

用於真空蒸鍍源噴嘴之腔體流場研究 A study on chamber flow field of the nozzle using for vacuum evaporation source

吳奕達*、孫嘉鴻、洪政源、李宗信、楊思華
Yi-Ta Wu*, Jia-Hong Suen, Cheng-Yuan Hung, Tsung-Hsin Lee, Szu-Hua Yang

財團法人金屬工業研究發展中心 光電系統組
Opto-Electronics System Section,
Metal Industries Research & Development Centre
E-mail: allenwu@mail.mirdc.org.tw

摘要

隨著資訊產品的日新月異，攜帶式數位產品等電子產品都已是日常生活中不可或缺的部份。然而，傳統顯示器已無法滿足需求，取而代之的是新型顯示器。其優點在於具備輕量化、薄型化、乃至可撓性等。其中，用於 AMOLED 顯示器的蒸鍍製程是製作該顯示器的關鍵技術之一，在該製程中其蒸鍍源有噴嘴裝置，當蒸鍍源的材料受熱汽化或昇華將通過噴嘴，而被蒸鍍於腔體內預設的基板區。在蒸鍍成膜過程中，基板被鍍層的均勻性是該製程的重點之一。

本研究為了對基板被鍍層的均勻性有更進一步的瞭解，針對蒸鍍源汽化後在蒸鍍腔體內的流場變化進行研究，預期求得蒸鍍腔流場對於基板被鍍層的均勻性的關聯性。而針對蒸鍍源的噴嘴型式加以設計變更，以求得有利於蒸鍍流場之噴嘴型式，而噴嘴孔洞截面型式改變所形成之流場，將透過計算流體動力學之數值模擬，來進行噴嘴型式對腔體流場影響之評估。

關鍵字詞：蒸鍍噴嘴、腔體流場、氣動力學、真空

Abstract

With information products develop fast, electronic products such as portable digital products and so forth are requirements in our life. However, new type displays are replaced traditional displays that are not satisfied with requirement. The advantage of new type displays own lightweight、thinning and flexibility. One of the key technology using for making AMOLED display is thermal evaporation process, and there are nozzle device on the evaporation source. When the evaporation source is heated, the source material will float through the nozzle to coating on default substrate zone by vaporization or sublimation in the chamber. The uniformity of the coating layer on the substrate is key point of evaporation processes.

In this study, in order to understand the uniformity of the coating layer on the substrate further, study for flow field variation after evaporation source vaporization in the chamber, expect to solve the connection between flow field and uniformity of the coating layer on the substrate in the chamber. To get if for good evaporation flow field by design and change the nozzle type of evaporation source. To estimate the influence of nozzle holes type changed on flow field and numerical simulation by computational fluid dynamics.

Keywords: evaporation nozzle, flow in chamber, gas dynamics, vacuum

1. 前言

近年來電子工業與資訊業的發展，伴隨顯示器的需求量隨之大幅成長，其對應的產品特性也牽動著每個背後的製程技術，在顯示器製程技術日新月異時代，架構在隨身攜帶的通訊 3C 產品製程技術相形重要，但在技術的研發上以往都需要透過實驗來取得經驗，以增進良率與效能。日前因數值模擬軟體之進步與電腦硬體的運算技術提升，可利用電腦模擬來分析相關製程問題，來加速研發的腳步並具有實際上的效益。而在

AMOLED 顯示器產業中有一鍍膜製程為熱蒸鍍製程(Thermal Evaporation)，有機材料在真空環境下加熱，依材料特性不同，可分為熔融型材料會先液化再氣化，昇華型材料是直接昇華。有些材料則介於者兩者之間，部分熔融、部分昇華，且會受到環境真空度等因素影響其相變情形。在量產上，對於每種不同特性的材料，如何穩定的控制蒸鍍速率以及如何長時間的連續蒸鍍，又必須防止有機材料產生熱裂解或化學反應產生缺陷，關鍵皆在於蒸鍍源的設計^[1]。最早開發出來

的蒸鍍製程，是以基板旋轉的方式，搭配點蒸鍍源。相較於其它種類的蒸鍍源，點蒸鍍源的結構設計簡單，對於鍍膜速度穩定性的控制也較佳，已於許多實驗或量產設備中驗證其可行性。惟在此類型真空腔體的設計中，為使成膜均勻性提高，基板與點蒸鍍源距離不宜太近；且隨基板的尺寸越大，距離則需越遠，這使得點蒸鍍源需具備較大的設備空間^[2]。為了縮小蒸鍍設備體積，近年來 OLED 設備商多改以開發線蒸鍍源為主。使用線蒸鍍源時，是以基板或蒸鍍源來回掃描的方式完成整面玻璃的鍍膜，其中線型的蒸鍍源噴嘴^[3](nozzle source)裝置為目前研究標的，但該噴嘴的結構設計與製作方式多為國外設備商所掌握^[4-8]。

在熱蒸鍍過程中，為了瞭解氣體分子離開噴嘴之後在腔體內部所形成的流場為何，從過去的研究當中，包含以 2-D 及 3-D 之 FEM 流場探討，討論浮力、溫度梯度及濃度梯度對成膜形成之影響^[9]；反應腔體溫度分佈受重力、基板移動及幾何形狀所影響，發現重力與浮力有重要關係，而移動式基座將使得流場變的複雜，但有助於改善均勻度^[10]。

本研究主要是透過數值模擬分析，在線型型的蒸鍍源噴嘴型式不同的情況時，瞭解反應腔體內的流場變化及溫度的分佈型態。透過反應腔體內物理量的分析，在不同噴嘴的情況下，蒸鍍源氣體離開噴嘴後到成膜基板間的流場變化，以推估流場對於成膜均勻性的影響與關聯性。該流場為單純的流況模擬，並不包含化學與相變化等多重物理現象耦合模擬。

2. 數值模擬方法

本研究使用泛用型計算流體力學軟體 CFdesign V2011 進行數值模擬，搭配的硬體為 HP XW 6600 Work-Station，浮點運算單元採用 Intel® Xeon® 5400 CPU 及 16GB FB-DIMM RAM。運算前處理將預先繪製的 3D 圖檔直接匯入套裝軟體 CFdesign V2011 做為初始模型，網格方面則是透過軟體內建自動網格生成功能做為物理模型建立，以及相關的材料與邊界條件的設定；影像分析後處理部份，使用 CFdesign V2011 Advanced 模組求解器為程式運算核心，包含數值分析運算，將結果以數據或圖表等方式輸出。

2.1 案例分析

在真空環境下氣體流動的型態隨其壓力以及腔體的尺寸而定，根據氣體之平均自由路徑與腔

體的主要尺寸可將其劃分為，黏滯範圍、過渡範圍及自由分子氣流範圍。而透過無因次參數 Kn 數(Knudsen number)來做為區分之標準，其定義為：

$$Kn = \lambda / d \text{-----}(1)$$

其中，

λ ：氣體分子平均自由徑(mm)

d ：腔體水力直徑(mm)

本研究所採用的腔體壓力約為 8×10^{-5} Torr，腔體壓力的判斷條件為：

$$0.01 < \frac{\lambda}{d} < 1.0 \text{-----}(2)$$

$$\text{又 } \lambda = \frac{5 \times 10^{-2}}{P} \text{-----}(3)$$

其中， P ：系統過渡壓力(Torr)

將(3)式代入(2)式，得到：

$$\frac{5 \times 10^{-2}}{d} < P < \frac{5}{d} \text{-----}(4)$$

本研究之蒸鍍腔體幾何尺寸為長 510mm、寬 400mm，腔體底部蒸鍍源噴嘴出口至成膜基板距離約 360mm。而水力直徑以最大流動區域的截面距離為基礎，意即水力直徑為 510mm，帶入(4)式中，則得到過渡壓力範圍為

$$9.8 \times 10^{-5} < P < 9.8 \times 10^{-3} \text{Torr}$$

若以氣體分子平均自由徑常用判斷式^[11]

$$\lambda = 0.05/P \text{-----}(5)$$

進行腔體流況判斷，以本研究之腔體壓力為 8×10^{-5} Torr 代入(5)式，氣體分子平均自由徑為 625 mm，再代回(1)式得到 $Kn = 625 / 510 = 1.225$ 。而 Kn 數區別腔體流場型態主要可分為下列三種：

$Kn < 0.01$ ，稱為黏性流(viscous flow)；

$Kn \approx 1$ ，稱為努森流(Knudsen flow)或過渡區流；

$Kn \gg 1$ ，稱為分子流(molecular flow)；

故本研究所採用最低壓力為 8×10^{-5} Torr 時， $Kn = 1.225 \approx 1$ ，得知腔體內之流體狀態已由黏性流轉換為努森流。

2.2 案例分析

腔體內流場現象也因數值模擬須簡化，做以下基本假設：

- (1)流體為牛頓流體之努森流過渡區，其流體密度隨溫度與真空度變化。
- (2)腔體壁面為無滑移條件(no slip condition)，且流體其壓力、溫度及密度具均質性(homogeneous)。
- (3)流體為三維穩態不可壓縮流之流體。
- (4)本研究因蒸鍍源有加熱，考慮熱擴散性。
- (5)不考慮化學及相變化反應。

(6)本研究之流場速度遠低於音速，所以能量方程式中的黏滯消散項忽略不計。

2.3 模型網格與邊界條件

在模擬分析過程中，流場中的格點(grid)疏密會影響數值計算的結果；不當的網格設計會造成收斂不易的情況；網格過少可能會因格點間的距離過大而無法詳細描述流場間細微的物理變化，甚至造成錯誤的模擬結果。而網格過多雖能詳細的描述流場各區域的物理量，但會花費更多的數值運算時間，也可能造成電腦硬體設備無法負荷之情形。故本研究網格建立僅針對腔體內部流體區，物理模型以厘米(mm)為單位，腔體流道簡化後之 CFD 初始物理模型如圖 1 所示，設計變更的四種噴嘴物理模型如圖 2 所示。

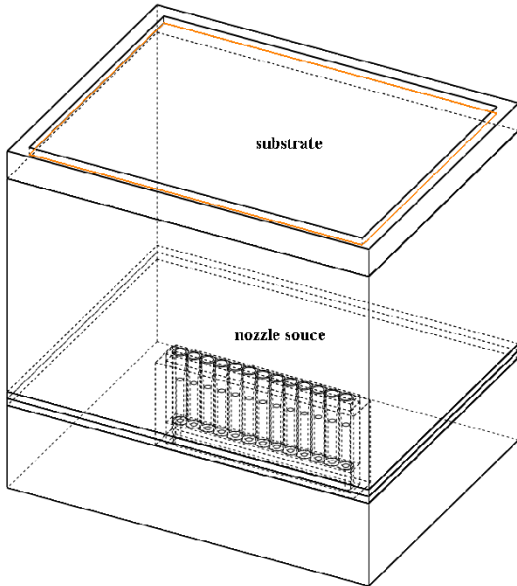


圖 1. 腔體流道簡化後之 CFD 初始物理模型

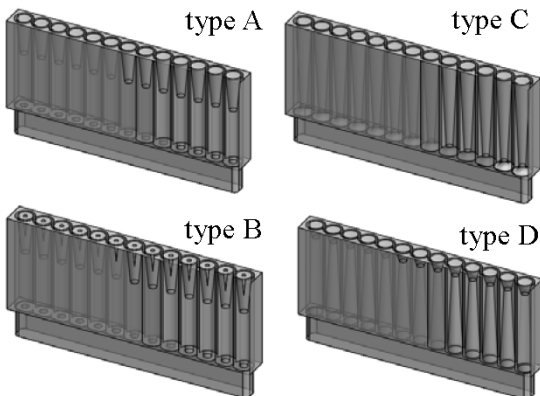


圖 2. 噴嘴設計變更的物理模型

本分析相關邊界條件如下：

- (1)反應腔室壁面(wall condition)：流體在固體壁面上需在滿足無滑動邊界條件(no-slip condition)，因此垂直於壁面之速度為零。
- (2)系統流量(system flow rate condition)：以入口體積流率為均勻且為單一方向。
- (3)壓力出口(pressure outlet condition)：因涉及低於一大氣壓，設定該處之整體系統壓力為絕對壓力，當狀態已達穩定，內部不再產生變化。
- (4)蒸鍍源之初始流體溫度為 400°C、出入口端假溫度梯度設在 5°C 之內，流體平均總流量控制在 49sccm，採用變數氣體條件。
- (5)因腔體壓力被限制遠低於一大氣壓，當微小流量進入腔體程穩定時，理論值為層流，但因氣體分子相對稀少，故流場型態修正為為努森紊流模式。

為使數值疊代方法能快速地獲得正確結果，執行電腦模擬程式的收斂與否以下列兩種條件判定：

- (i)連續疊代次數到達所設定次數時。
- (ii)所有計算殘值皆達所設定之大小。

本研究所有數值模擬計算結果，對收斂條件之設定如下：在連續及能量方程式、不同方向速度分量等計算殘值小於 10^{-4} 或疊代次數為 500 次先達到為判斷標準。在各組模擬結果中，其 UVW 速度分量及壓力殘值都收斂至 10^{-4} 以下。

3. 結果與討論

本研究針對真空熱蒸鍍製程之汽化流體，在脫離蒸鍍源噴嘴後進入腔體之流場變化研究，改變了噴嘴的孔洞造型，對於形成的流場與溫度場之型態進行探討，以下就腔體反應區與成膜基板區分別進行分析比較。

3.1 腔體反應區流場與溫度場之分析比較

為了瞭解蒸鍍源使用不同型式之噴嘴所形成的腔體流場及溫度場分佈，從圖3及圖4可分別得知模擬結果當中，不論使用何種型式的噴嘴，在剛離開噴嘴的速度相對較為強烈，在靠進基板的中間區形成相對之低速區；而整體的動能形式則以type D最強，type C次之，而type A最弱。

在溫度分佈方面，在剛離開噴嘴之溫度蓄積上以噴嘴type B、D較佳，有較完整的相對均溫區，而在噴嘴type A、C則較快形成溫度散逸，type C次之，而type A最弱；另外，當使用噴嘴type C時，噴嘴至基板的腔體區間的溫度梯度的分佈型態則優於其他三種噴嘴。

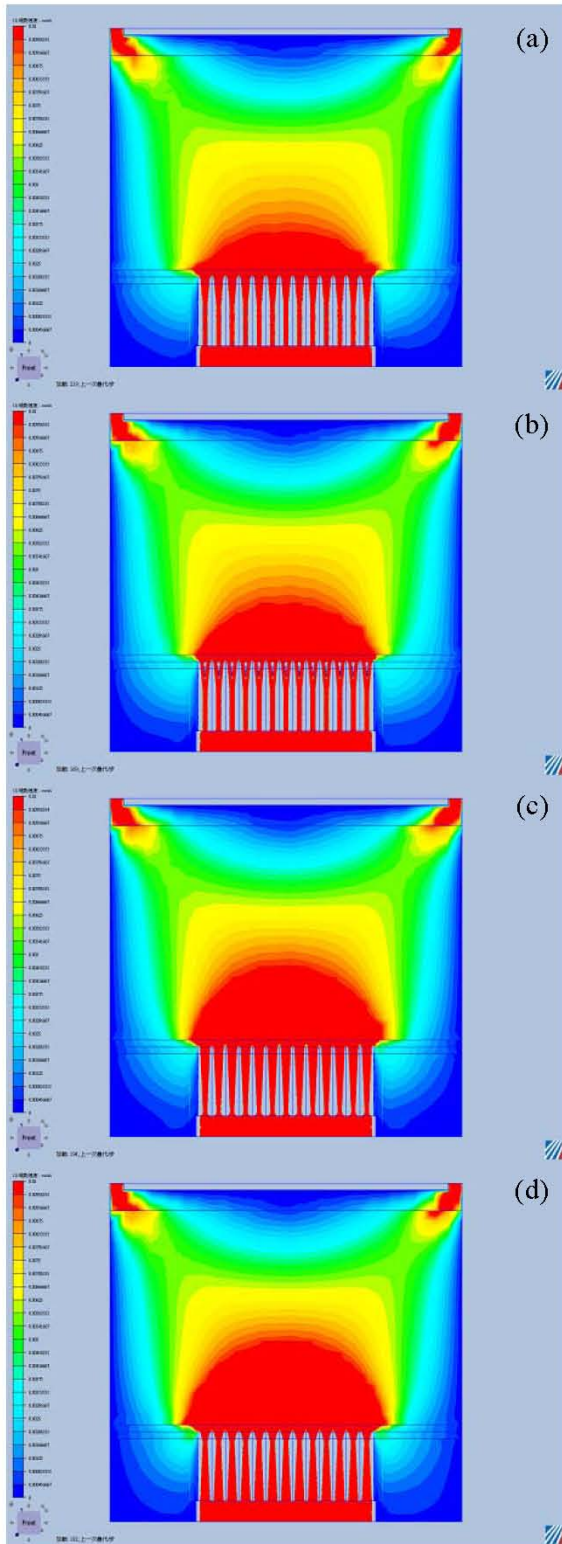


圖 3. 不同噴嘴切於腔體中間對稱面之速度場。
 (a)type A、(a)type B、(a)type C、(d)type D

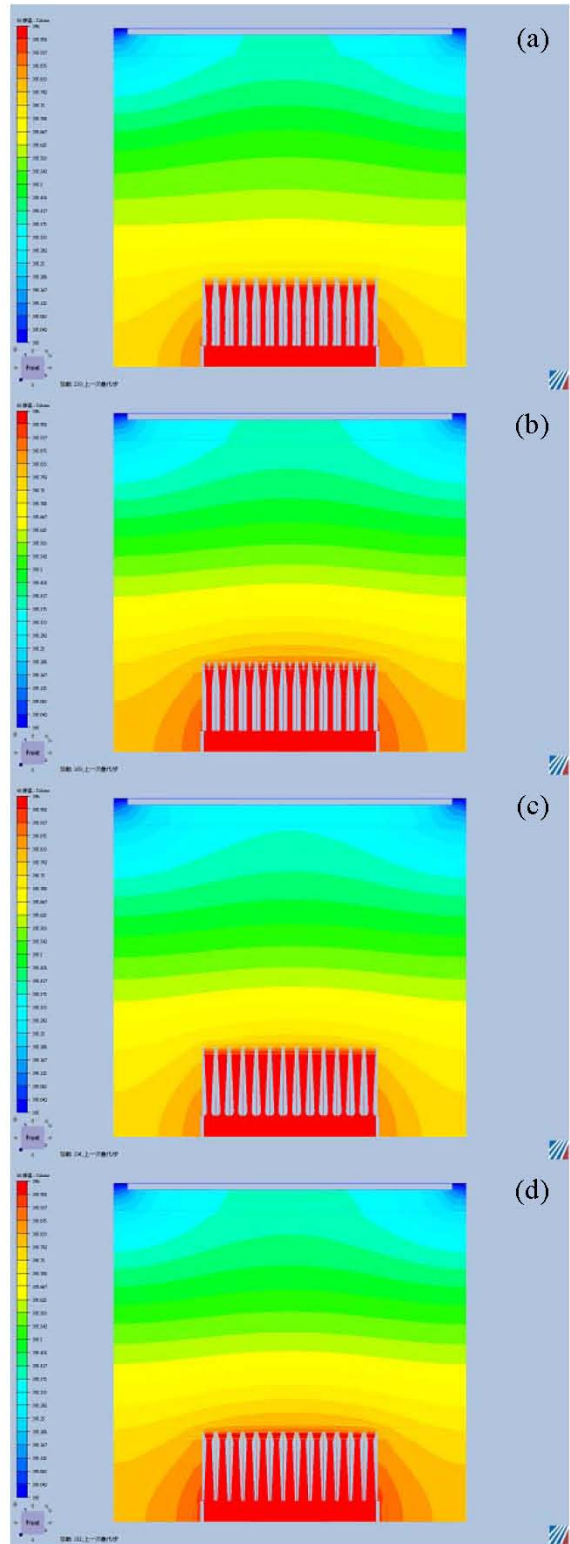


圖 4. 不同噴嘴切於腔體中間對稱面之溫度場。
 (a)type A、(a)type B、(a)type C、(d)type D

3.2 成膜基板區流場與溫度場之分析比較

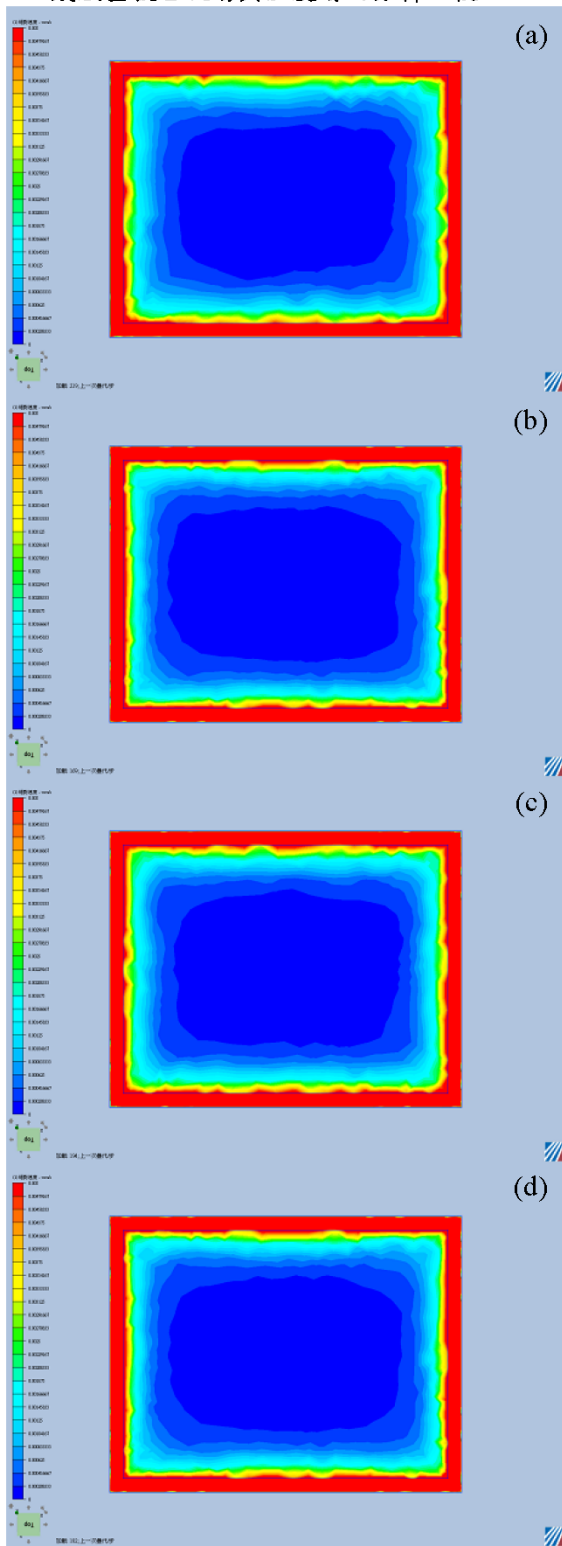


圖 5. 使用不同噴嘴切於基板成膜面之速度場。
 (a)type A、(a)type B、(a)type C、(d)type D

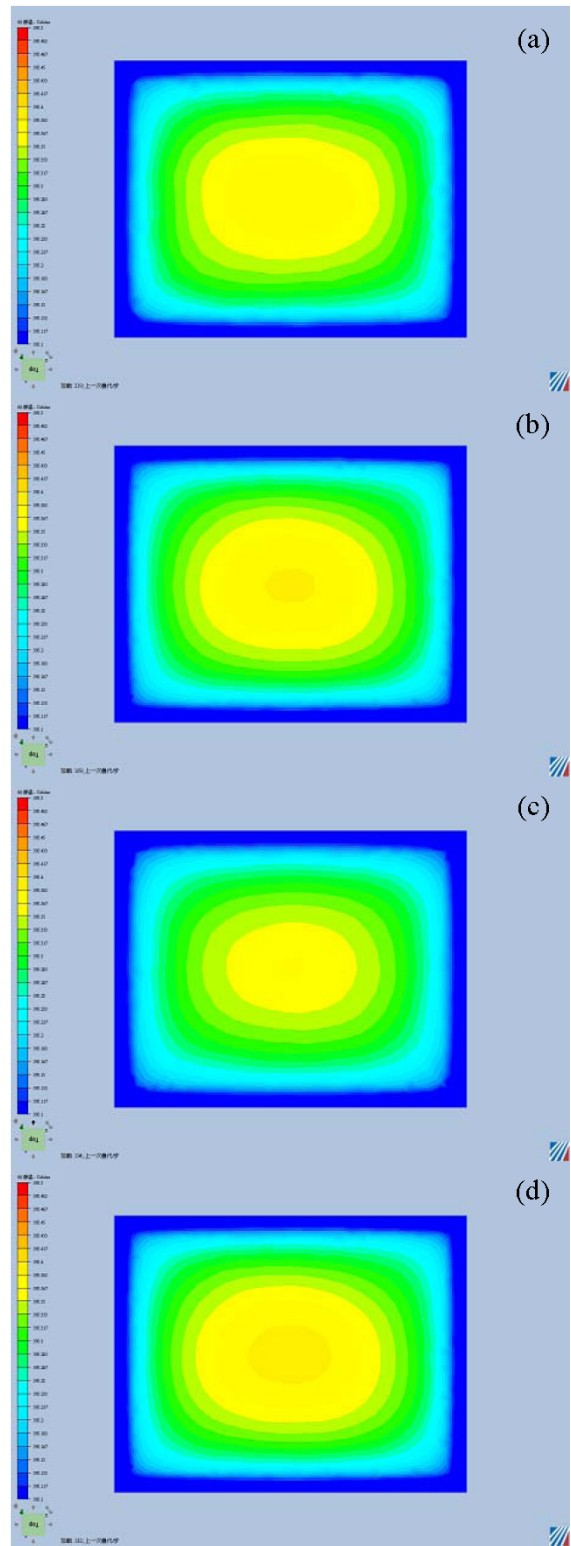


圖 6. 使用不同噴嘴切於基板成膜面之溫度場。
 (a)type A、(a)type B、(a)type C、(d)type D

圖 5 與圖 6 的模擬結果為切於成膜基板面上的速度場與溫度場分佈情形，在基板面的速度場中，不論使用何種型式之噴嘴，在基板面上的中央處又明顯之局部低速區，但隨著流體往基板外圍流動，其速度也隨之提升，並形成明顯之速度梯度差，但在此對於使用不同之噴嘴型式並無太大之速度場差異分佈。

而在溫度場的分佈方面，基板中央區明顯有較高的溫度區，就溫度的均勻性而言，以使用 type A 噴嘴的結果為最佳，type B、D 噴嘴的結果次之，type C 的最差。

4. 結論

整體而言，蒸鍍源的噴嘴在截面造型的設計上對於基板面上流場或溫度場的差異並不顯著，但在腔體的流場或溫度場則有些許差異。在蒸鍍流體離開噴嘴後的速度動能而言，使用 Type D 的噴嘴設計將有較明顯的揚升趨勢。

就噴嘴的特性而言，當蒸鍍源進入 Type D 噴嘴後會開始加速，在此刻轉換成揚升的動能，但在通過反折之漸擴孔設計後，則可緩和其流體之揚升動能，並在飄浮到相對空間較大的腔室之前進行調和與銜接，使飄浮的流場可以有效持續。其他的噴嘴雖同樣有做漸擴減速設計，但在起初並沒有強迫揚升之設計，使其在脫離噴嘴後的動能相對較弱，並可能受到熱場的溫度梯度干擾流體飄浮，或是隨著出口端的真空驅動力牽引，而造成往四週飄浮。

此外，基板的均勻度似乎是仍有許多進步的空間，顯然在基板面積愈來愈大時，基板較外圍的均勻性也相對較差；然而在較先進的製程中，控制蒸鍍源往復擺動則為提升均勻性的方式之一。然而本研究僅針對噴嘴流道與腔體流場進行研究，為一般較單純之熱流場模擬，後續在延伸的研究上，建議朝向流固耦合與之模擬，並考慮化學相變化，對於該蒸鍍製程的成膜分佈將更加準確。

5. 誌謝

本研究為經濟部科專編號 102-EC-17-A-02-02-0756 之計畫，由於經濟部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

1. YAS at FINETECH FPD Exhibition & Conference, 2010.
2. 李孟庭、吳長晏、李重君，友達光電股份有限公司，“AMOLED 顯示技術發展”，全球液晶通，2012 年 2 月。
3. 陳光榮，“AMOLED 量產技術與未來發展”，專題演講，高雄、台灣，2011 年。
4. 韓商 YAS global, yasoled.koreasme.com
5. 韓商 Sunic system, www.sunic.co.kr
6. 韓商 www.hansong.co.kr
7. 日商 Canon Tokki, www.canon-tokki.co.jp
8. 日商 ULVAC Solutions Inc., www.ulvac.co.jp
9. R. J. Chesterfield et al., “Multinozzle Printing: A Cost-Effective Process for OLED Display Fabrication,” SID Symposium Digest 30, 951-954, 2009.
10. S. Middleman, Modeling Axisymmetric Flows: Dynamics of Films, Jets, and Drops (Academic Press, New York, 1995), Ch. 5.
11. 國科會精密儀器發展中心，真空技術與應用，第 7-13 頁，全華科技，新竹、台灣，2004 年。