

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

以微電阻焊進行微結構組裝的研究

Investigation of Micro Resistive Welding  
for Assembly of Micro Structures

研究生：葉昌旗

指導老師：徐文祥 教授

中華民國九十五年六月

以微電阻鐸進行微結構組裝的研究  
**Investigation of Micro Resistance Welding**  
**for Assembly of Micro Structures**

研究生：葉昌旗

指導教授：徐文祥

指導教授：徐文祥

Advisors: Wensyang Hsu

國立交通大學

機械工程學系 碩士班



A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master

In Mechanical Engineering

June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十五年 六月

# 以微電阻鐸進行微結構組裝的研究

研究生：葉昌旗

指導教授：徐文祥

國立交通大學機械工程學系 碩士班

## 摘 要

在本論文中提出以電阻鐸的方式來組裝微結構，在結構設計上利用 V 型樑電熱式致動器輸出鐸接所需要的壓力，藉由結構在接觸面上會產生接觸電阻，在通入電流時候會因此產生局部高溫，使得材料融熔進而產生接合。在量測結果方面，可以得知在我們所設計的幾何尺寸下，接觸電阻可由  $20\Omega$  左右到  $3\sim 4\Omega$  之間，但是能達到微電阻鐸的範圍在  $4.6\sim 12\Omega$  之內，而較小的接觸電阻在接合時，雖然會消耗較多的輸入功率，但是接合效果與強度較佳。

在微機電的領域中，前人發表的元件幾乎沒有三維立體的微致動器與微感測器，主要原因在於沒有適當的裝配方式。本論文的結果證明微電阻鐸應用在微結構組裝上是可行的，同時也能兼顧到訊號與能量的傳遞問題，在未來有很大的機會利用微電阻鐸的原理來實現三維立體元件的組裝。

# **Investigation of Micro Resistance Welding for Assembly of Micro Structures**

Student : Cheng-Chi Yeh

Advisor : Dr. Wensyang Hsu

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

## **Abstract**

---

In this thesis, we propose to use micro resistance welding to assemble micro-structure. On structure design, we use bent-beam electro-thermal actuators to export the welding pressure. When we input the current, contact resistance will cause some high temperature in local and make the material melt on the contact surface to result in joint. Form the measure result, we can find the contact resistance is from about  $20\Omega$  to  $3\sim 4\Omega$ , and the range that can successful weld is from  $4.6\Omega$  to  $12\Omega$ . Smaller contact resistance will consume more input power while welding, but the joint result and intensity are relatively good.

In MEMS field, although much work has been devoted to develop the micro-structures, few researches have been done on three-dimensional micro-actuators or micro-sensors. The key point is no appropriate assembly method. The result in this thesis proves resistance welding is feasible on assembly micro-structure, and it can overcome the problem of transmission question of the signal and energy. In the future, it may have a well chance to apply to realize assembly three-dimensional component by micro resistance welding.

## 致 謝

經過兩年研究所的時間，終於完成了這份畢業論文。因此，首先我要感謝我的指導老師徐文祥教授，在老師的引領下，我從大三時候對於微機電技術產生了興趣，進入老師門下，讓我能夠更進一步去接觸微機電；在研究之外，老師也教導我許多對研究事物應該抱持的態度，建立起如何去面對問題、思考問題，當然這其中老師也給我相當多的耐心與包容，讓我在這兩年受益匪淺。

在實驗室的生活，我要謝謝鎮鵬學長、君煒學長、涵評學長、梨暖學姊、駿偉學長、家聖學長、文川學長、毅家學長、佳擘學長、鴻隆學長與業達學長，在我剛進入實驗室給我許多重要的觀念與訓練；在我進行實驗時，寶貴的經驗傳承，讓我克服許多實驗面臨的困難；一些中肯適當的提醒與建議，讓我多次從當局者迷的窘境中脫出。還有同屆的元德同學與彥宏同學，要感謝你們這兩年來的相伴與鼓勵，一起享受這一路走來的甘苦與回憶。而仁宏、家維與耕碩學弟，則要謝謝你們在我忙碌能幫我分擔一些雜務與工作。

最後，還要謝謝在從小把我拉拔長大的爸爸與媽媽，還有在我離家唸書的六年時間中，一直陪伴在我身邊的玫江，有你們無私的奉獻與關懷，默默給我支持鼓勵，我才能順利的完成學業，沒有你們就沒有今日的我，我愛你們，謝謝你們這些日子來的關心與照顧。

昌旗 于風城交大

# 目 錄

第 1 章 緒論 .....	- 7 -
1.1 前言與動機 .....	- 7 -
1.2 相關文獻 .....	- 8 -
1.2.1 微鉸鏈 (Micro Hinge) .....	- 8 -
1.2.2 組裝 (Assembly) .....	- 9 -
1.2.3 電熱式致動器 (Electro-Thermal Actuator) .....	- 10 -
1.3 研究內容 .....	- 11 -
第 2 章 設計與分析 .....	- 17 -
2.1 電阻鉗原理 .....	- 17 -
2.2 微鉗接結構與設計 .....	- 19 -
2.2.1 V 型樑電熱式致動器 .....	- 19 -
2.2.2 微鉗接結構設計 .....	- 21 -
2.3 微鉗接未來應用在三維立體結構組裝 .....	- 22 -
2.4 模擬與分析 .....	- 23 -
2.4.1 分析設定 .....	- 23 -
2.4.2 單一 V 型樑電熱式致動器尺寸最佳化 .....	- 24 -
2.4.3 最佳化尺寸模擬輸出 .....	- 26 -

第 3 章 製程流程 .....	- 34 -
3.1 鍍電鍍流程 .....	- 34 -
3.1.1 黏著層與種子層的選擇 .....	- 34 -
3.1.2 黃光製程 .....	- 35 -
3.1.3 電鍍製程 .....	- 36 -
3.2 製作流程 .....	- 36 -
3.3 製程結果 .....	- 37 -
第 4 章 實驗量測與討論 .....	- 41 -
4.1 量測設置 .....	- 41 -
4.2 量測結果 .....	- 41 -
4.2.1 V 型樑致動器的輸出與力量需求 .....	- 42 -
4.2.2 接觸壓力與接觸電阻的關係 .....	- 43 -
4.2.3 可達成銲接的接觸電阻範圍 .....	- 44 -
4.2.4 可達成銲接的功率範圍 .....	- 45 -
4.2.5 微銲接過程 .....	- 47 -
第 5 章 結論 .....	- 54 -
5.1 總結 .....	- 54 -
5.2 未來工作 .....	- 55 -



## 表格目錄

表格 2-1 有限元素分析中所使用到的材料參數.....	- 27 -
表格 3-1 黃光參數表.....	- 38 -
表格 3-2 電鍍參數表.....	- 38 -



## 圖表目錄

圖表 1-1 微鉸鏈版狀結構在釋放後的等角視圖[1] .....	- 13 -
圖表 1-2 彈性鉸鏈的側視圖[2] .....	- 13 -
圖表 1-3 無鉸鏈結構利用表面張力立起[3] .....	- 13 -
圖表 1-4 微鉸鏈利用鉚錫與支架形成自我組裝[8] .....	- 14 -
圖表 1-5 三維立體結構利用鉚接機構進行組裝[9] .....	- 14 -
圖表 1-6 電阻鉚的 SEM 照片 (a)全結構圖 (b)接點近視圖[13] .....	- 15 -
圖表 1-7 微鉚接接點 SEM 照片 (a)鉚接前 (b)鉚接後[14] .....	- 15 -
圖表 1-8 微鏡面角度固定之接合 [15] .....	- 15 -
圖表 1-9 應用雙金屬效應作為驅動方式的微電熱式致動器[10] .....	- 16 -
圖表 1-10 冷熱臂式微熱致動器[11] .....	- 16 -
圖表 1-11 單一 V 型樑微熱致動器結構示意圖[12] .....	- 16 -
圖表 2-1 V 型樑電熱式致動器 (a) 結構參數示意圖 (b) 致動示意圖 .....	- 28 -
圖表 2-2 微鉚接結構模型 .....	- 28 -
圖表 2-3 (a)未結合前的電流示意圖 (b)致動方向與接點位置示意圖 .....	- 29 -
圖表 2-4 進行鉚接階段電流與施予壓力示意圖 .....	- 29 -
圖表 2-5 (a) 三維立體結構鉚接結構圖 (b) 板狀結構鉚接點示意圖 .....	- 30 -
圖表 2-6 單一 V 型樑電熱式致動器 .....	- 30 -

圖表 2-7 V 型樑致動器在 Ansys 6.0 中模型示意圖(基底與空氣已隱藏).....	- 31 -
圖表 2-8 不同長度的致動器位移與力量的關係。 .....	- 31 -
圖表 2-9 致動器位移與力量對於寬度的關係。 .....	- 32 -
圖表 2-10 致動器溫度與位移輸出圖 .....	- 32 -
圖表 2-11 各電流輸入下可輸出的力量負載 .....	- 33 -
圖表 3-1 製程流程圖 .....	- 39 -
圖表 3-2 元件 SEM 照片 (a)銲接參數測試結構 (b)二維銲接結構。 .....	- 39 -
圖表 3-3 元件 SEM 照片 (a)450 倍放大 (b)1200 倍放大。 .....	- 40 -
圖表 3-4 元件 SEM 側視圖 (a)銲接參數測試結構 (b)二維銲接結構。 .....	- 40 -
圖表 3-5 元件 SEM 側視圖 (a)銲接參數測試結構 (b)二維銲接結構。 .....	- 40 -
圖表 4-1 量測設備設置圖 .....	- 48 -
圖表 4-2 銲接測試結構與輸入示意圖 .....	- 48 -
圖表 4-3 微銲接各階段力量需求圖 .....	- 49 -
圖表 4-4 微銲接各階段力量需求與致動器輸出比較圖 .....	- 49 -
圖表 4-5 量測輸入方式示意圖 .....	- 50 -
圖表 4-6 接觸壓力與接觸電阻關係圖 .....	- 50 -
圖表 4-7 在不同接觸壓力與接觸電阻下進行銲接的結果圖 .....	- 51 -
圖表 4-8 不同初始接觸電阻在接合時銲接部位的電阻 .....	- 51 -
圖表 4-9 不同初始接觸電阻在接合時所始用的功率 .....	- 52 -

圖表 4-10 (a)在低接觸電阻下的銲接結果 (b)在高接觸電阻下的銲接結果。..... - 52 -

圖表 4-11 微銲接測試流程..... - 53 -



# 第 1 章 緒論

## 1.1 前言與動機

微機電系統(Micro-Electro-Mechanical System, 簡稱 MEMS)技術是一種包含機械、電子、材料、控制、物理、化學與生醫等, 各種技術領域的微型化及系統整合技術。微機電系統起源 1960 年代之積體電路之材料和製程之研究, 應用了薄膜沉積、黃光微影、蝕刻等半導體製程技術的方法, 再加上 MEMS 特有的體型微加工製造技術(bulk micromachining)及面型微機械加工製造技術(surface micromachining), 可於矽晶片上製造出微米(micron)尺寸的微小可動機械元件。MEMS 具有可將機械結構與電子電路整合, 可批量製造而達到將低成本與均一品質, 尺寸縮小也可縮短反應時間, 降低損耗的能量, 又可增加量測與致動的精確性; 綜合以上優點, 也使與 MEMS 相關的研究與應用在近十年來受到相當的重視。

在 MEMS 元件中, 由於受限於製程的方式, 所以在早期主要都是屬於平面式二維的感測與致動, 雖然平面微結構的製程與使用較為容易, 但是也因為受限其只有二維的自由度, 所以在應用上也較為狹隘; 若能換個角度思考, 其實在三維的立體方向還有很大的空間可以去發展利用, 不管是致動器或是感測器, 若能成為立體元件, 將可以大為節省在平面上所佔的面積, 能夠提供更多的自由度與靈活度, 若在應用上也可以增加更多的彈性, 並提供 MEMS 元件更多的設計空間。

在平面時, 微結構的定位與訊號的輸入輸出不會是太大的問題, 但是若將平面結構進一步設計成三維立體結構時, 元件的組裝、致動能量與訊號的輸入輸出就會

產生許多的問題，所以本研究的重要課題，是設計出完成微結構元件組裝與能量訊號的輸入輸出的方法。

## 1.2 相關文獻

現有的研究當中，有許多關於微結構的組裝方式，但是在三維立體的微致動器與感測器，主要著重於結構的設置與定位，並沒有適當的裝配方式，可以達到訊號與能量的傳遞。在以下將會進行前人關於微鉸鏈(micro hinge)與類似的能將結構立體化的機制，各種組裝(assembly)方式，與幾種電熱式致動器 (Electro-Thermal Actuator) 等相關論文研究。



### 1.2.1 微鉸鏈 (Micro Hinge)

為了達到使結構立起的目的，其中一種方式是利用面型微加工，在平面上製造出一平板式的微結構，之後再設計一可使立體微結構旋轉立起的機構即可。在 1992 年，Pister 等人利用了多晶矽微鉸鏈製造出了三維立體結構[1]，如圖表 1-1，利用兩層的犧牲層與兩層的結構層去建構出活動的板狀結構與鉤環的部分，藉由鉤環(staple)將活動結構的栓(pin)的部分拘束住，如此便可得到一可立體自由移動的微結構，這種設計可以達成讓結構有三維方向自由度，但是並不能進行固定。在這之後還有彈性鉸鏈(elastic hinge)與無鉸鏈(hingeless)結構的類似設計；在 2002 年，Iwase 等人提出了彈性鉸鏈的設計[2]，利用結構的彈性形變使用來代替鉸鏈中鉤環的部分，因

此將微結構立起後也不需要用來固定的機構了，如圖表 1-2，0.2  $\mu\text{m}$  厚的彈性鉸鏈由鎳構成，而平板狀的微結構則是由磁場力量將其推離平面，另外須搭配適當的固定機制，才能完成立體結構的固定；至於無鉸鏈立體結構的設計，在 2000 年，Syms 等人提出了使用光阻與液體表面張力的設計[3]，藉由加熱使得光阻熔融為液體，則結構的板狀處則會隨著融化光阻內縮而被抬起，如圖表 1-3，這方法較大的缺點是需要由控制光阻量來決定三維結構最後固定的角度，不易達到精確。

### 1.2.2 組裝 (Assembly)

在此處我們所要了解的組裝(assembly)包含了兩個部分，第一是要先能將的懸浮結構舉起的機制，第二是要將舉起的結構固定的機制。在過去已經有許多應用鉸鏈或是其他組裝的方式與施力方式被提出來，在 1995 年 Syms, R.R.A.提出使用鉛錫(solder) [4]與在 1997 年 Ebefors 等人提出使用聚亞醯胺(polyimide) [5]等方式，利用液體表面張力來整合兩部分的結構；在 2002 年 Iwase 等人提出使用磁力的方式[2]，在 2001 年 Kaajakari 與 Lal 提出使用超音波震動的方式[6]，在 2002 年 Lai 等人提出了使用向心力的方式等[7]。此外，還有利用一些外部的機構設計來增加結構定位的準確度，在 1999 年，Kevin 等人使用了鉛錫融化的液體表面張力當作將結構舉起的力[8]，在額外增加自我鎖定機構來增加板狀結構舉起後的角度精度，如圖表 1-4；在 2001 年 Edward 等人，提出了微鉚接(microrivets)的方式[9]，如圖表 1-5，在完成微鉸鏈製作後，利用探針將板狀結構挑起，經由適當的定位後，再利用鉚釘結構將

其鉚接固定。

此外，還有使用材料熔接方式來組裝結構的設計，在 1991 年 Fedder 與 Howe 提出了以電阻鉚(resistive welding)的方式將多晶矽的結構進行接合[10]，如圖表 1-6。該鉚接的方式是用探針施以鉚接所需要的壓力，再通以適當的電流使結構接面處產生高溫與多晶矽結構的熔融，因此微鉚接結構的設計需要在機構的接點處產生最高溫，以避免其他部位的高溫現象造成結構的破壞。在 1992 年，Fedder 等人對其之前的設計進行了改良，提出了利用第二種材料-鋁，來形成鉚接時所需要的熔融介質[11]，如圖表 1-7，此法主要是避免電流通過結構中融化的部位，同時融化的鋁的表面張力也可提供接合時的拉力，雖然使用了第二種材料，但微鉚接的結果也是相當強壯，而適當的電路設計可避免結構破壞的產生。在 2003 年，Zhang 與 Lee 利用了熱熔接的技術來固定微鏡面(micromirror)的角度[12]，如圖表 1-8，利用 MUMPs 製程產生的兩層多晶矽結構，在利用靜電力調整好鏡面角度並施予接合壓力後，將設計成固定用的橋狀結構處通以電壓，使橋狀結構產生熔融而達到接合的目的，此法可以得到相當準確的結構組裝精確度。

### 1.2.3 電熱式致動器 (Electro-Thermal Actuator)

當進行微鉸鏈(micro hinge)的製作時，如何將其舉起與定位安裝，對於最後元件的完成是相當重要的環節，在這些微米(micro)尺度的元件中，若要做到精確的組裝，可以利用與其一樣具有微米精度的致動器，而電熱式致動器具有輸出力量大、反應

速度慢與局部高溫等特性，這些對於微銲接的應用將會有良好的幫助。以下將介紹在微機電常用的一些微電熱致動器。在 1988 年，W. Riethmuller 與 W. Benecke 提出應用雙金屬效應(bi-metal effect)做為驅動方式的微致動器[13]，如圖表 1-9，雙金屬效應是利用不同材料間的熱膨脹係數的差異，當熱致動器溫度上升時，因為不同的形變量而使致動器產生平面致動，此熱致動器的設計只要能夠有適當的製程與材料搭配，在驅動上將會有很好的穩定性。而在 1992 年，Guckel 等人提出了以鎳為材料的「U 型電熱式致動器」[14]，如圖表 1-10，應用結構寬度上的差異，使結構依電阻特性而產生局部高溫，其中寬度相異的懸臂因截面積不同，當電流通過的時候會有不同的電流密度，因焦耳效應導致結構上產生溫度的變化，當結構上的溫度不一致時就會產生不一樣的形變量，而使結構產生平面的位移。在 1999 年，Que 等人提出了 V 型樑電熱式致動器[15]，如圖表 1-11，該致動器是一對稱的 V 型懸樑結構，當通入電流時，V 型樑因獲得焦耳熱而受熱膨脹產生形變，造成致動器會往 V 型尖端的方向產生位移，而 V 型電熱式致動器的變形量主要受到 V 型樑的接合角度、尺寸與輸入電流有關。

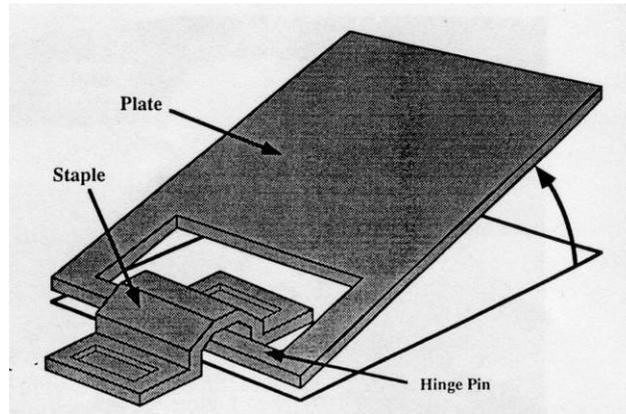
### 1.3 研究內容

在前人的研究中，我們可以知道有許多不同的微鉸鏈結構與許多組裝方式，這些都有助於我們去設計微結構的組裝方式，但是除此之外，我們還希望能夠達成微結構的電路連結的部分，這些在過去的組裝方法是較為無法克服的部分，在這裡我

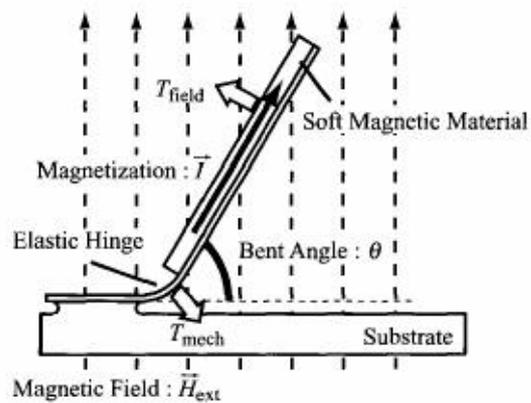
所進行研究的目的是希望能夠設計出新的微結構的組裝方式，可以完成組裝定位外，還要能夠完成電路的導通，至於如何去施予適當的組裝所需要的外力，也是相當關鍵的部分。所以我們的設計最大的特色，是以電熱致動器用來當作微鉸鏈的鉤環結構，並作為微銲接的施力與熔接機構，最後用來完成微結構的組裝。

在本研究中，希望能先建立起二維平面銲接結構的組裝與測試。利用金屬面型微加工的方式，以電鍍鎳為材料來製作類似微鉸鏈(micro hinge)的結構；我們期望的組裝方式，是利用微銲接(micro welding)的方法，在鉤環上的設計加入電熱式致動器，來施予結構組裝時所需要的壓力，而再利用適當的鉤環上的電路設計，使我們希望需要的接合處因接觸電阻產生局部高溫，發生材料熔融的現象，完成組裝與電路連結的機制。最後我們可以透過鉤環與能量輸入的平板(pad)相接，讓鉤環成為電流輸入微結構的電路的一部份，因此組裝與電路連結的問題都能夠得到適當的解決的方式。

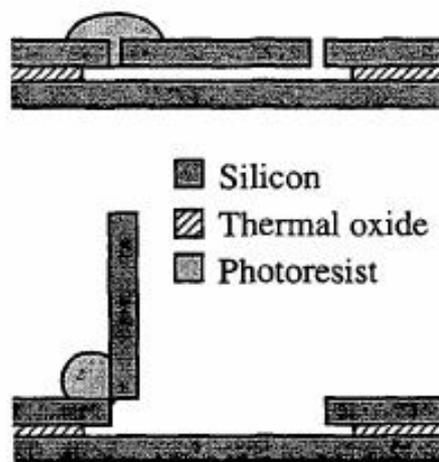
在本論文的第二章，將會對於微銲接的結構設計原理，與有限元素進行電熱與應變分析的結果進行描述與討論；第三章的部分，將會詳細的說明元件製造流程與參數，並進行微銲接製程測試，紀錄與討論實驗結果；第四章的部分，則會介紹我們所需設備，還有元件的測試與組裝的測試；最後在第五章，將會對本論文的研究進行討論與總結，以及未來可沿續發展的研究方向。



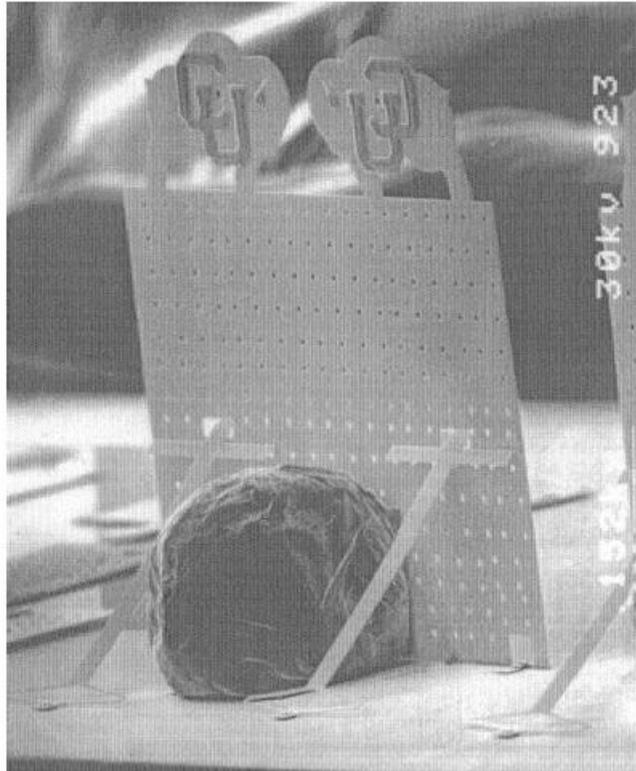
圖表 1-1 微鉸鏈版狀結構在釋放後的等角視圖[1]



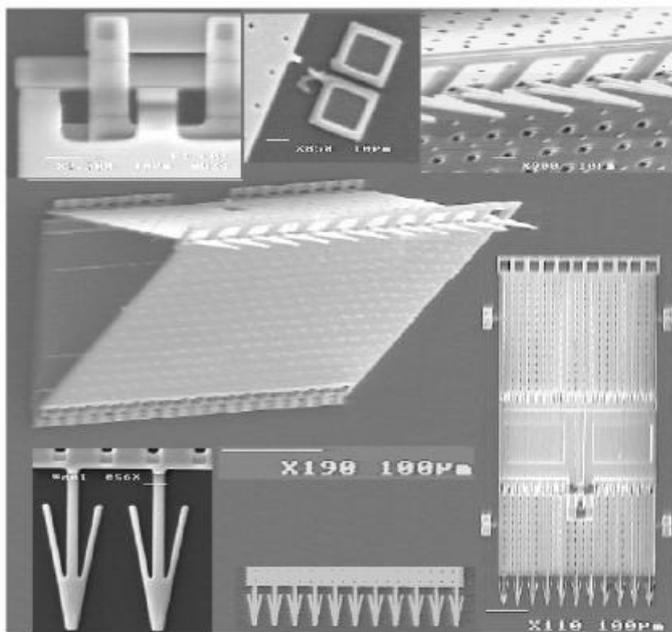
圖表 1-2 彈性鉸鏈的側視圖[2]



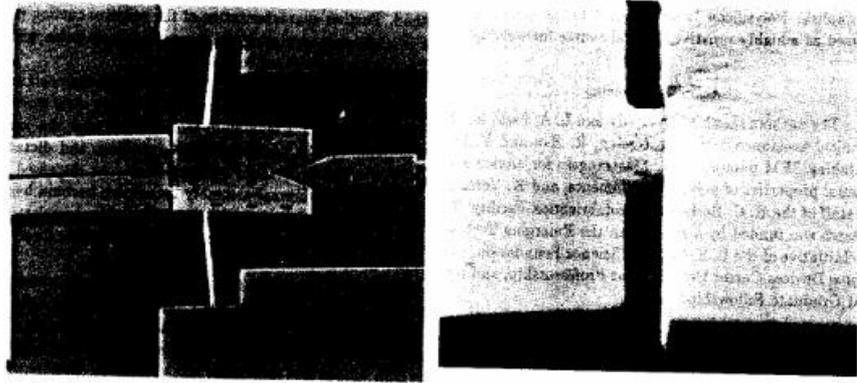
圖表 1-3 無鉸鏈結構利用表面張力立起[3]



圖表 1-4 微鉸鏈利用鐸錫與支架形成自我組裝[8]



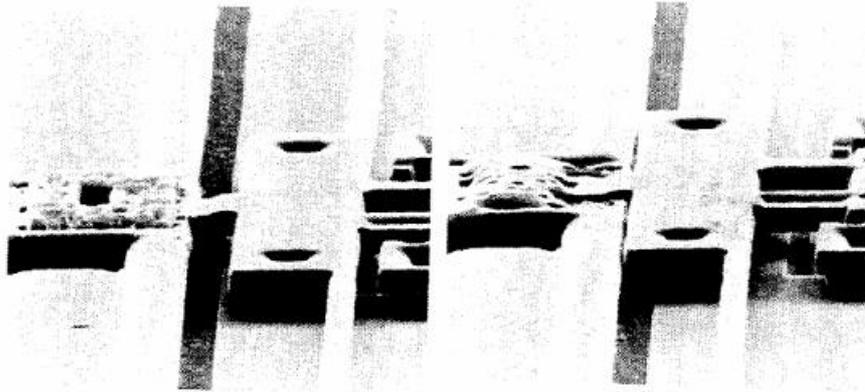
圖表 1-5 三維立體結構利用鉚接機構進行組裝[9]



(a)

(b)

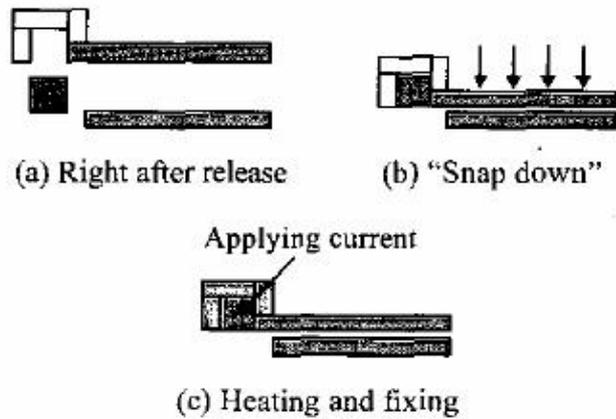
圖表 1-6 電阻鐳的 SEM 照片 (a)全結構圖 (b)接點近視圖[13]



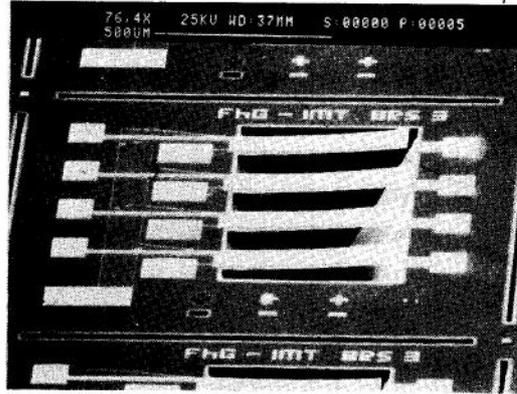
(a)

(b)

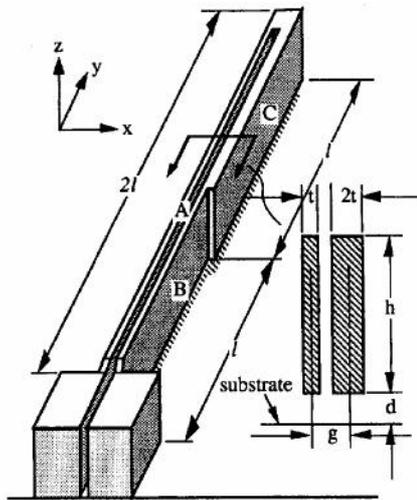
圖表 1-7 微鐳接接點 SEM 照片 (a)鐳接前 (b)鐳接後[14]



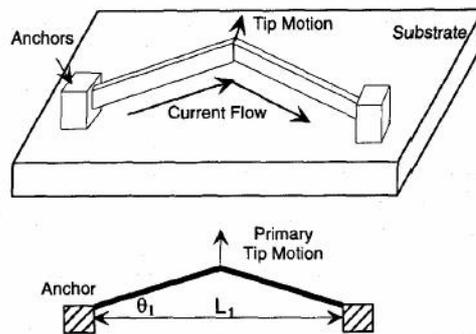
圖表 1-8 微鏡面角度固定之接合 [15]



圖表 1-9 應用雙金屬效應作為驅動方式的微電熱式致動器[10]



圖表 1-10 冷熱臂式微熱致動器[11]



圖表 1-11 單一 V 型樑微熱致動器結構示意圖[12]

## 第 2 章 設計與分析

為了要達成未來三維立體結構的組裝，我們利用了微鉸鍊(micro hinge)的設計，將微鉸鍊的鉤環(staple)部份作為用來進行微銲接的結構設計；在本章將會對於電阻銲的原理、我們對微銲接結構與設計進行描述與討論，並使用有限元素分析軟體 Ansys 6.0 進行分析模擬。

### 2.1 電阻銲原理

電阻銲一般是使工件處在一定電極壓力作用下並利用電流通過工件時所產生的電阻熱將兩工件之間的接觸表面熔化而實現連接的銲接方法。電阻銲具有生產效率高、低成本、節省材料、易於自動化等特點。

電阻銲時產生的熱量由下式決定：

**錯誤！物件無法用編輯功能變數代碼來建立。**

$$(2-1)$$

式中 Q：產生的熱量(J)、I：銲接電流(A)、R：銲接電阻( $\Omega$ )、t：銲接時間(sec)

當銲接的裝置與結構都已經固定，則銲接工件的電阻取決於該材料的電阻率；因此電阻路是被銲材料的重要性質，電阻率高的金屬導電性差，而電阻率低的電阻其導電性佳，這些性質都將會影響到銲接的方式與條件。電阻率不僅取決於金屬種類，還與該結構的製程方式、熱處理狀態、加工方式與溫度相關。

除了結構電阻率外，另一個與電阻較為相關的參數是接觸電阻。接觸電阻存在於銲接中的時間是暫時的，一般會出現在銲接初期，形成原因可能為工件與施加的電極表面有高電阻係數的氧化物或污染物質層，使電流通過受到較大的阻礙，過厚的氧化物與污染物質層甚至有可能使電流無法通過。若銲接表面十分潔淨的情況下，也有可能是表面的微觀不平整，使工件只能在粗糙的表面形成小面積的接觸點，在電流通過時，接觸點處將會形成電流線的收攏，因此是因為電流通路的縮小而增加了接觸處的電阻。

從公式(1)中可見，另一個重要參數是銲接電流，因為電流對產熱的影響是呈平方關係，比電阻與時間都大，因此在銲接過程中，這是需要嚴格控制的參數，而輸入電流的種類也應需求不同而異，使用交流電可以通過調幅使電流緩升、緩降，以達到預熱與緩冷的目的；使用直流電的話，則大部分用於需要大電流的場合。至於銲接時間部分，為了保證熔核尺寸與銲點強度，銲接時間與銲接電流在一定的範圍內可以有互補的效果，為了獲得一定強度的銲點，可採用大電流與短時間，或是採用小電流與長時間。

另外在式(1)中未列出的是銲接壓力的影響，壓力對於銲接總電阻(R)其實有很明顯的影響，隨著銲接點壓力的增大，電阻 R 將會減小，而銲接電流增大的幅度是不會有太大的增幅，並不能彌補因 R 減小而引起的產熱減少；因此銲接強度會隨著銲接壓力增大而減小，解決的方法是在增大銲接壓力的同時，增加銲接電流。

進行電阻銲時主要過程可分為三個階段：首先是預壓階段，要確保工件銲接面有壓緊，使接面間有適當的壓力；接下來是銲接階段，使銲接電流通過工件與銲接面，產生焦耳熱形成熔核；最後是維持時間，切斷銲接電流，但繼續保持壓力到熔核凝固到足夠的強度為止。

## 2.2 微銲接結構與設計

在上一節我們知道進行銲接時，有幾個重要參數需要知道：工作溫度、工作壓力與接觸電阻大小。當將尺寸縮小到微米等級時，這些條件依然不變，只是供應這些條件的方式因尺寸縮小而有所不同。以下將會對我們使用的致動器與微銲接過程進行說明。



### 2.2.1 V 型樑電熱式致動器

由於在微小尺寸下不易使用人工或器具供給精確的力量與位移，因此這裡我們選擇使用 V 型樑電熱式致動器來施加壓力在銲接點上，如圖表 2-1(a)，在鉤環的設計上，我們將懸空的部份設計成數個 V 型樑串聯的組合，在中間利用軛的設計將其連起；由電路組成來看，串聯的 V 型樑會形成並聯的電路，但若是由致動方向來看，V 型樑會因受熱後往相同的方向致動，如圖表 2-1(b)；當我們在致動器兩端施加電壓後，在上一小節中提到的因焦耳熱形成的溫度分布產生，結構產生熱膨脹效應使得串聯的 V 型樑致動器產生位移與致動效果，產生的位移量與輸出力量，將會是串

聯的 V 型樑基礎單位的總和，這樣的好處是能夠在很節省的空間內，產生我們進行微銲接所需要的壓力輸出，在精度上也能有良好的控制。

當 V 型樑電熱式致動器在小彎曲角度( $\theta < 10^\circ$ )下，可視為直臂線型結構，可使用 1996 年 Lin 與 Chiao 發表線型微結構在穩態下(steady state)的溫度分布解[16]，如下式：

$$T(x) = T_r - (T_r - T_\infty) \frac{\cosh[\sqrt{\varepsilon} \times (x - \frac{L}{2})]}{\cosh(\sqrt{\varepsilon} \times \frac{L}{2})} \quad (2-2)$$

$$T_r = T_\infty + \frac{J^2 \rho_0}{k \varepsilon} \quad (2-2a)$$

$$\varepsilon = \frac{k_{sus} F_{s,sus}}{k h g} - \frac{J^2 \rho_0 \xi}{k} \quad (2-2b)$$

這裡  $k_{sus}$  為元件的熱傳合成項， $F_{s,sus}$  是熱傳導形狀參數，其他的參數  $L$ 、 $J$ 、 $\rho_0$ 、 $k$ 、 $h$ 、 $g$  與  $\xi$  分別代表 V 型臂長度、電流密度、材料在室溫下電阻率、熱傳導係數、結構厚度、結構與基底間的空氣間隙寬度與電阻率的溫度係數。

因此若要計算 V 型樑平均升高的溫度  $\Delta T_{avg}$  可將其表示為下式：

$$\Delta T = \int_0^L T(x) dx - T_\infty \quad (2-3)$$

在 V 型樑中央頂點的位移量可由樑的尺寸與彎曲角度可由下式表示[17]：

$$d = 2 \frac{\tan \theta}{k} \tan \frac{kL}{4} - \frac{L}{2} \tan \theta \quad (2-4)$$

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad (2-4a)$$

$$\Delta T_{avg} = \frac{1}{\alpha \times L} \left( L' + \frac{PL}{EA} \right) \quad (2-4b)$$

$$L' = \frac{\tan^2 \theta}{4k} [2G + kL + kLG^2 + \sin kL - 2G \cos kL - G^2 \sin kL] \quad (2-4c)$$

$$G = \tan\left(\frac{kL}{4}\right) \quad (2-4d)$$

這裡  $\theta$ 、 $\alpha$ 、 $P$ 、 $EI$  與  $EA$  分別代表彎曲角度、熱膨脹係數、樑在 X 軸向的反應力、彎折剛性與軸向剛性。這裡我們可以利用式(2-3)、(2-4b)與(2-4c)解出  $P$  值應用在(2-4a)，並帶回式(2-4)來求得位移量的大小。

至於最大的 V 型樑力量輸出  $f_{\max}$  定義為可將頂點形變推回原零點位置，力量輸出可表示為下式[17]：

$$f_{\max} = K \times d \quad (2-5)$$

$$K = \frac{4 \sin^2(\theta_1) AE}{L} \quad (2-5a)$$

這裡  $\theta_1$  為取決於 V 型樑電熱式致動器初始的彎曲角度的有效彎曲角度。

若要增加力量輸出可利用串聯來達到增加力量輸出的效果，可由下式表示：

$$f_{\text{total}} = N \times f_{\max} \quad (2-6)$$

這裡  $N$  代表串聯的數量。

### 2.2.2 微銲接結構設計

如圖表 2-2，在這裡我們設計微鉸鍊的勾環時，將其視為一橋狀結構(bridge)，將 V 型樑電熱式致動器與銲接電路結構作左右對稱的設計，將兩邊橋狀結構並聯，當我們在固定板 1、3 施加電流輸入時，電流便可透過 V 型樑的致動器經過固定板 2、4 輸出，而 V 型樑電熱式致動器將會因為電阻熱產生昇溫現象，伴隨著熱膨脹現象後，致動器將會往中央產生推力，如圖表 2-3，在適當的昇溫下提供足夠的位移量與

施力，可將銲接電路結構往內推移，並挾持住銲接結構部份形成銲接點；如圖表 2-4(a)，在銲接點完成接觸的條件後，我們便可以在固定板 a、b 輸入電流，固定板 c、d 輸出電流，如此當電流通過中央銲接點，將會因為接觸電阻與橫截面較小電流密度提高，又處於電路的中央，因此會形成局部的高溫；此時兩端的 V 型樑仍然是有受溫度上升的影響，而能持續的給中央銲接處產生需要的壓力，如圖表 2-4(b)，在經過適當的升高電流後，銲接電路結構軛的部分與銲接結構便可造成材料熔接效果，這裡便是達成我們整個設計最重要的部份；在微銲接現象發生後，最後將電流略為降下但不關閉，維持溫度一小段時間讓熔核強化後才關閉電流。

### 2.3 微銲接未來應用在三維立體結構組裝



在確定微銲接的機制後，在未來我們可將其應用在立體微結構的組裝上，如圖表 2-5(a)，因微鉸鏈的鉤環部分設計成具有電熱式致動器的結構，也是提供銲接點的部分；為了讓板狀結構在被舉起後，能夠被銲接固定，因此在微鉸鏈的栓(pin)的結構處便需要做些結構設計；如圖表 2-5(b)，在栓對應於銲接點處，我們多長出了一個凸點，這個凸點便是我們要將栓與鉤環銲接起來的銲接結構，銲接的方式則是可利用重力或是探針將立體結構挑起後，依上述微銲接過程來進行組裝的步驟。這樣的一組熱致動器與一個凸點的對應，可視為一個銲接單元，可以隨著需要銲接的結構大小來進行串聯，以達成大範圍或大尺寸的結構微銲接；銲接成功後，也代表電路連結的完成，若微鉸鏈的板狀結構處以微致動器或微感測器替換，在搭配以適

當的電路關係，則可達到立體微結構能量與訊號的輸入與輸出了。

## 2.4 模擬與分析

為了要了解鉤環上電熱致動器的行為與銲接前後的電路改變情形，我們這裡將對結構進行有限元素分析模擬，使用的是商用軟體 Ansys 6.0。分析的過程分為兩部分，首先我們將會進行 V 型樑電熱式致動器尺寸的最佳化，將幾個重要參數進行分析，在有限的面積範圍內得到最佳的位移與輸出搭配；在已知電熱式致動器的最佳尺寸後，我們便可計算在應用上將需要多少的力量輸出，同時將不同數量並聯的致動器輸出進行比較，詳細的分析設定與結果將在本節說明。



### 2.4.1 分析設定

我們所使用的元件材料為鎳，原件底部是用以絕緣的二氧化矽與作為基底的單晶矽，上方是由空氣來包圍元件；而模擬中應用到熱傳導、熱對流與非線性的結構分析，因此需要進行兩階段的耦合分析，首先以電熱元素 3-D Solid69 進行通入電流以後結構因電阻生熱的情形，在以熱應變元素 3-D Solid45 來模擬熱膨脹產生的位移。模擬則先進行 V 型樑結構的最佳化，將 V 型樑幾個重要尺寸帶入進行模擬，來求得最佳的尺寸組合，之後我們將會建出單邊的多組串聯的 V 型樑電熱式致動器，來進行位移量與形變量的估算，如，使用到的材料參數部份將列於表格 2-1。

在模擬的前處理程序(preprocessor)，我們需要先建出三維的模型，並依序將材料參數引入各結構層，接下來進行分格(mesh)的動作，而我們的模擬是以 V 型樑電熱

式致動器最為關鍵，因此分格尺寸要小才能得到較精確的結果，而其他部分則是越遠離些關鍵部位分格可越大。接下來在後處理程序(post-processor)時，電熱分析結構有些邊界條件需要設定，首先設定單晶矽基底的底部是參考溫度的位置，接著在所有的結構與空氣層接觸的部份設定上熱對流參數；最後則是電流輸入的部份，如圖表 2-6，在固定板 1 輸入與固定板 2 輸出相同的電流，而再將固定板 2 設定成為電壓零位面。在完成邊界條件設定後，便可以開始進行分析求解，在完成電熱模擬之後，我們可以得到靜態的結構溫度分布。

進行熱應變分析時，我們可沿用電熱分析的模型而不需重繪，只要將電熱元素 3-D Solid69 改為熱應變元素 3-D Solid45，這時候便可以將熱應變分析的邊界條件輸入，而前面電熱分析的溫度分布結果在這裡變成結構的邊界條件輸入，而固定板 1、2 都被固定在基底上面；在求解設定部份則需要改成非線性(nonlinear)與大形變結構(large-deflection structural)分析，便可以開始進行分析求解，完成熱應變模擬後，我們便可以得到結構的位移情形與應力分布狀況。

#### 2.4.2 單一 V 型樑電熱式致動器尺寸最佳化

在使用 V 型樑電熱式致動器，我們希望能夠在有限的面積下使尺寸能夠有最佳的搭配，來得到最好的位移與力量輸出，如圖 2 6，主要影響 V 型樑致動器主要的參數有 V 臂展開長度 L、V 臂的樑寬 W、厚度 t 與 V 臂的角度  $\theta$ ；在這裡厚度 t 的部份，因其並不影響致動器的位移輸出，主要是力量輸出上的影響，因此取一實驗

中參數配合較佳的厚度  $8\mu\text{m}$ ，力量不足處則希望以並聯致動器的方式來克服；另外，在 V 臂的角度  $\theta$  部份，在 2000 年 M.J. Sinclair 已經對 V 型樑電熱式致動器進行角度的最佳化[18]，V 型樑在預變形  $1^\circ$  的情況下將會得到最大的形變與力量輸出，因此這裡我們將角度  $\theta$  取  $1^\circ$ 。剩餘的參數只有長度 L 與厚度 t，因此就我們製程可處理的尺寸來進行最佳化的模擬。

在這裡為了比較位移與力量輸出的優劣，因此這裡設定結構最高溫度差在  $400^\circ\text{C}$  的條件下來比較位移量與力量輸出的大小，原因是當材料溫度過高，材料性質的變化會較明顯，且可能還會伴隨著高溫氧化反應產生。圖表 2-7 是  $W=5\mu\text{m}$ 、 $t=8\mu\text{m}$ 、 $L=300\mu\text{m}$ ，通以 0.122 流時，結構上局部最高溫度差可達  $400^\circ\text{C}$ ，可以看到的是溫度是隨著在樑上的位置呈現高低分布，並非均溫，而最高溫度則是在 V 型樑的頂端處，這裡同時也是最大位移發生的地方，最大力量輸出則是在 V 型樑頂端處施一反向力，以能夠讓頂端位移為零的力量下，便是輸出的最大力量。

在圖表 2-8 中，我們在  $W=6\mu\text{m}$ 、 $\theta=1^\circ$ 、 $t=8\mu\text{m}$ 、最高溫度差  $400^\circ\text{C}$  的條件下，比較結構長度 L 在  $100\sim 400\mu\text{m}$  範圍內，對位移量與力量的影響；可以發現的是長度對於結構的位移量與力量輸出都有很大的影響，位移量隨著長度增加有大幅增加的趨勢，但同時力量輸出卻是大幅減少，在這決定取  $L=300\mu\text{m}$ ，主要是因其在這樣的溫差下能夠達到將近  $20\mu\text{m}$  的位移量，其力量輸出也在可接受的範圍內，若之後使用上有力量不足的問題時，可由並聯致動器來得到解決。在圖表 2-9 中，要比較的是在  $L=300\mu\text{m}$ 、 $\theta=1^\circ$ 、 $t=8\mu\text{m}$ 、最高溫度差  $400^\circ\text{C}$  的條件下，比較的是 V 型樑寬在  $3\sim 7\mu\text{m}$

的範圍內，對位移量與力量的影響；在位移量的部份，發現在這樣的長度與最高溫度差的條件下，不同寬度其位移量差異相當的小，因此這部份比較無差異，但在力量輸出的部份，可以發現當  $W=5\mu\text{m}$  時，這樣的尺寸組合會有最大的力量輸出。

### 2.4.3 最佳化尺寸模擬輸出

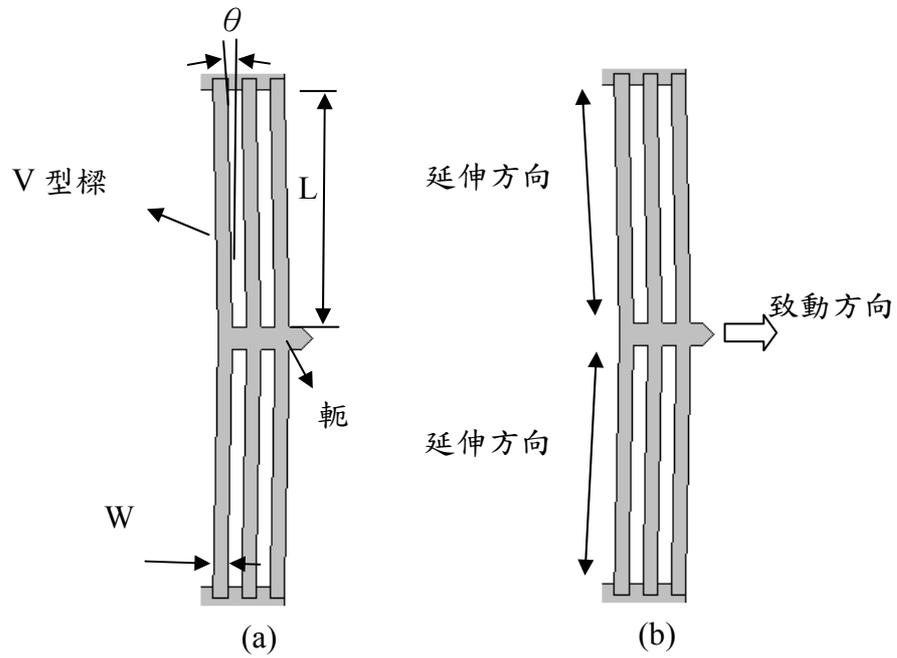
綜合上一小節得到的結果，可以決定要使用的 V 型樑電熱式致動器的幾何尺寸： $L=300\mu\text{m}$ 、 $W=5\mu\text{m}$ 、 $\theta=1^\circ$ 、 $t=8\mu\text{m}$ ，這樣的尺寸組合的輸入電流所產生的輸出溫度與輸出位移如圖表 2-10；至於在不同功率輸入的情況下，輸出力量圖表 2-11；同時也可看出，當輸入電流在  $0.122\text{A}$ ，最大溫差達  $400^\circ\text{C}$  的情況下，致動器能夠承受的最高負載約在  $500\mu\text{N}$ ，當然，這樣的大小並不能保證在使用上是足夠的，因此在實際製作上將會把多組致動器並聯以增加輸出力。



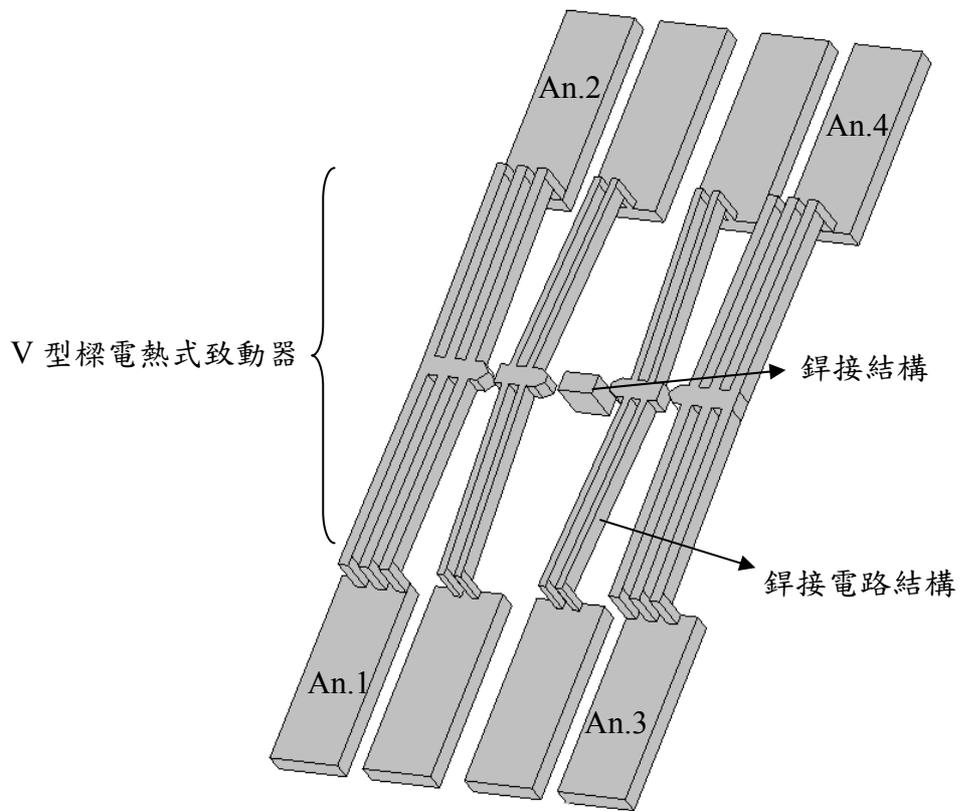
表格 2-1 有限元素分析中所使用到的材料參數

	Nickel	SC-Silicon	Oxide	Dry-Air
E (GPa) Modulus of Elasticity	207	162	57	*
D (Kg/m <sup>3</sup> ) Density	8880	2420	2660	1.293
CTE (10 <sup>-6</sup> /K) Coefficient of Thermal Expansion	TD : 12.7-16.8 (300K-800K)	TD : 2.56-4.10 (300K-800K)	0.4	*
$\nu$ Poisson Ratio	0.31	0.28	0.245	*
$\kappa$ (W/mK) Thermal Conductivity	90.5	TD : 146.4-41.8 (300K-800K)	1.1	TD : 0.024-0.056 (273K-773K)
C (J/Kg-K) Specific Heat	443	706.4	176	1006
$\rho$ (10 <sup>-8</sup> $\Omega$ -m) Resistivity	TD : 13.5-18.4 (273K-873K)	*	*	*

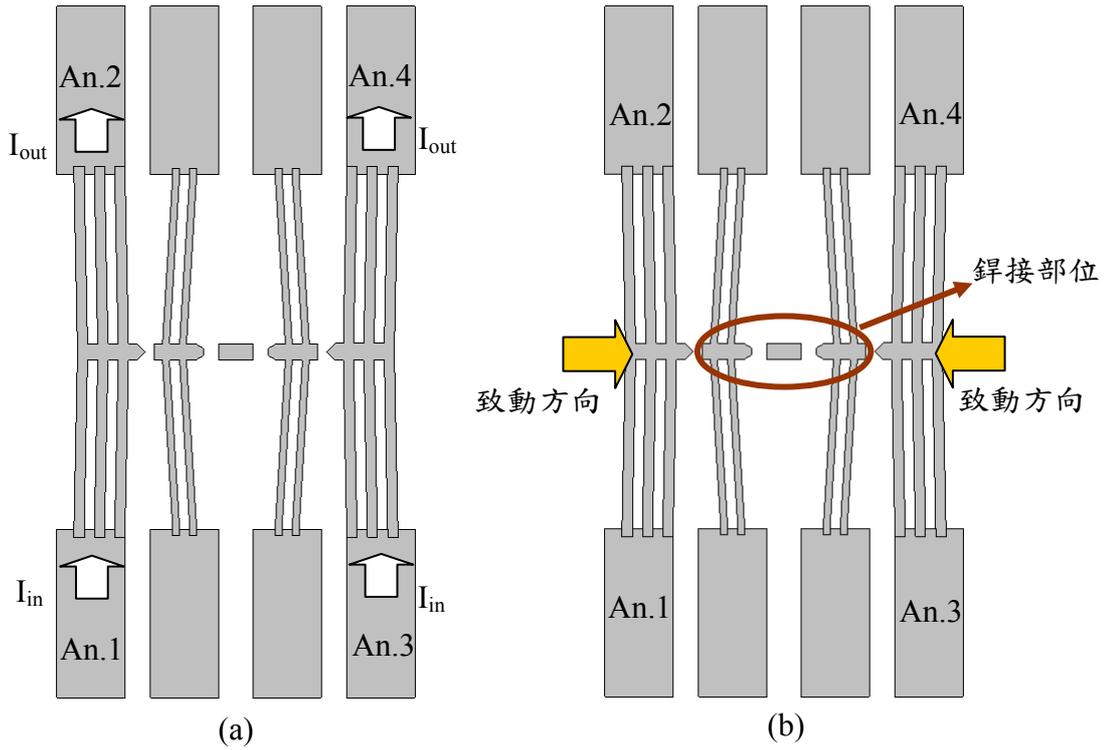
註：TD = Temperature Dependent



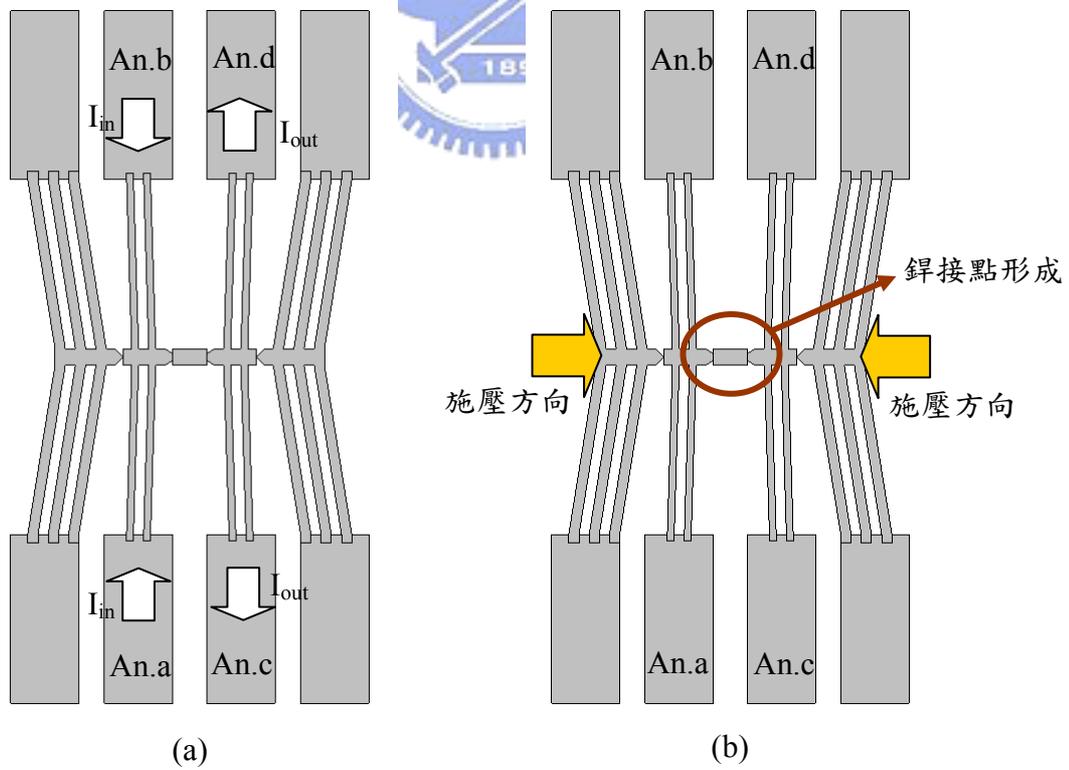
圖表 2-1 V 型樑電熱式致動器 (a) 結構參數示意圖 (b) 致動示意圖



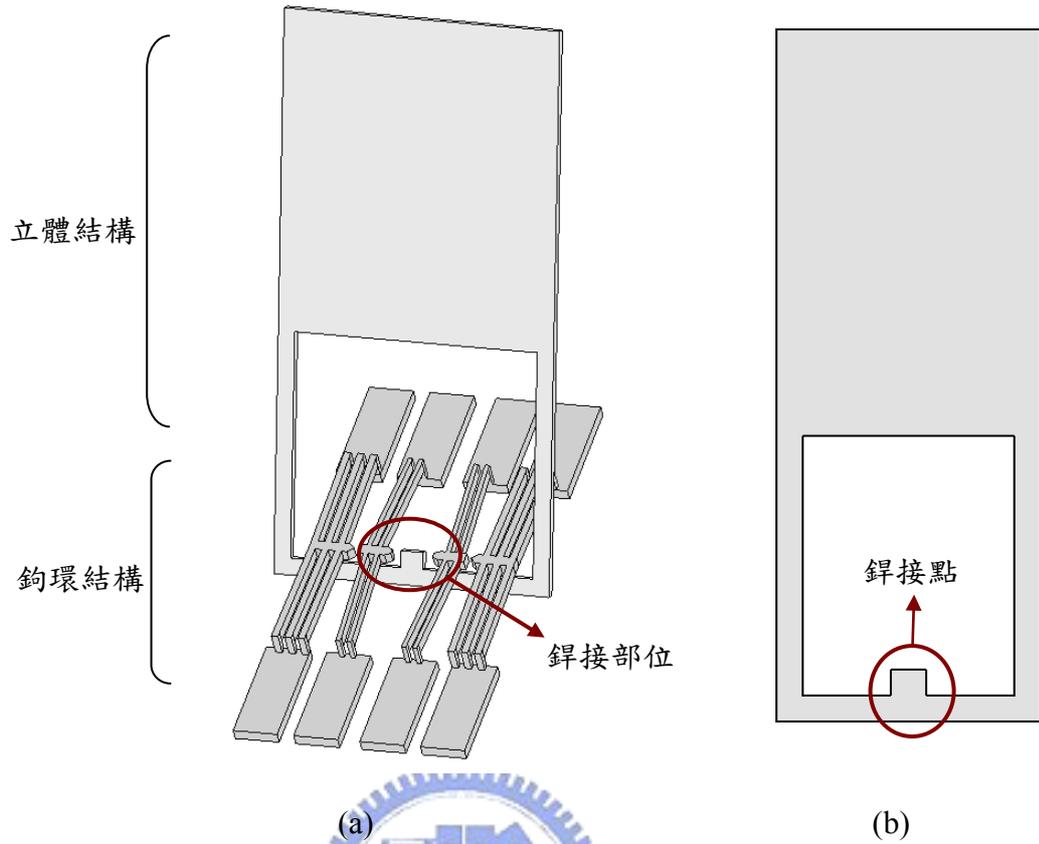
圖表 2-2 微鉚接結構模型



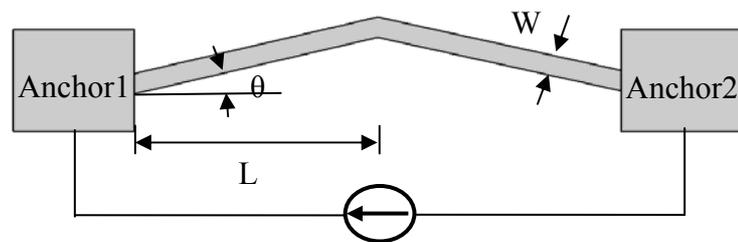
圖表 2-3 (a)未結合前的電流示意圖 (b)致動方向與接點位置示意圖



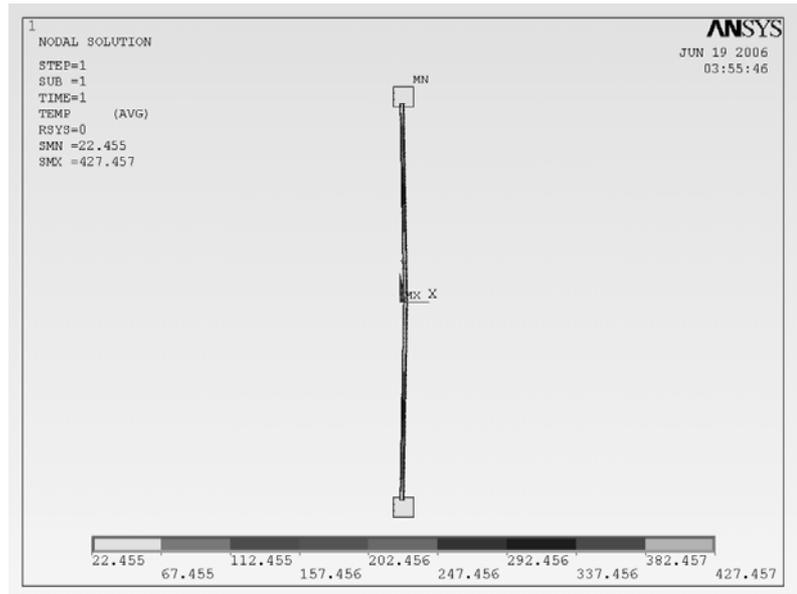
圖表 2-4 進行銲接階段電流與施予壓力示意圖



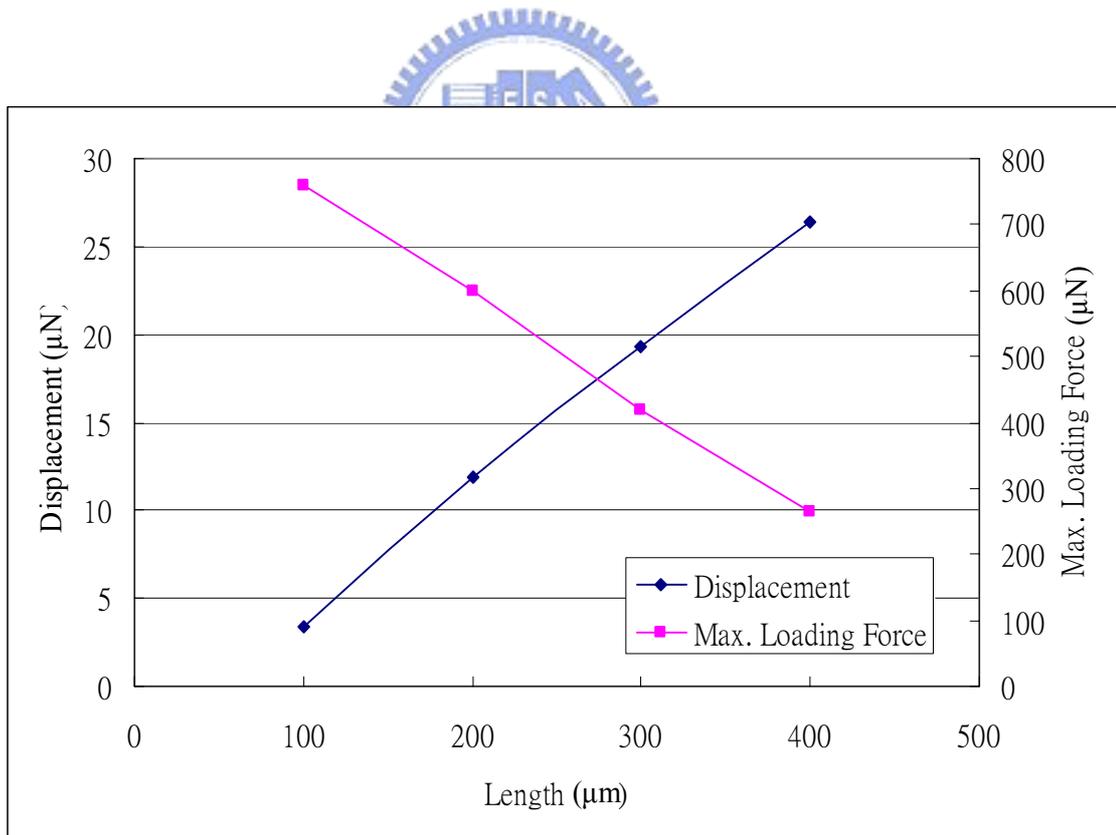
圖表 2-5 (a) 三維立體結構銲接結構圖 (b) 板狀結構銲接點示意圖



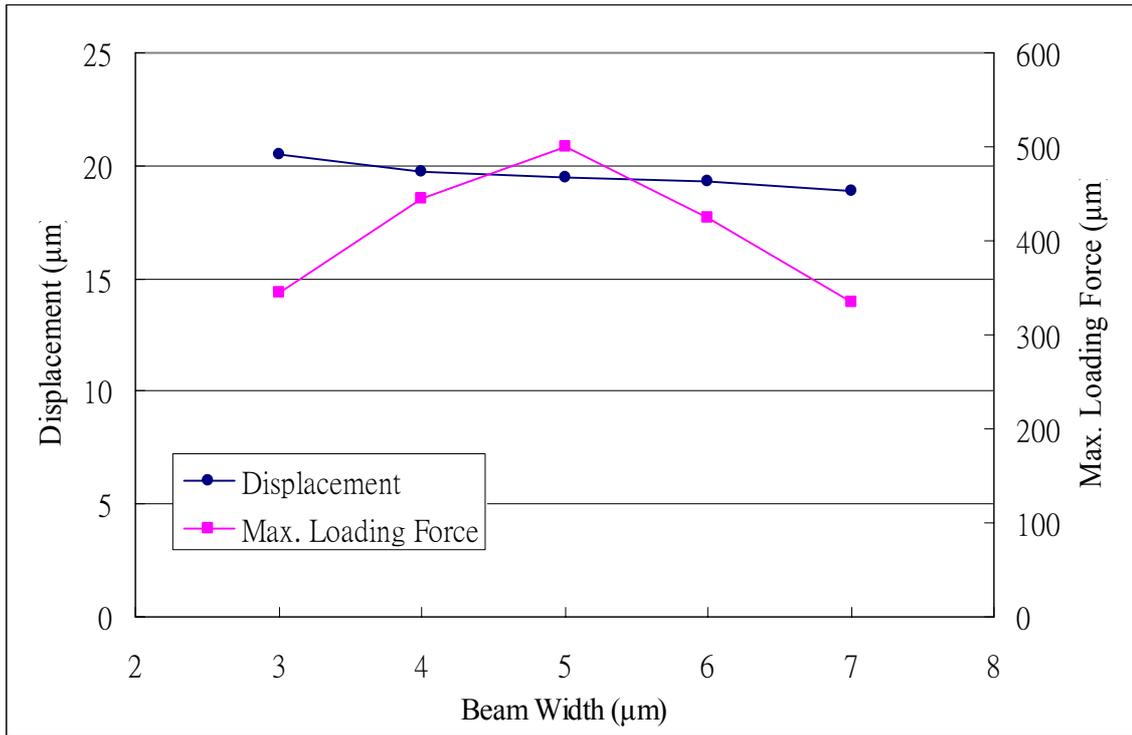
圖表 2-6 單一 V 型樑電熱式致動器



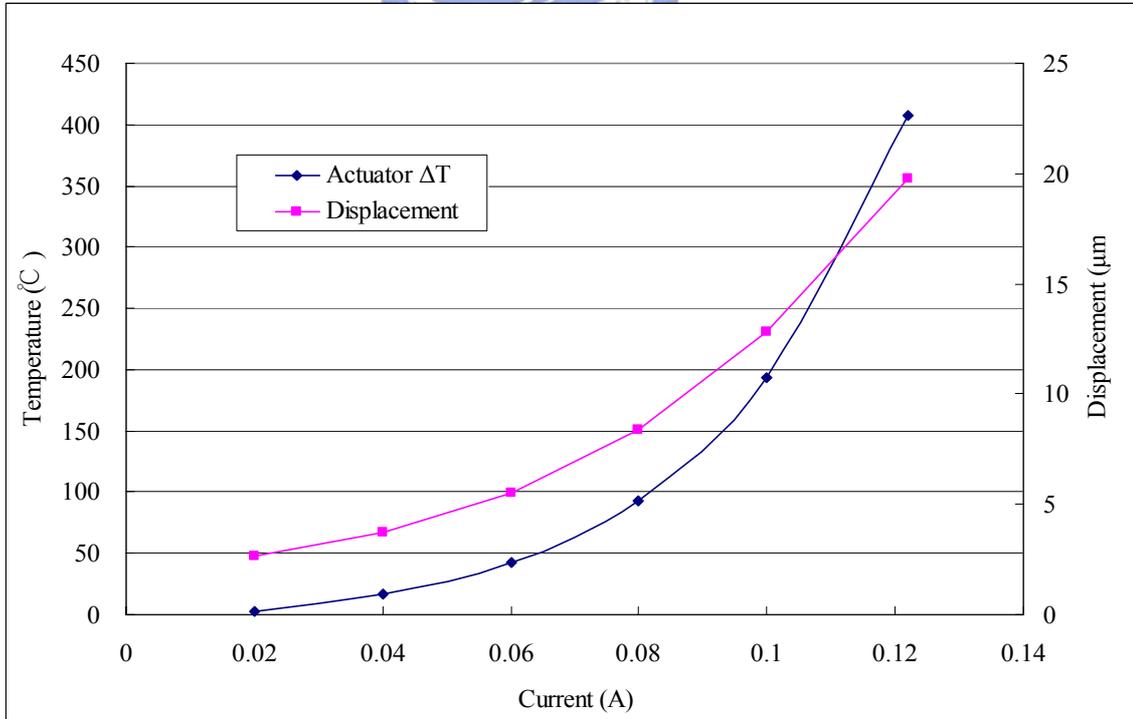
圖表 2-7 V 型樑致動器在 Ansys 6.0 中模型示意圖(基底與空氣已隱藏)



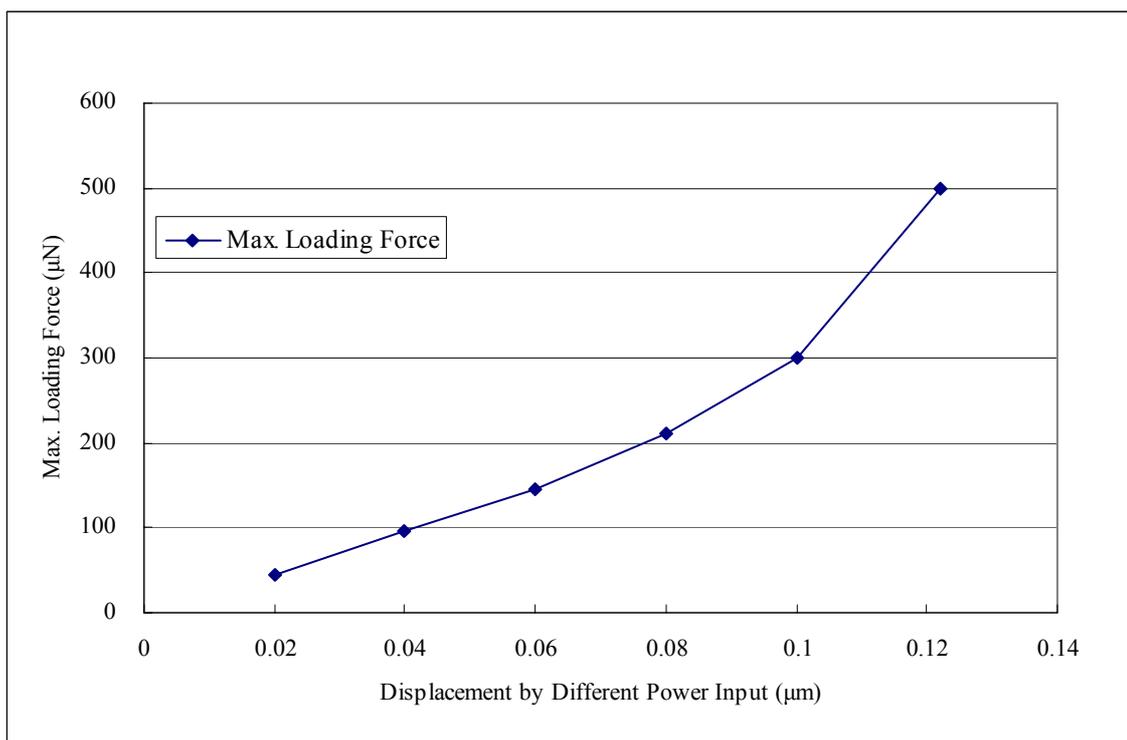
圖表 2-8 不同長度的致動器位移與力量的關係。



圖表 2-9 致動器位移與力量對於寬度的關係。



圖表 2-10 致動器溫度與位移輸出圖



圖表 2-11 各電流輸入下可輸出的力量負載



# 第 3 章 製程流程

在本章中將會描述在微銲接元件製造過程，我們所使用到的包含黃光微影 (lithography)、濺鍍(sputtering)與電鍍(electroplating)等表面金屬微加工技術，在這我們將會對電鍍流程進行較詳細敘述，並且介紹我們的製程流程，在最後則會對元件製作結果進行討論。

## 3.1 鎳電鍍流程

在本論文中，我們使用了鎳金屬的電鍍作為主要的元件製作製程，而要整個製程中，電鍍仍然需要其他製程的搭配，如電鍍前需要黏著層(adhesion layer)與種子層(seed layer)的濺鍍，產生電鍍元件的模(mold)的黃光製程，完成了這些後才能真正開始進行電鍍。所以在這裡我們將會依序介紹這些製程，最後再介紹我們電鍍會使用到的機台與對電鍍品質會產生影響的相關參數。

### 3.1.1 黏著層與種子層的選擇

在開始電鍍之前，我們需要在單晶矽基底上先設置一層金屬能夠在電鍍浴時，將電流由陰極板傳遞到電鍍的位置處，我們稱之為種子層，為了不影響後面的製程平整性，所以種子層盡量要薄但是不能夠具有太大的電阻，太大的電阻會造成之後電鍍薄膜厚度差異大。但是並不是每種金屬與單晶矽基底都能夠有很好的黏著性，

因此我們需要在種子層與單晶矽基底間建立促進兩者接合的黏著層。在這裡我們選用的種子層是銅(Cu)，這是由於銅金屬的電阻率很小，且也因為銅與我們結構層所使用的鎳，在選用適當的溶液時，可以有相當良好的蝕刻選擇比，因此也可拿來當作犧牲層。選用了銅當作我們的種子層後，發現銅與單晶矽基底的黏著並不是很好，根據實驗室學長的經驗，我們也為之選擇了鈦(Ti)金屬當黏著層，選擇鈦的原因首先當然是因為它對銅或者是單晶矽基底的黏著性都相當好，不會在釋放結構時產生剝離，而黏著層在製程結束後也是需要移除的，而鈦與我們的結構鎳也有很適當的溶液可以產生很好的蝕刻選擇比。

### 3.1.2 黃光製程



在進行電鍍製程前，最重要的就是我們需要建構出電鍍結構的模(mold)，電鍍製程在面型微加工中是具有產生厚膜結構的能力，這時候黃光製程便顯現出他的重要性了，由於我們電鍍模必須要比電鍍結構的高度還高，這時候就需要慎選光阻種類，以減少誤差的產生，這裡我們所選用的是正光阻 AZ9260，AZ9260 的特性是適合製作較厚的光阻層，特別是使用在電鍍上的模，而且其光阻邊壁的準直性佳，不容易造成線寬的損失；由於在本研究中主要為完成二維平面銲接結構的組裝與測試，所以在犧牲層的選擇上就以較容易處理的 FH6400 光阻來使用。表格 3-1 列出了我們所使用的黃光參數。

### 3.1.3 電鍍製程

電鍍是一電化學反應，電鍍所獲電鍍層的析鍍量由法拉第定律所規範：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。在本實驗中我們有使用到鎳的電鍍，鎳電鍍是最常使用的是瓦特浴 (Watt bath)，主要是因為有很高的鍍率與良好的品質，因此我們想要達成厚膜的鎳金屬電鍍瓦特浴的方式是最適合的。

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、結構應力與膜厚平均等，太低的電流密度容易造成雜質或是氣泡停留在電鍍面上，造成結構不完整，但是高低的電流密度會因晶粒粗大而使電鍍表面粗糙，因此取用可使結構完整的最小電流將是我們所希望的，如表格 3-2 列出了我們所使用的參數。



### 3.2 製作流程

在圖表 3-1 中，我們可以看到利用金屬面型微加工進行以鉸鏈機構製作三維立體微結構的過程，以下將進行較詳細的敘述。

在步驟(a)中，我們在經過 RCA 清潔後的單晶矽晶片，利用爐管長出  $5000\text{\AA}$  的濕氧作為電性絕緣層；在步驟(b)進行第一道光罩的黃光製程，塗佈上  $2.3\mu\text{m}$  的 FH6400 光阻進行曝光顯影，這道黃光的功能是將光阻用來作鉤環結構的犧牲層，為了能夠進行接下來的製程，所以在這依步驟需要將光阻在顯定影之後進行  $90^{\circ}\text{C}$ ，15

分鐘的硬烤；在步驟(c)因為光阻並不導電，因此需要利用濺鍍機，在整個晶片上先鍍上 200Å 的鈦作為黏著層，接著鍍上 1500Å 的銅作為電鍍種子層；在步驟(d)中，開始我們的第二道光罩，首先塗佈上 10μm 的光阻，進行曝光與顯影後便可完成電鍍所需要的模，接下來以電流密度 20mA/cm<sup>2</sup> 進行 22 分鐘的鍍金屬電鍍，這一道電鍍製程是為了產生約 8μm 厚度微鉸鍊的鈎環結構層；在步驟(e)中，我們要釋放懸浮的結構處，首先將試片泡在丙酮(ACE)裡，除去電鍍用的光阻膜，再以 CR-7T 浸泡 30 秒除去電鍍種子層，接著使用 BOE 溶液浸泡 20 秒，除去電鍍黏著層，最後再將試片泡入 ACE 中，用超音波震盪器震盪 2 分鐘，去除掉用來當做犧牲層的光阻。

### 3.3 製程結果



在經過上述製程之後，我們可以得到製程結果如圖表 3-2，圖表 3-2(a)為我們要用來進行銲接條件量測的元件，圖表 3-2(b)是希望能夠達成二維銲接的結構；在長 600μm 的懸浮樑結構，我們的製程可以順利電鍍表面尚平整且完整的結構。在圖表 3-3 結構的 450 倍與 1200 倍的放大倍率中可以看出，在結構轉角的地方有些毛邊的現象產生，這是因為在進行光阻電鍍模的製作時，可能因為角落處光源繞射現象，造成毛邊產生，但這部份並不影響實驗的進行。在圖表 3-4 中可看出結構皆有適當的懸浮，在圖表 3-5 是結構的側視圖則可以看出電鍍結構側壁的準直性相當好，這部份代表作為電鍍模的 AZ9260 是相當適合應用在電鍍上的厚膜光阻。

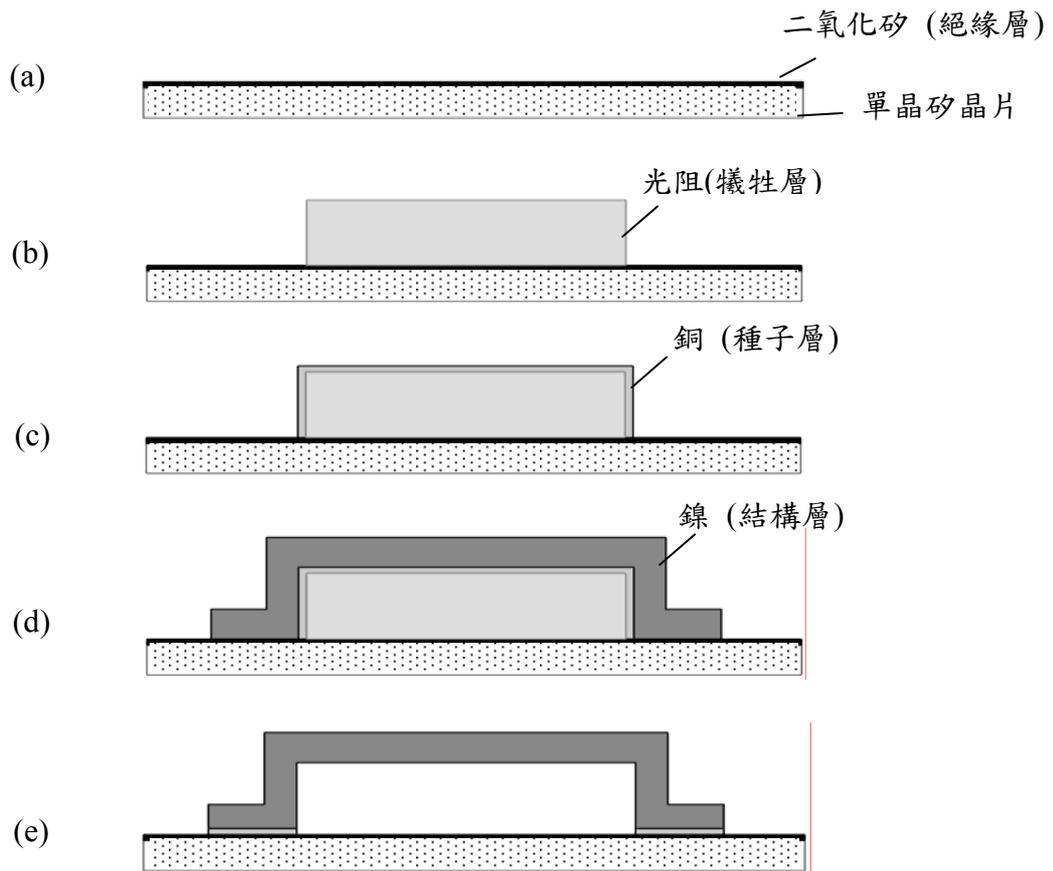
表格 3-1 黃光參數表

光阻種類	FH6400	AZ9260
光阻厚度	2.3 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
旋佈	1000 rpm (35 sec)	500 rpm (15 sec)
		1000 rpm (35 sec)
靜置	1 min	10min
軟烤	90 sec	15 min
水合	1 min	> 30 min
曝光	1.8 sec ( $46\text{mW}/\text{cm}^2$ )	10 sec (+20%) ( $46\text{mW}/\text{cm}^2$ )
顯影	1 min 30 sec (AZ-400k)	3 min 30 sec (AZ-400k)
定影	1 min (DI Water)	1 min (DI Water)

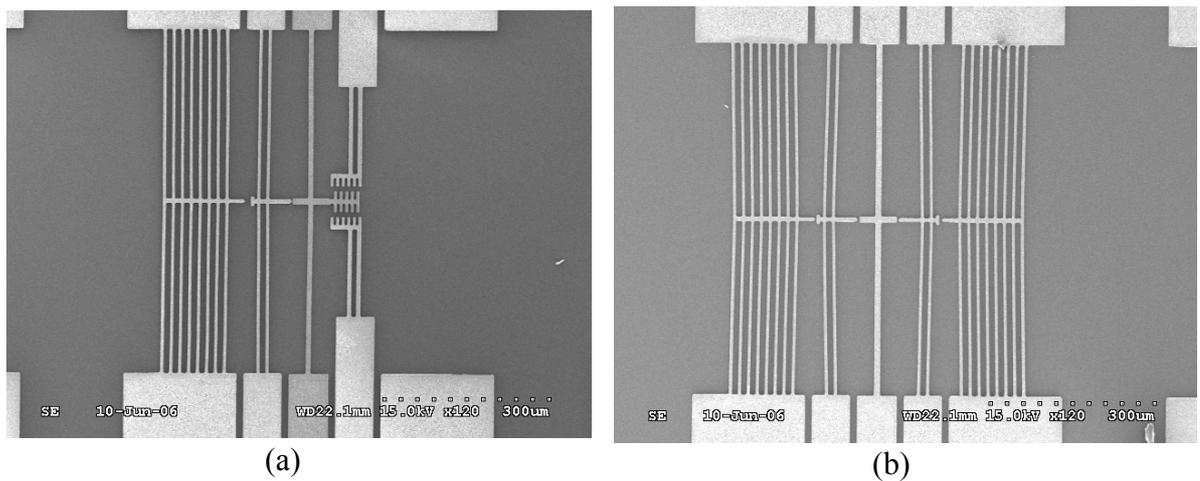


表格 3-2 電鍍參數表

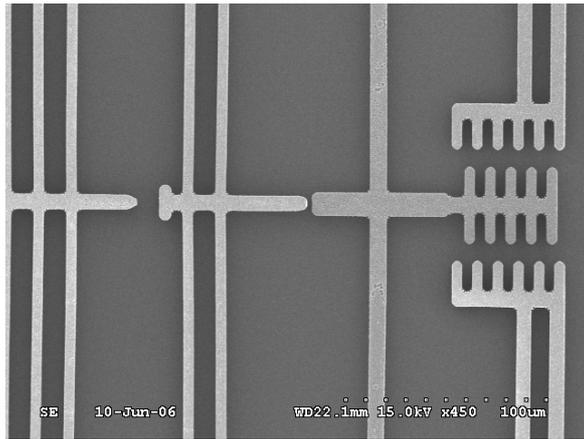
光罩	Mask #2
電鍍金屬	Ni
電鍍面積	8.21 $\text{cm}^2$
電流密度	20 $\text{mA}/\text{cm}^2$
電鍍速率	0.38 $\mu\text{m}/\text{min}$



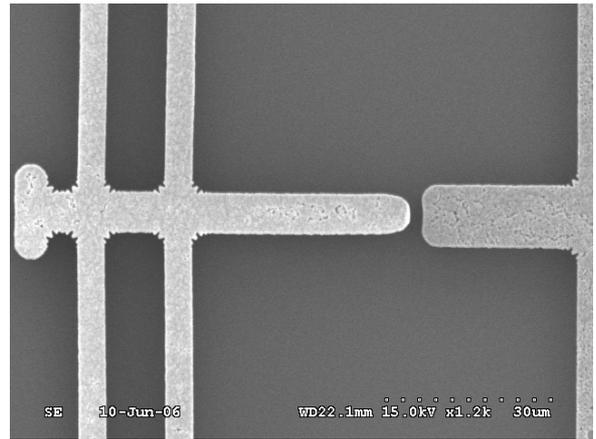
圖表 3-1 製程流程圖



圖表 3-2 元件 SEM 照片 (a) 銲接參數測試結構 (b) 二維銲接結構。

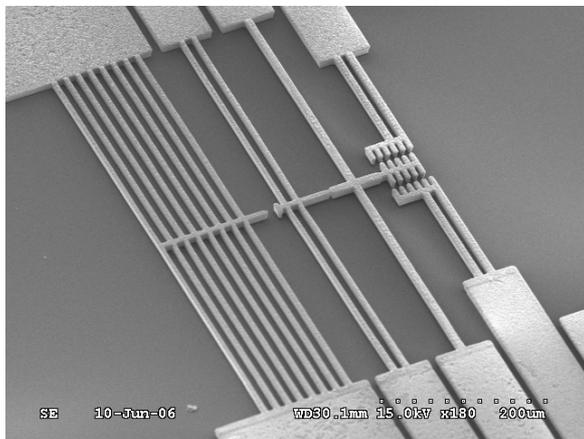


(a)

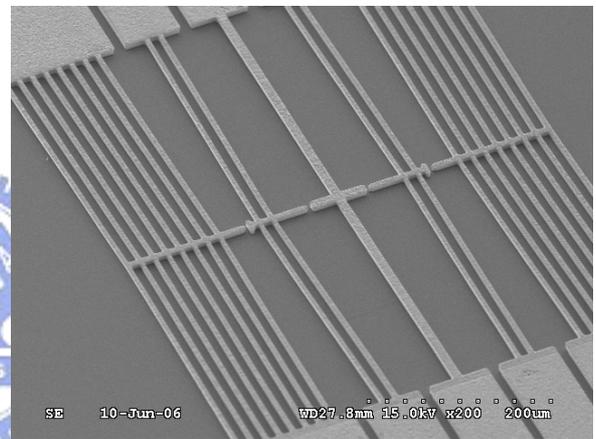


(b)

圖表 3-3 元件 SEM 照片 (a)450 倍放大 (b)1200 倍放大。

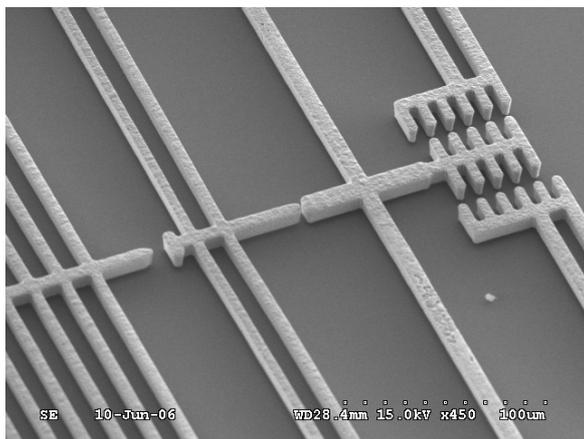


(a)

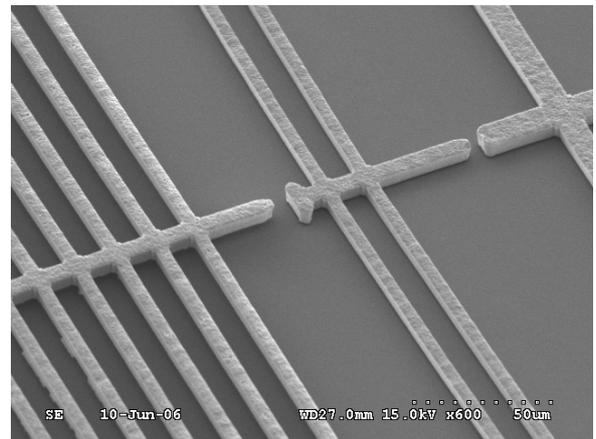


(b)

圖表 3-4 元件 SEM 側視圖 (a)銲接參數測試結構 (b)二維銲接結構。



(a)



(b)

圖表 3-5 元件 SEM 側視圖 (a)銲接參數測試結構 (b)二維銲接結構。

# 第 4 章 實驗量測與討論

## 4.1 量測設置

如圖表 4-1，為求能夠精確的控制能量的輸入，我們在電腦上使用軟體 Labview 7.1 來控制能量輸入，在軟體中設置電壓控制器，將輸入電壓分成粗調與細調兩種，粗調為每刻度 0.5V，細調為每刻度 0.05V，這樣的調整量在元件上的作用約為數個毫安培到數十個毫安培；電腦的訊號可以透過資料擷取卡(DAQ)傳入訊號放大器，再由訊號放大器將輸入放大 20 倍在經探針通入元件之中，因此我們可用電腦輸出訊號達成電壓精確的控制，同時在輸入元件的迴路上，再加上一個三用電表量測電流值的變化量；精確的輸入控制能夠明確的將工作範圍訂出，也能避免因過大的能量輸入造成結構的破壞，而輸出電壓與同步量測電流值，同時在螢幕上觀察 CCD 傳回的影像，讓量測工作能夠精確且有效率。

## 4.2 量測結果

在這一部份，如圖表 4-2，我們使用銲接測試結構來量測對於我們進行微銲接會有影響的一些參數，包括接觸壓力與接觸電阻的關係、可達成銲接效果的接觸電阻範圍、進行銲接時所需要的功率範圍等，最後則會利用量測的數據，進行微銲接的實際測試，以證明我們所設定的重要參數無誤。

#### 4.2.1 V 型樑致動器的輸出與力量需求

如圖表 4-2，當我們進行量測時，首先由致動器部份通入電流  $I_a$ ，待致動器行經一段距離後，開始推動 Beam II，並一直將 Beam II 推動到與 Beam I 在銲接點處接觸，此時由 Beam I 的形變量，便能計算接觸點的力量與壓力大小。應用公式如下：

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

$$k = \frac{192EI}{L^3} \quad (4-2)$$

式中  $F$  為樑受力大小、 $k$  為 Beam Spring 的彈簧常數、 $E$  為材料楊氏係數、 $I$  為結構慣性矩、 $L$  為樑的長度。

在實作結果中，因為進行電鍍模的黃光製程，因高度差的原因而有尺寸上的誤差，就量測結果可得：致動器樑寬  $W_a=6\mu\text{m}$ 、Beam I 樑寬  $W_i=9\mu\text{m}$ ，Beam II 樑寬  $W_{ii}=6\mu\text{m}$ ，致動器到 Beam II 距離  $9\mu\text{m}$ ，Beam II 到 Beam I 距離  $3\mu\text{m}$ ，而電阻銲過程因此大致能分為三步驟，同時透過實際量得尺寸代入式(4-1)與式(4-2)，可得致動器輸出需求：

(a) Step 1：致動器與 Beam II 未接觸。  $X = 0 \sim 6\mu\text{m}$ ；Required Force =  $0\mu\text{N}$

(b) Step 2：致動器推動 Beam II。  $X = 6 \sim 9\mu\text{m}$ ；Required Force =  $0 \sim 92\mu\text{N}$

(c) Step 3：致動器推動 Beam II 與 Beam I。  $X > 9\mu\text{m}$ ；Required Force  $> 92\mu\text{N}$

表示於圖表 4-3。

此時再將不同並聯數的 V 型樑致動器的模擬輸出數據與力量需求比較，可得圖表 4-4，這樣的比較之下可知輸出力量需求，約 4 組致動器聯聯即可滿足，但當初繪

製光罩時為求保險，因此在結構上放上了八組並聯。

#### 4.2.2 接觸壓力與接觸電阻的關係

如圖表 4-5，我們由致動器推動 Beam II 與包含尺規以量測位移量的 Beam I 接觸，此時 Beam I 可視為被拉伸的 Beam Spring，量測 Beam I 位移量的大小經式(4-1)與式(4-2)計算，便可以得到銲接點的接觸力，此時再將製程上的幾何參數代入算出面積大小，便可得到接觸壓力。

接觸電阻的計算部份，如式(4-3)我們在整個欲銲接的迴路上的總電阻，為接觸電阻加上結構電阻與探針的接觸電阻，要求出接觸電阻大小則要先能將其餘部份扣除。


$$R_{all} = R_{contact} + R_{structure} + R_{probe} \quad (4-3)$$

式中  $R_{all}$  為銲接前的整體電阻、 $R_{contact}$  為接觸電阻、 $R_{structure}$  為結構電阻、 $R_{probe}$  為探針輸入的接觸電阻。

在兩組欲銲接的樑接觸前，我們需要先量測出結構上電阻與探針接觸電阻的大小，如圖表 4-5，首先量測 Beam I 上的 C、D 兩點間的電阻與 Beam II 上 A、B 兩點的電阻相加後除以二，可得結構電阻與探針輸入的接觸電阻的總和 ( $R_{structure} + R_{probe}$ )，再利用致動器推動將 Beam I 與 Beam II 接觸後，量測電路迴路 B、D 的迴路總電阻值 ( $R_{all}$ )，最後將總電阻與結構電阻、探針接觸電阻相減，便能得到接觸點的接觸電阻。

由以上的計算，我們可以得到圖表 4-6，在圖中可看出接觸電阻與接觸力是約成反比的趨勢，在電路剛導通時，接觸電阻約在  $20\Omega$  左右，把接觸壓力加大時，最小接觸電阻可達  $3\sim 4\Omega$ ；而圖表中數據分散範圍較大，可能原因是因為在實驗中接觸面的大小與平整度略受製程影響，而在接觸的當下接觸角度也是有關係，在得知接觸壓力與接觸電阻的關係之後，便可進行下一步實驗，找出可達成微電阻鐳的接觸電阻範圍與需要的壓力大小範圍。

#### 4.2.3 可達成鐳的接觸電阻範圍

在這使用與上一小節同樣的方式計算接觸電阻，並在使用致動器使鐳點接觸以後，通入適當的電流電壓，測試不同的壓力與接觸電阻下，讓材料在接面處因較高的電阻形成高溫，而使鎳金屬有熔融接合的現象產生。

在實驗過程可能產生的現象有三：

- (1) 鐳點處有明顯但極小範圍的因高溫產生的氧化與變色現象，但未接合。
- (2) 鐳點處有明顯較大範圍的因高溫產生的熔融接合與氧化變色。
- (3) 鐳點處輸入到儀器上限，但沒有明顯的因高溫產生顏色變化。

而以上的對應實驗終止條件如下：

- (1) 在氧化之後沒有電流通過，因氧化造成的斷路。
- (2) 鐳接成功。
- (3) 輸入電流已經超過機器(訊號放大器)的上限(200mA)。

這樣的結果，將其各數據列於圖表 4-7。

如圖表 4-7 所示，這裡將銲接成功的參數以「○」記錄，銲接失敗的以「×」記錄，從圖表左上邊低接觸壓力、高接觸電阻銲接失敗的點，發生的現象符合上述第一種，在接面處因極小範圍的高溫熔融，而造成材料氧化但熔融的量尚不足達到接合；而右下角高接觸壓力、低接觸電阻銲接失敗的點，發生的現象則符合第三點的描述，當我們將輸入電流提高到訊號放大器可提供的上限，仍無法使結構能夠有明顯的局部高溫，因此終止實驗；最後在中央區域有許多銲接成功的點，大致分布的範圍在  $4.6\Omega$  到  $12\Omega$  之間，皆是能夠達成接合，且能夠將迴路上的電阻大為降低。

#### 4.2.4 可達成銲接的功率範圍

在進行銲接實驗中，同時記錄在不同電阻下銲接發生時的電壓與電流，由此我們可以計算當材料高溫融熔時，在接合高溫處所消耗的功率與電阻大小

$$R_{all}' = \frac{V_{weld}}{I_{weld}} \quad (4-4)$$

$$R_{weld} = R_{all}' - (R_{structure} + R_{probe}) \quad (4-5)$$

式中  $R_{all}'$  為銲接發生時的整體電阻、 $V_{weld}$  為銲接發生時的輸入電壓、 $I_{weld}$  為銲接發生時的輸入電流、 $R_{weld}$  為銲接發生時銲接點處的電阻、 $R_{structure}$  為結構電阻、 $R_{probe}$  為探針輸入的接觸電阻。

在實驗過程中，當對元件輸入電壓，並同時量測電流，直到發生材料高溫變色融熔時，記錄下該點的電壓  $V_{weld}$  與電流  $I_{weld}$ ，此時可計算出整體迴路的電阻大小

Rall'，再將整體電阻減去通入電流前所量測到的結構電阻與探針輸入的接觸電阻 (Rstructure+Rprobe)，便可計算出銲接發生時銲接點處的電阻 R<sub>weld</sub>。以上量測結果如圖表 4-8，圖中橫軸為初始的計算接觸電阻，縱軸為銲接發生時銲接點處的電阻；可以看出只要初始計算電阻座落在上一小節所算出的範圍內，在能夠達成銲接的條件下，可發現當銲接發生時銲接點處的電阻都在 11.2Ω-13Ω 的區域內，這些數值應該是因為鎳因為溫度上生伴隨的阻值增加所致，此時初始接觸電阻已不是主要的影響參數。

再由以上的數據，便能計算在這樣的尺寸幾何關係下，要達成銲接需要消耗的功率大小，如下式：

$$P_{weld} = I_{weld} V_{weld} - I_{weld}^2 (R_{structure} + R_{probe}) = I_{weld}^2 R_{weld} \quad (4-6)$$

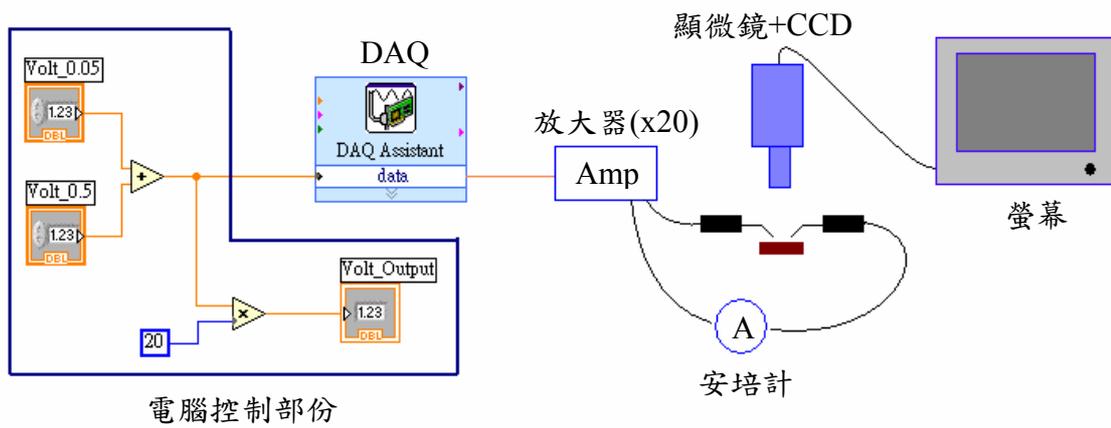
式中 P<sub>weld</sub> 為銲接發生時消耗的功率、V<sub>weld</sub> 為銲接發生時的輸入電壓、I<sub>weld</sub> 為銲接發生時的輸入電流、R<sub>weld</sub> 為銲接發生時銲接點處的電阻、R<sub>structure</sub> 為結構電阻、R<sub>probe</sub> 為探針輸入的接觸電阻。

結果如圖表 4-9，雖然點的分布有些雜亂，但若使用趨勢線仍可看出，當初始接觸電阻越大則在達成銲接時所需要消耗的功率相對較低，而反之初始接觸電阻越小則在達成銲接時所需要耗的功率較高，推測原因應是阻值較低的組合為了要讓材料達高溫，只有加大輸入的能量才能達成。但初始接觸電阻較低而輸入了較高功率，也始結構能夠有相對較大範圍的升溫，讓銲接結果接合較大也較佳，如圖表 4-10(a)；而較高的初始接觸電阻因高溫範圍較小，雖也能達成銲接，但是接合的程

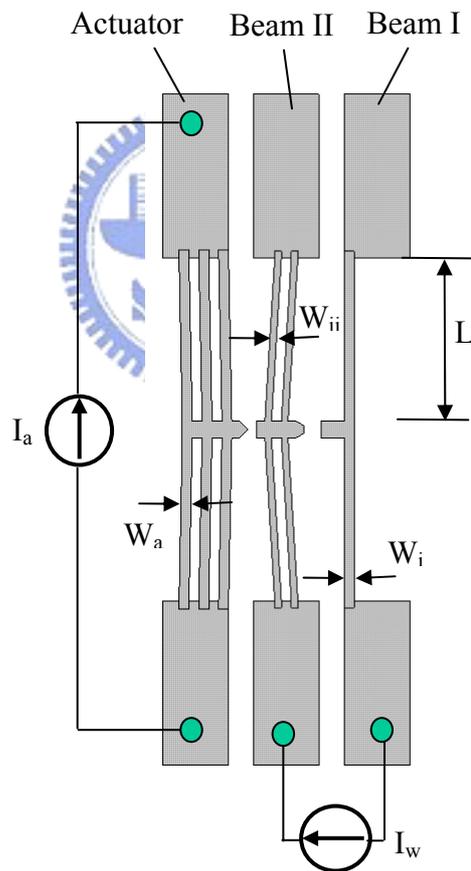
度略差，如圖表 4-10(b)。

#### 4.2.5 微銲接過程

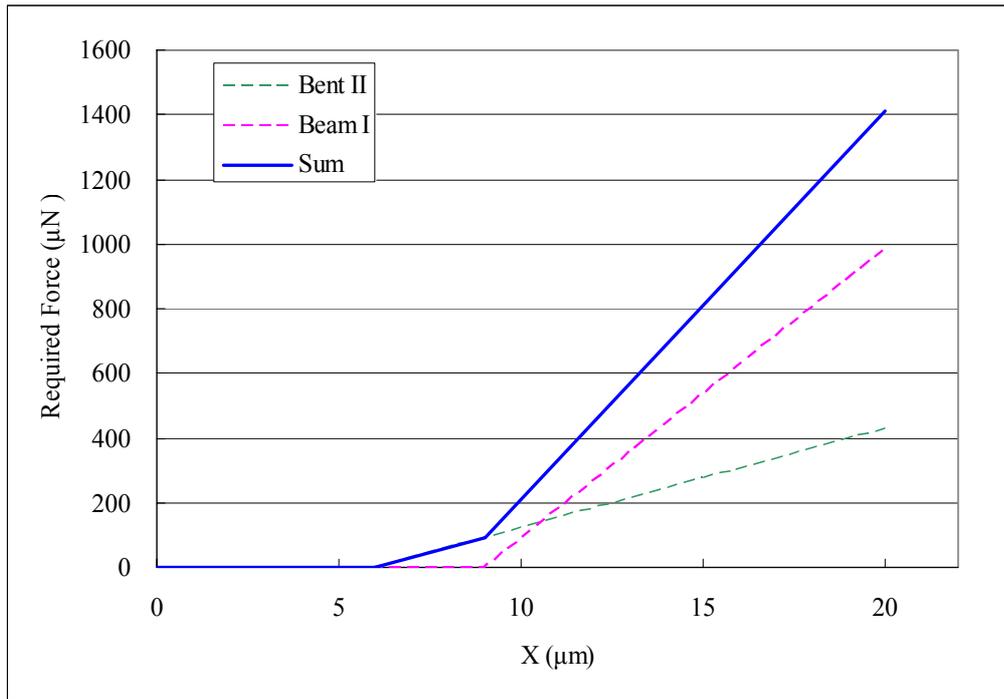
圖表 4-11(a)中為銲接測試結構的初始狀態；圖表 4-11(b)為對致動器輸入電流，去推動欲接合的 Beam II 與 Beam I，同時量測接觸電阻值，達到可達成銲接範圍內後，接上銲接電路；圖表 4-11(c)中，銲接電路連接完成，對 Beam II 到 Beam I 通入電流後，電流會通過中央欲銲接接合的部位，同時 Beam II 因些微的預變形，在溫度上升時能行成另外一組可提供接點推力的致動器；圖表 4-11(d)~(f)中提高輸入電流讓銲接接合處產生局部高溫，而該處也因高溫有變色與氧化的現象；圖表 4-11(g)中，溫度提高到可融熔的溫度，達成銲接；圖表 4-11(h)中將 Beam II 通往 Beam I 用來銲接的電流關閉，使結構回到原位；圖表 4-11(i)中將致動器電流關閉，結束焊接，並量測接合後的迴路電阻，與未接合前比較，確定電阻值是否有因接合而改變。



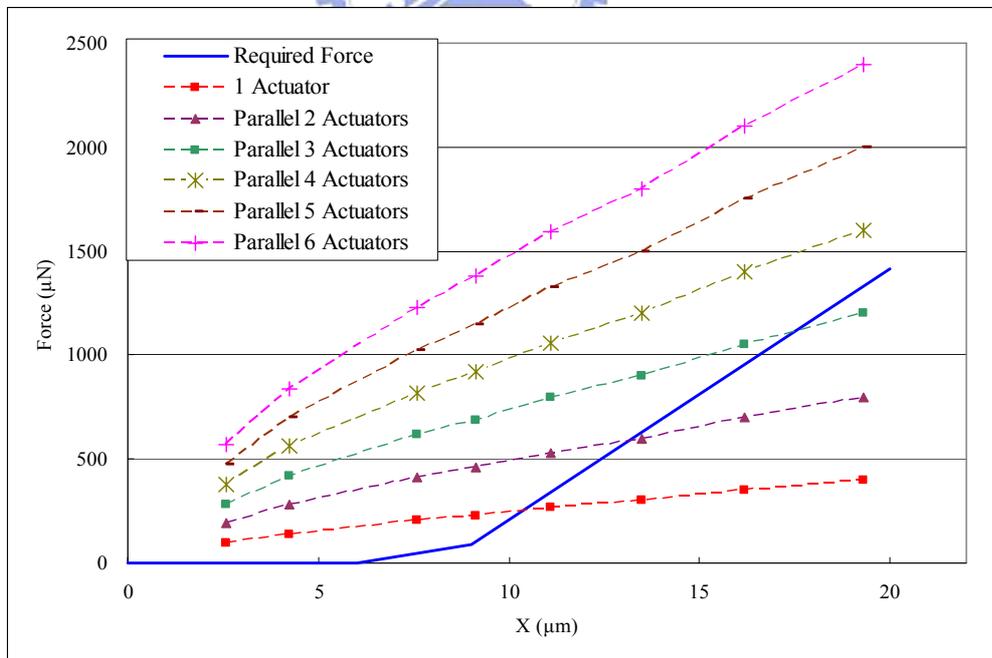
圖表 4-1 量測設備設置圖



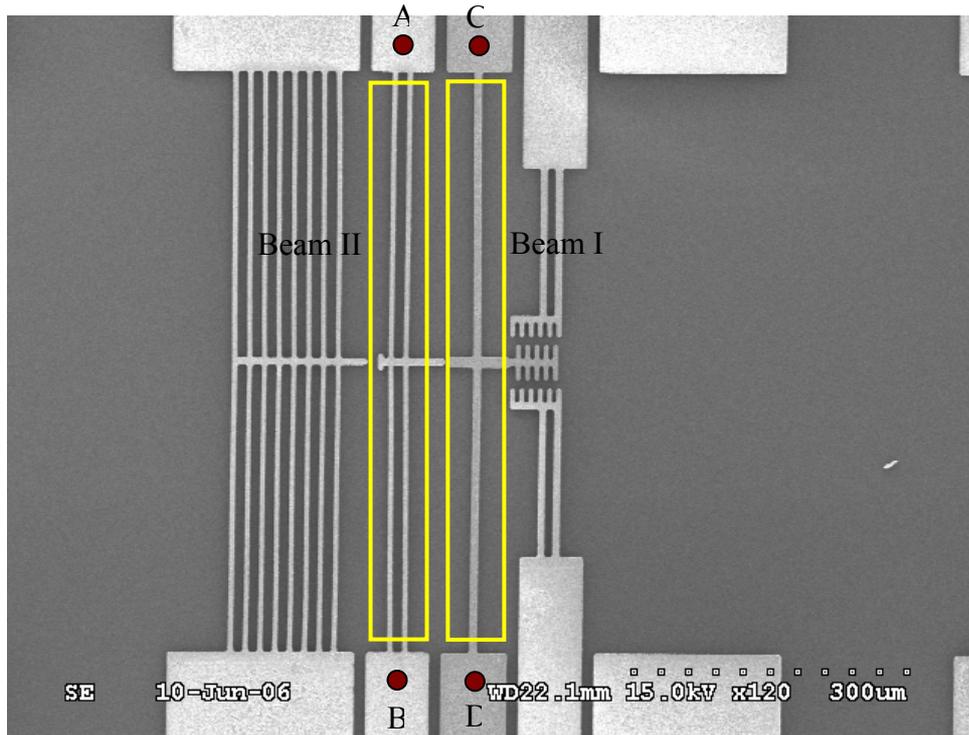
圖表 4-2 銲接測試結構與輸入示意圖



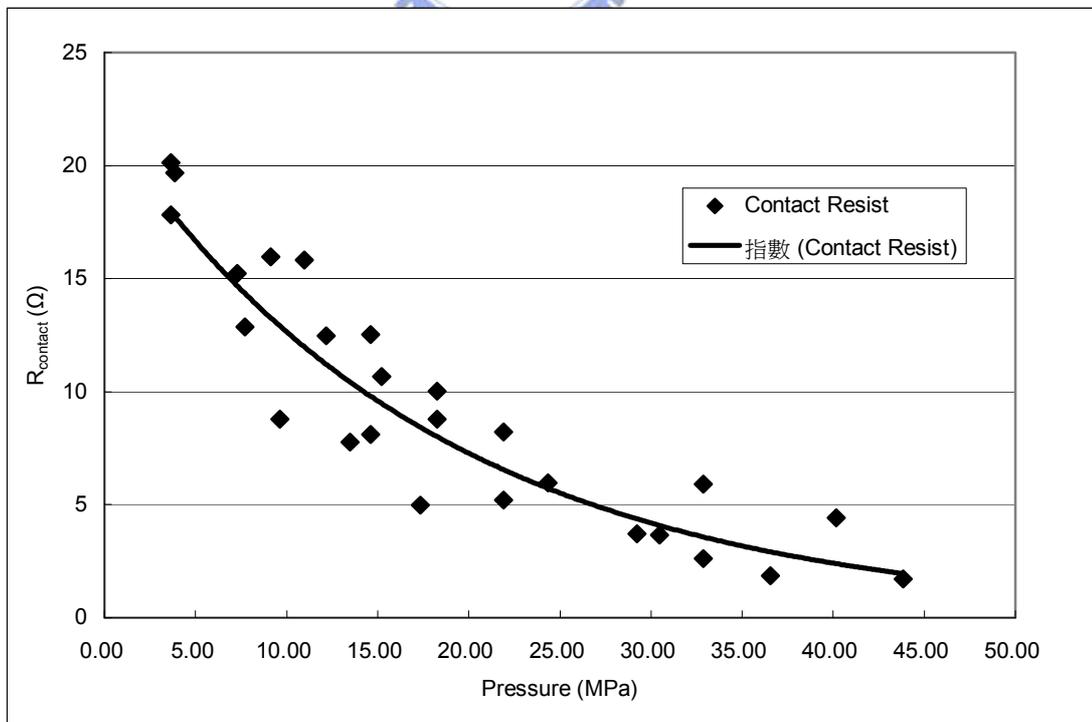
圖表 4-3 微銲接各階段力量需求圖



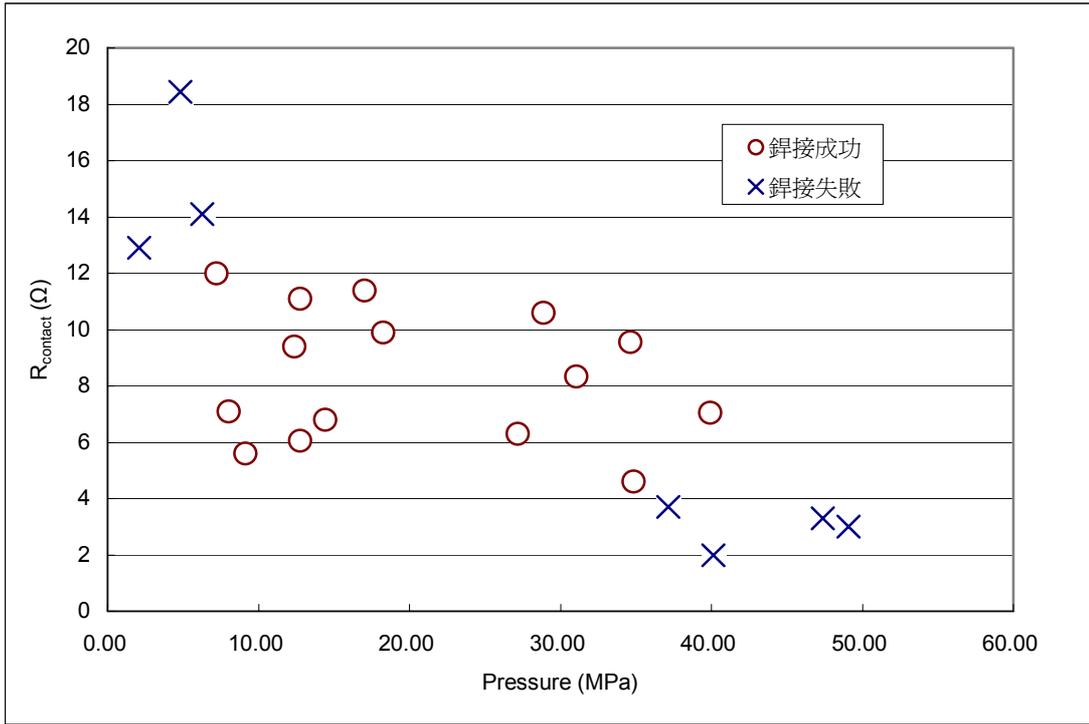
圖表 4-4 微銲接各階段力量需求與致動器輸出比較圖



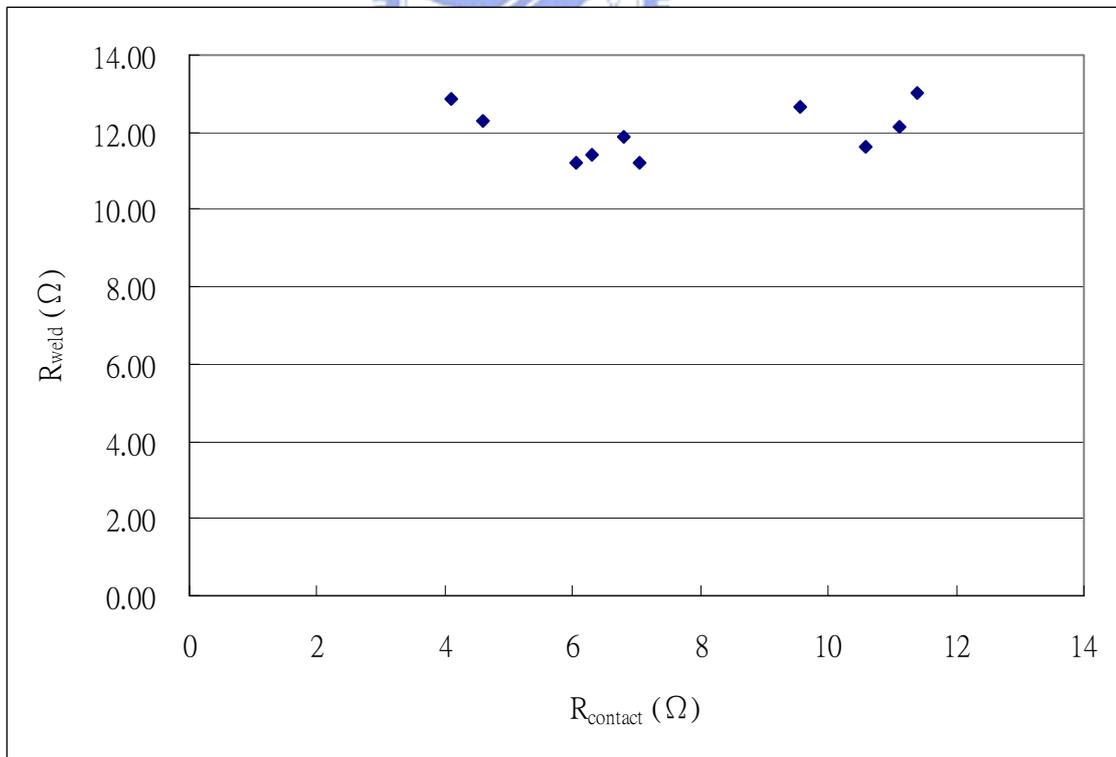
圖表 4-5 量測輸入方式示意圖



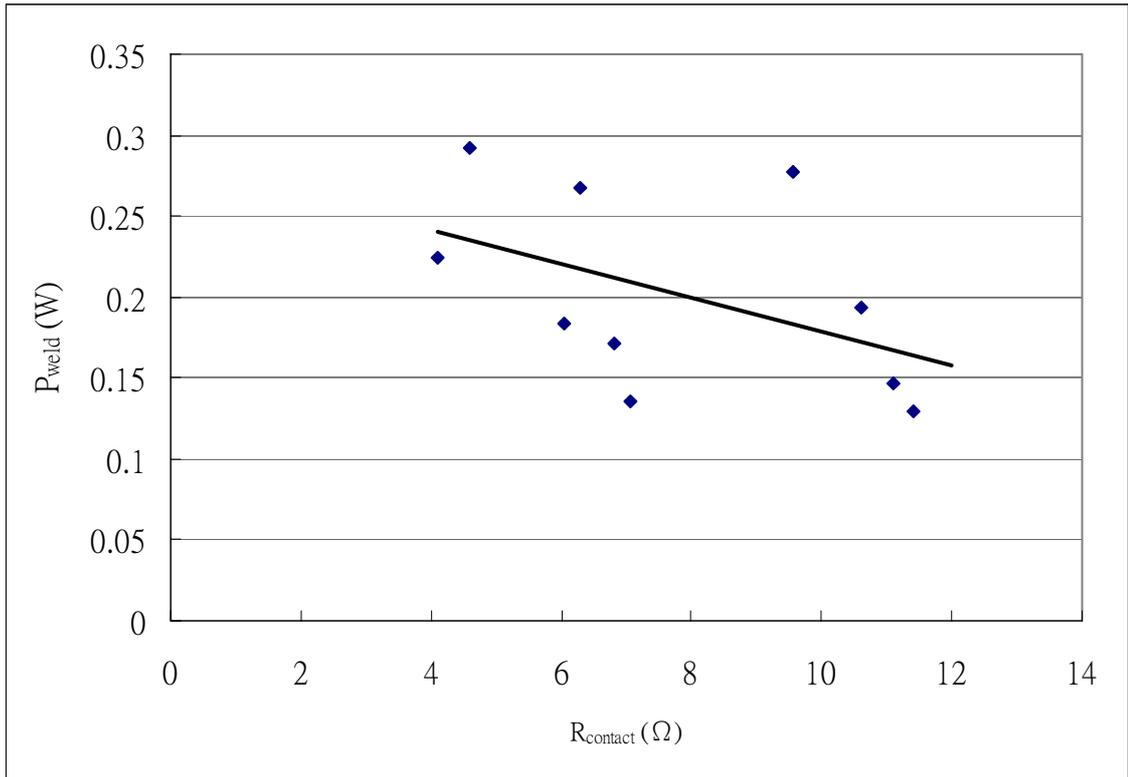
圖表 4-6 接觸壓力與接觸電阻關係圖



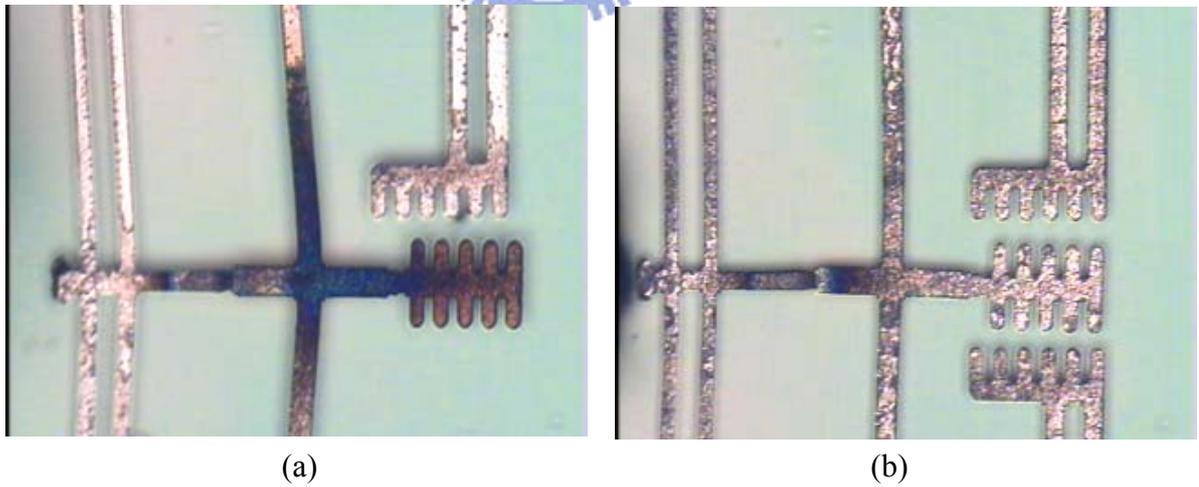
圖表 4-7 在不同接觸壓力與接觸電阻下進行銲接的結果圖



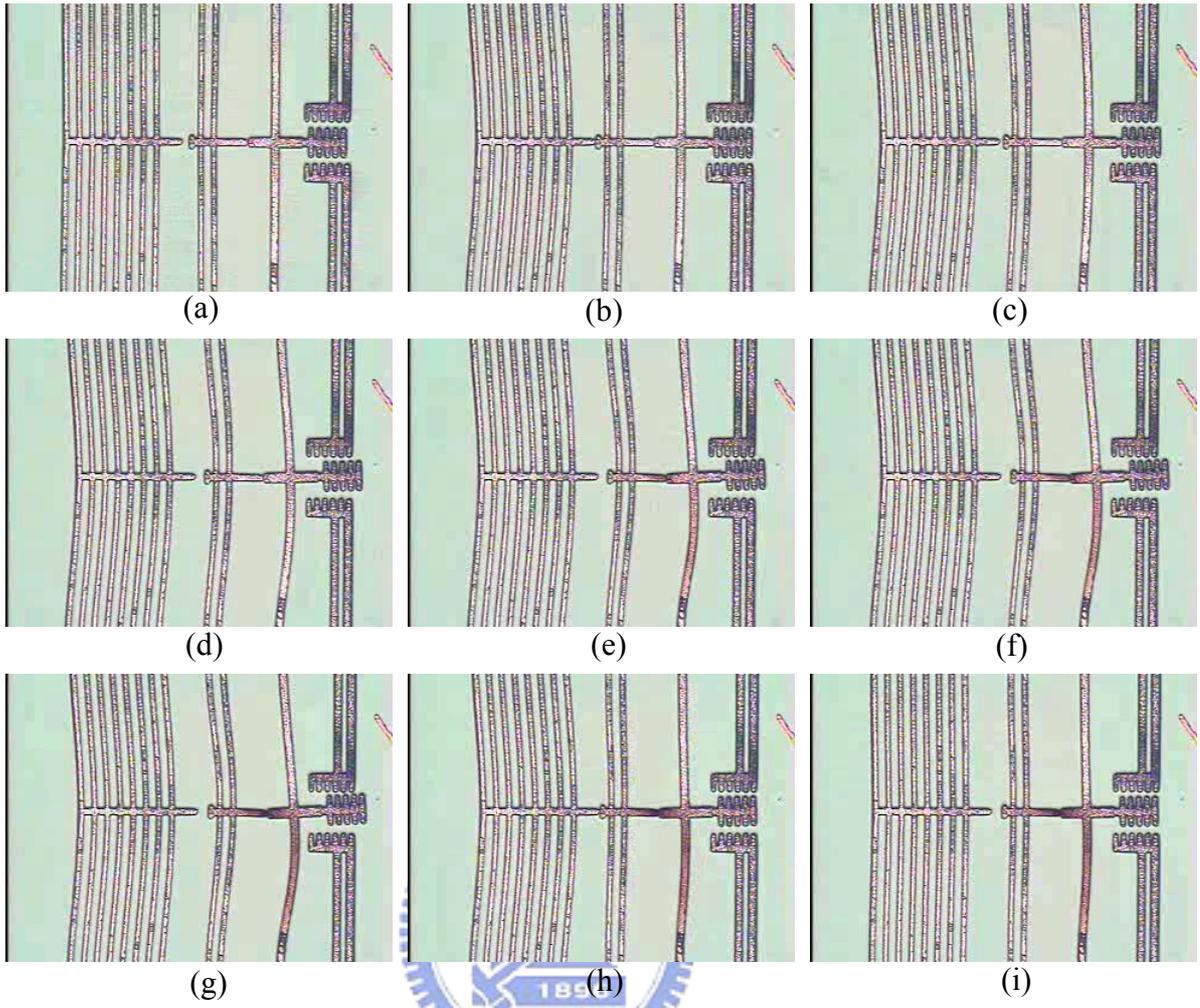
圖表 4-8 不同初始接觸電阻在接合時銲接部位的電阻



圖表 4-9 不同初始接觸電阻在接合時所始用的功率



圖表 4-10 (a)在低接觸電阻下的銲接結果 (b)在高接觸電阻下的銲接結果。



圖表 4-11 微銲接測試流程

# 第 5 章 結論

## 5.1 總結

在本論文中，已將二維微銲接結構進行了設計、模擬、製作與量測測試；結果中使用電鍍鎳金屬製作元件，也能夠成功的進行元件致動與達成預期的微電阻銲的目標。其中，在模擬中我們可以了解應用在微電阻銲中的 V 型樑致動器，長度、寬度與並聯數目是重要參數，適當的搭配將可減少元件尺寸與達成實驗目的；在最後微銲接的實作上，結果可以清楚的看出，接觸電阻會因接觸表面的大小形貌有影響外，接觸壓力也是主要影響的參數之一；微銲接的成功與否，則主要受到接觸電阻與接觸壓力所影響，在本論文中使用的幾何尺寸，接觸電阻範圍在  $4.6\sim 12\Omega$  之間，可以成功的達成接合，但接觸壓力的大小則會影響到最後的銲接品質，較大的接觸壓力能夠有較好的銲接品質，但是相對也消耗較高的功率。由本論文的結果與設計，相信在未來將微銲接技術應用在三維立體結構中，會有相當的幫助與參考價值，同時也讓三維立體結構能夠加入微致動器或感測器的可能大為增加，如此微機電技術在製作與設計上，將能夠大為提升靈活度與實用度。

## 5.2 未來工作

在微電阻鐳的使用上，若能隔絕大氣而在惰性氣體中進行，相信能夠避免掉材料在高溫下氧化的問題，而能在高溫狀態下保持更長時間，增加接合強度與品質。此外，因本論文中鐳接參數與過程的確定，未來希望能夠以此為基礎，更進一步應用在立體元件的組裝上，藉由微電阻鐳的方式，做出以往少見的三維立體微致動器或微感測器元件。



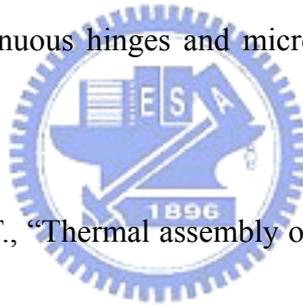
## 參考資料：

- [1] Pister K.S.J., Judy M.W., Burgett S.R., Ffearing R.S., “Microfabricated hinges”, Sensor and actuators A, 66,pp. 292-298, 1998.
- [2] Iwase, E.; Shimoyama, I.; Takeuchi, S., “Sequential batch assembly of 3-D microstructures with elastic hinges by a magnetic field”, Micro Electro Mechanical System, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference, Page(s):188-191, 2002.
- [3] Syms, R.R.A.; Gormley, C.; Blackstone, S., “Surface tension powered self-assembly of 3D MOEMS devices using DRIE of bonded silicon-on-insulator wafers”, Demonstrated Micromachining Technologies for Industry IEE Seminar, 29 March 2000.
- [4] Syms, R.R.A., “Equilibrium of hinged and hingeless structures rotated using surface tension forces”, Microelectromechanical Systems, Journal, Volume:4 Issue:4, Page(s):177-184, Dec. 1995.
- [5] Ebefors, T.; Kalvesten, E.; Vieider, C.; Stemme, G., “New robust small radius joints based on thermal shrinkage of polyimide in V-grooves”, Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97., Volume: 1, Page(s):675-678, 16-19 June 1997.
- [6] Kaajakari, V.; Lal, A., “Electrostatic batch assembly of surface MEMS using ultrasonic triboelectricity”, Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference, Page(s):10-13, 21-25 Jan 2001
- [7] Lai, K.W.C.; Hui, A.P.; Li, W.J., “Non-contact batch micro-assembly by centrifugal

force”, Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference, Page(s):184-187, 20-24 Jan. 2002.

[8] Kevin F. Harsh, Victor M. Bright, Y.C. Lee, "Solder self-assembly for three-dimensional microelectromechanical systems", Sensors and Actuators, 77, Page(s): 237–244, 1999.

[9] Edward S. Kolesar\*, Matthew D. Ruff, William E. Odom, Jeffery T. Howard, Simon Y. Ko, Peter B. Allen, Josh M. Wilken, Richard J. Wilks, Jorge E. Bosch, Noah C. Boydston, "Three-dimensional structures assembled from polysilicon surface micromachined components containing continuous hinges and microrivets", Thin Solid Films, 398-399, Page(s): 566–571, 2001.



[10] Fedder, G.K.; Howe, R.T., “Thermal assembly of polysilicon microstructures”, Micro Electro Mechanical Systems, 1991, MEMS '91, Proceedings. ‘An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots’. IEEE, Page(s):63-68,30 Jan.-2Feb. 1991.

[11] G.K. Fedder, J.C. Chang, and R.T. Howe, “Thermal assembly of polysilicon microactuators with narrow-gap electrostatic comb drive”, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1992. 5th Technical Digest., IEEE 22-25 June 1992 Page(s):63 - 68

[12] Jianglong Zhang, Y.C. Lee, "Thermal Based Angle Fixing For Micromirrors", The 12th international Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston,

June 8-12. 2003.

[13] W. Riethmuller, and W. Benecke, "Thermal Excited Silicon Microactuators", IEEE Transactions on Electron Device, vol. 35, pp. 758-763, 1988.

[14] H. Guckel, J. Klein, T. Christenson, K. Skrobis, M. Laudon, and E.G. Lovell, "Thermal-Magnetic Metal Flexure Actuators", Proceedings of Solid-State Sensor and Actuator Workshop, pp. 73-75, 1992.

[15] L. Que, JS. Park, and Y.B. Gianchandani, "Bent-Beam Electro-Thermal Actuators for High Force Application", IEEE conf. on Micro Mechanical Systems, Orlando, Jan. pp.31-36, 1999.

[16] Liwei Lin and M. Chiao, "Electrothermal Responses of Lineshape Microstructures," Sensors and Actuators, Vol. A55, pp. 35-41, 1996.

[17] Que, L., Park, J.-S., and Gianchandani, Y. B., "Bent-beam electrothermal actuators---part I: single beam and cascaded devices," J. Microelectromechanical systems, vol. 10, no. 2, pp.247-254, 2001.

[18] Michael J. Sinclair, "A High Force Low Area MEMS Thermal Actuator", Inter Society Conference on Thermal Phenomena, vol. 1, pp. 127-132, 2000.

