

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

應用於水下環境的光譜可調式 LED

光學特性研究

Characteristic research on a spectrum adjustable LED
light applied in underwater environment

研究生：林正斌

指導教授：洪景華 教授

中華民國 一百零二年 七月

應用於水下環境的光譜可調式 LED 光學特性研究
Characteristic research on a spectrum adjustable LED
applied in underwater environment

研究生：林正斌

Student: Chiung-Bin Lin

指導教授：洪景華 教授

Advisor: Dr. Ching-Hua Hung



July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零二年七月

應用於水下環境的光譜可調式 LED

光學特性研究

研究生：林正斌

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

摘要

水下照明一直以來是許多人在研究的課題，常用的鹵素燈、白熾燈泡雖然在空氣中具有高演色性，但在水中會受到吸收和散射等因素所影響，導致其演色性降低，在需要攝影的情況時甚至需要輔助光源的幫忙。而 LED 具有發射出的光波長集中的特性，在空氣中此為 LED 無法達到傳統燈泡之演色性的缺點，然而在水中甚至在霧中或濃煙中，其個別色光的可調節性可用來改變 LED 的混光進而改善演色性。

本研究之長程目標在於利用一新型多晶片 LED 光源來開發一可應用於高散射環境裝置。希望藉由調整電流改變 LED 混光的特殊作法，來達到針對不同的散射情況下改善演色性的需求。現階段的研究將先針對該多晶片 LED 光源進行初步實驗，量測其在水下的光學特性，並驗證其可改善水下演色性不佳的問題；同時嘗試透過光學模擬軟體 TracePro，針對 LED 光源在水下的照射進行模擬，並與實驗結果相互比較，以建立可用於水下 LED 照明裝置之設計模式。

關鍵字：LED、水下、混光、演色性、散射

Characteristic research on a spectrum adjustable LED applied in underwater environment

Student: Chiung-Bin Lin

Advisor: Dr. Ching-Hua Hung

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Underwater lighting has been the subject of many researchers. Although commonly used halogen lamps and incandescent bulbs have high CRI in the air, they are affected by absorption and scattering in water, resulting in lower CRI. In case of photography, an auxiliary light source is even needed. LED has a characteristic of concentrated emitting wavelength, so LED can not reach the traditional lamp's high CRI; however, in the water or even in fog or smoke environment, the adjustable light color in LED can control the color mixing to improve the CRI.

The long term goal of this research is to develop a device which can be applied in a high scattering environment by using a new multi-chip LED light source. Adjusting the electrical current to change the color mixing can improve CRI in different scattering environment. Preliminary experiments were performed by using the multi-chip LED light source to measure its optical properties in the water, and verify that this LED can improve the problem that LED has a lower CRI in the water. The LED's underwater illumination was also simulated by optical simulation software TracePro, and compared with the experimental results in order to build the design model which can be used in underwater LED devices.

Keyword: LED, Underwater, Color mixing, CRI, Scattering

誌謝

在這兩年的碩士生涯裡，首先感謝指導教授洪景華教授，即使他那麼的忙碌，仍然對我們的研究進行仔細的指導，也會關心我們的日常生活，也會對我們分享人生經驗，讓我們受益良多。

在研究過程中，要感謝實驗室的成員們，感謝麒楨、銘傑、彥彬和志嘉學長即使忙於畢業也仍然不辭辛勞的教我們，特別感謝明輝學長，即使為忙碌的在職學生，也對我的研究進行許多的幫忙，也感謝與我同屆的同學們，會與我同樂的榆文和毅恆，總是一起打遊戲，實驗室的開心果文玉，帶給實驗室許多歡樂，感謝學弟在我忙於實驗時還來幫忙，感謝所有實驗室的人帶給我兩年的快樂

感謝爸爸、媽媽的支持及鼓勵讓我能無後顧地進行研究，讓我能順利完成學業。

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
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. 文獻回顧.....	2
1.3. 研究動機與目的.....	5
1.4. 研究方法與步驟.....	6
1.5. 論文架構.....	6
第二章 光學基礎理論.....	7
2.1. 光學性質.....	7
2.1.1. 反射與折射.....	7
2.1.2. 吸收與散射.....	9

2.1.3.	色溫.....	11
2.1.4.	色差.....	11
2.1.5.	演色性.....	12
2.2.	光度學.....	13
2.3.	人對光的感覺.....	14
第三章 MC-E LED 照明實驗.....		16
3.1.	光源元件.....	16
3.2.	實驗目的.....	16
3.3.	實驗規劃.....	17
3.4.	實驗設備與量測設備.....	20
3.5.	實驗結果與討論.....	24
3.5.1.	LED 照度實驗.....	24
3.5.2.	LED 演色性實驗.....	31
第四章 光學模擬.....		34
4.1.	光學模擬軟體.....	34
4.2.	建立模型.....	35
4.2.1.	光源模型建立.....	35

4.2.2.	水槽(環境)模型.....	38
4.2.3.	反光杯模型.....	38
4.2.4.	完整模型.....	39
4.3.	模擬結果.....	40
第五章	結果與討論.....	46
5.1.	模擬與實驗比較.....	46
5.2.	誤差討論.....	50
第六章	結論與未來展望.....	53
6.1	結論.....	53
6.2	未來展望.....	54
參考文獻	56

表目錄

表 3. 1 紅光於空氣中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：LUX)	26
表 3. 2 綠光於空氣中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：LUX)	26
表 3. 3 藍光於空氣中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：LUX)	26
表 3. 4 紅光於水中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：LUX)	29
表 3. 5 綠光於水中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：LUX)	29
表 3. 6 藍光於水中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：LUX)	29
表 3. 7 在空氣中可獲得之最佳演色性及其相對應晶片電流	31
表 3. 8 調整電流前的演色性	31
表 3. 9 調整電流後在水中不同距離下可獲得之最佳演色性及其相對應晶片電流	32
表 4. 1 光源資料表[12]	36

圖目錄

圖 1.1 在不同發光角度下的水下照度圖[4].....	3
圖 1.2 增加圓柱前後之透鏡側視圖[5]	3
圖 1.3 增加圓柱前後之光強度分佈圖[5].....	4
圖 1.4 專利 US20120268945 圖示[6].....	4
圖 2.1 反射定理.....	8
圖 2.2 折射定理.....	9
圖 2.3 CIE xy 色度圖與普朗克軌跡	11
圖 2.4 立體角	13
圖 2.5 人眼對光的敏感度圖	15
圖 2.6 KRUIHOF CURVE [10].....	15
圖 3.1 XLAMP MC-E	16
圖 3.2 實驗流程圖	17
圖 3.3 水槽示意圖	18
圖 3.4 量測水槽(遠照).....	18
圖 3.5 量測水槽(水箱蓋).....	19
圖 3.6 量測水槽(排水孔).....	19
圖 3.7 量測水槽(量測位置及光源固定位置).....	20
圖 3.8 MC-E 照明裝置.....	21

圖 3.9 電源供應器	21
圖 3.10 光源與控制器組合圖.....	22
圖 3.11 UPRTEK MK350 手持式光譜儀.....	22
圖 3.12 熱電偶位置.....	23
圖 3.13 數位溫度感測器	23
圖 3.14 反光杯.....	24
圖 3.15 光源與反光杯.....	24
圖 3.16 LED 在空氣中溫度對時間關係圖	25
圖 3.17 在 300 毫安培下空氣中各色光的照度值	27
圖 3.18 在 300 毫安培下空氣中各色光的效率百分比.....	28
圖 3.19 LED 在水中溫度對時間關係圖.....	28
圖 3.20 在 300 毫安培下水中各色光的照度值.....	30
圖 3.21 在 300 毫安培下水中各色光的效率百分比	30
圖 3.22 演色性改善圖	33
圖 4.1 MC-E 波長分佈圖[12].....	36
圖 4.2 MC-E 配光曲線圖[12].....	37
圖 4.3 紅光波長分佈圖(SURFACE SOURCE PROPERTY GENERATOR)	37
圖 4.4 配光曲線圖(SURFACE SOURCE PROPERTY GENERATOR).....	37
圖 4.5 反光杯模型.....	39

圖 4.6 完整模型圖	39
圖 4.7 光線追跡圖	40
圖 4.8 在水中 1M 處藍光(上)、綠光(中)、紅光(下)照度圖	41
圖 4.9 模擬在 300 毫安培下空氣中各色光的照度值.....	42
圖 4.10 模擬在 300 毫安培下空氣中各色光的效率百分比.....	42
圖 4.11 模擬在 300 毫安培下水中無散射各色光的照度值.....	43
圖 4.12 模擬在 300 毫安培下水中無散射各色光的效率百分比.....	43
圖 4.13 模擬在 300 毫安培下水中有散射各色光的照度值.....	44
圖 4.14 模擬在 300 毫安培下水中無散射各色光的效率百分比.....	44
圖 5.1 空氣中模擬與實驗之照度值比較圖.....	46
圖 5.2 空氣中模擬與實驗之效率百分比比較圖	46
圖 5.3 水中未加散射的照度值模擬與實驗比較圖	47
圖 5.4 水中未加散射的效率百分比模擬與實驗比較圖.....	48
圖 5.5 水中加散射的照度值模擬與實驗比較圖	49
圖 5.6 水中加散射的效率百分比模擬與實驗比較圖.....	49
圖 5.7 調整後散射曲線(綠線).....	52
圖 5.8 調整散射數值後模擬的水中效率百分比.....	52

第一章 緒論

1.1. 前言

LED(Light Emitting Diode)的發明可追溯至 1907 年，H. J. Round 發現碳化矽結構具有發光的能力，接著到了 1962 年，第一顆可見光 LED 問世，其材料為砷化鎵 (GaAsP)，發出來是 655nm 的紅光，但發光效率依然不夠到可商業化的程度。直到 1993 年日亞化學公司 (Nichia Chemical Corporation) 成功的製造出較高效率的藍光 LED，緊接著在 1996 年發展出白光 LED，使得 LED 照明產業開始受到重視，業者紛紛投入研究，讓 LED 的技術進步速度大幅增加，每顆 LED 平均輸出的能量也越來越高。2006 年歐斯朗半導體公司 (OSRAM Opto Semiconductors Corporation) 已發展出了在 700 毫安培下可發出 400 流明的白光 LED，2012 年 4 月 CREE 公司也推出了功率高達 254 lm/w 的 LED [1]。

與傳統燈泡相比，LED 具有高效率、低耗電量、低發熱量、使用壽命較長的優點，而且不像日光燈管一樣含有液態汞，因此沒有污染的問題，所以 LED 照明正逐漸的取代傳統燈泡照明。然而 LED 具有發射的光波長集中的特性，因此目前 LED 照射出白光的方式大致有兩種：(1)以紅、綠、藍三原色晶片混光；(2)以藍光晶片為底上面

塗上黃色螢光粉以激發混合出白光。而在 LED 的照明應用設計上則大致分為三種：(1)將封裝好的 LED 以陣列的方式排列直接照射；(2)利用反光杯將光線反射，以達到匯聚光線的目的；(3)利用透鏡產生折射或全反射，以達成所需之光型。

隨著 LED 的發展，近幾年來也將嘗試其應用在水下環境。傳統應用在水下的鹵素燈或白熾燈泡光源，其波長分佈無法因應環境加以調整，所以除了耗電外還有導致被照物顏色失真的問題。而 LED 本身發出的光波長是集中的，可依據所需調整某色光之光強度，因此在此情況下應用範圍較為廣泛。

1.2. 文獻回顧

Hardy 等人[2][3]針對 LED 的所需功率、發光效率、溫度、使用壽命、色溫、發光波長等各項特性進行分析，認為其可以解決傳統水下載具體積過於龐大且外型難以變化的缺點，不過其並未對 LED 進行實驗加以探討。

在 LED 設計上趙[4]利用平均餘弦的方法分析 LED 在水下的散射情形並將 LED 光源建立於模擬軟體內，針對水下燈柱之 LED 的發光角度(圖 1.1)及排列方式進行模擬，最後進行實驗與模擬相互驗證。

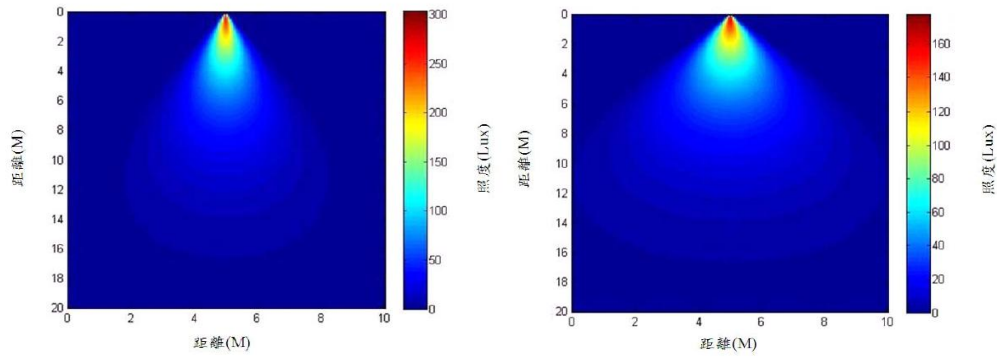


圖 1.1 在不同發光角度下的水下照度圖[4]

而張[5]則利用模擬軟體對白光 LED 的 RGB 混光進行光學透鏡之最佳，利用在透鏡側面增加圓柱(圖 1.2)改善光強度分佈(圖 1.3)成功的在一定體積的光學元件內將其發光角度縮小至 50 度以內並提高了光強度。

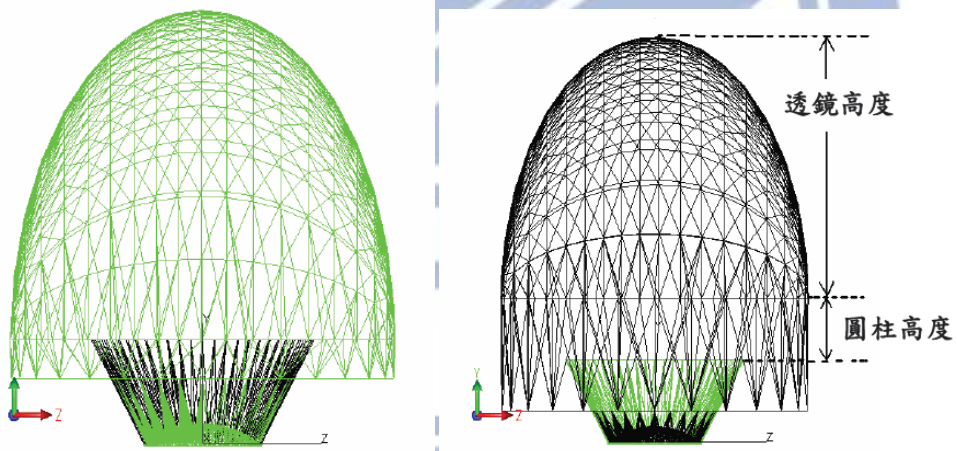


圖 1.2 增加圓柱前後之透鏡側視圖[5]

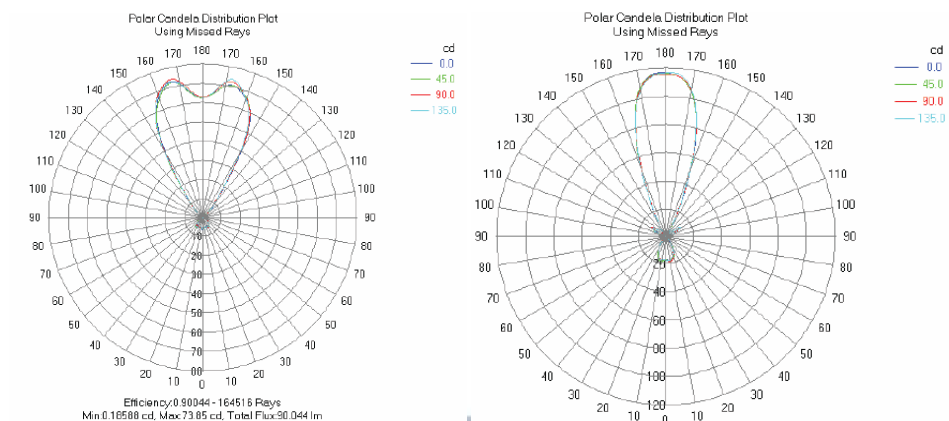


圖 1.3 增加圓柱前後之光強度分佈圖[5]

Olsson[6]則是藉由將透鏡之形狀改變成圓球形使其能依據情況變更發光角度且改善 LED 的照明效果(圖 1.4)。

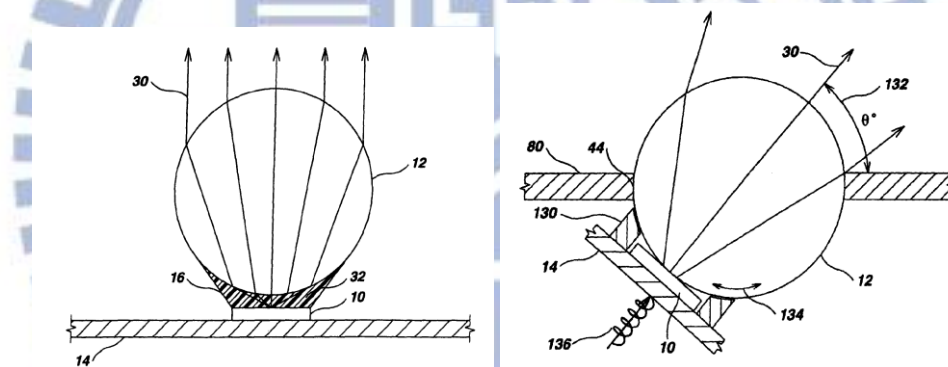


圖 1.4 專利 US20120268945 圖示[6]

廖[7]則針對火災場中對光線造成散射的煙霧及水霧粒子進行討論並加以設計出應用於火災場的照明裝置，且針對此進行模擬與實驗並加以比較。

在演色性方面，林[8]針對市面上的可調色溫式 LED 照明裝置，計算出其色溫變化對演色性的關係並針對人實際感受到的差異進行實驗。

1.3. 研究動機與目的

在目前LED照明裝置的演色性要求，大多以投射出來的光線能在一般環境下達到自然白光為目標。然而在一些特殊的環境下，如火場照明、水下探勘等，常因為懸浮粒子過多導致散射情況遠比在空氣中嚴重，使得在相同的光線下，這些場合的照明效果遠遠不及在正常環境，進一步造成許多危險的情況。而導致照明效果不如預期的主要原因是由於在這些環境下不同波長的光散射跟吸收的程度有所不同，所以衰減情形有所差異，以致於到達照射面的波長分布不如預期，進而影響照明品質。

近年來，CREE公司發展出了一顆名為XLamp MC-E的LED，其在小體積的光學封包內，含有4顆LED晶片，且此4顆晶片可根據需求選擇紅光、藍光、綠光或白光晶片，且可各別調節各晶片電流，改變各晶片出光時的光通量，藉由應用此產品或許能解決散射環境對LED的影響。

現階段本研究的目的為量測MC-E光源於水下的光學特性，並驗證可藉由調整電流值，改變三原色光的比例進而改善演色性，接著將針對實驗建立水中照射模型，模擬水中的散射情況，並與實驗相互比較，以期能藉以建立一適用於水下或其他散射環境之照明裝置的設計模式。

1.4. 研究方法與步驟

本研究希望藉由LED具有能發射集中波長之色光的特性，將發射紅光、綠光、藍光之LED晶片混合搭配，再配合電流的調整，使其能在不同情況下使用不同的波長照度組合達到更好的演色性。

本研究將首先針對一MC-E LED光源進行實驗，量測其光學特性，量測其在自來水中1公尺、2公尺和3公尺的照度值及演色性，並討論在不同波長照度組合下演色性的變化，接著將針對實驗狀況建立數值模擬模型，以TracePro模擬水下的照度值，並與實驗結果做比較以驗證其準確性。

1.5. 論文架構

本論文共分為六章，本章先就本研究進行背景介紹後，後續各章將分為：

- (第二章) 光學基礎理論：介紹將應用到的光學理論。
- (第三章) 光學量測實驗：量測 MC-E 光源的光學特性。
- (第四章) 光學模擬：建立模型模擬 MC-E 光源在水下的照射情形。
- (第五章) 結果與討論：討論模擬與實驗值及誤差發生的可能原因。
- (第六章) 結論與未來展望

第二章 光學基礎理論

2.1. 光學性質

光學研究光的現象，主要由探討光學元件的幾何特徵尺寸來區分，如果光學元件的特徵尺寸為原子等級，則使用量子光學去探討光與原子間的作用，如果特徵尺寸在波長等級，則使用物理光學去探討光的波動性質，如果特徵尺寸遠大於波長等級，則使用物理光學去探討光線的路徑。本研究所使用之光學元間均遠大於波長等級，因此採用幾何光學來加以分析。

2.1.1. 反射與折射

當光射入某一不同介質的界面後，會產生反射與折射，而光反射定律指的是入射光線與反射光線與法線之夾角相等，如下頁圖 2.1 中所示，IA 表示入射線而 RA 則為反射線，而法線 NA 定義為與交界面垂直於 A 點且與 IA 和 RA 位於同一平面上，此時 IA 與 NA 所夾之角為入射角 θ 而 RA 與 NA 所夾之角為反射角 ϕ'' ，根據反射定律，反射角等於入射角，即

$$\phi'' = \phi \quad (2.1)$$

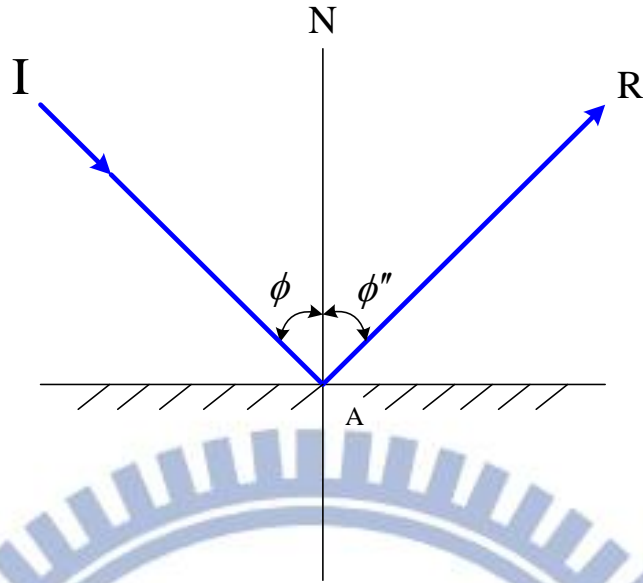


圖 2.1 反射定理

折射定律又稱為司乃耳定律(Snell's law)，如下頁圖 2.2 所示，其定義為當光線入射某一介質後，其入射角之正弦值和折射角之正弦值的比值為一常數。即

$$\frac{\sin \phi'}{\sin \phi} = \text{常數} \quad (2.2)$$

若光線從真空中入射則定義此常數為折射率，意即在真空中折射率定為 1。如果再折射率為 n 及 n' 之兩種物質之交界面折射時，折設定律可寫成對稱型式

$$n \sin \phi = n' \sin \phi' \quad (2.3)$$

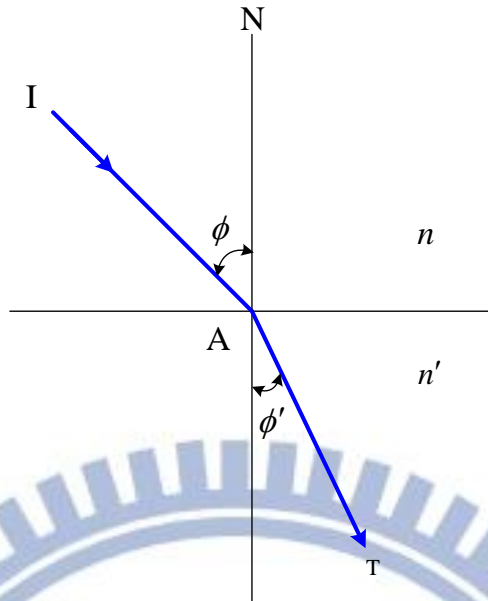


圖 2.2 折射定理

通常光通過介質時會部分反射、部分折射，如果光線由高折射率介質進入低折射率介質時，折射角會小於入射角，因此入射角必有一個極限值使得折射角為 90 度，此時的入射角度稱為臨界角(ϕ_c)。由折射定律可推得

$$\sin \phi_c = \frac{n}{n'} \quad (2.4)$$

當入射角大於臨界角時，折射不會發生，此情形稱為全反射(total internal reflection)。

2.1.2. 吸收與散射

一般情況下，光在行進時即使沒有因為介質的轉換而造成的反射仍然會因行進距離而逐漸衰減，其衰減的來由便是吸收與散射。比爾-朗伯定律 (Beer-Lambert law)便是光吸收的基本定律，當一單色光通

過一定厚度某一介質後，會因能量被介質吸收導致光強度降低，其關係式為

$$A = \log \frac{I_0}{I} = Klc \quad (2.5)$$

其中 A 為吸光度、 I_0 為光的初始強度、 I 為通過介質後的光強度、 l 為介質厚度、 c 為介質濃度、 K 為係數，若 l 單位為 cm 而 c 單位為 g/L 時，此時 K 稱為吸收係數，通常以 α 表示。

當行進中的光線受到一些局部的影響，如微小粒子、氣泡、晶體缺陷等，會導致光線會改變其行進軌跡、此現象稱為散射，而其中又分為彈性散射以及非彈性散射，彈性散射中又包含瑞利散射(Rayleigh scattering)和米氏散射(Mie scattering)，瑞利散射用於當產生散射的因素的粒子遠小於波長時，散射光強度與波長的4次方成反比，即

$$I(\lambda)_{\text{scattering}} \propto \frac{I(\lambda)_{\text{incident}}}{\lambda^4} \quad (2.6)$$

其中 $I(\lambda)_{\text{scattering}}$ 為散射光強分布函數而 $I(\lambda)_{\text{incident}}$ 為入射光強分布函數，從關係式可知波長較短的光比波長較長的還要容易產生散射，以可見光而言就是藍光比紅光更容易散射，這也是為何天空是藍的原因。而米氏散射則是用於粒子大小接近或大於波長時的狀況，如一般的灰塵、水滴、煙霧等。而非彈性散射應用在光與粒子碰撞前後總動能不守恆，常應用在電子與光子的交互反應，其主要有利布曼元散射 (Brillouin scattering)、拉曼散射(Raman scattering)等[9]。

2.1.3. 色溫

色溫(color temperature)為將黑體(black body radiator)加熱後，使其具有與光源相同顏色時的絕對溫度值，此溫度可在色度圖之普朗克軌跡(Planckian curve) (圖 2.3)上找到對應點。

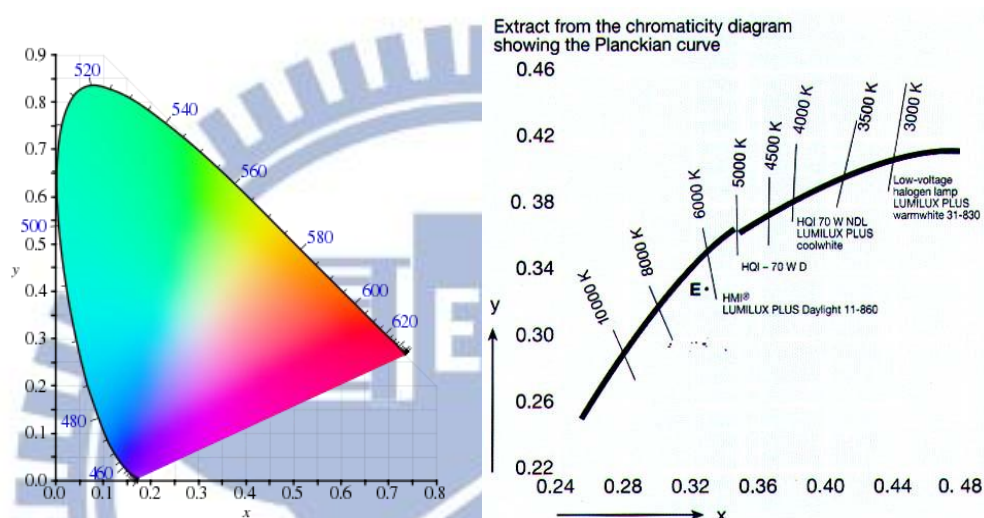


圖 2.3 CIE xy 色度圖與普朗克軌跡

2.1.4. 色差

色差為光源照射於目標物上與目標物的實際顏色差異，其計算是利用國際照明委員會(CIE, International Commission on Illumination)所提出之 CIELAB 色差公式來加以計算。此色差公式是利用 CIExy 色度圖(圖 2.3)將光源照射於目標物上所顯示之顏色對應出之 x 、 y 值 (x_1 、 y_1)與目標物實際顏色所對應之 x 、 y 值 (x_2 、 y_2)帶入下列公式計算而得。

$$z_i = 1 - x_i + y_i \quad (i=1 \sim 2) \quad (2.7)$$

$$L^* = \begin{cases} 116\left(\frac{y_i}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \frac{y_i}{Y_n} > 0.008856 \\ 903.3\left(\frac{y_i}{Y_n}\right) & \frac{y_i}{Y_n} < 0.008856 \end{cases} \quad (2.8)$$

$$f(t) = \begin{cases} (t)^{\frac{1}{3}} & t > 0.008856 \\ \frac{(7.787 \times t + 16)}{116} & t \leq 0.008856 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$a^* = 500 \times \left[f\left(\frac{x_i}{X_n}\right) - f\left(\frac{y_i}{Y_n}\right) \right] \quad (2.10)$$

$$b^* = 200 \times \left[f\left(\frac{y_i}{Y_n}\right) - f\left(\frac{z_i}{Z_n}\right) \right] \quad (2.11)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.12)$$

其中 X_n 、 Y_n 、 Z_n 參考白光之色度座標， ΔE^* 則為所求之色差。

2.1.5. 演色性

演色性(color rendering)是討論光源照射後呈現的顏色是否顯現正確顏色的程度。平均演色性指數(general color rendering index, Ra)為物件在某光源照射下顯示之顏色與其在參照光源照射下之顏色之相對差異。將參照光源之 Ra 值定為 100，與參照光源差異越多，Ra 值越低而所呈現出來的顏色越失真。

目前用來計算平均演色性指數的方法是利用國際照明委員會所提供之 8 種色票，將光源照射其上並計算其色差(公式 2.12)後再帶入下面算式

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (i=1 \sim 8) \quad (2.13)$$

分別計算 R_1 到 R_8 的值，最後將其平均後即為 R_a 的值，亦即

$$Ra = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2.14)$$

2.2. 光度學

對於描述輻射的單位，可分為輻射度學以及光度學兩種，它們都來自於同一個系列的計算方式，只是光度學的單位用於描述可見光之照明系統。以下將先介紹一種幾何單位，再進行光度學單位的說明。

如圖 2.4 所示，假設有一球殼，從球心發射一個以球心為頂點之圓錐，在球殼截出一曲面，則立體角 Ω 的定義為曲面面積除以球殼半徑平方，即

$$\Omega = A / r^2 \quad (2.15)$$

單位為球面度 steradian。例如一個完整球殼立體角為 $4\pi r^2 / r^2 = 4\pi$ steradian。

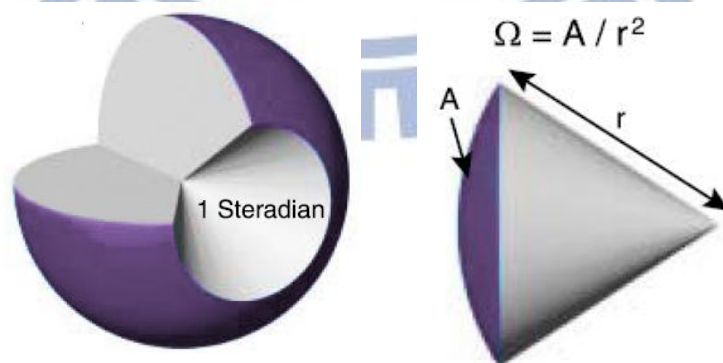


圖 2.4 立體角

下面將整理一些有用的光度學名詞及其定義與使用單位：

1. 光通量(luminous flux, Φ): 由一光源所發射且為人眼所感知的輻射能，稱為光通量，單位為 lumen。
2. 光強度(luminous intensity, I): 考慮點光源，光源在某一方向之單位立體角內的光通量密度，單位為 $\text{lumen/sr} = \text{candela}$ 。
3. 照度(illuminance, E): 光打在被照面上單位面積的光通量密度，單位為 $\text{lumen/m}^2 = \text{lux}$ 。
4. 輝度(luminance, L): 一光源或一被照面，在單位面積、單位立體角之光通量，又稱為亮度，為人眼所感知此光源或被照面的明亮程度。單位為 $\text{lumen/m}^2/\text{sr} = \text{candela/m}^2 = \text{nit}$ 。

2.3. 人對光的感覺

除了演色性外，人眼本身對各種波長的光感知度也有所不同，如圖 2.5 所示，人眼感受最強烈的波長大約為 555nm，此顏色大約為黃色偏綠色光，這也是為什麼霧燈要設計成黃色的原因，單以吸收與散射考量，理論上紅光的效率最高，但若再考量到此條件，便是以黃光效率更好。

除此之外，色溫的不同也會影響人的感受，Kruithof [10]發現，人們在低照度的時候喜好低色溫，反之則喜好高色溫，如圖 2.6 所示，紅色區域表較溫暖的感受而藍色區域則是較陰冷的感受，此外，光源色溫大約為 4000K 時給人有舒適的感受，而在約為 6500K 時則是給

人有清醒的感覺，反之，在 2700K 則給人有想睡覺的氣氛[11]。現階段本研究將暫不討論色溫對人的影響，然而在未來研究會加以探討。

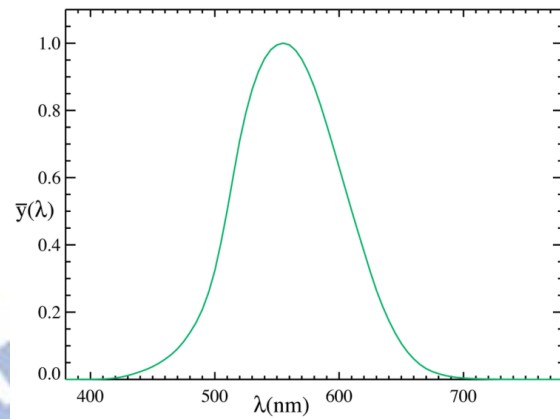


圖 2.5 人眼對光的敏感度圖

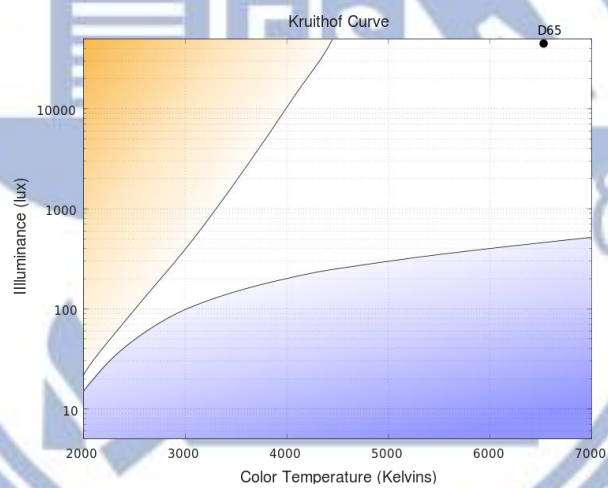


圖 2.6 Kruithof curve [10]

第三章 MC-E LED 照明實驗

3.1. 光源元件

本研究使用的是 CREE 公司的 XLamp MC-E 系列，其特色為在 LED 體積很小的一次光學封包內(7mmX7mm)，含有 4 個可發射不同波長之 LED 晶片，如圖 3.1 所示，而且可以根據需求選擇此 4 個晶片之組合，每個晶片可由不同的電壓電流控制，發出不同之光強度。

本實驗所選用的 4 個晶片分別為紅光、藍光、綠光的三原色光跟一顆冷白光(cool white)，之後模擬也將採用此 4 個晶片的光源資料輸入。

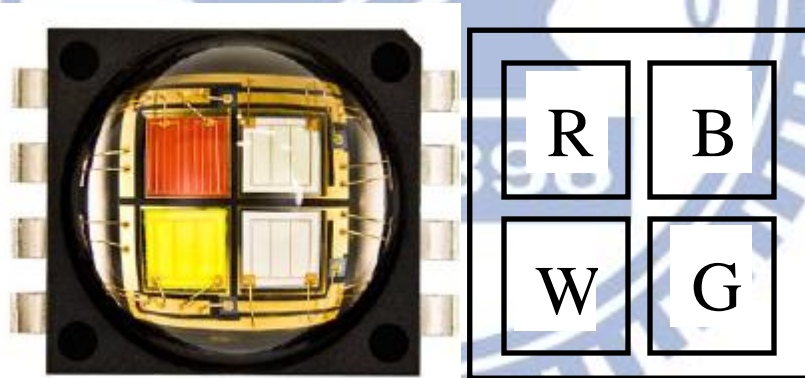


圖 3.1 XLamp MC-E

3.2. 實驗目的

本研究為了驗證在不同環境下演色性的差異以及 MC-E LED 裝置確實能改善在水下的演色性，底下將針對兩個環境進行量測，比較在不同距離下於空氣與水中的照度值及演色性，實驗流程如圖 3.2。



圖 3.2 實驗流程圖

3.3. 實驗規劃

為了能量測 LED 在水中之照度值及演色性，本研究設計了一水箱，材料為玻璃纖維，內壁長 3 公尺、寬 1 公尺、高 1 公尺，並有水箱蓋以在實驗時遮蔽雜光，並在底部設一排水孔以供後續排水。將 LED 置於水箱內，並為了防止儀器碰到水，在水箱壁上開洞並放置一玻璃當作量測點，並在水槽內距離量測點 1m、2m、3m 處裝設固定裝置以固定燈源位置，以量測不同距離下的光照數值，箱內為了盡可能避免側壁對光的反射，因此塗以黑色顏料以吸收光線，如圖 3.3 到 3.7 所示。

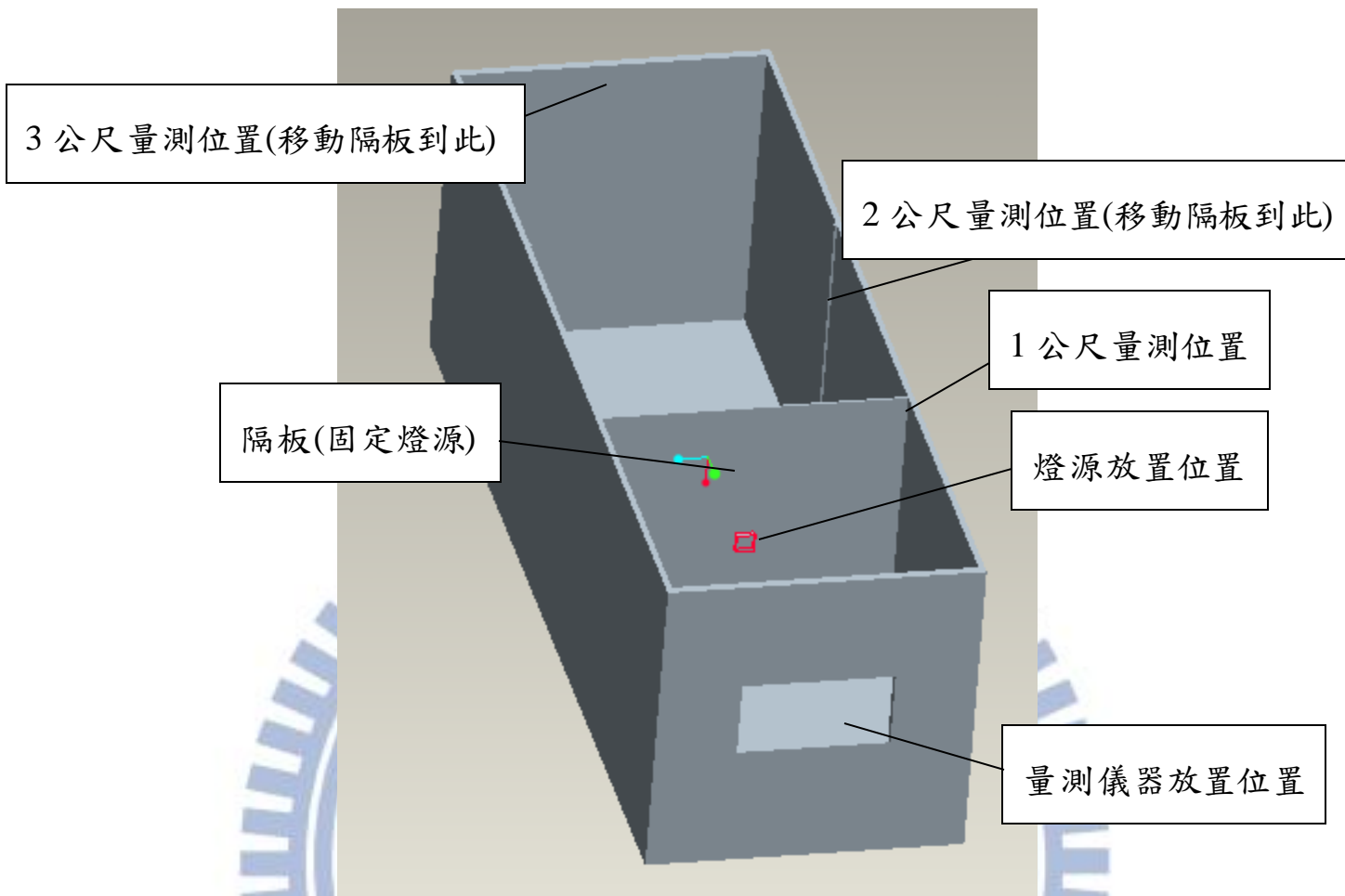


圖 3.3 水槽示意圖

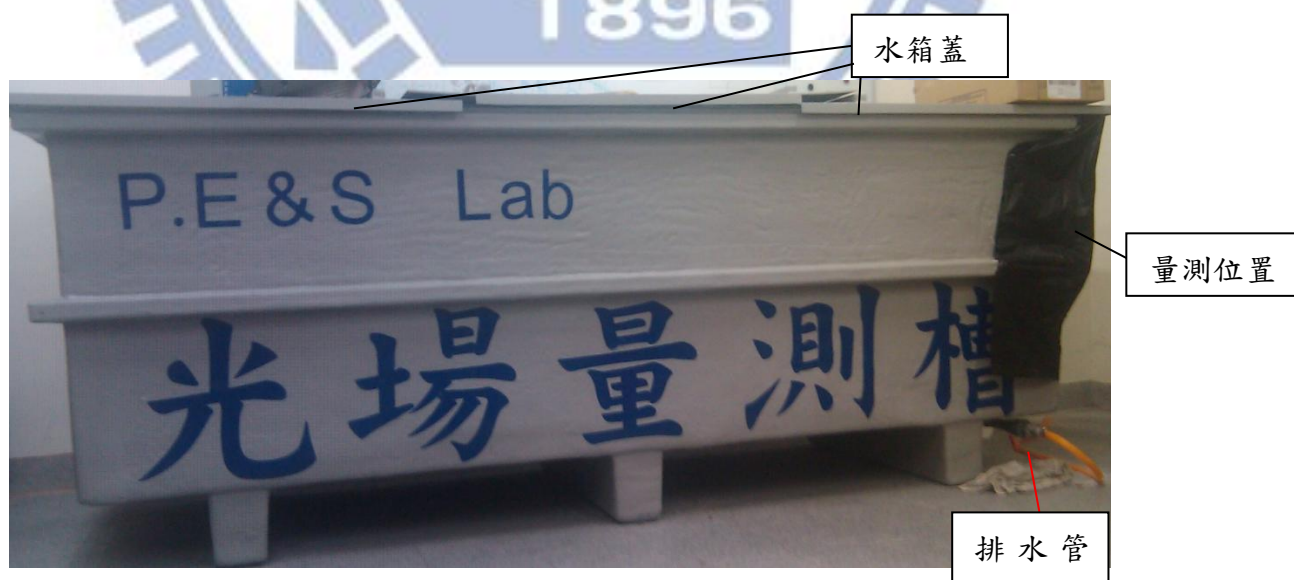


圖 3.4 量測水槽(遠照)



圖 3.5 量測水槽(水箱蓋)



圖 3.6 量測水槽(排水孔)



圖 3.7 量測水槽(量測位置及光源固定位置)

3.4. 實驗設備與量測設備

燈源將利用一電源供應器對各晶片輸出固定電壓以驅動發光，並利用可變電阻調節其電流值讓各晶片發出不同強度之色光。光學量測部分則是使用 UPRtek MK350，可量測其照度、色溫、波長分佈及演色性，裝置如圖 3.8、3.9、3.10 及 3.11 所示



圖 3.8 MC-E 照明裝置



圖 3.9 電源供應器



圖 3.10 光源與控制器組合圖



圖 3.11 UPRTek MK350 手持式光譜儀

由於 LED 溫度將直接影響晶片之發光效率，且水中與空氣中散熱環境不同，因此本研究也利用熱電偶及數位溫度感測器量測其溫度

並加以探討，裝置如圖 3.12 及 3.13 所示。



圖 3.12 熱電偶位置



圖 3.13 數位溫度感測器

為了使 LED 收光效率更好，選擇一個市面上用於 MC-E 系列的反光杯做為使用，如圖 3.14 及 3.15，之後模擬也將以此反光杯建立模型。



圖 3.14 反光杯



圖 3.15 光源與反光杯

3.5. 實驗結果與討論

3.5.1. LED 照度實驗

為了觀察三原色之光在不同環境下的影響，因此將針對三原色光

分別量測在 1m、2m、3m 的中央照度值，由於溫度會影響出光時晶片之光通量，因此首先針對在空氣中量測其平衡溫度，結果如圖 3.16 所示，可以知道在空氣中約在 70 分鐘之後達到平衡溫度，其溫度為 42 度 C，因此在之後實驗皆以達到平衡溫度後再進行實驗。

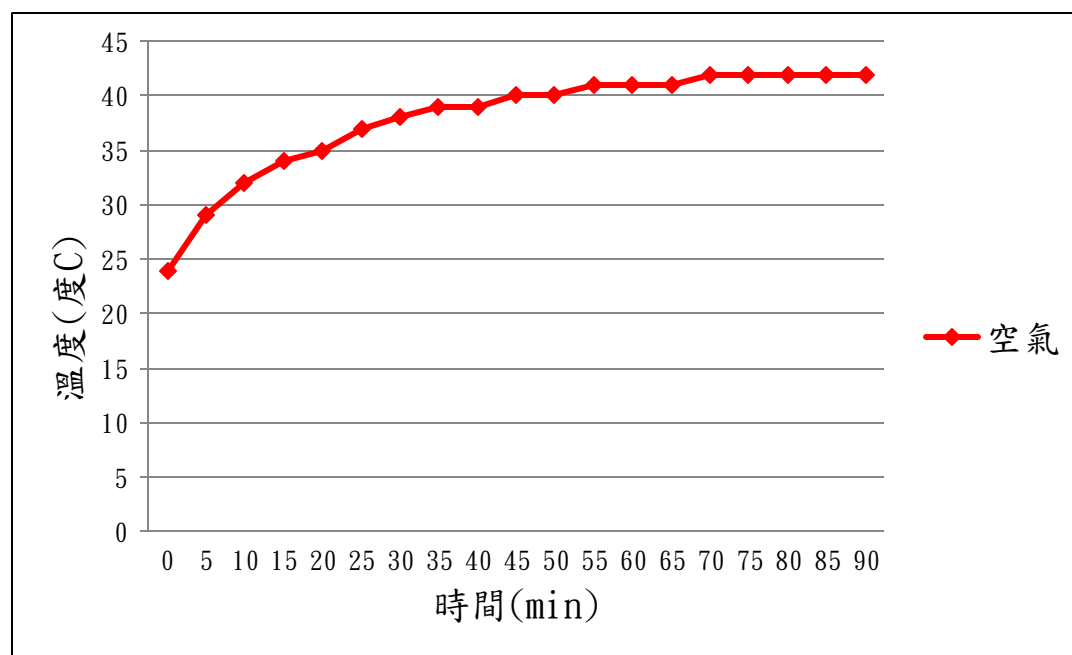


圖 3.16 LED 在空氣中溫度對時間關係圖

接著在平衡溫度下量測在空氣中的照度，實驗結果如表 3.1、3.2、3.3 所示。

表 3.1 紅光於空氣中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：lux)

電流 \ 距離	300mA	400mA	500mA	600mA	700mA
1m	152	195	254	299	343
2m	39	52	66	78	90
3m	20	28	33	40	46

表 3.2 綠光於空氣中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：lux)

電流 \ 距離	300mA	400mA	500mA	600mA	700mA
1m	205	281	347	408	465
2m	54	68	83	101	115
3m	27	36	44	51	58

表 3.3 藍光於空氣中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：lux)

電流 \ 距離	300mA	400mA	500mA	600mA	700mA
1m	56	71	88	105	121
2m	14	18	22	26	30
3m	8	10	12	13	15

下面將針對電流在 300mA 下的照度值加以討論環境對三原色光的影響，如圖 3.17 所示。

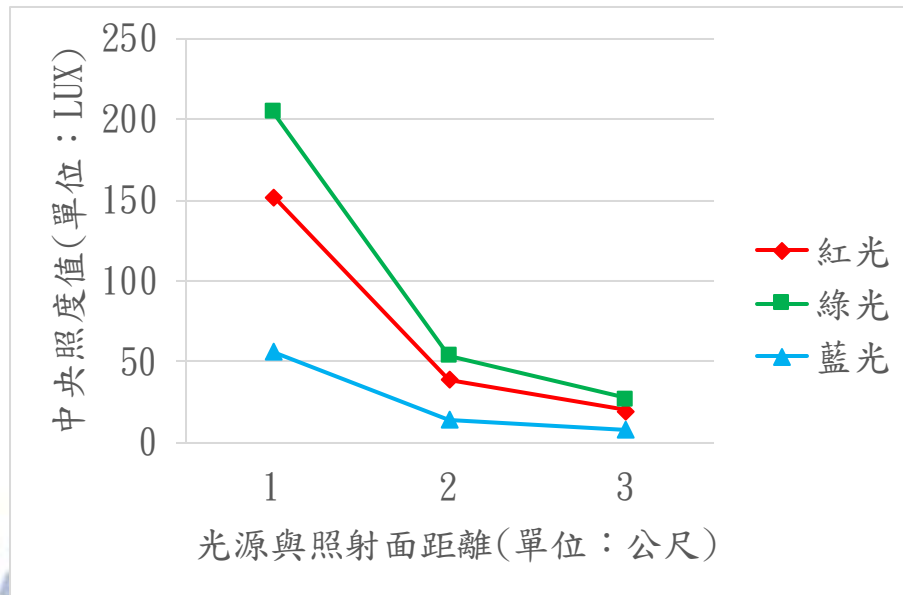


圖 3.17 在 300 毫安培下空氣中各色光的照度值

由於三原色晶片在相同的電流下所供給的光通量不同，因此為比較環境對三原色光的影響，我們以 1 公尺為基準，比較三原色光在空氣中隨著距離的增加其照度值的效率百分比，結果如圖 3.18 所示。這裡可以看出隨著距離的增加，三原色光的效率百分比皆相同，所以在照射面上三原色光的比例不變，因此其演色性並不會因距離增加而有所改變，與理論相符。

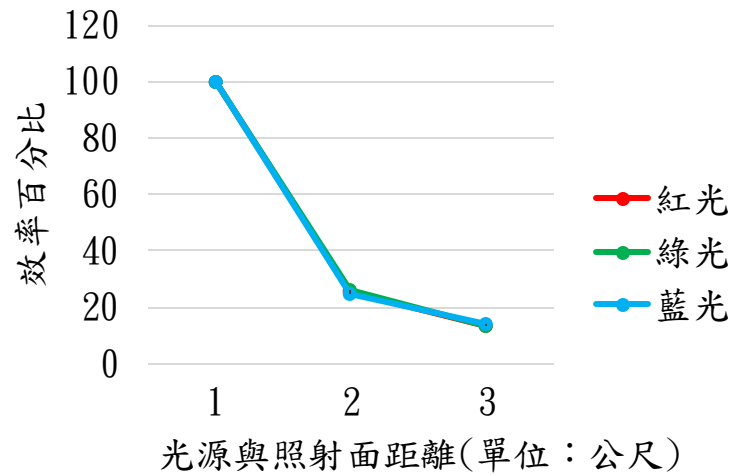


圖 3.18 在 300 毫安培下空氣中各色光的效率百分比

接著將水槽注滿水，首先觀察其平衡溫度，結果如圖 3.19，可以知道在水中約在 15 分鐘之後達到平衡溫度，其溫度為 31 度 C，因此在此之後實驗皆以達到平衡溫度後再進行實驗。

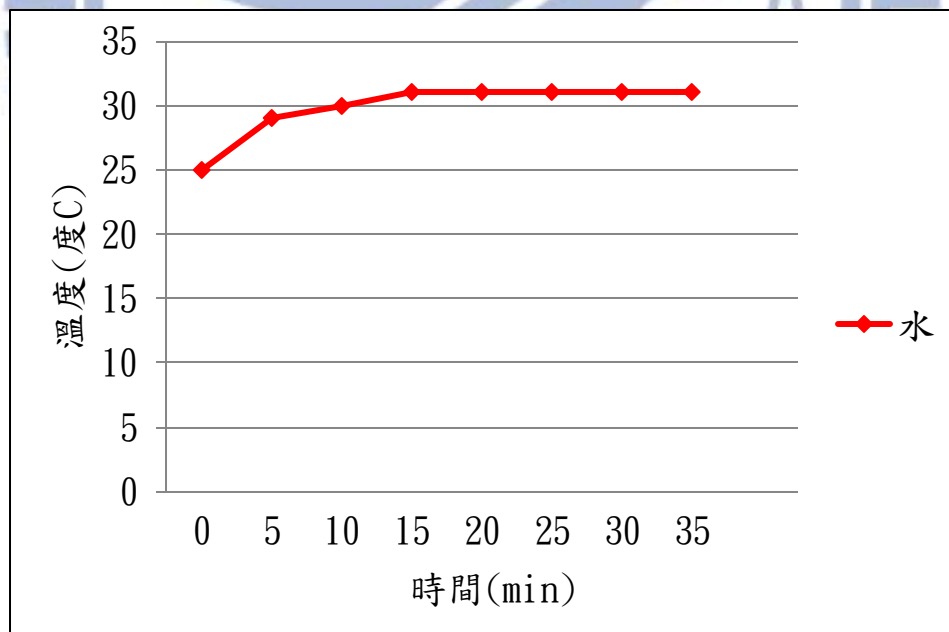


圖 3.19 LED 在水中溫度對時間關係圖

接著觀察燈源在水下的照射情形，實驗結果如表 3.4、3.5、3.6 所示。

表 3.4 紅光於水中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：lux)

電流 距離	300mA	400mA	500mA	600mA	700mA
1m	183	240	301	353	403
2m	55	73	90	107	125
3m	20	26	32	37	43

表 3.5 綠光於水中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：lux)

電流 距離	300mA	400mA	500mA	600mA	700mA
1m	293	383	478	564	650
2m	115	151	187	222	256
3m	51	66	83	98	112

表 3.6 藍光於水中在不同距離及不同電流下之照度值(單位：lux)

電流 距離	300mA	400mA	500mA	600mA	700mA
1m	84	111	135	164	191
2m	29	37	45	56	63
3m	13	17	22	25	29

與在空氣中的實驗相同，我們擷取出了 300mA 的數據加以比較其照度及效率，如圖 3.20 及 3.21 所示。可以看出，在三公尺範圍內紅光的效率最差、其次為藍光、最後則為綠光，因此如照射在三公尺的地方，其演色性就會不如預期，且可以預測在之後調節演色性時，需將紅光與藍光的電流調高。

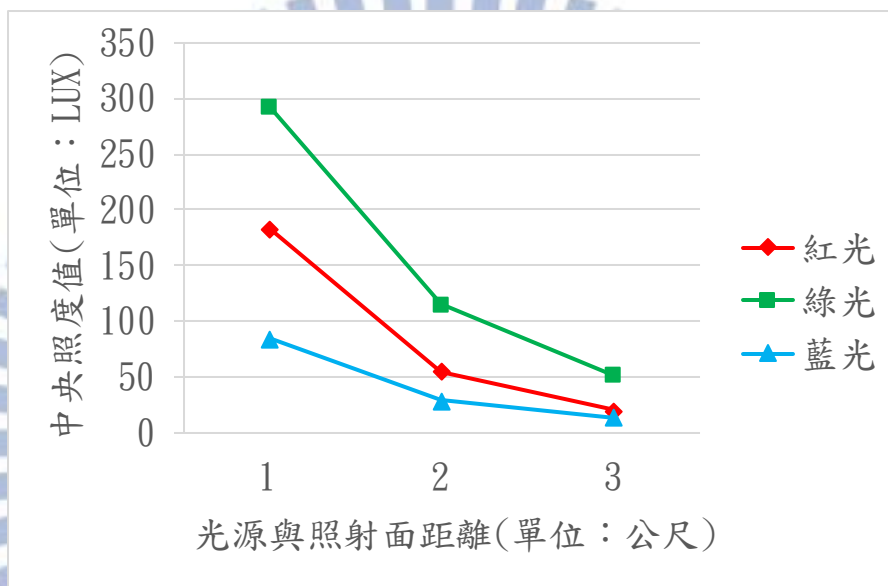


圖 3.20 在 300 毫安培下水中各色光的照度值

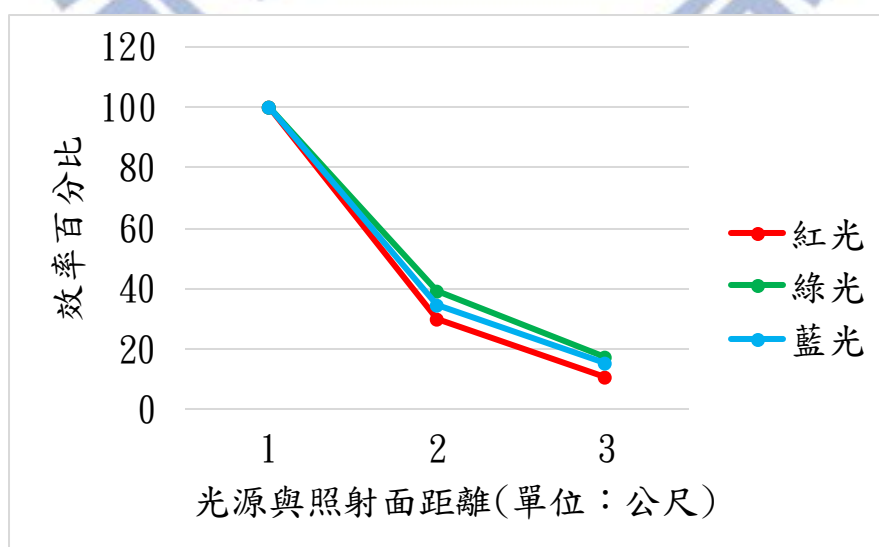


圖 3.21 在 300 毫安培下水中各色光的效率百分比

3.5.2. LED 演色性實驗

為了比較在不同環境下對演色性之影響，並驗證裝置可改善演色性，本研究首先將調整電流值，在空氣環境中找尋燈源之最佳演色性，並記錄其電流值，實驗結果如表 3.7。

表 3.7 在空氣中可獲得之最佳演色性及其相對應晶片電流

演色性	紅光電流值	綠光電流值	藍光電流值	白光電流值
85	60mA	120mA	30mA	310mA

接著將水箱注滿水，量測在使用上述空氣中最佳狀況的控制電流值燈源在水中距觀察面 1m、2m、3m 的演色性，結果如表 3.8 所示。從前面實驗結果(圖 3.18)可得知，三原色光在水中會因距離的改變而效率有所差異，因此實驗結果也如預期的導致演色性改變。

表 3.8 調整電流前的演色性

空氣中	水中距觀察面 1m	水中距觀察面 2m	水中距觀察面 3m
85	80	73	70

接著調整電流值以達到更好的演色性，結果如表 3.9 所示。從前面的照度實驗我們預期如果要將演色性調高，需將紅光與藍光的電流值拉高，而演色性實驗結果也與預期相符。

表 3.9 調整電流後在水中不同距離下可獲得之最佳演色性及其相對

應晶片電流

	演色性	紅光電流值	綠光電流值	藍光電流值	白光電流值
空氣中	85	60mA	120mA	30mA	310mA
水中 1m	84	100 mA	120mA	30mA	310mA
水中 2m	83	120 mA	120mA	40mA	310mA
水中 3m	82	150 mA	120mA	40mA	310mA

在照度值實驗方面，我們比較三原色在空氣中與在水中的衰減比較，可以看到在空氣中三原色光之效率百分比幾乎不會因為距離的增加而有所改變，而在水中會有明顯的影響，也間接驗證了在水中演色性會因為三原色光的衰減情形不同而有所改變。

而在演色性實驗上，可以看到在調整電流後可明顯的改善水中的演色性，且主要調整的為紅光與藍光晶片的電流，此也與前面照度實驗所量到之光效率結果一致，演色性改善的情況亦可的情況亦可表示如圖 3.22。

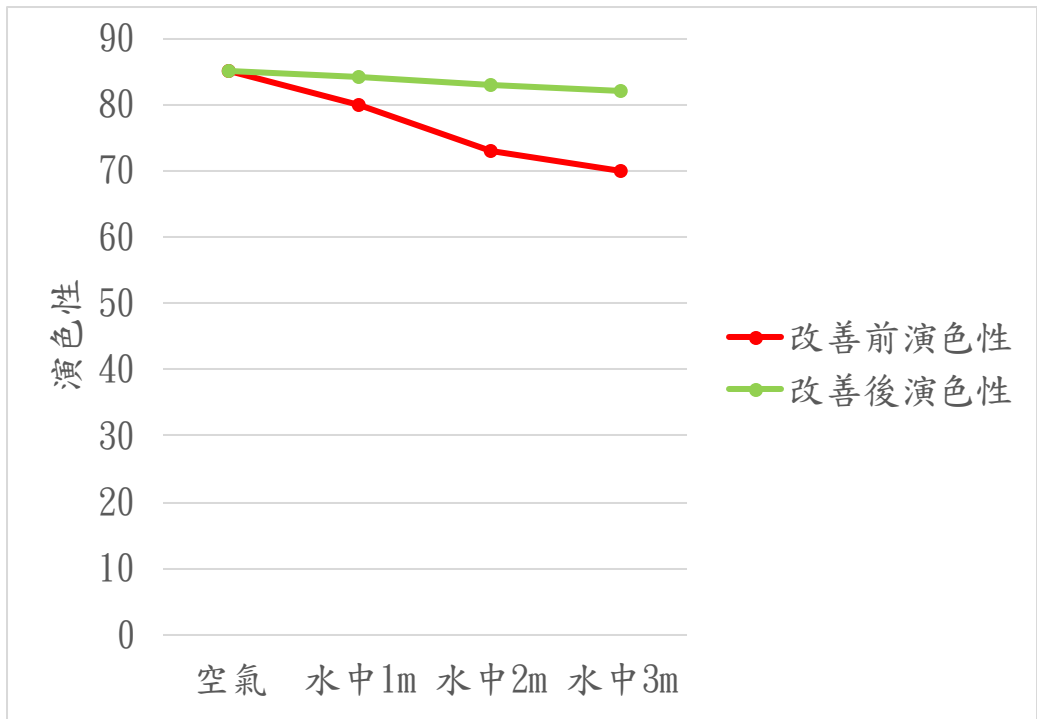


圖 3.22 演色性改善圖



第四章 光學模擬

接著我們將嘗試利用模擬軟體模擬光在水下的情形，在目前用模擬軟體跑水下照射情形的研究並不多，其原因為水中要考慮的變因過多，尤其散射情形更加難以計算，因此現今的研究大多以白光模擬水下情形，並僅討論其照度及發光角度，不討論三原色光在水中的光效率差異。因此本研究將嘗試模擬三原色光在水中的照射情形及效率，並與實驗值做比較。

4.1. 光學模擬軟體

光學軟體可區分為序列性(sequential)跟非序列性(non-sequential)兩種，序列性光學軟體通常用於成像系統分析，如相機、望遠鏡、投影機等，光線以面依次計算，可對一連串的透鏡組、折反射元件或繞射元件加以分析，再利用最佳化功能進行參數設計。這系列軟體僅利用特殊的少數光線進行追跡，且在每個面只計算一次，因此計算量較小，分析速度快。目前常見的序列性軟體有 Zemax、OSLO、CODE V 等。

非序列性光學軟體則多用於照明設計或雜散光分析上，它是透過 Monte Carlo 法使用大量的光線進行光線追跡，由於在一個交界面上的計算不只一次，因此較逼近實際光的行為。其分析的對象並不侷限在透鏡，可匯入各種形狀之物件進行計算，模擬的準確度取決光線的

數量，數量越多準確性便越高，但計算時間也相對更長。目前常見的非序列性光學軟體有 ASAP、TracePro、Lighttools 等。

本研究將模擬光的散射，因此選用非序列軟體，因 TracePro 內建有散射設定以及的表面光源建立工具，所以本研究將使用光學模擬軟體 TracePro 來進行分析。

4.2. 建立模型

4.2.1. 光源模型建立

本研究利用 CREE 公司所提供之光源資料[12]配合 TracePro 內建之 Surface Source Property Generator 建立表面光源，在晶片選擇上面，我們先選用 MC-E-color 中的 Cool White，由表 4.1 可知其紅光、綠光、藍光及冷白光在 350 毫安培下最低流明數分別為 30.6、67.2、8.2、100 流明，其個別的波長分佈如圖 4.1，配光曲線如圖 4.2，再將這些資料匯入 Surface Source Property Generator，如圖 4.3、4.4。

表 4.1 光源資料表[12]

Part	Color	CCT / Dominant Wavelength Range		Base order codes Min. Luminous Flux (lm) @ 350 mA*		Order Code
		Min.	Max.	Group	Flux (lm)	
White	Cool White	5,000 K	10,000 K	K	370	MCE4WT-A2-0000-000K01
				M	430	MCE4WT-A2-0000-000M01
	Neutral White	3,700 K	5,000 K	J	320	MCE4WT-A2-0000-000JE4
				K	370	MCE4WT-A2-0000-000KE4
	Warm White	2,600 K	3,700 K	G	240	MCE4WT-A2-0000-000GE7
				H	280	MCE4WT-A2-0000-000HE7
J	320	MCE4WT-A2-0000-000JE7				
Dynamic White	2 cool-white die	6,500 K		K	100	MCEDWT-A1-0000-0000A1001
	2 warm-white die	2,700 K		G	70	
	2 cool-white die	6,000 K		K	100	MCEDWT-A1-0000-0000A1002
	2 warm-white die	2,700 K		G	70	
Color	Red	620 nm	630 nm	A5	30.6	MCE4CT-A2-0000-00A5AAAA1
	Green	520 nm	535 nm		67.2	
	Blue	450 nm	465 nm		8.2	
	Cool White	5,700 K	7,000 K		100	
	Red	620 nm	630 nm	A4	30.6	MCE4CT-A2-0000-00A4AAAB1
	Green	520 nm	535 nm		67.2	
	Blue	450 nm	465 nm		8.2	
	Neutral White	3,700 K	4,300 K		80	

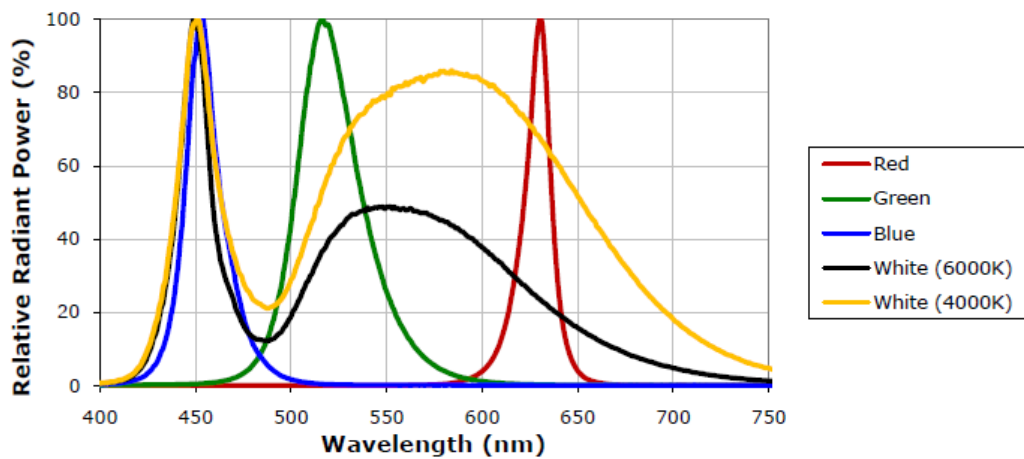


圖 4.1 MC-E 波長分佈圖[12]

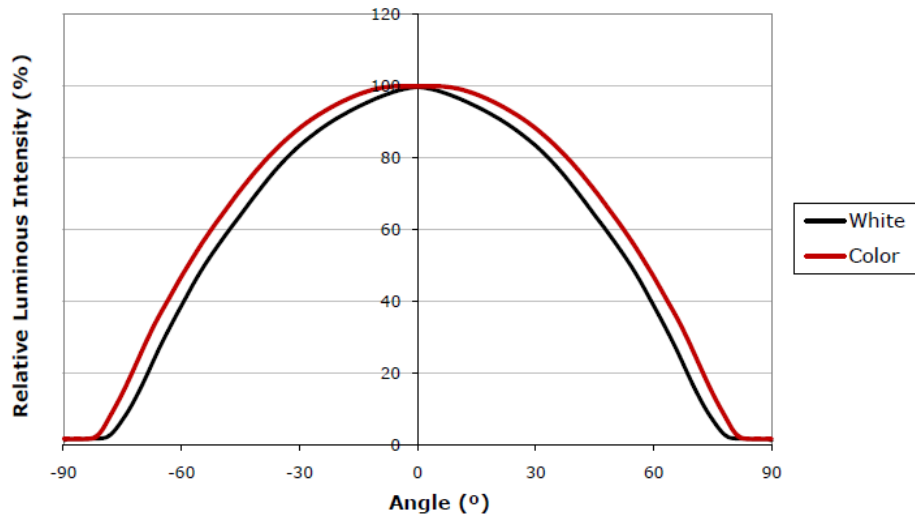


圖 4.2 MC-E 配光曲線圖 [12]

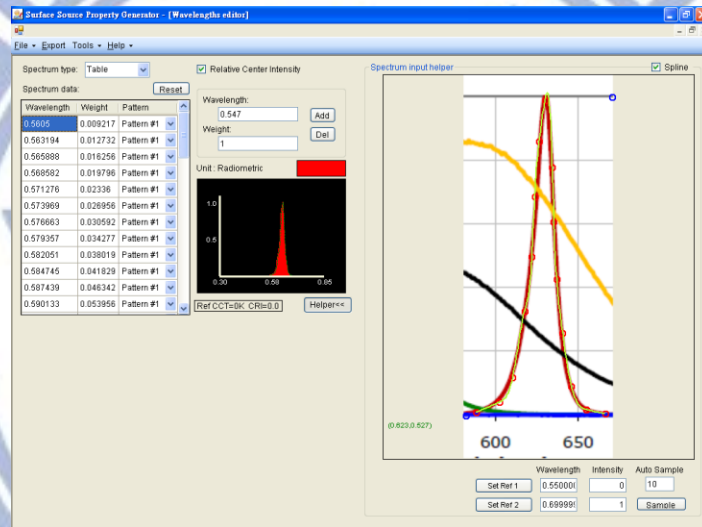


圖 4.3 紅光波長分佈圖 (Surface Source Property Generator)

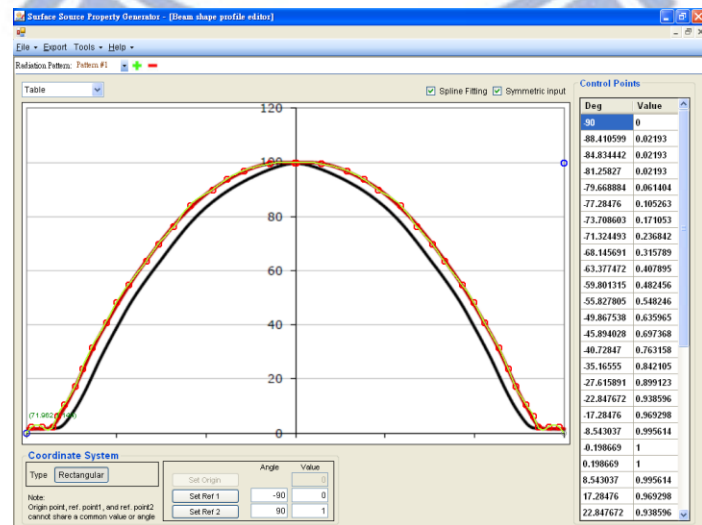


圖 4.4 配光曲線圖 (Surface Source Property Generator)

4.2.2. 水槽(環境)模型

首先將建立一長方體作為控制環境，長方體本身材料將當作照射時的環境參數，在空氣中將不設定任何材料性值，而在水中則將材料設定為 TracePro 內 material 中的 water。由於 TracePro 內建的材料性值並未有散射數值，因此我們將在 TracePro 內設定散射係數，數值部分則參考文獻[13]中純水波長對散射係數及平均餘弦值的圖。而在水箱的側面壁及底部為了避免光線反射後影響，且實際實驗側壁塗有黑色顏料吸收光，因此在模擬中將其設為完全吸收；而在水箱上平面，因其在實驗中必然會有水面，導致全反射影響量測值，因此在模擬中水箱上平面並不設為完全吸收，使其在邊界上有介質的差異，以盡可能接近真實情形。

4.2.3. 反光杯模型

在反光杯部份，由於 TracePro 內的繪圖能力仍不夠強，因此將利用 ProE 繪出反光杯模型再匯入 TracePro 內。最後模型如圖 4.5 所示。

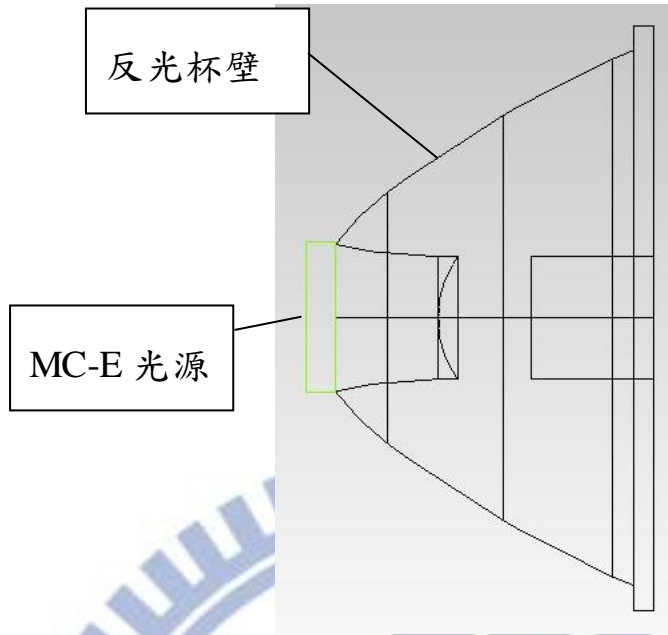


圖 4.5 反光杯模型

4.2.4. 完整模型

最後，我們將建立的模型組合起來，並在 1m、2m 及 3m 處建立量測面，如圖 4.6 所示。

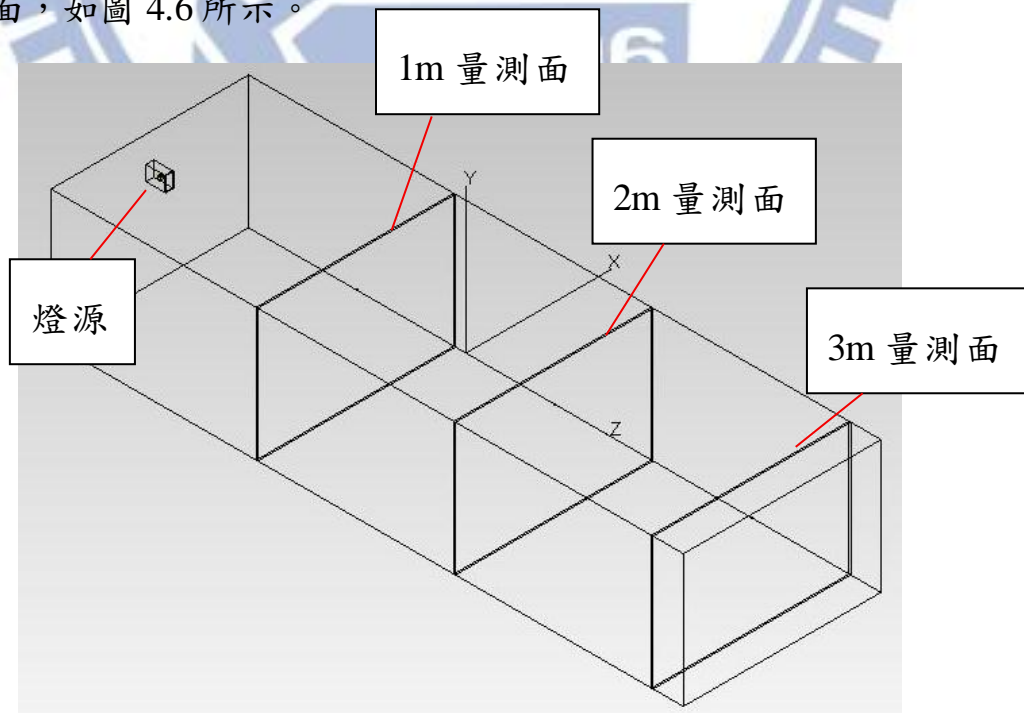


圖 4.6 完整模型圖

4.3. 模擬結果

模擬結果的光線追跡圖與照度圖如下圖 4.7 及 4.8 所示。由於反光杯目前是使用廠商所設計的現成品，因此目前不針對照射面上的光型加以討論，下面僅針對打在照射面中央位置的照度值做討論。

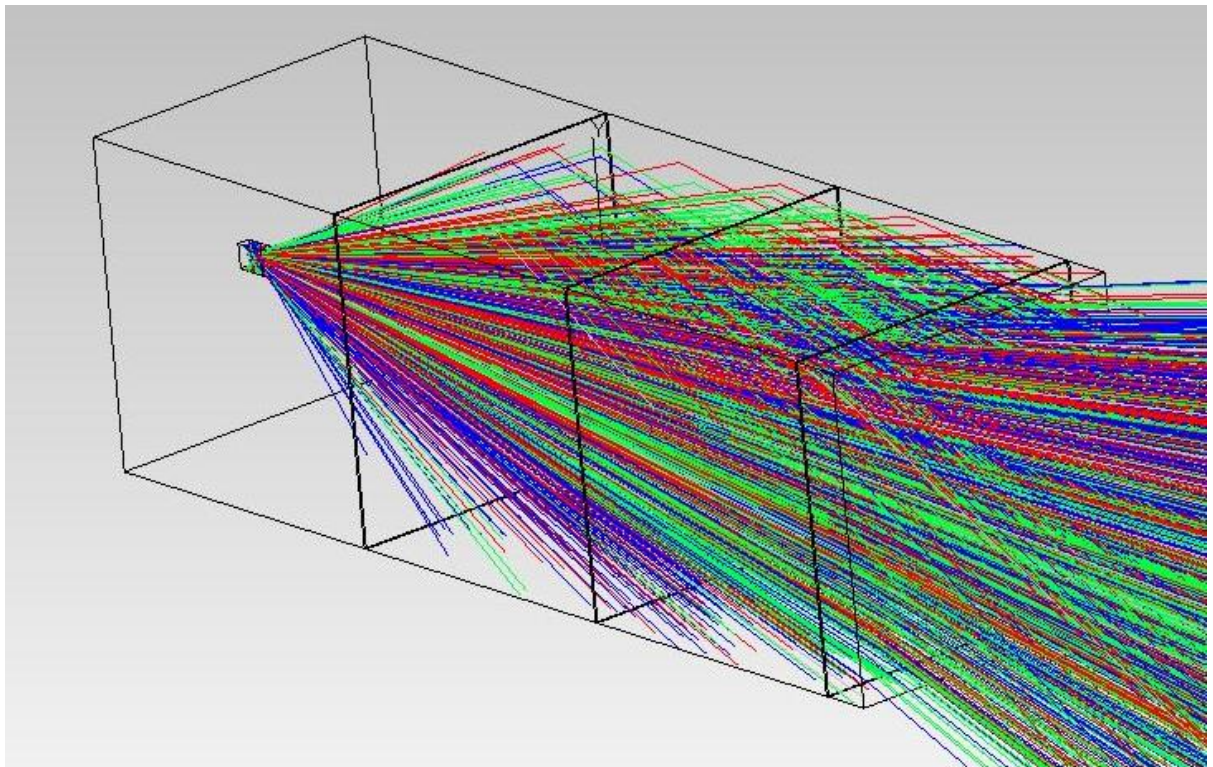


圖 4.7 光線追跡圖

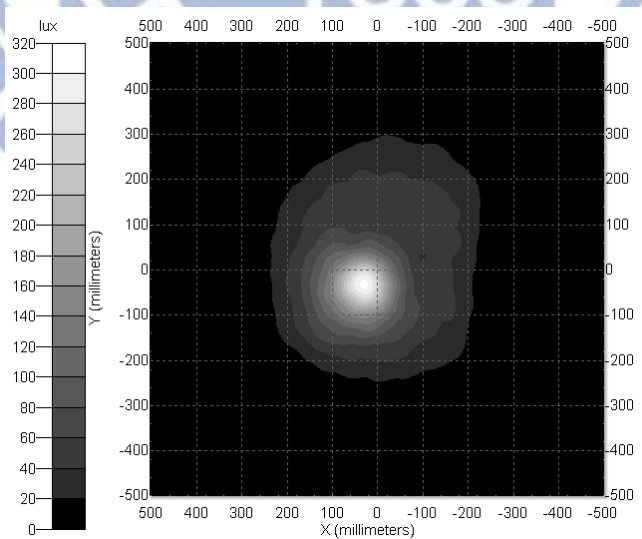
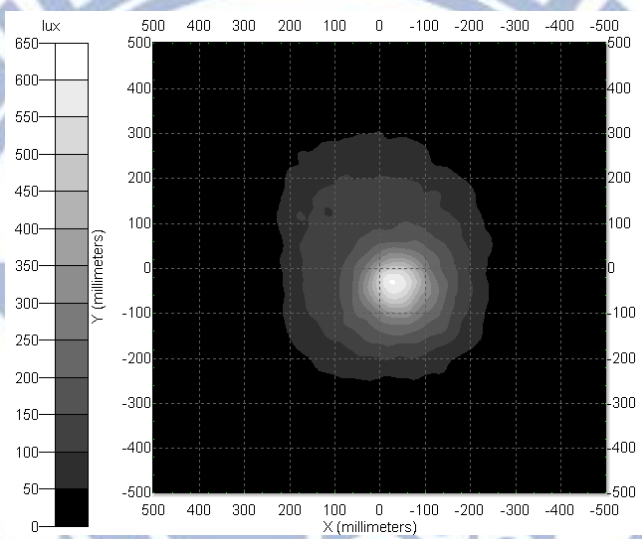
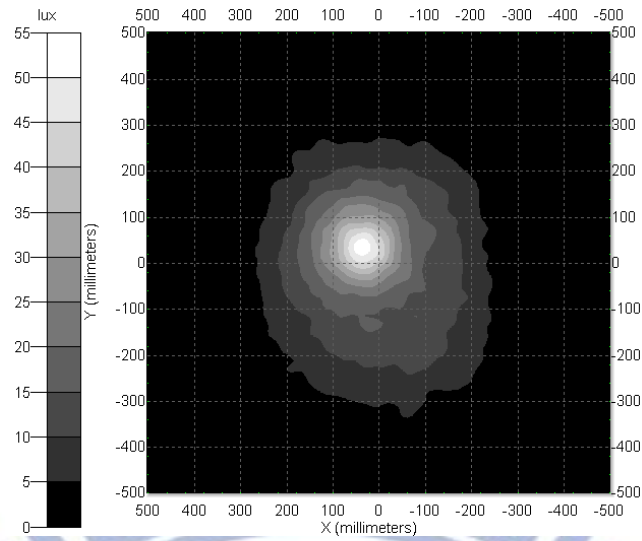


圖 4.8 在水中 1m 處藍光(上)、綠光(中)、紅光(下)照度圖

各光源在電流值 300mA 下空氣中的模擬結果如圖 4.9 及 4.10 所示。這裡可以看出在效率的部分，實驗值與模擬值趨勢相符，再隨著距離的增加，三原色光的光效率皆相同，後續將會針對實驗與模擬做進一步的比較討論。

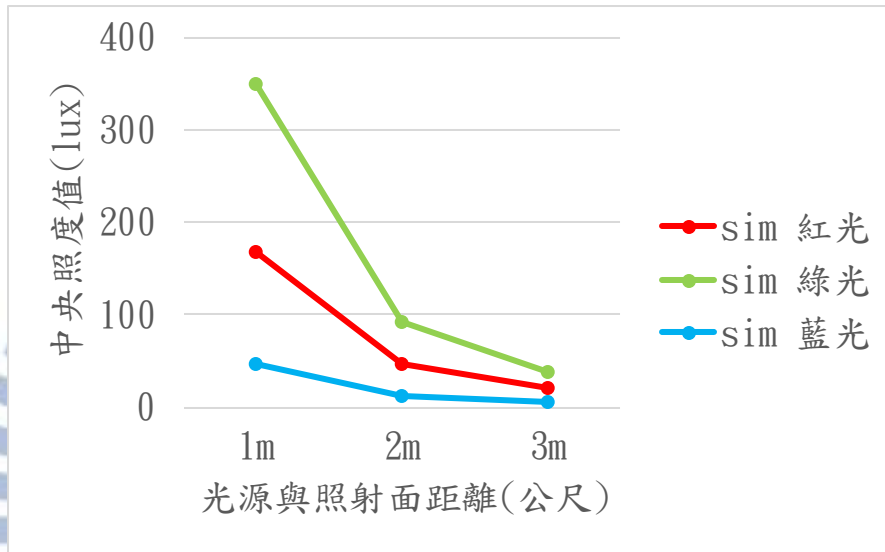


圖 4.9 模擬在 300 毫安培下空氣中各色光的照度值

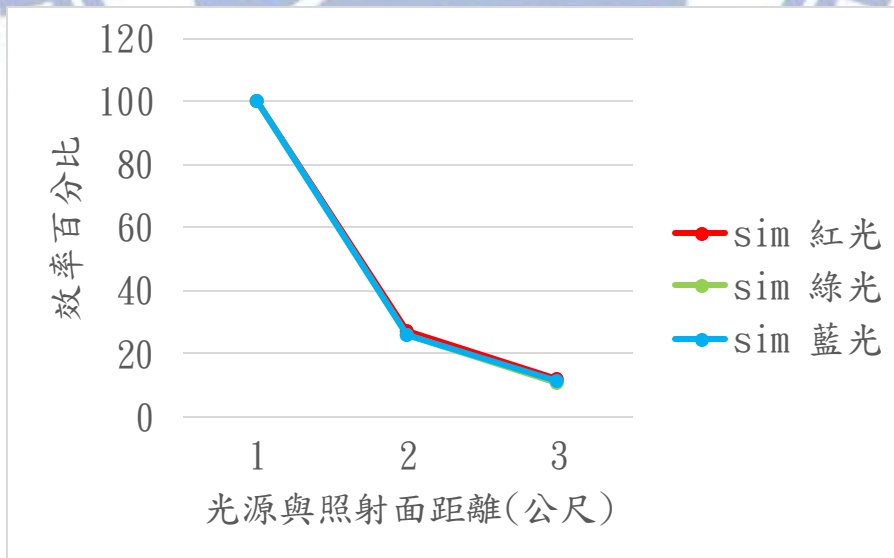


圖 4.10 模擬在 300 毫安培下空氣中各色光的效率百分比

接著，將環境設定成水中但不加入散射數值來進行模擬，結果如

圖 4.11 及 4.12 所示。理論上在不加入散射得情況其效率會較好，且由於沒有散射的影響，影響光效率的原因便僅是水的吸收，因此其效率為藍光最好而紅光最差，與理論相符，後續也將對此與實驗進行詳細比較。

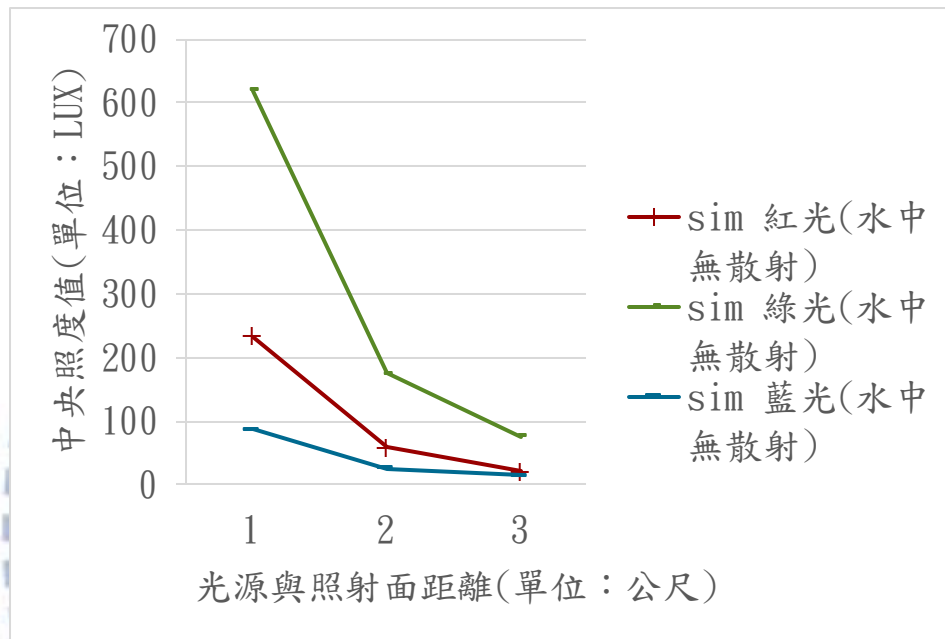


圖 4.11 模擬在 300 毫安培下水中無散射各色光的照度值

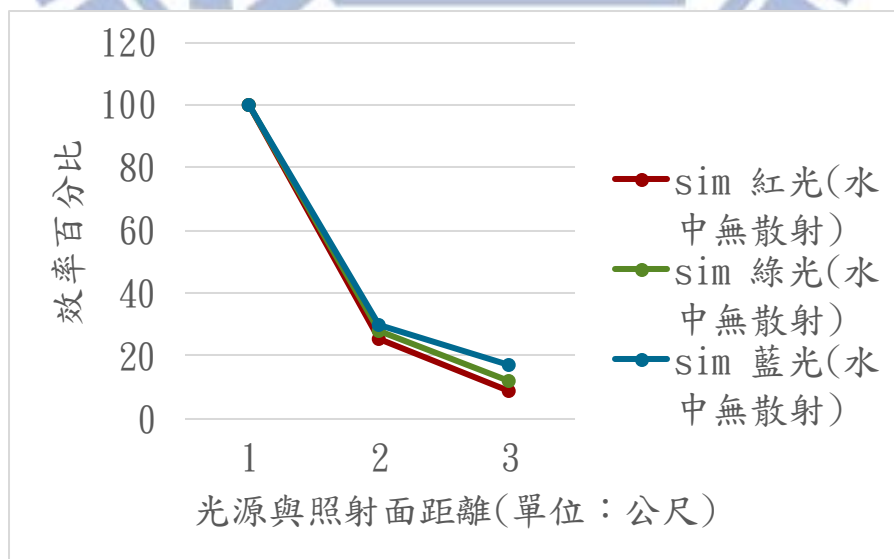


圖 4.12 模擬在 300 毫安培下水中無散射各色光的效率百分比

接著把散射數值加入並模擬，結果如圖 4.13 及 4.14。這裡可以看出，加入散射後效率變低，且由於散射對藍光影響較嚴重，導致與上面不加散射的結果相比，藍光效率下降較多。

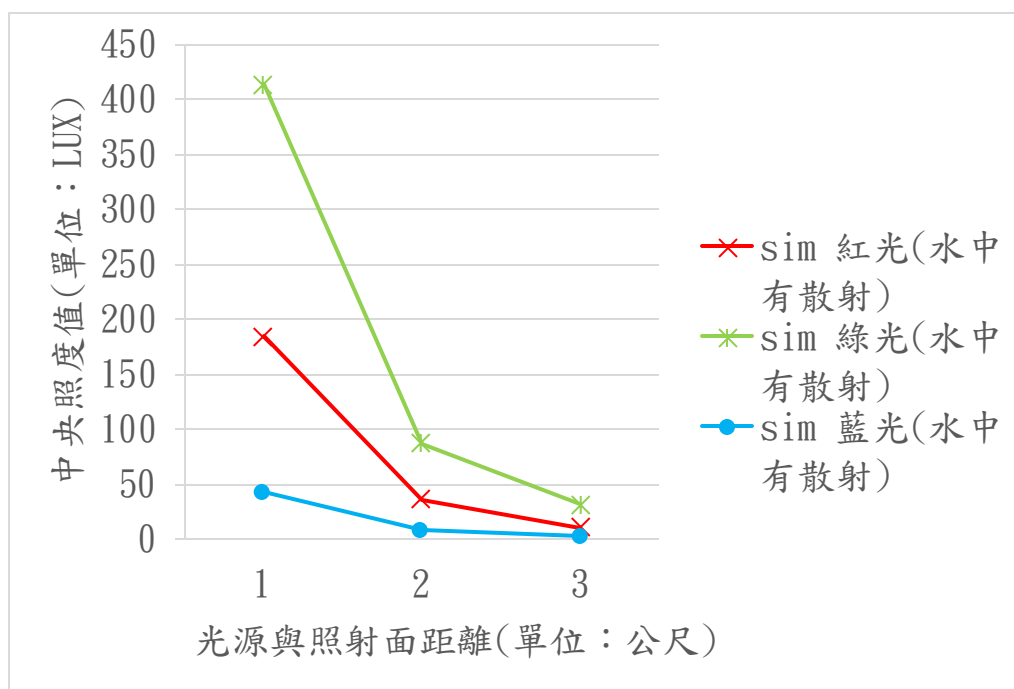


圖 4.13 模擬在 300 毫安培下水中有散射各色光的照度值

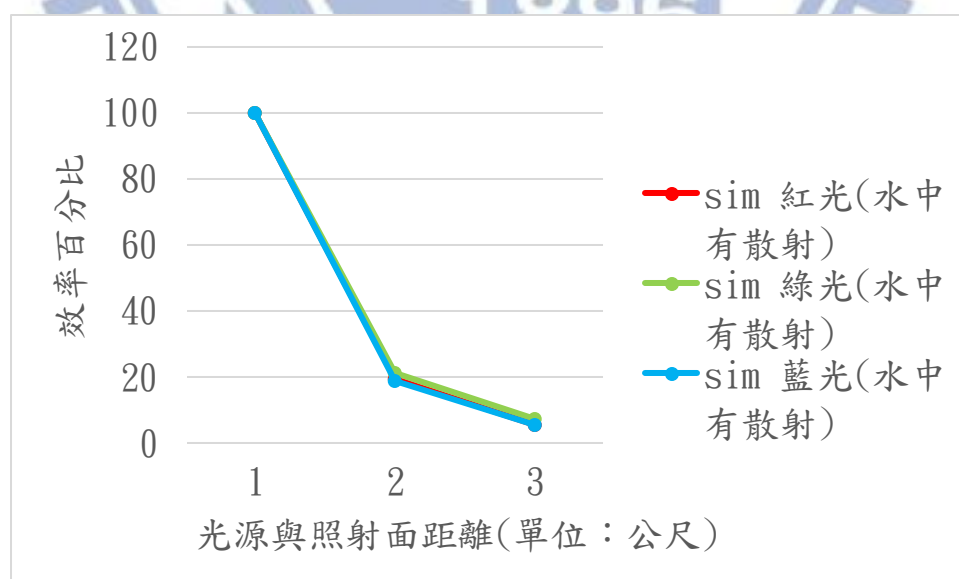


圖 4.14 模擬在 300 毫安培下水中無散射各色光的效率百分比

從圖 4.12 可以發現，當環境設定為水但不加入散射時，模擬出來三原色光會隨著距離的不同其效率有所不同，其效率為兩公尺時為藍光(30.1%)>綠光(28.2%)>紅光(25.2%)，而在三公尺時為藍光(17.0%)>綠光(12.3%)>紅光(9.1%)，其原因為在不考慮散射的情光下，隨著距離的增加影響光效率的僅有吸收，而在水中紅光最容易被吸收，綠光次之，藍光最低，因此導致藍光效率最好。從圖 4.12 與 4.114 之比較可以發現，在加入散射後，三原色光效率皆下降，在兩公尺時為綠光(20.9%)>紅光(19.3%)>藍光(18.6%)，而在三公尺時為綠光(7.5%)>紅光(5.6%)>藍光(5.5%)，也顯示了在模擬內散射影響藍光最嚴重，綠光次之而紅光最輕微，與理論上波長越短散射情形越嚴重的情況相符。

第五章 結果與討論

5.1. 模擬與實驗比較

我們將模擬與實驗的照度值及效率百分比加以比較，在空氣中的情形如圖 5.1 及 5.2 所示，虛線的為模擬值，實線的則為實驗值

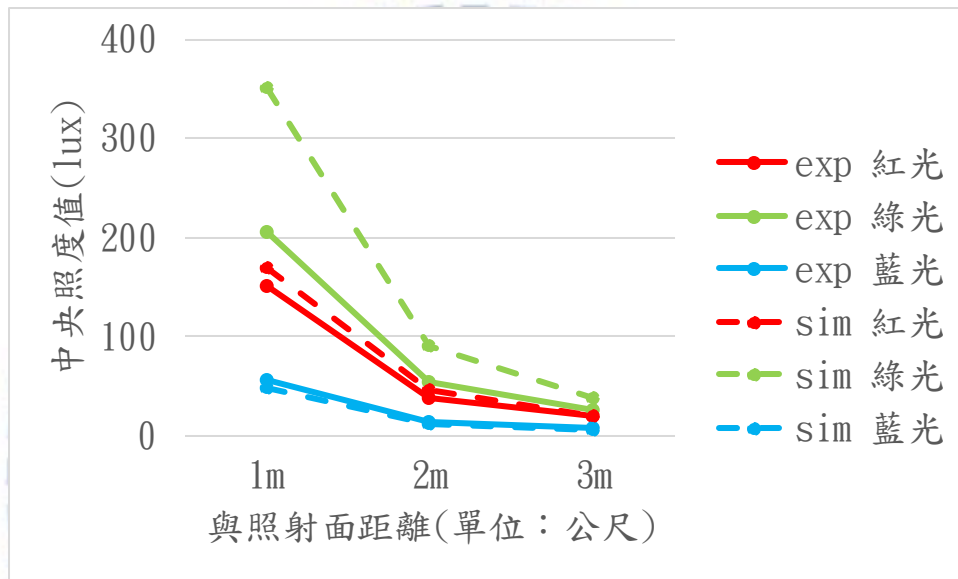


圖 5.1 空氣中模擬與實驗之照度值比較圖

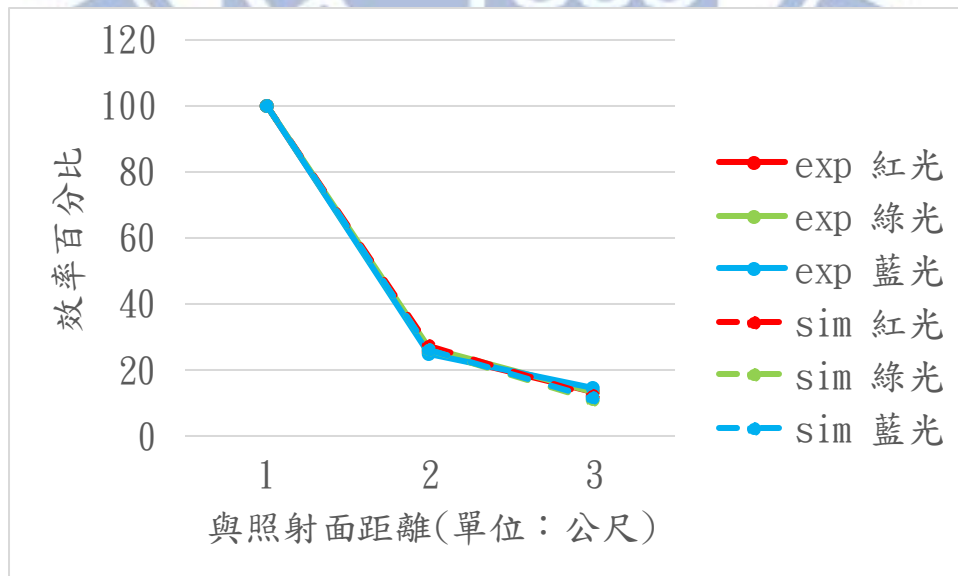


圖 5.2 空氣中模擬與實驗之效率百分比比較圖

從這裡可以發現，模擬值與實驗值在空氣中的效率是接近的，此驗證了模擬中光源的正確性；而且可以看出，三原色光在空氣中隨這距離的增加，效率幾乎一樣，證實了在一般空氣中距離的改變並不會影響其各色光的比例，也就不會影響到演色性。而在照度值方面有所差異，其最大原因為反光杯之模型是我們自行建立的，其在側面的全反射面會因為曲率的不同造成不一樣的收光效果，因此我們建立的反光杯與實際上使用的有所差異，導致其照度值有誤差。

接著將針對在水中的實驗與未加散射的模擬值加以比較如圖 5.3 及 5.4 所示，同樣的虛線為模擬值，實線的則為實驗值。

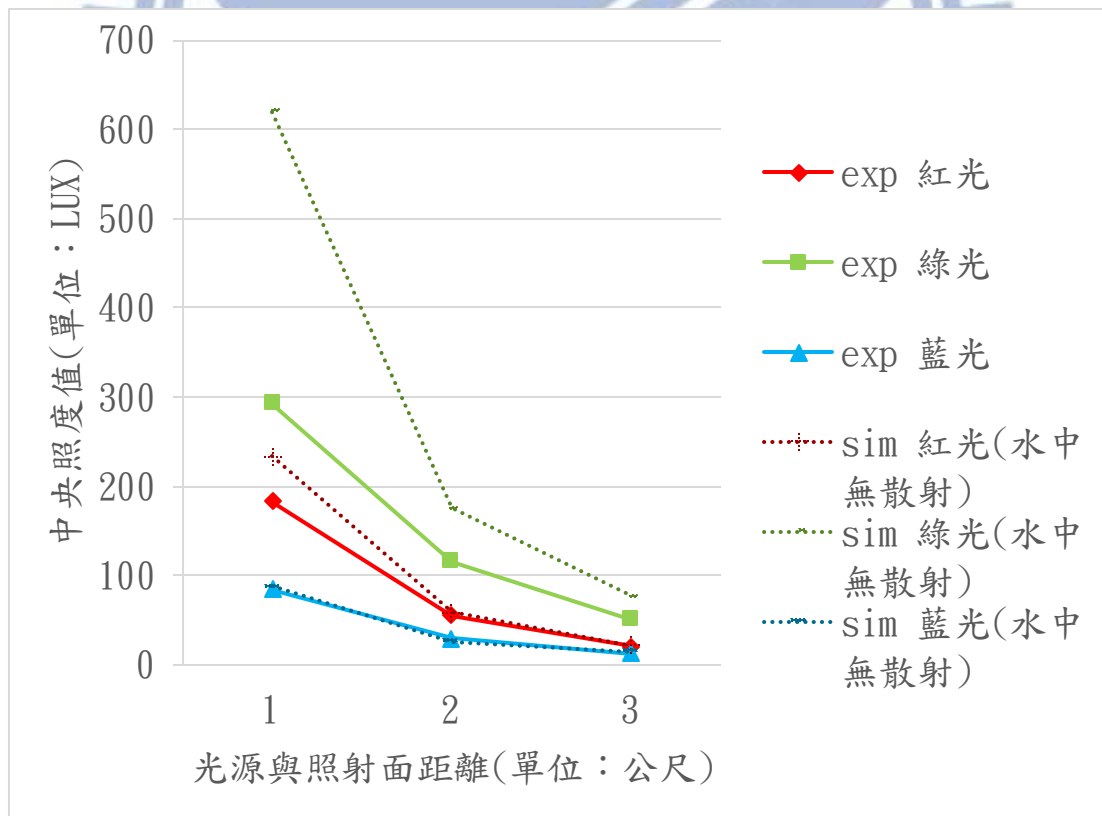


圖 5.3 水中未加散射的照度值模擬與實驗比較圖

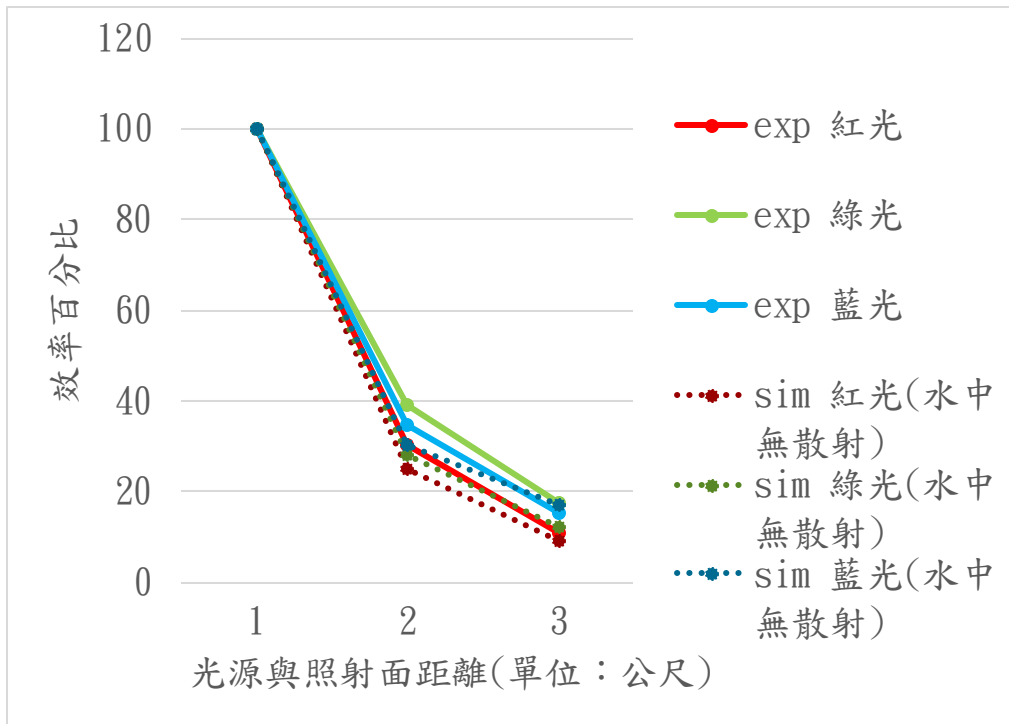


圖 5.4 水中未加散射的效率百分比模擬與實驗比較圖

這裡可以看到實驗量出來之效率百分比模擬值的結果高，而在三原色的比較上面，實驗中的效率為綠光>藍光>紅光，而模擬中在未加散射的情形則為藍光>綠光>紅光，這裡可以看出如果在模擬內不加入散射效應的話，藍光效率會比綠光還高而與實際情形不符。因此接著將針對加入散射後之實驗與模擬進行比較，如圖 5.5 及 5.6，虛線為模擬值，實線的則為實驗值。

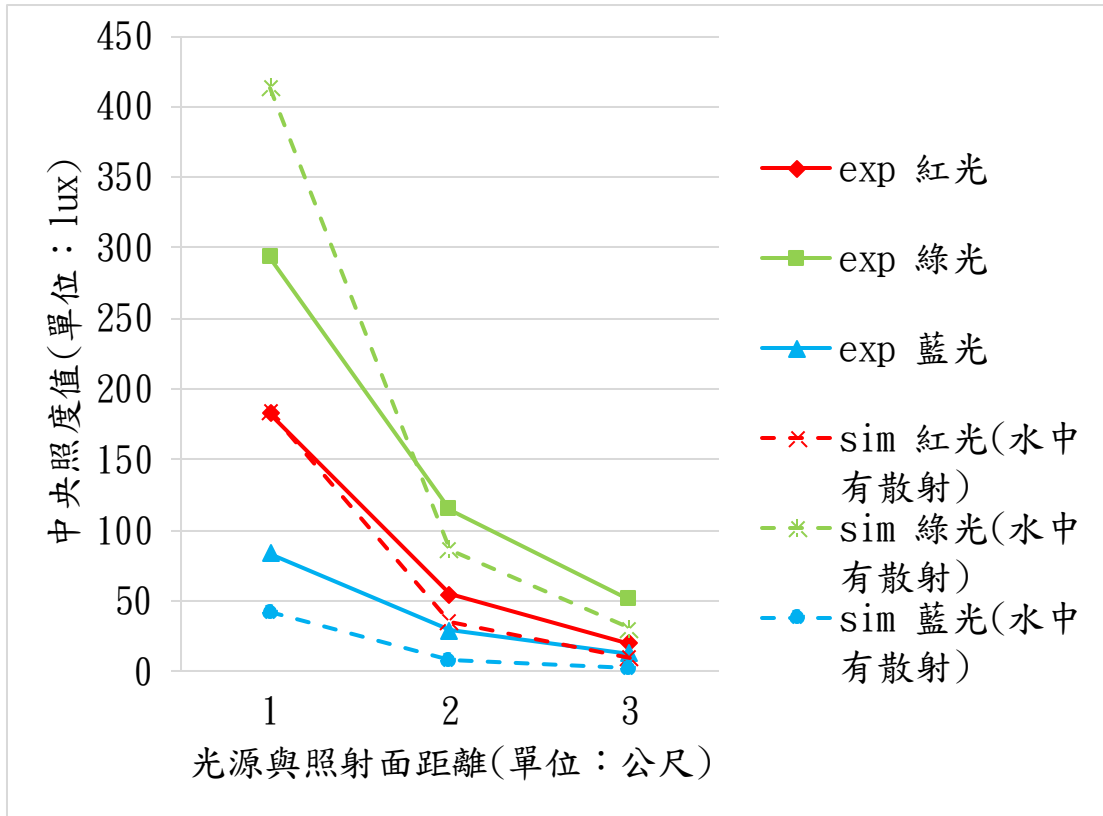


圖 5.5 水中加散射的照度值模擬與實驗比較圖

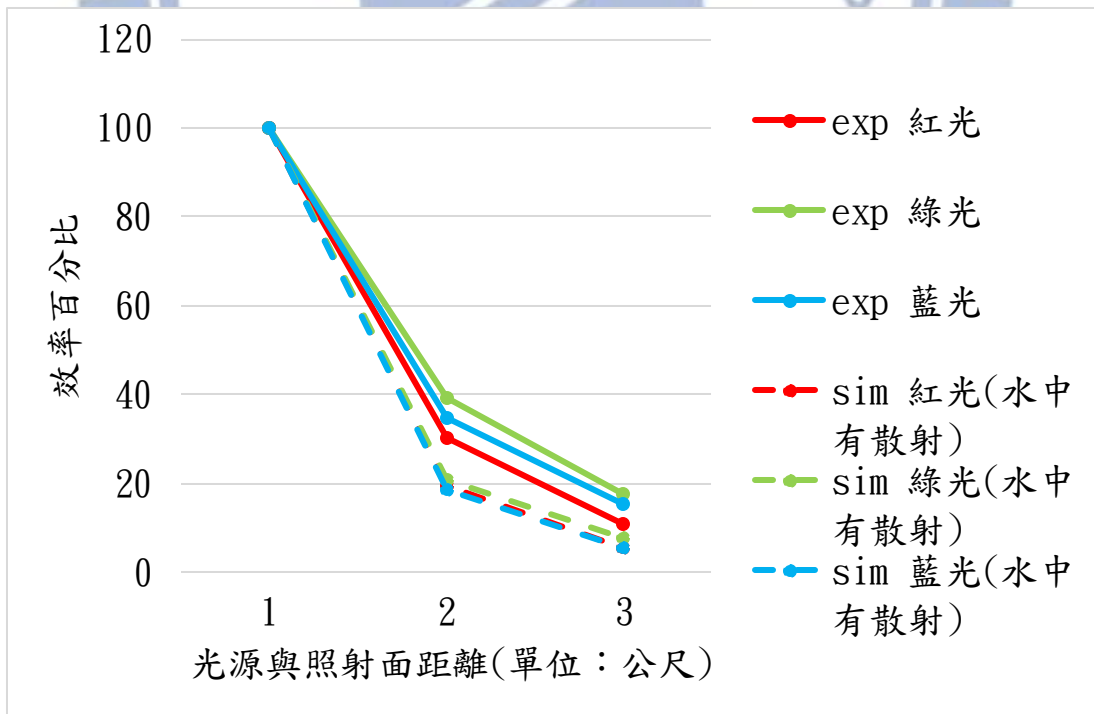


圖 5.6 水中加散射的效率百分比模擬與實驗比較圖

與上述未考慮散射之結果相同，在光效率部分仍然為實驗較高，且加入散射後，雖然藍光效率有如預期的變低，但由於散射情形過於嚴重，導致三原色的光效率十分接近，與實驗值有所差異。

5.2. 誤差討論

針對上一節中實驗與模擬之差異，以下將列出造成誤差的可能情形。

1. 模擬的邊界條件設定

在模擬裡，水箱的邊緣是以完全吸收體作為設定，而在實際實驗上，雖然水箱邊緣圖有黑色塗料以盡量的避免光的反射，但仍然不是完全吸收體，因此實驗結果會因為壁面光線反射而造成照度變高進而使效率百分比有所差異。

2. 晶片溫度影響

雖然本研究有針對溫度加以量測，並在模擬內加以設定，但由於器材位置限制，在實驗中量測到溫度仍然不是晶片的實際溫度，晶片的實際溫度應該會略高於我們所量到的溫度，因此實驗的照度值會略低。

3. 反光杯模型差異

雖然在模型部分已盡可能的按照實際的反光杯加以繪製，但其側面的全反射面並非球面鏡，難以繪製到一模一樣，因此在模型上仍會

有誤差。而由於全反射面是利用兩介質間的折射率不同引發全反射，然而波長不同對介質的折射率也有所不同，因此全反射面的誤差將對三原色光影響有所不同，以本研究的模擬結果來講，便是繪製出的全反射面對綠光效果較好導致綠光照度差異最大。

4. 環境數值的不確定性

現階段水中模擬仍與實驗有所差距，其最大的原因便是環境參數的影響，就像先前提過的，在水中要考量的情形過多，吸收、散射皆會因為波長的改變而有所改變，且不同的水，其吸收和散射皆會不同，而本研究所使用的散射數值為參考教科書上[13]之數值加以直接使用，而在吸收係數上面則是值皆採用模擬軟體內建水的材料設定，因此實驗值在光效率部分比模擬值更高，原因可能為我們所設定之吸收與散射太強，導致光效率不佳。

為了驗證散射數值為誤差的來源之一，我們針對輸入的散射數值做調整，使其藍光的散射情形降低，調整的係數圖如圖 5.7，結果如圖 5.8 所示。其效率百分比的順序在 2 公尺變為綠光(23.6%)>藍光(22.6%)>紅光(21.9%)而在 3 公尺變為綠光(8.5%)>藍光(8%)>紅光(7.3%)，順序與實驗相同，為驗證此假設的散射曲線之正確性，將需要利用量測光散射的儀器進一步檢測本實驗所推測之自來水的散射係數。

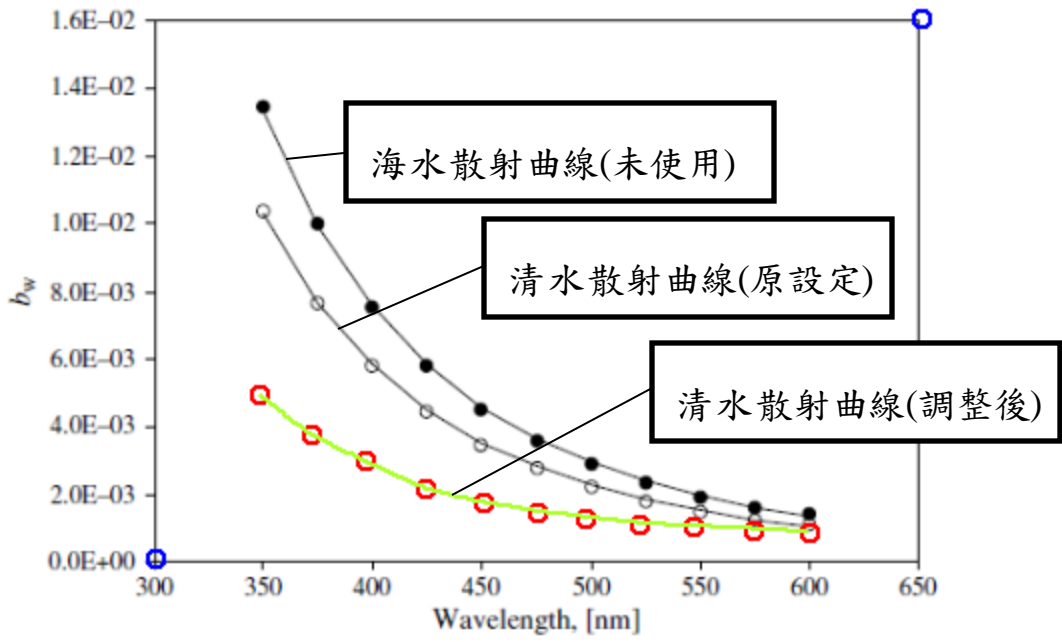


圖 5.7 調整後散射曲線(綠線)

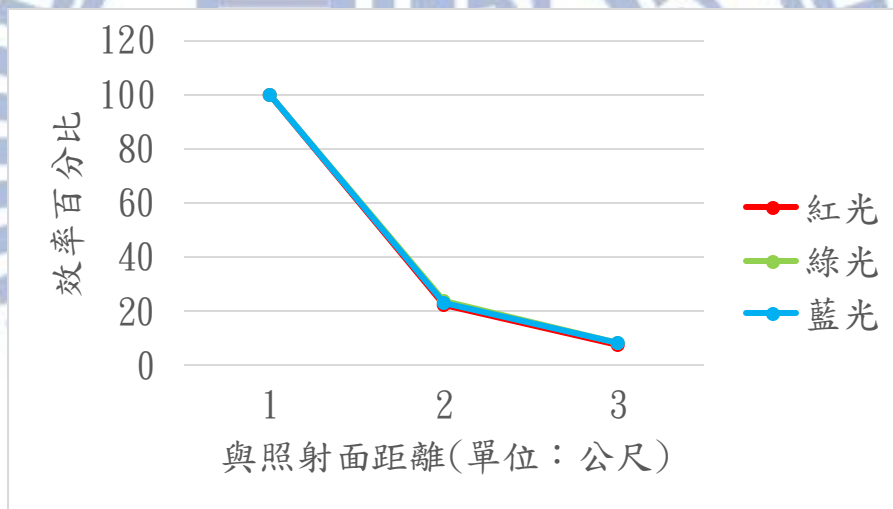


圖 5.8 調整散射數值後模擬的水中效率百分比

第六章 結論與未來展望

6.1 結論

由環境為空氣中的照度實驗可知，隨著距離的增加，三原色光的效率百分比皆相同，所以在照射面上三原色光的比例不變，因此其演色性並不會因距離增加而有所改變，此結果與理論相符。

而在環境為水中的照度實驗可知，在三公尺範圍內紅光的效率最差、其次為藍光、最後則為綠光，因此如照射在三公尺的地方，其演色性就會不如預期並預測之後演色性將需要調高紅光與藍光之電流值。

在演色性實驗可知，若在不調節電流的情況下將光放入水裡照射，其演色性會明顯降低，且從後續實驗可證實 MC-E 光源確實能藉由調節電流以在水中改善演色性降低的問題，且由於此裝置對 4 個晶片的供應電流為可調整式的，因此雖然只做了一般水中的實驗，但可預期在一些更惡劣的環境下，如黑煙中、海水中、濃霧中等，也可以改善演色性降低的問題，而在模擬中，雖然在水中模擬的誤差較大，但其散射的趨勢是有成功出來的，因此在未來藉由進一步量測散射數值應可成功的建立水中環境下照射的模型。

6.2 未來展望

我們希望未來能針對下列幾點加以研究

1. 反光杯的自行設計

目前實際應用的反光杯為外面廠商設計所應用於 MCE 此顆晶片的，然而其設計仍然為軸對稱，並未考量到實際上 MCE 的 4 個晶片發光波長不同，其光源分布並非軸對稱，因此可針對反光杯外型進行模擬與最佳化，找尋更好的設計。

2. 水中模擬參數的調整

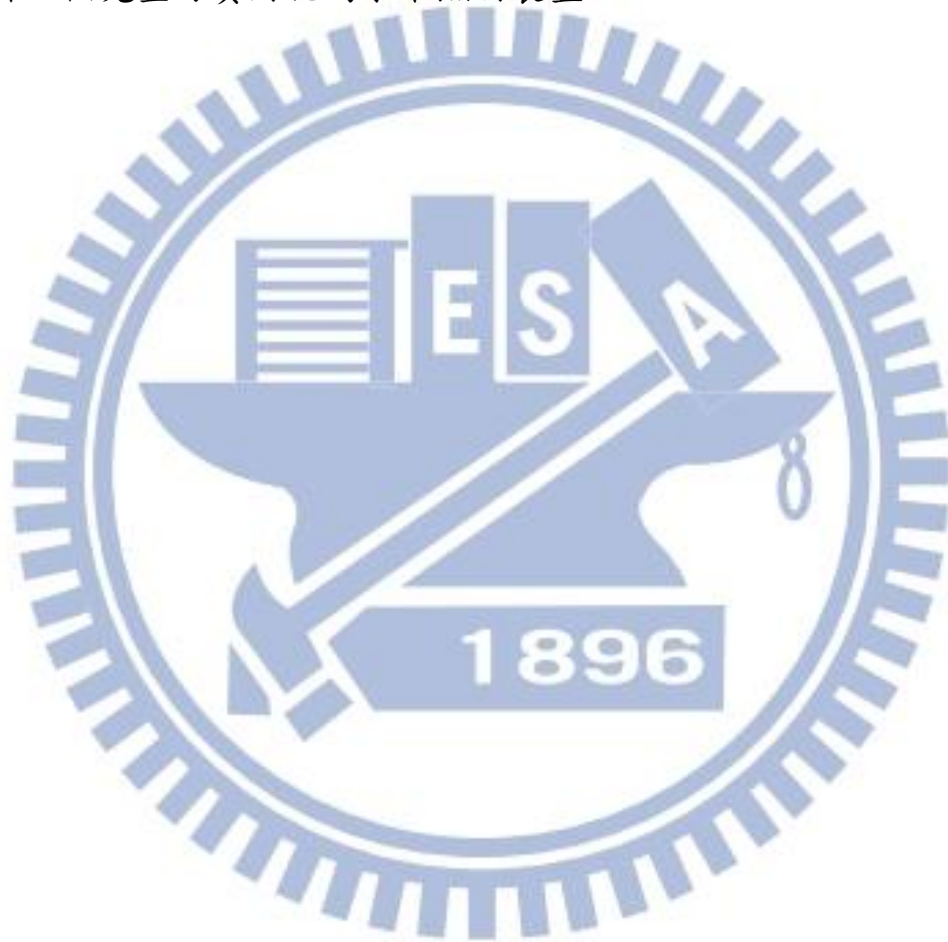
藉由量測並調整在模擬內有關水的參數，希望能成功的在模擬軟體內模擬出水中照射情形，如此就可在實驗前不需量測三原色的照度值即可與本研究之實驗相同可預測到如何調整電流值來達到更好的演色性，且此模型也可供後續針對反光杯的研究作使用。

3. 色溫的調節

在演色性實驗裡，我們在找尋最佳演色性時，發現到當找到最佳的演色性時，此時如果稍微調高藍光的電流值，其演色性不會有太大影響，但其色溫會變高，而色溫的變化對人的身心理皆會有影響[11]，因此本裝置也可期望藉由調節色溫，以讓人有更好的專注力或休息品質。

4. 水下裝置實用化之開發

除了上述所提及之反光杯的設計，我們希望還能針對防水性能、散熱性能加以改良，並為了能使電流的調節方式能讓一般人更加地輕易操作，可利用開關式或甚至結合數位面板加以控制，希望能藉此設計出一個完整可實用化的水下照明裝置。



參考文獻

- [1] 陳建隆，發光二極體之原理與製程，初版，全華科技圖書股份有限公司，2006。
- [2] K. R. Hardy, et al. “High Brightness Light Emitting Diodes for Ocean Application”, Oceans conference record, September 2007.
- [3] K. R. Hardy, et al. “Advances in High Brightness Light Emitting Diodes in underwater Application”, Oceans conference record, September 2008.
- [4] 趙致傑，「高亮度LED模組於水下光場之設計與分析」，國立成功大學，碩士論文，民國99年。
- [5] 張詩意，「高功率白光LED之混光實驗、模組設計及模擬優化」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國95年。
- [6] M. S. Olsson, “LED Illumination Devices and Method”, US patent 20120268945, 2012.
- [7] 廖榮皇，「應用於消防及緊急逃生之照明光學系統設計」，國立清華大學，博士論文，民國101年。
- [8] 林冠廷，「可調式色溫LED燈源之演色性品質評價」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國101年。
- [9] H. C. van de Hulst, Light Scattering by small Particles, Dover, New York, 1981.

[10]A. A. Kruithof “Tubular luminescence lamps for general illumination”, Philips Tech. Rev. 6(3). 1941.

[11]張裕隆，「全般照明環境下色溫度變化對心理與生理反應之研究」，國立成功大學，碩士論文，民國92年。

[12]CREE <http://www.cree.com/>

[13]M. Jonasz, G. R. Fournier, Scattering by Particles in Water, Academic Press, London, UK, 2007.

