

國立交通大學

機械工程學系

博士論文

結合微致動器之微電阻焊技術於微組裝之研究

Micro Resistance Welding with *In Situ* Micro Actuators for

Micro Assembly

1896

研究生 張駿偉

指導教授 徐文祥教授

中華民國九十九年一月

結合微致動器之微電阻焊技術於微組裝之研究
Micro Resistance Welding with *In Situ* Micro Actuators for
Micro Assembly

研究生：張駿偉
指導教授：徐文祥

Student: Chun-Wei Chang
Advisor: Wensyang Hsu



A Dissertation
Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
PhD
in

Mechanical Engineering

January 2010

Hsinchu, Taiwan

Micro Resistance Welding with *In Situ* Micro Actuators for Micro Assembly

Student : Chun-Wei Chang

Advisor : Wensyang Hsu

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

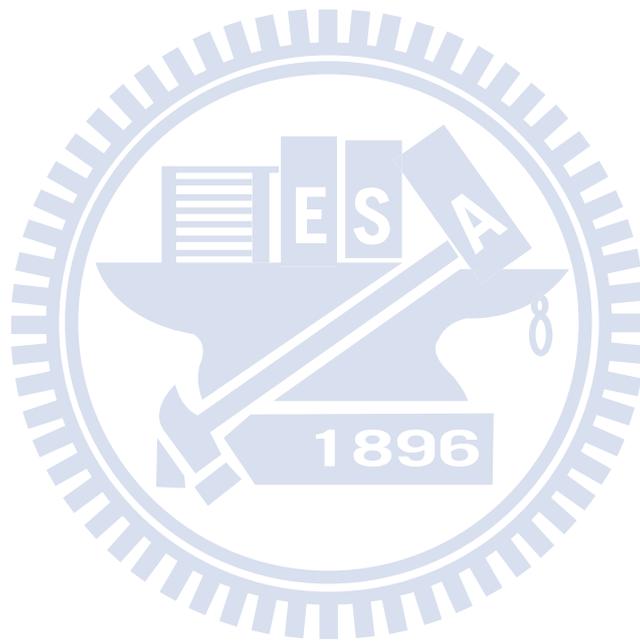
Abstract

Here, micro resistance welding with *in situ* micro actuators and corresponding two-dimensional (in-plane) and three-dimensional (3D) micro assemblies are proposed, including designs, fabrications, measurements, tests and discussions. Traditionally, resistance welding is a common scheme of assembly in macro scale by pressing two workpieces with current passing through to generate joule heating at contact region due to high contact resistance. There are, however, few studies focused on micro resistance welding with micro actuators in micro world. Under assistance of *in situ* micro actuators next to welding regions, increasing efficiency of welding energy, providing easy-controlled welding pressure and avoiding manual misoperation can benefit micro resistance welding. The scheme proposed here would be helpful in automation of micro assembly.

First, in-plane micro assembly with electroplated nickel micro structure is proposed to verify the practicability of micro resistance welding and understand the feasible ranges of welding parameters. The calibrated initial contact resistance is shown to decrease with the increasing contact pressure. In addition, stronger welding strength is achieved at a smaller initial contact resistance, namely, a larger clamping force would enhance the welding strength as large as 3.09 MPa at contact resistance of 2.7 ohm here. The input welding energy is also found to be a critical factor. In our tests, providing higher welding energy, such as 1 J, yield also increases to be 100%. In this case, the feasibility of the proposed technique is confirmed.

After this feasible study, three-dimensional micro assembly of hinged nickel micro devices by magnetic lifting and micro resistance welding is further developed. Lifting the released micro structure to different tilted angles is accomplished by controlling positions of a magnet beneath the device. Micro resistance welding is utilized for immobilizing the tilted structure. As mentioned, the micro actuators also used to provide necessary pressure. The proposed technique is shown to immobilize micro devices at controlled angles ranging from 14° to 90° with respect to the substrate, which is a difficulty to other techniques. Design parameters such as the electro-thermal actuator and welding beam width are also investigated. It is found there is a trade-off in beam width design between large contact pressure and low

thermal deformation. Finally, a lifted and immobilized electro-thermal bent-beam actuator is shown to displace upward about 27.7 μm with 0.56 W power input to demonstrate the capability of electrical transmission at welded joints by this proposed technique. With demonstration and characterization of micro resistance welding by *in situ* electro-thermal micro actuators, not only the passive micro structures but also the active micro structures which need electrical connections can be assembled with this proposed method.



結合微致動器之微電阻焊技術於微組裝之研究

學生：張駿偉

指導教授：徐文祥

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究特色是提出結合微熱致動器於微電阻焊技術並應用於微元件二維及三維的組裝，內容包含機構與元件設計、製造、與測試。雖然電阻焊技術已在傳統機械領域中廣泛應用，但以往並沒有任何將微致動器運用於微尺寸結構的微電阻焊技術之相關研究。電阻焊的原理是利用兩受壓物件會有高電阻特性，通過電流時可在接觸區域產生高溫，進而形成熔接接合。本研究利用金屬面型微加工技術，結合電熱式微致動器與待焊接元件在同一晶片上，可有效利用加工能量，提供良好接觸壓力控制，避免徒手操作的誤差，對微組裝自動化可有所助益。

本研究第一部份先開發平面式的微組裝技術，來驗證以微熱致動器進行微電阻焊的可行性，並建立相關元件及焊接參數的可行範圍。本研究發現初始接觸電阻會隨著接觸壓力的增加而減少，而較小的初始接觸電阻可以增加焊接強度，也就是較大的接觸壓力（接觸壓力 3.09 MPa 時，接觸電阻為 2.7 歐姆）能夠增加焊接強度。另外，也發現焊接能量是可靠度之重要參數。在本研究中，輸入超過一定焊接能量時，在此是 1 焦耳，可以使微電阻焊成功率達 100%，確認了應用微熱致動器於微電阻焊之可行性與可靠度。

本研究的第二部分則是進一步開發以微電阻焊技術用於三維微組裝。鎳質微元件透過製程及微絞鍊機構，形成可活動的絞接微結構後，在元件下方放置磁鐵，即可透過改變磁鐵位置，變化磁力來控制其抬昇的角度。微熱致動器在此同樣是用來提供所需的接觸壓力，使微電阻焊可將微元件固定在空間中。研究結果顯示，微元件可固定在 14° 到 90° 間角度範圍，這是其他微組裝技術很難作到的。另外也對相關設計參數的影響進行探討，例如微致動器的尺寸以及焊接樑寬度。結果發現，窄的焊接樑會讓焊接處有高接觸壓力，有利於增加焊接熱量傳遞，但相反地，寬的焊接樑可降低熱應變，減少焊接樑的形變。另外，由於微絞鍊機構在此是由金屬材質構成，具有導電性，可將平面輸入之電源有效傳遞至組裝立起來的立體微元件上，本研究也展示透過三維電阻焊技術所組裝之立體曲臂式微熱致動器，通以 0.56 瓦的電能可產生 27.7 μm 的出平面位移，顯示本研究所提出的微電阻焊技術應用於微組裝時，不但可以組立被動式微結構，也可運用於需要電性導通之主動式立體微元件組裝。

致謝

感謝過去曾經協助過我、為我打氣加油的每個人。因為有你們，讓我一路走來平穩安心。

念博士班、做研究的生活就像是一個人在深山中修行。在這過程當中會經歷許多情緒的起落。研究方向的迷惘、實驗的不確定性、許多的失敗以及最終的成功、深夜的研討會趕稿、文章撰寫以及與審稿委員的來往應答，這點點滴滴都需要靜下來思考判斷，旁人的支持與鼓勵也讓我走得更堅定。一路走來感謝許多人的扶持與協助，讓我最後完成了博士學位。

在這裡要感謝我的指導教授徐文祥老師。老師提供了一個安心、適切且有彈性的研究環境。除了在我需要指引的時候給予方向，老師在這個研究題目上也投注了許多的心力：實驗方向調整、周末與深夜的來回改稿到最後的攻防，老師都提供了很大的幫助。感謝老師。

實驗室夥伴的朝夕相處也培養了密切的情感。感謝涵評學長與君煒學長在製程上面提供了許多寶貴經驗的意見。已經畢業的耕碩 (pot)、昌旗、文川在這個研究題目上的許多初步測試更加確立這個題目的價值。以及實驗室夥伴家聖 (peanut)、毅家 (高手)、元德 (罔夫)、昶志 (HD)、岳剛 (拉可)、啟煥 (smile)、皓宇 (鐵奶)、鎧宇 (胖虎)、軒宇 (頭博)、澤瑋 (小高)、淳旭 (小熊)、佑明 (熱狗)、政涵 (小鍾)、鎮宇 (小江)、欣芸、松岳 (麥可)、正鄴 (該該)，懷念大家相處愉快時光。

我還要感謝我的朋友們，林韋成、林昇豪、康熙坤與我一起經歷許多起起落落。以及偉宗 (金剛)、又仁 (超人)、昱樹 (小樹)、正雄 (大雄)等好友的真心相伴。

最後我要感謝我的家人、父母提供我支持，讓我安心完成學業。以及要謝謝林忠憲在這幾年的陪伴。

駿偉 于 新竹 交通大學

2010.01.11

目錄

Abstract	I
摘要	III
致謝	IV
圖目錄	VII
表目錄	XI
第一章 序論	1
1.1 前言與動機	1
1.2 文獻回顧	3
1.3 研究目的	7
第二章 微組裝之原理與設計	9
2.1 電阻焊原理	9
2.2 靜磁式結構直立	11
2.3 立體微組裝之設計構想	13
2.4 微電阻焊結構之設計	14
2.5 電熱式 V 形樑致動器之理論分析	17
第三章 微電阻焊特性與可行性評估	20
3.1 有限元素模型電腦模擬	20
3.2 微結構製作	24
3.3 微電鑄製程原理	27
3.4 微電阻焊量測	30
3.5 量測結果與討論	33
3.6 結論	38
第四章 立體微組裝技術	39
4.1 立體微組裝設計概念(設計方案一)	39
4.2 尺寸設計	42
4.3 無焊接樑之結構設計 (設計方案二)	46
4.4 微結構製程	48
4.5 電鑄參數測試	49
4.6 立體微組裝實驗架構	51
4.7 微電阻焊在立體微組裝可行性確立	54
4.8 立體微組裝結果與討論	56

第五章 總結與未來工作	67
5.1 總結	67
5.2 未來工作	68
參考文獻	71



圖目錄

- 圖 1 微組裝技術促進微元件發展 (a)直立式電感[1] (b) 直立式風速計[2] (b) 仿生(魚類)流量計[3] (d) 整合多個微光學元件的微光學平台系統[5] 4
- 圖 2 應用於微機電元件的微組裝技術 (a) 機械式取放技術[6] (b)靜電吸引式[9] (c)殘留應力[11] (d)撓性機構[12] (e)磁力[14] (f) 熱動力學致動[15] (g) 表面張力[16] (h)高分子熱收縮 [19] (i) 局部感應熱熔接 [20] (j)磁力塑性變形[21] 5
- 圖 3 電阻焊技術示意圖，壓力以及電流是電阻焊最主要的兩個因素。 10
- 圖 4 鉸接的鎳微結構在外界磁場的影響之下被磁化，並且與外界磁場交互作用，產生出平面旋轉運動，直到結構與外界磁場方向一致為止。 12
- 圖 5 這個研究所提出的立體微組裝概念 (a) 具有鉸鍊的鎳結構受到磁場影響而被磁化產生出平面旋轉而被舉起，(b) 藉由微電阻焊來固定被舉起的結構 13
- 圖 6 焊接測試結構主要可分為三部分(1) 臨場的致動器元件 (Actuation Unit ; AU) (2)焊接單元一 (Welding Unit 1 ; WU1) (3) 焊接單元二 (Welding Unit 2 ; WU2)，另外有一個尺規 (Ruler) 以觀察位移量。 14
- 圖 7 焊接過程三步驟 (a) 預壓階段 (b) 焊接階段 (c)釋放階段 16
- 圖 8 (a)單一 V 形樑熱致動器的結構與工作原理[27] (b) V 形樑熱致動器的受力，其中 f 為外力， F 為固定端的反作用力[27]。 18
- 圖 9 焊接結構的尺寸，這個實驗的製程能力是這些決定尺寸的主要依據。其中致動器的樑長以及 V 型樑的數目，必須依賴有限元素電腦模擬的結果來決定。 21
- 圖 10 電腦模擬結果(a) 不同樑長致動器的最大位移量 d_{max} (b)不同數量並聯的 V 型樑致動器在不同位置上所能夠輸出的力量，以及在不同位置上的力量要求 (c) $10\ \mu m$ 的區域放大 23
- 圖 11 微結構製程步驟(沿著 AA'線段的剖面圖) (a)微結構的上視圖(b)成長氧化層 (c)圖案化的光阻犧牲層以及濺鍍黏著層與電鑄起始層 (d)電鑄鎳

金屬 (e) 釋放結構	26
圖 12 製作完成測試結構的 SEM 圖以及各部分尺寸。	30
圖 13 測量時之電路接線圖。	31
圖 14 硬體設備架設。包含一台個人電腦，兩台電源供應器，光學顯微鏡以及 CCD 攝影機。	32
圖 15 電阻焊過程 (a) 起始位置 (b) 焊接中 (c) 焊接完成	34
圖 16 接觸壓力與初始接觸電阻之關係	35
圖 17 在成功焊接的測試當中，初始接觸電阻與後接觸電阻之間的關係	36
圖 18 供應不同能量下的焊接成功率	37
圖 19 焊接強度隨著不同初始接觸電阻而變化。	38
圖 20 立體微組裝的結構設計(a) 在外加磁場的情況下，搭配電熱式微致動器的微電阻焊 (b) 焊接處的放大視圖 (c) 施加元件驅動電壓給已經組裝完成的微元件，電流經過焊接接合處從 P_1 流向 P_3 。	41
圖 21 在焊接處 (welding site)的幾何形狀參數，包含了有間距 (G_1, G_2 以及 G_3)還有焊接樑的寬度 (W_C)	43
圖 22 藉由有限元素分析所得到 V 型樑致動器的輸出能力 (a) 並聯不同數目的 V 型樑致動器在不同位置的出力以及出力要求 (b) 將位置 $21\ \mu\text{m}$ 附近的放大	45
圖 23 無焊接樑微結構的設計概念。與原本設計最大的不同點在於沒有焊接樑，致動器不需要推動焊接樑，可以降低對於致動器出力的要求。	47
圖 24 無焊接樑微組裝結構尺寸。此種設計對於致動器出力的要求較寬鬆，因此可沿用先前所設計的尺寸，且為了維持間距與上個有焊接樑結構的設計相同，也就是 G_4 與 G_5 的總合為 $21\ \mu\text{m}$ ， G_4 維持 $5\ \mu\text{m}$ ，因此 G_5 必須為 $16\ \mu\text{m}$ 。	47

- 圖 25 立體微組裝元件製程 49
- 圖 26 電鑄 40 分鐘之後，並沒有形成預期中的釘環蕈傘微結構。 50
- 圖 27 電鑄 60 分鐘之後，已經能夠形成封閉的釘環結構，並且蕈傘形狀也已經成形。蕈柄的高度應等同於光阻模仁厚度。 50
- 圖 28 電鑄 80 分鐘之後，形成封閉的釘環結構，並且蕈傘形狀繼續增長。 50
- 圖 29 (a) 實驗架設示意圖 (b) 可以固定試片 (specimen) 的壓克力平台，在試片下方有可以移動的磁鐵 (magnet) (c) 隨著磁鐵改變不同的位置， X_{magnet} ，微結構立起來的角度也會不同。 53
- 圖 30 焊接處的近拍 SEM 照片，從外觀來看，致動器前端與旋轉軸有熱熔接痕跡，可將微元件固定。 55
- 圖 31 無焊接樑微組裝結構照片。兩側旋轉軸焊接完成之後能夠將微元件直立固定在空間中，驗證了微電阻焊用在立體微組裝的可行性。此簡化的測試結構會有電流不平衡的現象。導致致動器右側容易產生挫曲。 55
- 圖 32 成功將第一款結構組裝在出平面的位置上，設計的微元件有 (a) 致動器與 (b) 曲折式結構 56
- 圖 33 在焊接程序之前，磁鐵位置與元件旋轉角度之間的關係 57
- 圖 34 光學顯微鏡拍攝的照片：立體微組裝的焊接過程 (a) 製造完成後的結構在致動器前端、焊接樑、轉軸與固定錨墊之間都有間距 (b) 致動器推動焊接樑與轉軸接觸，使得焊接區域 (welding site) 有適當的接觸壓力 (c) 焊接完成之後致動器停止施力放開焊接區域。 59
- 圖 35 經過立體微組裝之後的微元件，這三個微元件被固定在三個不同的角度，分別是 14° ， 35° 以及 90° 。這裡展示了這個研究所提出的立體微組裝技術能夠將元件組裝在各種不同的角度。 60
- 圖 36 磁鐵位置介在 0 至 12 mm 之間，焊接前與焊接後的角度變化。 61
- 圖 37 三種不同焊接樑寬度微元件的動態電阻曲線：(a) $W_C = 30 \mu\text{m}$ (b) $W_C = 11 \mu\text{m}$ 以及 (c) $W_C = 4 \mu\text{m}$ 。 63

圖 38 掃描式電子顯微鏡所拍攝的照片，在焊接之後焊接樑的熱變形: (a) $W_C = 30 \mu\text{m}$ (b) $W_C = 11 \mu\text{m}$ 64

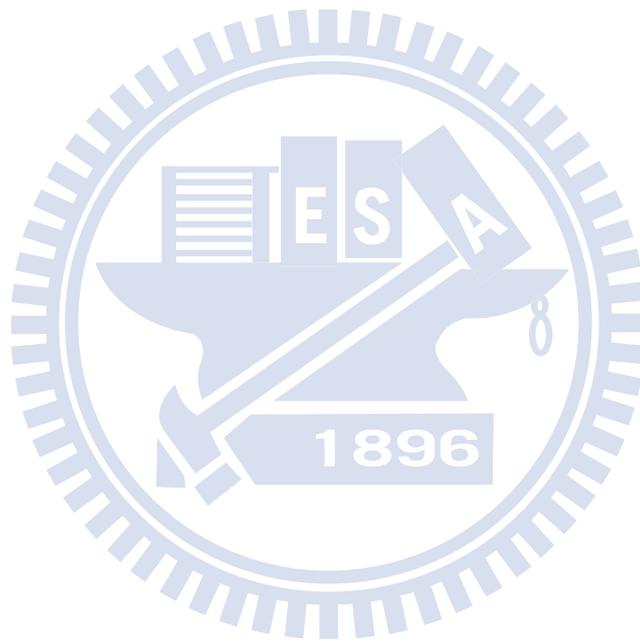
圖 39 測試已經組裝完成的微致動器 (a) 原來狀態 (b) 在供應 0.56 瓦特的電力之後，前端向上位移了 $27.7 \mu\text{m}$ 。 66

圖 40 側式焊接立體微組裝，未來可嘗試的另一種結構配置，期望能夠更精確控制角度。 69



表目錄

表 1 有限元素電腦模型中所採用的鎳金屬材料特性 [29]	21
表 2 黃光參數表.....	27



第一章 序論

本章將會闡述這個研究的動機，以及目前學術界發展立體微組裝技術的現況、所用的方法手段，從中了解所面對的研究課題以及困難。進一步確立立體微組裝的研究目標。

1.1 前言與動機

微機電系統 (Micro-Electro-Mechanical System) 技術是一種統合機械、電子、生醫、材料、光電、化學等多項領域整合之微型化技術。由於現今微機電系統技術之發展，實現將機電、生醫、光電等系統積體化以及微型化之可能。微機電系統較傳統能夠大幅減少生產成本、批次量產、低耗能、快速反應時間以及更高之解析度等優點。微機電系統起源自 1960 年代對於半導體製造技術之研究，繼承半導體製造技術之平面工藝，透過各種面型加工技術 (光蝕刻、薄膜沉積與蝕刻等) 製造平面二維空間上的微米尺寸機械元件，再加上本身特有之體型微加工及犧牲層技術釋放懸浮的可動結構，形成各式微感測器、微致動器與微結構。由於機械可動件是微機電系統相較於半導體電子元件來說，主要的特色，由於“可動”的需求，也增加了微機電系統的功能與特性。

微機電系統包含許多的領域，不同領域的應用也產生不同的製程需求以及元件特性。若是按照運動方向分類，一般可分為 (1) 元件運動方向與晶片平面平行的共平面式 (in-plane motion) 或是 (2) 元件運動方向與晶片平面垂直的出平面式 (out-of-plane motion)。半導體製造技術已經發展多年，已被廣泛應用在微電

子元件以及微機電系統上，但是半導體製造技術先天上是一種平面式的製造技術，因此微機電系統元件在出平面方向上的發展受到相當大的侷限。

將微機電系統自平面二維空間擴展至立體三度空間將能夠增加微機電系統的自由度與靈活度，擴大應用範圍。將現有微機電元件發展至立體三度空間亦可提供更多的效能。因此若能夠透過原有成熟的平面製造技術，搭配立體微組裝的出平面旋轉方式，提供在第三個維度上的自由度，將可快速實現立體微機電元件的概念。

平面式工藝技術製造元件之間的電路連接，可透過許多方式整批處理。例如蒸鍍或濺鍍金屬薄膜，再以黃光微影定義圖案，最後蝕刻產生所需的連接線。但是在平面結構擴展至立體結構時，元件的三維空間微組裝、致動能量、感測訊號的輸入與輸出都將遭遇難題。尤其當尺寸縮小，傳統的組裝方式已經無法應用在微元件上。元件的自我組裝成為一個重要的課題。因此這個研究期望發展立體空間中的微機電系統元件以及解決元件自我組裝、電路連接等問題。

1.2 文獻回顧

三維空間立體組裝已經被許多學者研究並且已經用來增強微元件的性能，例如立體電感[1]，並且用來研發多樣化的微元件與結構，例如熱線式風速計[2]，流量計[3]、微夾爪[4]以及微光學平台[5]等（圖 1）。

抬昇以及固定微結構是立體微組裝兩個重要的手段。過去有許多方法（圖 2）被提出抬昇(舉)微結構，例如機械式的取放技術 (pick-and-place technique) [6-7]，靜電吸引式 [8-9]，殘留應力 [10-11]，撓性機構 [12]，磁力 [13-14]以及熱動力學致動 [15]等。而大多數在這些研究當中，要固定微結構往往都需要仰賴鎖定機構的協助 [6-15]。

除了上述的兩步驟組裝方法，有其他的方式是將抬昇與固定的兩個功能在同一個步驟當中完成。這些方法包括了表面張力組裝 [16-18]，高分子熱收縮致動 [19]，局部感應熱熔接 [20]，以及磁力塑性變形 [21]等。舉例來說，表面張力用在立體微組裝技術是基於將材料（例如焊錫）加熱成為液態，此時表面張力可成為驅動力量將微結構拉起。這是因為液態的材料會傾向於降低表面能。冷卻固化之後即可固定微結構。在這個技術當中，角度的控制主要是依賴熔化材料在組裝之前的尺寸。而塑性變形是另一種已經被驗證可行的方法。為了要達到材料塑性變形的條件，角度的改變量必須要夠大，超過彈性變形的範圍。因此在小角度的組裝是有困難的。並且塑性變形後材料應力的釋放也會影響組裝之後的角度。一般來說，這些方式的組裝角度範圍都有受到相當的侷限，並且不容易達到主動控

制角度的目的。無論是兩步驟組裝或者是單一步驟組裝，電性的連接也都有被部分文獻所考慮 [1, 6, 7, 12, 17, 19, 20]。

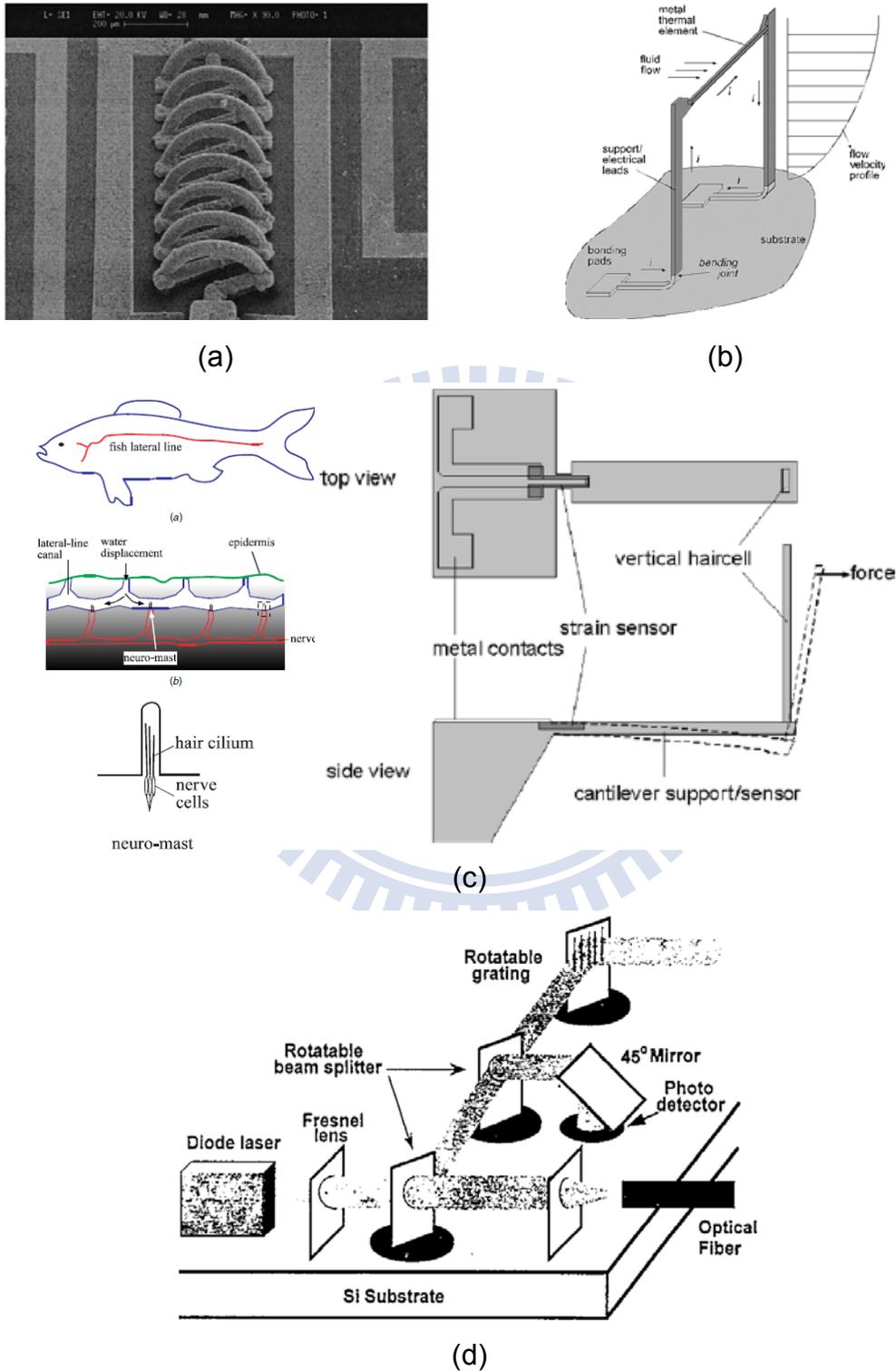


圖 1 微組裝技術促進微元件發展 (a)直立式電感[1] (b) 直立式風速計[2] (b)仿生(魚類)流量計[3] (d) 整合多個微光學元件的微光學平台系統[5]

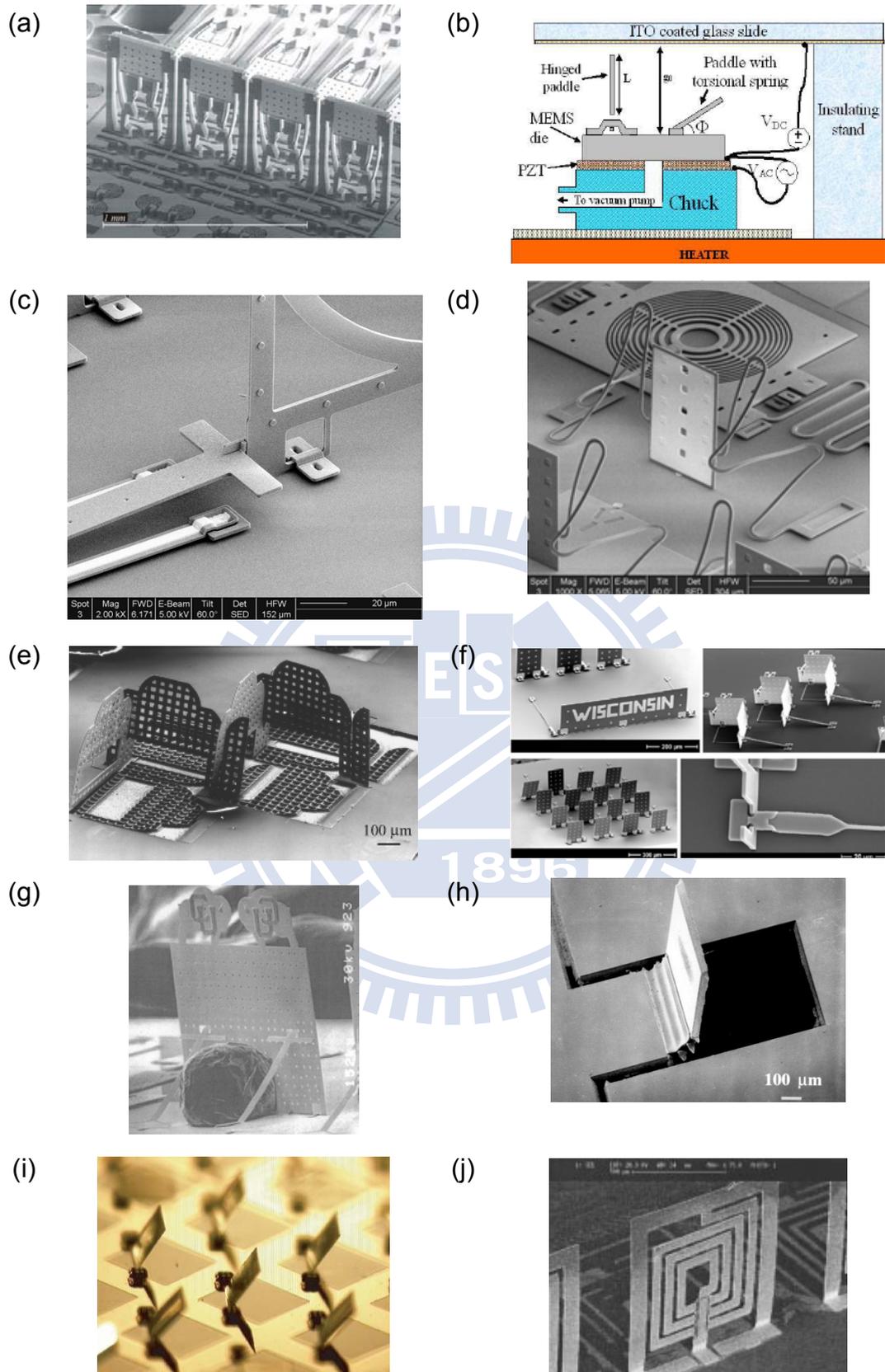


圖 2 應用於微機電元件的微組裝技術 (a) 機械式取放技術[6] (b)靜電吸引式 [9] (c)殘留應力[11] (d)撓性機構[12] (e)磁力[14] (f) 熱動力學致動[15] (g) 表面張力[16] (h)高分子熱收縮 [19] (i) 局部感應熱熔接 [20] (j)磁力塑性變形[21]

焊接是一個在傳統機械領域相當普遍的組裝方式，它主要藉由熔化兩個工件接觸面上的部分材料，來達成熔接的目的。在許多不同的焊接技術當中，電阻焊是一種不需額外焊料的熔接技術。其主要的原理是當電流流過兩個被施加壓力而接觸工件的時候，因接觸面存在有電阻，而會產生熱量（焦耳熱, joule heating）來熔化接觸面的材料。但是在文獻中，微米尺寸下的微電阻焊卻很少被提及。

盡作者最大努力所收集到的文獻當中，提及微電阻焊技術的研究相當缺乏。其中以多晶矽材料電阻焊的方式組裝微結構在 1991 年被提出[22-23]為代表文獻。此研究的概念是在結構製作完成後，使用熱熔接接合（電阻焊）以及切斷，重新組合同一平面的結構。但是受限於當時的技術，使用徒手操作探針施加壓力於焊接點上，再通予焊接電流使接觸點形成高溫熔融材料，熔接兩側的多晶矽結構。但是當時的徒手操作以及多晶矽容易在空氣中氧化形成先天氧化層（native oxide），因此在焊接時不容易形成穩定的電性接觸，導致焊接困難。

在傳統的焊接中，電阻焊使用導電的金屬材料進行焊接（而非多晶矽），就具有不需要額外的焊料材料的優點。與其他需要額外材料的組裝方式相比較，微電阻焊在半導體製造技術上佔有先天的優勢。並且由於欲焊接的兩側材料皆為導體，焊接後之接點亦為同材料，在電性的連接，也是另外一項本質上的優點。

微電阻的發展至此由於上述種種限制，依舊停留在同一平面結構的組裝上，使得在傳統機械加工領域中被廣為利用的電阻焊技術，在縮小尺寸之後的發展缺少廣泛而深入的研究。

1.3 研究目的

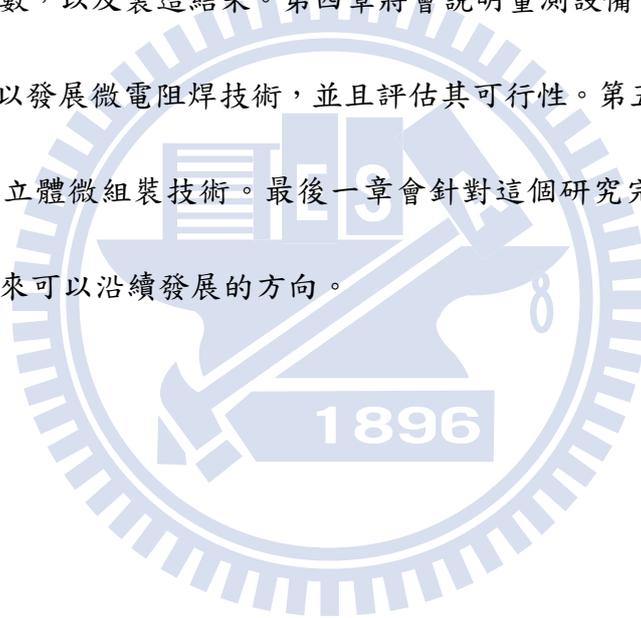
綜合以上，在立體微組裝的課題上，有許多已經開發的技術，例如：微鉸鏈機構配合熔融材料產生的表面張力、磁力微組裝與自我鎖定機構或是感應電流加熱銲錫，以上方式皆可解決 (1)如何將結構立起與 (2)如何將結構固定的問題，並且可以成功組裝被動的結構 (例如微鏡面、微平板)。但是組裝的角度無法主動地控制，而且角度的範圍有所侷限。而電阻焊在傳統機械加工的領域中已經被廣泛使用，其一般的特色為較其他焊接快速、有效率、低污染以及不需要額外的填充料 (焊料)，並且搭接的材料以及焊接點皆是導電材料，理論上可提供良好的電性連接。當尺寸縮小到微米尺寸之後，有潛力可應用於微機電系統元件的立體微組裝上。雖然多晶矽的電阻焊，曾經有過研究，但是受限於當時的技術，組裝的層次尚停留於平面組裝，並且缺乏深入的研究。

由以上可知對於微致動器與微感測器目前缺乏更有彈性的立體微組裝技術，多樣化且可主動控制角度的立體微組裝。因此此研究的目標為發展應用於微致動器與微感測器立體微組裝的微電阻焊技術。

因此這個研究的第一階段首先將針對其中的關鍵技術 - 微電阻焊，做相關的測試研究。首先利用金屬面型微加工技術，製造平面的電阻焊接測試結構，測試焊接平面式結構之效果，並且了解其中各項實驗參數對於微電阻焊的影響，找出其中可行的參數搭配。另外，焊接點的機械強度決定是否能夠穩固組裝，因此焊接點的焊接強度也將會做相關的測試。

這個研究的第二階段會借助第一階段的研究成果，了解電阻焊在微機電系統的可行性後，應用在微致動器或微感測器的立體微組裝上，首先會設計適當的微致動器或者微感測器，以及組裝過程中適當的電阻焊元件，期望可將元件立體微組裝後，能夠順利運作維持其原本的功能。

這個研究第一章對於相關的研究文獻，以及發展現況做一回顧。了解發展的瓶頸與困難。第二章將會說明這個研究的原理與理論，第三章將會解釋焊接測試結構的製程與參數，以及製造結果。第四章將會說明量測設備、步驟，以及討論電阻焊結果，用以發展微電阻焊技術，並且評估其可行性。第五章將會對說明這個研究所提出的立體微組裝技術。最後一章會針對這個研究完成的成果做出結論，並且規劃未來可以沿續發展的方向。



第二章 微組裝之原理與設計

本章將會介紹微組裝所會應用到的原理，包含了有電阻焊的原理、靜磁式致動的原理、立體微電阻焊的概念以及微焊接技術可行性測試之結構設計概念。

2.1 電阻焊原理

在這裡，將會電阻焊的原理作一般性的介紹。電阻焊的定義為兩塊金屬材料在接合處由於電流流過時，兩者介面處的電阻生熱而使其緊密結合[24]，如圖 3 所示。在電阻焊的過程前、中、後都有壓迫的力量使得兩金屬材料緊密壓合，在焊接的過程中通以適當的電流，使得工件間的接觸面因表面微起伏而存在的接觸電阻，產生焦耳熱效應 (Joule Heating)，當溫度上升到材料的熔點，即產生熔融的效果，逐漸降低電流後，持續施壓兩工件，待冷卻後形成接合。電阻焊的接合必須仰賴適當的電流、機械壓力與時間的配合協調。首先必須要產生足夠的熱量使得部份的金屬形成熔融狀態，在持續施加接觸壓力的狀況下，接著冷卻以產生足夠的強度使得工件接合。電流以及壓力必須使得熔融金屬得以產生，但是又不至於讓熔融金屬溢出焊接區域。供應電流的時間 (焊接時間)不可過長，以避免過度加熱電極與工件的介面，使得電極熔化損壞焊接設備。

電阻焊所需要的熱量仰賴電流流過工件介面間的電阻，以一個導電體為例，當電流通過時產生的熱量與三個因素有關：電流、電阻與時間，這三個因素影響產生熱量的多寡，可由下列式子表達：

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

另外上式也可以用電壓、電阻與時間表示成

$$Q = V^2 t / R \quad (2)$$

其中 Q 為產生的熱量 (焦耳, joule) I 為通過的電流 (安培, amperes)

R 為電阻值 (歐姆, ohm) t 為電流通過的時間(秒, second)

V 為電壓值 (伏特, voltage)

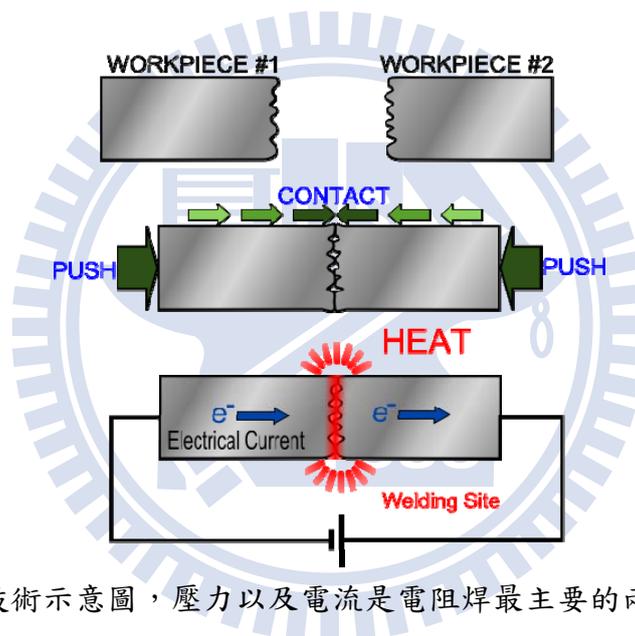


圖 3 電阻焊技術示意圖，壓力以及電流是電阻焊最主要的兩個因素。

由式(1)可知，在此三項因素中，產生的熱量與電流是平方關係，而電阻與焊接時間為一次方的關係。電流在電阻焊的過程中，扮演相當重要的角色。在傳統的電阻焊技術中，一般透過變壓器的轉換，能夠通予欲焊接工件適當的電流，並且可以調整輸入電流的頻率以及振幅，緩升及緩降電流，以達成焊接前的預熱以及焊接後的緩冷。

在傳統電阻焊過程中，其中的電阻值主要與材料電阻率、工件的表面狀態、

以及焊接設備的電極材料、尺寸與形狀，以及由電極施加在工件上的壓力等因素有關。

而焊接時間的長短亦會影響熱量的大小，一個長時間但是小電流的焊接，與一個短時間但是大電流的電阻焊，都可以產生相同的熱量，但是就效率來說，大電流的焊接可大幅減少所需要的焊接時間，因熱量與電流為平方關係。長時間的焊接，會使得熱量有機會傳導至焊接區域以外，容易使得其他區域的材料受熱產生熱變形。

進行電阻焊時，主要可分為三部分：首先是預壓階段，有一適當的壓力使得兩側的工件在接觸面（點）壓緊接觸；接下來是焊接階段，通予焊接電流逐漸加大，使得接觸面因產生焦耳熱形成熔合；焊接完成後，是壓力維持與釋放階段，此階段持續施壓，並且降低電流使得工件冷卻固化，形成足夠的強度之後，釋放焊接完成的工件。

2.2 靜磁式結構直立

在文獻當中，已經有許多研究解釋鐵磁性材料在磁場中的行為[25]並且利用鐵磁性材料在磁場中旋轉抬昇產生出平面旋轉[26]。在這個研究當中，使用一個外加的靜態磁場，並且讓磁場方向與基板法線方向平行，如圖 4。當一片鎳金屬（鐵磁材料）處於磁場（ \vec{H}_{ext} ）當中，鎳會隨著磁場而被磁化（磁化量 \vec{M}_{mag} ），並且

與外加磁場交互用產生磁力矩 (\vec{T}_{mag}) 作用在材料上。如此一來，鎳結構就會受到力矩的影響產生出平面的旋轉，其可表示為：

$$|\vec{T}_{mag}| = |V_{Ni} (\vec{M}_{mag} \times \vec{H}_{ext})| = V \cdot M_{mag} \cdot H_{ext} \cdot \cos\theta \quad (3)$$

其中 V_{Ni} 是鎳結構的體積， θ 是基板與磁化量之間的夾角。

另外，由於薄膜鐵磁性材料本身的材料特性影響，當厚度與另外兩個方向(長度與寬度)的尺寸相差很大的時候，其磁化的方向會傾向「躺在」薄膜平面上，材料裡容易被磁化的方向稱為易磁化軸 (easy axis)。當磁力矩作用在沒有撓性機構限制住的微結構，它會旋轉直到力矩為零的位置上，這使得結構最後的位置會與外界磁場的方向一致。藉此，可以透過改變磁場方向，來改變結構最後停留的角度位置。

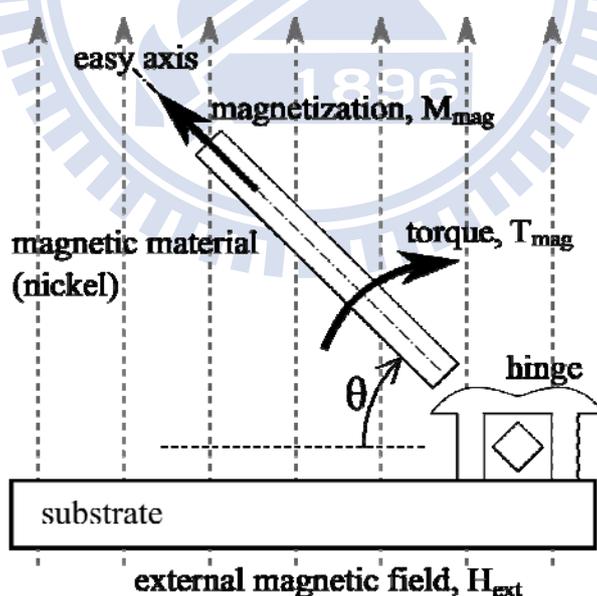


圖 4 銜接的鎳微結構在外界磁場的影響之下被磁化，並且與外界磁場交互作用，產生出平面旋轉運動，直到結構與外界磁場方向一致為止。

2.3 立體微組裝之設計構想

在這裡，藉由鉸接機構、靜磁式致動以及微電阻焊的技術來完成立體微組裝，如圖 5。這個研究裡的微電阻焊技術將會與臨場 (*in-situ*)微致動器配合控制焊接時的接觸壓力大小，將鎳金屬微元件固定在空間中。角度的位置將可以藉由移動磁鐵的位置來主動地控制。微電阻焊在微致動器的協助之下，將可以熔接焊接區域並且將立起在空間中的元件固定在特定的角度。更進一步的立體組裝之設計構想將會在後續的文章當中詳細解釋。

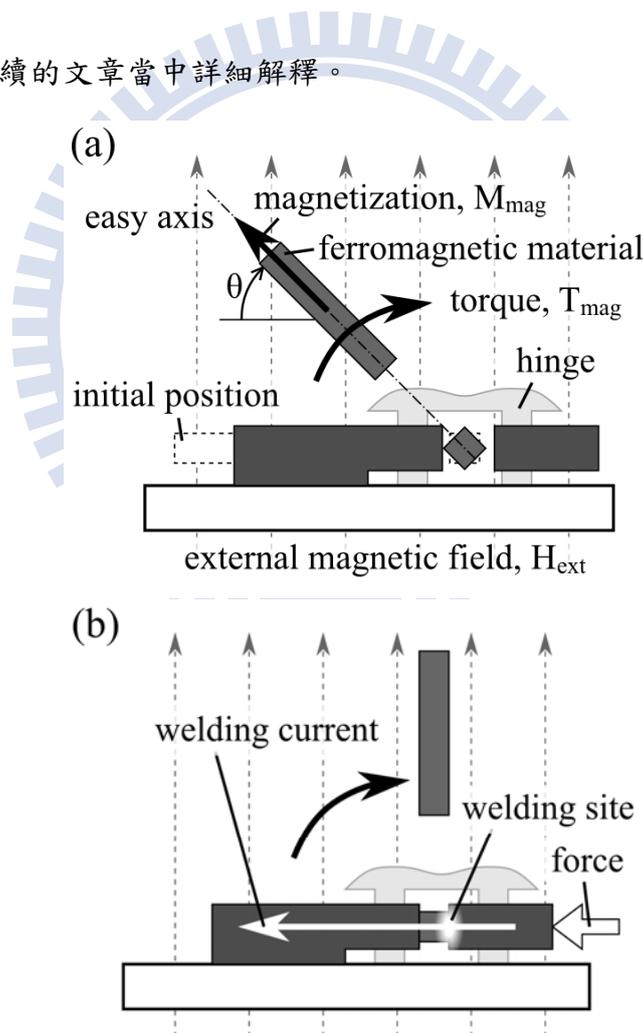


圖 5 這個研究所提出的立體微組裝概念 (a) 具有鉸鍊的鎳結構受到磁場影響而被磁化產生出平面旋轉而被舉起，(b) 藉由微電阻焊來固定被舉起的結構

2.4 微電阻焊結構之設計

本研究中利用微電阻焊的技術固定元件，但此技術在微小尺寸的相關研究卻非常缺乏，為了要了解電阻焊在微米尺寸的特性。這個研究將進行微電阻焊的相關研究。在了解電阻焊的原理之後，可以知道，要達成電阻焊，必須要提供力量使得焊接點接觸，另外需要有電流通路，使電流流過。為了要了解微電阻焊的特性，因此依照上述的兩項要素，設計一個平面式微焊接測試結構。先前文獻曾經提出多晶矽材料的電阻焊技術[22]，但受限於徒手探針提供接觸壓力的限制，不易精細控制其出力。因此這裡設計的結構包含了一組的臨場 (*in-situ*)致動器單元 (actuation unit)以及兩個焊接單元 (welding unit 1 與 welding unit 2)，微焊接結構的設計概念如圖 6所示。

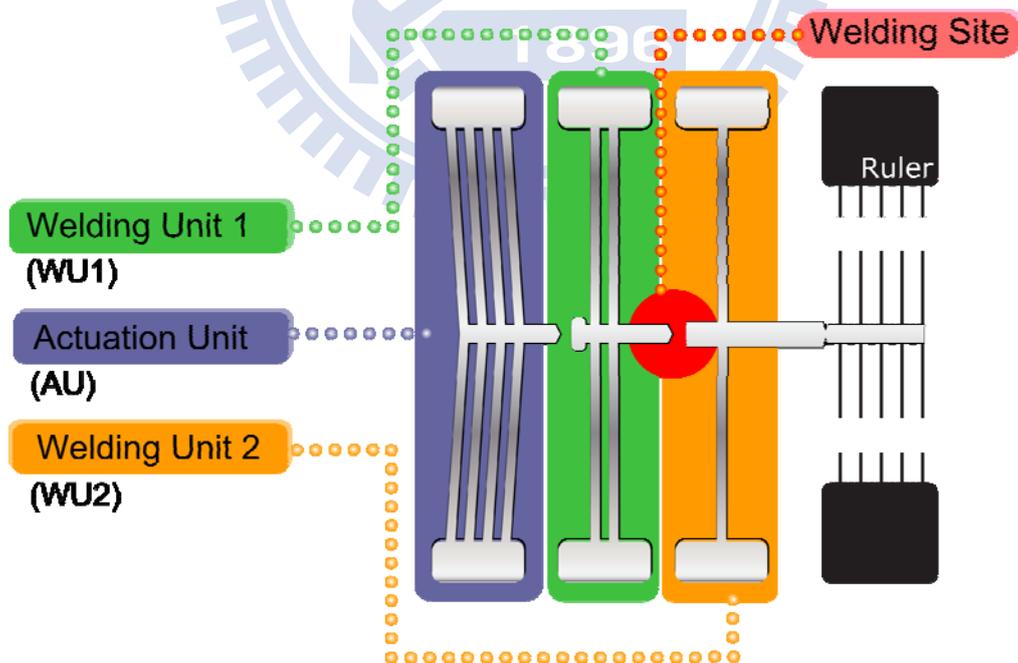


圖 6 焊接測試結構主要可分為三部分(1) 臨場的致動器元件 (Actuation Unit; AU) (2) 焊接單元一 (Welding Unit 1; WU1) (3) 焊接單元二 (Welding Unit 2; WU2)，另外有一個尺規 (Ruler) 以觀察位移量。

整個焊接測試結構可分為三個主要的部分，第一個部分是臨場 (*in-situ*)致動器元件 (actuation unit)，目的在焊接的過程當中提供適當的壓力。由於在微米尺寸使用徒手操作，並不容易準確控制施力大小與方向，因此有必要將此致動元件與焊接單元整合製作在同一晶片上。此致動器單元使用電熱式V形樑致動器，由於V形樑致動器設計容易、串聯多組致動器可達成大出力的要求、較長的V形樑可有較大位移，因此V形樑致動器可符合微電阻焊的需求。焊接單元一 (Welding Unit 1)與焊接單元二 (Welding Unit 2)為欲焊接接合的元件，兩者會在焊接處 (Welding Site)接合。焊接單元一與單元二可視為兩端為固定端的懸臂樑，其彈簧係數可藉由設計適當的長度、厚度、寬度以及選擇材料性質 (楊氏係數)來決定。因此當致動器推動焊接元件一與二時，可模擬為推動兩個彈簧係數不同的彈簧。最後焊接元件二的位移可由其後方帶動的尺規 (Ruler)結構讀出。當兩個焊接元件接觸後，在焊接點形成接觸壓力，當在焊接元件一與焊接元件二上施加電壓時，使得電流流過接觸點。圖 7所展示的是整個微焊接過程可分成三個步驟。

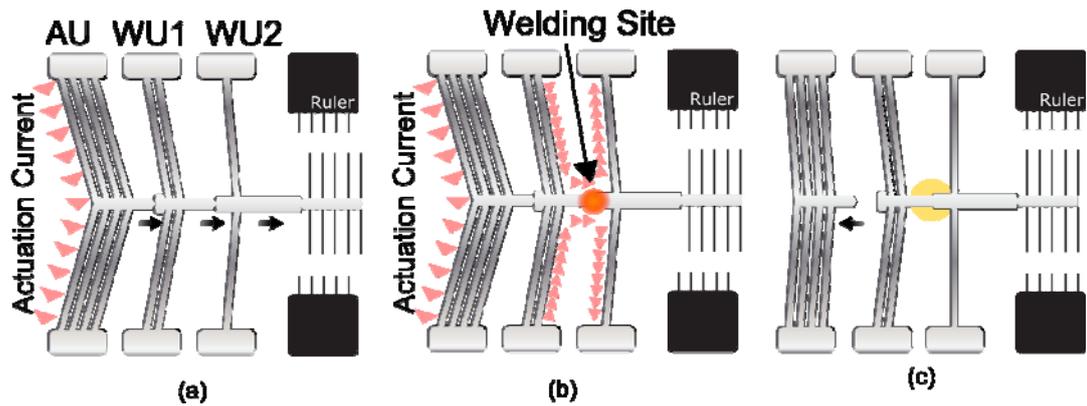


圖 7 焊接過程三步驟 (a) 預壓階段 (b) 焊接階段 (c) 釋放階段

微電阻焊過程可分為三個主要的部分。但是在開始進行前，製造完成的元件各自獨立，互不相接觸，如圖 7 所示。第一個部分是預壓階段，如圖 7 (a) 所示，在此階段當中，使電流 (Actuation Current) 通過致動器元件 (AU) 向前推動焊接單元一 (WU1) 與焊接單元二 (WU2)。在推動的過程中，致動器向前一小段距離後，接觸到焊接單元一，由於可將單元一視為一個線性的彈簧，當致動器在繼續推動單元一時，推動彈簧的位移越大，所需要推動的力量越大。當單元一被致動器繼續推動另外一段距離之後，會接觸到單元二，而單元二亦可視為另外一個彈簧係數不同的線性彈簧。致動器的重點在於必須要能夠推動單元一，並且只得單元一接觸到單元二之後，再往前推動一段距離，使得單元一與單元二之間的介面產生接觸壓力，兩單元互相接觸，此時存在有一個接觸電阻，讓焊接電路接通，以達成預壓階段的要求。

第二個階段是焊接階段，此時維持前一階段致動器的推動力量，在焊接單元一與單元二之間，施加電位差，使焊接電流通過焊接處 (Welding Site)，根據式

(1)可計算產生的熱量。當電流通過焊接點時，由於接觸面上的接觸電阻存在，並且大於結構本身的電阻，因此當電流流過時，在焊接處所產生的熱量會大於結構電阻產生的熱量，因此升溫較快。在散熱方面，由於矽晶片對於微機電元件來說可視為一個儲熱槽 (heat sink)，熱量容易散逸至晶片，而焊接處的位置遠離與晶片接觸的錨墊 (anchor)，因此熱量較其他地方更不易傳導至晶片。

第三個階段是壓力維持與釋放階段。逐漸降低焊接電流，並且繼續維持接觸壓力，使得熔融的焊接處溫度下降而固化，凝固後焊接處接合在一起，達到機械強度。在此階段完成後，即可切斷致動器電流，回復焊接前位置。

2.5 電熱式V形樑致動器之理論分析

由於微電阻焊需要在焊接過程中將欲焊接的結構施加壓力接觸後，才開始通與電流，而電熱式 V 形樑致動器因為具有以下幾個特點，因此相當適合應用在這個研究。

1. 輸出力量可在設計時，並聯多個 V 形樑致動器的基本單元，輸出力量與並聯個數成線性的倍數關係，因此容易設計大出力的致動器配置。
2. 致動器最大位移與樑長有關。樑越長，最大位移亦增加。但是實際上受到製程限制，越長的樑，增加沾黏 (stiction)發生的機率，使致動器失效，因此樑長也不能無限制加長。

3. V形樑致動器設計容易，製程簡單。容易使用金屬面型微加工技術製造。

V形樑致動器必須在整個焊接過程的前、中、後，提供適當的起始接觸壓力在焊接處，因此V形樑致動器的出力以及位移相當重要。因此以下將解釋V形樑致動器的理論分析[27-28]。

一個單一的V形樑熱致動器的構造如圖 8 (a)所示。在不受到外力 (即圖 8 中的 $f=0$)的情況下，一個V形樑熱致動器的頂點最大位移量，可由下式表示：

$$d_{\max} = 2 \frac{\tan \theta_1}{k} \tan \frac{kL_1}{4} - \frac{L}{2} \tan \theta_1 \quad (4)$$

$$k = \sqrt{\frac{F}{EI}} \quad (4a)$$

其中， θ_1 、 L_1 與 F圖 8(b)所示，分別為彎曲角度、樑長與錨墊的反作用力。E與I分別為楊氏係數與慣性矩。

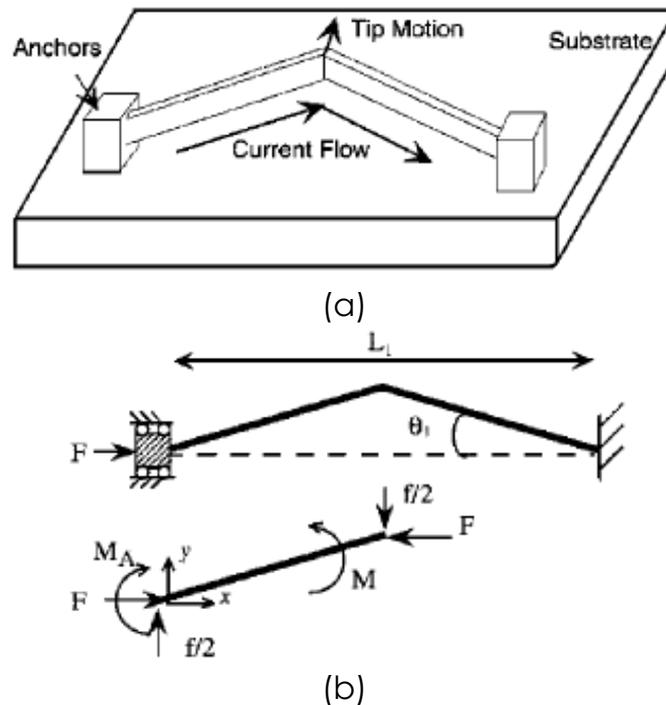


圖 8 (a)單一 V 形樑熱致動器的結構與工作原理[27] (b) V 形樑熱致動器的受力，其中 f 為外力， F 為固定端的反作用力[27]。

V形樑熱致動器的最大出力，定義為頂點向前位移後，將其推回原點所需施

加的力量，可由(5)表示：

$$f_{\max} = k_y d_{\max} \quad (5)$$

$$k_y = \frac{4 \sin^2(\theta_1') AE}{L_1} \quad (5a)$$

其中 θ_1' 是頂點經歷過位移之後的等效角度，A 是樑的截面積。若是串聯多

個致動器，則最大出力隨著並聯個數增加，如 (6)所示。

$$f_{\max} = N \times d_{\max} \quad (6)$$

其中 N 為並聯個數。



第三章 微電阻焊特性與可行性評估

本章將會介紹微電阻焊的設計考量，其中包含了應用電腦模擬來了解致動器尺寸變化的影響，以及製程規畫、實驗架設以及焊接參數討論，最後作成結論。

3.1 有限元素模型電腦模擬

前面章節已經說明，在電阻焊中，壓力與電流是兩個主要的操作條件，而在這個研究裡面，使用了臨場 (*in-situ*)致動器來提供壓力 (這個致動器連同被焊接的結構一同批次製造)。因此致動器的出力以及效能必須要符合一定的要求。為了解臨場致動器的性能，在這裡使用有限元素電腦模型 (ANSYS 軟體)來了解臨場電熱式微致動器的出力以及位移表現。在致動器的設計當中，由前文可以了解，致動器的樑長越長，其位移量的輸出越大，但是就製程上來說，卻是不利的，越長的樑越容易發生沾黏現象。因此這中間會有一個妥協的區間。另外，對於致動器的出力來說，並聯越多 V 型樑能夠提供越大的出力，但是考慮到晶片面積的使用效率，V 型樑的數目亦不可能無限制增加。本節將說明如何決定透過有限元素電腦模擬來決定樑長以及 V 型樑數目。

圖 9說明了這個研究所使用的測試結構幾何尺寸，其中樑長以及V型樑數目尚未被指定。這些尺寸的決定主要是參考這個實驗的製程能力。WU1 與WU2 之間間距個別是 6 μm 與 3 μm 。同時這也表示若致動器要推動WU1 與WU2 接觸在一起則至少需要移動這兩個間距的總合，也就是 9 μm 。由於WU1 與WU2 結構剛性的的關係，這兩個部分都會抵抗致動器的力量，可將此兩部分當成機械上的

彈簧，分別用 K_1 與 K_2 表示。有限元素分析所採用的鎳金屬材料特性列在表 1當

中。並且在模擬當中，鎳金屬的最高溫度被限制在不可超過 400°C [29]。

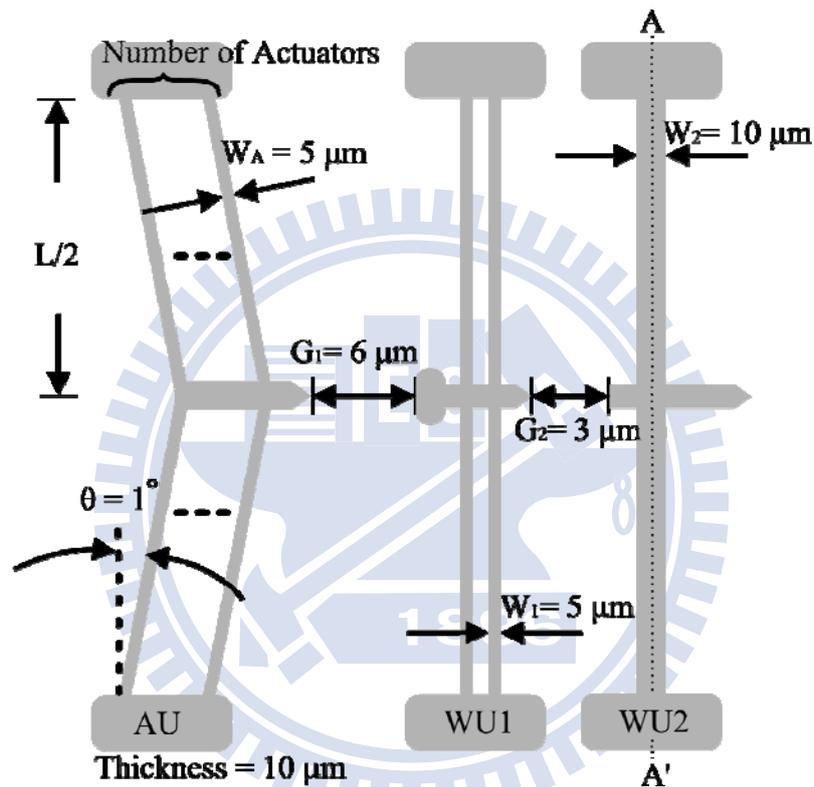


圖 9 焊接結構的尺寸，這個實驗的製程能力是這些決定尺寸的主要依據。其中致動器的樑長以及 V 型樑的數目，必須依賴有限元素電腦模擬的結果來決定。

表 1 有限元素電腦模型中所採用的鎳金屬材料特性 [29]

Modulus of Elasticity (GPa)	207
-----------------------------	-----

Density (Kg/m ³)	8880
Coefficient of Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /K)	12.7
Poisson Ratio	0.31
Thermal Conductivity (W/m-K)	90.5
Specific Heat (J/Kg-K)	443
Resistivity (10 ⁻⁸ Ω-m)	13.5

由電腦模擬所得到V型樑電熱式致動器的性能顯示在圖 10當中。圖 10 (a) 所展現的是輸出位移隨著不同的梁長度變化的結果。而圖 10(b)呈現的是致動器不同V型樑數目 (從 1 根到 4 根)在不同位移下的輸出力量。從圖上可以看出，致動器的長度至少必須要達到 335.23 μm。在這個實驗當中，選擇 400 μm作為樑長。長度決定之後，WU1 與WU2 的彈簧常數也可以被計算出來，分別是 129 N/m 與 518 N/m。從圖 9所標示的尺寸，基於致動器前端移動位置，X，整個致動器單元的操作範圍可以分成三個階段：

1. $0 \mu\text{m} < X < 6 \mu\text{m}$ ，致動器不受到阻力，向前致動。
2. $6 \mu\text{m} \leq X < 9 \mu\text{m}$ ，致動器需要推動焊接單元一 (WU1)。
3. $9 \mu\text{m} \leq X$ ，致動器同時推動致動單元一 (WU1)與致動單元二 (WU2)。

以上這三個階段所需求的力量也畫在圖 10當中。此線的斜率在以及 6 μm 以及 9 μm突然變化，這是由於不同的彈簧常數所造成。從圖 10 (b)的結果可以

看出在位移 $10\ \mu\text{m}$ 處，所需求的力量是 $1.16\ \text{mN}$ ，因此至少需要四根V型樑致動器才有足夠的出力 ($1.27\ \text{mN}$)。在本實驗中，為了確保致動器能夠提供足夠的力量，因此設計八根V型樑致動器以確保電阻焊的進行。在所有尺寸都以決定之後即可進行微結構的製作。

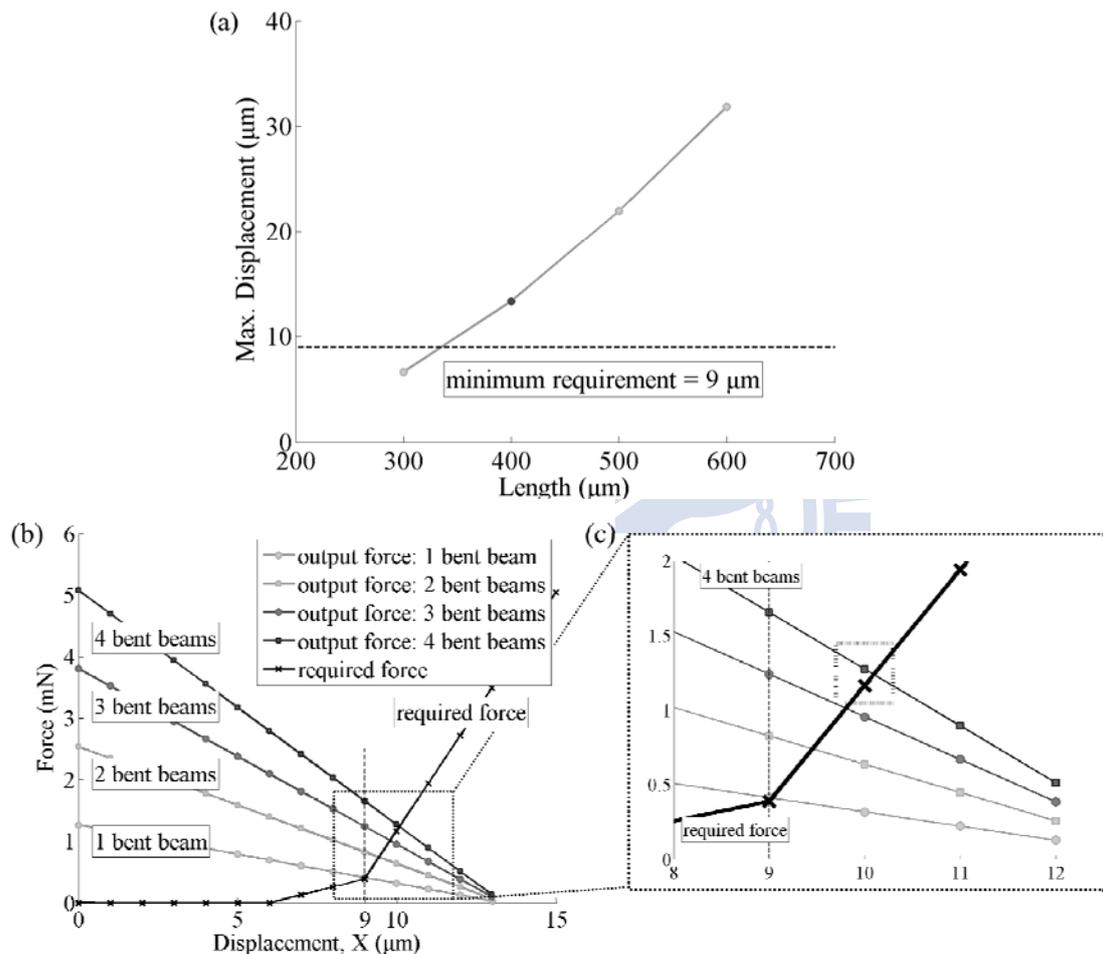


圖 10 電腦模擬結果(a) 不同樑長致動器的最大位移量 d_{max} (b)不同數量並聯的V型樑致動器在不同位置上所能夠輸出的力量，以及在不同位置上的力量要求 (c) $10\ \mu\text{m}$ 的區域放大

3.2 微結構製作

本節主要說明元件的製造過程，利用金屬面型微加工技術製造完成。其中重要的製程包含有光蝕刻製程、濺鍍、微電鑄與濕蝕刻製程。並且最後討論元件的製作結果。

面型微加工技術係指在基材表面上，進行黃光微影 (photolithography)、薄膜沉積、氧化、蝕刻的加工技術。不涉及基材本身材料的去除，只在基材的表面進行上述的製程。與其相對的是體型微加工技術。根據材料性質的不同，又可分為矽基 (Silicon-based)面型微加工與金屬基 (Metal-based)面型微加工。由於金屬基面型微加工有以下兩個主要特點，因此被廣泛應用。

可製造高厚結構。許多微機電元件包含有移動的零件，因此結構必須要有足夠的機械強度運動。而高厚的結構可增加結構的慣性矩，增加結構的強度。

低溫製程。由於微電鑄技術是一個低溫製程，溫度大約維持在 50°C ，低溫製程的優點在於大幅降低結構中的殘留應力，並且容易與 CMOS 製程整合。

整個製程包含兩道黃光與一次電鑄製程，如圖 11 所示。首先準備四吋矽晶圓，經過 RCA 清洗步驟之後，即可進行第一步驟 - 成長氧化層，如圖 11 (b) 所示。將晶片推入水平式的石英爐管中，逐漸升溫至 1050°C ，通入氧氣與氫氣，製程時間 30 分鐘後，成長 500 nm 厚度，逐漸降溫，以避免熱衝擊 (thermal shock) 使晶片承受過大熱應力而破裂，此氧化層可使元件與晶片間電性絕緣，作為絕緣層。接著第一道黃光微影製程，如圖 11 (c)，旋塗 $2\ \mu\text{m}$ 光阻 (FH6400)，並且

轉移光罩圖案至光阻上，形成犧牲層，詳細製程參數如表 2。以光阻作為犧牲層材料，只需黃光微影即可形成圖案，並且在的釋放結構時，容易使用丙酮去除，相當方便快捷。但缺點是厚度較厚光阻可能在後續製程中被加熱而導致光阻邊緣回流變形。由於這個研究使用犧牲層厚度僅有 2 μm ，因此回流變形的情況並不明顯，在此研究中適合使用光阻作為犧牲層，以節省製程時間。

在微電鑄之前必須要有導電層使得晶片導電，在電鑄時才能夠在晶片表面發生金屬原子的氧化還原反應。在此使用導電性良好的銅 (Cu) 金屬作為電鑄起始層的材料，但是由於銅與矽晶片的附著性不良，容易剝離，因此必須在濺鍍銅之前先濺鍍鈦 (Ti)，鈦同時對於銅與矽有良好的附著力，可作為黏著層。因此金屬層的沉積，是使用真空濺渡系統，首先濺渡 50 nm 厚度的鈦，接著濺渡 150 nm 厚度的銅薄膜，如圖 11 (c)。

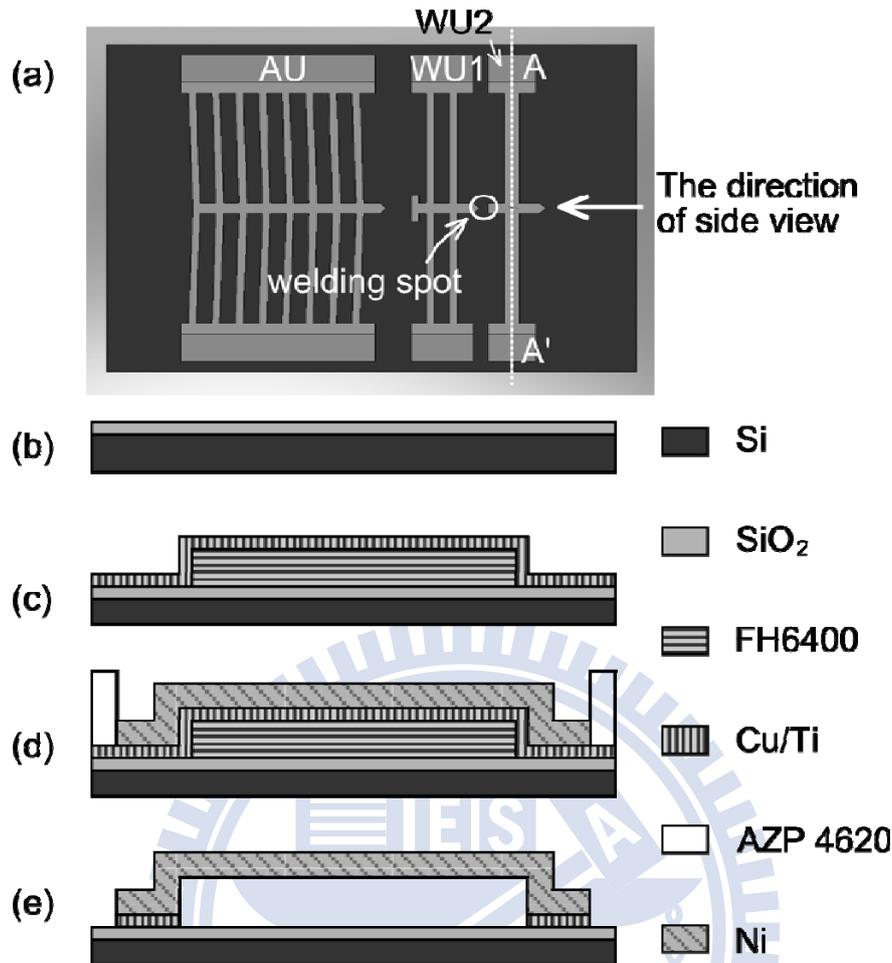


圖 11 微結構製程步驟(沿著 AA'線段的剖面圖) (a)微結構的上視圖(b)成長氧化層 (c)圖案化的光阻犧牲層以及濺鍍黏著層與電鑄起始層 (d)電鑄鎳金屬 (e) 釋放結構

第二道光罩的黃光微影製程使用AZ9260光阻，旋塗 10 μm 厚度，經過軟烤、曝光顯影後形成電鑄膜仁。由於AZ9260光阻較一般光阻可旋塗較厚的厚度，因此適合在需要製作高厚結構的金屬製程上，詳細製程參數如表 2。圖 11 (d)中進行微電鑄製程，電鑄鎳金屬，有關微電鑄製程的原理將在本章第三節說明。電鍍前需將晶片經過電鑄前清洗處理，使用 5%硫酸溶液以及介面活性劑混合之後短暫快速清洗晶片，沖洗乾淨後將晶片即刻放入電鑄液中，使用 20 mA/cm^2 的電流密度電鑄 22 分鐘，電鑄完成後可得 10 μm 厚的鎳金屬結構。

表 2 黃光參數表

光阻種類	FH6400	AZ9260
光阻厚度	2.3 μm	10 μm
旋佈	1000 rpm (35 sec)	500 rpm (15 sec)
		1000 rpm (35 sec)
靜置	1 min	10 min
軟烤	90 sec	15 min
水合	1 min	20 min
曝光	1.8 sec (46 mW/cm ²)	10 sec (+20%) (46 mW/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)

最後一個步驟為釋放結構，將晶片放置在丙酮溶液中去除電鑄用的模仁光阻 AZ9260，使用純水清洗後，再以 CR-7T 溶液蝕刻去除電鑄起始層，浸泡約 30 秒，接著使用 BOE (buffered oxide etchant) 去除黏著層，最後在將晶片泡入丙酮中去除犧牲層光阻，並且放置於 60°C 加熱器上烤乾，結構即製作完成。

3.3 微電鑄製程原理

電鑄是一種電化學反應，金屬原子會在陽極釋放電子，本身氧化成為金屬陽離子而溶於電鍍液當中，另一方面陰極產生金屬離子的還原反應，金屬離子與電子在陰極結合，析出成為固態的金屬。以鎳電鑄來說，兩個電極板置於含有鎳鹽的溶液當中，使用的陽極板又可分為可溶電極或不可溶電極，不可溶電極主要負

責導電以及控制電流在陰極表面的分佈，而可溶電極材料為鎳，除了以上的功能外，還肩負起向電鍍液補充損耗掉的鎳離子。陰極為被鍍的晶片，鎳原子會析出附著在陰極表面。當電鑄程序開始發生時，通予兩電極板電流，可為直流電或者脈衝電流，溶液中在陰極附近的鎳離子，在溶液中藉由擴散到電極與電鍍液的介面得到兩個電子析出。另一方面陽極的鎳原子釋放出兩個電子，本身成為二價陽離子，並且靠著擴散離開陽極表面進入電鍍液當中。



當外界提供電流進行電鑄過程的化學反應，是將電能轉換成化學能的反應。當電解液受到外界電能的影響，電解質的陽離子往陰極移動，陰離子往陽極移動的現象稱為電解，其析出的金屬質量與外界提供的電量，須依據法拉第電解定律，並且可表示為 (9)：

第一定律 在陰極析出的金屬量與通入的電量成正比

第二定律 在不同電解液中，通入相同電量時，各溶液析出物質質量與其化學當量成正比關係

$$m = \frac{MQ}{Fn} = kIt \quad (9)$$

其中 m 為析出物質質量 (g)

I 為通過的電流 (A)

t 為通過的時間 (h)

Q 為通過的電量 (A*h)

k 為電化學當量 (g/A*h)

M 為物質原子量 (g/mol)

F 為法拉第常數，為一莫耳電子所帶電量 (96500 coulomb)

n 為價數

但是在實際電鍍未能完全符合其定律，因為在電鍍的過程當中，陰極經常伴隨著氫氣的產生，使得部份的電流消耗在氫離子的還原反應上。

最後經過電鑄完成的微電阻焊元件如圖 12所示。大部分製造完成之尺寸與原始設計尺寸差別皆 $1 \mu\text{m}$ 以內，焊接單元一與焊接單元二之間的距離，誤差也在 $2 \mu\text{m}$ 以內。

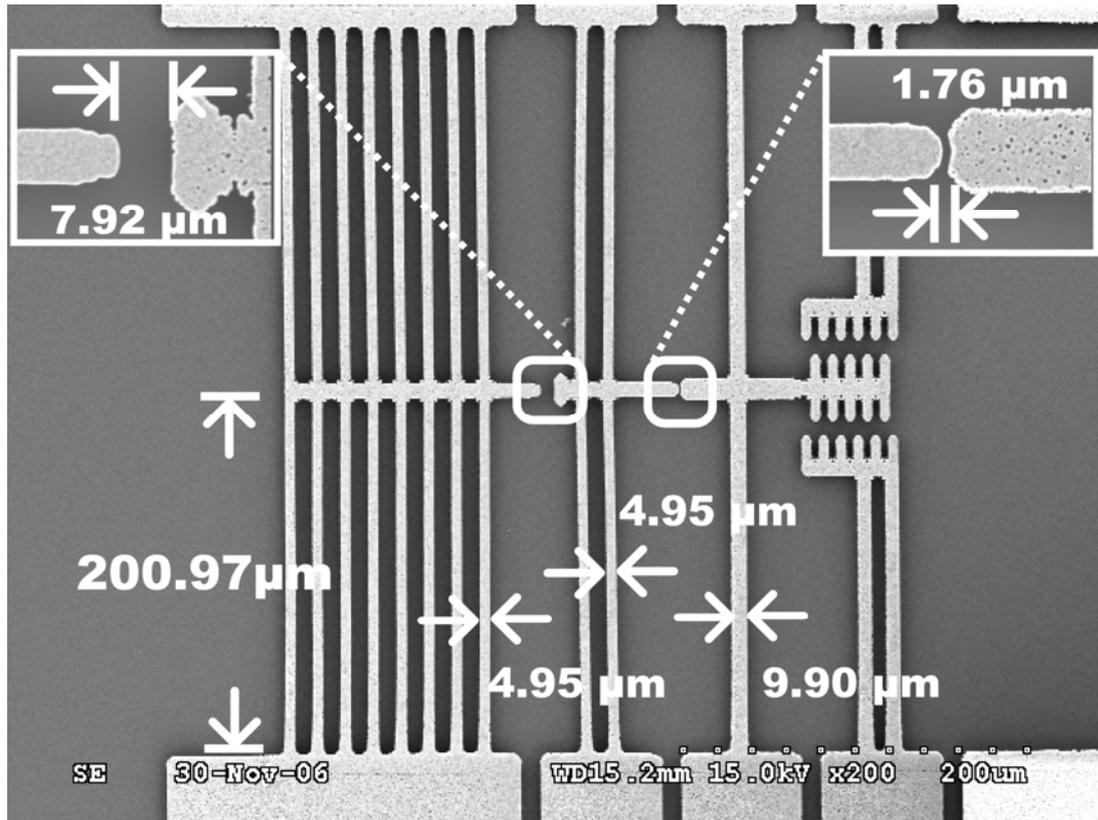


圖 12 製作完成測試結構的 SEM 圖以及各部分尺寸。

3.4 微電阻焊量測

為了了解焊接技術在微米尺寸等級的可行性以及表現，本節將會描述微焊接技術量測時所紀錄的參數以及量測設備的架設。焊接電流(I_w)、接觸電阻(R)與焊接時間 (t) 三項因素主要影響了焊接時產生的熱量大小。另外，穩健的組裝也是微元件組裝的條件之一，因此將會測量焊接後，焊接點的強度，作為參考指標。

量測時的電路架設如圖 13， V_a 提供致動器所需的電壓，並且產生 I_a 的電流流經致動器。另外有一個電壓源 V_w 提供焊接時所需的電壓，並且焊接電流 I_w 流經焊接點，焊接點的接觸電阻 R 。根據焦耳定律，在焊接點產生的熱量會與焊接電流 (I_w) 與接觸電阻 (R)以及焊接時間(t)有關。

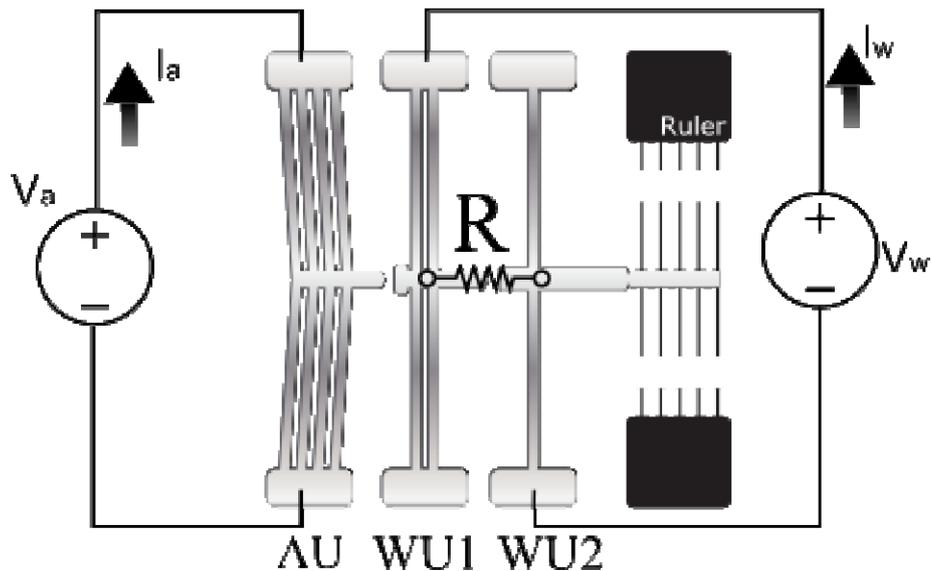


圖 13 測量時之電路接線圖。

測量時的設備架設如圖 14 所示。其中，由安裝 LabView 軟體的個人電腦透過 USB 介面傳送電壓設定指令至電源供應器的 GPIB 介面。藉由一組電源供應器提供焊接電流，並且透過 LabView 程式，能夠控制電壓的輸出。另外一組電源供應器能夠提供致動單元所需的電源。除了送出控制電壓的指令，透過 GPIB 介面，焊接電壓與焊接電流也會透過此介面以 6Hz 的速度傳回到電腦中，並且寫入文字檔。在測量過程中，元件的變化會藉由光學顯微鏡以及 CCD 攝影機拍攝焊接過程。並且傳入電腦儲存。透過紀錄下來的畫面可以計算焊接單元二的變形量，搭配樑變形公式，可計算當時的受力。

在一開始輸入致動器所需的電力，使得致動器單元往前推動，讓焊接單元一與單元二接觸，在此時測量接觸點的接觸電阻。紀錄接觸電阻之後，輸入焊接電壓，由零伏特逐漸往上增加，大約以 30 mV/sec 到達最大電壓值約 0.9 V，在此過程中，焊接電流亦逐漸增加，所產生的熱量可進行微電阻焊過程，之後以同樣

速率降低電壓直到結束。當焊接過程結束，焊接後的接觸電阻 (post contact resistance) 將會被測量紀錄下來。

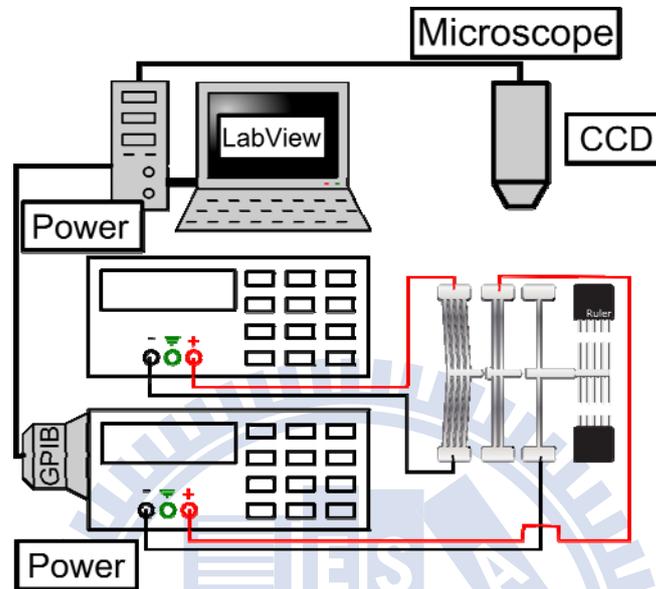


圖 14 硬體設備架設。包含一台個人電腦，兩台電源供應器，光學顯微鏡以及 CCD 攝影機。

焊接參數包含接觸壓力、初始/焊接後接觸電阻、焊接電流與焊接電壓可由實驗量測。在焊接點的接觸壓力可以藉由尺規的位移量以及橫截面計算得之。根據式(1)，焊接能量 (熱量, Q) 在實驗中可表示成：

$$Q = \sum I_i V_i \Delta T \quad (10)$$

其中， I_i 、 V_i 以及 ΔT 分別代表第 i 個時刻的電流、電壓以及時間間隔。平均功率(P)定義為焊接能量(Q)除以全部焊接時間(T)，可表示為：

$$P = \frac{Q}{T} \quad (11)$$

焊接強度也會進一步地測量。使用微操控平台與探針座挾持住焊接單元二的

尺規部分，並且嘗試拉開焊接後的焊接點。透過 CCD 拍攝到焊接單元二的位移量，配合材料力學中樑變形公式可計算出焊接強度。

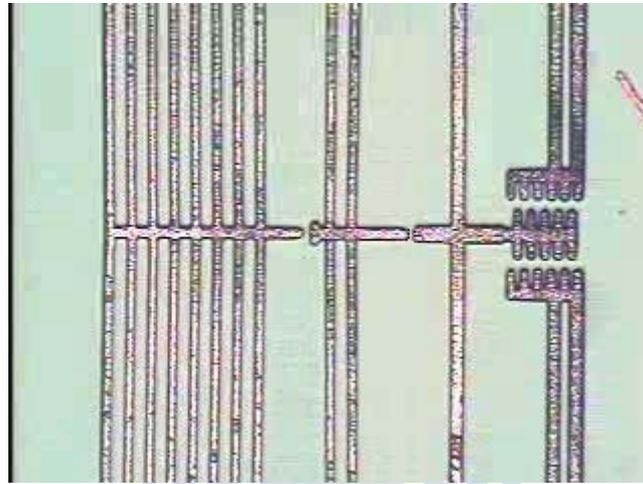
3.5 量測結果與討論

在這個實驗當中使用微電阻焊技術達成微機電結構的平面組裝。電阻焊主要的概念在於，當電流流經電阻時會產生熱量，即焦耳熱。而微焊接所產生的熱量主要受到焊接電流、接觸電阻以及焊接時間等因素的影響，如式(1)所示。由致動單元(AU)所提供的挾持力量，使得焊接單元一與焊接單元二能夠藉由適當的壓力接觸在一起，並且使得電路導通，讓焊接電流可流通。

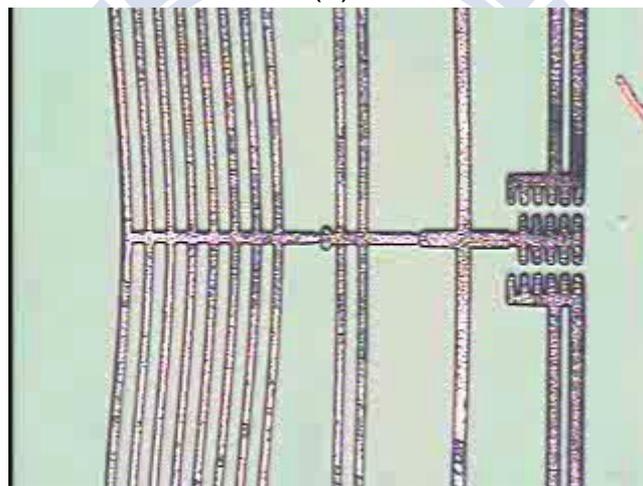
在這個研究中展示成功的電阻焊技術，一連串焊接過程的圖片如圖 15 所示。製作完的結構如圖 15(a) 所示，三個部分的結構彼此之間都不連接。在圖 15(b)中，致動單元提供適當的挾持壓力，使得焊接單元一與單元二接觸在一起。提供焊接電流之後，接觸點溫度上升，到達金屬熔點，產生電阻焊的效果。最後，焊接完成，焊接單元一與單元二接合在一起，並且關閉致動單元的電流，完成焊接。

所量測到的接觸壓力與接觸電阻間的關係，如圖 16 所示。式(1)中的電阻會受到在工件間介面的接觸壓力影響。由圖 16 可明顯看出初始接觸電阻隨著接觸壓力的上升而下降。也就是當致動單元 (AU) 將焊接單元一 (WU1) 與單元二

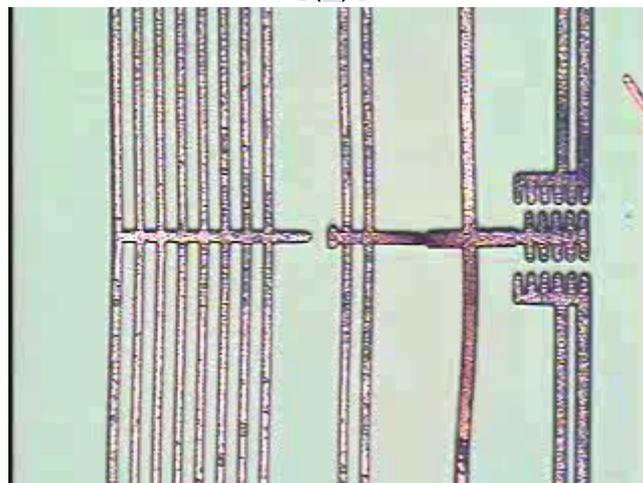
(WU2)夾持地越緊，將使得此兩個單元間的接觸面積增加，因而使得初始接觸電阻下降。



(a)



(b)



(c)

圖 15 電阻焊過程 (a) 起始位置 (b) 焊接中 (c) 焊接完成

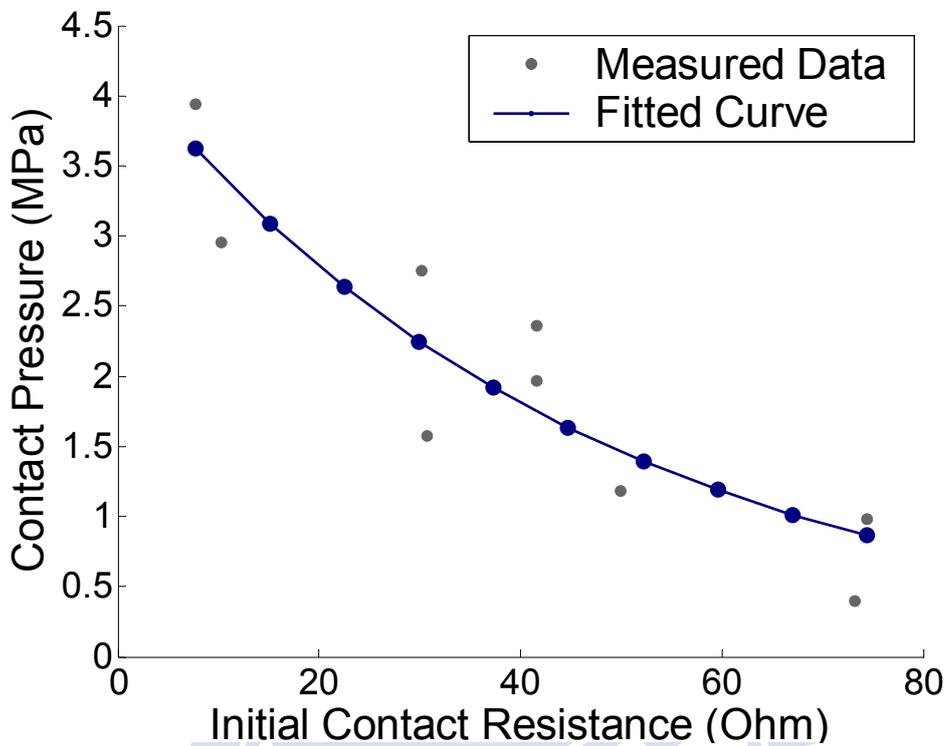


圖 16 接觸壓力與初始接觸電阻之關係

在這個研究當中還測量了後接觸電阻的大小。所謂後接觸電阻 (post contact resistance) 在此是指焊接點在焊接完成之後的電阻值。在每次完成焊接前與焊接後，都會測量接觸電阻的大小。根據測量的結果，初始焊接電阻的 (initial contact resistance) 範圍從 2.7 歐姆到 74.3 歐姆之間，如圖 17 橫軸的範圍。相較於初始電阻的分佈範圍，所有成功焊接的後接觸電阻範圍分佈小很多，都介於 0.1 與 1.15 歐姆之間。在成功焊接的測試中，無論初始接觸電阻是多少，焊接完成之後，焊接點都能夠維持在一個相對穩定且低電阻的狀態

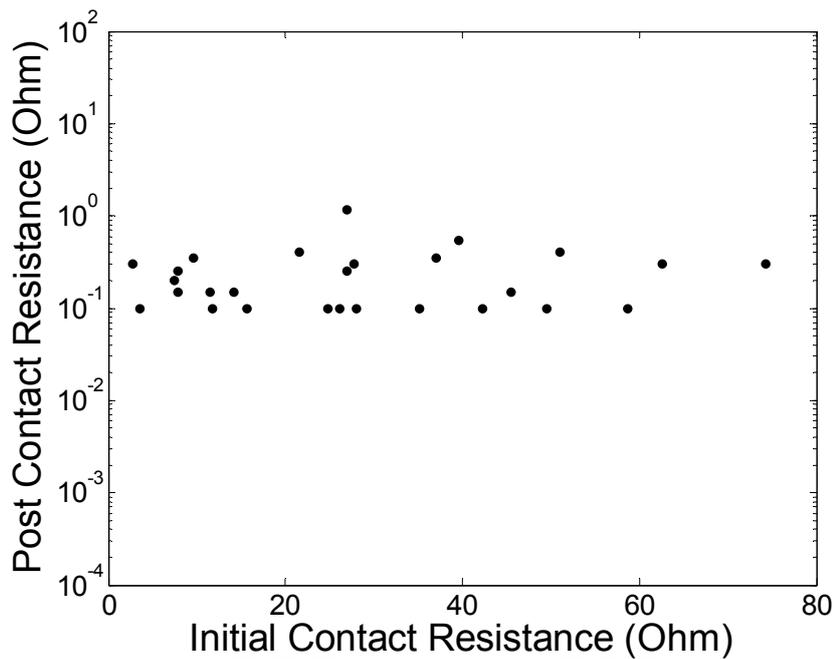


圖 17 在成功焊接的測試當中，初始接觸電阻與後接觸電阻之間的關係

焊接中所供應的能量大小對於電阻焊的產率有相當大的影響，如圖 18 所示。在這個研究中，當供應的能量低於門檻值 0.05 焦耳時，所有的試驗皆因熱量過低而失敗。當熱量介於 0.05 焦耳至 1 焦耳之間，微電阻焊產率逐漸提高，由 33.3% 提高至 58.3%。當能量再增加超過 1 焦耳之後，在這個研究中所有的試驗全部都可以成功焊接。因此在本試驗中，若需要達到最高的產率，將建議焊接能量超過 1 焦耳以上。

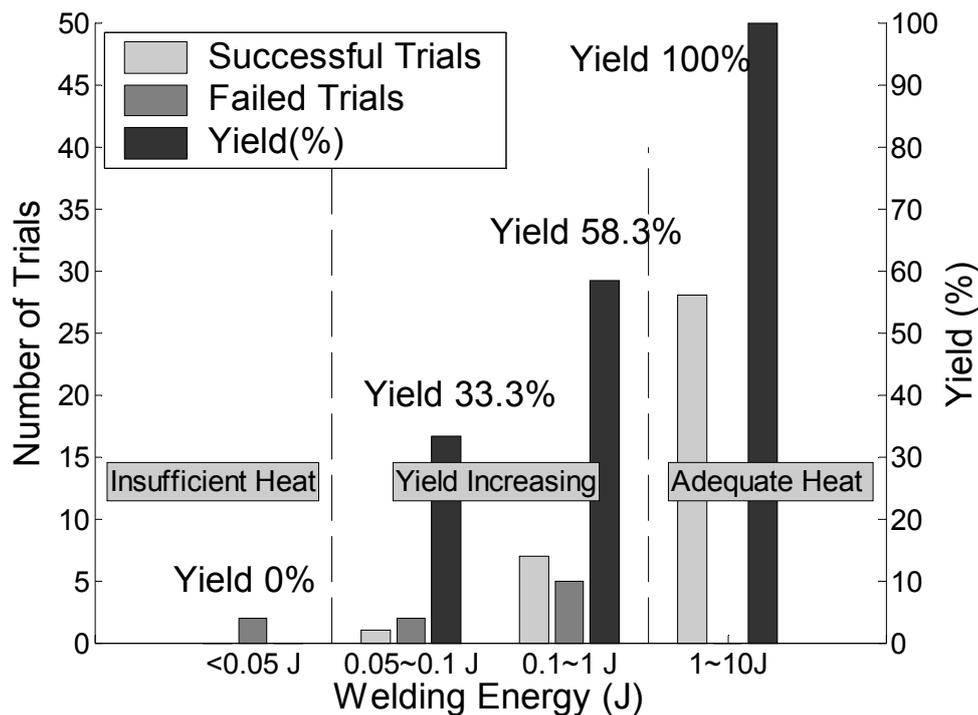


圖 18 供應不同能量下的焊接成功率

在焊接之後，成功的試驗都會進行焊接強度的測試。測試結果如圖 19 所示，焊接強度測試隨著接觸電阻的減少而增加。因為小的接觸電阻可以產生較大的熱量用於熔融焊接點較多的金屬，因此可以產生比較大的焊接強度。這個研究中，最大的強度發生在 2.7 歐姆為 3.09 MPa (74.4 μ N)，最小的強度發生在 57.4 歐姆為 0.13 MPa (3.2 μ N)。

從圖 18 可以發現到焊接能量的大小決定了成功率。從式(1)與式(2)，在相同的電壓以及時間情況之下，焊接能量會隨著電流的增加而增加，並且會隨著電阻的增加而減少。因此低電阻所伴隨著的大電流對於焊接是有利的，它可以增強焊接接合的強度 (圖 19)。從圖 16 到圖 19，可以發現到，大的接觸壓力導致低接觸電阻，而且可以使得更多電流用於焊接產生較多熱量來熔接更多材料以增強焊

接強度。以效率的觀點來說，短的焊接時間可以加速生產過程，因此短時間且大電流將會為此帶來助益。

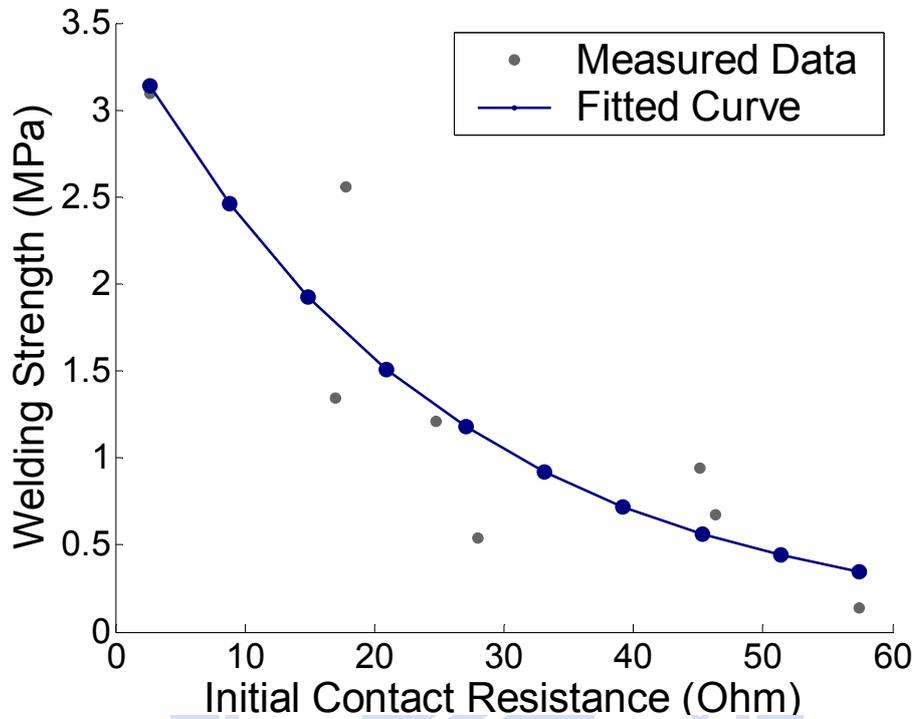


圖 19 焊接強度隨著不同初始接觸電阻而變化。

3.6 結論

這個實驗的第一部分已經將微電阻焊技術成功發展。並且介紹了微電阻焊的原理與概念、結構設計、尺寸考量、實驗架設以及最後定性與定量的結果。因此確定微電阻焊在微機電領域的可行性。並且將相關參數，例如接觸壓力、接觸電阻、焊接能量等之間的關係做了相關的實驗與解釋，期望微電阻焊技術能夠為微機電領域帶來其他更多的應用。

第四章 立體微組裝技術

在前面章節已經驗證微電阻焊的可行性。在本章中將會說明如何利用微電阻焊以及磁性致動來達成立體微組裝技術，並且解釋其設計概念、操作原理、製程、尺寸設計等。

本文所提出的立體微組裝技術主要包含有鉸鏈的鎳結構受到磁場影響而被磁化產生，與外在磁場交互作用，產生出平面旋轉運動而被舉起，接著藉由微電阻焊來固定被舉起的結構。微電阻焊的運作原理以及磁性致動的原理已經在前文說明，本章將會接續介紹設計概念。

4.1 立體微組裝設計概念(設計方案一)

這個研究將會提出兩個立體微組裝結構設計的方案，此兩個設計的差別在於第二個設計方案的結構是第一個設計的簡化，可以用來快速測試電阻焊在立體組裝的可行性，以及製程參數的調整。以下將會說明第一個設計方案的設計概念。

這個研究所提出第一個立體微組裝的結構配置如圖 20，其中包含了有釘環結構 (staple)、鉸接在基板上的鎳金屬微結構，此結構可被外界磁場舉起，另外還有臨場 (*in-situ*)微電熱致動器。

鉸接的微結構 (hinged micro structure)可以是一個主動作動的元件，例如微感測器或者微致動器，而不僅僅只侷限於單純的鏡面平板狀結構 (被動結構)。臨場電熱式微致動器功能在於協助微電阻焊的進行。在這裡，使用了兩組平行連接的V型樑電熱式微致動器，如圖 20(a)。除了上述的元件之外，還有一根介在

致動器前端端點以及鉸鍊結構轉軸(pivot)之間的焊接樑 (welding beam)可以提供電流流動的通路。在接觸壓力之下，焊接電流 (welding current)的方向從 P_1 流向 P_2 或者 P_3 流向 P_4 ，如圖 20(a) 與圖 20(b)。焊接樑能夠與轉軸 (pivot) 熔接形成焊接接合，而且可以防止致動器的前端跟旋轉軸 (pivot)熔接在一起。焊接樑不只在焊接過程中提供焊接電流導通的通路，在焊接組裝完成之後還擔任提供操作電壓、電流導通的路徑給微元件，因此焊接樑的寬度是一個重要的尺寸考量。窄的焊接樑在致動器推動的方向上有比較小的彈簧常數，因此致動器在推動焊接樑時，可以使用較小的出力就可以推動，然而太窄的焊接樑可能會受到電流流過時產生的熱量影響而產生熱應變。

要完成立體微焊接，步驟可分為以下幾部分。剛開始提供一個外界的磁場，這個磁場可以由一般的磁鐵或者是使用電磁鐵產生靜態磁場。接下來具有鉸鍊結構的鎳微元件會被磁化並且旋轉離開基板表面，直到磁化方向與磁場方向重合並且停在某一個角度。這個角度可以藉由外界磁場方向來控制。下一步驟，電熱式微致動器推動焊接樑，使得焊接樑與被立起元件的轉軸 (pivot)接觸。在適當的接觸壓力之下，焊接電壓個別施加在 P_1 與 P_2 以及 P_3 與 P_4 兩兩之間。焊接電流流經過焊接點 (welding site)，因為電阻的效應產生焦耳熱來進行電阻焊。經過一段時間之後，切斷焊接電流，讓焊接點冷卻之後，解除焊接點的焊接壓力，即完成立體微組裝。在焊接之後，若是要操作已經組裝完成的元件，金屬的焊接接合處可以提供電流通路，讓操作電流從 P_1 流經焊接處到 P_3 如圖 20(c)。

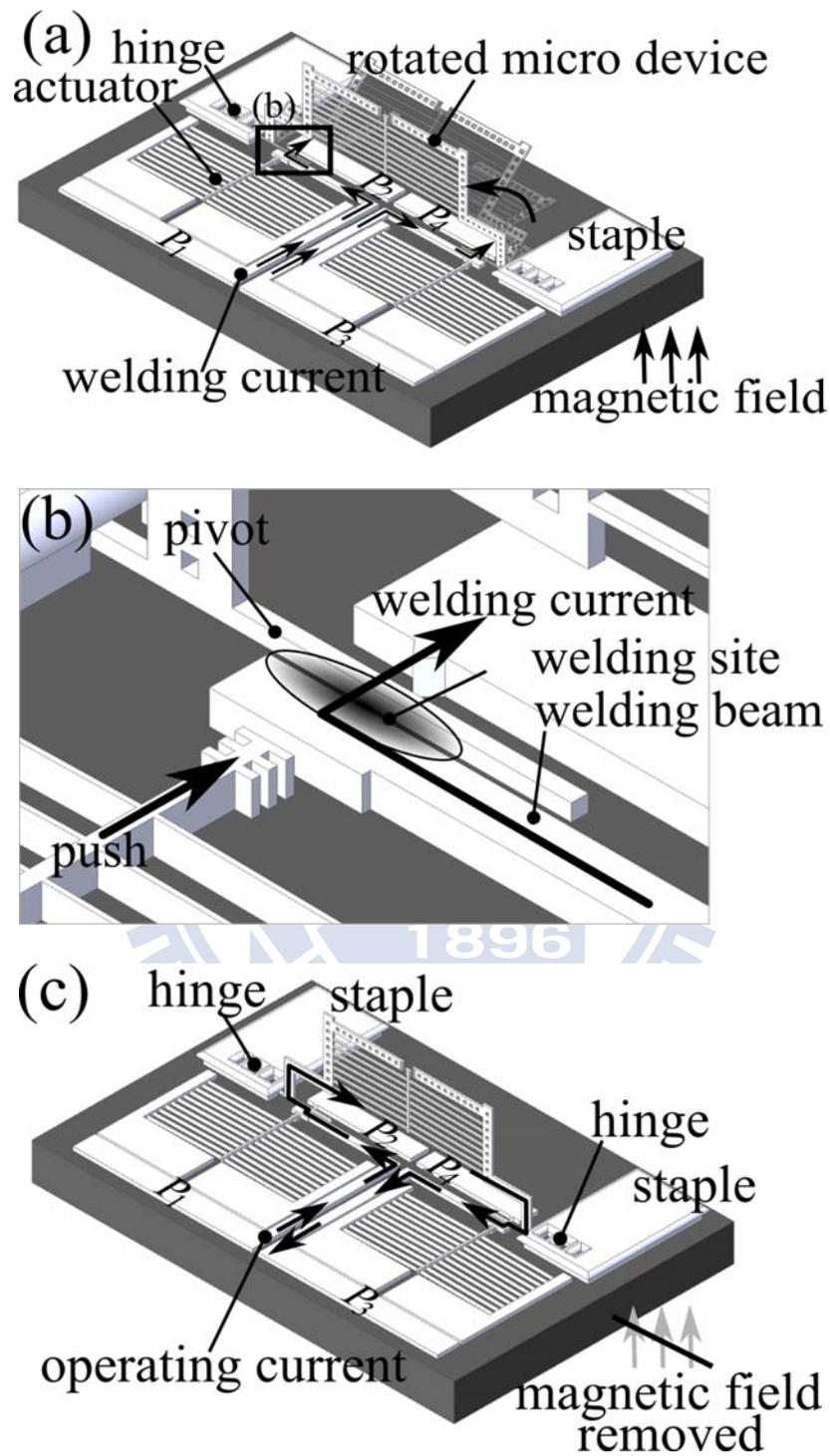


圖 20 立體微組裝的結構設計(a) 在外加磁場的情況下，搭配電熱式微致動器的微電阻焊 (b) 焊接處的放大視圖 (c) 施加元件驅動電壓給已經組裝完成的微元件，電流經過焊接接合處從 P_1 流向 P_3 。

4.2 尺寸設計

為了要確定足夠的接觸壓力，以及致動器必須提供足夠的位移移動量，因此必須要考量 V 型樑電熱式致動器的尺寸以及 V 型樑的數量。

在這個研究當中，靠近焊接區域的三個結構間距(G_1 , G_2 , 以及 G_3)決定了位移的需求如圖 21。由於製程能力上的限制，設計尺寸的間距最小的尺寸必須要大於 $5\ \mu\text{m}$ 以上，另外為了保證轉軸能夠有足夠的空間在鉸鏈結構當中旋轉，因此三個間距(G_1 , G_2 , 以及 G_3)的寬度分別定為 $8\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$ 與 $5\ \mu\text{m}$ 。如此一來，V 型樑致動器的最小前端位移就必須超過此三個間距寬度的總和，也就是位移至少要超過 $21\ \mu\text{m}$ 以上。這表示致動器前端至少要往前推動 $21\ \mu\text{m}$ 才能夠只使得焊接樑以及懸浮的轉軸 (pivot) 接觸到固定墊 (anchor) P_2 。這是最低的位移要求，實際上致動器必須要提供更多的位移才能夠在焊接過程當中，提供焊接處的接觸壓力。除了對於致動器有位移上的要求之外，致動器的出力也必須要抵抗焊接樑的機械性抵抗，由於焊接樑在機構上是一根懸臂樑，受力變形時有其彈簧常數。焊接樑的厚度是 $10\ \mu\text{m}$ ，臂長為 $400\ \mu\text{m}$ 。選定三個不同寬度的樑寬 (W_c) 分別是 $4\ \mu\text{m}$ 、 $11\ \mu\text{m}$ 以及 $30\ \mu\text{m}$ ，其相對應的彈簧常數分別是 0.5 、 10.6 與 $216\ \text{Nm}^{-1}$ 。

如同本文第二章所說明，致動器的能力可以藉由改變其幾何形狀來達成。可以藉由設計比較長的 V 型樑來增加位移量，另外，出力的大小與並聯的 V 型樑數目成正比的關係，越多 V 型樑並聯，出力越大。

致動器的位移過程可以分成兩個部分。當致動器前端從 $0\ \mu\text{m}$ 移動到 $8\ \mu\text{m}$ 的位置，移動的過程中沒有受到其他機構的阻力。當它在 $8\ \mu\text{m}$ 的時候恰巧碰觸到移動到焊接樑，從 $8\ \mu\text{m}$ 再往前移動到 $21\ \mu\text{m}$ 的時候，致動器的出力就必須要克服焊接樑所產生的抵抗。事實上，對於電阻焊來說，越大的力量可以提供越大的接觸壓力，能夠提升焊接的成功機率。

為了了解V型樑電熱式致動器的位移以及出力隨著不同並聯數目改變的情況，這個研究當中建立一個有限元素的電腦模型來模擬致動器的輸出位移以及輸出力量的情形。先前已經有文獻[29]應用鎳金屬的材料特性來建立有限元素模型，在此鎳金屬的材料性質列在表 1當中。其他未提及的尺寸沿用先前平面電阻焊的設計，這些尺寸包含有V型樑的厚度 $10\ \mu\text{m}$ 、V型樑的寬度 $5\ \mu\text{m}$ 、V型樑的總長 $800\ \mu\text{m}$ 以及彎曲角度 1° 。在模擬過程中，為了防止金屬鎳因高溫機械特性變化過大，因此將最高溫度設定在 400°C 。

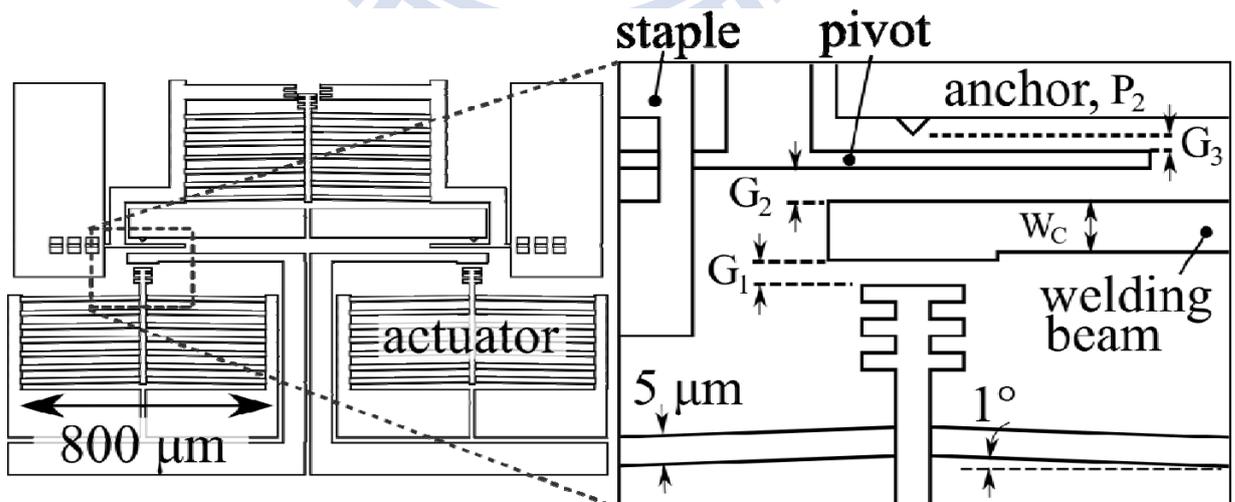


圖 21 在焊接處 (welding site)的幾何形狀參數，包含了有間距 (G_1 , G_2 以及 G_3) 還有焊接樑的寬度 (W_c)

有限元素的分析結果如圖 22所示，在這裡的結果是依據最大彈簧常數 (216 Nm^{-1})來計算的。從結果來看，力量輸出隨著位移的增加而減少，另外隨著 V型樑並聯數目增加而增加。對於彈簧常數 216 Nm^{-1} 來說，要讓焊接樑移動 $21 \mu\text{m}$ 的距離，最少的力量是 2.81 mN 。從圖 22來看，三根V型樑並聯之後的力量輸出 (在 $21 \mu\text{m}$ 的位置)是 2.53 mN ，不足所需的 2.81 mN 。而四根V型樑並聯的力量可達 3.37 mN ，因此決定至少要有四根V型樑並聯才能夠在 $21 \mu\text{m}$ 的位置提供足夠的輸出力量。在這個研究當中，為了確保有足夠的接觸壓力，設計了 20根V型樑並聯，以提高成功機率。



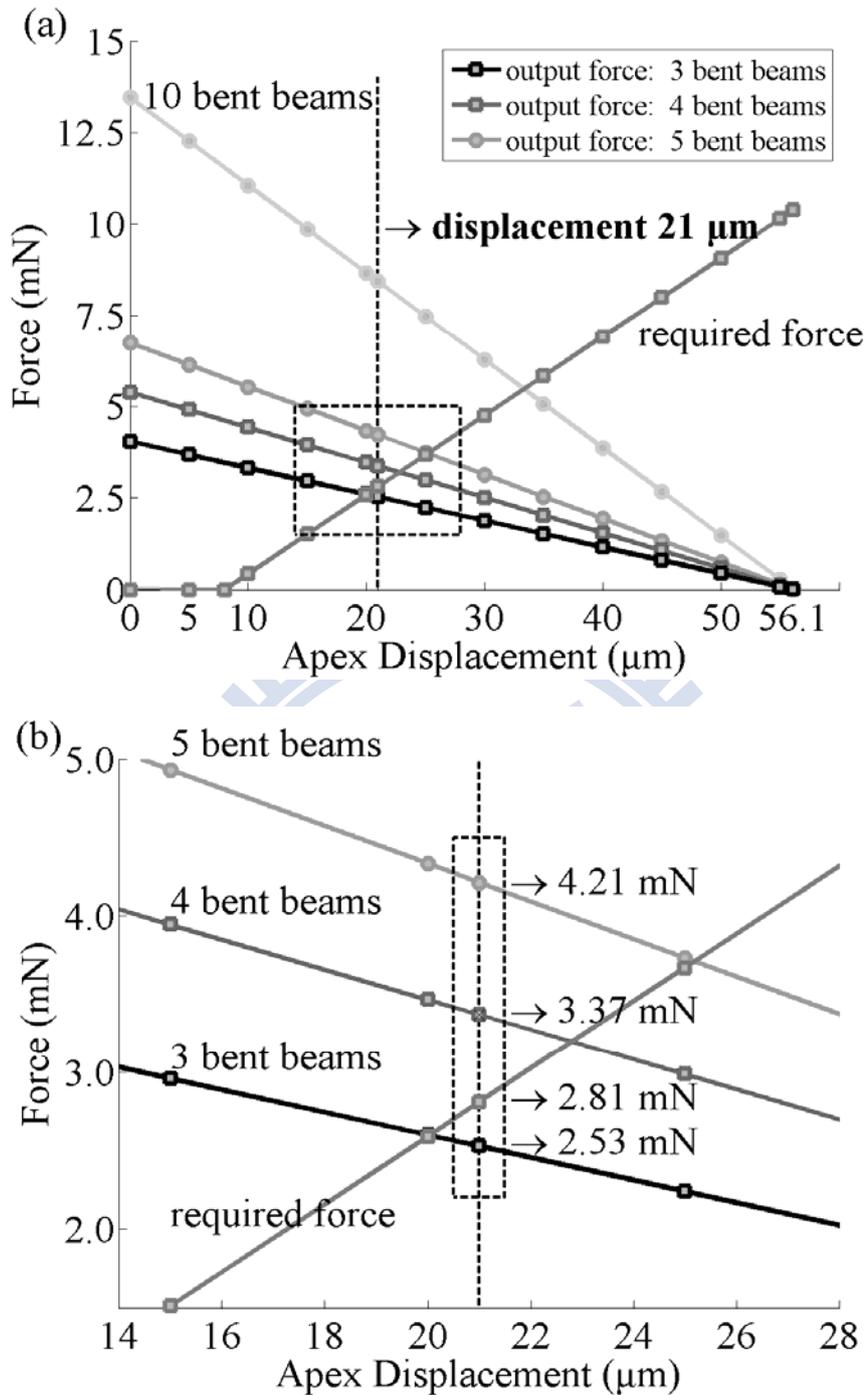


圖 22 藉由有限元素分析所得到 V 型樑致動器的輸出能力 (a) 並聯不同數目的 V 型樑致動器在不同位置的出力以及出力要求 (b) 將位置 21 μm 附近的放大

4.3 無焊接樑之結構設計 (設計方案二)

除了以上的結構設計之外，在這個研究裡面還設計了另外一種立體微組裝結構的配置，這個結構主要的差別在於省略焊接樑，如圖 23。除此之外釘環結構 (staple)、鍍金屬微元件以及臨場 (*in-situ*)微電熱致動器等結構與第一個設計相同，因為致動器不需推動焊接樑，所以最大的優點是對於致動器的出力要求可較低。此設計的另個優點是簡化焊接時的電流路徑，簡化接線。此設計具有簡化 (結構上與電路接線上)的優點，因此適合作為初步測試焊接以及調整製程之用。其組裝步驟:首先外接磁場將微元件立起之後，電路的架設為固定錨墊 P_5 與 P_7 接地 (低電位)而 P_6 接高電位。右半側與左半側是對稱結構，右半側電路架設類似於左半側， P_{10} 與 P_8 接地而 P_9 接高電位。一開始在 P_5 與 P_6 之間施加電壓，此時致動器會有致動電流 (actuation current)流過，而由於剛開始致動時，致動器前端與固定錨墊 (anchor) P_7 沒有接觸在一起，因此電流只會通過 P_5 與 P_6 之間，當致動器向前推擠旋轉軸 (pivot)使旋轉軸與固定錨墊 (P_7)接觸，此時， P_6 與 P_7 的電路導通，使得焊接電流導通，從 P_6 流向 P_7 產生焊接效果。當焊接組裝完成之後，焊接處 (welding site)即接合在一起，接著要測試微元件 (micro device)是否能夠正常工作，將會在 P_6 與 P_8 間 (或者 P_5 與 P_9)間施予操作電流，讓直立在空間中的微元件工作。

由於這種設計對於致動器的力量要求較為降低，因此尺寸沿用前面有限元素分析的結果。V型樑的厚度 $10\ \mu\text{m}$ 、V型樑的寬度 $5\ \mu\text{m}$ 、V型樑的總長 $800\ \mu\text{m}$

以及彎曲角度 1 度，20 根 V 型樑並聯， G_4 維持 $5\ \mu\text{m}$ ，為了要讓間距總合維持 $21\ \mu\text{m}$ ，因此 G_5 設定為 $16\ \mu\text{m}$ ，如圖 24。

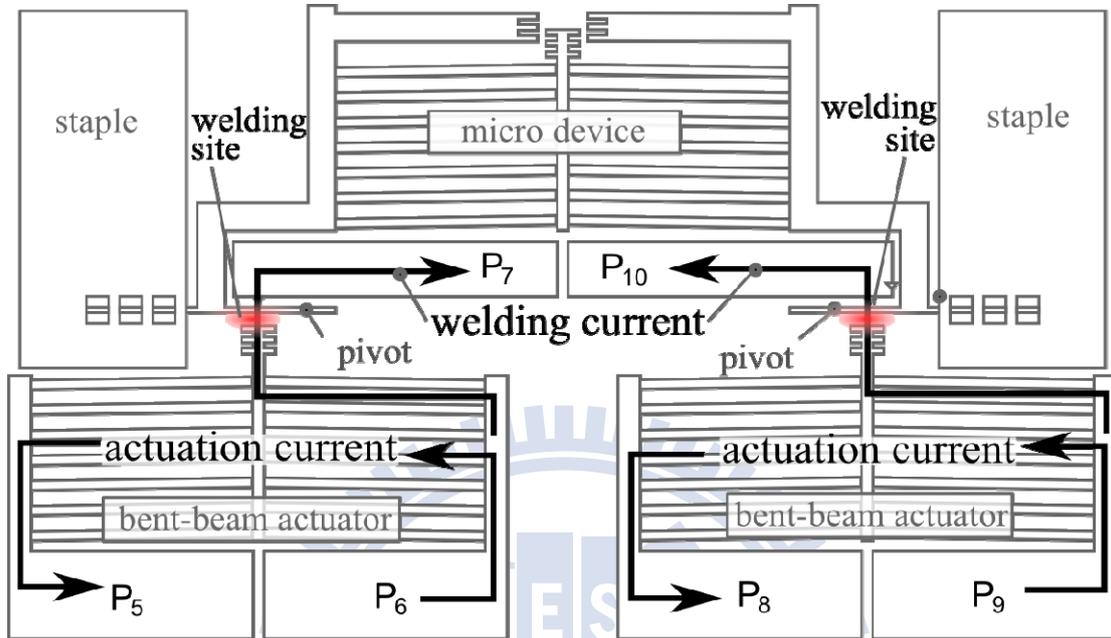


圖 23 無焊接樑微結構的設計概念。與原本設計最大的不同點在於沒有焊接樑，致動器不需要推動焊接樑，可以降低對於致動器出力的要求。

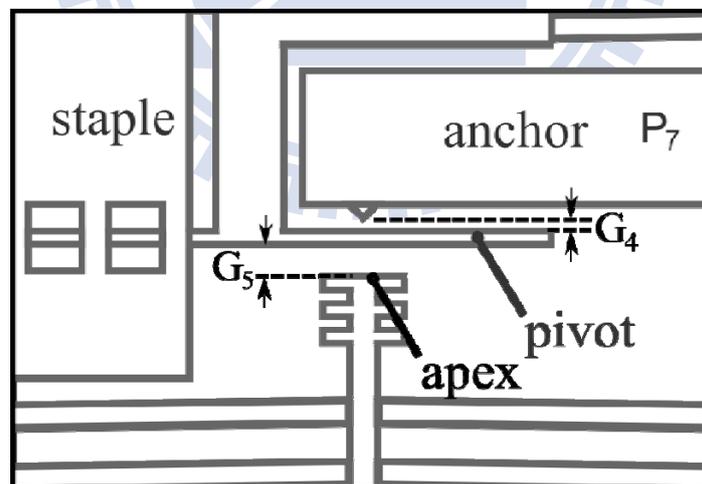


圖 24 無焊接樑微組裝結構尺寸。此種設計對於致動器出力的要求較寬鬆，因此可沿用先前所設計的尺寸，且為了維持間距與上個有焊接樑結構的設計相同，也就是 G_4 與 G_5 的總合為 $21\ \mu\text{m}$ ， G_4 維持 $5\ \mu\text{m}$ ，因此 G_5 必須為 $16\ \mu\text{m}$ 。

4.4 微結構製程

前述的立體微組裝所牽涉到的微結構是使用金屬基面型微加工技術所製造，其中包含有兩道不同厚度的電鑄製程，第一道電鑄製程製作出 10 μm 厚的鎳金屬結構，第二道電鑄製程利用電鑄滿溢出模仁的效果，形成香菇頭的形狀(蕈傘形狀)，可自然製作出釘環結構，利用此一特性，可以大幅降低製作釘環結構時的製程複雜度。製作過程如圖 25所示。首先準備經過RCA清洗過後的矽晶圓，將晶圓送入高溫石英爐管中成長濕式二氧化矽並且利用微影製程以及HF濕式蝕刻將第一道光罩的圖案轉移至二氧化矽層，圖 25(a)。接下來旋塗 FH 6400 光阻 (PR)並且用第二道光罩將其圖案化，此FH 6400 光阻層將會作為面型微加工的犧牲層。然後利用真空直流濺鍍沉積厚度 50/150 nm 的Ti (鈦)/Cu(銅)薄膜，鈦薄膜作為銅層與底下材料的接著層 (adhesion layer)增加附著性，銅薄膜作為第一道電鑄製程的電鑄起始層 (seed layer)如圖 25(b)。接下來另外一層 15 μm 厚的光阻 AZ 10XT被旋塗與圖案化，作為電鑄模仁，就可以進行電鑄 (EP) 10 μm 厚的電鑄鎳金屬 (EP Ni)，圖 25(c)。在使用丙酮移除前一道電鑄模仁之後，另外一層旋塗並且圖案化的 25 μm 厚的光阻 AZ 10XT被用來當做第二次電鑄的電鑄模仁，用來電鑄具有蕈傘形狀的釘環結構，如圖 25(d)，如此一來就可以製作出鉸鍊結構。最後，利用濕蝕刻的方式移除光阻以及Ti/Cu薄膜，且將晶圓泡在異丙醇當中置換出殘存在結構當中的水分，迅速置於加熱板上以 65°C 烘烤至異丙醇全數蒸乾，避免懸浮結構沾粘，完成釋放結構的步驟，如圖 25(e)。

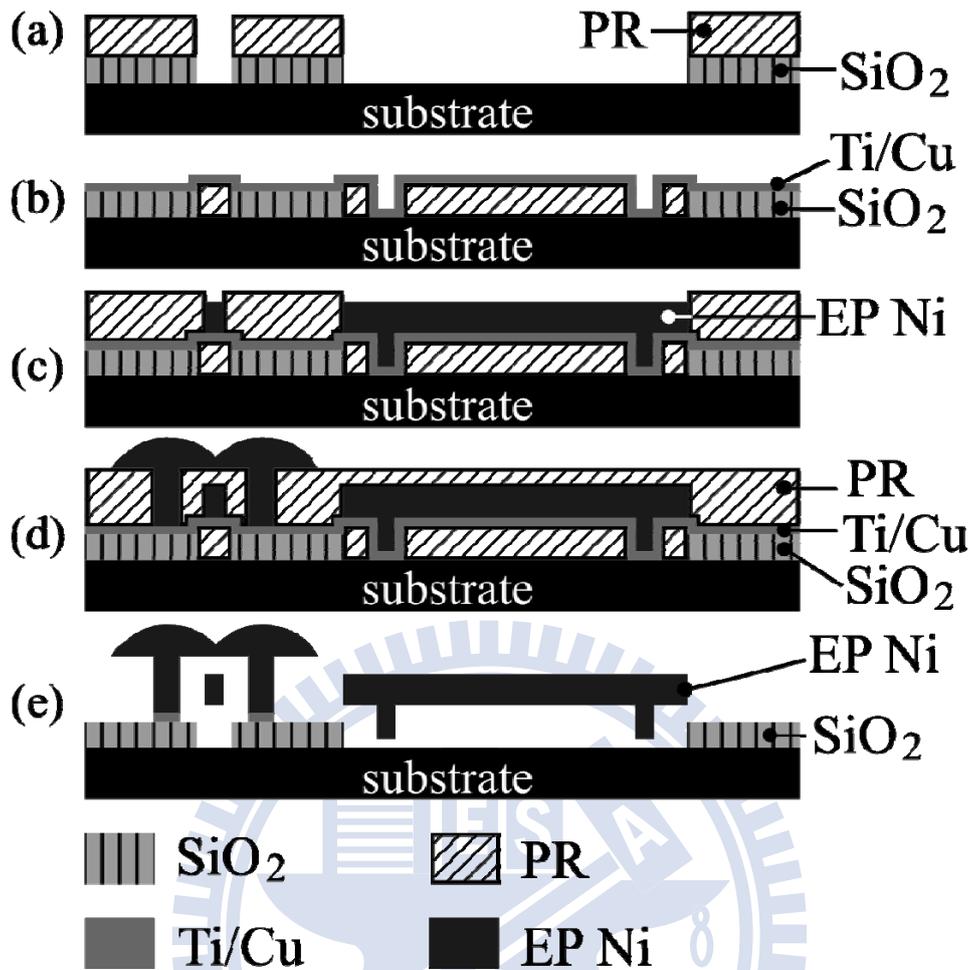


圖 25 立體微組裝元件製程

4.5 電鑄參數測試

在這個製程當中，為了要製作出蕈傘結構，必須要讓電鑄鎳鑄滿超過光阻模仁的厚度，並且再繼續電鑄一段時間之後，才會形成電鑄的蕈傘結構。因此必須要掌控好電鑄參數才能夠順利電鑄出適當的蕈傘結構。若是電鑄過多，則整個釘環結構會形成沒有開孔的洞穴結構，不利於釋放結構的製程。沒有開孔的洞穴結構無法讓濕式蝕刻使用的液態化學物品進入洞穴與犧牲層材料起化學反應。若是電鑄時間過短，則蕈傘結構兩側沒有完全閉合，將無法形成釘環結構。元件會在釋放結構的時候漂移離開晶片。測試形成蕈傘結構所需的電鑄參數，測試時固定

電流密度 $20\text{mA}/\text{cm}^2$ ，光阻厚度預計 $25\ \mu\text{m}$ ，電鍍時間分別測試 40 分鐘、60

分鐘與 80 分鐘。以下是電鍍完成的結果 SEM 照片。

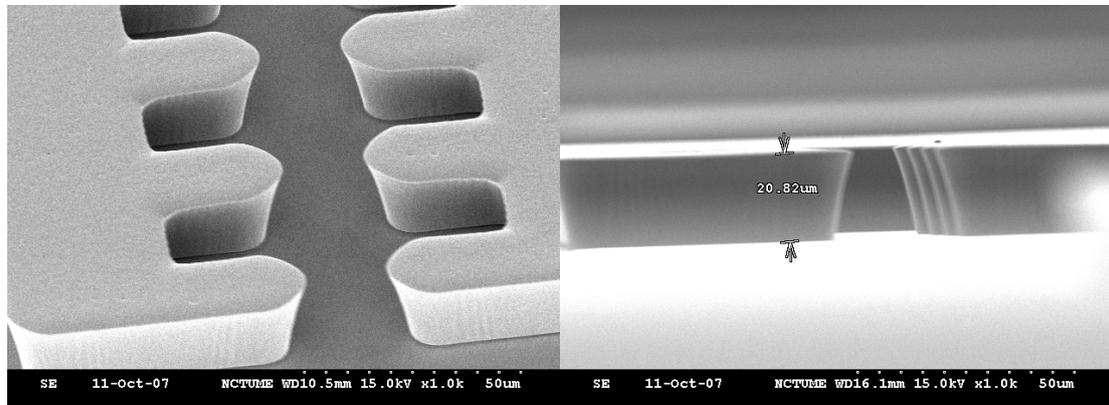


圖 26 電鍍 40 分鐘之後，並沒有形成預期中的釘環蕈傘微結構。

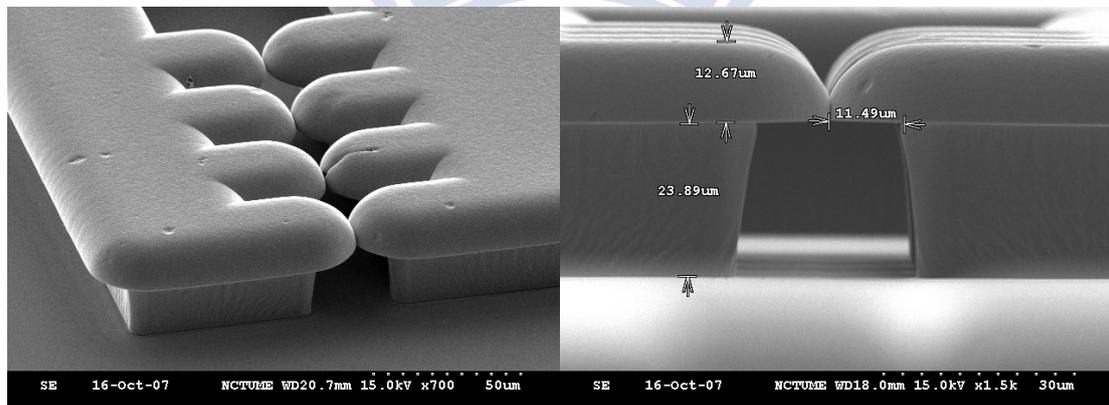


圖 27 電鍍 60 分鐘之後，已經能夠形成封閉的釘環結構，並且蕈傘形狀也已經成形。蕈柄的高度應等同於光阻模仁厚度。

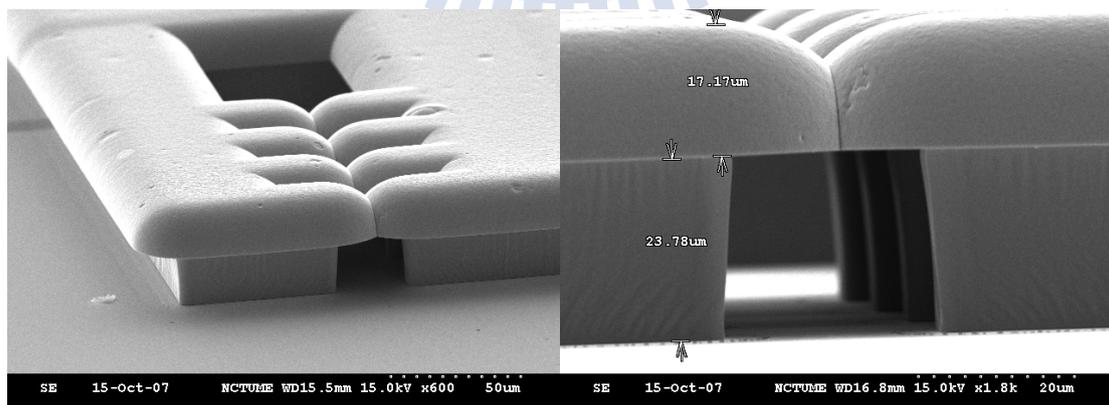


圖 28 電鍍 80 分鐘之後，形成封閉的釘環結構，並且蕈傘形狀繼續增長。

從上面的電鑄測試可以知道光阻厚度原本預期 $25\ \mu\text{m}$ ，但實際上在經過黃光製程之後光阻厚度約 $24\ \mu\text{m}$ 。在電流密度 $20\ \text{mA}/\text{cm}^2$ ，約 60 分鐘可以填滿光阻模仁，並且滿溢出來形成蕈傘形狀讓釘環結構封閉。雖然電鑄八十分鐘亦可形成所需結構，但基於時間效率上的考量，這個實驗的製程選擇六十分鐘的電鍍時間。

4.6 立體微組裝實驗架構

立體微組裝的實驗架設包含了有一個探針測試平台、個人電腦以及客制化的試片固定平台，此平台是由壓克力材料製成，如圖 29，用來測試三種不同焊接樑寬度 ($W_c = 4\ \mu\text{m}$ 、 $11\ \mu\text{m}$ 與 $30\ \mu\text{m}$)結構的立體微組裝的效果。在測試的過程當中，焊接電流以及焊接電壓都會被可程式化的電源供應器紀錄下來，並且存放於電腦當中，可供後續分析。

經過微機電製程製作出來的微結構 (試片)首先放在壓克力平台上，在壓克力平台下方有一個可以移動的圓形磁鐵 (直徑 $15\ \text{mm}$ 、由高斯計- Sypris Test & Measurement Inc. 5100 model - 測量到的磁場強度 $250\ \text{kA}/\text{m}$)放置在試片下方 $5\ \text{mm}$ 處，如圖 29(b)。藉由沿著平台底下的凹槽，磁鐵的移動方向就如同圖 29(b)所示，可在移動路徑上前後移動。藉由改變磁鐵的位置，磁場穿過微結構的磁力線方向也會改變，這樣一來就可以改變鎳微結構的直立角度，如圖 29(c)。當磁鐵在元件的正下方，也就是 $X_{\text{magnet}} = 0$ 時，微結構會被抬起到完全直立的位置，

也就是 90° 的角度。如果移動磁鐵到不同的位置，微結構的旋轉角度可以在 0° 與 180° 之間改變。當微結構被磁場抬起旋轉到一個特定的角度，就可以開始微電阻焊的焊接過程。微電阻焊的過程可分為三個部分：施加壓力、焊接（通以焊接電流）、釋放壓力。首先，電熱式微致動器施加 1.6 伏特，1.2 瓦特的電源，推動懸浮的焊接樑以及轉軸，使得這兩者與固定錨墊(anchor) P_2 接觸。在持續施壓的情況之下，直流的焊接電壓逐漸從零增加到 1.5 伏特，焊接電流就會從固定錨墊(anchor) P_1 經過焊接樑與轉軸流向 P_2 ，如圖 20(b)。經過 150 秒的焊接之後，焊接電壓逐漸降低之後關閉，冷卻焊接區域 (welding site)。然後才會關閉電熱式微致動器的電源，鬆開先前施加的壓力。在完成焊接之後，磁鐵就可移除，完成立體微組裝。隨後若是已經組裝完成的立體微元件需要通以操作電壓，讓元件作動，則可以在固定錨墊(anchor) P_1 與 P_3 之間施以電壓，如此可以檢驗焊接處是否有導通電流的能力。

另外這個研究也測量焊接前後的角​​度，並且作一比較。在元件被磁場抬起後焊接前的旋轉角度可以藉由 CCD 攝影機所拍攝的數位影像測量元件的原始長度 L_1 ，以及旋轉後的投影長度 L_2 ，如圖 29(c)，如此可以計算出抬起的角度， $\theta = \arcsin(L_2/L_1)$ 。這個研究中所使用的 CCD 攝影機搭配光學顯微鏡的解析度可以達每個像素邊長為 $3 \mu\text{m}$ 。對於一個 $400 \mu\text{m}$ 長度 (L_1) 的元件來說，相對應的角度解析度可達 0.5° 。而元件在被焊接之後的角度測量也是採用相同的方法。

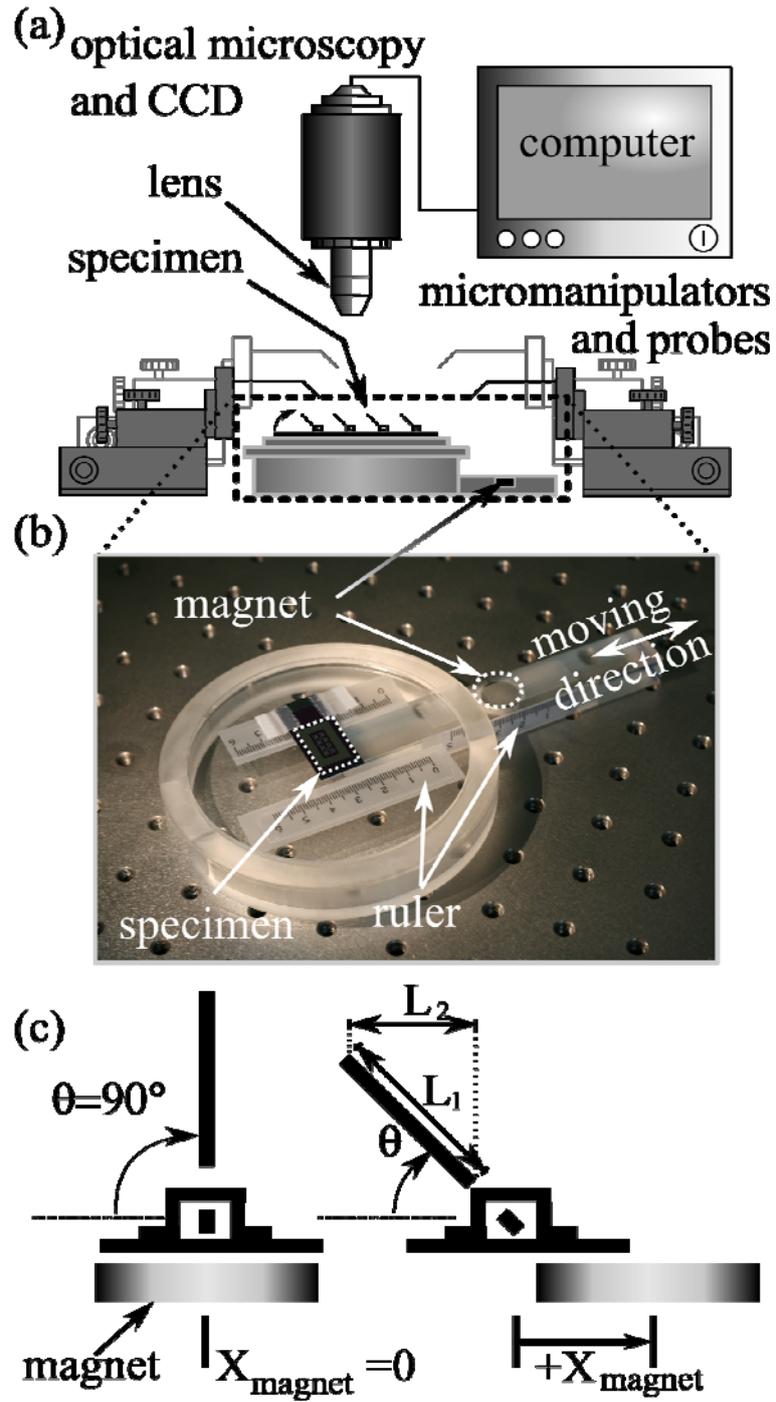


圖 29 (a) 實驗架設示意圖 (b) 可以固定試片 (specimen) 的壓克力平台，在試片下方有可以移動的磁鐵 (magnet) (c) 隨著磁鐵改變不同的位置， X_{magnet} ，微結構立起來的角度也會不同。

4.7 微電阻焊在立體微組裝可行性確立

在這個研究裡面，設計了兩種測試結構，不同點在於有無焊接樑，在這裡先做了定性測試簡化的結構（無焊接樑），第二個設計結構，以先了解微電阻焊是否適合做為立體微組裝的手段。圖 30是測試完成後拍攝焊接處的SEM照片，圖 31是整個元件被直立組裝在空間中的型態。從外觀上的觀察可以發現，焊接處的確有接合的痕跡（圖 30），而且也能夠將微元件固定在空間中（圖 31）。因此驗證微電阻焊應用在立體微組裝技術的可能性。另外從整個結構的角度來看，如圖 31。從定性上的結果可以發現，此設計由於致動器的致動電流以及焊接電流是由同一個電源提供（例如電流都是從P₆ 供應給P₅ 與P₇），因此致動器的右半部分總是承受較大的電流，這個也導致了致動器兩側的V型樑伸長量不同，因而導致右半邊容易挫曲，會有結構變形的不平衡，不利於組裝。在電路上來說，由於焊接電流以及致動器電流無法分開獨立控制，若是增加致動器電流也會增加焊接電流，這也是這個設計在定量測試上的另外一個困難。雖然有結構上以及電路上的問題，但是這個簡化的設計驗證了這個研究使用微電阻焊來進行立體微組裝的可行性。

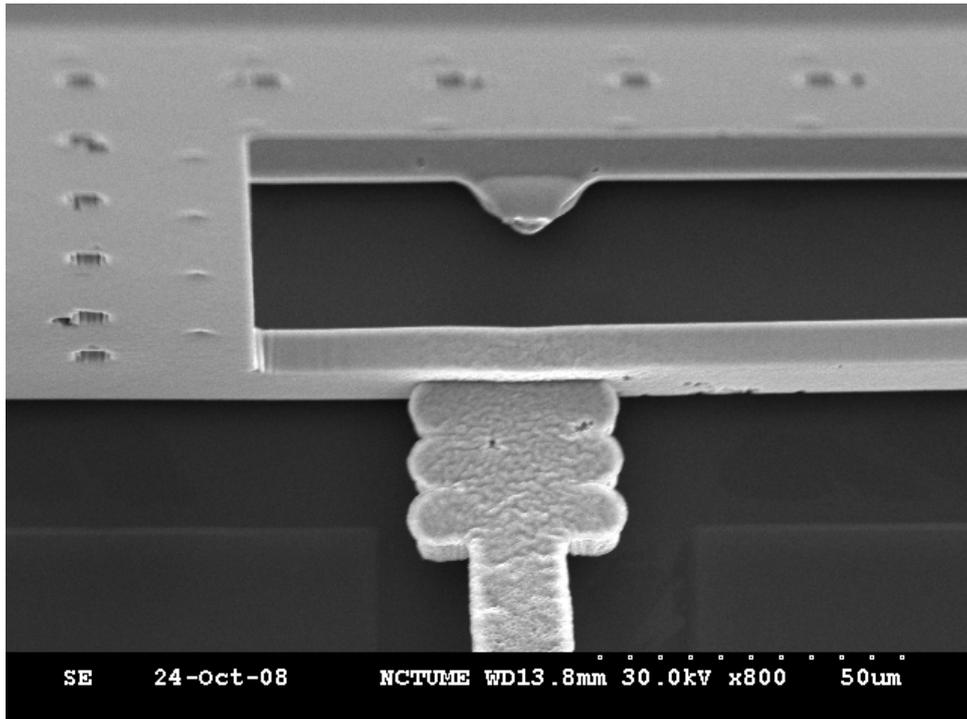


圖 30 焊接處的近拍 SEM 照片，從外觀來看，致動器前端與旋轉軸有熱熔接痕跡，可將微元件固定。

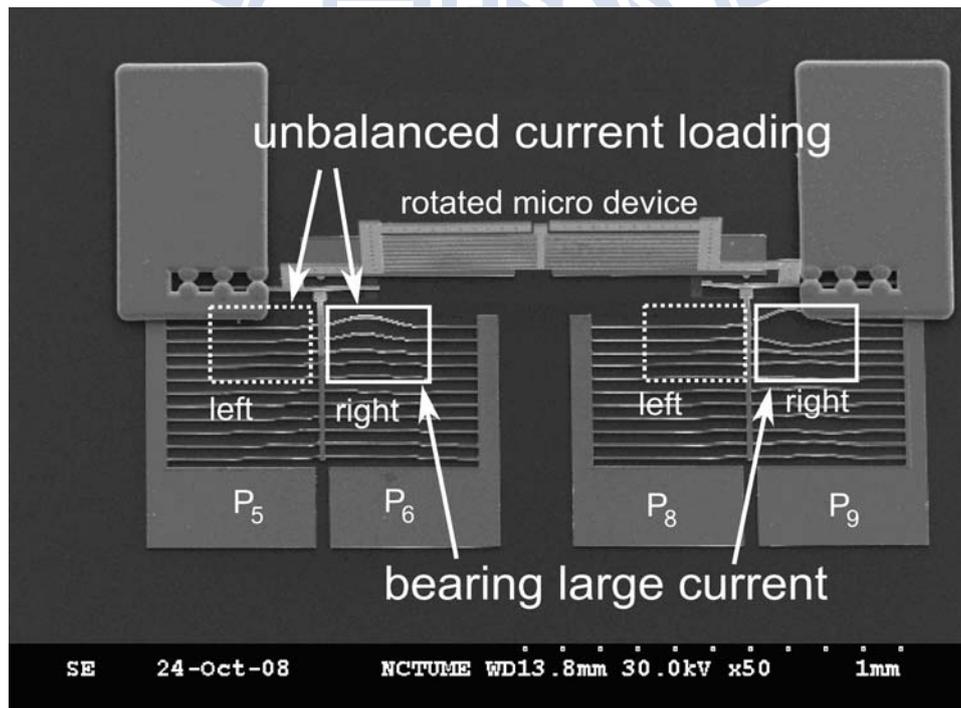


圖 31 無焊接樑微組裝結構照片。兩側旋轉軸焊接完成之後能夠將微元件直立固定在空間中，驗證了微電阻焊用在立體微組裝的可行性。此簡化的測試結構會有電流不平衡的現象。導致致動器右側容易產生挫曲。

4.8 立體微組裝結果與討論

在上節已經使用簡化結構(無焊接樑)，第二個設計方案，來驗證微電阻焊在立體微組裝的可行性。由於簡化結構有其限制，導致了結構上以及電路上的困難。在此節將會提出成功組裝第一設計結構的實驗資料 (定性與定量)來進一步了解這個研究所提出的組裝技術。如圖 32成功地將第一種設計方案的微元件組裝固定在直立的角度上。

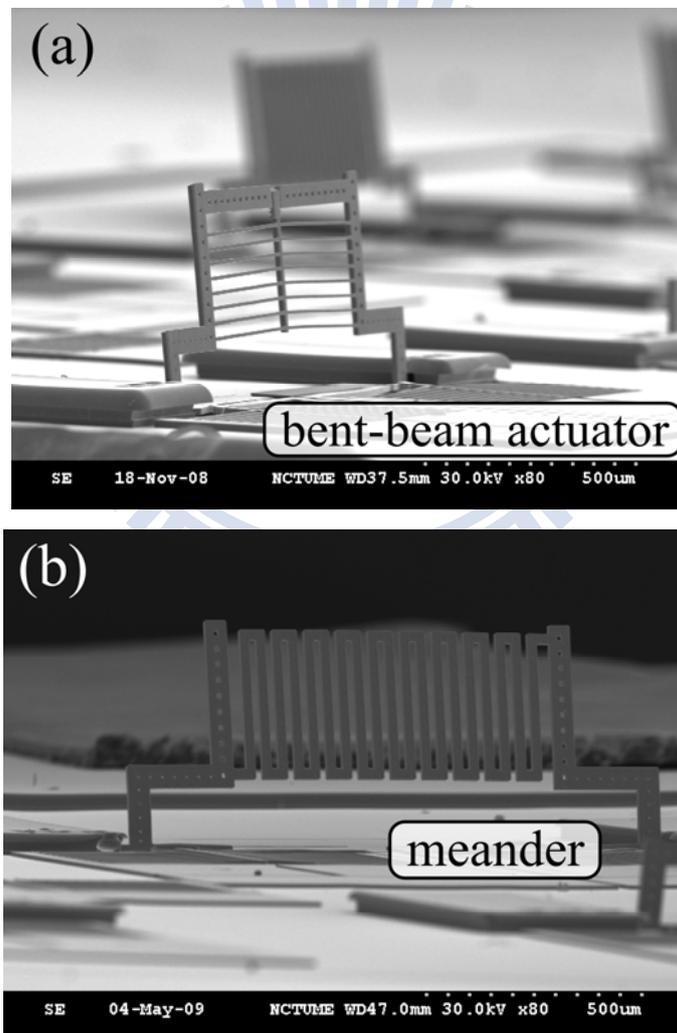


圖 32 成功將第一款結構組裝在出平面的位置上，設計的微元件有 (a) 致動器與 (b) 曲折式結構

藉由移動在平台下方的磁鐵，讓它靠近或者遠離試片，可以舉起銜接的鎳微結構在不同位置。而這兩者之間的關係，就如圖 33所示，在這裡當 $X_{\text{magnet}} = 0$ 定義成磁鐵就在試片的正下方，而且在這個位置微結構是完全直立的狀態。在圖 33中，所有的數據都是針對同一個元件多次重複量測的結果。在不同磁鐵位置的情況之下，重複三次測量舉起的角度。從結果可知，當 X_{magnet} 介於 +12 mm 與 -12 mm之間，旋轉角度可以在 10.5° 與 175° 之間改變。若是磁鐵的位置距離試片超過 ± 12 mm的話，旋轉的角度可以分別達到 0° 或者 180° 。

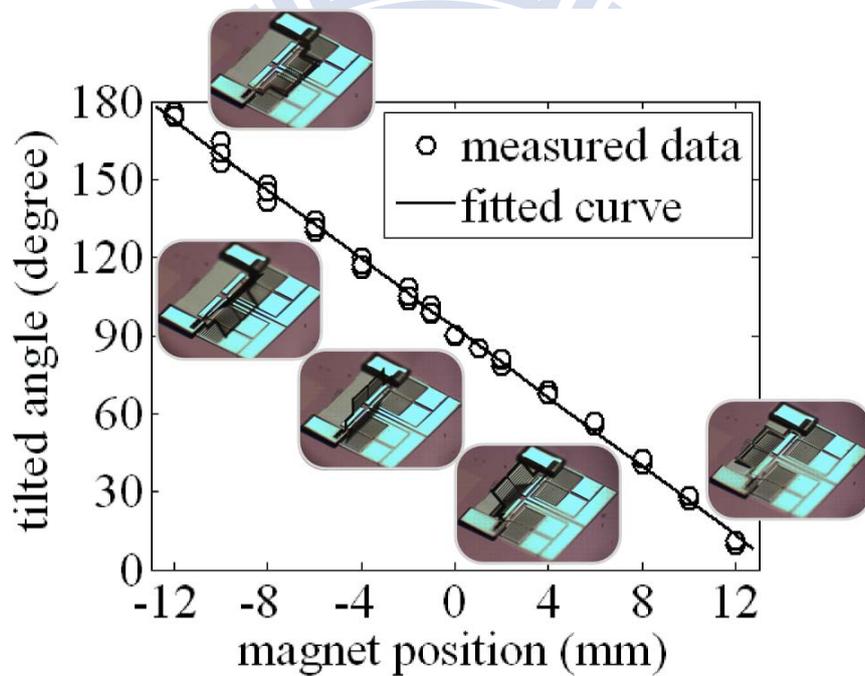


圖 33 在焊接程序之前，磁鐵位置與元件旋轉角度之間的關係

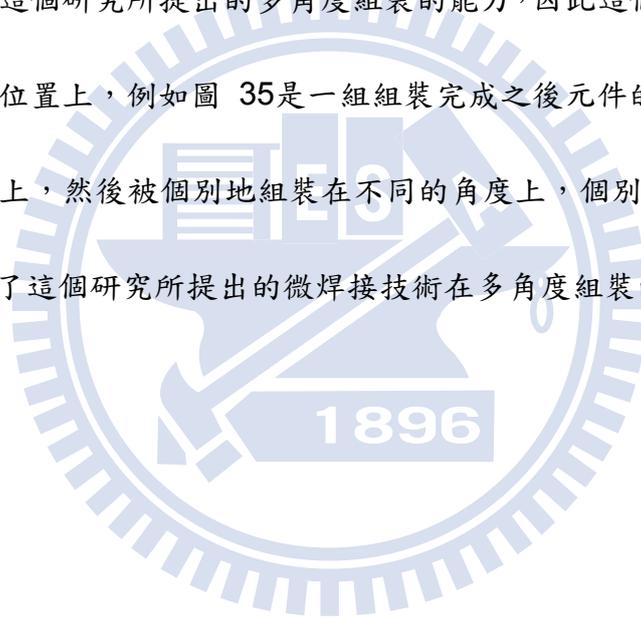
然而，當元件被轉到將近 180° 的時候，元件會跟其他固定在基板上的結構產生碰觸。而且也因為結構厚度的關係，懸浮的轉軸也會被抬昇一小段距離，因此焊接樑以及轉軸將不會完全處在同一平面的位置。如以一來就會造成焊接的困難。更進一步說，在焊接的過程當中，致動器會施力往前推動已經旋轉了一個

角度的轉軸，而轉軸被抬升一小段距離，會使得 0° 或者 180° 的焊接不容易達成。

圖 34 是電阻焊過程中經由光學顯微鏡拍攝下的圖片，在焊接區域的變化情況。

焊接過程首先將試片放置固定在壓克力平台之後，元件受到外加磁場的影響而舉起，圖 34(a)，隨後，致動器推動焊接樑和旋轉軸，使得兩者與固定錨墊 (anchor) 接觸，圖 34(b)。當微焊接完成之後，致動器就會停止出力，放開焊接點，圖 34(c)。

為了要驗證這個研究所提出的多角度組裝的能力，因此這個實驗嘗試著將元件固定在不同的位置上，例如圖 35 是一組組裝完成之後元件的照片，三個元件都在同一片晶片上，然後被個別地組裝在不同的角度上，個別大約是 14° 、 35° 以及 90° 。展示了這個研究所提出的微焊接技術在多角度組裝的能力。



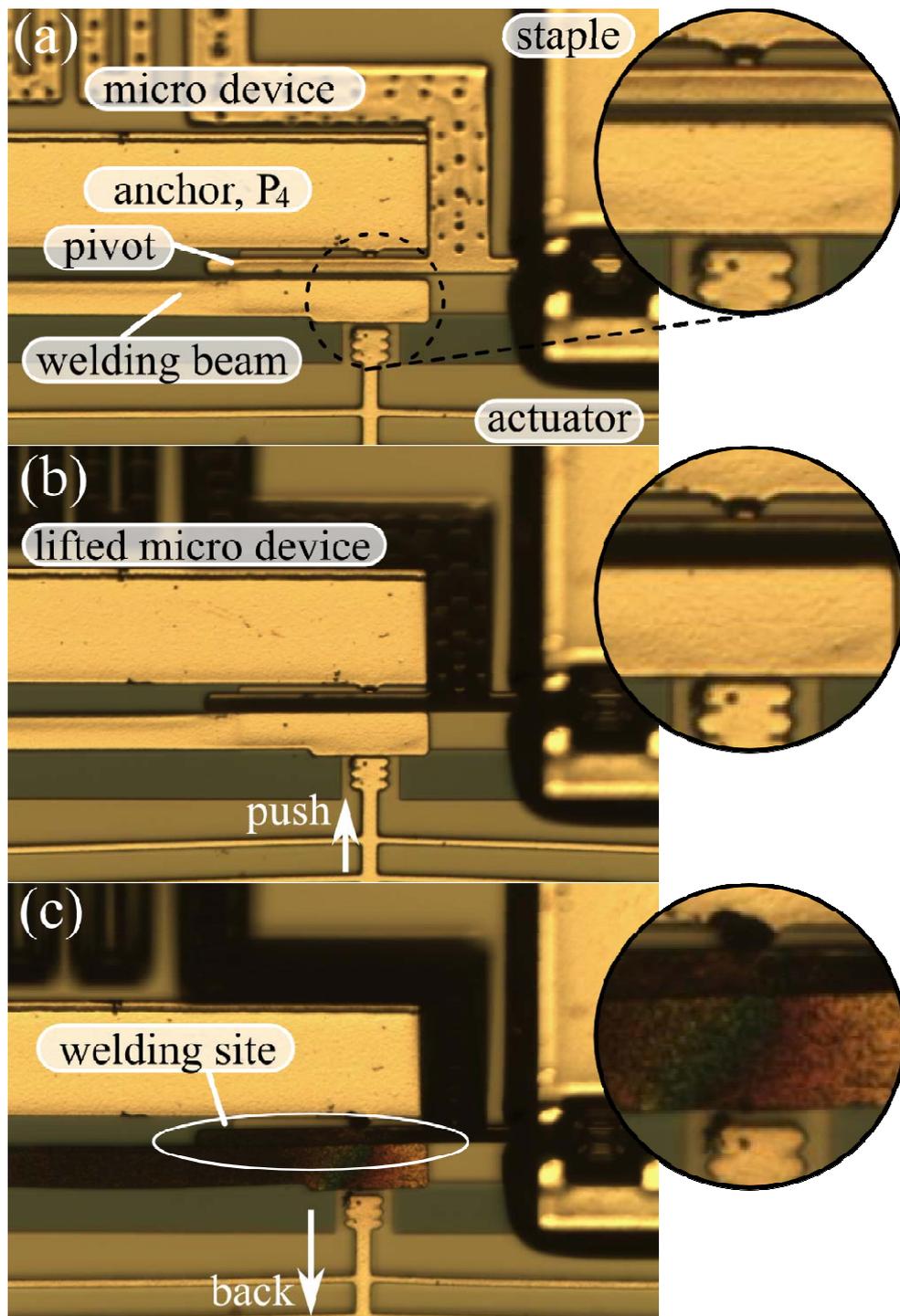


圖 34 光學顯微鏡拍攝的照片：立體微組裝的焊接過程 (a) 製造完成後的結構在致動器前端、焊接樑、轉軸與固定錨墊之間都有間距 (b) 致動器推動焊接樑與轉軸接觸，使得焊接區域 (welding site) 有適當的接觸壓力 (c) 焊接完成之後致動器停止施力放開焊接區域。

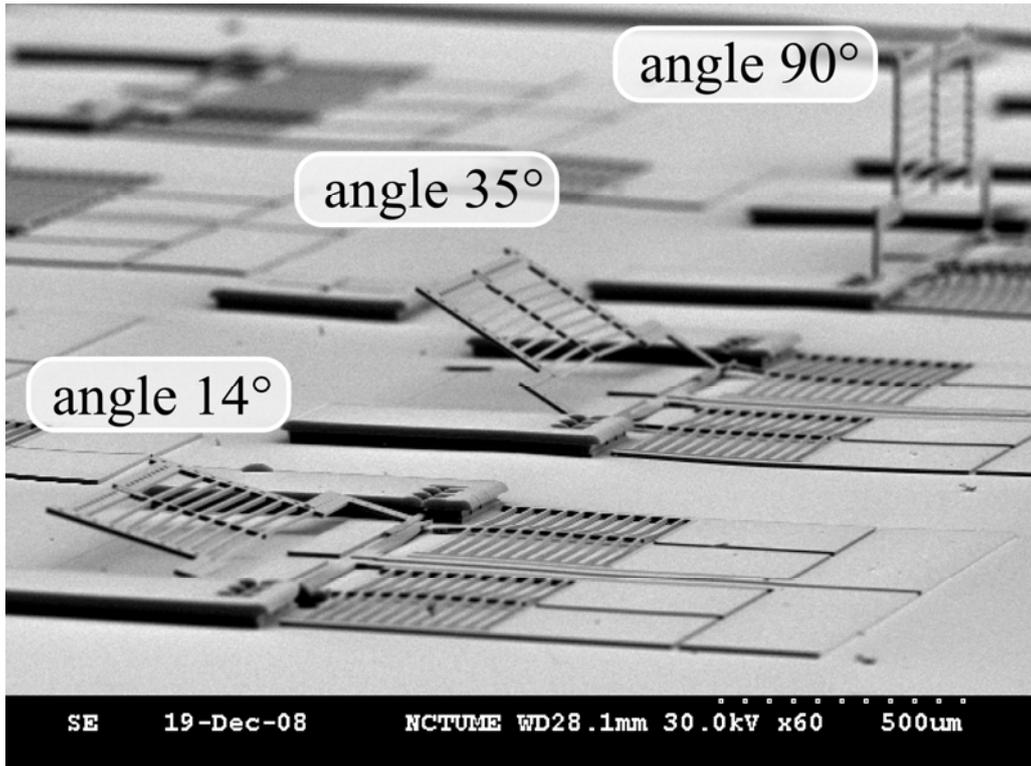


圖 35 經過立體微組裝之後的微元件，這三個微元件被固定在三個不同的角度，分別是 14°，35°以及 90°。這裡展示了這個研究所提出的立體微組裝技術能夠將元件組裝在各種不同的角度。

除此之外，為了要定量地了解在焊接前後角度上是否有差異，因此另外量測了 48 個元件在焊接前後的角度變化，在定量的實驗當中，元件在被磁場舉起後焊接前的角度將被紀錄下來，並且與焊接後的角度作一個比較，如圖 36。當磁鐵位置 X_{magnet} 在 0、4、8 與 12 mm 時，焊接之後平均的角度是 90.3°、66.5°、43.6°以及 15.5°，同時重複測量多次在這些位置角度的標準差是 4.1°、2.3°、3.6°以及 3.5°。再比較焊接前以及焊接之後的角度，當 $X_{\text{magnet}} = 12$ mm 的時候，兩者的差異最小，其值約 2.3°。由以上數據可定性證明，這個研究所提出的組裝方法不僅僅可以將元件作三度空間的組裝，更進一步，還可以組裝在不同的角度上，也就是多角度組裝。

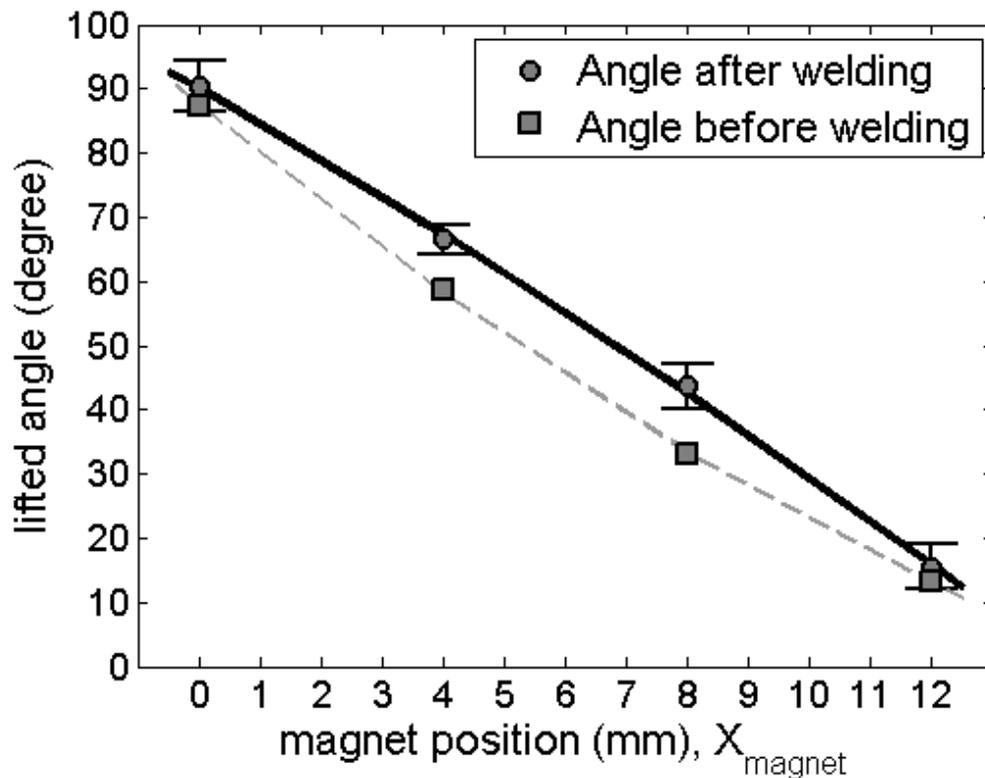


圖 36 磁鐵位置介在 0 至 12 mm 之間，焊接前與焊接後的角度變化。

在焊接過程當中，隨著時間的焊接電壓與電流都有被紀錄下來，依據這些資料，可以計算出每個時刻瞬間的電阻值，或者稱為焊接過程中的動態電阻。動態電阻在此定義為某個時間點的瞬間電壓除以瞬間電流。在這個研究利用元件直立 90 度位置時的微電阻焊的測量資料來得到的動態電阻的曲線，如圖 37，它所呈現的是一個典型的動態電阻。在傳統電阻焊中已經有許多研究針對動態電阻提出相關的實驗與觀察，並且解釋它在焊接過程中的變化情況[30, 31]，在這個研究當中，也觀察到動態電阻在焊接的過程當中有特定的變化，如圖 37(a)。

在焊接尚未發生的時候，表面上有許多微觀的粗糙突起。當焊接樑與轉軸的焊接處開始接觸的時候，這些微小的突起互相接觸，因而形成可能的電流路徑。

然而在一般情況之下，金屬表面上存在氧化物或者細微的污染物，這些物質會對電流產生很高的電阻。因此在電阻焊剛開始的期間（圖 37(a)），動態電阻曲線會有一個很高的值。隨著電壓逐漸增加，電流會穿破這層絕緣層，讓表面氧化物崩潰，使得電流得以通過微小的接觸點。當電流通過這些接觸點時，會產生焦耳熱，局部的溫度也隨之上升，可以進一步軟化這些細微突起，因而增加接觸的面積，導致電阻下降。然而由於金屬的電阻係數隨著溫度增加而增加，這個效應又會使得電阻升高。在這個階段，電阻的上升或者下降就是倚賴這兩個互相抵抗的效應所決定，其結果就是在這階段的電阻會有一個局部最小值。隨後由於電阻係數隨溫度增加而上升的效應比較明顯，因此電阻會從局部最小值開始往上增加。隨著焊接過程繼續進行，熱量持續產生，更多的材料逐漸被熱量熔融，也就是焊接過程中的熔核逐漸成長擴大，導致更多的材料接觸。當溫度逐漸穩定之後，動態電阻會從局部的高峰往下降，此時熔核成長的效果主宰了這個部分的動態電阻曲線，所以導致電阻下降，到最後電阻會達成一個平衡沒有變化的狀態，完成電阻焊的整個過程，如圖 37(a)所示，焊接完成時間約 22 秒。

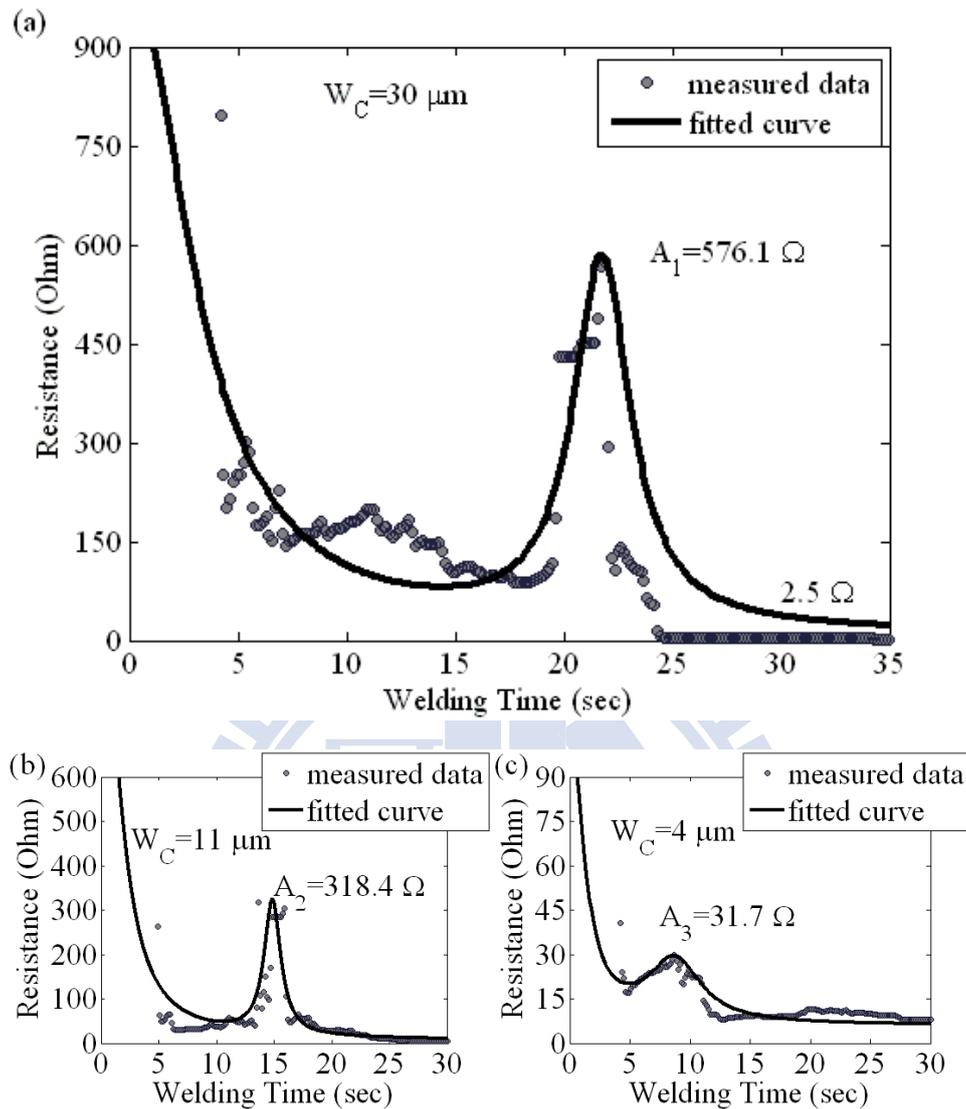


圖 37 三種不同焊接樑寬度微元件的動態電阻曲線:(a) $W_C = 30 \mu\text{m}$ (b) $W_C = 11 \mu\text{m}$ 以及 (c) $W_C = 4 \mu\text{m}$ 。

在這個研究中設計了三種不同寬度的焊接樑，除了 $W_C = 30 \mu\text{m}$ 已如前述說明之外，圖 37(b)(c)也顯示了另外兩種元件的動態電阻曲線。從結果發現，三種寬度的元件在焊接時都有類似的動態曲線的變化。在同一個焊接電壓 1.5 伏特的情況下，從結果數據可以發現局部最大值 A_1 、 A_2 與 A_3 隨著寬度的縮小而降低。比較寬的焊接樑有比較大的彈簧常數，這代表了抵抗致動器的阻力也比較大。致

動器輸出的力量必須要先抵抗焊接樑的阻力，之後的力量才提供焊接時所需要的接觸壓力。在相同的致動器出力情況下，比較窄的焊接樑，阻力比較小，因此接觸壓力比較大，可以使得接觸面比較緊密地接觸，如此一來，可有比較低的局部最高電阻。先前微電阻焊的可行性評估研究當中，可以知道接觸電阻越小，將有助於提高焊接的接合力。然而，太窄的焊接樑卻會受到焊接過程當中的熱量影響產生不必要的熱變形，如圖 38。在 $W_C = 11 \mu\text{m}$ 的元件當中，可以觀察到明顯的熱變形。相對來說， $W_C = 30 \mu\text{m}$ 的焊接樑在經歷過焊接過程之後依舊可以保持原來的幾何外型。綜合以上，焊接樑的寬度這兩者的妥協。過寬的焊接樑不利於焊接的接合強度，過細的焊接樑無法承受焊接電流而產生熱變形。

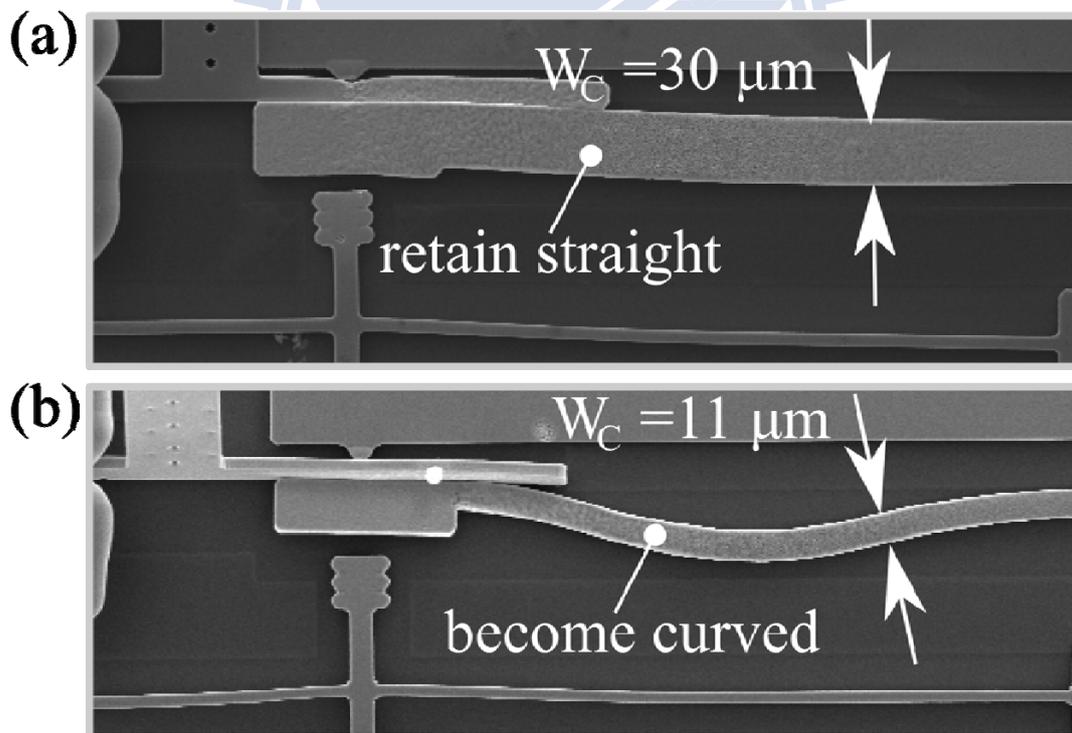


圖 38 掃描式電子顯微鏡所拍攝的照片，在焊接之後焊接樑的熱變形: (a) $W_C = 30 \mu\text{m}$ (b) $W_C = 11 \mu\text{m}$

對於相同寬度的焊接樑來說，不同角度的焊接對於動態電阻並沒有明顯的差異。設計焊接樑以及旋轉軸時，橫剖面理想的形狀應是矩形，但是由於製程上的誤差，黃光微影製程的光阻橫剖面往往都是梯形，導致最後製造出的焊接樑以及旋轉軸是具有倒梯形的橫剖面。因此兩者在焊接時，受到致動器推擠後的接觸容易是線的接觸，而不容易是面與面的接觸。更進一步說明，即使在不同的角度，接觸的面積不會有劇烈的變化，因為都是線的接觸。例如在 90 度位置不會是面與面接觸而與 45 度位置的接觸面積有所不同。因此，這可能導致在不同的焊接角度有類似的動態電阻曲線。

另外，在這個研究中，鉸鏈結構的間隙設計得足夠讓旋轉軸在其中自由轉動，以避免產生卡住的情況[9]，實驗過程當中也沒有發現鉸鏈結構有卡住的現象。然而在製造過程當中，釋放結構過程當中的粘黏現象卻是經常發生，按照這個實驗的製程能力，在同一個晶粒上的八個元件，至少有六個能夠成功被釋放。一旦微結構可以成功地被懸浮，後續的磁場致動都可以可靠地被順利驅動產生出平面的旋轉。因此只要鉸鏈結構設計的安全裕度夠大，將不會是實驗過程的瓶頸。

在這個實驗當中，另外還磁性舉起、組裝並且測試一個主動的微元件，例如一個電熱式致動器。並且給予這個已經組裝過後元件所需的電力，在 0.56 瓦特的電源供應之下，這個組裝過後的元件可以達到 $27.7 \mu\text{m}$ 出平面的位移量，如

圖 39。如此，在這個立體微組裝技術當中，可以更進一步確認焊接處在焊接完成之後的導電能力。將可以實現各種微致動器以及微感測器的立體微組裝應用上。

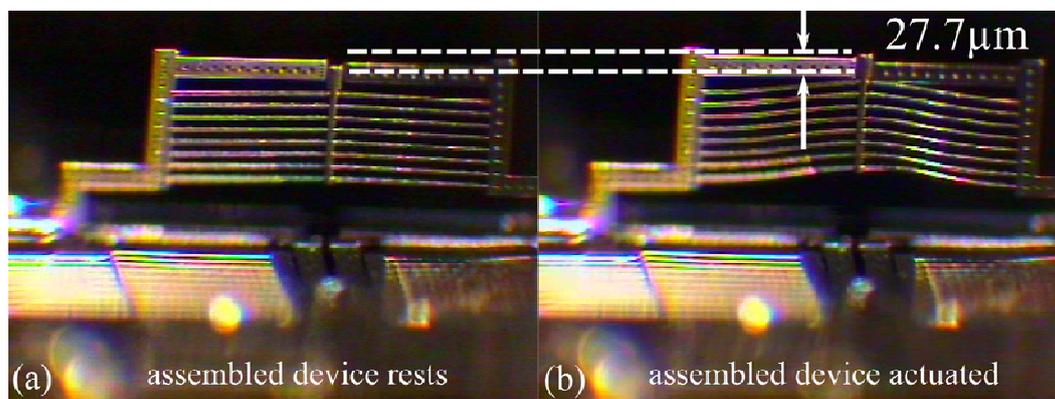


圖 39 測試已經組裝完成的微致動器 (a) 原來狀態 (b) 在供應 0.56 瓦特的電力之後，前端向上位移了 $27.7 \mu\text{m}$ 。

第五章 總結與未來工作

這個研究的目標為利用靜磁場抬昇結構以及微電阻焊組裝以達成立體微組裝的目的。而微電阻焊技術也成功發展出來，並且配合靜磁式抬昇機制能夠成功將一個微元件（致動器）組裝在出平面的立體空間當中。本章節將會對這個研究完成的部分作一總結，並且提出未來可以繼續發展的方向，以及可以加以改善的課題。

5.1 總結

在微電阻焊技術方面，利用結合熱致動器的微電阻焊在這個研究中成功地組裝平面結構。這個研究中所設計的微焊接結構包含了有一個致動器單元以及兩個焊接單元。製程以兩道光罩配合金屬基面型微加工技術即可完成。歸納這個研究的結果，接觸電阻、接觸壓力、焊接時間以及焊接能量對於焊接效果皆有顯著的影響。其中，接觸電阻隨著接觸壓力的上升而增加。比較小的接觸電阻可以讓較大的電流通過。由於焊接功率與電阻以及電流平方成正比，雖然電阻下降，但是電流卻增加，並且電流對於功率的影響大於電阻，因此整體的功率上升。

對於同樣的能量，大焊接功率可以節省生產時間。根據所供應的能量大小，可以將不同的狀況分為三類：熱量不足無法焊接、熱量增加產率提高、熱量充足產率達 100%。對於成功的焊接來說，提供的熱量必須至少達到 1 J 以上，可以達到最高產率。當能量低於 0.05 J，熱量將不足以產生良好的焊接。這個研究已

經討論並且說明重要參數對於微焊接技術的影響，並且透過焊接後電阻可證實，焊接後的結構能夠導電傳送電訊號或者電能。這個實驗提供了一個新的方式，能夠傳導電力，以及能夠為微組裝提供機械強度。

這個研究所提出的立體微組裝技術已經被驗證而且可以成功實行。藉由靜磁式抬舉以及微電阻焊技術，銜接的鎳金屬微元件可以被抬起並且固定在多樣化角度的位置上。設計上的考量，例如致動器的配置以及焊接樑的寬度，也作了探討與了解。實驗結果發現，在焊接樑寬度上需要作兩方面考量與妥協，其一是要達到高接觸壓力，需要細的焊接樑，另一是降低熱變形，需要粗的焊接樑。在動態電阻變化當中，可以觀察到不同的主導因素影響著電阻率以及接觸面積。這個研究所提出的微組裝技術不僅可以提供導電的接合更可以有助於立體微組裝的自動化過程。更進一步，在磁性抬舉的運作下，微結構抬舉的角度可以被外界磁場的方向所決定。這部分可以由不同磁場方向可以影響抬舉角度的資料來驗證。未來可以努力的方向在於不同磁鐵位置所產生的不同磁場方向，應該可以進一步發展其他更精確的方式來定性地決定。

5.2 未來工作

這個研究所使用的主要技術：微電阻焊技術與靜磁式抬升結構。目前已經驗證電阻焊技術不只可在傳統機械領域大尺寸下，有廣泛的應用，在微米尺寸也有應用的潛力。並且也已經對於主要參數對於電阻焊的影響做了研究調查，將有助

於微電阻焊技術往後的應用。

在未來延續發展方面，焊接前後的角度控制若是能夠更精確，將有助於將此組裝技術應用於光學元件上，例如微鏡面的組裝。在此提出另外一個可能可以解決的結構配置，圖 40所示的是一個簡易的示意圖。從兩側固定旋轉軸，以避免再施加焊接接觸壓力時，影響焊接角度。

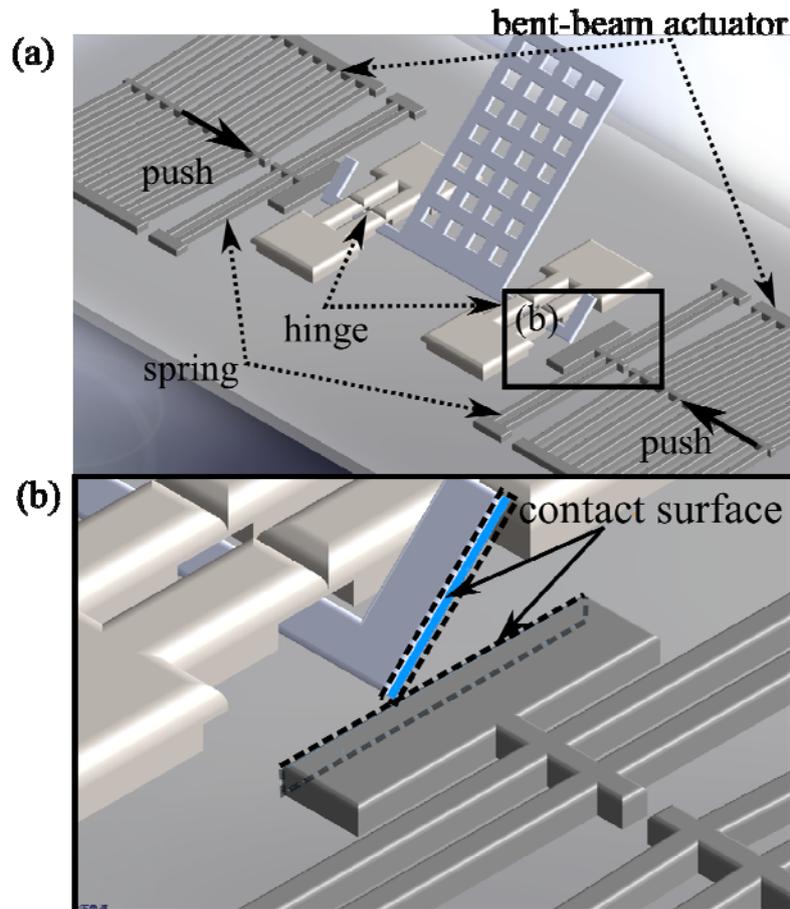


圖 40 側式焊接立體微組裝，未來可嘗試的另一種結構配置，期望能夠更精確控制角度。

另一個可能發展的方向是射頻元件的出平面組裝。在微機電系統當中，射頻元件一直佔有重要的地位，而其中利用微機電系統技術所製作的電感元件更是應用廣泛。利用面型微加工所製作出的電感的效能表現經常由於基板損耗導致效能

下降，因此其中一個未來的發展方向可以朝向將立體微組裝應用於電感元件的組裝，以增加電感的效能。



參考文獻

- [1]Zou J, Liu C, Trainor D R, Chen J, Schutt-Ainé J E and Chapman P L 2003 Development of three-dimensional inductors using plastic deformation magnetic assembly (PDMA) *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 51 1067-75
- [2]Chen J and Liu C 2003 Development and characterization of surface micromachined, out-of-plane hot-wire anemometer *J. Microelectromech. Syst.* 12 979-88
- [3]Fan Z, Chen J, Zou J, Bullen D, Liu C and Delcomyn F 2002 Design and fabrication of artificial lateral line flow sensors *J. Micromech. Microeng.* 12 655-61
- [4]Ok J, Lu Y-W and Kim C J 2006 Pneumatically driven microcage for microbemanipulation in a biological liquid environment *J. Micromech. Microeng.* 15 1499-504
- [5]Wu M C, Lin L-Y, Lee S-S, and Pister K S J 1995 Micromachined free-space integrated micro-optics *Sensors and Actuators A* 50 127-34
- [6]Tsui K, Geisberger A A, Ellis M and Skidmore G D 2004 Micromachined end-effector and techniques for directed MEMS assembly *J. Micromech. Microeng.* 14 542-49
- [7]Mayyas M, Zhang P, Lee W H, Popa D and Chiao J C 2009 An active micro joining mechanism for 3D assembly *J. Micromech. Microeng.* 19 035012
- [8]Johnstone R W and Parameswaran M 2001 Self-assembly of surface-micromachined structures using electrostatic attraction *Proc. SPIE* 4561 pp 66-76
- [9]Ardanuc S, Lal A and Reyes D 2007 Process-Independent, Ultrasound-Enhanced, Electrostatic Batch Assembly *14 th Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '07 (Lyon, France: IEEE)* pp 407-10
- [10]Li L, Zawadzka J and Uttamchandani D 2004 Integrated self-assembling

and holding technique applied to a 3-D MEMS variable optical attenuator *J. Microelectromech. Syst.* 13 83-90

- [11]Johnstone R W, Sameoto D and Parameswaran M 2006 Non-uniform residual stresses for parallel assembly of out-of-plane surface-micromachined structures *J. Micromech. Microeng.* 16 N17-22
- [12]Tsang S-H, Sameoto D, Foulds I G, Johnstone R W and Parameswaran M 2007 Automated assembly of hingeless 90° out-of-plane microstructures *J. Micromech. Microeng.* 17 1314-25
- [13]Yi Y W and Liu C 1999 Magnetic actuation of hinged microstructures *J. Microelectromech. Syst.* 8 10-7
- [14]Iwase E and Shimoyama I 2005 Multistep sequential batch assembly of three-dimensional ferromagnetic microstructures with elastic hinges *J. Microelectromech. Syst.* 14 1265-71
- [15]Kaajakari V and Lal A 2003 Thermokinetic actuation for batch assembly of microscale hinged structures *J. Micromech. Microeng.* 12 425-32
- [16]Harsh K F, Bright V M and Lee Y C 1999 Solder self-assembly for three-dimensional microelectromechanical Systems *Sensors and Actuators A* 77 237-44
- [17]Syms R R A 1998 Rotational self-assembly of complex microstructures by the surface tension of glass *Sensors and Actuators A* 65 238-43
- [18]Syms R R A 1999 Surface tension powered self-assembly of 3-D micro-optomechanical structures *J. Microelectromech. Syst.* 8 448-55
- [19]Ebefors T, Kalvesten E and Stemme G 1998 New small radius joints based on thermal shrinkage of polyimide in V-grooves for robust self-assembly 3D microstructures *J. Micromech. Microeng.* 8 188-94
- [20]Yang H-A, Lin C-W and Fang W 2006 Wafer level self-assembly of microstructures using global magnetic lifting and localized induction welding *J. Micromech. Microeng.* 16 27-32

- [21]Zou J, Chen J, Liu C and Schutt-Ainé J E 2001 Plastic Deformation Magnetic Assembly (PDMA) of Out-of-Plane Microstructures: Technology and Application *J. Microelectromech. Syst.* 10 302-09
- [22]Fedder G K and Howe R T 1991 Thermal assembly of polysilicon microstructures *Proc. IEEE Micro Electrto Mechanical Systems (Nara, Japan)*, 63-68
- [23]Fedder G K, Chang J C and Howe R T 1992 Thermal assembly of polysilicon microactuators with narrow-gap electrostatic comb drive *5th Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop* 63-8
- [24]Wilcox W L, Condra J R, Kearns W H, Betz I G, Frohlich R L, Hannahs J R, Manz A F, Pense A W, Privoznik L J, Rager D D and Somers R E 1980 *Welding handbook: resistance and solid-state welding and other joining process* vol 3, ed W H Kearns (Miami, FL) American Welding Society
- [25]Sooahoo R F 1965 *Magnetic Thin Films* , ed Seitz F (New York, NY: Harper & Row) 27-36
- [26]Judy J W and Muller R S 1997 Magnetically actuated, addressable microstructures *J. Microelectromech. Syst.* 6 249-56
- [27]Que L, Park J-S and Gianchandani Y B 2001 Bent-beam electrothermal actuators---part I: single beam and cascaded devices *J. Micromech. Microeng.* 10 247-54
- [28]Sinclair M J 2000 A high force low area MEMS thermal actuator *Proc. 7th Intersociety Conf. on Thermal Phenomena (Las Vegas, NV)* Vol 1 127-32
- [29]Hsu C-P, Liao T and Hsu W 2003 Electrothermally-driven long stretch micro drive with monolithic cascaded actuation units in compact arrangement *12th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS '03,(Boston, MA: IEEE)* 1 8-12
- [30]Savage W F, Nippes E F and Wassell F A 1978 Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds *Welding Journal* 57 43s-50s

[31]Bickinson D W, Franklin J E, and Stanya A1980 Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring *Welding Journal* 59 170s-6s

