

# 國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩 士 論 文

全周型 LED 球泡燈二次光學之設計

The Secondary Optics Lens Design for  
Omni-directional LED Lamp

研 究 生：魏紹華

指 導 教 授：徐瑞坤 教授

中 華 民 國 一〇二年一月

全周型 LED 球泡燈二次光學之設計  
The Secondary Optics Lens Design for  
Omni-directional LED Lamp

研究生：魏紹華

Student: Shao-Hua Wei

指導教授：徐瑞坤

Advisor: Ray-Quen Hsu

國立交通大學  
工學院精密與自動化工程學程  
碩士論文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Automation and Precision Engineering

College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
In  
Automation and Precision Engineering  
January 2013  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 102 年 1 月

# 全周型LED球泡燈二次光學之設計

研究生：魏紹華

指導教授：徐瑞坤教授

國立交通大學工學院精密與自動化工程學程

## 摘 要

目前常見的 LED 球泡燈，受限於 LED 平面發光的特性，把 LED 以平面排列組裝在半圓球罩中，點亮後的發光角度會在 180 度以內，無法符合能源之星規範定義的球泡燈的全周型光形。為了改善目前常見球泡燈的光形，本文提出採用二次光學的全反射透鏡(TIR lens)，把平面發光的 LED 光形，透過特殊的 TIR lens 導光以改變光形，得到滿足能源之星的全周型光形規範。本文先從 LED 球泡燈的發展現況進行整理，接著搜尋相關大角度的透鏡專利，提出不同於相關專利的 TIR 透鏡的外形，再規劃光學模擬的設計流程，設計出有別於現有專利的新型全周型二次光學透鏡，接著以 CNC 製作透鏡樣品，把透鏡樣品與其他球泡燈零件組裝成球泡燈成品，量測燈具的遠場光形，量測結果的遠場光形接近全周型標準，發光角度範圍達到 280 度、135 度至 180 度之間流明值為總流明的 6% 以上，而 135 度至 -135 度之間的光強分佈有超過一半的量測點符合全周型的均勻度標準規範，其餘量測點則落在規範的邊緣，實際量測結果與模擬結果的差異相近，與現有市面上的 LED 球泡燈比較，本文 LED 球泡燈的優點是具有更大的發光角度範圍、能夠照亮球泡燈下方的區域。

關鍵詞：發光二極體、二次光學透鏡、全周型球泡燈。

# The Secondary Optics Lens Design for Omni-directional LED Lamp

Student: Shao-Hua Wei

Advisor: Professor Ray-Quen Hsu

Degree program of Automation and Precision Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The common LED lamps presented in the commercial retailers generally emit the ray in the 180 degree range. The light distribution is produced from that LEDs with planar emitting characteristic are placed inside a semi-sphere cover. This distributional angle that is less than 180 degree can not meet the standard of an omni-directional lamp of Energy Star specification. In order to improve the light distribution of the previous mentioned LED lamps, this thesis proposed using a secondary optics lens, total internal reflection (TIR) lens, to change LED light distribution. Throughout the technique of TIR lens, light can be guided forward specific directions that can meet Energy Star specification. This thesis began with the current state of development of the LED lamp. Then we searched relative lens patents about large angle applications. Compared with these patents, we proposed a specific TIR lens profile different from the searched patents. Based the TIR lens profile, we revised the TIR lens profile by optics simulation analysis until the light distribution met the standard of omni-directional lamp. The designed model was sent to a CNC factory to manufacture a plastic mock-up sample. We assembled the mock-up lens and the other parts for a LED lamp. The LED lamp was measured by a goniophotometer device. The measured result of the far-field light distribution is approximate to the standard of omni-directional lamp. The active beam angle reaches 280 degree. The lumen between 135 and 180 degree is more than 6 percent of the total lumen. The measured points between 135 and -135 degree are more than half that satisfy the required uniformity of the standard of omni-directional lamp. The others are slight out of the range of standard. The difference between simulation result and measured one is close. Compared with the LED lamp presented in commercial retailers, the LED lamp designed in the thesis has the advantage of larger beam angle that can light the area below a LED lamp.

Keywords: LED, secondary optics lens, the omni-directional lamp.

## 誌謝

首先，衷心感謝指導教授徐瑞坤老師的辛苦指導，在他的教誨與栽培之下，讓我對於學習態度與研究方法受益良多，在此致上最誠摯的謝意。

感謝論文口試委員洪景華教授與陳仁浩教授對於本論文的指正與教導，讓我能夠瞭解本論文不完善之處，並進一步去更正內容，使本論文更加完整。

在學期間感謝各位同學們涂材宏、鄭康威、邱冠諭、黃志順、關坤男、羅旭剛，還有那些曾經幫助過我的人，在求學過程中相互協助與鼓勵，讓我能持之以恆完成本論文研究，祝福各位在學界與業界發展順利。

最後，感謝家人在我就學期間，給予精神上支持與關心，讓我無後顧之憂地完成研究，在此致上最深的謝意。

# 目錄

	頁次
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
第一章、緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究動機與目的.....	3
第二章、文獻回顧.....	8
2-1 產業現況以及相關文獻檢索.....	8
2-2 國內二次光學相關學術文獻.....	11
2-3 光學基本理論.....	13
2-4 LED 球泡燈介紹.....	20
2-5 美國能源之星的全周型簡介.....	23
第三章、研究內容與方法.....	26
3-1 設計流程.....	26

3-2 光源檔、接受器與散熱座建立 .....	28
3-3 二次光學透鏡光學設計 .....	33
3-3-1 二次光學透鏡的設計概念 .....	34
3-3-2 二次光學透鏡的概念實體建立 .....	37
3-3-3 二次光學透鏡光學設計過程 .....	41
3-3-4 二次光學透鏡光學設計結果分析 .....	47
3-4 設計結果與現有專利比較 .....	51
3-5 設計結果小結 .....	52
第四章、實驗結果與討論 .....	54
4-1 透鏡、散熱座、球泡燈實做 .....	54
4-2 光強度分佈量測條件 .....	58
4-3 實驗結果 .....	62
4-3-1 切面一的實驗結果 .....	63
4-3-2 切面二的實驗結果 .....	64
4-4 球泡燈實品視覺品味比較 .....	66
4-5 實驗結果討論 .....	69
4-5-1 光強度峰值的形成原因 .....	69
4-5-2 去除光強度峰值與設計結果的比較 .....	72
4-5-3 實驗結果誤差討論 .....	73

第五章、結論.....	75
5-1 結論.....	75
5-2 未來展望.....	77
參考文獻.....	79
附錄.....	82



## 表目錄

頁次

表 1.1 各種常見光源的發光效率比較表 <sup>[2]</sup> .....	2
表 2.1 國內廠商的 LED 球泡燈產品的比較表 .....	23
表 3.1 設計概念的構想流程 .....	36
表 3.2 設計結果表 .....	53
表 3.3 本論文透鏡與專利檢索的比較表 .....	53
表 4.1 光強度量測的條件表 .....	60
表 4.2 球泡燈實品點亮比較表 .....	69



# 圖目錄

頁次

圖 1.1 Nichia NS9W383T LED 規格 <sup>[1]</sup> .....	1
圖 1.2 Cree 的二次光學透鏡式的全周型的 LED 球泡燈 .....	7
圖 1.3 Cree 的二次光學透鏡與燈泡殼 .....	7
圖 2.1 Teledyne Lighting and Display Products, Inc. 的二次光學透 鏡專利圖 <sup>[5]</sup> .....	9
圖 2.2 綠明科技股份有限公司的二次光學透鏡專利圖 <sup>[6]</sup> .....	9
圖 2.3 美商露明光學公司的二次光學透鏡專利圖 <sup>[7]</sup> .....	10
圖 2.4 CREE, Inc. 的 Remote phosphor 專利圖 <sup>[8]</sup> .....	10
圖 2.5 旭燦光電股份有限公司的 LED 立體封裝專利圖 <sup>[9]</sup> .....	10
圖 2.6 折射現象示意圖 .....	16
圖 2.7 內部全反射示意圖 .....	17
圖 2.8 反射率與入射角關係圖 .....	17
圖 2.9 鏡面反射現象示意圖 .....	18
圖 2.10 非完全鏡向的反射示意圖 .....	19
圖 2.11 Lambertion 型態的反射 .....	20
圖 2.12 Gaussian 型態的反射 .....	20
圖 2.13 美國能源之星的全周型規範 <sup>[22]</sup> .....	25

圖 3.1 設計流程圖.....	27
圖 3.2 Nichia NS9W153AM-H3 SMD LED.....	29
圖 3.3 使用 Ray Source 的功能鍵的圖示.....	29
圖 3.4 開啟影像光源資料檔的圖示.....	30
圖 3.5 LED 光源檔的圖示.....	30
圖 3.6 匯入虛擬光線的圖示.....	31
圖 3.7 接受器的圖示.....	32
圖 3.8 散熱座的圖示.....	32
圖 3.9 透鏡的草圖輪廓圖.....	37
圖 3.10 透鏡的切面圖示.....	38
圖 3.11 光學模型軟體與 Solidwork 的聯結功能圖示.....	38
圖 3.12 光學件圖示.....	39
圖 3.13 透鏡的上半部的光線行為圖.....	40
圖 3.14 透鏡的下半部的光線行為圖.....	41
圖 3.15 不規則曲線中央的位置控制點往上移動的草圖輪廓圖.....	42
圖 3.16 透鏡的上半部傾向折射的光線行為圖.....	43
圖 3.17 透鏡的上半部傾向折射的光強度分佈圖.....	43
圖 3.18 不規則曲線中央的位置控制點往下移動的草圖輪廓圖.....	44
圖 3.19 透鏡的上半部傾向全反射的光線行為圖.....	44

圖 3.20	透鏡的上半部傾向全反射的光強度分佈圖.....	45
圖 3.21	設計完成的透鏡的草圖輪廓圖.....	46
圖 3.22	設計完成的光線行為圖.....	46
圖 3.23	設計完成的光強度分佈圖.....	47
圖 3.24	水平切面的光強度分佈的角度範圍分析.....	48
圖 3.25	水平切面的光強度分佈的均勻度分析.....	49
圖 3.26	45 度切面的光強度分佈的角度範圍分析.....	50
圖 3.27	45 度切面的光強度分佈的均勻度分析.....	51
圖 3.28	設計結果與現有專利比較圖示.....	52
圖 4.1	透鏡重點尺寸圖.....	56
圖 4.2	mockup 製作流程圖.....	57
圖 4.3	燈具成品圖.....	58
圖 4.4	量測儀器的旋轉台.....	61
圖 4.5	量測儀器的接受器.....	61
圖 4.6	燈具置於儀器的夾具上.....	62
圖 4.7	儀器的量測範圍.....	62
圖 4.8	光形量測結果的切面一的極座標圖.....	63
圖 4.9	光強度分佈量測結果的剖面一的卡氏座標圖.....	64
圖 4.10	光形量測結果的剖面二的極座標圖.....	65

圖 4.11 光強度分佈量測結果的剖面二的卡氏座標圖 .....	66
圖 4.12 本論文設計的 LED 球泡燈實品的點亮圖 .....	67
圖 4.13 市面上現有的非全周型的 LED 球泡燈實品的點亮圖 .....	68
圖 4.14 量測結果的峰值圖 .....	71
圖 4.15 設計光路圖 .....	71
圖 4.16 曲率變化圖 .....	72
圖 4.17 去除光形峰值的量測結果與模擬設計的光強度分佈圖比較 .	73



# 第一章、緒論

## 1-1 前言

高功率 LED 的發光效率已超過每瓦 100 流明，舉如 LED 國際大廠-Nichia 的高功率 NS9W383T LED<sup>[1]</sup>，在輸入電流 350mA、電壓 2.9V 的情況下，發光效率已達 148 lm/W，發光演色性大於 60，相關規格值如圖 1.1；發光效率 150 lm/W 是具有光源指標性的意義，從表 1.1 的常見光源的發光效率比較表可看出，LED 已接近發光效率 150 lm/W、演色性 30 的低壓 HID 燈，並可預期在 2013 年，LED 發光效率可輕易跨過 150 lm/W，此光學性能代表著 LED 的發光效率與演色性足以超越絕多數的發光源種類，成為照明燈具應用的新光源主要選項之一。諸多傳統照明燈具應用 LED 光源時，會面臨到需要因應 LED 光源特性而重新設計，LED 元件最快會取代的照明產品項目，就是用 LED 球泡燈取代傳統白熾燈，進一步取代節能燈。

項目	記号	条件	標準	最大	单位
順電圧	$V_F$	$I_F=350\text{mA}$	2.9	-	V
Rnn ランク	光束	$\Phi_v$	$I_F=350\text{mA}$	151	lm
	光度	$I_v$	$I_F=350\text{mA}$	42	cd
	演色性	$R_a$	$I_F=350\text{mA}$	-	-
R70 ランク	光束	$\Phi_v$	$I_F=350\text{mA}$	145	lm
	光度	$I_v$	$I_F=350\text{mA}$	41	cd
	演色性	$R_a$	$I_F=350\text{mA}$	75	-
色度座標	x	-	$I_F=350\text{mA}$	0.344	-
	y	-	$I_F=350\text{mA}$	0.355	-
熱抵抗	$R_{\theta JS}$	-	6	9	°C/W

圖 1.1 Nichia NS9W383T LED 規格<sup>[1]</sup>

表 1.1 各種常見光源的發光效率比較表<sup>[2]</sup>

光源	lm/Watt	光源	lm/Watt
LED	60~148	碳弧燈	40~60
鎢絲燈	10~20	鈉光燈	60
鹵素鎢燈	30	超高壓汞燈	60~70
螢光燈	30~60	金屬鹵素放電燈	80
氙燈	40~60	低壓 HID 燈	150

資料來源：相關資料取自文獻<sup>[2]</sup>，本文重新整理與表列。

LED 具有超越已有光源的優勢，例如：不含汞、節能、發光效率高.....等，但 LED 先天上的發光特性不佳，例如點光源、強指向性和發光角度小，造成選用 LED 作為球泡燈的光源時，LED 以平面式排列，再搭配擴散罩，若無其他配光元件的重新配光，得到的照明效果僅止於 180 度範圍之內，與傳統白熾燈及節能燈得到的照明效果不同。

原本業界期待，此新型燈具已足以取代過去傳統球泡燈，但是，2012 年美國環境保護局(EPA)發佈在美銷售的球泡燈，在 2012 年 4 月以後，要取得能源之星的球泡燈燈具標章，球泡燈必須滿足能源之星發佈的固態照明的 V1.1 的規範，該規範制定 LED 燈相關的電、光、

熱與壽命的要求，其中，光強度分佈部位，制定 LED 球泡燈必須滿足全周型(omni-direction)要求。

在規範未完全定版前，已引起業界多家廠商投入研發，競相研發各種解決方案以期滿足能源之星的規範，相對的，非全周型球泡燈預期在未來數年之內，將會逐步淘汰，在未來，LED 球泡燈可能全面採用全周型，全周型的相關研究在近期仍會熱烈發展中。

## 1-2 研究動機與目的

照明光源的分類，依發光類型可分為熱輻射(如白熾燈)、氣體放電(如螢光燈)、固態物理(如LED).....等，其中白熾燈泡是把鎢絲通電而發熱產生光能，發光色溫約3500~4000K，波長分佈接近太陽光的高演色性光源，加上價格低廉，這些特質是其他光源並無明顯能同時具有的優點；可惜，白熾燈的光效率不高，僅有少部分的總輸入功率能轉換成可見光的能量，其餘為紅外輻射能，以熱傳導及對流交換的方式損失能量；同時因為熱輻射關係，白熾燈泡表面溫度甚高，長時間點亮下，夏天室內冷氣會增加耗電量；白熾燈泡的壽命不長，一般壽命為750~1000小時。

2007年歐盟27國領袖通過一項法案，歐盟、英國、法國、美國、加拿大、義大利、日本、中國，預定逐步汰換白熾燈，預定於2012年逐步禁用白熾燈泡(或無法再進口或製造銷售)<sup>[3]</sup>；在節能潮流的影

響下，LED因具有節能、環保及壽命長的特性，躍身為節能光源的主流；LED發展至今，發光效率已接近150 lm/W，已達到取代省電燈泡的發光效率門檻，衍生出LED球泡燈產品。

LED光源的發光半強角度(full width at half maximum, FWHM)大多落於110度~140度，LED晶片甚小且為平面架構，發光效果接近點光源，以及平面180度內發光；當使用者應用LED至照明產品時，常發現LED的發光角度無法滿足現有的燈具光形要求，因此需要在LED的外側添加光學元件，重新分配LED的光能量並調整LED的發光角度，符合實際應用所需的各種燈具光強度分佈；在LED外側的光學元件，重新分配從LED本身的一次光學元件所發出的光能量，稱為LED二次光學元件(secondary optics component)，依據二次光學元件的光線行為，主要可區分成透鏡式與反射杯式的兩大宗形式。

以往LED照明產品首先重視經濟性，考量設置費用、維護費用、運作費用.....等等，期望以最小的消耗資源，來達到更有效使用能源的目的，但是照明產品不僅提供明亮度，也需創造舒適的光環境，包含視覺上的感受、被照環境的氣氛、光線柔和度、刺眼的眩光程度、被照物與周圍環境的明暗對比度.....等等。

論者觀察市面上現有的LED球泡燈，明顯可輕易觀察到大多數的LED球泡燈具有共通的相似結構，在一般LED的FWHM為120度的情況

下，設置LED在平面的電路基板上，使LED在平面排列而朝法線方向發光，再透過霧面燈殼使光線擴散，但是霧面燈殼無法大幅度增加LED光強角度，造成LED球泡燈的FWHM僅有130度左右，很難與傳統球泡燈的光學效果一樣達到全周型的光強度分佈；非全周型的光強度分佈會造成不適當明暗對比，在LED球泡燈的下方形成不適當的陰影，讓使用者產生視覺上的不舒適感，再與傳統的白熾燈泡相比，非全周型LED球泡燈的照明效果明顯地有別於傳統白熾燈泡。

可符合全周型規範的LED球泡燈可分為：二次光學透鏡式、Remote phosphor式與立體封裝式，三種類型皆能夠達到大角度的光形；二次光學透鏡式的全周型LED球泡燈，市面上仍沒有成熟的產品，各家廠商仍在開發中，相關資訊取得不易，而目前所能取得開發中的產業技術消息是在2012年8月，LED國際大廠Cree發表一款採用二次光學透鏡式的全周型LED球泡燈<sup>[4]</sup>原型(prototype)的技術白皮書，外觀造型如圖1.2、圖1.3，但Cree並沒有推廣，市面上也沒有見到，但Cree其餘發表的成熟產品已在市面上販賣，因此推論Cree採用二次光學透鏡式的全周型LED球泡燈尚未成熟；Remote phosphor LED球泡燈，藍光LED側著擺放在特殊設計的散熱座，LED發出的藍光打在球泡燈外側的螢光粉殼上，藍光激發螢光粉生成黃光後，藍光與黃光經混光而形成暖白光；此白光發光架構與一般白光LED的最大差異在於「非接觸式螢

光粉」，也就是螢光粉末貼附晶片；目前Remote phosphor LED球泡燈的售價仍然很高，2012年Q4的8瓦Remote phosphor LED球泡燈價格仍高於20美金，而相當的一般白光LED球泡燈的售價則低於10美金，兩者價差仍有兩倍以上的距離；立體封裝式LED球泡燈，多顆小功率LED排列在散熱座的周圍，LED朝各方向排列，設計上很直觀，但是多顆LED朝各方向排列，增加焊接的困難度與加工時間；目前Remote phosphor LED球泡燈的售價仍然很高，立體封裝式多顆LED焊接的工時較高，為了改善一般LED球泡燈發光角度過小，並達成美國能源之星的全周型標準規範，再考慮Remote phosphor式與立體封裝式以外的二次光學透鏡式，衍生出本文的研究動機。

本文的研究流程以此研究動機為出發點，接著收集相關的學術論文與相關專利，再迴避其他現有的專利，提出適切的LED球泡燈二次光學透鏡的設計流程，改善市售一般LED球泡燈無法滿足全周型光強度分佈的問題，得到與傳統白熾燈泡接近的照明效果，作為本研究的目的，研究成果可貢獻LED照明產業，作為開發LED球泡燈二次光學透鏡的設計選項。



圖 1.2 Cree 的二次光學透鏡式的全周型的 LED 球泡燈

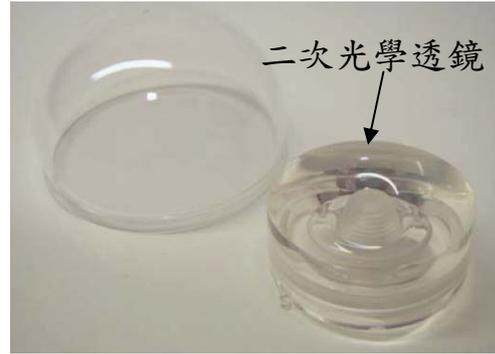


圖 1.3 Cree 的二次光學透鏡與燈泡殼



## 第二章、文獻回顧

### 2-1 產業現況以及相關文獻檢索

在 LED 發明至今，隨著 LED 發光效率大幅提升，逐漸達到取代傳統光源的發光效率時，LED 已快速大量應用在照明產業，由於 LED 的發光特性與傳統光源不同，傳統光源為 360 度大角度範圍發光，而 LED 發光角度在 180 度以內的平面上發光，為發光面積小的點光源且具有強指向性的發光特性，造成 LED 取代傳統燈具時，所得到的發光特性與傳統燈具相差甚大，如何順應 LED 先天的發光特性，並設計開發出與傳統燈具發光效果相似的 LED 燈具，成為研究人員努力的目標。LED 照明燈具採用二次光學透鏡的形式已有不少相關的研究與專利，例如，Teledyne Lighting and Display Products, Inc.<sup>[5]</sup>與綠明科技股份有限公司<sup>[6]</sup>運用二次光學透鏡的全反射特性將 LED 的光能量重新分配成大角度，美商露明光學公司<sup>[7]</sup>運用二次光學透鏡的全反射與折射行為將 LED 的光能量導向側邊發光；而 Remote phosphor 式與立體封裝式也有不少的研究與專利，例如，CREE, Inc.<sup>[8]</sup>置入 Remote phosphor 螢光粉殼在球泡燈中，得到大角度光形的效果，旭燦光電股份有限公司<sup>[9]</sup>使用可撓曲電路板，使焊接在平面的多顆 LED 改變方向，成為朝各方向發光的排列方式，來達到大角度光形；大量的大角度光學專利揭露二次光學結構的外型與光學結果，但是大部分

專利僅發表大角度的光強度分佈，由於未強調光強度分佈的均勻度，不一定能夠符合全周型標準，而使用 Remote phosphor 式與 LED 立體封裝式也存在價格較高與多顆 LED 焊接工時較長的問題，目前市面上尚未有成熟的二次光學透鏡的全周型 LED 球泡燈產生，因此引導出本論文的研究課題。

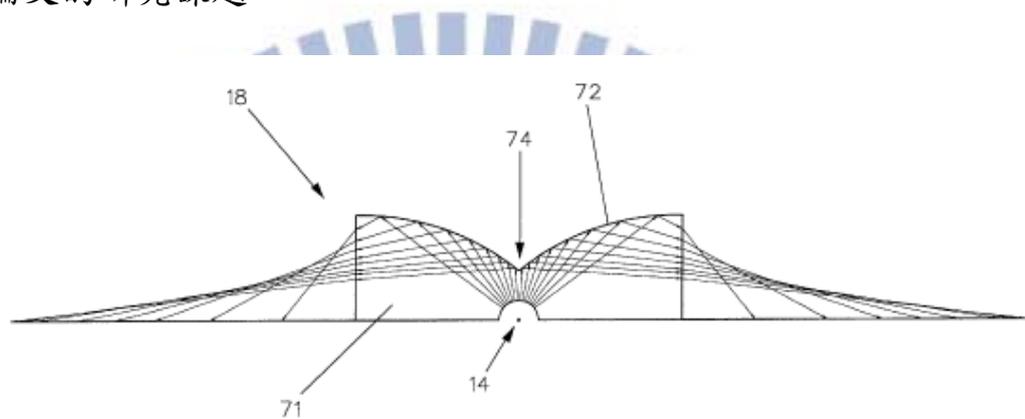


圖 2.1 Teledyne Lighting and Display Products, Inc.的二次光學透鏡

專利圖<sup>[5]</sup>

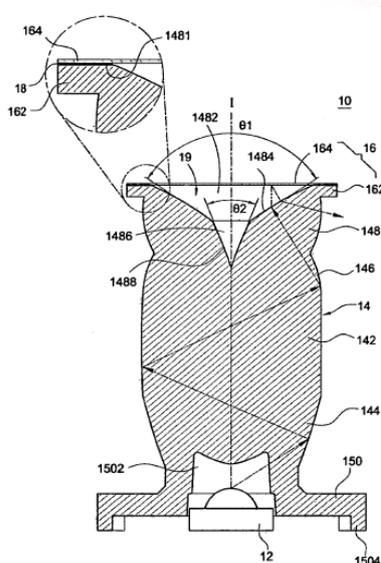


圖 2.2 綠明科技股份有限公司的二次光學透鏡專利圖<sup>[6]</sup>

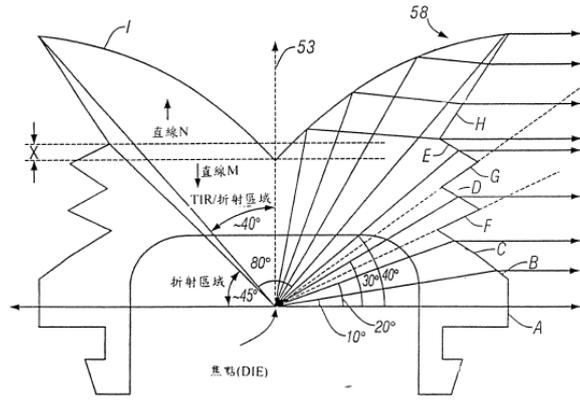


圖 2.3 美商露明光學公司的二次光學透鏡專利圖<sup>[7]</sup>

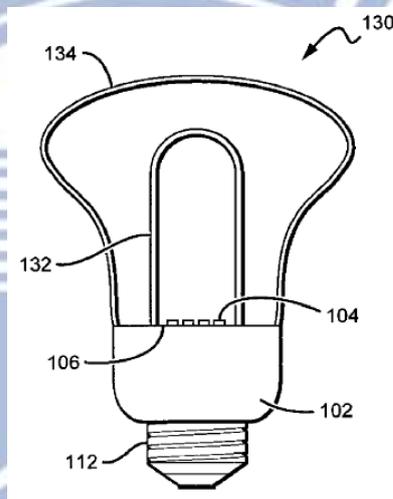


圖 2.4 CREE, Inc.的 Remote phosphor 專利圖<sup>[8]</sup>

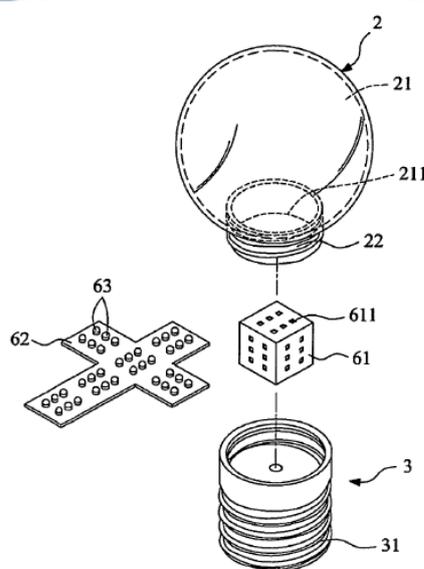


圖 2.5 旭燦光電股份有限公司的 LED 立體封裝專利圖<sup>[9]</sup>

二次光學透鏡相關的國外研究與期刊，主要是關於小角度聚光型與大角度路燈型，例如，Akira Terao 等人<sup>[10]</sup>採用非球面的 Fresnel 薄形化平板狀透鏡，取代體積較大的傳統透鏡，並且改善透鏡的製造性，達到太陽能集光的效果；Mikhail A. Moiseev 等人<sup>[11]</sup>提出當光源的尺寸小於與透鏡內部距離的 5 倍時，光源可近似為點光源，並提出設計透鏡內外部輪廓的計算方式，設計出窄角度的軸旋轉對稱聚光透鏡；Andreas Timinger 等人<sup>[12]</sup>說明 LED 具有壽命長與耗能低的優勢，適合作為路燈的發光元件，並搭配具有自由曲面的透鏡，重新分配 LED 的光能量，在需要照明的範圍路面上，達到所需要的路面照度分佈。

## 2-2 國內二次光學相關學術文獻

針對 TIR lens 二次光學的國內學術研究，主要是在照明類的小角度聚光型與大角度路燈型，以及各種其他應用的特殊角度型，分述如下：

- 小角度聚光型：

聚光型的照明需求，常見於投射燈、嵌燈、高空照明以及遠程照明，由於 LED 的 FWHM 多落於 110~140 度，如何透過設計巧妙的 TIR lens，把光束有效聚集於特定角度範圍之內，這方面的相關研究論文多討論如何有效設計出優良的 TIR lens，舉如劉元欽<sup>[13]</sup>，討論如

何應用田口方法來優化設計 TIR lens 的微結構外形，以建立相關的優化設計方法論；謝秀華<sup>[14]</sup>和劉凱翔<sup>[15]</sup>，則分別探討如何設計出讓 LED 照明經過透鏡，得到準直的光強度分佈的效果；郭政宏<sup>[16]</sup>則討論採用 COB LED 作為光源時，由於 COB LED 光源較常見 PLCC 與陶瓷基板封裝的 LED 的光源來得較大，相對應的二次光學元件的幾何外形，會相較難以收光。

• 大角度路燈型：

LED 光源應用於路燈時，受限於道路照明規範，舉如台灣 CNS-15233，以及考慮最大架置成本(最小化排列盞數)，單純以 LED 作為光源，並無法通過相關的規範以及成本降低；目前絕多數的合格 LED 路燈做法，多採用 TIR lens 透鏡形式完成路燈光強度分佈配光需求；由於路燈光形呈現兩軸至三軸不對稱，相關的路燈透鏡設計方法論仍未完善，延伸出仍有不少著重於路燈透鏡的研究，陳蕙質<sup>[17]</sup>與吳禹賢<sup>[18]</sup>，利用解讀道路規範，並設計出適用於台灣的 LED 路燈透鏡；林昱熙<sup>[19]</sup>，利用理想配光曲線理論作為基礎，進行高均勻性路燈透鏡設計。

• 特殊角度應用型：

LED 二次光學應用除了小角度聚光型與大角度路燈型之外，尚有許多特殊應用的情況，例如王荷正<sup>[20]</sup>利用二次光學透鏡增加 LED 的發光角度範圍，以節省直下式 LED 背光模組的 LED 使用量。

### 2-3 光學基本理論

LED 二次光學的主要感興趣的觀察對象是能量的分佈，光學的能量分佈是立體空間，視各種應用而有不同的描述方式，光學基本理論，應用於非成像光學時，主要是藉由光度學作為能量描述的基礎理論；光度學依據不同的觀察立場，即空間能量、平面能量與方向能量，各對應的光度學單位為光強度(luminous intensity)、光通量(luminous flux)與照度(illuminance)<sup>[21]</sup>，分述如下。

#### 1. 光強度

當要描述特定方向的光能量狀態，光度學定義出光強度值作為比較值，單位為燭光，燭光的定義是「若有一光源在某特定方向，發射出頻率為  $540 \times 10^{12}$  Hz 的單色光，單色光在該方向上的輻射強度值  $1.464 \times 10^{-3}$  w/sr. 時，則該光源在此特定方向上的光度是 1cd」。上述的“sr.”是單位立體角 steradian 的簡稱，是立體角的國際單位，1sr. 代表球面上，某面積等於球體半徑平方的立體角大小。

#### 2. 光通量

發光源放置在空間中，為了具體描述特定立體空間的能量總合，光度學採光通量作為量測模式，單位是流明(lumen, lm)；流明值的高低，能呈現發光源在相同立體空間範圍內的能量高低。流明定義是：「假設有某方向光度值為  $1\text{cd}$  的均勻光源位在半徑 1 單位長度的球心上，在球面上每一單位面積範圍內，接受到輻射通量即 1 流明」。

### 3. 照度

當觀察的對象為某平面的能量分佈，此時適用於的光度單位描述為照度，單位是 lux。照度定義是：「接受面的單位面積上的流明值。假設有某各方向均為  $1\text{cd}$  的點光源位於一半徑一公尺的球心上，則球面上的照度值是  $1\text{lux}$ 。」物體或被照面上，被光源照射所呈現的光亮程度，稱為照度；評量比較照度的大小，常用被照面上單位面積內所接受到由光源投射來的有效光通量來定義。

瞭解用來描述光在空間的總體空間、平面空間與特定方向的能量描述的單位，接著當光線在空間中行進，在光路過程會遇到不同的介質，不同介質有可能是透明體、半透明體與非透明體，在不同介質的交界處，會產生不同的介面，介面會形成「反射」與「散射」來決定光的行進，而介質會以折射率來決定光的折射程度；在非成像光學中，重點是擺在能量的分佈，引用的基礎光學理論，則圍繞在上述的介面與介質的光學物理現象。

光行進時，打到具透明性質的介質時，位在於兩介質的分界面處，有局部的光線行為會呈現反射現象，另外部分的光線則會穿過界面處而進入介質中，呈現折射現象，折射現象會與兩種介質折射率的不同，而有不同的折射角度，如圖 2.6 所示，垂直平面 MM' 上穿過入射點和折射點的線稱為法線 N，若限定入射光束、折射光束與法線在同平面，入射光束與折射光束在分界面法線的兩側，光束在不同介質的傳播速率是不同的，假若光束從光疏介質(折射率低)折射到光密介質(折率高)，光束折射角  $\theta_t$  會小於光束入射角  $\theta_i$ ，相對的，光束從光密介質折射到光疏介質， $\theta_t$  會大於  $\theta_i$ ，該折射光學現象是 1921 年，由荷蘭數學家與物理學家 Snell 提出，稱作 Snell 定律，如下式：

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.1)$$

其中  $n_i$  與  $n_t$  各代表折射前與折射後的介質折射率

觀察光束從光密介質折射入光疏介質，折射角總是大於入射角，當隨著入射角增加時，則相對應的折射角也會增加，當折射角隨著入射角增加而增加至超過 90 度，此時折射角無法折射進光疏介質，而會留在光密介質中，形成了內部全反射(total internal reflection, TIR)現象，如圖 2.7 的光束 e 所示，當折射角度剛好等於 90 度時，如圖 2.7 的光束 d，此時對應的入射角稱作臨界角，把式(2.1)的  $\theta_t$  代入 90 度，經整理後得到臨界角的計算公式：

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

在具透明介質的介面上，通常是反射與折射同時發生，各自的比例，則會與表面粗糙度以及入射角度有關，如圖 2-8 所示，當入射角增加時，相對應的反射比例亦會增加，當在達到某角度時，反射的比例會接近於零，該角度稱作布魯斯特角(Brewster angle)，在大於布魯斯特角之後的入射角度的反射比例會大幅上升。

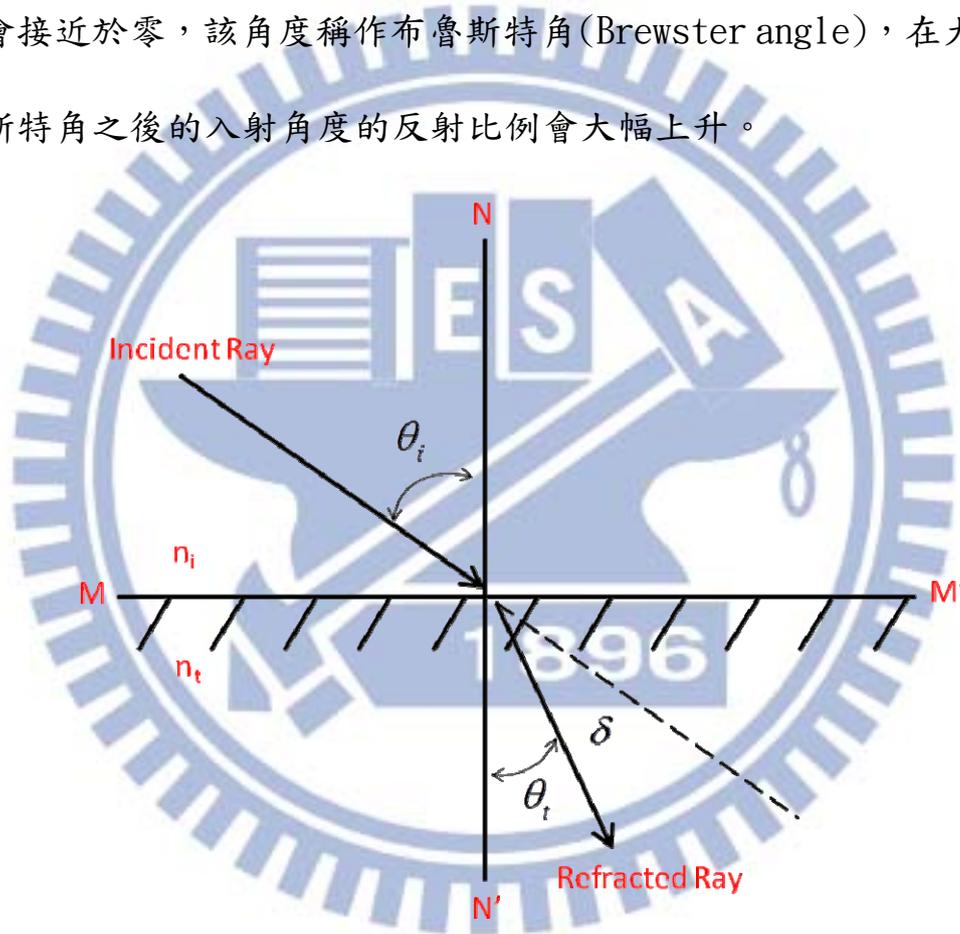


圖 2.6 折射現象示意圖

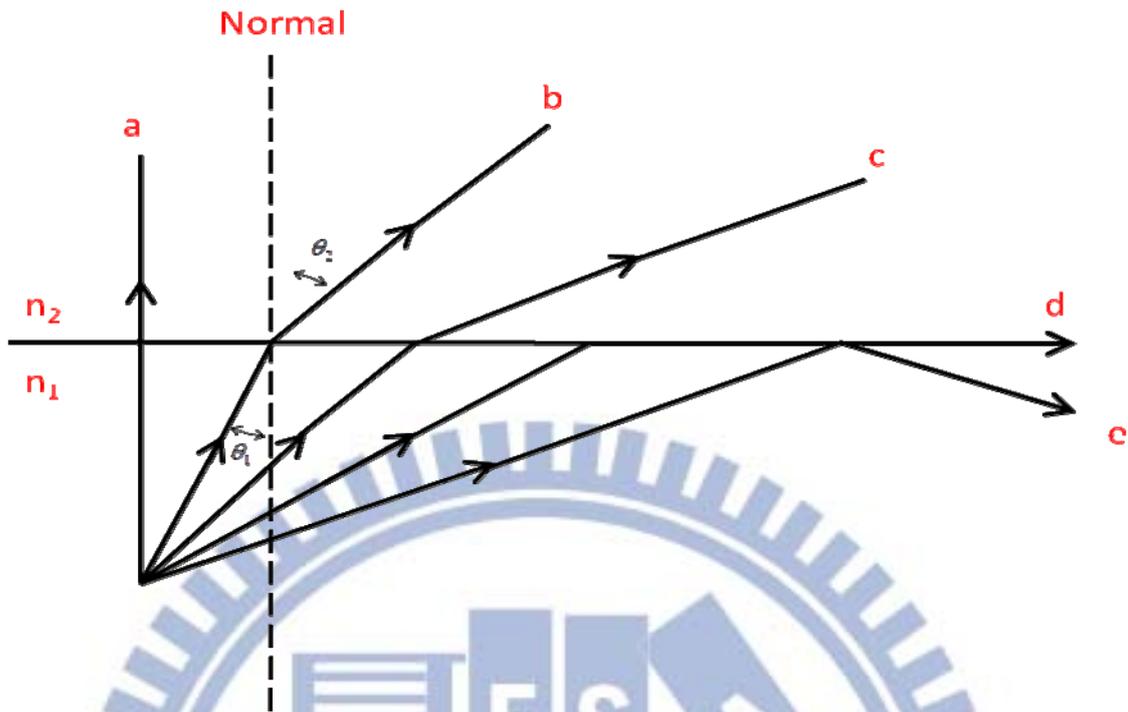


圖 2.7 內部全反射示意圖

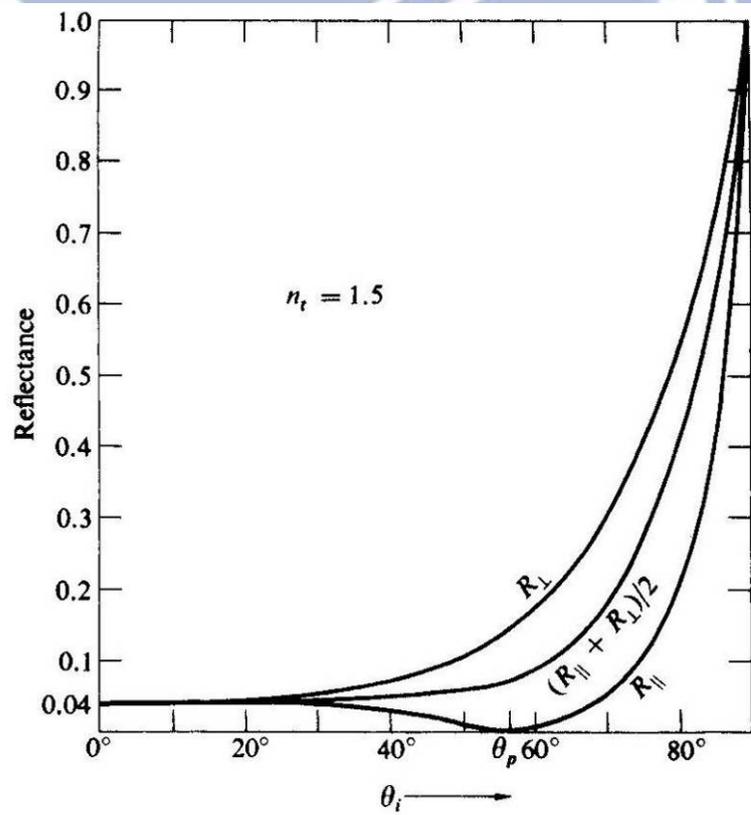


圖 2.8 反射率與入射角關係圖

光束在界面的反射行為，首先從理想鏡射的狀況進行介紹，如圖 2.9 所示，入射光束與反射光束與法線的夾角各為入射角  $\theta_i$ 、反射角  $\theta_r$ ；若限定入射光束、反射光束跟法線在同一個平面，入射光線與反射光線在法線的兩側，若界面平滑狀態為完全鏡面，則入射角  $\theta_i$  與反射角  $\theta_r$  與法線夾角角度會相等，此為反射定律，如式(2.3)

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.3)$$

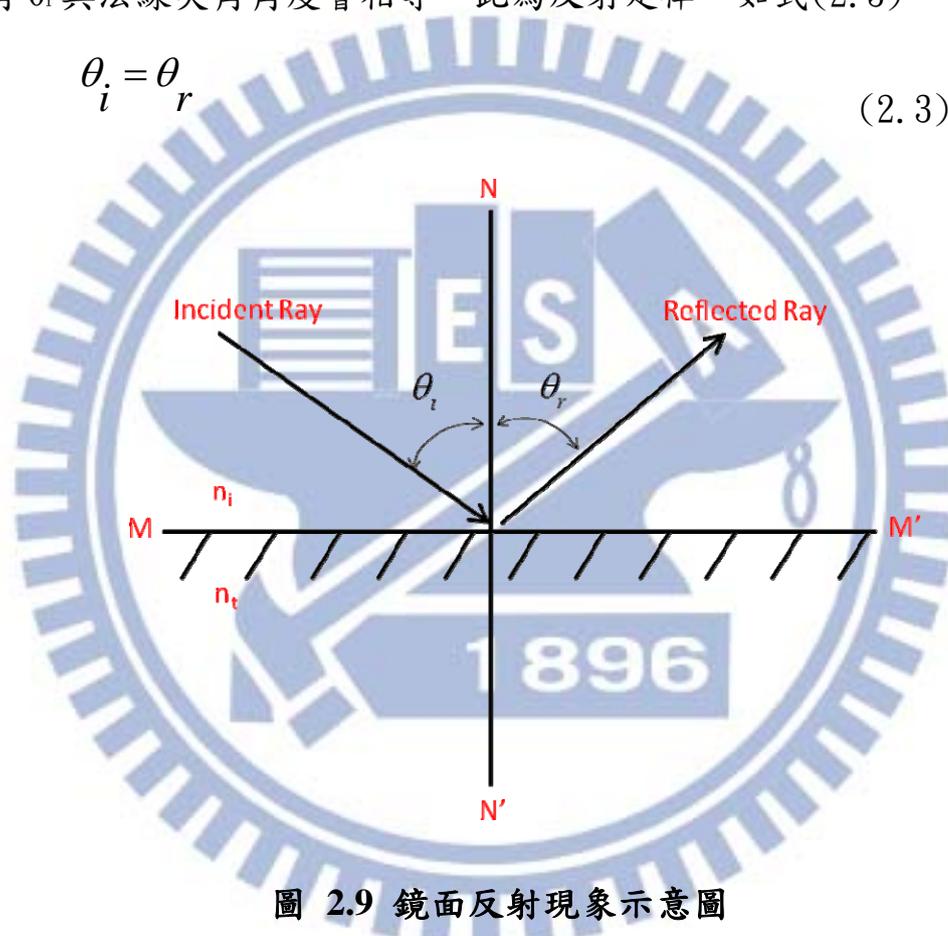


圖 2.9 鏡面反射現象示意圖

反射現象根據介面的表面狀況不同，會細分為鏡射(specular)與散射(diffuse)。鏡射是指在理想平滑表面時，光線依據反射定律進行反射，反射角會以同入射角的夾角方向進行，如圖 2.9 示意。散射是在不同平滑/粗糙程度的表面產生非完全鏡向反射，非完全鏡向反射光線的反射程度會呈現不同的型態，如圖 2-10 所示，如果能量

分佈呈現近圓形型態，稱作 Lambertian 分佈，如圖 2-11 所示，反射的能量會分佈在入射點近圓型方向均勻散射，此散射狀態多應用於白色水泥牆面的粗糙表面。其他非完全鏡向反射的型態，常見還有 Gaussian 分佈，Gaussian 分佈型態是入射光的反射能量會依據高斯公式分佈，如圖 2-12 所示，反射光線具方向性且與入射角度相關，反射後的能量分佈接近高斯分佈的標準差角度，意指高斯分佈的標準差角度越小，則反射的能量分佈範圍越窄小，當 Gaussian 角度接近 0 時，就接近鏡射表面，如式(2.4)。

$$P(\theta) = P_0 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.4)$$

$P(\theta)$  是在  $\theta$  方向的強度或幅射

$P_0$  是在軸向的強度或幅射

$\sigma$  是高斯分佈的標準差，單位：度

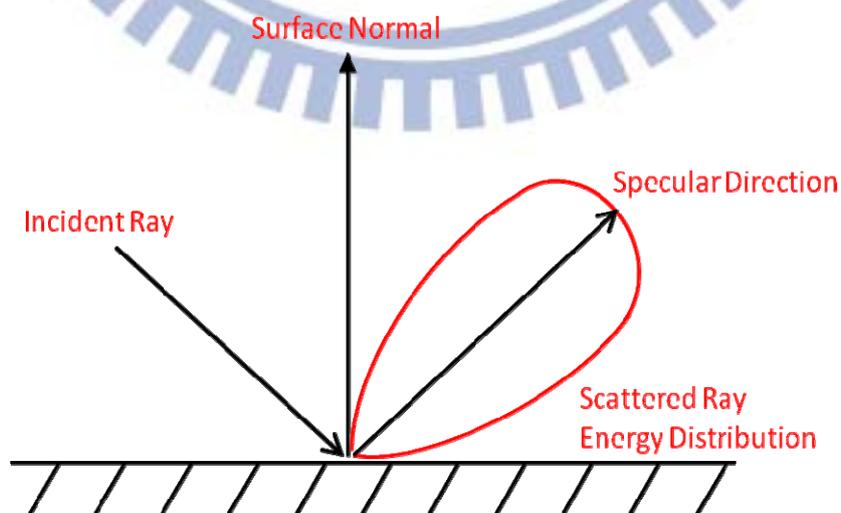


圖 2.10 非完全鏡向的反射示意圖

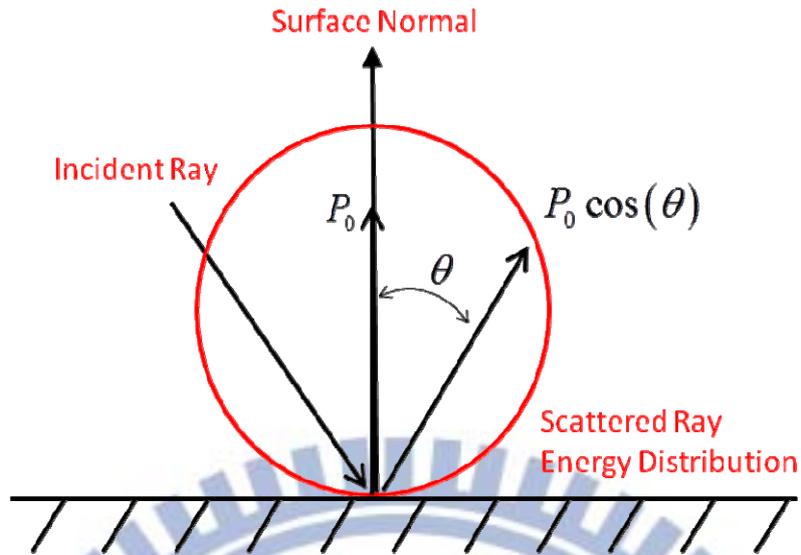


圖 2.11 Lambertian 型態的反射

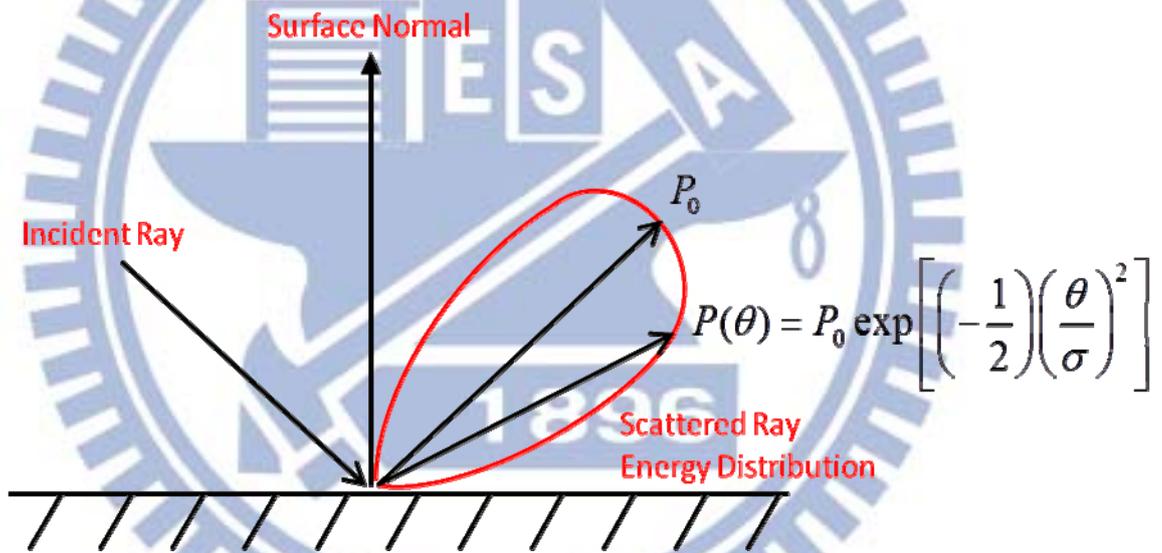


圖 2.12 Gaussian 型態的反射

## 2-4 LED球泡燈介紹

室內照明包含球泡燈、燈管、崁燈、射燈、承板燈.....等，由於節能議題逐漸受到重視，近期LED燈具常納入辦公室、學校、工廠的節能計畫中，其中又以LED球泡燈取代傳統白熾燈泡的節能效果最為顯著，例如12W LED球泡燈可取代60W 傳統白熾燈泡，能夠節約能

源80%，因此LED球泡燈的發展也越顯重要。為了推動傳統白熾燈泡與螢光燈更換為LED球泡燈，LED球泡燈的接頭設計與傳統白熾燈泡的接頭相同，常採用螺旋狀的接頭型式，依螺旋狀接頭的尺寸分為E12、E14、E26、E27.....等，E27代表螺旋狀接頭的直徑是27mm。

LED燈具在光色方面也與傳統燈具一樣，具有晝白色與暖白色兩種，使用者能夠依照需求情況與使用偏好而自由選擇光色；晝白色帶有涼爽、活躍的氣氛，適用於辦公室、教室，暖白色帶有溫暖、穩重的氣氛，適用於臥室、餐廳。在相同消耗功率的情況下，晝白色的LED燈具能提供較多的流明值，這是與LED的螢光粉配方有關，為了使LED發出暖白色的光色，會在黃色螢光粉中添加紅色螢光粉，而紅色螢光粉被激發的發光效率較低，導致暖白色的LED燈具的發光效率低於晝白色的燈具。

在市面上充斥各種瓦數與流明值的LED球泡燈產品，從4瓦~12瓦都有，各種瓦數的LED球泡燈都有相對應的適合的使用場合，使用者可自行搭配球泡燈數量來增加照明亮度。

觀察市面上現有的國內廠商的LED球泡燈，發現LED球泡燈的發光角度範圍小、無法照亮LED球泡燈後方的區域，或是-135度至135度之間的光強分佈沒有在-135度至135度之間的平均值的20%範圍以內，因此無法符合能源之星的標準規範，各廠商的LED球泡燈經整理

如表2.1。發光角度範圍小的LED球泡燈僅適合應用在：照明角度需求小的燈具、具有反射型燈罩的燈具、不需照亮LED球泡燈後方的燈具的重點式照明，例如：工廠、辦公室、商場的筒燈，或是展覽會場的繪畫的投射燈……等；但不適合應用在：照明角度大的燈具，或是不具有反射型燈罩的燈具，例如臥室的床頭燈、布罩檯燈……等，否則會產生LED球泡燈後方區域過暗的現象，造成使用者的不舒適感；因此發光角度範圍小的LED球泡燈適合的燈具有限，而一般使用者在購買LED球泡燈之前，對LED球泡燈的發光特性仍然不甚瞭解，更無法評估LED球泡燈適合的燈具，造成使用者購買LED球泡燈並實際使用後，才發覺發光效果與傳統白熾燈泡、節能燈有所差異。發光角度範圍大的LED球泡燈的應用較不受限制，由於發光特性與傳統白熾燈泡或節能燈較為相似，使用LED球泡燈取代傳統白熾燈泡與節能燈時，使用者比較不會感覺到照明效果的差異，同時能享有LED球泡燈帶來的節能效果，因此國內各家LED球泡燈廠商皆努力設計發光角度範圍大的LED球泡燈，以滿足使用者的實際需求與便利性。

表 2.1 國內廠商的 LED 球泡燈產品的比較表

廠牌	LED球泡燈	瓦數	全周型規範
E牌		6W	不符合
L牌		8W	不符合
R牌		7W	不符合
D牌		8W	不符合
T牌		10W	不符合
T牌		15W	不符合
A牌		3W	不符合
T牌		7W	不符合
T牌		8W	不符合

### 2-5 美國能源之星的全周型簡介

美國能源之星，自2008年9月30日正式執行，是因應全球暖化導致全球氣候異常與自然生態危害等因素，由美國能源部與美國環保署共同公開的技術規範，期望透過能源之星推廣節能產品，提高能源效率與減少碳排放量，透過嚴格的量測實驗，保證列管的產品的能源效益均符合法規要求。球泡燈生產廠商需提出由美國環保署認可的認證

機構的第三方測試報告，才可以取得能源之星的認證，測試內容包含：亮度等於或大於能源之星的規範、光輸出的變化小於能源之星的規範、色彩變化量小於能源之星的規範.....等。美國能源之星在LED照明業界具有領先地位，美國會率先遵照能源之星的規範來要求球泡燈產品，雖然能源之星的強制性只局限在美國，但是，世界各國的燈具發展，多會參照美國的規範，未來其他的國家，對於能源之星所規範的條件，會越來越重視，乃至於完全符合，以利產品能夠進入美國市場以及提升產品水準。

能源之星對於LED球泡燈的光強度分佈提出全周型的標準規範<sup>[22]</sup>，要求LED球泡燈的發光角度需大於 $\pm 135$ 度，也就是需大於270度，在發光角度 $\pm 135$ 度範圍內的光強度值需要落在平均值的 $\pm 20\%$ 以內，在發光角度135度到180度範圍之間的流明值需要大於5%總流明值，代表有部分比例的光能量射向球泡燈的後方，如圖2.13。

傳統白熾燈泡具有發光角度範圍廣、各角度的光強度均勻的發光特性，但是傳統白熾燈泡發光效率低，而LED球泡燈以節能的訴求來取代傳統白熾燈泡，為了避免傳統白熾燈泡更換成LED球泡燈後，雖然達到了節能的目的，卻因為LED球泡燈的光強度分佈與傳統白熾燈泡差異過大，造成使用者的不舒適感，因此能源之星要求LED球泡燈，需要具有相似於傳統白熾燈泡的光強度分佈，而研擬出全周型的標準

規範，要求LED球泡燈的發光角度需要相當廣，能夠照亮LED球泡燈的下方，並且各角度的光強度要均勻，當使用者把傳統白熾燈泡更換成LED球泡燈後，在視覺上不會有明顯的差異。

產品需要取得能源之星的標章，銷售到北美市場才能有基本的競爭力，為了符合能源之星的全周型規範，各家廠商積極運用各種廣角發光技術達到全周型的光形，使市售一般的LED球泡燈的半強發光角度(FWHM)由120度大幅提高為全周型標準規範的270度以上，以利把產品推向北美市場。

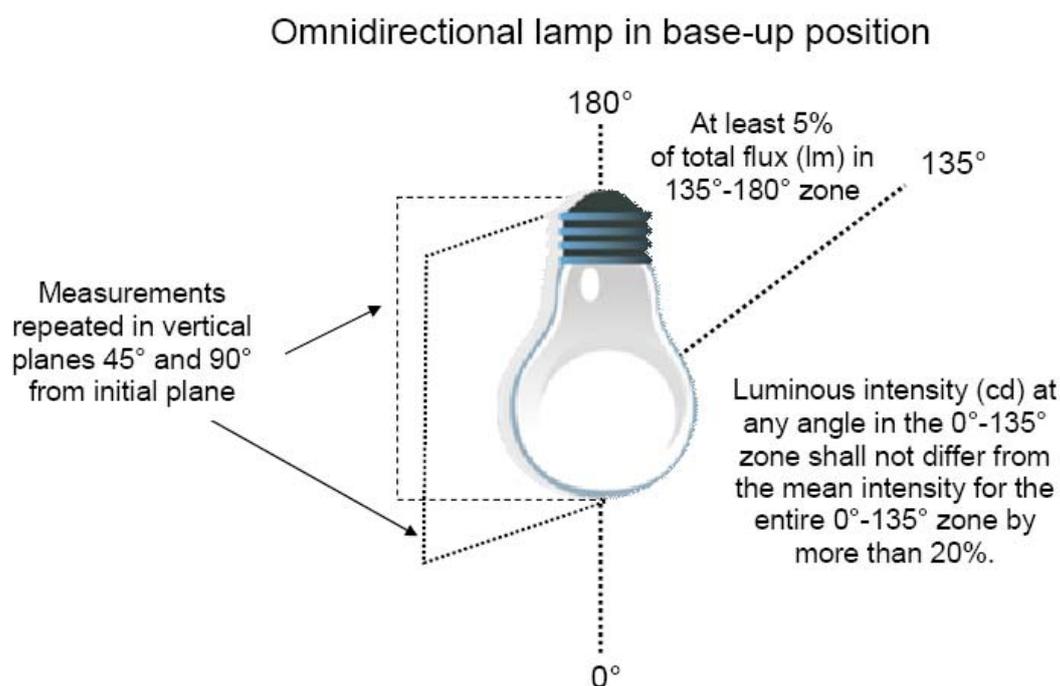


圖 2.13 美國能源之星的全周型規範<sup>[22]</sup>

### 第三章、研究內容與方法

本章使用光學模擬軟體 Lighttools 來設計新型透鏡，並搭配 3D 模型繪圖軟體 Solidworks 快速建模，在考慮迴避其他現有的大角度透鏡專利的情況下，重新設計出一款光形結果能符合能源之星的全周型規範的透鏡，並與現有專利進行差異比較。

#### 3-1 設計流程

使用光學模擬軟體 Lighttools 建立光學模型，建立 LED 影像光源資料檔，作為光學模型的光源，接著建立非序列性光線 (Non-sequential ray, NS ray)，分析光學模型的光路行為，設定目標為全周型標準，構思二次光學透鏡的設計概念，由設計目標為出發點，尋找相關的大角度透鏡專利，改善大角度透鏡專利遇到的問題並作專利迴避，接著使用 3D 模型繪圖軟體 Solidworks 建立設計概念的二次光學透鏡，聯結(link)二次光學透鏡模型到光學模擬軟體中，觀察非序列性光線的光路行為，接著執行光線追跡模擬以觀察光強度分佈，確認光強度分佈是否符合全周型標準，若無法符合全周型標準，再調整非序列性光線的分佈，再執行光線追跡模擬，直到光強度分佈符合全周型標準，即完成設計流程，如圖 3.1。

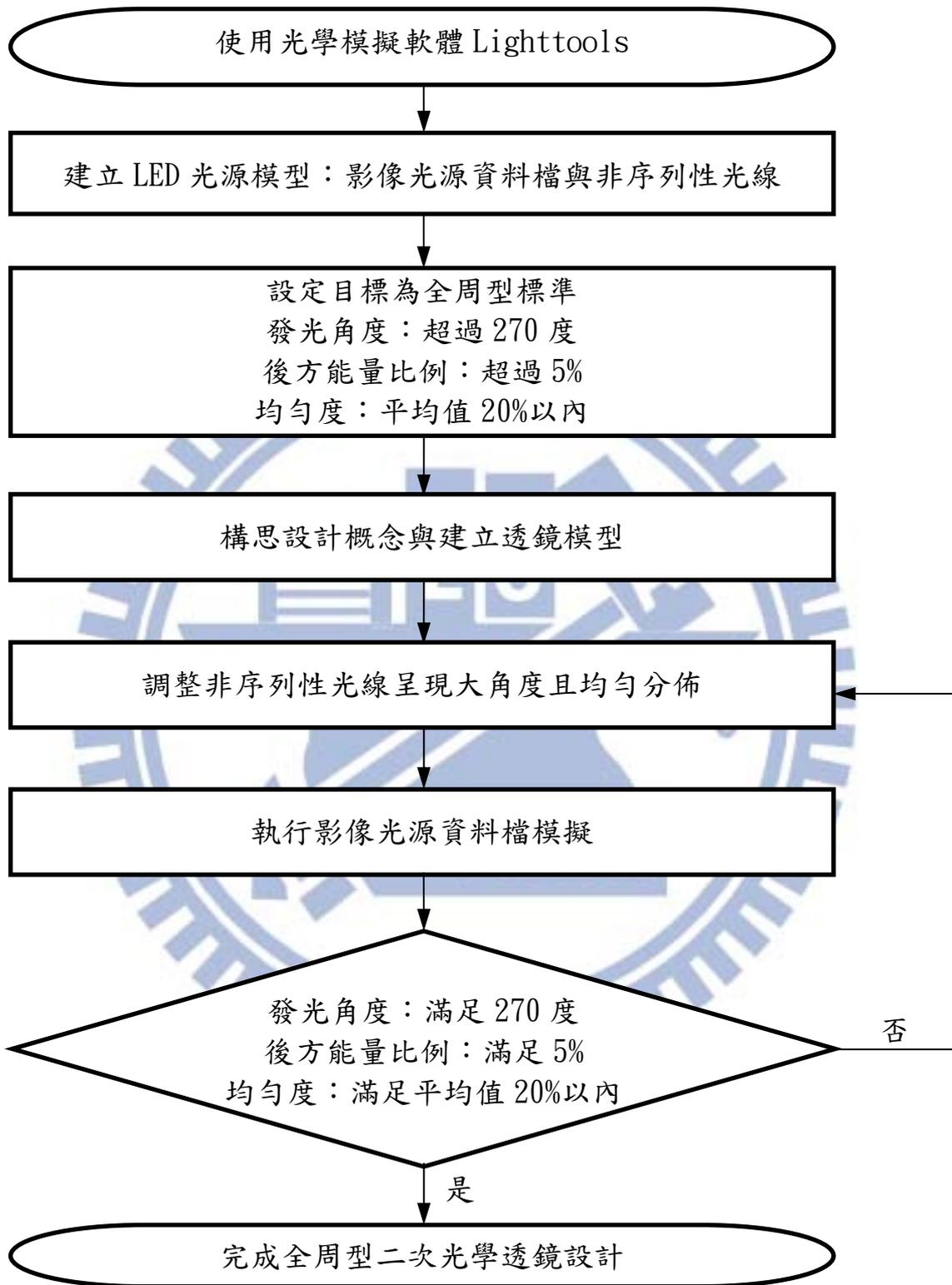


圖 3.1 設計流程圖

### 3-2 光源檔、接受器與散熱座建立

光學模型包含三項基本要素：光源、接受器、光學件；在建立本文的主要研究對象-光學件之前，首先建立光源與接受器，使用LED的影像光源資料檔作為光學模型的光源，提供光學模擬軟體能夠運算光線行為的光能量的發光源；LED的影像光源資料檔是LED封裝廠使用Radiant Image光學測量儀器，用CCD的原理擷取LED所發出的光能量轉換成影像檔，光學量測儀器使用CCD環繞著LED，從LED的各角度拍照，並取得LED發出的光能量分佈，CCD在LED的各角度拍照非常多次，取得LED自各個發光位置與各個角度的光能量，最後整理成LED的影像光源資料檔的型式，因此LED的影像光源資料檔足以表達LED的能量分佈，由於記錄的內容非常巨量，通常單個LED光源影像檔會達300Mb~500Mb。光源影像檔方便光學開發者設計二次光學元件，影像檔能夠從各大LED廠商的官方網站下載，匯入光學模擬軟體後，即完成建立光學模型的光源。光強度接受器是光學模擬軟體內建的多項接受器之一，光強度接受器的功能是接受經過光學件所發射往各角度的光能量，記錄空間中各方向的光強度分佈。

Nichia是產值最高的LED製造商，而Nichia LED被廣泛使用的封裝型式為PLCC型式，LED型號例如：NS6W183B、NF2W757AR、NS9W153AM-H3，採用Nichia的NS9W153AM-H3 LED作為本文的發光元

件，從Nichia的官方網站下載LED型號NS9W153AM-H3的影像光源資料檔，LED外觀如圖3.2，在光學模擬軟體中，點擊RaySource的功能鍵，匯入影像光源資料檔，如圖3.3，接著開啟影像光源資料檔，如圖3.4，在光學模擬軟體的指令列中輸入光源位置的XYZ座標位置，完成建立LED光源。



圖 3.2 Nichia NS9W153AM-H3 SMD LED

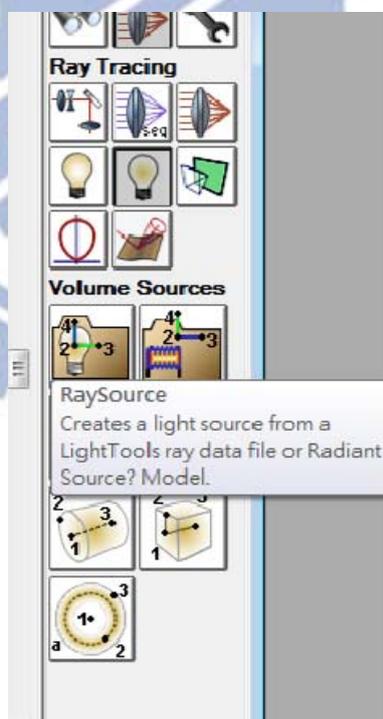


圖 3.3 使用 Ray Source 的功能鍵的圖示

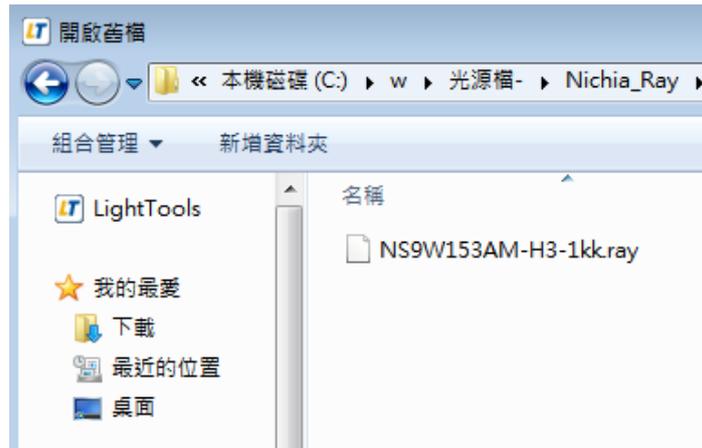


圖 3.4 開啟影像光源資料檔的圖示

當影像光源資料檔匯入光學模擬軟體時，光源的外觀如圖3.5，光源外觀為矩形圖示，矩形圖示作為光線方向的向量參考盒，非具備LED封裝體模型的任何光學性質。

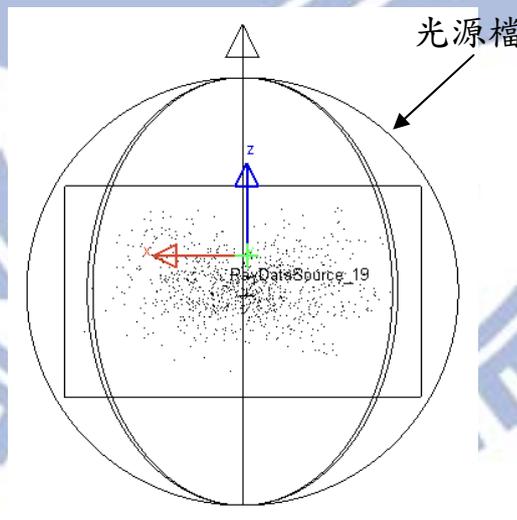


圖 3.5 LED 光源檔的圖示

設計初期為了快速分析光學模型的光路行為，在光源發光的中心點位置建立扇形的非序列性光線，能視覺化 LED 發出的各角度光線的光路，鑑於 LED 的光形為軸旋轉對稱，故僅需建立半邊的 NS ray；本研究把 LED 發出的光線區分成兩部分，分別為較小角度與較大角度

的兩部分，較小角度的光線設定為紅線，而較大角度的光線設定為藍線，如圖 3.6，非序列性光線能用來觀察自 LED 發出的各角度光線經過光學模型後的折射或反射方向，並評估光學模型的光路行為，作為設計的參考依據。

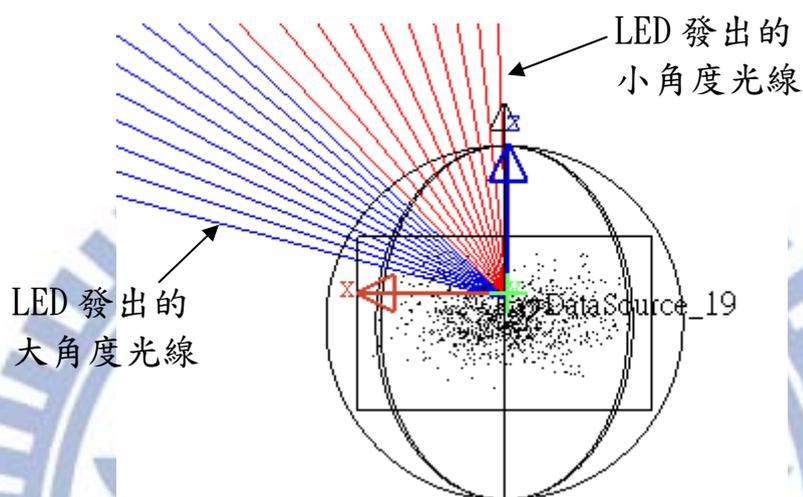


圖 3.6 匯入虛擬光線的圖示

接著新增遠場光強度接受器，接受範圍為360度的遠場球狀接受器，接受球狀空間中各方向的光強度值，如圖3.7，遠場光強度接受器能夠記錄光學模型中的空間光強度分佈狀況，供設計者分析光強度分佈結果來反覆修改設計，光強度分佈結果分為兩種圖示方式，各為極座標與卡式座標，設計者能夠依使用習慣或應用情況而自由選擇圖示模式。

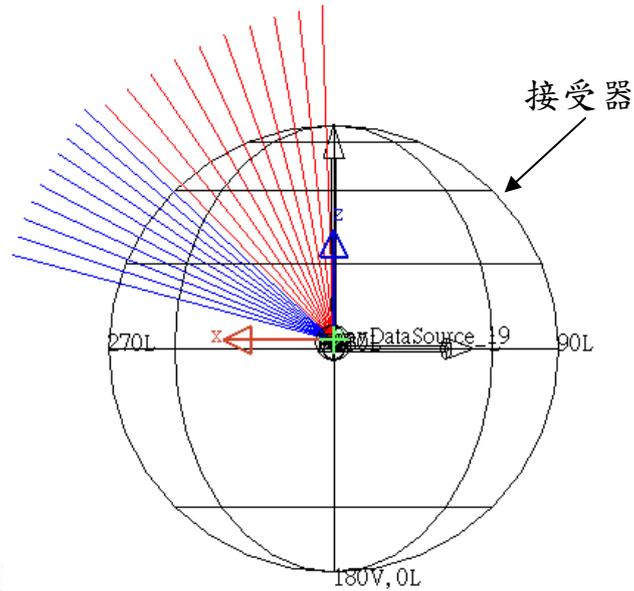


圖 3.7 接受器的圖示

繼續在光學模型的 LED 光源的下方建立散熱座機構實體，散熱座設定成不透光的金屬製品，散熱座會擋住由透鏡射向超過 180 度的大角度光線，同時又具反射局部光線，因此有必要考量設定散熱座的表面散射光學特性，如圖 3.8 所示。

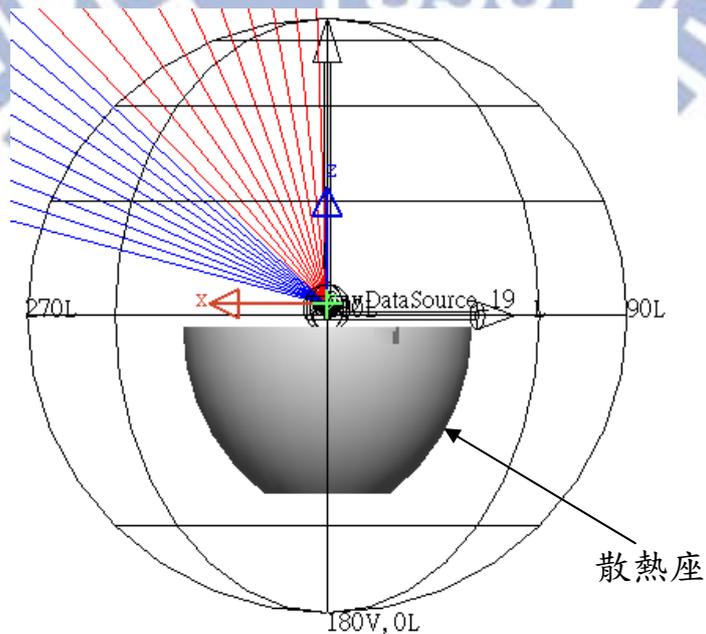


圖 3.8 散熱座的圖示

### 3-3 二次光學透鏡光學設計

建立光源檔、接受器與散熱座之後，接著建立二次光學透鏡，構思二次光學透鏡的設計概念，由設計目標為出發點，搜尋相關的大角度透鏡專利，分析大角度透鏡專利的特徵，作為設計概念的參考，接著改善大角度透鏡專利遇到的問題並作專利迴避，得到新型的全周型透鏡概念。

使用 3D 模型繪圖軟體 Solidworks 建立二次光學元件，在 Solidworks 草圖上繪製光學件的截面輪廓線，利用建模特徵的軸對稱旋轉功能，建立本文的二次光學元件實體。以光學模擬軟體與 3D 模型繪圖軟體的聯結功能，快速建立光學模擬軟體的二次光學件的設計模型，再依據光學模擬的遠場接受器的光形結果，反覆修改光學件造型來調整光強度分佈，達到全周型標準規範。

用來建立二次光學件的草圖輪廓，使用自由曲面(free form)的多點不規則曲線，採用不規則曲線的多個控制參數，以及曲線前端與末端的幾何位置，決定曲線的輪廓線，相對應的尺寸設計參數在 8~10 個，此設計參數設定的數目，尚在一般光學設計者可以接受的調整參數的數目範圍。

### 3-3-1 二次光學透鏡的設計概念

構思本論文二次光學透鏡的設計概念，由設計目標的大角度光形為出發點，尋找國內外相關的大角度透鏡專利，改善大角度透鏡專利遇到的問題並作專利迴避，設計概念的構想流程：

(1) 設定目標為全周型標準，需求功能屬於大角度光形，由於LED光源的發光半強角度大多落於110度~140度，只能照亮LED的上方，無法照亮LED的下方，需要額外再搭配二次光學透鏡來增加發光角度。

(2) 搜尋相關的大角度透鏡專利，觀察大角度透鏡的特徵，在透鏡的頂面具有V形結構，當二次光學透鏡內部的光線射到透鏡頂面的V形結構，光線會產生全反射現象，並射向二次光學透鏡的下方，達到增加發光角度的效果，因此本論文設計二次光學透鏡時，會參考V形結構的透鏡特徵。

(3) 當二次光學透鏡的頂部採用V形結構時，由於LED底部具有電路板與散熱座等機構件，會擋住射向透鏡下方的光線，減少大角度光線的能量。

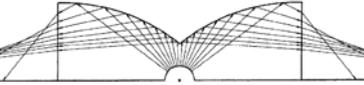
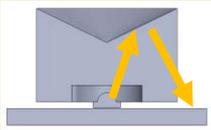
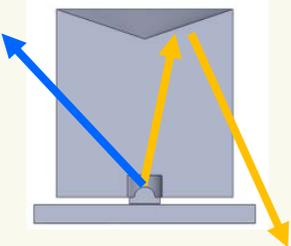
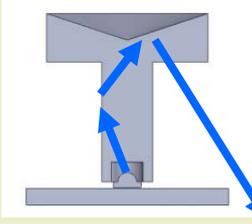
(4) 本論文增加透鏡的高度尺寸，改善散熱座擋住大角度光線的問題，但是過於相似現有的大角度透鏡專利，並且透鏡的體積太大，增加射出成型的困難度，也增加透鏡的重量與成本，也不容易控制

LED 射出的較大角度光線。

(5)進行專利迴避時，透鏡的下半部採用導光柱結構，減少透鏡的體積，改善透鏡重量與成本的問題，並且採用導光柱的全反射現象來控制 LED 發出的較大角度光線，光線先在導光柱內產生第一次全反射，並射向透鏡頂面的 V 形結構，當光線射到透鏡頂面的 V 形結構時，光線再產生第二次全反射，射向透鏡的下方，使更多的能量射往大角度的位置，增加光學設計的彈性，也更容易達成全周型標準，設計概念的構想流程如表 3.1 所示。



表 3.1 設計概念的構想流程

步驟	構想流程	說明	光路分析
1	需求功能	需求為大角度光形，但 LED 發光角度僅有 120 度	
2	搜尋專利	大角度透鏡具有 V 形結構	
3	發現問題	散熱座擋住射向下方的光線	
4	改善問題	把透鏡加高，但專利相似高，透鏡體積太大，且不易控制 LED 發出的較大角度光線	
5	專利迴避	透鏡下半部採用導光柱結構，減少透鏡體積，並控制 LED 發出的較大角度光線，更容易達成全周型	

### 3-3-2 二次光學透鏡的概念實體建立

使用 3D 模型繪圖軟體 Solidworks 建立設計概念的二次光學透鏡，使用 Solidworks 的不規則曲線、直線與導圓角的草圖繪製功能，快速建立軸旋轉對稱的二次光學透鏡造型；首先決定透鏡的最大外形的高度與寬度，訂出透鏡的尺寸範圍，接著繪製出不規則曲線的初始幾何位置；必須在初始頂面中央內凹位置預留適當的幾何空間，當要調整不規則曲線的曲率與輪廓時，能夠調整到不規則曲線中央的位置控制點與角度控制點，同線段的不規則曲線的控制參數與前端/末端的位置點參數，調整尺寸的方式可以直接輸入尺寸數據，或是直接拖曳控制點；接著使用草圖的直線繪製功能建立二次光學透鏡的其他輪廓線，透鏡底部較為細長的輪廓，則使用導圓角去除銳角，完成透鏡的草圖輪廓，如圖 3.9。

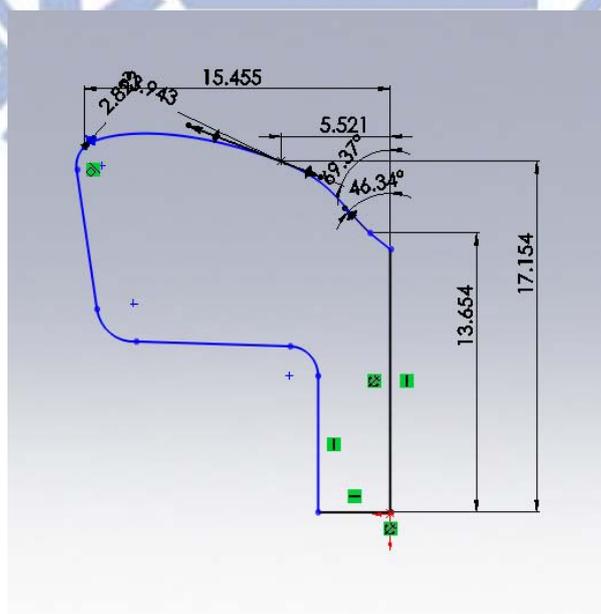


圖 3.9 透鏡的草圖輪廓圖

採用Solidworks的建模特徵-旋轉填充，沿著中心軸旋轉草圖輪廓，建立起二次光學透鏡實體，完成軸旋轉對稱的透鏡造型，如圖 3.10。

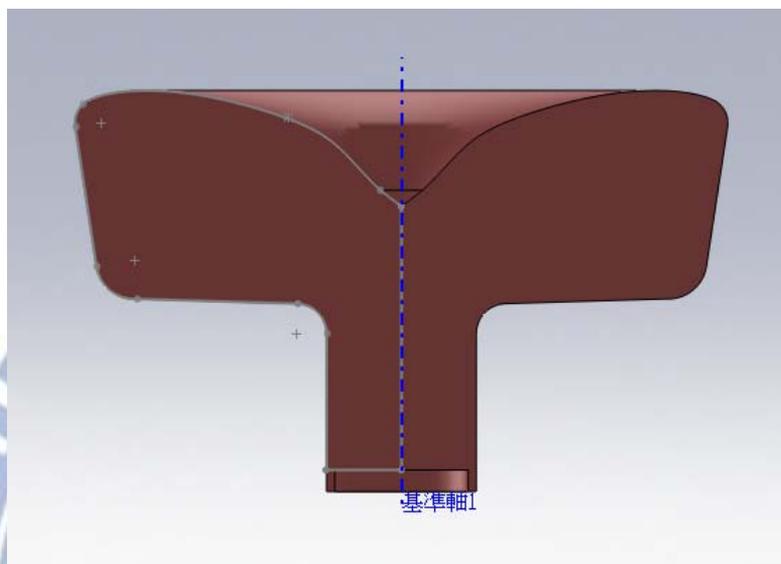


圖 3.10 透鏡的切面圖示

使用光學模擬軟體與 Solidworks 的聯結功能，把透鏡實體模型聯結到光學模擬軟體中，如圖 3.11 所示。

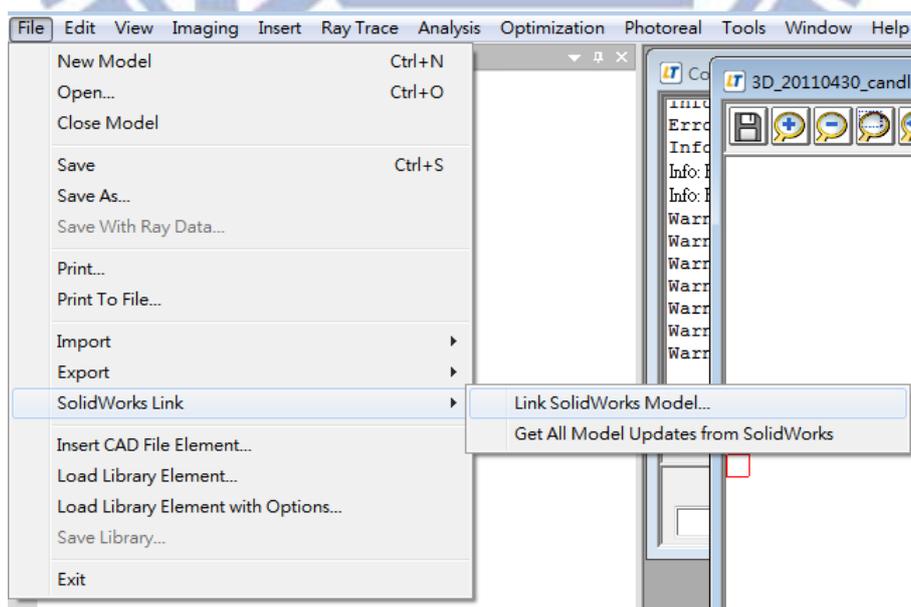


圖 3.11 光學模型軟體與 Solidwork 的聯結功能圖示

透鏡模型的材質設定成光學級 PC，折射率 1.575，表面光學參數設定為具「分光」及「菲涅爾損耗」的理想平滑表面的光學設定，完成光學模擬模型如圖 3.12。

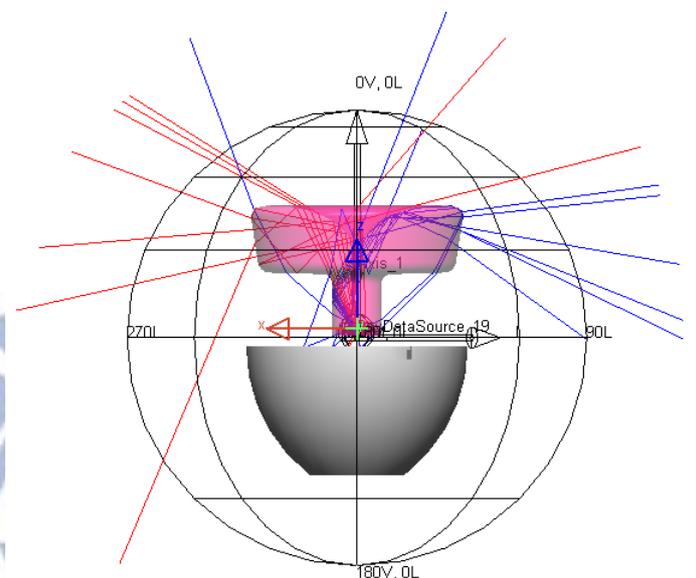


圖 3.12 光學件圖示

透鏡初始結構，依據光線行為區分成上下兩部分，透鏡的上半部設計成全反射結構，藉由全反射的曲線來控制光線經過透鏡後，各射往設計角度的光能量；透鏡的下半部為導光柱結構，引導LED光源發出的大角度光線轉向透鏡的上半部，再由二次的全反射來調整射往各設計角度的光能量，此導光柱光學結構，增加導引LED光源發出的大角度光線的設計的彈性空間。

透鏡的上半部是經光學設計的自由曲面，導引LED光源發出的較小角度的光線(紅色線)，進一步觀察透鏡上半部的光路行為，在光線射到透鏡頂部時，部份光線會遵循內部全反射的光學行為，朝向透鏡

的側邊及下方射出；除了全反射的光線以外，同時存在部分光線在不滿足全反射的情況下，依循光折射現象折射出朝上的光線，因此，藉由控制透鏡的上半部的自由曲面以重新調整、分配全反射、折射的光線能量比例(如圖3.13所示)，繼而達到全周型的光強度分佈，是一項困難度很高的光學設計目標。

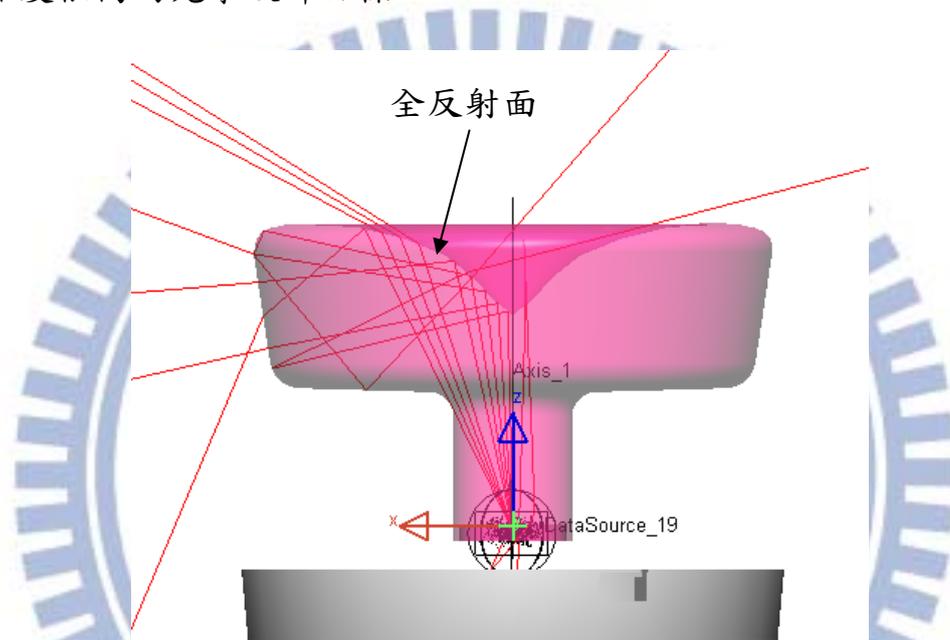


圖 3.13 透鏡的上半部的光線行為圖

藉由上述的說明，一般為了能有效分配LED光源射出的全部角度的光線，就得把透鏡上半部的全反射面加大，才能完整控制LED光源所發出的各角度光線，但是往往會有機構尺寸的限制，無法讓透鏡尺寸無限制的加大，再者，考慮到射出成形的因素，愈大的透鏡尺寸代表成形的成本愈高，無益於產品開發。本文提出，把透鏡的下半部可採用導光柱結構，導光柱為細長的柱狀結構，在導光柱內部的光線會形成全反射的光學行為，在全反射的同時，光線也向前傳遞；藉由導

光柱的光學概念，利用導光柱結構控制LED光源射出的大角度光線，大角度光線會在導光柱結構內進行第一次全反射，全反射後的光線射往透鏡的上半部時，再進行第二次全反射，最後射向透鏡的側邊及下方，如圖3.14所示。

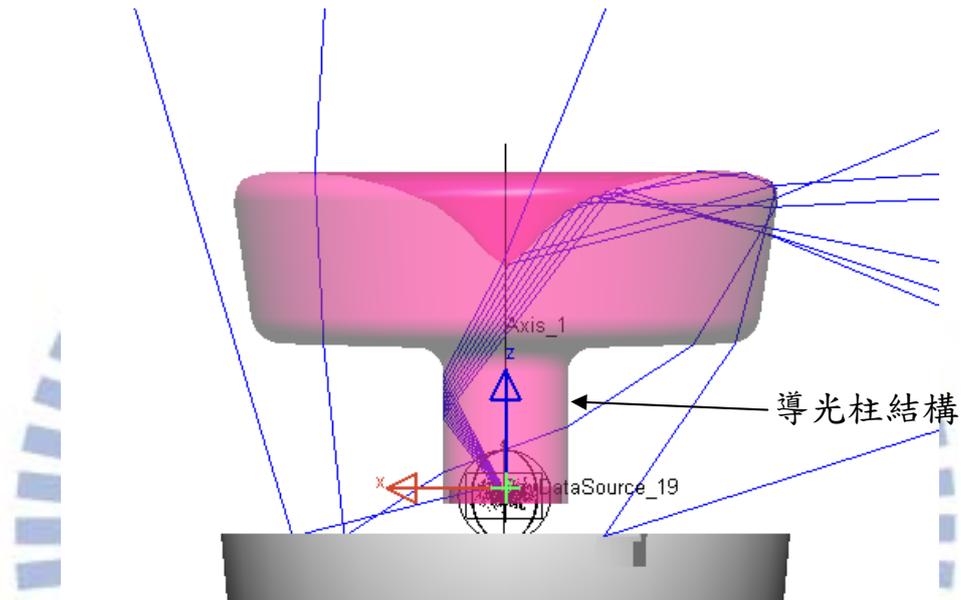


圖 3.14 透鏡的下半部的光線行為圖

### 3-3-3 二次光學透鏡光學設計過程

在設計過程中，為了達成全周型標準規範的設計目標，需要不斷調整來控制透鏡的上半部的自由曲面、重新分配全反射、折射的光線能量比例。由於透鏡模型、光路行為、光強度分佈之間存在相互關係，當控制透鏡的上半部的自由曲面以分配全反射、折射的光線能量比例時，可以藉由觀察非序列性光線的光路行為，以評估光路行為偏向全反射或折射的機率較高，接著執行光線追跡模擬以觀察光強度分佈圖，確認光強度分佈是否符合全周型標準規範，或是產

生局部角度的能量值過大所造成的光強度分佈不均勻的結果，接著提出兩種透鏡模型的舉例供分析與檢討。

舉例一，當透鏡的上半部的不規則曲線中央的位置控制點往上移動時，重新得到透鏡的草圖輪廓，如圖3.15，接著觀察非序列性光線的光路行為，發現光線射到透鏡的頂面時，光線傾向折射的機率較高，而傾向全反射的機率較低，同時光線也較集中在局部角度範圍內，而非均勻的散佈在各角度，造成自透鏡射出的光線能量傾向射往透鏡的上方，且集中在局部角度範圍內，如圖3.16；執行光線追跡模擬以觀察光強度分佈圖，發現光強度最大值落在50度的位置，且光能量集中，與非序列性光線所觀察到的光路行為結果相似，由於光強度分佈不夠均勻，無法符合全周型標準規範，如圖3.17。

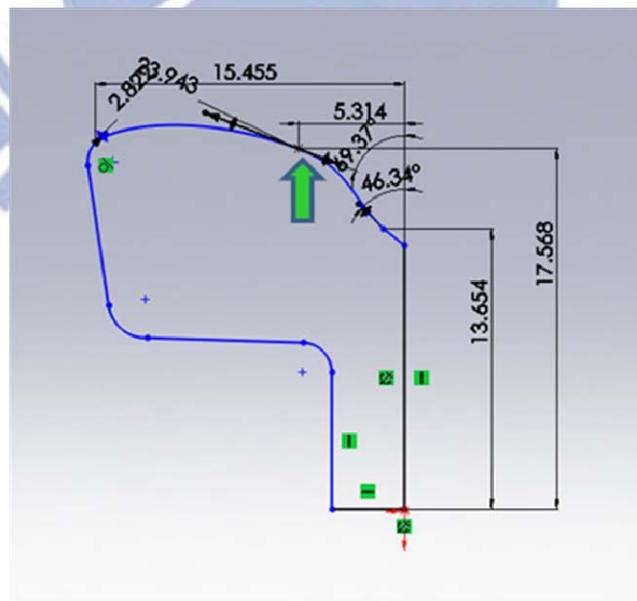


圖 3.15 不規則曲線中央的位置控制點往上移動的草圖輪廓圖

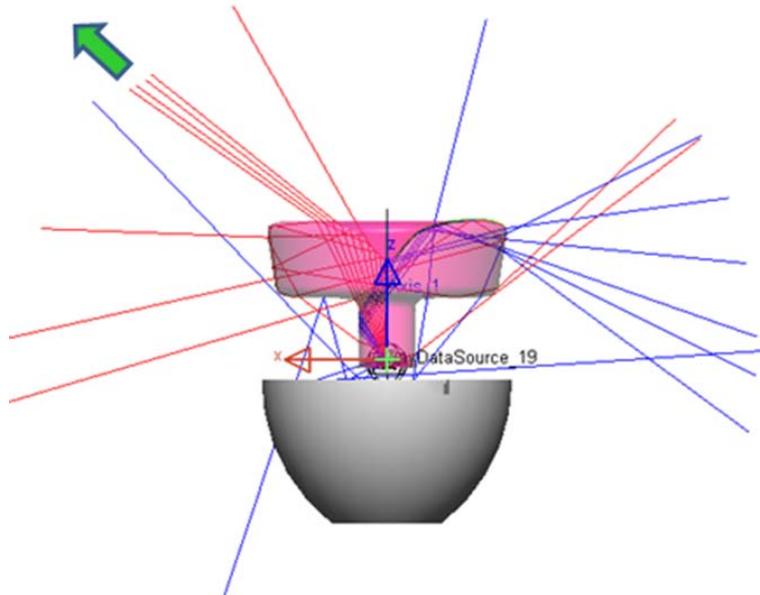


圖 3.16 透鏡的上半部傾向折射的光線行為圖

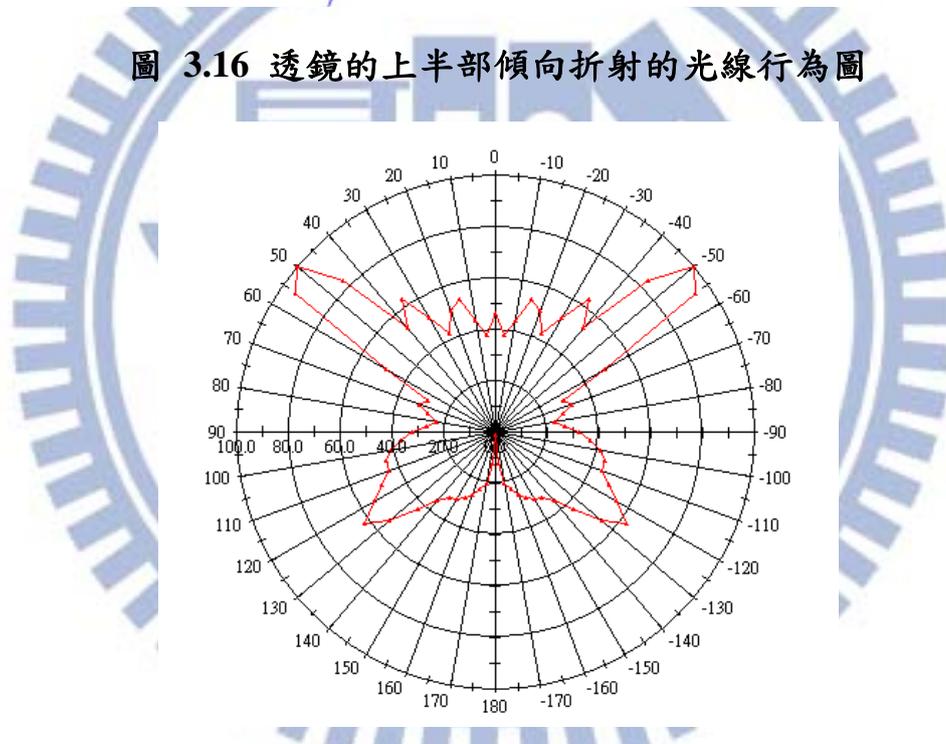


圖 3.17 透鏡的上半部傾向折射的光強度分佈圖

舉例二，當透鏡的上半部的不規則曲線中央的位置控制點往下移動時，重新得到透鏡的草圖輪廓，如圖3.18，接著觀察非序列性光線的光路行為，發現光線射到透鏡的頂面時，光線傾向全反射的機率較高，而傾向折射的機率較低，同時光線也較集中在局部角度範圍內，

而非均勻的散佈在各角度，造成自透鏡射出的光線能量傾向射往透鏡的側方與下方，且集中在局部角度範圍內，如圖3.19，再執行光線追跡模擬以觀察光強度分佈圖，發現光強度最大值落在110度與140度的位置，且光能量集中，與非序列性光線所觀察到的光路行為結果相似，由於光強度分佈不夠均勻，無法符合全周型標準規範，如圖3.20。

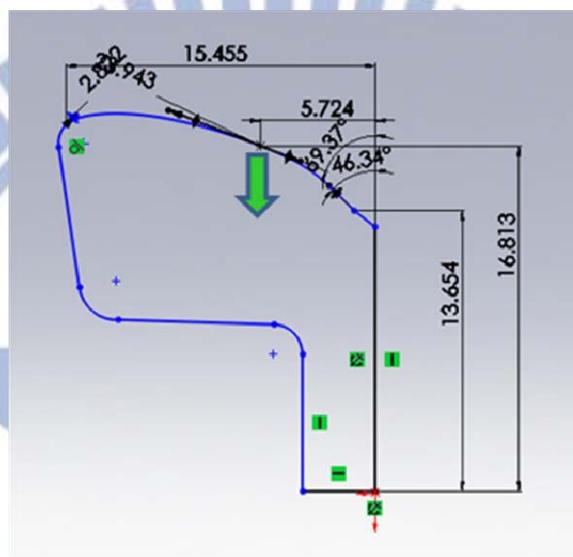


圖 3.18 不規則曲線中央的位置控制點往下移動的草圖輪廓圖

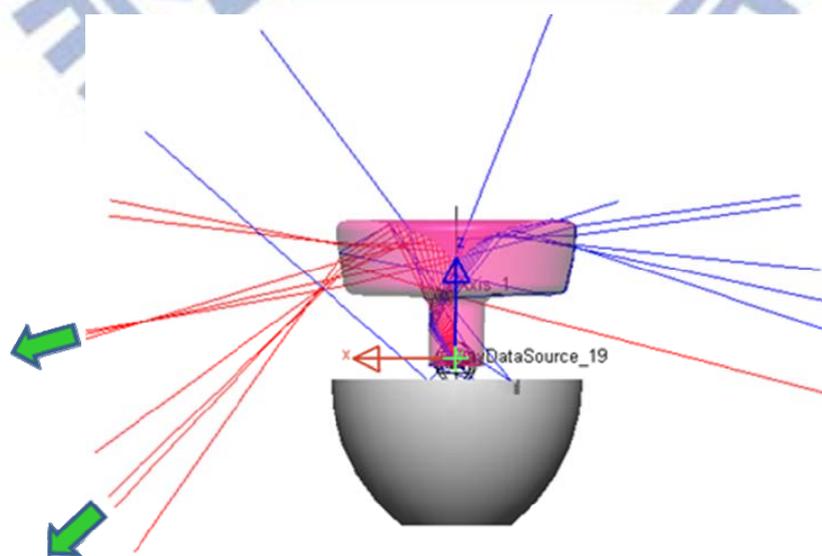
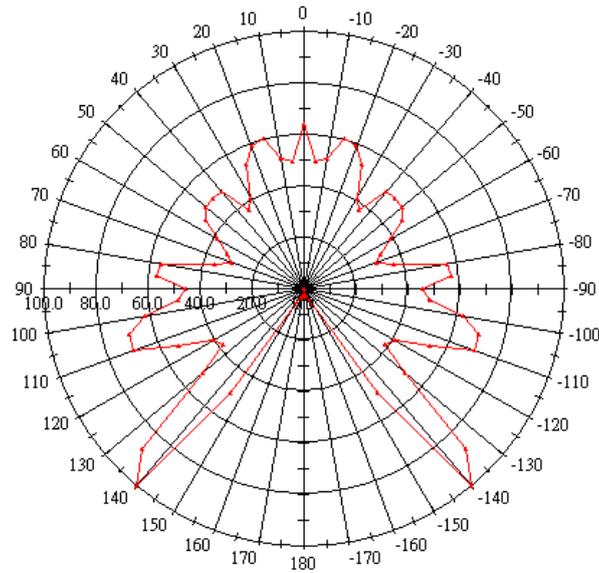


圖 3.19 透鏡的上半部傾向全反射的光線行為圖



**圖 3.20 透鏡的上半部傾向全反射的光強度分佈圖**

藉由觀察透鏡模型、非序列性光線的光路行為、光強度分佈之間的相互關係，設計者需注意當非序列性光線自透鏡射往各設計角度而呈現分佈不均勻且光線集中的光路行為結果時，光強度分佈的結果也會反應出相似的情況，而無法滿足全周型標準規範。非序列性光線可以幫助設計者在設計過程中，快速觀察透鏡模型的光路行為，作為設計者再次修改透鏡模型的依據，並由光路行為預估光強度分佈的可能結果；而光強度分佈的結果能夠提供更完整的模擬結果，供使用者確認設計結果是否符合設計目標；在設計過程中，需要反覆修改、調整透鏡的不規則曲線，在非序列性光線較均勻分散地射往各設計角度的情況下，光強度分佈能夠有較高的機會符合全周型標準規範。

反覆修改透鏡的輪廓，經過不斷調整、分配全反射、折射的能量比例後，重新得到透鏡的草圖輪廓，如圖3.21，接著觀察非序列性光

線的光路行為，發現光線射到透鏡的頂面時，遵循全反射、折射行為並射出透鏡的光線均勻的散佈在各設計角度中，再執行光線追跡模擬後以觀察光強度分佈圖，最後得到發光角度範圍大且光強度分佈均勻的遠場光強度分佈圖，如圖3.23所示。

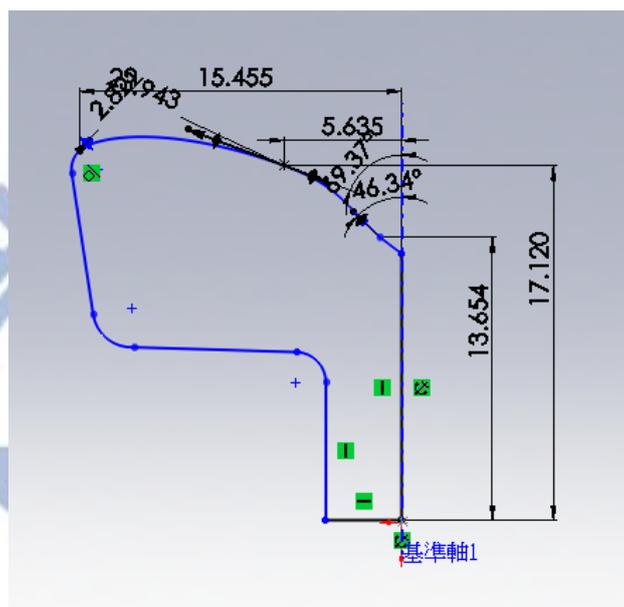


圖 3.21 設計完成的透鏡的草圖輪廓圖

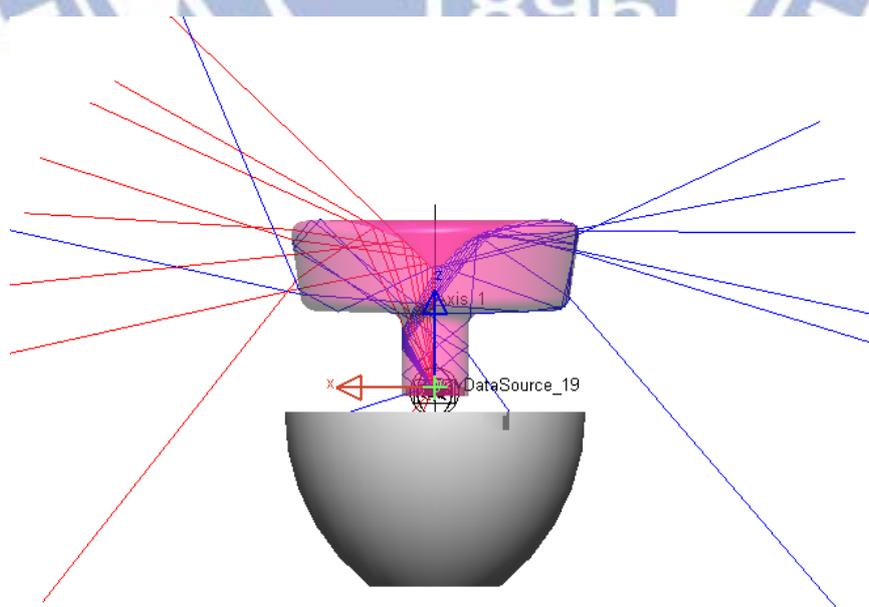


圖 3.22 設計完成的光線行為圖

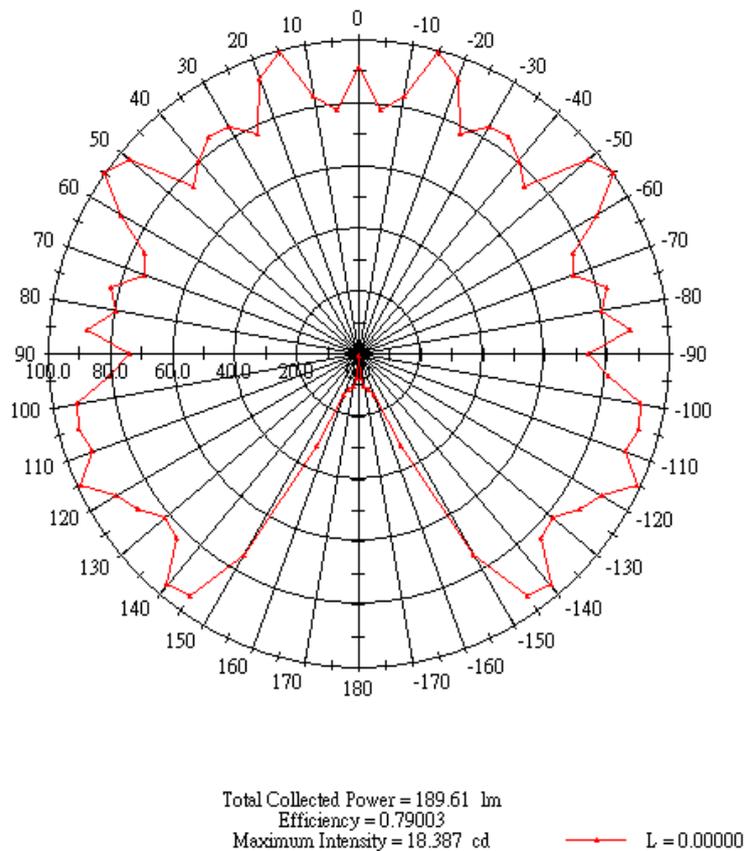
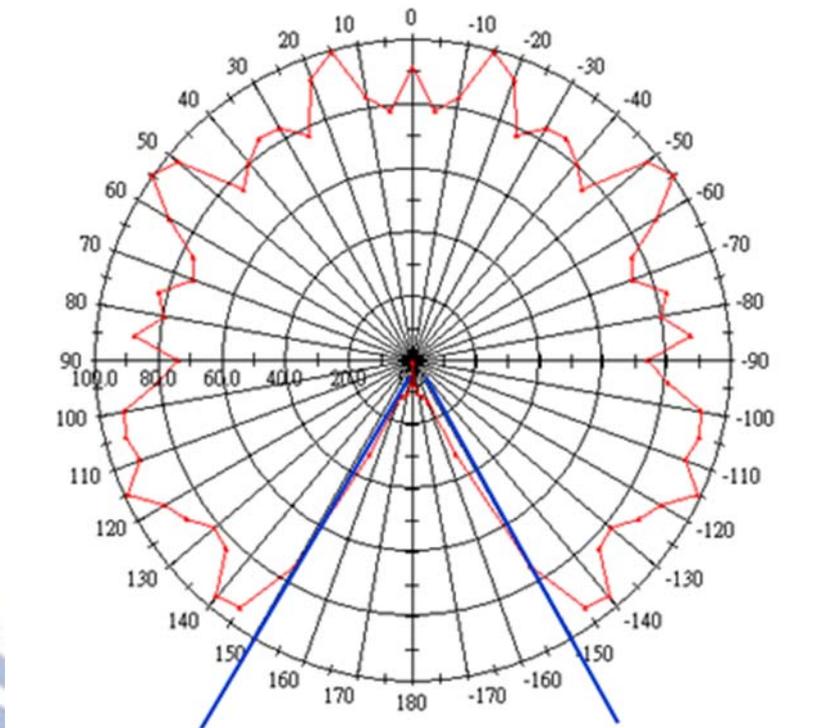


圖 3.23 設計完成的光強度分佈圖

### 3-3-4 二次光學透鏡光學設計結果分析

分析水平切面的遠場光強度分佈結果，角度範圍落於300度內，符合全周型標準的大於270度的規範；角度135度到180度範圍之間的流明值，計算結果為總流明值的7.5%，符合全周型標準的大於5%總流明的規範，如圖3.24所示。



300 度 (±150 度) (>270 度)      135-180 度之間的流明值 為總流明值的 7.5% (>5%)

圖 3.24 水平切面的光強度分佈的角度範圍分析

全周型標準規範-135至135度之間的光強度值需在平均光強度值的±20%以內，因此截取遠場設計結果-135度至135度之間的光強度分佈圖，切換成卡式座標系統，經換算得到-135度至135度之間的平均光強度值為85.7%，把85.7%正規化成1.0，在遠場光形圖中採雙座標方式，標示1.0於圖上的藍色虛線，黃色虛線標示上下限的範圍，分別各為值1.2與0.8。觀察-135度至135度之間的光強度分佈，所有的光強度值皆落在全周型標準規範的黃色虛線之內，代表遠場光強度分佈結果可符合全周型標準規範。

當光強度分佈不均勻時，球泡燈產品發出的光線照射在被照物

時，會存在視覺上亮暗線的不適現象，傳統燈具的360度均勻發光特性與LED相差甚大，而不會有此亮暗線的問題；設計LED燈具時要考量光強度分佈的均勻度，盡量避免產生亮暗線，本文把-135度至135度之間的光強度分布，以標準差的方式評估能量的均勻程度，套入標準差的公式，得到的計算結果為1.44，如圖3.25。

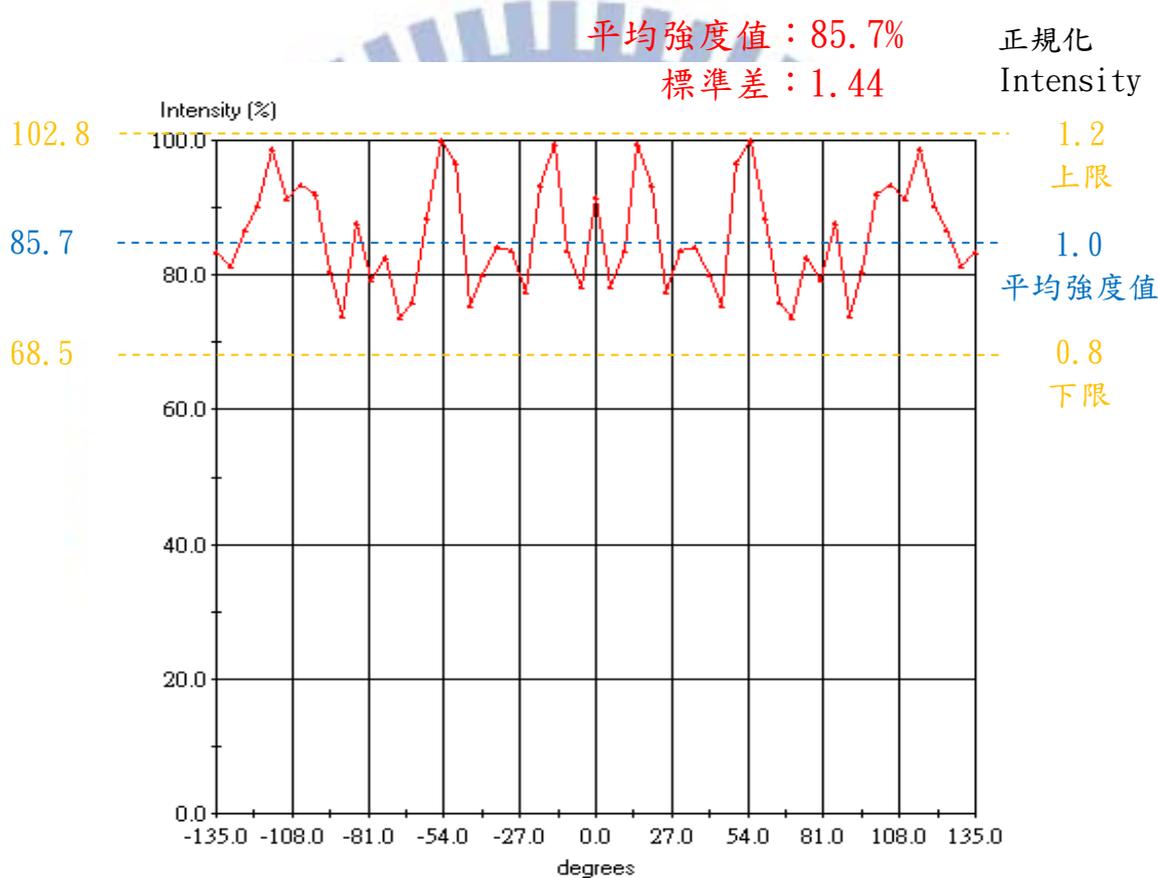
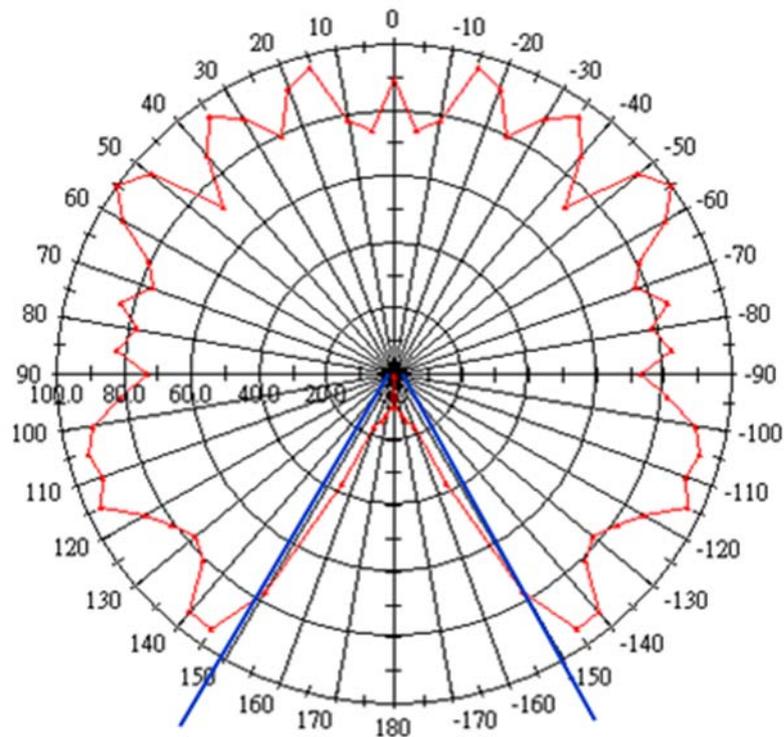


圖 3.25 水平切面的光強度分佈的均勻度分析

接著再分析45度切面的遠場光強度分佈結果，角度範圍落於300度內，符合全周型標準的大於270度的規範；角度135度到180度範圍之間的流明值，計算結果為總流明值的7.6%，符合全周型標準的大於5%總流明的規範，如圖3.26所示。



300 度  
(±150 度)  
(>270 度)

135-180 度之間的流明值  
為總流明值的 7.6%  
(>5%)

圖 3.26 45 度切面的光強度分佈的角度範圍分析

全周型標準規範-135至135度之間的光強度值需在平均光強度值的±20%以內，因此截取遠場設計結果-135度至135度之間的光強度分佈圖，切換成卡式座標系統，經換算得到-135度至135度之間的平均光強度值為85.2%，把85.2%正規化成1.0，在遠場光形圖中採雙座標方式，標示1.0於圖上的藍色虛線，黃色虛線標示上下限的範圍，分別各為值1.2與0.8。觀察-135度至135度之間的光強度分佈，所有的光強度值皆落在全周型標準規範的黃色虛線之內，代表遠場光強度分

佈結果可符合全周型標準規範。本文把-135度至135度之間的光強度分布，以標準差的方式評估能量的均勻程度，套入標準差的公式，得到的計算結果為1.48，如圖3.27。

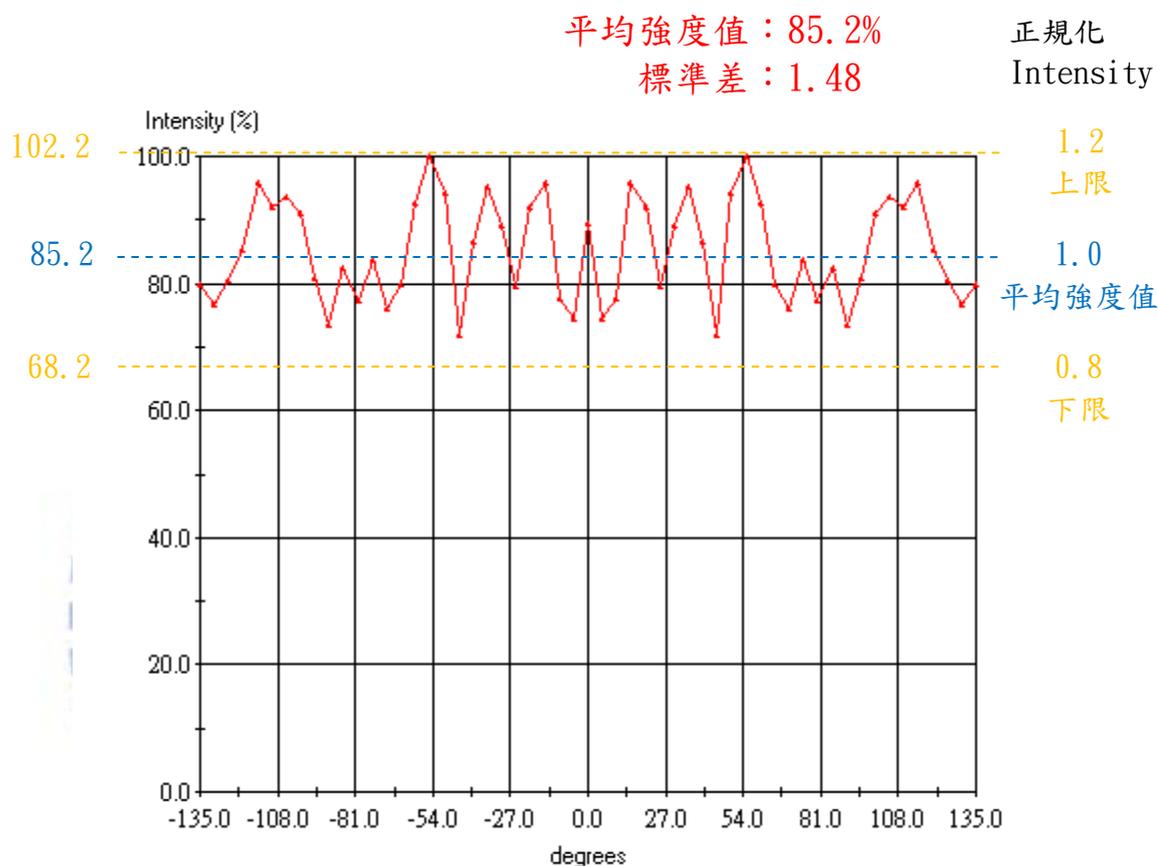


圖 3.27 45 度切面的光強度分佈的均勻度分析

### 3-4 設計結果與現有專利比較

設計的透鏡具有外觀的新穎性與功能的進步性，在外觀的新穎性方面，透鏡結合導光柱與全反射面的兩種光學結構，由兩種光學結構組成的透鏡具有獨特的光路行為，有別於其他現有專利的的光路行為，由於光路行為與透鏡外形攸關，因此透鏡也具有獨特的外觀造型。在功能的進步性方面，導光柱結構能夠更有效的控制 LED 發出的大角度

光線，能夠傳遞 LED 發出的大角度光線到透鏡頂面，並與 LED 發出的小角度光線集中在一起；另一方面，透鏡的表面為平滑表面，有別於其他現有專利的表面具有微小結構，因此透鏡能夠採用相對簡便的製造過程，並能夠達到全周型標準規範，如圖 3.28。

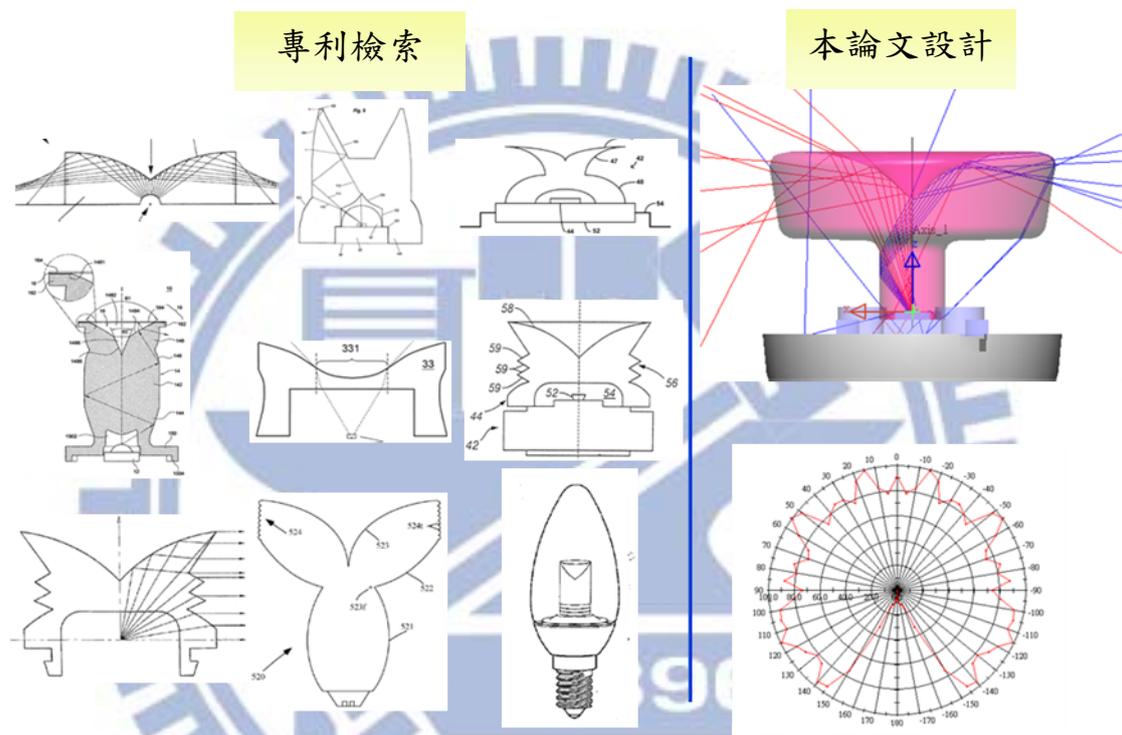


圖 3.28 設計結果與現有專利比較圖示

### 3-5 設計結果小結

提出新型全周型透鏡的光學模擬流程，透鏡具有外觀的新穎性與功能的進步性，而迴避其他現有專利，並且設計結果滿足全周型標準規範，如表3.1、表3.2，成功建立光學模擬達成設計目標的流程。

表 3.2 設計結果表

	角度範圍 ( $^{\circ}$ )	135~180 $^{\circ}$ 的能 量比例 (%)	-135~135 $^{\circ}$ 光強度 分佈的均勻度 (標準差)
模擬設計結果	300	7.5	1.44

表 3.3 本論文透鏡與專利檢索的比較表

	專利檢索	本論文的設計
新穎性	透鏡具有複雜的微小結構， 模具加工困難、射出良率低	透鏡具有單純的導光柱 結構，透鏡表面平滑， 加工容易
光路行為	微小結構造成光線折射、擴 散	導光柱引導 LED 發出 的大角度光線，搭配透 鏡頂面的全反射結構
進步性	大角度光形，未強調光形均 勻度，不一定能達到全周型 標準	達到全周型標準，光形 超過 270 度，光能量分 佈均勻

## 第四章、實驗結果與討論

接著把第三章設計的透鏡與燈具製作成實品，委託“中原大學照明及色彩研究中心”量測燈具的遠場光強度分佈，比較實際量測結果與模擬結果的差異，同時討論造成實際與模擬之間差異的原因。

### 4-1 透鏡、散熱座、球泡燈實做

把設計完成的透鏡圖檔委託廠商使用CNC加工製作mockup樣品，2D設計的重點尺寸如圖4.1所示；mockup的製作流程：

(1)首先取用塊狀光學級PC原料。

(2)把透鏡的3D實體交換檔格式(IGS)轉換成CNC的加工程序碼，分別使用R1、R0.5、R0.25mm 的銑刀，分層逐次加工出透鏡的輪廓，透鏡頂面越外側的輪廓使用R1刀具來加工，越靠近透鏡頂面中央的凹陷處，刀具尺寸需越小才能深入加工，此次加工使用R0.25mm刀具來處理中央凹陷處；加工過程中，更換刀具後，透鏡輪廓會因再次進給而產生加工段差，透鏡表面容易留下加工刀痕。

(3)此時使用粗研磨的方式，初步去除加工段差與刀痕。

(4)接著為了讓表面達到光亮平滑的程度，先用藥劑蒸氣腐蝕透鏡表面，有限度的去除研磨痕跡。

(5)接著細研磨提升透鏡的表面平滑程度。

(6)再腐蝕掉研磨痕跡，去除明顯的刀痕，反覆進行之後。

(7)最後把透鏡表面拋光。

(8)以布清潔透鏡表面的異物。

(9)完成mockup成品。

mockup製作流程如圖4.2所示。

光學mockup的成品精密度無法與光學級模具射出成品的精密度相比，在mockup成品的製程精密度比開模製程來的低的情況下，有必要先瞭解mockup加工外形限制與加工精密度的影響因素，以掌握透鏡成品的製作水準。

CNC直接加工mockup外型，不同於光學模具加工，要把實體模型翻轉，即凹處變凸處，接著再以射出成形的方式再翻轉回來，成為與設計的外形一致；由於模型翻轉的關係，設計的二次光學透鏡的中央處，對於以光學模具的加工來說，刀具深入不會構成困難，再加上光學模具是金屬製，可以承受刀具高速旋轉加工(通常是三萬六千轉以上)，能得到表面光潔度甚高的光學精密模具；反觀mockup的CNC加工，在中央凹處，刀具深入受限於尺寸限制，加工會有所受限，另外，mockup是塑料件，無法承受刀具高速旋轉產生的高溫，僅能使用低速加工(通常是六千轉上下)，造成表面光潔度不佳，足以影響到光學結果。

CNC加工機台的進給精度頗高，加工尺寸誤差一般能在0.05mm以

內，但是手工研磨的精度很低，存在人工作業的許多不確定因素，因此可推估最終mockup成品的精密度一般在0.1mm上下；0.1mm的精密度，已可滿足在一般塑件製造，但應用至光學件的製作，卻足以影響到光強度分佈，此點也是透鏡光學廠不採用mockup做為光學件的開發選項，存在與開模品有落差的潛在風險。

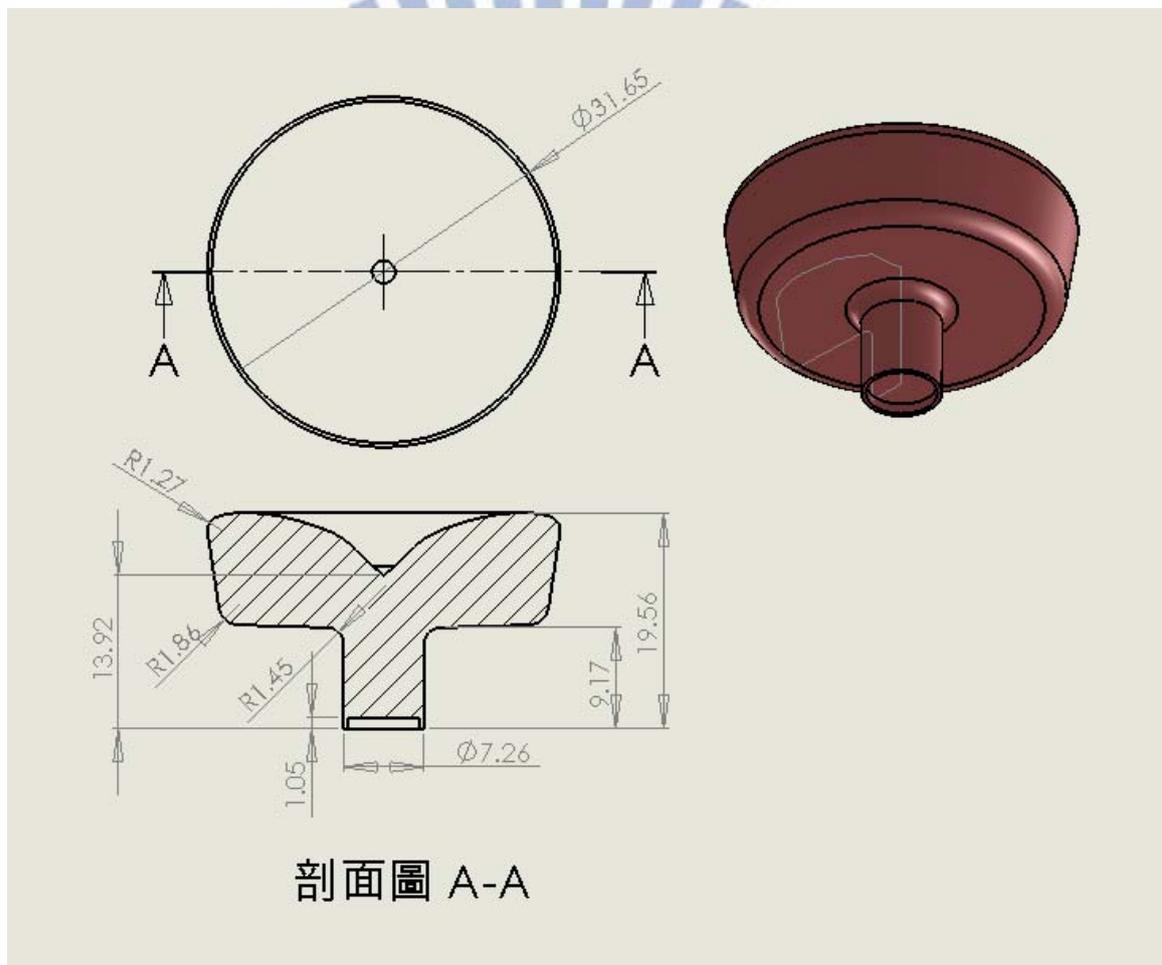


圖 4.1 透鏡重點尺寸圖

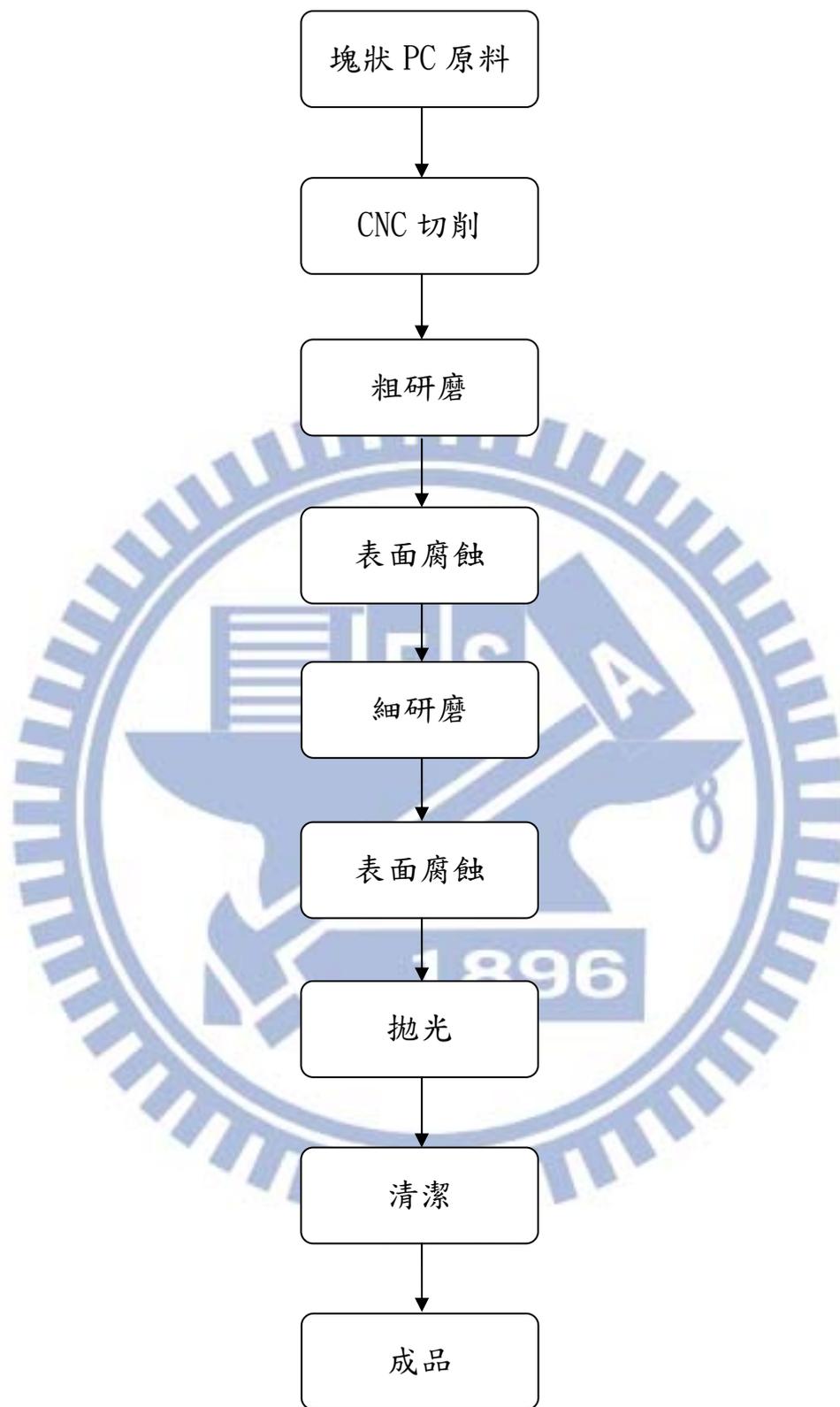


圖 4.2 mockup 製作流程圖

使用市售LED球泡燈的散熱座，把原有的LED拆除，僅留下散熱座供放置本文的LED與設計的透鏡。

LED電源使用AC轉DC定電流變壓器，電流穩定輸入LED 100mA，定電流輸入不隨著時間增加，或LED溫度上升而有所變化，穩定LED的光輸出，能在穩定的輸入狀況下測試光學。

製作好球泡燈各零件，把LED底部的鋁基板貼導熱墊片，用螺絲固定在散熱座，LED的電極連接到定電流變壓器，使用黏膠把透鏡固定在LED上，完成燈具的組裝，相關的燈具成品如圖4.3所示。



圖 4.3 燈具成品圖

#### 4-2 光強度分佈量測條件

量測實驗委託“中原大學照明及色彩研究中心”量測燈具的光強度分佈，“中原大學照明及色彩研究中心”為一所致力教學與研究

為目的而成立的研究中心，量測標準依據具有國家實驗室等級的工研院技術指導，並通過 TAF(財團法人全國認證基金會 Taiwan Accreditation Foundation)認證該實驗室達到國際規範要求，實驗室基於服務校外相關產業的量測需求，接受校外委託量測照明產品的光學特性，提供光學量測報告。

光強度分佈量測系統可量測燈具在空間中的光強度分佈，量測系統須架設在具穩定的環境溫濕度控制暗房；配光曲線量測結果為遠場光強度分佈，遠場光強度分佈接近把光源視為點光源，LED 封裝體本身具有一定的體積大小，非點光源，但在接受器與燈具的距離達到燈具最大發光直徑的五到十倍時，即量測距離在足夠遠的情況下，燈具發光源就能近似為點光源。LED 的光學特性會隨著溫度而改變，為了確保燈具在量測過程中的光學特性保持穩定，測試前須先預熱燈具，待燈具溫度達到平衡，再進行燈具量測。燈具預熱時間會與燈具大小攸關，大型燈具可能需要 1 小時或更久的時間，LED 球泡燈約需 30 分鐘就能達到平衡，藉由量測燈具的固定點的光強度變化來判斷是否達到穩定狀態；量測結果除了燈具各角度的光強度數值以外，量測結果可以轉換成 ies 檔，供光學軟體觀察光形各切面的結果，光強分佈的量測條件規格表如表 4.1，該裝置的測試照片如圖 4.4、4.5、4.6。

表 4.1 光強度量測的條件表

量測項目	量測條件
溫度	$23 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
濕度	$55 \pm 20 \%$
燈具預熱時間	30 分鐘
測試標準	CIE 70 The Measurement of Absolute Luminous Intensity Distributions
準確度	$\pm 2.5\%$
量測距離	6.9 公尺
輸入燈具的電器規格	交流電 110 V、60 HZ
輸入 LED 的電器規格	定電流 100 mA
量測解析度	$\theta$ 5 度、 $\Phi$ 22.5 度
待測物定位	燈具光源平面置於機台旋轉軸中心，以水平儀確認燈具前端平面擺正未傾斜



圖 4.4 量測儀器的旋轉台



圖 4.5 量測儀器的接受器



圖 4.6 燈具置於儀器的夾具上

光強分佈量測儀的量測範圍包含兩個旋轉軸，分別為  $\theta$  軸與  $\Phi$  軸， $\theta$  軸量測正負 180 度，共 360 度， $\Phi$  軸量測 180 度，即可完整量測整個球狀空間的光強度分佈，如圖 4.7 所示。

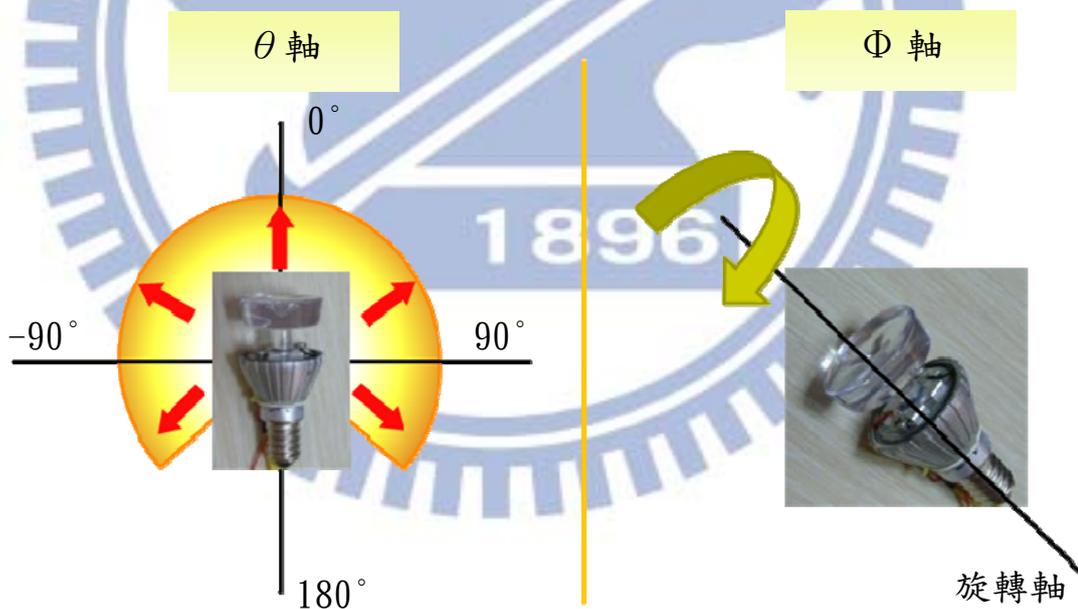


圖 4.7 儀器的量測範圍

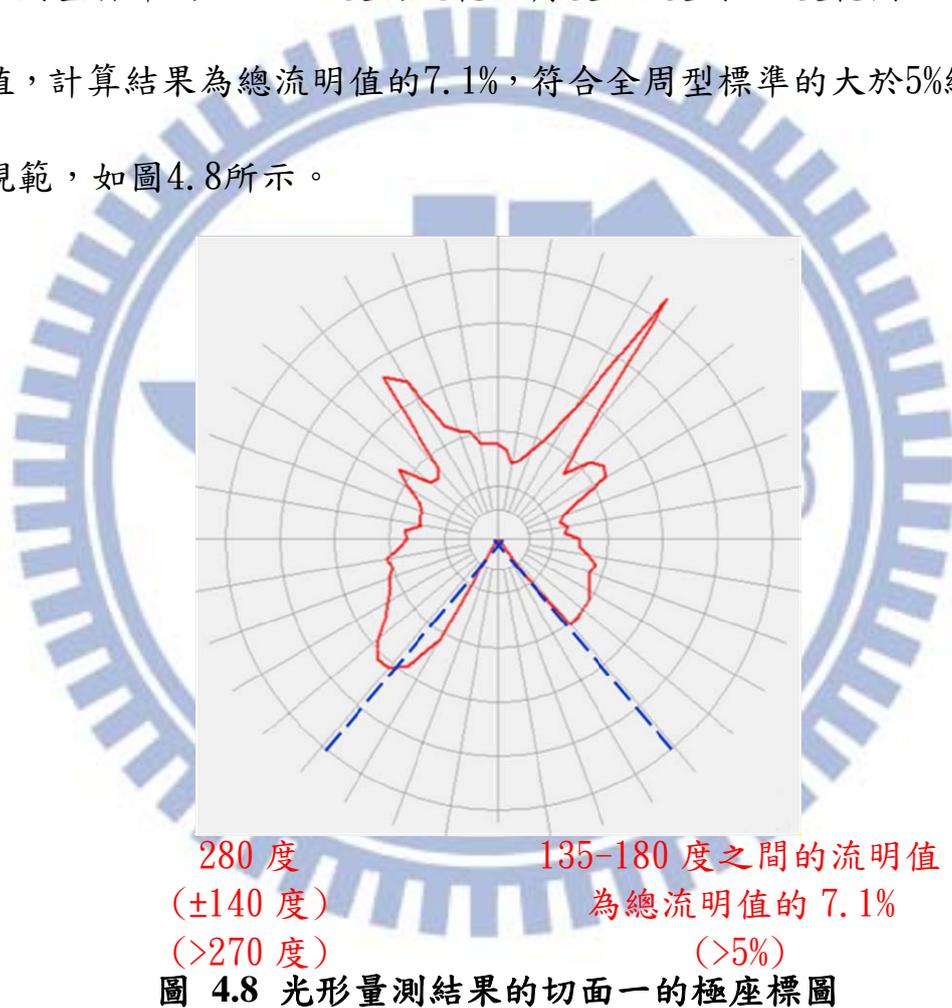
### 4-3 實驗結果

本論文設計的透鏡為軸對稱旋轉結構，理想狀況下，燈具每  $\Phi$  軸的切面光強度分佈會接近；為方便探討，本文取樣量測結果，分別取

用 $\Phi$ 為45度與135度切面的量測結果，跟設計結果進行比較，把 $\Phi$ 45度設定為切面一， $\Phi$ 135度設定為切面二。

#### 4-3-1 切面一的實驗結果

分析切面一的光強度分佈量測結果，角度範圍落於280度內，符合全周型標準的大於270度的規範；角度135度到180度範圍之間的流明值，計算結果為總流明值的7.1%，符合全周型標準的大於5%總流明的規範，如圖4.8所示。



截取-135度至135度之間的光強度分佈圖，切換成卡式座標系統，經換算得到-135度至135度之間的平均強度值為36.9%，把36.9%正規化成1.0，在光強度分佈圖中採雙座標方式，標示1.0於圖上的藍色虛線，黃色虛線標示上下限的範圍，分別各為值1.2與0.8。觀察-135

度至135度之間的能量分佈，計有超過半數的量測點落在符合全周型規範的黃色虛線之內，其他部分的量測點則落在全周型規範之外。接著解析落在全周型規範以外的量測點比例，超過黃色虛線10%處以內計有11個，超過黃色虛線10~20%範圍的計有4個，超過20%以上的計有6個，其中又以正負35度位置的光強度峰值最突兀，如圖4.9所示。

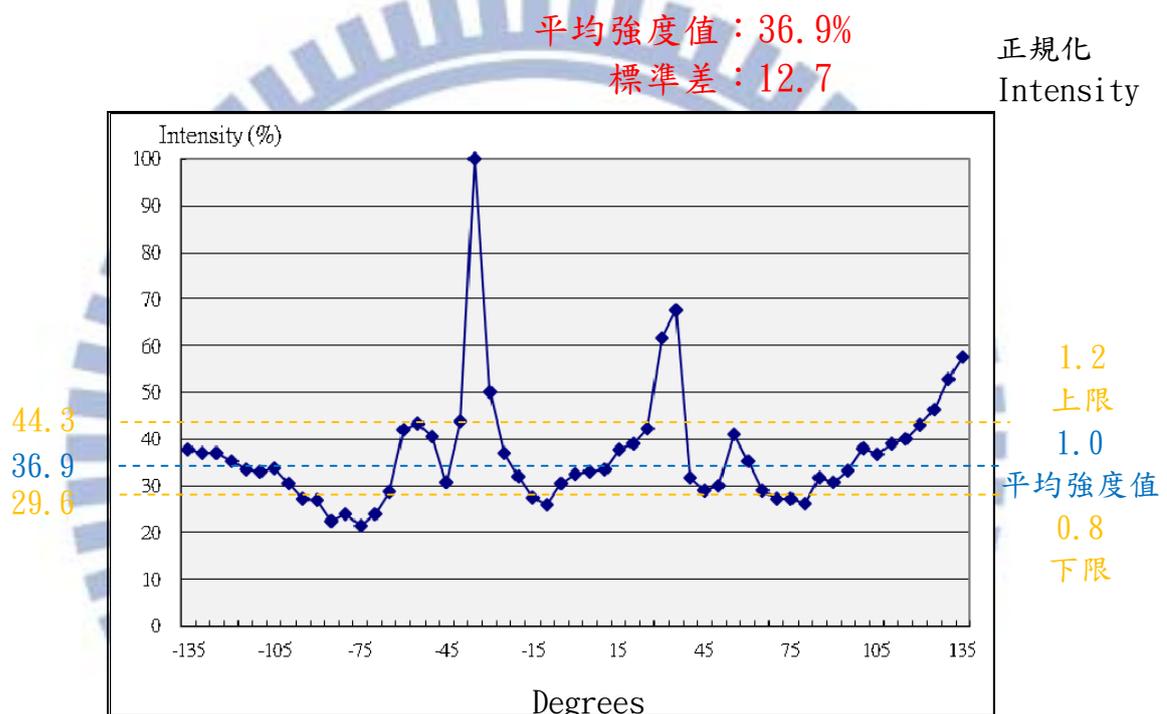
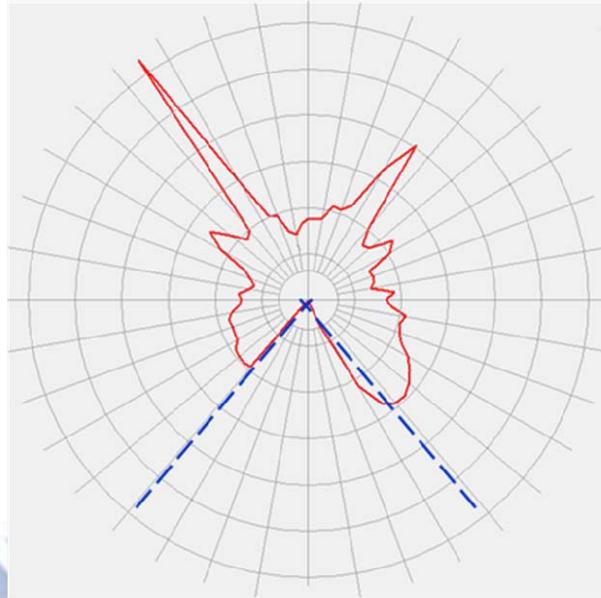


圖 4.9 光強度分佈量測結果的剖面一的卡氏座標圖

#### 4-3-2 切面二的實驗結果

接著分析切面二的光強度分佈量測結果，角度範圍落於280度內，符合全周型標準的大於270度的規範；角度135度到180度範圍之間的流明值，計算結果為總流明值的6.5%，符合全周型標準的大於5%總流明的規範，如圖4.10所示。



280 度  
(±140 度)  
(>270 度)

135-180 度之間的流明值  
為總流明值的 6.5%  
(>5%)

圖 4.10 光形量測結果的剖面二的極座標圖

截取光強度分佈-135度至135度之間的能量分佈圖，切換成卡式座標系統，經換算得到-135度至135度之間的平均強度值為36.9%，把36.9%正規化成1.0，在光強度分佈圖中採雙座標方式，標示1.0於圖上的藍色虛線，黃色虛線標示上下限的範圍，分別各為值1.2與0.8。觀察-135度至135度之間的能量分佈，計有超過半數的量測點落在符合全周型規範的黃色虛線之內，其他部分的量測點則落在全周型規範之外。接著解析落在全周型規範以外的量測點比例，超過黃色虛線10%處以內計有11個，超過黃色虛線10~20%範圍的計有5個，超過20%以上的計有6個，其中又以正負35度位置的光強度峰值最突兀，如圖4.11所示。

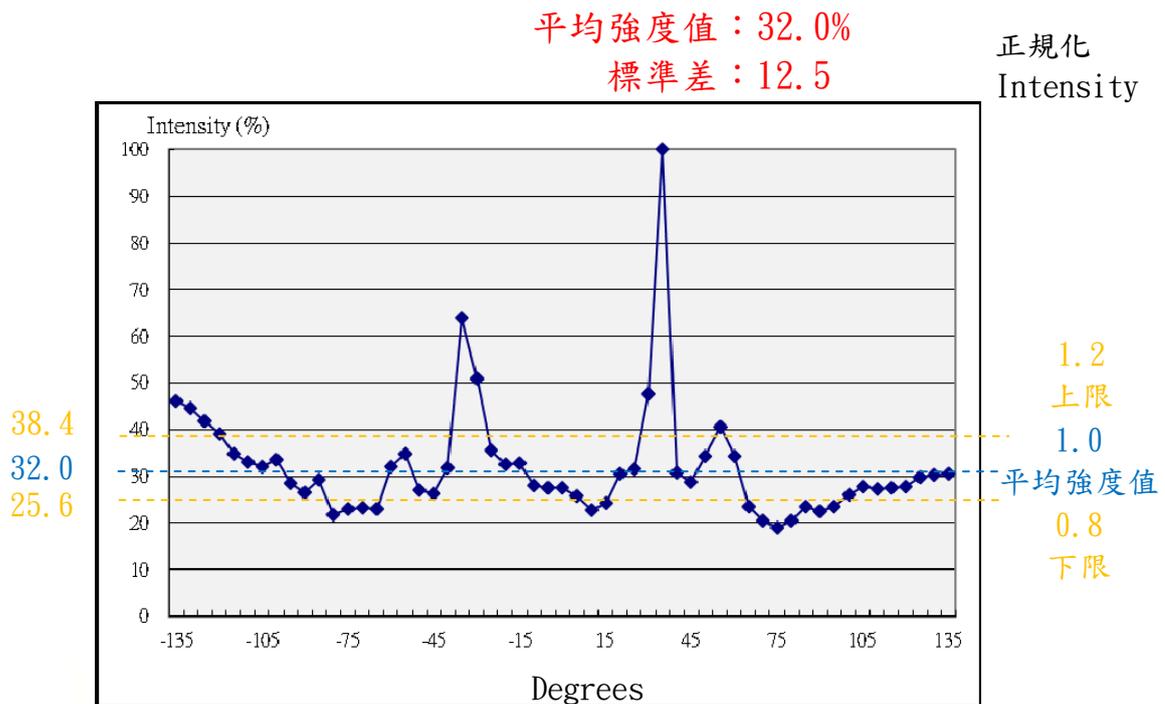


圖 4.11 光強度分佈量測結果的剖面二的卡氏座標圖

#### 4-4 球泡燈實品視覺品味比較

不論球泡燈的型式如何改變，球泡燈所需具備的功能是不變的，球泡燈的功能是照亮環境，以及使用者在照亮的環境中感覺目視均勻且舒適，在達到照亮與均勻的目的後，再盡量節能。照明環境除了要有適當的照度值，也應具有適當的照度均勻度，在照度分佈上，被照物與周圍的環境都需要具有某種程度的照度值，整體的明亮環境才能夠帶來悠閒、舒適感；若是被照物明亮，而被照物周圍的環境是黑暗的，造成視覺上局部區域黑暗的環境，會帶來壓迫感、不舒適感、眼睛疲勞……等不良的感受，當使用者觀看到的照明環境是不佳的，會影響使用者的舒適感與視覺品味，甚至於導致使用者無法快速、清

晰地看到被照物。

觀察本論文設計的LED球泡燈實品的點亮圖，設定LED發光的平面為水平面，由於LED球泡燈的發光角度範圍大的緣故，不僅照亮水平面以上的區域，同時也照亮水平面以下的區域，得到整體明亮的照明環境，如圖4.12。

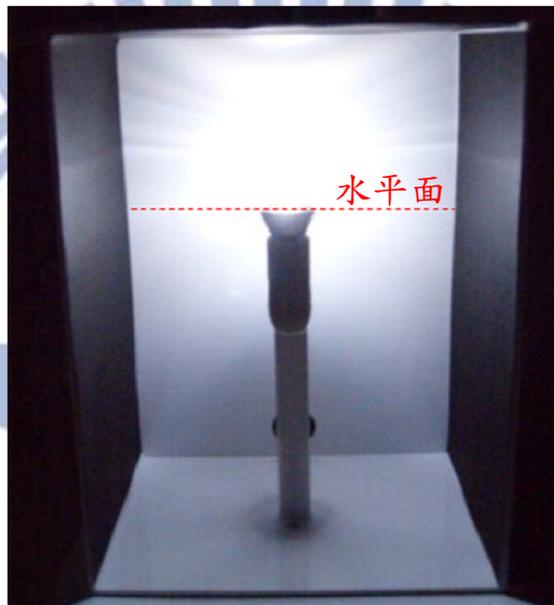


圖 4.12 本論文設計的 LED 球泡燈實品的點亮圖

接著再觀察市面上現有的非全周型的LED球泡燈實品的點亮圖，設定LED發光的平面為水平面，由於LED球泡燈的發光角度範圍比較小的緣故，僅能夠照亮水平面以上的區域，水平面以下的區域的微弱光量，大部份來自於盒面上的漫反射，得到LED球泡燈後方區域過於黑暗的照明環境，如圖4.13。

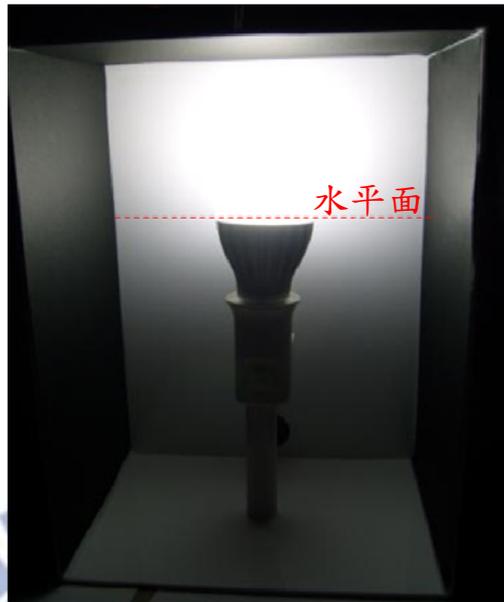
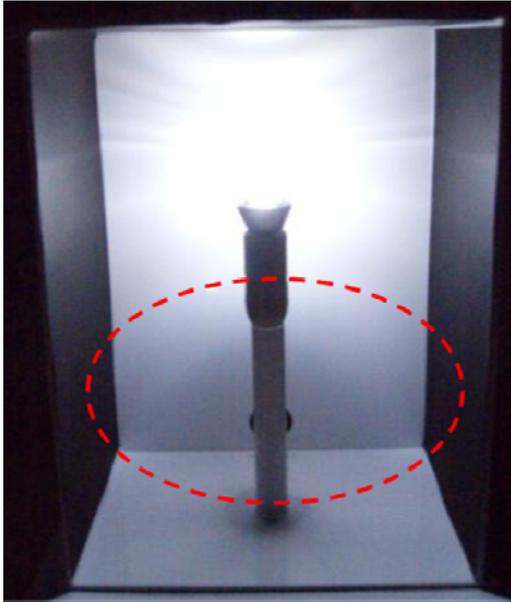
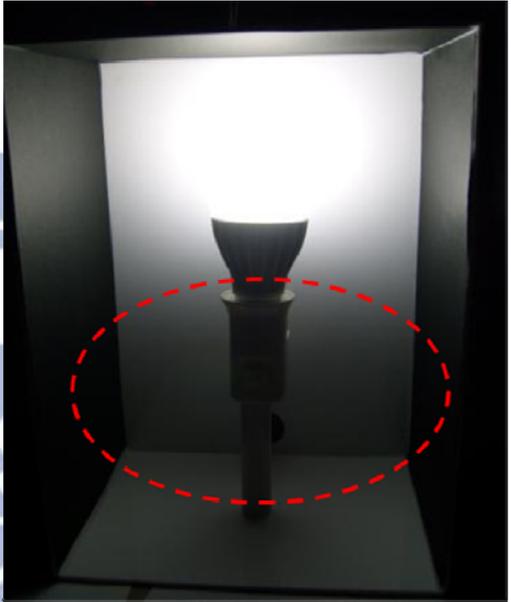


圖 4.13 市面上現有的非全周型的 LED 球泡燈實品的點亮圖

把本論文設計的接近全周型LED球泡燈與市面上現有非全周型LED球泡燈點亮圖做比較，如表4.2，接近全周型LED球泡燈實品能夠照亮整個環境，得到明亮度均勻而舒適的照明環境；市面上現有的非全周型的LED球泡燈則無法照亮LED球泡燈後方的區域，造成LED球泡燈的後方區域較為黑暗，產生視覺上明暗對比過高、不舒適感、壓迫感的照明環境。

表 4.2 球泡燈實品點亮比較表

本論文設計 接近全周型的 LED 球泡燈	市面上現有 非全周型的 LED 球泡燈
	

#### 4-5 實驗結果討論

設計目標主要有三項，由實驗結果的光強度分佈圖可知，已達成兩項設計目標，分別是光強度分佈的角度範圍大於 270 度，以及 135 度到 180 度之間的流明值大於總流明值的 5% 以上，而其中未達規範的項目是正負 135 度之間的均勻度，接續分析未達規範的影響因素與可能改善的對策。

##### 4-5-1 光強度峰值的形成原因

實際量測結果的光強度分佈圖顯示，光強度超出規範最多的位置在 35 度，如圖 4.14，光強度分佈形成峰值，明顯不同於設計均勻的

光形，為了解析此光強峰值的成因，觀察模擬軟體中的設計光路，觀察到透鏡射出 35 度的光線，來自於透鏡頂面的曲面位置，如圖 4.15 箭頭所指的位置，接著再開啟繪圖軟體的斑馬紋功能；斑馬紋是模仿條紋投影至曲面的視覺狀況，藉由斑馬紋檢視曲面在一般顯示模式下難以觀察到的細小變化，例如：曲面中的小綳褶、曲面的曲率連續程度；觀察到透鏡射出 35 度光線的曲面的斑馬紋是平順地連續的，如圖 4.16 所示，發現經由透鏡射出 35 度光線的透鏡輪廓是一段曲率連續的平滑曲面，；連續平滑的透鏡曲面所發出的光強度分佈的變化應該是平緩的，不應該存在突兀的峰值，峰值的突然跳躍產生，代表曲面有驟然的曲率轉折變化，此非設計的曲率轉折，推論發生在透鏡的 mockup 製造尺寸誤差，或是 CNC 加工更換刀具時，刀具加工銜接處的加工誤差.....等，造成 mockup 透鏡的平滑曲面產生非預期的曲率轉折而改變了光強度分布，導致光強度分佈圖出現峰值並超出均勻度的規範。

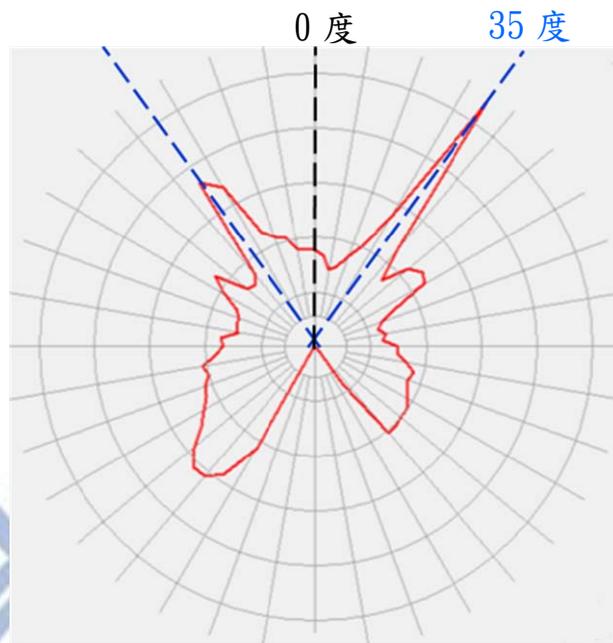


圖 4.14 量測結果的峰值圖

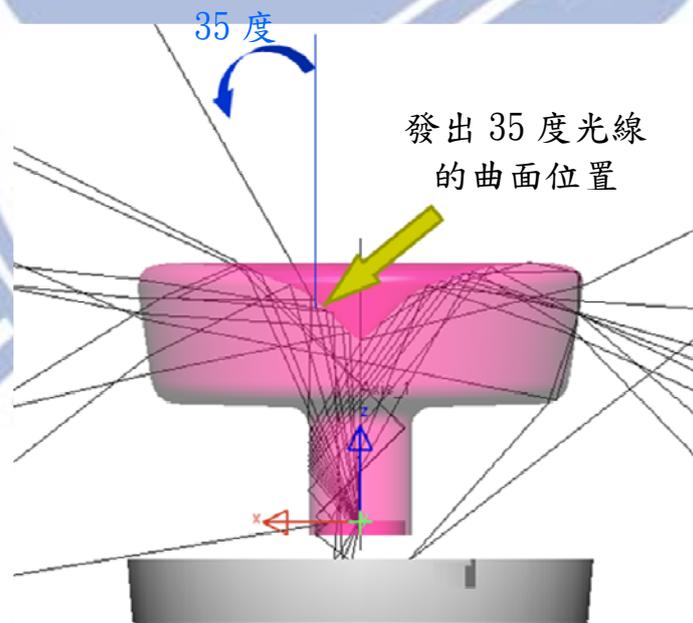


圖 4.15 設計光路圖

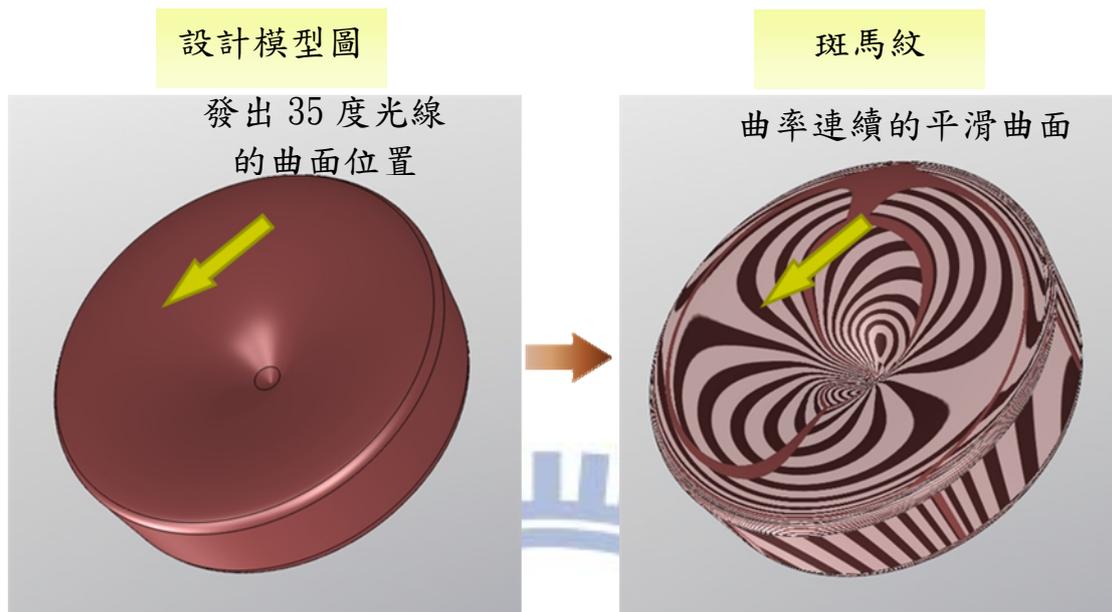


圖 4.16 曲率變化圖

#### 4-5-2 去除光強度峰值與設計結果的比較

由於量測結果的光強度的峰值，非設計所預期的結果，造成的原因可能是 mockup 加工製程所導致，因此在比較實驗結果與模擬設計的光強度分佈差異之前，先把正負 30 度與 35 度的光強度峰值修改為平均值，去除數據最突兀處，再來比較實驗結果與模擬設計的差異，發現排除量測結果的峰值後，量測結果的光強度分佈圖與模擬設計結果相近，如圖 4.13，代表設計模擬方法具有一定程度的正確度，而仍然有幾個角度位置的均勻度未達規範，下一節再進一步檢討可能的因素。

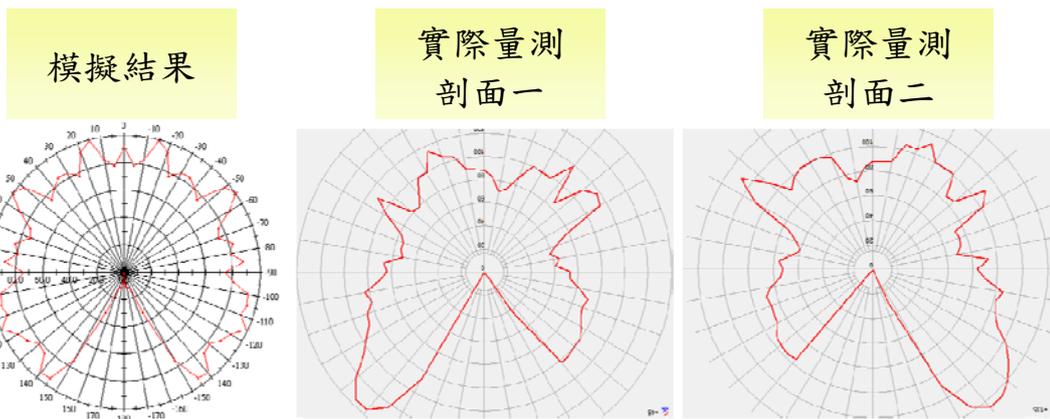


圖 4.17 去除光形峰值的量測結果與模擬設計的光強度分佈圖比較

#### 4-5-3 實驗結果誤差討論

承上節所述，把光強度分佈圖峰值的數據修改後，仍然發現有幾個角度位置的均勻度未達規範，接著列出可能存在的問題，並探討改善的方式：

(1) 研究對象是一款創新型式的透鏡，因此並沒有相關資料可供參考，也是首見新型式的透鏡，難以事先預測成品會發生的問題與狀況，後續增加設計經驗後，也許能逐漸減少問題的數量。

(2) 光強度分佈均勻度未達全周型標準的問題，在光學模擬設計時，透鏡的表面光學特性參數設定為理想光滑表面，為業界精密光學級模具可達到的加工水準，然而本論文透鏡實品是使用 CNC 加工製造，實際透鏡的表面存在加工刀痕與研磨痕跡，而與模擬設定的理想光滑表面不同；推論也可能是 mockup 加工的尺寸誤差，以及更換刀具銜接點的加工誤差，造成光強度分佈均勻度未達規範，接著提出下列的改善方式：

- 一般為了減少加工時間，會使用不同大小的銑刀，在加工過程中，更換刀具後可能存在刀具銜接點的誤差，造成透鏡形成不連續的表面輪廓，為了避免換刀造成的問題，加工過程中，可以僅使用一把最小的刀具，而衍生的缺點則是加工時間變長。
- 使用全新的刀具，避免刀具壽命影響加工品質。
- 使用鑽石刀取代一般碳化鎢刀，應用鑽石質硬耐磨的特性提升加工品質。
- 盡量降低切削的進給量，採用少量多次的輕切削加工。
- 選用精密度較佳的 CNC 機台，提升 CNC 的加工品質。
- CNC 機台與地基連結，減低震動的影響。

(3)本論文的燈具缺少燈泡殼，使燈具的外型不完整，若是搭配燈泡殼可增加燈具的外觀完整度、電路保護性以及美觀性，燈泡殼的輪廓存在倒勾，並為薄殼結構，一般需使用模具射出或射吹製程，若是本論文使用 CNC 製作 mockup 燈泡殼，作法是把大塊 PC 原料使用夾具夾持原料下半部，先完成上半部的加工，再把 PC 原料翻轉並夾持住已完成加工的部分；受限於燈泡殼的薄殼結構，在夾具夾持受力之下容易產生變形，再加上過多的加工刀痕，嚴重影響燈具成品的光強度分佈，因此燈泡殼不適合採用 CNC 製作 mockup。

## 第五章、結論

### 5-1 結論

觀察市面上現有的非全周型的 LED 球泡燈產品，發光角度小且無法照亮 LED 球泡燈下方的區域，無法滿足美國能源之星規範的 LED 球泡燈的全周型標準，發光特性與傳統白熾燈泡有所差異；能源之星的強制性雖然僅局限於美國，而世界各國在訂定規範時，多會參考美國提出的能源之星規範，因此預估未來的 LED 球泡燈的光強度分佈會朝符合全周型規範方向演進；搜尋現有的相關大角度的透鏡專利，提出迴避現有專利並設計出新型全周型透鏡，把設計的球泡燈與市面上現有的非全周型的 LED 球泡燈作實際成品的照明比較。最後把本文內容所探討的：專利迴避設計、光學模擬設計結果與實際驗證結果，總結如下：

1. 透鏡具有單純的導光柱結構，運用導光柱的內部全反射現象，引導 LED 發出的大角度光線，並搭配透鏡頂面的全反射結構，重新分配並調整 LED 發出的光能量；設計完成的二次光學透鏡，透鏡表面單純平滑，一體成型，能用射出製程量產，以單純的方式達成全周型標準規範，發光角度大於 270 度，光強度分佈均勻；有別於其他現有專利的結構，透鏡表面需要添加額外的微小結構，運用微小結構的擴散的光學現象，來放大 LED 球泡燈的發光角度，但是微小結構的加工製

程較為複雜、困難，或是透鏡需具有凸透鏡結構，來集中 LED 發出的大角度光線，再經由折射、全反射現象來放大 LED 的發光角度，雖然能夠達到大角度的光強度分佈，但是專利中並未強調光強度分佈的均勻度，因此不一定能夠達到全周型的標準規範。

2. 設計完成的透鏡，在光學模擬的設計結果能夠滿足全周型的標準規範；接著採用 CNC 加工製作 mockup 透鏡成品，實際量測燈具的光強度分佈，量測結果可以達成全周型的 2 項規範：發光角度範圍達到 280 度，符合全周型標準規範的大於 270 度的要求，以及 135 度至 180 度之間的流明值佔 6 至 7% 的總流明值，符合全周型標準規範的大於 5% 的要求。在光強度分佈的均勻度方面，全周型標準規範要求，-135 度至 135 度之間的光強度需落在平均值的  $\pm 20\%$  以內，實際量測結果有一半以上的量測點符合規範，其他部分的量測點則超出規範，落在規範的邊緣，可以從本文的第四章的光強度分佈量測結果中看到實驗結果。

3. 比較設計完成的 LED 球泡燈與市面上現有非全周型的 LED 球泡燈實際點亮的效果，設計完成的 LED 球泡燈的照明效果相對接近傳統白熾燈泡，發光角度範圍足夠大，能夠照亮整個照明環境，得到明亮度均勻、舒適的照明效果；當使用者因應節能需求而把傳統白熾燈泡更換成本文的 LED 球泡燈後，不會感覺到明顯的照明效果的差異。

4. 二次光學透鏡式的全周型LED球泡燈，市面上仍沒有成熟的產品，各家廠商仍在開發中，相關資訊取得不易，而目前所能取得開發中的產業技術消息是在2012年8月，LED國際大廠Cree發表一篇技術白皮書，內容為採用二次光學透鏡式的全周型LED球泡燈原型，但Cree並沒有推廣，市面上也沒有見到，Cree其餘發表的成熟產品已在市面上販賣，因此推論Cree採用二次光學透鏡式的全周型LED球泡燈尚未成熟；從Cree所發表的產品照片可以看到，Cree的二次光學透鏡並沒有導光柱結構，其透鏡結構與本文不同，由於Cree的全周型LED球泡燈採用二次光學透鏡式，代表二次光學透鏡式為全周型LED球泡燈的未來正確方向之一。能夠達成全周型LED球泡燈的型式，除了二次光學透鏡式以外，尚有Remote phosphor式與立體封裝式，目前Remote phosphor LED球泡燈的售價仍然很高，立體封裝式多顆LED焊接的工時較長，因此提出Remote phosphor式與立體封裝式以外的二次光學透鏡式，作為達到全周型標準規範的方式。

## 5-2 未來展望

研究結果雖然已接近全周型標準規範，但在光強度分佈的均勻度方面，以及光學模擬設計流程方面，仍然未盡完善，需要更深入的研究探討，列舉如下2點：

### 1. 光強度分佈均勻度：

全周型標準規範訂定-135 至 135 度之間的光強度值需在平均強度值的 $\pm 20\%$ 以內。光學模擬設計的均勻度能夠符合全周型標準規範，但在實務上存在製造的變異與誤差，例如透鏡的尺寸、曲率與表面粗糙度等等，造成實際成品與模擬設計的結果存在落差，當落差太大時，甚至可能導致設計失敗；希望未來在光學模擬設計階段，設計出-135 至 135 度之間的強度值達到平均強度值的 $\pm 10\%$ 以內，達成更穩健的設計結果，在設計上預留製程變異的空間，降低製造誤差造成失敗的機會。

## 2. 二次光學的設計方法論：

採用的光學模擬設計過程，並沒有提出系統式的設計方法論，也無進行最佳化設計，設計結果可能非是最佳解；希望進一步的研究，能夠結合系統式的最佳化設計方法論，利用最佳化設計的數值理論，把提出的設計參數，設定成最佳化設計變數，進一步地優化透鏡的曲率與尺寸，提升光強度分佈的均勻度，以得到更接近理想的設計結果。

## 參考文獻

- [1] Nichia NS9W383T LED spec, <http://www.nichia.co.jp>, 2012.
- [2] 史光國，半導體發光二極體及固體照明，全華科技圖書股份有限公司，2005。
- [3] 柏德葳，最受矚目的LED產業市場發展與契機深入剖析，拓璞產業研究所，2010。
- [4] Cree 75-Watt-Equivalent A19-Lamp Reference Design, <http://www.cree.com>, 2012.
- [5] United States Patent, Patent Number:6566824, October 16, 2001.
- [6] 中華民國專利，專利號碼：M426731，September 21, 2011。
- [7] 中華民國專利，專利號碼：I565951，April 30, 2002。
- [8] United States Patent Application Publication, Publication Number:20110227102, February 16, 2011.
- [9] 中華民國專利，專利號碼：M419020，June 10, 2011。

- [10] Akira Terao, Oscar Chao Pujol, Shandor G. Daroczi, Neil R. Kaminar, David D. Smith., Richard M. Swanson, “Recent Developments on the Flat-Plate Micro-Concentrator Module ” , IEEE, 29, pp. 1373-1376, May 2002.
- [11] Mikhail A. Moiseev, Leonid L. Doskolovich1, “Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region” , JOSA A, 29, pp. 1758-1763, September 2012.
- [12] Andreas Timinger, Harald Ries, “Street-lighting with LEDs” , SPIE, 7103, September 2008.
- [13] 劉元欽，「應用田口方法設計聚光微結構用於發光二極體之聚光透鏡」，和春技術學院，碩士論文，2010。
- [14] 謝秀華，「LED準直透鏡設計之研究」，中華科技大學機電光工程研究所，碩士論文，2011。
- [15] 劉凱翔，「具均勻照明之LED準直透鏡」，國立彰化師範大學電機工程學系，碩士論文，2011。
- [16] 郭政宏，「COB LED聚光燈之研究」，國立高雄應用科技大學電機工程系，碩士論文，2011。

- [17] 陳蕙質，「二次光學透鏡之設計應用LED於道路照明模組」，國立成功大學微電子工程研究所碩，博士論文，2011。
- [18] 吳禹賢，「LED路燈透鏡二次光學設計」，國立臺南大學電機工程研究所，碩士論文，2011。
- [19] 林昱熙，「LED高均勻性路燈模擬與設計」，長庚大學光電工程研究所，碩士論文，2011。
- [20] 王荷正，「直下式LED背光模組之二次光學透鏡設計」，虎尾科技大學，碩士論文，2011。
- [21] 張以謨，應用光學-第三版，電子工業出版社，2008。
- [22] EPA Energy Star, <http://www.epa.gov>, 2012.

# 附錄

中原大學照明及色彩研究中心

## 測試報告

報告日期：101年9月14日  
報告編號：LCRC9703235

測試件名稱：LED 燈泡  
委託人：魏紹華



  
照明及色彩研究中心主任

上項測試物品經本中心測試，結果如內文  
本報告含封面/及 9 頁內文，分離使用無效

## 測試報告使用說明

1. 照明及色彩研究中心執行測試所產生之測試結果詳列於本報告內。  
報告之測試結果僅對報告內提及之送測件有效。
2. 報告所列的測試項目及測試方法，經委託及受委託單位雙方同意後，  
進行測試工作。
3. 本報告內之數值是在本中心環境下執行測試所得知正確結果。
4. 報告未得到本中心書面同意，不得任意摘錄複製使用，但全文複製除外。

REP001

中原大學照明及色彩研究中心  
測試報告

報告編號：LCRC9703235

測試件名稱：LED 燈泡  
產品型號：LED 燈泡  
委託單位住址：台北市內湖區民權東路 6 段 280 巷 35 號  
委託單位電話：0933-723-793  
委託單位聯絡人：魏紹華  
送件日期：101 年 9 月 10 日

測試項目：

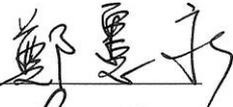
1. 實測功率
2. 電壓
3. 電流
4. 功率因數
5. 電流峰值因數
6. 全光通流明數
7. 發光效率
8. 光束角
9. 最大燭光數
10. 配光曲線圖
11. 卡式座標圖
12. 光度分佈表
13. 照明率
14. 照度/距離關係圖

室內環境溫度： $(23 \pm 3)^{\circ}\text{C}$   
室內相對溼度： $(55 \pm 20)\%$

燈具預熱時間：30 分鐘

測試標準：CIE84-1989 The Measurement of Luminous Flux.  
CIE 70 The Measurement of Absolute Luminous Intensity Distributions.  
CIE63-1984 The Spectroradiometric Measurement of Light Sources.  
IESNA TM-16-05 IESNA Technical Memorandum on Light Emitting Diode  
(LED) Sources and Systems.

品質主管：鄭憲永

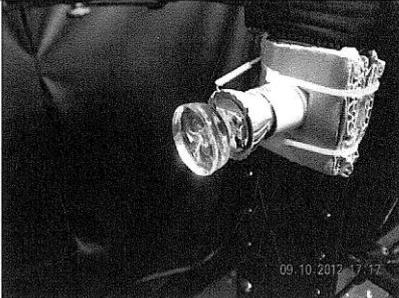


報告簽署人：張謙允



中原大學照明及色彩研究中心  
測試報告

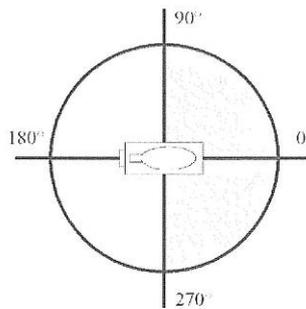
報告編號：LCRC9703235

項目 實驗室 試驗編號	廠牌型號	測試件照片
LCRC-3235	LED 燈泡	

燈具尺寸：3.1cm x 3.1cm x 10cm

\*使用儀器設備

儀器名稱	廠牌 / 型號
多功能電表	Agilent / 34970A+34901A
數位功率計	Chroma / 66202
溫濕度記錄器	SEKONIC / ST-50
偵測頭	CMS / CMS VL-BE
分光儀	Ocean / USB2000+
配光曲線儀	LID600V



第2頁，共9頁

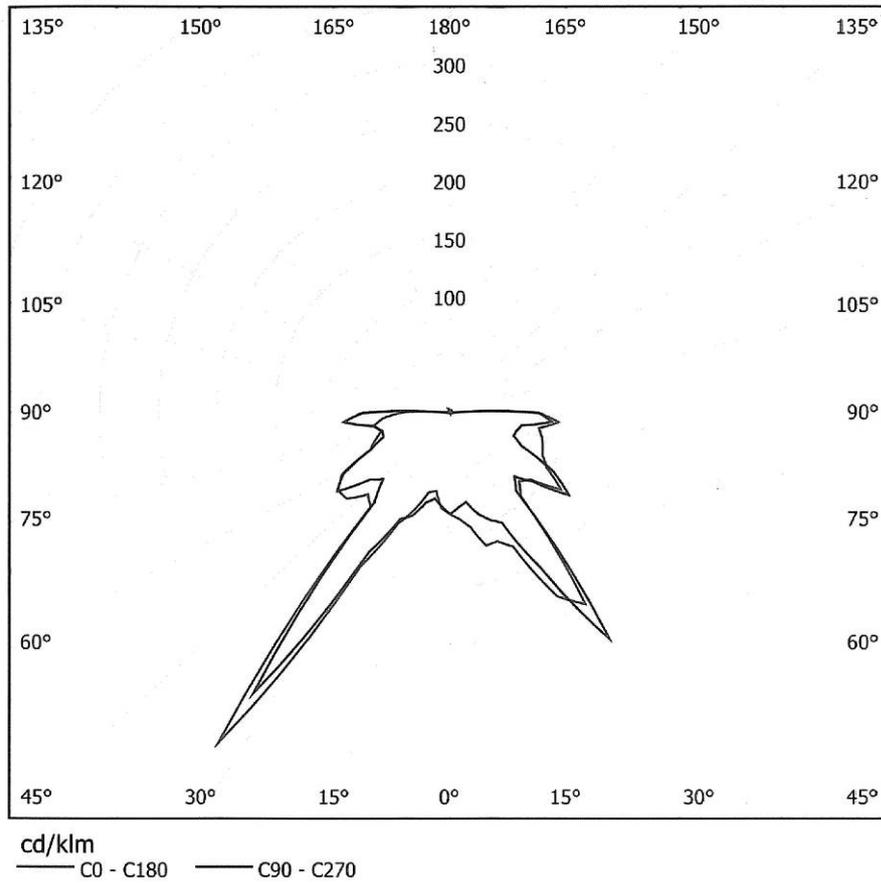
中原大學照明及色彩研究中心  
測試報告

報告編號：LCRC9703235

量測項目	量測結果
實測功率	1.348 瓦
量測電壓	110.8 伏特(60 Hz)
量測電流	0.0312 安培
功率因數	0.3904
電流峰值因數	5.5766
以配光曲線推算全光通量	65 ± 2.5% 流明
發光效率 (以實測功率計算)	≈ 48.22 流明/瓦
光束角 (水平)	183.92 度
光束角 (垂直)	184.25 度
最大燭光數	≈ 23.51 燭光

中原大學照明及色彩研究中心  
測試報告

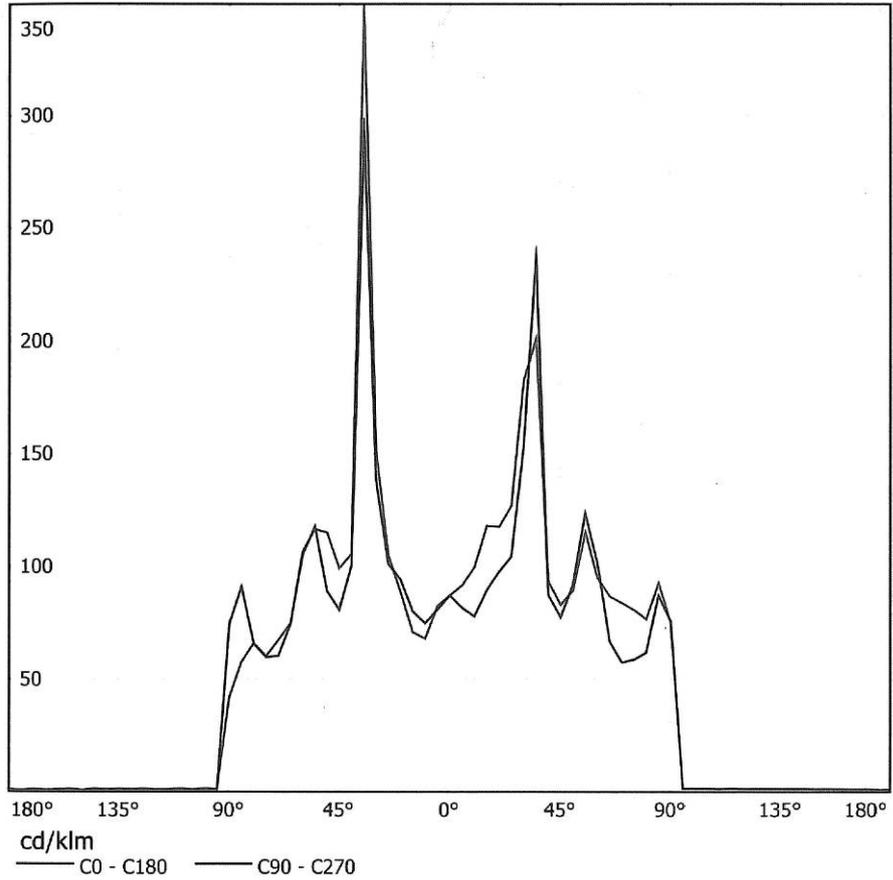
報告編號：LCRC9703235



配光曲線圖

中原大學照明及色彩研究中心  
測試報告

報告編號：LCRC9703235



卡式座標圖

# 中原大學照明及色彩研究中心 測試報告

報告編號：LCRC9703235

	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	360
0	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68	5.68
5	5.97	6.045	5.783	5.497	5.32	5.262	5.321	5.417	5.374	5.406	5.353	5.252	5.269	5.462	5.673	5.831	5.983
10	6.491	6.281	5.872	5.416	5.075	4.781	4.653	4.592	4.44	4.556	4.554	4.685	4.879	5.243	5.765	6.176	6.242
15	7.686	7.166	6.655	6.367	5.832	5.505	4.978	4.785	4.62	4.779	4.837	4.976	5.212	6.034	6.766	7.339	7.454
20	7.653	7.516	6.876	6.704	6.359	6.327	6.283	5.979	5.773	5.614	5.639	5.951	6.128	6.62	6.694	6.914	7.179
25	8.255	8.091	7.426	7.116	6.793	6.661	6.487	6.746	6.835	6.63	6.519	6.59	6.586	6.947	7.304	7.656	7.717
30	11.855	11.492	10.851	10.511	9.971	9.875	9.782	9.713	9.855	9.009	8.801	8.721	8.984	9.91	10.474	10.93	10.963
35	13.075	12.45	11.871	14.847	15.438	17.641	20.564	23.514	22.525	17.785	17.556	20.22	19.135	19.204	13.154	12.59	14.849
40	6.087	5.628	5.581	5.703	5.693	5.998	6.329	6.537	6.869	7.787	7.702	6.955	6.533	6.553	6.516	6.429	6.371
45	5.415	5.205	5.088	4.946	5.052	5.391	5.934	6.4	6.468	6.019	5.422	5.242	5.265	5.174	5.391	5.491	5.244
50	5.82	5.717	5.26	5.179	5.983	6.331	7.058	7.577	7.488	7.581	7.104	6.238	5.803	5.477	5.567	5.642	5.637
55	7.499	7.339	7.208	7.313	8.042	8.394	8.32	7.942	7.595	7.513	7.621	7.603	7.666	7.142	7.174	7.358	7.24
60	6.197	6.294	6.181	6.336	6.625	7.03	7.04	7.041	6.944	7.091	7.408	7.21	6.863	6.663	6.596	6.41	6.267
65	5.659	5.326	5.09	4.68	4.357	4.53	4.812	4.952	4.878	5.136	5.053	5.182	4.866	4.512	4.72	5.087	5.127
70	5.466	5.066	4.779	4.04	3.749	3.888	4.233	4.252	4.397	4.387	4.22	4.296	3.942	4.098	4.804	5.125	5.531
75	5.265	5.242	4.797	4.055	3.829	3.84	3.882	3.887	3.932	3.62	3.769	3.921	3.904	4.24	4.722	4.908	5.148
80	4.998	5.153	4.603	3.98	4.034	4.433	4.214	4.269	4.31	4.28	4.222	4.335	4.28	4.301	4.46	4.65	4.862
85	6.035	5.783	5.578	5.484	5.67	5.847	4.858	4.471	3.765	3.51	3.959	4.859	5.937	5.83	6.039	5.931	6.053

中原大學照明及色彩研究中心  
測試報告

報告編號：LCRC9703235

0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5	360
90	4.884	5.449	5.384	5.025	4.929	4.932	4.863	2.745	4.398	4.75	4.902	4.851	5.159	5.43	5.317	5.25
95	0.118	5.923	5.847	5.444	0.113	5.13	4.81	4.931	0.095	4.6	4.804	4.973	0.08	5.377	5.851	5.828
100	0.115	6.826	6.695	6.461	0.112	5.742	5.367	5.344	0.123	5.023	5.343	5.549	0.065	6.026	6.886	6.939
105	0.108	6.806	6.474	6.034	0.118	5.767	5.692	6.058	0.089	5.937	5.949	5.978	0.081	6.105	6.597	6.571
110	0.109	7.406	6.877	6.188	0.101	5.75	5.597	6.183	0.117	5.729	5.79	5.93	0.064	5.981	6.782	6.875
115	0.111	7.819	7.039	6.117	0.117	5.932	5.656	6.06	0.095	5.722	5.9	5.986	0.073	6.28	7.151	7.179
120	0.104	8.302	7.543	6.421	0.103	5.833	5.689	6.278	0.092	5.636	6.201	6.051	0.075	6.723	8.03	8.202
125	0.109	9.33	8.147	6.628	0.102	6.119	6.43	6.43	0.109	5.88	6.486	1.45	0.062	7.126	8.627	9.025
130	0.109	10.264	9.296	7.223	0.101	6.212	6.186	6.186	0.096	6.005	6.519	0.107	0.081	7.494	9.175	9.854
135	0.106	10.551	10.108	1.211	0.1	6.282	6.598	6.598	0.104	6.245	6.647	0.072	0.065	1.531	9.5	10.059
140	0.109	10.146	10.1	0.19	0.098	6.183	6.836	6.836	0.094	6.299	6.655	0.077	0.079	0.182	9.492	9.774
145	0.107	9.35	9.293	0.61	0.099	6.113	6.516	6.516	0.11	6.11	2.766	0.069	0.073	0.221	8.866	9.111
150	0.103	7.417	6.933	0.099	0.087	6.081	6.611	6.611	0.072	5.361	0.117	0.08	0.069	0.069	7.059	7.805
155	0.101	0.112	0.116	0.097	0.09	0.089	0.092	0.089	0.105	0.335	0.078	0.073	0.084	0.077	1.923	4.633
160	0.097	0.107	0.115	0.093	0.082	0.082	0.1	0.094	0.087	0.079	0.084	0.075	0.056	0.072	0.063	0.069
165	0.092	0.113	0.095	0.091	0.078	0.087	0.09	0.093	0.076	0.083	0.072	0.074	0.079	0.07	0.093	0.082
170	0.099	0.084	0.103	0.086	0.086	0.077	0.088	0.082	0.099	0.079	0.089	0.08	0.071	0.077	0.061	0.065
175	0.083	0.099	0.088	0.086	0.064	0.08	0.086	0.09	0.062	0.091	0.085	0.082	0.069	0.057	0.089	0.084
180	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087

光度分佈表

中原大學照明及色彩研究中心  
測試報告

報告編號：LCRC9703235

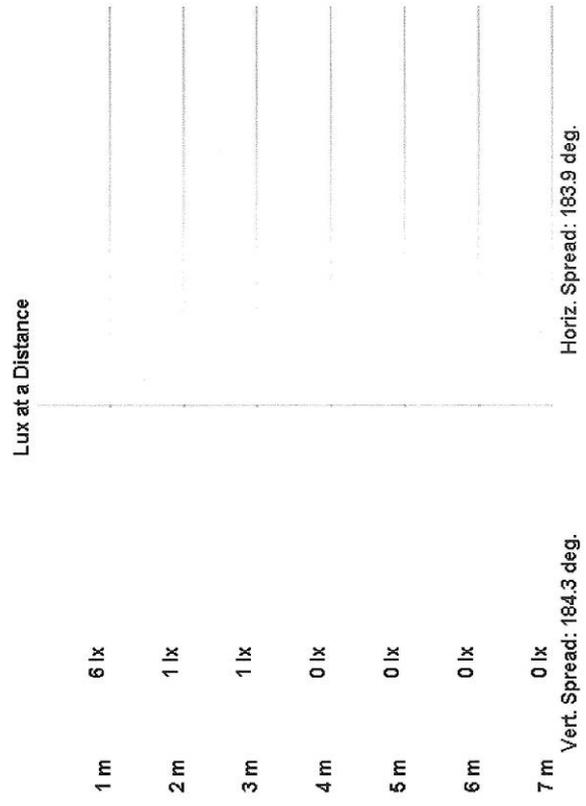
Coefficients Of Utilization - Zonal Cavity Method

RCC %:	Effective Floor Cavity Reflectance: 20%																		
	80			70			50			30			10			0			
	70	50	30	70	50	30	70	50	30	70	50	30	70	50	30	70	50	30	
RW %:	1.09	1.09	1.09	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
RCR: 0	.96	.90	.85	.80	.89	.84	.80	.84	.80	.89	.84	.80	.84	.80	.89	.84	.80	.84	.80
1	.86	.77	.70	.63	.72	.65	.63	.72	.65	.63	.72	.65	.63	.72	.65	.63	.72	.65	.63
2	.78	.67	.58	.51	.72	.62	.55	.62	.55	.54	.48	.43	.46	.41	.37	.39	.35	.32	.28
3	.71	.59	.49	.42	.66	.55	.46	.55	.46	.47	.41	.35	.40	.35	.31	.34	.30	.27	.23
4	.65	.52	.43	.36	.60	.48	.40	.48	.40	.42	.35	.30	.36	.30	.26	.30	.26	.23	.19
5	.60	.46	.37	.31	.55	.43	.35	.43	.35	.37	.31	.26	.32	.27	.23	.27	.23	.19	.17
6	.55	.41	.33	.26	.51	.39	.31	.39	.31	.34	.27	.22	.29	.24	.20	.25	.20	.17	.14
7	.51	.37	.29	.23	.47	.35	.27	.35	.27	.31	.24	.19	.26	.21	.17	.22	.18	.15	.12
8	.47	.34	.26	.20	.44	.32	.24	.32	.24	.28	.22	.17	.24	.19	.15	.21	.16	.13	.11
9	.44	.31	.23	.18	.41	.29	.22	.29	.22	.25	.19	.15	.22	.17	.13	.19	.15	.12	.10
10																			

照明率

# 中原大學照明及色彩研究中心 測試報告

報告編號：LCRC9703235



照度/距離關係圖

## 本實驗室秉持

以信實的態度、專業的精神、精準的過程，提供高品質的服務。

您的意見是實驗室進步的動力，感謝您的支持!

中原大學照明及色彩研究中心

320 中壢市中北路 200 號

TEL/FAX : 03-2656207