

國防大學中正理工學院

赴美進修心得報告書

鋁鈦酸鉛薄膜微致動器

操作原理與製作

報告人：張枝成上校

中華民國 94 年 12 月

目錄

| | |
|------------------------------|----|
| 壹、進修依據..... | 3 |
| 貳、進修學校..... | 3 |
| 參、進修過程..... | 5 |
| 一、研究動機與目的..... | 5 |
| 二、研究內容..... | 9 |
| (一) 微致動器之基本元件—鋁鈦酸鉛薄膜..... | 9 |
| (二) 鋁鈦酸鉛薄膜製作..... | 12 |
| (三) 鋁鈦酸鉛薄膜鐵電性質與微致動器操作原理..... | 17 |
| 一、研究成果..... | 20 |
| 二、未來發展..... | 21 |
| 肆、結語..... | 21 |
| 參考文獻..... | 23 |
| 相片..... | 25 |
| 附件一..... | 38 |

壹、進修依據

職係奉國防部民 94 年 5 月 6 日選返字第 0940006301 號令，赴美國州立華盛頓大學 (The University of Washington, 簡稱 UW) 機械工程學系 (Department of Mechanical Engineering) 短期進修。進修期限自民國 94 年 6 月 14 日起至 94 年 12 月 15 日止。

貳、進修學校

美國州立華盛頓大學(以下簡稱華大)是美國西岸著名大學之一，根據世界日報 2005 年 9 月 25 日的報導：倫敦一家發行數量約一百萬份的新聞雜誌「經濟學人(The Economist)」，本月將華州最著名的大學華盛頓大學列為全球最頂尖大學的前 20 名。這一則報導可以說是華大自西元 1986 年創校以來，被評價排名最好的一次。華大教授中有六位諾貝爾獎得主，在全美國公立大學中，可以說是得到最多的聯邦研究經費。華大機械系早在 1906 年就培養出了 5 位大學畢業生，而從機械系的相片檔案中[文獻 1]，可看到早在 1909 年(清末)機械系的工程圖課程班級裡就有女學生。華大座落於西雅圖市東北角，校園佔地約

中正理工學院的四倍大，當年創校時西雅圖人口只有兩百五十人，而今每日進出華大校園的人數達四萬人[文獻 2]。校園建築主要採哥德(Gothic)式與現代式的組合(相片一、二)，遠眺群山，近觀明潭(相片三、四)，景色怡人。

華大全校共有 22 座圖書館，其中 Suzzallo Library 屬最大(相片五)，擁有最古色古香的高挑閱覽室(相片六)，而 Odegarrrd Undergraduate Library 則有各項視聽設備及教科書，該館的 DVD 影片數量達兩萬支以上，根據個人的觀察，華大學生使用該館的情形相當踴躍(相片七)。其他如物理系、化學系、工學院、商學院等亦有各自的圖書館。為了協助相關學院發展微機電，華大設置了內有無塵室的技術中心(簡稱 WTC)，採集中管理重要儀器設備，分享昂貴資源之政策。體育中心設置了各式各樣的體育場地與裝備，尤其是具有三樓高之看台的體育場(相片八)，非常雄偉，在球季裡常作為校際美式足球比賽場地，而華大的學生及校友通常會穿上紫色服裝為華大代表隊加油，而紫色與金色是華大的代表顏色。華大校園的另一特色就是沒有明顯的圍牆(相片九)，校園外的居民可自由進出校園，校門不明顯卻獨樹一格(相片十)。華大最新的建築之一應屬法律所的 William H. Gates Hall(相片十一)，

獨特的外型，令人印象深刻，尖銳的屋角叫人心生畏懼，依照吳豐隆的說法[參考文獻 3]，這種形狀尖、菱角多的建築屬火形，適合軍警；不知此樓之設計師是否有意要隱喻法律人之人格特質，而建築物的名稱就是為了紀念微軟(Microsoft)公司四位創辦人之一的 William H. Gates，另外三棟新建築分別是 Mary Gates Hall, the Kenneth S. Allen Library 以及 the Paul G. Allen Center for Computer Science and Engineering。華大各式各樣的建築，除了顯現他的多元外，廣場上的藝術創作，依個人的看法似乎有要啟發學生，剛柔並濟、屹立不搖；針鋒相對、危機重重；高聳入雲、頂天立地；春風化雨、優遊自得的意思(相片十二)。

參、進修過程

一、研究動機與目的

在人口持續成長、地球資源日益短少的情況下，日本經濟新聞社早在二十年前就為了因應高度成長時代之後的穩定成長提倡「輕、薄、短、小」作為無上的技術成就與經營竅門而出版了「輕、薄、短、小的時代」一書 [4]。民國七十四年職從台灣大學機械系取得碩士學位而

於台大圖書部的書展中購得該書的翻譯本。該書舉出很多例子說明具有輕、薄、短、小特性的電器用品意外的廣受消費者歡迎，而國內馬遠榮教授在 2002 年也提出輕、薄、短、小且多功能性的電腦和家電品成了大家的最愛；希望越來越精密準確的電子儀器和高速網路通道，也會是置身數位網路時代的迫切問題[5]。國內外學者之前的預測，事實上已經是職目前的切身經驗了，對照十六年前個人奉派至英國進修，雖然當時電腦已算普遍，但筆記型電腦尚未流行；而今，筆記型電腦已算是出國進修人員的基本配備，尤其叫人容易心情隨之起伏、又愛又氣且又不得不與之形影相隨的全球網際網路相關設備已是如同身體的一部分。愛之是因為它為我打開世界之窗，即使人到了美國，仍可以隨時收到國內的消息與院內的每日公報，甚至可以透過語音視訊與國內的研究生線上討論功課，氣之是因為對資訊需求的胃口大了之後就嫌它慢；天天背上背下，就算是輕日久也會嫌它重。從學者的預測至個人的親身體驗，不得不叫人相信具有「小而巧」特徵的產品是市場的新寵。

Maluf 在他的 An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering 一書中[6]，以一則醫療人員如何用「無菌微注射針」與只

有銀幣大小的「心律調節器」緊急救護一位心臟病患者的簡短虛擬故事當開場，敘述來自「小人國」的技術－微機電系統 (Microelectromechanical Systems, MEMS) 或稱微系統技術 (Microsystems technology MST)。Fatikow 與 Rembold 則在他們的 Microsystems Technology and Microrobotics 一書中[7]，認為微系統技術已經變成感應器、致動器及整個控制模組製成之所賴，而成為工業的焦點，且變成具有重大應用潛力的領域。黃楓台在其奈米與微機電一書中[8]，提到微機電系統是目前全世界公認最具未來發展潛力與前瞻性的研究領域之一，而該研究的發展可以回溯到 60 年代對基體電路的研究；在當時主要目標在於將電子電路的微小化，如今各式各樣微小的電子產品已進入了我們的生活。現在科技研發人員又企圖改善傳統加工技術及應用半導體製程技術，製造微小的元件，試圖將各式機械元件微小化，希望能夠像半導體產業一般成為本世紀革命性的技術。

根據「科學人」雜誌 2004 年 3 月[9]號之報導：不遠的將來，大尺寸電視以及電腦螢幕將可以捲起來存放，士兵可以攤開一塊塑膠，上面顯示即時的戰情地圖。而且這種顯示器可以運用在飛行員及士兵的頭盔上，這樣的技術主要就是利用有機發光材料作出更亮、更有效

率以及可以撓曲的先進科技顯示器，美國陸軍科學實驗室曾撥出 200 萬美元進行研發可以從像筆一樣小的通訊裝置攤開的 OLED 顯示器；另美國國防部高等研究計畫署也提供經費，資助研發戰場用的可撓曲式顯示器。目前國內外已有研發單位採用噴墨列印技術(Ink-Jet Printing, IJP)之原理，作為此一先進技術之主要製程，而噴墨列印技術的改良也是職近年來的研究重點之一，已先後獲得工研院與國科會補助經費達五次以上。

職近年來將英國所學的噴霧與霧化原理及技術擴展至微機電領域的軍用可撓式電子地圖之關鍵技術—高分子元件製作，就在此次進修期間也同時完成國科會補助研究計畫「噴墨列印技術應用於高分子元件製作之實驗研究」第一年成果報告。而職此次的主要進修內容—銻鈦酸鉛薄膜也是與微機電系統相關的微感測器與微致動器的基本元件之一，進修目的乃期望將此一元件應用於微噴嘴之製作。以下就銻鈦酸鉛薄膜如何成為微致動器的基本元件；如何製作銻鈦酸鉛薄膜；銻鈦酸鉛薄膜電性質與微致動器操作原理等在研究內容一節中分小節報告之。

二、研究內容

(一) 微致動器之基本元件－鋇鈦酸鉛薄膜

Fatikow 與 Rembold [7]認為微系統技術在經濟上最具吸引力之領域就是利用它來量測物理或化學參數，例如溫度、加速度、壓力或某物質的濃度的微感測器(Micro-Sensor)。事實上，感測器是理工醫領域工作者所熟悉的科技儀具，而感測也不是一項近代的發明；我們不難在眾多歷史記載中找到有關物理參數的量測，例如距離、重量、時間、及溫度。Maluf [4]則認為近代的感測方法是由前兩個世紀所累積的大量科學知識而達到實用；例如我們對於靜電學及電容的熟悉可歸功於十八世紀後期法國的 Charles Augustin de Coulomb 與英國的 John Priestly；1856 年 Lord Kelvin 所發現的壓電阻性(Piezoresitivity)。近代感測的作法乃是將一個特定的物理參數轉換成電能，並且要能排除其他干擾的參數；例如，壓力或加速度被轉換為機械的應力，接著這個應力再被轉換成電力。另外在感測技術中，最常見的還有使用諸如熱電偶材料性質對於溫度的相依性來量測溫度。近代在很多技術運用上，感測器之使用也越來越多，且如同前言中所述有將感測器越做越小之趨勢，今日已有眾多的微感測器出現，而它們在汽車工業、環保、

醫學、生產與製程技術及軍事應用上有很大的潛力。感測器之設計，生產技術及信號處理零件一直在改良，可以說是在微系統技術中發展最快的；微感測器之問題等同於其他微系統技術零件之問題。Fatikow 與 Rembold [5]則將微感測器區分成：力及壓力、位置與加速度、化學、生物、溫度以及流動等類型。

微系統技術的另一個領域則是微致動器(Micro-Actuator)；儘管微感測器已經發展相當成功，而 Fatikow 與 Rembold [5]則提出微致動器應屬構想階段。在發展微系統技術時，自然會發現傳統的運動概念或製造方法不再滿足關於微小化及所牽涉到的問題；要開發微系統及未來的微機械人自然需要研發尺寸十分小、機械構造簡單、高可靠度的、新的、進步的致動器。Maluf [6]歸納出五種常見的致動方法；分別是靜電致動、壓電致動、熱致動、磁致動以及使用形狀記憶合金的相恢復致動。職此次進修的鋇鈦酸鉛薄膜則既屬於力及壓力類的微感測器也是屬於壓電致動的微致動器，目前華盛頓大學機械系與材料科學系正合作發展應用於無線微內視鏡與微助聽器的鋇鈦酸鉛薄膜微致動器。

國內長庚大學圖書館網頁對於鋇鈦酸鉛闢有專欄說明如下[10]：自

1954 年 Jaffe 等人發現銻鈦酸鉛(Lead Zirconate Titanate, PZT)固溶液 (Solid-Solution)材料所具有的優良壓電特性(Piezoelectric Properties)後，PZT 即被廣泛的應用在各種壓電裝置(感測器(Sensors)、致動器 (Actuators)及電壓產生器(Voltage Generators)等)上。PZT 基本上是由 $x\text{PbZrO}_3-(1-x)\text{PbTiO}_3$ ($0 < x < 100$)的固溶相所構成的雙成份系統。它的化學式可表示成 $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ，由於其所屬的鈣鈦礦結構，使得其在加入電場後產生了鐵電(Ferroelectric)性質。而所謂鐵電性(Ferroelectricity)是使指材料本身在外電場之下，具備自發性極化(Spontaneous Polarization)及極化轉移(Polarization Transition)的特性。由於晶格結構變形，使離子偏離其平衡位置而形成電偶極矩(Electric Dipole)；當施加外電場時，會使電偶極矩順電場方向排列，而在電場移去後，仍能保持極化方向的殘留值，此種特性即稱為鐵電性。由於鐵電性質的發生和單位晶格內的不對稱性有絕對的關係，以同屬鈣鈦礦結構的鈦酸鋇為例，當其溫度高於臨界溫度 T_C (居里溫度)時，其結構為簡單立方晶格，晶格參數為 0.4 nm；此時的結構為對稱性，不具有自發性極化；但是當溫度低於臨界溫度時，其晶格中的鈦離子與鋇離子會偏離原本對稱的晶格位置，而促使電偶極(Dipole)的形成。若此自發性的極化可

藉由外加電場來反轉，則這種晶體即稱為具有鐵電性。另外有關鐵電膜(Ferroelectric Films)的相關文獻，Bhalla 與 Nair [11]蒐集了 35 篇論文編輯成冊，值得研究者參考。至於何以具有鐵電性的鋇鈦酸鉛薄膜可用於製作感測器與致動器將於第四節說明，職在華大的這一段時間，主要工作即是參與研究如何製作品質穩定的鋇鈦酸鉛薄膜，以下一節將敘述職參與鋇鈦酸鉛薄膜研製的過程。

(二) 鋇鈦酸鉛薄膜製作

華大機械系沈教授(Professor Shen)與材料科學系曹教授(Professor Cao)組成團隊(以下簡稱沈曹團隊)合作研發鋇鈦酸鉛感測器已有多年，職於今年六月抵達該校時，正逢兩位教授開始研發鋇鈦酸鉛薄膜微致動器。沈教授在震動學領域學有專精，目前已是該系的正教授，而曹教授在奈米結構與奈米材料學有專精，曾於 1993 年出書 Nanostructures & Nanomaterials 乙冊[12]，沈曹團隊對於鋇鈦酸鉛薄膜的製作是採溶膠-凝膠法(Sol-Gel)。

國內長庚大學圖書館網頁對於鋇鈦酸鉛溶膠-凝膠法闡有專欄說明如下[10]：隨著電子產品輕、薄、短、小之發展趨勢，電子陶瓷的應用在電子工業的發展上扮演了舉足輕重的角色，而在眾多製備電子陶

瓷的方法中，溶膠-凝膠法由於可在較低的燒結溫度下製造出具有高純度、高化學均勻度、新化學成份及新微結構之陶瓷材料的潛力，因此在過去十幾年來一直為學術界及產業界廣泛的討論。與其他製備多成份氧化物電子陶瓷的方法相比，溶膠-凝膠法製備之陶瓷材料除擁有較小之粒徑(約 $<1\mu\text{m}$)、高分子程度之化學均勻性及較低之燒結溫度外，其溶膠及粉末之成份、粒徑大小、粒徑分佈及形狀等性質皆可經由前驅(Precursor)溶液的製備條件(如成份、反應溫度、反應物、觸媒種類、溶液濃度及 pH 值等)之改變而加以控制。不過由於溶膠及粉末之性質(如成份、粒徑大小等)，對燒結後陶瓷材料及薄膜的特性有極大之影響；因此探討並了解前驅溶液的製備條件對溶膠及粉末性質及燒結後陶瓷材料及其薄膜而言，是一個非常重要的研究主題，從事溶膠-凝膠製備薄膜者，對此應有深刻體認，才有助於薄膜製備的品質。另外銦鈦酸鉛(PZT)由於其優良的鐵電性質，可應用於焦電熱偵測器、壓電致動器及動態隨機存取記憶體內的絕緣層材料上。銦鈦酸鉛之鐵電特性除了隨著材料內銦與鈦的相對含量不同而有所改變外，同時亦會隨著粉末性質之不同而有所變化。因此，利用銦鈦酸鉛來作為探討溶膠-凝膠法前驅溶液製備條件對多成份氧化物溶膠及粉末性質，與燒結後電

子陶瓷及其薄膜材料特性之影響，是一個相當合適的對象。同理從事溶膠-凝膠製備薄膜者，亦應對此有深刻體認。

在職參與沈曹團隊之前，該團隊採用銦鈦酸鉛溶膠-凝膠法製作微結構的阻尼已有具體成果，例如團隊成員 Yi-Chu Hsu 於 2003 年以 Damping Treatments for Microstructure 論文[13]完成博士學位，在此論文中詳細敘述了溶膠-凝膠法製備銦鈦酸鉛薄膜，而團隊的重要成果亦已逐一發表[例如參考文獻 14-16]。該團隊為了因應微助聽器與無線微內視鏡的研發需要，必須將原先的溶膠-凝膠與浸塗法(Dip Coating)變更為溶膠-凝膠與旋塗法(Spin Coating)製備銦鈦酸鉛薄膜，而此一改變卻遇到了團隊成員之一所謂的「黑點」困擾，造成研究進度稍緩。沈教授建議職每週乙次參與該團隊的定期討論會，而職在經過兩次的會議之後，主動決定協助解決「黑點」的困擾。由於職曾經歷過組長、資圖中心主任與教務分處處長之主管任務，多少體驗過團隊合作的訣竅，因此應用個人的領導經驗、多年的實驗研究心得並參考王海山主編科學方法百科辭典[17]中之實驗方法(Experiment Method)，親自走入第一線與博士生一起調配銦鈦酸鉛溶膠並製作薄膜(如相片十三與十四)，而在職親自與博士生多次進入華大無塵室實際操作實驗約四週之

後，即以「斑點的困擾與研究的樂趣」(如附件一)之簡報於定期會議中提出解決黑點之道。之後職多次協助指導團隊中之博士生 Ryan 與 Joseph 製作研究心得簡報，尤其向研究生們推薦科學方法百科辭典[17]中實驗方法之精隨：實驗是人類實踐活動的一種形式，具有與生產實踐活動相類似的結構。實驗包括實驗者、實驗對象、實驗工具三個要素，三者必須彼此協同，形成一個整體。科學觀察和科學實驗都屬於人類有目的的科學實踐活動，兩者既有聯繫又有區別。狹義的觀察方法即純自然條件下的觀察，只能在天然條件下認識客觀對象，因而受到自然條件的種種限制。實驗方法既可以簡化、純化、延緩客觀過程，又可以強化、激化、加速客觀過程，還可以重複、再現、模擬客觀過程，能夠在變革客觀對象的過程中認識客觀對象，獲得在天然條件下難以獲得的科學事實，強化了人們認識客觀世界的主動性，因此可以說實驗中包含著觀察。我曾多次建議團隊的研究生們用心體會「只有無實驗的觀察，卻沒有無觀察的實驗」之意義。另外為了保證實驗結果的可靠性，我建議他們必須依照正確的實驗方法遵循三項原則(1)確定誤差範圍，在表述實驗結果時，只有同時給出實驗的誤差範圍，才能獲得具有科學價值的結果。(2)要有可比性，為了準確地解釋實驗結

果，必須進行對照實驗，以排除其他各種可能的解釋。(3)要有可重複性，只有進行必要的重複實驗，才能總結出可靠的規律性的結論。目前沈曹團隊的博士生 Joseph 仍多少採納職之建議繼續朝如何製作品質穩定之溶膠-凝膠法銦鈦酸鉛薄膜實驗前進；就在職回國前，Joseph 告知預定明年一月可確定研究成果，而沈教授也當面感謝職願意親自與華大研究生走入第一線「無塵室」實際參與，對於職提出利用水滴滴在半成品白金薄膜上，並以接觸角大小當作檢驗製程良窳依據的建議，持肯定評價。

有關銦鈦酸鉛溶膠-凝膠法、鐵電薄膜、薄膜沉積等課題，職亦蒐集了相關資料，[例如參考文獻 18-22]，這些文獻對於職學習銦鈦酸鉛溶膠-凝膠法並協助團隊指導研究生有相當大的助益。銦鈦酸鉛溶膠-凝膠法主要配方(Recipe)如下：

1. Dissolve 24.48 g Pb acetate in 16 g (15.2 ml) acetic acid in Beaker 1 (Use a cover to reduce dusts but make a 10 ± 2 mm diameter hole in the center). The speed of mixing bar is “7” (equal to 550 rpm).
2. Heat to 110°C and dwell 5 minutes, then cool to room temp (In the step, water is desired to remove from Pb solution). Record Weight and Volume of solution.
3. First, put 14.7 ml (15.932 g) Zr n-propoxide in Beaker 2 and then dissolve 8.4 ml (8.128 g) Ti-isopropoxide to mix at least 15 minutes.

The speed of mixing bar is “7” and use a cover to reduce dusts (Caution: When adding Ti-isopropoxide please keep pipet in the center of beaker and let pipet close to liquid surface to prevent splash).

4. Add Zr + Ti mixture (Beaker 2) to Pb solution (Beaker 1) as slower as possible to mix just for 15 minutes (To prevent solution from cooling down to room temp. Please see reference of M. Sayer, et al., *Ferroelectr.* 7, (1995), 1-4). The speed of mixing bar is “7” and use a cover to reduce dusts.
5. Add 16 g (16 ml) of deionized water to mix 15 minutes.
6. Add 4 g (3.4 ml) lactic acid to mix 15 minutes.
7. Add 6 g (4.8 ml) glycerol to mix 15 minutes.
8. Add 4 g (3.6 ml) ethylene glycol to mix 15 minutes.
9. Use Syringe to filter sol and put it in the vessel (Use air gun to blow dusts out of Vessel beforehand).
10. Make diluted sol (PZT sol to acetic acid = 1:1) in the vessel and ultrasonic 20 mins.

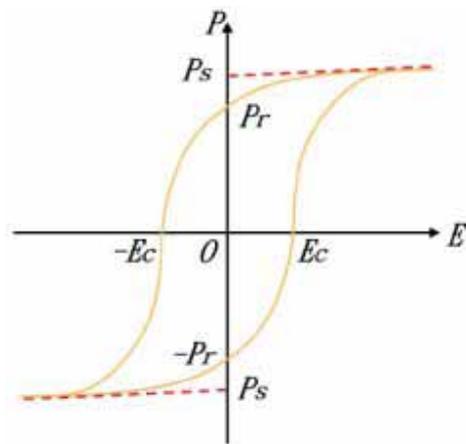
以上的配方，職亦提供了部份意見，俾使製程增加可靠性。

(三) 鋇鈦酸鉛薄膜鐵電性質與微致動器操作原理

上一小節已提過鋇鈦酸鉛具有優良的鐵電性質，可應用於焦電熱偵測器、壓電致動器等，本節特將其原理加以說明。鄭佩慈在其發表的鐵電材料之特性與應用一文中[23]有詳細說明，在此加以摘要轉述：早在 18 與 19 世紀，材料之壓電性與焦電性已被科學家所研究，而壓電性是指對沒有對稱中心的晶體外加電場，會產生應變；反之，若給予晶體外加應變，也會產生電極化的改變。若晶體電極化之改變同

時會受外在應力與溫度的影響，則稱作焦電性。然而並非所有的壓電材料與焦電材料都具有鐵電性，直到 1920 年由法國人 Valasek 發現在酒石酸鉀鈉 ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 中特異的介電性質，才開啟了鐵電材料研究的熱潮。鐵電材料皆具有多方向自發極化的特性。在晶胞內的原子，由於不同的堆疊結構，如鈣鈦礦結構，使得正負電荷產生相對位移，形成電偶極矩，讓晶體在不加外電場時就具有自發極化現象，且自發極化的方向能夠被外加電場反轉或重新定向，鐵電材料的這種特性即被稱為「鐵電現象」或「鐵電效應」。在 32 種晶體點群中，只有 10 種具有這種極化的表現。

鐵電材料可以藉由外加電場來改變極化方向，如圖一所示，為電極化 P 與外加電場 E 的關係。這種鐵電材料特有的 $P-E$ 曲線稱為電滯曲線 (hysteresis loop)。若無自發極化的現象，如一般的介電材料， $P-E$ 圖將為一斜線。



圖一、電滯曲線[23]

於鐵電晶體外加一電場（電壓）時，電偶極矩將會在電場作用下重新排列。改變電壓的極性，可使電偶極矩的方向反轉。電偶極矩的這種可轉向性，意味著它們可以在記憶晶片上表示一個「0 或 1 的訊號」。而且，即使在電壓斷開時，這些電偶極矩也會保持在原來的方向，使鐵電記憶體仍能保存資料，如智慧卡 (Smart Card) 即是運用這種資料儲存技術。此外，運用化學氣相沉積 (Chemical Vapor Deposition, CVD)、溶膠-凝膠(Sol-Gel)、RF 濺鍍系統 (RF Sputtering Deposition System) 與脈衝雷射蒸鍍系統 (Pulsed Laser Deposition, PLD)，可將不同成分配比的鐵電材料製鍍成薄膜型式，不僅保有高介電係數與自發極化的特性，更能與一般微機電元件相結合，如鐵電隨機存取儲存器 (FRAM)，表面聲波元件 (SAW) 與光調製器等。華大曹教授亦在其所

著書中[9]提到鐵電材料具有壓電與焦電特性，因此成為微機電系統的介電候選材料。由於利用溶膠-凝膠旋塗法製備的鋇鈦酸鉛薄膜，其厚度只有數微米(μm)，因此很適合應用於製作微系統，而沈曹團隊就是利用鋇鈦酸鉛薄膜的壓電特性，應用於無線微內視鏡與微助聽器的製作，未來還規劃研發微動脈感測器。沈曹團隊所製備的鋇鈦酸鉛薄膜，其電滯曲線可參閱參考文獻[24]。

由以上所述，我們已知道鋇鈦酸鉛薄膜具有壓電特性，故鋇鈦酸鉛薄膜可將機械能轉換為電能。當加壓力於鋇鈦酸鉛薄膜時，在晶體表面間產生電壓，即所謂的直接壓電效應，量取電壓值即可感測壓力值，加上鋇鈦酸鉛薄膜可製備成非常微小之元件，故可輕易製作成微感測器。反之，加電壓於鋇鈦酸鉛薄膜時，將造成材料在特定方向變形，即所謂的逆壓電效應，此一逆壓電效應即可用於製作成微致動器。以上就是鋇鈦酸鉛薄膜微致動器的操作原理。

三、研究成果

如前一節所述，職在七月底針對如何解決鈦酸鉛薄膜燒結時所產生的斑點提出建議(詳如附件一)，此建議的重點是有系統的建立實驗數據與經驗，再用交叉比對找出因應之道，最後歸納出最佳化鈦酸鉛薄

膜配方。職與華大研究生經過一個學季的努力，已逐漸將造成斑點的原因找出，在經過數次的重複性驗證之後，即可證明職提出來的以「接觸角」檢驗製程中白金鍍膜表面性質，華大研究生在職協助指導之後的研究心得簡報日漸成熟（為遵守保護華大智慧財產之承諾，本報告對於機敏部分不做敘述），沈老師也預判，再一至兩個月之後，鈦酸鉛薄膜的最佳配方就會發展完成。

四、未來發展

鈦酸鉛薄膜的最佳配方發展完成，即可進行製作微小致動器元件（如相片十五），而此致動器元件可用於驅動耳蝸內的淋巴液，以作為助聽器之用，或置入無線內視鏡內，作為高速度掃描之用，亦能用於微噴嘴之噴射動力來源，對於發展微系統將邁進一大步。

肆、結語

職很榮幸的奉國防部核准赴美國華盛頓大學短期進修六個月，在各級長官的愛護與祝福下，滿懷歡喜的來到西雅圖。在博士後的十二年能獲得此次機會赴美短期進修，讓職有機會體驗英美學風之異同。由於歷練過組長、資圖中心主任與教務分處處長，在華大校園內除了

鑽研機械專業新知，亦能隨時抽空探索華大的力與美。

經過一連串的學習與研究，學會了華大機械系與材料科學工程系正在進行的銦鈦酸鉛薄膜微致動器研製方法，對於職未來在院內的教學與研究將有很大的助益。另外由於網際網路相當發達與本校的開明作風，因此職在美國的期間，仍能透過網際網路隨時獲得國內消息，也能隨時與國內的研究生聯繫，尤其順利指導研究生完成國科會研究計畫的成果報告撰寫與結案。同時透過網際網路協助院外單位委外之研究計畫等工作之評分委員；協助院外單位完成六個研究計畫之初審；協助友校完成審查博士生之博士論文。就在接近短期進修的尾聲時，榮獲院外單位邀請參與合作研發案，職亦透過網際網路指導研究生撰寫實驗室簡介與研究規劃，極力爭取合作機會，最後經審核職為最適合人選，目前按計畫提出研究計畫申請中。在回國前，持續指導研究生進行國科會補助之計畫與向國防部人力司申請補助之延續案研究計畫並構思撰擬新的研究計畫書。職攜帶了輕薄短小的數位攝錄影機來到華大，拍攝了數十 G 的影片與相片，職將善用這些資料，使未來的講課內容更生動豐富。也希望六個月的短期進修能使職的研究潛力再提升，俾利為本院繼續奉獻心力。

參考文獻

- [1] Fritsch, C., The Messenger, University of Washington, College of Engineering, Mechanical Engineering, Seattle, Washington, Autumn 2005.
- [2] Siderius, C., Visitors Guide, University of Washington, Seattle, Washington, 2005.
- [3] 吳豐隆，自己動手看陽宅，林懋文化事業有限公司，2001。
- [4] 林元輝(翻譯)，輕，薄，短，小的時代，經濟與生活出版事業股份有限公司，1985。
- [5] 馬遠榮，奈米科技，商周出版，2002。
- [6] Maluf, N. (著)，李世鴻(翻譯)，微機電系統工程，五南圖書出版公司，2003。
- [7] Fatikow, S. and Rembold, U. (著)，黃淳權(翻譯)，微機電概論，高立圖書有限公司，2005。
- [8] 黃楓台，奈米與微機電，行政院國家科學委員會科學技術資料中心，2002。
- [9] 王榮文，科學人雜誌，遠流出版，第 25 期，3 月，2004。
- [10] <http://www.lib.cgu.edu.tw/academy/engineering/CE/www/>陶瓷網頁。
- [11] Bhalla, A. S. and Nair, K. M., Ceramic Transactions, Ferroelectric Films, Volume 25, the American Ceramic Society, 1992.
- [12] Cao, G., Nanostructures & Nanomaterials, Imperial College Press, 2003.
- [13] Hsu, Y. C., Damping Treatments for Microstructure, Ph.D. Dissertation of the University of Washington, 2003.
- [14] Hsu, Y. C., Wu, C. C., Lee, C. C. Cao, G. and Shen, I. Y., Demonstration and characterization of PZT thin-film sensors and

- actuators for meso- and micro-structures, *Sens. Actuators A: Phys.* 116 (3) (2004) 367–377.
- [15] Wu, C. C., Lee, C. C., Cao, G. and Shen, I. Y., Effects of corner frequency on bandwidth and resonance amplitude in designing PZT thin-film actuators, *Sens. Actuators A: Phys.* will be published in 2005.
- [16] Wu, C. C., Lee, C. C., Cao, G. and Shen, I. Y., DESIGNING PZT THIN-FILM ACTUATORS: AN EXPERIMENTAL DEMONSTRATION, Proceedings of IMECE2005 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 5-11, 2005, Orlando, Florida USA IMECE2005-79102.
- [17] 王海山，科學方法百科辭典，恩楷股份有限信公司，2003。
- [18] Sayer, M., Yi, G. and Sedlar, M., Comparative Sol Gel Processing of PZT Thin Films, *Integrated Ferroelectrics*, 1995, Vol. 7, pp. 247-258.
- [19] Yi, G. and Sayer, M., An Acetic/Water Based Sol-Gel PZT Process I: Modification of Zr and Ti Alkoxides with Acetic Acid, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 6, pp. 65-74, 1996.
- [20] Yi, G. and Sayer, M., An Acetic/Water Based Sol-Gel PZT Process II: Water Based Solution, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 6, pp. 75-82, 1996.
- [21] Araujo, C. P., Scott, J. F. and Taylor, G. W., *Ferroelectric Thin Films: Synthesis and Basic Properties, Ferroelectricity and Related Phenomena*, Volume 10, *Integrated Ferroelectric Devices and Technologies, Part I*, Gordon and Breach Publishers, 1996.
- [22] Smith, D. L., *Thin-Film Deposition Principle & Practice*, McGraw-Hill, 1995.
- [23] 鄭佩慈，鐵電材料之特性與應用，儀科中心簡訊 68 期：中華民國 94 年 4 月 30 日出版。
- [24] Wu, C. C., *Development of PZT Thin-Film Two Dimensional Microactuators*, Ph.D. general examination of the University of Washington, 2004.