

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

應用微機電技術在電化學三維微機構加工之研究(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2218-E-002-016-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：張所鎰

計畫參與人員：黃聖鎮

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 2 月 24 日

應用微機電技術在電化學三維微機構加工之研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 91 - 2218 - E - 002 - 016
執行期間：90年 8月 1日至 92年 7月 31日

計畫主持人：張所鎰
共同主持人：
計畫參與人員：黃聖鎮

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學機械工程學系

中華民國 92年 7月 31日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

應用微機電技術在電化學三維微機構加工之研究

Electrochemical Microfabrication of three-dimensional mechanism based on MEMS technique

計畫編號：NSC xx-xxxx-x-xxx-xxx

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：張所鈺

計畫參與人員：黃聖鎮

國立台灣大學機械工程學研究所

一、中文摘要

在微機電系統(MEMS)上立體微機構製造是發展重點之一，目前在微機電系統設計上最常被使用之立體微加工是非等向性蝕刻(Anisotropy etching)，不過此方法很困難製作任意形狀的立體微機構。

過去已有研究出很多方法製作立體微機構，其中之微影加工技術是利用紫外線光線照在光阻產生變化，使得顯影作用於光阻劑的局部範圍。這些作用於微米範圍組合而成立體結構之加工技術稱為立體微影加工技術。

本研究採用之立體微影加工是由紫外線聚焦系統及精密定位系統組成。聚焦系統採用顯微鏡聚焦系統，精密定位系統為自行研發之奈米精密定位系統。

立體微影加工之主要因素有光阻反應的波長、紫外線光波長、聚焦面積及光強度。目標為傳統微機電加工難以達成之三維微結構加工，未來實現三維次微米及三維奈米結構。

關鍵詞：微機電系統、立體微影加工技術、紫外線光、光阻劑、顯影、顯微鏡、光纖、奈米精密定位、三維微結構

Abstract

The 3D-micromachining is a key technology in minimization machine. Anisotropy etching method is the most popular method to fabricate 3D microstructure in MEMS. But, it is hard to MEMS machine arbitrary 3D microstructure.

Now, many kind of 3D microstructure fabrications are developed, in which microlithography is changing characteristics in local area of photoresister, which illuminated UV light. These changed areas are assembled 3D microstructure called microstereolithography fabrication.

Microstereolithography system is composed UV light focusing system and precision position stage system. Also focusing system is provided microscope focusing system. Then precision position stage is adopted nano precision position stage which is developed by P.N.M.L. in N.T.U.

This fabrication's main factors are photoresister's reactive light wave length, UV wave length, focusing area and light intensity. This technique can make up 3D microstructures, in future attain to 3D submicrostructures and 3D nanostructures.

Keywords: MEMS, Microstereolithography, UV Light, Photoresister, Lithography, Microscope, Fiber, Nano Precision Position Stage, 3D microstructure

二、緣由與目的

美國柯林頓總統於 2000 年初，宣布一項 5 億美元 2001 的預算，投入奈米技術(Nano-technology)，相較於 2000 年經費，增加了 83%。同年十二月，行政院召集的科技顧問會議，所建議的五大科技項目中，奈米技術為其一，奈米技術被界定為具有另一工業革命的衝擊力，包括奈米(百萬分之一釐米，稱為奈米)材料，奈米

電路電腦，生化醫療，其應用可擴展至所有科技領域，最終影響國家安全，可見此一技術的重要性日趨增加。

微影技術已廣泛應用於電子及微機電元件之加工製程，面臨奈米技術需求的到來，超細電子元件的挑戰，達到微米及奈米尺寸，即是本研究的目標。

又有鑑於目前管被研究的 MEMS 加工技術，由於曝光顯影的限制，均以平面視之主體結構為主，卻運用 MEMS 加工技術，製作三維區面蝕刻方向之橫載面非相等面積者等微機構，則是相當費事。

微米及奈米立體加工技術是未來很重要的關鍵技術之一，而且完整功能的微系統研發上需要任意形狀之立體機構。實踐微系統的應用上需要各式各樣的立體微機構，可是目前微系統加工之限制在於無法製作深度方向任意形狀的立體微機構，因此立體微加工技術在微系統發展上扮演主要角色。

立體微加工技術包含立體微加工及平面柱狀微加工，並且此加工作用來分為蝕刻(etching)及沉積(Deposition)加工方法。蝕刻作用是被加工物(work piece)上不需要的部分，利用分解及溶解等方法去除，得到需要的形狀。沉積作用是將需要的被加工物質，堆積在需要的位置上，一層一層堆積出所需要的形狀。此加工原理，可分類為電化學微加工(Electro-Chemical Micro-Machining)[1-8]、微放電加工(Micro-Electro-Discharge Machining)[9-10]、電化學放電微加工(Electro-Chemical-Discharge Micro-Machining)[11-13]、超音波微加工(Ultrasonic Micro-Machining)[14]、微影加工[15-29]、粉末微加工[20][32]及電漿微加工[30-31]。

微影加工分為 LIGA[15-17]、準分子雷射微加工(Excimer Laser Micro-Machining)[18-22]、灰階光罩加工(Gray Lithography)[23-25]、HARMST(High Aspect-Ratio Microstructure Technology)[26]、M²DXL(Moving Mask Deep X-ray Lithography)[27]、電子束(E-beam)加工[28]及立體微影加工(Microstereolithography)[29]。目前只有準分子雷射微加工、M²DXL 及 microstereolithography 才能真正能做到三

維微結構、其他加工技術只能製作 2.5D 微結構。此三種三維微加工技術最大不同在於光源，分別為準分子雷射、同步輻射源及紫外線光源。紫外線光源成本低及取得最容易的優點，本研究採用此光源。

目前立體微影加工只有局部固化方式堆疊製作而成，並沒有傳統顯影方式加工。因此本研究著重於紫外線聚焦使得光阻劑的微小點產生曝光效果，最後此微小點的顯影組成立體微結構。

三、基本原理及系統設計

顯影基本原理為，當紫外線照在光阻時，光阻內的化學抑制劑(Inhibitor，被顯影劑溶解的速率減低之成分)改變成一種感光劑(Sensitizer)，這些感光劑被顯影劑沖洗掉而達到曝光的效果。顯影完後光阻膠上就形成與紫外線照射範圍之圖形。因此縮小紫外線照射很小範圍，這些小點配合 XYZ 定位平台，可以製作三維結構。

聚焦系統之聚焦點直徑(R)由光源的部分同調(σ , Partial Coherence)、光源的波長(λ , Wave Length)及數值孔徑(NA, Numerical Aperture)算出大小(1)。

$$R = \sigma \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

本研究採用之兩種聚焦方式為顯微鏡聚焦及光纖聚焦。首先顯微鏡聚焦是利用顯微鏡鏡頭組合達成紫外光聚焦。顯微鏡之數值孔徑在高倍率較大，因此縮小聚焦點需要高倍率物鏡及目鏡組合(圖一)。光纖聚焦是放電產生之電弧來光線末端溶解及凝固製作而成之光纖凸鏡來聚焦紫外光。優點是不需要很多鏡片組合提高數值孔徑，缺點是加工誤差造成很難精確掌握數值孔徑值。

光源來源為 UV-LED(350~425nm)，優點為體積小、反應快、光強度可改變及成本低，缺點為功率小、光譜寬及穩定度差。增加曝光次數、增加濾鏡及一次曝光時間減少可以減少缺點產生之問題。

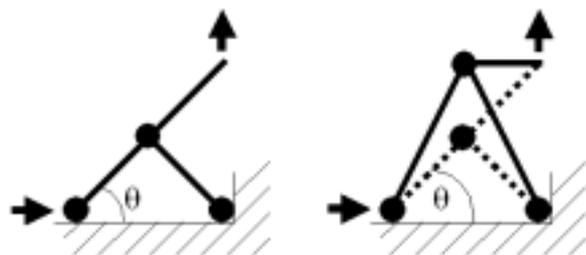
三、奈米精密定位平台

在壓電驅動微定位平台的發展上，計畫主持人所帶領之精微機構實驗室已完成一系列之研究。1999年 Chang 與 Du 應用 Scott-Russell 機構設計出一單自由度之微定位平台[34]，如圖 2-6 所示，其行程可達 100 mm 以上，解析度則小於 40 nm。1999年 Chang 等以組合平台的方式設計出 XY 之壓電驅動微定位平台[35-36]，如圖 2-7 所示，最大的位移為 17.8 mm/150V，最小位移解析度 10 nm，最大旋轉位移為 0.58 mrad/150V，最小旋轉位移解析度為 0.15 mrad，三軸間的干涉在 1.2%以下之位移誤差。1999年 Chang 與 Li [37]亦利用摩擦滯滑原理，設計出一配合 Scott-Russell 機構，單步位移 0.05-120 mm 之定位平台。

(一) 理論及設計方法

在壓電材料作為致動器的設計中，常見的形式有三種：形變式、摩擦式、尺蠖蟲 (inchworm) 式，三種設計於使用上各有其優缺點；以形變式而言，可達到較高的解析度，但無法有較長的行程，因此若需要較長的行程，常常與一解析度較低、但行程較長的平台做搭配，以完成整個系統。摩擦式與尺蠖蟲式可有較長的行程，但裝配的困難度較高，且會產生裝配誤差，於本設計中將採用形變式的方式，最大位移範圍為 100 μ m 移動解析度為數十奈米，以帶動被加工物。

放大機構為改良式 Scott-Russell 機構 (圖一)，特點是同體積及放大倍率不變為 $1/\tan\theta$ 之下有減少誤差、減少干涉、減少加工誤差產生之誤差及減少體積。



圖一 Scott-Russell 機構(左)與改良式 Scott-Russell 機構(右)比較

(二) 有限元素模擬分析

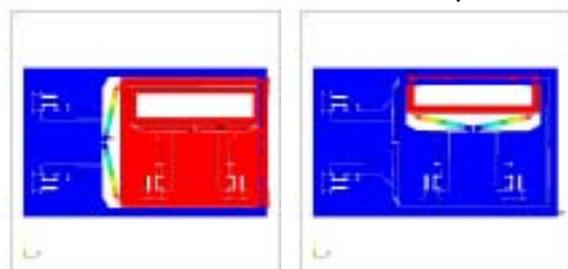
最小體積上製作出符合性能的奈米精密定位平台為設計目標，並且加工誤差也在考慮範圍內。加工方式為線切割放電加工，比傳統加工精度還要高。不過還是 1 μ m 左右加工誤差，因此設計時主要的放大機構精度不能小於 1mm，減低加工誤差造成機構性能誤差。不過線切割放電加工先天性特性，不能製作 0.5mm 以下厚度的懸壁樑，饒性鉸鍊及饒性彈簧也受到限制。此兩個因素設定成最小值之後，套用機構設計來完成實際模型。

使用有限元素分析軟體(ANSYSTM)模擬設計完成之模型。分析之後為了達到需要性能，犧牲體積來換取性能，最後完成需要的性能。設計完成結果為單軸最大行程 100 μ m(圖二)及最低共振頻率 5.654Hz (圖三)。

使用有限元素分析軟體(ANSYSTM)模擬設計完成之模型。分析之後為了達到需要性能，犧牲體積來換取性能，最後完成需要的性能。設計完成結果為單軸最大行程 100 μ m(圖二)及最低共振頻率 5.654Hz (圖三)。



圖二 單軸最大位移量 100 μ m



圖三 共振頻率 5.654Hz(左)14.783Hz(右)

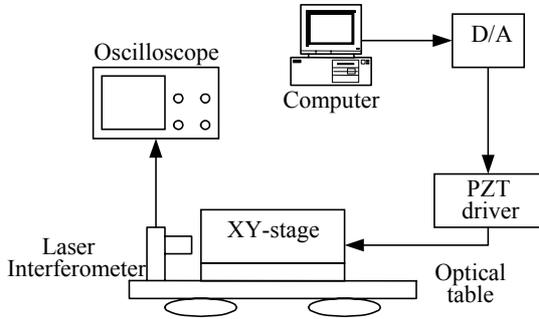
(三) 量測結果

量測設備為雷射干涉位移量測儀 (Polytec QFV3000)、示波器 (Tektronix 2430A)、個人電腦(IBM-PC 相容)、數位類比轉換卡(NI 6713)、壓電驅動放大器(PI E-663)，此設備與精密定位平台組合而成量測系統。

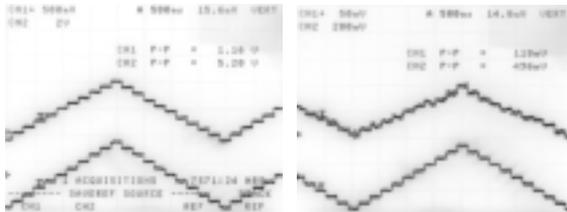
階梯波供給壓電致動器量測平台解析度，解析度在 200nm 時看不到誤差(圖四(左))，可是在解析度在 20nm 看得到誤差(圖四(右))，不過已接近量測解析度很難判定平台本身特性所造成的誤差。

正弦波(sine)及餘弦波(cosine)個別個

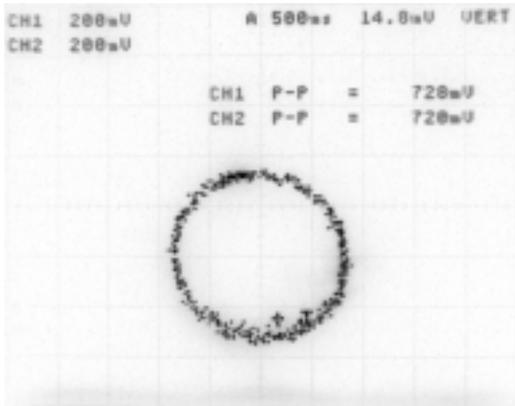
別輸入到 X 及 Y 軸產生圓形軌跡，使用示波器 XY 顯示量測定位平台之圓形軌跡(圖五)。此圖形越圓表示 X 及 Y 軸的線性度高及干涉軸小。圓的直徑表示最大位移量。因此 15 μm 位移範圍內確實有精密定位性能存在。



圖四 量測系統架構圖

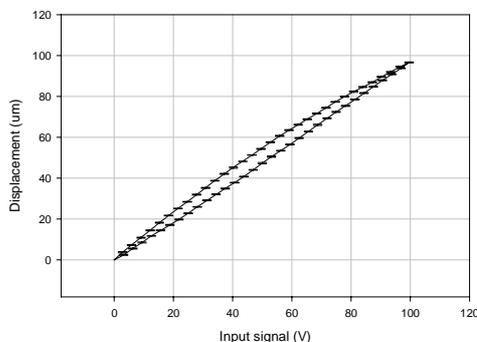


圖四 單軸解析度量測 200nm(左)20nm(右)



圖五 XY 軸圓形軌跡(直徑 15 μm)

Hysteresis

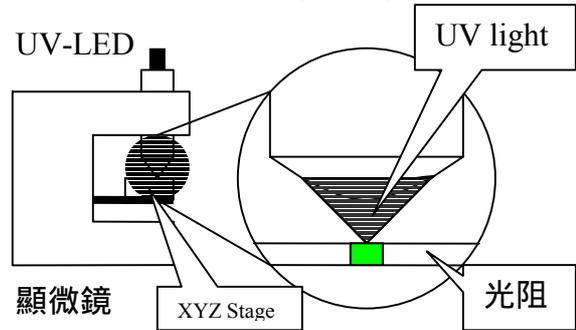


圖六 遲滯曲線

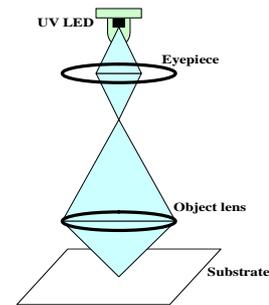
壓電致動器無可避免遲滯現象(圖六)，不過經由控制系統可校正改善遲滯現象。

四、紫外線聚焦系統

UV-LED 波長為 350~425nm，此波長是最常用的光阻顯影波長，因此光阻選擇性多。顯微鏡聚焦系統由顯微鏡(Olympus BX60) UV-LED 及 XYZ 定位平台組成(圖六)。UV-LED 發出紫外光線經過顯微鏡鏡片聚焦成微小面積(圖七)。



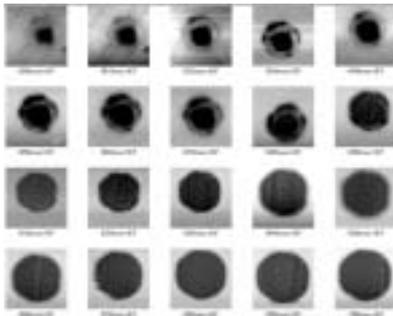
圖六 顯微鏡聚焦系統架構



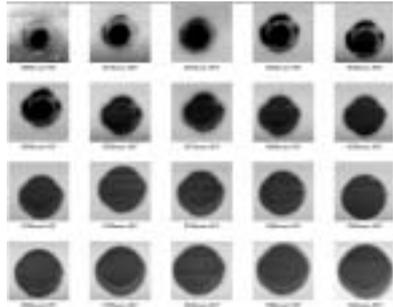
圖七 顯微鏡聚焦系統鏡片組合

五、結果及討論

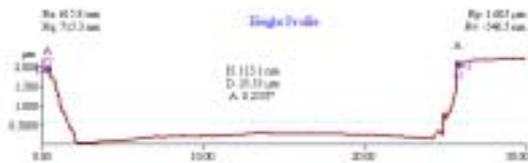
5 msec 曝光時間到 1 sec 曝光時間曝光，再使用顯影劑時間分為 30 sec (圖八) 及 2 min (圖九)，實驗結果只要在顯影劑廠商建議的條件下 (30 sec ~ 2 min)，顯影時間並不會影響顯影品質。實驗量測結果無殘留光阻圓孔之中，孔底最小及左右壁寬度最小的 600 msec 為最適當的曝光時間，產生底部直徑為 22 μm 及牆壁長寬各個為 2 μm (圖十) 的孔洞。並且，整理不同曝光時間及量測結果比較之後得到現象為曝光時間越久，孔洞的直徑及深度越多 (圖十一及圖十二)。與預期結果相符，不過因為 LED 反應時間不夠快的關係，小於 5 msec 時幾乎沒有曝光效果。



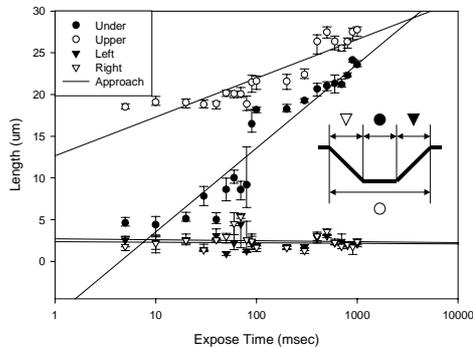
圖八 5 msec ~ 1 sec 曝光, 30 sec 顯影 AFM 量測結果



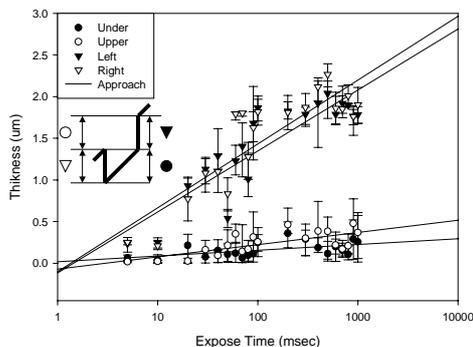
圖九 5 msec ~ 1 sec 曝光、2min 顯影 AFM 量測結果



圖十 600msec 曝光圓孔剖面 AFM 量測圖

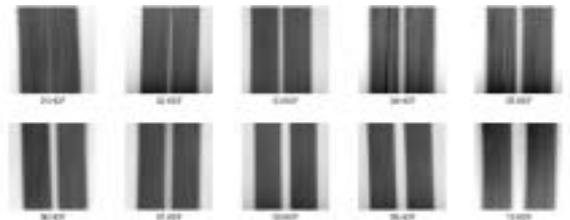


圖十一 曝光時間與寬度大小比較 (顯影時間: 30 sec)

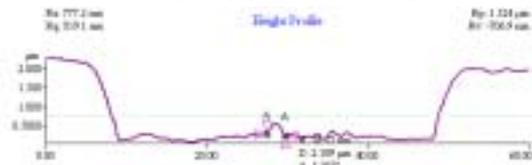


圖十二 曝光時間與高度大小比較 (顯影時間: 30 sec)

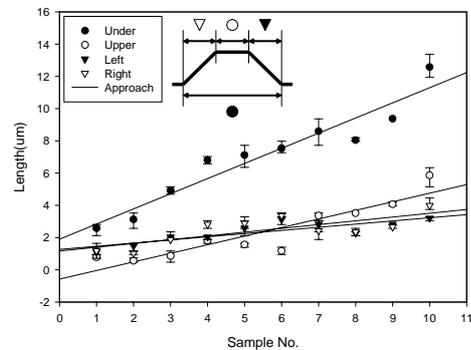
製作直線採用分散式直寫曝光，此系統曝光時對每個曝光點做多次(100 steps)曝光。參考圖十三。目前最小線寬可做到約 $2\mu\text{m}$ (圖十三最左上角及圖十四)。由圖十五及圖十六發現，寬度方向隨距離改變線寬跟著改變。而且壁的垂直度也不會有很大變化。唯一變化較大的是厚度方向，如果很細的線要顯影時候，有要注意厚度方向問題。因為聚焦角度左右重疊影響，線高降低的結果。



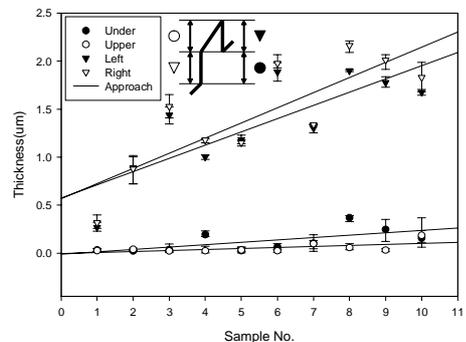
圖十三 100 Steps、6 msec 曝光、2 min 顯影結果 AFM 量測



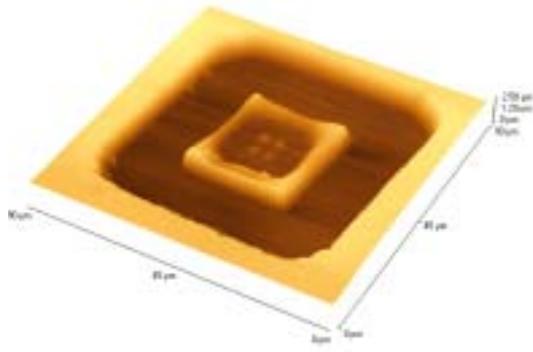
圖十四 $2\mu\text{m}$ 線寬 AFM 量測圖



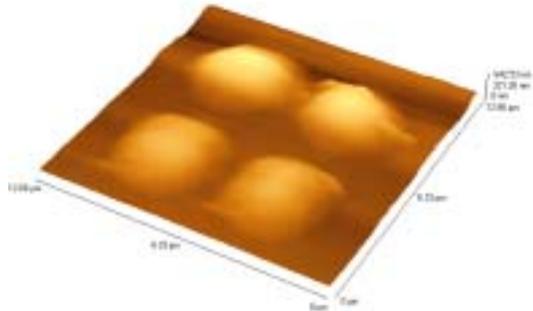
圖十五 100 步、6 msec/step 曝光、2 min 顯影結果



圖十六 100 步、6 msec/step 曝光、2 min 顯影結果



圖十七 微半球加工 AFM 量測



圖十八 微半球加工局部放大 AFM 量測

先用 6 msec、500steps、50 μ m 曝光出外框，接下來 0.6 msec、100 steps、12 μ m 曝光，2 min 顯影之後呈現圖十七，局部放大為圖十八。此曝光程度剛好到底，不過還是因為光源繞涉關係，中央地區原本要留下的方形柱分成四個山坡。中間島的長寬約為 25 μ m，高度為光阻高度一樣的 2 μ m。不過原來的凹溝已經到底部出現山坡形狀，此山坡直徑為約 4 μ m，高度為約 500nm。此結果顯示利用曝光路徑，也可以做得到圓柱形形狀的結構。

六、討論及未來展望

本研究最主要以紫外線發光二極體光源，低成本，多樣式及快速的實現微影或立體加工，很適合在研究室及打樣產品上使用。而且一般研究室現有的設備(光學顯微鏡，定位平台及含控制介面卡的個人電腦等)上很輕易組裝完成，不需要投入很多經費，也能達的到同樣目的。

本文之 UV LED 分散式微影系統可製作最小線寬為 2 μ m，並且可製作立體結構。未來需要增加微影加工精度，改善系統配備及光阻基板，例如，光源改用 UV

Laser，放大鏡組選擇更高放大倍率鏡組及光組基板換成像矽晶圓的平滑基板。

微影系統在微奈米電子，微機電及奈米技術上扮演很重要的角色，UV LED 微影製程提供簡單又低成本的新型微影系統。

七、參考文獻

- [1] R. Schuster, V. Kirchner, P. Allongue, G. Ertl, "Electrochemical Micromachining," *Science*, 289, pp.98-101, 7 July, 2000.
- [2] K. Takahata, S. Aoki, T. Sato, "Fine Surface Finishing Method for 3-Dimensional Micro Structures," *Proc. IEEE MEMS'96*, pp.73-78, 1996.
- [3] H. Ohji, P. T. J. Gennissen, P. J. French, K. Tsutsumi, "Fabrication of accelerometer using single step electrochemical etching for micro structures (SEEMS)," *Proc. IEEE MEMS'99*, pp.61-65, 1999.
- [4] S. S. Wang, V. M. McNeil, M. A. Schmidt, "Selective etching of N-type silicon using pulsed potential anodization," *Solid-State Sensors and Actuators, IEEE Transducer 1991*, pp.819-822, 1991.
- [5] K. J. Ma, K. Najafi, "A new capacitive electro-chemical etch-stop technique," *Proc. IEEE MEMS'94*, pp.158-163, 1994.
- [6] R. Mlcak, H. L. Tuller, "Photo-assisted electrochemical machining of micromechanical structure," *Proc. IEEE MEMS'93*, pp.225-229, 1993.
- [7] H. Ohji, P. J. Trimp, P. J. French, "Fabrication of free standing structure using step electrochemical etching in hydrofluoric acid," *Proc. IEEE MEMS'98*, pp.246-250, 1998.
- [8] H. C. Ozdemir, J. G. Smith, "Band model for explaining new effects observed in electrochemical Micromachining of Si," *Proc. IEEE MEMS'91*, pp.198-201, 1991.
- [9] T. Masaki, K. Kawata, T. Masuzawa, "Micro electro-discharge machining and its applications," *Proc. IEEE MEMS'90*, pp.21-26, 1990.
- [10] J. Stampfl, R. Leitgeb, Y. L. Cheng, F. Prinz, "Electro-discharge machining of mesoscopic parts with electroplated copper and hot-pressed silver tungsten electrodes," *J. Micromech. Microeng.* 10, pp.1-6, 2000.
- [11] V. Fascio, R. Wuthrich, D. Viquerat, H. Langen, "3D microstructure of glass using electrochemical discharge machining (ECDM)," *IEEE Micromechatronics and Human Science*, pp.179-183, 1999.
- [12] R. Wuthrich, V. Fascio, D. Viquerat, H. Langen, "In Situ Measurement and Micromachining of glass," *IEEE Micromechatronics and Human*

- Science, pp.185-191, 1999.
- [13] 余政賢, 彭成鑑, 林澤勝, "電化學放電法玻璃微細加工研究,"第二屆奈米工程暨微系統技術研討會論文集, pp3-61~3-66, 1998.
- [14] X. Q. Sun, T. Masuzawa, M. Fujino, "Micro Ultrasonic Machining and Self-Aligned Multilayer Machining/Assembly Technologies for 3D Micromachines," Proc. IEEE MEMS'96, pp.312-317, 1996.
- [15] W. Menz, W. Bacher, M. Harmening, A. Michel, "The LIGA - a Novel Concept for Microstructures and the combination with Si-Technologies by Injection Molding," Proc. IEEE MEMS'91, pp.69-73, 1991.
- [16] A. S. Holmes, S. M. Saidam and R. A. Lawes, "Low cost LIGA processes," Microengineering Technologies and How to Exploit Them, IEE Colloquium on, 2/1-2/4, 1997.
- [17] G. Engelmann, O. Ehrmann, J. Simon, H. Reichl, "Fabrication of high depth-to-width aspect ratio microstructures," Proc. IEEE MEMS'92, pp.93-98, 1992.
- [18] M. C. Gower, "Industrial Micromachining applications of excimer laser," Laser Applications, IEE Colloquium on, pp.7/1 -7/3, 1993
- [19] S. Maeda, K. Minami, M. Esashi, "Excimer laser induced CVD and its application to selective non-planer metallization," J. Micromech. Microeng. 5, pp.237-242, 1995.
- [20] J. Akedo, M. Ichki, K. Kikuchi, R. Maeda, "Fabrication of three dimensional micro structure composed of different material using excimer laser ablation and jet molding," Proc. IEEE MEMS'97, pp.135-140, 1997.
- [21] J. H. Brannon, "Excimer-laser ablation and etching," IEEE Circuits and Devices Magazine Volume: 6 5, pp.18 -24, Sept. 1990.
- [22] J. Brannon, "Excimer laser ablation and etching," IEEE Circuits and Devices Magazine Volume: 13 2, pp.11 -18, March 1997.
- [23] Jun-Bo Yoon, Byeong-il Kim, Yun-Seok Choi, Euisik Yoon, "3-D lithography and metal surface micromachining for RF and microwave mems," MEMS, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on, 2002, pp. 673-676, 2002.
- [24] C.M. Waits, R. Ghossi, M.H. Ervin, M. Dubey, "MEMS-based gray-scale lithography," Semiconductor Device Research Symposium, 2001 International , pp. 182-185, 2001.
- [25] W. Henke, W. Hoppe, H.J. Quenzer, P. Staudt-Fischbach, B. Wagner, "Simulation and experimental study of gray-tone lithography for the fabrication of arbitrarily shaped surfaces," MEMS '94, Proceedings, IEEE Workshop on, 1994, pp. 205-210, 1994.
- [26] R. Islam, C. Brubaker, "Advanced lithography for high aspect ratio MEMS technology," Microelectromechanical Systems Conference, 2001, pp. 77-79, 2001.
- [27] O. Tabata, N. Matsuzuka, T. Yamaji, Hui You, J. Minakuchi, K. Yamamoto, "Fabrication of 3-dimensional microstructures using moving mask deep X-ray lithography (M/sup 2/DXL)," MEMS, 2001, The 14th IEEE International Conference on , 2001, pp. 94-97, 2001.
- [28] S.C. Jacobsen, D.L. Wells, C.C. Davis, J.E. Wood, "Fabrication of micro-structures using non-planar lithography (NPL)," MEMS '91, Proceedings. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots. IEEE, 1991, pp. 45 -50, 1991.
- [29] V. K. Varadan, X. Jiang, V. V. Varadan, "Microstereolithography and other fabrication techniques for 3D MEMS," John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [30] M. S. Ahmed, "Modern applications of EDM and ECM," Manufacturing Technology Update, IEE, pp.14, 1993.
- [31] S. Reyntjens, E. Puers, "Focused ion beam induced deposition: fabrication of three-dimensional microstructures and Young's modulus of the deposited material," J. Micromech. Microeng. 10, pp.181-188, 2000.
- [32] H. Wensink, H. V. Jansen, J. W. Berenschot, M. C. Elwenspoek, "Mask materials for power blasting," J. Micromech. Microeng. 10, pp.175-180, 2000.
- [33] P. Rai-Choudhury, Ed., "Handbook of Microlithography, Micromachining & Microfabrication," SPIE, 1997.
- [34] S. H. Chang and B. C. Du, "A Precision Piezodriven Micropositioner Mechanism with Large Travel Range," Rev. Sci. Instrum., Vol. 69, No. 4, pp. 1785-1791, 1998.
- [35] S. H. Chang, C. K. Tseng, and H. C. Chien, "An ultra-precision XY z piezo-micropositioner Part I: Design and Analysis," IEEE Trans. Ultrason. Ferro-elect., Freq. Contr., Vol. 46, no. 4, pp. 897-905, July 1999.
- [36] S. H. Chang, C. K. Tseng, and H. C. Chien, "An ultra-precision XY z piezo-micropositioner Part II: Experiment and Performance," IEEE Trans. Ultrason. Ferro-elect., Freq. Contr., Vol. 46, no. 4, pp. 906-911, July 1999.
- [37] S. H. Chang and S. S. Li, "A high resolution long travel friction-drive micropositioner with programmable step size," Rev. Sci. Instrum., Vol. 70, No. 6, 1999.
- [38] 黃聖鎮, "三維微奈米顯影加工技術之研究,"國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文, 2003.

