

質子交換膜燃料電池流場板設計研究

王金燦* 黃銳堯

國立宜蘭大學機械與機電工程學系

摘 要

質子交換膜燃料電池是一種效率高且環保的新世代能源，適用於運輸動力、可攜式電力及家用型發電機。質子交換膜燃料電池雙極板流道，需具備增加氣體對流與擴散效率及降低氣體阻力之功能。本研究以網狀流道為基本設計雛型，透過仿生學以人體血管漸進式分佈概念而發展出仿生流道，並與平行流道及蛇型流道，透過以流場觀察法及數值分析法，針對流場 $Re=1$ 及 $Re=5$ 下，分析各種不同流道板的速度場均勻性與壓力阻力作一比較。實驗經視流觀察知，平行流道之流場均勻性最差，蛇型流道壓力阻力為最大，仿生流道在流場均勻性及壓力阻力則有最佳表現。此外，模擬結果發現，仿生流道在速度標準差及壓力阻力亦有最佳的表現，與實驗所得結論吻合，因此仿生流道設計將有助於質子交換膜燃料電池未來效能的提昇。

關鍵詞：質子交換膜燃料電池，仿生流道

Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Flow Slab Design

Chin-Tsan Wang* and Ruei-Yao Huang

Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering, National I Lan University

ABSTRACT

Fuel cells utilizing proton exchange membranes (PEM) exhibit environmental protection and high energy generation efficiency that could be applied to consumer electronics (cameras, PDAs, etc). The design of a PEM fuel cell flow slab should possess an increased rate of gas convection and diffusion and a reduction in the pressure drop. In this study, a novel design of bionic flow slab originating from the net flow slab would be designed by imitating gradual variations of blood vessels in compliance with bionics. Four kinds of flow slab which are bionic flow slab, net flow slab, parallel flow slab and serpent flow slab respectively would be investigated by flow visualization and simulation analysis. According to flow visualization and simulation results, the parallel flow slab has a seriously inconsistent flow distribution and the serpent flow slab possesses the largest amount of pressure drag. The bionic flow slab would have a better performance on the uniformity of flow distribution and lower pressure drag. This new types of bionic flow slab design will be useful for improving the performance of fuel cell system.

Key words : proton exchanges membrane fuel cell, bionic flow slab

一、前言

能源在人類的科技與文明佔極重要的部份，目前石油日漸減少，因此尋找新的世代能源為當務之急，而燃料電池是一種效率高且環保的新能源，為將活性化學能轉化為電能的裝置。其中，質子交換膜燃料電池除具備燃料電池一般特點外，還具備常溫操作及啟動迅速等特性[1]，而廣被研發。

質子交換膜燃料電池是以氫氣為燃料氣體，在陽極氫氣在觸媒層的催化下，解離成為氫離子與電子，反應式如(1)：



解離的氫離子透過質子交換膜，往陰極移動，而解離的電子則透過電極板，經外電路移至陰極。在陰極氧氣、氫離子與電子在觸媒層的催化下，進行還原反應產生水，反應式如(2)：



依據質子交換膜燃料電池發電原理，構成組成元件為質子交換膜、觸媒、電極及雙極板[2]。質子交換膜燃料電池的雙極板與氣體擴散層連結，陰極與陽極各置一個雙極板。雙極板為進氣導流與收集電流用，故又稱為流場板或集電器。目前雙極板常用的材質為石墨碳板、塑膠碳板、金屬板與複合型雙極板等材質，這些材料皆具備雙極板所需的基本特性，如阻氣、導電及抗蝕等性質，在雙極板所加工流道溝槽的目的，是為能提供反應氣體氫氣與氧氣（或空氣）及反應後的產物水進入或排出燃料電池的通道。質子交換膜燃料電池雙極板流道的幾何設計需具備以下的條件：

1. 增加氣體對流與擴散的效率：流道設計最重要的一點，是須確保電極各處均能夠充分獲得反應氣體。若流道的設計無法使反應氣體均勻分佈至電極各處，而造成電極反應氣體供應不足時，便會造成電化學反應速率減緩甚至停止反應，如此將會使燃料電池的性能嚴重下降。此外，流道設計需考量反應氣體流動狀態，必須有助於反應氣體通過電極的氣體擴散層至催化層反應的傳遞；同時，也必須使反應產物能順利排出流道，一旦反應產物無法順利排出，堵塞在流道內，將會使燃料電池的效能大大的降低。2. 降低氣體阻力：在一固定流量下，反應氣體通過流道的壓力降須適中且平均。壓力降太大會產生過高的水頭損失，導致反應氣體流動狀態緩慢，大大降低燃料電池的效能，因此如何設計一有效流場板且能提升電

性效能，將是重要議題之一。

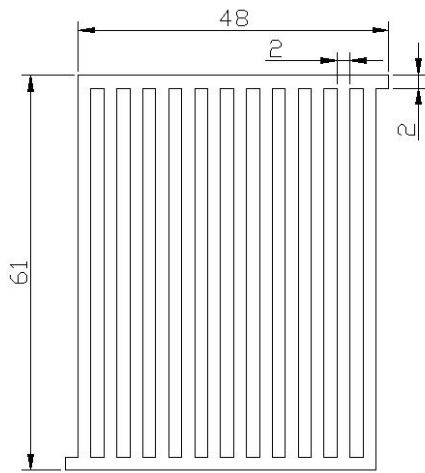
目前常見的質子交換膜燃料電池雙極板流道設計有平行流道[3, 4]、蛇型流道[5, 6]、指叉型流道[7]等，這些常見的質子交換膜燃料電池雙極板流道都有其優缺點，所以本研究主要目的在於提出一仿生流道板設計，以增加氣體對流與擴散的效率及降低氣體阻力的流道，而有效提升質子交換膜燃料電池的效能。

二、實驗設備與方法

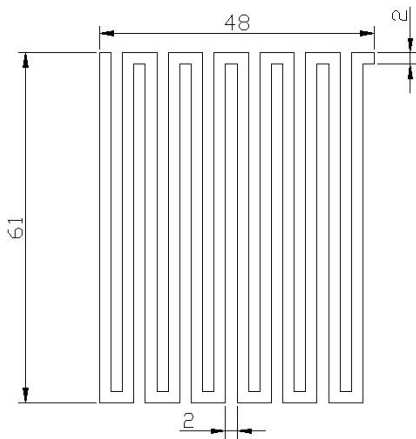
根據質子交換膜燃料電池雙極板流道板場基本要求，本研究以網狀流道為基本設計雛型，透過仿生學以人體血管漸進式分佈概念，改良網狀流道而發展出仿生流道。

在實驗方法上，針對研究所提四種流道（仿生、網狀、蛇型、平行）透過視流觀察，根據流道板流場均勻性及出口到入口所需時間，進而判斷流道設計的優劣。實驗為求簡化操作條件，故僅針對單一燃料電池流道，進行視流觀察。

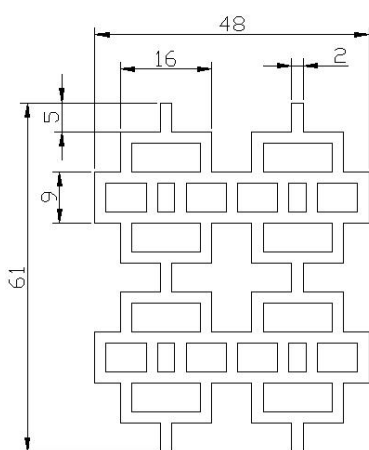
首先將 PMMA 板利用 CO₂ 雷射雕刻機，雕刻出四種流道：平行流道、蛇型流道、網狀流道及仿生流道。四種流道尺寸如圖 1 所示，本研究將四種流道設計尺寸限制在 61mm×48mm，其中平行流道、蛇型流道及網狀流道的流道寬度皆為 2mm；仿生流道的流道寬度則有 2mm、3mm 及 4mm 三種。四種流道的深度皆為 1mm。雕刻出流道的 PMMA 板置於烘箱，加熱至 170°C，90 分鐘後，再降溫至室溫進行退火處理，使流道表面較為平整[8]，以減低因不平整因素而影響實驗結果。最後將容量 50ml 的滴定管，以一固定的流量將混入染劑的染液送入流道中，以觀察染液在流道內的分佈情形及測量染液從入口到出口時間，以判定其相對壓力阻力的大小。



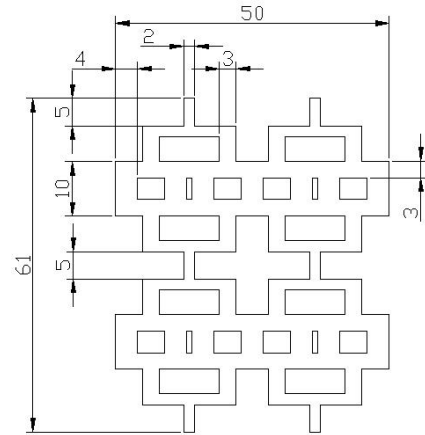
(1) 平行流道



(2) 蛇型流道



(3) 網狀流道



(4) 仿生流道

圖 1. 四種不同流道尺寸示意圖 (單位: mm)。

三、數值模擬方法

研究將使用CFDRC 2009版數值分析模擬軟體，進行二維流場穩態分析，利用結構式網格，以有限體積法，將連續方程式及動量方程式，配合邊界條件，進行網格化計算求解。格點測試結果以總網格數 $N=25000$ 為依據，將Solver設定為AMG，收斂值設為 $1E-018$ 。工作流體設定為水，密度 $\rho=997\text{kg/m}^3$ ，黏滯係數為 $\mu=0.000855\text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 。雷諾數以 $Re=1$ 及 $Re=5$ 為入口流場條件，計算四種流道(如圖1)速度標準差SD值及壓力阻力PD值，以了解流道設計之優劣。

基本假設：

(1) 穩態流 (2) 不可壓縮且為牛頓流體 (3) 流體性質如黏度、密度與擴散係數為常數 (4) 忽略重力、磁力、溫度場的影響 (5) 管壁無滑移現象。

四、結果與討論

在質子交換膜燃料電池雙極板流場的幾何設計，需具備增加氣體對流與擴散的效率及降低氣體阻力的條件下，利用視流觀察方式，觀察染液在流道內的分佈情形，以判定流道板內流動之均勻性及測量染液從入口到出口的時間，以流動快慢判斷不同流道設計的壓阻，進而分析流道設計的優劣。圖 2 為平行流道板自染液進入流道後 4 秒達出口處所擷取的畫面。由圖 2 所示，染液從進口處交會的 X 軸方向及 Y 軸方向流道經過出口處交會的 X 軸

方向及 Y 軸方向流道再流出，除自出口處算起，第 4 排及第 5 排流道有染液流入並充滿流道，其餘的流道並無染液流入，可見染液會選擇最短路徑且壓阻最小的流道，染液開始自進口端注入至出口端排出的時間約只需 4 秒，表示平行流道應存在較低的壓力降。反觀其餘流道，雖陸續有染液流入但仍有流道無法注滿，顯示染液無法平均分佈於平行流道內，因此流場分佈均勻性差。圖 3 為蛇型流道板自染液進入流道後 15 秒達出口處所擷取的畫面。由圖 3 顯示染液沿著蛇型流道由進口端流入於出口端流出，部份流道因空氣存在而無顏色呈現，但在固定流速衝擊下，空氣將會被排出，而使染液佈滿流道並持續流動。染液自進口端開始注入至出口端約耗時 15 秒，顯示蛇型流道存在較大壓阻，其原因在於蛇型流道彎管數多造成水頭損失嚴重。

網狀流道的進口端有兩個，控制兩個進口端的流量各為平行及蛇型流道的流量一半。如圖 4 所示，染液沿著網狀流道由進口端流入至出口端流出，可佈滿並持續流動在整個網狀流道內，顯示流場的均勻性。染液開始自進口端注入至出口端排出的時間約 3 秒，表示網狀流道有較低的壓阻。

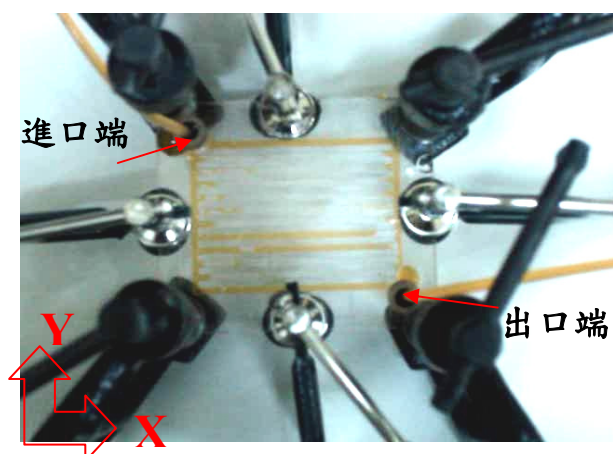


圖 2. 平行流道的實驗圖(染液進入後第 4 秒達出口)。

圖 5 為仿生流道板自染液進入流道後約 2 秒達出口處所擷取的畫面。仿生流道的進口端與網狀流道相同有兩個，控制兩個進口端的流量各為平行及蛇型流道的流量一半。如圖 5 所示，染液沿著仿生流道由進口端流入至出口端流出，可佈滿並持續流動在整個仿生流道內，顯示流道間流場均勻性佳。染液開始自進口端

注入至出口端排出的時間約 2 秒，表示仿生流道存在最低的壓阻。

在網狀流道及仿生流道設計上，各為 2 個進口端及 2 個出口端。但在平行流道及蛇型流道設計上，各只有 1 個進口端及 1 個出口端。受到進出口端數量的不同，使網狀流道及仿生流道設計的壓阻相較於平行流道設計的壓阻小。但無庸置疑，染液在網狀流道及仿生流道內的分佈情形相較於平行流道，應有較佳的流場均勻性。

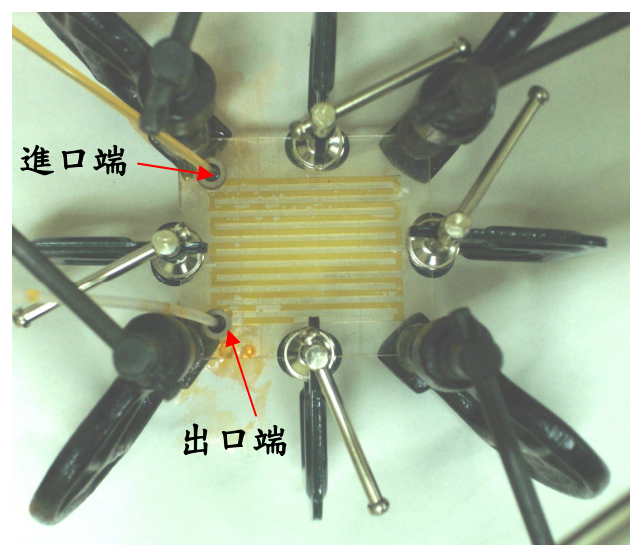


圖 3. 蛇型流道的實驗圖(染液進入後第 15 秒達出口)

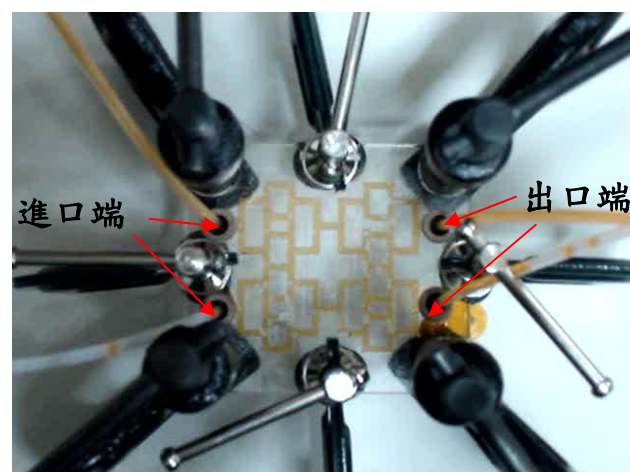


圖 4. 網狀流道的實驗圖(染液進入後第 3 秒達出口)。

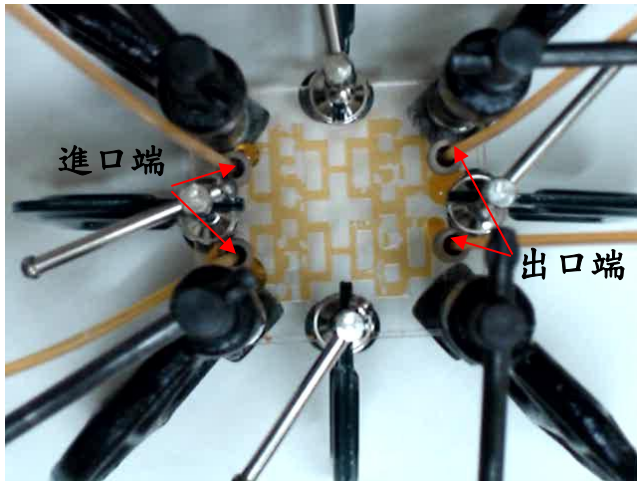
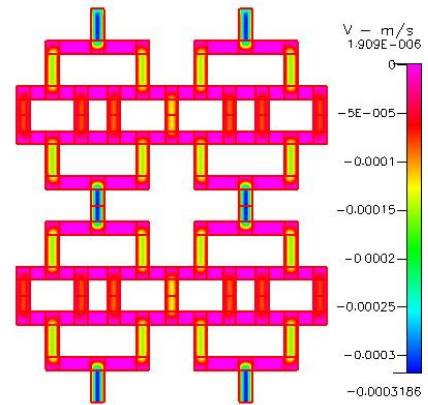
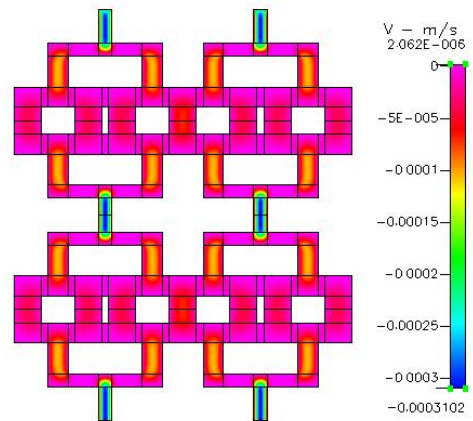


圖 5. 仿生流道的實驗圖(染液進入後第 2 秒達出口)。

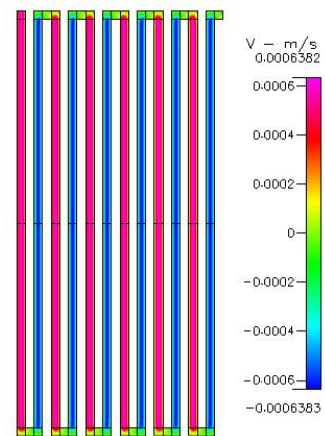
在數值分析上，圖 6 為 $Re=1$ 流場條件下，四種流道下速度分佈圖，從圖 6 發現蛇型流道似乎有較佳的速度均勻性，仿生流道及網狀流道次之，平行流道因中間區域管流存在低流速，使得速度均勻性較差；同樣結果亦發生在 $Re=5$ 的流場條件下。然而，在壓力阻力的分佈上，由圖 7 可清楚得知，蛇型流道壓力阻力比起其它三種流道要大很多，尤其在 $Re=5$ 時更為明顯，顯示流體在流道內流動時所花的時間將會最久，這種推論與實驗觀察結果相吻合。從表 1 內數據顯示四種流道在 $Re=1$ 及 $Re=5$ 流場下其相對的 SD 值與 PD 值。由表 1 結果，發現在 $Re=1$ 及 $Re=5$ 時，蛇型流道與仿生流道存在較小 SD 值，顯示流場有較佳的均勻性；相反的，平行流道因存在最大 SD 值，顯示流場均勻性最差。在壓阻表現上，則以蛇型流道存在最大壓阻，仿生流道則存在最小壓阻。綜合上述分析結果，在質子交換膜燃料電池性能提升上，應以仿生流道板最能符合最佳流場均勻性及最小壓力阻力的設計原則，因此本研究所提仿生流道板設計將有助於未來燃料電池流道板的改進。



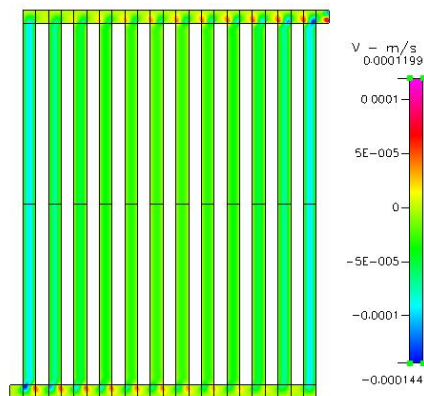
(1) 網狀流道



(2) 仿生流道



(3) 蛇型流道



(4) 平行流道

圖 6. 雷諾數 $Re=1$ 四種流道速度分佈圖。

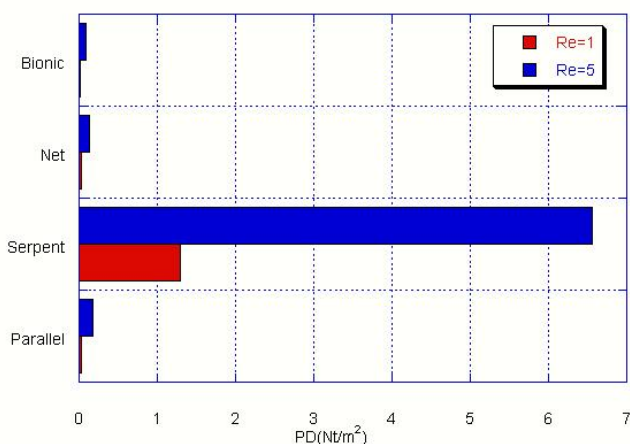


圖 7. 雷諾數 $Re=1$ 及 $Re=5$ 四種流道壓力阻力分佈圖

表 1. 雷諾數 $Re=1$ 及 $Re=5$ 四種流道下速度標準差 (SD)與壓力阻力(PD)值

	Parallel	Serpent	Net	Bionic
SD at $Re=1$	1.57E-05	1.65E-10	1.15E-09	3.00E-10
SD at $Re=5$	7.94E-05	1.88E-09	6.50E-09	2.00E-09
PD at $Re=1$	0.036689	1.3045	0.027867	0.019056
PD at $Re=5$	0.18637	6.5608	0.14049	0.096341

五、結論

本文針對質子交換膜燃料電池四種雙極板流道的設計：平行流道、蛇型流道、網狀流道及仿生流道，採用視流觀察及數值模擬分析方式，研究上述四種流道設計對質子交換膜燃料電池的效能影響。綜合上述所得結果，四種不同流道設計以平行流道之流場均勻性最差，蛇型流道之壓阻最大。網狀流道及仿生流道設計因有均勻流場及低壓阻表現，是較好的流道板設計。但在質子交換膜燃料電池性能提升上，則以仿生流道板最符合流場均勻性及低壓阻設計原則，因此本研究所提仿生設計概念將有助於未來燃料電池流道板的改良設計。

誌謝

本研究感謝中央研究院應用科學研究中心 鄭邱言博士在實驗設備上的提供與協助。

參考文獻

- [1] 黃鎮江，燃料電池，全華科技圖書，第 41-71 頁，2005。
- [2] Hwang, J.J, Hwang, H.S, “Parametric studies of a double-cell stack of PEMFC using Grafoil™ flow-field plates”, J Power Sources, Vol.104, pp.24-32, 2002.
- [3] Hu, G., Fan J., Chen, S., Liu, Y., Cen, K., “Three-dimensional Numerical Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) with Conventional and Interdigitated Flow Fields, J Power Sources, Vol. 136, pp. 1–9, 2004.
- [4] Hwang, J.J., Chen, C.K., Savinell, R.F., Li, C.C. and Wainright, J., “A Three-dimensional Numerical Simulation of the Transport Phenomena in the Cathodic Side of a PEMFC, J Appl Electrochem, Vol.34, pp. 217–224, 2004.
- [5] Weng, F. B. , Su, A., Jung, G.B., Chiu, Y. C., Chan, S. H., “Numerical Prediction of Concentration and Current Distributions in PEMFC, J Power Sources, Vol.145, pp. 546–554, 2005.
- [6] Sun. A., Chiu, Y. C. and Weng. F. B., “The Impact of Flow Field Pattern on Concentration and Performance in PEMFC, Int. J. Energy Res., Vol.29, pp.409 – 425, 2005.

- [7] Hu, G., Fan, J., Chen, S., Liu, Y., Cen, K.,
“Three-dimensional Numerical Analysis of
Proton Exchange Membrane Fuel Cells
(PEMFCs) with Conventional and
Interdigitated Flow Fields, J Power Sources,
Vol.136, pp. 1–9, 2004.
- [8] Cheng, J.Y., Wei, C. W., Hsu, K. H. Hsu,
Young, T. H., “Direct-write Laser
Micromachining and Universal
Surfacemodification of PMMA for Device
Development, Sensor Actuat B-Chem,
Vol.99, pp.186–196, 2004.

