

國立臺灣大學電機資訊學院光電工程學研究所



碩士論文

Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics
College of Electrical Engineering and Computer Science

National Taiwan University

Master Thesis

利用超穎介面及有機發光二極體達成裸眼式立體顯示
器之研究

An Autostereoscopic Display Based on Metasurface and
Organic Light-Emitting Diodes

陳冠妤

Guan-Yu Chen

指導教授：林晃巖 博士

Advisor: Hoang Yan Lin, Ph.D.

中華民國 108 年 7 月

July, 2019

誌謝



時光飛逝，轉眼間兩年的研究所生涯即將邁入尾聲，驀然回首總有釋懷的感覺，感謝讓我有所成長的一切。

此篇論文的完成承蒙許多人的支持以及鼓勵，首先，也是最主要感謝的是我的指導教授，林晃巖老師。在整個過程中他給了我很大的幫助，論文撰寫期間給予的教導與督促，並且從中學習到對於研究的執著與態度。在論文題目制定時幫我具體分析目標，經過老師的幫忙，讓我在寫作時有了方向，且寫作時思路清晰。

在論文口試期間內，感謝吳忠幟教授與蘇國棟教授所給予的寶貴意見與指正，讓此篇碩士論文更臻於完善，在此表示深摯的謝忱。在此十分感謝老師的細心指導，才能讓我順利完成畢業論文。

感謝兩年中陪伴在我身邊的同學、朋友，感謝他們為我提出的有益的建議，有了他們的支持、鼓勵和幫助，我才能充實的度過了兩年的學習生活，在我研究所生涯中添增了豐富的色彩。

最後，感謝默默支持與關心我的家人，讓我在求學過程當中無後顧之憂，忙碌之餘總是為我加油打氣，在此分享這份喜悅給所有的人，我是幸福的，因為有你們！！

陳冠妤 謹致

中華民國一〇八年七月

中文摘要



隨著科技的進步與顯示器性能的提升，立體顯示越來越普及化，追求與現實更相近與還原度更高的影像，以達到滿足人類的視覺需求。在 2013 年 David Fattal 等人提出以多指向性背光源來實現廣角裸眼顯示技術，LED 透過波導技術與液晶搭配，將圖像顯示在正確方向上。

而本篇論文中，以提出了 metasurface 結合 OLED 的模型，空間多工式將多個影像經由反射產生指向性，分成不同視角區域，以 FDTD 模擬電磁波的傳播過程，使用光學模擬軟體來調變不同參數，模擬分析 OLED 與高指向性 OLED 在不同週期的 metasurface 結構之遠場角度分佈、出光效率及發光頻譜。

本研究所要解決裸眼顯示技術中不同視角區域的光源指向性不足的問題，所以透過 DBR 共振元件結構的高指向性 OLED，使用陣列的點光源來模擬發光區，使下發光的部分透過底部有週期性的 metasurface 能有聚焦的效果，在此聚焦是指發散角大角度的部分強度下降。

在未來的研究中，不只可以改變 OLED 的膜層結構設計來增加出光指向性，也可以透過出元件後再經過光柵或是穿透式 metasurface 的結構，達到角度偏折的部分外，還能使光的指向性更進一步的提升，crosstalk 得以改善，來達到裸眼立體顯示中更好的影像品質。

關鍵字：裸眼立體顯示技術、超穎介面、高指向性有機發光二極體

ABSTRACT



With the advancement of technology and the improvement of display performance, stereoscopic display has become more and more popular, and pursuit of more realistic images with higher image quality to meet the visual needs of human beings.

In 2013, David Fattal proposed a multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display, LED through waveguide technology with the liquid crystal, the image is displayed in the correct direction.

In this paper, the model of metasurface combined with OLED is proposed. The spatial multiplexing method will generate directionality with multiple images via reflection, and divide into different viewing regions to simulate the propagation process of electromagnetic waves by FDTD, and use optical simulation software to modulate different parameters are used to simulate the far-field intensity distribution, light-emitting efficiency and luminescence spectrum, of OLED and high-directional OLED, in different periods of metasurface structure.

In this research, the problem of the lack of directionality of the light source in different viewing angle areas in the naked eye display technology is solved. Therefore, the high-directionality OLED through the DBR resonant structure is used to simulate the light-emitting area by using the point light source array, so that the lower light-emitting portion has periodicity through the bottom the metasurface can have a focusing effect, where focusing refers to a partial intensity drop at a large angle of divergence.

In future research, not only can the OLED film structure design be changed to increase the light directivity, but also through the structure of the grating or the transmissive metasurface to achieve the angle deflection, the directionality of light is further improved, and crosstalk can be improved to achieve better image quality in naked-eye stereoscopic display.

Keywords: Autostereoscopic, Metasurface, High-directional OLED

目 錄



誌謝	I
中文摘要	II
ABSTRACT	III
目 錄	IV
圖目錄	VI
表目錄	X
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 立體視覺成像原理	2
1.2.1 心理深度因子	2
1.2.2 生理視深因子	3
1.3 顯示器的分類與發展	5
1.3.1 穿戴式立體顯示器	6
1.3.2 裸眼式立體顯示器	8
1.4 研究動機與目的	13
1.5 本文架構	15
第二章 設計原理與模擬架構	16
2.1 有機發光二極體之簡介	16
2.2 超穎介面介紹	18
2.2.1 廣義的司乃爾定律	18
2.2.2 超穎介面之相位變化	19
2.2.3 週期性超穎介面之介紹	21
2.3 模擬軟體	24
2.3.1 RSOF TM 模擬設定	24
2.3.2 時域有限差分法	24
2.3.3 空間格點參數	25
2.3.4 入射場設定	27
2.4 結構設計與分析	28

2.4.1 OLED 結構	28
2.4.2 超穎介面結構	29
2.5 驗證模擬方法	31
2.5.1 OLED 場型驗證	31
2.5.2 超穎介面在單一光源在中心位置驗證模擬	32
第三章 研究結果與討論	34
3.1 模擬 OLED 實驗結果與分析	34
3.1.1 OLED 模擬結果分析	34
3.1.2 高指向性 OLED 實驗結果分析	37
3.2 不同週期超穎介面之結果與分析	40
3.2.1 超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 之遠場角度分佈	40
3.2.2 超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 之遠場角度分佈	44
3.3 不同週期的超穎介面結構對出光效率之影響	48
3.3.1 超穎介面結構之出光效率	48
3.3.2 超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 之出光效率	49
3.3.3 超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 之出光效率	50
3.4 不同週期的超穎介面結構對發光頻譜之影響	51
3.4.1 超穎介面結構之發光頻譜	51
3.4.2 超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 之頻譜	53
3.4.3 超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 之頻譜	57
第四章 結論與未來展望	60
4.1 結論	60
4.2 未來展望	61
附錄	62
文獻參考	69

圖目錄



圖 1-1 心理視深因子(a)由近至遠線性延伸 (b)遮蔽 (c)陰影 (d)細節[2].....	2
圖 1-2 生理視深因子[1]	4
圖 1-3 立體顯示系統分類.....	5
圖 1-4 彩色眼鏡原理示意圖[6]	6
圖 1-5 偏振光眼鏡示意圖[5]	6
圖 1-6 快門眼鏡原理示意圖[8]	7
圖 1-7 頭戴顯示器示意圖[9]	8
圖 1-8 電子全像系統示意圖[13]	9
圖 1-9 以雷射光源掃描快速旋轉散色屏幕之體積式立體顯示器[12]	9
圖 1-10 (a)多平面式立體顯示器原理示意圖 (b)前景與後景的平面影像影像曾經 過顏色深淺調整，使其疊合後有不同層次的景深產生立體畫面。[15]	10
圖 1-11 視差屏障型立體顯示原理示意圖[9]	11
圖 1-12 柱狀透鏡陣列立體顯示原理示意圖[9]	11
圖 1-13 (a)基於繞射光學之指向性背光源示意圖(b)指向性光源在外部使用液晶 進行調製(c)在玻璃或塑料光導基板的表面上蝕刻或沉積特殊光柵圖案(d)惠 普實驗室開發裸視且廣角的 3D 顯示技術[12].....	12
圖 1-14 反射式元件示意圖(a)單一影像對應多視角(b)多影像對應多視角	14
圖 1-15 多影像對應多視角之反射式元件示意圖(a)下發光結構(b)上發光結構. 14	
圖 1-16 多影像對應多視角之穿透式元件示意圖(a)下發光結構(b)上發光結構. 14	
圖 2-1 OLED (a)上發光式有機發光二極體 (b)下發光式有機發光二極體[29] ...	16
圖 2-2 OLED 示意圖(a)下發光型(b)上發光型(c)透明元件	17
圖 2-3 (a) 介面上有相位差的折射示意圖(b)介面上有相位差的反射示意圖	18
圖 2-4 超穎介面之相位變化分類(a)旋轉(b)形狀(c)填充因子[25].....	19
圖 2-5 超穎介面焦距與位置參數示意圖	20
圖 2-6 當波長 $\lambda d = 532 \text{ nm}$ 與焦距 $f = 1000 \text{ nm}$ 時，(a)相位分佈(b)包裹相位 圖	20
圖 2-7 (a)結構單元的填充因子(b)每個填充因子所對應的相位示意圖	20

圖 2-8 (a)每個填充因子所對應的相位示意圖(b)超穎介面不同位置上的相位分佈 (c)超穎介面位置對上填充因子之示意圖	21
圖 2-9 超穎介面結構示意圖	21
圖 2-10 (a)拋物面鏡元件的聚光(b)超穎介面之聚焦	22
圖 2-11 (a)點光源在中心位置經過超穎介面反射示意圖(b)多個點光源經過超穎 介面反射示意圖	22
圖 2-12 (a)超穎介面視為一個大拋物面鏡示意圖(b) $T = 1.5 \mu\text{m}$ 週期性超穎介面 示意圖(c) $T = 0.9 \mu\text{m}$ 週期性超穎介面示意圖	23
圖 2-13 週期性超穎介面透過局部的作用讓出光的指向性提升示意圖	23
圖 2-14 空間中 x, y, z 三個方向的網格切割法	24
圖 2-15 Grid PPW	26
圖 2-16 局部材料折射率圖	26
圖 2-17 (a)非均勻的網格切割(b)均勻的網格切割	27
圖 2-18 在 OLED 發光層中 $+x$ 方向上光源之位置	27
圖 2-19 (a)OLED 結構 (b)增強指向性 OLED 結構	28
圖 2-20 不同 OLED 之頻譜	29
圖 2-21 Analytical EM wave model 模擬場型結果	31
圖 2-22 RSOF TM 模擬場型結果	31
圖 2-23 Device #ref 1 與 Device # 1 到#5 在平坦層厚度 800 nm 之遠場強度(a)角 度分佈(b)極座標	32
圖 2-24 Device #ref 2 與 Device # 6 到#10 在平坦層厚度 800 nm 之遠場強度(a)角 度分佈(b)極座標	33
圖 3-1 (a)平坦層厚度對 OLED 的影響。超穎介面焦距為(b) $f = 500 \text{ nm}$ (c) $f =$ 800 nm (d) $f = 1000 \text{ nm}$ (e) $f = 1500 \text{ nm}$ (f) $f = 2000 \text{ nm}$ 不同超穎結構在 OLED 中，平坦層厚度對出光遠場角度分佈的影響	37
圖 3-2 (a)平坦層厚度對高指向性 OLED 的影響。超穎介面焦距為(b) $f = 500 \text{ nm}$ (c) $f = 800 \text{ nm}$ (d) $f = 1000 \text{ nm}$ (e) $f = 1500 \text{ nm}$ (f) $f = 2000 \text{ nm}$ 不同超穎結 構在高指向性 OLED 中，平坦層厚度對出光遠場角度分佈的影響	39
圖 3-3 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 在 OLED 不同平坦層厚度對出光	

遠場角度分佈的影響(a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$	42
圖 3-4 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 在高指向性 OLED 不同平坦層厚度對出光遠場角度分佈的影響(a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$	44
圖 3-5 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 在 OLED 不同平坦層厚度之遠場角度分佈(a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$	46
圖 3-6 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 在高指向性 OLED 不同平坦層厚度之遠場角度分佈(a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$	47
圖 3-7 不同焦距的超穎介面在 OLED 不同平坦層厚度之頻譜(a)沒有超穎介面(b) $f = 500 \text{ nm}$ (c) $f = 800 \text{ nm}$ (d) $f = 1000 \text{ nm}$ (e) $f = 1500 \text{ nm}$ (f) $f = 2000 \text{ nm}$	52
圖 3-8 不同焦距的超穎介面在高指向性 OLED 不同平坦層厚度之頻譜(a)沒有超穎介面(b) $f = 500 \text{ nm}$ (c) $f = 800 \text{ nm}$ (d) $f = 1000 \text{ nm}$ (e) $f = 1500 \text{ nm}$ (f) $f = 2000 \text{ nm}$	53
圖 3-9 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 在 OLED 不同平坦層厚度之頻譜(a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$	55
圖 3-10 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 在高指向性 OLED 不同平坦層厚度之頻譜(a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$	56
圖 3-11 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 在 OLED 不同平坦層厚度之頻譜(a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$	58
圖 3-12 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 在高指向性 OLED 不同平坦層厚度之頻譜(a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$	59
圖 4-1 高指向性 OLED 部分的上發光示意圖	60

圖 4-2 在元件上方設計結構示意圖(a)Grating 實現偏折(b)穿透式 metasurface 實現聚焦提升指向性與偏折	61
附錄-圖 1 參數示意圖(a)雙重影像(b)單一影像[31]	62
附錄-圖 2 (a) LED 准直後的 64 個影像光源 (b)沿(a)水平軸的虛線橫截面，每個影像光的強度[11]	63
附錄-圖 3 人眼間距約為 6.3 cm 與影像所間格 $\Delta\theta$ 示意圖	64
附錄-圖 4 一維 8 個視域數之遠場角度分佈(a)出光角度與強度(b)極座標	65
附錄-圖 5 一維 4 個視域數遠場角度分佈(a)出光角度與強度(b)極座標	65
附錄-圖 6 一維 2 個視域數遠場角度分佈(a)出光角度與強度(b)極座標	66
附錄-圖 7 高斯光束遠場分佈與 Device#7''之場型比較	67
附錄-圖 8 模擬 Device #7''之一維 2 個視域數遠場角度分佈(a)出光角度與強度 (b)極座標	68
附錄-圖 9 高斯光束遠場分佈與 Device #7'' 一維 2 個視域數遠場角度分佈比較	68

表目錄

表 2-1 超穎介面結構參數表	30
表 3-1 不同焦距的超穎介面在(a) OLED 結構與(b) 增強指向性 OLED 結構在不 同平坦層厚度之出光效率比較表	48
表 3-2 不同焦距的超穎介面週期結構為 1.5 μm 的(a) OLED 結構與(b) 增強指向 性 OLED 結構在不同平坦層厚度之出光效率比較表	49
表 3-3 不同焦距的超穎介面週期結構 0.9 μm 的(a) OLED 結構與(b) 增強指向性 OLED 結構在不同平坦層厚度之出光效率比較表	50
附錄-表 1 不同影像數系統規格評估	64

第一章 緒論



1.1 研究背景

隨著科技的進步，不斷提升顯示器之性能，追求還原度與解析度更高的影像品質，以達到滿足人類的視覺需求。從傳統的黑白電視到彩色電視，顯示器的發展也從早期耗電且較佔空間的陰極射線管（CRT：Cathode Ray Tube），到現代輕薄低功耗的液晶顯示器（LCD：Liquid-Crystal Display）、電漿顯示器（PDP：Plasma Display Panel）以及發光二極體顯示器（OLED：Organic Light-Emitting Diode）等。

科技的日新月異，顯示器也從二維顯示發展到三維顯示技術，左右眼分接收到適當視差的影像，就能產生立體的空間感受，追求更自然真實的視覺體驗，3D 顯示技術擁有廣大的市場前景與帶給人們更好的視覺享受。除了在娛樂、教育、藝術、醫療、軍事等各領域，都在發揮其更大的價值。有朝一日 3D 立體顯示器會普及至每個人的生活中，像是 3D 電視或是手機有立體顯示功能，使得社會大眾更能深刻體驗到更真實的內容與身歷其境的感覺。



1.2 立體視覺成像原理

深度知覺(Depth Perception)是指觀察者在觀看物體時，是否有遠近深度之立體視覺效果，要讓 2D 圖像看起來具有深度，透過心理深度因子來產生深度知覺[1]，藉由大腦認知辨識物體的深度，觀賞者在觀看物體時，因心理層面產生立體感。或由 3D 顯示器建立符合生理視深因子之條件，因人類雙眼相距約為 5.0 cm ~ 7.0 cm，所以兩眼視網膜所接收到的影像資訊因為視角差異而有些微不同，再經由大腦融合兩個不同視角影像，即可產生立體視覺的感受。

1.2.1 心理深度因子

(1) 由近至遠線性延伸(Linear perspective)

像是兩條平行鐵軌像遠方延伸，會讓人產生有匯聚到一點的視覺感，具有深度的感覺。

(2) 遮蔽(Occlusion)

靠近觀察者的物體，會將後方的物體擋住，被擋住的物體會有較遠的感覺，讓人產生具有遠近的深度感。

(3) 陰影(Shading)

光與影，因為光線照射空間中的物體，在物體背後就有陰影的產生。固陰影會給人一種物體是立體的感覺。

(4) 細節(Texture Gradient)

用表面深淺，亮與暗的明暗對比度，讓觀察者感受到立體感。

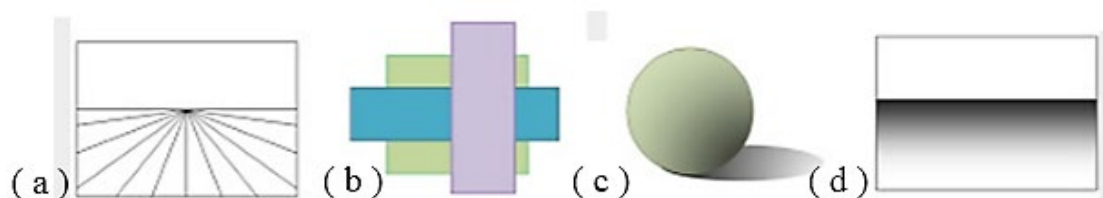


圖 1-1 心理視深因子(a)由近至遠線性延伸 (b)遮蔽 (c)陰影 (d)細節[2]



1.2.2 生理視深因子

利用心理深度因子中的任何一種，都可以讓觀察者在觀看物體時產生立體視覺效果，若要讓影像顯示裝置能夠產生立體視覺效果，便可以藉助生理視深因子，使得左眼與右眼接收到的影像，因為視角差異而形成立體視覺效果。

(1) 調節(Accommodation)

藉由調節力，使得水晶體的形狀與厚度改變，產生不同的焦距。當注視遠處物體時，睫狀肌是放鬆的，水晶體厚度較薄；當要看清近處物體時，眼睛做近距離調節，睫狀肌收縮使水晶體增厚，縮短焦距，使原先成像在視網膜之後的焦點前移到視網膜上。所以透過調節作用，調整眼睛焦距，就可以感受到遠近的深度。

(2) 輻輳(Vergence)

輻輳是指兩眼同時注視正前方物體時，所做的異向運動，像是看近物時，雙眼會同時向內轉聚焦在物體上，稱為集合(Cconvergence)；反之，如果看遠方物體時，雙眼因要對焦在物體上而同時向外轉，稱為散開(Divergence)。所以雙眼視線對物體的角度，會因為物體的遠近而改變。

(3) 移動視差(Motion parallax)

像是搭火車時看到近處的電線杆與遠處的高山，物體相對的移動速度不同，因為觀看者的移動而讓視角產生變化，觀看角度改變，使得觀看到的影像內容也有不同。

(4) 雙眼視差(Binocular disparity, Stereo)

因人類雙眼相距約為 5.0 cm ~ 7.0 cm，兩眼視角的不同，所以雙眼接收到的影像略有差異，並且兩影像會經由大腦結合成為有深度的影像。

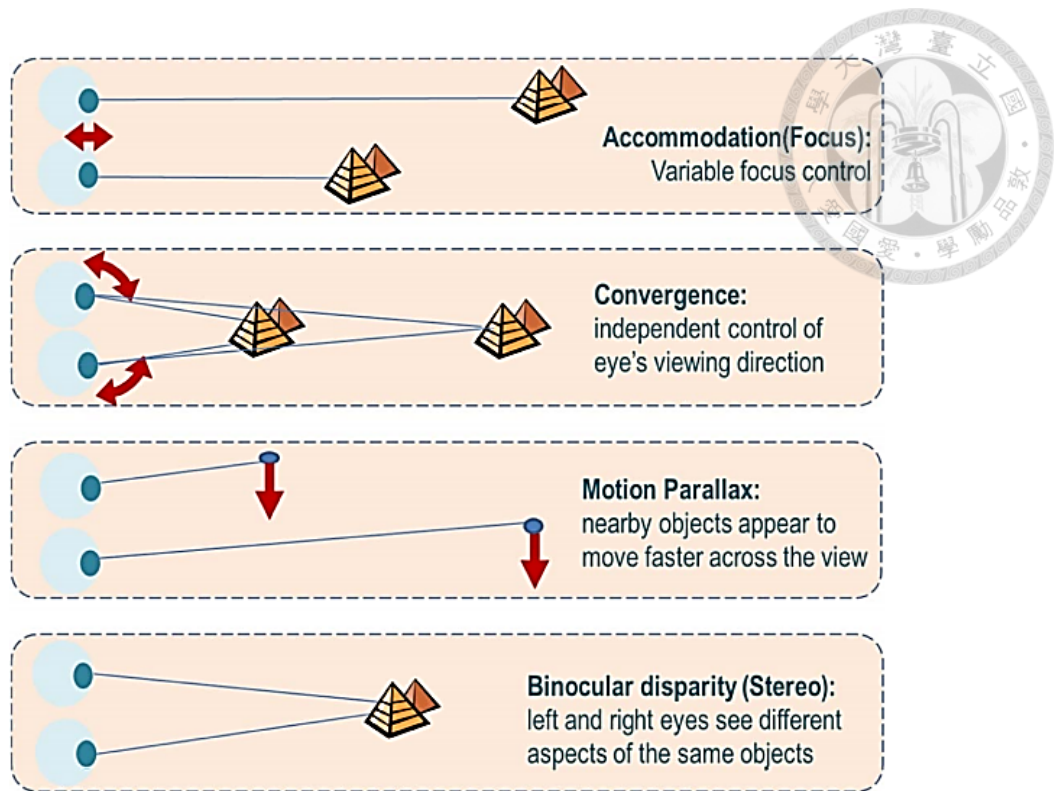


圖 1-2 生理視深因子[1]



1.3 顯示器的分類與發展

利用雙眼視差立體顯示技術原理，基於人的眼睛立體視覺中的水平雙眼視差，透過光學原件將左、右眼的圖像分開，使得左、右眼接收到對應的圖像，大腦就會呈現出具深度感的立體影像。

依照是否配戴裝置配件於頭部與否，而區分成穿戴式 3D 眼鏡 (Stereo 3D with glasses) 與裸式 3D (Naked 3D without glasses) 兩大類。穿戴式立體顯示，需要觀察者配戴眼鏡等穿戴裝備，主要技術有彩色眼鏡 (Anaglyph)、偏振光眼鏡 (Polarization Glasses)、快門眼鏡 (Shutter Glasses)、頭戴顯示器 (Head Mount Displays; HMD) 等；裸眼立體顯示根據使用的結構分光方式可以分為全像式、體積式、多層平面式、視差屏障型、柱狀透鏡陣列與指向性光源式，以下分別介紹。

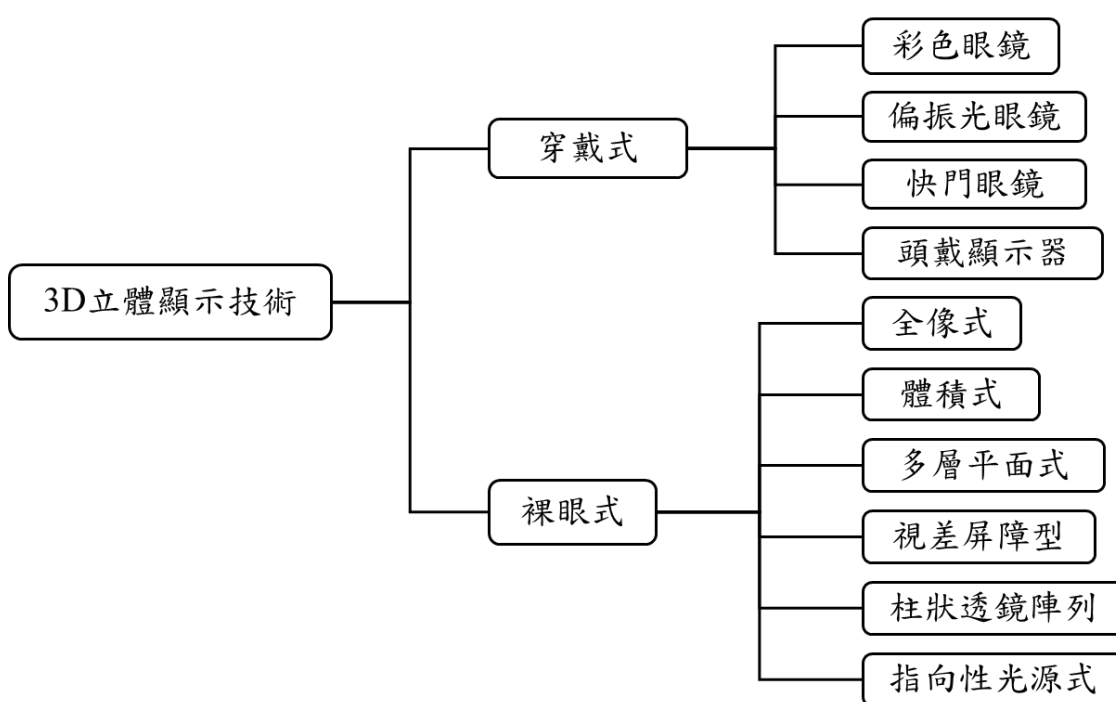


圖 1-3 立體顯示系統分類



1.3.1 穿戴式立體顯示器

1. 彩色眼鏡(Anaglyph)

此技術是利用互補的兩種顏色，通常是紅色、綠色式鏡片或紅色、藍色式鏡片，成像原理如圖 1-4，因為觀察者配戴紅綠眼鏡，左、右眼的鏡片各自濾出不同顏色的影像，所以雙眼就會接收到不同顏色所對應的左、右眼影像。

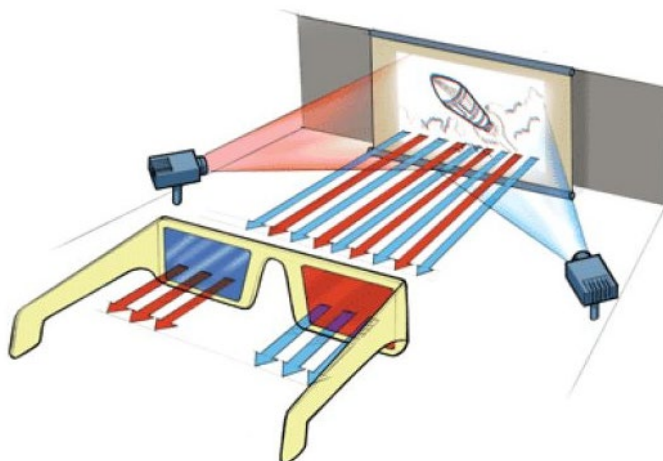


圖 1-4 彩色眼鏡原理示意圖[6]

2. 偏振光眼鏡(Polarization Glasses)

使用兩部投影機將左、右眼對應之影像以不同偏振光投影到螢幕上，觀眾戴上相對應的偏振光鏡片，因為左、右眼鏡片的偏振方向為正交，所以雙眼會分別接收到不同偏振光的影像，而在腦中融合成立體影像，如圖 1-5 所示。

目前電影院之 3D 電影大多採用此技術放映，除了亮度會降低之外，較無色彩上之問題。



圖 1-5 偏振光眼鏡示意圖[5]



3. 快門眼鏡(Shutter Glasses)

藉由快門眼鏡快速切換、遮蔽左右眼，當播放右眼影像時，快門會遮住左眼，只讓右眼接收右眼影像；反之，當播放左眼影像時，快門會遮住右眼，讓只讓左眼接收左眼影像，使左右眼各自看到正確的左右眼畫面，在大腦內呈現出具深度感的立體影像。

快門眼鏡是透過電路對液晶眼鏡開、關的控制，通電可以控制眼鏡鏡片全黑，以遮住一眼圖像。液晶通電不透光的原理，加上切換開關的速度要與左、右眼對應之影像交錯變換的速度完美搭配，如此一來，可得到立體效果較好且解析度較高的 3D 畫面。

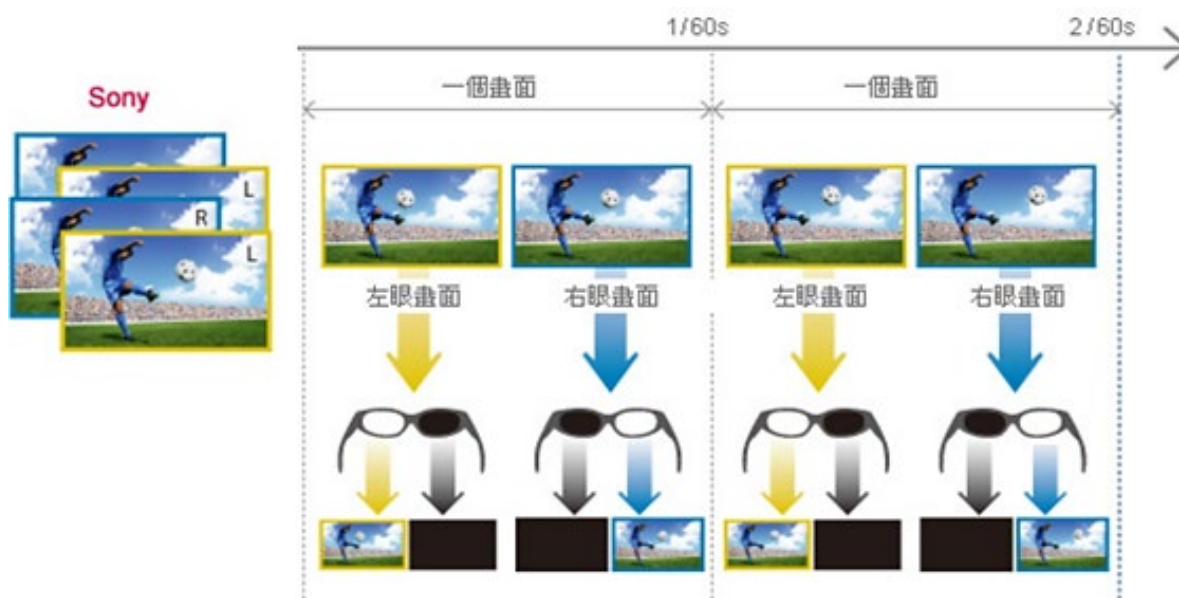


圖 1-6 快門眼鏡原理示意圖[8]

4. 頭戴顯示器(Head Mount Displays ; HMD)

頭戴顯示器目前大多用於現今熱門的虛擬實境(Virtual Reality，縮寫 VR)，如下圖 1-7，兩眼前方各有一塊小型的螢幕來作顯示，雙眼所見不同之影像，形成完整的立體視覺感受。



圖 1-7 頭戴顯示器示意圖[9]

綜合以上穿戴式立體顯示技術，分析其優缺點，彩色眼鏡會因為濾掉一些顏色，而造成只能看到較單一色調的畫面，觀看舒適感較差。偏振光眼鏡使用了偏振技術，所以顯示的畫面亮度會下降 50%，當如果頭部有偏斜時，偏光眼鏡會無法濾掉另一個方向的影像，造成兩眼視差影像之間的串擾，觀賞者可能會有頭暈的狀況。快門眼鏡雖然解析度較高，但如果眼鏡開關切換頻率與影像變換頻率不同步時，會有閃爍的畫面，會影響立體觀看的效果。頭戴顯示器只能個人使用，目前設備的重量會造成頭部負擔且單價較高。

1.3.2 裸眼式立體顯示器

裸眼式立體顯示器，雖然其立體顯示的效果目前比不上頭戴式的立體顯示器，但是可免於穿戴設備所造成的不便外，還可以提供給多人同時觀賞。以下針對裸眼式立體顯示系統各別做介紹。

1. 全像式(Holographic)

全像術是由光學干涉所造成的一種立體視覺效果，一個同調的參考光波和所要記錄的物光波混合以產生干涉圖案，把這干涉圖案記錄完成之後，再以相同的參考光照射全像片時，將可過濾出在底片上所記載的物體資料，即重建物體原來的光場資訊，已呈現立體影像之效果。

為了做為顯示器，可以用電子元件取代傳統的全像底片，像是電子全像術系統[13]，是由聲光調製器晶體(Acoustic Optical Modulator, AOM)、垂直掃描鏡(Vertical Scanning mirror)與多面鏡(Polygonal mirror)，所組成，如下圖 1-8 所

示，利用紅色、綠色與藍色雷射光源各自經過調變器產生相位型光柵，再經過全像片合併之後，以垂直掃描鏡及多面鏡進行垂直及水平的掃描，使立體影像呈現出來。[1]

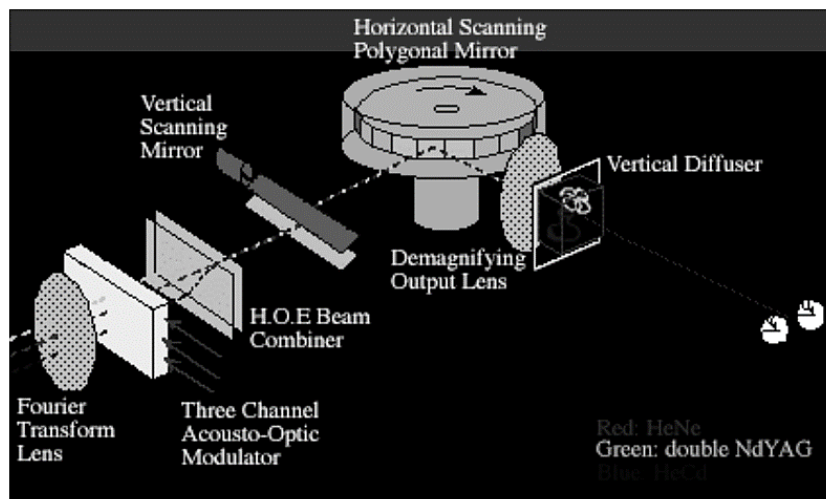


圖 1-8 電子全像系統示意圖[13]

2. 體積式(Volumetric)

體積式則是由德州儀器(Texas Instruments, TI)所開發的雷射 3D 投影技術，以雷射光照射在一個高速旋轉盤上的散射現象，於一個玻璃密閉空間內顯示立體物件，越靠近軸心處影像品質較低，因為是在空間中建立畫素點所組成立體影像。[15]

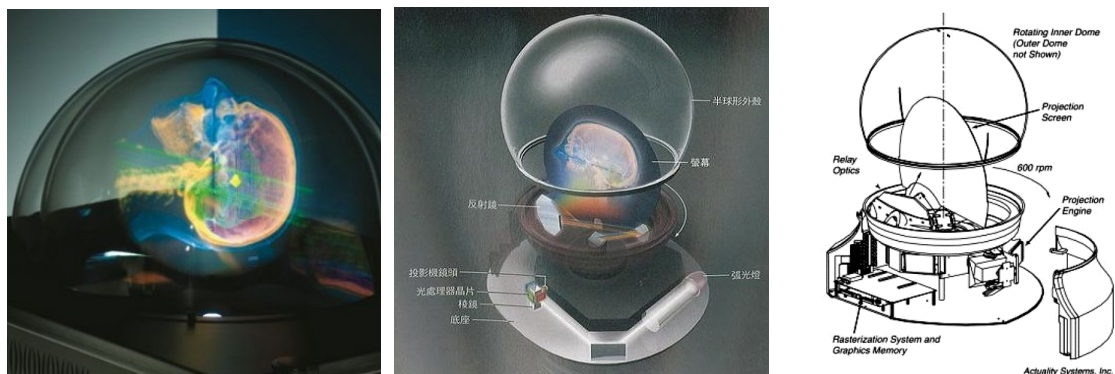


圖 1-9 以雷射光源掃描快速旋轉散色屏幕之體積式立體顯示器[12]



3. 多平面式

多平面式立體顯示技術[16]，是在兩個重疊的液晶面板顯示前景與後景影像，觀賞者感受到影像顏色的差別，因為前景與後景 2D 影像重疊的平均顏色而製造出 3D 影像立體感的效果。

前後面板的對位技術必須十分精準，且對於觀賞角度有較高要求，只有在正視方向的觀賞位置，才會有較佳的立體效果。

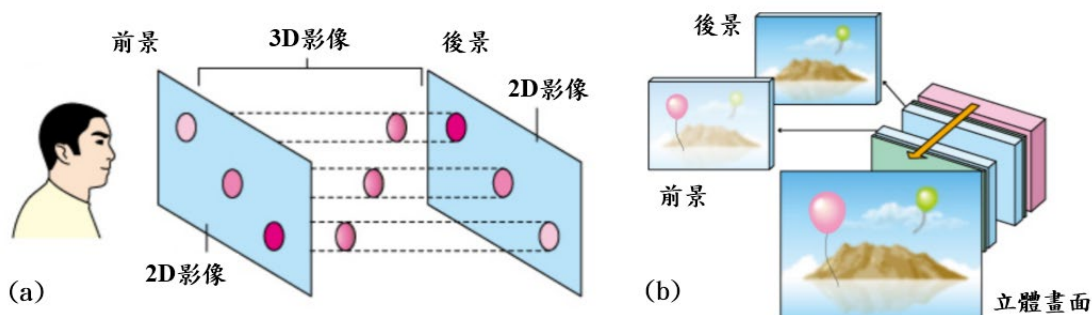


圖 1-10 (a)多平面式立體顯示器原理示意圖 (b)前景與後景的平面影像影像會經過顏色深淺調整，使其疊合後有不同層次的景深產生立體畫面。[15]

空間多工式主要原理為透過在同一個畫面、以畫素交錯的方式，同時顯示左右眼的影像，然後用以下三種技術來達到控制光線，使雙眼分別看到不同的畫素。

4. 視差屏障型(Parallax Barrier)

視差屏障型為遮擋式，利用交錯排列的左眼影像與右眼影像，經過透光與不透光相間的光柵條紋，利用頻障的遮蔽來限制出光的影像，使得左眼和右眼接收到對應的影像，產生視差效果，從而在觀察者大腦中形成立體的顯示畫面

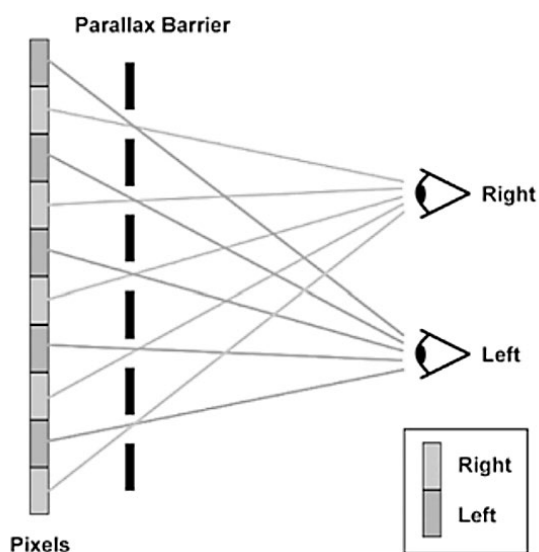


圖 1-11 視差屏障型立體顯示原理示意圖[9]

5. 柱狀透鏡陣列(Lenticular Lens Array)

柱狀透鏡陣列為折射式，如圖 1-12 柱狀透鏡陣列立體顯示原理示意圖[10]所示，原理為在影像前放上對應柱狀透鏡陣列，使影像透過透鏡折射而改變行進的方向，以不同的方向投影每個子像素。於是雙眼從不同的角度觀看顯示屏，就看到不同的子像素，分離成雙眼視差的影像，左眼影像對應左眼，右眼影像對應右眼。

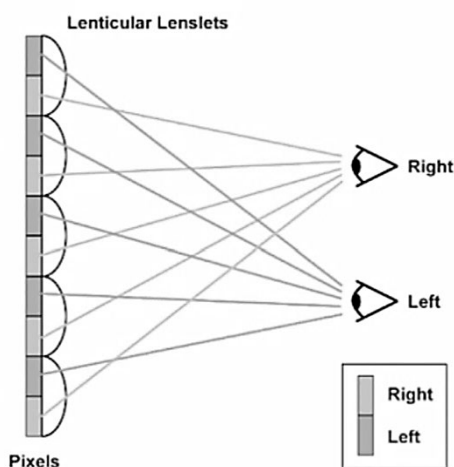


圖 1-12 柱狀透鏡陣列立體顯示原理示意圖[9]



視差屏障型與柱狀透鏡陣列兩者技術的差異是在亮度的部分。採用視差屏障型，會因為把相當多的光線檔掉，所以讓螢幕的亮度降低。如果採用柱狀透鏡陣列的技術，是改變光線的方向，所以亮度不會差太多。

6. 指向性光源式(Directional Backlight)

指向背光源(Directional Backlight)技術是分時多工技術之一。以一組指向性背光板搭配快速反應面板，快速切換顯示對應影像讓使用者觀看形成 3D 影像。在不減低光源與亮度下，達到範圍內裸眼 3D 的顯示效果。

在玻璃或塑料光導基板的表面上蝕刻或沉積特殊光柵圖案，使用 LED 光源經過準直後的 TE 波入射到基板內，以 θ_{in} 在基板內進行全反射，指光性的光藉由對應的微結構散射出基板，圖 1-13 (c)，散射光的方向由繞射角度決定，而繞射角度由微結構的週期決定，外部再使用液晶進行調製後，使觀看者的左眼和右眼分別接收不同的圖像，指向背光源實現裸式 3D 技術。[11]

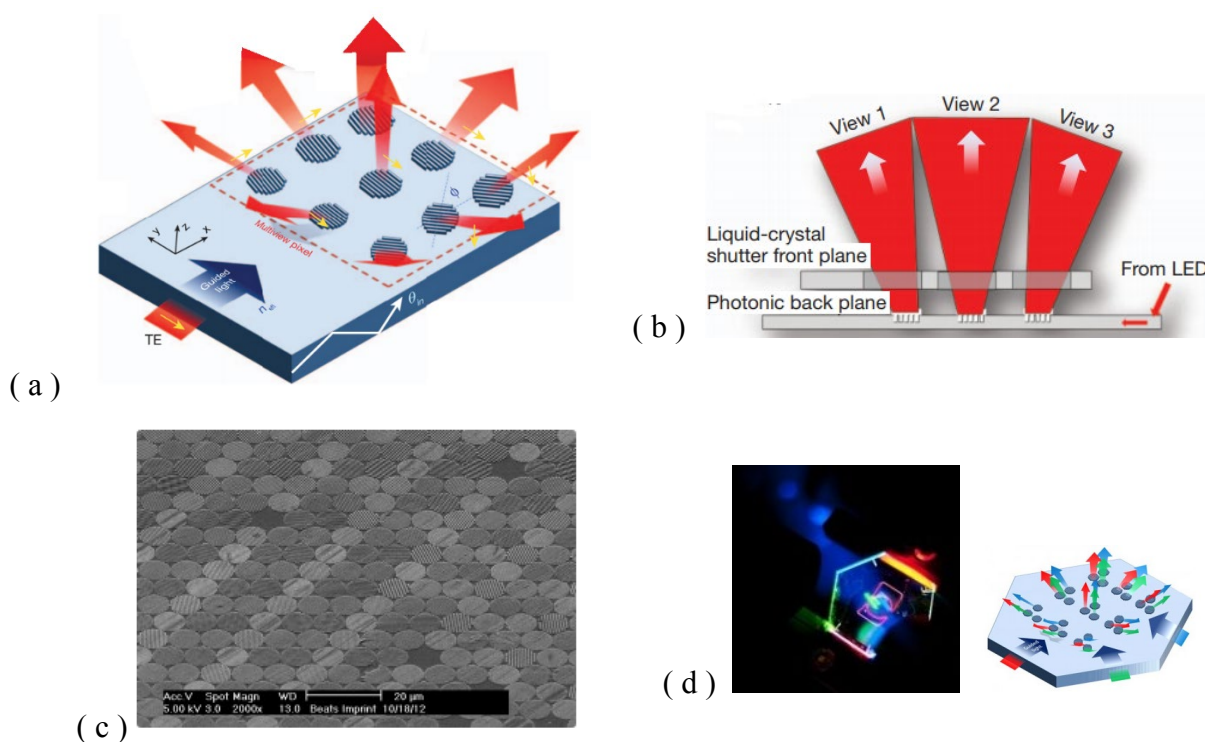


圖 1-13 (a)基於繞射光學之指向性背光源示意圖(b)指向性光源在外部使用液晶進行調製
(c)在玻璃或塑料光導基板的表面上蝕刻或沉積特殊光柵圖案(d)惠普實驗室開發裸視且廣角的 3D 顯示技術[12]



1.4 研究動機與目的

三維立體顯示技術為人類帶來新的視覺享受，其臨場感與真實感是在一般二維顯示影像中無法體會的。隨著三維顯示系統的技術成熟，我們將使用 HP Lab 在 2013 論文《A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display》[11]中，提出指向性背光源用於裸眼立體顯示技術作為研究與發想的方向。

如下圖 1-14 為反射式元件示意圖，(a)為時間多工之單一影像對應多視角，以交替左、右眼影像投射且快速切換影像，觀察者因視覺暫留使影像在腦中結合成立體影像。(b)為空間多工式將同多個影像經由反射產生指向性，分成不同視角區域，同時顯示左右眼的影像，但會因左、右眼的角度不同而形成立體影像對，以達到立體效果。

而本研究的出發點為圖 1-14 (b)，又可分為圖 1-15 與圖 1-16 之概念，分為反射式與穿透式元件，由於我們想要將增加指向性的結構，結合 OLED，固採用穿透式 OLED，使光經由內部結構反射後，出光具有指向性，如圖 1-15 (a)，能作為裸眼立體顯示之光源。

透過吳忠幟教授實驗室的研究，對於用 OLED 作為光源的結構已做好參數設計，這是與參考文獻中相異之處，而使光反射後具有指向性的內部結構為超穎介面，目前的文獻中也鮮少將 OLED 的光源作用於超穎介面上，在本文的第四章也會對此提出結論與未來展望。

本文章會找出參數的最佳化數值，會與沒有內部結構的元件作比較，且分析不同數值對結果的影響，並探討差異性，以持續追求的目標是更接近真實世界的立體的效果。

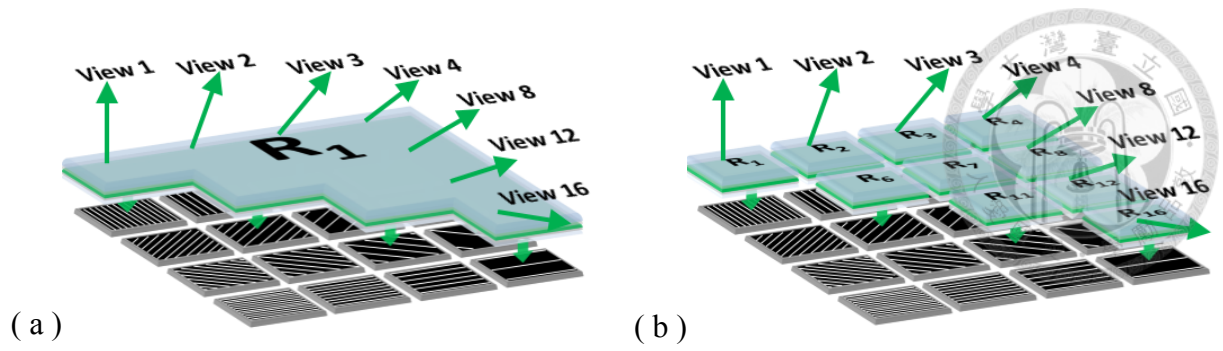


圖 1-14 反射式元件示意圖(a)單一影像對應多視角(b)多影像對應多視角

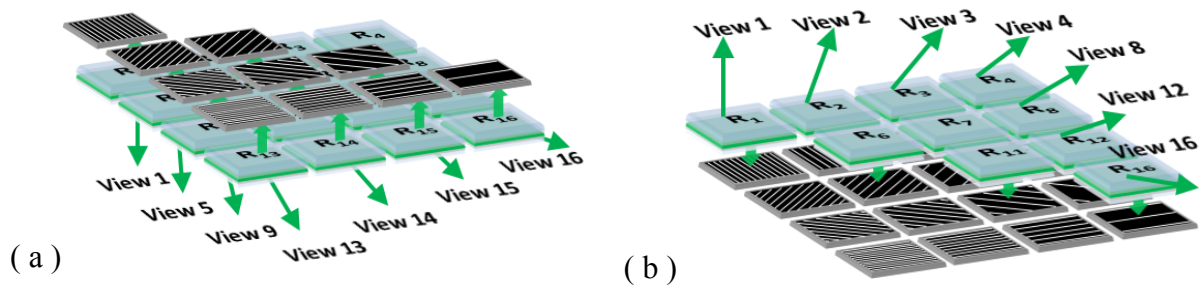


圖 1-15 多影像對應多視角之反射式元件示意圖(a)下發光結構(b)上發光結構

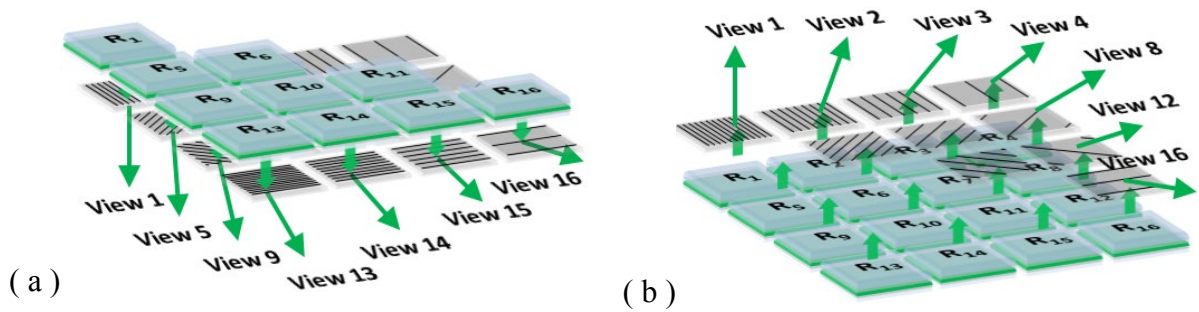


圖 1-16 多影像對應多視角之穿透式元件示意圖(a)下發光結構(b)上發光結構

1.5 本文架構

本篇論文主要是討論有機發光二極體用於裸眼式立體顯示器之研究，再根據不同結構與參數模擬出遠場強度與角度分佈的關係，來實現 OLED 做為裸眼立體顯示之光源。

在第一章節中先介紹立體視覺成像原理，接著對不同的立體顯示器做分類與說明其成像原理，以及闡述研究動機與實驗目的。

第二章針對設計原理與架構做說明，像是使用的光源與超穎介面，以及使用的光學模擬軟體、模擬方法、參數設定，接著驗證模擬方法。

在第三章中，模擬 OLED 與高指向性 OLED，且比較不同超穎介面結構參數與週期的遠場強度與角度分佈的關係，還有出光效率與頻譜。

第四章為該實驗結果的結論與總結，還有未來發展與可行的研究方向。以及最後的附錄，討論 crosstalk，將結果與文獻中規格作比較。

第二章 設計原理與模擬架構



2.1 有機發光二極體之簡介

有機發光二極體(Organic Light-Emitting Diode，簡稱 OLED) ，目前市場上，OLED 產品市佔率正在不斷提升中，與液晶顯示器(Liquid-Crystal Display) 相比，有著自發光、輕薄、可彎曲、廣視角與高對比度等特性。

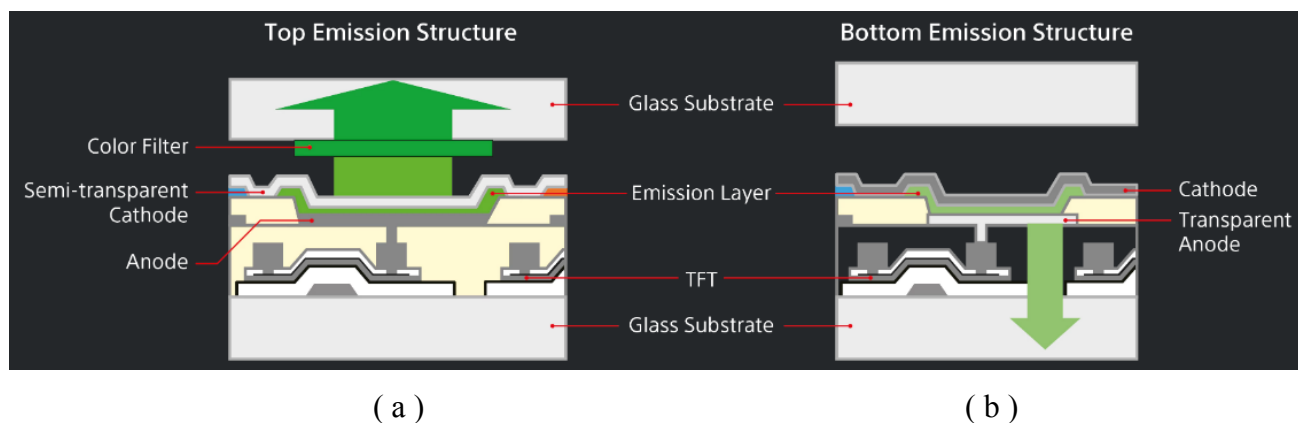


圖 2-1 OLED (a)上發光式有機發光二極體 (b)下發光式有機發光二極體[29]

在結構上，可分為上發光式有機發光二極體(Top Emission OLED)與下發光式有機發光二極體(Bottom Emission OLED)，如圖 2-1 OLED (a)上發光式有機發光二極體 (b)下發光式有機發光二極體所示，可以知道上發光式有機發光二極體式金屬作為陽極，而陰極為透明導電電極[27]光出元件時通過透明的陰極，不會受到下方薄膜電晶體的遮擋。而圖(b)下發光式有機發光二極體金屬作為陰極在上方，而陽極為透明導電電極在元件下方，光經由上方金屬反射後，經由下方薄膜電晶體出光。[28]

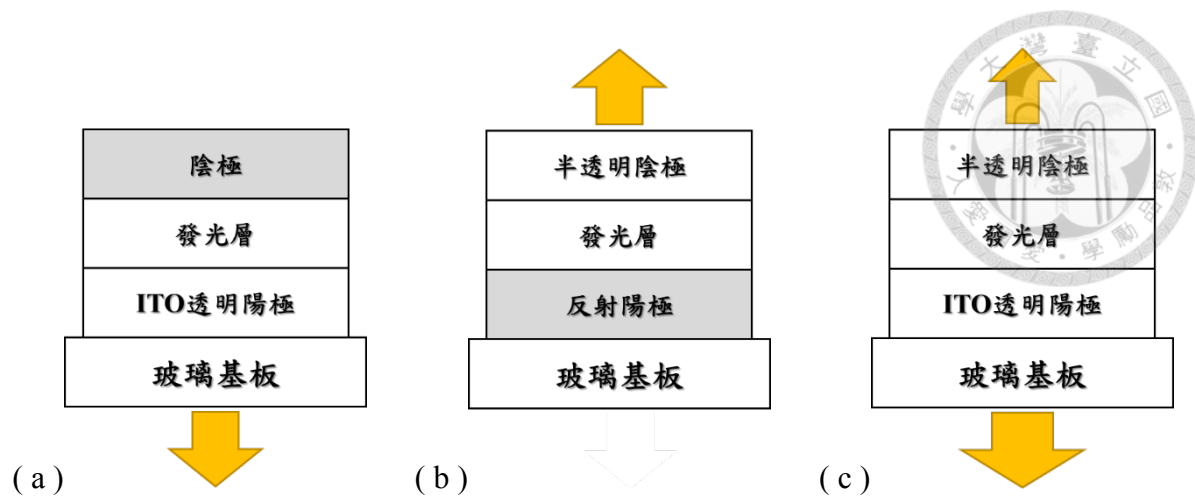


圖 2-2 OLED 示意圖(a)下發光型(b)上發光型(c)透明元件

如圖 2-2(c)本實驗光源採用下發光較多之透明元件 OLED。[26] 陽極材料還是使用傳統的透明 ITO 陽極，搭配透明陰極，像是將鎂銀電極控制在 20 nm 左右可得到高透光率，所以 OLED 元件兩面都會發光，也就是所謂的透明元件。[33]

我們利用透明元件有機發光二極體的結構，使大部分的光往下發光，用反射式的超穎介面結構，匹配成功幫助光出元件有好的指向性能夠降低串擾 (crosstalk)，最後優化元件的超穎介面之週期，讓元件出光的強度對上角度分佈更為聚焦，滿足裸眼顯示器的需求。



2.2 超穎介面介紹

2.2.1 廣義的司乃爾定律

由 N. Yu 等人根據廣義的司乃爾定律(Generalized Snell's law)的理論基礎 [19]，主要是透過超穎材料(Metamaterials)上物理尺度上的幾何結構與尺寸進行設計，其中的微結構使光波在介面上不同位置產生漸變的電磁波相位(Phase)，並在遠場干涉(Interference)後建構出特定指向的平面波前(wave front)。 [20]

超穎介面(Metasurface)就是由超穎材料所構成，可以改光波的波前、相位與偏振態，使光的傳播不在遵守原本的反射定律[17]，如圖 2-3 為介面上有相位差的示意圖。

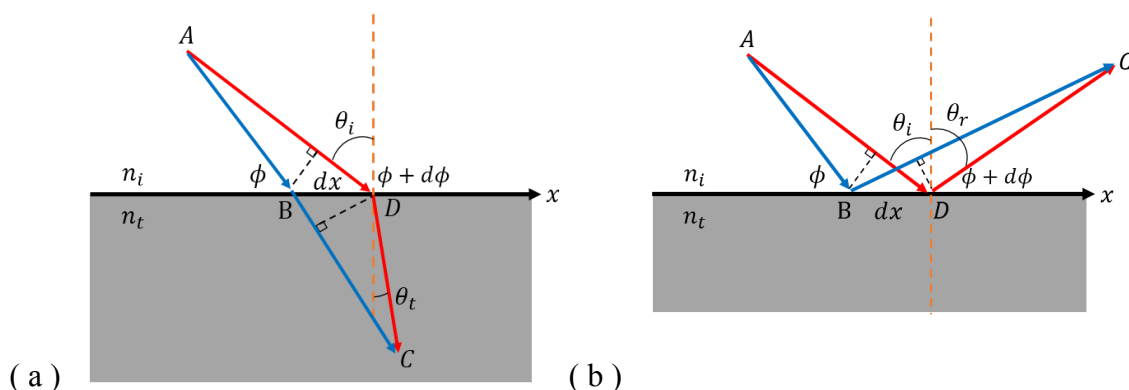


圖 2-3 (a) 介面上有相位差的折射示意圖 (b) 介面上有相位差的反射示意圖

由動量守恆可以得到以下式

$$\text{折射} : [k_0 n_i \sin \theta_i dx + (\phi + d\phi)] - (k_0 n_t \sin \theta_t dx + \phi) = 0 \quad (2-1)$$

$$\text{反射} : [k_0 n_i \sin \theta_i dx + (\phi + d\phi)] - (k_0 n_i \sin \theta_r dx + \phi) = 0 \quad (2-2)$$

其中 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 整理後

$$\text{折射} : n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right) \frac{d\phi}{dx} \quad (2-3)$$

$$\text{反射} : \sin \theta_r - \sin \theta_i = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \right) \frac{d\phi}{dx} \quad (2-4)$$

其中 θ_i 、 θ_r 與 θ_t 分別為入射角、反射角與折射角， n_i 與 n_t 為不同的介質， $\frac{d\phi}{dx}$ 為介面上相位隨距離的變化，兩個介質介面上的人造結構，在介面上有相位的改變[21]可提供光的相位改變 ϕ ，這時反射角與入射角、折射率和波長有關。若介面為理想介面時，上式(2-3)廣義的反射定律中 $\frac{d\phi}{dx} = 0$ ，即為一般的反射定律，如式(2-5)。

$$\theta_i = \theta_r \quad (2-5)$$

2.2.2 超穎介面之相位變化

在下圖 2-4 中，將造成相位變化分為旋轉(Rotation)、形狀(Shape)和填充因子(Fill Factor or Duty Cycle)等三個類型[22]，(a)納米棒陣列分佈的示意圖，通過次波長金納米棒的旋轉角度設計所需的相位。(b)使用互補的 V 形結構來控制相位。(c)須仔細設計局部相位，不同尺寸的結構單元在介面上不同位置產生漸變的電磁波相位(phase)，並在遠場干涉(interference)後建構出特定指向的平面波前(wave front)。[23]

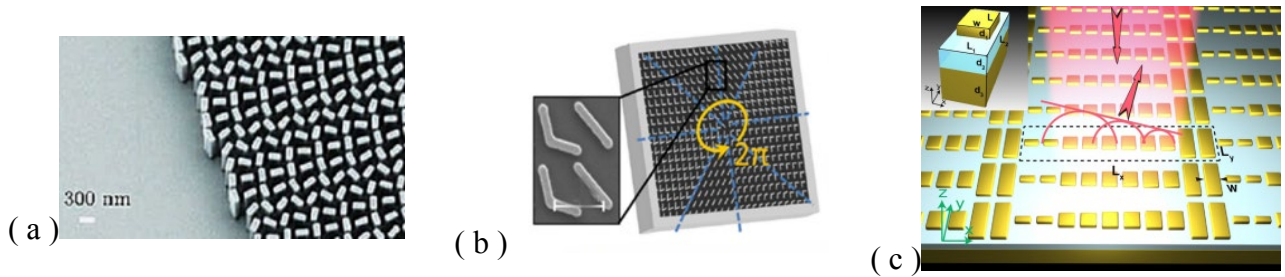


圖 2-4 超穎介面之相位變化分類(a)旋轉(b)形狀(c)填充因子[25]

採用蘇國棟教授實驗室所提供焦距為 500、800、1000、1500 和 2000 nm 的超穎介面參數，透過下列式(2-6)中，不同焦距對應不同位置的相位，如圖 2-5，可得到圖 2-6 (a)的相位分佈，再將把原始相位以 π 為週期，壓縮在 0 到 π 之間，即可得到(b)包裹相位圖(wrapped phase map)。

$$\varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda_d} (f - \sqrt{x^2 + f^2}) \quad (2-6)$$

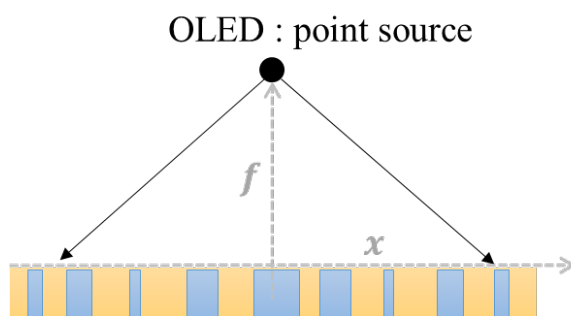
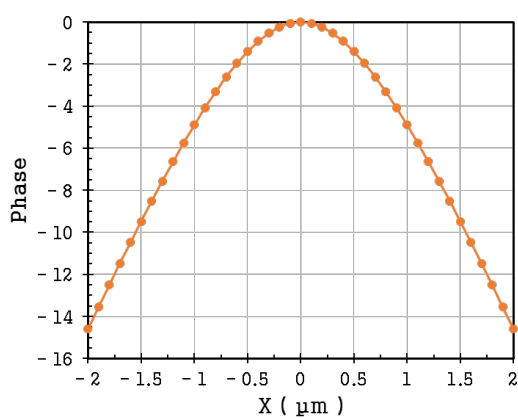
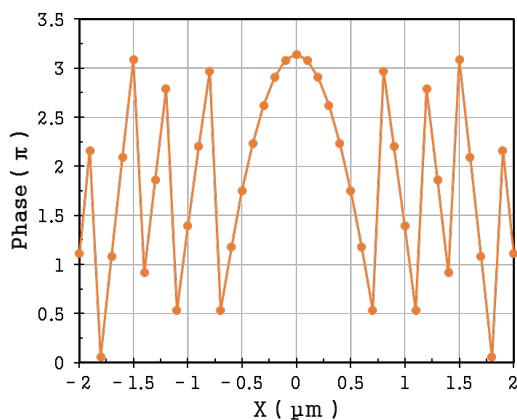


圖 2-5 超穎介面焦距與位置參數示意圖

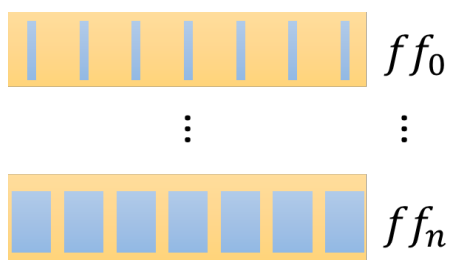


(a)



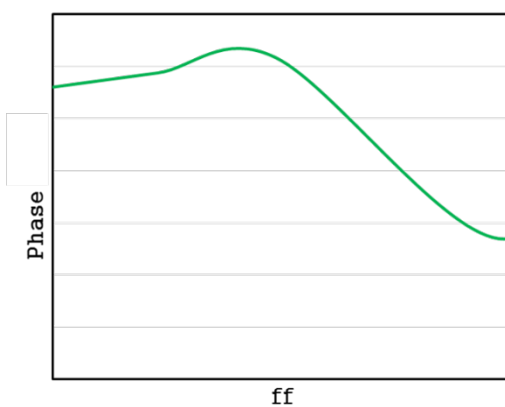
(b)

圖 2-6 當波長 $\lambda_d = 532 \text{ nm}$ 與焦距 $f = 1000 \text{ nm}$ 時，(a)相位分佈(b)包裹相位圖



ff : fill factors of building blocks

(a)



(b)

圖 2-7 (a)結構單元的填充因子(b)每個填充因子所對應的相位示意圖

在圖 2-7 中，透過結構單元掃描不同的填充因子後，即可找出每個填充因子所對應的相位，如圖(b)，接著在由上式(2-6)所求出的位置與相位分佈，藉由圖 2-8 中(a)與(b)所對照，利用相同的相位，在(c)中，即可找出每個位置所對應的填充因子。最後在模擬中建構出超穎介面，如圖 2-9 超穎介面結構示意圖。

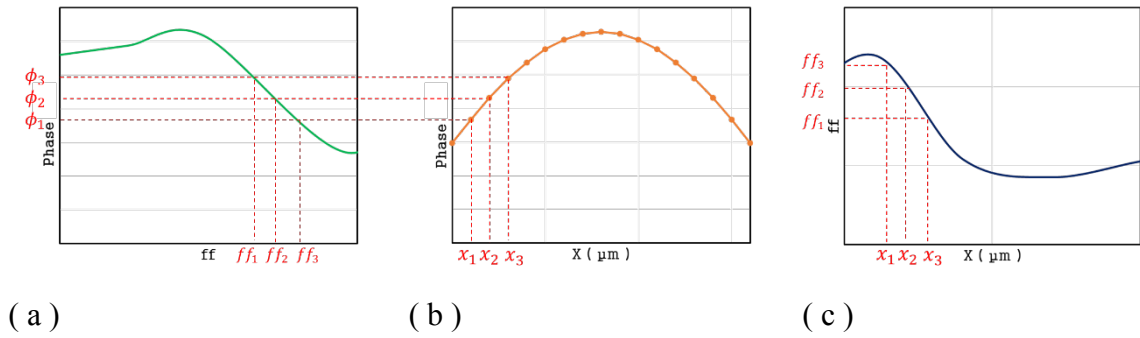


圖 2-8 (a)每個填充因子所對應的相位示意圖(b)超穎介面不同位置上的相位分佈(c)超穎介面位置對上填充因子之示意圖

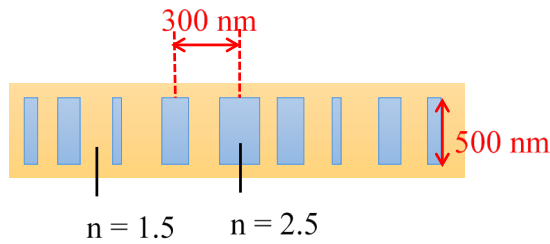


圖 2-9 超穎介面結構示意圖

2.2.3 週期性超穎介面之介紹

傳統光學元件的厚度至少都要大於入射波長的十倍以上，電磁波才能感受到折射率的變化而產生偏折。藉由設計超穎介面，大約在次波長的厚度，使電磁波經過其介面後改變其行進方向，達到調控的效果。

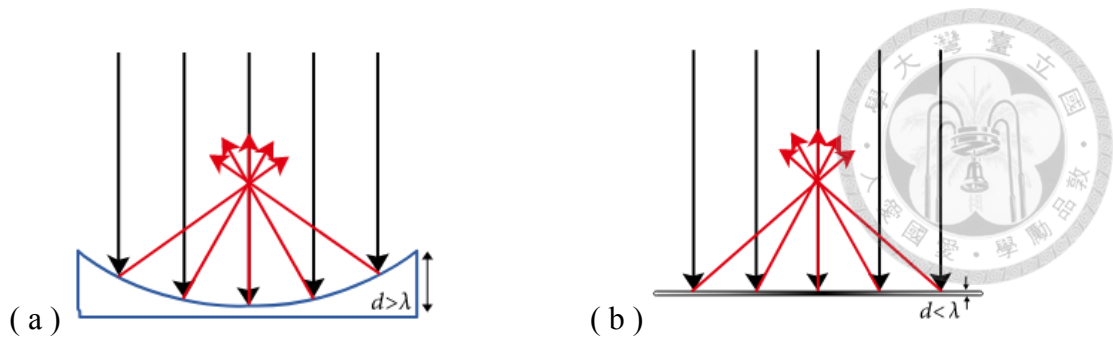


圖 2-10 (a)拋物面鏡元件的聚光(b)超穎介面之聚焦

超穎介面設計聚焦作用，元件中心排列相位延遲較大且在邊緣位置相位延遲較小的超穎介面元素設計成不同尺寸的結構單元即可達到光聚焦的功能。延續前兩小結的介紹，在此節中我們將超穎介面視為一個大拋物面鏡的概念[21]，將單一點光源放在焦距的位置，那麼透過拋物面鏡的反射，即可得到一個高指向性的平行光。但是如果光源不在焦距的位置上，則對於結構中心的入射光將傾斜一個角度，會降低整體方向性，無法達到理想的狀況，如下圖 2-11 所示。

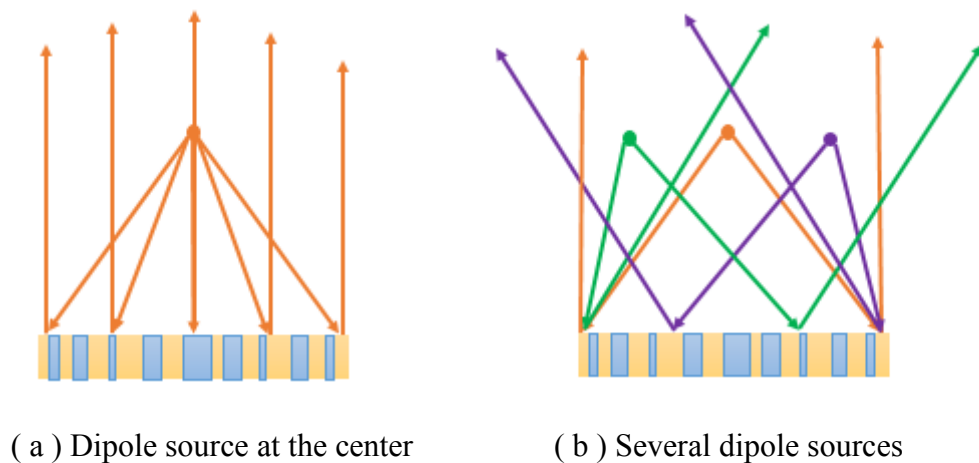


圖 2-11 (a)點光源在中心位置經過超穎介面反射示意圖(b)多個點光源經過超穎介面反射示意圖

實際上元件結構是面光源，在模擬時我們將光源設成陣列的概念，原本一個大的拋物面鏡，也設計成是許多小拋物面鏡的想法，如圖 2-12，因此只要讓每個點光源都對應到拋物面鏡的焦距上，透過局部的作用讓出光的指向性提升，如圖 2-13。

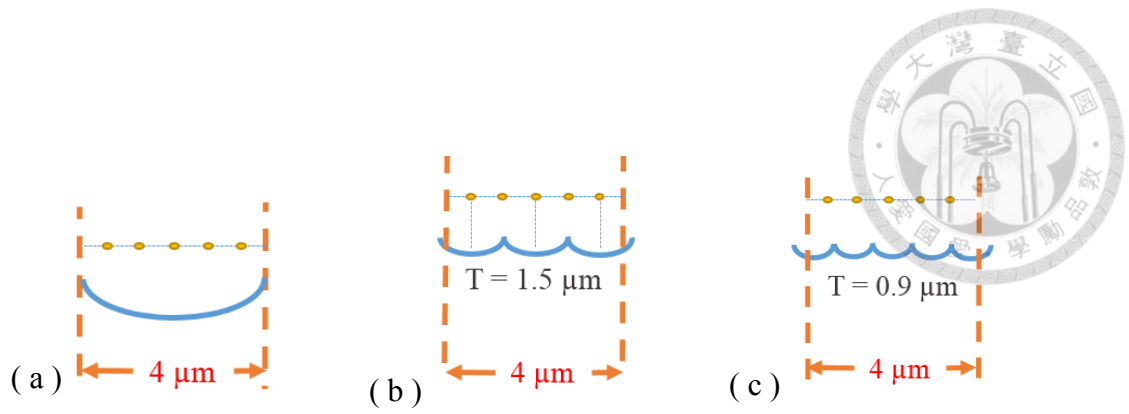


圖 2-12 (a)超穎介面視為一個大拋物面鏡示意圖(b) $T = 1.5 \mu\text{m}$ 週期性超穎介面示意圖
(c) $T = 0.9 \mu\text{m}$ 週期性超穎介面示意圖

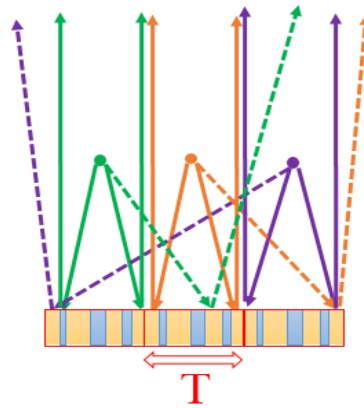


圖 2-13 週期性超穎介面透過局部的作用讓出光的指向性提升示意圖



2.3 模擬軟體

2.3.1 RSOFTM 模擬設定

FullWAVETM 是商用軟體 RSOFTM 電磁光學模擬工具中，使用 FDTD 求解馬克斯威爾方程式的模擬工具。因為 RSOFTM 中 FullWAVETM 使用該演算法，沒有針對模型進行任何物理假設，不用真空、不用球對稱...之類，因此在求解電磁光學問題上具有高度準確度與解析度。

FullWAVETM 模擬使用的邊界條件為完美吸收層(Perfectly Matched Layer ，稱為 PML)，PML 邊界由多個點組成，這些點被加到模擬區域的邊緣，設計成用作高損耗材料，其吸收所有入射能量而不產生反射，吸收邊界條件最初廣泛的應用在模擬邊界的吸收以避免誤差來自邊界的反射。在三維 FDTD 運算受限於電腦的記憶體及計算速度，不可能設定一個無窮大的空間來模擬要求解的問題，所以會使用有限的空間進行各種電磁問題的模擬，數值是依據模擬區域、邊界條件設定 PML 就是作為吸收電磁波的方法。

2.3.2 時域有限差分法

時域有限差分法(Finite Difference Time Domain，簡稱 FDTD)由 K.S.Yee 在 1966 年在其論文《 Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwells equations inisotropic media 》[18]中提出，空間中網格的有限差分計算使波所在模擬範圍內向外傳播，並與模擬區域範圍內的結構交互作用，模擬電磁波的傳播過程。

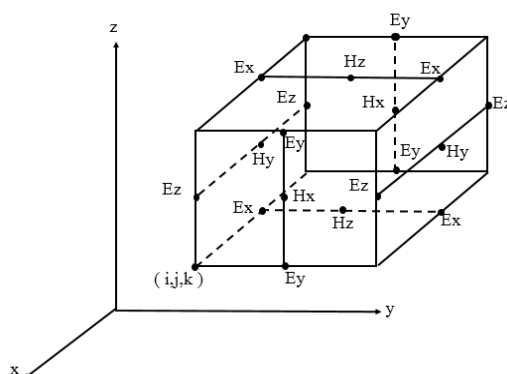


圖 2-14 空間中 x, y, z 三個方向的網格切割法

根據馬克士威爾方程式(Maxwells equations) 當電磁波在自由空間(free space)或真空(vacuum)中前進的時微分形式如(2-7)式到(2-8)式向量方程式所示，在直角坐標系表示成六個純量方程式，如(2-9)式到(2-14)式所示。其中 μ 為導磁係數(permeability)， ε 為介電常數(permittivity)。

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}(\nabla \times \vec{E}) \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}(\nabla \times \vec{H}) \quad (2-8)$$

透過空間中 x, y, z 三個方向的網格切割，計算電場與磁場在空間中進行的交互作用。

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \quad (2-9)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (2-10)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2-11)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2-12)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (2-13)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) \quad (2-14)$$

2.3.3 空間格點參數

在二維 FDTD 模擬中，x 與 z 方向網格尺寸大小，對於模擬輸出值是有影響的，如果格點切割越小，模擬範圍越大會增加計算時間，為了讓模擬結果較為精準，網格的尺寸大小是要多加以考量的，本研究採用針對不同材料切不同網格 (Grid PPW, point per wavelength)，因為不同材料有不同的折射率，依照該材料的波長進行切割，如此一來，切割的格點大小能隨著材料內的波長而改變。如圖 2-15，在我們的實驗中，使用 PPW = 30，所模擬出的能量是趨近於穩定的值。

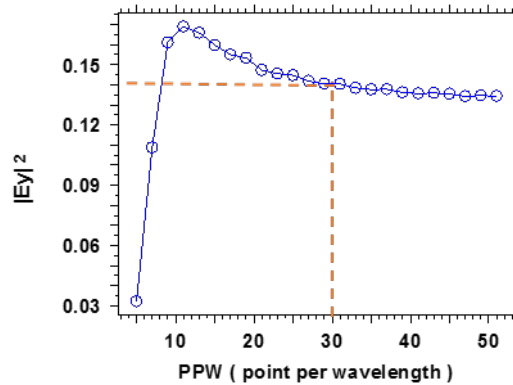


圖 2-15 Grid PPW

一般而言，網格的切法有兩種，一種為均勻(uniform)，是指在同一個材料中以等長的網格大小進行切割；另一種為非均勻(non-uniform)的網格切割，是針對在兩個膜層之間，格點尺寸可以更小，能準確反應出折射率變化，被計算的部分如果不精確，可能會導致計算上的錯誤。

在 z 方向上的層狀結構中有金屬材料，電磁場在邊界變化較為劇烈，所以這部分網格要切的比較細，於是我們會採用非均勻的網格切割，邊界因子(Edge Factor)設定為 0.1，表示邊界的網格大小為一般區域(Bulk)的 0.1 倍，且縮放比例(grading ratio)為漸變式的變小 $\sqrt{2}$ 倍，在這樣的模擬條件之下，可以使薄膜效應被計算得更精確之外，也可以減少計算上的錯誤，如下圖 2-17 為圖 2-16 局部材料折射率圖之非均勻與均勻的網格切割之比較。

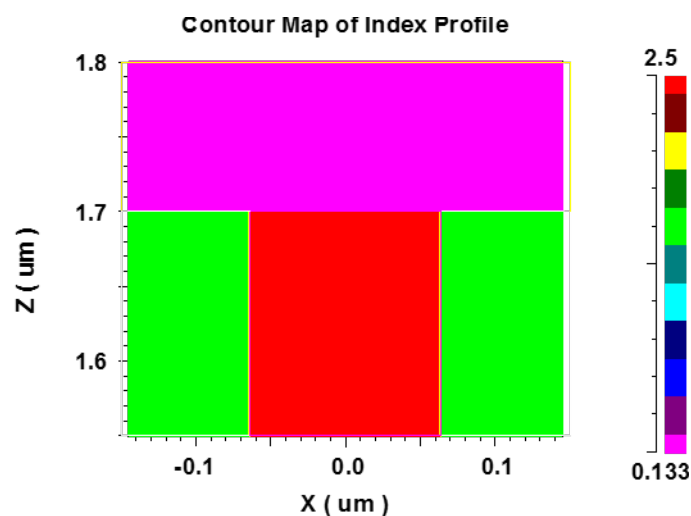


圖 2-16 局部材料折射率圖

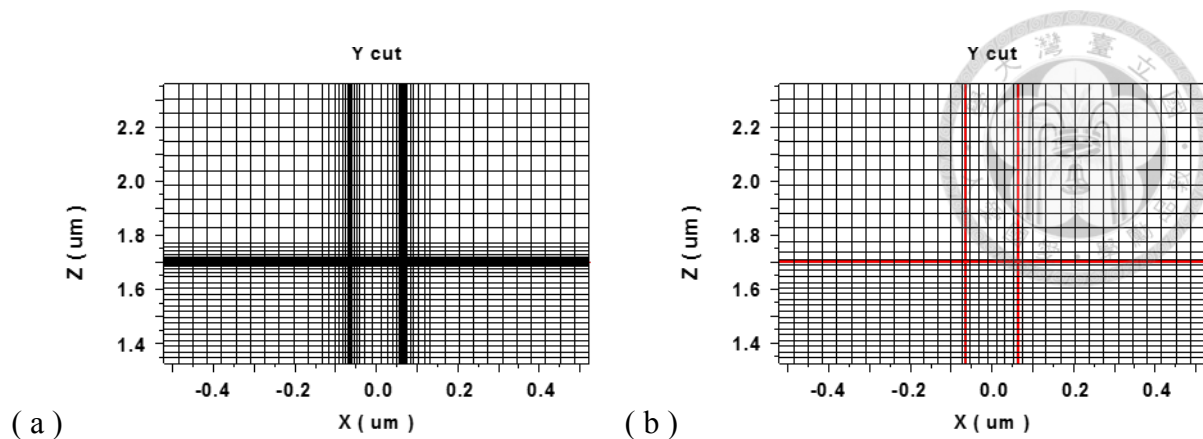


圖 2-17 (a)非均勻的網格切割(b)均勻的網格切割

2.3.4 入射場設定

在時間場中，FullWAVETM 有連續波(CW)是持續不變化的單波長光源及適用於頻譜分析的脈衝(pulsed)之激發模式。

光源採用 532 nm 的綠光，設定 unit power = 1 模擬內部量子效率為 100 %。空間場的設定我們選擇型態為電流(current)，是指由偶極所產生的電磁波做為光源。在 RSoft 之 FullWAVETM 使用 FDTD 演算法，對馬克斯威爾方程式求解，其中 LED Utility 進行模擬表面結構所產生的光學特性，在出光效率和遠場的場型都會有較高的準確度。

在光源位置的模擬，我們選擇點光源數量為 5，分別在 $x = -1.5$ 、 -0.75 、 0 、 0.75 、 $1.5 \mu\text{m}$ 的位置，因為結構具有對稱性，選擇 symmetry 模式，可以減少電腦記憶體的運算量，如下圖 2-18 在 OLED 發光層中 +x 方向上光源之位置，且光源彼此之間是採用非同調(Incoherently)。

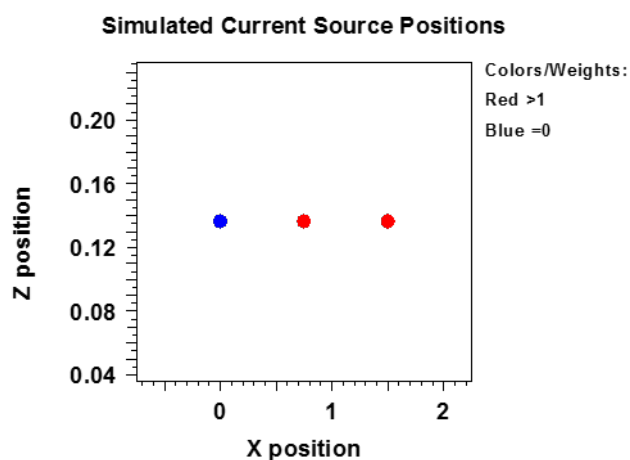


圖 2-18 在 OLED 發光層中 +x 方向上光源之位置



2.4 結構設計與分析

真實 OLED 作為光源，透過反射式 OLED 超穎介面(Reflective Metasurface)使反射光的角度分佈達到聚焦的效果，來提昇出光的指向性，減少所見影像之間的相互干擾，以實現多視域裸眼式立體顯示。

所以由前面的下發光式的 OLED 介紹，所發出的光會有一定的角度分佈，大約半高全寬為 $\pm 36^\circ$ ，藉由布拉格反射鏡(Distributed Bragg Reflector, DBR)增加膜層結構，高-低折射率的薄膜交互堆疊，當光經過這些不同折射率的膜層結構時，因為各層反射回來光的相位角改變而進行建設性干涉，然後再互相結合，即可即得到較強的反射光使得出光的指向性增加。

2.4.1 OLED 結構

本研究由高指向性的光源來實現立體顯示，所以在 OLED 膜層的設計會有微共振腔結構，是採用高-低折射率膜層交替組合的 DBR(distributed Bragg reflector)，對正向亮度有所增益，在此暫不考慮電性之影響，其結構會產生微共振腔效應而影響頻譜與出光效率，但能增加出光指向性，以下將會對兩種不同結構進行分析。

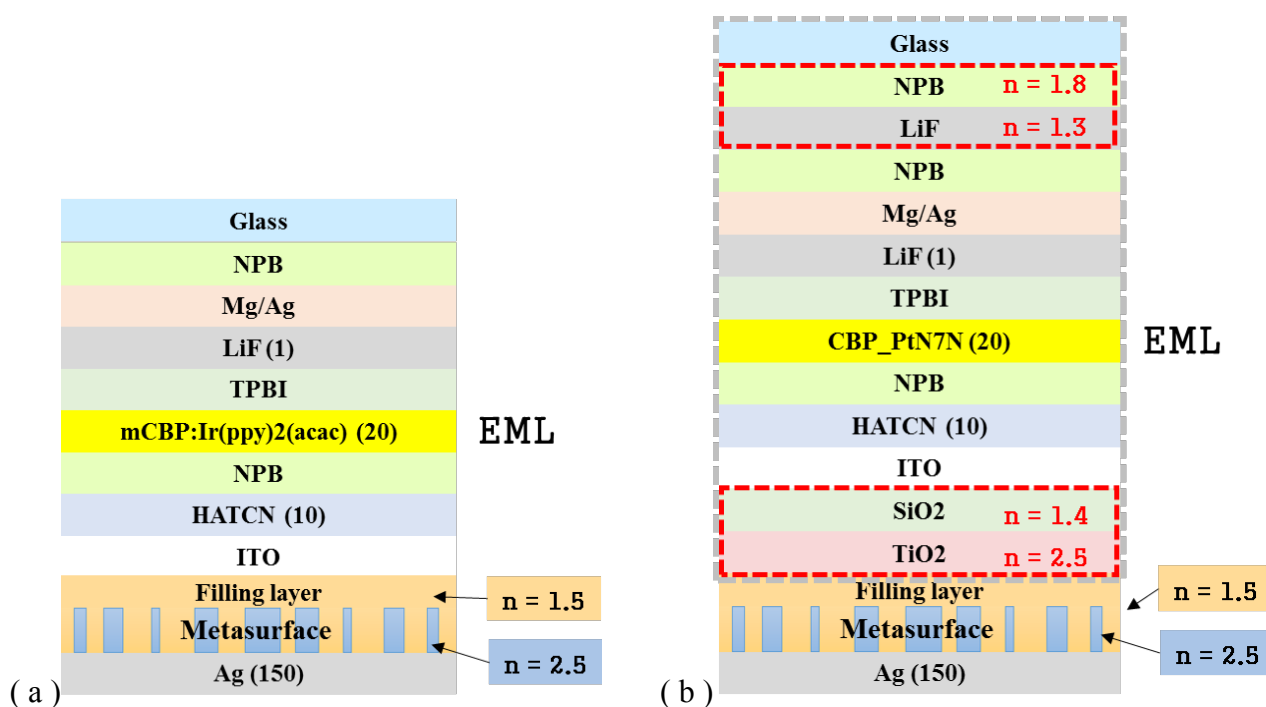
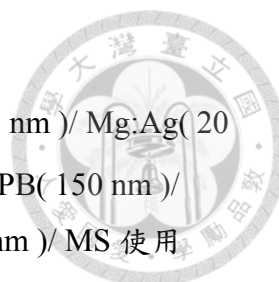


圖 2-19 (a) OLED 結構 (b) 增強指向性 OLED 結構



在圖 2-19 (a) 中，OLED 元件結構參數如下: Glass/ NPB(65 nm)/ Mg:Ag(20 nm)/ LiF(1 nm)/ TPBi(50 nm)/ mCBP:Ir(ppy)₂(acac)(20 nm)/ NPB(150 nm)/ HAT-CN(10 nm)/ ITO(80 nm)/ Plannarization layer ($n = 1.5$)(x nm)/ MS 使用 TiO₂(500 nm)/ Filling Material($n = 1.5$)(500 nm)/ Ag(150 nm)，而圖 2-18 (b) 的 OLED 增強指向性元件結構參數如下: Glass/ NPB(65.77563 nm)/ LiF(91.50832 nm)/ NPB(65.77563 nm)/ Mg:Ag_{1:10}(30 nm)/ LiF(1 nm)/ TPBi(176.7149 nm)/ cbp_PtN7N(20 nm)/ NPB(45.94646 nm)/ HAT-CN(10 nm)/ ITO(64.25975 nm)/ SiO_x(83.95971 nm)/ tio₂_S(49.51206 nm)/ Plannarization layer ($n = 1.5$)(x nm)/ MS 使用 TiO₂(500 nm)/ Filling Material($n = 1.5$)(500 nm)/ Ag(150 nm)。其中其中 x nm 為平坦層厚度(Plannarization layer)，分別為 300 nm、500 nm、800 nm、1000 nm、1500 nm 和 2000 nm。圖 2-20 為圖 2-19 (a) 與 (b) 的發光頻譜。

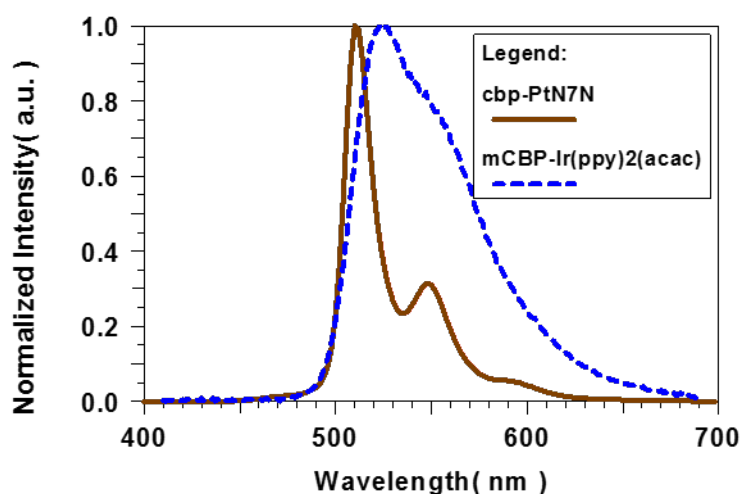


圖 2-20 不同 OLED 之頻譜

2.4.2 超穎介面結構

超穎介面設計出針對焦距分別為 500 nm、800 nm、1000 nm、1500 nm 和 2000 nm 在 OLED 的內部，與平面結構 Device #ref 1 與 #ref 2 之出光遠場分佈做比較。也會在第三章的內容中，將每個 Device 有週期性 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 與 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 的改變後，再與原本設計的出光遠場分佈做比較。



表 2-1 超穎介面結構參數表

OLED 結構						
Device	#ref 1	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
超穎介面焦距 (nm)	-	500	800	1000	1500	2000

增強指向性 OLED 結構						
Device	#ref 2	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10
超穎介面焦距 (nm)	-	500	800	1000	1500	2000

表 2-2 超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$

OLED 結構						
Device	#ref 1	# 1'	# 2'	# 3'	# 4'	# 5'
超穎介面焦距 (nm)	-	500	800	1000	1500	2000

增強指向性 OLED 結構						
Device	#ref 2	# 6'	# 7'	# 8'	# 9'	# 10'
超穎介面焦距 (nm)	-	500	800	1000	1500	2000

表 2-3 超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$

OLED 結構						
Device	#ref 1	# 1''	# 2''	# 3''	# 4''	# 5''
超穎介面焦距 (nm)	-	500	800	1000	1500	2000

增強指向性 OLED 結構						
Device	#ref 2	# 6''	# 7''	# 8''	# 9''	# 10''
超穎介面焦距 (nm)	-	500	800	1000	1500	2000



2.5 驗證模擬方法

2.5.1 OLED 場型驗證

與吳忠幟教授實驗室所提供將高指向性 OLED 的上下出光部分作場型的驗證，將 RSOFTE 的結果，如圖 2-22 所示，與圖 2-21 Analytical EM wave model 使用 Transfer-matrix method 計算各膜層 n 、 k 值的場型分佈做比較，下發光的能量大於上發光， 0° 為上發光在玻璃基板量測的部分， 180° 為下發光在平坦層量測的部分，且大約為 $\text{FWHM} = \pm 20^\circ$ 。

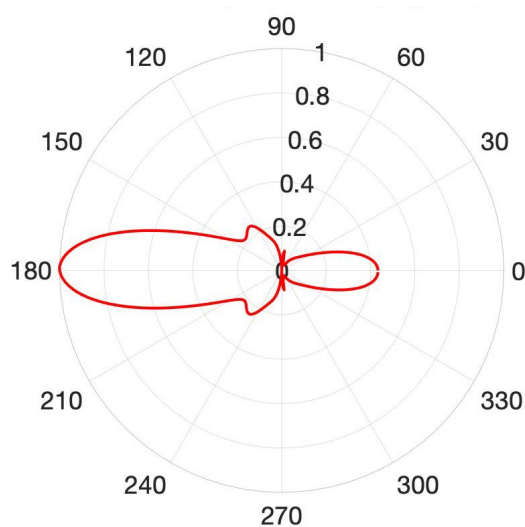


圖 2-21 Analytical EM wave model 模擬場型結果

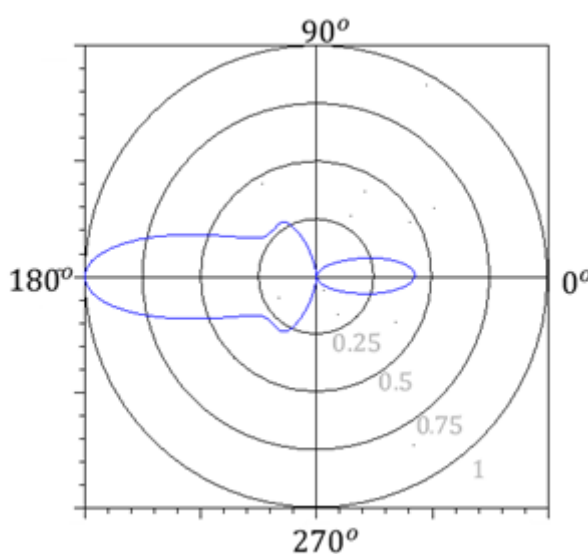


圖 2-22 RSOFTE™ 模擬場型結果

2.5.2 超穎介面在單一光源在中心位置驗證模擬

驗證上述的設計是否能達到提升指向性之效果，將平坦層厚度都固定為 800 nm，將一個光源放在發光層的中心位置，透過適當地改變超穎介面焦距，使經過介面的反射光，出元件後在 200 nm 的位置設置接收器，達到預期的結果。

在 Device #ref 1 沒有超穎介面結構，OLED 出光強度分佈 $\text{FWHM} = \pm 16^\circ$ ，經過適當的焦距設計，在 $f = 1500 \text{ nm}$ 與 2000 nm 時 $\text{FWHM} = \pm 7^\circ$ ，Device #ref 2 也是沒有超穎介面結構，高指向性 OLED 光強度對角度分佈 $\text{FWHM} = \pm 15^\circ$ ，經過改變超穎介面焦距，在 $f = 1500 \text{ nm}$ 時 $\text{FWHM} = \pm 11.8^\circ$ ，達到聚焦的目的，由於元件本身為高指向性的 OLED 設計，所以降低大角度(大於 $\pm 30^\circ$)的強度。

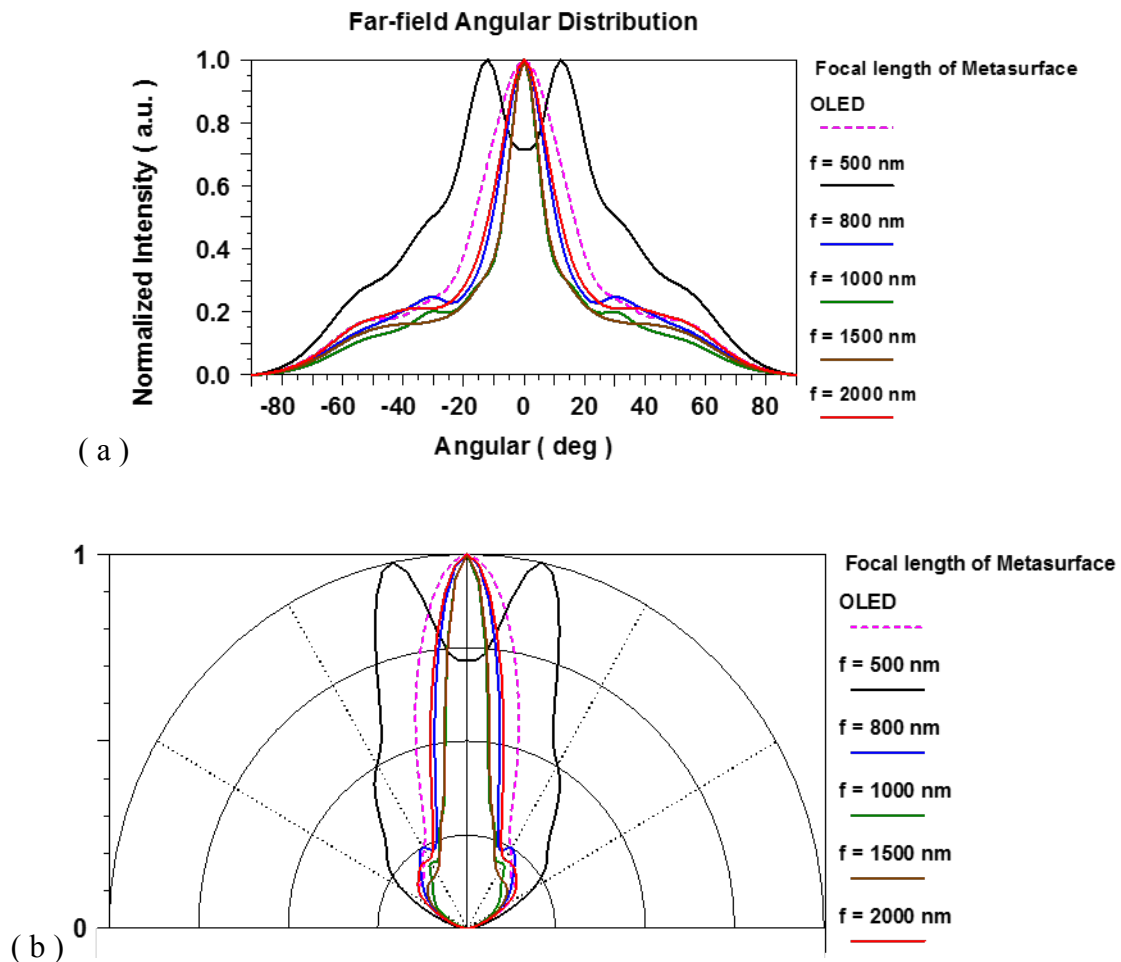


圖 2-23 Device #ref 1 與 Device # 1 到 #5 在平坦層厚度 800 nm 之遠場強度 (a) 角度分佈

(b) 極座標

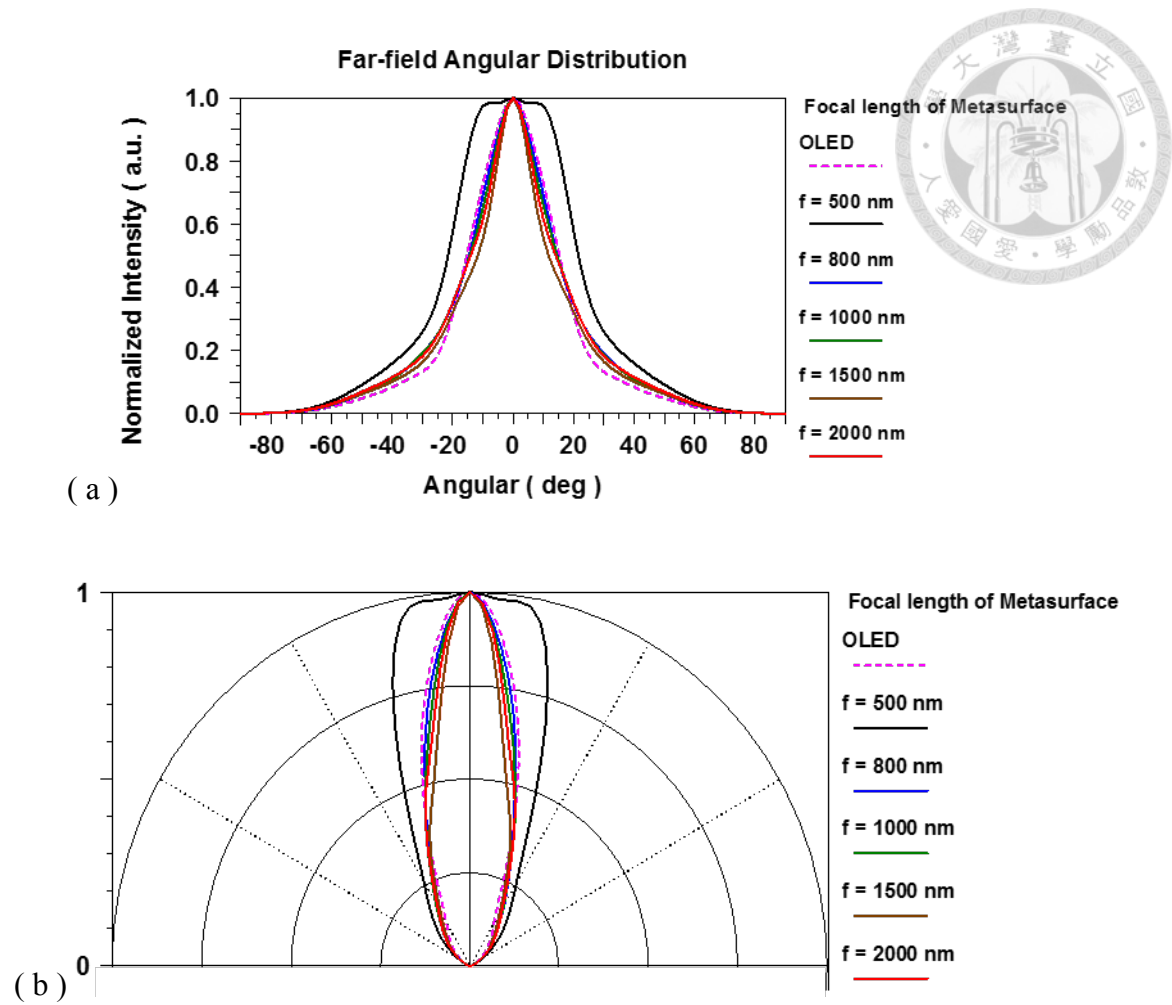


圖 2-24 Device #ref 2 與 Device # 6 到 #10 在平坦層厚度 800 nm 之遠場強度 (a) 角度分佈

(b) 極座標

第三章 研究結果與討論



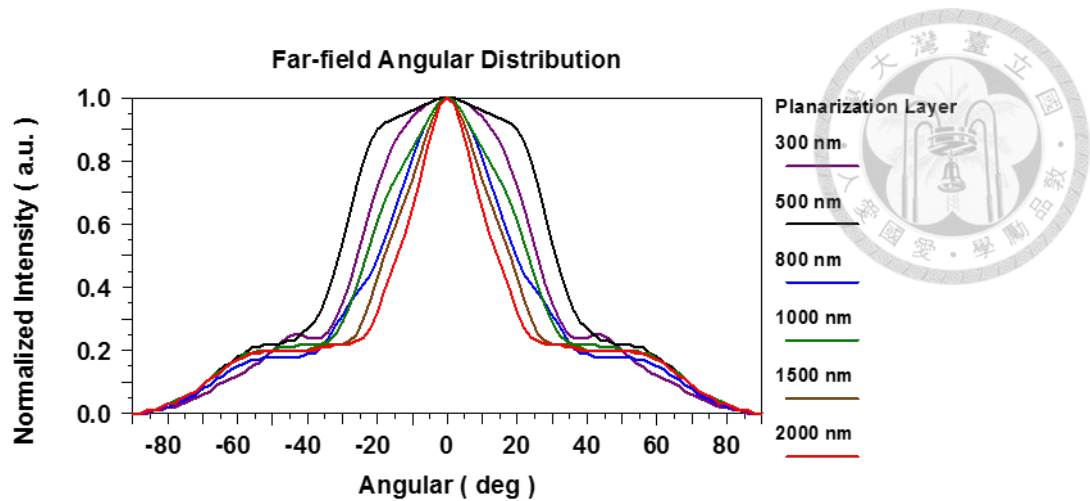
3.1 模擬 OLED 實驗結果與分析

在前一章節的驗證中，單一點光源放置在發光層的中心位置，可透過適當的設計超穎介面的焦距，或是在本章節中改變平坦層厚度，使遠場分佈的角度達到聚焦的效果。實際上元件結構是面光源，在模擬時我們將光源設成陣列的概念，分別在發光層中 $x = -1.5$ 、 -0.75 、 0 、 0.75 、 $1.5 \mu\text{m}$ 的位置進行模擬。

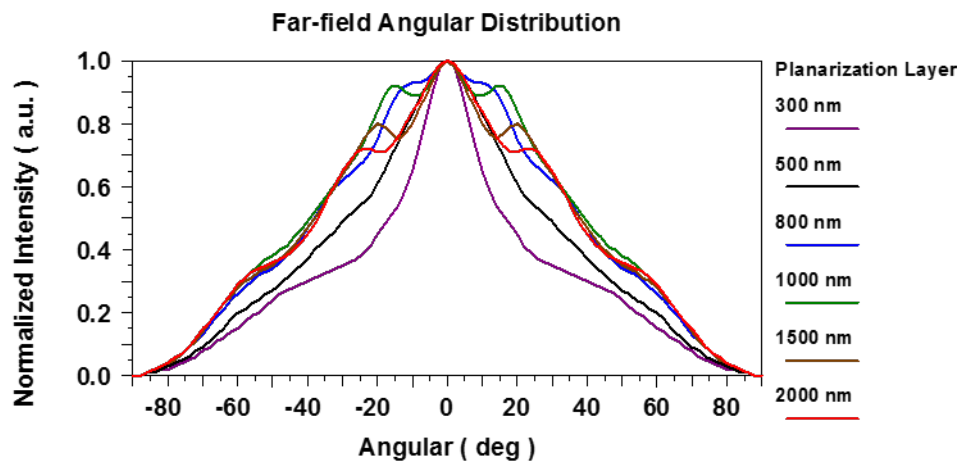
3.1.1 OLED 模擬結果分析

從圖 3-1(a) 中可以發現平坦層厚度會影響遠場角度分佈，在厚度為 2000 nm 雖然可以最小的半高全寬(Full Width at Half Maximum, FWHM)，指向性最好，但是推測原因可能是因為大角度的光沒有被接收到；而指向性指平坦層厚度的關係也不是絕對的，像是平坦層厚度為 300 nm 時，指向性也不是最差的，因此推估平坦層厚度在 800 nm 到 1000 nm 時，是一個比較適當的厚度。

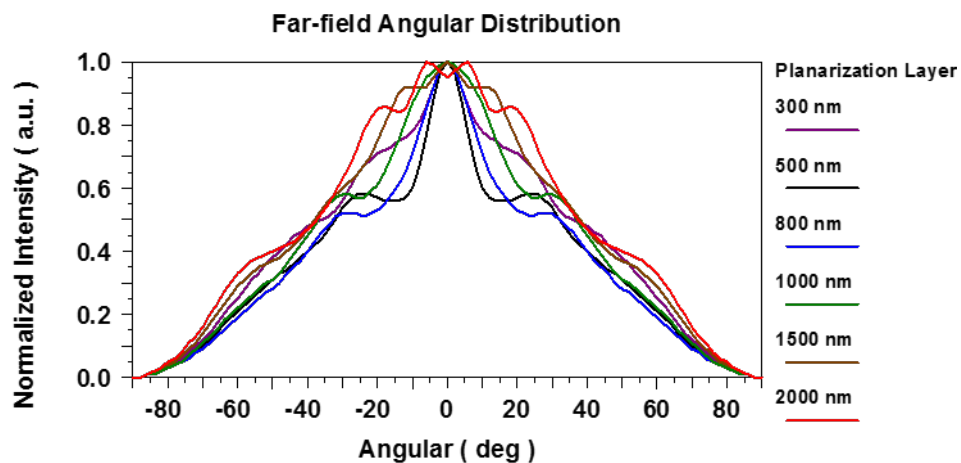
圖 3-1(b) 到 (f) 為第二章節所提到的，在 OLED 中設計不同焦距的超穎介面 (MS, Metasurface)，使出光的遠場角度分佈能夠達到聚焦集中的效果。圖 3-1(b) 與 (a) 相比，在平坦層厚度為 300 nm 時，因為有 MS 的結構，使得指向性得到提升；圖 3-1(d) 中，平坦層厚度 800 nm 時，也有 $\text{FWHM} = \pm 17^\circ$ 相較之下比較好的結果，雖然中心小角度的分佈有明顯的聚焦效果，但大角度分佈的能量強度依然過大，可參閱本文附錄。



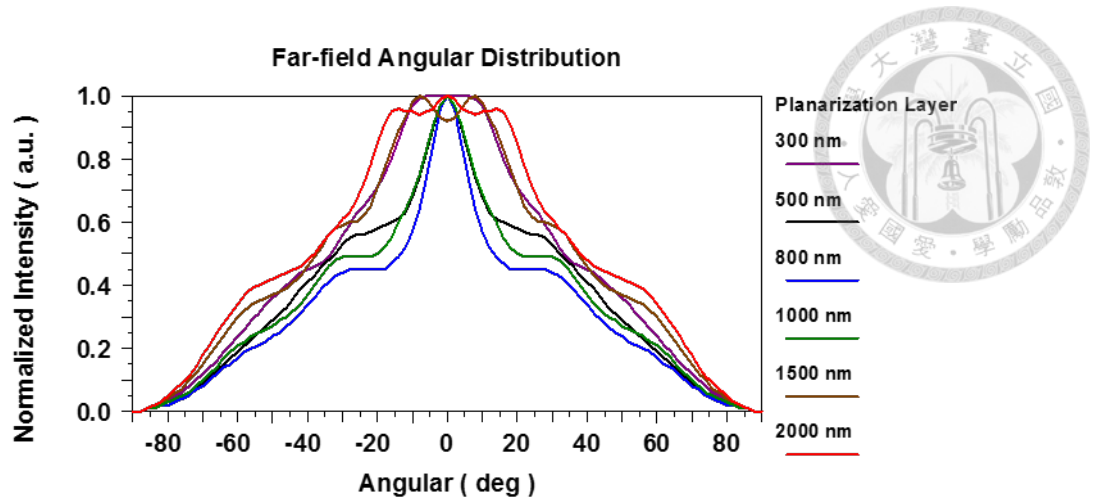
(a). OLED 當平坦層厚度為 2000 nm 時，FWHM = $\pm 17^\circ$



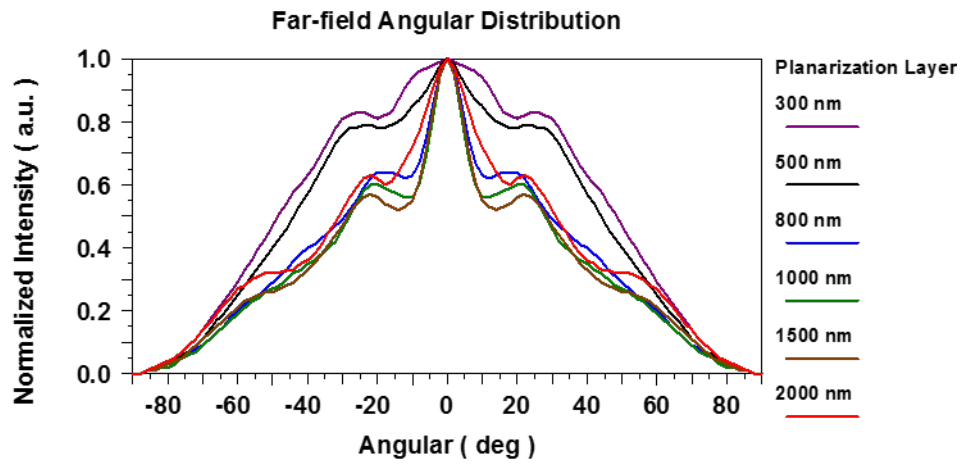
(b). Device # 1 聚焦在 $f = 500$ nm，當平坦層厚度為 300 nm 時，FWHM = $\pm 17^\circ$



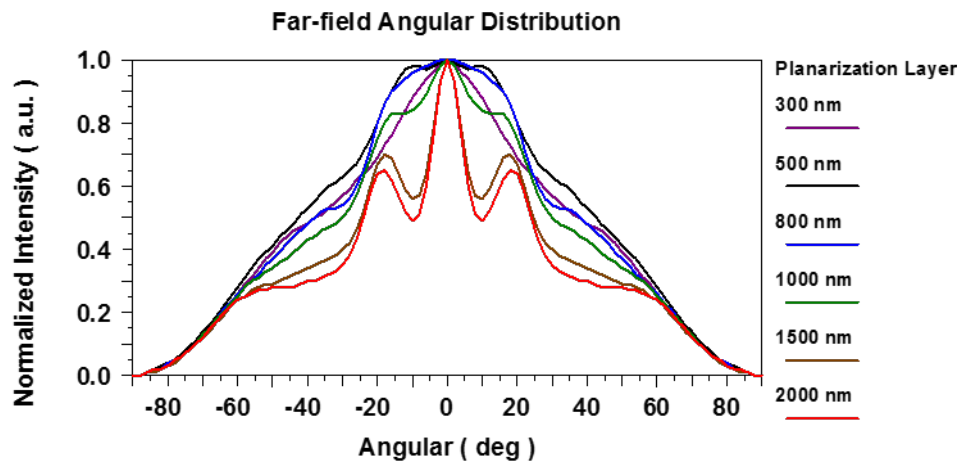
(c). Device # 2 聚焦在 $f = 800$ nm，當平坦層厚度為 800 nm 時，FWHM = $\pm 25^\circ$



(d). Device # 3 聚焦在 $f = 1000 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 17^\circ$

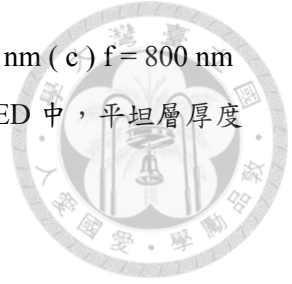


(e). Device # 4 聚焦在 $f = 1500 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 1000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 28^\circ$



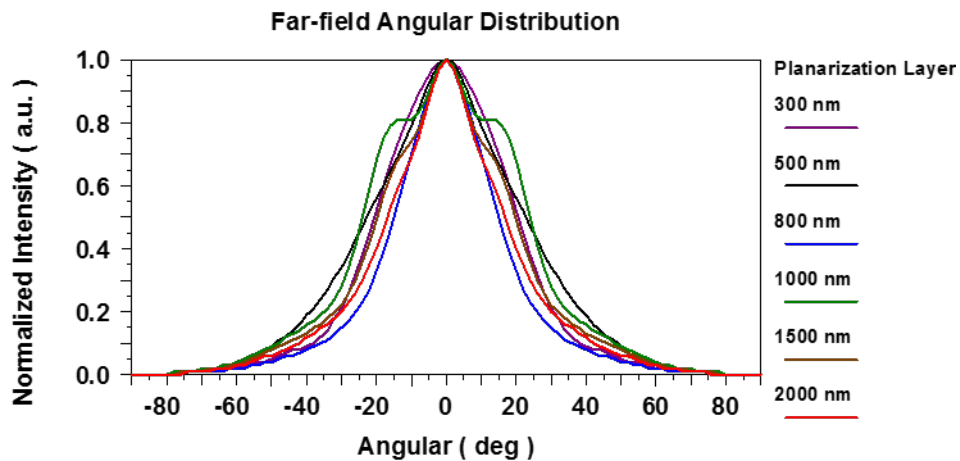
(f). Device # 5 聚焦在 $f = 2000 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 2000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 25^\circ$

圖 3-1 (a)平坦層厚度對 OLED 的影響。超穎介面焦距為 (b) $f = 500 \text{ nm}$ (c) $f = 800 \text{ nm}$ (d) $f = 1000 \text{ nm}$ (e) $f = 1500 \text{ nm}$ (f) $f = 2000 \text{ nm}$ 不同超穎結構在 OLED 中，平坦層厚度對出光遠場角度分佈的影響

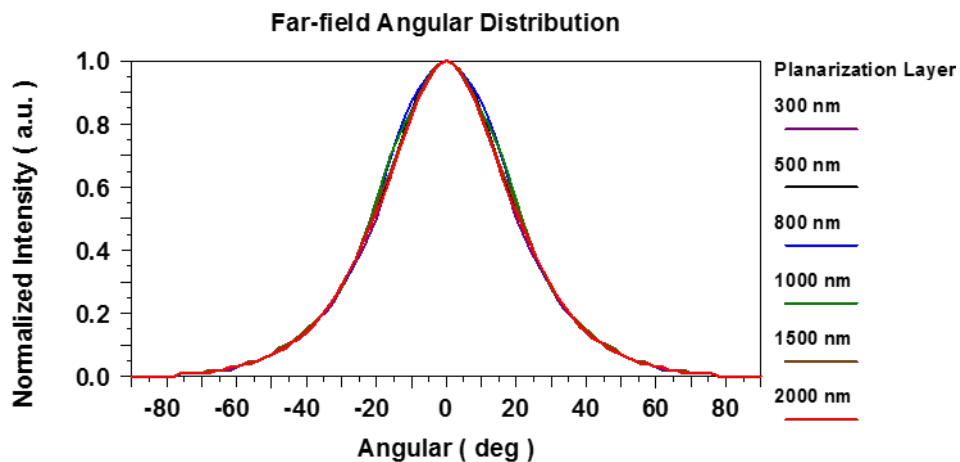


3.1.2 高指向性 OLED 實驗結果分析

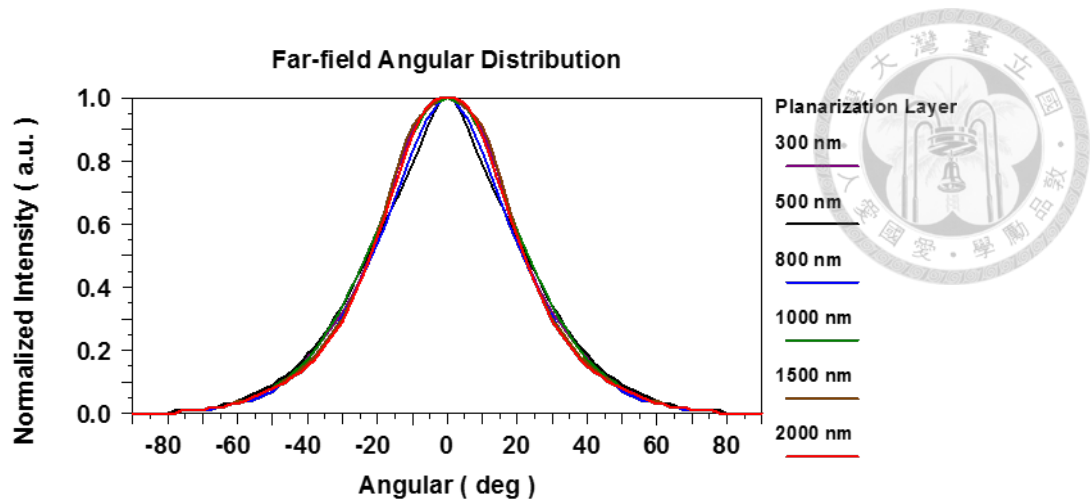
由 3.1.1 OLED 模擬結果分析中，出光遠場分佈的大角度的能量強度太大，以至於無法達到整體出光有強聚焦的效果，以下是不同焦距的 MS，在不同平坦層厚度的結果，在本節使用一個更高指向性的 OLED，來解決上述的問題外，還發現了當光源本身指向性提升，會減少平坦層厚度所產生的影響。



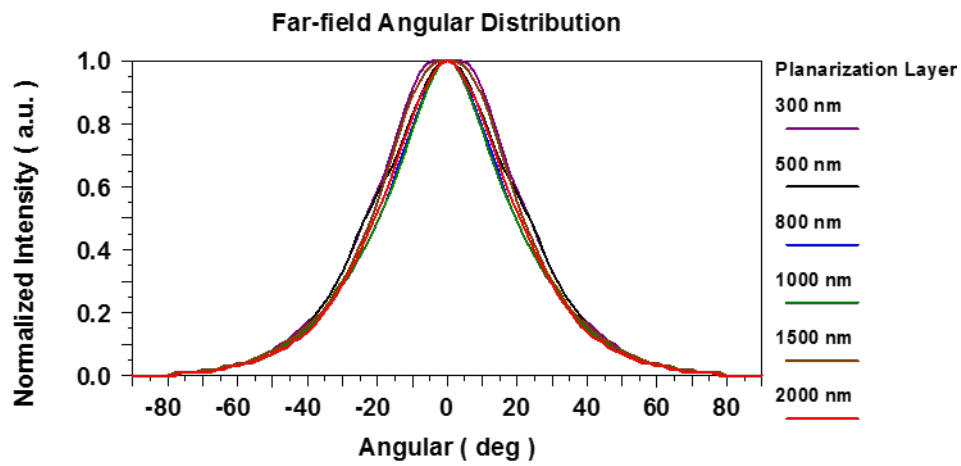
(a).高指向性 OLED，當平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 15^\circ$



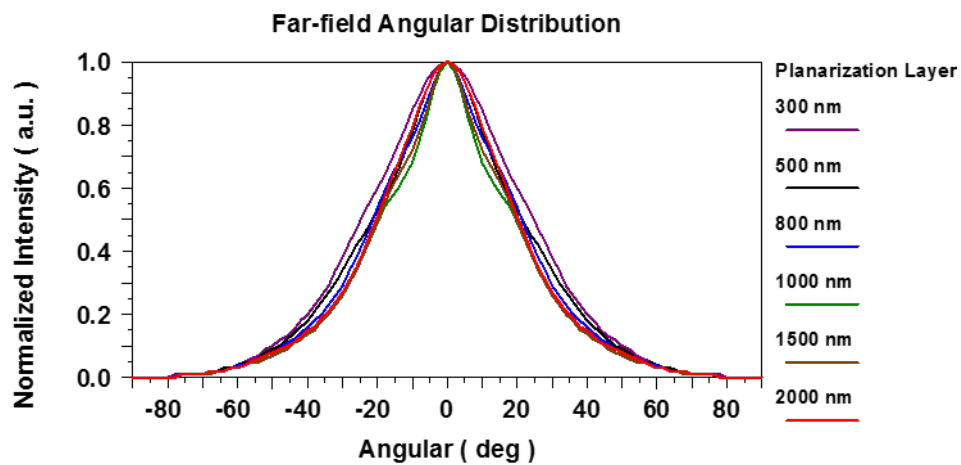
(b).Device # 6 聚焦在 $f = 500 \text{ nm}$ ， $\text{FWHM} = \pm 21^\circ$



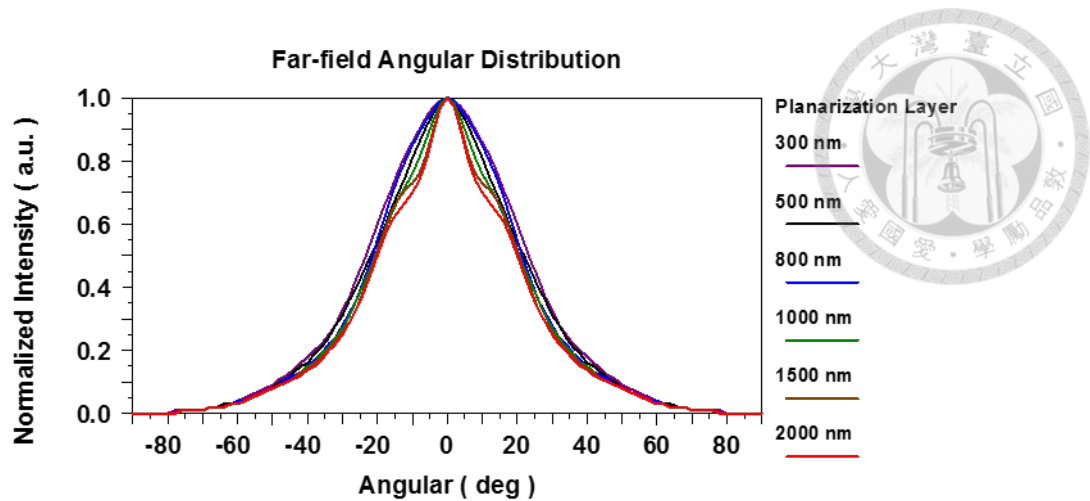
(c). Device # 7 聚焦在 $f = 800 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 21^\circ$



(d). Device # 8 聚焦在 $f = 1000 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 1000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 19^\circ$



(e). Device # 9 聚焦在 $f = 1500 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 1000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 21^\circ$



(f). Device # 10 聚焦在 $f = 2000 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 2000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 25^\circ$

圖 3-2 (a) 平坦層厚度對高指向性 OLED 的影響。超穎介面焦距為 (b) $f = 500 \text{ nm}$ (c) $f = 800 \text{ nm}$ (d) $f = 1000 \text{ nm}$ (e) $f = 1500 \text{ nm}$ (f) $f = 2000 \text{ nm}$ 不同超穎結構在高指向性 OLED 中，平坦層厚度對出光遠場角度分佈的影響



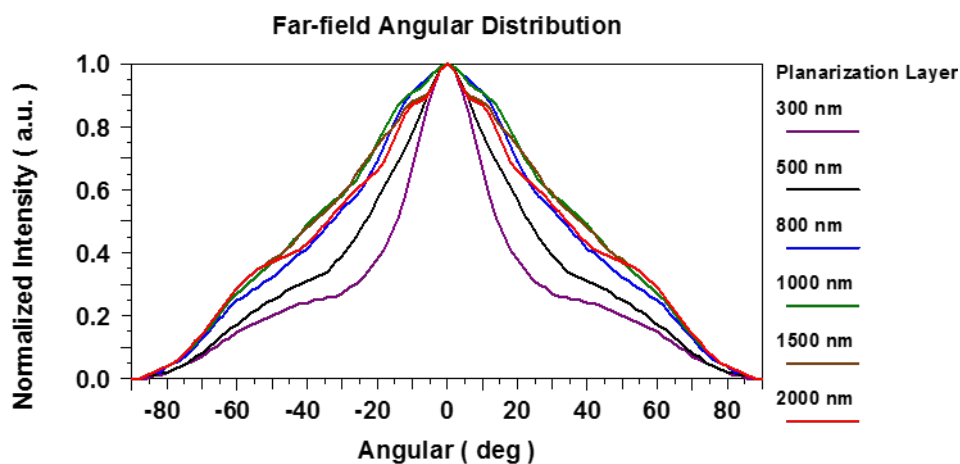
3.2 不同週期超穎介面之結果與分析

3.2.1 超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 之遠場角度分佈

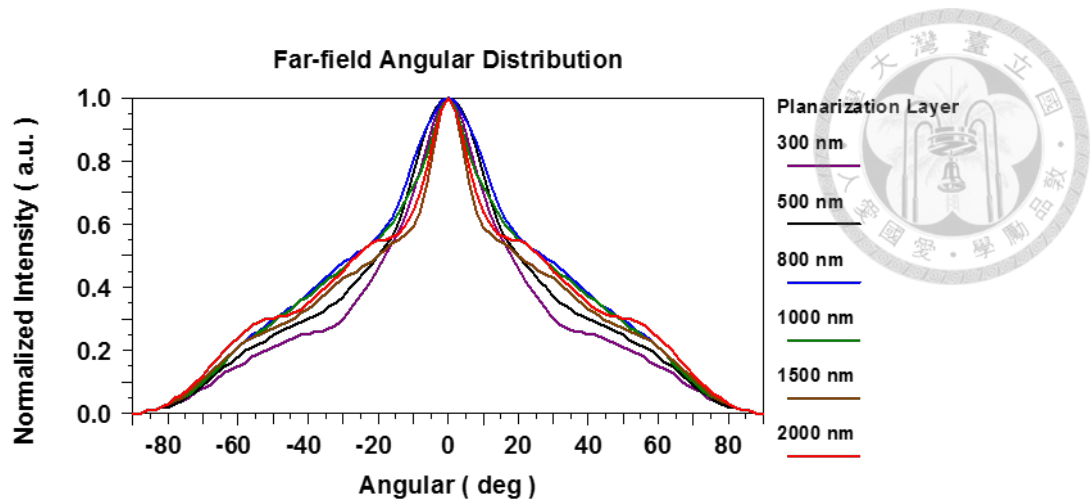
此節將超穎介面設計成週期性的結構，將是使指向性提升的一大關鍵，在第二章的介紹中提到超穎介面如同一個大拋物面鏡的概念，只要將點光源放在焦距的位置，那麼透過拋物面鏡的反射，即可得到一個高指向性的平行光。但在真實的元件結構是面光源，但在模擬時我們將光源設成陣列的概念，原本一個大的拋物面鏡，也設計成是許多小拋物面鏡的想法，因此只要讓每個點光源都對應到拋物面鏡的焦距上，透過局部的作用讓出光的指向性提升。

我們可以比較圖 3-1 與圖 3-3，在超穎介面的結構中在還是有高能量在大角度的分佈，推測為干涉或是繞射造成的，但透過將超穎介面週期性的設計，可以看出在 $\pm 20^\circ$ 的分佈明顯達到聚焦的效果。

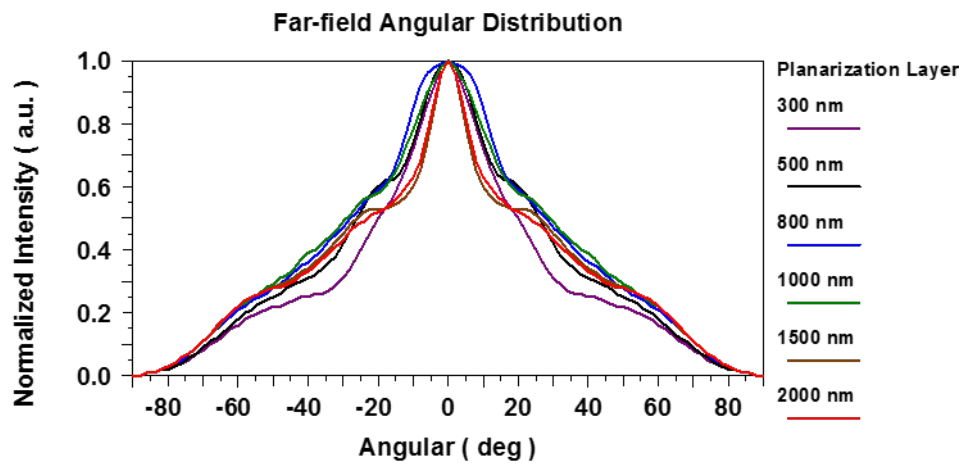
在圖 3-3 與圖 3-4 的結果中，有一樣的現象是如果本身就為高指向性 OLED，那麼確實可以大幅降低平坦層厚度對於角度分佈的影響，在製程上將是一大優勢，不會因為厚度有些微的誤差而影響結果。



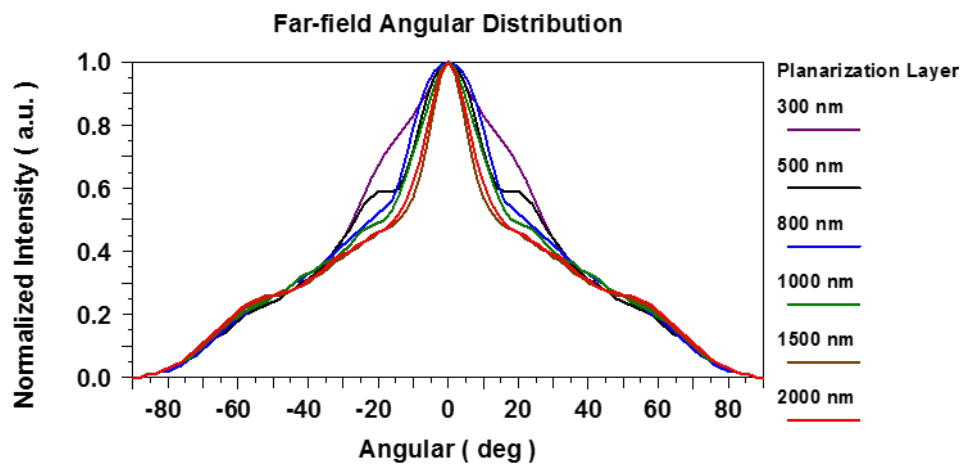
(a).Device # 1' 聚焦在 $f = 500 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 300 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 15^\circ$



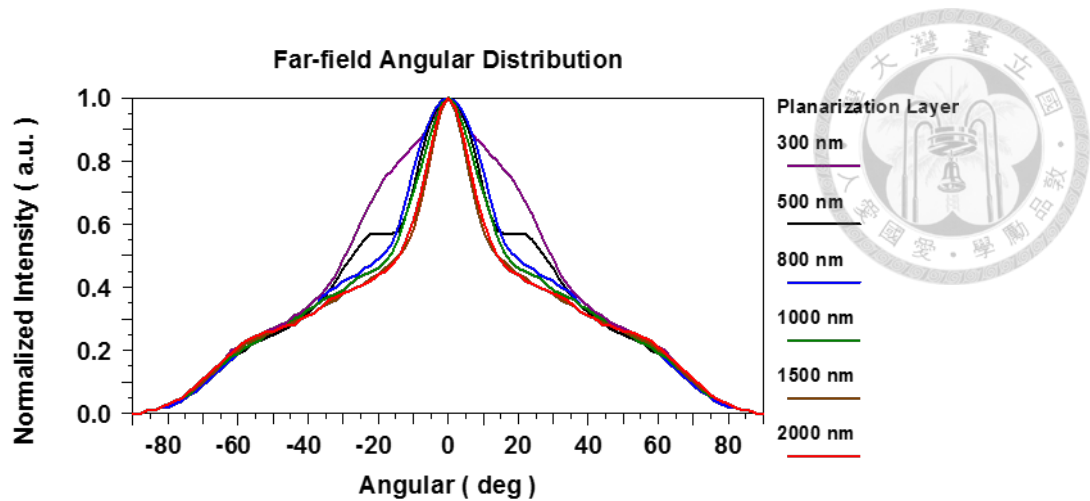
(b).Device # 2' 聚焦在 $f = 800 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 300 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 18^\circ$



(c).Device # 3' 聚焦在 $f = 1000 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 300 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 20^\circ$

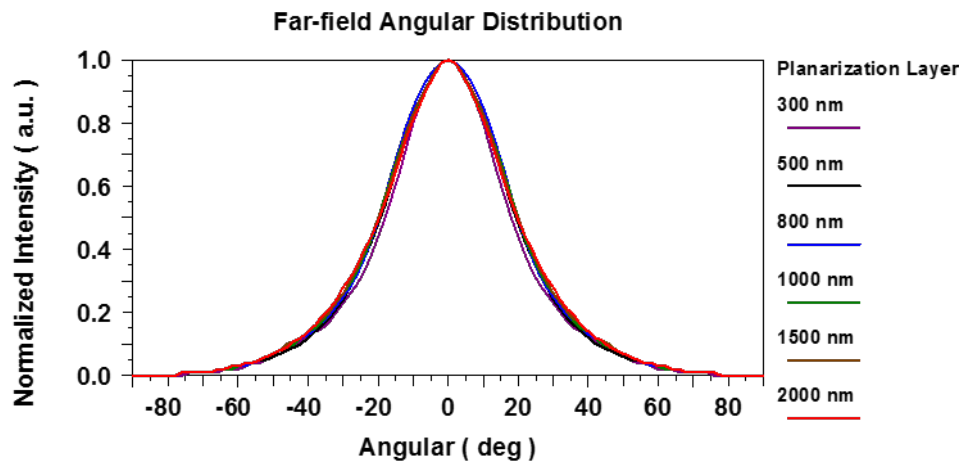


(d).Device # 4' 聚焦在 $f = 1500 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 1500 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 14^\circ$

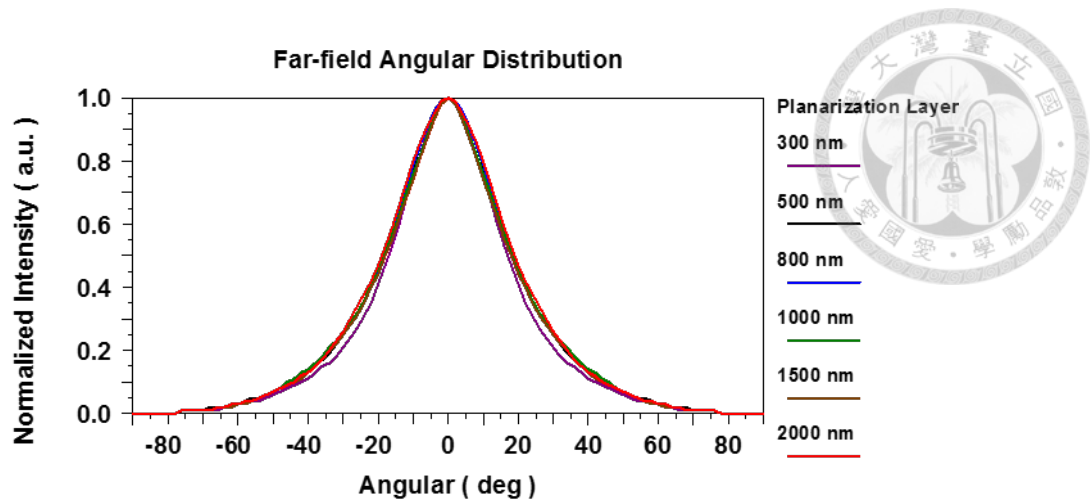


(e).Device # 5' 聚焦在 $f = 2000 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 1500 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 14^\circ$

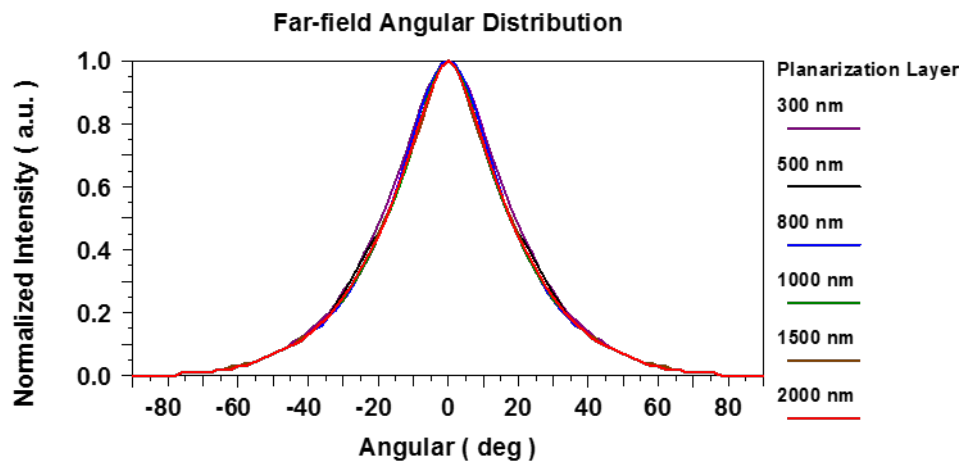
圖 3-3 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 在 OLED 不同平坦層厚度對出光遠場角度分佈的影響 (a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$



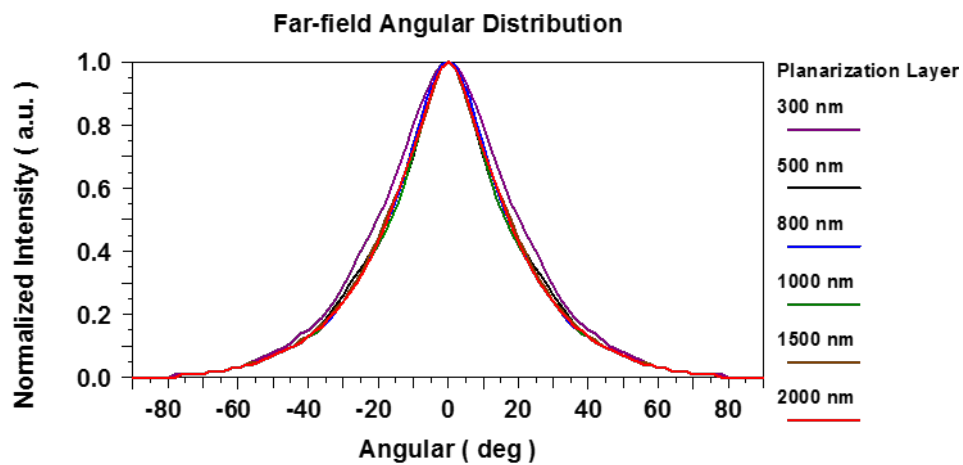
(a).Device # 6' 聚焦在 $f = 500 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 300 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 18^\circ$



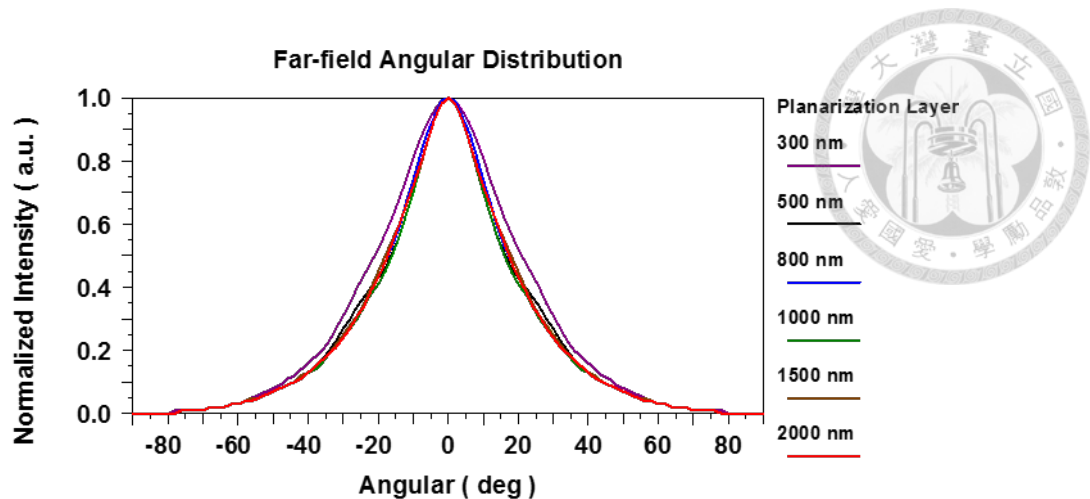
(b).Device # 7' 聚焦在 $f = 800 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 300 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 16.8^\circ$



(c).Device # 8' 聚焦在 $f = 1000 \text{ nm}$ ，平坦層厚度為 1000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 17.5^\circ$



(d).Device # 9' 聚焦在 $f = 1500 \text{ nm}$ ，平坦層厚度為 1000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 16.3^\circ$

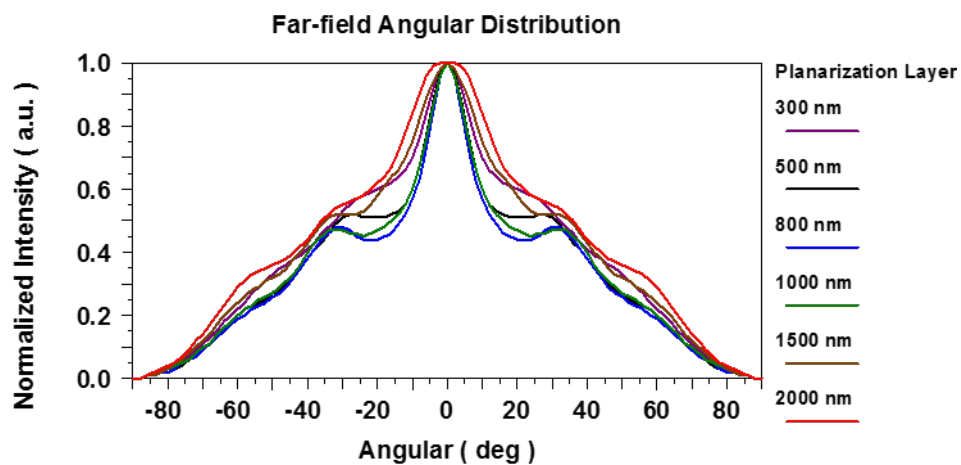


(e).Device # 10' 聚焦在 $f = 2000 \text{ nm}$ ，平坦層厚度為 1000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 15.9^\circ$

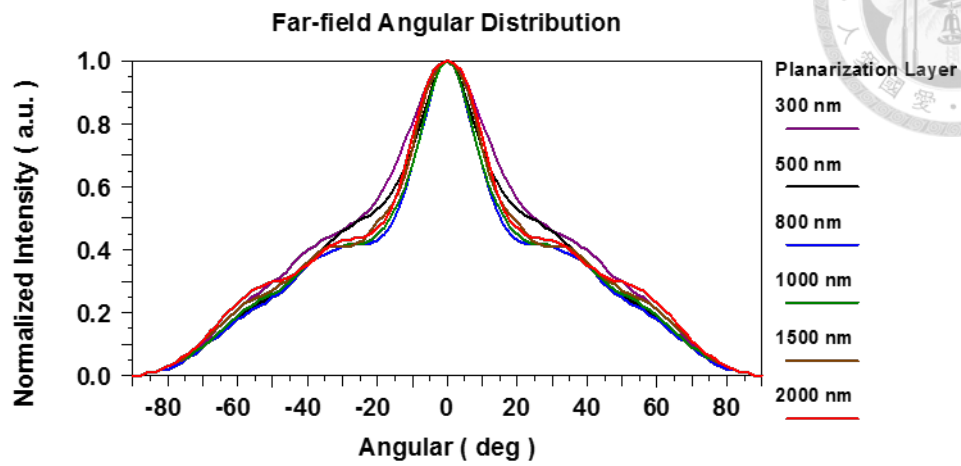
圖 3-4 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 在高指向性 OLED 不同平坦層厚度對出光遠場角度分佈的影響 (a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$
(e) $f = 2000 \text{ nm}$

3.2.2 超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 之遠場角度分佈

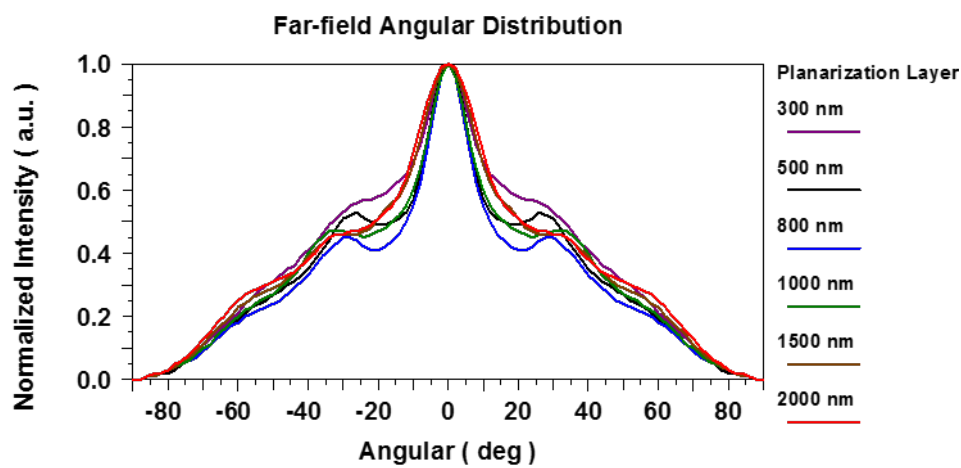
藉由透過設計超穎介面不同的週期，來提升指向性，因為在上節中驗證模擬方法使用的為單一光源且位置是在元件中心，但是真實狀況是一個發光區，所以在我們使實驗中光源位置的模擬，選擇點光源數量為 5，分別在 $x = -1.5$ 、 -0.75 、 0 、 0.75 、 $1.5 \mu\text{m}$ 的位置，為了讓光源對應到焦距，所以採用不同週期參數，以下針對 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 設計的結果。



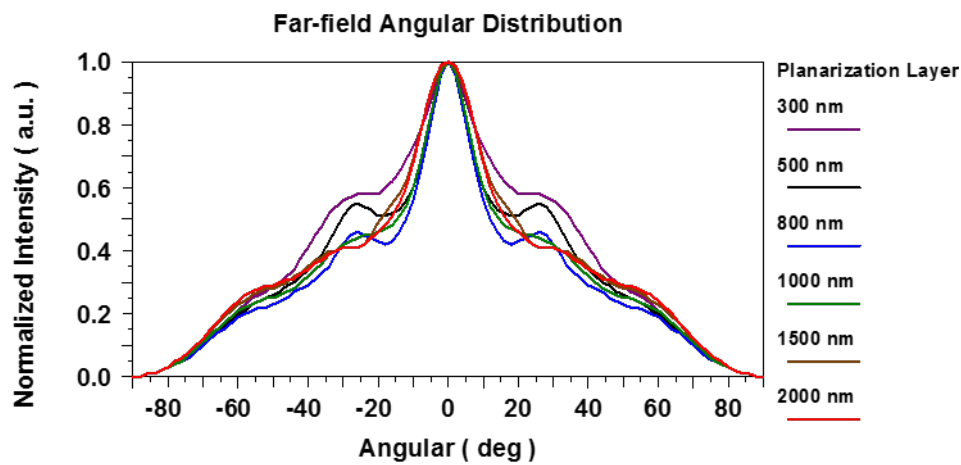
(a).Device # 1'' 聚焦在 $f = 500 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 13^\circ$



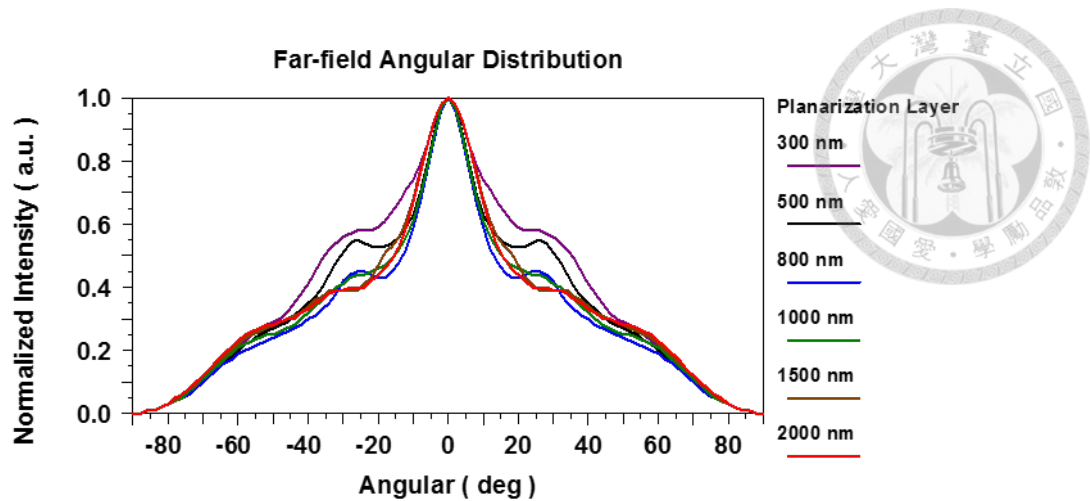
(b).Device # 2'' 聚焦在 $f = 800 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 15.1^\circ$



(c).Device # 3'' 聚焦在 $f = 1000 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 11^\circ$

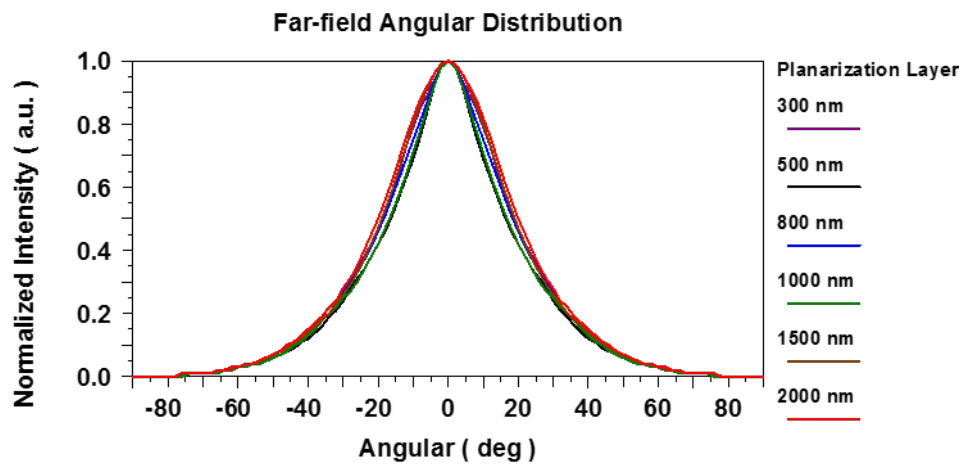


(d).Device # 4'' 聚焦在 $f = 1500 \text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 11.5^\circ$

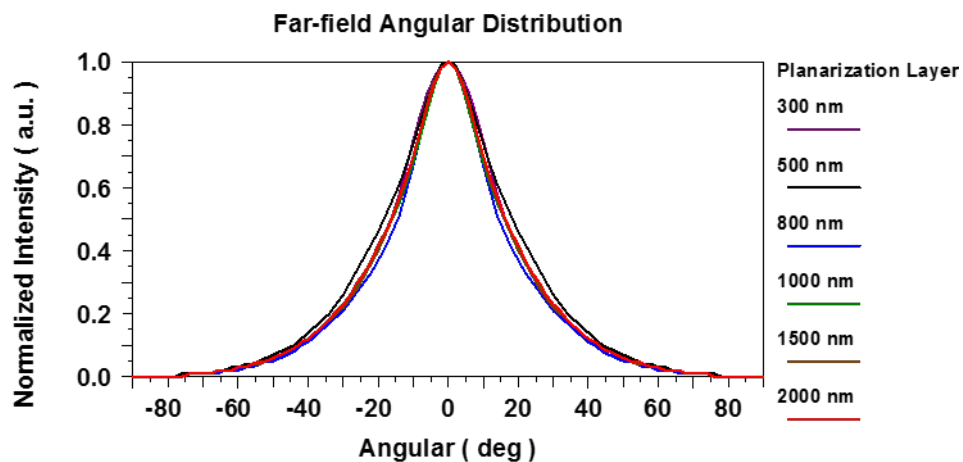


(e).Device # 5” 聚焦在 $f=2000\text{ nm}$ ，當平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 12.5^\circ$

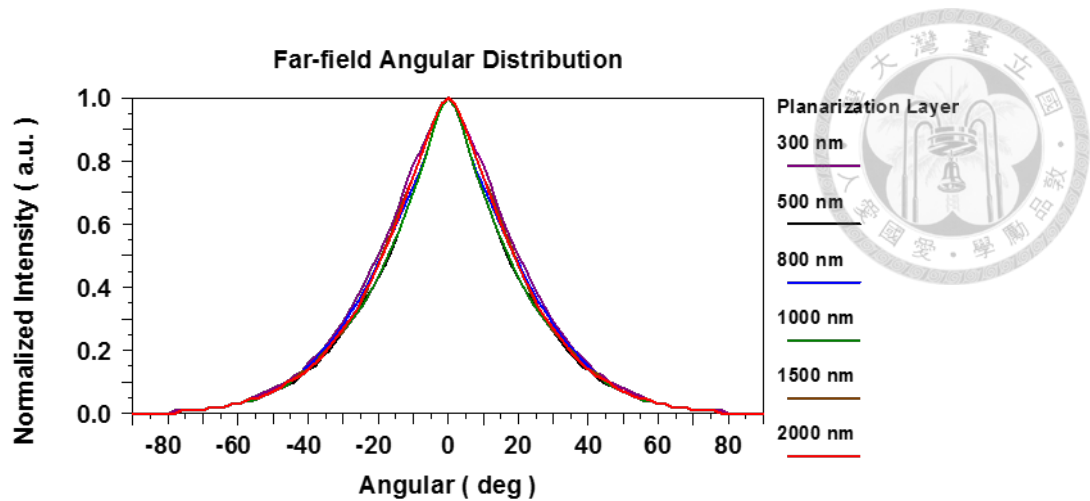
圖 3-5 不同焦距的超穎介面週期結構 $T=0.9\text{ }\mu\text{m}$ 在 OLED 不同平坦層厚度之遠場角度分佈 (a) $f=500\text{ nm}$ (b) $f=800\text{ nm}$ (c) $f=1000\text{ nm}$ (d) $f=1500\text{ nm}$ (e) $f=2000\text{ nm}$



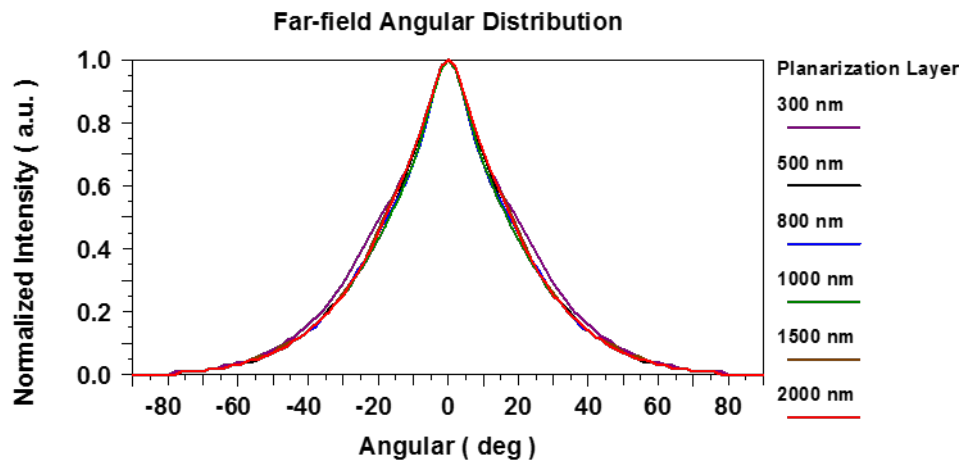
(a).Device # 6” 聚焦在 $f=500\text{ nm}$ ，平坦層厚度為 300 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 16.3^\circ$



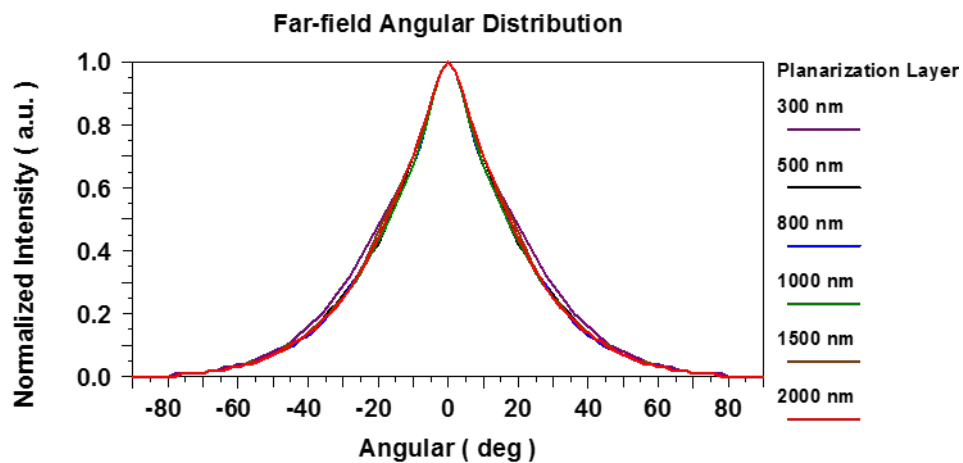
(b).Device # 7” 聚焦在 $f=800\text{ nm}$ ，平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 14.1^\circ$



(c).Device # 8” 聚焦在 $f = 1000 \text{ nm}$ ，平坦層厚度為 500 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 16.8^\circ$



(d).Device # 9” 聚焦在 $f = 1500 \text{ nm}$ ，平坦層厚度為 1000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 16.7^\circ$



(e).Device # 10” 聚焦在 $f = 2000 \text{ nm}$ ，平坦層厚度為 1000 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 16.7^\circ$

圖 3-6 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 在高指向性 OLED 不同平坦層厚度之遠場角度分佈 (a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$



3.3 不同週期的超穎介面結構對出光效率之影響

3.3.1 超穎介面結構之出光效率

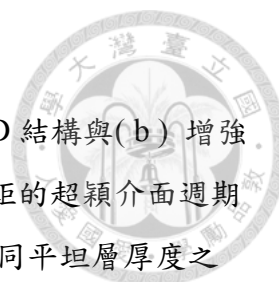
在本研究中，模擬邊界在第二章中有說明是使用 PML，在此模擬的元件大小為 $4\mu\text{m}$ ，即可視為整個元件只有一個週期。在 3.3.2 超穎介面週期結構 $T = 1.5\mu\text{m}$ 與 3.3.3 超穎介面週期結構 $T = 0.9\mu\text{m}$ 小節中，會比較超穎介面有週期結構 $T = 1.5\mu\text{m}$ 與 $T = 0.9\mu\text{m}$ 時，在不同平坦層厚度在玻璃基板中的出光效率。

在表 3-1 中，比較了同焦距的超穎介面在 OLED 結構與增強指向性 OLED 結構的出光效率，會發現隨著平坦層厚度的增加，使得出光效率下降。

(a)		OLED 結構 Efficiency (into glass)					
Device		#ref 1	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
MS_f (nm)		-	500	800	1000	1500	2000
平坦層厚度 (nm)	300	43.55%	31.18%	30.03%	29.20%	29.92%	28.30%
	500	36.70%	29.35%	28.15%	27.67%	28.85%	26.99%
	800	33.47%	26.83%	26.57%	26.15%	26.96%	25.33%
	1000	31.30%	26.30%	25.43%	25.43%	25.76%	24.22%
	1500	28.30%	24.12%	23.29%	23.29%	23.90%	22.01%
	2000	26.14%	22.27%	21.91%	21.91%	22.71%	21.08%

(b)		增強指向性 OLED 結構 Efficiency (into glass)					
Device		#ref 2	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10
MS_f (nm)		-	500	800	1000	1500	2000
平坦層厚度 (nm)	300	33.04%	21.44%	20.27%	19.02%	20.33%	20.58%
	500	21.59%	20.78%	19.36%	18.48%	19.96%	19.41%
	800	29.18%	20.40%	20.06%	17.99%	18.85%	19.10%
	1000	22.44%	20.21%	19.16%	17.21%	18.54%	18.53%
	1500	22.68%	19.35%	18.54%	16.96%	18.16%	18.21%
	2000	22.24%	18.66%	18.30%	16.71%	18.07%	18.09%

表 3-1 不同焦距的超穎介面在 (a) OLED 結構與 (b) 增強指向性 OLED 結構在不同平坦層厚度之出光效率比較表



3.3.2 超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 之出光效率

表 3-2 不同焦距的超穎介面週期結構為 $1.5 \mu\text{m}$ 的 (a) OLED 結構與 (b) 增強指向性 OLED 結構在不同平坦層厚度之出光效率比較表不同焦距的超穎介面週期結構為 $1.5 \mu\text{m}$ 的 (a) OLED 結構與 (b) 增強指向性 OLED 在不同平坦層厚度之出光效率比較表，可觀察到平坦層厚度越厚，部份能量可能損失，推測是出元件大角度的光被邊界吸收，沒有被接收器所接收到。

從數據中觀察到與表 3-1 有一樣的趨勢，效率會隨著平坦層的厚度增加而下降，比較表 3-2 的 (a) 與 (b)，發現透過增強指向性 OLED 結構，可以減少出光效率下降的比率

(a)		OLED 結構 Efficiency (into glass)					
Device		#ref 1	# 1'	# 2'	# 3'	# 4'	# 5'
MS_f (nm)		-	500	800	1000	1500	2000
平坦層厚度 (nm)	300	-	29.55%	28.79%	30.52%	29.49%	27.98%
	500	-	28.11%	26.96%	28.57%	27.77%	26.56%
	800	-	24.82%	25.83%	27.40%	26.99%	25.73%
	1000	-	24.45%	24.64%	26.39%	25.54%	24.24%
	1500	-	23.8%	22.50%	23.46%	22.95%	21.81%
	2000	-	20.88%	21.11%	22.09%	21.79%	20.70%

(b)		增強指向性 OLED 結構 Efficiency (into glass)					
Device		#ref 2	# 6'	# 7'	# 8'	# 9'	# 10'
MS_f (nm)		-	500	800	1000	1500	2000
平坦層厚度 (nm)	300	-	22.82%	21.37%	21.67%	19.43%	19.24%
	500	-	21.60%	19.31%	20.24%	18.74%	18.83%
	800	-	20.80%	20.54%	19.98%	18.48%	18.36%
	1000	-	20.36%	19.00%	19.43%	17.95%	17.97%
	1500	-	19.46%	18.84%	18.77%	17.23%	17.31%
	2000	-	18.97%	18.59%	18.61%	17.06%	17.19%

表 3-2 不同焦距的超穎介面週期結構為 $1.5 \mu\text{m}$ 的 (a) OLED 結構與 (b) 增強指向性 OLED 結構在不同平坦層厚度之出光效率比較表

3.3.3 超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 之出光效率

在上一章節發現藉由增強指向性 OLED 結構解決平坦層厚度對於出光後角度分佈的影響，在此我們討論在超穎結構有週期性 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 時的出光效率，可由表 3-3 不同焦距的超穎介面週期結構 $0.9 \mu\text{m}$ 的 (a) OLED 結構與 (b) 增強指向性 OLED 結構在不同平坦層厚度之出光效率比較表中所得到的數據，找出一組最佳的參數。

(a)		OLED 結構 Efficiency (into glass)					
Device		#ref 1	# 1''	# 2''	# 3''	# 4''	# 5''
MS_f (nm)		-	500	800	1000	1500	2000
平坦層厚度 (nm)	300	-	29.81%	31.42%	28.63%	29.16%	29.23%
	500	-	27.99%	30.07%	26.87%	26.84%	26.93%
	800	-	26.14%	28.18%	25.81%	25.83%	25.94%
	1000	-	25.38%	27.23%	24.83%	24.64%	24.77%
	1500	-	23.58%	25.28%	22.87%	22.58%	22.71%
	2000	-	22.04%	23.71%	21.53%	21.25%	21.38%

(b)		增強指向性 OLED 結構 Efficiency (into glass)					
Device		#ref 2	# 6''	# 7''	# 8''	# 9''	# 10''
MS_f (nm)		-	500	800	1000	1500	2000
平坦層厚度 (nm)	300	-	21.70%	22.81%	21.67%	19.16%	19.30%
	500	-	21.33%	20.24%	20.24%	18.87%	19.04%
	800	-	20.77%	21.48%	19.98%	19.05%	19.30%
	1000	-	20.58%	20.07%	19.43%	18.46%	18.69%
	1500	-	19.84%	19.92%	18.77%	17.77%	18.01%
	2000	-	19.17%	19.71%	18.61%	17.52%	17.76%

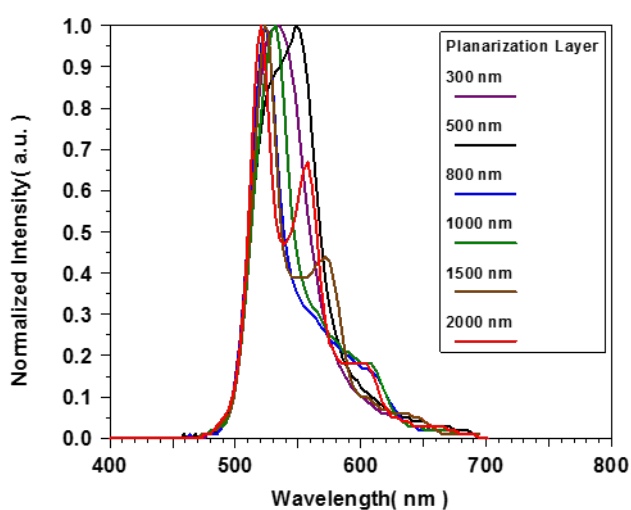
表 3-3 不同焦距的超穎介面週期結構 $0.9 \mu\text{m}$ 的 (a) OLED 結構與 (b) 增強指向性 OLED 結構在不同平坦層厚度之出光效率比較表



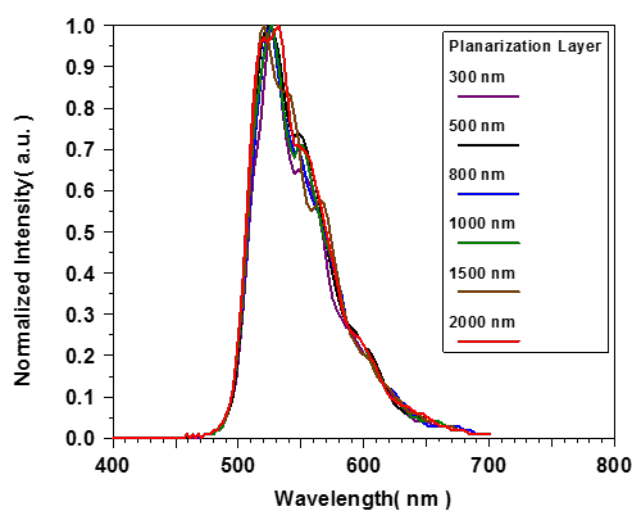
3.4 不同週期的超穎介面結構對發光頻譜之影響

3.4.1 超穎介面結構之發光頻譜

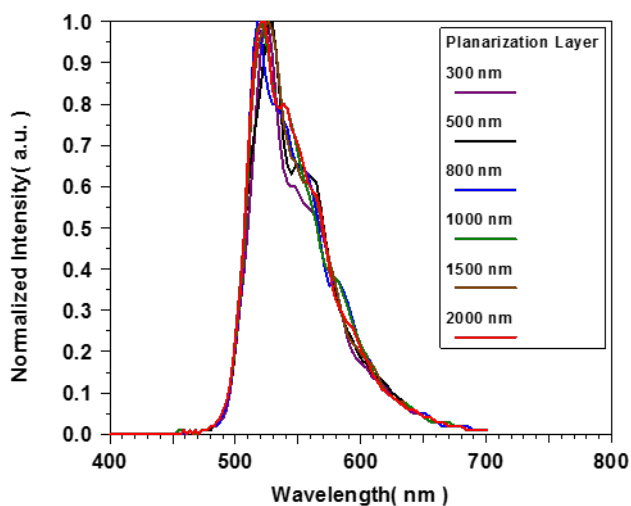
圖 3-7 與圖 3-8 為 OLED 與高指向性 OLED 在超穎介面之發光頻譜，可以觀察出藉由增加光源的指向性，讓波長較不會有偏移的現象。除了 Device #ref 1 與 Device #ref 2 沒有超穎介面的平面結構，可能會受到共振腔效應的影響，而導致波長有明顯的偏移現象。



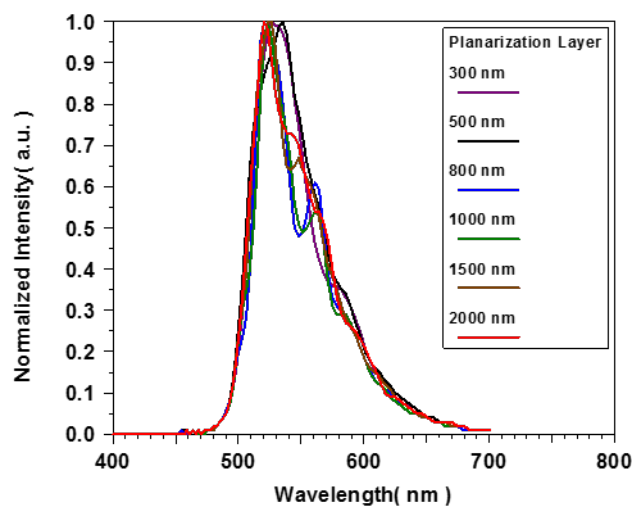
(a) Device #ref 1



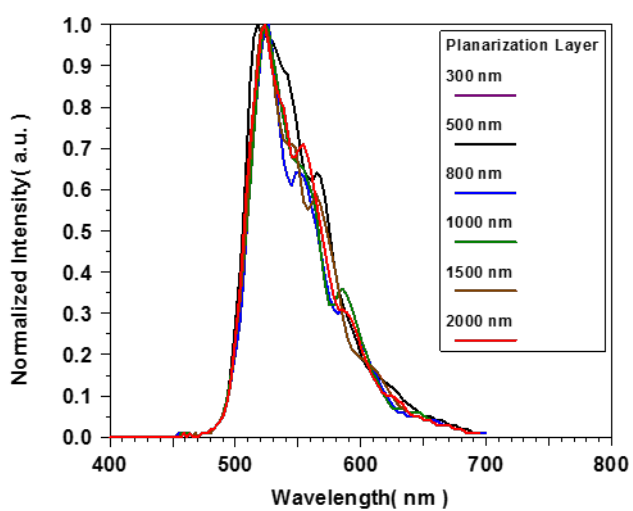
(b) Device # 1



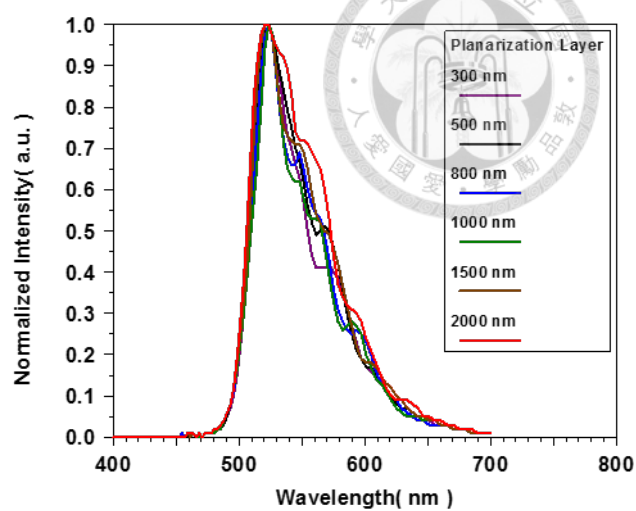
(c) Device # 2



(d) Device # 3

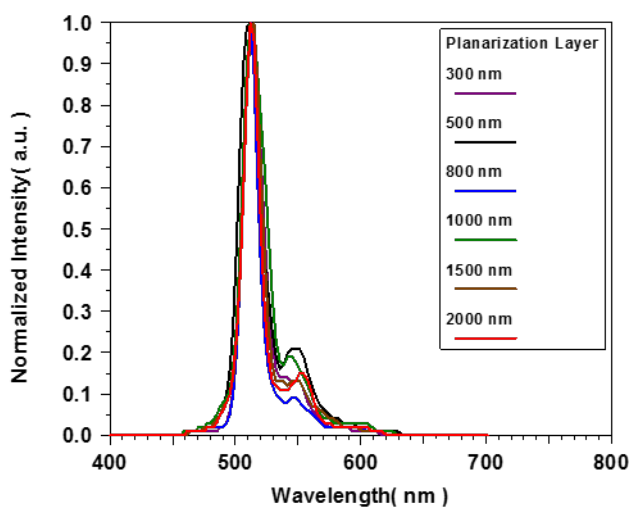


(e) Device # 4

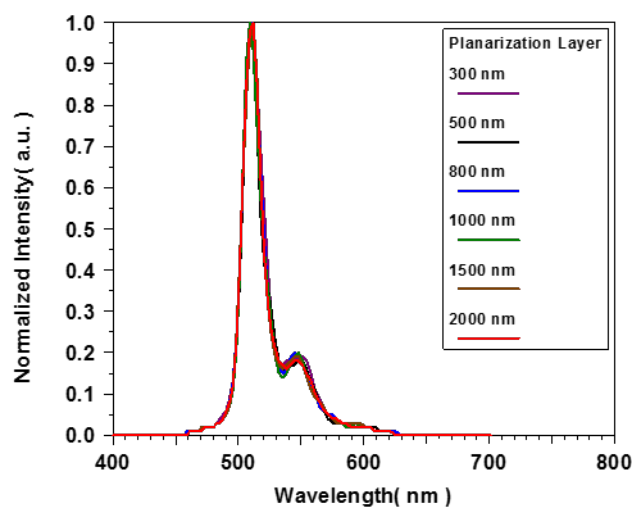


(f) Device # 5

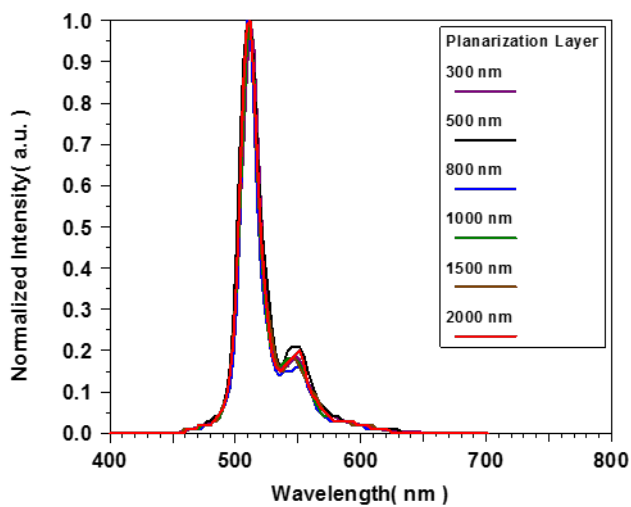
圖 3-7 不同焦距的超穎介面在 OLED 不同平坦層厚度之頻譜(a)沒有超穎介面(b) $f = 500 \text{ nm}$ (c) $f = 800 \text{ nm}$ (d) $f = 1000 \text{ nm}$ (e) $f = 1500 \text{ nm}$ (f) $f = 2000 \text{ nm}$



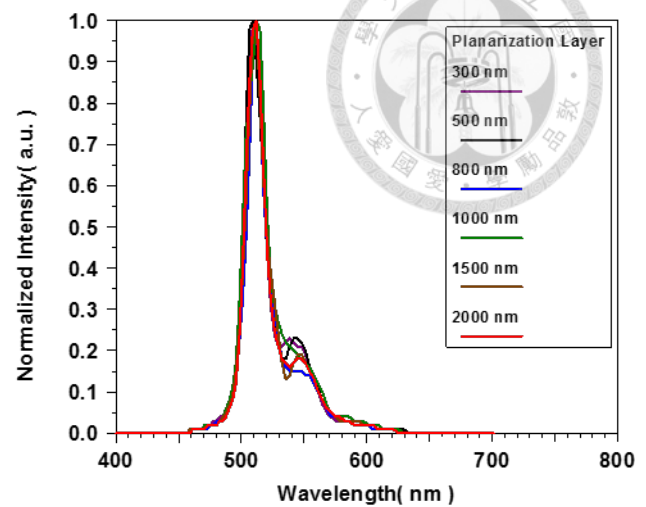
(a) Device #ref 2



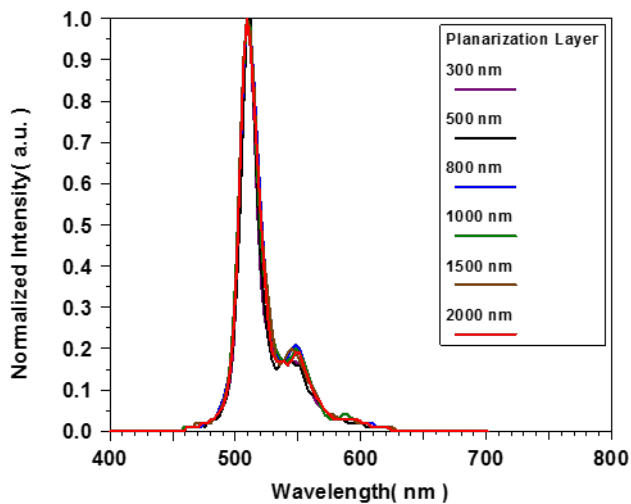
(b) Device # 6



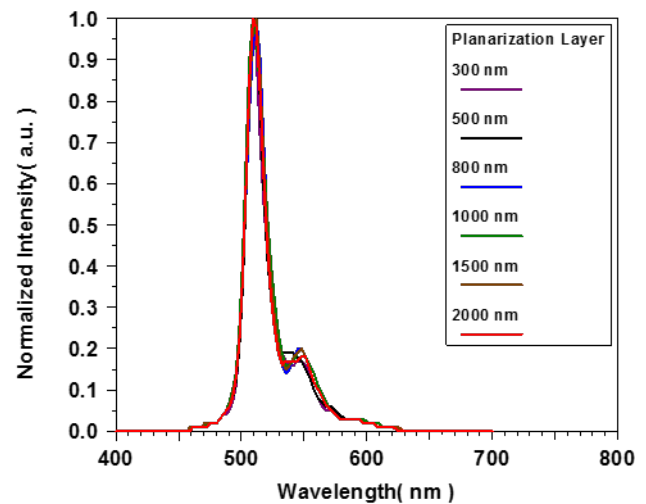
(c) Device # 7



(d) Device # 8



(e) Device # 9



(f) Device # 10

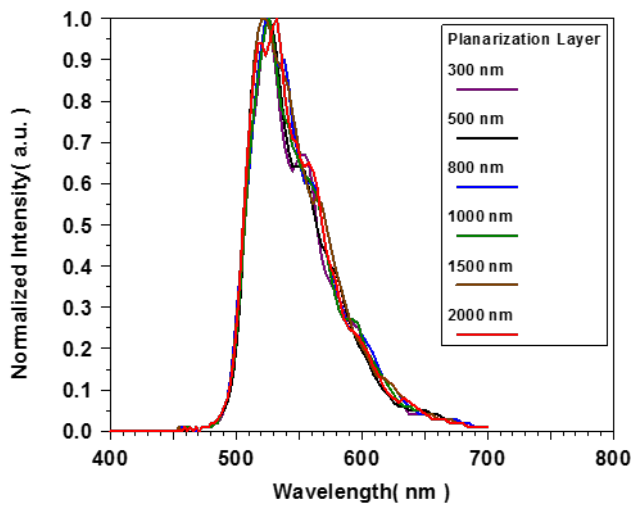
圖 3-8 不同焦距的超穎介面在高指向性 OLED 不同平坦層厚度之頻譜(a)沒有超穎介面

(b) $f = 500 \text{ nm}$ (c) $f = 800 \text{ nm}$ (d) $f = 1000 \text{ nm}$ (e) $f = 1500 \text{ nm}$ (f) $f = 2000 \text{ nm}$

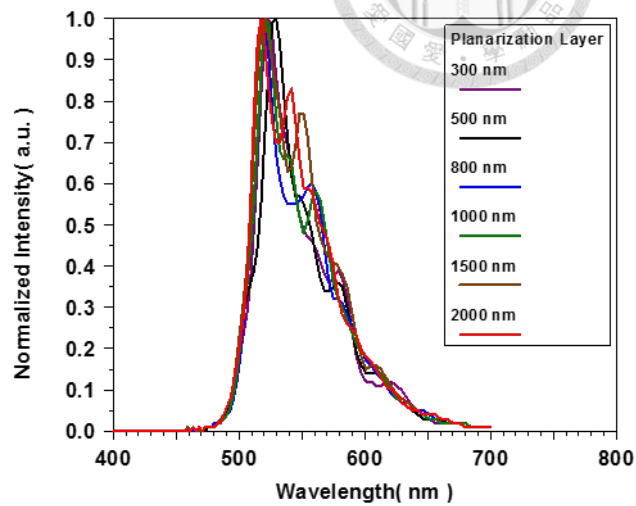
3.4.2 超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 之頻譜

圖 3-9 與圖 3-10 為超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ ，分別在 OLED 與高指向性 OLED 的發光頻譜，在上節的遠場角度分佈中，可觀察到在 OLED 中，平坦層厚度影響較大，在圖 3-9 也可以明顯觀察到在 OLED 中，頻譜在同一個 Device 隨著平坦厚度的變化而變化，但與圖 3-7 相比，藉由超穎介面有週期結構讓中心波長

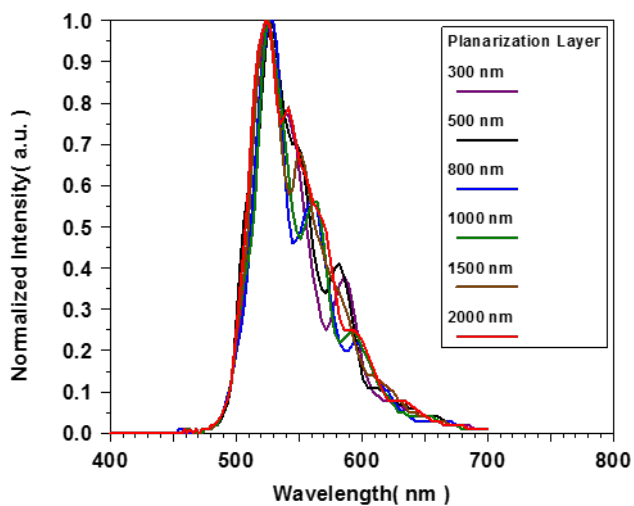
的偏移減小。在圖 3-10 中，可以藉由增加 OLED 的指向性，來減少平坦層厚度改變對頻譜的影響。



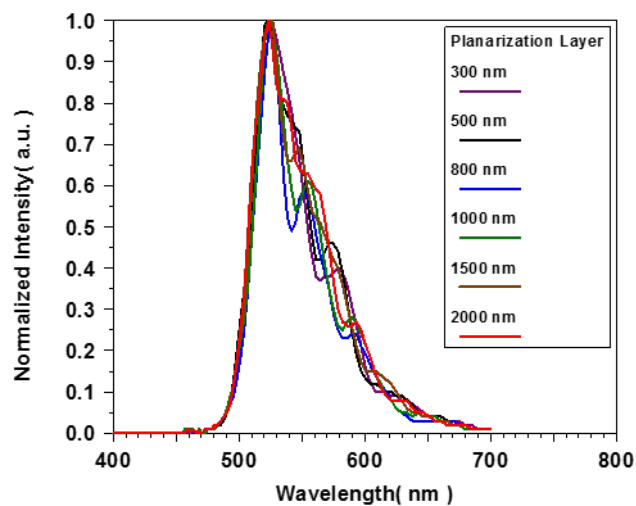
(a) Device # 1'



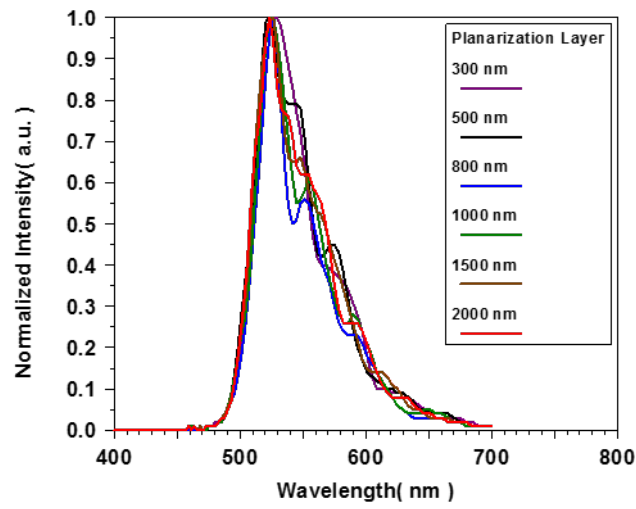
(b) Device # 2'



(c) Device # 3'

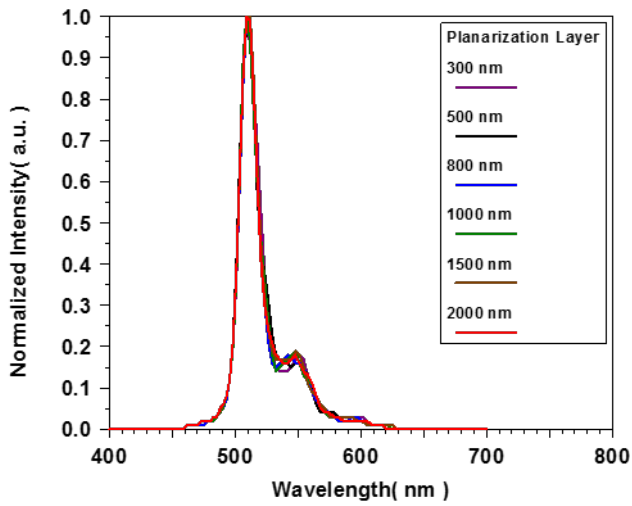


(d) Device # 4'

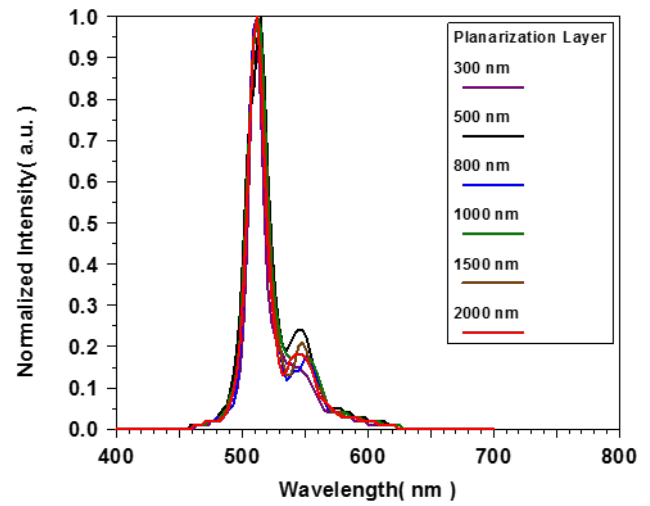


(e) Device # 5'

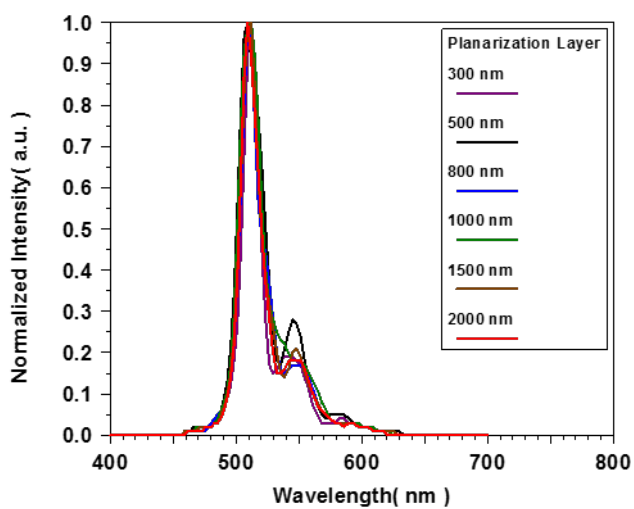
圖 3-9 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 在 OLED 不同平坦層厚度之頻譜 (a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$



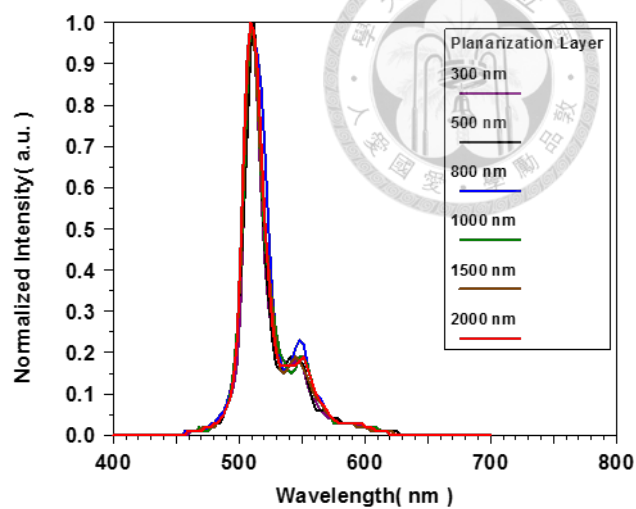
(a) Device # 6'



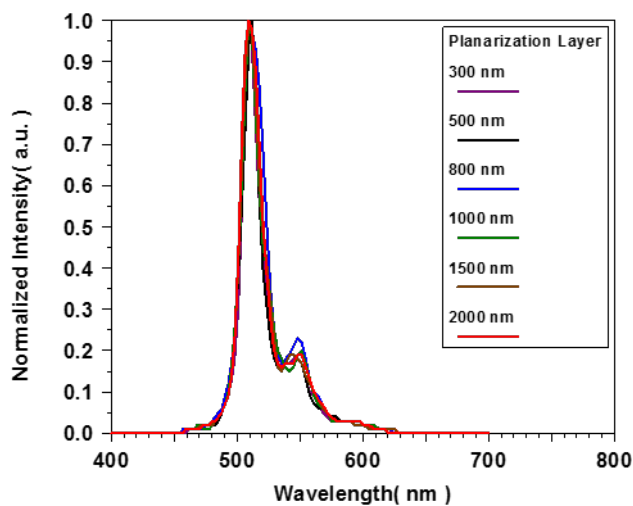
(b) Device # 7'



(c) Device # 8'



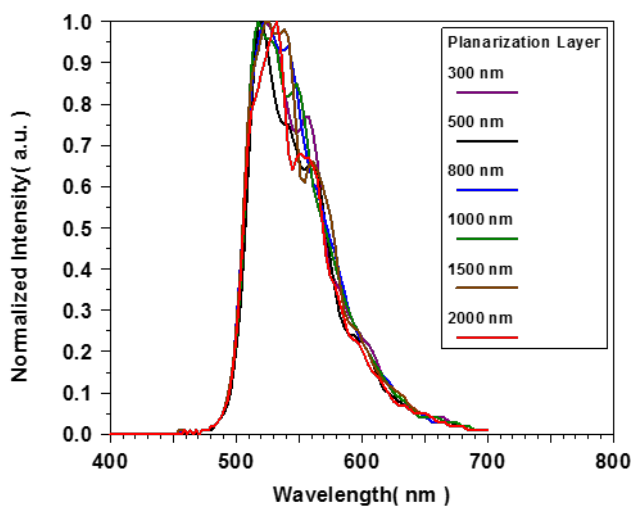
(d) Device # 9'



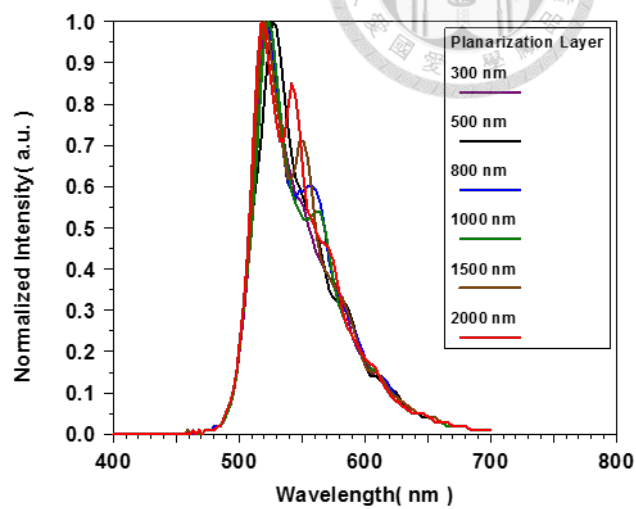
(e) Device # 10'

圖 3-10 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 在高指向性 OLED 不同平坦層厚度之頻譜 (a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$

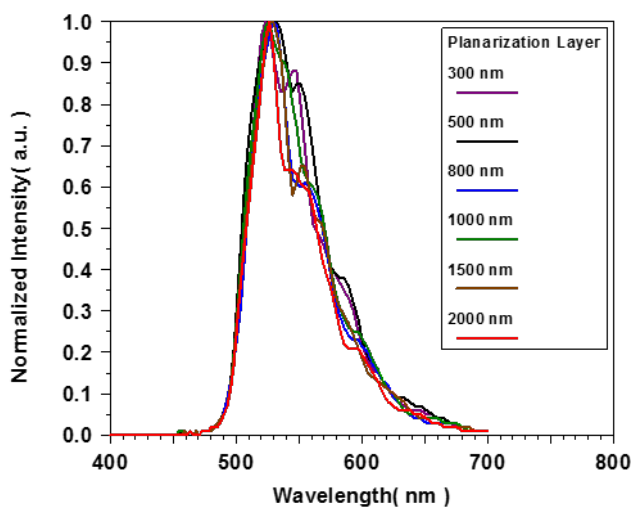
3.4.3 超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 之頻譜



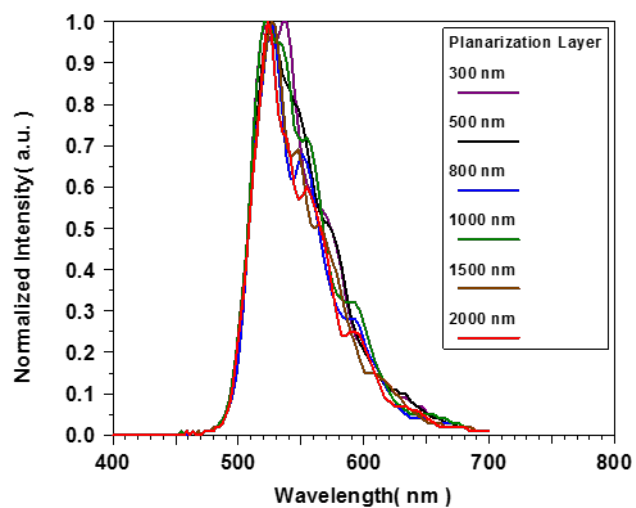
(a) Device # 1''



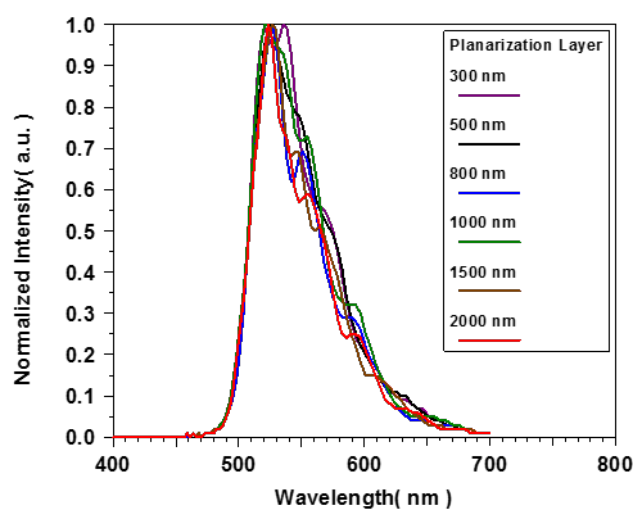
(b) Device # 2''



(c) Device # 3''

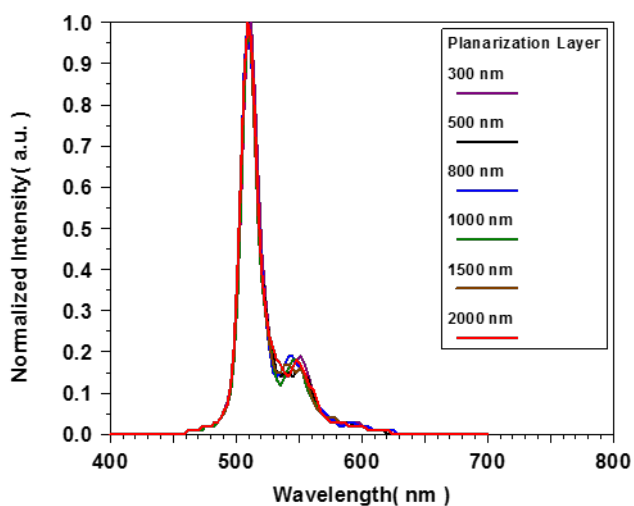


(d) Device # 4''

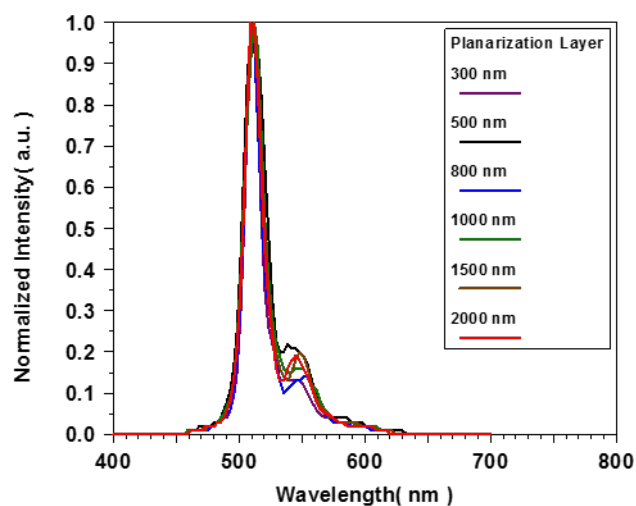


(e) Device # 5''

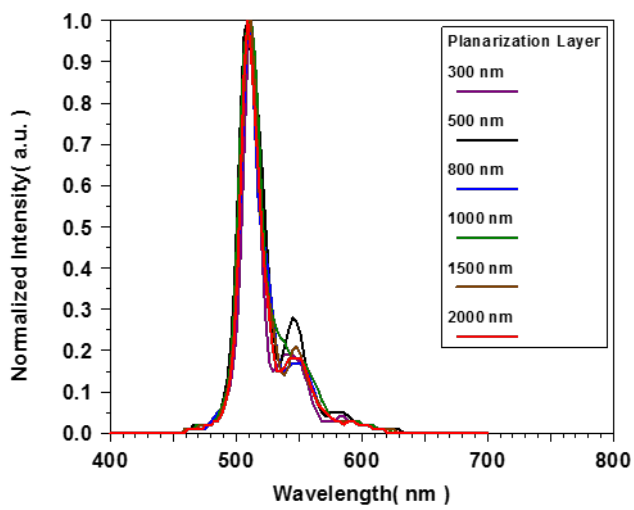
圖 3-11 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 在 OLED 不同平坦層厚度之頻譜 (a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$



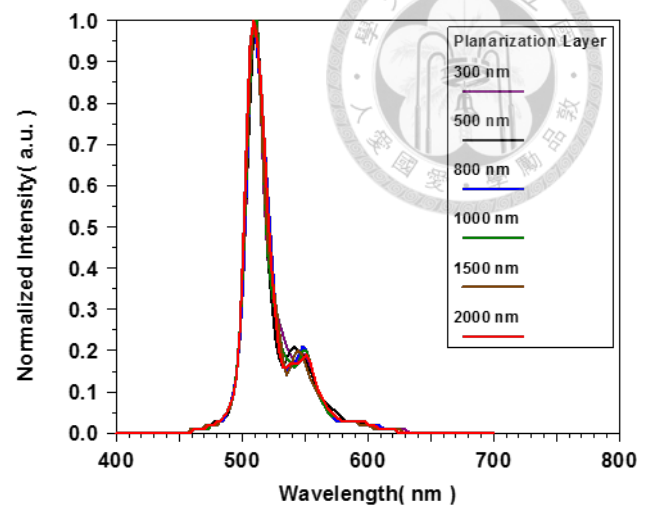
(a) Device # 6''



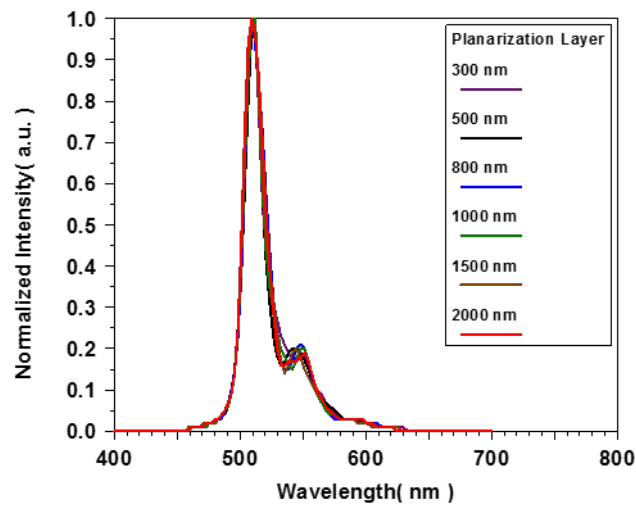
(b) Device # 7''



(c) Device # 8''



(d) Device # 9''



(e) Device # 10''

圖 3-12 不同焦距的超穎介面週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 在高指向性 OLED 不同平坦層厚度之頻譜 (a) $f = 500 \text{ nm}$ (b) $f = 800 \text{ nm}$ (c) $f = 1000 \text{ nm}$ (d) $f = 1500 \text{ nm}$ (e) $f = 2000 \text{ nm}$

第四章 結論與未來展望



4.1 結論

本研究以反射式且高指向性 OLED，結合超穎介面的結構，以模擬方式成功提升出光之指向性，做為裸眼式立體顯示器之光源。

以 FDTD 模擬電磁波的傳播過程，使用光學模擬軟體來調變不同參數，模擬分析 OLED 與高指向性 OLED 在不同週期的 Metasurface 結構之遠場角度分佈、出光效率及發光頻譜。

對於超穎介面之結構參數進行最佳化設計，也對各項參數之間進行詳細地分析，再經由 OLED 膜層結構適當的設計，顯現能夠增加出光指向性並且增加原本 OLED 光源之指向性，更能夠減少平坦層厚度對於出光角度分佈之影響，提升穩定性，這將會是一大優勢。

因為不同材料中的折射率不同，所以光在行徑的等效焦距會與當初所推測有誤差，所以我們掃描參數範圍為平坦層厚度 300、500、800、1000、1500 與 2000 nm，超穎介面焦距 $f = 500、800、1000、1500$ 與 2000 nm 以及適當週期性變化 $T = 1.5 \mu\text{m}$ 與 $T = 0.9 \mu\text{m}$ 後，找出最佳值為 Device # 7” 使用超穎介面焦距 $f = 800$ nm 週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ ，在平坦層厚度為 800 nm 時， $\text{FWHM} = \pm 14.1^\circ$ ，且大於 $\pm 30^\circ$ 的強度有效降低，達成聚焦的效果。

對於目前高指向性 OLED 還是有一部分的上發光是沒有經過底下超穎介面的部份，如圖 4-1，這樣的物理機制導致大角度光的強度還是有一定的發散。但若要達到實際的應用上，還要討論 crosstalk 的問題，使光的指向性更進一步的提升，crosstalk 得以改善，來達到裸眼立體顯示中更好的影像品質。

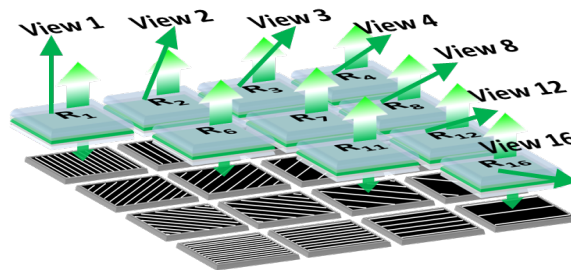


圖 4-1 高指向性 OLED 部分的上發光示意圖



4.2 未來展望

在本文的研究中發現，在未來可以有兩大方向，可以往提升 OLED 指向性的方向去做深度的討論，從模擬與分析中得出更高指向性光源搭配研究的參數數據將會有更窄的半高全寬之遠場角度分佈，如此一來可以使串擾降低，增加裸眼顯示之視域的數目，再經由一層光柵就能使出光達到偏折，如圖 4-2 (a)；另一方面可以朝向出光後的超穎介面去探討，使得出元件的光，再經過一層穿透式超穎介面後，不但能偏折到每個影像所對應之視角，還能有更窄的半高全寬，來實現多視角之裸眼立體顯示，圖 4-2 (b)。

立體顯示技術擁有廣大的市場前景，在智慧型手機日新月異的發展，相信在不久的將來，行動裸眼立體顯示會普及至每個人的生活中。本研究針對此目標提出一些評估與參數設計及未來可研究的方向，本研究的設計方法，對往後的研究有參考性，期望能對全人類科技進步有所貢獻。

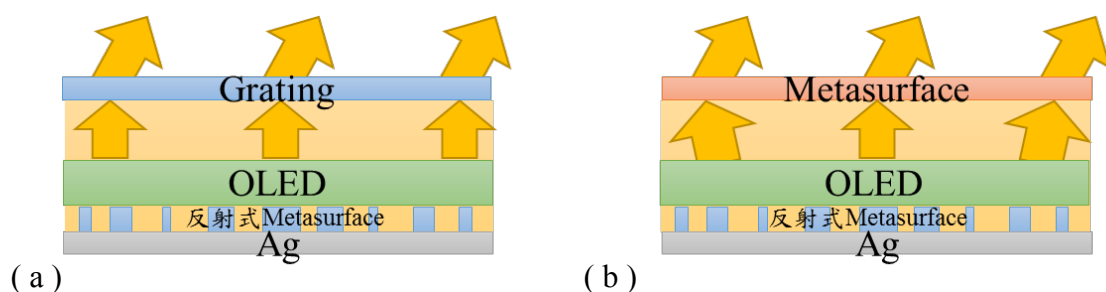
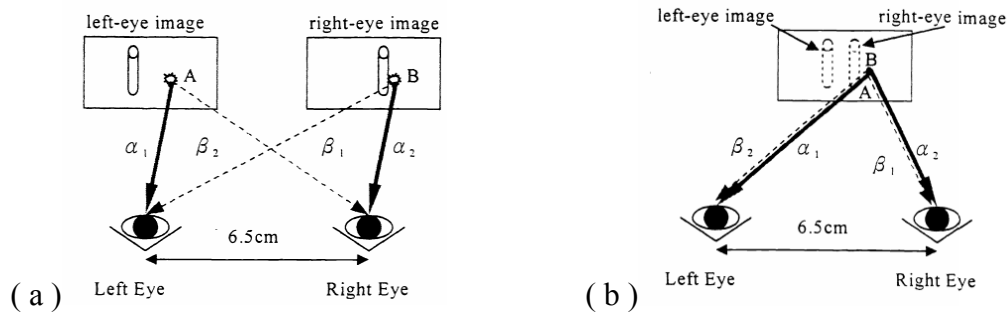


圖 4-2 在元件上方設計結構示意圖(a)Grating 實現偏折(b)穿透式 metasurface 實現聚焦
提升指向性與偏折

附錄



串擾(crosstalk)是指在使用3D立體顯示器時，對每隻眼睛發送單獨的左眼和右眼影像，原本應該是將不同影像發送至正確的眼睛，但眼睛除了接收正確影像的同時，也可能接收到非預期的影像。所以此現象被稱為串擾或重影[30]。而串擾是影響3D顯示器影像品質的主要因素，因位接收到不正確的影像，依照串擾程度的不同，在合成立體影像時會看到疊影或是產生暈眩等，進而降低觀看立體影像時的觀賞品質。



附錄-圖 1 參數示意圖(a)雙重影像(b)單一影像[31]

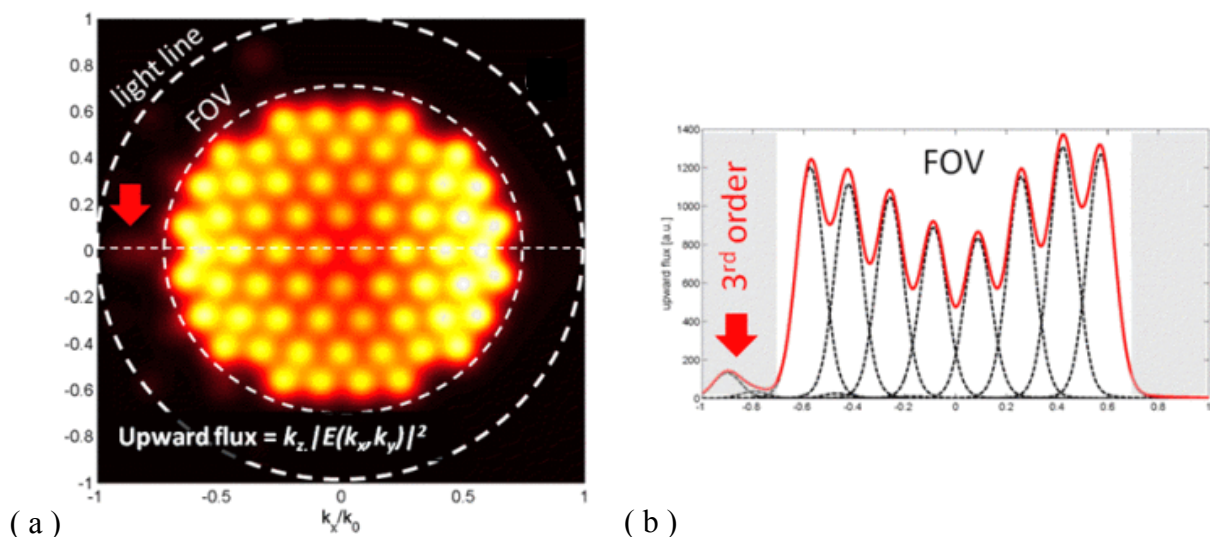
1. 系統串擾(System crosstalk)：來自另一隻眼睛的意外洩漏圖像的程度。如附錄-圖 1 中， α_1 對左眼是正確的影像， α_2 對右眼是正確的影像， β_1 對右眼是不正確的影像， β_2 對左眼是不正確的影像，所以對右眼的串擾值 $\frac{\beta_1}{\alpha_2}$ ，對左眼而言串擾值 $\frac{\beta_2}{\alpha_1}$ ，與顯示的內容無關。

2. 觀看者串擾(Viewer crosstalk)：觀看者感受到的串擾，所以對右眼的串擾值 $\frac{A\beta_1}{B\alpha_2}$ ，對左眼而言串擾值 $\frac{B\beta_2}{A\alpha_1}$ ，多了感受與知覺的部份。

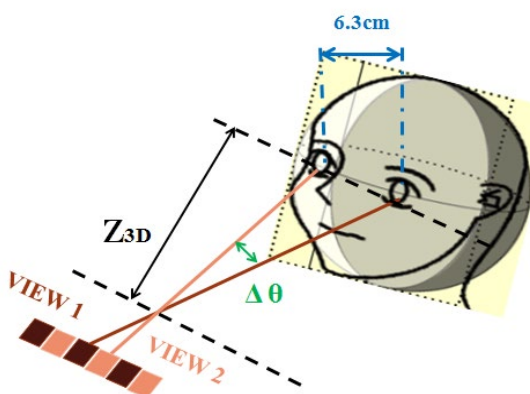
如上述所定義，系統串擾由顯示器決定，而觀看者串擾根據內容有感受與知覺而變化，像是圖像對比度的影響等。[31]這些定義在不同論文的結果也存在些許的差異，可能受立體顯示技術、測量方法、實驗條件和顯示內容之間的差異的影響，或是對於不同使用目的也可能存在不同的可接受的串擾值。[30]

本研究是根據 T. Järvenpää 在 2008 年發表的論文《 Optical characterization of autostereoscopic 3-D displays 》[32]，文中提到對於兩個影像的立體顯示器，人眼可接受的串擾約小於 10 %，將其串擾之計算公式定義為看到不正確影像與看到正確影像的大小比值。本研究將採用該作者所提出的概念來作為裸眼立體顯示器的評估，且根據理論計算後對不同影像數量所需的條件提出一份規格，如下表所示。

而在我們研究動機與目的中，提到 HP Lab 在 2013 論文《 A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display 》[11]，在文中與附錄-圖 2 中看出視場角 (field of view, FOV) 90° ，人眼間距約為 6.3 cm，如附錄-圖 3，為 64 個影像 (8 X 8) 系統，其中每個影像所間格 $\Delta\theta = 10^\circ$ ，計算出所需規格大約 $FWHM = \pm 5^\circ$ 。



附錄-圖 2 (a) LED 准直後的 64 個影像光源 (b) 沿(a)水平軸的虛線橫截面，每個影像光的強度[11]

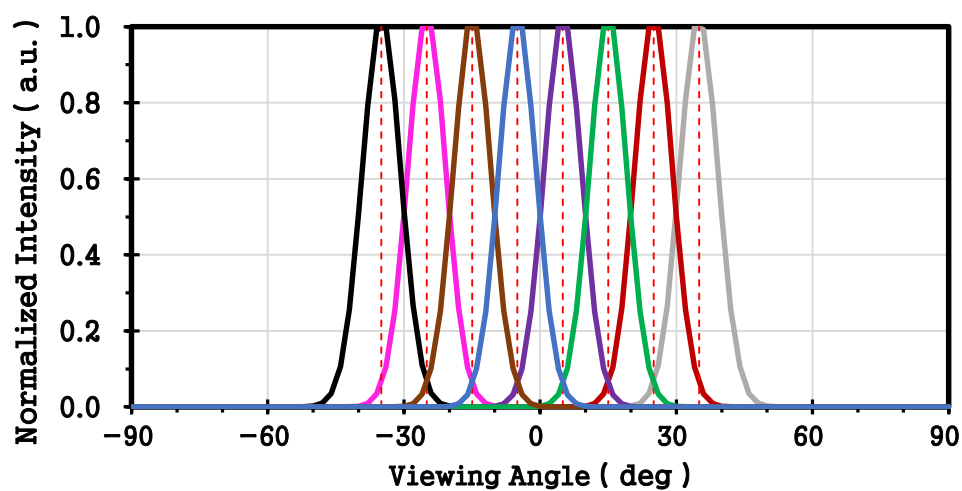


附錄-圖 3 人眼間距約為 6.3 cm 與影像所間格 $\Delta\theta$ 示意圖

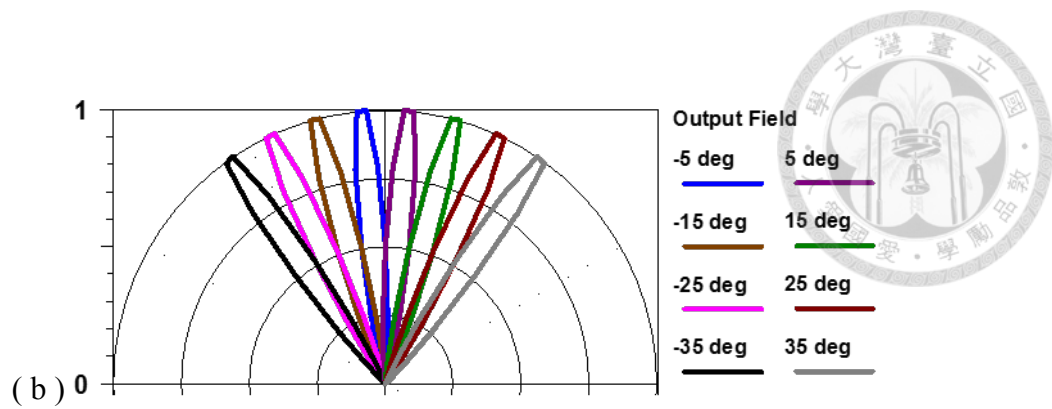
附錄-表 1 不同影像數系統規格評估

Spec	8 x 8 (64) views	4 x 4 (16) views	2 x 2 (4) views
FOV (field of view)	90° (±45°)	90° (±45°)	90° (±45°)
$\Delta\theta$ (Angular separation between views)	10°	20°	35°
Z_{3D} (Stereo distance)	36 cm	17.86 cm	10 cm
FWHM of each beam	air	~10° (±5°)	~20° (±10°)
	n = 1.5	~6.6° (±3.3°)	~24.5° (±12.25°)

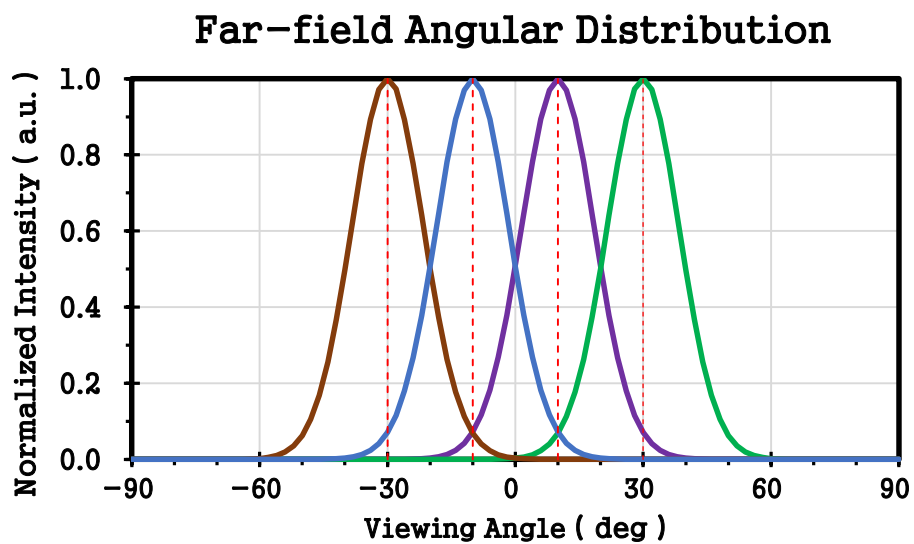
Far-field Angular Distribution



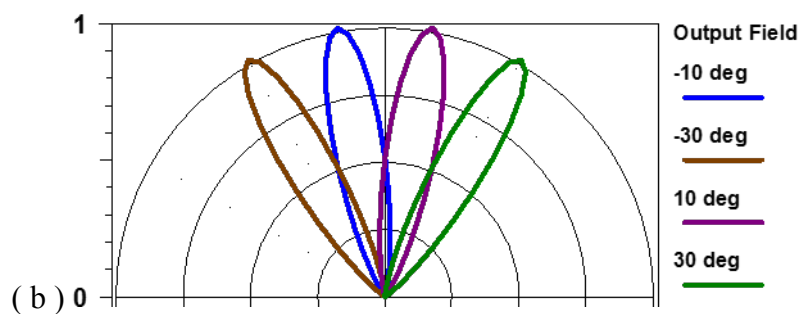
(a)



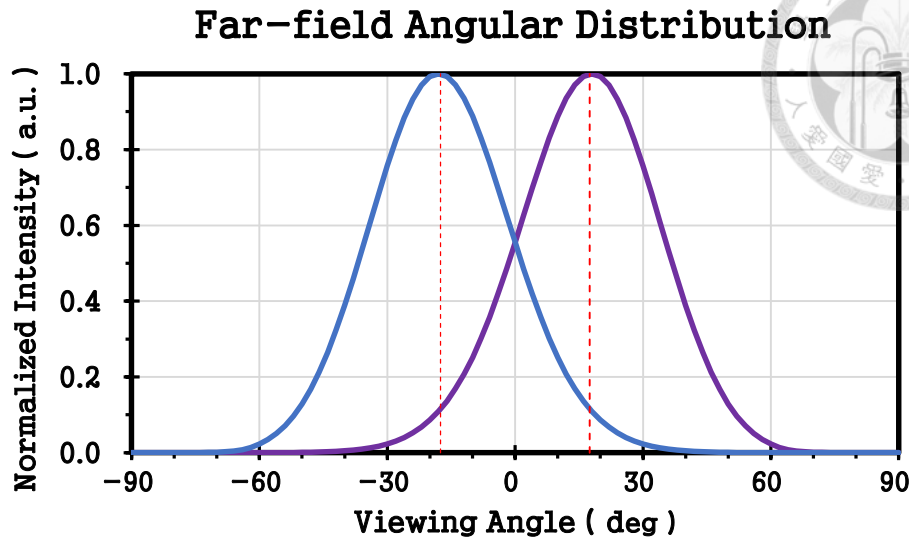
附錄-圖 4 一維 8 個視域數之遠場角度分佈(a)出光角度與強度(b)極座標



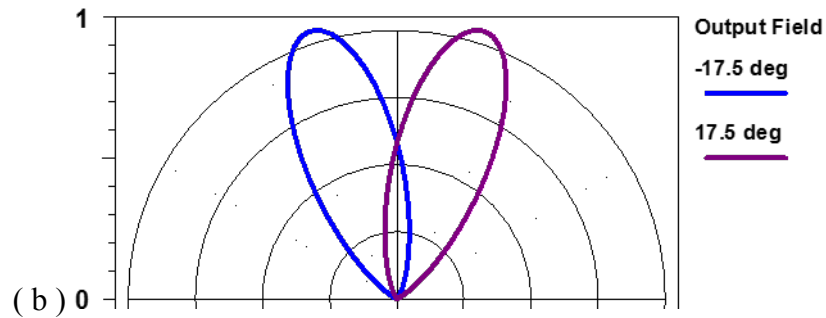
(a)



附錄-圖 5 一維 4 個視域數遠場角度分佈(a)出光角度與強度(b)極座標



(a)

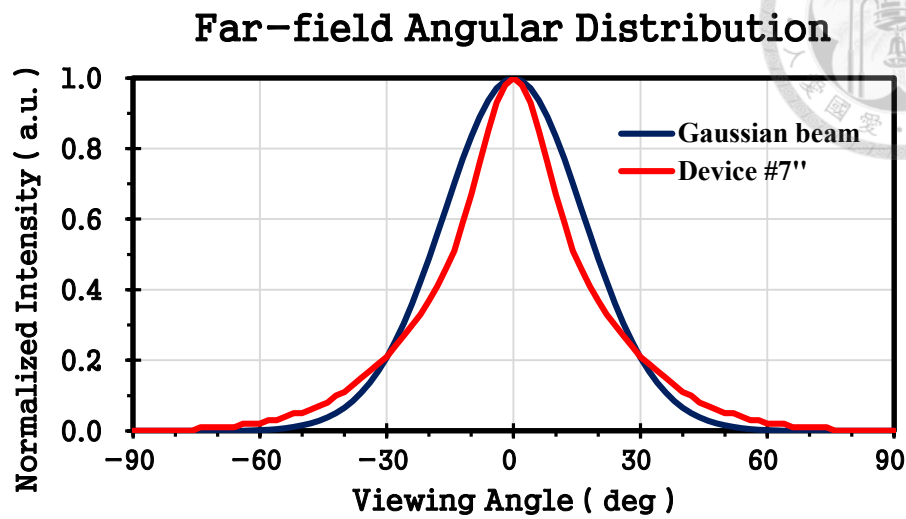


(b)

附錄-圖 6 一維 2 個視域數遠場角度分佈(a)出光角度與強度(b)極座標

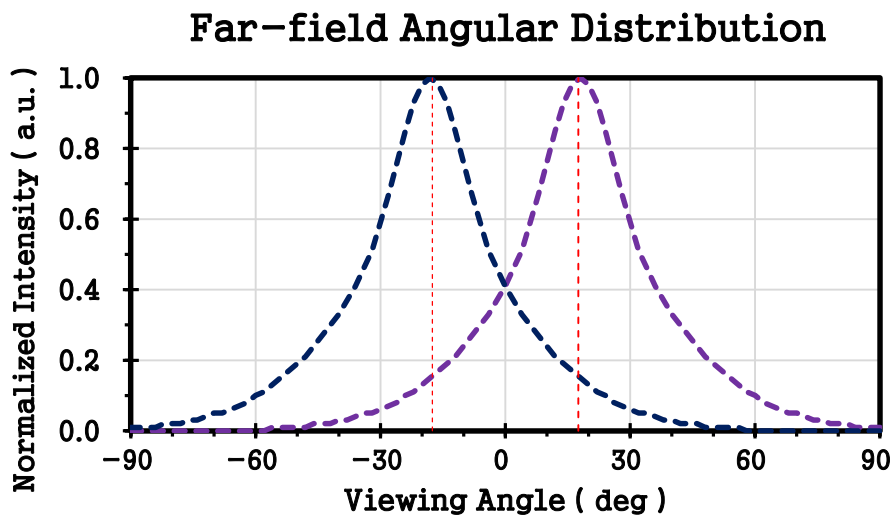
在附錄-圖 4 到 6 中，使用高斯分佈來討論在 $FOV = 90^\circ$ 且 crosstalk 大約 10% 時，不同視域數目所需半高全寬之要求，在附錄-表 1 中列出了所需系統的規格，若 $FWHM = \pm 5^\circ$ 可實現 64 個影像數，或是在能產生 2 個影像數為立體視覺的最低要求，在高斯分佈的 $FWHM$ 大約為 $\pm 19.25^\circ$ 。

下圖為產生 2 個影像數 $FWHM = \pm 19.25^\circ$ 高斯光束遠場分佈與本研究模擬高指向性 OLED 中 Device #7 之比較，可以看出本研究找出最佳值 Device #7 使用超穎介面焦距 $f = 800 \text{ nm}$ 週期結構 $T = 0.9 \mu\text{m}$ ，在平坦層厚度為 800 nm 時， $FWHM = \pm 14.1^\circ$ ，比高斯光束遠場分佈的半高全寬還要窄約 $\pm 5^\circ$ ，確實是有達到聚焦的功能，但大於 30° 的強度分佈與高斯光束相比較大，所以造成 crosstalk 過大的問題。

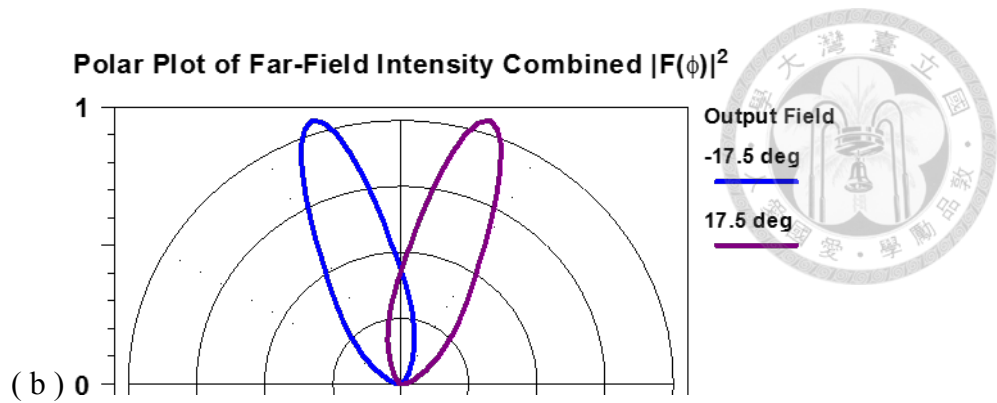


附錄-圖 7 高斯光束遠場分佈與 Device#7 之場型比較

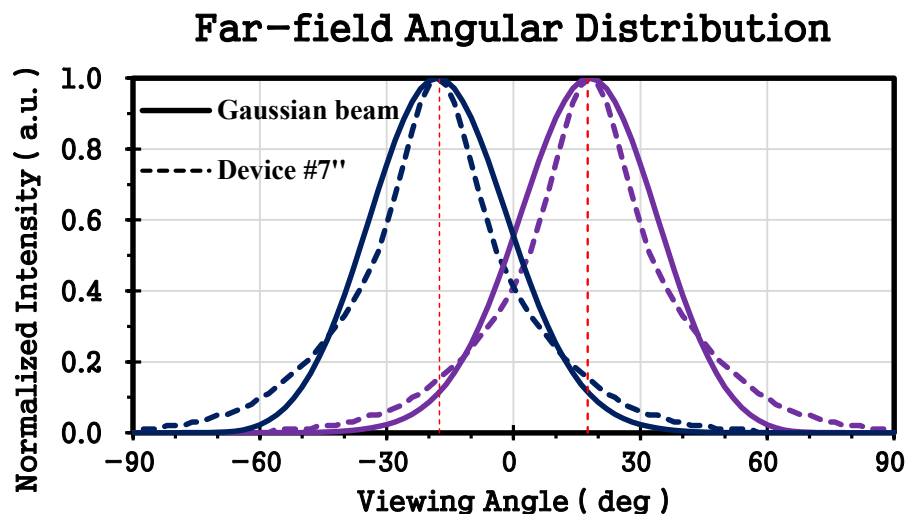
將 Device #7 之結果，偏折到規格中立體顯示的要求 $\pm 17.5^\circ$ ，如附錄-圖 8 中，目前的 crosstalk 為 15%，與文獻中所提到的 10% 相比差 5%，再大角度的部份還有壓低的空間。



(a)



附錄-圖 8 模擬 Device #7''之一維 2 個視域數遠場角度分佈(a)出光角度與強度(b)極座標



附錄-圖 9 高斯光束遠場分佈與 Device #7'' 一維 2 個視域數遠場角度分佈比較


附錄-圖 9 中，實線為 Gaussian beam 之結果，虛線是 Device #7'' 之結果，將理論高斯光束遠場分佈與我們的模擬 Device #7'' 疊合比較，在前面的參數掃描結果，因為元件本身物理機制，有部份上發光是沒有經由下方超穎結構的作用，所以大角度還是有部份的強度分佈，目前 crosstalk 為 15 %。

因為光源會有一個分佈，即使像高指向性的雷射光都有高斯分佈，所以在 3D 立體顯示技術中不可能完全消除系統串擾，但盡可能使串擾可以降低到觀察者不易察覺的程度，使整體 crosstalk 得以改善，來達到裸眼立體顯示中更好的影像品質。

文獻參考



- [1] Geng, Jason. "Three-dimensional display technologies." *Advances in optics and photonics* 5.4 (2013): 456-535.
- [2] Hong, Jisoo, et al. "Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues [Invited]." *Appl. Opt* 50.34 (2011): H87-H115.
- [3] 許精益、黃乙白，「3D 立體顯示技術之發展與研究」，《光學工程》，第九十八期，53~60 頁，2007 年。
- [4] 黃乙白、周秉彥，「3D 漂浮顯示與凌空觸控技術」，《科學發展》，503 期，14~20 頁，2014 年。
- [5] 林晃巖，「試看紅塵的深度：漫談 3D 立體顯示器的發展」，2015 國際光之年(下)-科技發展篇，10~19 頁，2015 年。
- [6] Izmantoko, Y. S., Andriyan Bayu Suksmono, and T. L. Mengko. "Implementation of anaglyph method for stereo microscope image display." *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*. IEEE, 2011.
- [7] 呂怡貞，「戴上眼鏡 看進立體世界」，《科學人雜誌》，科學 Easy Learn 網路板，資訊科技，2012 年 from :
<http://sa.ylib.com/MagArticle.aspx?Unit=easylearn&id=1915>
- [8] SONY, from : <http://store.sony.com.tw/product/KDL-46NX710>
- [9] VIVE 頭戴式顯示器, from : <https://www.vive.com/tw/product/>
- [10] 程治, 工程系, and 大綱. "3D 立體顯示應用產品的現況與未來發展." 摘自: (http://www.digitimes.com.tw/tw/B2B/Seminar/Service/download/0539804240/980424tvc_i_2.pdf). 2009.。
- [11] Fattal, David, et al. "A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display." *Nature* 495.7441 (2013): 348.
- [12] HP Labs develops new Glasses-Free, Wide Angle 3D Screen Technology, from : <http://lightfield-forum.com/2013/04/hp-labs-develops-new-glasses-free-wide-angle-3d-screen-technology/>

- 
- [13] Kollin, Joel S., Stephen A. Benton, and Mary Lou Jepsen. "Real-time display of 3-D computed holograms by scanning the image of an acousto-optic modulator." *Holographic Optics II: Principles and Applications*. Vol. 1136. International Society for Optics and Photonics, 1989.
- [14] Soltan, Parviz, et al. "Laser based 3D volumetric display system." U.S. Patent No. 5,854,613. 29 Dec. 1998.
- [15] 呂怡貞,「丟掉眼鏡 當機不立斷」,《科學人雜誌》,科學 Easy Learn 網路板,資訊科技,2012 年。from :
<http://sa.ylib.com/MagArticle.aspx?Unit=easylearn&id=1916>
- [16] Sullivan, Alan. "58.3: A Solid-state Multi-planar Volumetric Display." *SID symposium digest of technical papers*. Vol. 34. No. 1. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2003.
- [17] Zhao, Zeyu, et al. "The generalized laws of refraction and reflection." *Opto-Electronic Engineering* 44.02 (2017): 129-139.
- [18] Yee, Kane. "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwells equations in isotropic media." *IEEE Transactions on antennas and propagation* 14.3 (1966): 302-307.
- [19] Yu, Nanfang, et al. "Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction." *science* 334.6054 (2011): 333-337.
- [20] 楊光宇, "介面梯度超穎材料之電磁波調控研究," 碩士論文, 國立臺灣大學, 臺灣, 2012.
- [21] Sun, Yan-Yan, et al. "General laws of reflection and refraction for metasurface with phase discontinuity." (2013): 104201-104201.
- [22] Deng, Zi-Lan, et al. "Facile metagrating holograms with broadband and extreme angle tolerance." *Light: Science & Applications* 7.1 (2018): 78.
- [23] Khorasaninejad, Mohammadreza, et al. "Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging." *Science* 352.6290 (2016): 1190-1194.
- [24] Chen, Bo Han, et al. "Ga_N metalens for pixel-level full-color routing at visible light." *Nano letters* 17.10 (2017): 6345-6352.
- [25] Sun, Shulin, et al. "High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces." *Nano letters* 12.12 (2012): 6223-6229.

- 
- [26] Te-Chuan Chen, "Enhancing the color gamut of organic light-emitting devices by employing microcavity structures and color filters," 碩士論文, 國立交通大學, 臺灣, 2012.
- [27] Chen, Chieh-Wei, et al. "Top-emitting organic light-emitting devices using surface-modified Ag anode." *Applied physics letters* 83.25 (2003): 5127-5129.
- [28] 溫健揚, "Numerical Studies on Structural and Optoelectronic Properties of White Organic Light-Emitting Diodes," 碩士論文, 國立彰化師範大學, 2008.
- [29] SONY, Super top emission technology.from :
https://pro.sony/en_HR/technology/oled
- [30] Woods, Andrew J. "Crosstalk in stereoscopic displays: a review." *Journal of Electronic Imaging* 21.4 (2012): 040902.
- [31] Huang, KuoChung, et al. "Measurement of contrast ratios for 3D display." *Input/Output and Imaging Technolgies II*. Vol. 4080. International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [32] Järvenpää, Toni, and Marja Salmimaa. "Optical characterization of autostereoscopic 3-D displays." *Journal of the Society for Information Display* 16.8 (2008): 825-833.
- [33] Wu, Chung-Chih, et al. "Advanced organic light-emitting devices for enhancing display performances." *Journal of Display Technology* 1.2 (2005): 248-266.