

圖 5-14 透鏡小於半球體

圖 5-15 表示不同透鏡所增加的效率作比較，透鏡為半圓，透鏡直徑分別為 50 μm 、75 μm 和 100 μm ，透鏡間距為 5 μm 、10 μm 和 15 μm 。由圖 5-15 可以看出當透鏡間距為 5 μm 且透鏡直徑為 100 μm 可以增加最多效率，這表示增加的效率和填充率為正比的關係，當透鏡的填充率越高表示越大面積有透鏡可以將光導出。

經過計算可以得到公式 (5-4)，但這個公式適合範圍為填充率大約 40% 到 80%，當填充率過小或過大時，其斜率與截距亦會不同。

$$y = 37.63x + 35.18 \quad (5-4)$$

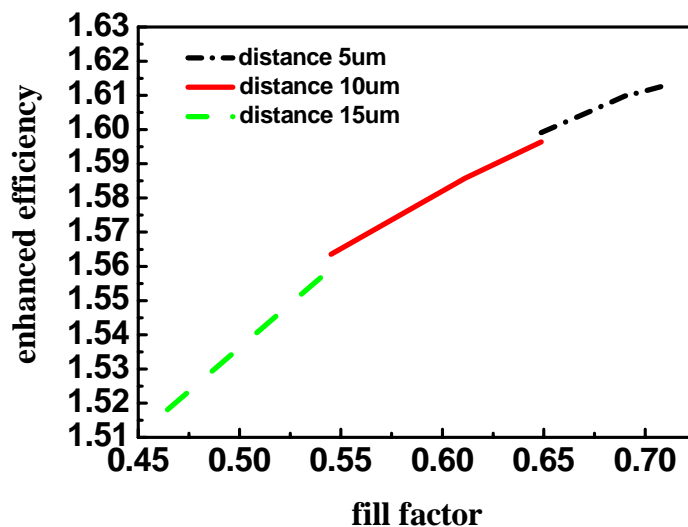


圖 5-15 填充率對所能增加的效率關係圖

圖 5-15 中三段曲線每段都趨近為一直線，顯示出當填充率越大所能增加的光耦合效率越大，但可以看出當填充率越大曲線趨近平緩，所以當填充率越來越大時，所能增加的光耦合效率雖然持續在變大，但變動的幅度會越來越小。

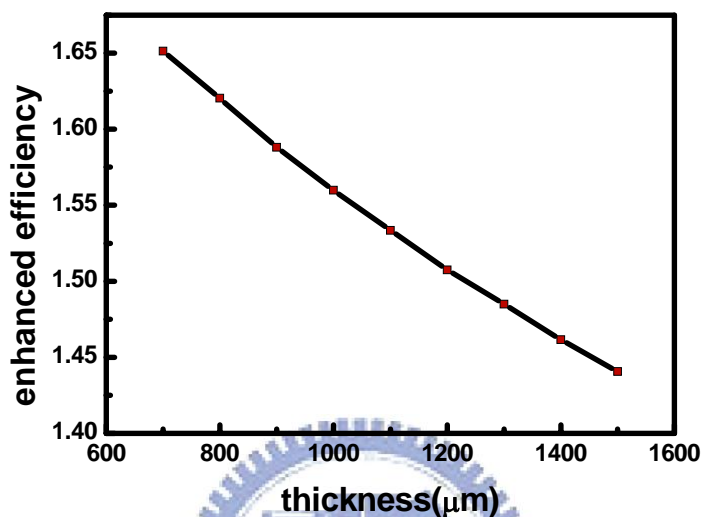


圖 5-16 增加效率對基板厚度關係圖

圖 5-16 表示在不同基板厚度時透鏡可以增加多少效率，圖中透鏡直徑 $100\mu\text{m}$ ，透鏡間距 $15\mu\text{m}$ 和透鏡接觸角為 90 度。從圖可以看出當基板厚度越來越大時，所能增益的效率越少。而其中基板厚度 $700\mu\text{m}$ 為直接在我們所作的 PLED 上作微透鏡陣列，後面厚度不同是將微透鏡陣列先作在蓋玻片上後，再將微透鏡陣列貼附在 PLED 上。

5-2 實驗結果

如前文所述，我們的玻璃基板先經過 UV-Ozone 的處理，使玻璃基板的性質改變成親水性，先確定基板的親水性和處理 UV-Ozone 的時間的關連性，再挑選最佳的 Ozone 時間，使基板的親水性達到最強。圖 5-17(a)說明了處理 UV-Ozone 的時間，和水滴大小的關係，其中水滴體積一樣，所以當水滴直徑越大表示玻璃基板親水性越強，水滴直徑如圖 5-17 (b)。

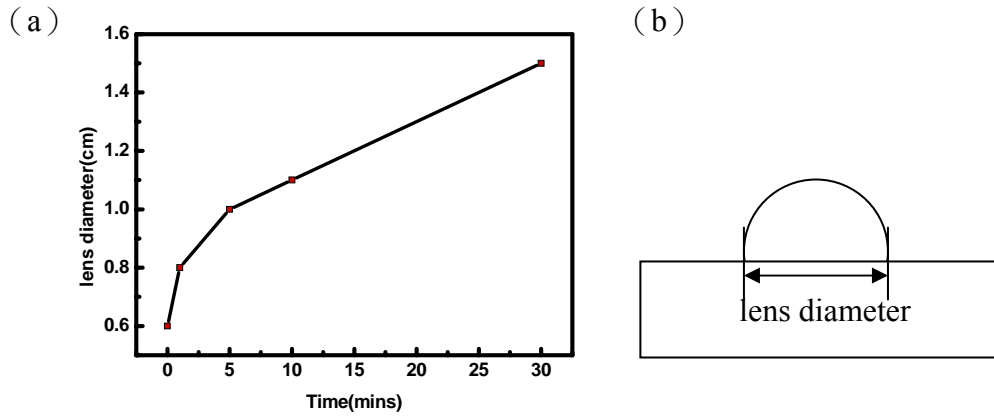


圖 5-17 (a) 基板親水性與處理 UV-Ozone 時間關係圖；(b) 水滴直徑示意圖

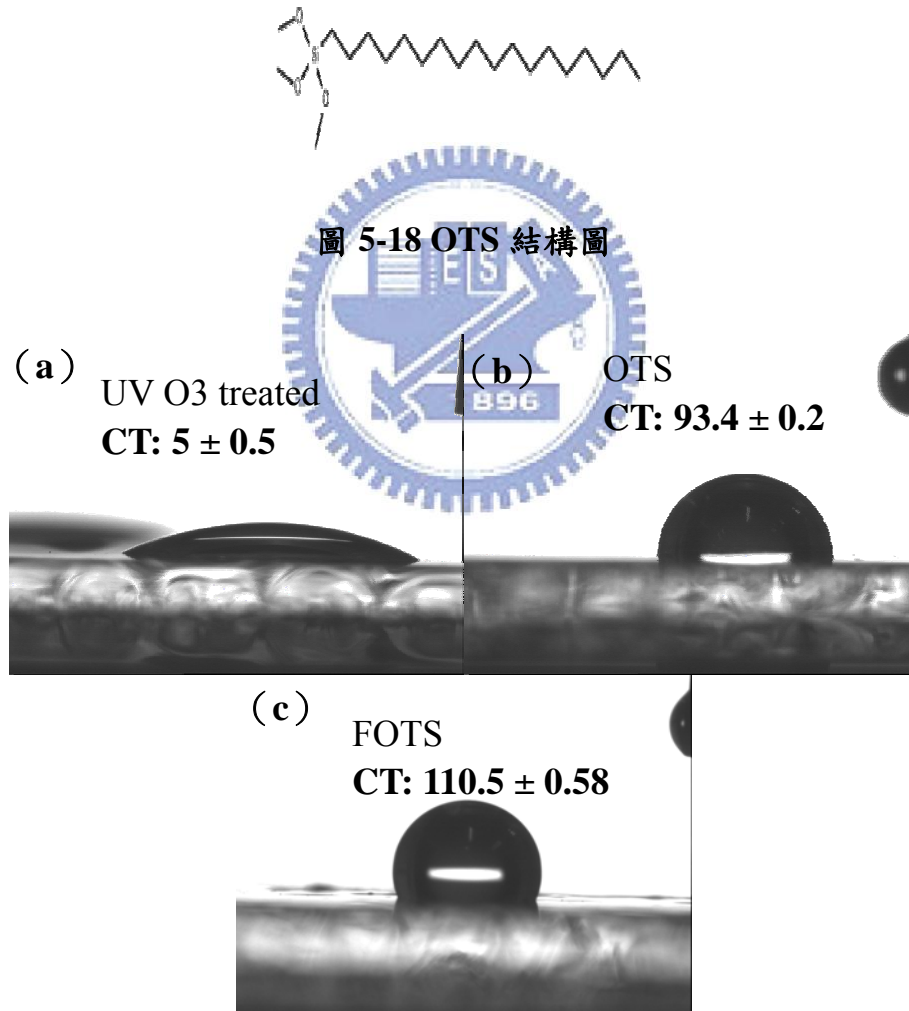


圖 5-18 (a) UV-Ozone 處理的基板，接觸角為 5 ± 0.5 (b) OTS 處理的基板，接觸角為 93.4 ± 0.2 ；(c) FOTS 處理的基板，接觸角為 110.5 ± 0.58 [23]

疏水性的材料比較常用的有 Octadecyl-trimethoxysilane (OTS) (圖 5-18) 與

FOTS，根據前人的研究[23]在基板上用 OTS 和 FOTS 做處理之後，在處理過後的基板上滴上水珠，看其接觸角大小。由圖 5-19 可以看出 FOTS 的接觸角是最大的，表示其疏水性最強，最後我們根據前人的結果便利用 FOTS 當作實驗的疏水性材料，另外圖 5-19 中的 (a) 圖為 UV-Ozone 處理過後的基板。

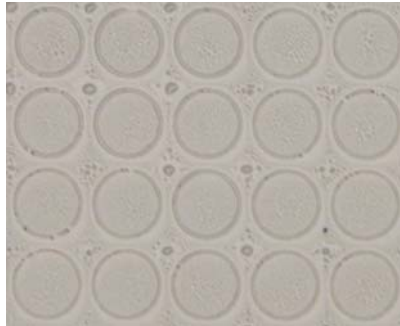


圖 5-20 玻璃基板利用微接觸印刷後圖案化

為了確認 PDMS 印章上的圖案確實正確的轉移到玻璃基板上，我們必須先用顯微鏡觀察圖案是否有轉移到玻璃基板上，但實際上我們所需要的 FOTS 膜厚只要單層膜 (monolayer)，這樣的膜厚在顯微鏡下是看不見的，因此為了先確定圖案是否有轉移，我們就把 PDMS 印章和玻璃基板的接觸時間拉長，使 FOTS 可以在玻璃基板上長成多層膜，以利於在顯微鏡底下看見玻璃基板上的圖案。

另外也可以使用原子力顯微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) 量測 FOTS 膜厚以及確定 FOTS 不會出現在該是親水性的區域 (也就是圓內)。經過顯微鏡 (圖 5-20) 和 AFM (圖 5-21) 確認之後，顯示我們真的可以藉由微接觸印刷來定義玻璃基板上的圖形，且不會使 FOTS 在親水性區域出現。

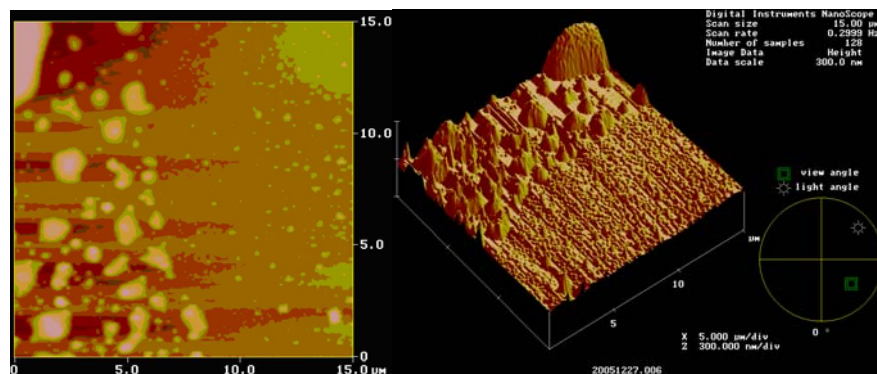


圖 5-21 AFM 圖

確定我們可以將 PDMS 模型上的圖案轉移到玻璃基板上後，就將 NOA65 旋轉塗佈上玻璃基板。從前文可以看出，當透鏡高度 h 越高，表示其接觸角越大，而接觸角越大時，我們可以得到較大的光耦合效率。因此致力於將透鏡高度增高使光耦合效率大大提升。

至於我們用來控制透鏡高度 h 的參數有四種：NOA65 的黏度、旋轉塗佈時的轉速、旋轉塗佈次數和噴墨技術 (Ink-Jet Printing)。

NOA65 黏度方面：

NOA65 的黏度會因為溫度的不同而有所改變，由圖 5-22 可以看出當溫度變高時，NOA65 的黏度會降低，使得旋轉塗佈上的 NOA65 膜厚變薄，因此將會得到較低的透鏡高度；相對的當溫度降低時，旋轉塗佈上的 NOA65 膜厚變厚，而得到較高的透鏡高度。

因此在沒有室內溫控的情況下，在夏天與冬天所做的透鏡會擁有不同的透鏡高度，如表 3 所述，其中控制轉速為 2000 轉，利用 α -step 量測透鏡高度，其餘製成參數都不變。

從表 3 明顯的看出當溫度改變時，NOA65 黏度跟著改變，使得透鏡的高度進而改變，另外也可以在表 3 中看出來在同樣轉速下，不同的透鏡大小會擁有不同的透鏡高度，當透鏡間距固定時，透鏡直徑越大其所得到的透鏡高度越高，但其接觸角都相近，經由計算得到在溫度較低時所做出透鏡接觸角大約 8.7 度，而在溫度較高所做出來的透鏡接觸角約為 5.7 度。

表 3 溫度對透鏡高度的影響

季 節	透 鏡 直 徑	100 μ m	75 μ m	50 μ m
	冬天 (15 度)		3.4237 μ m	2.85 μ m
夏天 (25 度)		2.5496 μ m	1.867 μ m	1.263 μ m

另外介紹一個參數 F number，其表現透鏡的特性，而 F number ($f_{\#}$) 的計算公式 (5-4) 為下：

$$R_s = \frac{h^2 + \left(\frac{R_l}{2}\right)^2}{2h}, f' = \frac{R_s}{n-1}, f_{\#} = \frac{f'}{R_l} \quad (5-4)$$

其中 n 為透鏡材料的折射率， f' 為透鏡的焦距。

由圖 5-23 看出 $f_{\#}$ 正比於填充率，這是因為當填充率小的時候，會有更多的透鏡材料聚集在較小的透鏡直徑內，故 h 變高、 R_s 變小所以 $f_{\#}$ 變小。就拿透鏡直徑 $50\mu\text{m}$ 透鏡間距 $15\mu\text{m}$ 為例，其填充率為 0.46 而 $f_{\#}$ 為 5.6 。其觀察出確有透鏡形成因為剛開始的 NOA65 膜層是平坦的。

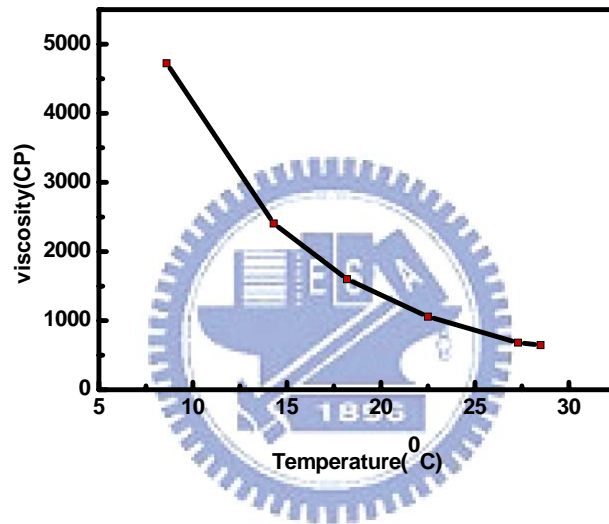


圖 5-22 NOA65 的黏度與溫度關係

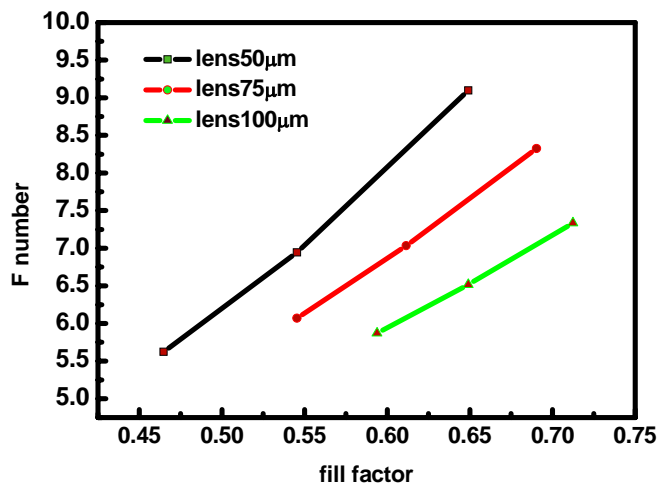


圖 5-23 $f_{\#}$ 與填充率的關係

旋轉速度方面：

從圖 5-24 可以看出當轉速提高時，NOA65 的薄膜層較薄，所以會得到較低的透鏡高度；反之會得到較厚的薄膜層，與較高的透鏡高度。因此在低轉速時會擁有較低的 $f_{\#}$ ，而高轉速時 $f_{\#}$ 較高。

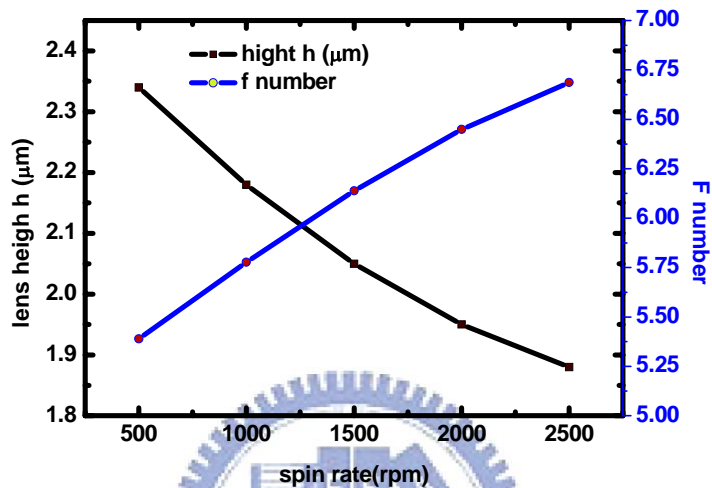


圖 5-24 轉速對透鏡高度與 $f_{\#}$ 的關係圖

旋轉次數方面：

我們可以重複在基板上塗佈上 NOA65，這樣不僅可以慢慢的將透鏡增高（如圖 5-25），還可以像圖 5-26 所示使透鏡更加接近我們所設定的大小，並使曲面更完整。圖 5-26 中為同一片基板，且在相同的位置。

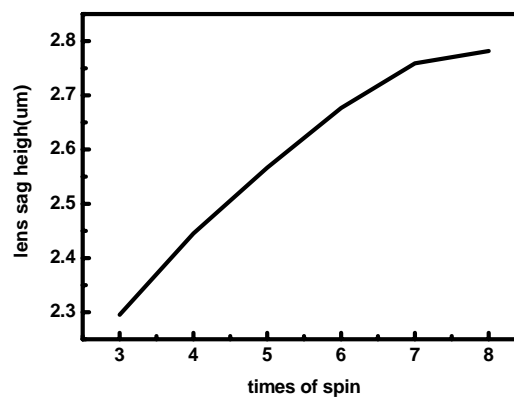


圖 5-25 旋轉塗佈次數與透鏡高度的關係

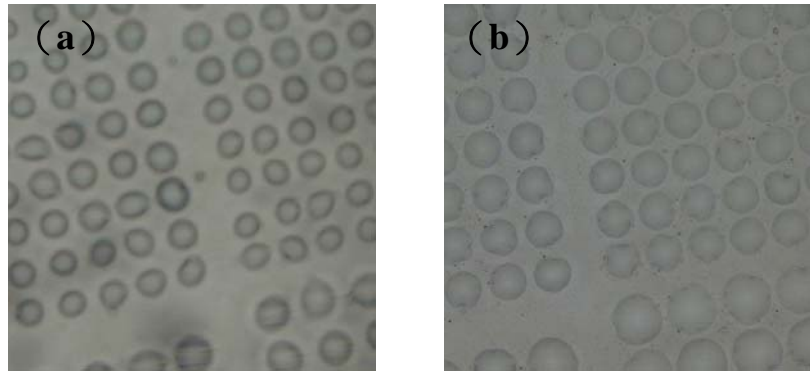


圖 5-26 (a) 旋轉塗佈 1 次透鏡 OM 圖；(b) 旋轉塗佈 8 次透鏡 OM 圖

最後圖 5-27 為三種不同透鏡直徑的 OM 圖，由圖可以知道三種透鏡直徑我們都可以用自組裝薄膜的方式做出，並且符合 PDMS 模形。

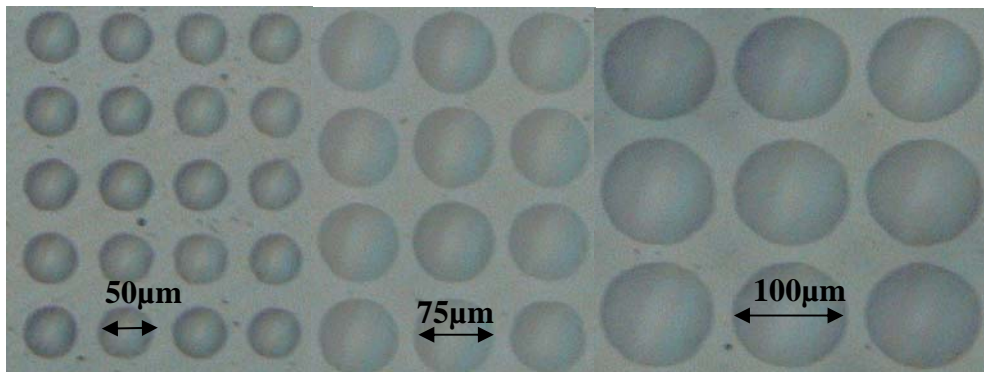


圖 5-27 三種大小 lens 的 OM 圖，間距都為 15 μm

另外這種製作透鏡的作法還可以作在塑膠基板 (PEG) 上，將來可以利用在可撓式發光元件上，圖 5-28 為透鏡在塑膠基板上的 OM 圖。我們可以在塑膠基板上做出跟玻璃基板一樣的透鏡，三種大小的透鏡直徑跟不同間距都可以在塑膠基板上做出來。

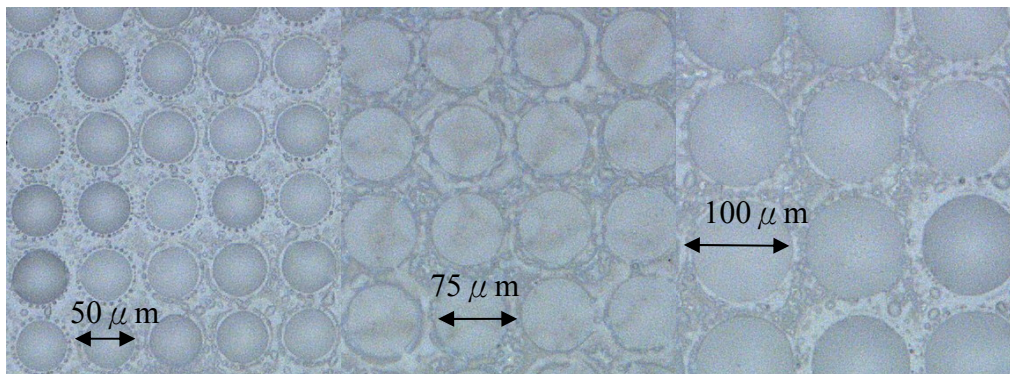


圖 5-28 在塑膠基板上的三種微透鏡，間距 15 μm

5-3 光學量測

我們利用氦氖雷射來作光點大小的光源，我們可以從公式 5-5 算出繞射極限 z ，而繞射極限由圖 5-29 簡單說明。

$$z = 2 \times 1.22 \times \frac{\lambda}{R_l} \times f' \quad (5-5)$$

其中 λ 為光源波長

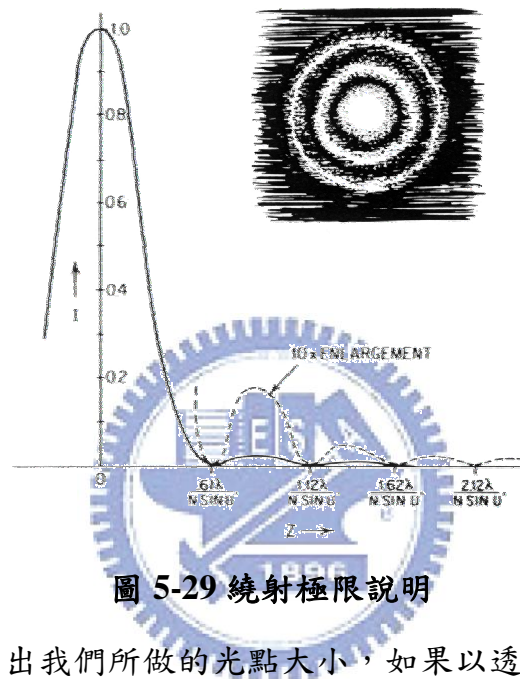


圖 5-29 繞射極限說明

由圖 5-30 可以看出我們所做的光點大小，如果以透鏡大小 $75\mu\text{m}$ 透鏡間距 $10\mu\text{m}$ 為例，經由理論計算得到光點直徑為 $10.8\mu\text{m}$ ，而實際量測到的光點直徑為 $11.08\mu\text{m}$ ，兩者數據非常接近，可以知道我們所做的透鏡曲面還蠻完整的。

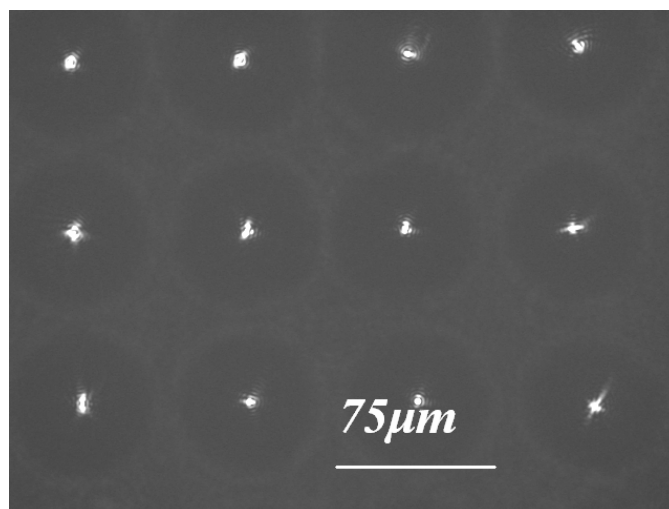


圖 5-30 光點大小

5-4 實驗與模擬比較

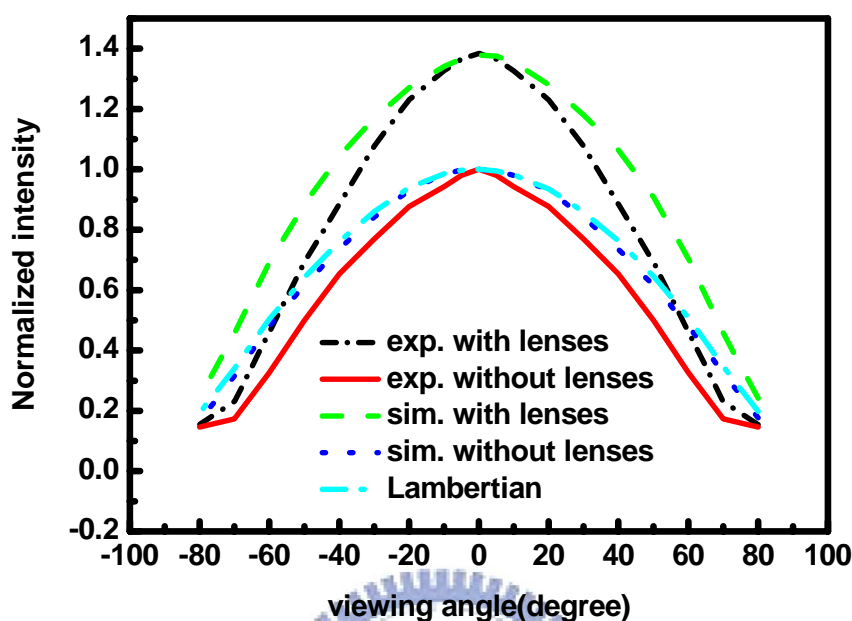


圖 5-31 模擬與實驗的視角亮度關係圖

前面所述為了簡化模擬，使模擬簡單化而把光源設定為理想的 Lambertian 光源，而前文說明過加上微透鏡陣列並不會劇烈改變其發光場形。圖 5-31 中有理想 Lambertian 光源的視角與強度曲線圖，可以看出和模擬結果很相近，而實驗的結果就和理想的 Lambertian 光源與模擬結果相近，但還是有一點不同，這可能是因為當初為了簡化模擬模組而少了 ITO 薄膜層，所以實驗上大角度部分的光會被困在 ITO 薄膜層，而導致大角度部分的光強度不如模擬的數據。圖中實驗的透鏡是用噴墨技術所做的。

圖 5-32 為模擬結果與實驗結果比較圖，透鏡大小為 $50\mu\text{m}$ ，橫軸為填充係數，縱軸為增加的效率。由圖 5-32 可以看出實驗結果跟模擬結果趨勢相似，但是所增加的效率略微不同，可能的原因有貼上透鏡時所用的 UV 膠 (NOA65) 厚度與預設值不同，或是所貼附的透鏡有缺陷，例如兩三個透鏡相連在一起使透鏡變大，如前文所述大透鏡所增加的效率較大，因此導致實驗所增加的效率略微高於模擬結果。

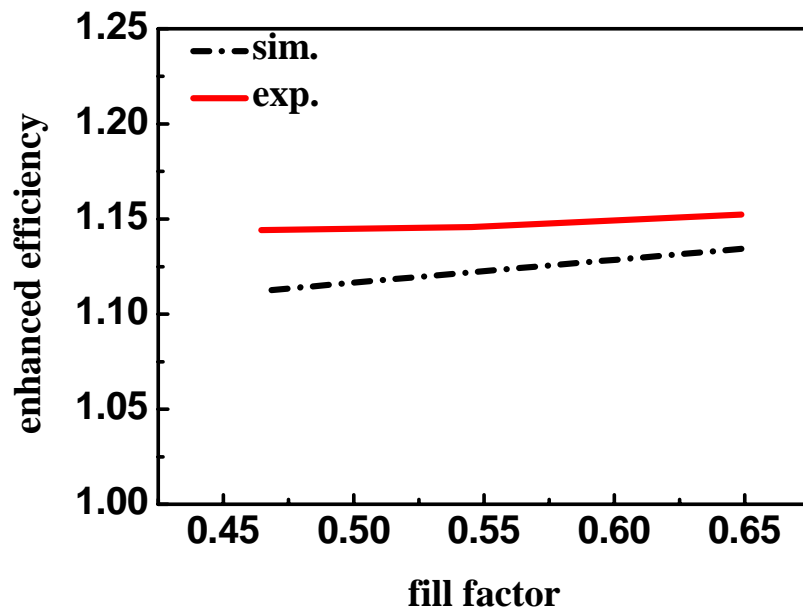


圖 5-32 模擬與實驗之比較

當我們進一步控制透鏡的完美性，及 UV 膠的厚度，便可以得到如圖 5-33 一樣相當近似的結果。

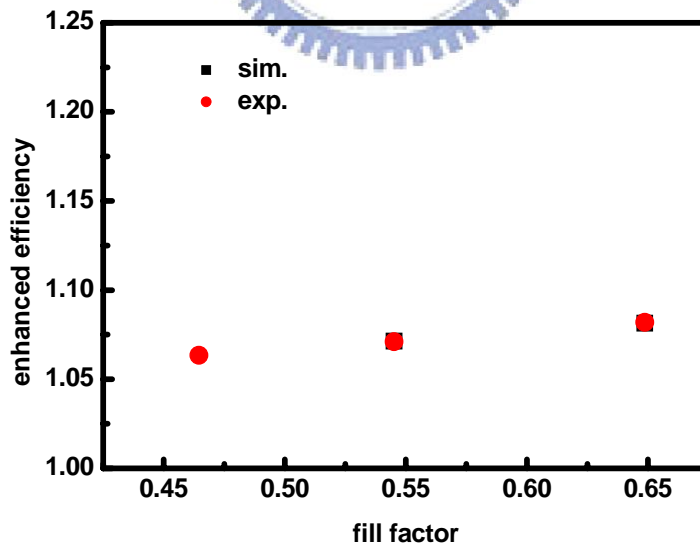


圖 5-33 相當相近的結果

由上述之實驗結果，驗證了模擬的可信度，因此可以藉由模擬得到最佳的透鏡大小與排列，再應用在元件上，以優化元件特性。

第六章 結論

我們利用光學模擬軟體 Tracepro 來當作我們的模擬工具，雖然為了簡化模擬過程而所做的模擬模型很簡單，但仍可得到正確的結果，這顯示了適當的簡化並不會影響到最後的結果。此外也找到了增加光線數的方法，使模擬結果更加逼近真實情況。

利用自組裝薄膜來將玻璃基板圖案化，先找出疏水性極強的 FOTS，再將玻璃基板用 UV-Ozone 處理過，使其表面親水性變強後，再將 FOTS 長在處理過的玻璃基板上，最後塗佈上 NOA65，便可以成長出漂亮的微透鏡陣列。

其中微透鏡陣列的透鏡高度受到 NOA65 與轉速的影響，利用轉速來控制透鏡的高度，如果以後可以溫控 NOA65 的溫度使其黏度增高，便可以將透鏡的高度作的更高。

綜上所述，我們已製作了自組裝微小透鏡陣列，目前文獻所做的透鏡大多是方形底，而我們可以將透鏡做成圓形底，並利用此微透鏡增加了有機發光二極體的光耦合效率。

最後我們證明了增加微小透鏡在有機發光二極體上並不會改變元件發光特性，只增加了出光效率，不會如同第二章所述的，加了擴散層或是散射材料後，改變了發光顏色等不需要的改變。另外我們也利用簡單的模擬得到了與實驗相近的結果，之後便可以從模擬結果可推知何種透鏡大小和透鏡間距可以得到最高的光耦合效率。根據之前的模擬結果，若透鏡之接觸角可達到 90 度，可將光耦合效率提高約 60%。

但由於利用旋轉塗佈的方式較難將透鏡作到半球體，我們可以配合噴墨印刷方式，將透鏡材料塗佈在基板上，以求得到將近半球體的透鏡，使光耦合效率可以增進約為 60%。

參考文獻

- [1] L.S. Hung, C.H. Chen, *Materials Science and Engineering R* 39 143(2002)
- [2] J. Dresner, *RCA Rev.* 30, 322(1969)
- [3] W. Helfrich and W. G. Schneidere, *Phys. Rev. Lett.* 14, 229(1965)
- [4] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.* 51, 913(1987)
- [5] J. H. Buroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Bums and A. B. Holmes, *Nature* 347, 539(1990)
- [6] C. Ganzorig and M. Fujihira, *Appl. Phys. Lett.*, 81, 3137(2002)
- [7] M. Wohlgenannt, K. Tandon, S. Mazumdar, S. Ramasesha, Z. V. Vardeny, *Nature* 409, 494(2001)
- [8] J.S. Wilson, A.S. Dhoot, A. J. A. B. Seeley, M. S. Khan, A. Koehler, R. H. Friend, *Nature* 413, 828(2001)
- [9] C. Adachi, M. A. Baldo, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, 90, 5048(2001)
- [10] N. C. Greenham, R. H. Friend, and Donal D. C. Bradley, *Adv. Mater.* 6, 491(1994)
- [11] Nakamura, T, Tsutsumi, N, Juni, N, *J Appl. Phys.* 96 (11): 6016 (2004).
- [12] C. F. Madigan, M.-H. Lu, and J. C. Sturm, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, num.13, pp. 1650 (2000).
- [13] T. Yamasaki, K. Sumioka, and T. Tsutsui, *Appl. Phys. Lett.* 76, 1243(2000).
- [14] Mao-Kuo Wei, I-Ling Su, Yi-Jia Chen et al., *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16, 368 (2006)
- [15] S. Möller and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.* 91, 3324 (2002)
- [16] J.W. Swart et al., *IEEE IMOC'99 proceeding* 605
- [17] D. L. Macfarlane, V. Narayan, J. A. Tatum, W. R. Cox, T. Chen, and D. J. Hayes, *Ieee Photonics Technology Letters* 6, 1112(1994).
- [18] Jeon, C.W., Gu, E., Liu, C., Girkin, J.M., Dawson, M.D., *Ieee Photonics Technology Letters* 17, 9, 1887(2005)
- [19] Teng-Kai Shin, Jeng-Rong Ho, Cheng, J.-W.J., *Ieee Photonics Technology Letters* 16, 9, 2078(2004)
- [20] S. Chen et al., *Infrared Physics and Technology* 44, 133(2003)

- [21] M. T. Gale, M. Rossi, J. Pedersen, and H. Schutz, *Optical Engineering*, 33, pp. 3556-3566 (1994).
- [22] J. L. Wilbur, A. Kumar, E. Kim, and G. M. Whitesides, *Advanced Materials*, vol. 6, pp. 600-604, 1994.
- [23] Wen-kuei Huang, Chu-Jung Ko, Fang-Chung Chen, *Microelectronic Engineering* 83 1333(2006)
- [24] TracePro(Lambda Research Corp.) on-line Help

