

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 Photonics and Optoelectronics

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Taiwan University

Master's Thesis

以微陣列結構提升 Micro-LED 出光效率之低反射二次光學設

計

Low Ambient Light Reflective Secondary Optical Design

Enhancing the Light Extraction Efficiency of Micro-LED via

Micro Array Structure

蔡佑鴻

Yu-Hung Tsai

指導教授:林晃巖

Advisor: Hoang-Yan Lin

中華民國 112 年 10 月

October 2023

誌謝



感謝這些日子來晃巖老師用心的指導，宛如站在巨人的肩膀上，學術研究上有更美麗的風景可以眺望，同時感謝皓云學長跟思潔學姊在題目交接過程的協助讓我可以更快的上手軟體以及設計的發想，謝謝計畫的搭檔珈慶一起討論跟切磋。謝謝老師、師母、實驗室的大學長政脩、同學及學弟：彥戎、宇家、文豪、嘉元、兆元、元箴、昱廷、茂愷、祐熙、煜竑、宏毅、爾鴻、仁翔、湧煒、奎均、伯軒讓實驗室氣氛變得溫暖且有趣。感謝固態雷射晶體與元件實驗室全體成員曾經給我的指導及陪伴。感謝我各個時期的朋友們來台北探望我、或在我遇到不熟悉的領域時候不吝給我充足的資訊和客觀的建議。感謝欣庭給予支持及陪伴，不僅在課業上贊助我，也當我的台北嚮導，一起經歷兩年來的高山低谷。感謝我的家人們重視孩子的教育，尊重並支持我的想法，也盡全力資助我一路以來的開銷，讓我能潛心專注於課業。最後感謝自己擇善固執。

中文摘要

作為一種新的顯示技術，Micro-LED 顯示技術主要基於第三代半導體材料氮化鎵（GaN），其獨特的優勢，如低功耗、高對比、快速響應和高可靠性，已經引起了行業和學術界的廣泛關注。然而隨 LED 的體積縮小，內部 Internal Quantum Efficiency(IQE)降低導致裸晶出光強度降低，以及大角度出光會造成出光不易被人眼接收，因此，如何有效地收集大角度出光並加以利用成為一個值得思考的課題。本文是透過 LightTools®進行幾何光學模擬及分析開發出一種具反射杯及黑矩陣之二次光學結構設計，以提升 Micro-LED 之效率。

透過反射杯及倒梯形結構建構出六角形出光光路為核心思想，將 Micro-LED 出光的光路及環境光吸收的光路分開，並儘量收斂出光光路。這樣一來，可以降低吸光光路及出光光路的相互影響，並分別加以優化。再者，當出光光路越發收斂，環境光吸光光路就能夠佔據更大的面積，進一步吸收更多環境光以提升面板的對比度。經過二次光學設計之後可以從原先具有 40%的出光損耗下降至 4.54%，環境光反射從 25%下降至 4.92%。

關鍵字: 黑矩陣、倒梯形、反射杯、出光損失、環境光反射

ABSTRACT



As a novel display technology, Micro-LED display technology is primarily based on third-generation semiconductor material, gallium nitride (GaN). Its unique advantages, including low power consumption, high brightness, rapid response, and high reliability, have garnered widespread attention from both industry and academia. However, as LEDs shrink in size, the reduction in Internal Quantum Efficiency (IQE) leads to decreased light emission intensity, and an increase in lateral light emission results in some light being less easily perceived by the human eye. Therefore, effectively collecting and utilizing laterally emitted light becomes an important consideration.

In this paper, we utilize LightTools® for geometric optical simulations and analysis to develop a secondary optical structure with reflector cups and a black matrix. This design addresses the previously mentioned issues of increased lateral light emission and enhances the utilization of Micro-LED light output.

The core concept involves constructing a hexagonal light path by using reflector cups and trapezoidal structures, separating the Micro-LED light path from the light path absorbed by the environment and converging the light paths as much as possible. This approach reduces the mutual interference between the light-absorbing path and the light-emitting path and optimizes them separately. Furthermore, as the light-emitting path converges further, the light-absorbing path for environmental light can occupy a larger area, further enhancing the panel's contrast. After the secondary optical design, the light loss, which was initially at 40%, has been reduced to 4.54%, and environmental light reflection has decreased from 25% to 4.92%.

Keywords: Micro-LED, LightTools®, Reflector, Secondary Optical Structure Design

目次



誌謝	i
中文摘要	ii
ABSTRACT	iii
目次	iv
圖次	vi
表次	viii
第 1 章 緒論與研究動機	1
1-1 OLED 與 Micro LED 顯示器介紹及比較	1
1.2 Micro-LED 之技術現況與挑戰	4
1.3 研究動機與本文架構	6
第 2 章 Micro-LED 之發光原理與參數定義	7
2.1 LED 之出光原理	7
2.2 二次光學結構原理	10
2.3 光線追蹤(Ray-Tracing)	13
2.4 模型定義參數	15
第 3 章 二次光學結構建置環境	16
3.1 LightTools® 簡介及環境設置	16
3.2 模型建立	16
3.2.1 出光模型	17
3.2.2 環境光模型	18
3.3 模擬輸入之條件	19
第 4 章 二次光學結構設計:參數與效率之關係	20
4.1 Micro-LED 出光分析	23
4.2 反射杯設計與分析	23
4.3 倒梯形設計與分析	26
4.3.1 倒梯形角度與效率之關係	26
4.3.2 黑矩陣位置改變對效率之影響	29
4.3.3 倒梯形高度對效率之影響	30
4.4 上黑矩陣之設計與分析	31
4.4.1 倒梯形間隙	31
4.5 陣列微結構設計與分析	36
4.5.1 陣列錐之設計	36
4.5.2 三角柱陣列之設計	37
4.6 參數統整及效率展示	39
4.7 二次光學設計之模型製程	44

第 5 章 結論與未來展望	45
5.1 結論探討	45
5.2 未來展望	47
參考文獻	48



圖次

圖 1-1：OLED 結構示意圖 ^[3]	1
圖 1-2：LED 載子複合發光之示意圖 ^[7]	2
圖 1-3：(A)車用抬頭顯示器(B)穿戴式擴增實境裝置(C) 相關應用之技術指標 ^[5]	3
圖 1-4：Micro-LED 顯示器 (A)不含微透鏡 (B)含微透鏡 ^[8]	4
圖 1-5：黑矩陣示意圖 ^[9]	5
圖 1-6：反射杯示意圖 ^[10]	5
圖 2-1：LED 電流注入示意圖 ^[11]	7
圖 2-2：LED 在順向偏壓下的複合機制 ^[13]	8
圖 2-3：OLED 顯示器使用之黑矩陣結構設計 ^[16]	10
圖 2-4：OLED 顯示器使用之梯形結構設計 ^[17]	11
圖 2-5：(A) Micro-LED 顯示器使用之反射杯結構設計 ^[19]	11
圖 2-5：(B)結合黑矩陣、梯型結構及反射杯所組成的六角型結構概念示意圖	12
圖 2-6：幾何光學之反射、穿透、散射及吸收示意圖	13
圖 2-7：入射光經界面之穿透及反射示意圖	13
圖 2-8：全反射之示意圖 (A): $\theta i < \theta C$ 時全反射未發生(B): $\theta i = \theta C$ ，恰等於臨界角發生全反射(C): $\theta i > \theta C$ 時發生全反射	14
圖 2-9：封裝前後之模型示意圖 (A) 封裝前，定義此時之出光損失為 0%；(B) 封裝後，此時之出光損失為 40%	15
圖 3-1：uLED 陣列之示意圖，其中圖 (A)為陣列之俯視圖，黑虛線內為單一畫素範圍；(B)單一畫素俯視圖，其中紅線內為一個子畫素的範圍，結構長邊為 111um，結構短邊為 37um	16
圖 3-2：Display Measurement System 示意圖	17
圖 3-3：出光強度及遠場場型量測模型	17
圖 3-4：(A)環境光反射示意圖(B)環境光之光源及環境光遠場接收器	18
圖 3-5：二次光學結構設計參數使用示意圖	19
圖 3-6：抗反射膜之反射率一波長關係圖	19
圖 4-1: OC 封裝示意圖	20
圖 4-2：OC 層對於出光場型之影響	20
圖 4-3 封裝結構側視圖：(A) 結構長邊(B)為結構短邊(C)是將(B)圖上半部結構放大來看，在短邊未塗黑矩陣材料之處作為陣列錐深度。	22
圖 4-4：單顆 Micro-LED 之出光光線分布示意，後續的章節為求說明及繪圖方便將省略電極及 MQW 的標示	23
圖 4-5：反射杯搭載黑矩陣吸光材料之結構示意圖	24
圖 4-6：反射杯往不同方向之出光(A)往側下出光(B)往側邊直接出光	24
圖 4-7：搭載黑矩陣之反射杯(A)出光效率損失對反射杯角度(B)環境光反射率對反射杯角度之作圖	



@HRC = 15um.....	25
圖 4-8：加上倒梯形，搭載黑矩陣之反射杯之四種出光示意圖	26
圖 4-9：Micro-LED 當中四種不同的出光情形(A)直接穿透((1))(B)向上折射((2))(C)內全反射導致的波導效應((3))(D)向旁側折射((4)).....	27
圖 4-10：倒梯形+反射杯+黑矩陣材料之(A)出光效率損失對反射杯角度(B)環境光反射率對反射杯角度之作圖@HIT = 15UM.....	28
圖 4-11：倒梯形+反射杯+上黑矩陣材料之(A)出光效率損失對反射杯角度(B)環境光反射率對反射杯角度之作圖@HIT = 15UM.....	29
圖 4-12：不同倒梯形高度的(A)出光損失對(B)環境光反射率	30
圖 4-13：不同 θ ITL 之光損：(A) θ ITL = 90°, (B) θ ITL = 95°, (C) θ ITL = 100°, (D) θ ITL = 105°, (E) θ ITL = 110°, (F) θ ITL = 115°, (G) θ ITL = 120°, (H) θ ITL = 125°, (I) θ ITL = 130°, (J) θ ITL = 135°；環境光反射率：(K) θ ITL = 90° (L) θ ITL = 95°, (M) θ ITL=100°, (N) θ ITL = 105°, (O) θ ITL=110°, (P) θ ITL = 115°, (Q) θ ITL=120°, (R) θ ITL=125°, (S) θ ITL = 130°, (T) θ ITL = 135°	34
圖 4-14：加入陣列錐之(A)結構出光側視圖(B)結構俯視示意	36
圖 4-15：不同深度之陣列錐的：(A)出光損失對陣列錐之深度作圖及(B)環境光反射率 對陣列錐之深度作圖.....	37
圖 4-16：加入三角柱之：(A) 結構出光側視圖；(B) 陣列錐結構俯視示意	37
圖 4-17：不同深度之三角柱陣列的:(A)出光損失對三角柱陣列之深度作圖及(B)環境光反射率 對三角柱陣列之深度作圖.....	38
圖 4-18：Micro-LED 裸晶、加入完整結構封裝、OC 封裝之遠場場形出光比較圖	39
圖 4-19：(A) 提升 Micro-LED 正向輝度與抗反射之二次光學結構設計 ^[19] ；(B) 微透鏡應用於微形 發光之研究 ^[22]	42
圖 4-20：二次光學結構之製作流程示意圖	44
圖 5-1：透過對長邊短邊做不同設計(非對稱六邊形的設計)可達成非對稱光型	47

表次

表 1-1: LCD/OLED/Mini-LED/Micro-LED 技術現況比較 ^[5]	2
表 4-1:結構效率演進及最佳效率:.....	40
表 4-2:結構最佳效率所對應之參數統整.....	41
表 5-1: 倒梯形上底寬度與 Micro-LED 尺寸比較	46



第1章 緒論與研究動機



1-1 OLED 與 Micro LED 顯示器介紹及比較

OLED^[1]研究始於 1987 年的鄧博士，於 2010 年代較廣泛應用於照明及顯示器。OLED 結構是以透明陽極、電洞注入層、電洞傳輸層、發光層、電子注入層、電子傳輸層等多層有機材料進行堆疊，如圖 1-1 所示。施加外部電壓時，電子與電洞分別進入發光層並產生激子，其釋放能量回到基態放出可見光即為一般熟知之 OLED 光源^[2]。得益於用於發光的有機化合物，OLED 顯示器可以產生鮮豔且準確之色彩。另外 OLED 還有視角廣、反應時間快，且由於各個像素獨立發光，OLED 顯示暗內容時消耗的電量更少，有助於節省能源^[3]。

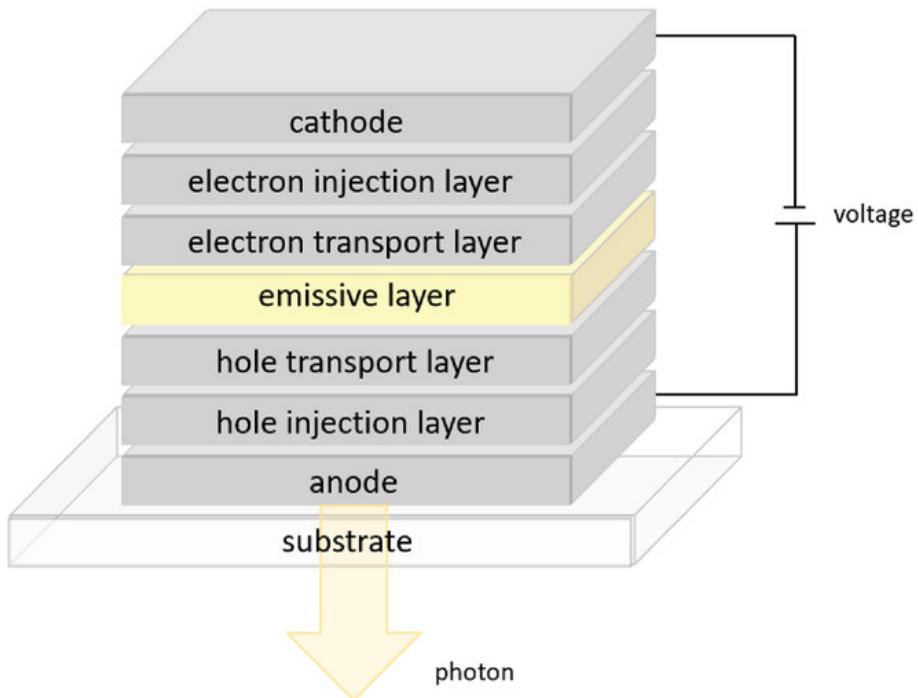


圖 1-1：OLED 結構示意圖^[3]

但 OLED 顯示螢幕也存在以下挑戰^[4]：

1. 容易出現烙印：持續顯示靜態圖像可能會導致圖像殘留，從而導致屏幕上出現影像殘留。
2. 製程上之挑戰：考量 OLED 當中之有機材料，由於蒸鍍製程之限制，導致實現



高 PPI(Pixel Per Inch)之顯示器具挑戰性。

3. 藍色 OLED 退化：藍色 OLED 像素往往比紅色和綠色像素退化得更快，會導致潛在的色彩平衡問題。

以下表格統整當今顯示技術現況比較: Micro-LED 除擁有 OLED 自發光、高對比、低功率損耗等等優點之外，可以實現更好的 PPI 非常有潛力成為新一代顯示器的發光元件。

表 1-1: LCD/OLED/Mini-LED/Micro-LED 技術現況比較^[5]

Display technology	LCD	OLED	Mini-LED	Micro-LED
Luminous technology	Backlight/LED	Self-illuminated	Self-illuminated	Self-illuminated
Contrast ratio	5000:1	>1 million:1	>1 million:1	>1 million:1
Brightness [nits]	>600	>600	>1000	10^7
Luminous efficiency	Low	Medium	High	High
Response time	ms	μ s	ns	ns
Life [h]	30–60K	30K	100K	100K
Cost	Low	Medium	High	High
Power consumption	High	Medium	Low	Low
PPI	Medium	Medium	High	Very high
Production status	Mass production	Mass production	Preliminary mass production	Research stage

Micro-LED^[6]，其工作原理與傳統 LED 相同，但尺寸更小。其核心是微小的半導體結構，通常使用氮化鎵 (GaN) 或類似材料製成。通過結合兩種不同的半導體材料（通常是 p 型和 n 型）來形成。當在此結構上施加電壓時，來自 n 型區域之電子和來自 p 型區域之電洞結合，以光子形式釋放能量，如圖 1-2 所示。

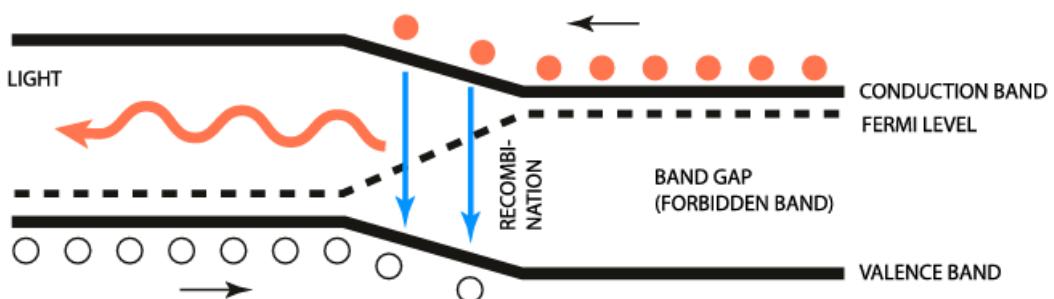


圖 1- 2：LED 輽子複合發光之示意圖^[7]

顯示技術有很多相關之應用如：擴增實境(AR)、虛擬實境(VR)、車用抬頭顯示器(HUD)及穿戴式裝置(Wearable device)，及其所對應之需求如下圖所示：

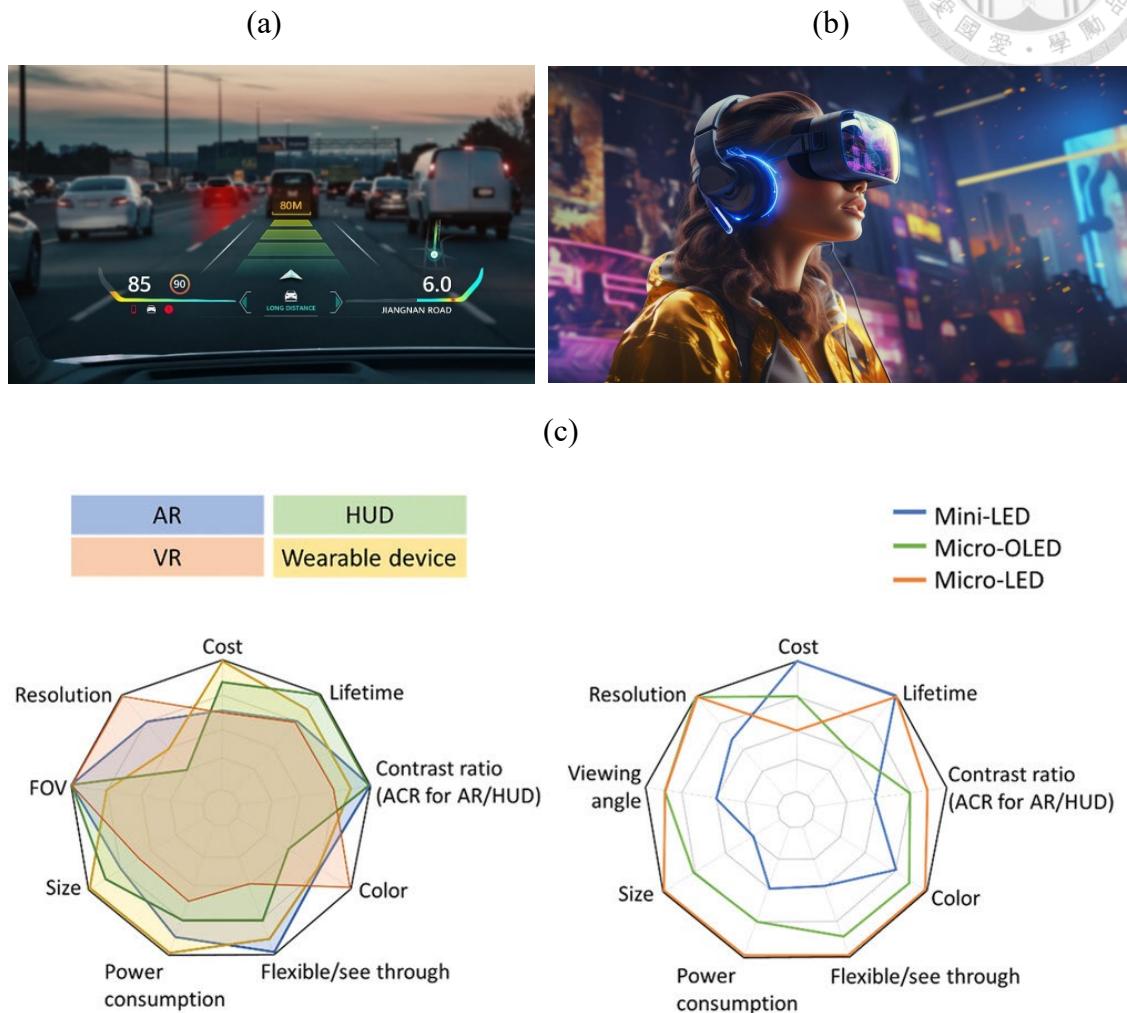


圖 1-3：(a)車用抬頭顯示器(b)穿戴式擴增實境裝置(c)相關應用之技術指標^[5]



1.2 Micro-LED 之技術現況與挑戰

縱使有先前提及的優點，當前的 Micro-LED 技術面臨著多項技術瓶頸。首先，Micro-LED 的內部量子效率隨著尺寸減小降低，造成外部量子效率變低；隨著尺寸減小，(表面積/體積)增加造成 Micro-LED 側向出光增加；以及經材料封裝後界面之間的折射率差異容易使光因全反射被困在結構裡，降低了整體光萃取效率，如何將大角度出光加以利用以提升出光會是一大課題。再者，環境光反射的產生會導致對比度降低。綜合上述問題，以下簡單列舉一些解決這些問題的方式：

微透鏡陣列^[8]能夠放置在 Micro-LED 上方，幫助聚焦和將發出的光重導向所需的方向，有效地減少光束的發散。這種方法確保更多的光線從 Micro-LED 結構中散射出來，從而提高光萃取效率如圖 1-4 所示。

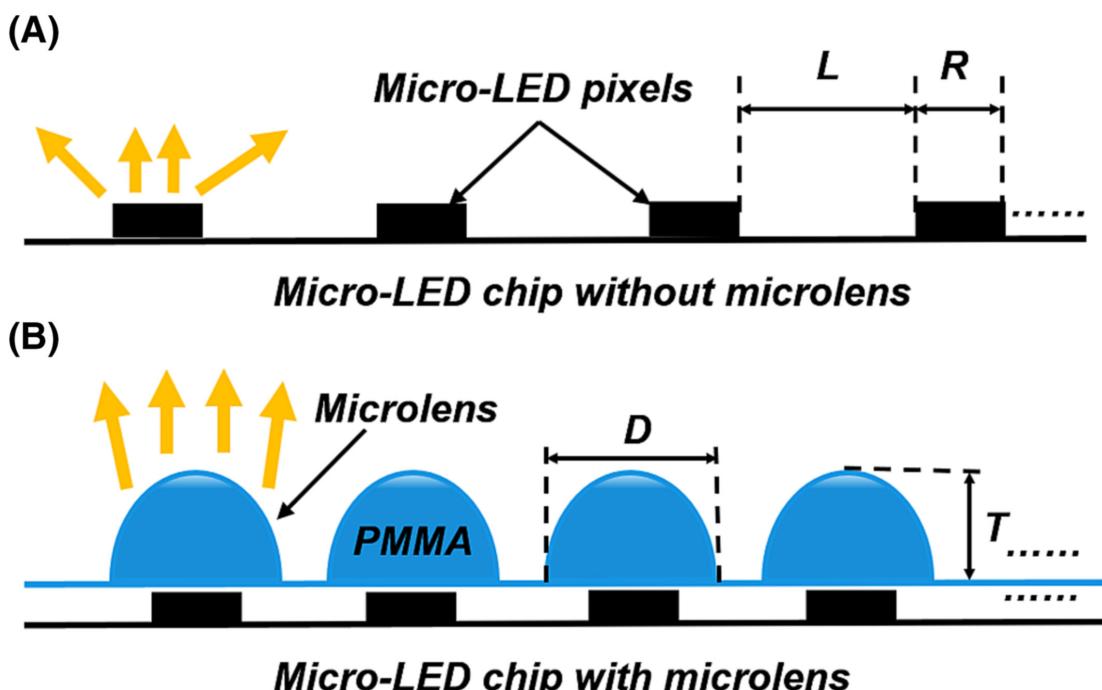


圖 1-4：Micro-LED 顯示器 (A)不含微透鏡 (B)含微透鏡^[8]

黑矩陣^[9]加入於像素之間，黑矩陣可以吸收環境光，防止其反射，增強對比度並降低環境反射對顯示器的影響。

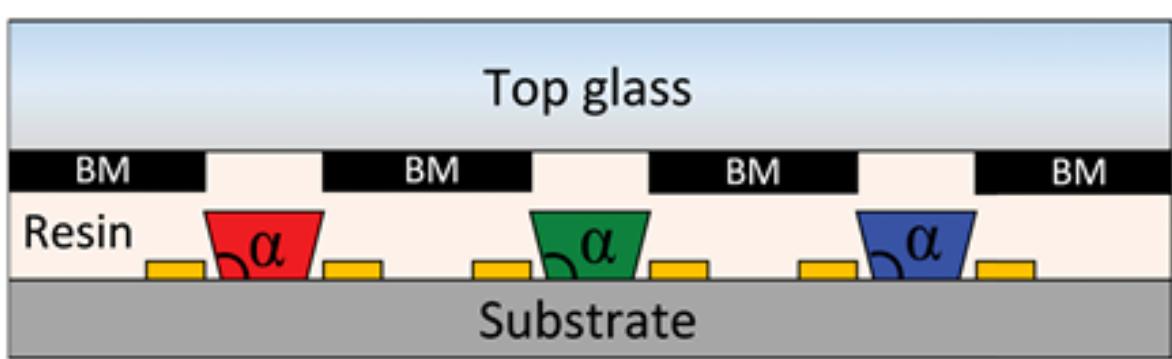


圖 1-5：黑矩陣示意圖^[9]

反射杯(Reflector)^[10]可以透過斜面杯壁進行導光，把側向出光向上集中以提升光的使用效率。

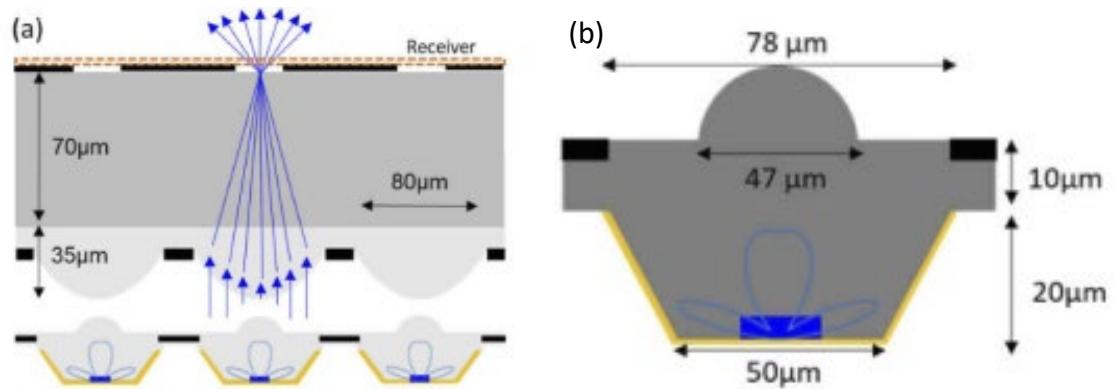


圖 1-6：反射杯示意圖^[10]



1.3 研究動機與本文架構

本文基於過往 OLED 及 Micro-LED 等等之顯示螢幕封裝概念，提出一種應用於 Micro-LED 之二次光學結構設計。結構具有：反射杯、黑矩陣、倒梯形及陣列微結構的μLED，來達到有效收集大角度出光、同時減少封裝時的出光損耗及降低環境光反射率等問題。考量到提升出光與提升吸光本身是相互衝突的，本文有別於一般封裝結構之設計，將出光的光路及吸光的光路儘量區分，使得 Micro-LED 出光及增加面板對環境光的吸收有機會各自提升，並儘量降低出光效率及環境光反射之間的取捨權衡，目標是光損降至 20% 以下，環境光反射率 5% 以下。

第二章中，會先介紹 Micro-LED 之出光原理，接著介紹二次光學結構及其原理及定義本文所用到的效率指標及模型參數。第三章中介紹本研究所使用的工具並說明設計模型之尺寸，Micro-LED 出光的量測模型及環境光強度的量測模型以及模擬之輸入條件。

第四章中循序去展示二次光學結構之設計，比較不同設計參數對效率的影響，探究光線追跡的原理，並尋求適當的參數組合。最後，在第五章會根據前面統整的數據，提出此結構的優勢以及未來進一步的研究或應用。



2.1 LED 之出原理

誠如 1.1 節提及，在施加電壓時，來自 n 型區域的電子和來自 p 型區域的電洞結合，以光子的形式釋放能量，以下我們簡單說明 LED 當中注入電流轉換成光子之過程^[11]：

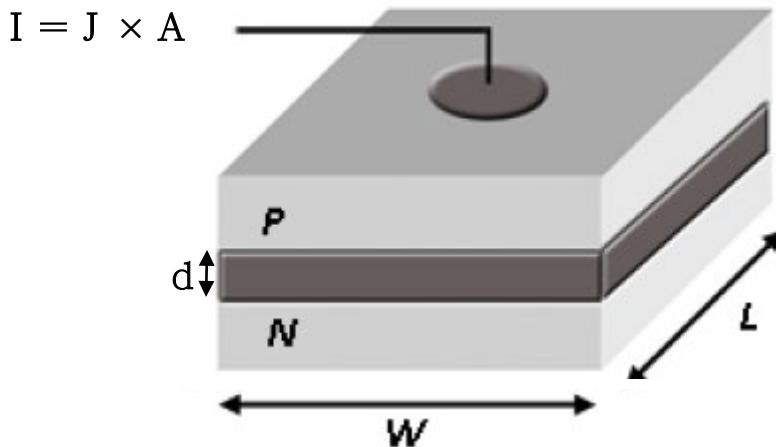


圖 2-1：LED 電流注入示意圖^[11]

其中 J 視為注入主動區的均勻電流密度， A 是電流注入區之面積， d 是主動區的厚度， L 和 W 分別是主動區的長與寬，假定注入主動區電流密度視為均勻的分布，則主動區的速率方程式(rate equation)寫成：

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{e} \times \frac{1}{d} - \frac{n}{\tau_n} \quad (2.1)$$

其中， e 是電子的帶電量， n 是載子濃度(carrier density)， τ_n 為載子生命週期(carrier life time)，因為主動區的電流密度是均勻的，所以令 $\frac{dn}{dt} = 0$ ，推導出主動區的載子濃度，考慮注入電流並非都能流進主動區，也就是注入效率(injection efficiency, η_e)不為 1，如下式所示：

$$n = \eta_e \frac{J\tau_n}{ed}$$



(2.2)

進入主動區的載子，共有三種複合路徑^[12]：

1. 蕭克利-里德-霍爾複合(Shockley-Read-Hall Recombination)包括：
 - 缺陷複合:因半導體材料的晶體品質受損，導致晶體內部產生缺陷，形成大量能隙。載子進入這些能隙時，會產生聲子來釋放能量。
 - 表面複合:由於半導體表面晶格的不連續，在半導體表面會產生表面能隙能階時，也通過產生聲子來釋放能量。
2. 輻射複合(Radiative Recombination): 複合後，會釋放出光子，其複合速率與載子濃度成正比。
3. 歐傑複合(Auger Recombination): 此種複合涉及三個粒子之作用，以下圖為例，當電子和電洞複合後，把此能量轉移給另外一個導電帶的電子使其躍遷至更高的能帶，而非將能量用以產生光子。

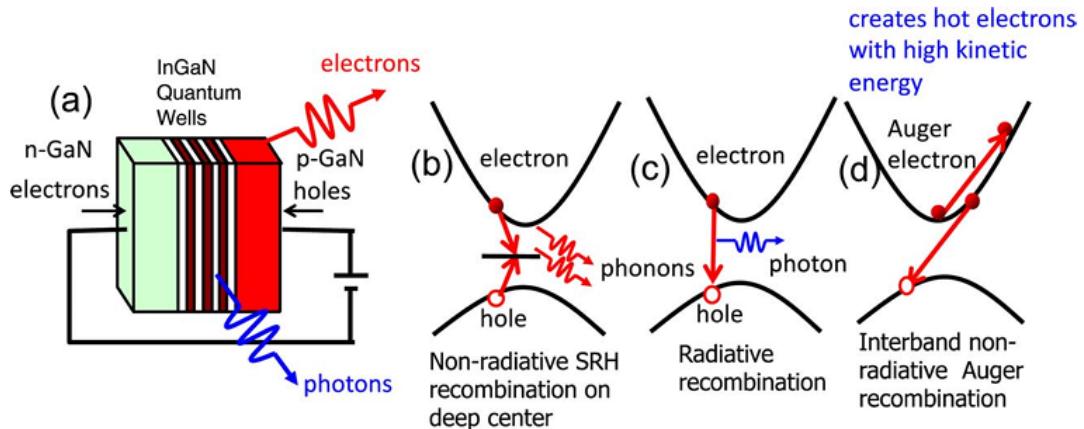


圖 2-2：LED 在順向偏壓下的複合機制^[13]

所以內部量子效率(Internal Quantum Efficiency, η_i)即為描述主動區當中，載子複合後轉換成光子的比例：

$$\eta_i = \frac{\text{輻射複合率}}{\text{總輻射率(輻射 + 非輻射)}} = \frac{\frac{1}{\tau_r}}{\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}} = \frac{\frac{1}{\tau_r}}{\frac{1}{\tau_n}} \quad (2.3)$$



則主動區當中產生的光能量表示為：

$$P = \eta_i \eta_e \frac{J}{ed} \times h\nu \times A \times d = \eta_i \eta_e h\nu \left(\frac{I}{e}\right) \quad (2.4)$$

考慮到只有部分的光能從主動層離開 LED 成為 P_0

$$P_0 = \eta_{ext} \eta_i \eta_e h\nu \left(\frac{I}{e}\right) \quad (2.5)$$

則外部量子效率可以被定義成

$$\eta_{EQE} = \eta_{ext} \eta_i \eta_e \quad (2.6)$$

然而隨著當今 LED 尺寸越來越小，許多問題隨之產生，首先，隨著 LED 尺寸減小，(表面積/體積)的比例增加導致有更多的光從側壁以大角度出光，光萃取效率 (Light Extraction Efficiency, η_{ext}) 降低^[14]，其次是隨著 LED 尺寸減小，側壁蝕刻所造成的缺陷在 LED 內所占的比例增加，故載子更容易以 SRH 複合造成 LED 的內部量子效率 (Internal Quantum Efficiency, η_i) 降低^[15]，進而降低出光效率。本文旨在利用二次光學結構，更有效率的收集 Micro-LED 產生的光，進入環境當中，以提升出光效率以及對比度。



2.2 二次光學結構原理

為了解決大角度出光以及出光效率減少的問題，可以利用二次光學結構的設計去更有效的利用 Micro-LED 的出光，在實驗室先前的研究當中已有文獻探討在 OLED 當中加入所謂的二次光學結構，利用折射及全反射去改變光行進的方向，克服 OLED 元件當中的多層結構直接造成的出光下降^{[16][17]}，本研究關於大角度出光的概念延續先前 OLED 之研究，差異在於 OLED 為一個面光源，而 LED 之立體結構使其多了四個可發光之側面，故於本篇文章中所探討之 Micro-LED 大角度出光，由頂部平面及四個側面貢獻之總和。

也可以透過結構去吸收環境光，以達到提升出光效率及對比度並降低環境光反射，結構概念如圖所示：

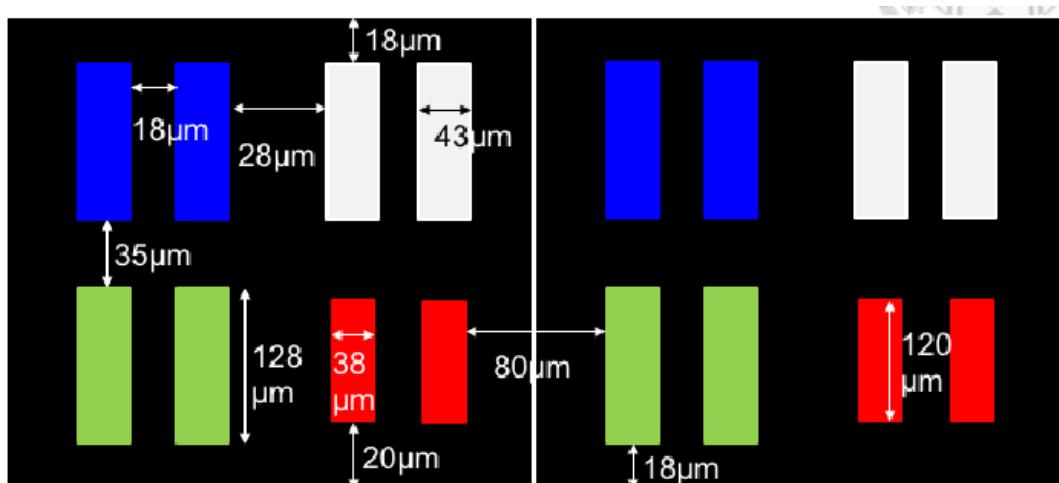


圖 2-3：OLED 顯示器使用之黑矩陣結構設計^[16]

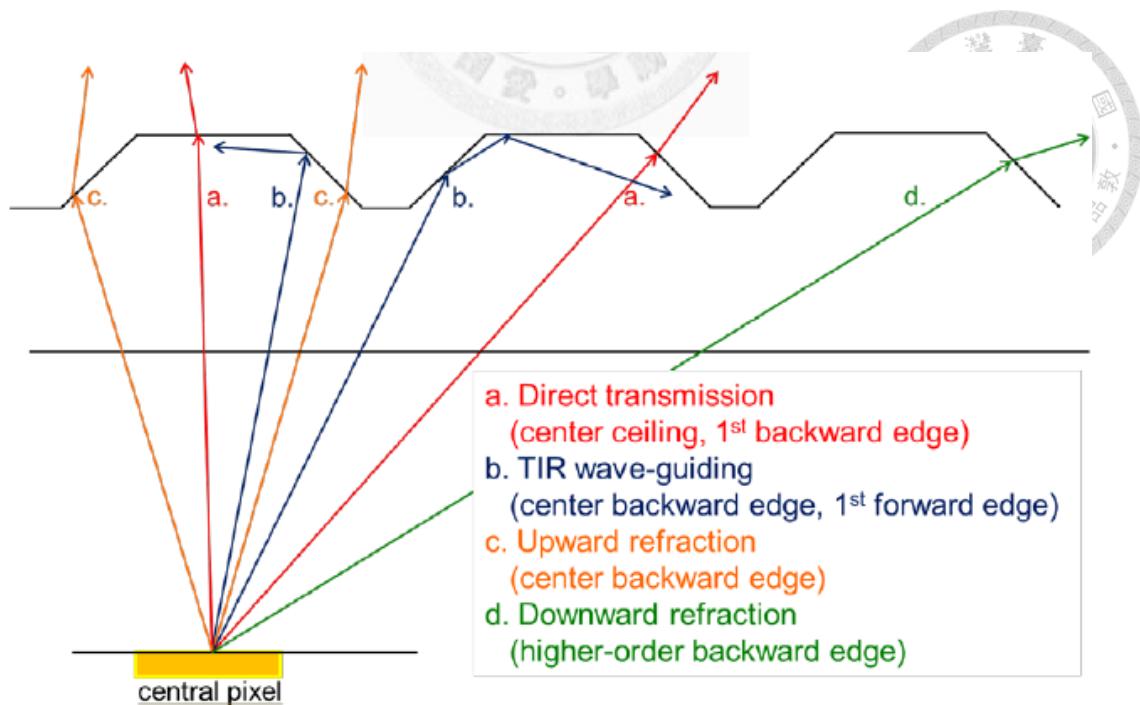


圖 2-4：OLED 顯示器使用之梯形結構設計^[17]

如上圖所示，梯型結構的設計，梯型設計的平坦上底可以直接向上出光路之路徑不被偏折，並透過梯型的斜面產上向上折射的路徑，在實驗室先前研究中提及^[17]，此外在結構如何對齊畫素的探討中，上底式對齊，也就是使上底的邊寬長度等於畫素邊長的做法，可以使直接出光路徑儘量不受到偏折，增加出光效率^[18]。

梯型及黑矩陣的概念應用在 Micro-LED 的顯示，在不更動 Micro-LED 內部結構的情況之下可以透過對封裝結構的設計，使得離開 Micro-LED 的光有更高的比例能夠透過收集二次光學結構進入環境，也就是提升光萃取效率^[19]如圖 2-5 所示：

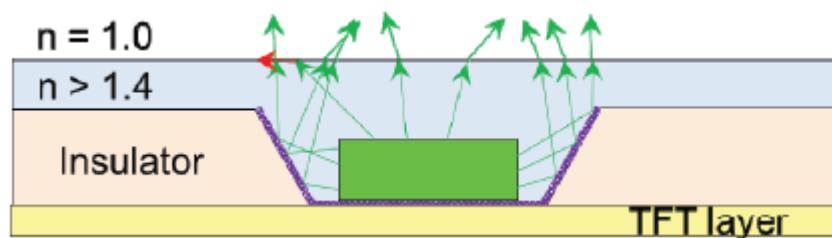


圖 2-5：(a) Micro-LED 顯示器使用之反射杯結構設計^[19]

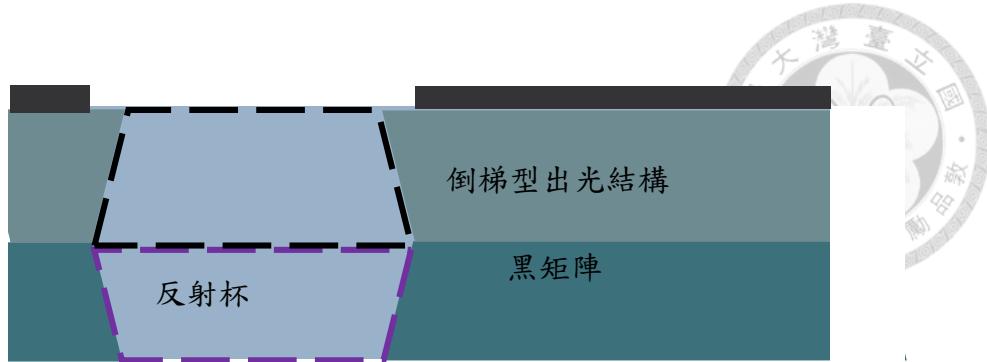


圖 2-5：(b)結合黑矩陣、梯型結構及反射杯所組成的六角型結構概念示意圖

所發想之六角形出光，是利用反射杯結合倒梯形結構的概念並參照先前研究之分析。與圖 1-6^[10]論文中的結構相比，但不同於其架構，本文使用平整而不加透鏡的截面，有助於使靠近 Micro-LED 中心之出光不易被偏折。然而不同的地方是：本研究將倒梯形直接建置在反射杯上，可爭取更多的出光提前被倒梯形匯聚，在出光光路提前被收斂的同時，將黑矩陣材料上移至倒梯形上方，可以爭取更多黑矩陣的面積，最後在倒梯形的邊緣加入陣列微結構以強化出光。綜合上述的組合去提升出光的效率並降低環境光反射，於後續的章節會接續說明出光光路分析及出光效率。



2.3 光線追跡(Ray-Tracing)

二次光學結構設計背後需探討光線追跡，根據司乃爾原理的計算去推得光線行經的方向，其中反射及穿透會在界面產生，吸收會在介質當中產生，散射則可能在介質或界面當中產生，如 2-6 所示：

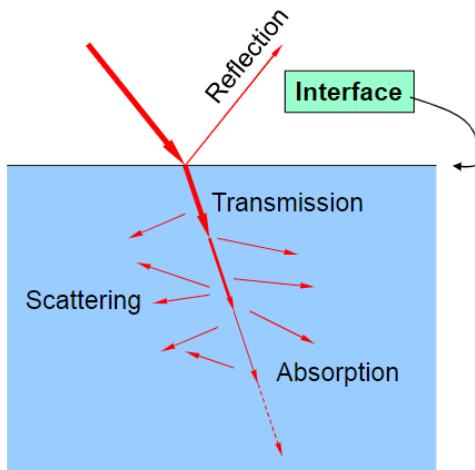


圖 2-6：幾何光學之反射、穿透、散射及吸收示意圖

接下來簡單介紹司乃爾原理，當界面存在時會分隔兩個不同折射率的介質，界面產生的反射及折射就能夠以司乃爾定律計算，入射光及反射光與穿透光的關係如下式：

$$\begin{cases} n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \\ \theta_i = \theta_r \end{cases} \quad (2.7)$$

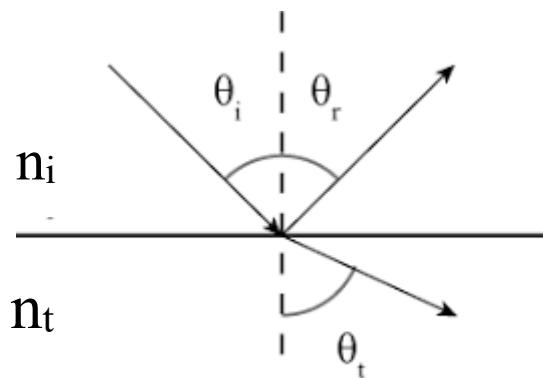


圖 2-7：入射光經界面之穿透及反射示意圖

其中 n_i 是入射光存在的介質折射率且 θ_i 是入射角， n_t 是穿透光存在的介質折射率



且 θ_t 是入射角，而 θ_r 則為反射角，當滿足臨界條件—穿透角度為 90° 時，此時的入射角 θ_i 定義成臨界角(critical angle, θ_c)，如下式：

$$\begin{aligned} n_i \sin \theta_i &= n_t \sin \theta_t = 1, \theta_t = 90^\circ \\ \Rightarrow \theta_i &= \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_i}{n_t} \end{aligned} \quad (2.8)$$

當 $\theta_i \geq \theta_c$ 時入射光會形成內全反射(internal total reflection)，如圖所示：

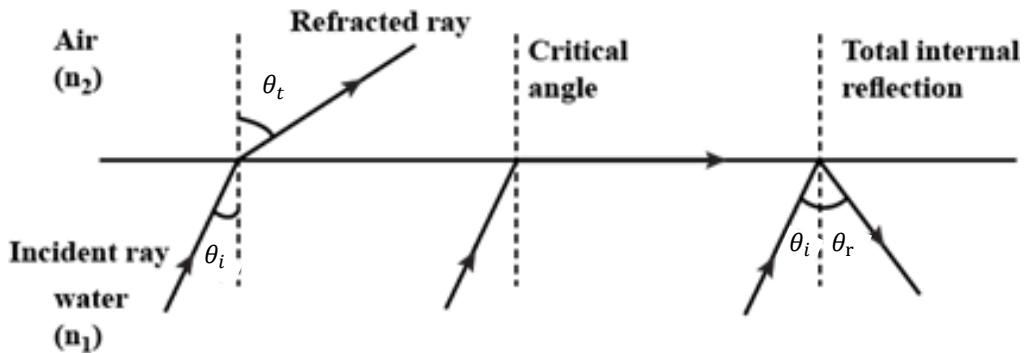


圖 2-8：全反射之示意圖 (a): $\theta_i < \theta_c$ 時全反射未發生 (b): $\theta_i = \theta_c$ ，恰等於臨界角發生全反射 (c): $\theta_i > \theta_c$ 時發生全反射



2.4 模型定義參數

在封裝覆蓋層 OC(Over Coating)的情況下光線可能因為界面造成部分穿透部分反射無法完全進入環境，為了定義模型當中有多少光能從 Micro-LED 進入環境被接收，而不是被限制於結構我們可以定義出光效率：

$$\text{出光效率} = \frac{I_p}{I_{unp}} \times 100\% \quad (2.9)$$

同時為了想了解加入封裝結構設計之後，出光損失為多少，如式：

$$\text{Loss} = \left(1 - \frac{I_p}{I_{unp}}\right) \times 100\% \quad (2.10)$$

其中 I_{unp} 為未封裝前的出光強度， I_p 為封裝後的出光強度，如圖 2-9 所示：

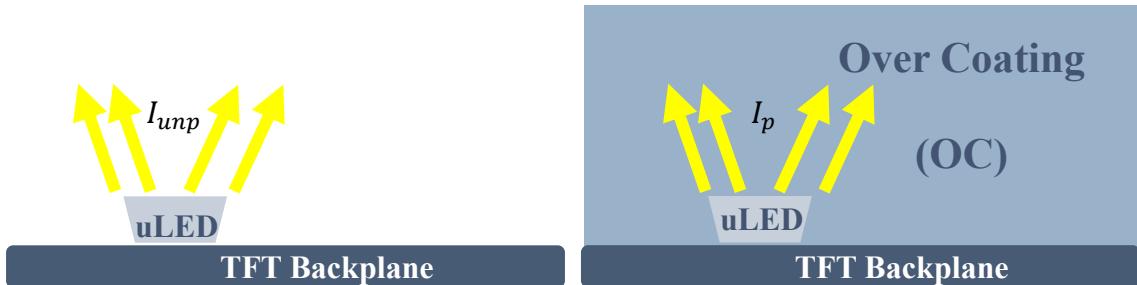


圖 2-9：封裝前後之模型示意圖 (a) 封裝前，定義此時之出光損失為 0%；

(b) 封裝後，此時之出光損失為 40%

因外界環境光造成反射，故定義環境光反射率的公式如式：

$$\text{Reflectivity}(R) = \frac{I_R}{I_0} \times 100\% \quad (2.11)$$

環境光反射率(R)的定義即為環境光原始強度(I_0)環境光(I_R)經 micro-LED 螢幕之反射回到接收器的強度。

第3章 二次光學結構建置環境



3.1 LightTools® 簡介及環境設置

往後的章節會利用 LightTools®來建構 Micro-LED 面板的光學模型，並做模擬及分析。LightTools®是由美國的 ORA 公司開發，是基於蒙地卡羅演算法 (Monte Carlo method)^{[20][21]}所進行光線追跡的模擬，也就是考慮材料之間的反射、吸收、穿透並能夠計算光線分布資訊利用蒙地卡羅的隨機性選取來自光源的光線並做追跡與統計，在追跡光線的量足夠多時就足夠趨近實際量測結果。

3.2 模型建立

模型為一個 5*5 之陣列，如(a)圖所示，其中每一個像素包含紅藍綠三個子畫素，像素大小為 $111*111\mu m^2$ ，如圖(b)所示，在此篇論文當中皆針對波長為 456nm 的藍光 micro-LED 作設計。本文探討之二次光學結構設計是對建於 LightTools® 中的 LED，在一個大小為 $111*37\mu m^2$ 子畫素區域中，探討其光線追跡。在下文中定義 $111\mu m$ 為結構長邊， $37\mu m$ 為結構短邊。

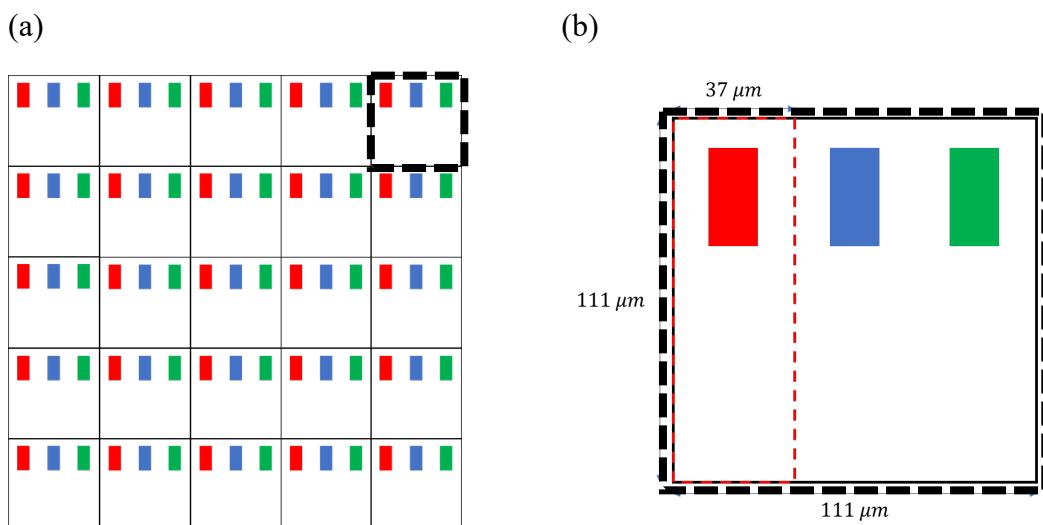


圖 3-1：μLED 陣列之示意圖，其中圖 (a)為陣列之俯視圖，黑虛線內為單一畫素範圍；(b)單一畫素俯視圖，其中紅線內為一個子畫素的範圍，結構長邊為

111 μ m，結構短邊為 37 μ m



3.2.1 出光模型

量測 Micro-LED 面板封裝前後之出光強度及 Micro-LED 場型的模型建構，參考顯示量測系統(Display Measurement System):正向出光強度的強度由上方的圓形接收器所收之光通量決定;場型則是用遠場接收器(Far field Receiver)量測不同方位角的出光強度，如下圖示意。

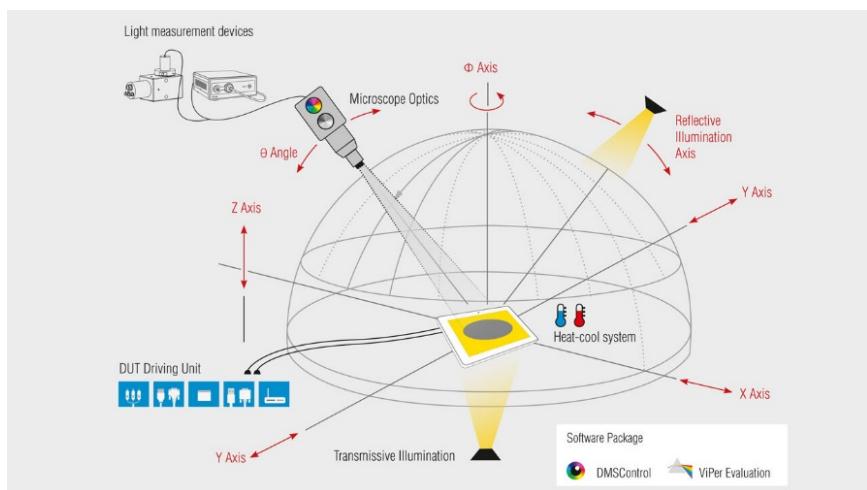


圖 3-2 : Display Measurement System 示意圖

在 LightTools®當中，設定遠場接收器每 5 度收集一個數據點得出光場型圖；並透過圓形接收器量得封裝前與封裝後的出光求得光損，如圖 3-3 所示：

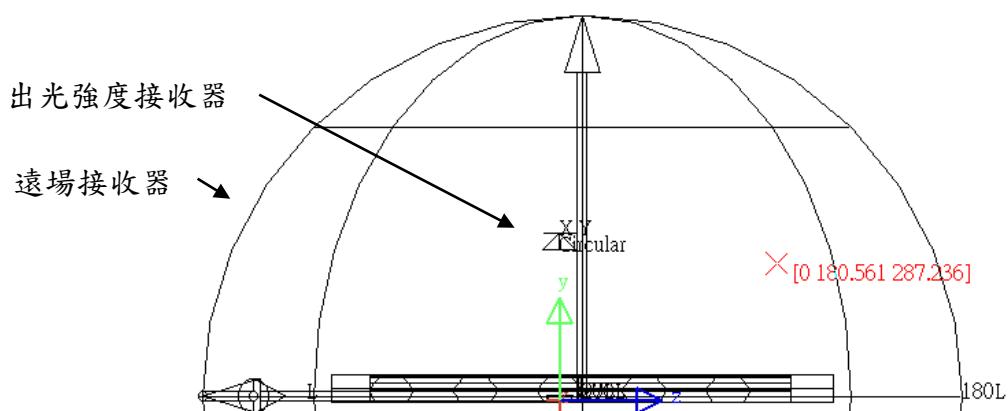


圖 3-3 : 出光強度及遠場場型量測模型



3.2.2 環境光模型

量測 Micro-LED 面板封裝前後之環境光反射率需要透過環境光遠場接收器，以分光光譜儀(型號:V-670 UV-VIS-NIR Spectrophotometer)之架構做為參考。環境光反射量測模型的建立，協助計算環境光打到 Micro-LED 螢幕後有多少比例的環境反射被遠場接收器吸收，其中環境光源 D65 具有 5° 的發散角，並位於 Micro-LED 顯示器上方順時針旋轉 5° 的位置，並利用球型接收器收集所有反射光，如圖 3-4 所示。

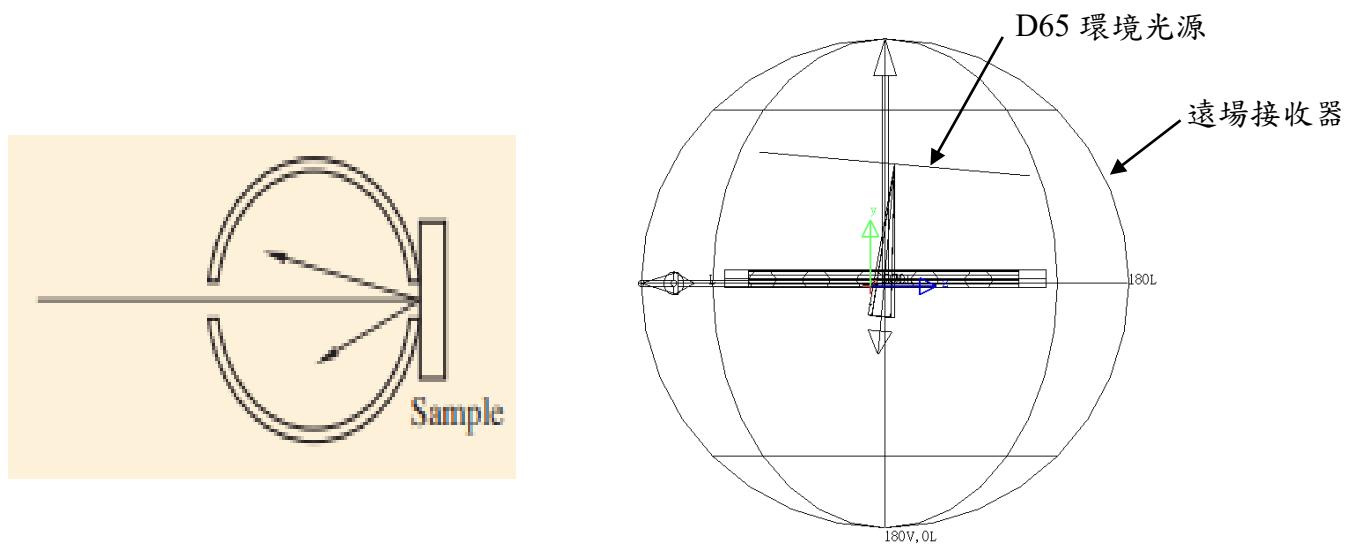


圖 3-4：(a)環境光反射示意圖(b)環境光之光源及環境光遠場接收器



3.3 模擬輸入之條件

於本文中所使用的 Micro-LED 均為藍光 LED，使用波段 $\lambda=456\text{nm}$ ，於模型當中模擬光線條數為一百萬條，利用幾何結構本身的尺寸 (um)、折射率 n 及消光係數 k 來對材料做設定，材料的折射率為：反射杯 $n_{reflector}=1.47$ 、倒梯形 $n_{inverted\ trapzoid}=1.47$ 、Over Coating 封裝層 $n_{over\ coating}=1.65$ 、微結構 $n_{structure}=1.65$ 及黑矩阵吸光材料 $n_{black\ matrix}=1.57+0.24i$ 如圖 3-5 所示，抗反射膜 (Anti-Reflection Film) 為一市面可見的光學鍍膜其反射率-波長圖如圖 3-6 所示，接下來下一章將開始探討結構的參數對面板效率的影響。

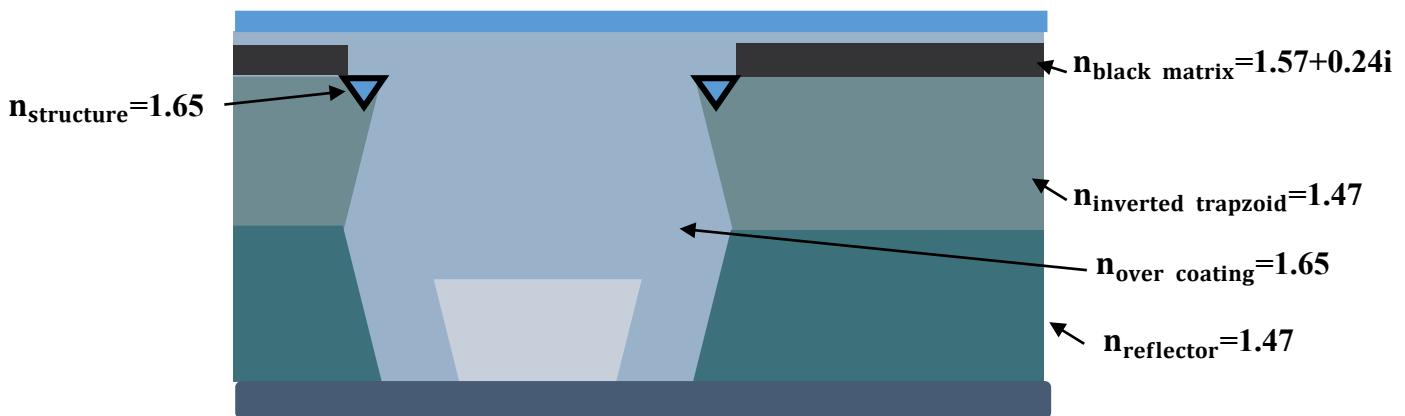


圖 3-5：二次光學結構設計參數使用示意圖

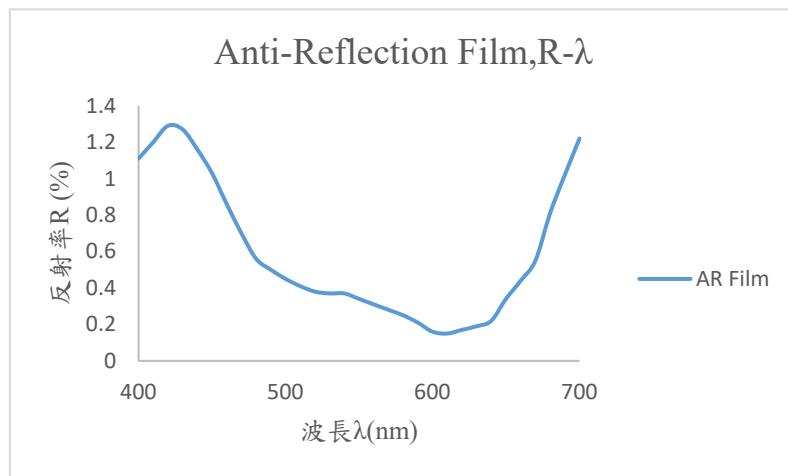


圖 3-6：抗反射膜之反射率-波長關係圖

第 4 章 二次光學結構設計:參數與效率之關係



Micro-LED 之晶片保護透過封裝，需要在裸晶陣列加上常規封裝層 Over coating (OC)，容易造成大角度出光無法被加以利用，請見圖 4-1：

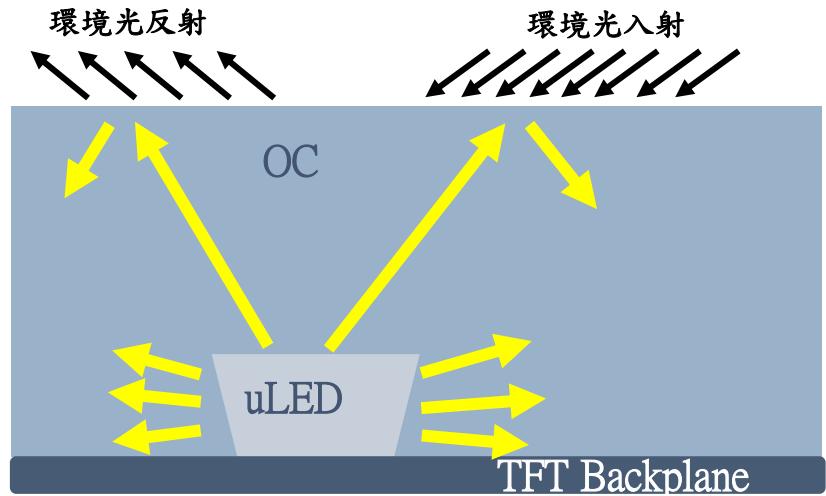


圖 4-1: OC 封裝示意圖

然而此舉使環境光反射率及出光損失分別增加至為 25% 和 40%，從出光場形也可以反映出 OC 層造成的出光損失，如圖 4-2 所示：

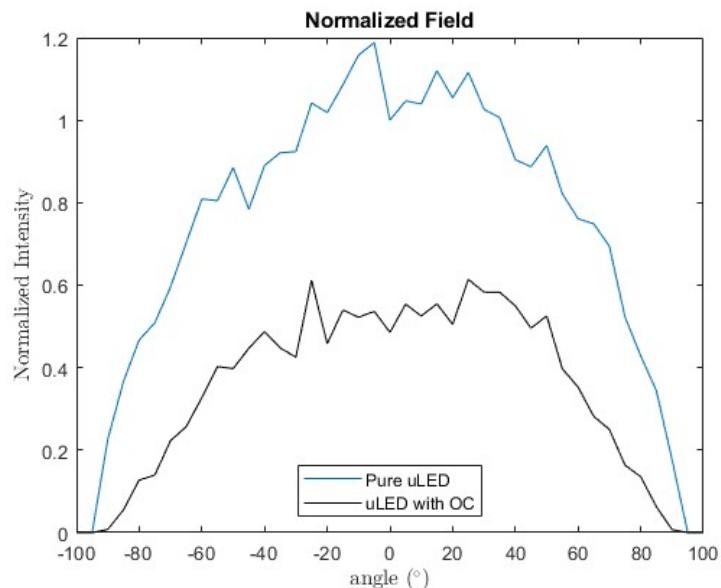
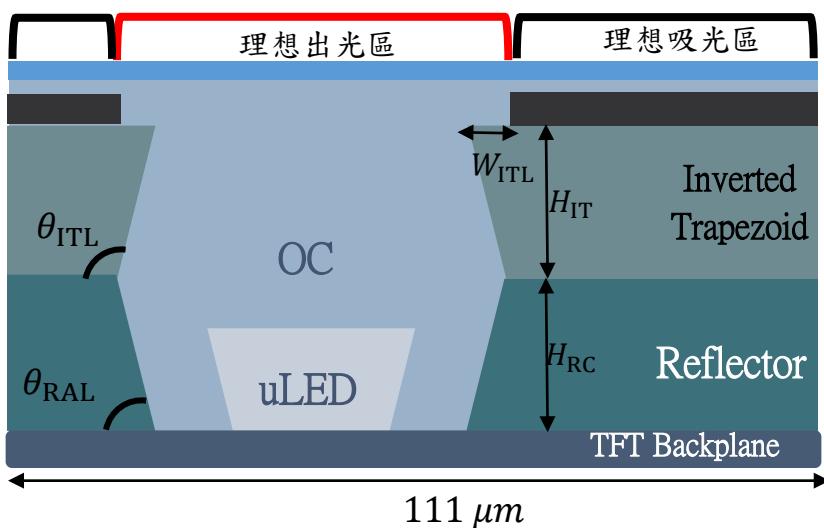


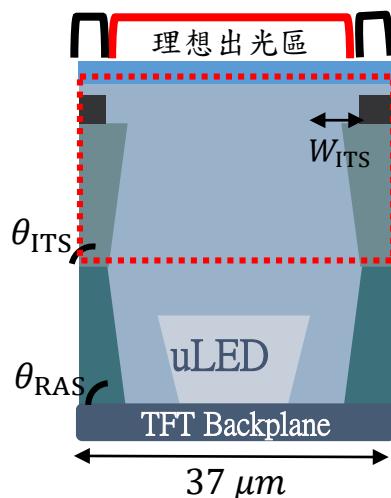
圖 4-2：OC 層對於出光場型之影響

本章節主要討論如何在常規封裝結構裡面，透過二次光學結構去提升 Micro-LED 效率，由於需要同時提升 Micro-LED 的出光效率和降低環境光的反射(增加對環境光的吸收)，所以希望可以透過將 Micro-LED 的出光和環境光的吸收光路分開，如下圖所示：紅色括弧所包含的區域形成一個六角形理想出光區，黑色括弧所涵蓋到的範圍為理想吸光區，分別進行優化，相關的參數如下圖 4-3(a)、(b)及(c)的標示：反射杯高度 H_{RC} 倒梯形高度、 H_{IT} 倒梯形之長邊角為 θ_{ITL} 、反射杯長邊角為 θ_{RAL} 、 W_{ITL} 為長邊未覆蓋黑矩陣之倒梯形寬度，倒梯形之短邊角為 θ_{ITS} 、反射杯短邊角為 θ_{RAS} 以及 W_{ITS} 為短邊未覆蓋黑矩陣之倒梯形寬度。

(a)



(b)



(C)

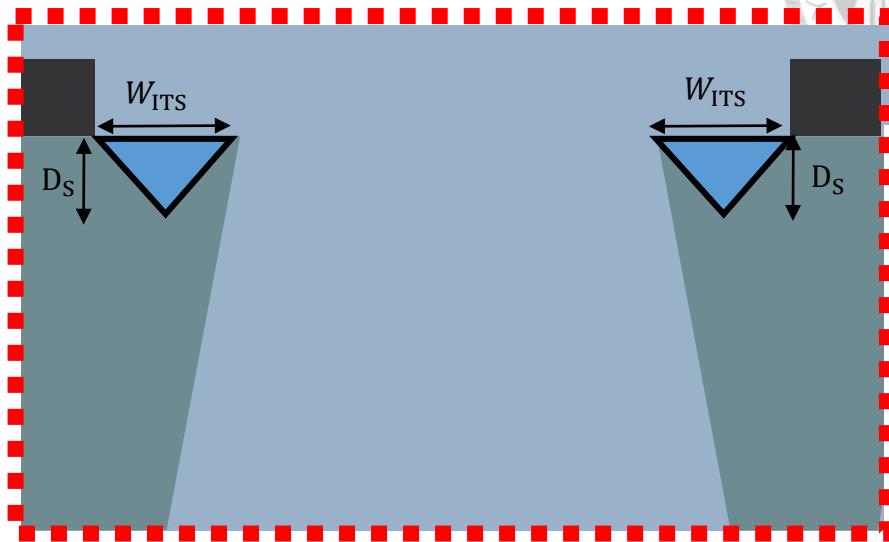


圖 4-3 封裝結構側視圖：(a) 結構長邊(b)為結構短邊(c)是將(b)圖上半部結構
放大來看，在短邊未塗黑矩陣材料之處作為陣列錐深度。



4.1 Micro-LED 出光分析

本節首先分析單顆 Micro-LED 之出光，同先前提到的，除了向上出光以外，不乏也看到有往兩側的光束，尤其是向側下的光，單顆覆晶式 Micro-LED 由中心的量子井(Multiple Quantum Well, MQW)發光，及其電極於 LightTools® 中模擬的結果如下圖所示：

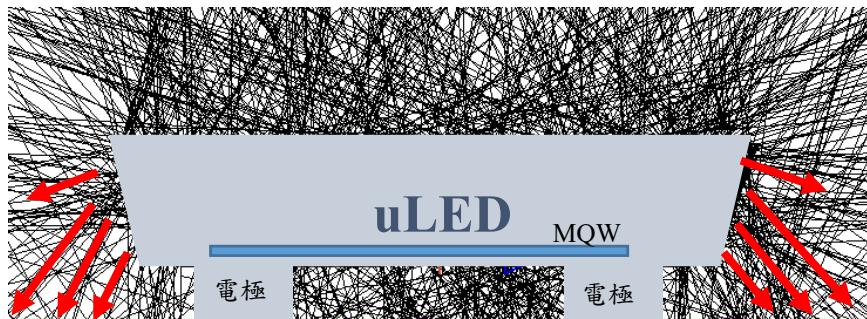


圖 4-4：單顆 Micro-LED 之出光光線分布示意，後續的章節為求說明及繪圖方便將省略電極及 MQW 的標示

4.2 反射杯設計與分析

在圖 4-5 繪出三種可能的光路：

1. 直接向上出光
2. 直接穿透反射杯/被黑矩陣吸收
3. 先打到反射杯底，再透過反射杯向上出光

其中：第 2 及第 3 種光路與反射杯參數有較大的關聯，所以利用反射杯提升出光效率，目標是儘量避免大角度出光產生：出光部份透過斜面反射杯結構，以及反射杯材料($n=1.47$)跟高折射率 OC 層($n=1.65$)的折射率差，盡可能將光線以大於臨界角的入射角打到邊界並產生內全反射也就是藉由路徑 3，環境光吸收部分利用旋塗 BM 材料在反射杯上緣以增加對環境光吸收，如圖 4-5、4-6 所示：

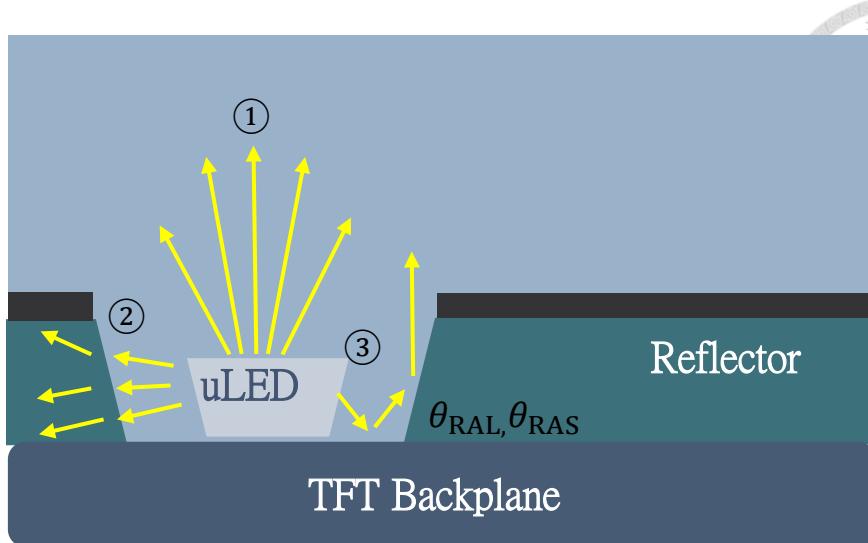


圖 4-5：反射杯搭載黑矩陣吸光材料之結構示意圖

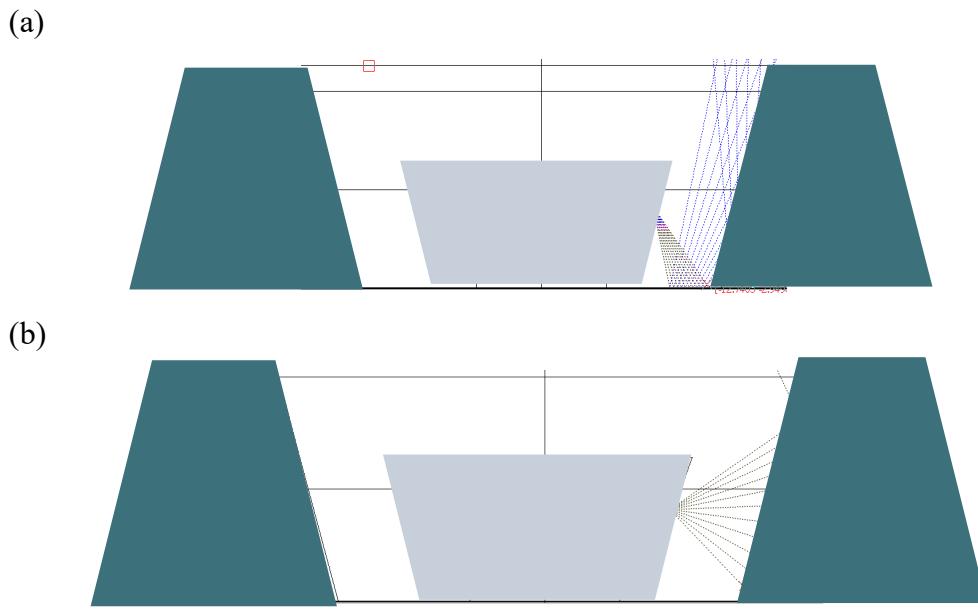
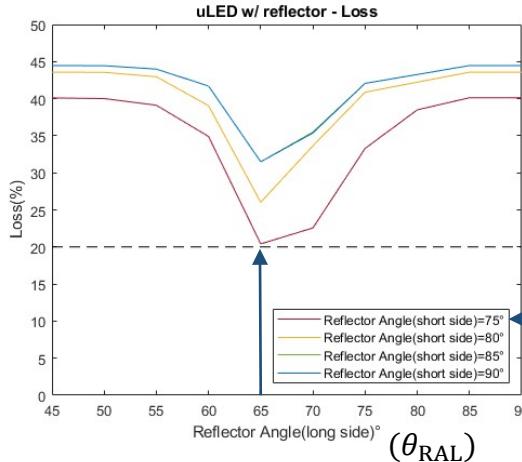


圖 4-6：反射杯往不同方向之出光(a)往側下出光(b)往側邊直接出光

可以看見射向反射杯底的出光透過杯壁反射可以向上出光，側向直接射向杯壁的出光幾乎無法被反射並向上出光。出光損失(Loss)及環境光反射率(Reflectivity)對反射杯角度 θ_{RAL} 、 θ_{RAS} 之作圖如圖 4-7 所示：

(a)



(b)

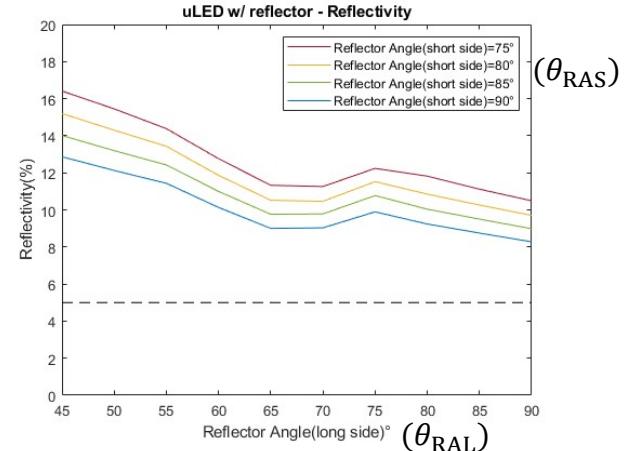


圖 4-7：搭載黑矩陣之反射杯(a)出光效率損失對反射杯角度(b)環境光反射率

對反射杯角度之作圖@ $H_{RC} = 15\mu m$

首先隨著反射杯長邊角度增加，光損隨之下降，原因是反射杯可以將更多路徑 3 之光線集中，在反射杯長邊角度 $\theta_{RAL} = 65$ 度時反射杯有最佳的匯聚效果，然而當 θ_{RAL} 超過 65 度及 θ_{RAS} 超過 75 度時，越來越多路徑 3 之光因內全反射之條件消失，改以路徑 2 出光，意即： $\theta_{RAL} = 65$ 度 $\theta_{RAS} = 75$ 度時，路徑 3 透過反射杯的內全反射向上出光的出光效果最好。環境光的吸收與黑矩陣鋪蓋面積有直接關係，反射杯角度越大，反射杯上可以鋪蓋的黑矩陣面積越多。至於反射杯的高度設定為了儘量讓打到反射杯底的出光能夠透過反射杯的內全反射。反射杯的高度愈高，集光的能力愈好，下一節會探討倒梯形結構對於出光及環境光反射的影響。



4.3 倒梯形設計與分析

4.3.1 倒梯形角度與效率之關係

倒梯形可能遇到的出光光路對應到下圖的四種出光：

1. 直接向上出光。
2. 光經過倒梯形向上折射。
3. 光經過倒梯形產生內全反射，在 OC 當中以類似波導的形式傳遞。
4. 光穿透倒梯形，向旁側折射。

第 1 及第 2 種出光光路利於提升效率，第 3 及第 4 種則會造成大角度出光。

倒梯形的建立，是為了將 LED 出光更向中間收斂，我們提出了一種用於 LED 出光光路使用之六角形出光結構，先前，由反射杯將射反射杯底的光匯聚，與其他一同向上的 LED 出光，經過上方倒梯形利用 High n OC 與倒梯形的折射率差異，以第 1 及第 2 種出光光路的形式向上出光，如示意圖 4-8 及 4-9 所示：

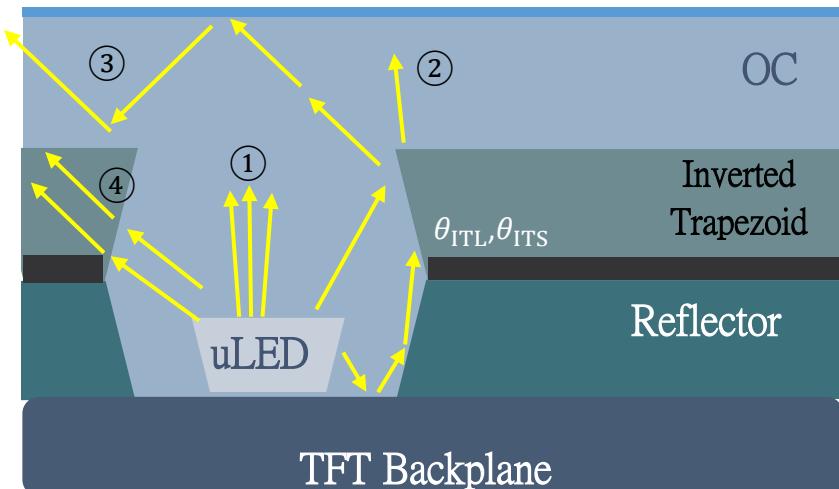


圖 4-8：加上倒梯形，搭載黑矩陣之反射杯之四種出光示意圖

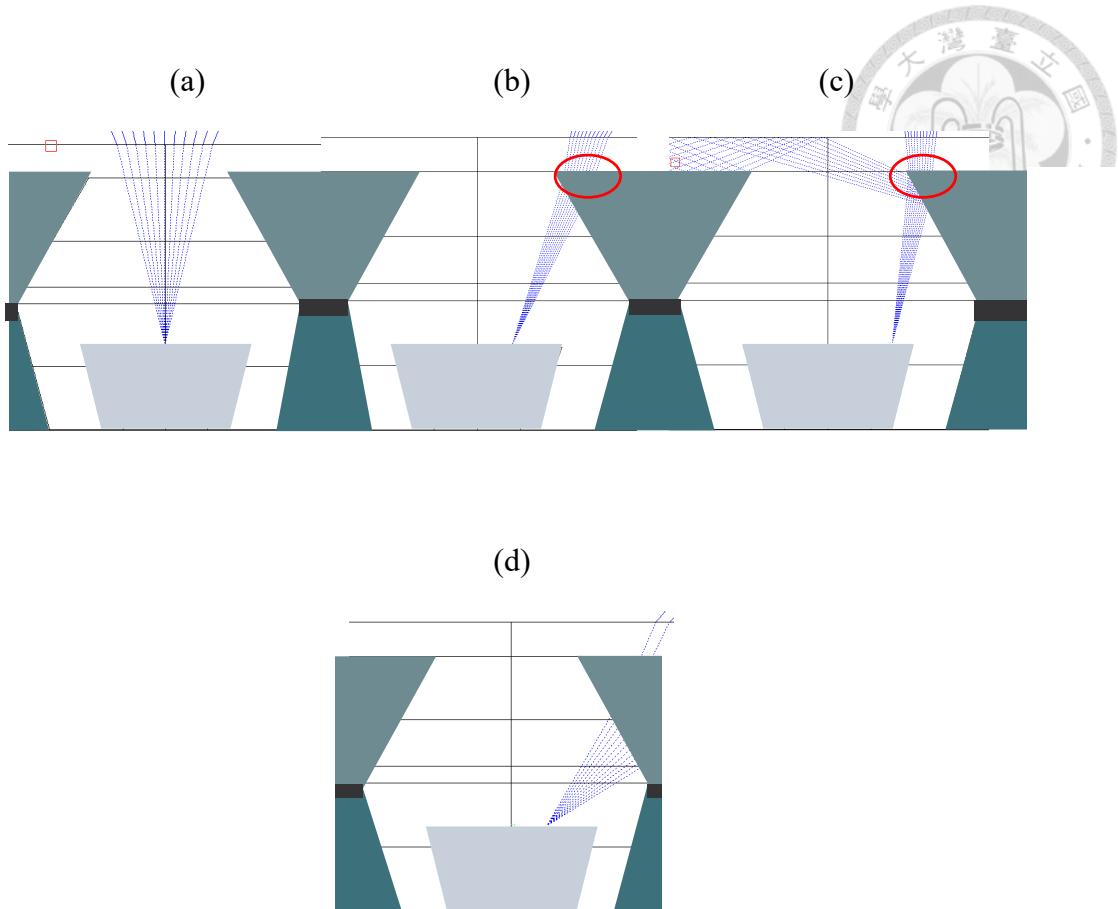


圖 4-9：Micro-LED 當中四種不同的出光情形(a)直接穿透(①) (b)向上折射((②)) (c)內全反射導致的波導效應(③) (d)向旁側折射(④)

從圖 4-9 中可以發現(1)：倒梯形在靠近頂角邊緣(紅圈標示處)有較強的聚光能力，(2)主要能夠被偵測器量測到的主要光路為圖 4-9(a)的直接向上出光以及圖(b)的向上折射出光，為了進一步了解出光效率與倒梯形之關係，在固定反射杯長邊角 $\theta_{RAL} = 65^\circ$ 及反射杯短邊角 $\theta_{RAS} = 75^\circ$ 之下，圖 4-10 為光損(Loss)及環境光反射率(Reflectivity)對倒梯形長邊角 θ_{ITL} 及倒梯形短邊角 θ_{ITS} 之結果

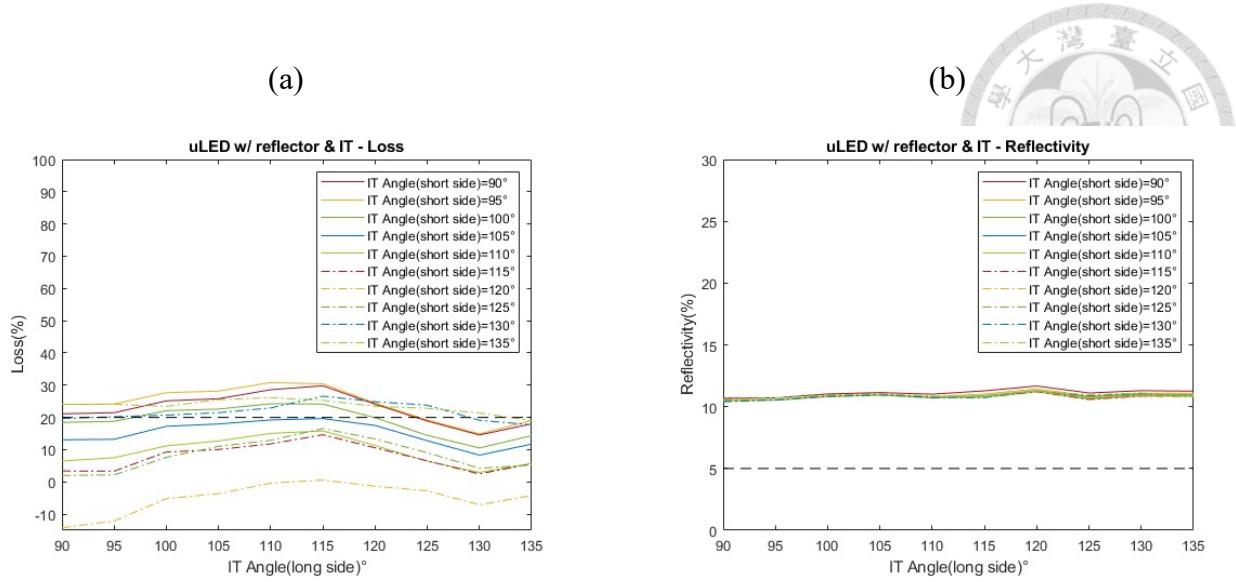


圖 4-10：倒梯形+反射杯+黑矩陣材料之(a)出光效率損失對反射杯角度(b)環境光反射率對反射杯角度之作圖@ $H_{IT} = 15\mu m$

可以看到在倒梯形長邊角度 $\theta_{ITL} = 115^\circ$ 開始光損的大幅下滑，是因為原先光路 4 因為倒梯形的折射而改改以光路 2 出光；當 $\theta_{ITL} > 130^\circ$ 出光損失會增加，是因倒梯形的延展壓迫到光路 2 以及光路 1，使光路 3 形式之傳遞增加；隨梯形短邊角度 θ_{ITS} 增加，光路 4 因為倒梯形的折射而改改以光路 2 出光，光損隨之下降， $\theta_{ITS} = 120^\circ$ 時有最好之結果， $\theta_{ITS} > 120^\circ$ 因倒梯形的延展壓迫到光路 2 以及光路 1，使光路 3 形式之傳遞增加。而在環境光部分並沒有太大的變化，因為環境光的吸收主要由鋪蓋的黑矩陣面積而決定，將黑矩陣鋪蓋在反射杯上就意味著：隨著反射杯的角度不再變動，可以鋪蓋黑矩陣的面積也隨之固定，故環境光反射率就沒有很大的變動起伏。



4.3.2 黑矩陣位置改變對效率之影響

考量黑矩陣在倒梯形及反射杯中間其擺放面積有限，將黑矩陣上移至倒梯形上方，如圖 4-3(a)所示，則面積就不會隨著反射杯角度的變小而被壓縮，但部分之光路 2 可能因黑矩陣上移而被吸收，然而，只要能夠盡可能收斂出光光路，便能將黑矩陣上移對出光造成的影响降到最低，黑矩陣材料能夠擺放的位置就更多，自然能夠吸收更多環境光反射。圖 4-11 是圖 4-3(a)之出光損失及環境光反射率對倒梯形角度之作圖，其中橫軸為倒梯形之長邊角 θ_{ITL} ，而圖中每一條線代表一個倒梯形之短邊角 θ_{ITS} ，請見下圖：

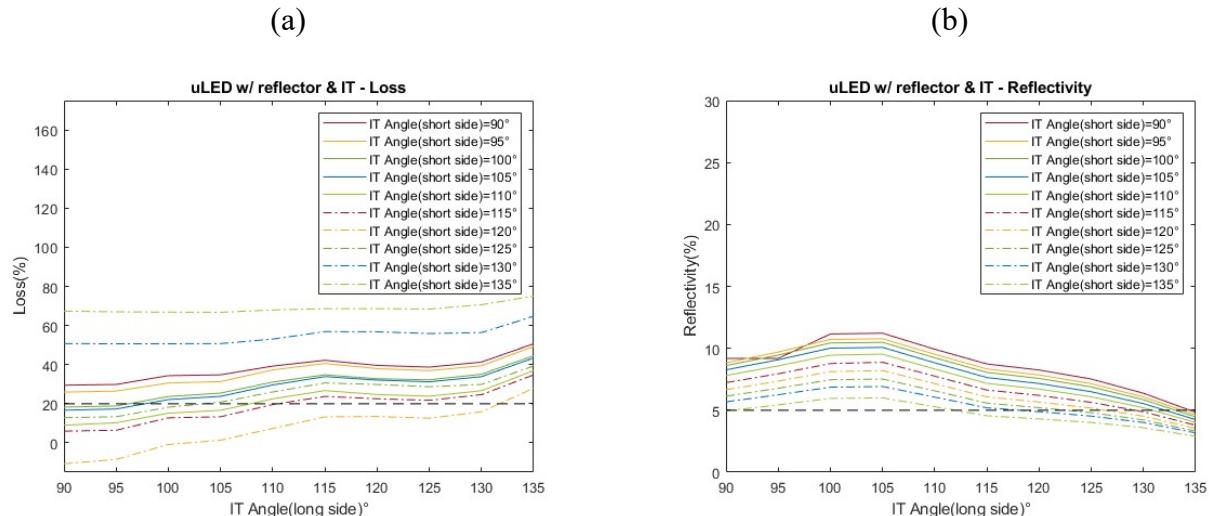


圖 4-11：倒梯形+反射杯+上黑矩陣材料之(a)出光效率損失對反射杯角度(b)

環境光反射率對反射杯角度之作圖@ $H_{IT} = 15\mu\text{m}$

首先環境光反射率有顯著下降，因為黑矩陣鋪蓋的面積不被反射杯角度限制，然而在出光損失的部分因為透過反射杯及倒梯形匯聚光路，與圖 4-10相比，在 $\theta_{ITL} > 115^\circ$ 及 $\theta_{ITS} > 120^\circ$ 有較劇烈之出光損失，原因是因為倒梯形的出光仰賴倒梯形的頂角，在覆蓋過多黑矩陣有可能會吸收到出光，在章節 4.4 中會談到在儘量不影響環境光反射效率的情況下，繼續對 W_{ITL} 、 W_{ITS} 之於模型出光效率進行優化及討論。



4.3.3 倒梯形高度對效率之影響

同 4.3.1 所提及的，倒梯形的出光分為：向上出光、向上折射、內全反射導致的波導效應及向旁側出光。調整倒梯形高度以瞭解倒梯形高度對出光損失及環境光反射之影響：

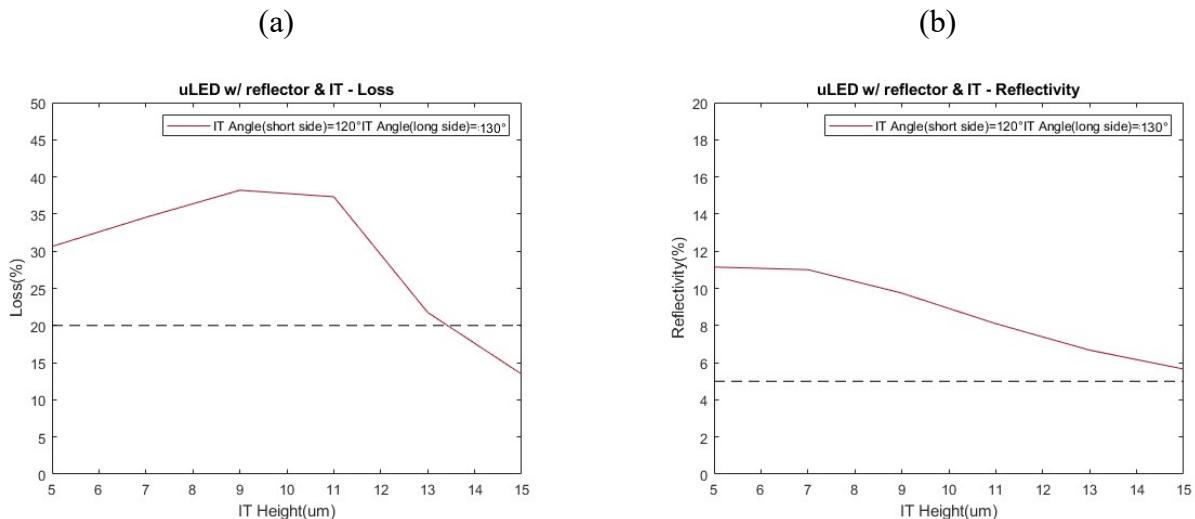


圖 4-12：不同倒梯形高度的(a)出光損失對(b)環境光反射率

從圖 4-12 可得知出光損失的走勢可以看到在 $H_{IT} > 11\mu m$ ，光損隨 H_{IT} 增加而降低；環境光方面由於倒梯形上底隨 H_{IT} 之增加而增加，黑矩陣面積增加，使更多環境光可以被黑矩陣吸收，故將倒梯形 H_{IT} 高度增加有助於同時提升出光效率及對環境光的吸收。

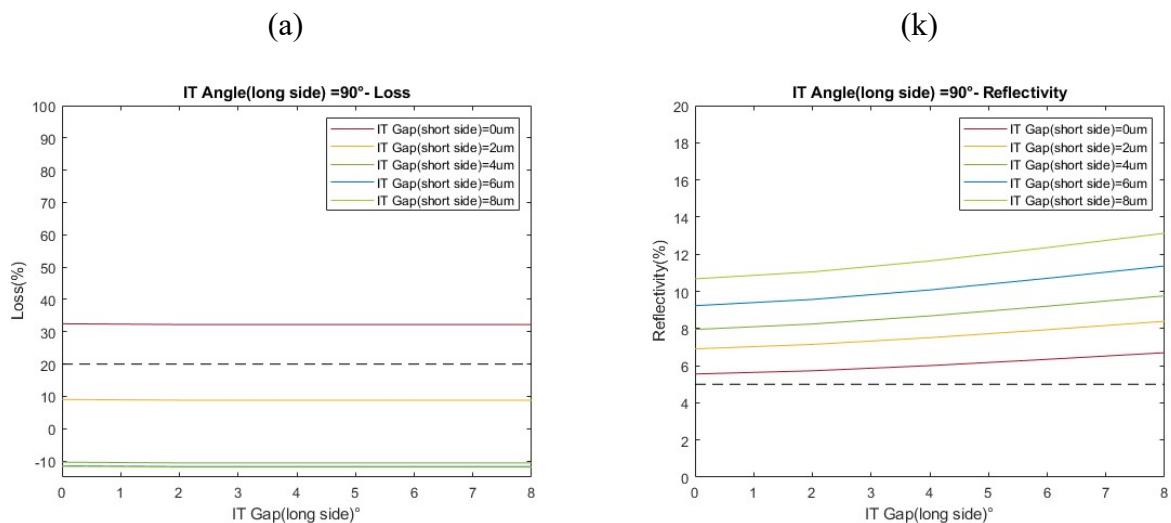


4.4 上黑矩陣之設計與分析

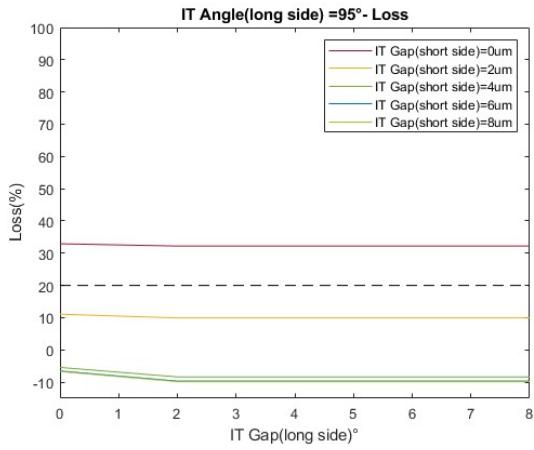
4.4.1 倒梯形間隙

根據 4.3.2 得知黑矩陣放置於倒梯形之上，可有效的降低環境光反射，但使出光損失大幅提升，原因是光路 2 會大量的被吸收，故在此章節探討在維持環境光反射前提下，調整未覆蓋黑矩陣之倒梯形寬度 W_{ITL} & W_{ITS} ，觀察出光損失及環境光反射率之變化。

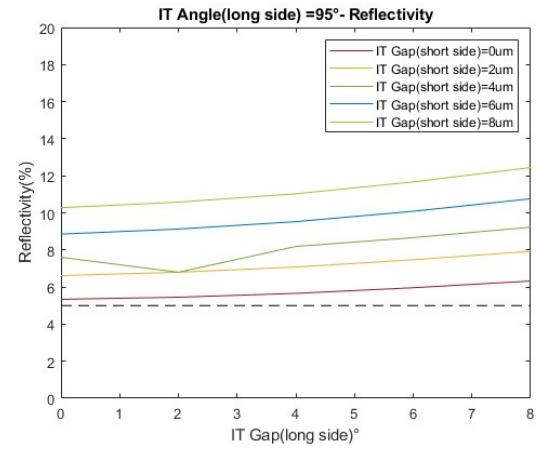
圖 4-13 分別代表，其中左側圖(a、b、c、d、e、f、g、h、i、j)之縱軸為出光損失，右側圖(k、l、m、n、o、p、q、r、s、t)之縱軸為環境光反射率，橫軸為長邊未覆蓋黑矩陣之倒梯形寬度(IT Gap(long side), W_{ITL})，圖中的每一條線代表一個短邊未覆蓋黑矩陣之倒梯形寬度(IT Gap(short side), W_{ITS})，每張圖分別代表著不同的倒梯形長邊角 θ_{ITL} 。固定倒梯形短邊角 $\theta_{ITS} = 120^\circ$ 的原因是：無論是將黑矩陣放在反射杯上(參見圖 4-10(a))或是倒梯形之上(參見圖 4-11(a))， $\theta_{ITS} = 120^\circ$ 在出光的表現明顯都比其他 θ_{ITS} 還要好；而 θ_{ITL} 在 115 度~130 度出光損失接近，且考量當 θ_{ITL} 值大時，黑矩陣更有機會影響到向上折射的光路，故以下每組圖(出光損失、環境光反射率)均對應到一個 θ_{ITL} 值($\theta_{ITL} = 90^\circ \sim 135^\circ$)。



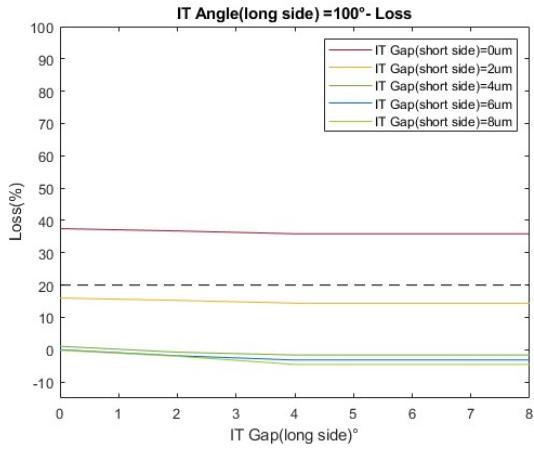
(b)



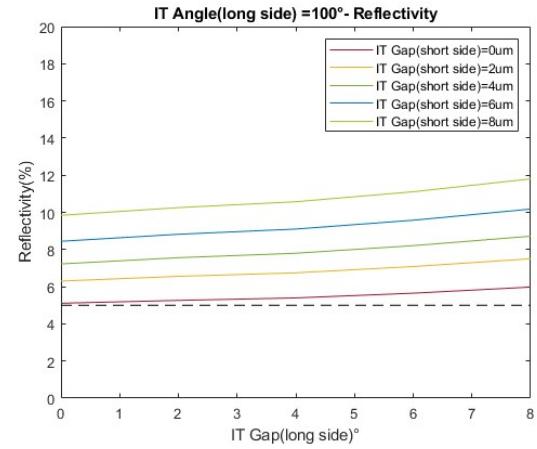
(l)



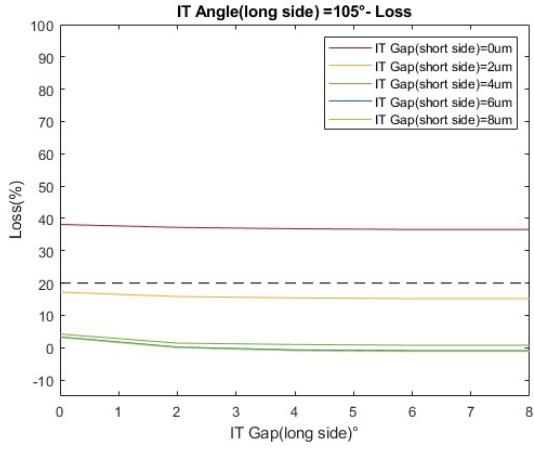
(c)



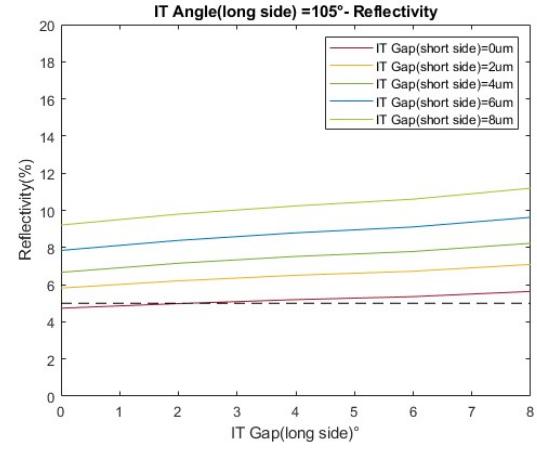
(m)



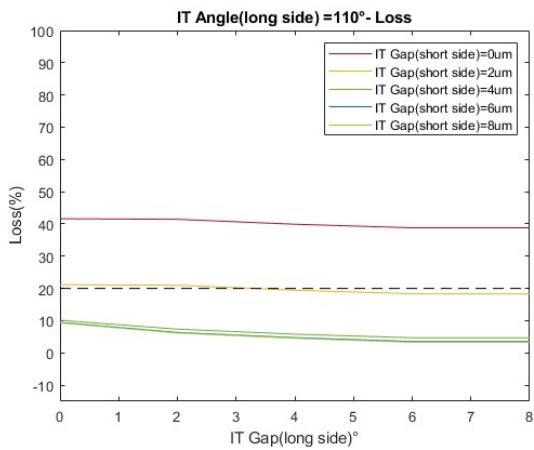
(d)



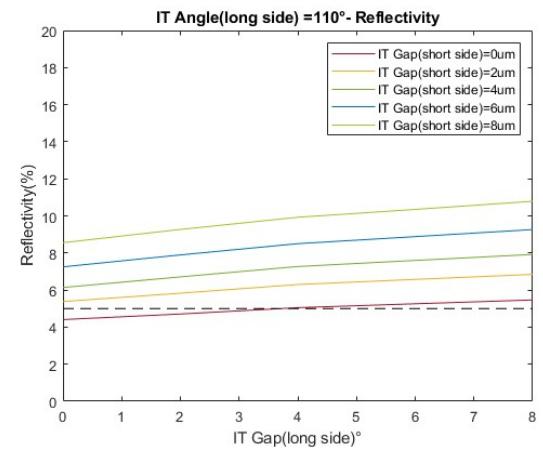
(n)



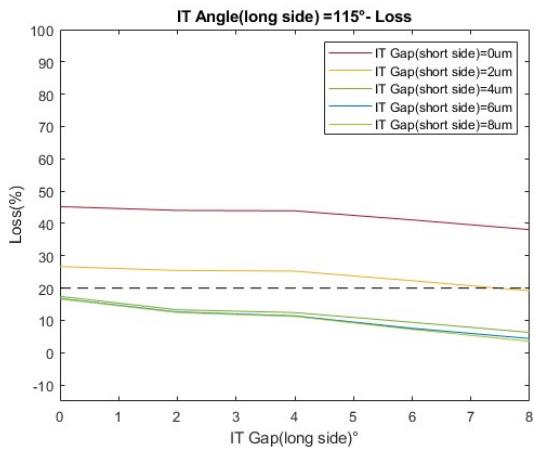
(e)



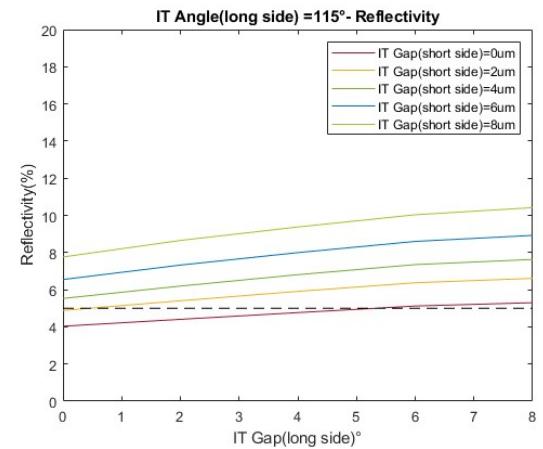
(o)



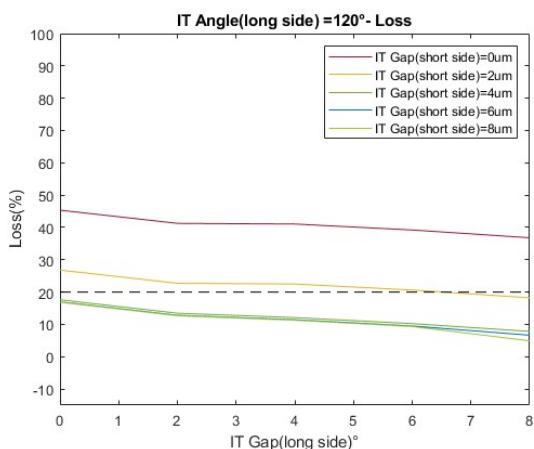
(f)



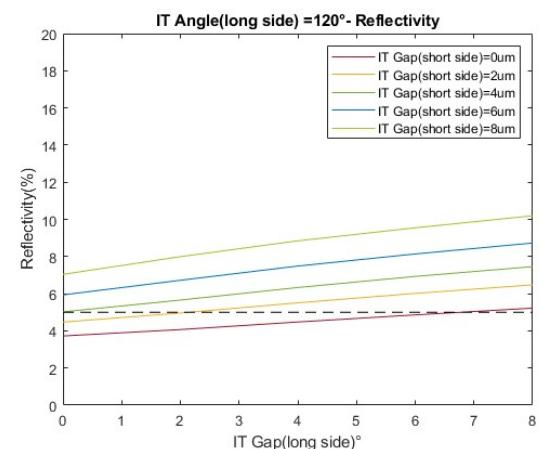
(p)



(g)



(q)



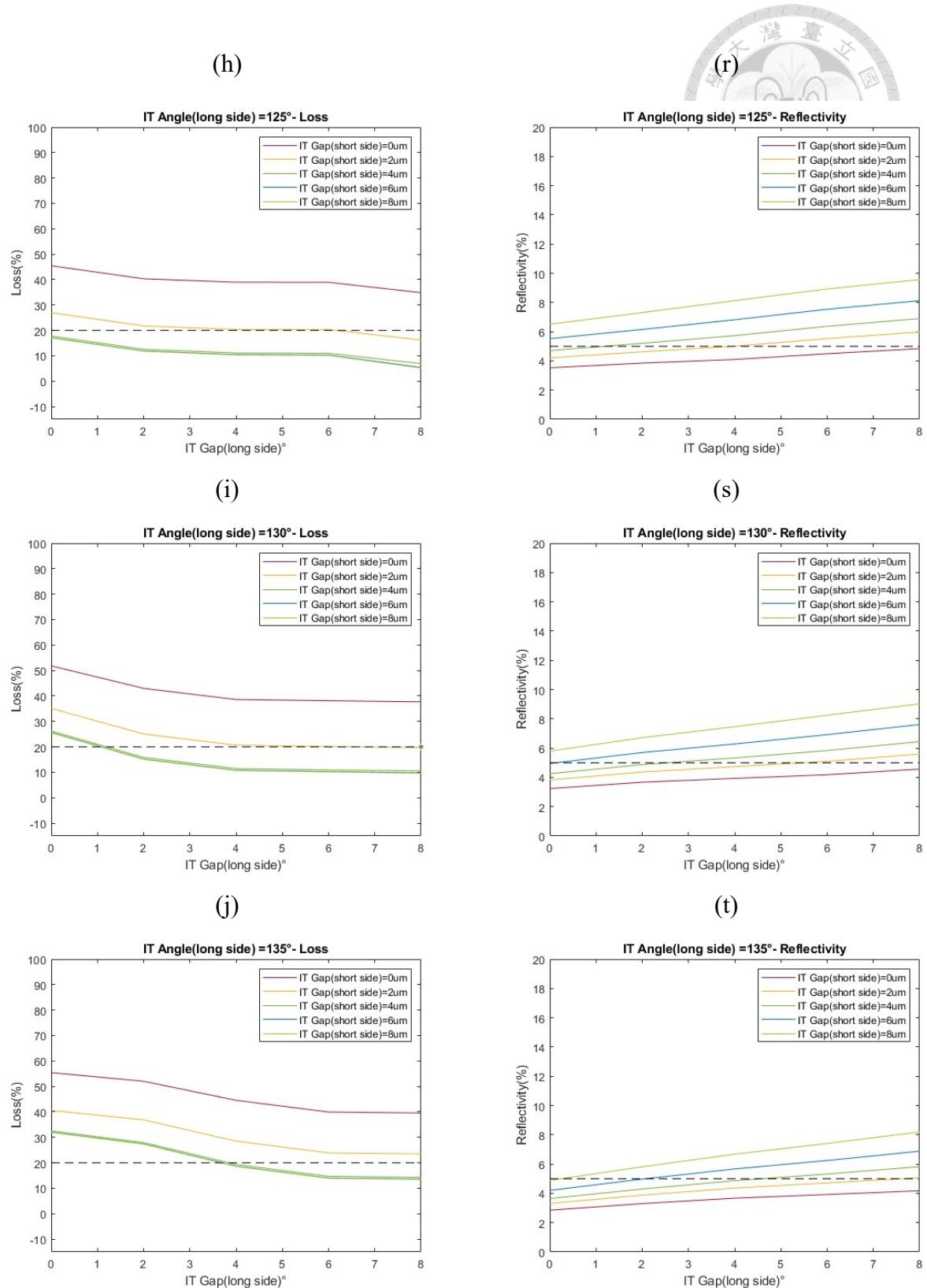
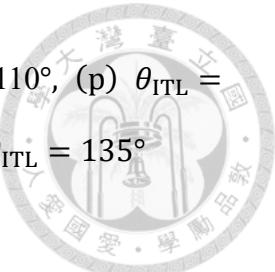


圖 4-13：不同 θ_{ITL} 之光損：(a) $\theta_{ITL} = 90^\circ$, (b) $\theta_{ITL} = 95^\circ$, (c) $\theta_{ITL} = 100^\circ$, (d) $\theta_{ITL} = 105^\circ$, (e) $\theta_{ITL} = 110^\circ$, (f) $\theta_{ITL} = 115^\circ$, (g) $\theta_{ITL} = 120^\circ$, (h) $\theta_{ITL} = 125^\circ$, (i) $\theta_{ITL} = 130^\circ$, (j) $\theta_{ITL} = 135^\circ$ ；環境光反射率：(k) $\theta_{ITL} =$



90° (l) $\theta_{ITL} = 95^\circ$, (m) $\theta_{ITL} = 100^\circ$, (n) $\theta_{ITL} = 105^\circ$, (o) $\theta_{ITL} = 110^\circ$, (p) $\theta_{ITL} = 115^\circ$, (q) $\theta_{ITL} = 120^\circ$, (r) $\theta_{ITL} = 125^\circ$, (s) $\theta_{ITL} = 130^\circ$, (t) $\theta_{ITL} = 135^\circ$

從光損對 W_{ITS} & W_{ITL} 之作圖可得知光損在 $W_{ITS} = 0 \sim 4\mu m$ 隨 W_{ITS} 增加而大幅降低，原因是有多比例之光路 2 (參見圖 4-8) 出光而不是被黑矩陣吸收， W_{ITL} 的增加對光損之降低在 $\theta_{ITL} < 115^\circ$ 較不顯著，在 $\theta_{ITL} = 120^\circ \sim 130^\circ$ 範圍中有較低之光損和環境光反射，雖然 $\theta_{ITL} = 120^\circ \sim 125^\circ$ 有較佳之光損和較差之環境光反射率，但 $\theta_{ITL} = 130^\circ$ 有較低之環境光反射率，且從圖 4-10 的結果得知 $\theta_{ITL} = 130^\circ$ 之倒梯形應有更有利於光路 2 之形成是因黑矩陣的鋪蓋損失部分的出光，後續可透過額外結構設計加強倒梯形之聚光能力，匯聚光路。



4.5 陣列微結構設計與分析

本節探討如何在倒梯形上加入幾何結構，提升倒梯形聚光能力，優化結構之出光效率。

4.5.1 陣列錐之設計

陣列錐之設計是在倒梯形設計存在的情況下強化倒梯形集光的效果，本質上是利用錐面創造一個新的界面，將部分向旁側的出光匯聚改以向上偏折的方式出光如下圖之示意：

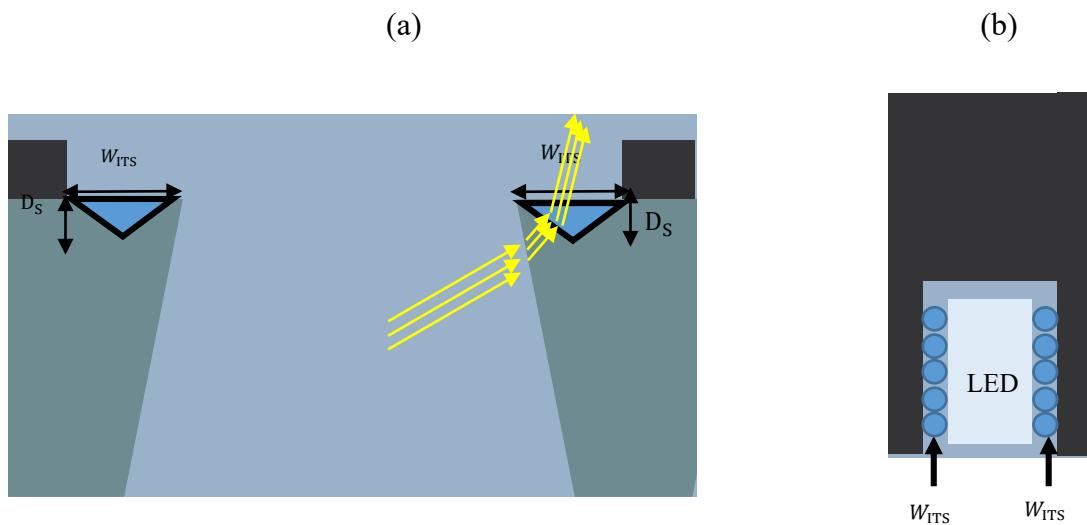


圖 4-14：加入陣列錐之(a)結構出光側視圖(b)結構俯視示意

放置於該位置的好處有二：(1)不影響直接向上的出光，且可以強化向上偏折之光路(光路 2)，陣列錐深度在 1~2.3um 都可以看到不錯的效果，尤其在 1.5~1.7um 使出光損失降到 5%左右。(2)陣列錐擺放不影響吸光光路，不造成明顯的環境光反射率增加。如圖 4-15 所示：

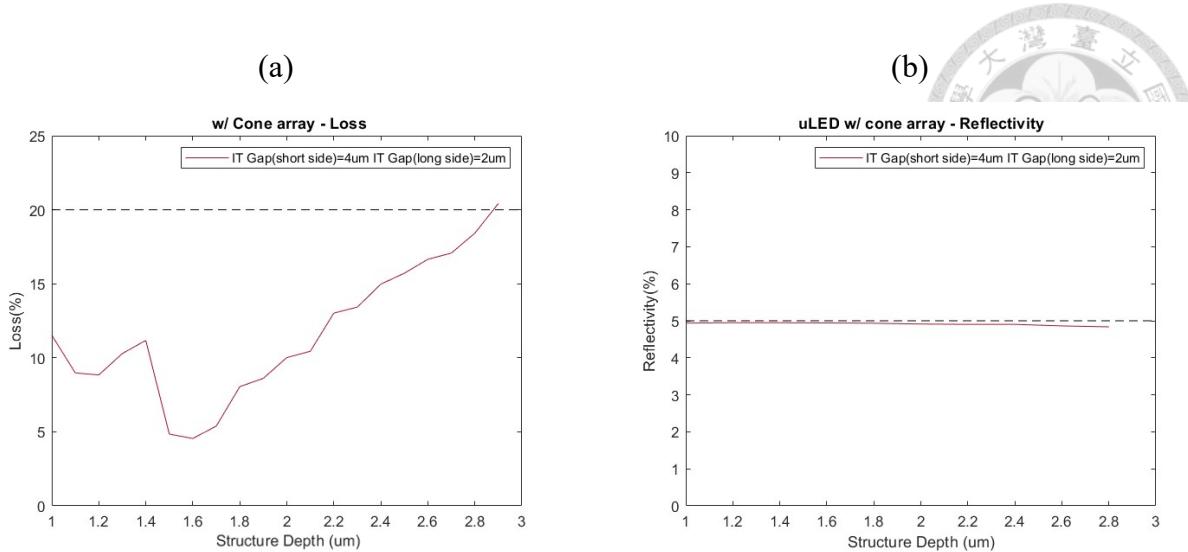


圖 4-15：不同深度之陣列錐的：(a)出光損失對陣列錐之深度作圖及(b)環境光反射率對陣列錐之深度作圖

4.5.2 三角柱陣列之設計

延伸陣列錐的概念，將兩側緊密排列的錐陣列改成一對三角柱，如圖 4-16：

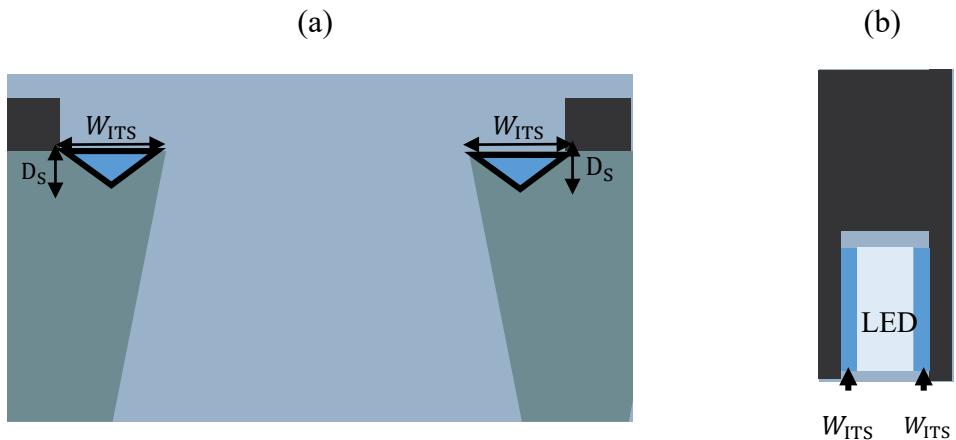


圖 4-16：加入三角柱之：(a) 結構出光側視圖；(b) 陣列錐結構俯視示意

三角柱深度在 1~2um 都可以看到不錯的效果，尤其在 1.1~1.3um 使出光損失降到 5%左右，如圖 4-17 所示：

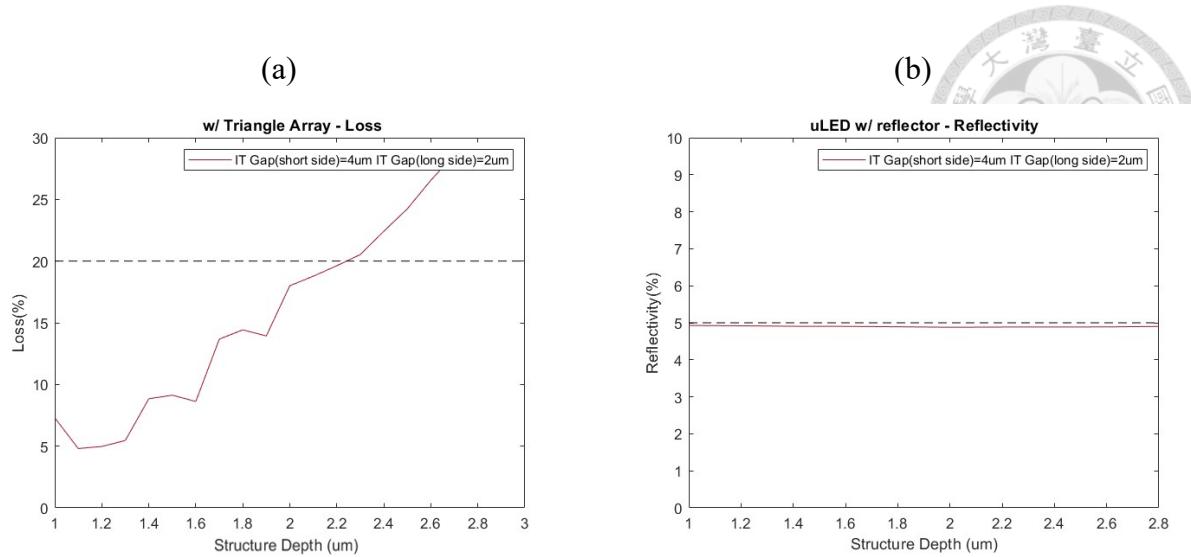


圖 4-17：不同深度之三角柱陣列的:(a)出光損失對三角柱陣列之深度作圖及
(b)環境光反射率對三角柱陣列之深度作圖



4.6 參數統整及效率展示

經先前 4.1~4.5 對結構設計之探討及分析，出光場形隨結構之變化如圖所示，藍色實線為 Micro-LED 裸晶出光場型，經過一般 OC 封裝後場型遽減至黑色實線所示，而加入結構之後場型可以回復到紅色實線。如下圖 4-18 所示：

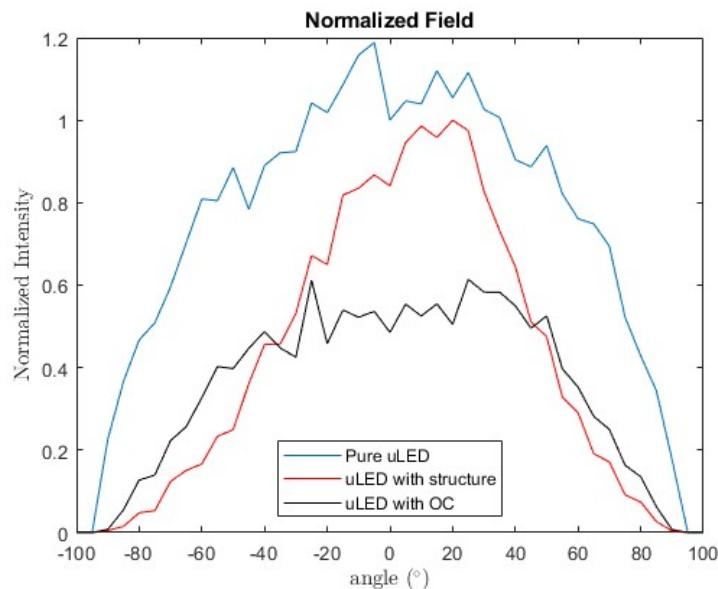


圖 4-18：Micro-LED 裸晶、加入完整結構封裝、OC 封裝之遠場場形出光比較圖

原先未加結構之光損為 40%，環境光反射率為 25%，加入結構後對應之效率及其演進如下表所示：

表 4-1：結構效率演進及最佳效率：

加入反射杯及黑矩陣	
出光損失(%)	22
環境光反射率(%)	12
再加入倒梯形	
出光損失(%)	0，額外增加 12
環境光反射率(%)	~8
再將黑矩陣上移	
出光損失(%)	15
環境光反射率(%)	4.86
再加入陣列錐/三角錐陣列	
出光損失(%)	4.54/4.86
環境光反射率(%)	4.92/4.85

最後，變動參數的優化結果，最佳效率對應的參數如表 4-2 所示：

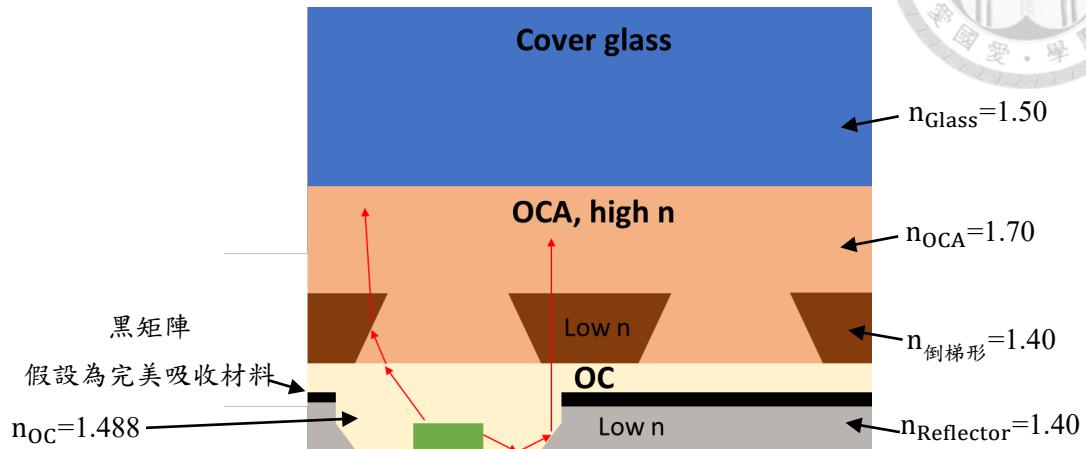
表 4-2：結構最佳效率所對應之參數統整

變數名稱	數值(單位)
反射杯高度 H_{RC}	15(um)
倒梯形高度 H_{IT}	15(um)
反射杯長邊角為 θ_{RAL}	65($^{\circ}$)
反射杯短邊角為 θ_{RAS}	75($^{\circ}$)
倒梯形之長邊角為 θ_{ITL}	130($^{\circ}$)
倒梯形之短邊角為 θ_{ITS}	120($^{\circ}$)
長邊未覆蓋黑矩陣之倒梯形寬度 W_{ITL}	2(um)
短邊未覆蓋黑矩陣之倒梯形寬度 W_{ITS}	4(um)
陣列錐， D_s	陣列錐:1.6/三角柱:1.1(um)

在實驗室先前 Micro-LED 之二次光學設計之研究，包含玻璃 (Glass)、OCA (Over Coating Adhesive)、OC(Over Coating)、微透鏡、反射杯及黑矩陣等等材料，其結構示意、光損及環境光反射率如圖 4-19 所示：



(a) 光損：0 且額外增加 11%；環境光反射率:10%



(b) 光損：13.3%；環境光反射率：10.4%

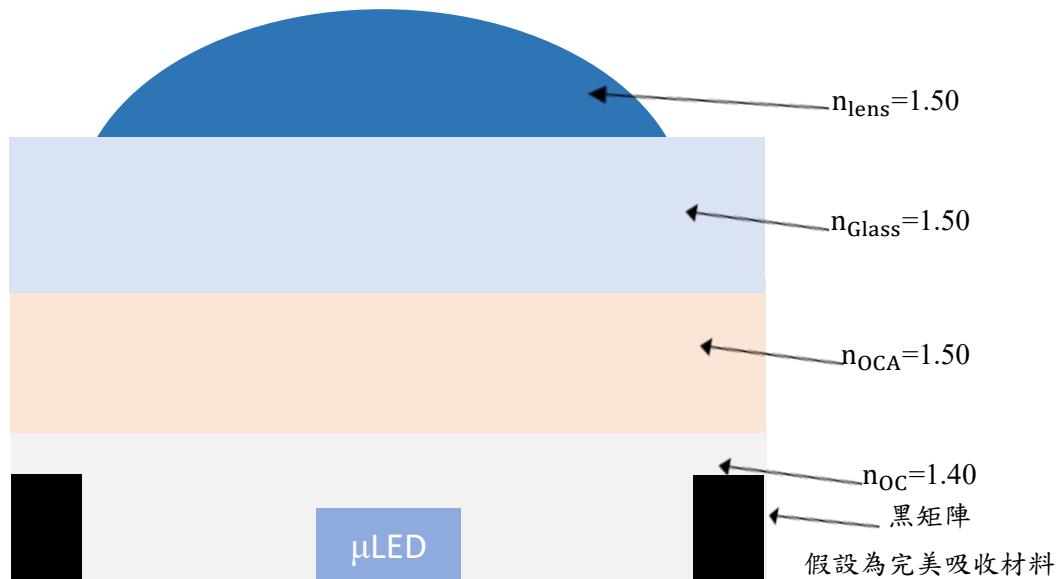


圖 4-19：(a) 提升 Micro-LED 正向輝度與抗反射之二次光學結構設計^[19]；(b) 微透鏡應用於微形發光之研究^[22]

如圖 4-19 所示：(a) 結構之出光損失為 0 且額外增加 11%；環境光反射率 10%，與本文圖 4-10 中之結構，在倒梯形長邊角 θ_{ITL} 為 90 度時相似，且結構及材

料使用更簡單，本文為求進一步降低環境光反射，故將黑矩陣材料上移以降低一半環境光反射率；(b) 結構之出光損失為 13.3%；環境光反射率：10.4%，此結構雖然結構及製程均較為簡單，惟光損及環境光反射率較高。





4.7 二次光學設計之模型製程

為確保所設計之結構有符合實際製程之可行性，以下說明結構製作流程：(1)在 Micro-LED 轉置至背板之後先在背板上旋塗反射杯材料，(2)接著透過蝕刻製程製作反射杯結構，(3)將 Over Coating 材料旋塗於結構上，(4)利用蝕刻製程製作六角形出光空結構，(5)將倒梯形材料填入。(6)～(7)印上黑矩陣材料並蝕刻出微結構，(8)旋塗 Over Coating 材料並在上層鍍上抗反射膜：如下圖 4-20 所示：

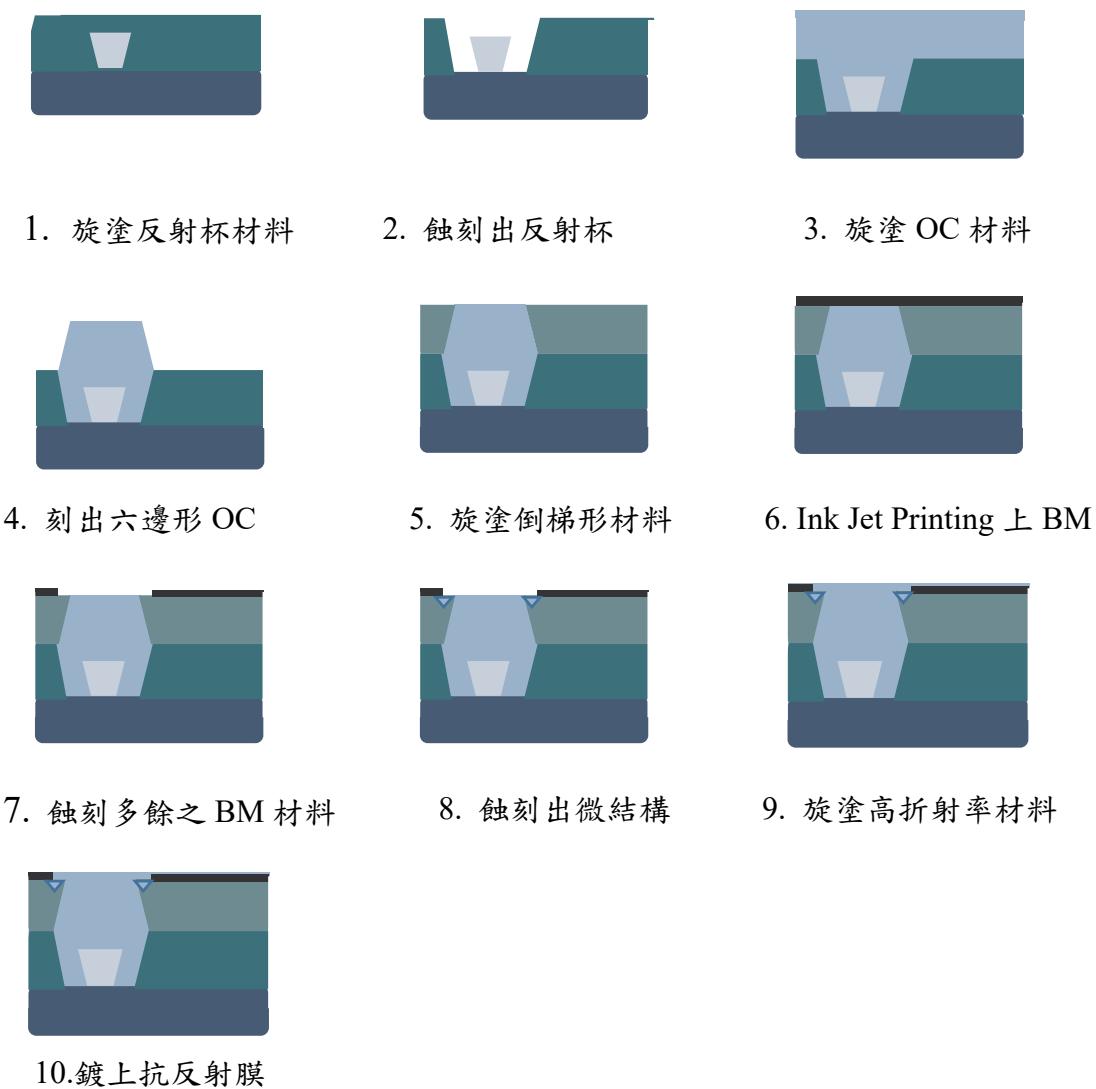


圖 4-20：二次光學結構之製作流程示意圖

第 5 章 結論與未來展望



5.1 結論探討

本論文透過 LightTools®進行二次光學結構設計，並探討出光損耗及環境光反射率與該結構關係並找到最佳的參數組合。

在 4.2 節反射杯設計與分析中可以看到反射杯在長邊為 65 度及短邊為 75 度時光損會有最好的表現，主要是能夠將打在反射杯底的光被反射杯側壁以內全反射向上出光，因此出光損失可以大幅減少。

在 4.3 節倒梯形設計與分析中在既有結構中加入倒梯形結構以加強向上折射，結果得知增加 θ_{ITL} 及 θ_{ITS} 對出光效率有顯著提升，但當 θ_{ITL} 超過 130 度及當 θ_{ITS} 超過 120 度時，內全反射波導效應會壓迫到直接向上出光(光路 1)及向上偏折的光(光路 2)，使光損提升；環境光反射率因為原結構之反射杯角度限制，侷限了黑矩陣擺放面積，當黑矩陣位置上移至倒梯形上方時，結果顯示對於較大的 θ_{ITL} 及 θ_{ITS} 角度有顯著的提升對環境光吸收之效果，再將環境光反射率減半。

在 4.4 節上黑矩陣之設計中探討倒梯形參數 W_{ITL} 、 W_{ITS} 對於出光損失及環境光反射率的影響，結果得知在 $W_{ITL} = 2\text{um}$ 、 $W_{ITS} = 4\text{um}$ ，出光損失為 15.84%，環境光反射率為 4.86%。在 4.5 節陣列微結構之設計中加入微結構之設計，結果得知當陣列錐 $D_s = 1.6$ / 三角柱 $D_s = 1.1(\text{um})$ 出光損失為 4.54/4.86%，環境光反射率為 4.92/4.85%。

此外先前在第二章提到向上對齊式結構—像素對準方式，因保留完整之出光平面使得中心小角度之出光能夠直接向上出光（路徑 1），能對於出光有較佳的效果，惟在本篇研究當中，未以向上對齊之方式進行後續參數調變及優化，一方面使參數設定具靈活性，另一方面也能透過比較倒梯形上底寬度與 Micro-LED 發光範圍之關係，驗證向上對齊式結構—像素對準之方法是否適用於此 Micro-LED 之結構。由 θ_{RAL} 、 θ_{RAS} 、 θ_{ITL} 和 θ_{ITS} 之結果可計算六角形出光之倒梯形上底寬度，並



與研究所用之 Micro-LED 光源尺寸比較，如下表 5-1：

表 5-1：倒梯形上底寬度與 Micro-LED 尺寸比較

	長邊尺寸(um)	短邊尺寸(um)
Micro-LED 發光範圍	≈31	≈19.5
倒梯形上底寬度	29.2	18.3

從表 5-1 得知出光模型當中無論長邊或是短邊，倒梯形的上底寬度與 Micro-LED 向上出光範圍尺寸接近，但誤差存在，表示上底式對齊概念^[17]亦有助於 Micro-LED 之光損降低，但仍需透過更細微之參數優化進一步降低光損。



5.2 未來展望

本研究提出之六角形出光結構，改善了常規封裝以後之出光損失以及環境光反射率，然而六角形出光結構尚有一些潛在的應用：例如考慮 Micro-LED 廣視域的特性，將 Micro-LED 引入車用面板，可能會因廣視域的特色，使垂直於擋風玻璃方向的面板光源打到擋風玻璃後，進而影響駕駛者的視線，倘若將一側的光做方向性的匯聚，並維持另一個方向的廣視域，則有機會改善駕駛者視線受擾之問題，在六角形結構的概念中，如果將長邊及短邊的倒光結構做不同的設計，就有機會達成上述的需求，如下圖所示：

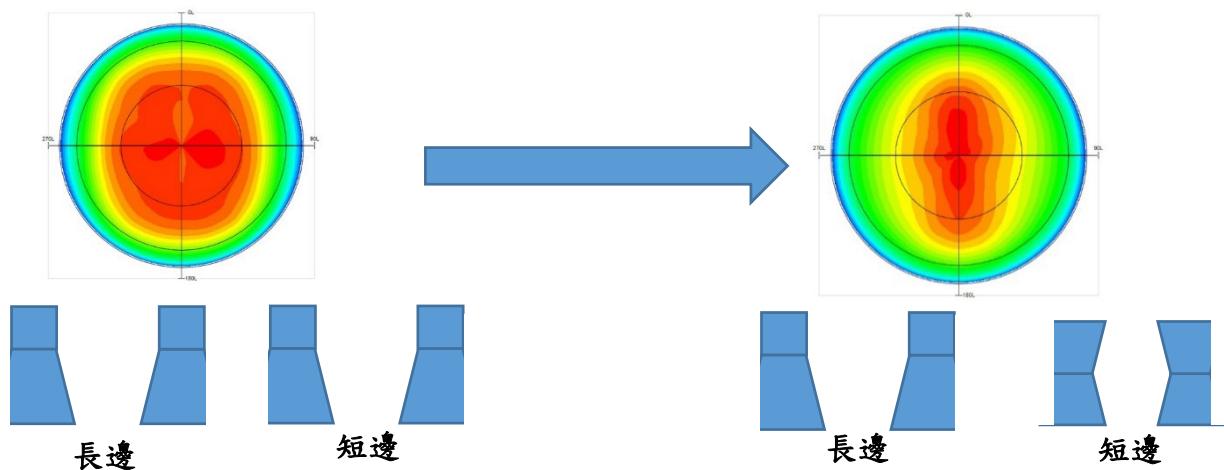
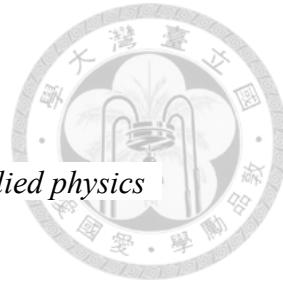


圖 5-1：透過對長邊短邊做不同設計(非對稱六邊形的設計)可達成非對稱光型

而針對繼續將出光效率提升的部分，倘若能因應大角度出光的角度分布，以弧形之反射杯作為發想，試圖將不同方向的光路以不同的手段做導光並向上出光，相信對於繼續推進 Micro-LED 的二次光學技術會有幫助。

參考文獻



- [1] Tang, C. W., et al., "Organic electroluminescent diodes." *Applied physics letters* 51.12 (1987): p. 913-915.
- [2] Popovic, Z. D., et al., "Reliability and degradation of small molecule-based organic light-emitting devices (OLEDs)." *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics* 8.2 (2002): p. 362-371.
- [3] Hong, G., et al., "A brief history of OLEDs—emitter development and industry milestones." *Advanced Materials*, 33.9 (2021): 2005630.
- [4] Huang, Y., et al., "Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: Present status and future perspectives." *Light: Science & Applications*, 9.1 (2020): p. 1-16.
- [5] Miao, W. C., et al., "Microdisplays: Mini-LED, Micro-OLED, and Micro-LED." *Advanced Optical Materials*, (2023): 2300112.
- [6] Wu, T., et al., "Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology." *Applied Sciences*, 8.9 (2018): 1557.
- [7] Bright, T. O., et al., "Efficient blue light-emitting diodes leading to bright and energy-saving white light sources." *Sci. Backgr. Nobel Prize Phys* (2014): p. 1-9.
- [8] Li, Y., et al., "Highly efficient and ultra-compact micro-LED pico-projector based on a microlens array." *Journal of the Society for Information Display*. (2023).
- [9] Gou, F., et al., "Angular color shift of micro-LED displays." *Optics express*, 27.12 (2019): p. A746-A757.
- [10] Hsiang, E. L., et al., "Tailoring the light distribution of micro-LED displays with a compact compound parabolic concentrator and an engineered diffusor." *Optics Express*, 29.24, (2021): p. 39859-39873.
- [11] Kasap, S. O. "Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices 2/e"(2012)
- [12] 馬江智. "以阻抗特性量測來分析半導體發光元件之微分載子生命期." 交通大



- [13] Sun, Y., et al., "Highly transparent, ultra-thin flexible, full-color mini-LED display with indium-gallium-zinc oxide thin-film transistor substrate." *Journal of the Society for Information Display* 28.12 (2020): p. 926-935.
- [14] Tian, P., et al., "Size-dependent efficiency and efficiency droop of blue InGaN micro-light emitting diodes." *Applied Physics Letters*, 101.23 (2012): 231110
- [15] Olivier, F., et al., "Shockley-Read-Hall and Auger non-radiative recombination in GaN based LEDs: A size effect study." *Applied Physics Letters*, 111.2 (2017): 22104
- [16] 郭令儀. "具有黑矩陣之有機發光二極體的效率提升之研究." 臺灣大學光電工程學研究所學位論文 (2016)
- [17] 江正仁. "應用於有機顯示器具高正向亮度且消除模糊效應之微梯形陣列結構膜設計." 臺灣大學光電工程學研究所學位論文 (2012)
- [18] Lin, H. Y., et al., "Luminance and image quality analysis of an organic electroluminescent panel with a patterned microlens array attachment." *Journal of Optics*, 12.8 (2010): 85502.
- [19] 賴皓云. "提升 micro LED 正向輝度與抗反射之二次光學結構設計." 臺灣大學光電工程學研究所學位論文 (2022)
- [20] Jensen, H. W., et al. "Monte Carlo ray tracing." *ACM SIGGRAPH*, 5.44 (2003): 340769537
- [21] Metropolis, N., et al., "The monte carlo method." *Journal of the American statistical association*, 44.247. (1949): p. 335-341.
- [22] 吳思潔. "微透鏡應用於微型發光二極體之研究." 臺灣大學光電工程學研究所學位論文 (2022): p.1-77