

國立臺灣大學電機資訊學院光電工程學研究所

碩士論文

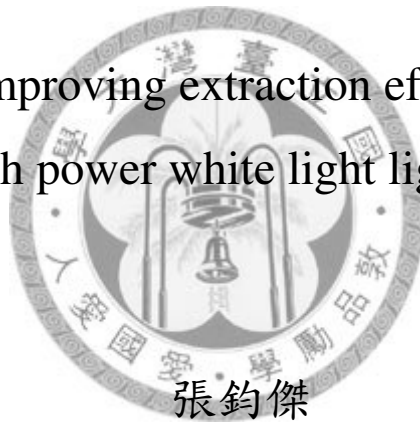
Graduate Institute of Electro-Optical Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science

National Taiwan University

Master thesis

提升高功率白光發光二極體光取出效率封裝技術之研究

The research on improving extraction efficiency packaging
technology for high power white light light-emitting diodes



張鈞傑

Chun-Chieh Chang

指導教授：李允立 博士

Advisor: Yun-Li Li, Ph. D.

中華民國 97 年 7 月

July 2008

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

提升高功率白光發光二極體光取出效率

封裝技術之研究

The research on improving extraction efficiency
packaging technology for high power white light
light-emitting diodes

本論文係 張鈞傑 君 (R95941019) 在國立臺灣大學光電
工程學研究所完成之碩士學位論文，於民國 97 年 07 月 07 日
承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

李 允 三

(簽名)

(指導教授)

張 允 崇

黃 鼎 偉

所長

黃 升 龍

(簽名)

致 謝

本論文成果得以順利的完成，首先誠摯的感謝指導教授李允立博士的教導，使我對於 LED 封裝及相關的知識有深入的探索與了解，教授不時的討論並指點我正確的方向也使我在兩年中獲益匪淺。老師對於做實驗及作學問的嚴謹態度更是我輩學習的典範。此外亦感謝兩位口試委員：黃鼎偉教授以及張允崇教授對於研究內容的指教，使得本論文的內容能夠更完善並提供了更多未來的研究方向及想法。

誠摯的感謝齊瀚光電股份有限公司對於本論文研究協助，提供本研究實作部份所需的樣品。在此感謝劉家齊總經理、季寶琪協理、胡志傑、黃冠鈞、沈季儒等人，給予 LED 封裝經驗上的指導與討論，此對於本研究無論實做或模擬的過程均有相當大的幫助。

兩年裡的日子，實驗室裡共同的生活點滴，除了學術上的討論外必須感謝大家忍受我不怎麼好笑的爛梗。十分感謝隨贏、逸儒、志凌、蘇逸、凱文、冠詠、玫丹、惠心學長姐，俊廷、育弘、閔馨、心煜諸位戰友，以及邵宇、敬堯、宗彧、執中學弟對於本研究上的協助與討論，使得本研究得以順利的進行。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親。

摘要

本論文的主旨在於探討如何藉由改善 LED 模組外在封裝的方式，加以增進整體 LED 模組之光取出效率(extraction efficiency)及增進白光 LED 的光學特性：包括光均勻性或增進單位立體角光強度。主要利用 TracePro 光學軟體進行整體 LED 模組的設計與模擬，並輔以部份實際實驗量測結果來確認模擬結果的正確性與可靠性。

研究中首先成功的於 TracePro 軟體中建立了 YAG:Ce 螢光粉的散射模型與光波長轉換機制模型。之後我們藉由設計不同的凹杯以及取光鏡的形狀，搭配不同形式螢光粉的塗佈方式來嘗試提升 LED 模組的總光通量；另外藉由設計不同形式的反射杯及聚光透鏡來使 LED 達成高單位立體角光強度的目的。

在增進整體 LED 模組光取出效率方面，根據模擬結果，擁有最高光通量強度的組合為利用上直徑 4.2 mm、下直徑 3.2 mm、深度 1 mm 形式的凹杯，搭配上螢光粉遠離塗佈的技術，再加上型狀為半圓取光鏡的 LED 模組。預計可讓裸片發光強度為 170 mW 的藍光晶片經由封裝過後發出 173.27 mW、相對色溫為 6500K 的白光，換算出的流明值則約為 54 流明。此光通量值為應用相同凹杯配合上傳統封裝形式(螢光粉均勻塗佈以及未加上取光鏡)時所能獲得的 1.38 倍。

在增進 LED 模組單位立體角光強度方面，比較利用反射杯及聚光透鏡兩種聚光方式：利用反射杯形式可獲得更高的單位立體角光強度值，其中心單位立體角光強度為未加反射杯 LED 模組的 6.36 倍，但卻伴隨較高的光損耗(6.33%)而造成較低的總光通量；而利用聚光透鏡可在光損耗較小(小於 2%)的情況下達成聚光的目的，但能達成的單位立體角光強度值為未加聚光透鏡 LED 模組的 5.27 倍，小於利用反射杯形式聚光所能達成的值。

關鍵字：發光二極體、螢光粉、封裝、光取出效率

Abstract

In this thesis, we changed the LED packaging to improve the light extraction efficiency and light characteristic of a white light LED module. The optical software TracePro was used to design the LED module. The radiant flux was optimized by designed different cups, phosphor applying methods, and lens shapes of LED modules. Higher radiant intensity was obtained by designing the reflector or the condensing lens of a LED module.

At first we successfully established the simulation model by TracePro software for the white light LED using a blue LED chip with Ce:YAG phosphor. In the study of high extraction efficiency of a LED module, the highest radiant flux was obtained by using remote phosphor on type B cup (top diameter 4.2 mm, bottom diameter 3.2 mm, depth 1 mm) with a semi-sphere shape lens. The efficiency enhancement was 38% compared with the conventional LED structure.

In the study of high radiant intensity of LED module, higher radiant intensity was obtained by using the LED module with a designed reflector. The radiant intensity of the LED module with a designed condensing lens was enhanced by a factor of 6.36 compared with the radiant intensity of a LED module without a reflector, but high light radiant flux loss was caused (6.33%) at the same time. Another method to get higher radiant intensity was using the condensing lens. The radiant intensity of the LED module with a designed condensing lens was enhanced by a factor of 5.27 compared with the radiant intensity of a LED module without a condensing lens. However, lower light radiant flux loss caused by the LED module with a condensing lens was lower than the value got from the LED module with a reflector.

Keywords : LED 、 phosphor 、 packaging 、 light extraction efficiency

目 錄

口試委員會審定書.....	I
致謝.....	II
中文摘要.....	III
英文摘要.....	IV
目 錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	X
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 白光 LED 之應用.....	2
第二章 LED 封裝技術.....	3
2.1 LED 介紹與工作原理.....	3
2.2 螢光粉介紹與發光原理介紹.....	7
2.3 LED 封裝技術.....	9
2.4 白光 LED 技術.....	12
第三章 LED 封裝光學模擬.....	14
3.1 TracePro 光學模擬軟體.....	14
3.2 高功率白光 LED 模組架構與各項模擬參數.....	16
3.3 YAG 螢光粉參數設定.....	21
第四章 不同封裝設計之光學模擬結果與討論.....	30
4.1 螢光粉塗布及凹杯型式對於白光 LED 發光效率分析.....	30
4.2 取光鏡對藍光 LED 模組發光效率與場形影響分析.....	33
4.3 取光鏡對白光 LED 模組發光效率分析.....	36
4.4 白光 LED 模組色均勻性分析與改進.....	38

4.5 反射杯對於白光 LED 模組發光效率及場形之影響分析	43
4.6 二次光學取光鏡設計與模擬	47
4.7 本章小結	53
第五章 結論與未來展望	55
5.1 結論	55
5.2 未來展望	56
參考文獻	57



圖目錄

圖 1-1	白光 LED 與其它照明技術流明效率發展比較圖	1
圖 1-2	LED 在發展過程中市場上之應用	2
圖 2-1	半導體材料的能階圖及電子和電洞躍遷圖	3
圖 2-2	發光二極體 p-n 接面能帶示意圖	4
圖 2-3	量子井結構示意圖	5
圖 2-4	室溫下 AlGaInN 四元材料能隙與晶格常數關係圖	5
圖 2-5	螢光材料發光原理示意圖[13]	7
圖 2-6	螢光粉兩種放光機制	8
圖 2-7	傳統子彈型 LED 封裝結構圖	9
圖 2-8	高功率凹杯型 LED 模組結構圖	10
圖 2-9	矽膠與環氧樹脂於紫外光照射後穿透率比較圖[17]	10
圖 2-10	LED 晶片內部結構及內部光徑示意圖	11
圖 3-1	TracePro 軟體介紹圖	15
圖 3-2	TracePro 中凹杯型 LED 模組基本架構圖	16
圖 3-3	各種光波段鋁的折射係數 n 與消光係數 k	17
圖 3-4	各種光波長光入射鋁對應之反射率	17
圖 3-5	兩種光線照射至晶片表面機制示意圖	18
圖 3-6	LED 晶片表面對於各種光波段等效反射率量測圖[23]	18
圖 3-7	矽膠 OE-6550 於厚度為 24.58 mm 時各波段光之光學穿透率	19
圖 3-8	矽膠 OE-6550 於各波段光吸收係數 α	20
圖 3-9	TracePro 含螢光物質光學模組模擬流程圖	21
圖 3-10	螢光粉吸放光與散射光實驗裝置圖[27]	22
圖 3-11	TracePro 螢光粉吸放光與散射光架構模擬圖	23
圖 3-12	TracePro 螢光粉吸放光與散射光改良架構模擬圖	24

圖 3-13 YAG:Ce 螢光粉於不同激發光源之發射光頻譜圖	26
圖 3-14 激發藍光於螢光層受螢光粉散射示意圖	27
圖 3-15 螢光粉吸放光與散射光量測架構圖[32]	28
圖 3-16 不同濃度 YAG:Ce 螢光粉穿透及反射之藍、黃光比例圖[32].....	28
圖 3-16 不同濃度 YAG:Ce 螢光粉穿透及反射藍、黃光比例模擬結果圖	29
圖 4-1 螢光粉在凹杯型 LED 模組中三種塗佈形式	30
圖 4-2 LED 反射凹杯結構圖	31
圖 4-3 TracePro 包含取光鏡的 LED 模組結構圖	33
圖 4-4 不同凹杯搭配不同取光鏡之總光通量圖	34
圖 4-5 凹杯 A 搭配不同取光鏡藍光 LED 發光場形強度分布模擬圖	35
圖 4-6 凹杯 B 搭配不同取光鏡藍光 LED 發光場形強度分布模擬圖	35
圖 4-7 凹杯 C 搭配不同取光鏡藍光 LED 發光場形強度分布模擬圖	35
圖 4-8 不同凹杯及螢光粉塗佈形式搭配各式取光鏡 LED 模組光通量圖.....	36
圖 4-9 原始相對色溫約為 6500K 各式 LED 模組在加上不同取光鏡後 CCT 變化 圖	37
圖 4-10 控制最終 LED 模組相對色溫值於約 6500K，各種 LED 模組的光通量圖	37
圖 4-11 不同螢光粉塗佈方式仿真光照圖	38
圖 4-12 TracePro 量化光均勻性架構圖	39
圖 4-13 不同螢光粉塗佈方式光均勻性比較圖	39
圖 4-14 不同螢光粉塗佈方式發光場形強度分布圖	40
圖 4-15 以 d_1 、 d_2 、 d_3 三個變數定義遠離塗佈螢光粉層的形狀	41
圖 4-16 不同遠離晶片螢光粉塗佈方式光均勻性比較圖	42
圖 4-17 於凹杯型 LED 模組加上反射杯實體圖	43
圖 4-18 TracePro 反射杯模擬架構圖	43

圖 4-19 各式反射杯獲得最大光強度圖	44
圖 4-20 反射杯高度為 15mm 時，不同斜率反射杯發光場形強度分布圖	45
圖 4-21 不同斜率反射杯光半功率角度	45
圖 4-22 各式反射杯總幅射光通量圖	46
圖 4-23 各式反射杯總幅射光損耗比例	46
圖 4-24 凹杯型 LED 模組上加上二次光學聚光鏡實體圖	47
圖 4-25 TracePro 二次光學聚光鏡架構圖	47
圖 4-26 不同上直徑 D_1 聚光鏡發光場形強度分布圖	48
圖 4-27 TracePro 改良式光學聚光鏡架構圖	49
圖 4-28 改良型聚光鏡於不同上直徑 D_1 發光場形強度分布圖	50
圖 4-29 TracePro 含聚光透鏡 LED 模組光線追跡圖	51
圖 4-30 TracePro 模擬具反射聚光杯或聚光透鏡 LED 模組仿真光照圖	52
圖 4-31 具反射聚光杯或聚光透鏡 LED 光均勻性比較圖	52



表目錄

表 2-1	LED 所用化合物材料特性.....	6
表 2-2	實現白光 LED 的三種方法.....	13
表 3-1	道康寧生產 LED 封裝常用矽膠資料表[17].....	18
表 3-2	螢光粉吸放光與散射光實驗結果[27]	23
表 3-3	不同各向異性係數對於紅光光源散射模擬結果.....	25
表 3-4	不同莫爾消光係數 K 值對於最終藍光、黃光比例之影響	28
表 3-5	不同 YAG:Ce 螢光粉濃度及散射因子對照表	29
表 4-1	三種不同形式凹杯尺寸	31
表 4-2	不同凹杯形式與不同螢光粉塗佈型式之光效率比較.....	32
表 4-3	三種凹杯所用五種取光鏡曲率半徑對照表	33
表 4-4	不同螢光粉遠離塗佈形式 d_1 、 d_2 、 d_3 值及相對應的最終相對色溫值，總 輻射光通量對照表.....	41
表 4-5	二次聚光透鏡各種不同 D_l 時半功率角角度，總光通量，最大單位立體 角光強度	48
表 4-6	改良型聚光鏡不同 D_l 時半功率角角度，總光通量，最大單位立體角光強 度	50

第一章 前言

1.1 研究動機

發光二極體 (light-emitting diode, LED) 照明技術被視為本世紀新興最重要的照明技術主流之一。原因除了 LED 具備壽命長、耐用、耐震、適合量產、體積小、反應快、無汞的優點外，另一最大的特點在於其光照流明效率有相當大進步的潛力。圖 1-1 為白光 LED 與其他照明技術之流明效率發展比較圖。如圖所示，現有常見照明技術的流明效率發展至今都已幾乎達到其物理極限而難以持續提升，相較之下白光 LED 技術的發光效率則從 2000 年起每年以 10 lm/W 的速度持續提升，並預估在 2010 年後市面上量產的白光 LED 流明效率便可超越目前常見的照明設備[1]，進一步成為下一世代的照明主流。

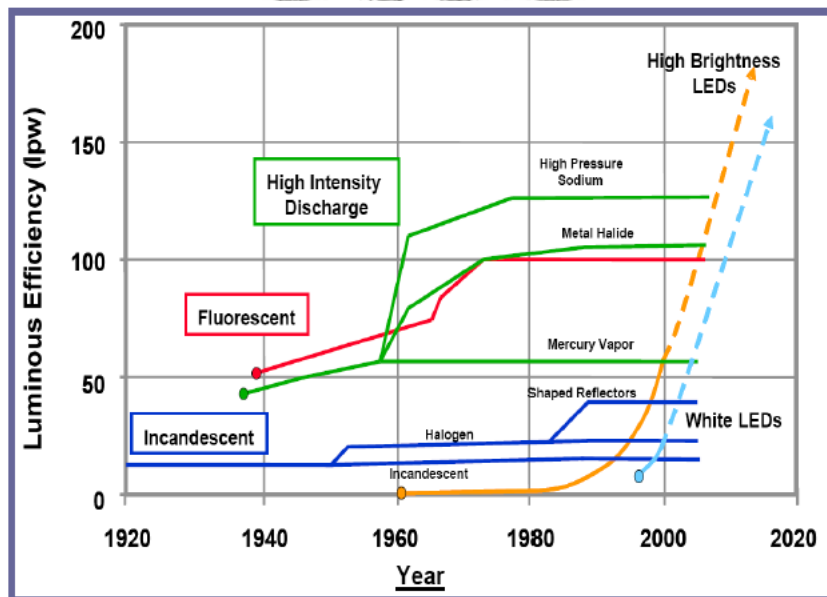


圖 1-1 白光 LED 與其它照明技術流明效率發展比較圖

本論文的研究動機主要在探討如何藉由改善 LED 模組外在封裝的方式，加以增進整體 LED 模組之光取出效率(extraction efficiency)及增進白光 LED 的光學特性:包括光均勻性或增進單位立體角光強度。主要利用 TracePro 光學軟體進行整體 LED 模組的設計與模擬，並輔以部份實際實驗量測結果來確認模擬結果的正確性與可靠性。我們藉由設計不同的凹杯以及取光鏡的形狀，搭配不同形式螢光粉的塗佈方式來嘗試提升 LED 模組的光通量；另外設計不同形式的反射杯及聚光透鏡來達成高單位立體角光強度的目的。

1.2 白光 LED 之應用與歷史發展

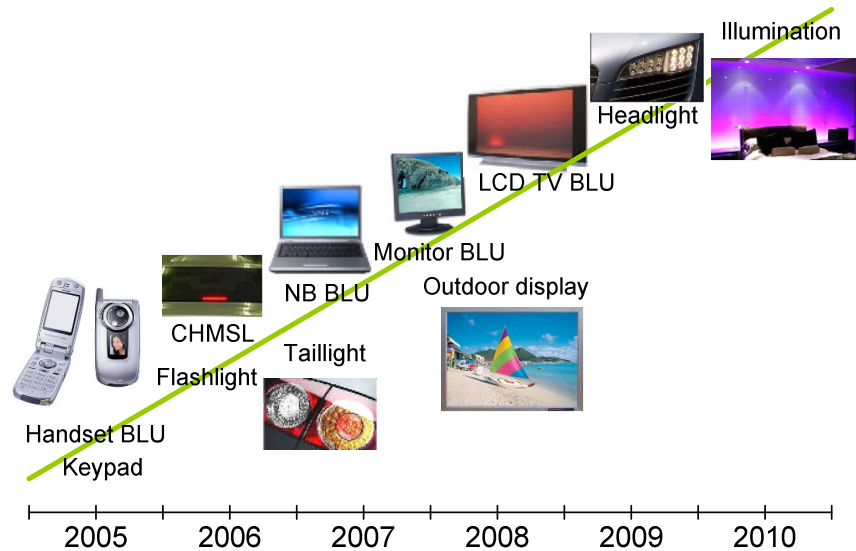


圖 1-2 LED 在發展過程中市場上之應用

白光 LED 的發展始於高亮度藍光 LED 的發明，高亮度藍光 LED 則是由日本日亞化學公司的中村(Nakamura)博士於1987年以兩氣流法有機金屬氣相沈積反應器(Two flow MOCVD)成長高品質的Ga_N薄膜製成[2]，之後並成功於1996年開始大量生產出售高亮度藍光 LED。高亮度藍光 LED 的量產促成了白光 LED 的發展，這是由於白光並非單一波長的光，而是必須搭配兩種以上可見光波段，人眼才能感受到「白光」。目前白光 LED 的發展主流可分為兩種方式：一是利用多種不同顏色的LED晶片(multi-chip LED)封裝在一起，藉由混光產生白光[3]；二是利用螢光粉(phosphor)將部份 LED 所發的短波長光(如藍光)轉換為其他波長較長的光色(如黃光)，藉此搭配出白光[4]。

LED 在發展過程中市場上之應用如圖1-2所示，在過去主要應用市場為手機的背光模組(2005年)以及汽車煞車燈(2006~2007年)，目前階段目標則以液晶螢幕背光源為主，從筆記型電腦、桌上型電腦到液晶電視的背光模組，此外汽車的車頭燈也逐漸改以 LED 燈為主流。未來則期望能於2010年起逐漸將白光 LED 應用在一般照明上。白光 LED 是否能成功取代現有一般照明技術的主要關鍵之一便取決於其效率及亮度能否超越現有的一般照明技術，而本論文的目的便在於藉由改善高功率白光 LED 的封裝來有效提升其發光效率及亮度，使得 LED 應用在一般照明的時代更進一步的來臨。

第二章 LED 封裝技術

2.1 LED介紹與工作原理

LED 的組成材料為半導體材料，本節先在此說明半導體材料電子及電洞在能帶中躍遷情形。如圖2.1所示為半導體材料能階圖及電子和電洞躍遷圖。如圖所示，半導體的能階可大致分為傳導帶(conduction band; E_c)，價電帶(valence band; E_v)，而傳導帶與價電帶間的區域則為電子與電洞無法停留的「能隙」(Band-Gap; E_g)。當半導體材料受外來的光或電激發後，位在價電帶的電子會躍遷至傳導帶，並在價電帶層形成電洞。由於電子在傳導帶中是處於不穩定的狀態，因此電子將會再跳回價電帶與電洞復合(recombination)。在電子與電洞復合的過程當中能量會分成兩種方式釋放，其一為藉由非發光形式的復合(non-radiative recombination)，此時電子的能量將藉由原子間震動(vibration)的形式轉換為聲子(phonon)而成為熱能。另一種能量轉換則是我們想要的發光形式復合(radiative recombination)，此時電子的能量將轉換成光的形式而使半導體元件釋放出光子(photon)，而光子的能量將等於此半導體的能隙，即 $h\nu = E_g$ 。

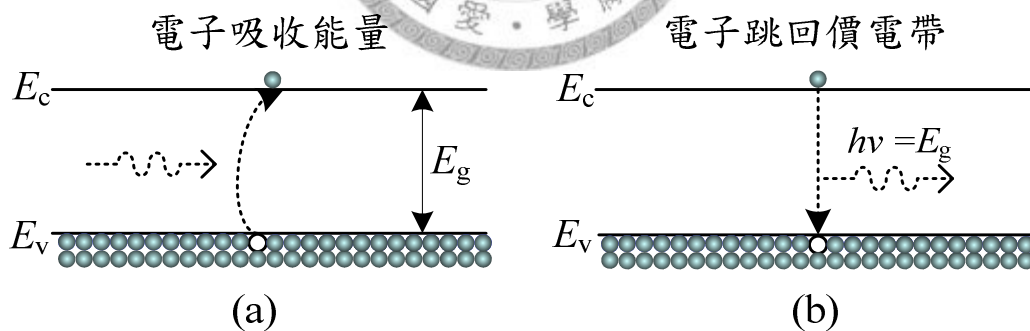


圖2-1 半導體材料的能階圖及電子和電洞躍遷圖 (a)半導體材料吸收能量後電子躍遷至傳導帶 (b)傳導帶中不穩定的電子將會躍遷回價電帶與電洞復合

最早期的發光二極體結構便和一般二極體結構一樣，為利用p型半導體與n型半導體形成一個接面。在未施加任何電壓(unbiased)時，p型半導體的費米階與n型半導體的費米階會相互對齊，且在接面處形成一電場阻止電子電洞的流動。如圖2-2(a)所示。

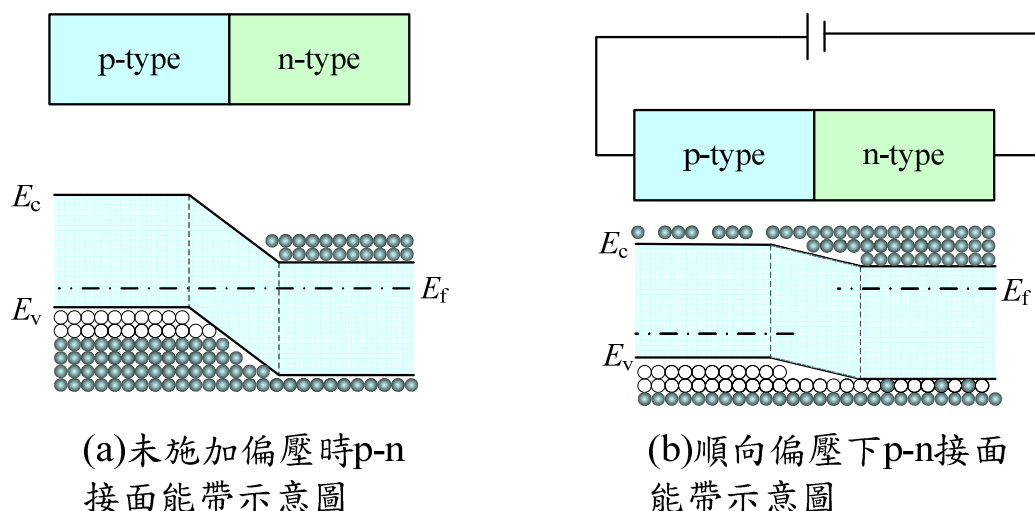


圖2-2 發光二極體p-n接面能帶示意圖

當將此種發光二極體以順向偏壓(forward biased)的方式外接電源時，如圖 2-2(b) 所示。此時負電壓端(相對於正電壓端)的所有能階皆會往上提升，破壞原先的平衡狀態。這時 p 型半導體的費米階與 n 型半導體的費米階不再對齊，且電子在導電帶中向左流動時所遇到的能障(energy gap)也降低，因而容易流通使二極體中形成「導通」狀態，電流也急速上升。像這樣外加適當的順向偏壓使電子、電洞由電源分別注入 n、p 兩端後，電子電洞在 p-n 接面區域結合時，會將能量以光子或聲子的形式釋放出來。而外部的電源不斷由 n 側注入電子，並由 p 側注入電洞，使得「電子、電洞結合而發光」的動作持續進行，此便為發光二極體的發光原理[5]。

基本二極體形式中的電子電洞復合放光機率極低，目前常見的 LED 在結構設計已有諸多的改良，通常會加入特殊設計的發光層以提升發光效率。發光層的結構常為多個量子井(quantum well)所組成[6]，量子井的概念及示意圖如圖 2-3 所示。設計量子井的目的在於進一步在局部的空間中侷限電子與電洞的分佈，使電子電洞主要於量子井區域以高效率放光形式復合。此外亦可藉由量子井材料的設計精確控制 LED 發光波段並提升電子電洞復合效率。量子井的設計原理為運用異質結構(利用不同材料，如 GaN 與 InGaN)的能隙(bandgap)差異，使得 LED 的能階上產生了一個能量較低的凹陷，使掉入量子井中的電子電洞在空間中被侷限，而所發出光子的波段也得以受到控制。

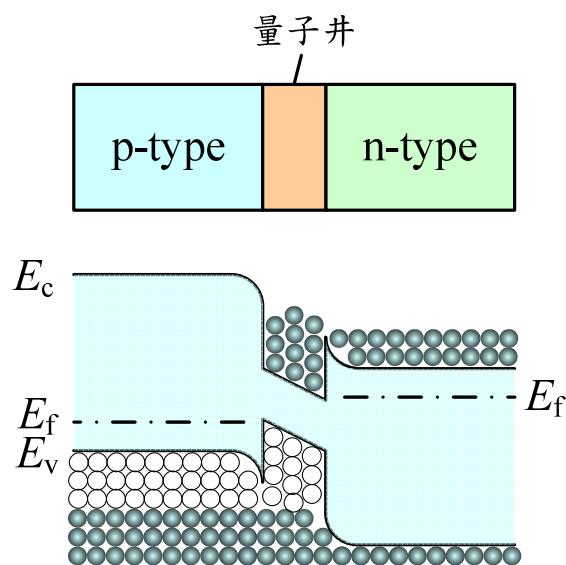


圖 2-3 量子井結構示意圖

半導體發光的波段取決於其能隙的大小，其換算公式如式 2-1

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{1240}{E_g(\text{eV})} \quad (2-1)$$

當中 λ 為發光波長， E_g 為半導體能隙。而 LED 之所以能夠發出各種可見光波段的原因在於 LED 材料可藉不同原子的組合改變其能隙，如圖 2-4 所示。LED 材料以

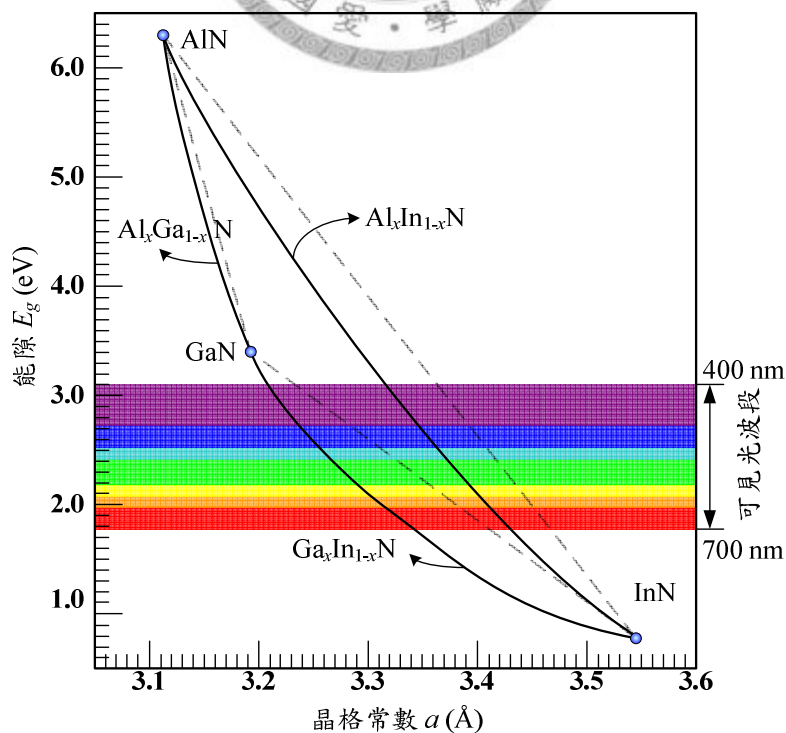


圖 2-4 室溫下 AlGaInN 四元材料能隙與晶格常數關係圖

AlGaInN 的四元材料來組合出適當的能隙 E_g ，圖中虛線為利用內插法所算出的結果，會與現實情況有所差異；實線的部份則為四元材料實際上混合的結果。而不同比例的材料 A 與 B 所獲得的能隙可由式 2-2 推算而得[7]：

$$E_g^{AB} = E_g^A + (E_g^B - E_g^A)x + x(1-x)E_b \quad (2-2)$$

其中的 E_b 稱為彎曲係數(bowing parameter)， x 為材料的比例。

表 2-1 列出了常見 LED 所用材料的特性，能隙值以及晶格常數值，若分別將材料能隙與彎曲係數代入式 2-2，便可推算不同比例材料的能隙值，如式 2-3，式 2-4，式 2-5 所示：

表 2-1 LED 所用化合物材料特性

	AlN	GaN	InN
晶格結構	Wurtzite	Wurtzite	Wurtzite
能係種類	Direct	Direct	Direct
能隙(E_g ; eV)	6.28	3.42	0.77
晶格常數(Å)	$a_0=3.112$ $c_0=4.982$	$a_0=3.191$ $c_0=5.185$	$a_0=3.545$ $c_0=5.703$
本質載子濃度(n_i ; cm^{-3})	9.4×10^{-34}	1.9×10^{-10}	920
相對介電常數(ϵ_r)	8.5	8.9	15.3
折射係數(n)	2.15	2.5	2.9

$$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} : E_g = 3.42 + 2.86x - x(1-x) \quad (\text{eV}) \quad [8] \quad (2-3)$$

$$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N} : E_g = 3.42 - 2.85x - 2.4x(1-x) \quad (\text{eV}) \quad [9] \quad (2-4)$$

$$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N} : E_g = 0.77 + 5.51x - 3.0x(1-x) \quad (\text{eV}) \quad [10] \quad (2-5)$$

雖然所列出的四元材料 AlGaInN 理論上可以製作出所有波段可見光的 LED，不過在實際製作高銦(In)含量高的材料時，由於氮化銦(InN)會有群聚的現象而無法做出均勻性的高銦含量 GaInN LED。因此目前常見的橘紅光波段的 LED 是以 AlGaInP 四元材料為主。

2.2 螢光粉介紹與發光原理介紹

螢光粉(phosphor)為一種光波長轉換(wavelength converter)材料，主要用途是將短波長光子轉換為較長波段的光子。螢光粉物質於17世紀就已經發明[11]，其應用發展非常廣泛，目前最常見的應用為日光燈管中，藉由螢光粉將UV波段光源轉換為可見光波段而發出白光。

由於使用半導體材料所製成的 LED 晶片，材料本身有特定的能階使其發射光譜為窄頻寬的單色光源，若是要讓 LED 單一元件具有至少兩個波長的寬頻譜白光，一種作法為在 LED 晶片發光層(active layer)直接加入摻雜[12]，提供其它能階的結合發光中心(radiative recombination center)，但是此一方法通常會大幅降低元件的發光效率。另一較有效率的方法是在晶片外以封膠的形式將光轉換介質包覆其中，螢光粉在此一技術中便扮演極為重要的角色，此種方法也是本篇論文主要採用混成白光的方法。

螢光粉的發光原理如圖 2-5 所示，當外來的激發光子被螢光材料吸收後，外來激發光子能量會激發螢光材料位於基態(ground state; S_0)的電子使之躍遷至激發態(excited state)，之後位於激發態的電子藉由原子間的振動(vibrational transition)將電子傳遞至較低能階，當電子傳遞至激發態的最低能階(S_1)時，再以螢光放光的形式回到基態，此時釋放出的光子能量為激發態最低能階與基態間的能階差。螢光粉除了螢光發光型式外還具有另一種的發光型態，經激發光激發的電子經傳遞至三重激發態(triplet excited state; T_1)後，以磷光發光形式回到基態。螢光與磷光最大差異點在於螢光的發光形式不涉及電子自旋改變，因此其衰變期較短，約在 $10^{-9} \sim 10^{-5}$ 秒，而磷光材料約為 $10^{-4} \sim 10$ 秒。

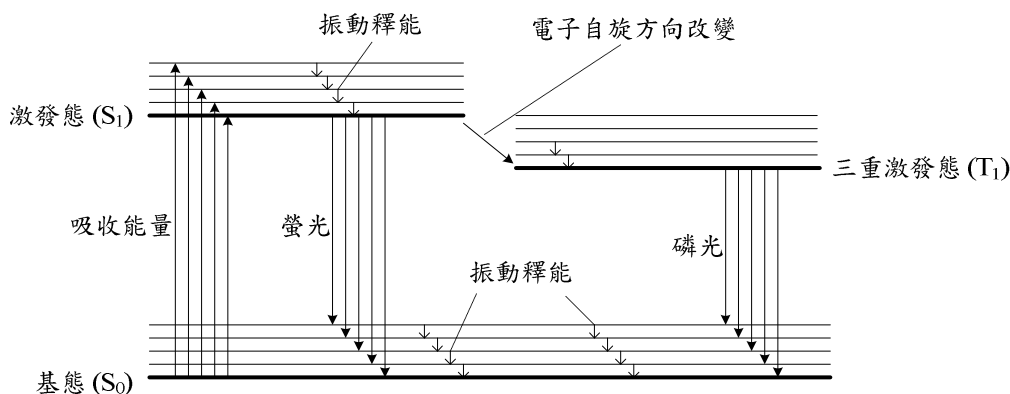


圖 2-5 螢光材料發光原理示意圖[13]

一般螢光材料由主體晶格與摻雜物構成[14]，主體晶格(host lattice；H)為螢光粉之主要成分，摻雜物則為螢光材料的發光中心，也稱為活化劑(activator；A)，以本論文所探討的鈮鋁石榴石(YAG)摻雜鈣(Ce)元素(YAG:Ce)螢光粉為例，當中YAG 即為主體晶格，而 Ce 為摻雜於主體晶格中的摻雜物。有時螢光材料會於主體晶格中再加入第二種摻雜物，此種物質稱為增感劑(sensitizer；S)，其作用為幫助吸收外來激發光源並傳遞能量至活化劑使得活化劑放光。兩種放光機制如圖 2-6 所示：外來激發光由螢光粉的活化劑吸收後，放出特定波長之光子；另一種則由螢光粉增感劑吸收外來激發光後，傳遞能量至活化劑再放出特定波長的光子。螢光粉材料可藉由主體晶格與活化劑的調整來設計釋放各種波長的光子：如鈮鋁石榴石摻雜鈣元素(YAG:Tb)可發綠光、摻雜鈣元素(YAG:Eu)發紅光，摻雜鈹元素(YAG:Bi)則發藍光。

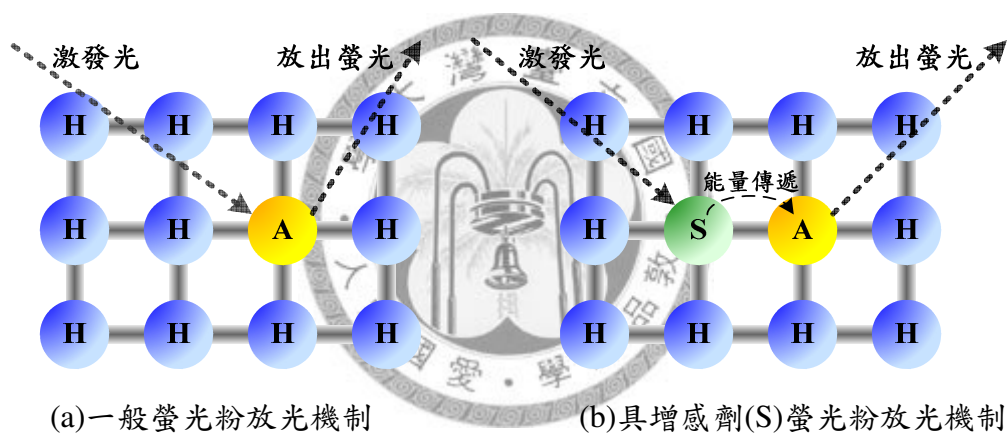


圖 2-6 螢光粉兩種放光機制

2.3 LED 封裝技術

LED 封裝結構介紹

圖2-7為傳統型 LED 的封裝結構，這種子彈型(bullet type) LED常見於指示與訊號用途：如紅綠燈、公車指示牌、LED 裝飾燈及大型 LED 看板。此種封裝形式為將尺寸大小為 $0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$ LED 的 LED 晶片固定於一反射杯(reflector cup)上，以金線連接(wire Bond) LED 晶片的電極，再以環氧樹脂(Epoxy)封裝。一般此種 LED 封裝後元件的側向直徑是 5 mm ，故亦稱為 5Φ LED。其發光功率僅為 $1\sim 2$ 流明(luminous flux)，操作電流是 $20\sim 30\text{ mA}$ 。

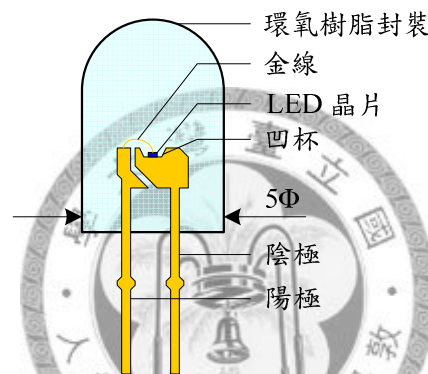


圖 2-7 傳統子彈型 LED 封裝結構圖

隨著 LED 晶片製造技術的進步，應用面也從單純的裝飾與指示用途走向照明用途。照明所用的大尺寸 LED 晶片稱之為高功率(high power) LED，晶片尺寸大小一般為 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 、單顆操作電流為 350 mA 、消耗功率則約為 1 W ，為傳統 LED 的 $15\sim 20$ 倍左右。由於高功率 LED 消耗功率的增加，使得 LED 晶片溫度大幅提升，此將造成 LED 的發光強度衰減、發光頻譜紅移[15]與壽命降低等現象，此時解決散熱問題將變的十分重要。由於傳統子彈型 LED 封裝形式的散熱效果不佳，因此高功率 LED 模組必須適當的改進外在封裝形式來解決有關散射的問題。

圖 2-8 為高功率 LED 模組封裝結構圖，此種高功率凹杯型(Leadframe)LED 模組和傳統子彈型 LED 封裝形式一大不同點便在於其將 LED 晶片固晶於一大面積的金屬基板上，此金屬基板可提供較好的散熱能力來有效解決 LED 因過熱而產生的光衰現象。目前常見的基板材質大多為熱阻係數較低的金屬，如銅或是鋁等。而若考慮光學特性，由於鋁在可見光波段範圍擁有較高的反射率，用鋁基板並且直接車床製作反射凹杯有著降低製程難度、成本及擁有高表面反射的特性。

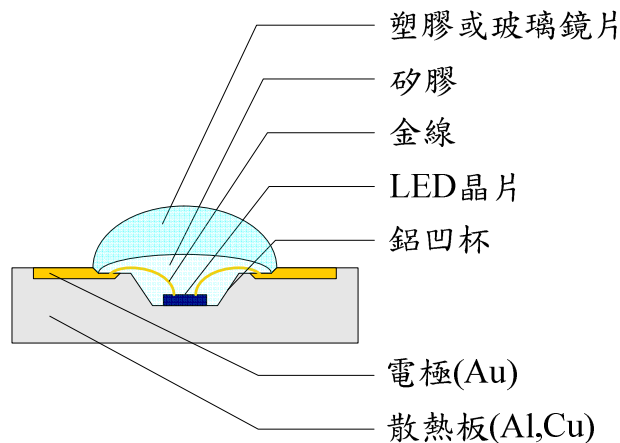


圖 2-8 高功率凹杯型 LED 模組結構圖

高功率 LED 在封裝上所用的封裝透明材料也做了改變，現在所使用的是化學性質較為安定，折射係數約在1.5~1.6左右的矽膠材料。改變封裝材料的原因在於以往常用的環氧樹脂在受到近UV波段光源照射時分子結構會受到破壞導致透光率降低[16]。此外環氧樹脂在120°C以上溫度時化學反應也會變的不穩定使顏色逐漸轉黃，穿透率也因而降低。如圖2-9所示為美國道康寧公司所生產的矽膠(OE-6630)和環氧樹脂在紫外光(波長365 nm，紫外光強度19 mW/cm²，照射時間4小時)照射後穿透率比較圖。由圖中所示環氧樹脂在黃化後其光穿透率將大幅降低，故現有高功率白光 LED (以藍光、紫外光晶片配合螢光粉)都逐漸轉以矽膠封裝為主流。

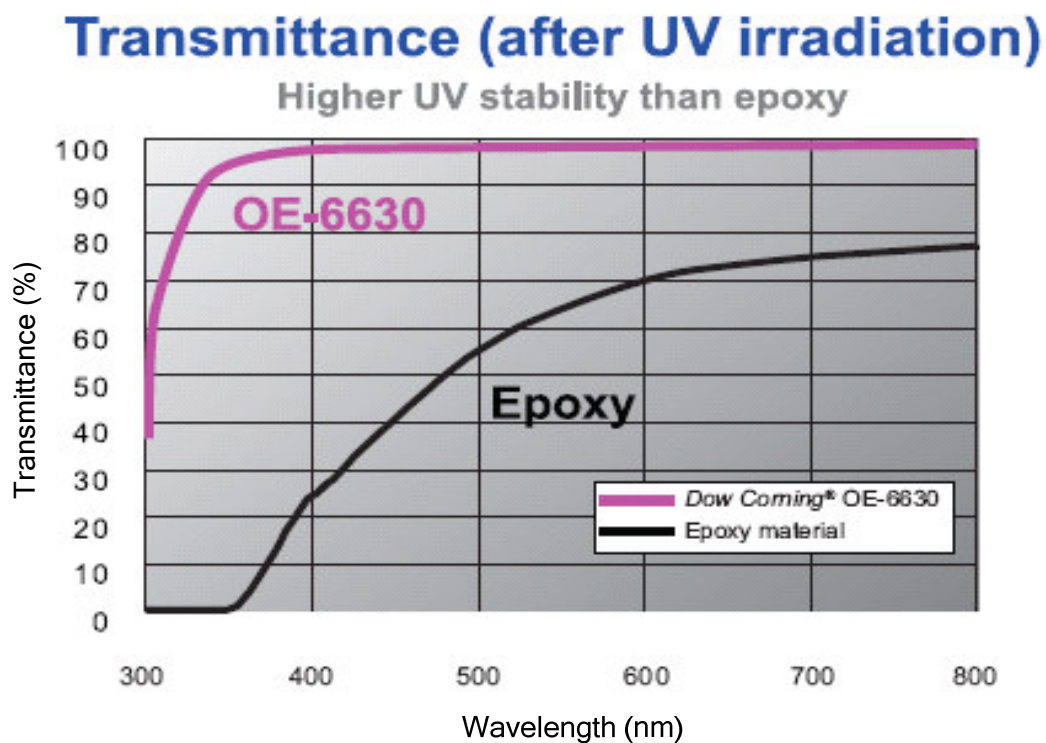


圖 2-9 矽膠與環氧樹脂於紫外光照射後穿透率比較圖[17]

LED 模組填裝矽膠或環氧樹脂封裝的目的，除了是為了保護 LED 晶片以及導電金線，另一目的則是為提升 LED 光學取出效率。藉由填裝矽膠或環氧樹脂提升 LED 光學取出效率的機制可由圖 2-10 解釋。如圖所示，LED 晶片內部主要是由主動層(active layer)發光，其發光特性為等向四面八方均勻性的發光。當由主動層的光行進於晶片與外部材質的介面時，由於 LED 晶片的折射率(n_1)大於外部材料的折射率(n_2)，故當光線行進至介面時必須遵守施乃爾定律(Snell's law)。此時大於臨界角(critical angle, θ_c)的光線會產生全反射(total internal reflection)現象而侷限於晶片內部而逐漸被吸收。以本研究所用材質為氮化鎵(GaN，折射率 $n=2.5$)的藍光 LED 晶片為例：當晶片尚未用矽膠或環氧樹脂封裝時而直接入射於空氣(折射率 $n=1$)中時，根據式 2-8[7]，其光取出效率計算得僅得為 4%。但當晶片經由矽膠或環氧樹脂封裝(折射率 $n=1.54$)後，在此介面的光取出效率增加為 10.6%，為原始數值(4%)的 2.65 倍。

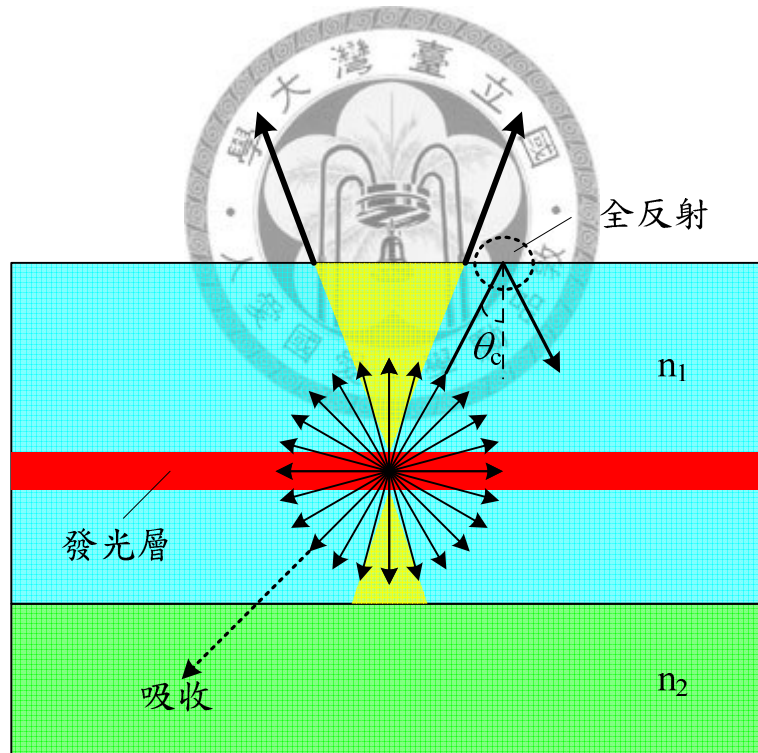


圖 2-10 LED 晶片內部結構及光徑示意圖

$$\text{司乃爾定律: } n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-6)$$

$$\text{臨界角公式: } \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2-7)$$

$$\text{LED 光取出效率計算: } \frac{P_{\text{escape}}}{P_{\text{active}}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta_c) \quad (2-8)$$

2.4 白光 LED 技術

在 LED 晶片亮度不斷提昇的現在，LED 應用在白光照明市場的進展是越來越快。白光並非是由單一波段光源所顯示的顏色，在第一章中已經簡單介紹過兩種利用 LED 混成白光的方式。在本節將更詳細的介紹現有的白光 LED 技術並比較其優缺點。

RGB 三色或多色 LED 混成白光

將 R、G、B 三色或更多種晶片封裝成一個 LED 模組，或是將單顆 R、G、B 三色以上的 LED 排列組合均可混成白光[18]，此種混成白光的優點在於可以不需要經過螢光粉的轉換損失能量，而且色溫甚至顏色可以藉由分別控制 R、G、B 三色的 LED 光強度來改變。但是這種白光 LED 有幾個需要克服的缺點：其一是以單顆 LED 模組封裝的方式在大電流驅動下會遇到散熱問題；其二是此種 LED 混成白光需要一段混光距離使色彩均勻，將增加 LED 模組的大小；此外由於各種顏色 LED 晶片因為熱效應造成的光衰速度不同也會造成混成光的色溫或顏色漂移的現象。此問題雖然可藉由回饋電路來偵測控制，但卻會遇到成本及操作較困難的問題；此外由於目前綠光 LED 晶片的發光效率仍低，故目前這種白光 LED 形式整體光效率仍舊不如現有一般照明技術。

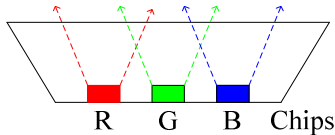
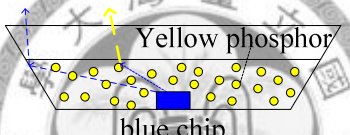
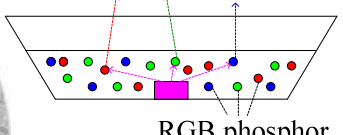
UV LED + RGB 螢光粉

日光燈管的原理是於通電後給予日光燈管內的汞原子能量而先放出紫外光 (UV) 波段的光，之後紫外光再激發燈管內的螢光粉使其放出白光。而 UV LED + RGB 螢光粉這種白光 LED 原理和日光燈類似，為利用紫外光 LED 晶片激發多種螢光粉(R、G、B)混成白光[19]。這樣的方法因為 UV LED 不實際參與白光的配色，因此 UV LED 波長與強度的波動對於配出的白光而言不會造成色溫的偏差。不過目前 UV LED 的發光效率低，且螢光粉轉換光波長過程中會再次損耗能量而降低發光效率。此外 LED 的封裝材料通常是以矽膠(silicone)或環氧樹脂(Epoxy)作為封裝材料，其中特別是環氧樹脂容易因紫外光能量較強而產生黃化現象降低其穿透率。UV LED 目前仍有許多需克服的課題。

藍光 LED+YAG 螢光粉

在單晶藍光 LED 上加上 YAG:Ce 螢光粉為目前最常見的白光 LED 形式[20]。所用的藍光晶片波段通常在 440 nm 到 460 nm 之間。由於 YAG:Ce 螢光粉的發射頻譜剛好可和波長 450 nm 左右的藍光互補而形成白光光源，因此僅需單一此種螢光粉便可混出相對色溫接近 6500K 的白光光源。但由於此種白光 LED 發光頻譜缺少紅光的部分，故最大的缺點就是演色性不夠高，僅為 70 左右。不過由於 YAG:Ce 螢光粉的轉換效率較其他種類螢光粉高，且目前藍光晶片的發光效率不斷提升，所以目前這種白光發光效率為三種白光 LED 中最高。

表 2-2 實現白光 LED 的三種方法

RGB LED 混成白光	UV LED + RGB 螢光粉	藍光 LED+YAG 螢光粉
 R G B Chips	 Yellow phosphor blue chip	 RGB phosphor

第三章 LED封裝光學模擬

3.1 TracePro 光學模擬軟體

光學軟體模擬軟體可分為光跡追蹤法(ray tracing)、光束傳播法(Beam propagation method; BPM)、時域有限差分法(Finite difference time domain; FDTD)三大種類。光跡追蹤法主要應用於傳統幾何光學，將光考慮為直行的光線而不考慮光的波動性質，因此探討的物件結構尺寸等級必須大於所用的光源波段等級。若使用的光源為可見光波段範圍(400~700 nm)，則限制的物件尺寸等級則必需在微米等級(μm)以上。此方法主要應用於成像或非成像系統、照明系統...等光學元件設計與光學機構分析。而光束傳播法主要針對光波導、主動元件、被動元件...等的模擬與分析。時域有限差分法則主要對更小的微米到奈米結構($\text{nm}\sim\mu\text{m}$)波動光學如光子晶體進行設計與分析。本論文的研究主題：LED的封裝結構尺寸範圍在毫米(mm)的等級，故將使用光跡追蹤法軟體來做模擬分析。

光跡追蹤軟體對光線的分析模式又可分成序列性(sequential)以及非序列性(non-sequential)兩類，序列性光跡追蹤軟體如OSLO、ZEMAX是以表面為單位做分析，每條光線在經過一次表面時僅做一次計算，不計算部分反射的結果，優點是運算速度快且通常具有自動優化的運算功能，但不考慮部分反射的缺點是與現實情況差異較大，通常應用於相機透鏡的設計。

非序列性光跡追蹤軟體如TracePro則是以物件為單位做分析，並利用蒙地卡羅(Monte Carlo)隨機計算的數值方法[21]：蒙地卡羅運算法為一開始以亂數決定光線的位置及方向，當光在物件表面上運算時，又隨機的決定光線的散射，由於採用機率取樣的概念，故光線數越多時才能越接近真實系統。每條光線在行進於物件中時都會考慮如反射、折射與吸收等多種計算，因此分析結果與現實世界結果更接近。但由於每種物件都考慮多種計算故計算量龐大，故所需計算時間較長且通常無自動優化運算的功能。常應用於照明系統的分析。

本論文以非序列性光跡追蹤軟體TracePro做為設計 LED 模組與分析的軟體，其是由美國Lambda Research Co.所開發，介面如圖3-1所示，在此簡單介紹此軟體操作的流程與方法。首先會於如圖3-1右下方的模擬模組視窗中建構整體光學

架構的幾何外型。第二步則在位於左側的操作系統樹狀列表中，分別選取對應於右側光學模組中的每個元件，並在此設定發光光源以及各元件的物件或表面特性參數。完成了整體光學架構包含幾何外型以及各物件的性質設定後便可執行光跡追蹤的動作並分析發光結果。

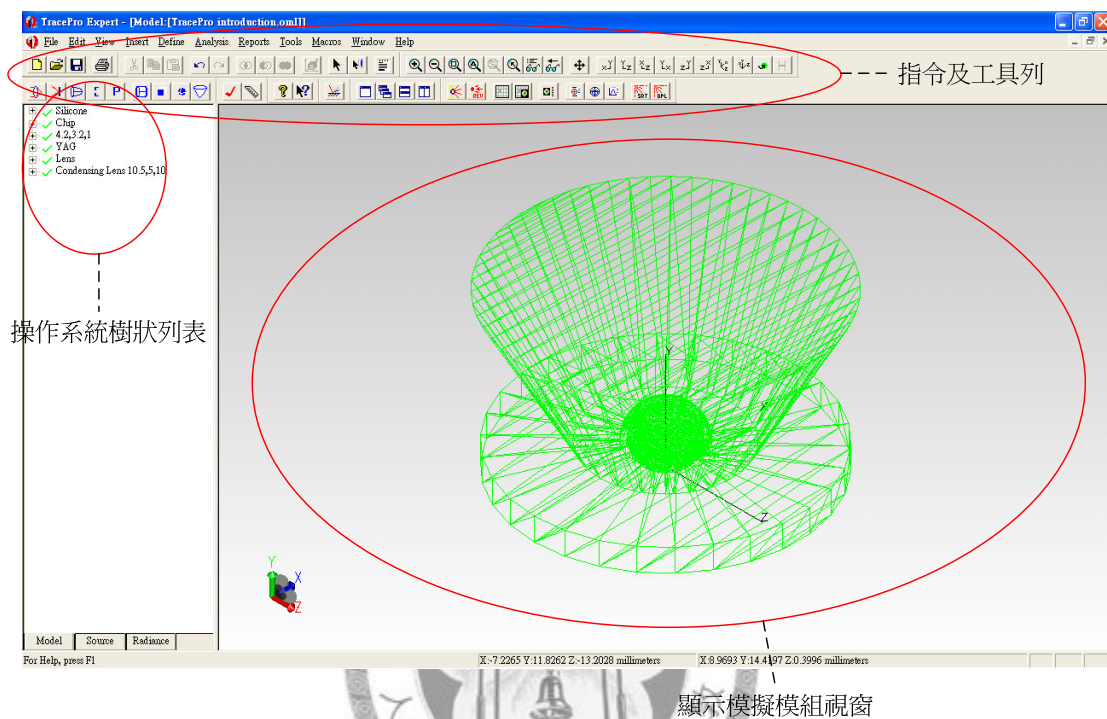
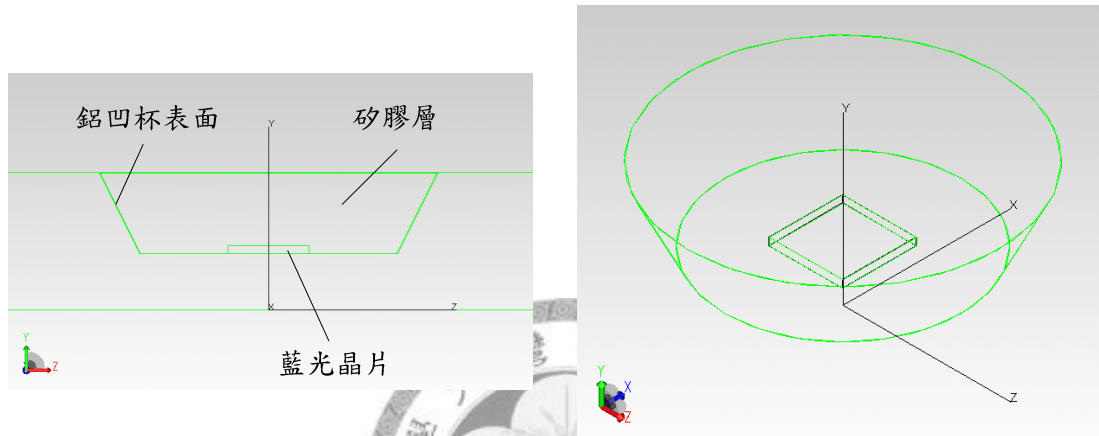


圖3-1 TracePro軟體介面圖

本章節接下來將介紹我們如何設定在模擬中所需凹杯型高功率白光 LED 模組的重要參數。

3.2 高功率白光 LED 模組架構與各項模擬參數

本論文主要針對凹杯型高功率 LED 模組架構做設計與模擬，其於TracePro中最基本的模擬架構如圖3-2所示(未添加螢光粉模型)。如圖中所示，這種高功率 LED 模組模擬時所需的參數資料包含鋁凹杯表面的反射率；藍光 LED 晶片表面的等效反射率；封裝矽膠材料的光吸收係數；以及當模組中有應用螢光粉時則須建立適當的螢光粉模型。本節接下來將分別闡述上述各項參數的來由及設定。



(a) LED模組基本架構圖(2D圖)

(b) LED模組基本架構圖 (3D圖)

圖3-2 TracePro中凹杯型 LED 模組基本架構圖

鋁基板的表面反射率計算

凹杯型高功率 LED 模組常見的基板是鋁製材質，再加以加工製作凹杯而得。鋁材質對於各可見光波段的反射率數值可依據反射率關係式 3-1[5]來計算。

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2 + k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2} \quad (3-1)$$

式 3-1 中的 n_2 以及 k_2 分別為鋁材質的折射係數以及消光係數， n_1 則為入射介質的折射係數。關於鋁材質的折射係數以及消光係數可由網路查詢獲得[22]。圖 3-3 為各種入射光波段鋁所對應的折射係數 n 與消光係數 k 。

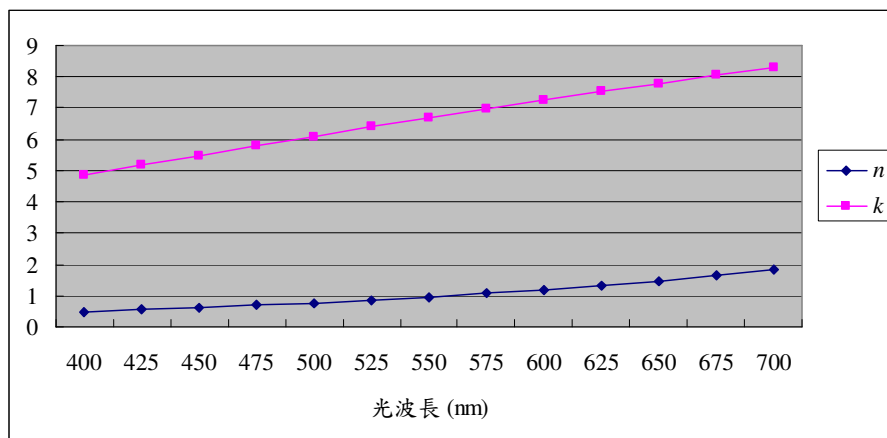


圖 3-3 各種光波段鋁的折射係數 n 與消光係數 k

得知了不同光波段光對鋁的折射係數與消光係數後，再代入式 3-1 便可得到各種光波長對鋁的反射率。不過反射率的強度又同時會受到入射介質的折射率所影響。在凹杯型高功率 LED 模組中，鋁基板上通常會以矽膠膠材封裝，其折射率為 1.54，故在此我們也計算此時鋁表面對應的反射率數值，如圖 3-4 所示。

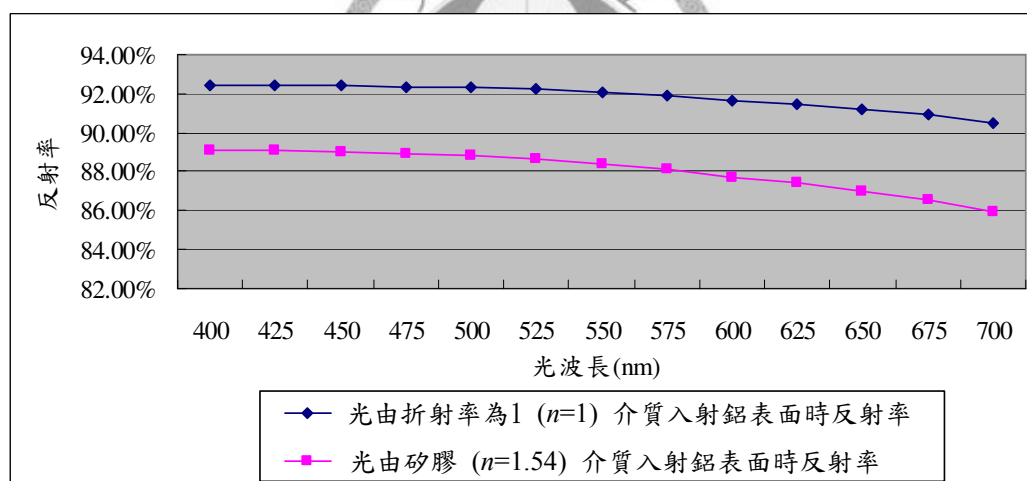
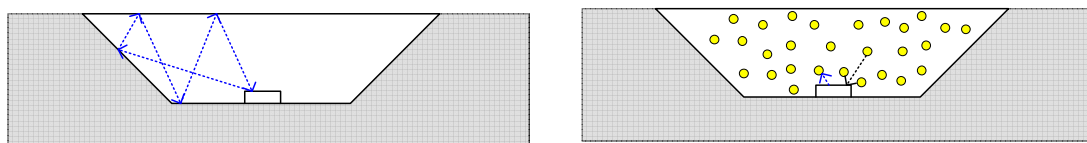


圖 3-4 各種波長光入射鋁對應之反射率

LED 晶片表面反射率設定

凹杯型高功率 LED 模組的原始發光來源為 LED 晶片，不過此晶片所發出的部分光線會由於矽膠跟空氣界面的全反射而再照射回晶片表面，如圖 3-5(a)所示；另外當 LED 模組內加上螢光粉時由螢光粉受激所發的螢光也會再照射至晶片表面，如圖 3-5(b) 所示。故在高功率 LED 模組模擬時也需要考慮晶片表面的反射特性。鋁基板表面反射率可經由計算獲得，而 LED 晶片的表面反射率我們則參考 Jong Kyu Kim 等人的文獻[23]來設定，圖 3-6 為 Jong Kyu Kim 等人量測不同形式 LED

晶片時所獲得的等效反射率圖。如圖中所示，當 LED 晶片內部背面的反射金屬為鎳(Ni)與金(Au)時，對於外來光線的等效反射率約在 40~50%之間。而當 LED 晶片內部背面的反射金屬使用為銀(Ag)時，對於外來光線的等效反射率則約在 60~70%之間。



(a) 藍光經由全反射照射至晶片表面 (b) 螢光粉放出螢光照至晶片表面

圖 3-5 兩種光線照射至晶片表面機制示意圖

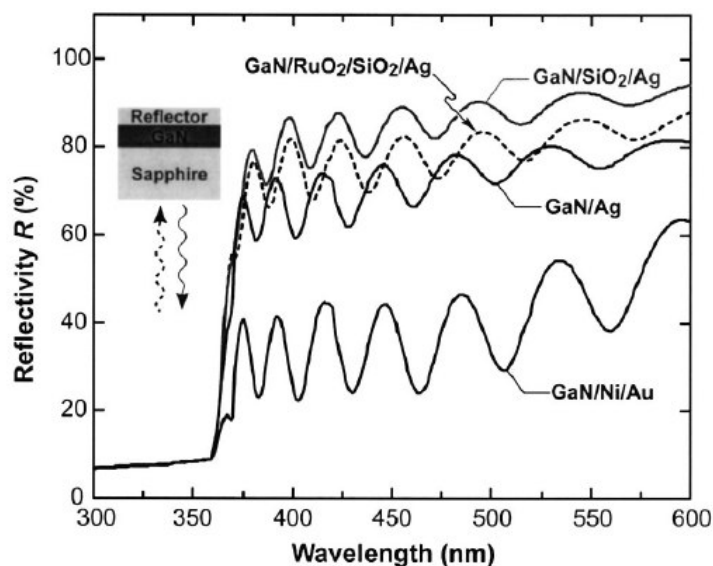


圖 3-6 LED 晶片表面對於各種光波段等效反射率量測圖[23]

另一篇 Hong Luo 等人的文獻[24]引用了 Jong Kyu Kim 等人的實驗結果並且在他們的模擬實驗中假設了模擬晶片表面的等效反射率為 50%。在我們的初步模擬中將仿造 Hong Luo 等人先將 LED 晶片表面的等效反射率定為 50%，在後續 4.1 節中則將觀察此值的設定是否符合我們自己的實際實作成果。

矽膠膠材介紹與矽膠吸收率之量測與設定

表 3-1 所列為道康寧公司所生產，目前 LED 業界常用的封裝矽膠材料資料表。如表所示，每種矽膠材料又分為兩種膠質，此兩種膠質經特定比例混合並經固化後，可形成折射率約 1.54，光穿透率在 1mm 厚度下幾乎為 100% 的透明彈性膠材。

表 3-1 道康寧生產 LED 封裝常用矽膠資料表[17]

Material Properties of HRI Encapsulants						
HRI Encapsulants	Gel	Elastomers		Resins		
	Dow Corning® OE-6450	Dow Corning® OE-6528	Dow Corning® OE-6550	Dow Corning® OE-6630	Dow Corning® OE-6635	Dow Corning® OE-6665
As Supplied						
Component	2-part	2-part	2-part	2-part	2-part	2-part
Mixing Ratio	1:1	1:1	1:1	1:4	1:3	1:20
Viscosity, Pa·s	1.8	2	4	2.5	5	2.2
Cure Condition, °C/hr	100/1	150/1	150/1	150/2	150/2	150/2
After Cure						
Hardness	—	26 (JIS A)	62 (JIS A)	41 (shore D)	33 (shore D)	68 (shore D)
Refractive Index	1.54	1.54	1.54	1.53	1.53	1.53
Transmittance, % @ 450 nm, 1 mm	100	100	100	100	100	99.5
CTE	—	230	210	—	—	—

在 LED 模組中一個重要的參數為所使用封裝膠材光的穿透率(Transmittance, T)。本研究在實做 LED 模組時所用的封裝膠材為道康寧 OE-6550 這款矽膠膠材。雖然根據道康寧公司本身所提供的資料(表 3-1)，光在穿透 1mm 厚度的 OE-6550 矽膠膠材時其穿透率幾乎是接近 100%，但由於矽膠膠材的折射率大於空氣介質，在兩者介面處當入射光的入射角大於臨界角時會有全反射的現象發生而將光侷限於矽膠層內，此被侷限的光線在矽膠介質內的行進光學路徑有機會遠大於 1mm，故在本研究中仍對矽膠對光的吸收加以考慮。圖 3-7 為利用日本 Jasco 公司所生產的光譜儀(型號 V-570)測量當 OE-6550 矽膠厚度為 24.58 mm 時的光穿透率。

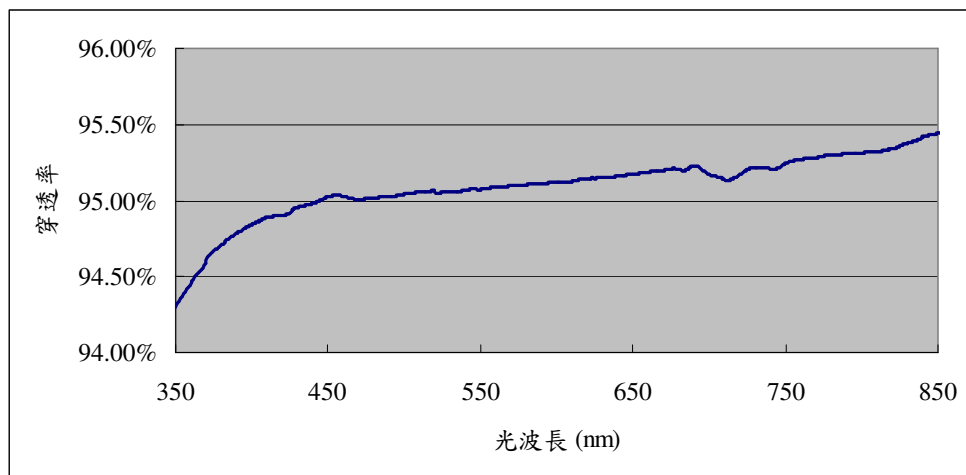


圖 3-7 矽膠 OE-6550 於厚度為 24.58 mm 時各波段光之光學穿透率

由量測的結果可以得知，隨著矽膠的厚度增厚，矽膠整體對光吸收效應便會顯現而不可忽視。而根據計算光穿透現象的比爾定律公式(Beers law，式 3-2)：

$$\text{Beers law: } I = I_0 e^{-\alpha L} \quad (3-2)$$

當中 I_0 為原始入射光強度， I 為經過介質後穿透光的強度， L 為光經過介質的厚度， α 則為介質的吸收係數。我們將 I 比上 I_0 的比值，即代表光經過介質後的穿透率以 T 值代入，可將式 3-2 整理後化為式 3-3 的形式：

$$\alpha = \frac{\ln(1/T)}{L} \quad (3-3)$$

圖 3-7 所量測到當矽膠厚度為 24.58 mm 時的光穿透率在經由式 3-3 的換算後便可得到 OE-6550 在各波段的吸收係數，如圖 3-8 所示。本研究在 TracePro 中的模擬便是輸入此參數設定封裝矽膠的性質，之後 TracePro 便可自行運算 LED 模組中光行進於矽膠層時的吸收與穿透量。

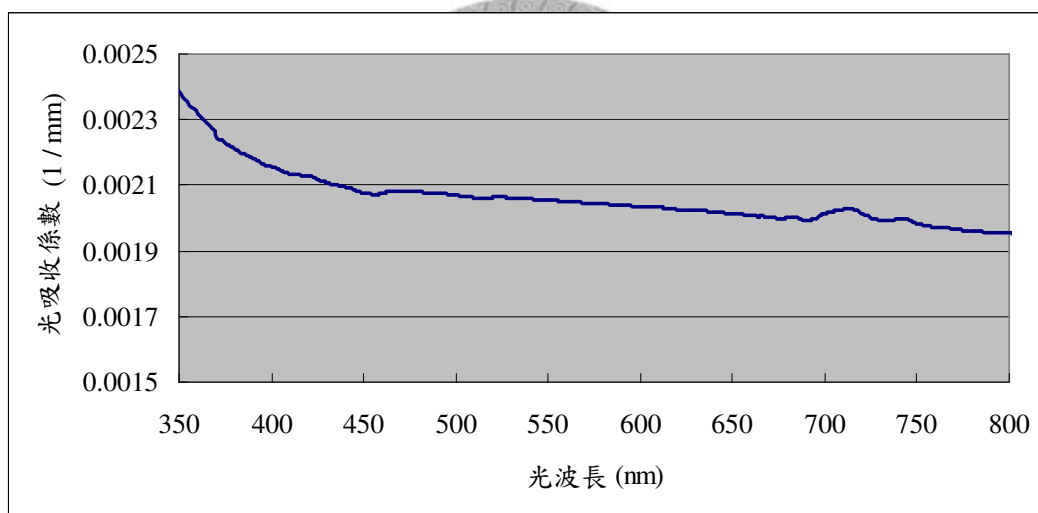


圖 3-8 矽膠 OE-6550 於各波段光吸收係數 α

3.3 YAG螢光粉參數設定

含螢光粉發光的光學模組在傳統的光學模擬系統中有相當的模擬難度。這是因為螢光粉物質牽涉到了短波長、高能量光的吸收，再轉換為長波長、低能量光的放出效應。但是舊有的光學模擬系統中並沒有這種能量轉換的運算。在文獻上常見的解決作法為將螢光粉的發光視為另一獨立的發光源，以J. K. Kim等人的模擬實驗為例[25]，他們將螢光層的發光假設為一均勻獨立的扁平圓柱光源，但這種假設與實際情況的不同點在於螢光層的發光強度應該與激發光源的分布強度有關而非為一均勻的光源。

本論文所用的光學模擬軟體TracePro從第四版本開始具有螢光能量轉換的模型。圖3-9為其螢光模型運算的流程圖[26]。在建立完全含螢光物質的光學模組後，TracePro會以光跡追跡的方式運算照射至螢光物質的激發光線量。之後在螢光層的

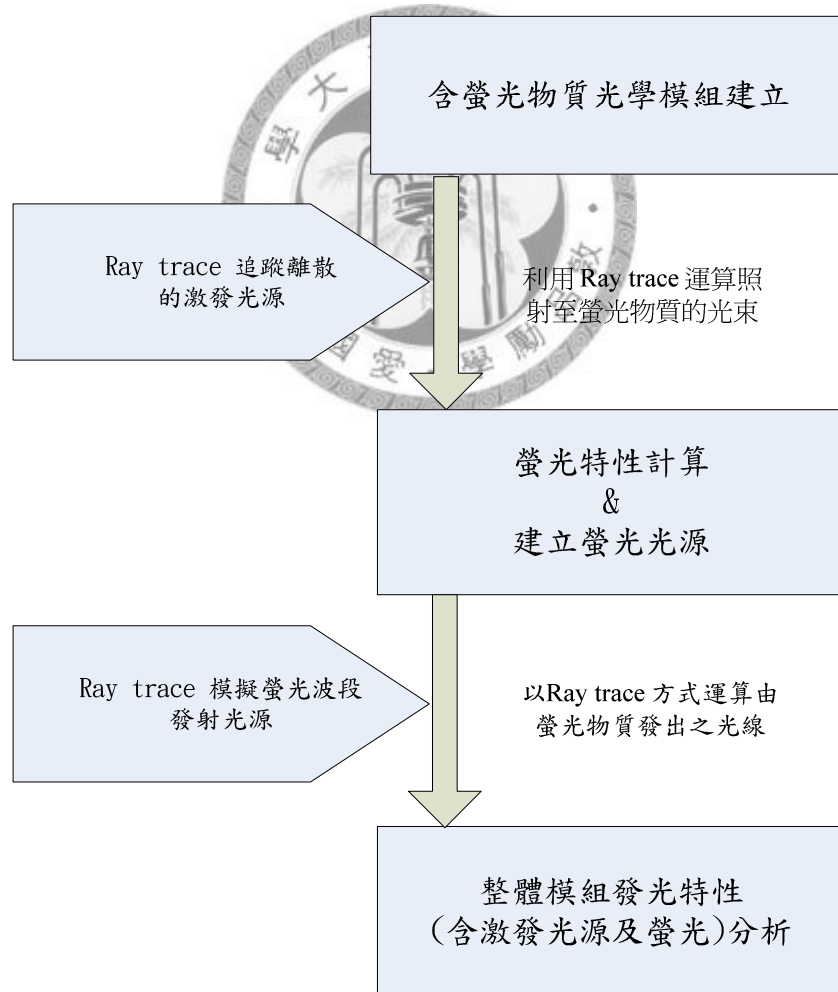


圖3-9 TracePro 含螢光物質光學模組模擬流程圖

螢光轉換運算則包括了計算激發光的吸收比例、以及依照螢光粉的量子轉換效率計算被吸收的激發光轉換出多少強度的螢光。此發出的螢光則會依據內建或輸入的螢光頻譜做比例上的分布。最後TracePro會則再以光跡追跡的方式同時分析未被吸收的激發光源與轉換發出的螢光光源整體模組的發光特性。

在TracePro模擬包含螢光物質的光學模組時，相關於螢光物質的設定參數包括：螢光粉層的莫爾濃度(Molar Concentration, Unit: moles/liter)以及影響吸收激發光比例的莫爾吸收係數(Molar Extinction, Unit: liter/(mole × cm))；被螢光層吸收激發光轉換成螢光的能量轉換比則用螢光物質的量子效率(Quantum Efficiency, QE)決定，另外螢光發光的頻譜分布可自行輸入設定。在本研究中主要所用的螢光物質為含鈾的鈮鋁石榴石(YAG:Ce)，此螢光物質對於照射在此物質上的光線除了有吸收及放出螢光的性質外，對於未被吸收的光線則會有散射的效應。因此本研究必須同時建立此種螢光粉的散射模型，各項參數的建立方式跟數值逐一分述如下。

本論文所用相關螢光粉的參數設定，主要由Yiting Zhu等人的文獻[27]內的實驗架構以及實驗數據推算得到。為了討論光線經過 YAG:Ce 層後的效應，Yiting Zhu等人應用了如圖3-10的實驗架構。此實驗乃是利用光纖導入由外部架設的LED光源，照射於一塗佈特定濃度($8\text{mg}/\text{cm}^2$)YAG:Ce螢光粉層的玻璃上，在螢光層的前端及後端則分別利用積分球量測穿透螢光層以及反射回光纖光源側的各種光的光強度，藉此能了解YAG:Ce螢光粉的散射以及吸、放光的效應。在 LED 的光源架設方面，Yiting Zhu 等人分別用了藍光、綠光、紅光三種 LED 外來光源。而最後所量測到的結果則如表3-2所示。

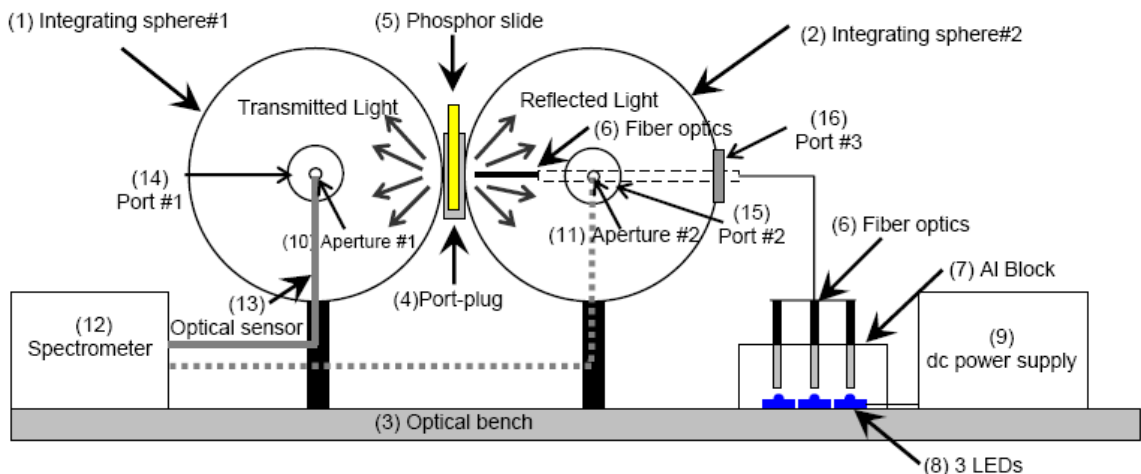


圖3-10 螢光粉吸放光與散射光實驗裝置圖[27]

表3-2 螢光粉吸放光與散射光實驗結果[27]

	Reflected	Transmitted	Lost	Total
Blue (unconverted)	5%	6%	36%	100%
Yellow (converted)	29%	24%		
Green	40%	42%	18%	100%
Red	43%	44%	13%	100%

為了獲得螢光粉層相關的參數，我們於 TracePro 軟體中參照 Yiting Zhu 等人的實驗架構建構了相同尺寸的光學模擬架構，如圖3-11(a)所示。當中我們將以光纖導入的LED光源改成以一發光形式為垂直出射的面光源取代，如圖3-11(b)所示。

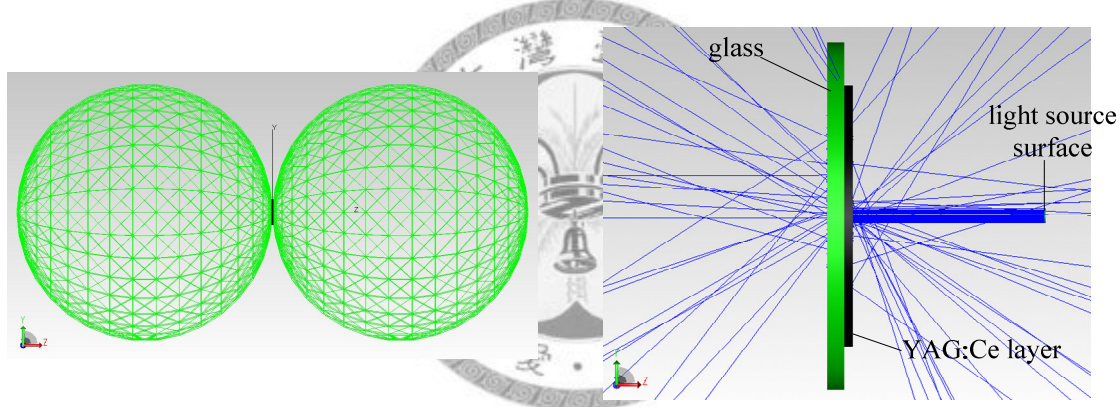


圖3-11 (a) TracePro 螢光粉吸放光與散射光架構模擬圖 圖3-11 (b) TracePro 螢光粉吸放光與散射光架構模擬圖(以螢光粉塗佈玻璃層為中心放大圖)

在TracePro模擬中需要夠多的光線數使得模擬結果接近真實情況。但當所設定的光源光線數增多至上萬條光束時，卻發現上述的模擬架構會使 TracePro 軟體有耗盡電腦記憶體而無法分析結果的問題產生。推測原因是由於我們設定積分球內部表面反射特性為接近完全反射的99%，在此設定下積分球內部的光線會有相當多次的反射而使得記憶體不足。為了解決此一問題我們將積分球改以兩穿透半球面代替，如圖3-12所示。由於兩顆積分球的本來作用是量測光纖所導出的光照射至玻璃板上的螢光層後穿透與反射光的強度，因此我們將積分球以兩曲率半徑為100 mm 的穿透半圓面來代替，並量測這些穿透與反射光的強度是合理且能得到符合實際情形的模擬結果的。

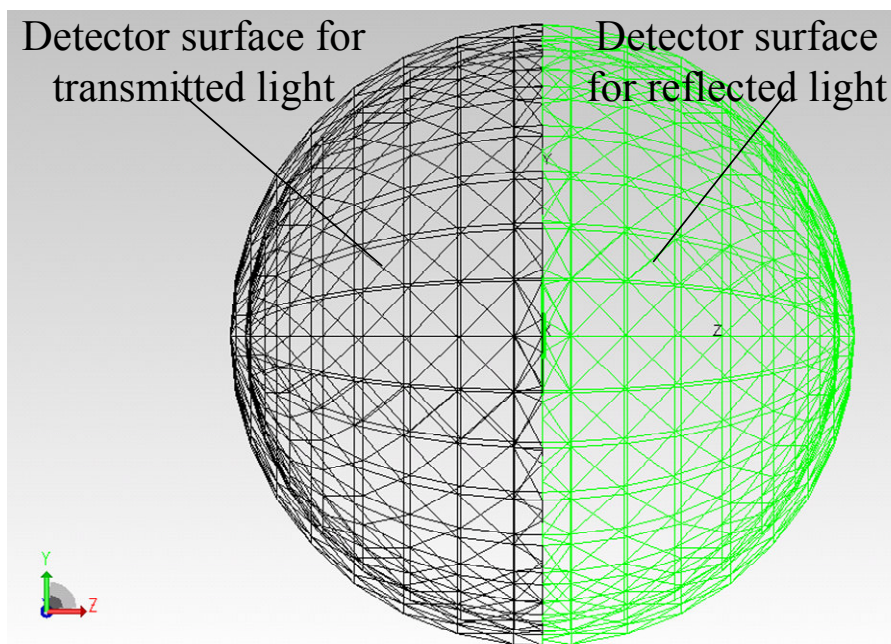


圖3-12 TracePro 螢光粉吸放光與散射光改良架構模擬圖

螢光粉散射模型建立

螢光粉的效應其一是吸收短波長高能量的光並加以轉換為長波長低能量的光。不過對於照射在螢光粉體上但未被吸收的光子而言螢光粉的效應則為散射粒子。接下來本論文內容將解釋模擬所用的散射模型以及參數設定。

最常見的塊材散射模型 (Bulk scattering model) 是由 Henyey, L.G. 以及 Greenstein, J. L. 所提出[28]，該模型用兩個變數 (g , μ_s) 來描述塊材散射的散射現象。當中 g 稱為各向異性係數(anisotropy factor)，其數值範圍介於 1 與 -1 之間。此值決定了當光線照射在散射粒子時散射出來光線的方向性。一般當 g 值為正時，代表散射出來的光線比較偏向原始入射光行進方向；而當 g 值為負時，散射出來的光線則偏向反射的形式；而當 g 值為零時，則代表光線將等機率的往各個方向散射。 μ_s 則為散射因子，其為光線在物質中行進時平均自由徑 L 的倒數。所謂平均自由徑的意義代表光線在物質中行進時，沒有碰撞到散射粒子的平均行進距離，一般平均自由徑的單位為公釐(mm)。因此為平均自由徑倒數的散射因子所代表意義則為單位距離內撞到散射粒子的次數，單位為 $1/\text{mm}$ 。

平均自由徑的計算公式可由式3-4[29]得：

$$L = \frac{1}{n\sigma} \quad (3-4)$$

當中 n 為散射粒子的濃度，即單位體積內散射粒子的個數($1 / \text{mm}^3$)，而 σ 則為散射粒子截面積的大小。因散射因子為平均自由徑的倒數，故散射因子我們可由式 3-5 計算而得：

$$\mu_s = \frac{1}{L} = n\sigma \quad (3-5)$$

一般的螢光粉粒徑大小介於 $5\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ 之間[30]。為了簡化計算我們取螢光粉粒徑為其平均值 $10 \mu\text{m}$ ，依此計算可得螢光粉截面積 σ 為 $7.9 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ 。在 Yiting Zhu 等人的實驗中於玻璃片上所塗的螢光粉濃度為 $8 \text{ mg} / \text{cm}^2$ ，假定塗佈厚度為 0.5 mm ，又知 YAG:Ce 螢光粉密度為 $4.31 \text{ g} / \text{cm}^3$ [30]，經由計算可得此時螢光粉濃度 n 為 7.1×10^4 (個 / mm^3)。將此兩數值代入式 3-5 便可得此濃度下螢光粉層的散射因子 $\mu_s = 5.576$ ($1 / \text{mm}$)。

YAG:Ce 螢光粉的各向異性係數(g)的數值不易藉由一般儀器量測獲得，在此藉由試誤法模擬來推測此值。我們參考列於表 3-2，Yiting Zhu 等人利用紅光光源所做的實驗結果，所以採用紅光光源的理由是可以先排除螢光粉吸收及放光的轉換效應機制。之後以如圖 3.12，即之前建立於 TracePro 中的螢光粉散射及吸放光量測架構，藉由改變不同各向異性係數並且和 Yiting Zhu 等人的實驗結果來比較，以此得出螢光粉散射效應中的各向異性係數。各種不同各向異性係數對應的模擬結果列於表 3-3。如表所示我們可得：當各向異性係數 $g = 0.4$ 時可獲得最接近 Yiting Zhu 等人實驗的結果，因此之後我們採用各向異性係數 $g = 0.4$ 作為 YAG:Ce 螢光粉模擬時的標準參數設定。

表 3-3 不同各向異性係數對於紅光光源散射模擬結果

	Reflected	Transmitted	Lost	Total
Reference	43%	44%	13%	100%
$g = 0$	49.51%	38.93%	11.56%	100%
$g = 0.1$	48.09%	40.10%	11.81%	100%
$g = 0.2$	46.57%	41.47%	11.97%	100%
$g = 0.3$	45.35%	42.62%	12.03%	100%
$g = 0.4$	43.14%	44.60%	12.26%	100%
$g = 0.5$	41.18%	46.57%	12.25%	100%

YAG:Ce 螢光粉發射頻譜量測

由於 TracePro 中並無內建 YAG:Ce 螢光粉的發光頻譜，故必須自行量測並輸入此資訊以利後續的模擬進行。如圖 3-13 所示，此圖為利用日本 Jasco 公司生產之螢光光譜儀(型號 FP-6300)，量測 YAG:Ce 螢光粉以重量百分比 10% 濃度溶於矽膠膠材、由波長 440 nm~460 nm 的藍光雷射激發時 YAG:Ce 螢光粉的發射頻譜。由於在之後實作時所用的藍光 LED 晶片的主波段(λ_{peak})為 451 nm，且於 TracePro 軟體模擬中所設定藍光晶片的波長為 450 nm，故將圖 3-13 中由波長為 450 nm 藍光雷射激發時所獲得的螢光發射頻譜，在正規化後輸入於 TracePro 的自定螢光粉資料中。

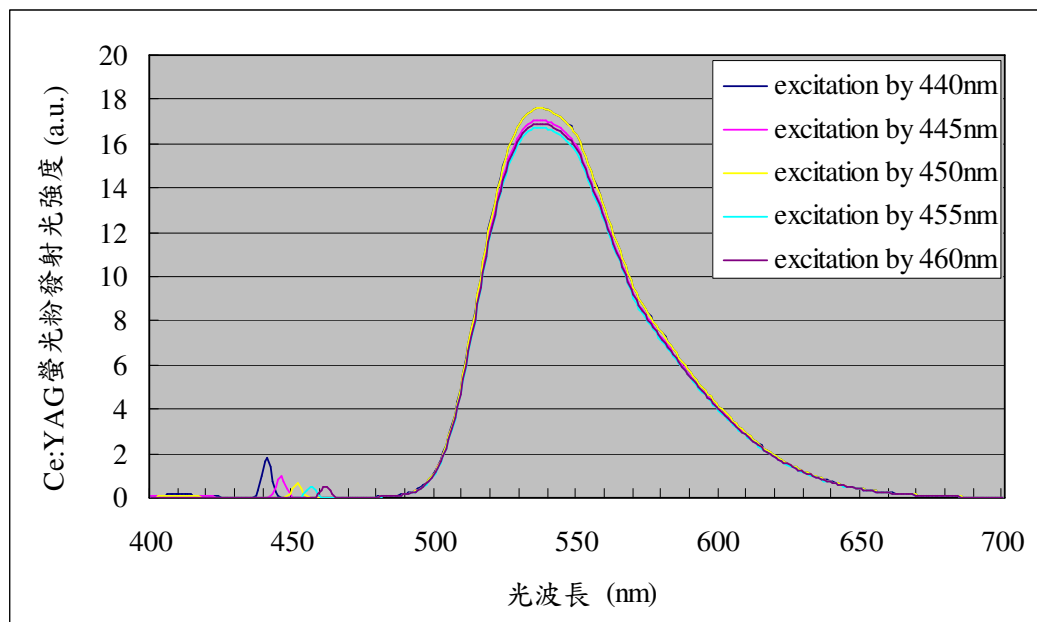


圖 3-13 YAG:Ce 螢光粉於不同激發光源之發射光頻譜圖

YAG:Ce 螢光粉吸收效率與轉換量子效率

在確定了 YAG:Ce 螢光粉的散射模型以及發光的頻譜後，接下來我們要探討的是 YAG:Ce 螢光粉的吸收效應與量子效率，藉此來定量 YAG:Ce 螢光粉吸收藍光的比例以及決定放出的黃光強度。

一般探討塊材物質光穿透與吸收的比爾定律在螢光粉參雜的物質中仍然適用。根據 TracePro 軟體的研發公司 Lambda Research Corporation 所提供的螢光粉指導說明書[26]，光線透過螢光物質層的特性可由式 3-6 來描述：

$$\tau = 10^{-\mu_a t} \quad (3-6)$$

當中 τ 為原始入射光經過螢光物質後的穿透比例， t 為螢光粉層的厚度， μ_a 為吸收係數， μ_a 又可以以式 3-7 來描述：

$$\mu_a = KC_{molar} \quad (3-7)$$

當中 C_{molar} 為螢光粉層的莫爾濃度，單位為 moles / liter；而 K 為莫爾消光係數(molar extinction)，單位為(liter / (mole × cm))，此值目前為未知的參數。我們根據如表 3-2 Yiting Zhu 等人所做的實驗數值，原始藍光在經過 YAG:Ce 螢光粉層後穿透出來的藍光總值為 11%，而塗佈 YAG:Ce 螢光粉的濃度經換算後可得 C_{molar} 為 0.2695 moles / liter，螢光粉層厚度則為 0.5 mm，這些數值代入式 3-6 及 3-7 可得到莫爾消光係數 K 的值為 71.74 liter / (mole × cm)。

參照 Yiting Zhu 等人以及 Regina Mueller-Mach 等人的文獻[31]，我們定 YAG:Ce 螢光粉轉換藍光為黃光時的量子效率為 0.77。至此我們已獲得 TracePro 中 YAG:Ce 螢光粉所有所需的參數。但當我們於 TracePro 輸入這些參數，執行如圖 3-12 的結構模擬時，卻發現模擬結果和 Yiting Zhu 等人實際所做的結果不盡相同，如表 3-4 所示。由表看出藉由 YAG:Ce 轉換出的黃光比例過高而未轉換的藍光比例過低。回顧所有的參數，我們推測其為莫爾消光係數 K 值設定過高的原因。作此推測的理由在於此參數數值是藉由其它參數代入式 3-6 以及式 3-7 而得。但式 3-6 以及式 3-7 所考慮的螢光物質並未考慮原始的激發光會於螢光粉層發生散射的現象，如圖 3-14 所示：所用激發的藍光實際上於螢光粉層中行進的平均路徑將大的螢光粉實際的厚度 t ，因此造成以公式推算出的莫爾消光係數不符合實際情況。

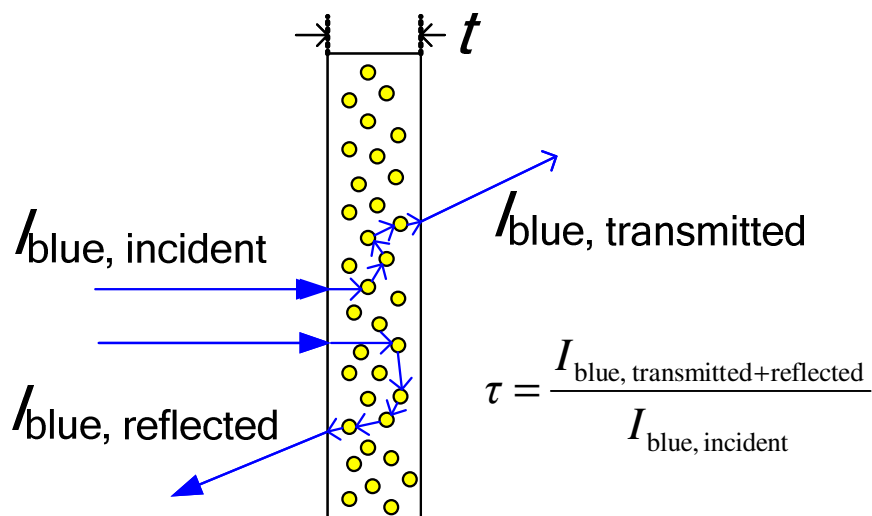


圖 3-14 激發藍光於螢光層受螢光粉散射示意圖

為了獲得更符合實際情況的莫爾消光係數 K 值，我們再次於 TracePro 中採用試誤法嘗試不同 K 值對於最終光比例的影響。最終我們發現當 K 值約為 34 liter / (mole \times cm) 時有十分接近 Yiting Zhu 等人實做的結果，如表 3-4 所示，故我們之後的模擬將定莫爾消光係數 K 值為 34 liter / (mole \times cm)。

表 3-4 不同莫爾消光係數 K 值對於最終藍光、黃光比例之影響

	Blue	Yellow	Lost	Total
Reference	11%	53%	36%	100%
$K=71.74$	8.89%	55.51%	35.6	100%
$K=34$	11.47%	53.54%	34.99%	100%

YAG:Ce 螢光粉模擬模組參數確認

至目前為止我們已經初步設立了 YAG:Ce 螢光粉在 TracePro 模擬中所需的參數。但當中有兩個參數：螢光粉散射模型中的非等向異性係數以及螢光粉光轉換機制模型中的莫爾消光係數是以模擬的試誤法求得。為了再次驗證這些設定參數的準確性，我們參照 Yiting Zhu 團隊發表的另一篇文獻[32]中的實驗架構(圖 3.15)及實驗結果(圖 3.16)，此篇文獻探討了不同 YAG:Ce 螢光粉濃度下，穿透及反射的藍、黃光比例。我們同樣仿造此實驗架構於 TracePro 中建立相同尺寸的模型，不過考慮到簡化模型，模擬架構中的兩積分球仍以兩半圓穿透面代替，而因螢光粉濃度不同而改變的參數則整理列於表 3.5。

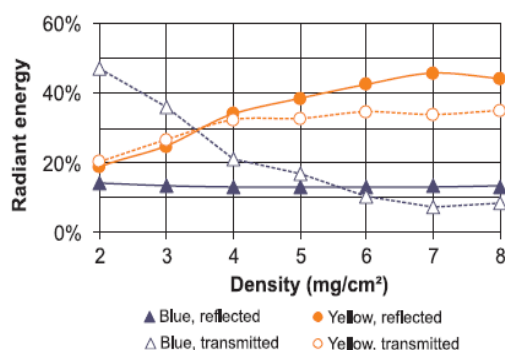
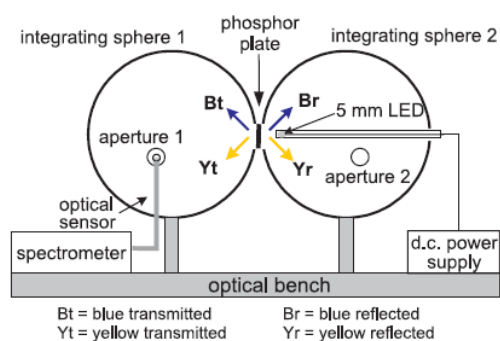


圖 3-15 螢光粉吸放光與散射光量測架構圖[32] 圖 3-16 不同濃度 YAG:Ce 螢光粉穿透及反射之藍、黃光比例[32]

表 3-5 不同 YAG:Ce 螢光粉濃度及散射因子對照表

YAG:Ce 螢光粉濃度 (mg/cm ²)	YAG:Ce 螢光粉濃度 (moles/liter)	散射因子 (μ_s , unit: 1/mm)
2	0.067375	1.394
3	0.101063	2.091
4	0.13475	2.788
5	0.168438	3.485
6	0.202125	4.182
7	0.235813	4.879
8	0.2695	5.576

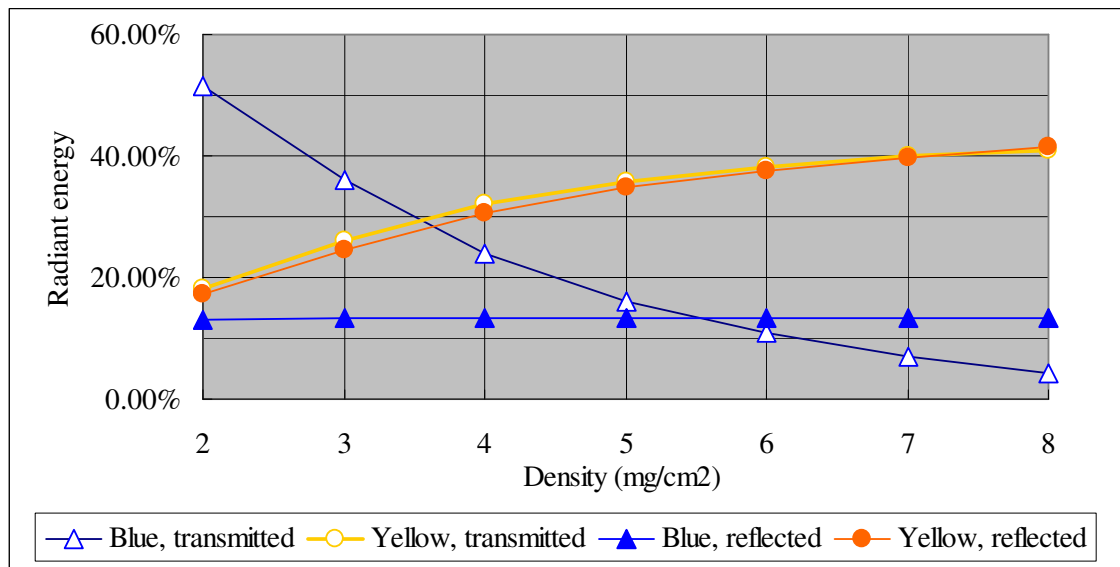


圖 3-17 不同濃度 YAG:Ce 螢光粉穿透及反射藍、黃光比例模擬結果圖

圖3-17為用 TracePro 模擬不同濃度YAG:Ce螢光粉的結果圖。和圖3-16 Yiting Zhu 團隊的實驗結果比較可發現兩者有相當接近的數值和趨勢，此比較證實了我們於TracePro 內建立的螢光粉散射模型以及螢光粉吸收藍光及放出黃光的各項參數是準確且可信的。

第四章 不同封裝設計之光學模擬結果與討論

在第三章中我們藉由實際的量測、文獻的查詢與推演於 TracePro 中建構了藍光 LED 晶片混合 YAG:Ce 的白光 LED 模組基本模擬模型與參數，而在此章節中我們將進一步藉由這些基本參數值模擬多種不同封裝形式的 LED 模組，並討論最終 LED 模組如總光通量值，單位立體角輻射光強度值以及光均勻性等的光學特性。

4.1 螢光粉塗佈及凹杯型式對於白光 LED 發光效率分析

本節將探討三種不同的凹杯結構並分別搭配三種不同螢光粉塗佈方式，製作最終相對色溫值為6500K的白光 LED 模組，並探討其發光效率。此部分的研究分為實做以及模擬兩部份。

研究中所探討的三種螢光粉塗佈方式分別為：(a)均勻分布(uniform)、(b)覆蓋於晶片上(conformal)、(c)遠離晶片塗佈(remote)，如圖4-1所示。均勻濃度的塗佈方法可利用電子天平調配適合之螢光粉與矽膠的比例，再加以均勻塗佈即可。而覆蓋於晶片上的塗佈方式則可利用均勻的螢光粉與矽膠混合後經過長時間的沉澱而得。遠離晶片塗佈法則可先加入一層控制適當量的矽膠於凹杯內，預烤固定時間使其表面固化後再調配較高濃度螢光粉混合溶液塗佈於矽膠層上。

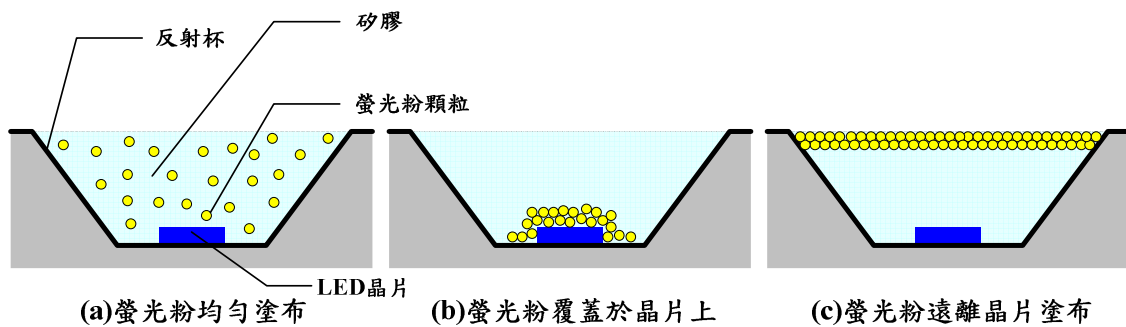


圖4-1 螢光粉在凹杯型LED模組中三種塗佈形式

本研究探討的另一項操作變因則為 LED 模組中反射凹杯的形式。實驗以及模擬中所用的反射凹杯尺寸以及結構圖均如表 4-1 以及圖 4-2 所示。

表 4-1 三種不同形式凹杯尺寸

	凹杯 A	凹杯 B	凹杯 C
上圓直徑 D_1 [mm]	3	4.2	6.13
底部直徑 D_2 [mm]	2	3.2	5
深度 H [mm]	0.6	1	1
θ	50°	63°	61°

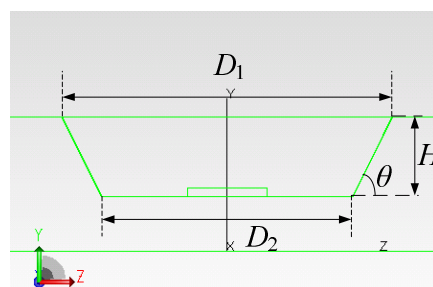


圖 4-2 LED 反射凹杯結構圖

實做部分採用的藍光晶片其主波段(λ_{peak})為 451 nm、半高強度寬(FWHM)為 19 nm、裸片在操作電流 350 mA 情況下其光輻射強度為 170 mW。而模擬部分的主要參數則設定如同第三章所述。不過在模擬中我們仍有兩個參數仍不確定其確切值而需要進一步討論。第一個參數為如第 3.3 節所述：為晶片表面的等效反射率設定，另一則為模擬藍光晶片的光輻射強度值。在我們的模擬中為了簡化模擬的結構，我們不考慮晶片內部的結構而直接設定其發光形式為以晶片上端面發出朗伯遜(lambertian)分佈的光源。雖然實際用的裸片晶片其光輻射強度為 170 mW，但我們由 2.3 節矽膠的功用得知在封裝的過程中，矽膠層覆蓋於 LED 晶片的時候由於晶片與外在介質折射率差值的降低將有效提升 LED 晶片於該介面的發光強度。

由 2.3 節的理論推導我們知道應用矽膠層時晶片於該介面的發光因提升為 2.65 倍，但由於現今的 LED 晶片本身均已做過提升光取出效率的製程，故矽膠的提升效果將小於 2.65 倍而為一未知的值。為了設定 LED 晶片於此介面的發光強度值，我們先假定另一個未完全掌握的變數：晶片表面的等效反射率值為參考文獻上的 50%。之後調整晶片於介面的發光值來逼近實做的數值。結果發現當調整晶片於介面的發光值為 292 mW 時能獲得和實驗結果頗接近的結果，結果整理如表 4-2 所示。

螢光粉於空間中分布情形明顯的影響整體白光 LED 發光強度。由表 4-2 中可發現無論是哪種凹杯形式，採用螢光粉遠離晶片塗佈的方式都可獲得最高的發光效率。螢光粉遠離晶片塗佈法可獲得較高發光效率的原因在於：當螢光粉經由 LED 發出的藍光激發後，所放出之光線並無特定的方向，意即將有一半的光線將會朝底部的方向發射，此外根據第三章螢光粉的散射模型，部分藍光也會因螢光粉而改變方向向下散射。在螢光粉覆蓋於晶片表面的塗佈方式中，向下發射與散射的光線將有大部分會照射於晶片表面。由於一般 LED 晶片表面的等效反射率小於週遭鋁材質的反射率，故採用螢光粉覆蓋於晶片表面的塗佈方式時，由螢光粉所發

出的光子以及受螢光粉散射的藍光有較高比例照射在晶片表面上而使得吸收率較大。而採用螢光粉遠離晶片塗佈的方式則可大幅降低經由螢光粉層後光被晶片吸收的效應，原本向下的光線大部分可經由較高反射率的鋁凹杯反射，故螢光粉遠離晶片塗佈的方式可獲得較高的發光效率。

若我們比較實際實驗結果與表面等效反射率定為 50%的模擬，發現遠離塗佈形式較覆蓋於晶片表面方式的總光通量提升比例過高。我們推測這是由於所用的晶片表面等效反射率設定過低的關係。我們重新嘗試表面等效反射率為 60%，並設定此時晶片於介面的發光值為 286 mW 時能得到更符合實際實驗的結果，模擬結果也列於表 4-2。之後我們將設定此兩個參數為模擬預設值來繼續我們之後的模擬。

表 4-2 不同凹杯形式與不同螢光粉塗佈型式之光效率比較

		實際 LED 量測 結果	TracePro 模擬結果	
			晶片表面等效 反射率定為 50%	晶片表面等效 反射率定為 60%
		總光通量 (mW)	總光通量 (mW)	總光通量 (mW)
凹杯 A	覆蓋於晶片表面	118.49	107.13	120.17
	均勻塗佈	125.54	118.22	127.84
	遠離晶片塗佈	129.37	129.57	133.33
凹杯 B	覆蓋於晶片表面	108.78	103.96	118.53
	均勻塗佈	119.27	117.71	125.71
	遠離晶片塗佈	127.56	129.24	130.50
凹杯 C	覆蓋於晶片表面	109.62	100.86	111.01
	均勻塗佈	118.87	128.01	122.78
	遠離晶片塗佈	122.31	131.96	128.54

4.2 取光鏡對藍光 LED 模組發光效率與場形影響分析

在 2.3 節我們解釋過當光線由較高折射率物質入射至較低折射率物質時，由於兩物質折射率差將造成全反射現象使得光線容易被侷限於高折射率材料中逐漸吸收，進而降低整體光學取出效率。此情況在如 4.1 節中基本 LED 模組架構中的矽膠到空氣層界面層也會發生。一有效降低光線全反射量的方法為在基本 LED 模組上加上一經設計過的取光鏡片，此鏡片由於能使原本大於臨界角入射而反射的光線直接穿透出去，而有效提升總光學取出效率。在此節的模擬我們將先行探討不同曲率的取光鏡對於藍光 LED 模組發光效率以及發光場形所造成的影響。模擬所用取光鏡的材質選定為 TracePro 內建，德國 Schott 公司所出的 BK7 玻璃鏡片。本部分模擬針對和上一節相同的三種凹杯，分別設計了五種不同曲率的取光鏡，這五種不同取光鏡的曲率設計可使得取光鏡的高度 L 正好等於 $1/5$ 、 $2/5$ 、 ~ 1 的反射凹杯上半徑。各種取光鏡對應的曲率半徑如表 4-3 所列。

表 4-3 三種凹杯所用五種取光鏡曲率半徑對照表 (單位: mm)

	$L=1/5 R_I$	$L=2/5 R_I$	$L=3/5 R_I$	$L=4/5 R_I$	$L=R_I$
凹杯 A ($D_I=3$ mm)	3.9	2.175	1.7	1.5375	1.5
凹杯 B ($D_I=4.2$ mm)	5.46	3.045	2.38	2.1525	2.1
凹杯 C ($D_I=6.13$ mm)	7.969	4.44425	3.47367	3.14162	3.065

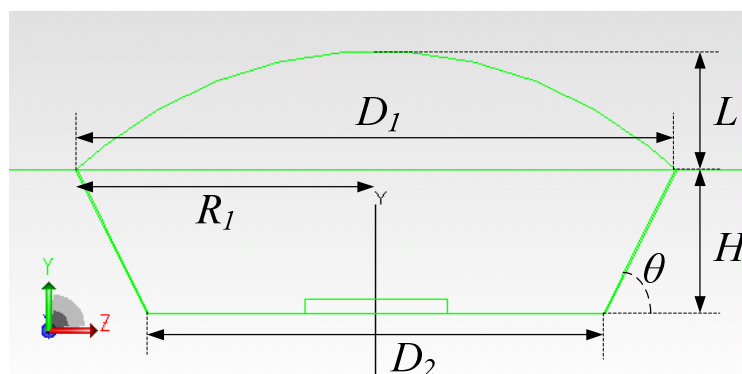


圖 4-3 TracePro 包含取光鏡的 LED 模組結構圖

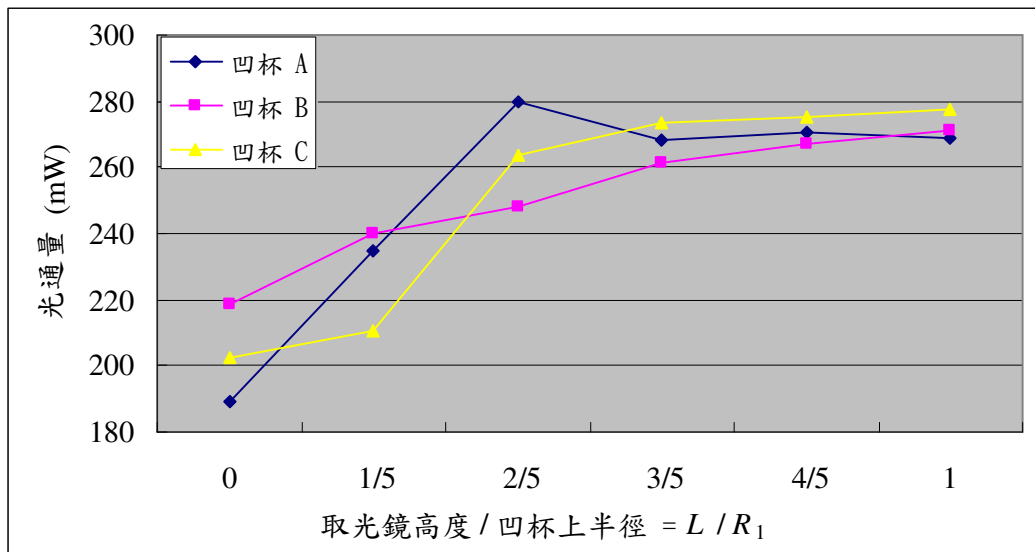


圖 4-4 不同凹杯搭配不同取光鏡之總光通量圖

圖 4-4 為不同凹杯搭配不同取光鏡時藍光 LED 總光通量強度的比較圖。由圖中所示我們發現在我們所用的三種凹杯形式中，加上取光鏡後對於無論哪種凹杯形式，其發光強度都有明顯的增強。在較大的凹杯設計(如凹杯 B 與凹杯 C)，當 LED 晶片位置越靠近於取光鏡之曲率中心時(即取光鏡越接近半圓時)，其取光的增率越明顯。這是因為當整個模組體積較大時，我們可將 LED 晶片視為近似為一點發光源，在此假設下當 LED 晶片位於取光鏡的曲率中心時，其大部分所發出的光可避免全反射的限制而直接穿透鏡片層到達空氣中，進而增進光取出率。不過當整體模組較小時(如凹杯 A)，我們便需考慮晶片實際為一面光源，因此取光鏡在某些特定的曲率時，以所模擬的五種取光鏡為例，當用取光鏡高度為 $2/5 R_1$ 時，將有最高的光取出率。

圖 4-3、圖 4-4、圖 4-5 分別為三種凹杯形式搭配不同取光鏡時發光場形強度分布模擬圖。

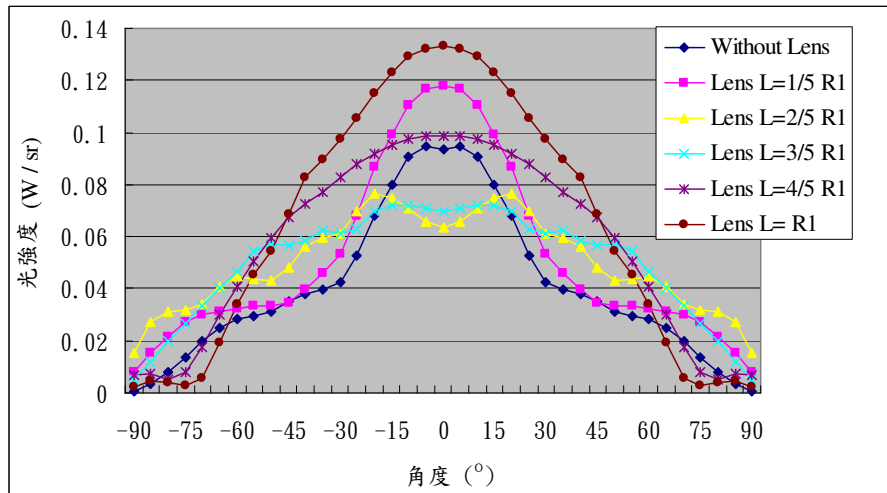


圖 4-5 凹杯 A 搭配不同取光鏡藍光 LED 發光場形強度分布模擬圖

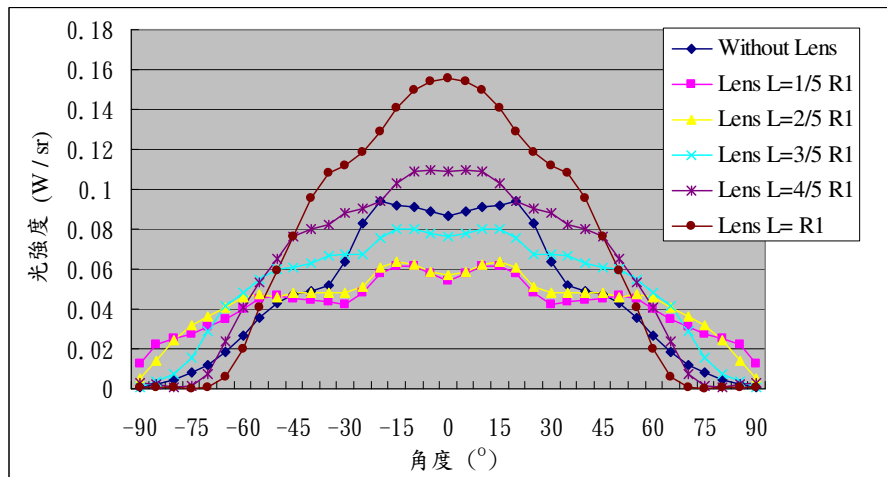


圖 4-6 凹杯 B 搭配不同取光鏡藍光 LED 發光場形強度分布模擬圖

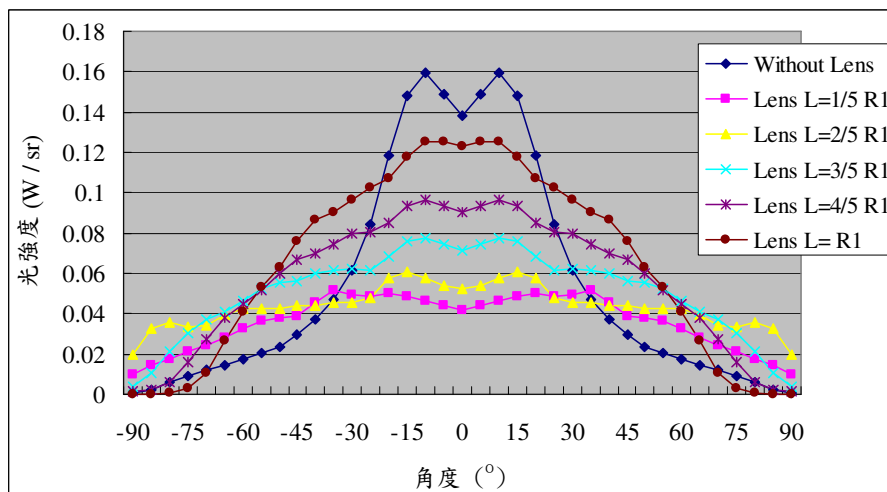


圖 4-7 凹杯 C 搭配不同取光鏡藍光 LED 發光場形強度分布模擬圖

4.3 取光鏡對白光 LED 模組發光效率分析

在本節的模擬中，我們將同時探討同 4.1 節提到的三種不同種形式的凹杯以及三種不同形式螢光粉的塗佈方法，搭配 4.2 節中五種形式的取光鏡，探討整體 LED 模組的光取出率。模擬光通量結果如圖 4-8 所示。

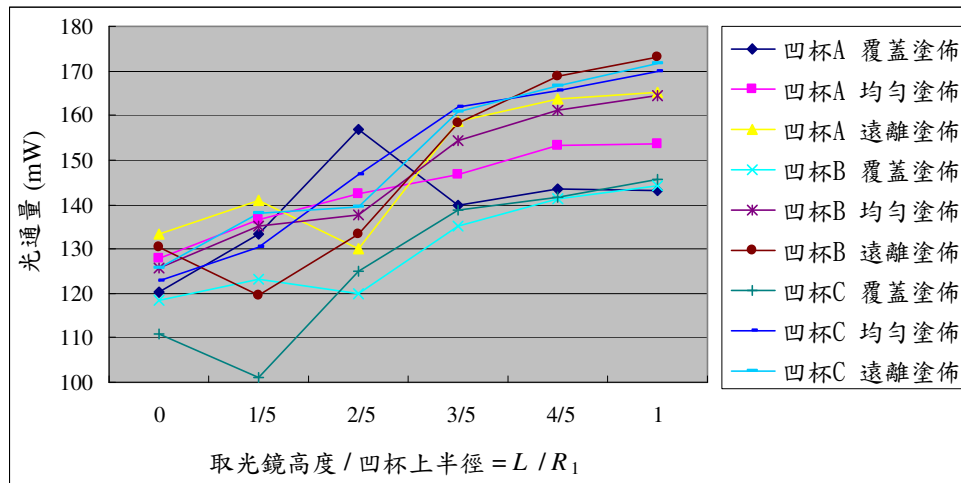


圖 4-8 不同凹杯及螢光粉塗佈形式搭配各式取光鏡 LED 模組光通量圖

根據模擬的結果所示，在所模擬的眾多 LED 模組形式裡，以上直徑 4.2 mm、下直徑 3.2 mm、深度 1 mm 形式的凹杯 B，搭配上螢光粉遠離塗佈技術以及 L / R_1 比為 1 的取光鏡(即半圓形的取光鏡)可獲得最佳的光取出率(173.27 mW)，而換算出的流明值則為 54.63 lm。此光通量值為應用相同凹杯配合上傳統封裝形式(螢光粉均勻塗佈以及未加上取光鏡)時所能獲得的 1.38 倍。

上述的模擬結果，是在各種形式 LED 模組尚未加上取光鏡之前，控制相對色溫值於 6500K 左右所獲得的。而在加上各種不同曲率的取光鏡後，大部分的 LED 模組在光取出效率均有顯著的提升。不過同時我們也觀察到了另一個現象：當蓋上取光鏡時 LED 的相對色溫值(CCT)也會有偏移的現象，我們將各式 LED 模組 CCT 偏移的模擬情況結果整理如圖 4-9 所示。所以會有相對色溫值偏移的現象，相信是由於各式取光鏡所造成的藍光光提升率和 YAG:Ce 所發出的黃光光提升率不同所造成的。尤其是當我們應用螢光粉遠離晶片塗佈的技術時，由於從晶片發出的藍光光源與由螢光粉發出的黃光光源在空間上分布距離較大，因此受不同取光鏡所造成的光提升比例差也相對較大，而造成了相對色溫值偏移較大的結果。相較於螢光粉遠離塗佈法，應用螢光粉覆蓋於晶片上的塗佈技術時，由於兩者發

光源較為靠近，故相對色溫值(CCT)受取光鏡不同而造成的偏移量則相對的較小。

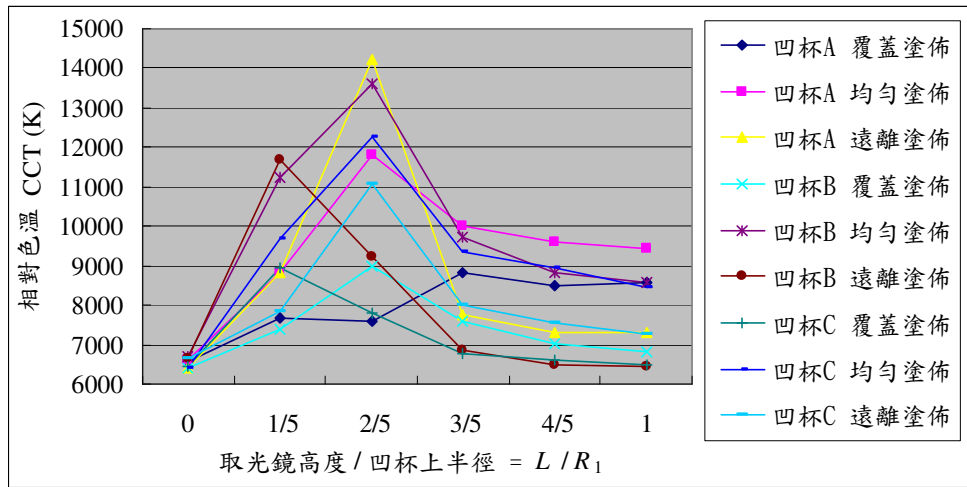


圖 4-9 原始相對色溫約為 6500K 各式 LED 模組在加上不同取光鏡後 CCT 變化圖

在實際的 LED 應用時，我們關心的是能控制 LED 模組最終的相對色溫值於一固定值。故本模擬藉由調整各式 LED 模組中 YAG:Ce 螢光粉的濃度，控制最終相對色溫值於 $6500\text{K} \pm 150\text{K}$ ，並探討此時各種 LED 模組的總光通量值，其結果整理如圖 4-10 所示。

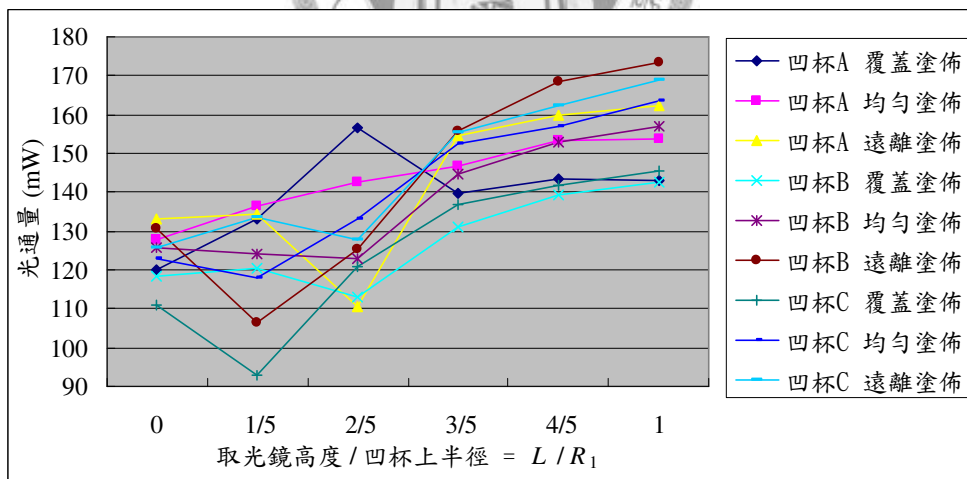


圖 4-10 控制最終 LED 模組相對色溫值於約 6500K，各種 LED 模組的光通量圖

在控制最終色溫值於 6500K 左右時，部分形式的 LED 模組其光取出效率和圖 4-8 所示的略有不同。但擁有最佳光取出效率的組合仍為上直徑 4.2 mm、下直徑 3.2 mm、深度 1 mm 形式的凹杯，搭配上螢光粉遠離塗佈的技術以及 L/R_1 比為 1 的取光鏡的 LED 模組。

4.4 白光 LED 模組色均勻性分析與改進

應用藍光 LED 晶片配合黃光 YAG:Ce 螢光粉所形成的白光 LED 模組，有著製程簡易的優點，且發光效率發展至今已能超越一般日光燈(約 70 lm / W)，因此極被看好成為未來主流的白光光源之一。但這種形式的白光 LED 有一缺點為其發光的色均勻性不一。在此節我們將討論這種現象，並且嘗試提出適當的解決方案。

圖 4-11 所示為用上直徑 4.2 mm、下直徑 3.2 mm、深為 1 mm，搭配曲率半徑為 2.1 mm 的取光鏡，應用三種不同螢光粉塗佈方式時，由一距離 LED 模組為 316 mm 的觀測曲面觀測到的模擬仿真色彩分布圖。由圖中我們可觀察到，藍光 LED 晶片配合黃光 YAG:Ce 螢光粉所形成的白光 LED 模組確實有著色彩不均勻的問題。由圖觀察到此種白光 LED 偏中央的光色較偏藍色，而周圍的光色則較偏黃色，此種應用藍光 LED 搭配 YAG:Ce 螢光粉色彩分布不均的現象一般稱為藍斑或是黃圈[33]。

造成色彩不均勻現象的主要因素為藍光 LED 晶片與 YAG:Ce 螢光粉發光型態不同所造成。藍光 LED 晶片的發光強度一般遵循著朗伯遜分布，意即其強度分布隨著角度成 $\cos \theta$ 的分布，故相對應角度較小的偵測面中央部份的藍光較強，而對應角度較大的偵測面邊緣則藍光強度較弱。相較於藍光晶片發光強度隨角度分布不同，螢光粉在受藍光激發後發出黃光的形式則為均勻分布。藍光光源與黃光光源發光型態的不同為造成色彩均勻性不同的主因。

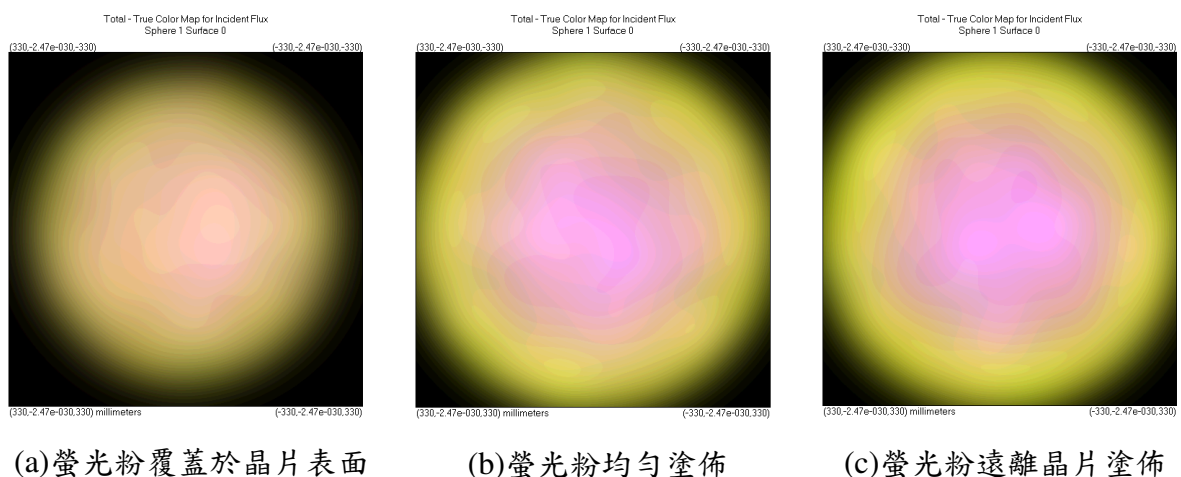


圖 4-11 不同螢光粉塗佈方式仿真光照圖

螢光粉塗佈形式的不同也影響著色彩不均勻的程度。由圖 4-11 中我們觀察到螢光粉遠離晶片塗佈時所造成的色彩不均勻程度大於其餘兩者，而螢光粉均勻塗佈的方式造成的色彩不均勻程度也大於螢光粉覆蓋於晶片表面的形式。為了更進

一步量化比較此色彩均勻性不同的特性，我們於 TracePro 軟體中設計了一偵測光均勻性的架構，如圖 4-12 所示。在距 LED 模組 316 mm 的距離，每隔 10 度($\Delta\theta$)建立一偵測曲面。藉由計算每個偵測曲面上被照射的藍光與黃光比例，並和相對色溫值 6500K 的參考線做比較，可量化判定光均勻性的程度。

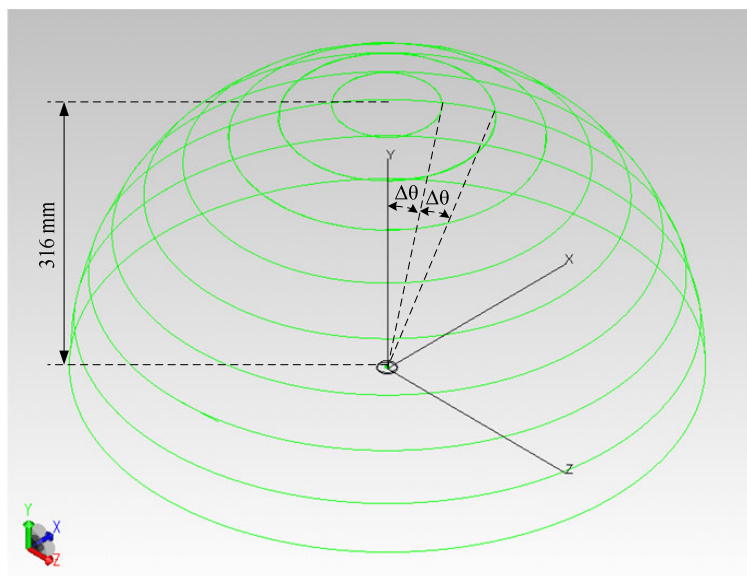


圖 4-12 TracePro 量化光均勻性架構圖

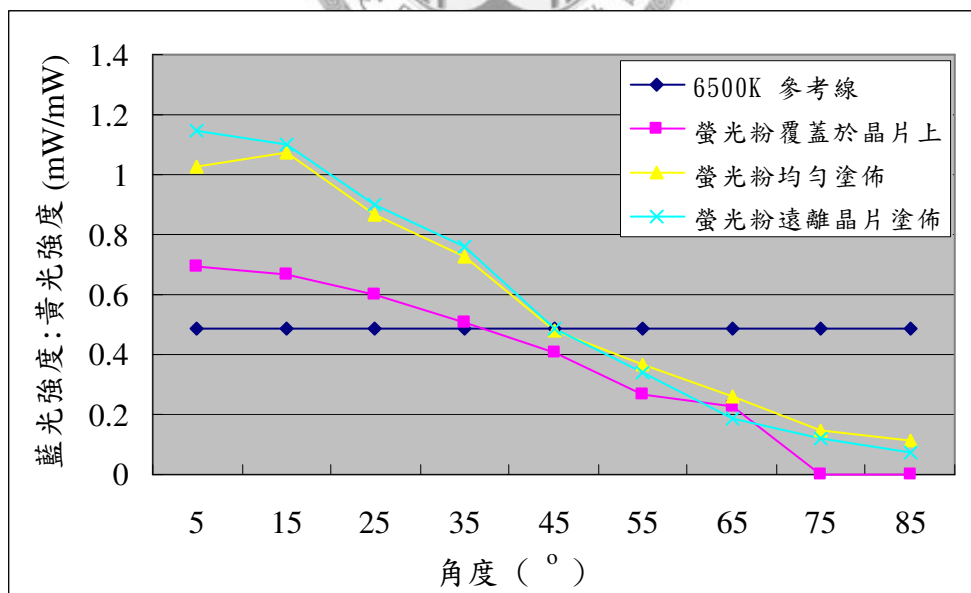


圖 4-13 不同螢光粉塗佈方式光均勻性比較圖

圖 4-13 為不同螢光粉塗佈方式光均勻性比較圖。由圖可更明顯看出：和相對色溫值定於 6500K 的參照線比較起來，螢光粉覆蓋於晶片上的塗佈方式擁有較佳的色彩均勻特性。此外雖然在角度大於 70° 以上時，螢光粉覆蓋於晶片上塗佈法所得的藍光黃光強度比例較其餘兩者和相對色溫值 6500K 參考線的差距更大，但若考慮此類大角度的實際光強度，如圖 4-14(a)所示，由於此時螢光粉覆蓋於晶片上塗佈法在大角度時 LED 的光強度趨近於零，根據這個結果我們仍認定螢光粉覆蓋於晶片上塗佈法可獲得最佳的光色均勻特性。

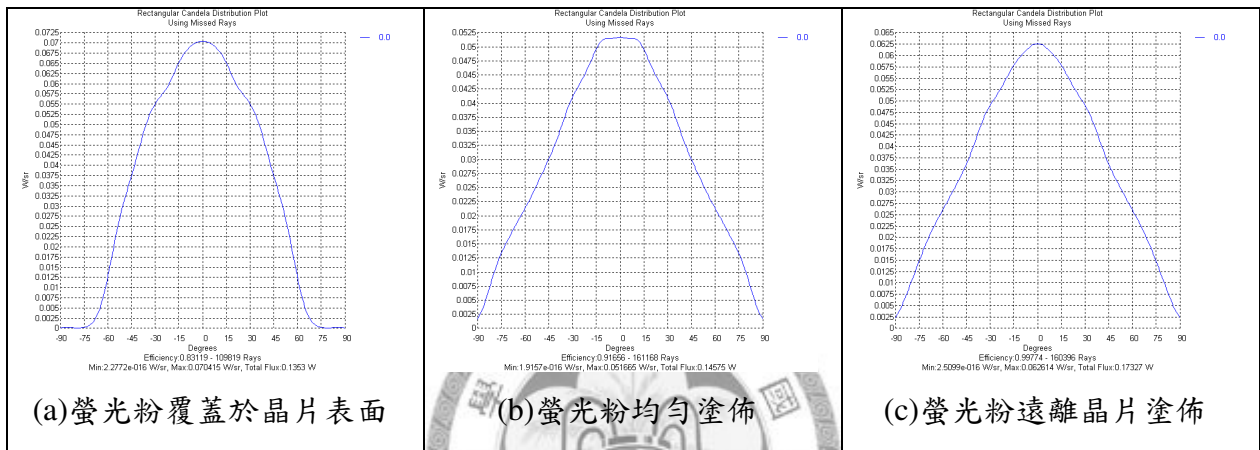


圖 4-14 不同螢光粉塗佈方式發光場形強度分布圖

由本節討論目前為止的結論可得：應用螢光粉覆蓋於晶片表面的塗佈方式可獲得較佳的色均勻特性。但由 4.1 和 4.3 節得到的結論卻發現：此種塗佈方式所獲得的總光通量會較另外兩種塗佈方式為低。為了獲得較高總光通量並同時改善光均勻特性，本節接著討論能否藉由主要採用螢光粉遠離晶片塗佈的方式，但再加以微調塗佈螢光粉厚度分布來改善光均勻特性。

由於一般色均勻性不均的現象為照射面上中央光色較偏藍而周遭光色偏黃，故我們嘗試改進色均勻性的方法是將遠離塗佈的螢光粉層中央部分增厚或邊緣部份改薄。我們定義三個長度參數 d_1 、 d_2 、 d_3 (單位: mm) 來改變螢光粉層的形狀，如圖 4-15 所示。 d_2 決定了形狀為圓餅狀的螢光粉層厚度， d_1 則決定了在圓餅狀螢光粉層(d_2 層)上球冠體的厚度， d_3 則決定了在圓餅狀螢光粉層(d_2 層)下球冠體的厚度。

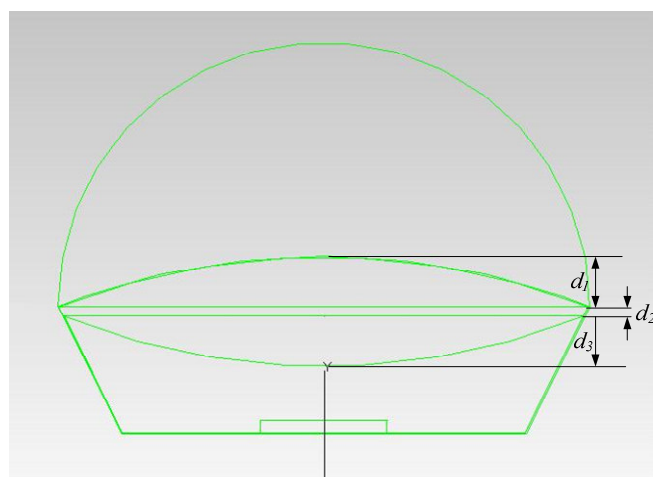


圖 4-15 以 d_1 、 d_2 、 d_3 三個變數定義遠離塗佈螢光粉層的形狀

在改變遠離塗佈螢光粉層形狀的同時，我們藉由改變螢光粉層的濃度，控制最終整體 LED 模組發光的相對色溫值範圍於 $6500 \pm 200\text{K}$ 。表 4-4 為我們嘗試的幾組不同的幾組 d_1 、 d_2 、 d_3 值，以及相對應最終相對色溫值以及總輻射光通量對照表。

表 4-4 不同螢光粉遠離塗佈形式 d_1 、 d_2 、 d_3 值及相對應的最終相對色溫值，總輻射光通量對照表

(d_1, d_2, d_3)	相對色溫值 (K)	總輻射光通量 (mW)
原始螢光粉遠離塗佈形式 (0,0.28,0)	6469.53	173.27
(0.2,0.28,0)	6584.655	172.81
(0.4,0.28,0)	6643.54	174.36
(0.4,0.18,0)	6669.439	172.93
(0.4,0.08,0)	6546.498	172.36
(0,0.08,0.2)	6455.228	172.12
(0,0.08,0.4)	6627.379	171.85

由表 4-4 觀察幾種不同的螢光粉遠離晶片塗佈形式，這些塗佈形式都仍然具有螢光粉遠離塗佈的優勢而維持著較高的總輻射光通量。接著分析所嘗試的各種遠離塗佈形式的色均勻性。圖 4-16 為應用我們先前建立的偵測光均勻性架構，分析

並計算各種不同遠離塗佈法於各個角度偵測面上藍光與黃光強度的比例。圖中仍附上相對色溫值為 6500K 以及螢光粉覆蓋於晶片塗佈法所獲得的結果以方便比較。由圖 4-16(a)中發現，僅於原始圓餅型螢光粉層(d_2 層)上再加上球冠體型的螢光粉塗佈並未能有效改善色彩分布不均的問題。即便我們藉由減少圓餅型的厚度(降低 d_2 值)來提高中央螢光粉層與邊緣螢光粉層的厚度比例，色彩分布不均仍然幾乎未有任何的改善。但若我們改成於圓餅型螢光粉層(d_2 層)下加上球冠體型的螢光粉層(d_1 層)，由圖 4-16(b)中觀察到此種塗佈方式各角度所得的藍光黃光強度比較原始一般螢光粉遠離晶片塗佈法要接近相對色溫值為 6500K 的參考線，但和螢光粉覆蓋於晶片表面方式比較起來其色彩均勻性仍然較差。

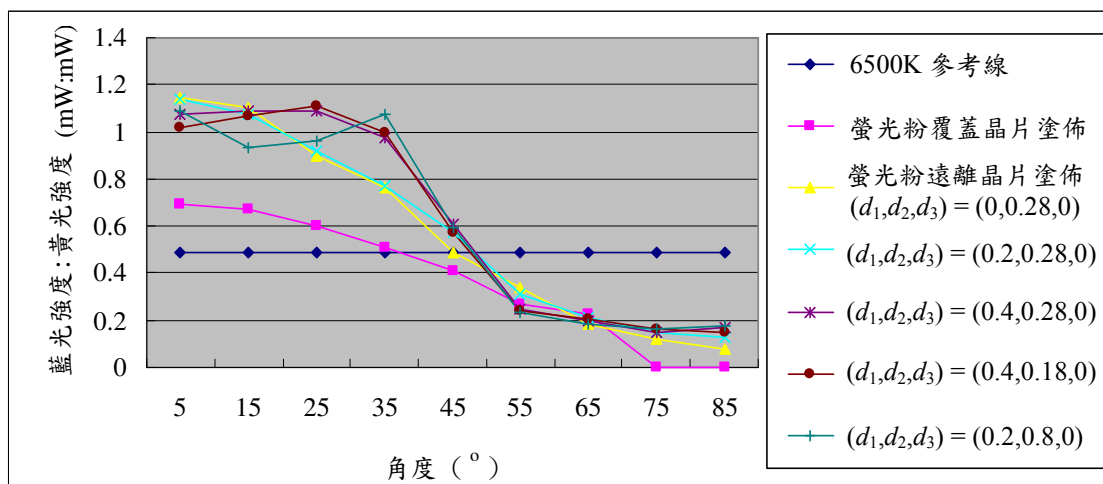


圖 4-16 (a) 不同遠離晶片螢光粉塗佈方式光均勻性比較圖

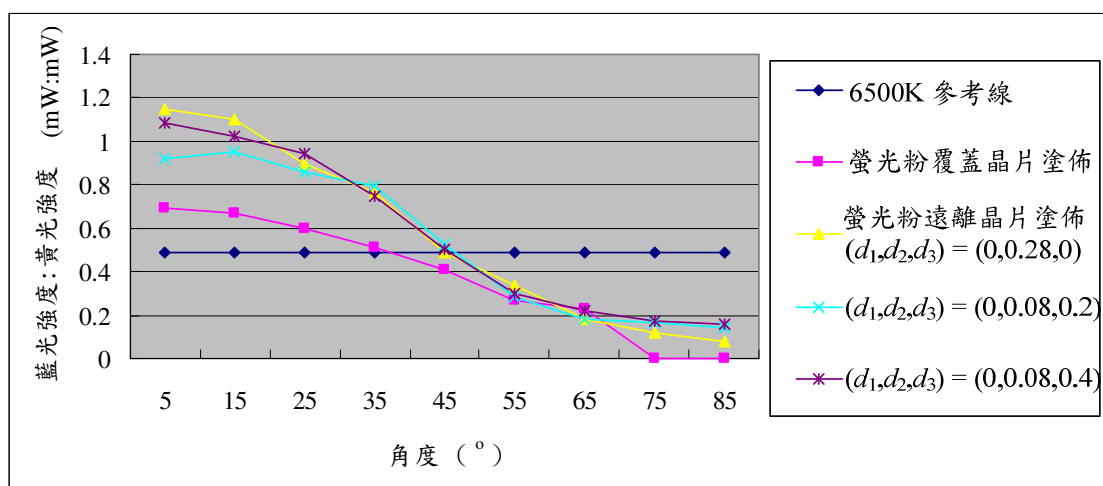


圖 4-16 (b) 不同遠離晶片螢光粉塗佈方式光均勻性比較圖

4.5 反射杯對於白光 LED 模組發光效率及場形之影響分析

LED 晶片本身的發光場形基本上遵循朗伯遜強度分布，其半功率角(光強度由峰值強度往兩側強度降至峰值強度一半時的角度)為 60 度。在某些應用的場合上，如汽車的大燈或是投射燈，所需要的光源並非為寬的半功率角而是需要較高的單位立體角光輻射強度。為了達成聚集光線的效果，目前最常見的方式為在完成封裝的凹杯型 LED 模組上再加上一反射杯，其架構實體圖如圖 4-17 所示。



圖 4-17 於凹杯型 LED 模組加上反射杯實體圖

本節的研究目標，在於設計不同形式的反射杯，並探討其對光輻射強度、總光通量強度、半功率角的影響。

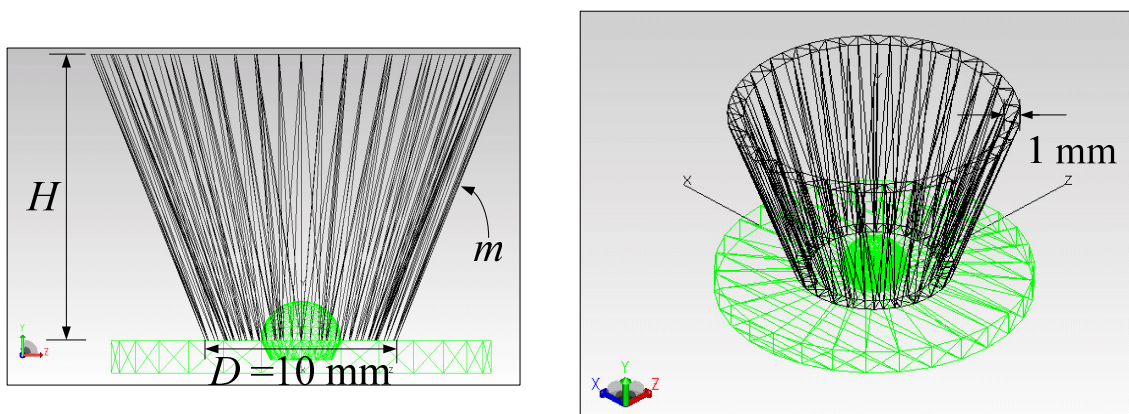


圖 4-18 TracePro 反射杯模擬架構圖

圖 4-18 為用 TracePro 建立的 LED 模組加上反射杯模型。一般實際所用反射杯的反射表面為鍍鋁金屬的表面，故將反射杯表面反射率定為如圖 3-3 中，入射介質

折射率為 1 時鋁材的反射率。在反射杯形狀的設計方面，則定反射杯的下直徑固定為 10 mm，材質厚度為 1 mm，而反射杯形狀的操作變數則為其側壁的斜率 m 以及反射杯的高度 H 。斜率 m 採用的數值範圍為 1, 1.25, 1.5, 1.765, 2.5, 3, 4, 5，而反射杯高度則從 2.5 mm ~ 15 mm，間距為 2.5 mm，高度 15 mm 以上的反射杯由於所佔體積過大而在實際應用上將有所不便，故不予考慮。

在基本 LED 模組上在加上反射杯的最大主要目的便在於增進在單位面積或單位立體角的光照度或光輻射強度，圖 4-19 為用 4.3 節所獲得輻射光通量最亮的 LED 模組(凹杯形式:上直徑 4.2 mm，下直徑 3.2 mm，深 1 mm，螢光粉遠離晶片塗佈搭配半圓取光鏡)搭配各式反射杯後所能獲得的中心最大光強度圖。如圖所示，單位立體角光強度基本的趨勢為隨著反射杯的高度增加而增強，而當定反射杯高度為 15 mm 時，在所嘗試的斜率值當中，以當反射杯斜率為 3 時能獲得最大的光強度圖。這代表著並非單純斜率越大就能獲得較大的光強度，而是需選取適當的斜率值。

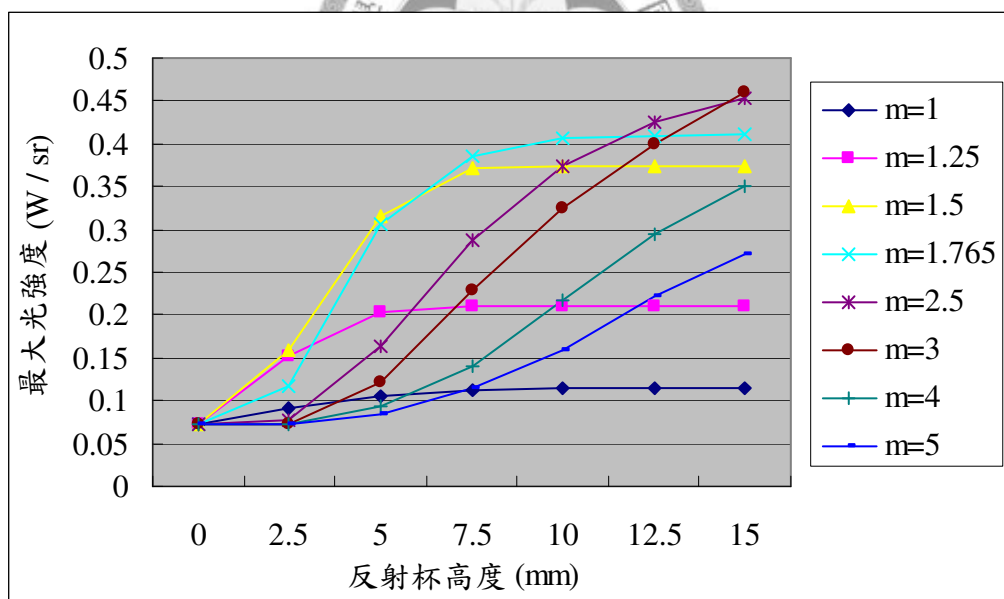


圖 4-19 各式反射杯獲得最大光強度圖

為了更進一步探討反射杯斜率跟發光場形的關係，圖 4-20 探討了當我們定反射杯高度為固定值(15 mm)時，各種不同斜率反射杯的發光場形圖；而圖 4-21 則為不同斜率反射杯式的光半功率角。一般而言，光半功率角的值越小則代表該反射杯聚光效果越好。由圖 4-21 中明顯觀察到光半功率角最小，即聚光效果較佳的反射杯斜率為接近 3 的時候，此時其半功率角度僅約為 12 度，得到的最大單位立體角光強度倍率為無反射杯時的 6.36 倍。

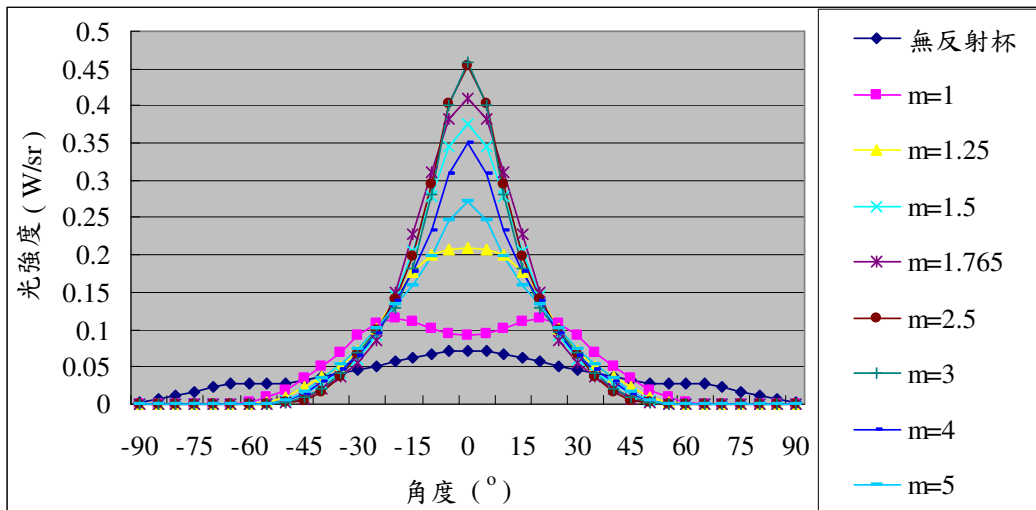


圖 4-20 反射杯高度為 15mm 時，不同斜率反射杯發光場形強度分布圖

由圖 4-20 觀察到當反射杯的斜率為 2.5 時，其最大單位立體角光強度(0.45 W / sr) 僅略小於斜率為 3 的反射杯，由圖 4-21 得知反射杯的斜率為 2.5 時的半功率角大於斜率為 3 時反射杯的半功率角，這代表斜率為 2.5 的反射杯聚光的效果低於斜率為 3 反射杯。但斜率為 2.5 的反射杯能造成的最大單位立體角光強度能接近斜率為 3 反射杯的原因在於：由於二次光學的反射杯藉由反射面改變光線方向聚光的同時，光每次藉由反射面反射時卻也會有反射損耗。當反射杯的斜率較大時，反射的次數較多會造成總幅射光通量降低，各式反射杯總幅射光通量如圖 4-22 所示，而各式反射杯總幅射光通量損耗比例則如圖 4-23 所示。反射杯斜率較大使得總光輻射量降低解釋了為何斜率為 2.5 反射杯在聚光特性較斜率為 3 反射杯差時還有十分接近的最大單位立體角光強度的原因。

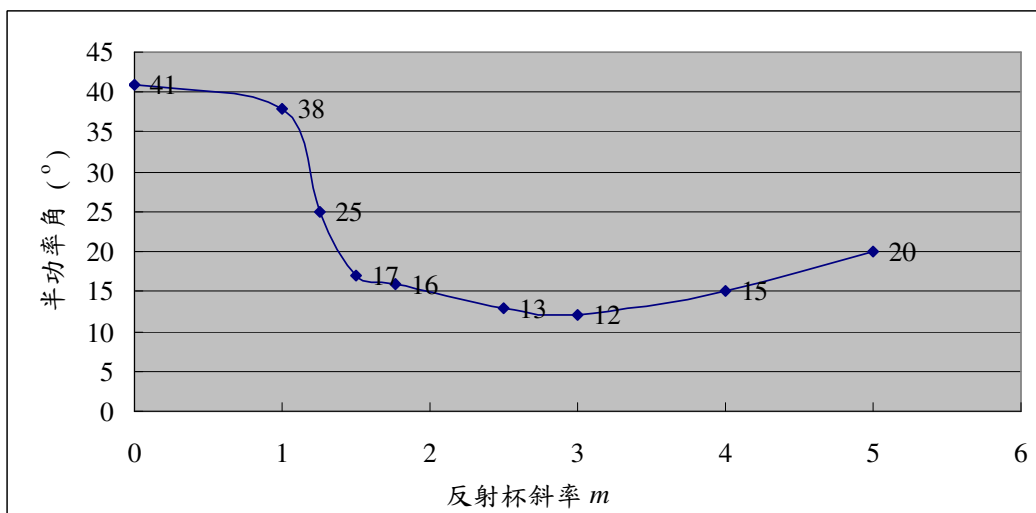


圖 4-21 不同斜率反射杯光半功率角度

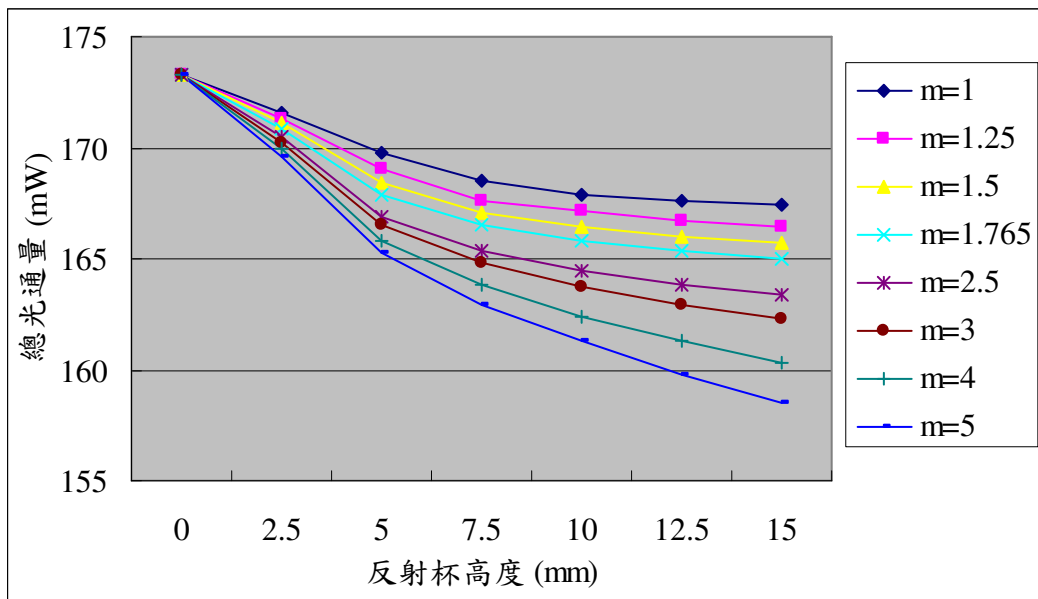


圖 4-22 各式反射杯總幅射光通量圖

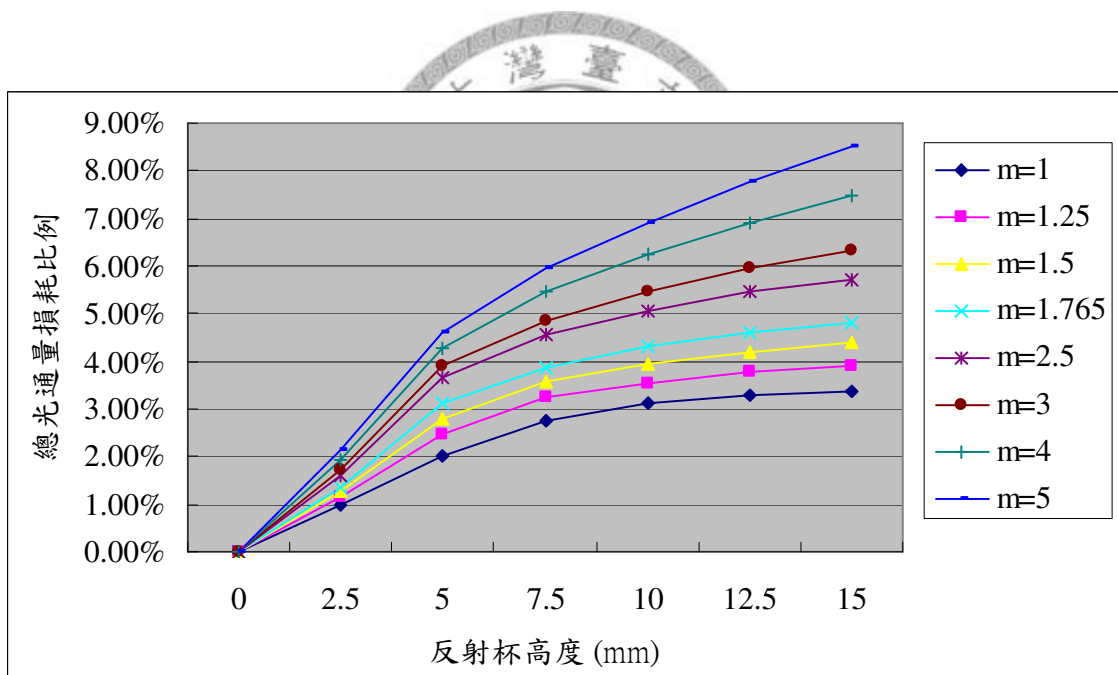


圖 4-23 各式反射杯總幅射光通量損耗比例

4.6 二次光學聚光鏡設計與模擬

前一節探討了以鍍鋁材質做為反射面的不同形狀反射杯，在本節則將探討另一種二次光學聚光的方法：利用玻璃或塑膠等透明材料製成一透明聚光鏡。這種 LED 模組的實體外型如圖 4-24 所示。



圖 4-24 凹杯型 LED 模組上加上二次光學聚光鏡實體圖

在本節我們將先設計不同形式的二次光學聚光鏡，並和 4.5 節一樣探討不同形式的聚光鏡對於光輻射強度、總光通量強度、半功率角的影響，並將其結果和以反射杯形式聚光 LED 模組達成的效果做一比較。

圖 4-25 為在 TracePro 中設置的二次光學聚光鏡架構圖。在實際的應用時，由於二次光學聚光鏡的所需材料體積較大，為了成本考量及容易成形而常選用的材料為光學級壓克力材料 (PMMA)，其在可見光波段折射率 n 為 1.49，穿透率則為 92% (厚度為 10 mm 時)。

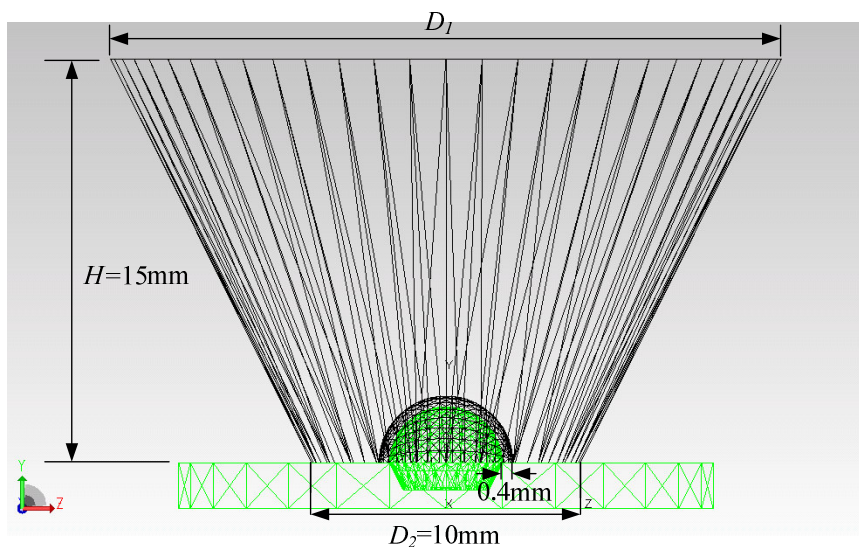


圖 4-25 TracePro 二次光學聚光鏡架構圖

在設計二次光學聚光鏡的外型時，較值得注意的一點為其側壁斜率有一定的範圍限制，這是因為此種聚光鏡其聚光方式不同於反射杯是利用高反射率的表面；二次光學聚光鏡的反射原理是藉由聚光鏡本身和空氣介面折射率差值所造成的全反射，故其只能針對入射角度大於臨界角度的光線造成反射作用來加以聚光。在 TracePro 模擬中經由嘗試的方法我們得出：如圖 4-25 中的聚光鏡其上直徑 D_1 的範圍需介於 20~30 mm 之間才有較為明顯的聚光效果，我們並將幾組不同 D_1 光場強度分布附於如圖 4-26。

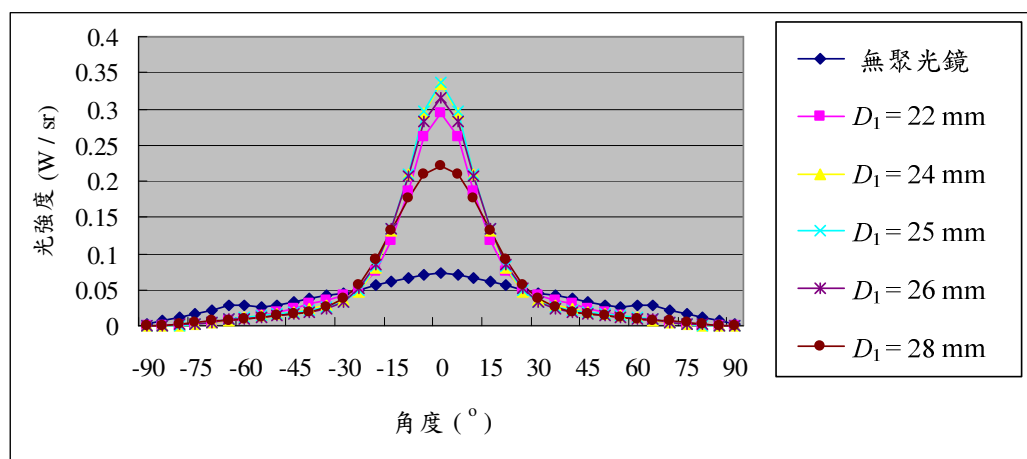


圖 4-26 不同上直徑 D_1 聚光鏡發光場形強度分布圖

表 4-5 為各種不同 D_1 所得到的半功率角角度、總光通量、最大單位立體角光強度一覽表。和反射杯形式的聚光方式相較，二次光學聚光鏡所能得到的半功率角度值可得到和反射杯形式幾乎相同的數值，意即兩者聚光的效果是差不多的。

表 4-5 二次聚光透鏡各種不同 D_1 時半功率角角度，總光通量，最大單位立體角光強度

	半功率角度 ($^{\circ}$)	總光通量 (mW)	最大單位立體角 光強度 (W / sr)	最大單位立體角 光強度增進率(%)
無聚光鏡	41	173.27	0.07217	1
$D_1 = 22$ mm	13	138.97	0.29431	4.07801
$D_1 = 24$ mm	13	138.38	0.3341	4.629347
$D_1 = 25$ mm	13	138	0.33745	4.675766
$D_1 = 26$ mm	13	137.57	0.315	4.364694
$D_1 = 28$ mm	18	136.9	0.22106	3.063046

但若比較兩種類型的總光通量值，利用二次光學聚光鏡所得的總光通量強度卻遠低於利用反射杯形式的聚光方式，其能量較反射杯型式約低了 30~40 mW。我們應用全反射方式來聚光的原本目的在於透過全反射來改變光行進方向時能量並不會有所耗損，此和反射杯用鋁反射面每次會有約 10% 的光能量損耗是一大優勢。但我們所獲得的模擬結果卻沒有展現出二次光學聚光鏡應有的優點。推測其原因在於所用的模擬結構中，聚光鏡和原本內部的取光鏡之間我們假定其為空氣層，此空氣層和聚光鏡的界面處將因折射率差產生佛內爾(Fresnel)的反射而降低總光通量值。為了去除此降低總光通量的反射因素及進一步簡化整體 LED 模組的製程，我們嘗試另一種取光透鏡的形式。如圖 4-27 所示，和原本的結構如圖 4-25 相比，新的結構去除了內部的光學取光鏡，整體結構簡化為將聚光鏡直接附於一般 LED 模組上。

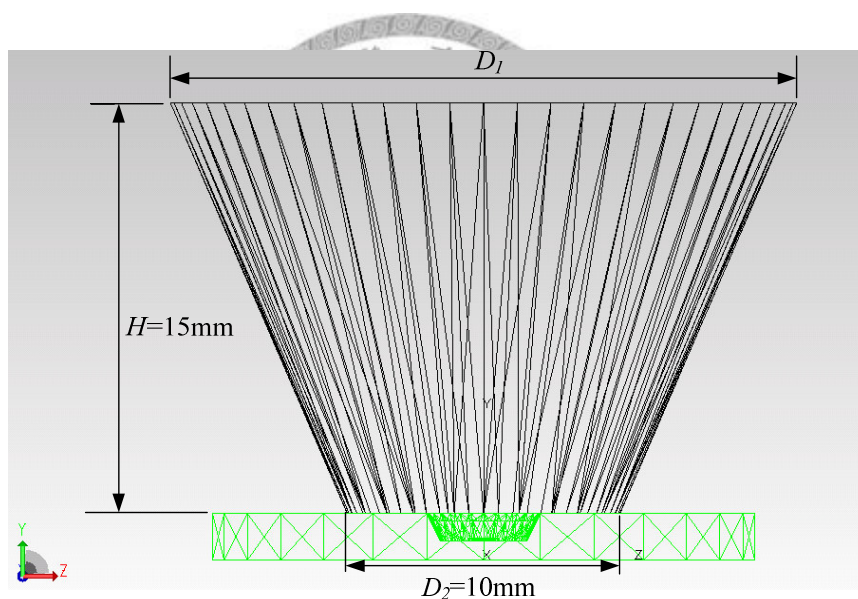


圖 4-27 TracePro 改良式光學聚光鏡架構圖

圖 4-28 為改良型聚光鏡於各種不同上直徑 D_1 的發光場形強度分布圖，而表 4-6 則分別列出半功率角度、總光通量、最大單位立體角光強度。由表 4-6 我們觀察到改良型聚光鏡和原本的設計相比的確有效的提升了 LED 模組的總光通量值，而且此種形式獲得的總光通量值也高於利用反射杯聚光的模組。此點符合了之前預期：利用全反射型式聚光能有效避免反射光損而達成較高總通量的推測。但若比較兩種形式所能獲得的最大單位立體角光強度，利用聚光鏡方式所能獲得的最大單位立體角光強度卻小於利用反射杯方式所能獲得的倍率($5.27 < 6.36$)。這一點

我們可藉由比較圖 4-20 和圖 4-28 獲得解釋，在圖 4-20 中我們觀察到利用反射杯聚光形式時在較大角度(約大於 45 度)時光強度都趨近於零，這是由於大角度的光線都將因鋁反射面而改變其行進方向因而能獲得更高的中心亮度。但在圖 4-28 中可觀察到聚光透鏡形式的反射鏡在大角度時卻仍有一定的光強度值，這是因為先前提到由於聚光透鏡是利用全反射性質來聚光，但角度小於臨界角的光線卻會直接穿透介面而無法改變其行進方向。

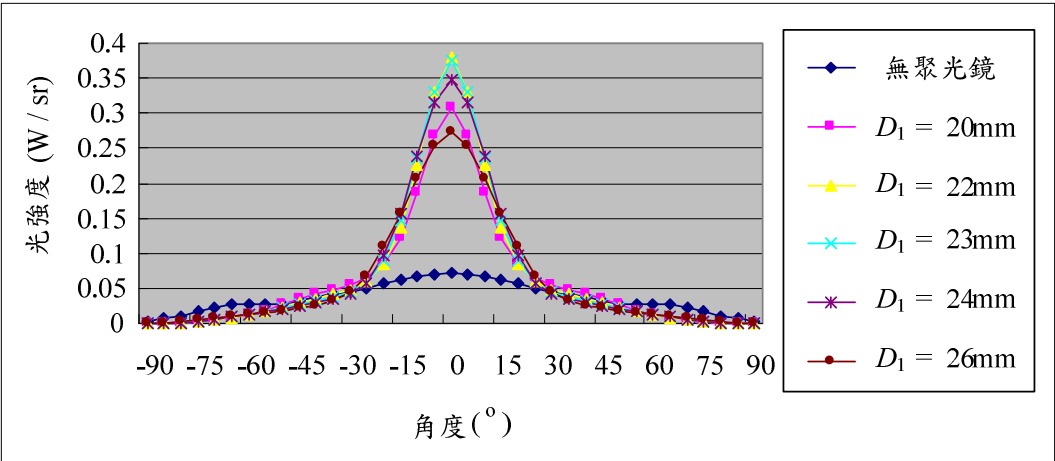


圖 4-28 改良型聚光鏡於不同上直徑 D_1 發光場形強度分布圖

表 4-6 改良型聚光鏡不同 D_1 時半功率角度，總光通量，最大單位立體角光強度

	半功率角度 ($^{\circ}$)	總光通量 (mW)	最大單位立體角 光強度 (W / sr)	最大單位立體角 光強度增進率(%)
無聚光鏡	41	173.27	0.07217	1
$D_1 = 20 \text{ mm}$	13	171.58	0.30857	4.275599
$D_1 = 22 \text{ mm}$	12	171.28	0.38059	5.273521
$D_1 = 23 \text{ mm}$	12	171.01	0.37397	5.181793
$D_1 = 24 \text{ mm}$	13	170.68	0.34779	4.819038
$D_1 = 26 \text{ mm}$	17	169.83	0.2726	3.777193

由圖 4-29 我們可觀察到另一個為何利用聚光透鏡其總光通量較高、半功率角度和反射杯聚光鏡類似、但中心最大單位立體角光強度卻不如反射杯聚光鏡的原因。由圖中可觀察到除了有因角度未大於臨界角而直接從聚光透鏡側壁出射的光線外，部分的光線則會因為上端界面的全反射而反射向下，這一類的光線再次行

進至聚光透鏡側壁時由於相對於此界面入射角度小於臨界角，故也會直接穿透而造成所想要的向上聚光量降低。

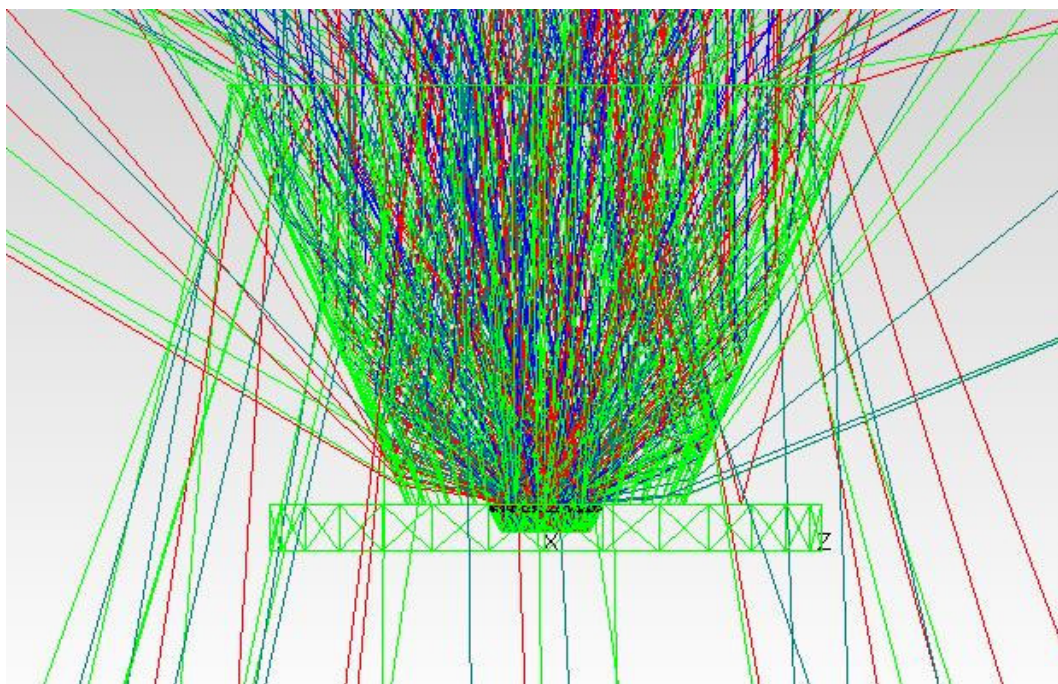
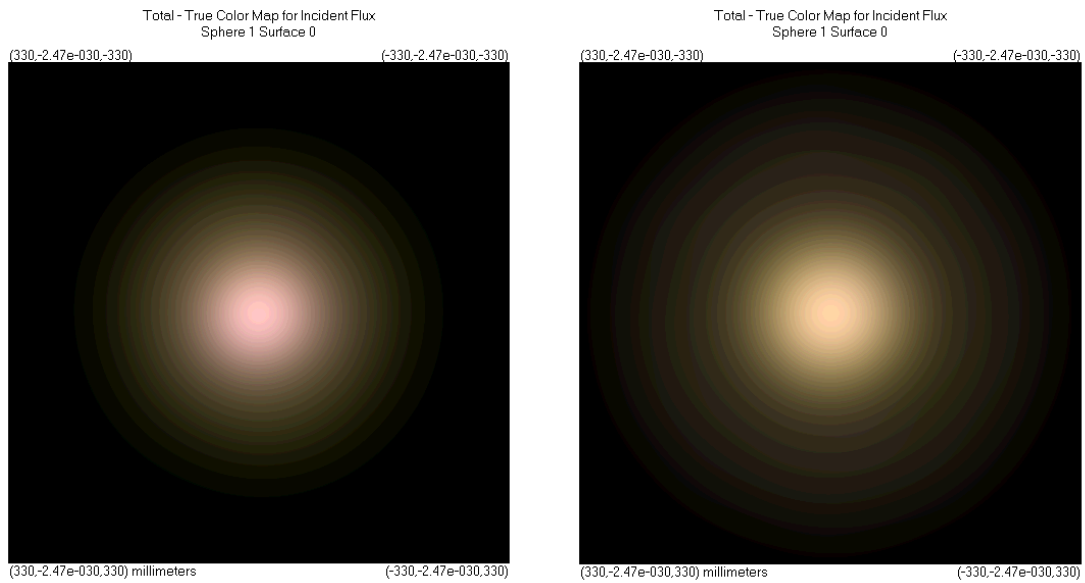


圖 4-29 TracePro 含聚光透鏡 LED 模組光線追跡圖

反射杯或聚光鏡除了具有增大最大中心光強度的功用外，經由聚光過後的 LED 模組理論上其色均勻性應也能同時獲得改善。圖 4-30 為能獲得最大單位立體角光強度的反射杯以及聚光鏡的模擬光色圖，而圖 4-31 則用應用 4.4 節於 TracePro 中設計的偵測面所計算各個角度藍光與黃光強度比，在此圖中我們仍同時保留未加反射杯或聚光鏡前，另外兩種螢光粉塗佈方式所獲得的結果以方便比較。由於在具有反射杯或聚光鏡後大角度(大於 55 度)的光強度都不高，因此若不考慮大角度的範圍來觀察圖 4-31 我們可發現兩種聚光模式在使用螢光粉遠離塗佈的方法時能獲得色均勻性顯著的提升的現象。尤其是採用具光透鏡的 LED 模組，其各角度的藍光比黃光強度的比例和相對色溫 6500K 的參考線比較起來重疊性甚至比螢光粉塗佈於晶片上更高，意味可獲得的色均勻性還要更好。



(a) 具反射聚光杯 LED 模組光色圖

(b) 具聚光透鏡 LED 模組光色圖

圖 4-30 TracePro 模擬具反射聚光杯或聚光透鏡 LED 模組仿真光照圖

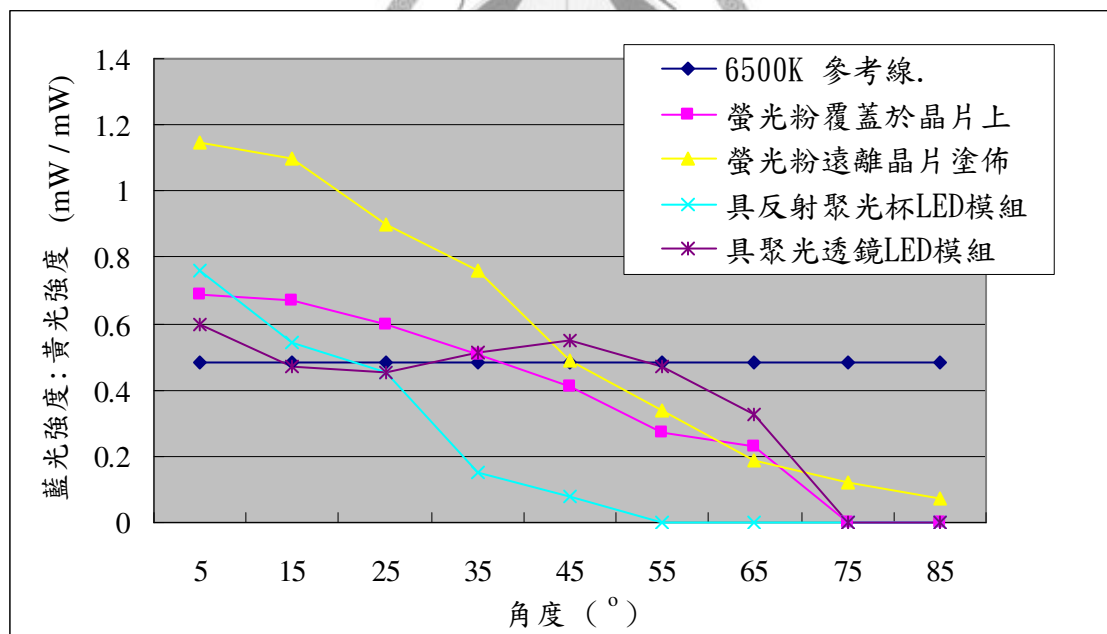


圖 4-31 具反射聚光杯或聚光透鏡 LED 光均勻性比較圖

4.7 本章小結

本章主要探討了如何藉由改善 LED 模組的外在封裝的方式，加以增進整體 LED 模組之光取出效率，或是藉由二次光學來提升單位立體角光強度值，並同時探討各式封裝形式時的光均勻性。在光取出效率的提升方面藉由 TracePro 光學軟體模擬分析不同形式凹杯，搭配不同形式螢光粉塗佈方式，加上不同曲率取光鏡時整體 LED 模組的光取出效率；而在提升單位立體角光強度則是設計並比較了反射杯以及聚光透鏡兩種方式所能獲得的結果。

在不同螢光粉塗佈方式的模擬及實作實驗中，研究結果顯示無論採用何種凹杯形式，螢光粉遠離晶片的塗佈形式都可有效增進整體 LED 模組的光學取出率。這是由於當螢光粉遠離晶片塗佈時可有效減少螢光粉發出的光及被螢光粉散射的藍光被 LED 晶片再吸收的量。

在藍光 LED 模組的模擬中，當採用較大的凹杯模組時，藍光晶片可近似於一點光源，在此前提下設計接近半圓、且曲率中心位置正好為晶片所在的取光鏡可獲得較大的光學取出提升率。但當採用較小的凹杯模組時，必須實際考慮藍光晶片為一面光源來設計取光鏡。本模擬中的五種取光鏡形式以取光鏡高度為 2/5 凹杯上半徑時，有最高的光取出率值。

在白光 LED 模組的模擬中，取光鏡所提升的藍光及黃光比例不同造成了相對色溫值的偏移。而藉由調整螢光粉濃度可控制最終相對色溫值，並控制其為 $6500\text{K} \pm 150\text{K}$ 。在眾多 LED 模組形式裡，擁有最佳光取出效率的組合為利用上直徑 4.2 mm、下直徑 3.2 mm、深度 1 mm 形式的凹杯，搭配上螢光粉遠離晶片塗佈的技術、再加上半圓取光鏡的 LED 模組。根據模擬結果預計可讓裸片發光強度為 170 mW 的藍光晶片經由封裝過後發出 173.27 mW、相對色溫為 6500K 的白光，此換算出的流明值則約為 54 流明。

在色均勻性的研究方面，螢光粉覆蓋於晶片上的塗佈方式所獲得的色均勻性優於螢光粉遠離塗佈方式。藉由再改變遠離塗佈螢光粉的分布可略為改善色均勻性，但其能改善的程度有限，在我們嘗試的不同遠離塗佈分布形式中所有最終的色均勻性結果仍不如螢光粉覆蓋於晶片上來得佳。

常見提升單位立體角光強度值的方法分為在基本 LED 模組再加上反射杯或聚光透鏡。藉由模擬我們分別得到能獲得較高單位立體角光強度的反射杯形式為反

射面斜率為 3，高為 15mm，下底直徑為 10 mm 的反射杯。其能達成的中心單位立體角光強度為未加反射杯 LED 模組的 6.36 倍，不過此時由於反射面所造成的光通亮損耗則為 6.33%；改良式的聚光透鏡利用全反射原理可降低光損而獲得較高的總光通量值，在模擬中所能達到的最大中心單位立體角光強度為沒有聚光透鏡 LED 模組的 5.27 倍。所以較反射杯形式倍率較低的原因在於利用全反射原理僅能反射入射角度大於臨界角度的光束。而比較兩者的光均勻性，採用聚光透鏡的 LED 模組其色均勻性優於採用反射杯的 LED 模組。



第五章 結論與未來展望

5.1 結論

LED 有極大的潛力與機會取代現有的照明設備而成為未來照明的主流。發展的一大關鍵便在於其發光效率能否如預期般大幅超越現有的照明設備。本論文主要以模擬的方式探討何種 LED 外在封裝的形式能進一步的增進 LED 的發光效率或單位立體角強度。

在多種利用 LED 晶片混成白光的方法中，目前以利用藍光晶片搭配 YAG:Ce 螢光粉所能獲得的發光效率最高。本論文從研究這種形式的 LED 模組切入，先於第三章中，成功的於 TracePro 軟體中建立了 YAG:Ce 螢光粉的散射模型與光波長轉換機制模型。搭配上由實驗量測或文獻上查得的其餘高功率 LED 模組的參數資料，我們完整的建立了此種高功率 LED 的模擬模型，便可藉由模擬推測各種不同封裝形式 LED 模組的光學特性。

在第四章中，我們模擬了高功率 LED 晶片在各種不同封裝形式下所獲得的光學性質。所謂不同封裝形式包含改變鋁基板凹杯的形狀，不同的螢光粉的塗佈方式以及各種形狀的取光鏡、反射杯或聚光透鏡。而所關心的光學性質則為 LED 模組的總光通量值、單位立體角光強度值以及光均勻性。總和所有結果分析可總結幾點結論：

螢光粉的塗佈方式同時對於總光通量值及光均勻性均有影響，且其間有相互競爭的關係。採用螢光粉遠離塗佈可獲得較高的總光通量值，但卻會犧牲光均勻性，反之採用螢光粉塗佈於晶片表面的方式光均勻性較佳，但犧牲了部份的光通量值。

比較利用反射杯及聚光透鏡兩種聚光方式：利用反射杯可獲得更高的單位立體角光強度值，但卻同時會有較高的光損耗造成較低的總光通量；而利用聚光透鏡可在光損耗很小(小於 2%)的情況下達成聚光的目的，但能達成的單位立體角光強度值小於利用反射杯形式聚光所能達成的值。

利用反射杯或聚光透鏡聚光的同時也能改善光均勻性，而聚光透鏡改善色均勻性的程度較反射杯形式為佳。

5.2 未來展望

本論文已成功於 TracePro 內建立以藍光 LED 晶片搭配 YAG:Ce 螢光粉的白光 LED 模型，並可預測以這種形式為基本的 LED 模組在眾多封裝形式搭配後的光學特性。這種只利用藍光晶片配合單一 YAG:Ce 螢光粉的缺點在於其缺少紅色波段頻譜的光源，使其在演色性方面的表現僅能達到約 70 的數值，此外由於這種塗佈技術為日本日亞化學的專利[34]，故使其在實際生產或應用時會有諸多限制。在未來我們期望可以於 TracePro 內建立更多不同種類螢光粉的模型，應用多種不同種類螢光粉於同一 LED 模組可有效提升所發白光的演色性[35]。未來期望能利用模擬的方式來預測多種螢光粉的 LED 模組在搭配不同封裝形式時的光學特性，藉此找出同時具有高光效率及高光演色性的 LED 封裝模組。

根據本論文實作和模擬的結果，以及眾多的文獻中都證實了在高功率 LED 中採用螢光粉遠離晶片塗佈的方式能明顯有效提升整體 LED 模組的光取出效率，其原因在於目前 LED 晶片對於外來光線的等效反射率低於周遭固晶金屬基板的緣故。但現今隨著 LED 晶片本身光學取出效率不斷的提高的同時，其對於外來光線的等效反射率應該同時也有顯著的提升。我們期望未來的 LED 晶片對於外來光線的等效反射率能提升至和週遭的固晶金屬相同甚至更高的程度，此時根據初步的模擬結果，我們預測在這樣的條件時反而會變成螢光粉覆蓋於晶片表面能獲得較高的光學取出效率，且同時能避開螢光粉遠離晶片塗佈所造成的光均勻性較差的問題。

參考文獻

- [1] N. Narendran, “Improved Performance White LED,” *5th International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE*, **5941**, 45, Bellingham (2005)
- [2] S. Nakamura and G. Fasol, “The Blue Laser Diodes, GaN Based Light Emitter and Lasers,” 216-221, Springer, Berlin (1997)
- [3] A. Zauskas, F. Ivanauskas, R. Vaicekauskas, M. S. Shur and R. Gaska, “Optimization of multichip white solid state lighting source with four or more LEDs,” *Proceedings of SPIE*, **4445**, 148 (2001)
- [4] Y. Simizu, K. Sakano, Y. Niguchi and T. Moriguchi, “Light Emitting Device Having a Nitride Compound Semiconductor and A Phosphor Containing a Garnet Fluorescent Material,” *United States Patent*, US 5998925, Dec. 7 (1999)
- [5] A. Zukauskas, M. S. Shur and R. Caska, “Introduction to Solid-State Lighting”, Wiley, New York (2002).
- [6] S. Nakamura and G. Fasol, “The Blue laser Diodes”, Springer Heideberg (1997)
- [7] E. Fred Schubert, “Light-Emitting Diodes”, **2nd version**, Cambridge (2006)
- [8] Yun F., Reshchikov M. A., He L., King T., Morkoc H., Novak S.W., and Wei L. “Energy band bowing parameter in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys” *J. Appl. Phys.* **92**, 4837 (2002)
- [9] Wu J., Walukiewicz W., Yu K. M., Ager J.W., Haller E. E., Lu H., and Schaff W. J. “Small band gap bowing in $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ alloys” *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4741 (2002)
- [10] Siozade L., Leymarie J., Disseix P., Vasson A., Mihailovic M., Grandjean N., Leroux M., and Massies J. “Modelling of thermally detected optical absorption and luminescence of $(\text{In,Ga})\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures” *Solid State Commun.* **115**, 575 (2000)
- [11] Shigeo Shionoya, William H. Yen, “Phosphor Handbook”, CRC-Press (1998)
- [12] J. K. Sheu, et al., “White-light emission from InGaN-GaN multiquantum well light-emitting diodes with Si and Zn codoped active well layer”, *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, **14**, No.4, 450 (2002)
- [13] 石景仁, “白光發光二極體用之鈹鋁石榴石螢光粉合成與特性”, pp.3 (2001)
- [14] J.A. DeLuca, “An Introduction to Luminescence in Inorganic Solids”, *J. Chem. Educ.* **57**, 8, 541 (1980)
- [15] Chhajed S., Xi Y., Li Y.-L., Gessmann Th., and Schubert E. F., “Influence of

- Junction Temperature on Chromaticity and Color-Rendering Properties of Trichromatic White-Light Sources Based on Light-Emitting Diodes”, *J. Appl. Phys.* **97**, 054506 (2005)
- [16] Barton D. L., Osinski M., Perlin P., Helms C. J., and Berg N. H., “Life Tests and Failure Mechanisms of GaN/AlGaIn/InGaIn Light-Emitting Diodes”, *Proc. SPIE* **3279**, 17 (1998)
- [17] Silicone and Epoxy data are available at <http://www.dowcorning.com/LED>
- [18] S. Muthu, F. J. P. Schuurmans, and M. D. Pashley, “Red, Green, and Blue LEDs for white light illumination,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 333 (2002)
- [19] T. F. McNulty, D. D. Doxsee and J. W. Rose, “UV reflector and UV-Based Light Source Having Reduced UV Radiation Leakage Incorporating the same”, *United States Patent*, US 6686676 B2 (2004)
- [20] R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, M. R. Krames, and T. Trottier, “High-Power Phosphor-Converted Light-Emitting Diodes Based on III-Nitrides,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 339 (2002)
- [21] Reuven Y. Rubinstein, “Simulation and the Monte Carlo Method”, **1st edition**, John Wiley & Sons, Inc. (1981)
- [22] The index of refraction and of aluminum is available at <http://www.luxpop.com/>
- [23] J. K. Kim, T. Gessmann, H. Luo, and E. F. Schubert, “GaInN Light-Emitting Diodes with RuO₂/SiO₂/Ag Omni-Directional Reflector”, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 22 (2004).
- [24] Luo H., Kim J. K., Schubert E. F., Cho J., Sone C., and Park Y., “Analysis of High-Power Packages for Phosphor-Based White Light-Emitting Diodes” , *Appl. Phys. Lett.* **86**, 243505 (2005)
- [25] Kim J. K., Luo H., Schubert E. F., Cho J., Sone C., and Park Y., “Strongly Enhanced Phosphor Efficiency in GaInN White Light-Emitting Diodes Using Remote Phosphor Configuration and Diffuse Reflector Cup” , *Jpn. J. Appl. Phys. – Express Lett.* **44**, L 649 (2005)
- [26] TracePro Tutorial, “Fluorescence Example”, Lambda Research Inc (2007)
- [27] Zhu, Y., N. Narendran, and Y. Gu. “Investigation of the optical properties of YAG:Ce phosphor”, *Sixth International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE.* **6337**, 63370S (2006)

- [28] L.G. Henyey, J.L. Greenstein, “Diffuse radiation in the galaxy”, *Astrophysical J.* **93**, 70 (1941)
- [29] LightTool Tutorial, “Modeling Phosphors in LightTools”, Optical Research Associates
- [30] 康敦彥, “螢光粉型白光發光二極體之模型建構與最佳設計”, 國立台灣大學應力所 碩士論文 (2006)
- [31] R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, and M. R. Krames, “Phosphor materials and combinations for IlluminationGrade white pcLED”, *Proc. SPIE* **5187**, 115–122 (2003).
- [32] Narendran, N., Y. Gu, J.P. Freyssinier-Nova, and Y. Zhu. “Extracting phosphor-scattered photons to improve white LED efficiency.” *phys. stat. solidi (a)* **202 (6)**, R60-R62 (2005)
- [33] M. R. Krames, et al., “High-Power III-Nitride Emitters for Solid-State Lighting”, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **192**, No.2, 237 (2002)
- [34] Y. Simizu, K. Sakano, Y. Niguchi and T. Moriguchi, “Light Emitting Device Having a Nitride Compound Semiconductor and A Phosphor Containing a Garnet Fluorescent Material,” *United States Patent*, US 5998925 (1999)
- [35] A. A. Stelur, A. M. Srivastava, H. A. Comanzo and D. D. Doxsee, “Phosphor Blends for Generating White Light from Near-UV/Blue Light-Emitting Devices,” *United States Patent*, US 6685852 B2 (2004)