

使用於有機發光元件之微透鏡增光膜

Patterned Microlens-Array Films for Light Enhancement of Organic Light-Emitting Devices

陳冠宇、林晃巖、李君浩、魏茂國

Kuan-Yu Chen, Hoang-Yan Lin, Jiun-Haw Lee, Mao-Kuo Wei

使用表面微結構的方式來增加有機發光顯示器的光萃取效率 (或簡稱為出光效率)，是為人所熟知常應用的技巧。然而將表面微結構應用在顯示器上，雖然具有效率提升之優點，卻會因為微結構造成雜散光的增加，進而使影像品質變差。本研究的主要目標即是利用微結構的設計方法，以解決增加出光效率與維持影像品質的兩難困境。

Conventionally, micro-structured films (*e.g.* microlens array films) are often applied to enhance light-extraction efficiency and increase luminance of organic light-emitting display. However, this approach was suffered from poor image quality due to stray rays caused by micro-structures. This trade-off between efficiency and image quality can be solved by our novel microlens array arrangement.

一、文獻回顧

有機發光顯示器 (organic light-emitting displays, OLED) 因為具有自發光的特性，所以擁有廣視角、反應迅速、結構簡單與可應用於撓曲式基板 (flexible substrate) 上等優點，已經被廣泛地應用於手機、MP3 及數位相機等手持顯示裝置，近來更朝向大面積的 OLED 電視發展。另因其不含汞，具有環保特性與適合捲式製程 (roll-to-roll process) 之優點，加上可利用噴墨印刷 (inkjet printing) 方式大量生產，因此被認為極有機會成為新式的固態照明光源而蓬勃發展。但是由於介面的全反射與層狀結構的波導效應，其發光的光萃取效率 (light-extraction efficiency) 一般而言均低於 30%，因此其效能還有

很多值得改善的空間⁽¹⁾。文獻上有人提出使用貼附微結構膜的方式來破壞介面的全反射⁽²⁻⁴⁾，以增加光萃取效率或出光亮度，但通常伴隨著影像顯示器的畫質變差，這是因為所增加的光線多為大角度的光，會影響到周圍畫素的顯示，以上是使用貼附微結構膜增加出光亮度所遭遇的兩難困境。

筆者之前曾進行了一系列探討覆蓋率 (coverage ratio 或 fill factor)、高徑比 (height ratio 或 aspect ratio) 和微透鏡底部直徑對於增光比影響的實驗，得出高的覆蓋率、高的高徑比和小的微透鏡直徑都會有較佳的增光比⁽⁵⁻⁷⁾。但是高的覆蓋率和高的高徑比卻會造成嚴重的影像模糊 (本文將探討如何定量影像模糊的影響)，前人對於這個問題採取的辦法，就是把微結構的尺度 (如微透鏡直徑) 變小，這樣一

來微結構的尺度遠小於次畫素 (sub-pixel) 的大小，雜散光線所造成影像的模糊程度也可以受到控制。然而微結構縮小會造成繞射效應，且變小的微結構在製造與複製上會增加困難程度，因此並不是一個非常適宜的解決之道。

以下筆者將介紹一個測量影像模糊或品質變差程度的定量方法，藉由這個方法找出增光比與影像品質變動的關係；最後再提出創新的中空排列微結構設計，在模擬及實驗上討論達成增光效果與兼顧影像品質的方案。

二、實驗及模擬條件

1. 實驗設定

使用 Minolta CS-1000 來量測 OLED 的亮度，進而計算「貼附微透鏡膜的 OLED 元件亮度」除以「原來 OLED 元件亮度」，將其定義為亮度比例 (luminance ratio)，其值也等於「增光比 +1」。

2. 模擬條件

使用光線追跡光學模擬軟體 LightTools™，所模擬的 OLED 元件之層狀架構定義為：反射陰極／電洞傳輸層 (60 nm)／發光層 (60 nm)／ITO (110 nm)／玻璃 (0.7 mm)／微透鏡膜 (0.1 mm)，微結構尺寸與實驗上 SEM 圖所測量出尺寸相同；假設光源為發光層與電洞傳輸層介面上均勻分布，且在各角度發光強度均相同之點光源集合。

模擬的光度計置於距玻璃與空氣介面 4 cm 的位置，收光的張角為 1.58 度，與實驗上使用 CS-1000 之量測條件相同。

三、設計原理分析

本文中的新發現適用於大部分規則排列之微結構，在此使用微透鏡結構作為探討的對象。

1. 微透鏡參數

- 覆蓋率 (coverage ratio 或 fill factor) 定義：具微透鏡的區域面積除以膜的總面積。
- 高徑比 (height ratio 或 aspect ratio) 定義：微透鏡

的高度除以微透鏡的底部半徑。

在微透鏡底部半徑固定之情況下，當微透鏡越高，表示曲率半徑越小，越接近半球形。

2. 定量影像品質

單一 OLED 畫素 (pixel) 的影像如圖 1 所示，左半部是實驗結果，右半部是模擬結果，上半部是沒有微透鏡膜的原始畫素，下半部是有貼附微透鏡膜的畫素，可以觀察到加上微透鏡膜之後，影像變得很模糊。定義 L 是原本發光畫素的寬度、 L' 是貼附微透鏡膜後由最亮處至 $1/e^2$ 強度的寬度，據此定義模糊寬度 (blur-width) = $(L' - L)/2$ ，如此就有定量基準來比較各種微結構對影像品質所造成的影響⁽⁸⁾。

3. 變化各種參數對增光比與模糊寬度的探討

(1) 覆蓋率的影響

① 模擬結果

由圖 2 可知：上半部是模擬畫素發光的圖案，由右至左的覆蓋率漸增，下半左圖可看出覆蓋率與總能量增加率呈正比，下半部右圖可看出覆蓋率與模糊寬度也呈正比。

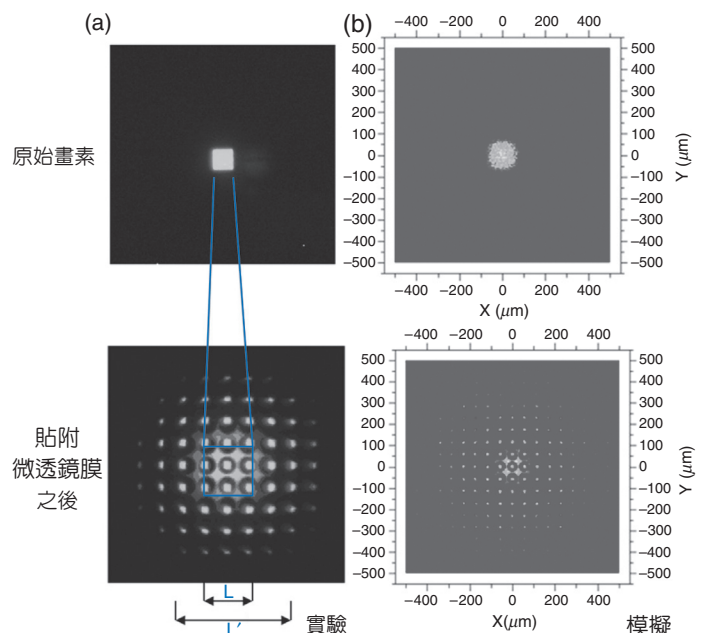


圖 1. 由實驗與模擬照片定義模糊寬度。

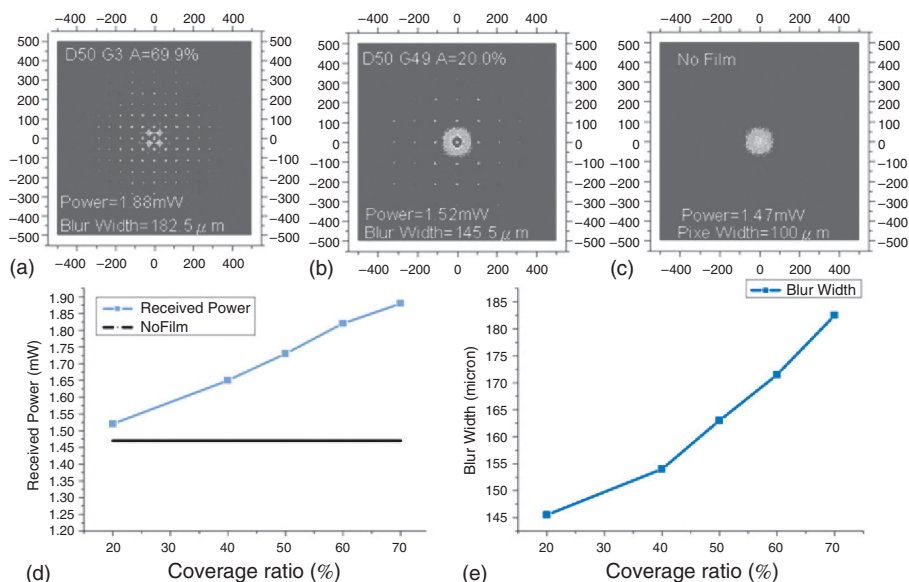


圖 2. 模擬覆蓋率對總能量增加與模糊寬度的影響。

② 實驗結果

如圖 3 所示，照片是用顯微鏡接上數位相機，固定光圈、快門與 ISO 值之下所拍攝的，覆蓋率由右至左漸增，增光比漸增，同時模糊寬度也漸增，其趨勢與模擬結果相符合。

(2) 高徑比的影響

① 模擬結果

如圖 4 所示上半部是模擬發光的圖案，由右至左的曲率半徑漸增 (高徑比越小)，下半部左圖可看出曲率半徑與能量呈反比，下半部右圖可看出曲率半徑與模糊寬度也呈反比，這表示高徑比對出光效率與模糊寬度都呈正比的關係。

② 實驗結果

如圖 5 所示，高徑比由右至左漸增，增光比漸增，同時模糊寬度也漸增，其趨勢與模擬結果相符合。

(3) 微透鏡直徑大小的影響

這個部分只進行模擬，從圖 6 的結果可知，上半部是模擬發光的圖案，由右至左的透鏡底部直徑漸小，下半左圖可看出透鏡底部直徑與能量呈反比，下半右圖可看出透鏡底部直徑與模糊寬度呈正比。換句話說，只要透鏡底部直徑變小，就同時可

以獲得高效率與良好的影像品質，這就是傳統上出光效率與影像品質兩難的解決之道。但是微結構不可能無限制地縮小，很小的微結構在製作與複製上會有困難，而且會引起繞射效應。

4. 全新微結構的排列方式

在此使用三個次畫素 (sub-pixel) 來代表全彩 OLED 中 RGB 三個次畫素。由圖 7 可看出上半部是傳統單一週期微結構的方式，下半部是所提出新的微結構排列方式：中空式排列，在發光畫素的正上方不要布置微結構，如此可使正向的光線直接透射出玻璃，而不會在透鏡的邊緣因入射角過大而造成全反射，所以這種全新的微結構會增加正向的效率。右半部是微結構安排的圖示，左半部是發光區域的模擬圖示，其中可以觀察到，單一週期微結構貼附的 OLED 影像畫質很差，而中空形式微結構貼附的 OLED 影像畫質所受影響大幅降低。

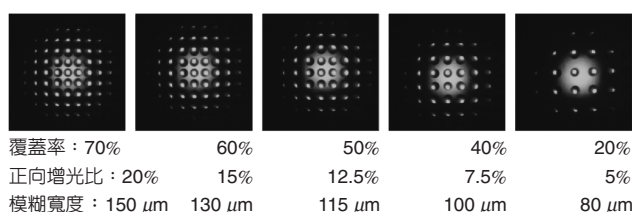


圖 3. 實驗上覆蓋率對於增光比與模糊寬度的影響 (微透鏡為正方排列，每個高約 5.1 mm)。

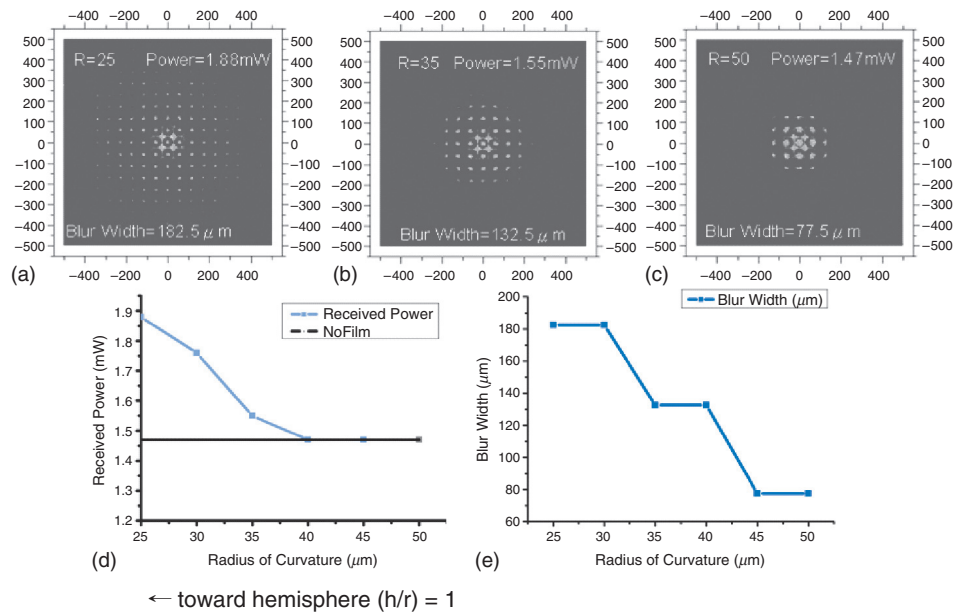


圖 4. 模擬曲率半徑對能量增加與模糊寬度的影響 (固定透鏡底部半徑)。

表 1. 模擬上相對總能量、相對亮度和模糊寬度對原始畫素、單一週期和中空形式的比較。

畫素大小 = 157 × 39	Power	Luminance	Blur-width (X)	Blur-width (Y)
Unit (μm)	Ratio	Ratio	Unit (μm)	Unit (μm)
原始畫素 覆蓋率 0%	1	1	×	×
單一週期 覆蓋率 54.5%	1.93	1.55	124	79
中空排列 覆蓋率 37.8%	1.79	1.63	24	9

從表 1 可以發現，這種中空排列微結構的方式可以有 79% 的能量增加與 63% 的正向增光比，正向亮度比值還大於傳統的單一週期微結構，只有在總能量比值上稍減，但是在影像畫質上則有大幅改進：X 方向的模糊寬度從 124 μm 降為 24 μm，Y 方向從 79 μm 降為 9 μm，也就是說，只會比本來的畫素多出數個 μm 的雜散光區域，在畫質上小小的犧牲卻可換來超過 60% 的效率提升⁽⁹⁾。

而實驗上正向亮度達到 120% 的增光比，如圖 8 所示，詳細的元件結構請參考文獻 10 與 11。而且單一像素的模糊寬度從單一週期微結構貼附 OLED 是大於 24 μm 變成為中空排列微結構貼附 OLED 是 15 μm，並且這種中空排列方式不會影響 OLED 顯示器視角的特性，從 0 至 70 度均維持超過原始畫素的亮度，如圖 9 所示。影像品質係數 (image quality index，計算方式出自參考文獻 12) 更只有從 1 稍降為 0.9445，反觀單一週期微結構貼附 OLED 則劇降為 0.7512，如圖 10 所示。

除此之外，在模擬上證明了這種中空的排列方式特別適合於小發光畫素，如顯示器方面的應用。如圖 11 所示，將一個 1000 μm × 1000 μm 的發光畫素切割成四等分 (也就是每個子畫素為 500 × 500 μm)、16 等分 (每個子畫素為 250 × 250 μm)、25 等

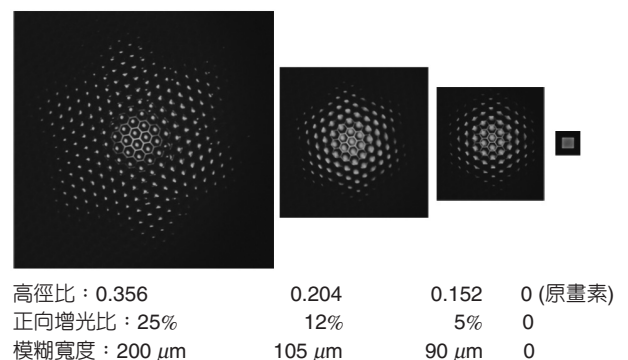


圖 5. 實驗上高徑比對於增光比與模糊寬度的影響 (微透鏡為六角排列，覆蓋率 90% / 畫素 88 × 96 μm)。

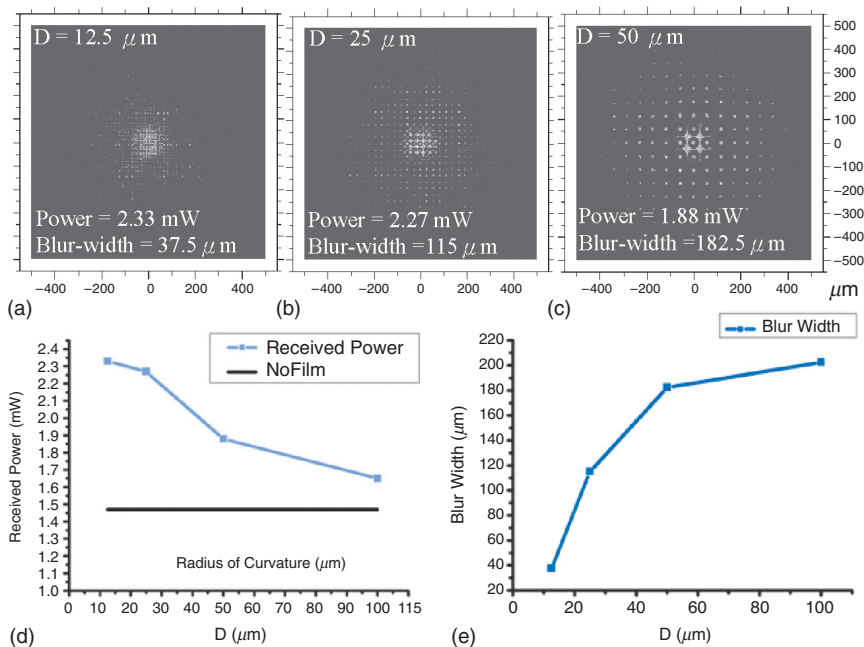


圖 6. 模擬結果：透鏡底部直徑對正向亮度增加比與模糊寬度的比較。上半為模擬照片(微透鏡為正方排列，高與半徑相同)。

分(每個子畫素為 $200 \times 200 \mu\text{m}$)與 100 等分(每個子畫素為 $100 \times 100 \mu\text{m}$ ，與一般手機面板子畫素大小相當)，我們發現在同等的總發光面積下，將畫素畫分得越小，中空排列微透鏡的方式會比本來無結構之大面積畫素有著更高亮度的比例增加；相反的，單一週期微結構形式看不出把畫素變小的優

勢。此外，無結構的畫素只要總面積一樣，正向發光強度均相同⁽¹³⁾。

四、結論

由本文所介紹的研究可以了解：微透鏡增光膜中微透鏡覆蓋率越高、高徑比趨近於 1，就會有良好的效率，然而此時會造成嚴重的影像品質衰減。只有將微透鏡的直徑縮小，才可以達到較好的結果，但是縮小透鏡會增加製程的困難度。由於直射玻璃面光線會在微透鏡邊緣造成全反射的實驗觀察，我們提出了創新的中空排列微透鏡的方式，這個方法比縮小透鏡底部的直徑能提升更高的效率，且影像品質更佳，是真正的雙贏之道！

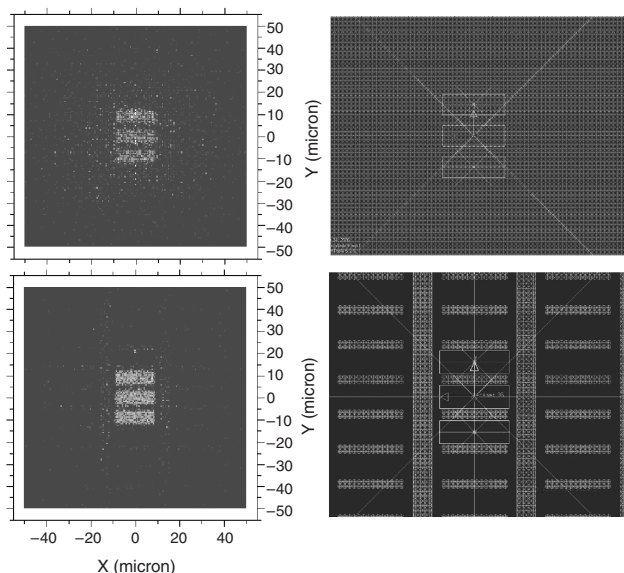


圖 7. 模擬結果：微結構排列方式(右半)與其發光圖案的比較。上半兩圖為單一週期，下半兩圖為中空排列的結果。

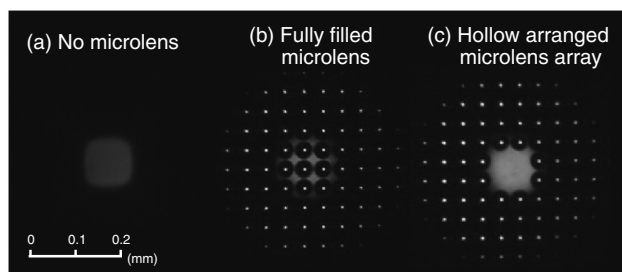


圖 8. 正向的亮度比例，(a) 原始：100%，(b) 單一週期：140%，(c) 中空排列：220%。

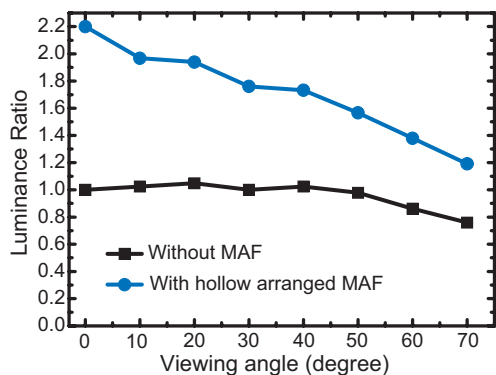


圖 9. 貼附中空排列微透鏡膜的 OLED 視角特性。

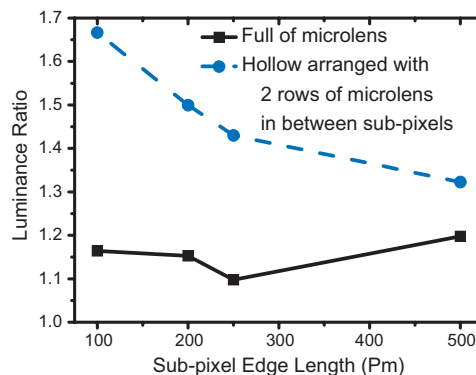


圖 11. 分割過後的小發光畫素與本來大面積無結構發光畫素的正向亮度比。

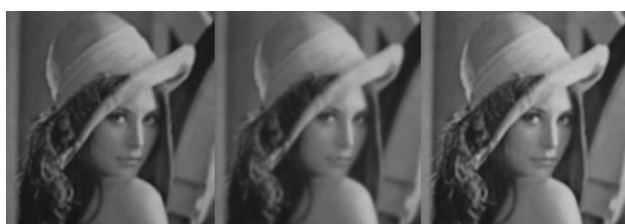


圖 10. 影像品質係數，(a) 原始：1，(b) 單一週期：0.7512，(c) 中空排列：0.9445。

參考文獻

1. M. H. Lu and J. C. Sturm, *Journal of Applied Physics*, **91**, 2, 595 (2002).
2. J. J. Shiang, T. J. Faircloth, and A. R. Duggal, *Journal of Applied Physics*, **95** (5), 2889 (2004).
3. S. Moller and S. R. Forrest, *Journal of Applied Physics*, **91** (5), 3324 (2002).
4. Y. R. Do, Y.-C. Kim, Y.-W. Song, and Y.-H. Lee, *Journal of Applied Physics*, **96** (12), 7629 (2004).
5. M.-K. Wei and I. L. Su, *Optics Express*, **12** (23), 5777 (2004).
6. H. C. Hsu, K. Y. Chen, H. Y. Lin, J. H. Lee, C. Y. Lin, and M. K. Wei, *SID/IDMC* (2006).
7. K.-Y. Chen, C.-C. Lin, J.-H. Lee, M.-K. Wei, and H.-Y. Lin, *MRS Fall Meeting*, D2.9 (2005).
8. Y.-H. Ho, K.-Y. Chen, J.-H. Lee, H.-Y. Lin, C.-C. Lin, and M.-K. Wei, *IEEE LEOS Annual Meeting* (2006).
9. C.-Y. Lin, S.-C. Hsu, K.-Y. Chen, H.-Y. Lin, J.-H. Lee, and M.-K. Wei, *SID Symposium Digest*, P-179 (2007).
10. Y.-H. Ho, K.-Y. Chen, H.-Y. Lin, J.-H. Lee, J.-H. Fang, and M.-K. Wei, *SID Symposium Digest*, 2022 (2008).
11. H. Y. Lin, Y. H. Ho, J. H. Lee, K. Y. Chen, J. H. Fang, S. C. Hsu, M. K. Wei, J. H. Tsai, and T. C. Wu, *Optics Express*, **16** (15), 11044 (2008).
12. Z. Wang and A. C. Bovik, *IEEE Signal Processing Letters*, **9** (3), 81 (2002).

13. K. Y. Chen, Y. T. Hsiao, H. Y. Lin, J. H. Lee, and M. K. Wei, *SID/IDRC* (2009).

- 陳冠宇先生為國立台灣大學光電工程學研究所博士班學生。
- 林晃巖先生為國立台灣大學電機工程博士，現任國立台灣大學光電工程學研究所暨電機工程學系副教授。
- 李君浩先生為國立台灣大學光電工程博士，現任國立台灣大學光電工程學研究所暨電機工程學系副教授。
- 魏茂國先生為德國埃爾藍根—紐倫堡大學材料工程博士，現任國立東華大學材料科學與工程研究所副教授兼系主任。
- Kuan-Yu Chen is a Ph.D. candidate in the Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics at National Taiwan University.
- Hoang-Yan Lin received his Ph.D. in electrical engineering from National Taiwan University. He is currently an associate professor in the Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics and Department of Electrical Engineering at National Taiwan University.
- Jiun-Haw Lee received his Ph.D. in electrical engineering from National Taiwan University. He is currently an associate professor in the Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics and Department of Electrical Engineering at National Taiwan University.
- Mao-Kuo Wei received his Ph.D. in materials engineering from the University of Erlangen-Nürnberg University, Germany. He is currently an associate professor in the Institute of Materials Science and Engineering at National Dong Hwa University.