Kanamori, Y.](#); [Aoki, Y.](#); [Sasaki, M.](#); [Hosoya, H.](#); [Wada, A.](#); [Hane, K.](#), "Fiber-optical switch using cam-micromotor driven by scratch drive actuators", Journal of Micromechanics and Microengineering, v 15, n 1, January, 2005, p 118-123.
- [11] [Bernardoni, Paul](#); [Riwan, Alain](#); [Tsitsiris, Hellie](#); [Millet, Olivier](#); [Buchailot, Lionel](#); [Regnier, Stephane](#); [Bidaud, Philippe](#), "From the mechanical analysis of a polyarticulated microgripper to the design of a compliant microgripper", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v 5383, Smart Structures and Materials 2004 - Modeling, Signal Processing, and Control, 2004, p 469-477.
- [12] [Linderman, Ryan J.](#); [Bright, Victor M.](#), "Nanometer precision positioning robots utilizing optimized scratch drive actuators", Sensors and Actuators, A: Physical, v 91, n 3, Jul 15, 2001, p 292-300.
- [13] [Chien-Chih Huang](#), "An Analysis and Design of Scratch Drive Actuator for Micro Compliant Mechanism Applied to Optical Switch" 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文, 2001.
- [14] [Cheng-Chi Yeh](#), "Investigation of Micro Resistance Welding for Assembly of Micro Structures" 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2005.
- [15] 微機電系統技術與應用，行政院國家科學委員會精密儀器發展中心出版，新竹市，中華民國九十二年七月。