

國立交通大學

平面顯示技術碩士學位學程

碩士論文

高亮度 LED 光電熱特性量測與分析



Optical, Electrical, Thermal characteristic Measurement  
and analysis of High Power LED

研究生：徐錦淵  
指導教授：郭浩中教授

中華民國九十九年十一月

高亮度 LED 光電熱特性量測與分析  
Optical、Electrical、Thermal characteristic  
Measurement and analysis of High Power LED

研究生：徐錦淵      Student : Chin-Yuan Hsu  
指導教授：郭浩中      Advisor : Hao-Chung Kuo

國立交通大學

平面顯示技術碩士學位學程

碩 士 論 文



A Thesis  
Submitted to Degree Program of Flat Panel Display Technology  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science  
in  
Flat Panel Display Technology  
November 2010  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九 年 十一 月

## 摘要

本論文主要研究主題為使用積分球、分光光譜儀、電源供應器、熱電致冷溫控器、以及 DAQ 卡，使用 Labview 軟體整合上述儀器，透過校正手法，了解波長校正、分光通量絕對值校正，並從架設完成的儀器中，測量相同的高亮度 LED，不同散熱基板的熱阻。

本研究會先從基本輻射度量學探討，進而與光度學做比較，接著再從色度學的觀念，解釋出常用的單位定義以及說明積分球量測原理及注意事項、光譜儀原理，以及波長校正，絕對強度值校正，然後介紹目前三種常看到的熱阻量測方法，比較每個方法的優缺點，並說明為何使用 NIST 的熱阻量測方法，根據上述的原理，使用 Labview 軟體開發出可同時測試 LED 的光電熱特性。

最後使用廠商所贊助相同規格的高功率白光 LED 測試，比較這幾顆 LED 的特性，以及在不同接面溫度下、不同注入電流下的熱阻值的變化。

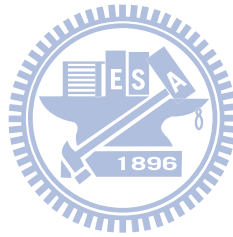
## Abstract

In this study, we integrated the integrated sphere, optical emission spectrometer, power supply, thermoelectric cooling (TEC) module, and DAQ card into one system by Labview software. Through the varying approaches, we accomplished the calibration of wavelength, luminous flux, junction temperature, and thermal resistance of LEDs. Besides, we measured and analyzed the thermal resistance of LEDs with different heat slug.

This thesis begins with the discussion of basic radiometry, and following by comparison with photometry. Then we defined several useful units from the aspect of colorimetric. We specified the working principle of integrated sphere, optical emission spectrometer and the calibration of emission wavelength, absolute intensity. Next, we introduced three common methods of measuring thermal resistance and contrast them, and we explained why we chose the NIST method. According to the mentioned methods, we developed a system by Labview software which can measure the optical, electrical and thermal

characteristics of LEDs at the same time.

Finally, we analyzed the thermal characteristics of high power white LEDs under different junction temperature and injection current.



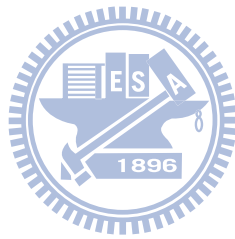
## 致謝

首先誠摯的感謝郭浩中老師，老師悉心的教導使我得以一窺 LED 製程及封裝領域的深奧，並不時的給予建議以及教導，使我在這些年獲益匪淺，不僅在學識方面，老師在待人處世方面更是我們學習的典範。

本論文的完成另外亦得感謝栽培我的公司五鈴光學，總經理郝祖德郝哥，時常給我的鼓勵與建議，讓我不論在開發軟硬體上，都有足夠的硬底子，來應付客戶的需求，同事賴傑宏 Roger，在我開發時遇到困難時，都會提點我，幫助我度過難關，同事李海津大叔時常給我的鼓勵與幫助，還有左老師、Wolf、馥米、Rita、Jolly、Leanne、淑姿、袁欣，在工作上大力協助，工研院電光所的明吉、聖良技術的協助，因為有你們的體諒及幫忙，使得本論文能夠更完整而嚴謹。

兩年多在交大的日子，感謝眾位學長及同學們、你們的陪伴讓兩年多的生活多采多姿。感謝 Boris、Nason 這兩個同班同學，有事情發生的時候一定會通知我，感謝感謝；感謝清華學長在實驗中的幫忙指導，明華、士偉學長們半開玩笑的建議，常常讓我有新的構想開發儀器，也感謝政暉、治凱、柏孝、朝勳同學的幫忙，不論是在資源的分享上，或者是一起做實驗的情感，謝謝你們的幫忙，當然還有實驗室的其他人都讓我銘感在心。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親及祖母，還有在天國的祖父，  
因為有您們的支持與鼓勵，讓我能求學的過程中無後顧之憂的進行  
研究。



## 目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
致謝.....	IV
目錄.....	VI
表目錄.....	IX
圖目錄.....	X
第一章 緒論.....	- 1 -
1.1 LED 的發展概況.....	- 1 -
1.2 熱阻量測的重要性.....	- 3 -
1.3 熱阻量測解決方法.....	- 4 -
第二章 LED 光色量測原理及參數定義.....	- 5 -
2.1 輻射度量與光度學的基礎.....	- 5 -
2.2 色度學(Colorimetry).....	- 7 -
2.2.1 輻射通量(Radiant Flux, $\Phi_e$ ).....	- 7 -
2.2.2 光通量(Luminous Flux, $\Phi_v$ ).....	- 8 -
2.2.3 相關色溫(Correlated Color Temperature, CCT 或 TCP)..	- 10 -
2.2.4 色度差(Chromaticity Difference, DC 或 $duv$ ).....	- 11 -
2.2.5 色度座標(Chromaticity Coordinates).....	- 12 -
2.2.6 主波長(Dominate Wavelength, $\lambda_d$ ).....	- 17 -
2.2.7 顏色純度(Purity, P).....	- 18 -
2.2.8 峰波長(Peak Wavelength, $\lambda_p$ ).....	- 18 -
2.2.9 半波寬(Full Width Half Maximum, FWHM, $\Delta\lambda_{0.5}$ ).....	- 19 -
2.2.10 演色性(Color Rendering Index, CRI 或 Ra).....	- 20 -
2.2.11 發光效率(Luminous efficacy, $\eta$ ).....	- 23 -
2.2.12 輻射效率( <i>Wall plug efficiency or Radiant efficiency</i> ).....	- 24 -
2.3 積分球原理與架構.....	- 25 -
2.3.1 朗伯餘弦定律(Lambert's Cosine Law).....	- 25 -
2.3.2 球體架構.....	- 27 -



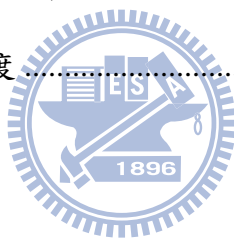
2.4	分光光譜儀.....	31
2.4.1	光譜儀工作原理.....	33
2.4.2	波長值校正.....	34
2.5	分光通量標準燈.....	36
2.5.1	絕對強度校正.....	36
2.6	輔助燈.....	38
2.7	熱電致冷溫控器(TEC)發展及原理.....	39
第三章	熱阻量測原理.....	45
3.1	熱阻量測相關參數定義.....	45
3.2	CNS 15248 量測熱阻規範介紹.....	47
3.3	熱電致冷溫控器 TSP 量測方法.....	52
3.4	NIST 熱阻量測方法.....	56
3.5	量測方法比較.....	60
第四章	LED 光熱電量測系統開發整合與實驗數據.....	62
4.1	系統架構.....	62
4.1.1	積分球規格.....	63
4.1.2	分光通量標準燈規格.....	64
4.1.3	分光光譜儀規格.....	65
4.1.4	光纖.....	66
4.1.5	熱電致冷溫控器規格.....	66
4.1.6	電源供應器.....	67
4.1.7	DAQ 資料擷取卡.....	68
4.1.8	開發軟體.....	69
4.2	NIST 量測方法之數據與 TSP 量測方法之數據.....	71
4.2.1	Emitter 封裝形式 (NIST 量測方法 VS TSP 量測方法).....	72
4.2.2	Star 封裝形式 (NIST 量測方法 VS TSP 量測方法).....	74
4.3	Emitter VS Star 光電熱量測數據.....	76
4.3.1	光強度變化 VS 接面溫度.....	76
4.3.2	相關色溫、演色性 VS 接面溫度.....	78
4.3.3	電壓、效率 VS 接面溫度.....	81
4.3.4	熱阻 VS 接面溫度.....	84
4.4	Emitter VS Star 散熱特性比較.....	86
4.4.1	接面溫度 VS 電流.....	87

4.4.2 光強度、色溫 VS 電流.....	- 88 -
第五章 結論與未來展望.....	- 90 -
5.1 結論.....	- 90 -
5.2 未來展望.....	- 91 -
參考文獻.....	- 92 -



## 表目錄

表 2-1	14 個參考顏色色板.....	- 23 -
表 2-2	常見燈泡的發光效率.....	- 24 -
表 2-3	分光光譜儀、視效函數偵測器優缺點比較.....	- 32 -
表 2-4	半導體與金屬材料的 Seebeck 係數.....	- 41 -
表 4-1	LED 光熱電量測系統設備一覽表.....	- 62 -
表 4-2	Emitter 之 TSP 資料與線性方程式.....	- 72 -
表 4-3	Emitter 之熱阻與接面溫度比較.....	- 73 -
表 4-4	Star 之 TSP 資料與線性方程式.....	- 74 -
表 4-5	Star 之熱阻與接面溫度比較.....	- 74 -
表 4-6	相關色溫 VS 接面溫度.....	- 79 -



## 圖目錄

圖 1-1	LED 發光效率發展藍圖.....	- 2 -
圖 1-2	LED 的輻射複合與非輻射複合.....	- 3 -
圖 2-1	電磁波頻譜.....	- 5 -
圖 2-2	視效函數.....	- 6 -
圖 2-3	五鈴光學開發的配光曲線儀(IGM-150).....	- 9 -
圖 2-4	五鈴光學開發的積分球系統.....	- 9 -
圖 2-5	色溫與顏色相對關係圖.....	- 10 -
圖 2-6	色溫與等溫線關係圖.....	- 11 -
圖 2-7	CIE 標準色度觀察者光譜三刺激值.....	- 12 -
圖 2-8	CIE 1931 色度座標.....	- 13 -
圖 2-9	CIE 1931 色差圖.....	- 14 -
圖 2-10	UCS 1976 色度座標.....	- 15 -
圖 2-11	CIE 1976 色差圖.....	- 15 -
圖 2-12	色度圖上的主波長.....	- 17 -
圖 2-13	半波寬示意圖.....	- 19 -
圖 2-14	理想朗伯平面強度分布.....	- 26 -
圖 2-15	實際量測朗伯平面強度分布(Sphere Optics 提供).....	- 26 -
圖 2-15	積分球內材料特性(Sphere Optics 提供).....	- 27 -
圖 2-16	矽偵測器之光譜響應.....	- 28 -
圖 2-17	積分球之基本結構.....	- 29 -
圖 2-18	視效函數偵測器(五鈴光學提供).....	- 31 -
圖 2-19	視效函數偵測器光譜響應(五鈴光學提供).....	- 32 -

圖 2-20	分光光譜儀之基本結構.....	- 33 -
圖 2-21	汞燈的光譜分布(五鈴光學提供).....	- 34 -
圖 2-22	波長值校正流程圖.....	- 35 -
圖 2-23	絕對強度值校正流程圖.....	- 37 -
圖 2-24	熱電材料的歷史演進.....	- 40 -
圖 2-25	各種尺寸的離散式散熱晶片.....	- 43 -
圖 2-26	積體式微致冷晶片與散熱鰭片示意圖.....	- 44 -
圖 3-1	$R_{JA}$ 定義示意圖 .....	- 45 -
圖 3-2	$R_{JC}$ 定義示意圖 .....	- 46 -
圖 3-3	$R_{JCR}$ 定義示意圖.....	- 46 -
圖 3-4	熱特性量測電路.....	- 47 -
圖 3-5	熱穩定之狀態曲線示意圖.....	- 48 -
圖 3-6	CNS 15248 參考之電源波型(A).....	- 49 -
圖 3-7	CNS 15248 參考之電源波型(B) .....	- 49 -
圖 3-8	CNS 15248 參考之 $V_F - T_J$ 關係曲線圖.....	- 50 -
圖 3-9	K 係數之量測電路.....	- 50 -
圖 3-10	CNS 15248 系統架構圖.....	- 51 -
圖 3-11	熱電致冷溫控器 TSP 系統架構圖.....	- 53 -
圖 3-12	TSP 之 $V_F - T_J$ 關係曲線圖.....	- 53 -
圖 3-13	參考之電源波型(A).....	- 54 -
圖 3-14	參考之電源波型(B) .....	- 54 -
圖 3-15	DC 電流驅動法電源波型(A) .....	- 57 -
圖 3-16	DC 電流驅動法電源波型(B).....	- 57 -

圖 3-17	脈波電流驅動法電源波型.....	- 59 -
圖 4-1	系統架構圖.....	- 62 -
圖 4-2	積分球外觀.....	- 64 -
圖 4-3	分光通量標準燈外觀與報告.....	- 64 -
圖 4-4	OceanOptics USB 2000+ 分光光譜儀外觀.....	- 65 -
圖 4-5	OceanOptics 光纖外觀.....	- 66 -
圖 4-6	熱電致冷溫控器外觀.....	- 67 -
圖 4-7	Keithley 2400 實際送出脈波寬度.....	- 68 -
圖 4-8	Keithley 2400 Source meter 外觀.....	- 68 -
圖 4-9	NI PCI-4461.....	- 69 -
圖 4-10	軟體操作介面.....	- 70 -
圖 4-11	Emitter 之 TSP.....	- 72 -
圖 4-12	Star 之 TSP.....	- 74 -
圖 4-13	光通量 VS 接面溫度.....	- 76 -
圖 4-14	輻射通量 VS 接面溫度.....	- 77 -
圖 4-15	不同接面溫度下的激發光譜.....	- 78 -
圖 4-16	相關色溫 VS 接面溫度.....	- 78 -
圖 4-17	演色性 VS 接面溫度.....	- 80 -
圖 4-18	順向電壓 VS 接面溫度.....	- 81 -
圖 4-19	LED 的 IV 特性曲線.....	- 81 -
圖 4-20	發光效率 VS 接面溫度.....	- 82 -
圖 4-21	輻射效率 VS 接面溫度.....	- 82 -
圖 4-22	熱阻 VS 接面溫度.....	- 84 -



圖 4-23	LED 內部電路示意圖.....	- 85 -
圖 4-24	不同電流下的接面溫度.....	- 87 -
圖 4-25	光通量 VS 電流.....	- 88 -
圖 4-26	輻射通量 VS 電流.....	- 88 -
圖 4-27	光通量 VS 電流.....	- 89 -



## 第一章 緒論

### 1.1 LED 的發展概況

傳統照明燈具的問題，如白熾燈泡雖便宜但有發光效率低、高耗電、壽命短、易碎等缺點；而日光燈雖很省電但其廢棄物有汞污染、易碎等問題；相對而言，符合節能環保安全的 LED，因是屬於化合物半導體的一種，有壽命長、低耗電量、低發熱量、光色純、高防震性、不易碎、安全、無污染、小型化等等優點，同時 LED 的發光效率也在此時達到 100 Lumen/W，且有相關商品出現，而且目前發光效率與亮度也不斷在提升中。目前已應用在室內照明、行動裝置、行車相關照明、情境光源等等的應用。

而在全全球 LED 相關廠商和研究單位不斷的積極研究下，其發光效率預估在 2015 年將可達到 150 Lumen/W，且在成本不斷下降之下，就目前而言，未來將有絕大的機會取代白熾燈泡與日光燈應用市場。

LED 的發展概況。





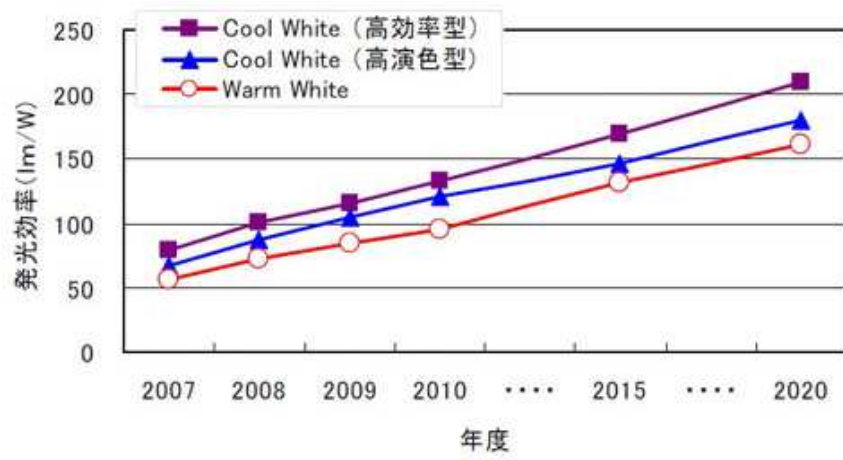
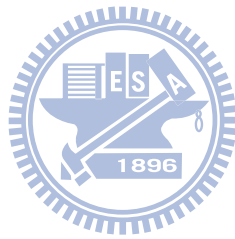


圖 1-1 LED 發光效率發展藍圖



## 1.2 熱阻量測的重要性

在 LED 發展如此快的情況下，還是有一些地方需要克服的，其中最大的問題就在於散熱。LED 在注入電流後，會產生兩種複合方式，一種為輻射複合，也就是說 LED 注入電流後，有一部分的能量會以光的形式輻射，另外一種就是剩下沒辦法輻射出的能量，就只能以熱能輻射的方式產生。在這裡面會牽扯到熱是不是能夠有效的被帶出，或者是熱能全部積熱在 LED 裡面，熱阻的測量就是能讓這些熱的影響變成數據化，讓使用者能知道在加入多少電能的時候，有多少的熱能可以順利釋放出，加上熱傳導以及自然對流的設計，讓散熱的問題能很快的解決。

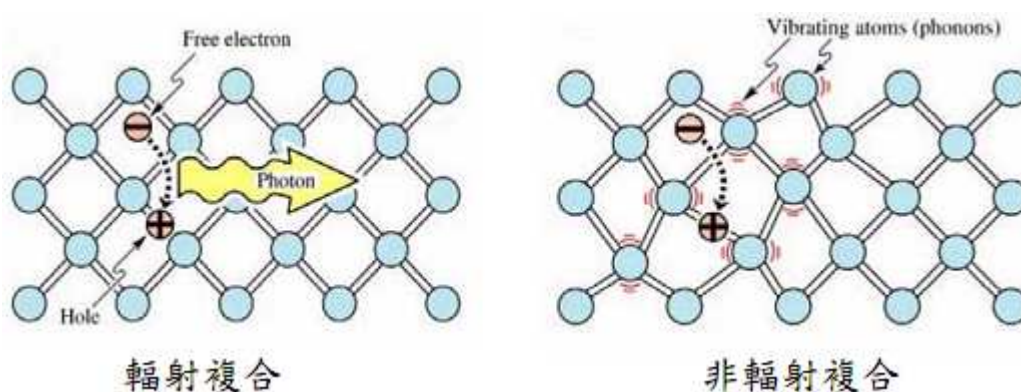
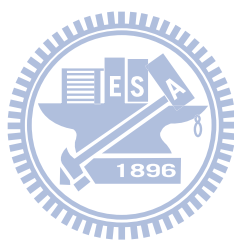


圖 1-2 LED 的輻射複合與非輻射複合

### 1.3 熱阻量測解決方法

目前市面上有許多量測熱阻的儀器，絕大部分的儀器都是參考 JEDEC JESD 51 所製作而成，而這些儀器大部分都是比較適用於積體電路，並不適合拿來量測高功率 LED，由於此類系統皆未附上光電特性的量測，而且量測時間長(約一天左右)，此種量測方法實在浪費時間，有鑑於此，特別參考了 NIST 量測熱阻的方法，與積分球做結合，同時量測高功率 LED 的光電熱特性，並且分析在不同接面溫度下，光電熱特性的變化。



## 第二章 LED 光色量測原理及參數定義

### 2.1 輻射度量與光度學的基礎

輻射度量學(Radiometry)是一門研究電磁輻射能量測的科學輻射度量學的基本概念和定律適用於整個電磁波段的輻射量測，但是對於不同電磁波的波段，由於其特殊性，又往往有不同的量測方式和手法。譬如說可見光波段的研究就是其中一個讓我們最為熟悉又常用的量測方式和手法，光學波段一般是指從波長 0.1 nm 到 100  $\mu\text{m}$ ，大約是指 X 射線(X-ray)到遠紅外線(FIR)，波長小於 0.1 nm 以下是  $\gamma$  射線，而波長大於 100  $\mu\text{m}$  的話，則是更遠的微波或者是無線電波。

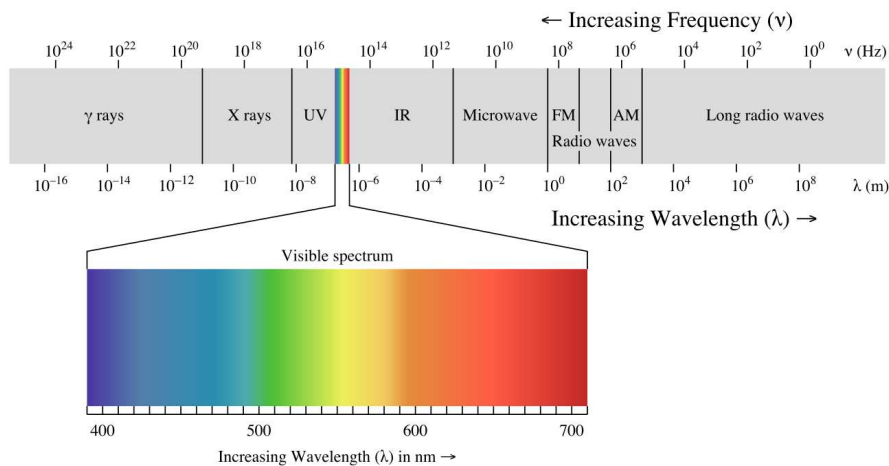


圖 2-1 電磁波頻譜

輻射度量是用能量單位描述輻射能的客觀物理量，而光度學 (Photometry) 是光輻射能是為人眼接受所引起的視覺刺激大小的度量科學，研究範圍的波長一般是指 360nm 到 830nm，而兩者之間則透過視效函數 (Colour Matching Functions) 作為轉換媒介。

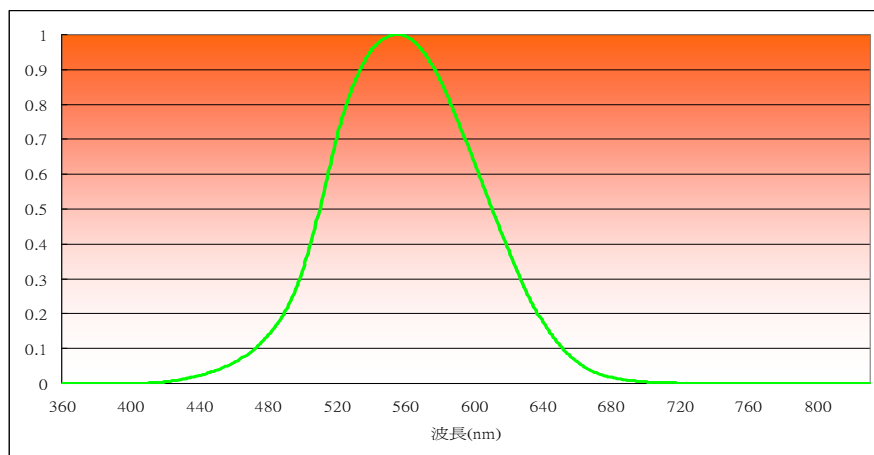


圖 2-2 視效函數

## 2.2 色度學(Colorimetry)

光源顏色或者物體顏色的定量或度量涉及了觀察者的視覺心理、照明條件、觀察條件等許多因素的複雜問題，例如說當室內的裝潢或者是照明的顏色趨近於紅色或者是橘色的時候，我們心裡普遍會感覺到溫暖熱情，這是因為紅色或者是橘色給人非常刺激，往往會令人心跳加快、呼吸急促的感覺；反而當條件都變成藍色的時候，心理則會感覺到涼爽冷靜還有一種給人放鬆的感覺。所以為了夠得到一致性的度量效果，國際照明委員會(INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, CIE)以下簡稱 CIE，基於每一種顏色都能使用三個選定的顏色，紅色(R)、綠色(G)、藍色(B)按照適當比例混合而成的實驗，並集合許多人的測試，在 1931 年進而制定出一種標準色度系統，稱為 CIE 標準色度系統，這個系統便成為後來近代色度學的基礎。

### 2.2.1 輻射通量(Radiant Flux, $\Phi_e$ )

輻射通量定義為以輻射的形式發射、傳輸或接收的功率，用以描述輻射能量的時間特性，實際應用中，對於連續輻射體或者是吸收體，以單位時間的輻射能量或是輻射通量表示，因此，輻射通量是一個非常重要的輻射度量單位，許多的光源發射特性以及許多的輻射接收器的輻射響應值，通常不會用輻射能量的時間累積值表示，而是直

接取決於輻射通量的大小決定，單位為瓦特(Watt)。例如，單色光的發光二極體(Light Emitting Diode, LED)，以下簡稱 LED，或者是雷射 (Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation)，它們在輻射通量的單位都是以 Watt 表示。

### 2.2.2 光通量(Luminous Flux, $\Phi_v$ )

光通量與輻射通量的定義是一樣的，單位為流明(Lumen)，光通量需透過視效函數與輻射通量作為轉換，由下式可知

$$\Phi_v(\lambda) = K_m \int_{360}^{830} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$$

式中：

$V(\lambda)$ ：人眼視效函數，計算的範圍在可見光波段 360nm~830nm

$K_m$ ：683.002  $\frac{\text{Lumen(光通量)}}{\text{Watt(輻射通量)}}$  at 555nm，由於 555nm 為視效函數最高

點，其他波長的視效函數，皆與  $K_m$  成比例關係。

輻射通量與光通量可以使用兩個方式量測數值，一為使用配光曲線儀(Goniometer)，如圖 2-3，另一種是使用積分球(Integrating Sphere)量測，如圖 2-4。

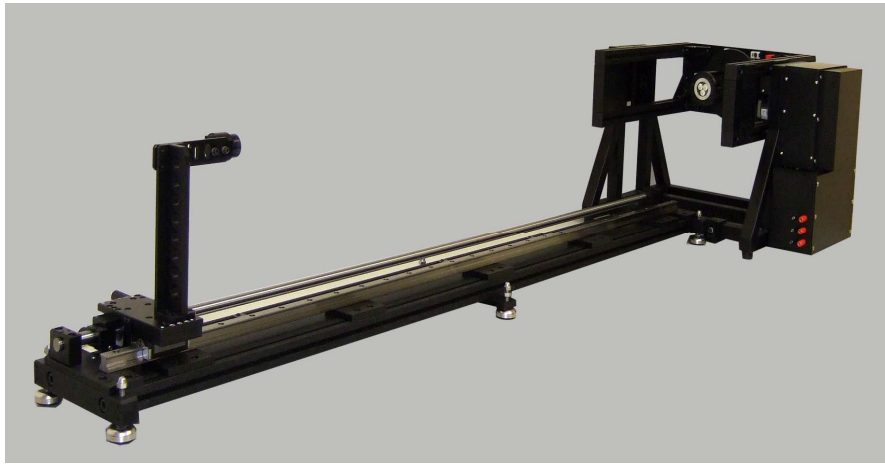


圖 2-3 五鈴光學開發的配光曲線儀(IGM-150)



圖 2-4 五鈴光學開發的積分球系統



### 2.2.3 相關色溫(Correlated Color Temperature, CCT 或 TCP)

色溫簡單的說就是顏色溫度，單位為凱文(Kelvin, K)，在可見光波段，當輻射體與某溫度時候的黑體(Black body)具有相同顏色時，那麼該黑體溫度就稱為該輻射體的色溫，根據色度學上的定義，色具有同色異譜的性質，也就是說兩種光源如果是有相同顏色特性的話，那麼它們的光譜能量分布不一定會是相同的，也就是說色溫不能像描述溫度那樣說明光譜能量分布的特性，但是對於連續波長的光源，例如鹵素燈，或者是不連續波長的光源，例如說螢光粉激發的 LED 或者是三色(RGB)混光的 LED，與黑體輻射相差很大的光源，卻是可以使用色溫來描述的。嚴格來說，任意光源的顏色，只能說與某一溫度的黑體顏色相近，但是不可能完全相同，所以才有相關色溫的概念出現，相關色溫就是輻射體和某溫度黑體顏色最相近時的黑體溫度，因為相關色溫的概念被提出來之後，許多光源得以使用相關色溫來描述其色溫值。

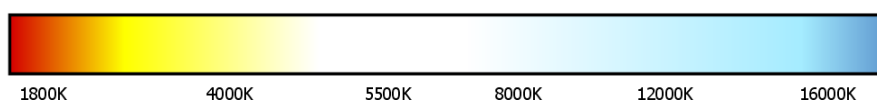


圖 2-5 色溫與顏色相對關係圖

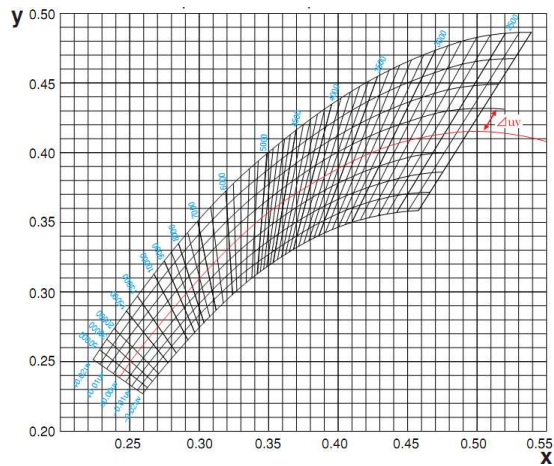


圖 2-6 色溫與等溫線關係圖

#### 2.2.4 色度差(Chromaticity Difference, DC 或 duv)

色度差是參考光源與待測光源在 CIE 1960(Uniform Color Space) 色度座標上，座標間距離的差異，一般來說待測光源的色溫應越接近參考光源的色溫才能做為比較，在待測光源色溫 5000K 以下時，選擇黑體作為參考光源，高於 5000K 以上時，則使用 D65 光源作為參考光源的依據，參考光源應與待測光源應具有相同或近似的色度座標，色度差應小於  $5.4 \times 10^{-3}$ ，待測光源的色溫就會更接近黑體的色溫。

$$\Delta C = \left[ (u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中：

$u_k$ 、 $v_k$ ：待測光源的色度座標

$u_r$ 、 $v_r$ ：參考光源的色度座標

## 2.2.5 色度座標(Chromaticity Coordinates)

CIE 為了能讓人們使用科學定量的方法，來表示顏色以及顏色之間的差異，方使用來表示顏色的計量與國際間的互相交流，在 1931 年制定了 XYZ 三刺激值的表色系統，以及標準色度觀察者光譜三刺激值，如下圖

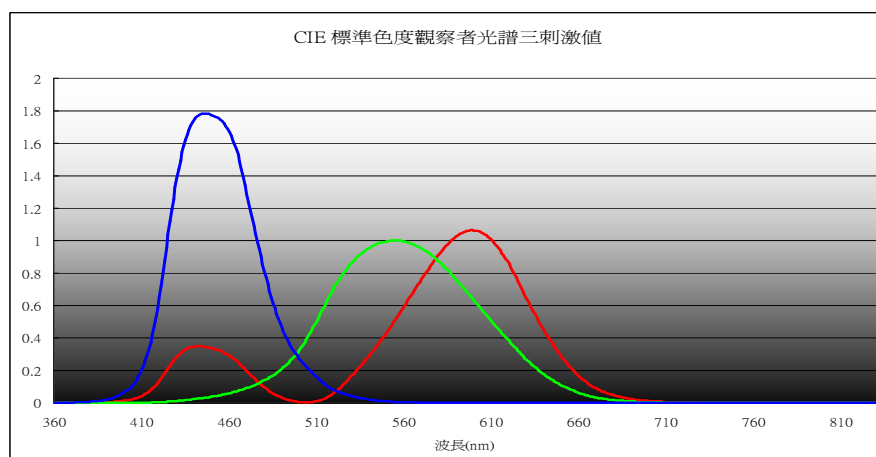


圖 2-7 CIE 標準色度觀察者光譜三刺激值

圖中， $\bar{X}(\lambda)$ 、 $\bar{Y}(\lambda)$ 、 $\bar{Z}(\lambda)$ 、分別代表對應各波長等能光譜色的三個假設原色的刺激值，其數據是從三個真原色 700nm、546.1nm、435.8nm，經過實驗之後轉換至 XYZ 表示系統，更由 XYZ 根據三刺激值推導出了 CIE 1931 色度座標，座標以 x、y 表示，如下圖

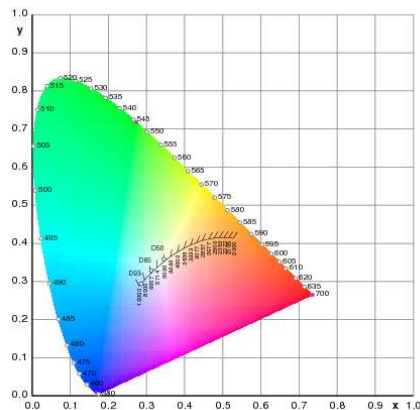


圖 2-8 CIE 1931 色度座標

色度座標中描述出許多色彩的資訊，包括馬蹄形最外部各顏色對應的波長關係，以及色度坐標與顏色的關係。經過多年的實驗證明 CIE 1931 標準色度觀察者的數據描述了人眼  $2^\circ$  視角的平均特性，但是實驗發現當視角加大至  $4^\circ$  以上， $\bar{X}(\lambda)$ 、 $\bar{Y}(\lambda)$ 、 $\bar{Z}(\lambda)$  在波長 380nm~460nm 區間數值偏低。這是由於大面積視角觀察時，桿狀細胞的參與以及中央凹黃色素的影響，顏色視覺會發生一定的變化。日常觀察物體時，視角經常超過  $2^\circ$  範圍，故為了適應大視角顏色量測的需求，1964 年 CIE 規定了一組 CIE 1964 補充標準色度觀察者光譜三刺激值，簡稱為 CIE 1964 補充標準色度系統，也叫做  $10^\circ$  視角  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  色度系統。在 CIE 1931 還有個缺點就是不能完整的表示色度差，如下圖所示

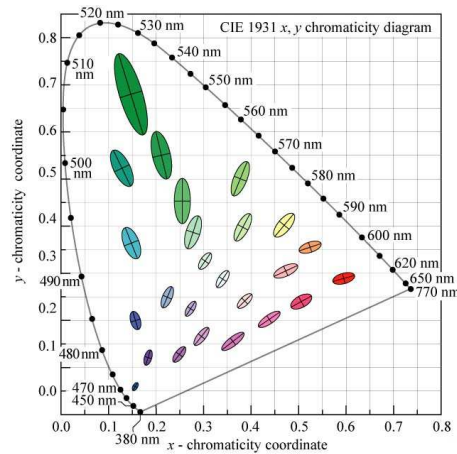


圖 2-9 CIE 1931 色差圖

也就是說當座標在綠色的時候，色度座標差很大時，綠色的色度差還是差不多一樣；但是在藍色的時候，色度座標差一點點，色度差就會變的非常大。為了改善這個色差所帶來的差異性，CIE 又在 1976 年的時候提出均勻色度空間的規定，稱為 CIE 1976 均勻色度空間，簡稱 CIE 1976 或者是 UCS 1976，座標以  $u'$ 、 $v'$  表示，如下圖所示，

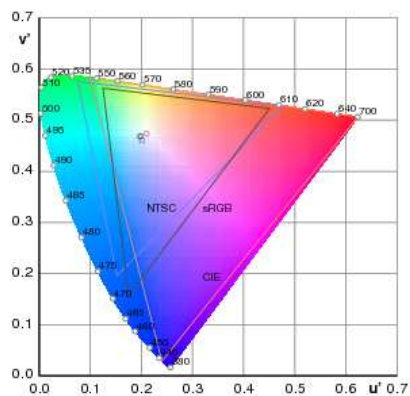


圖 2-10 UCS 1976 色度座標

如此一來在色度座標上的差異，並不會因為顏色的不同，而導致差異性的變化，如下圖

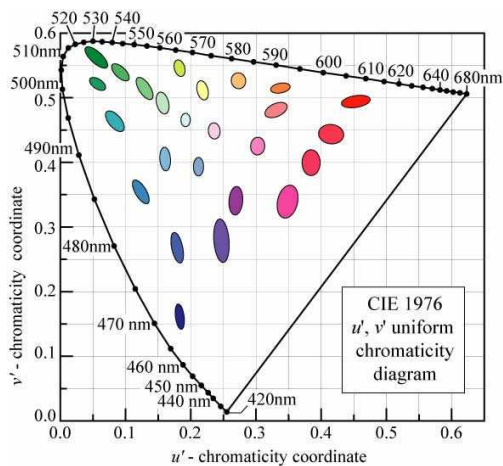


圖 2-11 CIE 1976 色差圖

要計算色度空間的座標，首先必須求出顏色的三刺激值，CIE 色度座標的三刺激值計算方式為

$$X = K_m \int_{360}^{830} \bar{X}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K_m \int_{360}^{830} \bar{Y}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K_m \int_{360}^{830} \bar{Z}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda$$

CIE 1931 xy 座標的計算方法：

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y$$

若是已經知道 L(亮度)xy 的話，可利用下式求得顏色的三刺激值

$$X = \frac{x}{y} Y$$

$$Y = Y$$

$$Z = \frac{z}{y} Y = \frac{1-x-y}{y} Y$$

CIE 1976  $u'v'$  座標的計算方法：

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} = \frac{4x}{-2x+12y+3}$$

$$v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} = \frac{9y}{-2x+12y+3}$$





例調配成白光 LED。

### 2.2.7 顏色純度(Purity, P)

顏色純度指的是待測光源顏色與主波長光譜色接近的程度，一般使用百分比(%)表示，數值為 100%時表示與主波長的光譜色相等，沒有其他的雜色光混入此待測光源的顏色中，例如雷射、單色光的 LED 皆是屬於此種顏色純度很高的光源，反之顏色純度在 50%以下的話，代表著這個待測光源混入許多雜色光，例如像螢光燈、白光 LED、鹵素燈皆是這種純度不是很高的光源。如圖 2-12 計算發光體的主波長和顏色純度時通常選用等能白(W 0.333, 0.333)當作參考點，連接量測點  $F_1$  到馬蹄形邊緣的光譜色點 D，其中 D 點是光譜色所代表的主波長，顏色純度則可用下列式子算出

$$P = \frac{x_w - x_1}{x_w - x_d} \times 100\% = \frac{y_w - y_1}{y_w - y_d} \times 100\%$$

顏色純度與色飽和度並不完全相同，一個是純粹描述顏色的純度，一個則是在顯示器上以 NTSC 所規定的三原色色域面積為分母，顯示器三原色色域面積為分子去求百分比。

### 2.2.8 峰波長(Peak Wavelength, $\lambda_p$ )

峰波長指的是在光譜範圍內光源所輻射出的最大能量所對應的

波長，常用於雷射或者是單色光 LED，與主波長不同的是，峰波長不等於人眼可辨識的波長，主波長才是人眼可辨識的波長，主波長在可見光波段才比較常用，而峰波長則是常用於不可見光的部份，利如紫外波段，紅外波段等等。

### 2.2.9 半波寬(Full Width Half Maximum, FWHM, $\Delta\lambda_{0.5}$ )

半波寬是指在雷射或者是單色光 LED 之發光光譜分部由峰值往兩側功率降到一半之間的波長寬度。以可見波段來說，其值通常決定顏色的清晰度，範圍越小則人眼所感覺到的顏色較清晰，通常 III-V 族的 LED 半波寬範圍約在 30nm 至 50nm 之間。

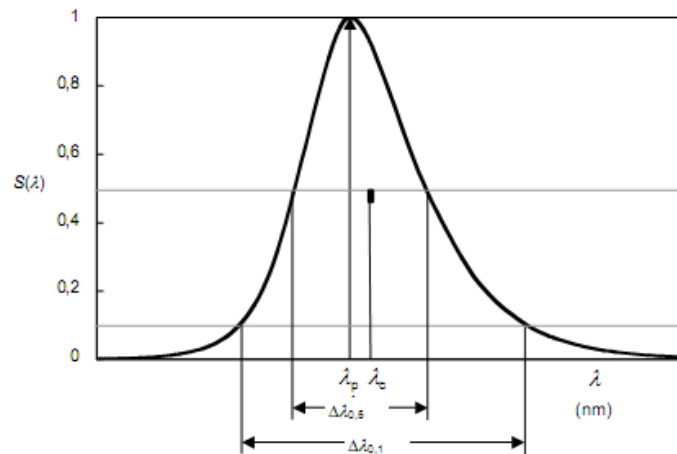


圖 2-13 半波寬示意圖

## 2.2.10 演色性(Color Rendering Index, CRI 或 Ra)

人眼的顏色視覺是在自然光照明下長期地進行各種工作和辨色過程中逐漸形成的。所謂自然光在白天是指日光，夜間為火光，火光的光譜分布大致相當於黎明和黃昏時的日光。儘管由於季節、緯度、氣候等條件的變化，日光會有不同的光色和光譜分布，但是日光和火光都是熾熱發光體，它們發光的光譜分布都是連續的。由於人眼長期適應於這類光源照明，因此在這類光源照明下觀察物體的顏色是恆定的。對物體顏色的辨別能力是準確的，我們可以認為在日光和火光的照明下看到的物體顏色是物體的真實顏色。隨著科學技術的發展，與日光、火光具有相似連續光譜分布的白熾燈統治照明工業的時代已經過去，許多發光效率高的光源已經出現。例如螢光燈、高壓鈉燈、高壓汞燈、氙燈、金屬鹵素燈等。它們具有新的發光機制，因此它們發出來的光的光譜分布不再完全是連續光譜了，有線光譜、波帶光譜，更多的是混合光譜。在這些新光源照明下看到的物體顏色與日光和白熾燈下所看到的顏色會產生一定的差異。例如一支高壓汞燈去照明賣肉的櫃台，你會發現新鮮的肉變得暗紅色，而且紅色缺少飽和度，如此一來會使顧客誤以為肉不新鮮。原因是這種燈缺少紅光部分的光譜，因此物體中的紅色的顏色損失了。由此可知，人眼在這些光源照明下看到的物體色會改變，感到物體顏色失真，這種影響物體顏

色的特性稱為光源演色性。演色性好的光源，則物體色失真小，看到的顏色越接近真實的顏色。

光源的演色性影響人眼所觀察物體的顏色，所以那些處理物體表面色的技術部門如紡織、印染、圖料、印刷、彩色攝影、彩色電視等部門，必須考慮由光源演色性所帶來的後果。對光源演色性進行定量的評估是光源製造部門評價光源品質的一個重要課題。

光源演色性的計算步驟：

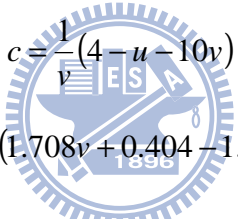
1. 量測待測光源的光譜分佈。
2. 根據光譜分佈計算待測光源的色度座標  $u_k$  ,  $v_k$  。
3. 根據  $u_k$  ,  $v_k$  求出待測光源的相關色溫。
4. 當相關色溫低於 5000K 時，選用黑體輻射體來當作參考照明體，它的色溫能隨待測光源的相關色溫選取，當相關色溫高於 5000K 時，選用 D65(色溫 6504K)光源，作為參考照明體，它的色溫也是經過待測光源的相關色溫選取。
5. 計算下列 14 組標準樣品在參考照明體下及在待測光源下的三刺激值以及色度座標  $u_{ri}$  ,  $v_{ri}$  ,  $u_{ki}$  ,  $v_{ki}$  。
6. 考慮顏色適應的色度位移，求得  $u'_{ki}$  ,  $v'_{ki}$  。由於待測光源與參考照明體的色度不完全相同，而使眼睛在這兩種不同光源照明下需適應顏色變化的影響。為了處理適應顏色變化的影響，必須將待測

光源的色度座標  $u_k, v_k$ ，調整成為參考照明體的  $u_r, v_r$ ，即  $u'_k = u_r$ ， $v'_k = v_r$ 。這時候這 14 組標準樣品的  $u_{ki}, v_{ki}$ ，也要做對應的調整，成為  $u'_{ki}, v'_{ki}$ 。此種色度座標的調整稱為顏色適應的色度位移。用下列式子調整

$$u'_{ki} = \frac{10.872 + 0.404 \frac{c_r}{c_k} c_{ki} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{ki}}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{ki} - \frac{d_r}{d_k} d_{ki}}$$

$$v'_{ki} = \frac{5.52}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{ki} - \frac{d_r}{d_k} d_{ki}}$$

式中  $c, d$  由下式計算



$$c = \frac{1}{v} (4 - u - 10v)$$

$$d = \frac{1}{v} (1.708v + 0.404 - 1.481u)$$

7. 用下列式子求得各標準樣品的  $\Delta E_i$

$$W^*_{ri} = 25(Y_{ri})^{\frac{1}{3}} - 17, \quad W^*_{ki} = 25(Y_{ki})^{\frac{1}{3}} - 17$$

$$U^*_{ri} = W^*_{ri}(u_{ri} - u_r), \quad U^*_{ki} = W^*_{ki}(u'_{ki} - u'_k)$$

$$V^*_{ri} = W^*_{ri}(v_{ri} - v_r), \quad V^*_{ki} = W^*_{ki}(v'_{ki} - v'_k)$$

式中  $u'_k = u_r, v'_k = v_r$















$$\Delta E_i = \sqrt{(U^*_{ri} - U^*_{ki})^2 + (V^*_{ri} - V^*_{ki})^2 + (W^*_{ri} - W^*_{ki})^2}$$

8. 以下列式子求得各標準樣品的  $R_i$  以及最後的  $R_a$

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$$

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

表 2-1 14 個參考顏色色板

顏色編號	孟塞爾編號	顏色描述	表示顏色
TCS 1	7.5 R 6/4	暗灰紅色	
TCS 2	5 Y 6/4	暗灰黃色	
TCS 3	5 GY 6/8	飽和黃綠色	
TCS 4	2.5 G 6/6	中等黃綠色	
TCS 5	10 BG 6/4	淡藍綠色	
TCS 6	5 PB 6/8	淡藍色	
TCS 7	2.5 P 6/8	淡紫藍色	
TCS 8	10 P 6/8	淡紅紫色	
TCS 9	4.5 R 4/13	飽和紅色	
TCS 10	5 Y 8/10	飽和黃色	
TCS 11	4.5 G 5/8	飽和綠色	
TCS 12	3 PB 3/11	飽和藍色	
TCS 13	5 YR 8/4	淡黃粉色	
TCS 14	5 GY 4/4	樹葉綠	



### 2.2.11 發光效率(Luminous efficacy, $\eta$ )

發光效率是衡量一個光源把電能轉換成可見光轉換效率的指標，是光源所發出的光通量與光源所消耗電功率的比值，量測的單位是  $\frac{\text{流明}}{\text{瓦}} \left( \frac{\text{Lumen}}{\text{Watt}} \right)$ 。電燈類之輸出與用電量大小成正比，同類燈泡之大瓦特數者，其光輸出也較大。不同類光源作比較，則因發光原理不同，須以發光效率即每瓦特之用電量所產生之光輸出  $\frac{\text{流明}}{\text{瓦}} \left( \frac{\text{Lumen}}{\text{Watt}} \right)$  來比較。光通量越高，光源就顯得越明亮。通常以發光效率來量化比較各種光源的發光效果。常用人工光源中以白熾燈泡、日光燈、鹵素燈、水銀燈為主，尤其前三種最為室內照明所採用，LED 燈泡也隨著製程與散熱方面的改善，逐漸取代前述的幾種燈泡。

表 2-2 常見燈泡的發光效率

燈泡種類	發光效率 (Lumen/Watt)
白熱燈泡	10 ~ 15
鹵素燈	15 ~ 25
省電燈泡	50 ~ 60
日光燈	60 ~ 100
水銀燈	55
複金屬燈	60 ~ 100
高壓鈉燈	100 ~ 150
高壓鈉燈	150 ~ 200
LED 燈泡	60 ~ 150

#### 2.2.12 輻射效率(*Wall plug efficiency or Radiant efficiency*)

與發光效率定義類似，它是指說光源所發出的輻射通量與電功率之比值，較多使用於描述雷射或者是單色光 LED。

## 2.3 積分球原理與架構

一般提到 LED 的量測一定都會提到積分球，積分球是測試 LED 最主要的儀器，但積分球並非一個單獨的量測設備，它常常與光源或偵測器搭配組合，作為理想的漫射標準傳遞和均勻光源，而積分球常見應用於光輻射以及色彩量測。

### 2.3.1 朗伯餘弦定律(Lambert's Cosine Law)

對於研磨很光滑或是鍍膜很明亮的反射鏡，當一束光入射到它上面時，反射光具有很好的方向性，即當恰好逆著反射光線的方向觀察時，因為入射光等於反射光的關係，能量全部反射回去，所以會感到十分耀眼，而在偏離不大的角度觀察時，就看不到反射光。對於一個表面粗糙的反射體或漫射體而言，就觀察不到上述的現象。

除了漫反射體之外，對於某些自身發射輻射的輻射源，輻射亮度與方向無關，即輻射原各方向的輻射亮度不變，這類的輻射源，就稱為朗伯輻射體。絕對黑體和理想漫反射體，在實際問題的分析中，常使用朗伯輻射體做為理想的模型。朗伯體反射或發射輻射的空間分佈可表示為

$$d^2P = L \cos \theta dA d\Omega$$

依照朗伯輻射體亮度不隨角度 $\theta$ 變化的定義，可得下式



$$L = \frac{I_0}{dA} = \frac{I_\theta}{dA \cos \theta}$$

$$I_\theta = I_0 \cos \theta$$

也就是說在理想情況下，朗伯體單位表面積向空間規定方向單位立體角內發射或反射的輻射通量和該方向與表面法線方向的夾角的餘弦成正比。

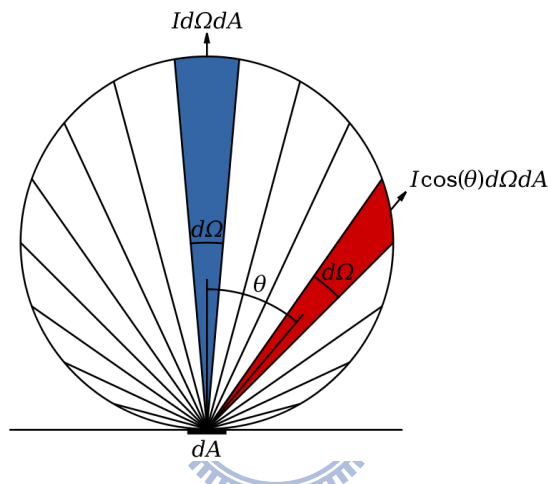


圖 2-14 理想朗伯平面強度分布

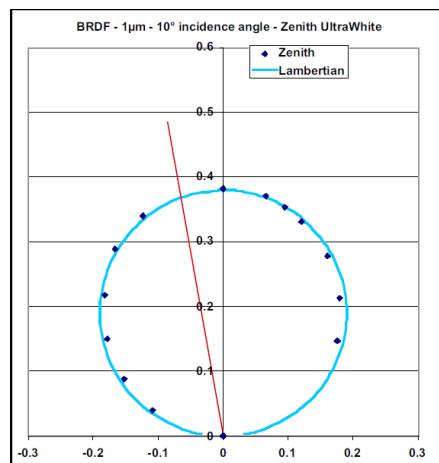


圖 2-15 實際量測朗伯平面強度分布(Sphere Optics 提供)

### 2.3.2 球體架構

積分球被廣泛的運用在光源量測、影像晶片平場修正或是用於標準光源的傳遞，在 LED 基本量測設備中更是常常會看到它的身影。

積分球的基本結構是由鋁或者是其他金屬、塑材等做成的一個內部空心球體，球內壁上都會噴塗多層漫射材料，通常是 20 層以上，例如硫酸鋇( $BaSO_4$ )，聚四氟乙烯等，這些材料都有一個共通的特性，光譜反射特性在可見光和近紅外相當平坦，反射率皆高達 90% 以上。

如下圖所示

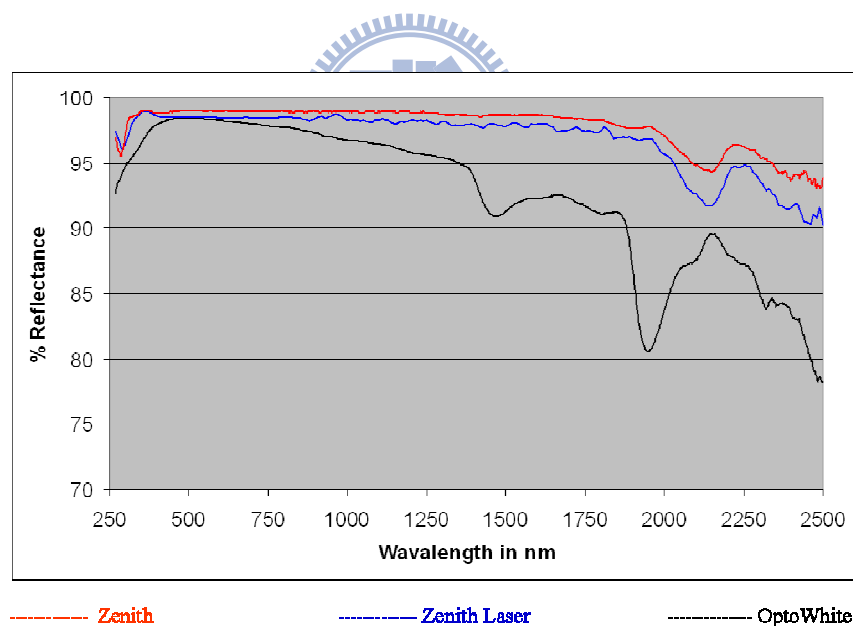


圖 2-15 積分球內材料特性(Sphere Optics 提供)

在量測 LED 上，由於涵蓋波長大部分都在可見光波段，所以在可見光波段材料的反射率，必須很平坦，且反射率在每個波長至少都必

須在 90%以上，材料內的反射率對積分球偵測光源的光譜特性有很大的影響，如下式

$$E(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{4\pi R^2} \times \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)}$$

式中：

$E(\lambda)$ ：球面上的照度

$\rho(\lambda)$ ：為材料的反射率

假設  $\rho(\lambda)=0.98$  時，照度的相對變化率約為反射比相對變化的 50 倍。

即材料光譜反射比的少量變化，會引起內部照度相當大的變化。

由於分光光譜儀偵測器的材料大部份為矽(Si)，且其偵測器之光譜響應在 400nm 之前，藍光部分是很低的，如下圖所示

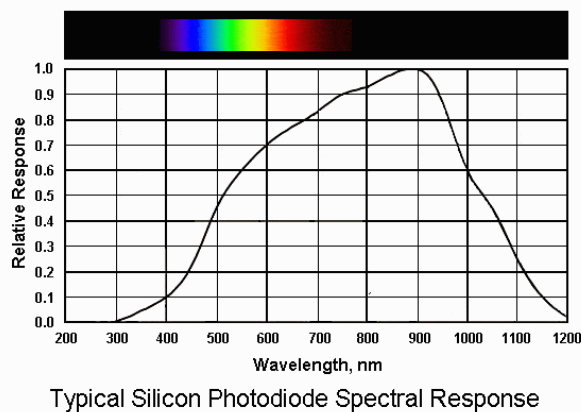


圖 2-16 矽偵測器之光譜響應

所以矽偵測器在藍光以及紅光部分易造成誤差，這時候材料在藍光的反射率如果能彌補回來，對於量測上的誤差也會變小。

積分球內部必須為真圓，不能為橢圓或不規則形狀，因為朗伯表面的特性，入射光打到球內壁時，所漫射出的光，在任何方向看強度必須相等，所以積分球也是一個可以消除偏振光的元件，若為橢圓或者是不規則形狀時，將會發現光暈現象，也就是光無法做完全的漫射，這樣也會產生量測上的誤差。

IES LM-79-2008 規範上說，在積分球的尺寸選擇上，應為待測物總表面積應該少於百分之二的球內壁總面積，如此量測值才不會因為物體表面積大小、形狀顏色、及材質本身，造成量測上的誤差。

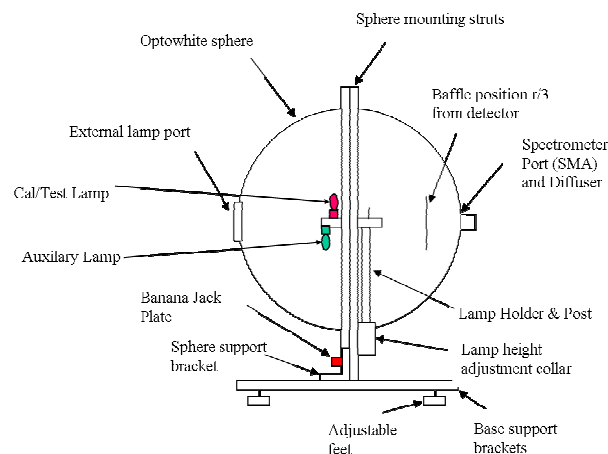
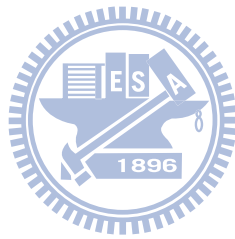


圖 2-17 積分球之基本結構

如上圖所示，積分球內部需有檔板(Baffle)，這是為了防止入射光直接射到偵測器上，造成量測上的誤差，CIE 84-1989 規範中提到，檔板(Baffle)的架設，需離偵測器直徑的 $\frac{1}{6}$ 架設，也就是半徑的 $\frac{1}{3}$ 處，這是因為離偵測器較近時，光線在球內無法做完全的漫射，離偵測器較遠時，怕入射光線直接射入偵測器，造成光偵測器因直接接收光線而導致數據計算錯誤。



## 2.4 分光光譜儀

在光輻射量測中，視效函數偵測器如下圖所示



圖 2-18 視效函數偵測器(五鈴光學提供)



與分光光譜儀常被用來當作光偵測器使用，由於早期分光光譜儀價格與雜訊的原因不常使用，且視效函數偵測器具有偵測速度快、雜訊低的原因，所以視效函數偵測器變成為最主要的光偵測器。隨著製程進步，分光光譜儀的價格越來越便宜，分光光譜儀已變成目前比較主要的光偵測器，不但使用簡單，在運算上更可以得到許多光源資訊，但是在偵測速度上還是無法比過視效函數偵測器；而視效函數偵測器由於鍍模技術的原因，致使藍光與紅光部分無法完全與視效函數完全符合，所以在量測藍光或紅光 LED 時，會有 50~60%的誤差。如下圖所示

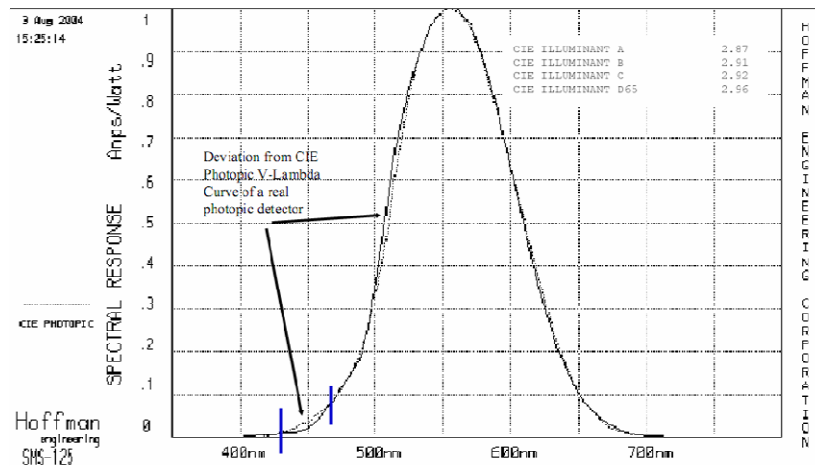


圖 2-19 視效函數偵測器光譜響應(五鈴光學提供)

CIE 與美國國家標準與技術局(The National Institute of Standards and Technology, NIST)建議在量測 LED 時盡量使用分光光譜儀作為量測光源特性的工具。

表 2-3 分光光譜儀、視效函數偵測器優缺點比較

	分光光譜儀	視效函數偵測器
偵測速度	3ms ~ 4s	1ms
準確性	全波段皆優	藍、紅光較差
雜訊	低	非常低
價格	中等	低

## 2.4.1 光譜儀工作原理

下圖為 Ocean Optics USB 2000+ 分光光譜儀的系統架構。

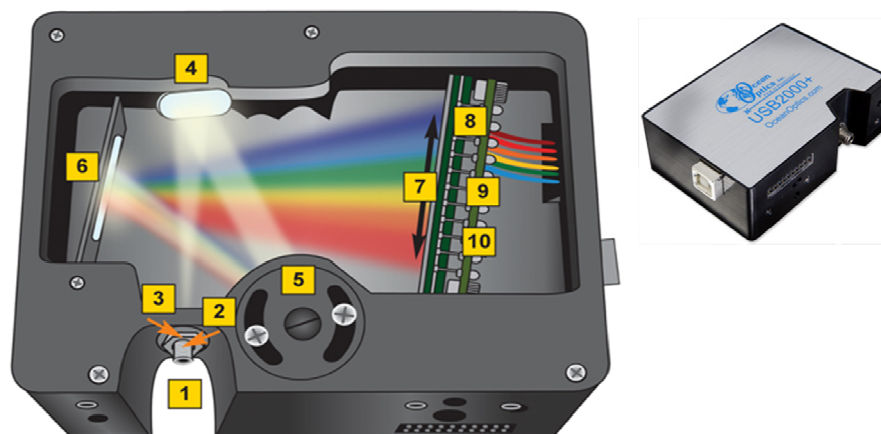


圖 2-20 分光光譜儀之基本結構

光經由光纖進入狹縫(2)之後產生繞射使光束擴散，光線進入分光光譜儀內後，擴散光經過反射鏡(4)之後變成平行光，平行光在光柵(5)被分光產生光譜之後曲折，曲折光射入反射鏡(6)之後光譜更擴散，經過擴散之後的光譜，射入了線性電荷耦合元件(Linear Charge Coupled Device, CCD)，透過 CCD 變成由光訊號轉換成電訊號，在經過類比數位轉換之後，數位訊號被電腦接收，變成了我們所看到的光譜。分光光譜儀的應用廣泛，在此最常見的應用是用來量測材料的反射率、穿透率、吸收率以及顏色辨識等等應用。



## 2.4.2 波長值校正

一般來說分光光譜儀在出廠的時候波長值都會經過波長值校正，若光譜儀未經過校正，只能當作光偵測器，而無法當作分光光譜儀。分光光譜儀利用汞燈特有的線光譜特性，不同於一般的連續光譜光源，以方便定義出波長的位置，達到光譜波長校正的目的，如下圖所示

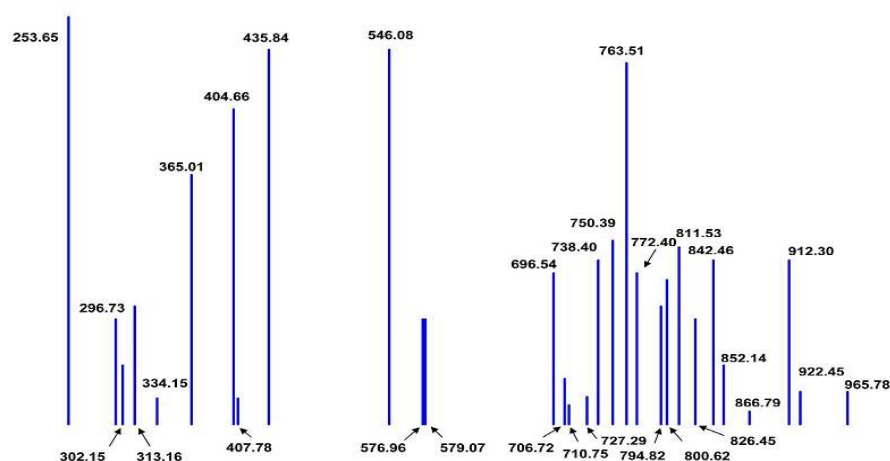


圖 2-21 汞燈的光譜分布(五鈴光學提供)

由於分光後光譜為奈米(nm)所以，遠遠的小於 CCD 的單一像素 (Pixel)的面積微米(μm)，所以 1nm 往往會包括 3~4 Pixel，假設校正不正確的話，波長差異會到 0.3nm~0.4nm，首先找出波峰與汞燈對應的波長值，並固定參數，接下來把剛剛波長對應的 Pixel，利用線性數值迴歸方法，計算出每個像素對應的波長值，最後使用已知的雷

射波長讓分光光譜儀量測波長值，例如氦氖雷射(He-Ne Laser)的波長為 632.8nm。波長值校正步驟如下圖所示

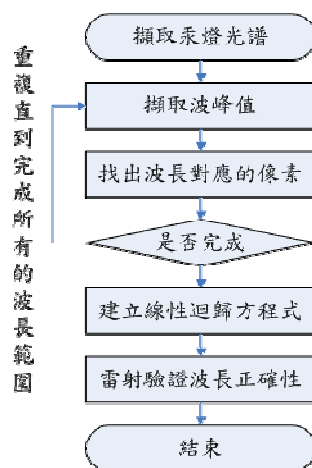


圖 2-22 波長值校正流程圖



## 2.5 分光通量標準燈

許多的積分球在購買的時候，會隨機器附送一顆到兩顆的標準燈，這個標準燈需附報告，內容為從 360nm 到 1000nm 或是 380nm 到 780nm 每個波長對應的分光通量值( $\frac{W}{nm}$ )，積分球需使用標準燈作為標準，對整個系統做強度值校正，如果積分球未附標準燈的話，儀器必需每年送回原廠做校正，如此一來花費時間與金錢，在運送的過程中也會發不必要的碰撞與損傷，所以在積分球選用時，應購買分光通量標準燈作為標準。由於標準燈本身需附一份可追溯國家實驗室的報告，因此價值不菲，一些儀器廠商的作法通常會幫客戶製作一顆複製標準燈，校正時就使用此複製標準燈做校正，而原來的標準燈則是放置在恆溫恆濕箱，等到半年或一年之後才拿出來與複製燈作對比校正，這樣的話不僅方便，也讓標準燈的壽命增長，在購買儀器時需注意此項目。

### 2.5.1 絕對強度校正

由於儀器在新買的時候，分光光譜儀本身沒有做過校正，所以必需讓分光光譜儀做過絕對強度值校正，才能量測出正確的分光通量值，絕對強度值校正步驟如下，讀取標準燈的數值，接著依照校正的電源條件點燈，在點燈之後，確認標準燈穩定後，擷取當時分光光譜儀的強度值，在與標準數值相除之後，得出修正值，校正數值在每次

執行時，都須與分光光譜儀的強度值相乘，這樣才能算出光譜的絕對值。絕對強度校正步驟如下

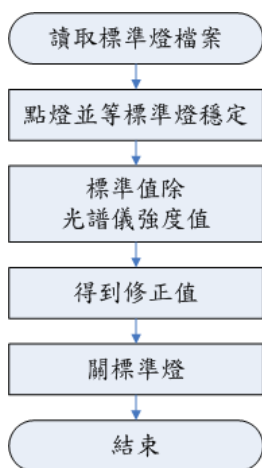


圖 2-23 絕對強度值校正流程圖



## 2.6 輔助燈

輔助燈的功能是修正待測光源的形狀大小、物體顏色、材質吸收在量測光源時所會產生的誤差，除非待測光源的形狀大小、物體顏色、材質吸收，與標準燈相同，否則輔助燈的修正，應該被嚴格要求。在 LED 的量測上，輔助燈可以是鹵素燈、白熱燈或者是白光 LED 光源。

輔助燈修正係數公式如下

$$\alpha = \frac{Y_{AUX} Test(\lambda)}{Y_{AUX} REF(\lambda)}$$

式中：

$\alpha$ ：輔助燈修正係數

$Y_{AUX} Test(\lambda)$ ：置入待測光源的輔助燈分光修正值

$Y_{AUX} REF(\lambda)$ ：參考環境的輔助燈分光修正值



## 2.7 熱電致冷溫控器(TEC)發展及原理

半導體與金屬的熱電效應，於西元 1823 年首度被 T. J. Seebeck 發現，並因此命名為席貝克(Seebeck)效應。此效應認為當兩塊不同的金屬體(或半導體)連接在一起，若其接合面維持在不同溫度下時，就會在迴路中產生電動勢，而電動勢的大小將取決於材料的性質以及溫度的差異。相隔 12 年之後，J. C. A. Peltier 提出更進一步的解釋，他認為該接面在有電流流過時才會產生溫度變化的效應，(而非 Seebeck 所認為導體是直接因溫度差異而產生磁場圍繞迴路並生成電動勢)，而且電流的方向將決定溫度是上升還是下降。首先被研究的金屬是鈹跟銅，Peltier 發現若是電流由鈹流向銅則溫度上升，反之溫度下降。時至今日，熱電效應已發展 180 年的時間，其他幾個重要里程碑簡列如下：

西元 1838 年 Lenz 提出 Peltier 效應的理論基礎

西元 1855 年 William Thomson 發現 Seebeck 效應與 Peltier 效應的關聯性

西元 1885 年 Rayleigh 發現利用熱電效應，熱可生成電

西元 1911 年 Altenkirch 發現 Z 值(材料之熱電效能指數)

西元 1930 年美國海軍實驗室發現化合物半導體擁有非常高的 Seebeck 參數

西元 1947 年 Telkes 製造出世界上第一個熱電發電機

西元 1949 年 Ioffe 發表半導體熱元件理論

西元 1954 年 H. J Goldsmid 宣布可利用熱電致冷技術將溫度降至 0 °C 以下

西元 1956 年 Ioffe 展示半導體摻雜之後的熱電效益

二十世紀中葉以後，半導體工業蓬勃發展，許多半導體材料陸續被研發出來，然而終因為無法找到適合量產的高熱電效應（高 Z 值）之材料，所以該期間仍僅有少數實用的產品出現，比如說，熱電冰箱與熱電發電器。直至最近的十年之間，熱電效應的研究又再度掀起熱潮，

主要原因有三：

a. 因為科學家發現一些效能極佳的新熱電材料，如下圖所示

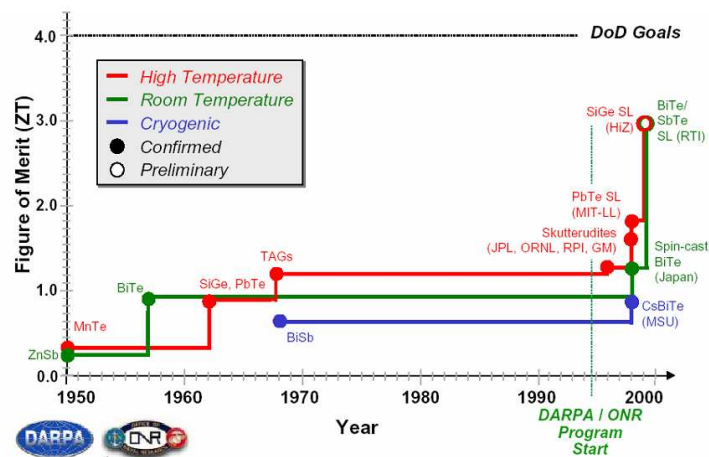


圖 2-24 熱電材料的歷史演進

科學家更進一步發現經過摻雜 (impurity doping) 後的半導體材料，其熱電效應遠大於金屬材料，如下表所示

表 2-4 半導體與金屬材料的 Seebeck 係數

材料	Seebeck 係數	材料	Seebeck 係數
<i>Al</i>	-0.2	<i>Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>(P)</i>	162
<i>Cu</i>	3.98	<i>Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>(N)</i>	-240
<i>W</i>	5.0	<i>TiO<sub>2</sub></i>	-200
<i>Ag</i>	3.68	<i>Poly-Si(P)</i>	190
<i>ZnSb</i>	220	<i>Poly-Si(N)</i>	-120
<i>InSb</i>	-130	<i>Poly-SiGe(P)</i>	-144
<i>Ge</i>	-220	<i>Poly-SiGe(N)</i>	-136

b. 因為一些特殊技術的發展，使得材料的熱電效應得以更進一步的提升。



c. 市場需求性日益急迫：隨著半導體技術的進步，單晶片的元件密度越來越高，運算速度越來越快，致使許多電子產品運轉時產生較高的功率，如功率放大器，雷射二極體與微處理器，進而造成元件工作溫度高達到足以破壞其可靠度的程度；另外一方面，日益高升的工作溫度也會嚴重影響元件的效能與壽命，而傳統的散熱方法又無法適用於在這些需要局部冷卻與高密度封裝的微系統晶片上，所以急須再研發更新更有效率的致冷技術。目前應用熱電技術所開發的產品計有以下三大類：熱電致冷器、熱電發電機與熱感測器。其中熱電發電機是



應用熱電技術將熱轉換成電能，而熱電致冷器則是利用電能將熱能加速導至別處，以上兩種應用都是屬於固定的元件，沒有任何移動式的零件。熱電致冷器與傳統的風扇轉動式致冷技術有很大的差異性，其優點為可以大幅增強使用年限與減低故障率，目前這些產品皆已經被廣泛應用於軍事、通訊、醫學及太空工業等不同的領域中。

熱電致冷器，又被稱為帕耳帖致冷器 (Peltier Cooler)，它常被用來穩定元件的操作溫度，如 CCD 或是降低元件的操作溫度，如 LED、中央處理器 CPU 等；相對於傳統的致冷器，TE Cooler 能提供較寬廣的熱能散逸範圍（從每秒幾個毫瓦特到每秒數百瓦特之間）以及較大的溫差，最高與最低溫度差可達到  $60^{\circ}\text{C}$ 。目前在市面上已可買到商品化的離散式熱電致冷器，尺寸大小從數百  $\text{mm}^2$  到數千  $\text{mm}^2$  不等，有單層 (Single Stage) 結構，也有多 4 層疊接 (Multi-Stage Cascade) 結構，多層疊接致冷器可以提高熱端 (Hot Side) 和冷端 (Cold Side) 的最大溫差 ( $\Delta T_{\text{max}}$ )，下圖展示了一些市面上所銷售的離散式熱電致冷器。

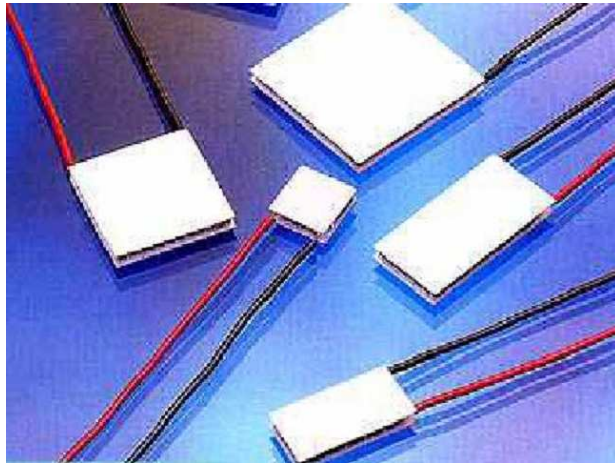


圖 2-25 各種尺寸的離散式散熱晶片

目前熱電致冷器所面臨的最大困難點就是能源轉換效率無法達到令人滿意的境界。相較於目前最常用的壓縮機系統，其效率明顯較低以及無法承受過大的負載。雖然如此，在許多方面熱電致冷器還是有許多無法被取代的優勢；例如可以做到體積小、重量輕、沒有運動的機械結構、不會產生震動、使用壽命更長以及可用 DC 電源驅動等等。

另一方面，因為有些應用無法容許目前離散式熱電致冷器的尺寸（數百  $mm^2$  到數千  $mm^2$ ），所以還要設法縮小其尺寸為  $100 mm^2$  以下的範圍。這麼小的尺寸已無法使用傳統機械加工來完成，而必須採用積體電路以及微機電系統的技術來製作，此種可以提高熱電致冷效率與應用範圍的元件即為熱電微致冷器（ $\mu$ -TEC）。熱電微致冷器是一個非常具有潛力的元件，它可以解決微小晶片或光電元件因產生高熱而衍生

的種種問題。下圖為積體式熱電微致冷晶片的結構示意圖。

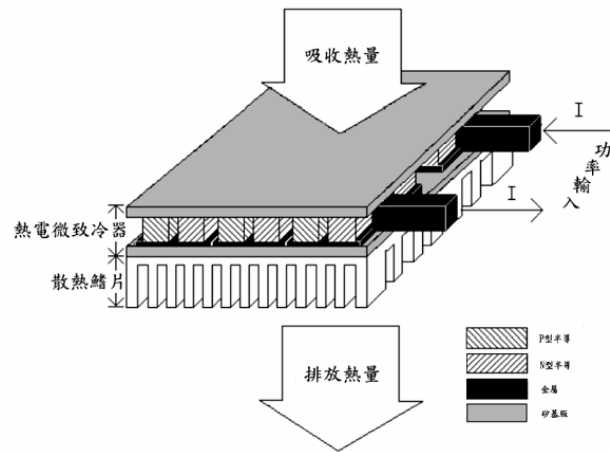


圖 2-26 積體式微致冷晶片與散熱鰭片示意圖

因為採用微機電及積體電路的製程，所以可以製作出高密度的散熱元件，使得熱電微致冷晶片可以更有效率的從其冷端（與待冷卻物接觸的面）吸收大量熱量，並藉由輸入功率的適當控制而將該吸收之熱量傳導至另一端（熱端），最後再藉由傳統的微熱鰭片或是微風扇將熱端熱量散逸至空氣中以達到冷卻的效果。

### 第三章 熱阻量測原理

#### 3.1 熱阻量測相關參數定義

熱阻(thermal resistance) $R_{th}$ ：在熱平衡之條件下，沿熱傳導通道上的溫度差與通道上所消散的功率之比值，表示待測 LED 的散熱能力。熱阻抗的定義是，某物質在一瓦的熱量下兩側所能維持的溫度差。單位為 $^{\circ}C/W$ 。

$R_{JA}$ ：考慮消耗在 LED PN 接面(PN Junction)至周圍環境(Ambient)電功率之熱阻值。如下圖所示

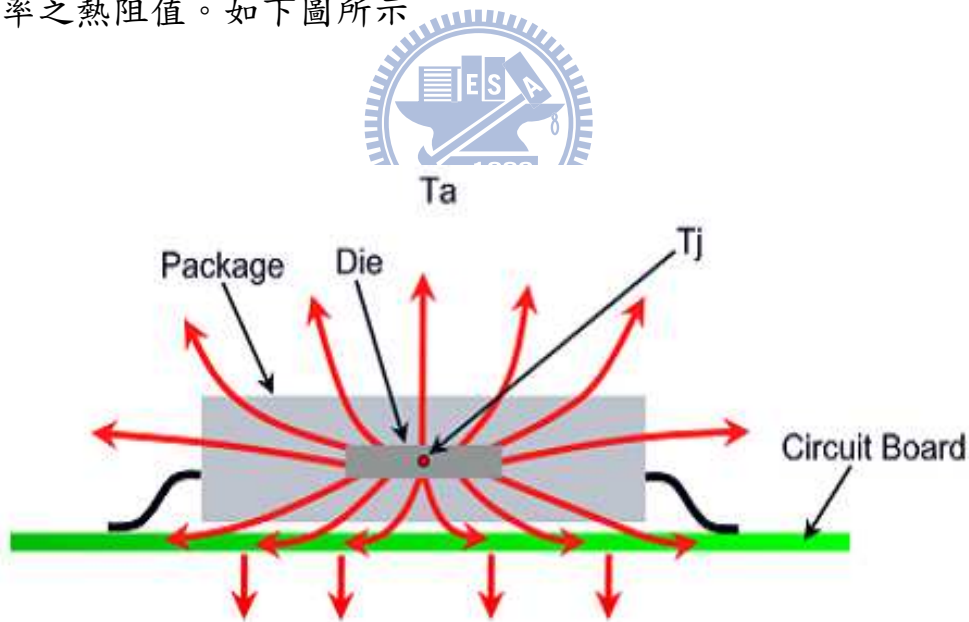


圖 3-1  $R_{JA}$  定義示意圖

$R_{JC}$ ：考慮消耗在 LED PN 接面(PN Junction)至外殼(Case) 電功率之熱阻值。如下圖所示

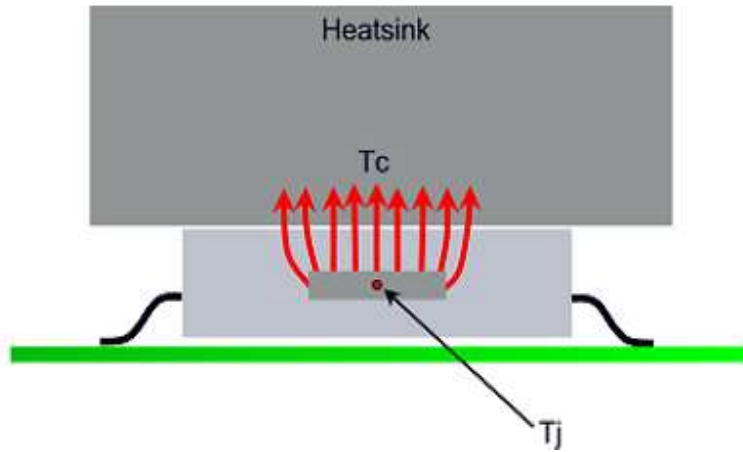


圖 3-2  $R_{JC}$  定義示意圖

$R_{JCR}$ ：考慮消耗 LED PN 接面(PN Junction)至外殼(Case)電功率與 LED 發出之輻射通量影響的熱阻值。如下圖所示

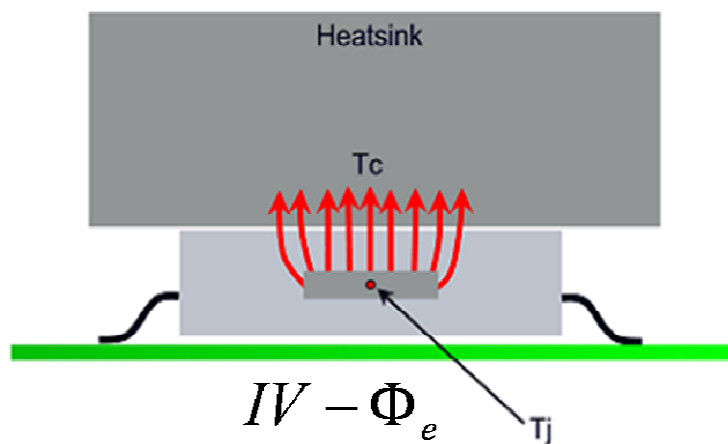


圖 3-3  $R_{JCR}$  定義示意圖

### 3.2 CNS 15248 量測熱阻規範介紹

由於接面溫度無法直接量測，所以通常只能運用電壓與溫度為線性關係，用此關係來推導接面溫度與其他溫度點的溫度差，藉由此溫度差計算出熱阻，接下來將會把常見的測試熱阻的方法一一介紹，CNS 15248 此標準由中華民國標準檢驗局收集，國內外測試熱阻標準規範以及許多人的想法與建議所訂製出來的標準規範，此標準敘述的熱阻量測方法，是參考 JEDEC 固態技術協會 (JEDEC Solid State Technology Association) 內的 JESD 51 號規範所制定而成，該規範原來是用於半導體的熱阻量測，由於發光二極體(LED)也是屬於半導體的一類，所以也適用於熱阻量測。

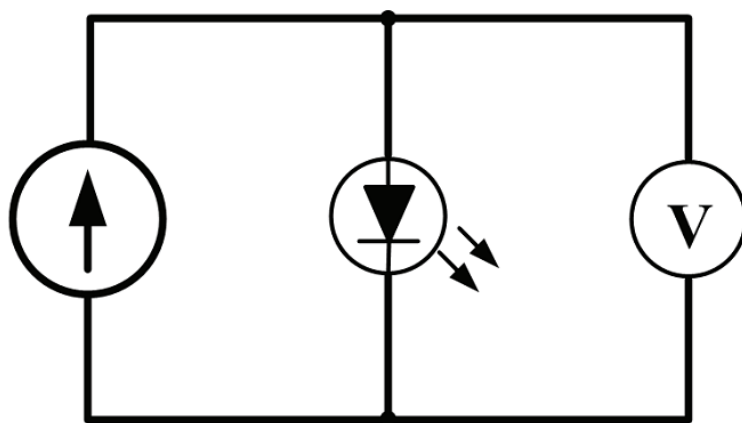


圖 3-4 熱特性量測電路

- a. 由上圖所示，對待測物 LED 施加量測電流  $I_m$ ，此量測電流用於驅動 LED，但是不能使 LED 產生出自發熱，範圍通常建議在  $0.1\text{ mA}$  至  $10\text{ mA}$  之間，量測其對應的順向電壓  $V_{F0}$ 。
- b. 用加熱電流  $I_H$  替代  $I_m$ ，加熱電流即是 LED 正常操作電流，等待 LED 在穩定之後，如下圖所示，量測其加熱電壓  $V_H$ 。

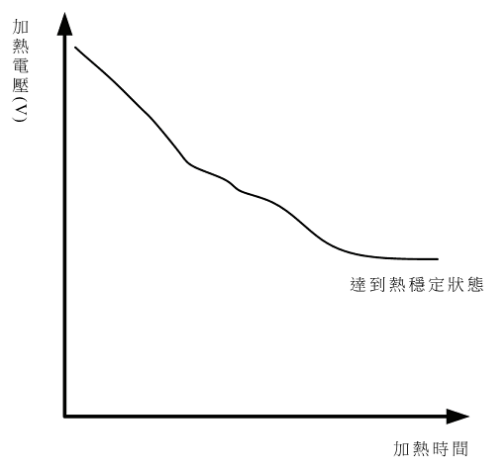


圖 3-5 熱穩定之狀態曲線示意圖

- c. 迅速的(時間約  $20\text{ us}$  至  $50\text{ us}$  之間)以量測電流  $I_m$  取代加熱電流  $I_H$ ，量測其對應的順向電壓  $V_{FSS}$ ，由此可得：

$$\Delta V_F = |V_{F0} - V_{FSS}|$$

$$\Delta T_J = K \times \Delta V_F$$

$$T_J = T_{J0} + \Delta T_J$$

$T_{J0}$  為量測開始前待測 LED 元件之初始接面溫度，電源波型由下圖

所示：

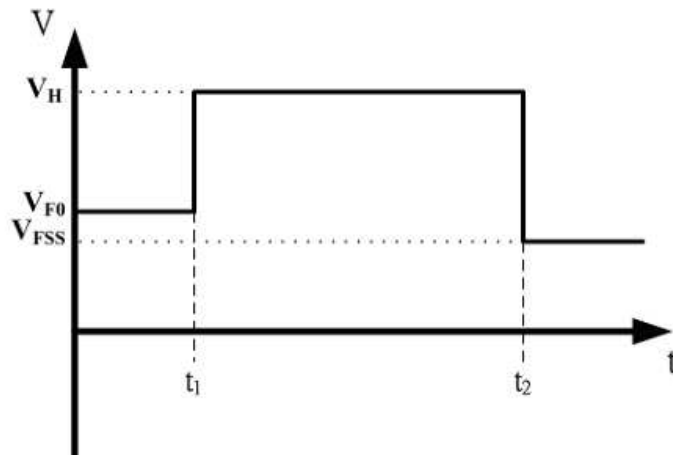


圖 3-6 CNS 15248 參考之電源波型(A)

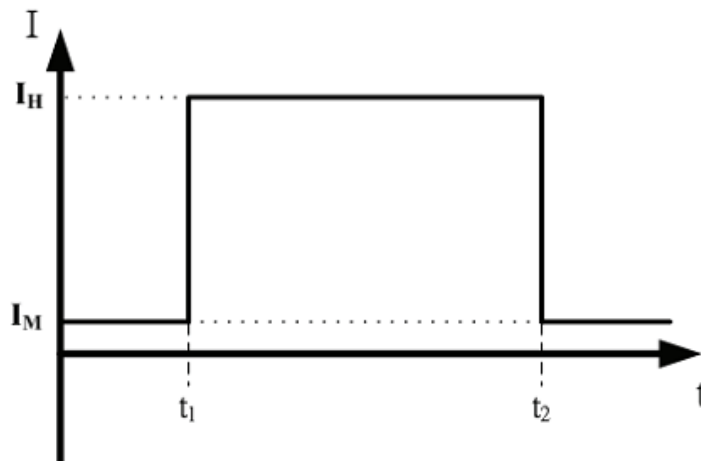


圖 3-7 CNS 15248 參考之電源波型(B)

d. 量測 K 係數(K Factor)

- I. 先控制溫控箱的初始溫度  $T_i$  在接近室溫的穩定狀態，例如  $25^{\circ}\text{C}$ ，  
 等待監測的順向電壓穩定後，接著量測其對應的順向電壓  $V_{Fi}$ 。
- II. 接著把溫控箱內的溫度增加到高溫  $T_H$ ，典型值為  $100^{\circ}\text{C}$ ，等待監



測的順向電壓穩定後，量測其對應之順向電壓  $V_{FH}$ ，由下圖可得

知溫度與順向電壓之關係，K 係數可由下面式子得出：

$$K = \left| \frac{T_H - T_i}{V_{FH} - V_{Fi}} \right|$$

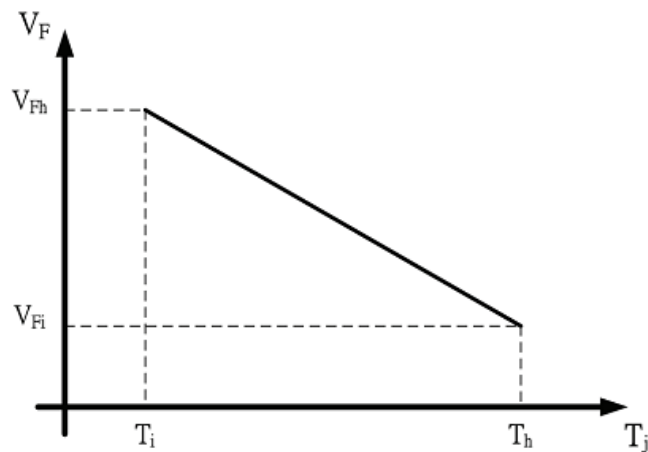


圖 3-8 CNS 15248 參考之  $V_F$ - $T_j$  關係曲線圖

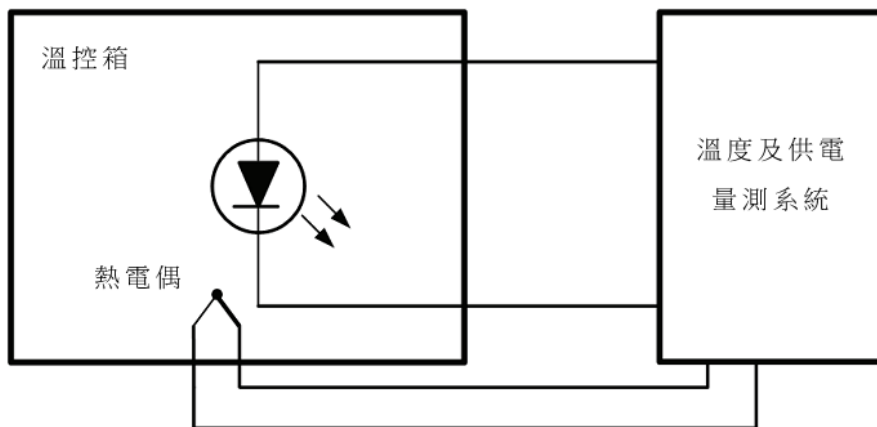


圖 3-9 K 係數之量測電路

最後即可根據下列式子算出熱阻

$$R_{JX} = \frac{\Delta T_J}{P_H} = \left| \frac{K \times \Delta V_F}{I_H \times V_H} \right|$$

其中：

$P_H$ ：LED 的消耗功率。

$R_{JX}$ ：由待測 LED 的參考點溫度與接面溫度決定，例如有加熱電致冷溫控器(TEC)的溫控情況下，X 可表示為外殼 C，即為  $R_{JC}$ 。

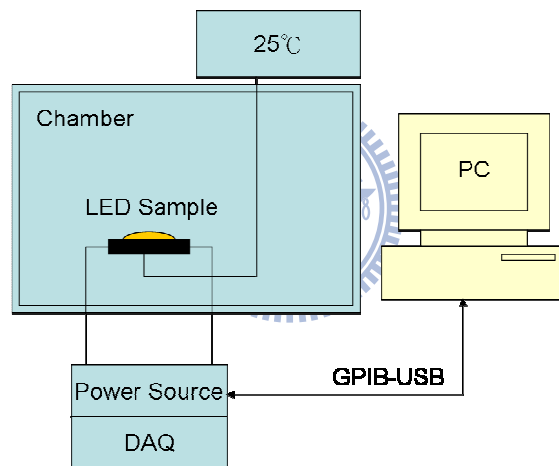


圖 3-10 CNS 15248 系統架構圖

### 3.3 熱電致冷溫控器 TSP 量測方法

此量測方法參照了 JESD 51 量測方法，改進了量測時間與重複性，使用熱電致冷溫控器做為加熱的媒介，改變待測物的參考點溫度，量測出不同溫度時，所對應順向電壓之 TSP(Temperature Sensitive Parameter)曲線，由此 TSP 算出接面溫度與熱阻。

首先須先把 TSP 量測出，一開始把待測物 LED 放置在熱電致冷溫控器的加熱板上面，對 LED 施加量測電流  $I_m$ ，此量測電流用於驅動 LED，但是不能使 LED 產生出自發熱，範圍通常建議在 0.1 mA 至 10 mA 之間，接下來使溫度分別穩定在 20°C、40°C、60°C、80°C (溫度點如果越多越接近實際數值，但是所花費的時間也會變長)，監視量測電流  $I_m$  下的順向電壓的變化在穩定之後，分別對各穩定溫度施加工作條件之脈波電流  $I_H$ ，脈波寬度(Pulse width)為 1.5 ms 左右，工作週期(Duty cycle)為 0.25%，接著使用軟體(Labview)以及硬體(DAQ)擷取順向電壓值，如下圖：

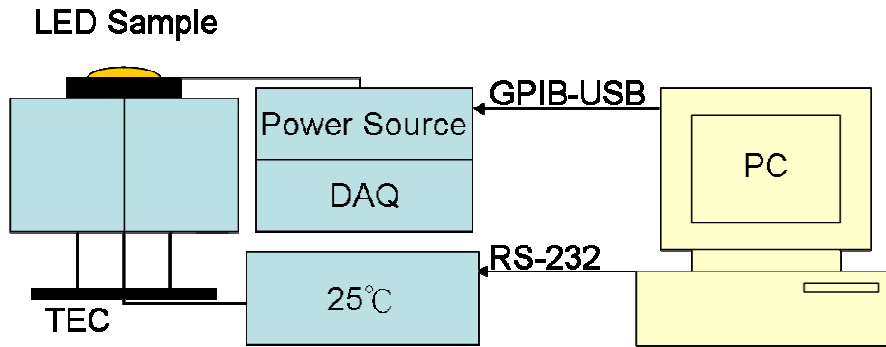


圖 3-11 熱電致冷溫控器 TSP 系統架構圖

把個別溫度的順向電壓擷取之後，如下圖所示，對溫度與順向電壓的製作線性公式如下圖所示：

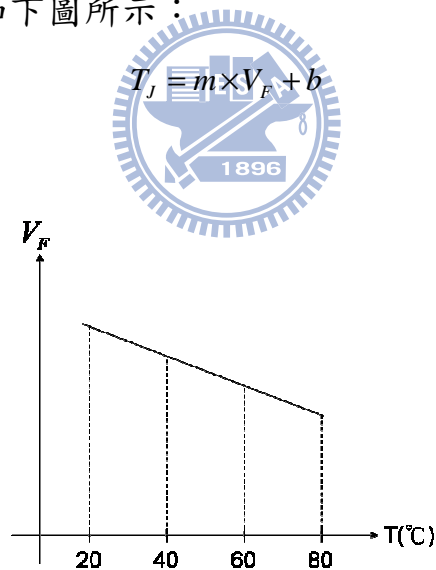


圖 3-12 TSP 之  $V_F - T_J$  關係曲線圖

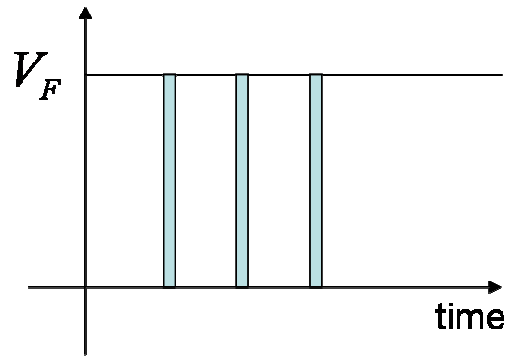


圖 3-13 參考之電源波型(A)

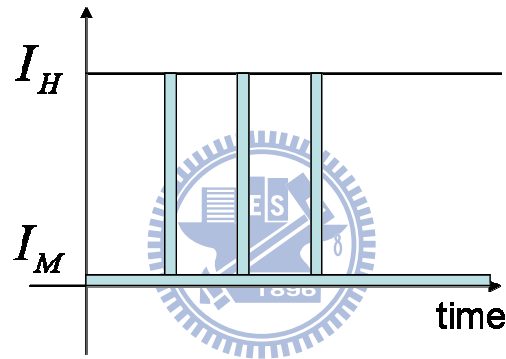


圖 3-14 參考之電源波型(B)

接下來設定熱電致冷溫控器的加熱板溫度 $T_C$ ，例如  $25^{\circ}\text{C}$ ，同時間施加工作條件之電流 $I_{DC}$ ，監測對應之順向電壓變化，待穩定之後，量測其順向電壓 $V_{FDC}$ 以及加熱電流 $I_{DC}$ ，把順向電壓 $V_{FDC}$ 數值帶回 $T_J = m \times V_F + b$ 式中，即可獲得 $T_J$ 之數值，求得 $T_J$ 之數值後，得 $\Delta T$ 值，帶回下列式子中，可得出 $R_{JC}$ 值。

$$\Delta T = |T_J - T_C|$$

$$R_{JC} = \frac{\Delta T}{P_{DC}} = \frac{|T_J - T_C|}{V_{FDC} \times I_{DC}}$$

其中：

$R_{JC}$ ：LED 的接面至外殼的熱阻

$T_J$ ：LED 的接面溫度

$P_{DC}$ ：LED 設定溫度與加熱電流下所產生的消耗功率



### 3.4 NIST 熱阻量測方法

此方法是由美國國家標準與技術局參考 JESD 51 量測方式，在 2008 年所開發出來的量測熱阻的方法，他是使用 DC 電流驅動法或者是脈波電流來建立電壓的參考點，不過此技術少了 K 係數的量測，讓整個量測時間比上述的兩個開發出來的方法，又少了些許的時間，它們也是使用上述的熱電致冷溫控器做為加熱的媒介，量測電路與熱電致冷溫控器 TSP 量測方法一樣，比較麻煩的是首先須先決定接面溫度，等待接面溫度的監控電壓穩定之後，然後使用工作點的脈波電流，擷取當時的順向電壓  $V_F(0)$ ，接著控制溫控器的溫度，讓監測的順向電壓  $V_F(t)$  能夠與  $V_F(0)$  是相等的。從這邊可知道接面溫度、外殼溫度、與熱阻值，此方法又可分為兩個電源驅動法決定  $V_F(0)$ ，此兩方法為 DC 電流驅動法與脈波電流驅動法，以下介紹這兩種方法的特性比較。

- a. DC 電流驅動法：首先需把 LED 未受熱影響的順向電壓  $V_F(0)$  量測出來，一開始設定接面溫度，假設是  $25^{\circ}\text{C}$ ，確定溫度穩定的同時，同時監測電壓的變化，讓此電壓變化不超過  $1\text{mV}$ ，若達穩定時稱此發光二極體的接面溫度與外殼溫度為相等的，然後施加 DC 電流，接著使用軟體(Labview)以及硬體(DAQ)擷取當時的順向電壓，以外插法的方式得到  $V_F(0)$ 。如下圖所示

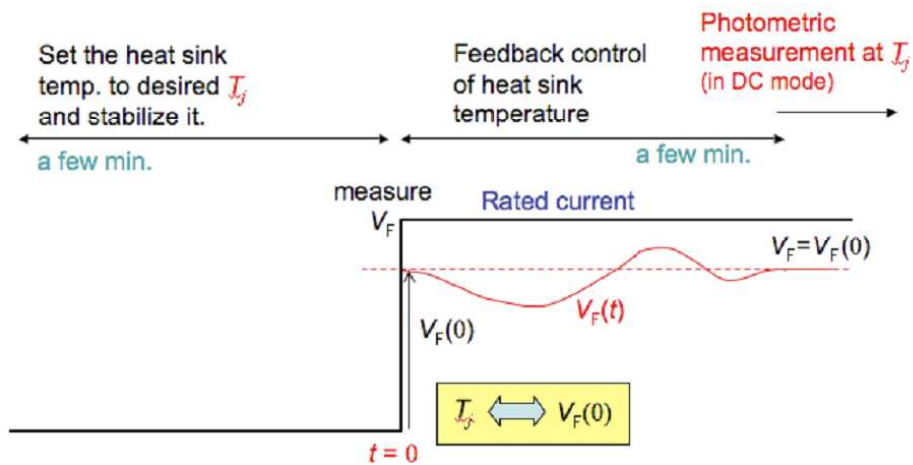


圖 3-15 DC 電流驅動法電源波型(A)

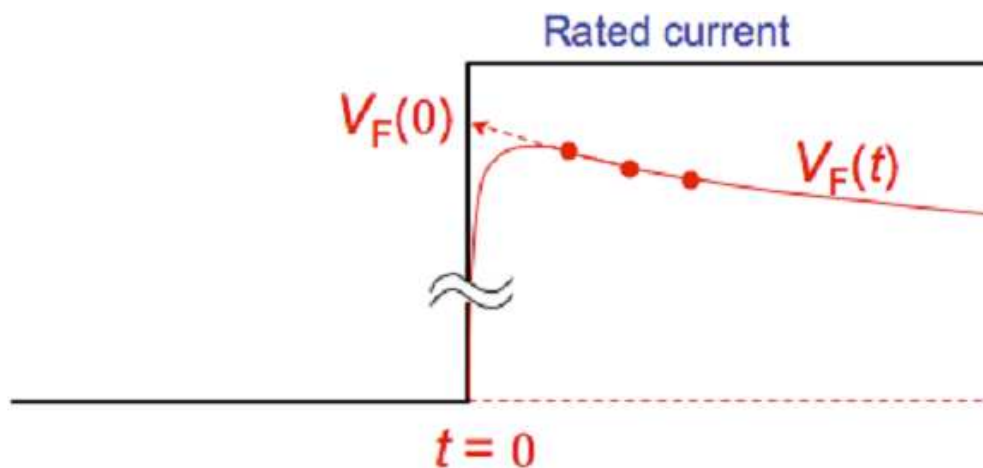


圖 3-16 DC 電流驅動法電源波型(B)

接下來調整 LED 外殼溫度，同時使用 DC 方式驅動 LED，由於熱影響，順向電壓開始改變，我們調整 LED 外殼溫度，同時監測 LED 的順向電壓，使  $V_F(0)$  與溫度穩定後的  $V_F(t)$  相等，那麼便可由此  $V_F(0) = V_F(t)$  的條件上，算出熱阻值，接面溫度與外殼溫度，如下式



$$\Delta T = |T_J - T_C| = |T(0) - T(t)|$$

$$R_{JC} = \frac{\Delta T}{P(t)} = \frac{|T_J - T_C|}{V_F(t) \times I(t)} = \frac{|T(0) - T(t)|}{V_F(t) \times I(t)}$$

其中：

$R_{JC}$ ：LED 的接面至外殼的熱阻。

$T_J$ ：LED 的接面溫度。

$T(t)$ ：LED 在設定的溫度穩定後，所得到的外殼溫度。

$P(t)$ ：LED 設定溫度與加熱電流下所產生的消耗功率。

- b. 脈波電流驅動法：首先需把 LED 未受熱影響的順向電壓  $V_F(0)$  量測出來，一開始設定接面溫度，假設是  $25^\circ\text{C}$ ，再溫度穩定的同時，同時監測電壓的變化，讓此電壓變化不超過  $1\text{mV}$ ，若達穩定時稱此發光二極體的接面溫度與外殼溫度為相等的，然後再施加工作點的脈波電流，脈波寬度(Pulse width)為  $0.5\text{ms}$  左右，工作週期(Duty cycle)為  $0.25\%$ ，接著使用軟體(Labview)以及硬體(DAQ)擷取當時的順向電壓  $V_F(0)$ 。如下圖所示

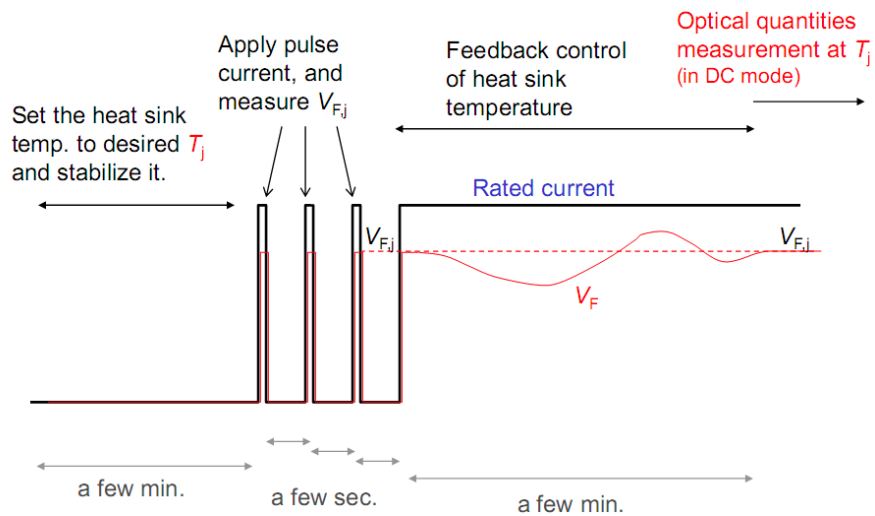


圖 3-17 脈波電流驅動法電源波型

接下來調整 LED 外殼溫度，同時使用 DC 方式驅動 LED，驅動 LED 之後，由於熱影響，順向電壓開始改變，我們調整 LED 外殼溫度，同時監測 LED 的順向電壓，使  $V_F(0)$  與溫度穩定後的  $V_F(t)$  相等，那麼便可由此  $V_F(0) = V_F(t)$  的條件上，算出熱阻值，接面溫度與外殼溫度，如下式

$$\Delta T = |T_J - T_C| = |T(0) - T(t)|$$

$$R_{JC} = \frac{\Delta T}{P(t)} = \frac{|T_J - T_C|}{V_F(t) \times I(t)} = \frac{|T(0) - T(t)|}{V_F(t) \times I(t)}$$

由於 DC 電流驅動法量測  $V_F(0)$  時，會使用到外插法求得，而使用外插法會讓誤差變大，所以在此研究中，一率採用脈波電流驅動法量測  $V_F(0)$ 。

### 3.5 量測方法比較

#### a. CNS 15248 規範在實際量測上所會遇到的問題

I. 對低功率 LED 而言，散熱的主要方式為自然對流及接觸點的熱傳導。為貼近實際使用情形，量測  $R_{JA}$  會比  $R_{JC}$  來得適當。但對高功率 LED 而言，本身已有 Heat Slug 及散熱基板等設計，量測  $R_{JC}$  會比較容易。再者，在量測高功率 LED 時，如果沒有快速有效的散熱機制，LED 會因內部溫度的快速上升而毀損，所以要量測  $R_{JA}$  會是很困難的。

II. 規範中所要求的電流切換速度建議在 20 至 50 us 之間，市面上能達到這樣速度及精度的設備，價格會接近百萬。便宜的設備，其輸出波形及速度，往往不如規格所言，所以會影響到量測上的誤差。

III. 要量測  $R_{JCR}$  必需與積分球結合，才能有效地將輻射通量計算出來。目前以 CNS 手法而言，設備通常要分為二套。一套為恆溫箱，用來測 K 係數；另一套則為積分球系統，因為分為兩套儀器量測，量測時的可靠性不易控制。

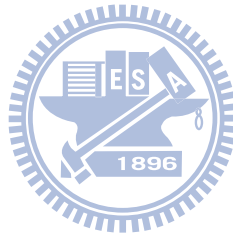
#### b. 熱電致冷溫控器 TSP 量測方法與 NIST 熱阻量測方法在實際量測上所會遇到的問題

I. 熱電致冷溫控器 TSP 量測方法還是需要量測 TSP 曲線，在 TSP 曲

線量測時還是會有些許的誤差產生，而 NIST 熱阻量測方法少了這個步驟，減少量測的不確定性。

II. 以熱電致冷溫控器為溫控手段時，不容易將溫度降到  $0^{\circ}\text{C}$  以下。

以  $3\text{W}$   $R_{JC}=10^{\circ}\text{C}/\text{W}$  高功率 LED 而言，LED PN 接面到外殼的溫差為  $30^{\circ}\text{C}$ 。也就是說，如果要將接面溫度降至室溫  $25^{\circ}\text{C}$ ，則熱電致冷溫控器必需降到零下  $5^{\circ}\text{C}$  左右。未來在多晶 LED 量測上，溫差將更大。如何定義出業界能接受參考溫度，則是主要的困難。



## 第四章 LED 光熱電量測系統開發整合與實驗數據

### 4.1 系統架構

表 4-1 LED 光熱電量測系統設備一覽表

設備項目	簡易規格
積分球	球體直徑 30cm、 $BaSO_4$ 塗佈、 $\rho(\lambda)=95\%$ 以上 (360nm~1000nm)、Sphere Optics 製作、五鈴光學代理
分光通量標準燈	20W 鹵素燈、校正範圍 360nm~1000nm、量測值可追溯 NIST、Sphere Optics 製作、五鈴光學代理
分光光譜儀	OceanOptics USB 2000+、350nm~1050nm
光纖	長 2m、核心直徑 600um、350nm~1050nm
熱電致冷溫控器	溫控範圍 $5^{\circ}C \sim 85^{\circ}C$ 、溫度精度 $\pm 0.1^{\circ}C$ 、散熱能力 $30W@25^{\circ}C \sim 125$
電源供應器	Keithley 2400、(21V1A、200V0.1A)
DAQ 資料擷取卡	NI PCI-4461 204.8 kS/s/ch、24bit
開發軟體	NI Labview 8.6

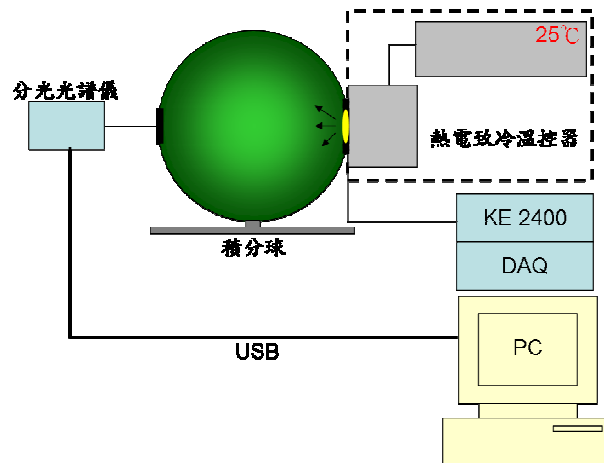
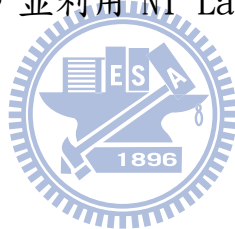


圖 4-1 系統架構圖

本研究是把高功率 LED 放在溫控座上面，然後搭配積分球、電源供應器、DAQ (Data Acquisition, DAQ) 的量測方式來獲取高功率 LED 整個光電熱特性，與其他系統不一樣的是，本量測系統同時整合了光電特性以及熱特性的量測，世界上尚未出現此類的產品，而本研究中採用了 NIST 熱阻量測方法，利用熱電致冷溫控器控制不同界面溫度，從界面溫度 40°C 每間隔 20°C 測量到界面溫度 120°C 為止，並使用分光光譜儀量測光色特性，DAQ 卡量測電特性，熱電致冷溫控器量測熱特性，在量測高功率 LED 的同時，測量其高功率 LED 之熱阻、界面溫度、外殼溫度等特性，並利用 NI Labview 8.6 做自動化控制，以及資料分析等動作。



#### 4.1.1 積分球規格

本研究所用的積分球是由 SphereOptics 製作，產品型號為 LM-12，球內直徑為 30cm，此積分球可以量測高功率 LED 或者是小型燈具，球體符合 CIE 84-1989，IES LM-79-2008 規範的  $4\pi$  條件，內部塗層為  $BaSO_4$ ，反射率為 95% 以上在 360nm~1000nm 波長內，外部球體架構為鋁合金，可接 SMA 905 規格的光纖或相容此 SMA 905 規格的光譜儀。



圖 4-2 積分球外觀

#### 4.1.2 分光通量標準燈規格

本研究所用的分光通量標準燈為 20W 鹵素燈，校正範圍從 360nm~1000nm，量測數值可追溯 NIST，報告內附有點燈條件、光通量、色溫、分光通量，以及不確定度。



圖 4-3 分光通量標準燈外觀與報告

#### 4.1.3 分光光譜儀規格

本研究所用的分光光譜儀為 OceanOptics USB 2000+，採用 Sony ILX511B 線性 CCD，波長範圍為 350nm~1050nm，但實際可用範圍是依照分光通量標準燈的範圍決定，數位波長解析度約 0.35nm，數位解析度為 16 位元，訊雜比(signal to noise ratio)為 250 : 1，USB 數位傳輸介面。



圖 4-4 OceanOptics USB 2000+ 分光光譜儀外觀

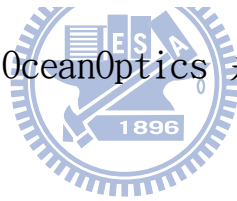


#### 4.1.4 光纖

OceanOptics 所生產的光纖，核心(Core)直徑為 600um，為一多模光纖，穿透的波長範圍為可見光到紅外光波段。



圖 4-5 OceanOptics 光纖外觀



#### 4.1.5 熱電致冷溫控器規格

本研究所用熱電致冷溫控器，溫控範圍可從 5°C 到 120°C，當 LED 在 10W 以下溫控範圍可從 5°C 到 100°C，在 11W~20W 之間溫控範圍可從 15°C 到 110°C，在 21W~30W 之間溫控範圍可從 25°C 到 120°C，使用 RS-232 控制，軟體可支援 VB、C、Labview 等。

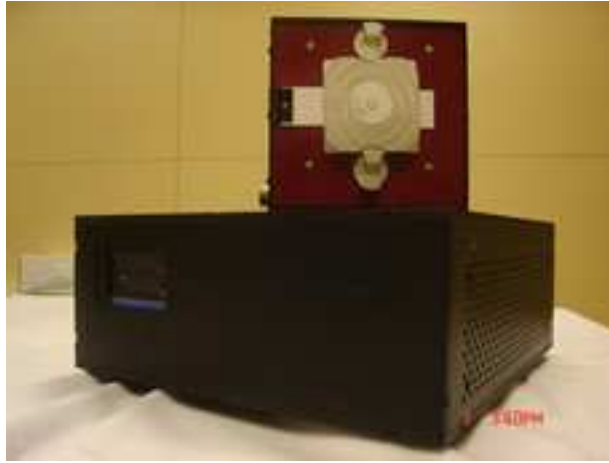


圖 4-6 熱電致冷溫控器外觀

#### 4.1.6 電源供應器

由 Keithley Instruments 所製造的 Keithley 2400 Source meter，是特別為快速的直流特性量測所設計，有 20W 的驅動能力，0.012% 的準確度，5 位半的解析度，可以使用 GPIB 或 RS-232 與電腦做連結，脈波寬度約 1.5ms。

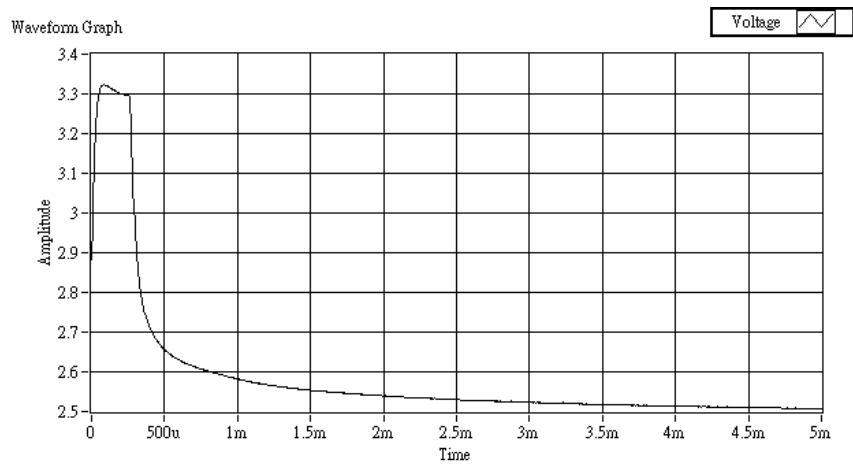


圖 4-7 Keithley 2400 實際送出脈波寬度



圖 4-8 Keithley 2400 Source meter 外觀

#### 4.1. 7DAQ 資料擷取卡

NI PCI-4461 為高準確度資料擷取模組，專為聲音和振動應用所設計。NI PCI-4461 具有 24 位元 sigma-delta 類比-數位轉換器 (ADCs) 及 24 位元類比輸出，適用於激發源-響應應用，例如聲音及

結構測試。NI PCI-4461 具有動態範圍 118 dB 和 6 增益設定，適用於以麥克風、加速規，和其他極大動態範圍感測器所進行的準確度量測。PCI-4461 的一般應用程式，包含聲音擴大器、產品安裝測試、振動產生平台控制 (shaker table control)、振動分析，和機械處理監測。

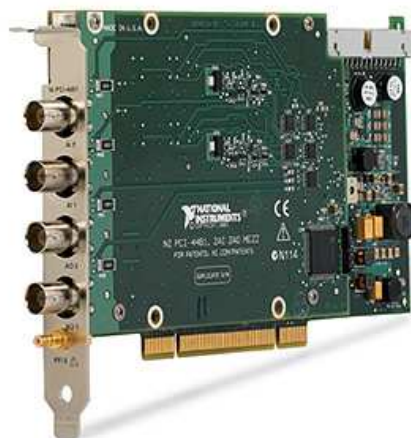


圖 4-9 NI PCI-4461

#### 4.1.8 開發軟體

本研究所用的程式是由 Labview 開發，使用時把上述所描述的儀器，整合成一個測量系統。這樣的話，不僅可以了解每個儀器本身的操作功能，以及工作原理，也可以把系統與系統間相互干擾的複雜問題，一個一個解決讓此系統更優化，量測更準確，下圖為軟體測試介面

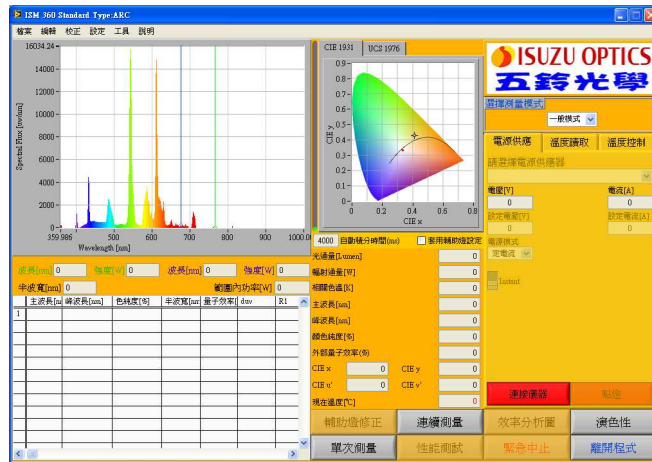


圖 4-10 軟體操作介面

不論是國內或國外測量光通量的儀器與測試熱阻的儀器全都使用兩套系統作為測試，因為兩套系統測試中所帶來的量測不確定度增加，所以整合成一套系統，如此一來可以讓整套系統的價格降低，也可以在量測的時候同時擷取到 LED 光性、電性、熱的資料。

本次實驗可量測的數據：

光：光通量、輻射通量、相關色溫、CIE x、CIE y、CIE u'、CIE v'、主波長[nm]、峰波長[nm]、色純度[%]、半波寬[nm]、duv、R1~R14、Ra、量子效率[%]

電：電壓[V]、電流[A]、消耗功率[W]、發光效率[Lumen/Watt]、輻射效率[Watt(O)/Watt(E)]

熱：Rjc[C/W]、Rjcr[C/W]、Tj[C]、Tc[C]、dT[C]

## 4.2 NIST 量測方法之數據與 TSP 量測方法之數據

本次實驗採用的 LED 是由國內封裝大廠葳天科技所提供的 LED，一為 Emitter 形式封裝(以下簡稱 Emitter)，一為 Emitter 形式封裝加印刷電路板(以下簡稱 Star)，分別使用不同的量測方法驗證量測數據，從光通量、輻射通量、相關色溫、CIE x、CIE y、演色性、電壓、發光效率、熱阻、接面溫度、溫度差、光譜圖來驗證兩個方法量測方法數據接近。

測試方式是先使用 NIST 方法設定接面溫度 60 °C，量測出外殼溫度，並且量測出光電熱等特性，接著固定外殼溫度，使用 TSP 方法，量測光電熱特性，接著比較兩種方法所量測的數據，判斷兩種方法是否相等。



#### 4.2.1 Emitter 封裝形式 (NIST 量測方法 VS TSP 量測方法)

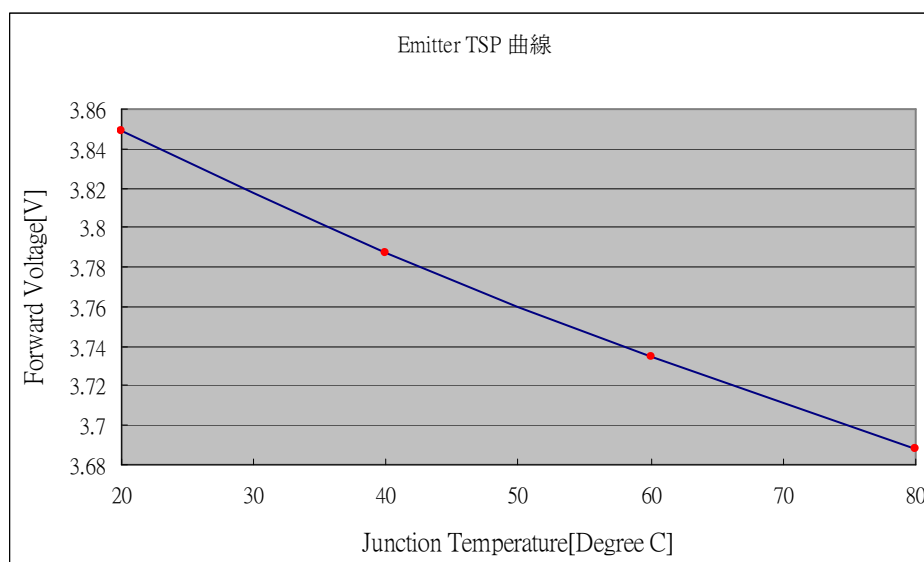


圖 4-11 Emitter 之 TSP



表 4-2 Emitter 之 TSP 資料與線性方程式

Temperature [C]	19.9667	40	60	80.0333
Voltage [V]	3.84863	3.78707	3.73463	3.68816
40°C ~ 19.967°C : $T = -325.44 V + 1272.46$				
60°C ~ 40°C : $T = -381.344 V + 1484.18$				
80.033°C ~ 60°C : $T = -431.13 V + 1670.11$				
19.967°C ~ 80.033°C : $T = -373.501 V + 1456.09$				
$R^2 = 0.99599$				

圖 4-11 及表 4-2 顯示了 Emitter LED 的 TSP 特性曲線。可以發現在脈波操作的情況下(可忽略 LED 內部的熱效應)，操作電壓會隨著接面溫度升高而下降，一般稱此現象為負溫度係數，這是由於二極體受熱後串聯電阻下降以及能隙縮小的緣故，而隨接面溫度變化的電壓

特性曲線之線性度是非常高的( $R^2=0.99599$ )，也顯示了我們使用熱電致冷溫控器來控制溫度是非常準確的。

表 4-3 Emitter 之熱阻與接面溫度比較

	熱阻[°C/W]	接面溫度[°C]	溫度差[°C]
NIST 量測方法	12.6969	60	33.2
TSP 量測方法	12.7538	60.1387	33.3387
誤差	0.45%	0.1387°C	0.1387°C

接著我們使用 NIST 的方式量測熱阻。當我們將接面溫度設定在 60°C 時(參考 TSP 量測時，室溫操作下的接面溫度)，可發現兩種熱阻量測所得到的溫度差非常接近，用此溫度差求得的熱阻值也只有 0.45% 的差異。這說明了 TSP 與 NIST 這兩種量測熱阻的方法在我們發展的量測系統中是非常可靠的。



## 4.2. 2Star 封裝形式 (NIST 量測方法 VS TSP 量測方法)

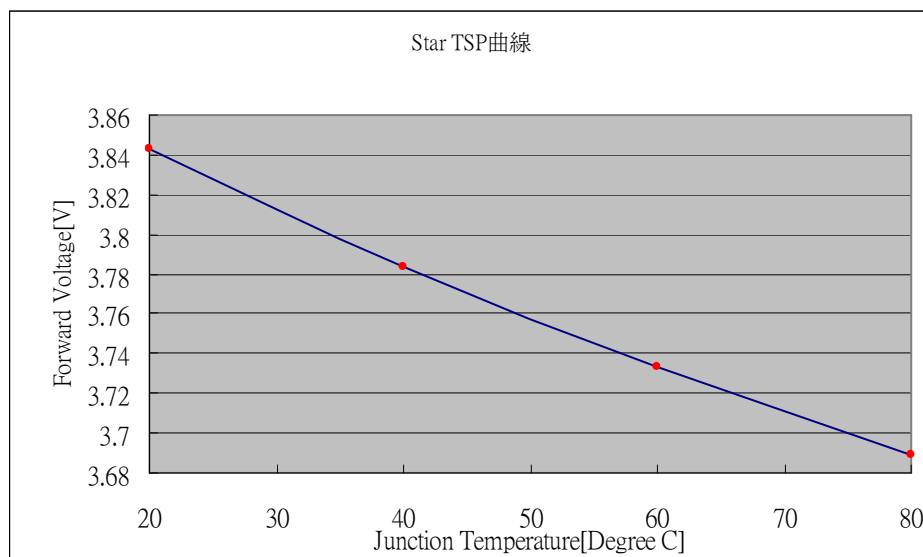


圖 4-12 Star 之 TSP



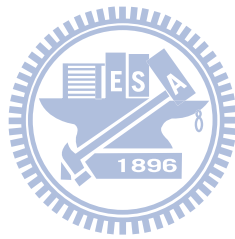
表 4-4 Star 之 TSP 資料與線性方程式

Temperature [C]	19.9667	40	59.9667	80
Voltage [V]	3.84275	3.78342	3.73285	3.68877
40°C ~ 19.967°C	: T = -337.645 V + 1317.46			
59.967°C ~ 40°C	: T = -394.819 V + 1533.77			
80°C ~ 59.967°C	: T = -454.517 V + 1756.61			
19.967°C ~ 80°C	: T = -388.636 V + 1512.01			
R <sup>2</sup> = 0.995575				

表 4-5 Star 之熱阻與接面溫度比較

	熱阻 [°C/W]	接面溫度 [°C]	溫度差 [°C]
NIST 量測方法	14.7564	60.0667	38.5667
TSP 量測方法	14.7152	59.9511	38.4511
誤差	0.28%	0.1156°C	0.1156°C

而 STAR LED 的 TSP 曲線的線性度也是相當的好( $R^2=0.995575$ )，顯示了即使多加上一層散熱板，也不會影響熱電致冷溫控器對於 LED 控溫的表現。而加上一層印刷電路板之後，溫度差大約多了  $5.2^{\circ}\text{C}$ ，而熱阻由  $12.7^{\circ}\text{C}/\text{W}$  上升至  $14.7^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。因為我們量測的熱阻是 PN 接面(PN Junction)至外殼(Case)的  $R_{jc}$ ，所以這部分熱阻的增加是屬於印刷電路板所貢獻的，而且無論是 NIST 或是 TSP 的方法都能夠量測出它的值。



### 4.3 Emitter VS Star 光電熱量測數據

接著使用 NIST 量測方法，設定接面溫度，從 40 °C 測試到 120 °C，每隔 20 °C 測試一次光電熱的數據，並且分析在溫度上升時，對光強度、相關色溫、演色性、電壓、效率以及熱阻的影響。

#### 4.3.1 光強度變化 VS 接面溫度

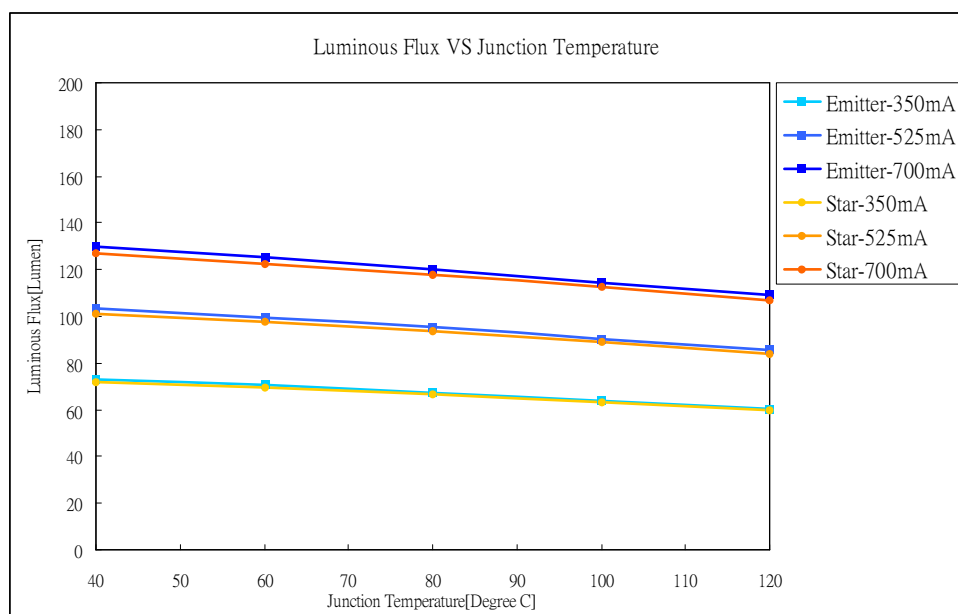


圖 4-13 光通量 VS 接面溫度

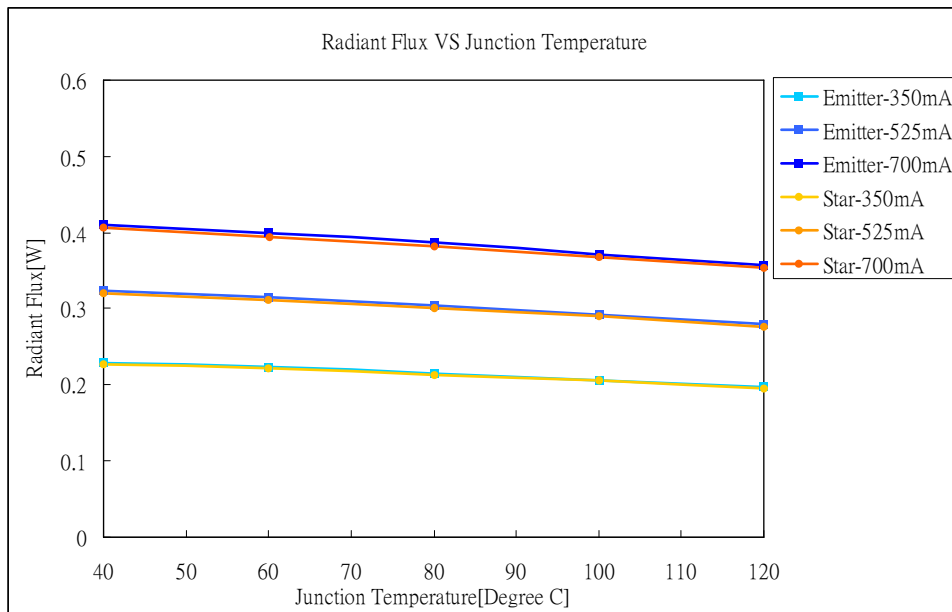


圖 4-14 輻射通量 VS 接面溫度

光通量與輻射通量對接面溫度的關係如圖 4-13、4-14 所示。由圖中我們可以發現，在任何操作電流之下，無論是光通量以及輻射通量都隨著接面溫度升高而降低，可以得知在接面溫度升高的情況下，因溫度效應的關係 LED 的量子效率是會降低的。但當操作在不同電流的情況下 Emitter 與 STAR 在改變接面溫度時的發光強度趨勢是幾乎一致，主要原因是兩者的皆是控制接面溫度的方式來量測的，若將改為控制外殼溫度的話，因 Emitter 與 STAR 熱阻有  $2^{\circ}\text{C}/\text{W}$  的差異，則 Emitter 與 STAR 將會有較明顯的差異。

### 4.3.2 相關色溫、演色性 VS 接面溫度

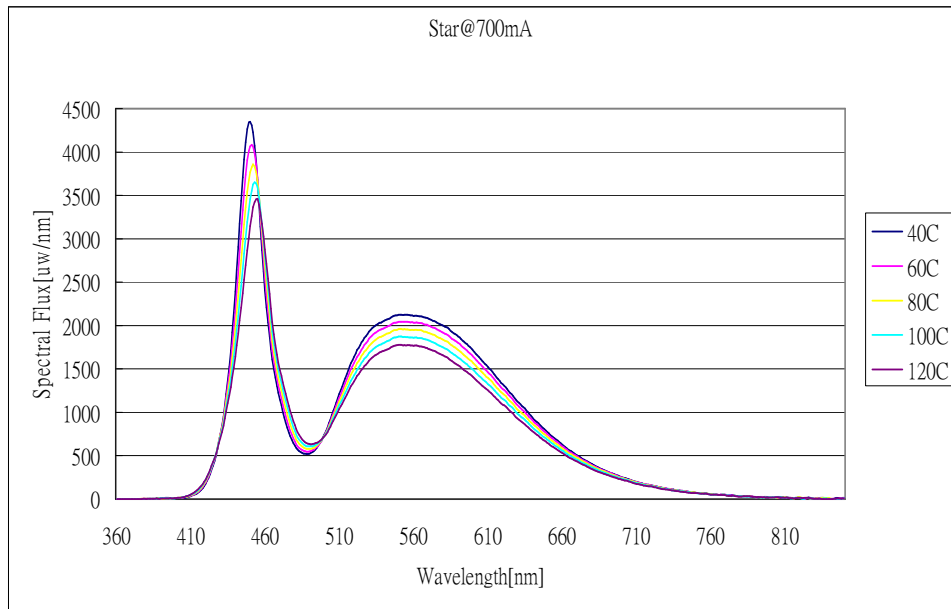


圖 4-15 不同接面溫度下的激發光譜

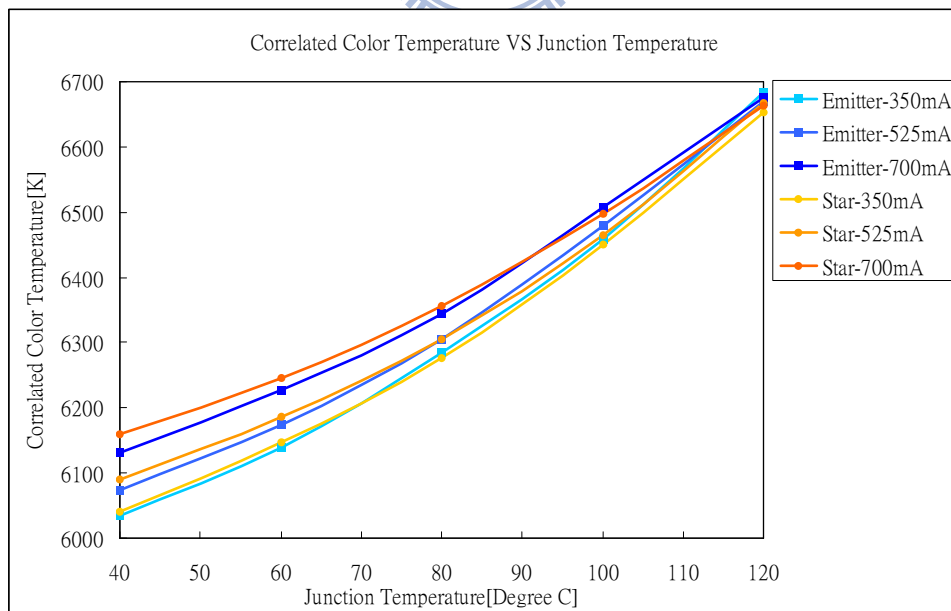


圖 4-16 相關色溫 VS 接面溫度

表 4-6 相關色溫 VS 接面溫度

350mA					
Emitter	6035.28	6138.19	6284.19	6458.72	6683.48
Star	6040.22	6147.88	6276.66	6449.48	6652.38
誤差(%)	0.08%	0.16%	0.12%	0.14%	0.47%
525mA					
Emitter	6073.44	6173.24	6304.89	6478.37	6669.24
Star	6089.58	6186.06	6305.89	6464.67	6667.03
誤差(%)	0.27%	0.21%	0.02%	0.21%	0.03%
700mA					
Emitter	6131.64	6226.62	6344.83	6507.65	6676.21
Star	6158.67	6246.39	6356.43	6496.85	6663.37
誤差(%)	0.44%	0.32%	0.18%	0.17%	0.19%

STAR 以及 Emitter LED 的相關色溫與接面溫度的關係如圖 4-16 所示。可以看出兩者隨著接面溫度提高，熱能增加，在能量不變的定律下，藍光強度降低，激發螢光粉的能量變小，而黃光部分雖然在能量變小的情況下，但是降低的比例上還是沒辦法超越藍光，導致藍光主導了色溫的變化，在此情況下，色溫會往高色溫移動。

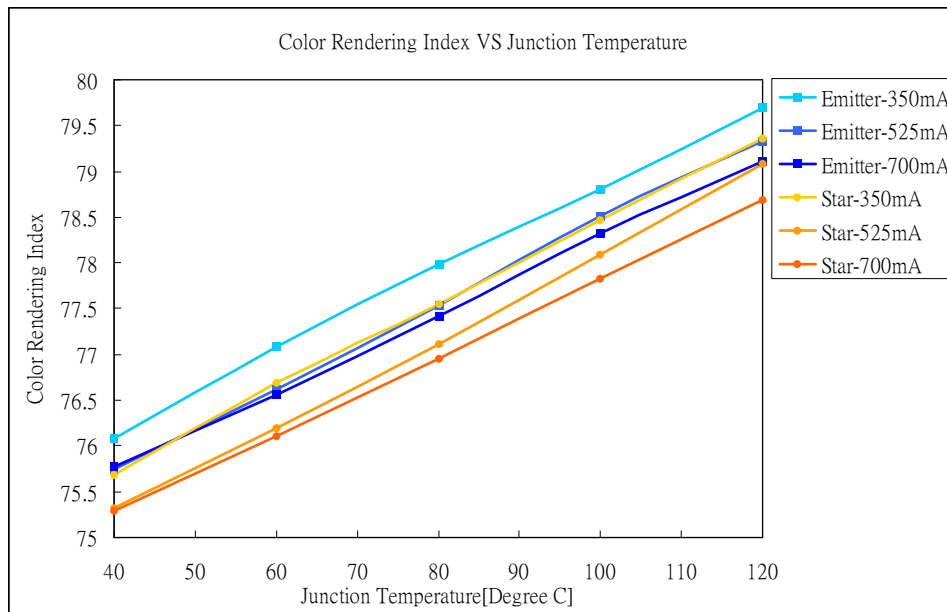


圖 4-17 演色性 VS 接面溫度

STAR 以及 Emitter LED 的演色性與接面溫度的關係如圖 4-17 所示。可以看出兩者隨著接面溫度提高，演色性增加，這是由於當接面溫度升高時，藍光能量及螢光粉能量降低，但降低的過程中卻使得光譜變的比較平坦，光譜平坦的結果造成照射在各個色板的涵蓋面積變大，在涵蓋面積變大時，相對的演色性數值也跟著變高。

### 4.3.3 電壓、效率 VS 接面溫度

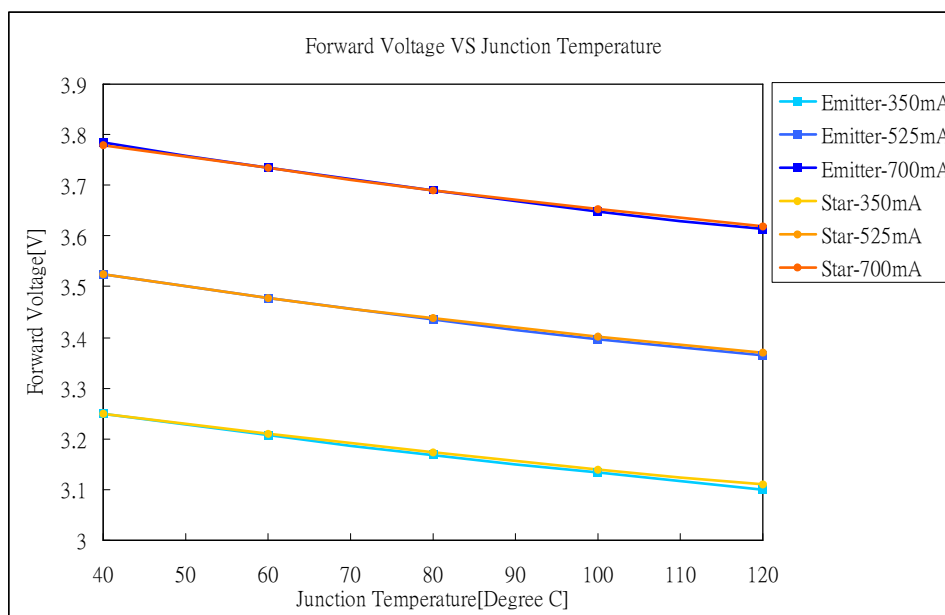


圖 4-18 順向電壓 VS 接面溫度



在前面我們曾經說過由於二極體受熱後串聯電阻下降以及能隙縮小的緣故，所以當溫度上升時，只需要相對小的順向電壓，也可獲得相同的電流，由上圖可明顯看出，此量測結果符合一般接面溫度每上升  $1^{\circ}\text{C}$  順向電壓會下降  $2\text{mV}$ ，如圖 4-19 所示。

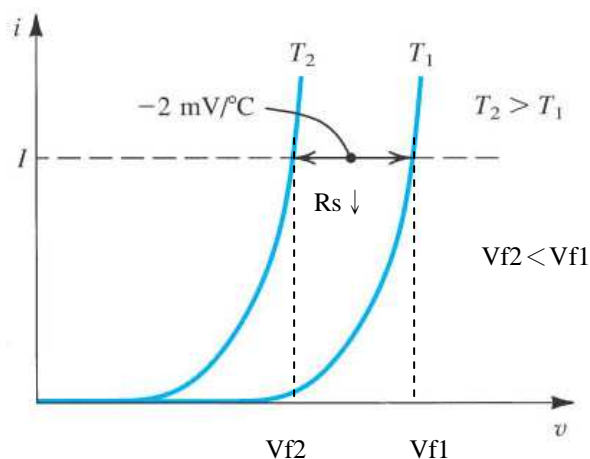


圖 4-19 LED 的 IV 特性曲線



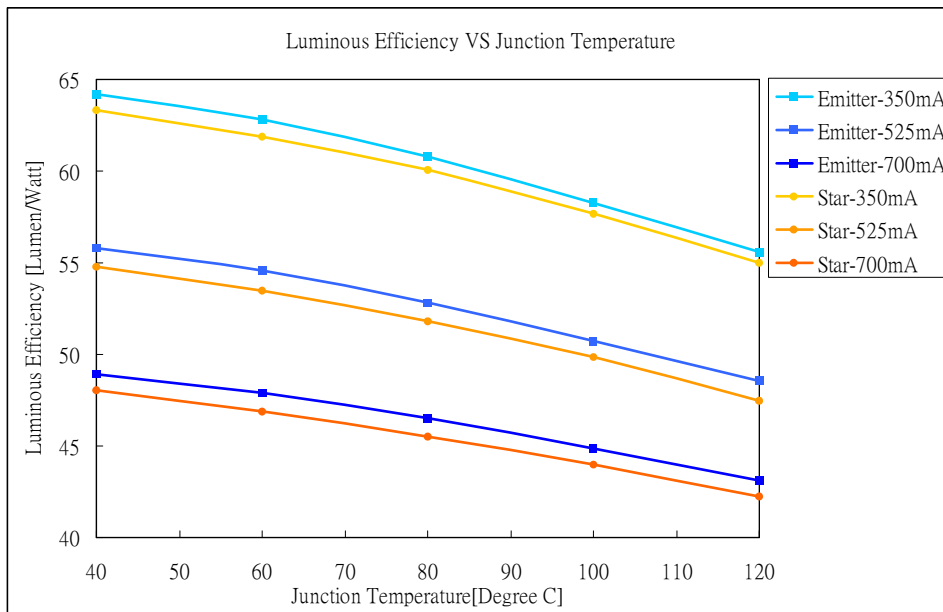


圖 4-20 發光效率 VS 接面溫度

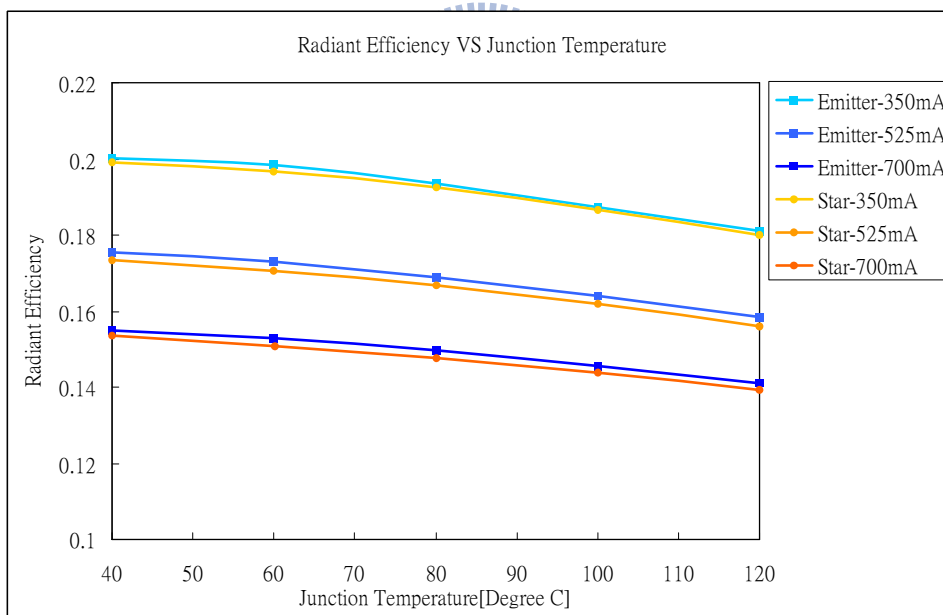


圖 4-21 輻射效率 VS 接面溫度

發光效率與輻射效率對接面溫度的關係如圖 4-20、4-21 所示。

由圖中我們可以發現，無論是發光效率以及輻射效率都隨著接面溫度

升高而降低，尤其是在較高操作電流下，其衰減的程度會從線性衰減變為較接近指數的衰減，最主要是因為接面溫度的升高，會產生更多的缺陷數與增強非輻射複合，此溫度主宰的效應會削弱發光效率與輻射效率，也就是說當電子電洞對的結合沒有產生光子，結合的能量就變成了熱，也就是聲子(Phonons)，其主要以非輻射複合(Non-Radiative Recombination)發生的晶格原子振動之形式轉化熱能。若從非輻射複合的過程進一步說明，則當傳導帶(Conduction Band)的電子或價電帶(Valence Band)的電洞受外來較大的能量驅動下，過程中因缺陷(Defect)存在而被捕獲(Capture)，經由多聲子放射產生能(Band-Gap Energy)的能量釋放，使得在缺陷位置會有很強的振動，導致缺陷的擴散與產生，再造成非輻射複合，如此一直循環下去將導致發光效率嚴重衰減。

#### 4.3.4 熱阻 VS 接面溫度

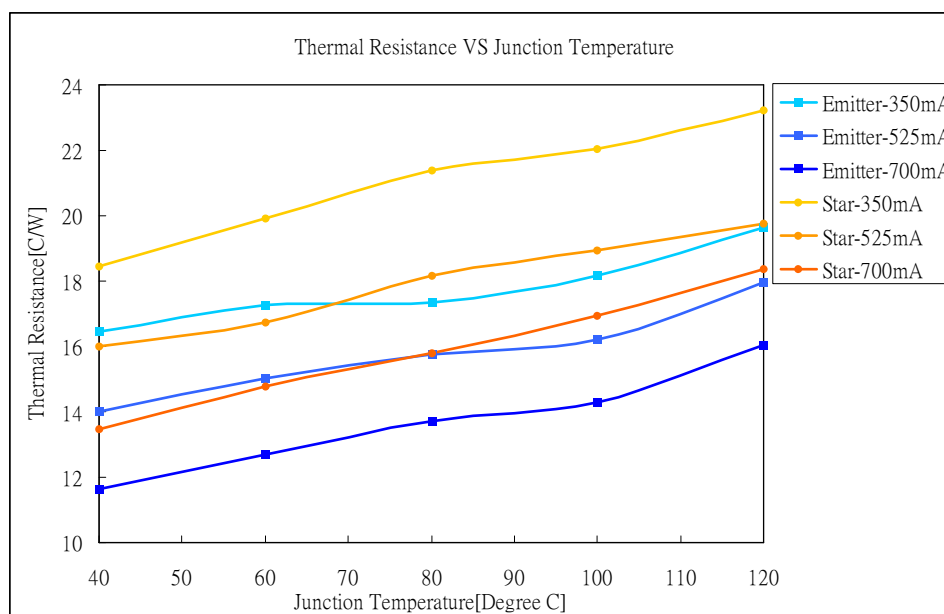


圖 4-22 熱阻 VS 接面溫度

熱阻對接面溫度的關係如圖 4-22 所示，隨接面溫度越高熱阻隨之越大，約每上升  $20^{\circ}\text{C}$  熱阻增加  $1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，猜測造成此結果最主要的原因是，因為 LED 的 Current Spreading 不佳導致溫度分布不均，且 LED 的 PN 兩端接面順向電壓為負溫度係數，較高的接面溫度將使其順向電壓變小，進而增加其電流來維持其固定電流，又引起接面的溫度上升，如此循環不已，便形成所謂的熱逃脫(Thermal Runway)，也就是所謂的電流擁擠(Current Crowding)的效應，此效應將導致熱阻會隨接面溫度上升有明顯的提升，也會使得元件特性變差，甚至造成元件永久性的破壞；亦猜測有一小部份是因為接面溫度升高導致 GaN

和導熱介面材料(Thermal Interface Material: TIM)的熱傳導係數下降所引起的。但當操作電流越高熱阻卻隨之反降，約每增加 1W 熱阻下降  $2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，且隨接面溫度升高熱阻一直維持約  $2^{\circ}\text{C}/\text{W}$  的偏移量(offset)。而操作電流越高熱阻卻降低的現象與一般電子元件的特性是完全不同的，這是在 LED 光電元件才有的特殊情況，猜測可能是操作電流增加，因溫度上升其串聯電阻隨之下降，導致串聯電阻消耗的功率( $P_{Rs}$ )降低，使得整體的輸出功率( $P_D$ )跟著提升，如圖 4-23 的 LED 內部電路示意圖所示，最後降低元件的整體熱阻大小。

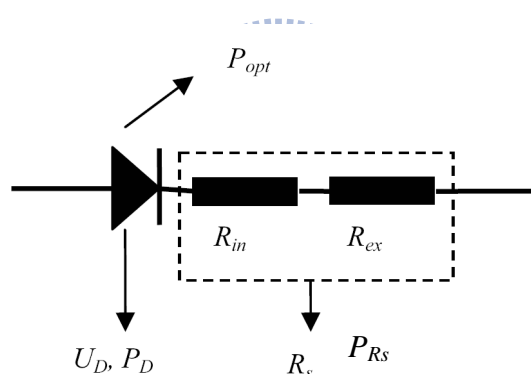


圖 4-23 LED 內部電路示意圖

#### 4.4 Emitter VS Star 散熱特性比較

前實驗只能知道光電熱特性，尚無法得知道加了印刷電路板或散熱鰭片之後是否對 LED 的散熱有幫助，這裡分別做兩個不同的實驗驗證 LED 散熱是否正常，第一個實驗是分別注入 350mA、525mA、700mA 的電流量測兩個樣品的 TSP 曲線，接著放在室溫(不控制溫度)下，分別量測 350mA、525mA、700mA 的接面溫度，接著比較不同電流下的接面溫度，相同的電流下，若接面溫度較高的話，則表示溫度比較沒辦法散出。第二個實驗是兩個樣品注入 0 到 700mA，每隔 1mA 擷取一次 LED 的光色特性，同樣也是在室溫(不控制溫度)比較兩個樣品，分別比較兩個樣品光強度，以及色溫的漂移程度。



#### 4.4.1 接面溫度 VS 電流

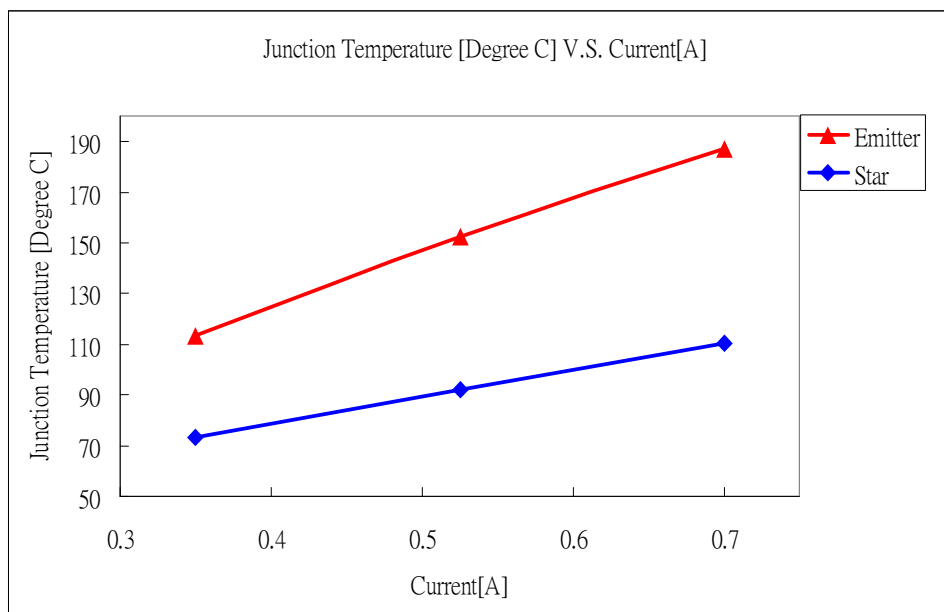


圖 4-24 不同電流下的接面溫度

在不同的電流下，兩個 LED 分別注入 350mA、525mA、700mA，由圖 4-24 得知，在室溫下，接面溫度隨著電流越高而上升，兩者的溫度差也越來越大，在這裡可得知，雖然 Star 的熱阻上升了，但是熱已經被導入散熱板裡造成溫度分散，所以沒加散熱片的接面溫度反而比加了散熱片的接面溫度還高。

#### 4.4.2 光強度、色溫 VS 電流

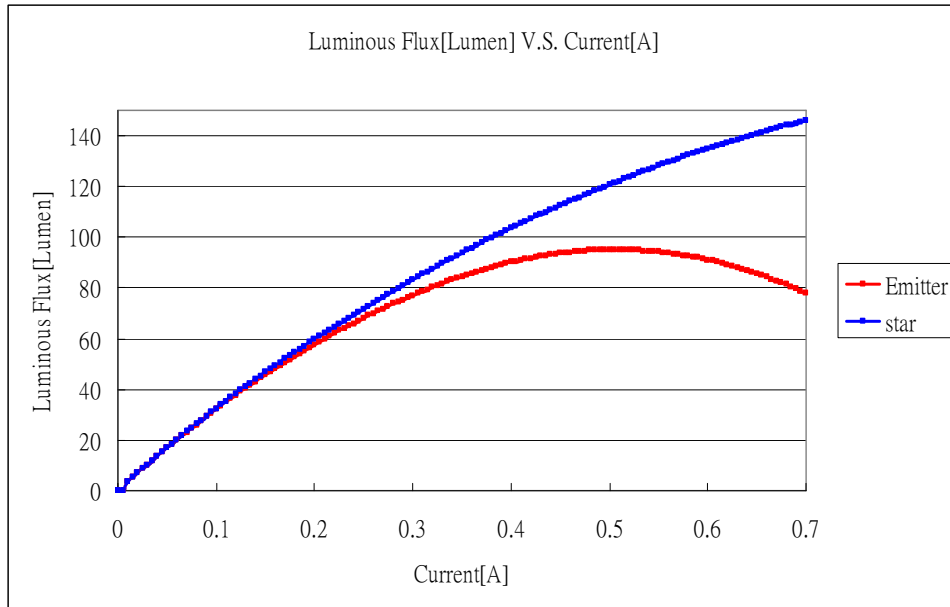


圖 4-25 光通量 VS 電流

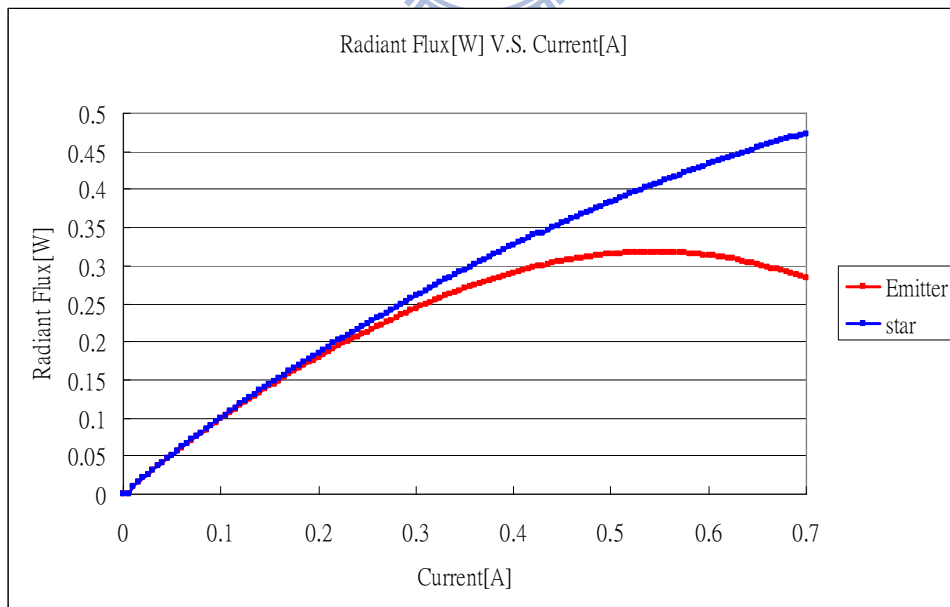


圖 4-26 輻射通量 VS 電流

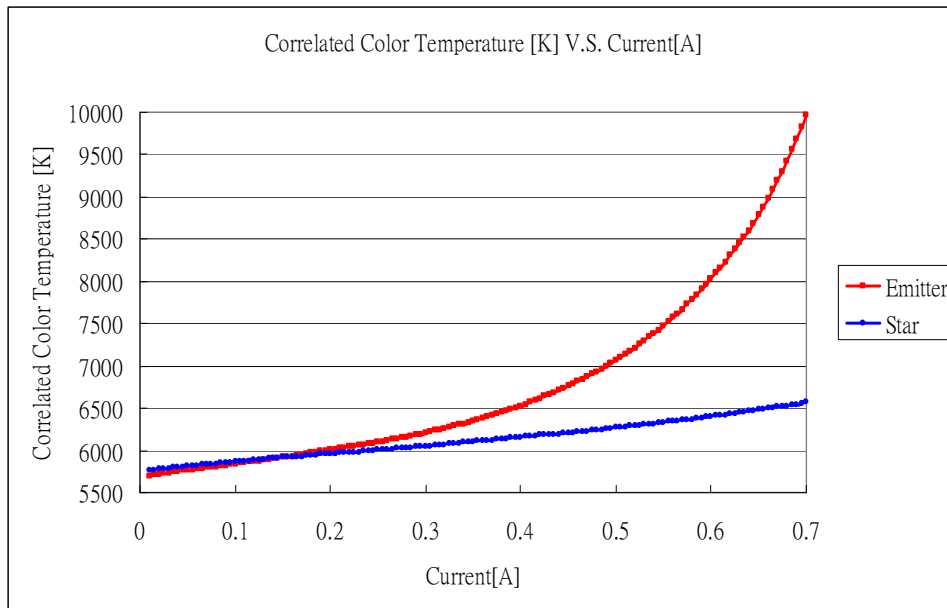


圖 4-27 光通量 VS 電流

由圖 4-25、圖 4-26、圖 4-27 這三種增加電流的情況下看，在電流增加的時候，Star 從光強度變化來看，是維持持續上升狀態，色溫變化，約為 1000K，而 Emitter 的光強度變化卻是到了 500mA 開始衰減，色溫變化差到 4000K，尤其是後段積熱多的情況下，斜率越來越大，反倒是 Star 比 Emitter 相對變化來的小，所以證明加了散熱板的確有讓散熱變好，LED 變的更穩定。



## 第五章 結論與未來展望

### 5.1 結論

1. 在前面的數據驗證後，各不同熱阻測試方法的數據測試經比較後看起來是接近的，在實驗室的階段中使用 TSP 方法跟 NIST 方法比較好，TSP 方法可以用來驗證 LED 製程的好壞或者有無漏電的情況，NIST 方法可以與積分球整合用來做單一接面溫度下的快速量測光電熱分析。
2. 在外殼溫度越來越高的情況下，光強度會變低、顏色會漂移、熱阻會上升的情況下，目前比較重要的課題是如何讓熱流能比較順利的散熱，而不會讓 LED 的壽命隨著操作溫度提升而減短，這個是後面無論是在製程、封裝、散熱、光學上所必需努力的重要課題，以期在未來中，運用 LED 環保長效的特性，把 LED 照明或其他應用普及至地球各角落，甚至是外太空，為環保貢獻一分心力。

## 5.2 未來展望

1. 目前 LED 的熱阻量測尚未有一個國際標準，所以大部分的情況下只能用國際大廠坐數據的驗證，這無論對儀器廠商或是上中下游的廠商都極為不便，唯有制訂一個標準才能讓每個人說的數據都相同，而此量測系統希望能做一個領頭羊的角色，讓其他更多光電熱量測系統能夠陸續被開發出來，造福儀器廠商以及上中下游的廠商。
2. AC LED 的光電熱阻量測系統：由於 AC LED 是未來的主流，加上其應用上的便利性，所以未來在開發上會加入 AC LED 與 HV LED 的光電熱阻量測系統。
3. 暫態的 LED 熱阻量測分析：現今在改善半導體製程上，每一層的熱阻都需要更斤斤計較，由一些文獻上或者是教科書上，可以發現用 R(電阻)C(電容)電路模擬計算每一層介面的熱阻以及所謂的熱容，所以之後也會研究如何使用已有的知識套用數學的方法分析每一層介質的熱阻值以及熱容值。

## 參考文獻

- [1] 中華民國國家標準 CNS 15248-2009 發光二極體元件之熱阻量測方法 (Methods of measurement on light emitting diode components for thermal resistance)
- [2] EIA/JESD51-8, Integrated Circuit Thermal Test Method Environmental Conditions “Junction-to-Board” , October 1999.
- [3] IES LM-79-08, Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products, 2008.
- [4] CIE 13.3-1995 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources
- [5] CIE 84-1989 Measurement of Luminous Flux
- [6] CIE 127-2007 Measurement of LED' s-Second Edition
- [7] Yuqin Zong and Yoshi Ohno, New Practical Method for Measurement of High-Power LEDs, Proceedings of the CIE Expert Symposium 2008 on Advances in Photometry and Colorimetry, CIE x033:2008, pp 102-106.
- [8] 戴明吉、劉君愷、譚瑞敏、李聖良，LED 熱阻量測技術(上)，工業材料雜誌 5 月號/2010 第 281 期

- [9] 戴明吉、劉君愷、譚瑞敏、李聖良，LED 熱阻量測技術(下)，工業材料雜誌 6 月號/2010 第 282 期
- [10] 湯順青主編，色度學，北京理工大學出版社，1990.
- [11] 金偉其, 胡威捷 編著，輻射度 光度與色度及其測量，北京理工大學出版社，2006.
- [12] S. M. Sze, Semiconductor Devices: Physics and Technology, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2001.
- [13] <http://www.isuzuoptics.com.tw/cht>
- [14] <http://www.oceanoptics.com>
- [15] <http://www.Sphereoptics.com>
- [16] <http://www.labSphere.com>
- [17] <http://www.ni.com/zht>
- [18] <http://www.keithley.com.tw>
- [19] <http://zh.wikipedia.org>
- [20] <http://www.lightemittingdiodes.org>