

應用田口方法於具微小特徵矽基板之鎳基電鑄製程的最佳化

Application of Taguchi Method to Optimization of Ni-based Electroforming
Process of Silicon Substrate with Micro-Features

余志成

J.-C. Yu

國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系 副教授

Associate Professor,

Department of Mechanical and Automation Engineering,

National Kaohsiung First University of Science and Technology

徐珮凱

P.-K. Hsu

國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系 研究生

Graduate student,

Department of Mechanical and Automation Engineering,

National Kaohsiung First University of Science and Technology

摘 要

電鑄製程可運用於精微模仁的製作，而配合非等向性矽基蝕刻的電鑄基板，便可用來製作具高精密度與重複性的微稜鏡特徵，然而如何有效率的翻鑄成高品質金屬薄板取代，則為本研究的重點。本文將控制電鑄製程的正負脈衝電流(Pulse-reverse current)波形，以及運用夾治具設計以改善電鑄複製精度及厚度均勻性。本文利用田口方法(Taguchi Method)進行鎳基電鑄製程的參數設計，提升電鑄厚度的均勻性與沈積的速率，同時也針對晶圓的導電層材料之選用進行比較。所得到的最佳參數與同樣的平均電流密度之連續電流進行比較，二者的平均沈積厚度均約略為 25 ($\mu\text{m/hr}$)，但其沈積厚度變異量則從 2.83($\mu\text{m/hr}$)降低了 12.62%，使得電鑄後經背板研磨所得的有效沈積速率提升了 7%到達 18.4($\mu\text{m/hr}$)。最後將最佳化的電鑄參數應用在平面顯示器導光板薄板取代的製作上，成功的製作出大小為 70 μm 梯形長溝與截頂角錐微結構，驗證運用在導光板薄板取代製程上的可行性。

關鍵詞：電鑄，非等向性矽基蝕刻，薄板取代，正負脈衝電流，田口方法。

Abstract

Electroforming is often applied to the stamper fabrication of precision components such as compact discs. Anisotropic wet etching of silicon wafers can produce micro-features with extremely high precision and repeatability, which can serve as the initial layer of the electroformed stamper for the light guide plates of LCD. However, the related study on the electroforming on a silicon substrate with arrays of micro-features is scarce. This study aims to improve the thickness uniformity and the surface property of the electroformed micro-structure using the initial layer of bulk-machined silicon wafer from (1) the parameter design of the pulse-reverse current, (2) the design of fixture jig, and (3) the material selection of the initial deposited metal layer on the wafer. This study applies Taguchi Method to the parameter design to improve the deposition rate and uniformity of electroforming. The study also compares the selection of initial deposited metal layer. The optimized parameters compare with the process using DC of For the same average current density, both the optimized pulse-reverse current and DC electroforming have the similar average deposition rate 25 ($\mu\text{m/hr}$). However, standard deviation of deposition thickness reduces 12.62% from 2.83 ($\mu\text{m/hr}$). Because the electroformed metal plate has to be ground to an uniform thickness to be a stamper, the effective deposition rate for the optimized pulse-reverse current increases 7% to 18.4($\mu\text{m/hr}$) compared with DC electroforming. At last, this study successfully applies the derived result to fabricate LGP stampers with 70 (μm) trapezoid grooves and prisms, and demonstrates the effectiveness of the result.

Keywords: Electroforming, Anisotropic wet etching, Stamper, Pulse-reverse current, Taguchi Method

1. 前言

電鑄常使用在精密機械加工上，而隨著光電、電子以及微機電等的產業快速發展，各種零件強調輕薄短小，所需要的精密模具製程技術也越來越受到重視，其中 LIGA 技術結合了微影光刻(lithography)、電鑄(electroforming)以及模造成型(molding)等三種技術，所製作出來的結構具有微小、高精度、高深寬比等特點色[1][2]，當應用電鑄工件作為模具的薄板取代，其電鑄成品厚度的均勻性將會影響到後續的研磨量。

影響沈積平整度以及表面粗糙度的因素很多，Wong 等[3][4][5]運用不同的電流波形進行電鑄，並對電鑄鎳金屬進行表面處理，比較各種波形所製作的結果之表面粗糙度，實驗結果發現當脈衝波的波形使用到緩衝時間時，其鍍層的表面粗糙度較佳。Popov 等[6][7][8]提出連續電流與脈衝電流在電鍍基板上的電流分佈之數學關係式與表面高度的推導，發現正脈衝電流能得到較高的邊緣電流密度、連續電流能有較佳較平緩的電流分佈、正負脈衝電流有正電流的電流分佈與負電流的電流分佈來降低正電流在邊緣的電流，而可得到最平緩的電流分佈，較正脈衝與連續電流好。Yang 等人[9]為了增加平整度的改善進而改變陽極和陰極的幾何型狀、陰極與陽極的間距、以及改變電流波型並選用直流法(DC)、逆電流法(periodical reverse)、中斷法(pulse-DC)進行實驗，結果顯示只有直流法可以小幅度改變光阻邊緣沉積速度，最後再使用輔助陰極的方式在陰極前加入一個與陰極相同外型的外框，結果顯示電流密度分佈較均勻，且微結構邊緣與中心的沉積速率較接近，所以可改善其平整性。

雖然許多的學者針對電鑄後的平整度以及表面粗糙度來進行改善，但大多以金屬板件作為電鑄的母膜，以矽基板作為翻鑄成金屬薄板之相關研究不多，矽基板常作為微結構的製作[10][11][12][13][14]，但對於後續以矽基板作為電鑄母膜的研究則甚少。本研究即運用非等向性矽基

蝕刻製作出具高精密度與高重複性的微特徵之特性，並利用正負脈衝電流的方式進行翻鑄，控制電流強度以及正負脈衝的時間，配合田口法找出最佳脈衝電流參數，以得到較低的電鑄厚度差異，進而改善整體的平整度並有較佳的沈積速率。另外再針對晶圓的導電層之選用來進行實驗，再利用最佳化的結果，應用在導光板薄板取代的製作上，製作出微結構，以驗證結果。

2. 研究方法及步驟

2.1 電鑄微特徵形狀

本研究在微特徵製作規劃上則運用 UV-LIGA 之技術，配合矽基非等向性蝕刻，並使用四分之一<100>的 P-type 晶圓來製作電鑄所需之試片，而微特徵分佈的範圍為長寬各為 2.5cm x 2.5cm 的矩形，所製作出來的微特徵為角錐稜鏡之微結構，尺寸如圖 1 所示。

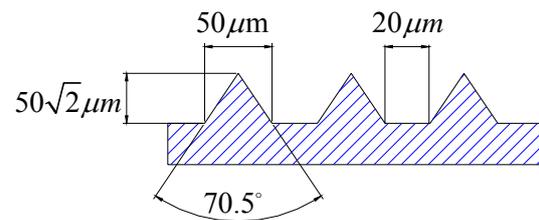


圖 1 微特徵尺寸示意圖

2.2 電鑄夾治具設計

本研究所使用的為鎳電鑄浴，鑄浴環境：胺基磺酸鎳 380g/l；鹽化鎳 9.5 g/l；硼酸 38 g/l；濕潤劑 3 ml/l；應力降低劑 5 ml/l；浴溫 40°C；PH 值 4。而本文在電鑄實驗之前並設計電鑄用之夾治具，以改善電鑄精密微結構的複製精度、外形輪廓及表面特性等，依據的文獻的分析[15]，因受到外緣電流聚集現象、沈積速率較快，與類球形裁散層所造成之離子質傳效果佳的雙重因素，使外緣鑄層迅速沈積，終至形成香菇狀(mushroom)的凸塊，所以在電鑄時為避免厚度不均，一般建議是在電鑄到 2/3 高度處即停止電鑄。本文設計之夾治具如圖 2 所示，減少厚度不均的現象；以及具有遮蔽物的設計，而此材料

為鐵氟龍的材質，即為電流絕緣物，使得電流能集中在我們所要電鑄的區域，以增加電鑄的效率並達到整形的效果。

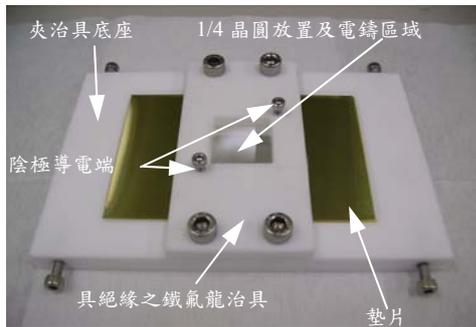


圖 2 設計之電鑄夾治具

2.3. 微特徵結構製作

本研究採用矽基化學濕蝕刻作為微特徵的電鑄中介層，試片為<100>的 P-type 晶圓，利用矽基非等向性蝕刻的基本形狀由蝕刻速度最慢的[111]面所定義的特性，蝕刻出角度為 70.5°的角錐稜鏡微結構，如圖 1 所示，由於蝕刻表面為晶格面，特徵大小由微影的精度決定，一般可達~ μm ，且角度非常準確，表面粗糙度也可達到奈米等級，蝕刻製程所製作角錐稜鏡微特徵的 SEM 圖如圖 3 所示。

蝕刻後濺鍍或蒸鍍一層金屬薄膜作為微結構的電鑄起始層，以鎳基金屬電鑄沈積至所需厚度，再以濕蝕刻去除矽基材，即可得到我們所需具有微結構的金屬薄板，詳細的流程如圖 4。

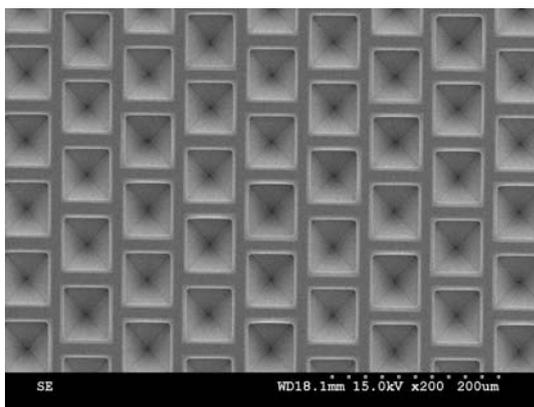


圖 3 角錐稜鏡微特徵蝕刻後 SEM 圖

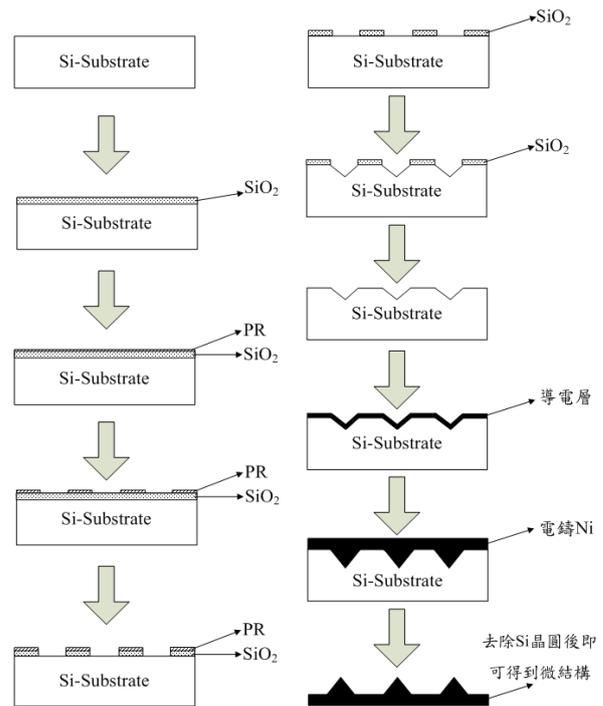


圖 4 微特徵製作流程

2.4 電鑄田口參數實驗

本研究運用電鑄的正負脈衝電流的形狀定義來進行參數規劃如圖 5 所示，期望能達到提升電鑄的速率以及整體厚度的均勻性。設計及控制的參數包含了負脈衝電流密度(ASD, i_n)、平均電流密度(ASD, i_{avg})、正脈衝電流時間(ms, t_p)與負脈衝電流時間(ms, t_n)，並利用平均電流來計算出正脈衝電流密度(ASD)，如式(1)所示。經由田口的實驗計畫配合電鑄厚度望大的方式以找出最佳參數組合，其實驗的控制因子及水準如表 1。在變數的安排上，採用田口 L9 直交表來進行電鑄的實驗，配合具有整形及導電性良好的夾治具，電鑄的時間為 24 小時。

表 1 電鑄田口實驗之控制因子及水準

Factor levels for Taguchi Experiment				
Control Factors	Level 1	Level 2	Level 3	
i_n 負脈衝電流密度(ASD)	$0.5 i_{avg}$	0	$-0.5 i_{avg}$	
i_{avg} 平均電流密度(ASD)	1	1.5	2	
t_p 正脈衝電流時間(ms)	30	60	90	
t_n 負脈衝電流時間(ms)	3	6	9	

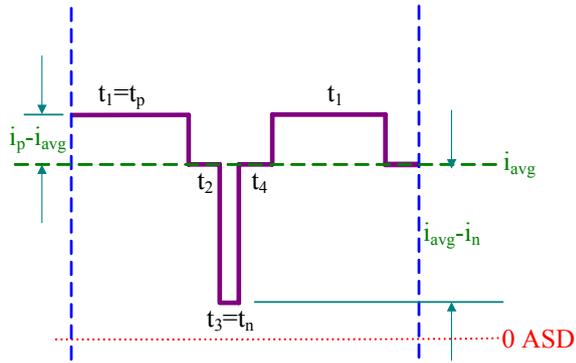


圖 5 脈衝電流示意圖

$$i_{avg} = \frac{i_p t_p + i_n t_n}{t_p + t_n} \quad (1)$$

i_{avg} : 平均電流密度

i_p : 正脈衝電流密度

i_n : 負脈衝電流密度

t_p : 正脈衝電流時間

t_n : 負脈衝電流時間

2.5 電鑄參數設計

本研究利用光學顯微鏡(OM)與掃描式電子顯微鏡(SEM)來觀察微結構表面品質，並量測微結構的幾何特徵。另外，在每組田口電鑄實驗後，使用 3D 輪廓測定儀來量測電鑄後的斷差，即沈積厚度，而每一個試片量測均勻分佈 25 個量測點。

每組參數均電鑄 24 小時後，將 L9 實驗數據表整理如表 2 所示，並計算單位沈積厚度的變異量(coefficient of variation, COV)，如式(2)所示，而我們希望此單位沈積厚度的變異量能越小越好，也就是說厚度平均值(\bar{y})能越大越好，厚度分佈標準差能越小越好；因此採用望大特性的 S/N 比，如式(3)所示，且繪製出 S/N 比回應圖如圖 6，以選擇出最佳的參數解以極大化 S/N 比，即為 $(i_n)_2$ 、 $(i_{avg})_3$ 、 $(t_p)_1$ 、 $(t_n)_1$ 。其中參數 t_n 的部份，對 S/N 比的影響不大，因此選擇平均厚度較高的 $(t_n)_1$ ，最佳化的參數組合，分別為負脈衝電流密度為 0 (ASD)、平均電流密度為 2 (ASD)、正脈衝電流時間為 30 (ms) 與負脈衝電流時間 3 (ms)。

$$COV = \frac{s}{\bar{y}} \quad (2)$$

$$(S/N)_{望大} = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

表 2 電鑄田口實驗之 L9 實驗數據表

L9 OA				
NO.	厚度平均值 (μm)	厚度標準差 (μm)	COV	S/N
1	97.27	12.88	0.13241	39.54
2	132.19	24.8	0.18761	41.95
3	186.64	39.45	0.21137	44.88
4	269.4	15.78	0.05857	48.57
5	449.36	33.65	0.07488	52.98
6	479.36	49.84	0.10397	53.49
7	183.36	17.7	0.09653	45.15
8	389.2	38.23	0.09823	51.69
9	356.2	29.66	0.08327	50.95

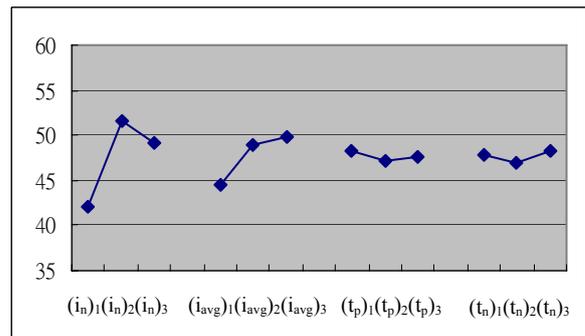


圖 6 沈積厚度 S/N 比回應圖

3. 結果分析

選出田口最佳化的組合後，即進行電鑄的速率分析，依同樣的平均電流密度分別以最佳脈衝電流與連續電流進行比較，由結果圖 8 與圖 9 觀察發現，沈積厚度與其標準差均與沈積時間成正比。運用正負脈衝電流最佳化的沈積速率約 25.6($\mu\text{m/hr}$)，與連續電流沈積速率為 25.7($\mu\text{m/hr}$)約略相同，但其沈積厚度的標準差則從連續電流的 2.83($\mu\text{m/hr}$)降到 2.39($\mu\text{m/hr}$)，降低了 15%，代表最佳化參數能得到較均勻的厚度，可減少後續研磨量與其研磨可能產生的殘留應力。

因沈積後的成品多需經過背板研磨處理，以求得均一厚度的薄板，假設厚度最後需研磨至平

均厚度減三個標準差，則最佳化脈衝電流與連續電流電鑄的有效沈積速率分別為 18.4($\mu\text{m/hr}$)與 17.2($\mu\text{m/hr}$)，以最佳化脈衝電流的有效電鑄速率約提升了 7%。最佳化參數組合不僅提升了有效沈積速率，且沈積的整體厚度差異性也能改善。

利用田口最佳化的組合製作出來的微結構，利用 SEM 來進行觀察如圖 7 所示。而本研究也將最佳化的參數組合，以兩組試片分別進行一天、二天以及三天的電鑄，其沈積速率與厚度標準差如圖 8 與圖 9，兩組試片的差異可能來自於電鑄夾治具在電鑄槽的擺放位置、噴泉式攪拌打在試片的位置以及電鑄夾治具電極端是否有與陰極正常導通等。

3.2 起始層材料對電鑄特性的影響

本研究所電鑄的試片為晶圓，其導電率非常差，所以需要利用濺鍍或者是蒸鍍的方式來沈積一層金屬層作為導電層，本研究採用 500 Å 厚的鈦(Ti)作為導電層與矽晶圓的黏著層。導電層厚度為 1500 Å，分別採用銀(Ag)、鋁(Al)以及鉑(Pt)來進行比較，並利用田口最佳化的組合之參數同樣進行一天的電鑄沈積，觀察不同的導電層，其沈積速率與厚度的標準差之變化。結果如表 3 所示，電鑄沈積的速率與金屬層的導電率相關，導電率最佳的為銀具有最高的沈積速率，而白金因電導率較低，其電鑄速率也最低。但銀為貴重金屬，鋁的費用則比較低，所以在沈積速率差不多的情況之下，可選擇鋁作為晶圓的導電層，以降低製作晶圓導電層的成本。

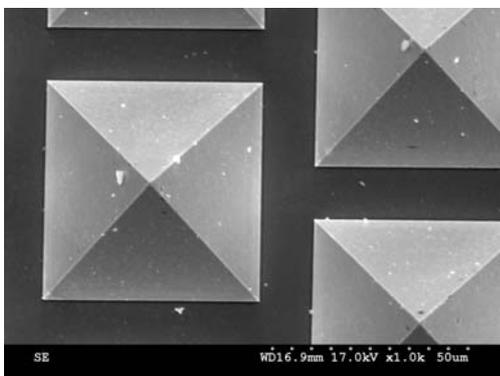


圖 7 電鑄微特徵後 SEM 圖

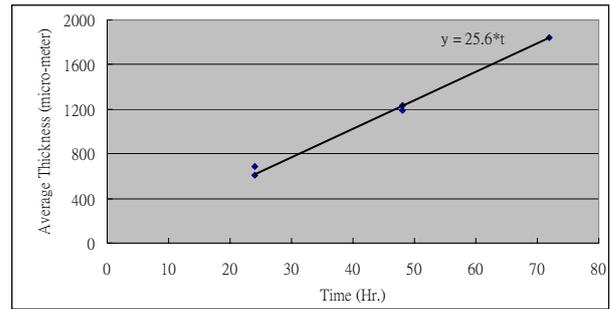


圖 8 最佳參數組合的平均沈積速率

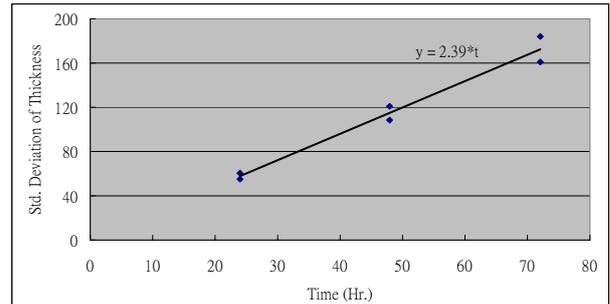


圖 9 最佳參數組合的沈積厚度標準差

表 3 金屬電阻率、電導率、熱導率性質表

名稱	符號	電阻率 (nΩ·m)	電導率 (%IACS)	熱導率 [W/(m·k)]
銀	Ag	14.7	108.4	428
鋁	Al	26.55	64.96	247
鉑	Pt	106	16	71.1
鈦	Ti	420	-	11.4

表 4 不同導電層之最佳化電鑄實驗結果

導電層(Å)	平均電鑄厚度(μm)	厚度標準差(μm)	COV	S/N
Ag(1500)	690.6	60.31	0.08733	56.69
Pt(1500)	644.84	64.19	0.09954	56.06
Al(1500)	650.92	68.3	0.10493	56.13

4. 導光板薄板取代製作的應用

本研究以所得之電鑄最佳化的實驗參數，並以矽基板非等向性蝕刻配合具有蝕刻深度終止層的設計，製作出截頂微結構的導光板薄板取代。過程係利用矽晶圓[111]面蝕刻停止與深度蝕刻終止層的特性，製作梯形溝槽與截頂角錐微結構[13][16]，再藉由微電鑄製作出精密的鎳基薄板取代。所製作出截頂角錐之薄板取代，如圖 10 所示，特徵角度 70.5°，微結構大小 70 μm ，

間距 $10\mu\text{m}$ 。因此薄板取代需電鑄至 2mm 的厚度，並需經過背板研磨，藉由此參數設計可減少因電鑄厚度不均的研磨量，減少因研磨造成的薄板殘留應力，也避免因殘留應力造成的翹曲。

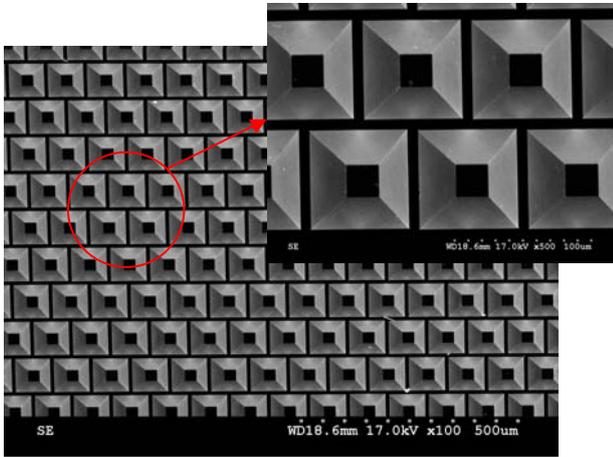


圖 10 電鑄後之截頂角錐薄板取代 SEM

5. 結論

本研究分析矽基板非等向性蝕刻製作角錐稜鏡微結構，製作微特徵中介層，並設計夾治具配合田口電鑄的實驗計畫以及電鑄厚度望大的方式找出了最佳參數組合，與同樣的平均電流密度之連續電流做比較，其結果厚度差異性降低 15%，而考量研磨量後的有效沈積的速率也提升了 7%，而也驗證了沈積速率也與金屬層的電導率相關。另外，本研究也運用電鑄實驗出來的最佳化參數，應用在導光板薄板取代的製作上，驗證了最佳化的結果運用在導光板薄板取代製程上的效益。

誌謝

本研究承蒙國科會經費支持，計劃編號 NSC 96-2221-E-327 -043，特誌謝意。

參考文獻

[1]. C. Marques, Y. M. Desta, J. Rogers, M. C. Murphy, K. Kelly, "Fabrication of high-aspect -ratio microstructures on planar and nonplanar surfaces using a modified LIGA process", *Journal of Microelectromechanical systems*, Vol. 6, pp. 329-336, 1997.

[2]. L.S. Johansen, M. Ginnerup, J.T. Ravnkilde, P.T. Tang, B. Lochel, "Electroforming of 3D microstructures on

highly structured surfaces", *Sensors and Actuators*, Vol. 83, pp. 156-160, 2000.

[3]. K. P. Wong, K. C. Chan, T. M. Yue, "A study of surface finishing in pulse current electroforming of nickel by utilizing different shaped waveforms", *Surface and Coatings Technology* 115, 1999, pp. 132-139.

[4]. K. P. Wong, K. C. Chan, T. M. Yue, "Modeling the effect of complex waveform on surface finishing in pulse current electroforming of nickel", *Surface and Coatings Technology* 135, 2000, pp. 91-97.

[5]. K. P. Wong, K. C. Chan, T. M. Yue, "Modeling of electrocrystallization for pulse current electroforming of nickel", *Applied Surface Science* 178, 2001, pp. 178-189.

[6]. K. I. Popov, M. D. Maksimovic, M. S. Simic, "The effect of periodic reverse current on the surface roughness of metal deposits and the maximal deposition rate", *Surface Technology*, Vol. 16, pp. 209-218, 1982.

[7]. K. I. Popov, M. D. Maksimovic, D. C. Totovski, "Fundamental aspects of pulsating current metal electrodeposition VI: The comparison electrode surface roughening in pulsating current and periodic reverse current electrodeposition of metals", *Surface Technology*, Vol. 17, pp. 125-129, 1982.

[8]. K. I. Popov, D. C. Totovski, M. D. Maksimovic, "Fundamental aspects of pulsating current metal electrodeposition VII: The comparison of current density distributions in pulsating current and periodic reverse current electrodeposition of metals", *Surface Technology*, Vol. 19, pp. 181-185, 1983.

[9]. H. Yang, and S. W. Kang, "Improvement of thickness uniformity in nickel electroforming for the LIGA process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.40, pp. 1065-1072, 2000.

[10]. 王長志、楊志賢、游智勝、胡一君、陳柏台，2003，"應用 SU-8 及犧牲層技術製作微流道系統製程研究"，中國機械工程學會第二十屆全國學術研討會，p81-88，台北。

[11]. 吳政憲、林文兆，2004，"利用濕蝕刻和電鑄技術製作之模仁於射出成形和射壓成形之研究"，中國機械工程學會第二十一屆全國學術研討會，高雄。

[12]. 余志成、李佩君、江韋翰、紀源聰，2006，"結合非等向蝕刻與微電鑄於 LCD 導光板模仁的製作"，第五屆海峽兩岸製造技術研討會論文集，2006 年 4 月 24~25 日，國立高雄第一科技大學。

[13]. 李佩君、余志成，2007，"結合非等向蝕刻與微電鑄於光學增亮膜片的製作"，中國機械工程學會第二十四屆全國學術研討會論文集，中原大學，桃園。

[14]. Luo Yi, Wang Xiaodong, Liu Chong, Lou Zhifeng, Chudenan, and Yu Dehui, "Swelling of SU-8 structure in Ni mold fabrication by UV-LIGA technique", *Microsystem Technology*, Vol.11, pp. 1272-1275, 2005.

[15]. L.T. Romankiw, "A path : from electroplating through lithographic masks inelectronics to LIGA inMEMS", *Electrochimica Acta*, Vol. 42, pp. 2985-3005, 1997.

[16]. 余志成、李佩君，中華民國專利申請中，申請案號：96100909。