

國立交通大學  
光電工程研究所

碩士論文

氮化鎵惠斯頓電橋交流電發光二極體最佳化設計

Optimization Design of GaN-Based Wheatstone  
Bridge Alternating Current Light-Emitting Diode

研究生：陳冠霖

指導教授：余沛慈 教授

中華民國一百年七月

氮化鎵惠斯頓電橋交流電發光二極體最佳化設計  
**Optimization Design of GaN-Based Wheatstone  
Bridge Alternating Current Light-Emitting Diode**

研究生： 陳冠霖

Student : Guan-Lin Chen

指導教授： 余沛慈 教授

Advisor : Prof. Peichen Yu

國立交通大學  
光電工程研究所  
碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering  
College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master

in

Electro-Optical Engineering

July 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

# 氮化鎵惠斯頓電橋交流電發光二極體最佳化設計

研究生： 陳冠霖

指導教授： 余沛慈

國立交通大學光電工程研究所

## 摘要

本篇論文旨在探討惠斯頓電橋交流電發光二極體(WB-ACLELED)操作於交流下時的最佳化光輸出功率與晶片效率的比較。透過 SPICE 電路模擬軟體成功的建立了不同面積條件下 WB-ACLELED 操作於交流時的電性特性，並且透過設計與量測不同面積的微晶粒 LED 建立了光性資料庫，將光性資料寫入 Matlab 透過數學式計算不同面積下的電流密度之單位面積光輸出功率，成功的模擬出 WB-ACLELED 操作於交流下時的平均光輸出功率。

第一部分，WB-ACLELED 晶片固定總面為  $1.24\text{mm}^2$ 、輸入功率為 1W 及面積比值為 1 之條件下。當 WB-ACLELED 的半波整流微晶粒 LED 顆數(Side LED Number, SLN)固定為 5，只改變全波整流微晶粒 LED 顆數(Center LED Number, CLN)。 (SLN=5,CLN=25)較(SLN=5,CLN=5)的光輸出功率提高了 60%。當 WB-ACLELED 的微晶粒 LED 總顆數固定為 45 時，改變 SLN 與 CLN 之比例。(SLN=6,CLN=21)較(SLN=9,CLN=9)的光輸出功率提高了 8%。

第二部分，WB-ACLELED 晶片固定總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、輸入功率為 1W 及總微晶粒 LED 顆數為 65 之條件下，改變 WB-ACLELED 的半波整流微晶粒 LED 面積與全波整流微晶粒 LED 面積之面積比值(ratio of area, r)。當 WB-ACLELED 的  $r=2$  較  $r=1$  的光輸出功率提高了 9%。

# Optimization Design of GaN-Based Wheatstone Bridge Alternating Current Light-Emitting Diode

Student : Guan-Lin Chen

Advisor : Prof. Peichen Yu

Institute of Electro-Optical Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

This paper aims to compare the optimized light output power and the chip efficiency of Wheatstone bridge alternating current light-emitting diode, WB-ACLELED, under the condition of AC. Through SPICE, the simulative circuit software, the AC electronic characteristics of WB-ACLELED were set up successfully under different conditions of areas. In addition, the optical database was built by designing and measuring micro-LED under different areas so that the optical data could be written into the Matlab. By calculating the light output power per unit area under different current density of various areas, the real light output power of WB-ACLELED under AC was simulated successfully.

The first condition was under the total area of the WB-ACLELED chip as 1.24 mm<sup>2</sup>, the input power as 1W, and the area ratio as 1. When the side LED number (SLN) of WB-ACLELED was consistent at 5, only the center LED number (CLN) was changed. The light output power of the condition (SLN=5, CLN=25) was increased 60% than that of (SLN=5, CLN=5). When the number of micro-LED of WB-ACLELED was consistent at 45, the ratio between SLN and CLN was altered. The light output power of the condition (SLN=6, CLN=21) was elevated 8% than that of (SLN=9, CLN=9).

The second condition was under the total area of the WB-ACLELED chip as 1.24 mm<sup>2</sup>, the input power as 1W, and the number of micro-LED as 65. The ratio of area (r) between the side LED and the center LED of WB-ACLELED was changed. The light output power of the condition (r=2) was increased 9% than that of (r=1).

## 致謝

時光如流，兩年的碩士學生生涯有如夕陽為白天將盡劃上的句點，與夜交替後，展開人生另一段新的旅程。但在新旅程開始前，我要感謝的人太多太多了，單單一句『謝天』也是無法表達我心中對大家那有如滔滔江水連綿不絕的感激之情呀！首先，要謝謝余沛慈老師對學生研究上的指導與建議，並且提供了學生良好的研究環境，也教導了學生研究的態度與解決問題能力。同時也要感謝郭浩中老師時常在研究上給予學生許多正向的建議，提供許多研究上的資源，也教導學生做事做人的態度與方法。最後還要感謝徐碩鴻老師在會議上給予的寶貴意見。

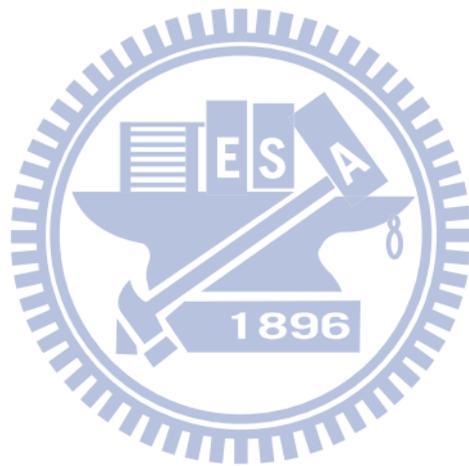
接著要感謝從我碩一時就一直帶領我的閔安學長，指導我做研究的技巧與方法，在研究上時常給予我意見與想法，讓我在困惑時為我解惑，在我茫然時指引我大道的方向，平常又幽默風趣總是樂觀正向的態度，讓學弟我相信轉角就是希望！再來要感謝的是璽軒學長，因為有學長我才能將研究做得更完整更完美，當我研究遇到問題時學長總適時給予我明燈，也常常與我享許多自己的研究心得，真的是不可多得的好學長呀！接下來要感謝的是 Joseph 學長，感謝學長這麼罩學弟，在研究上給予我許多寶貴的意見，祝福學長千里馬時譜出一段戀曲。還有感謝國儒學長在研究上大力的專業支援，資格考順利過關！最後還要謝謝家華學長、亭綱學長、跑哥學長與信助學長在實驗室中的幫助與排優解悶救救研究生的義行。

還有同屆的戰友們，在研究上常常互相打氣的 kobe 峰瑜、常常問我名牌的純情男子大頭、很愛揪飯局的食神卡卡、常常分享各種心得與想法的敏翔、補教界名師 po 哥、壘球小將木村家齊、攝影大師 Jolin 與大寶、有原則的肉圓、人超好嘴炮跟製程一樣強的小杜、像小學生的正妹羿蓁、像鄰家小妹的美眉瑋婷、羽球強暴了的 Just、實驗室管理員 SGG、咖啡王子幼齒和發了 APL 各項能力都很變態的阿國，有你們才讓我的研究生涯充滿了歡樂，在研究上、修課上，我們一起打拼、互相討論，失落時彼此鼓勵，開心時共同分享，這些生活中的點點滴滴將會是我難以忘懷的回憶。還要謝謝學弟炫廷與柏瑜對我於研究上的協助，我們共同解決了許多問題渡過許多難關，還有學弟國軒、宇志、承穎與子軒，祝福你們將來研究都能順利！最後是偉哥，在我最初時細心的指導我，後來我們共同面對了許多困難也都迎刃而解，相信你在未來的道路上能一切順利。

再來是謝謝大學時代的朋友們，謝謝復凱兄陪我在單調的研究生活中一起幹天幹地幹命運，謝謝宜諺常常陪我來一段激烈的下午茶，謝謝志翰聽我平常說一些五四三的話，謝謝台南南霸天們巨石孟哲、虎克本傳、小強政助、台北扛霸子小豪與小 V 在 OPT 會議時收留我，祝大家順利畢業且光榮退伍！

緊接著還要感謝我最愛的女朋友，在我研究所求學期間一直沒有出現，讓我專心跑完模擬做完量測完成了學業，接下來的日子妳再不出現我媽就要叫我去相親了。

最後的最後，要感謝我的家人，謝謝父親與母親支持我做我自己想做的事，給予我這麼好的生活環境，讓我無後顧之憂的專注於學業，還有姊姊與弟弟對我的關心，有你們我覺得自己好幸福好幸運，祝你們都能身體健健康康，順利考上國考，順利完成學業，順利退休！



# 目錄

摘要 (中文).....	I
摘要 (英文).....	II
誌謝.....	III
目錄.....	V
圖目錄.....	VII
表格目錄.....	X
<b>Chapter 1 序論與研究動機 .....</b>	<b>1</b>
1.1 LED 與 WB-ACLED 發展 .....	1
1.2 WB-ACLED 發展優勢 .....	2
1.3 研究動機 .....	4
<b>Chapter 2 WB-ACLED 工作原理 .....</b>	<b>5</b>
2.1 LED 原理 .....	5
2.2 ACLED 原理與種類 .....	7
2.2.1 串並型 ACLED(Anti-parallel ACLED, AP-ACLED).....	8
2.2.2 橋式型 ACLED(Wheatstone bridge ACLED, WB-ACLED).....	9
2.3 WB-ACLED 參數定義 .....	9
<b>Chapter 3 SPICE 模擬 WB-ACLED 電路效率最佳化分析.....</b>	<b>11</b>
3.1 SPICE 模擬軟體介紹 .....	11
3.1.1 SPICE LED 模型 .....	12
3.2 建立 LED 模型 .....	18
3.3 建立 WB-ACLED 模型 .....	23
3.4 最佳化 WB-ACLED 設計方法 .....	25
3.4.1 WB-ACLED 顆數比分析 .....	26

3.4.2 WB-ACLED 面積比分析.....	34
3.5 WB-ACLED 電性與光性結果討論.....	35
<b>Chapter 4 WB-ACLED 製程之量測與實驗結果 .....</b>	<b>36</b>
4.1 WB-ACLED 之光罩設計與製程.....	36
4.1.1 固定面積比值變微晶粒 LED 顆數 .....	36
4.1.2 固定微晶粒 LED 顆數變面積比值 .....	39
4.1.3 WB-ACLED 元件製程.....	42
4.2 WB-ACLED 之電性與光性量測分析 .....	44
4.2.1 WB-ACLED 變顆數比值電性與光性量測分析.....	45
4.2.2 WB-ACLED 變面積比電值性與光性量測分析.....	50
4.3 WB-ACLED 之發光強度分佈量測與分析.....	55
<b>Chapter 5 總結.....</b>	<b>58</b>
<b>參考文獻 .....</b>	<b>59</b>



# 圖目錄

## 第一章：

圖 1.2.1 ACLED、DCLED 與傳統照明之間的優劣比較 .....	3
圖 1.2.2 ACLED 與白熾燈之 Flux 比較 .....	3

## 第二章：

圖 2.1.1 LED 的 pn+接面在無外加偏壓下之能帶示意圖 .....	5
圖 2.1.2 外加順向偏壓下 LED 的 pn+接面在無外加偏壓下之能帶示意圖 .....	6
圖 2.1.3 DCLED 電源轉換系統示意圖 .....	7
圖 2.2.1 ACLED 電源轉換系統示意圖 .....	7
圖 2.2.2 DCLED 操作於直流下的特性 .....	7
圖 2.2.3 ACLED 操作於交流下的特性 .....	8
圖 2.2.1 (a)AP-ACLED 微電路示意圖與(b)實體元件圖 .....	8
圖 2.2.2 (a)WB-ACLED 微電路示意圖與(b)實體元件圖 .....	9

## 第三章：

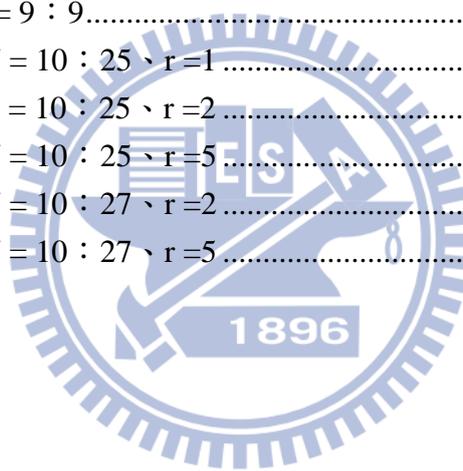
圖 3.1.1 直流大訊號 SPICE 二極體模型 .....	14
圖 3.1.2 SPICE 二極體模型 I-V 特性曲線 .....	15
圖 3.1.3 SPICE 二極體的 交流小訊號模型 .....	16
圖 3.2.4 SPIC 二極體包含雜訊源的交流小訊號模型 .....	18
圖 3.2.1 為 20 種不同面積的微晶粒 LED 光罩圖與 450um×450um 微晶粒 LED 的 OM 圖 .....	19
圖 3.2.2 微晶粒 LED 電流-電壓量測系統架構 .....	19
圖 3.2.3 微晶粒 LED 之 I-V 特性曲線 .....	20
圖 3.2.4 125um×125um 微晶粒 LED 之 LogI-V 特性曲線 .....	20
圖 3.2.5 SPICE 裡模擬微晶粒 LED 之電路模型與模擬結果 .....	22
圖 3.2.6 微晶粒 LED 之 L-I 特性曲線 .....	22
圖 3.2.7 微晶粒 LED 之 L-J 特性曲線 .....	23
圖 3.3.1 SPICE 裡 WB-ACLED 電路模型 .....	24
圖 3.3.2 SPICE 模擬 WB-ACLED 之時變 I-V 特性曲線 .....	25
圖 3.4.1 WB-ACLED 之微晶粒 LED 顆數設計示意圖 .....	27
圖 3.4.2 Matlab 連結 SPICE 軟體固定參數之設定介面 .....	28
圖 3.4.3 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數總串聯電阻值比較 .....	29
圖 3.4.4 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數晶片效率比較 .....	30
圖 3.4.5 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數光輸出功率比較 .....	

.....	31
圖 3.4.6 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數總串聯電阻值比較	31
.....	32
圖 3.4.7 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數晶片效率比較	32
圖 3.4.8 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數光輸出功率比較	33
.....	33
圖 3.4.9 WB-ACLED 之半波微整流微晶粒 LED 與全波整流微晶粒 LED 的面積比定義示意圖	34
圖 3.4.10 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變面積比值與光輸出功率比較	35

#### 第四章：

圖 4.1.1 SLN=5, CLN=5, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	37
圖 4.1.2 SLN=5, CLN=10, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	37
圖 4.1.3 SLN=5, CLN=15, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	37
圖 4.1.4 SLN=5, CLN=20, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	37
圖 4.1.5 SLN=5, CLN=25, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	38
圖 4.1.6 SLN=6, CLN=21, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	38
圖 4.1.7 SLN=7, CLN=17, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	39
圖 4.1.8 SLN=8, CLN=13, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	39
圖 4.1.9 SLN=9, CLN=9, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	39
圖 4.1.10 SLN=10, CLN=25, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	40
圖 4.1.11 SLN=10, CLN=25, r=2 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	40
圖 4.1.12 SLN=10, CLN=25, r=5 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	40
圖 4.1.13 SLN=10, CLN=27, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	41
圖 4.1.14 SLN=10, CLN=27, r=2 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	41
圖 4.1.15 SLN=10, CLN=27, r=5 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖	42
圖 4.1.16 WB-ACLED 製程流程圖	43
圖 4.2.1 ACLED 量測設備系統示意圖與限流電阻電路	45
圖 4.2.2 固定 r=1、SLN=5、CLN=5~25 之 WB-ACLED 的 IV 曲線	46
圖 4.2.3 固定 r=1、SLN=5、CLN=5~25 之 WB-ACLED 的 PL 曲線	46
圖 4.2.4 固定 r=1、SLN=5、CLN=5~25 之 WB-ACLED 模擬與量測的光輸出功率比較圖	47
圖 4.2.5 固定 r=1、SLN=6~9、CLN=9~21, 總顆數為 45 之 WB-ACLED 的 IV 曲線	48
圖 4.2.6 固定 r=1、SLN=6~9、CLN=9~21, 總顆數為 45 之 WB-ACLED 的 PL 曲線	49
圖 4.2.7 固定 r=1、SLN=6~9、CLN=9~21, 總顆數為 45 之 WB-ACLED 模擬與量測的光輸出功率比較圖	50

圖 4.2.8 固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25),面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 的 IV 曲線 .....	51
圖 4.2.9 固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25),面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 的 PL 曲線 .....	52
圖 4.2.10 固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25),面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 模擬與量測的光輸出功率比較圖 .....	53
圖 4.3.1 SLN : CLN = 5 : 5.....	55
圖 4.3.2 SLN : CLN = 5 : 10.....	55
圖 4.3.3 SLN : CLN = 5 : 15.....	56
圖 4.3.4 SLN : CLN = 5 : 20.....	56
圖 4.3.5 SLN : CLN = 5 : 25.....	56
圖 4.3.6 SLN : CLN = 6 : 21.....	56
圖 4.3.7 SLN : CLN = 7 : 17.....	56
圖 4.3.8 SLN : CLN = 8 : 13.....	56
圖 4.3.9 SLN : CLN = 9 : 9.....	56
圖 4.3.10 SLN : CLN = 10 : 25、r=1 .....	56
圖 4.3.11 SLN : CLN = 10 : 25、r=2 .....	56
圖 4.3.12 SLN : CLN = 10 : 25、r=5 .....	57
圖 4.3.13 SLN : CLN = 10 : 27、r=2 .....	57
圖 4.3.14 SLN : CLN = 10 : 27、r=5 .....	57



# 表目錄

## 第一章：

表 1.2.1 15W 省電燈泡與 ACLED 燈使用 2 萬小時比較(2009 年規格為準)....4

## 第三章：

表 3.1.1 SPICE 二極體內建參數.....13

表 3.2.1 為 20 種不同面積的微晶粒 LED.....18

表 3.2.2 為 9 種不同微晶粒 LED 面積之理想因子.....21

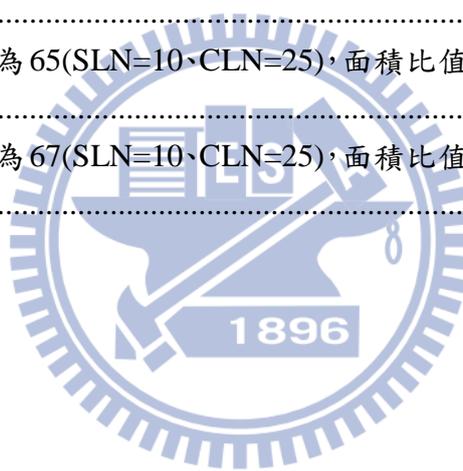
## 第四章：

表 4.2.1 固定  $r=1$ 、 $SLN=5$ 、 $CLN=5\sim 25$  之 WB-ACLED 量測數據.....47

表 4.2.2 固定  $r=1$ 、 $SLN=6\sim 9$ 、 $CLN=9\sim 21$ ，總顆數為 45 之 WB-ACLED 量測數據.....50

表 4.2.3 固定總顆數為 65( $SLN=10$ 、 $CLN=25$ )，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 量測數據.....53

表 4.2.4 固定總顆數為 67( $SLN=10$ 、 $CLN=25$ )，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 量測數據.....54



# 第一章

## 序論與研究動機

### 1.1 LED 與 ACLED 發展

由於石油能源危機的到來，發展更高效率更省電的電子與照明設備越來越受到重視，在此趨勢之下具有省電、環保(不含汞)無污染、壽命長、亮度高、反應快、體積小、高發光效率等優點的發光二極體(Light-Emitting Diode, LED)元件漸漸在照明產業中露出頭角，應用範圍遍及於日常生活中，例如儀器面板上的指示燈。而隨著半導體技術的發展與材料科學的進步，更豐富了發光二極體的色彩，使得顯示器達到全彩化的目標，其中發展的關鍵則仰賴氮化鎵系半導體技術的成熟。

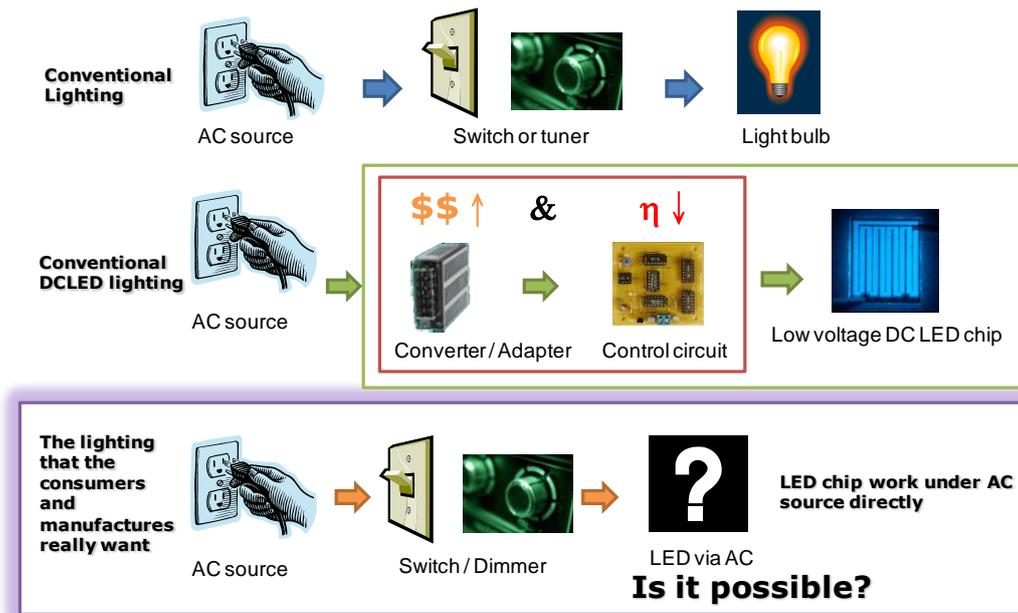
氮化鎵發光二極體(Gallium Nitride -based light-emitting diodes, GaN LED)因材料本身為直接能隙(direct bandgap)為 3.39 eV，氮化鎵材料系列是一種理想的短波長發光元件材料，氮化鎵可用來作為藍綠光到紫外光的發光元件。因為紅、藍、綠為色彩的三原色，所以藍綠光的氮化鎵可達成全彩顯示器的需求，另外，亦可增加數位影音光碟的存取密度。LED 目前已被廣泛的應用於面板背光源、廣告看版、戶外顯示器、車用照明、交通號誌、一般照明與商業照明等各種應用領域[1-12]。目前世界多國都即將實施白熾燈的禁產，進而全面禁止使用。台灣在 2010 年開始實施停止生產白熾燈，2012 年完全禁產白熾燈，而交通號誌全面汰換為 LED 燈。預計於 2014 開始將一般照明汰換為 LED 燈，此計劃的實施勢必加速替代照明的發展，綜合以上各點，發光二極體將是 21 世紀極具競爭力的照明用具。

但由於 LED 本身物理上的限制，傳統上在使用時必須額外再加其它電子元件整流變壓器，將交流源(DC)轉換為直流源(DC)，而在這轉換的過程中會

額外消耗掉一部分的功率，而整流電壓器又會增 LED 的體積、重量與成本，而其中的電子元件如電容壽命又遠短於 LED，造成了 LED 模組壽命變短。因此該如何設計 LED 晶片能直接工作於交流源下以鞏固 LED 於照明市場的地位是非常迫切需要的。ACLED(Alternating Current LED)晶片是在於一絕緣體基板上透過 LED 半導體標準製程方式將許多微晶粒 LED(micro-LEDs)整合在一起，使該 LED 晶片可直接工作於交流源下[13-17]。由於微晶粒 LED 互相串接與輸入訊號為一交流正弦波電壓，因此 ACLED 與 DCLED 的運作模式相當的不同，發出的光會快速閃爍與較高的注入電流密度，在半週期下只有部份的微晶粒 LED 會發光。ACLED 的特色是微晶粒 LED 的數量、佈局(Layout)、面積大小相對於整顆晶片面積和面積的利用率，而在每一個 AC 週期下微晶粒 LED 發光特性都會受到這些因素影響，決定了 ACLED 的光輸出效率與製造成本。

## 1.2 ACLED 發展優勢

ACLED 與 DCLED 最大不同之裡在於前者直接插上一般家用插座使用交流電即可，克服了 DCLED 必須使用電源轉換器將交流電轉換為直流電才能使用的限制，如圖 1.2.1 所示。沒有了電源轉換器，這時 ACLED 的優勢也就突顯了出來，沒有了電流轉換器龐大的體積與重量，提高了產品設計上的方便性，更降低了產品成本。



Ref. Epistar & ITRI

圖 1.2.1 ACLED、DCLED 與傳統照明之間的優劣比較

以 lm/\$ 來看 LED 顯然要快速取代現有照明光源仍有一段路要走，但相較於已經停滯的傳統燈源技術，LED 的進步速度極為迅速，目前效率上已遠超過白熾燈，如圖 1.2.2 所示。

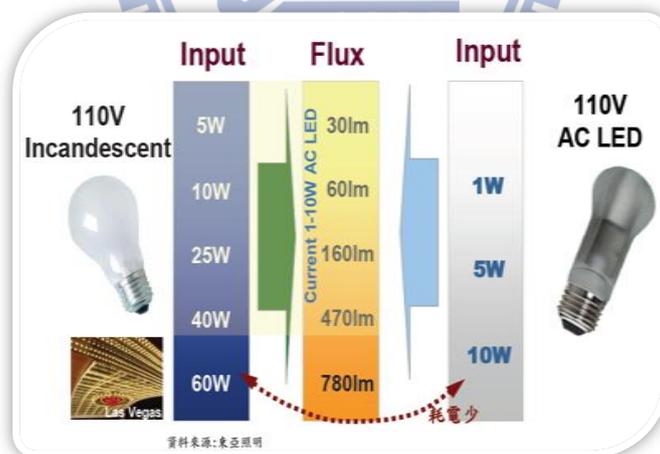


圖 1.2.2 ACLED 與白熾燈之 Flux 比較

家用燈源最常見為省電燈泡和日光燈，而 AC LED 目前是以省電燈泡來當作比較對象，綜合各項設備及耗電成本比較，目前雖然還略遜一籌(如表 1.2.1 15W 省電燈泡與 ACLED 成本比較)，但依照現有的研發時程，往後效能上有機會超越省電燈泡成為燈源的明日之星[18]。目前台灣晶元光電所開發

的 ACLED 產品 AC55B 目前效率已達 75lm/W(2009Q4)，而 AC36B 效率已達 86~93lm/W(2010Q1)[19]。

	省電燈炮	ACLED
耗電量 (度/千小時)	15	12
電費 (元/月)	3.75	3.0
壽命 (小時)	6,000	>20,000
燈源成本 (元/2萬小時)	450 (150元/個×3)	480
設備總成本 (燈源+燈具)	550	630
設備+耗電成本	1,300	1,230
資料來源：工研院電子與光電研究所		

表 1.2.1 15W 省電燈泡與 ACLED 燈使用 2 萬小時比較(2009 年規格為準)

### 1.3 研究動機

因 ACLED 相較於 DCLED 的各種優點與方便性，且業界也積極的開發相關產品，但 ACLED 目前的發光效率仍略低於 DCLED。ACLED 實際上可分為兩大類，其一為串並型 ACLED(Anti-parallel-ACLED, AP-ACLED)，其二為橋式型 ACLED(Wheatstone Bridge-ACLED, WB-ACLED)，WB-ACLED 的光輸出功率與面積利用率上較 AB-ACLED 還來得好，而目前有關於優化 ACLED 光輸出功率方面的研究甚少，本論文之研究將透過最佳化 ACLED 的微晶粒 LED 顆數與面積利用率來改善 WB-ACLED 的光輸出功率，使 ACLED 在市場上能更具有優勢。

## 第二章

### WB-ACLED 工作原理

#### 2.1 LED 原理

LED 為一種會發光的半導體電子元件，和一般二極體的結構相同，會預先摻雜其它元素以產生 pn 接面結構，由直接能隙半導體材料構成，例如 GaAs、GaN 等。在順下偏壓操作下，主動區(active region)會有電子(electron)從 n-type 半導體區注入與電洞(hole)從 p-type 半導體區注入，並形成電子電洞對復合進而放出光子，放出光子的行為即為輻射復合(radiative recombination)，釋放出的光子能量近似於能隙能量  $h\nu \approx E_g$ 。圖 2.1.1 為 LED 未加任何偏壓下的 pn<sup>+</sup>接面元件之能帶圖，其中 n 側相較 p 側為重摻雜，因而 pn<sup>+</sup>元件的空乏區大部分落在 p 側。在平衡且不外加偏壓下整體元件的費米能階必須維持一致，因此於能帶圖中，從 n 側  $E_c$  側 p 側  $E_c$  間會有一位能障  $eV_0$  ( $\Delta E_c = eV_0$ )， $V_0$  為內建電壓，在 n 側因重摻雜下擁有高濃度的傳導電子，因此驅使自由電子由 n 側擴散至 p 側，但淨電子擴散卻會被位障  $eV_0$  阻擋。

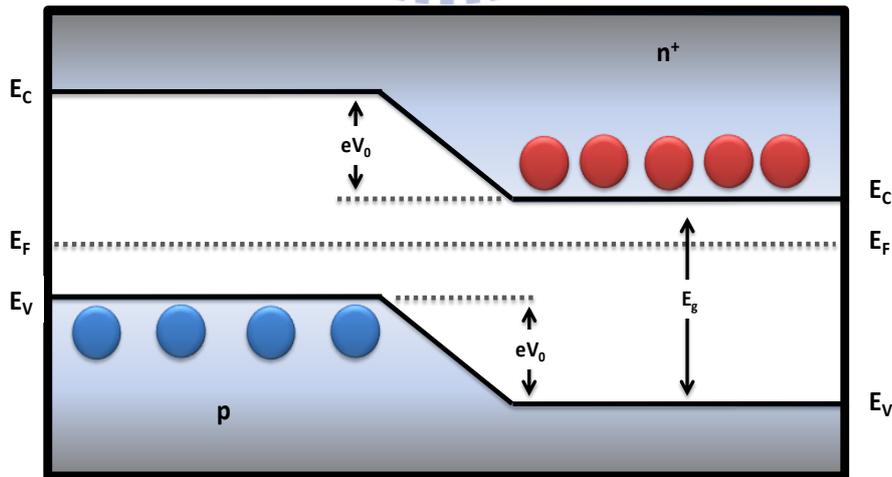


圖 2.1.1 LED 的 pn<sup>+</sup>接面在無外加偏壓下之能帶示意圖

LED 元件主要的電阻大都位於空乏區內，所以只要外加一順向偏壓  $V$ ，

當電壓降座落於空乏區，內建電壓將從  $V_0$  降至為  $V_0 - V$ ，這時  $n^+$  的電子會擴散或被注入至 p 側，如圖 2.1.2 所示。於  $pn^+$  這種結構中，從 p 到  $n^+$  側的電洞注入會較從  $n^+$  到 p 側之電子注入小很多，因此注入的電子在空乏區和中性 p 側處復合導致光子自發放射；主要復合會發生在空乏區內延伸至電子擴散長度  $L_e$  在 p 側所涵蓋的體積內，此復合區經常被稱為主動區。因電子電洞對復合而產生光輻射的現象，是由於少數載子的注入所產生，此行為被稱為電激螢光(injection electroluminescence)。此外，由於電子和電洞復合的統計本質，所發射出的光子為隨意方向即為自發輻射(spontaneous emission)。

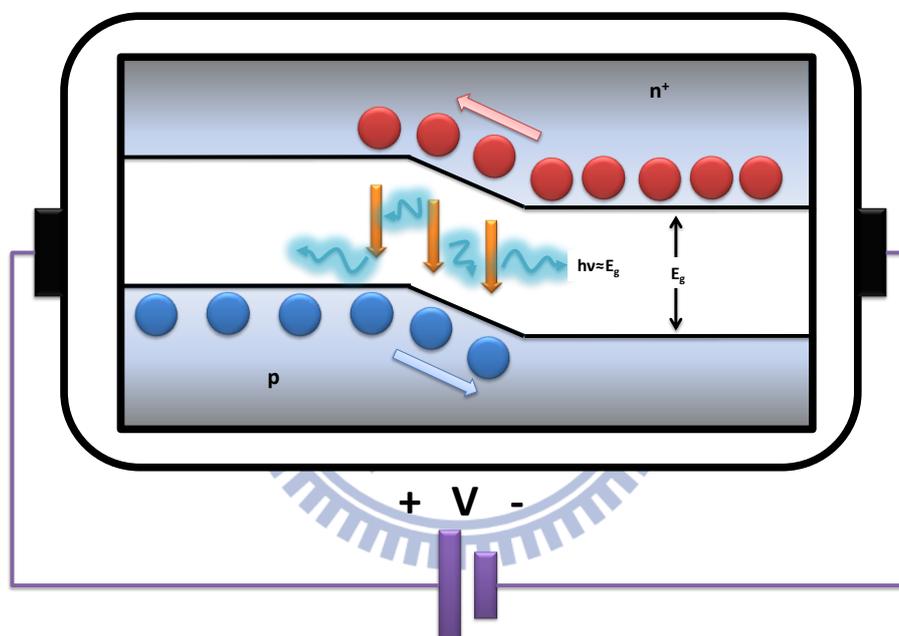


圖 2.1.2 外加順向偏壓下 LED 的  $pn^+$  接面在無外加偏壓下之能帶示意圖

LED 必須將交流電經由整流變壓器與控制電路等電子電路轉換為穩定的直流電才能使用，DCLED 電源轉換系統如圖 2.1.3 所示，從原始交流電經過變壓器降壓，二極體整流器將半波轉換為全波，電容濾波成為鏈波，最後電壓穩壓器的穩定電壓才加載在 DCLED 上。

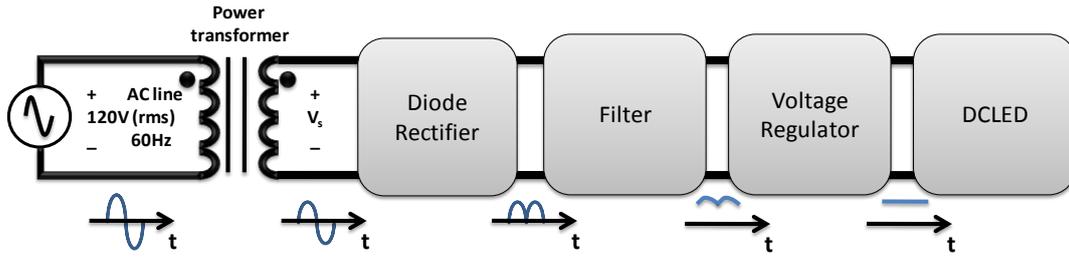


圖 2.1.3 DCLED 電源轉換系統示意圖

## 2.2 ACLED 原理與種類

ACLED 的發光機制其實與 DCLED 一樣，但在電源轉換上就沒有 DCLED 那麼複雜，交流源輸入可直接加載於 ACLED，如圖 2.2.1 所示。

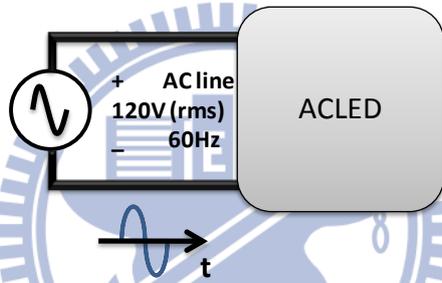


圖 2.2.1 ACLED 電源轉換系統示意圖

DCLED 操作於直流下時操作點固定不變，電壓與電流為一固定的常數值，如圖 2.2.2 所示。

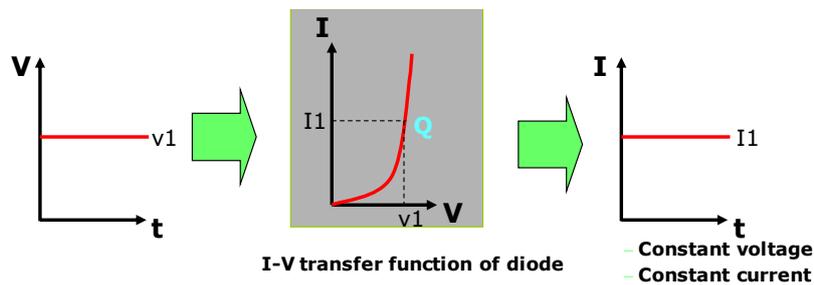


圖 2.2.2 DCLED 操作於直流下的特性

但 ACLED 操作於交流下，輸入電壓為正弦波電壓，由圖 2.2.3 中的 LED I-V 曲線中對應到操作點會隨著輸入電壓在  $V_1$  切入電壓與  $V_2$  峰值電壓中來回

的移動，因此電流是為非正弦波電流。

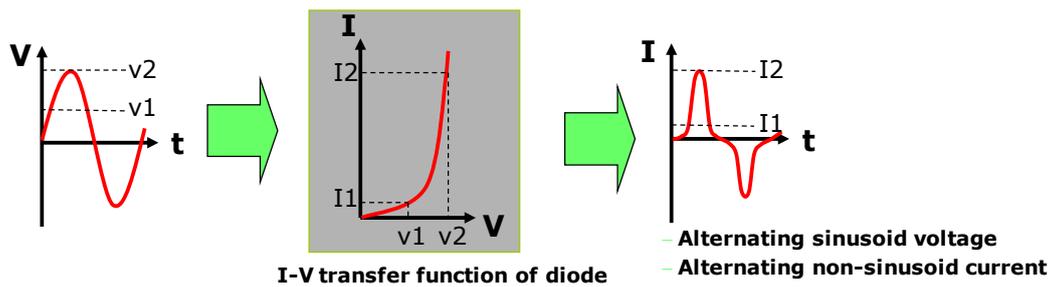


圖 2.2.3 ACLED 操作於交流下的特性

最一開始的 ACLED 是由兩串微晶粒 LED 反向並聯連接而成的 ACLED，被稱為串並型 ACLED (Anti-parallel, AP-ACLED) [13,17]，在一半週期下只能導通一半的微晶粒 LED，與 DCLED 接近 100% 的晶片面積利用率 (chip area utilization ration) 比較 AP-ACLED 只有 50% 的晶片面積利用率，因此 AP-ACLED 的光輸出功率較低於 DCLED。後來延申設計出另一種 ACLED 設計形式，台灣工業技術研究院 (ITRI) 利用將微晶粒 LED 佈局成惠斯頓電橋 (Wheatstone Bridge) 微電路架構，成功的將晶片面積利用率提升到 66% 以上。

### 2.2.1 串並型 ACLED (Anti-parallel ACLED, AP-ACLED)

圖 2.2.1 (a) 為 AP-ACLED 微電路示意圖而 (b) 為實體元件圖，串並型 ACLED 是由韓國首爾半導體最先開發出來的 ACLED，其優點具有較高的逆向電壓承受度穩定性佳，但在晶片面積利用率上不佳只有 50% 的利用率，而造成了光輸出功率無法有效提升。

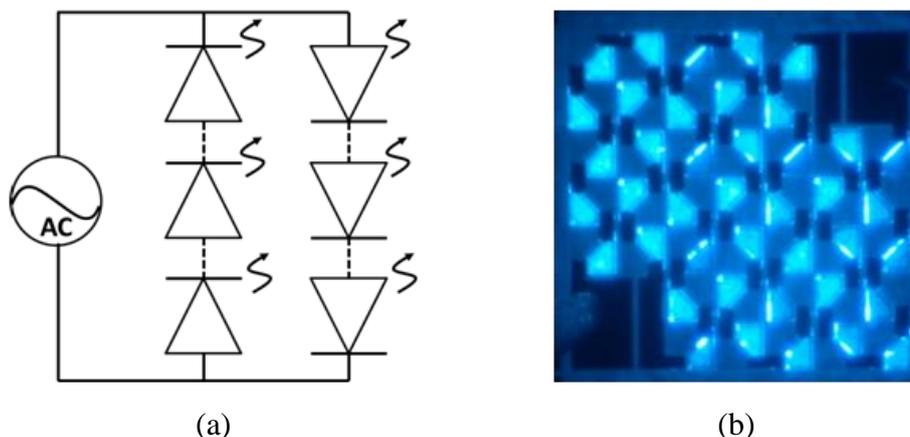


圖 2.2.1 (a)AP-ACLED 微電路示意圖與(b)實體元件圖

## 2.2.2 橋式型 ACLED(Wheatstone bridge ACLED, WB-ACLED)

為了增加 ACLED 的晶片面積利用率 WB-ACLED 因而誕生，WB-ACLED 的微電路架構如圖 2.2.2(a)所示，WB-ACLED 共由 5 條支路互相連接而成，其中旁邊 4 條為半波整流用由微晶粒 LED 串接而成，中間一條為全波整流用由微晶粒 LED 串接而成，在正半週下將正向導通 2 串半波整流微晶粒 LED 串與中間全波整流微晶粒 LED 串，負半週下將逆向導通另兩串半波整流微晶粒 LED 串與同一串中間全波整流微晶粒 LED 串，如此為一個完整週期的循環。經由這樣的設計 WB-ACLED 的面積利用率將高於 AP-ACLED，而當晶片面積利用率獲得改善後，隨之光輸出功率也將有所提高，雖然與 DCLED 相比還是有一段差距，但在適當的微晶粒 LED 顆數與面積比值設計下此差距將有機會被縮短。

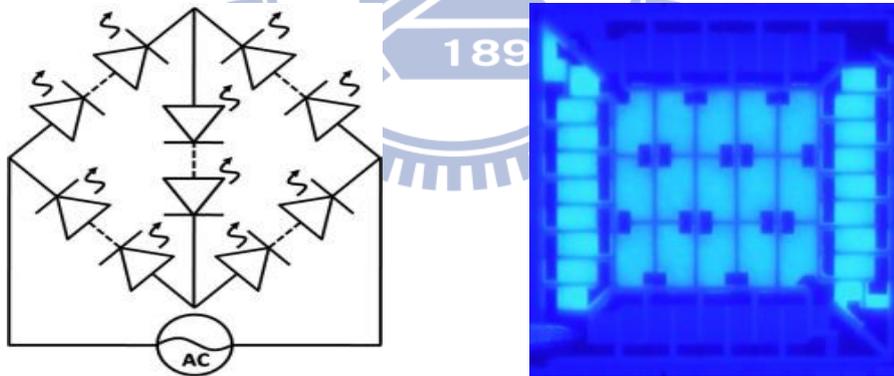


圖 2.2.2 (a)WB-ACLED 微電路示意圖與(b)實體元件圖

## 2.3 WB-ACLED 參數定義

這一小節要為接下來的模擬與實驗先行定義會用到的參數：

Ⓒ 有效功率 (Real Power,  $P_{\text{real}}$ )：

交流電的瞬時功率並不是一個常數固定不變的值，因此必對一

個週期內的瞬時電壓與瞬時電流的乘積做積分，以求得有效功率，  
數學式如 2.3.1 式所示。

$$P_{\text{real}} = \int_0^T \frac{V(t)I(t)dt}{T} \quad (2.3.1 \text{ 式})$$

ⓐ 視在功率 (Apparent power,  $P_{\text{apparent}}$ ) :

有效值電壓與有效值電流之乘積即為視在功率，包含了有效功  
率與虛功率，數學式如 2.3.2 式所示。

$$S = P_{\text{apparent}} = V_{\text{rms}} \times I_{\text{rms}} \quad (2.3.2 \text{ 式})$$

ⓐ 功率因數 (Power factor, PF) :

$$PF = \frac{P_{\text{real}}}{P_{\text{apparent}}} = \cos\phi \quad (2.3.3 \text{ 式})$$

ⓐ 半波整流微晶粒 LED 顆數 :

定義 WB-ACLED 於 4 條支路中微晶粒 LED 單串之數目，以便  
後續模擬定義。

$$\text{Side LED Number} = \text{SLN} \quad (2.3.4 \text{ 式})$$

ⓐ 全波整流微晶粒 LED 顆數 :

定義 WB-ACLED 於中間支路中微晶粒 LED 單串之數目，以便  
後續模擬定義。

$$\text{Center LED Number} = \text{CLN} \quad (2.3.5 \text{ 式})$$

## 第三章

# SPICE 模擬 WB-ACLED 電路效率最佳化分析

### 3.1 SPICE 模擬軟體介紹

Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis (SPICE) 是大家所公認的一套強大類比電路模擬軟體，它被使用來驗證電路設計的正确性與預測電路的功能，是套實用性很高的集成電路模擬軟體。SPICE 軟體最初是由美國加州大學(University of California)與柏克萊大學(University of Berkeley)電子研究實驗室的於 1975 所開發。

SPICE 可用來做很多種型式的電路分析，以下列舉出較重要的幾項：

- 直流非線性分析(Non-linear DC analysis)：計算直流的轉換曲線
- 暫態非線性分析(Non-linear transient analysis)：在大訊號下，可計算時變函數的電壓與電流
- 交流線性分析(Linear AC Analysis)：計算頻率函數的輸出
- 雜訊分析(Noise analysis)
- 靈敏度分析(Sensitivity analysis)
- 失真分析(Distortion analysis)
- 富立葉分析(Fourier analysis)：計算並畫出頻譜圖

在 SPICE 電路裡可包含以下的元件：

- 獨立與相依電壓電流源
- 電阻
- 電容
- 電導

- 共生電感
- 傳輸線
- OPA 放大器
- 切換器
- 二極體
- BJT 電晶體
- MOS 電晶體
- JFET
- MESFET

### 3.1.1 SPICE 二極體模型

SPICE 內建二極體模型的參數如表格 3.1.1 所示[20-21]。這些參數可被分類為四種模型，並代表著各模型方程式的變數，以作為模擬許多種情況下二極體之特性。這四種模型分別為直流大訊號模型(large-signal dc model)、交流小訊號模型(small-signal ac model)、溫度與面積影響、雜訊模型。

Name	Parameter	Units
<b>I<sub>s</sub></b>	Reverse saturation current	A
<b>RS</b>	Series resistance	Ohm
<b>N</b>	Ideal factor	
<b>TT</b>	Forward transit time	Sec
<b>CJO</b>	Zero-bias junction capacitance	F
<b>VJ</b>	Contact potential	V
<b>M</b>	Junction capacitance grading exponent	

<b>EG</b>	Energy gap	eV
<b>XTI</b>	IS temperature exponent	
<b>KF</b>	Flicker noise coefficient	
<b>AF</b>	Flicker noise exponent	
<b>FC</b>	CJ forward-bias coefficient	
<b>BV</b>	Reverse breakdown voltage	V
<b>IBV</b>	Current at BV	A

表 3.1.1 SPICE 二極體內建參數

### 直流大訊號模型：

SPICE 二極體裡大訊號的行為是指直流電流與電壓到接地端之間的關係。這個模型裡使用到的參數有 IS, RS, N, BV, and IBV。IS 代表在理想二極體情況下的逆向飽合電流  $I_s$  (reverse saturation current)。RS 是指串聯電阻  $R_s$  (series resistance) 是金屬接觸與空乏區在高電流注入下的電阻。N 是指理想因子 (ideal factor) 為修正電流對電壓 (I-V) 特性曲線下的斜率。最後的 BV 與 IBV 參數是表現二極體在崩潰下的行為。

圖 3.1.1 表示 SPICE 二極體在直流大訊號下的等效模型。這個等效電路包含了內建二極體  $D_1$ ，串聯電阻  $R_s$ ，並聯電阻  $R_p$ 。SPICE 增加這個電阻是為了讓使用者更清楚 PN 接面附近的整合更接近於實際二極體大直流大訊號下的操作特性。

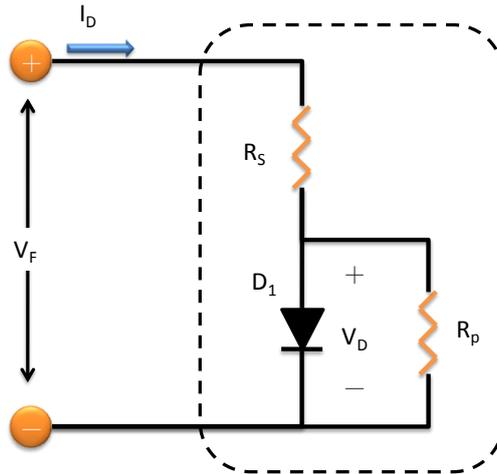


圖 3.1.1 直流大訊號 SPICE 二極體模型

在直流下的變數是由跨在二極體兩端的  $V_F$  電壓、內建二極體  $V_D$  和流跨過二極體兩端的  $I_D$  電流所組合而成。在直流大訊號可用這些參數與變數表達出下列的方程式

$$V_F = R_S \times I_D + V_D$$

和

$$I_D = f(V_D)$$

我們可以將二極體的工作情形分為四個工作區域來描述函數式與建內二極體電壓與電流之間的關係

(a) For  $V_D \geq -5 \times N \times V_t$

$$I_D = IS \times \left( e^{\frac{V_D}{N \times V_t}} - 1 \right) + \frac{V_D}{R_p}$$

(b) For  $-BV \geq V_D - 5 \times N \times V_t$

$$I_D = -IS + \frac{V_D}{R_p}$$

(c) For  $V_D = -BV$

$$I_D = -BV$$

(d) For  $V_D < -BV$

$$I_D = -IS \times \left( e^{\frac{-(BV+VD)}{V_t}} - 1 + \frac{BV}{V_t} \right)$$

在以上所有方式裡的  $V_t$  是代表熱電壓(Thermal voltage)，被定義為

$$V_t = \frac{k \times T}{q}$$

為了確保在工作區(c)與(d)皆能收斂，我們定義  $IBV$  為

$$IBV \geq \frac{IS \times BV}{V_t}$$

利用這些方程式並對  $I_D$  對  $V_D$  做圖我們可得到如圖 3.1.2，圖中指明工作區(a) 到(d)的區域範圍。

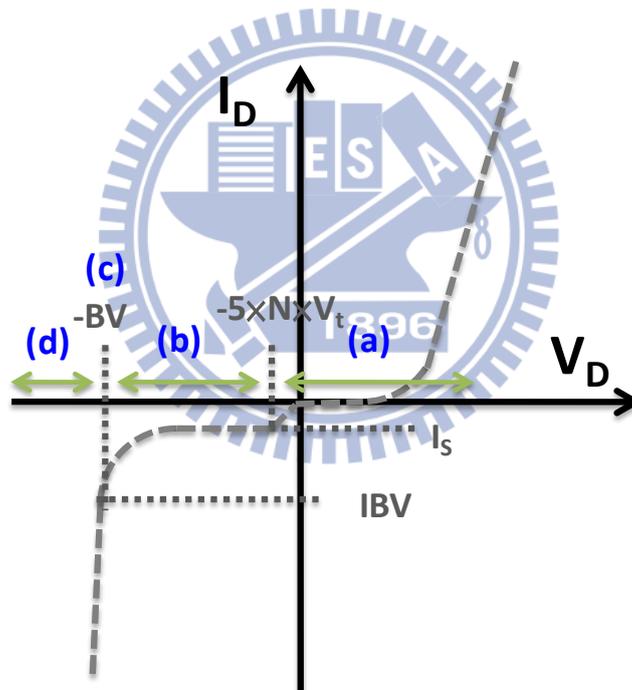


圖 3.1.2 SPICE 二極體模型 I-V 特性曲線

### 交流小訊號模型：

SPICE 二極體的交流模型是從內建二極體  $D_1$  的線性小訊號行為推導而來如圖 3.1.1 所示。此模型的電路元件包含了接面電容(junction

capacitance)  $C_J$ 、動態電導  $G_D$  和擴散電容  $C_D$ ；這些參數是由理想二極體的模型所延伸出來，是為了讓二極體更能接近實際應用情況下的特性表現。

接面電容(junction capacitance)可由  $C_{J0}$ 、 $V_J$ 、 $M$  和  $FC$  這些參數運算所得。當偏壓為零時  $V_{J0}$  與  $V_J$  是一樣的，所以我們可以用  $C_j(0)$  與  $V_j$  去描述理想二極體。參數  $M$  是漸近指數(grading exponent)可被使用來改變接面電容對電壓( $C$ - $V$ )特性曲線的斜率。對陡峭或階梯型的接面來說  $M$  值為 0.5，若是線性漸近型的接面  $M$  值為 0.333。參數  $FC$  被使用來塑造電容在順向偏壓條件下時的情形。

完整的 SPICE 二極體交流小訊號模型如圖 3.1.3 所示。圖中  $R_s$  與  $R_p$  與前述的定義相同。

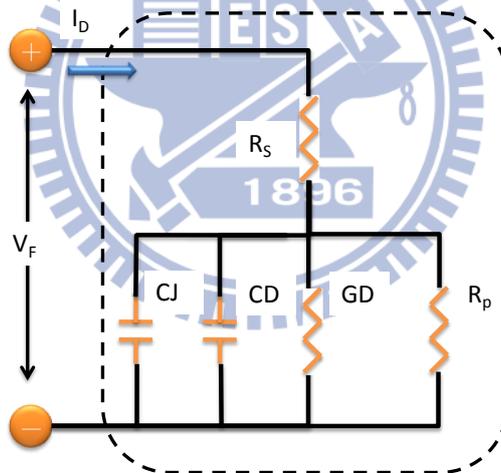


圖 3.1.3 SPICE 二極體的 交流小訊號型模

### 溫度與面積影響：

SPICE 二極體的溫度行為可透過一些與溫度有關的參數來達到。這些參數分別為  $I_S$ 、 $V_J$ 、 $C_{J0}$  與  $FC$ 。我們定義  $T_{NOM}$  為參考溫度  $27^\circ\text{C}$ ，當然這個值只是預設值，可在 `.options` 這行程式裡做更改。如果 `.temp` 這行程式被刪除則，變數  $T$  解析溫度(analysis temperature,  $^\circ\text{C}$ )預設值為  $27^\circ\text{C}$ ，

當然若是不刪除可從這行程式碼來做更改值的動作。

對一個理想的二極體來說，接面面積(junction area)是一個很重要的參數。SPICE 提供一個與面積相關的參數面積因子(AREA factor)，這個參數可從電路檔案的程式語言做更改。面積因子所影響的參數有 IS、RS、CJO 和 IBV，相關數學式如下所示：

$$I_S = \text{AREA} \times I_{S_0}$$

$$R_S = \frac{R_{S_0}}{\text{AREA}}$$

$$\text{CJO} = \text{AREA} \times \text{CJO}_0$$

$$\text{IBV} = \text{AREA} \times \text{IBV}_0$$

而面積因子最初的預設值為 1。我們將會透過更改這個數值來控制我們不同面積的 micro-LED 所影響的模擬參數值。

### 雜訊模型：

SPICE 二極體裡的小訊號雜訊可由兩個雜訊電流來表示，如圖 3.1.4 所示的交流小訊號電路模型。電流源  $i_{RS}$  是代表串聯電阻  $R_S$  熱雜訊(thermal noise)的產生。下列數學式的均方根是為熱雜訊電流值：

$$\overline{i_{RS}^2} = \frac{4 \times k \times T}{R_S} \times \Delta f$$

$T$  是溫度、 $\Delta f$  是雜訊的頻寬單位為 Hz。電流源  $i_D$  代表在二極體空乏區裡瞬間雜訊與閃爍雜訊(1/f noise)的產生。下列數學式全部相乘並加起來的均方根值即為  $i_D$  電流源：

$$\overline{i_D^2} = 2 \times q \times I_D \times \Delta f + K_F \times \frac{I_D^{AF}}{f} \times \Delta f$$

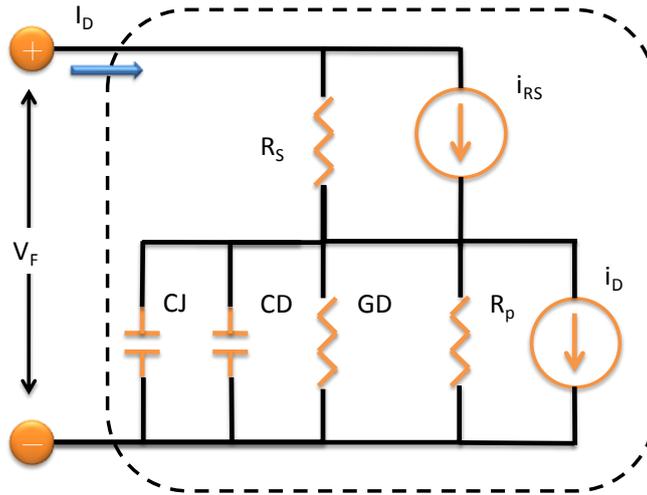


圖 3.2.4 SPIC 二極體包含雜訊源的交流小訊號模型

### 3.2 建立 LED 模型

為了建立完整且接近實際工作情形的 WB-ACLED 模型，我們必須先建立微晶粒 LED(micro-LED)在直流工作下的模型，再由微晶粒 LED 在交流下的工作情形去模擬出 WB-ACLED 在交流工作下的特性。

先設計出 20 種不同面積的微晶粒 LED，如表 3.2.1 所示。

LED Size			
25um×25um	50um×50um	75um×75um	100um×100um
125um×125um	150um×150um	175um×175um	200um×200um
225um×225um	250um×250um	275um×275um	300um×300um
325um×325um	350um×350um	375um×375um	425um×425um
450um×450um	475um×475um	500um×500um	

表 3.2.1 為 20 種不同面積的微晶粒 LED

光罩設計如圖 3.2.1 左圖所示，為了讓電流分佈能較均勻，在距離大於 200um 時會在 P 電極端加上寬 5um 的金屬線(Finger)來避免電流有擁擠的現象，圖 3.2.1 右圖為 450um×450um 的實體微晶粒 LED 顯微鏡圖。

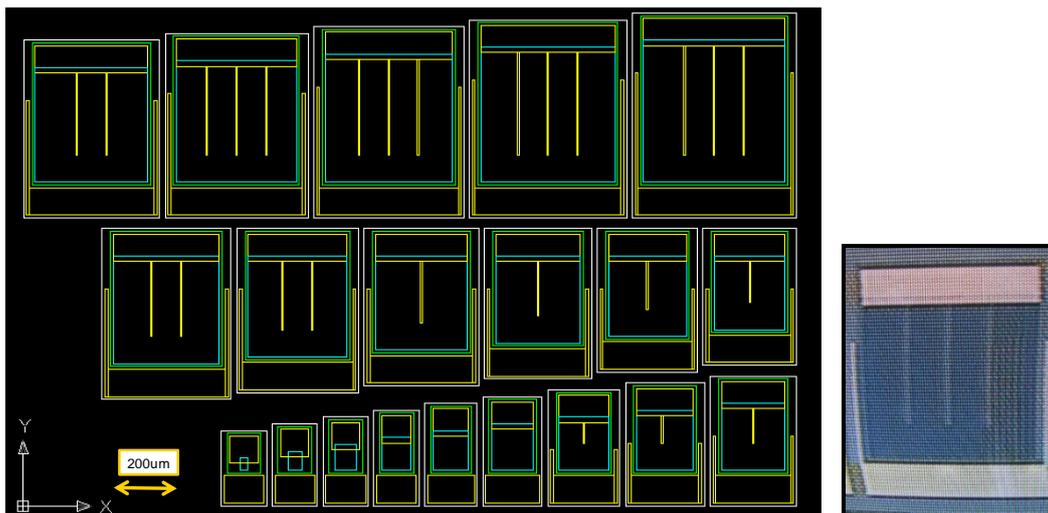


圖 3.2.1 為 20 種不同面積的微晶粒 LED 光罩圖與 450umx450um 微晶粒 LED 的 OM 圖

接下來我們使用 Keithley 2400 Source meter 當作電流源，Agilent 4156B Parameter Analyzer 來量測電流與電壓值，量測系統架構如圖 3.2.2 所示，圖中只秀出 15 種微晶粒 LED 的 I-V 曲線是因為最前 3 組面積太小而最後 2 組面積太大，不符合 WB-ACLED 接下來的設計條件故屏除。

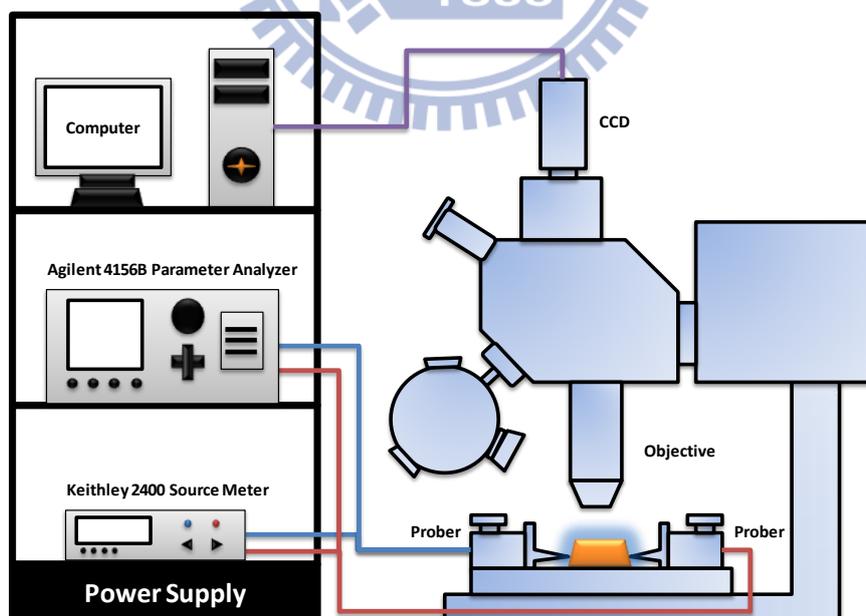


圖 3.2.2 微晶粒 LED 電流-電壓量測系統架構

圖 3.3.3 即為不同面積之微晶粒 LED 的 I-V 量測圖，從圖中我們可發現

隨著微晶粒 LED 面積變大 IV 曲線會愈陡峭的趨勢，是因為當 LED 面積愈大則在相同電流的注入下電流密度則愈低，串聯電阻會較小。

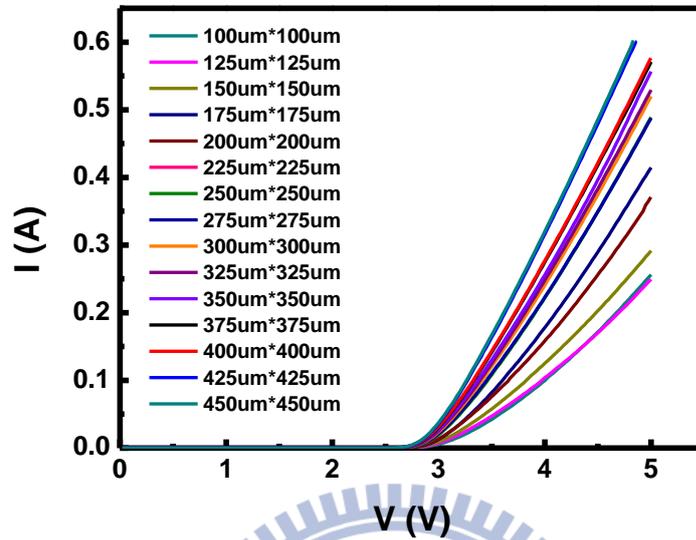


圖 3.2.3 微晶粒 LED 之 I-V 特性曲線

因為需粹取出 SPICE 模擬需要的參數  $R_s$ 、 $N$  與  $I_s$ ，我使用的方法需要畫出順向時的 I-V 特性曲線，且 Y 軸的電流值必需取對數(Logarithmically)來當刻度，如圖 3.3.4 所示在圖中曲線上選出  $V_{F1}$ 、 $V_{F2}$  和  $V_{F3}$ ，將這三個值帶入 3.3.1、3.3.2 和 3.3.3 式：

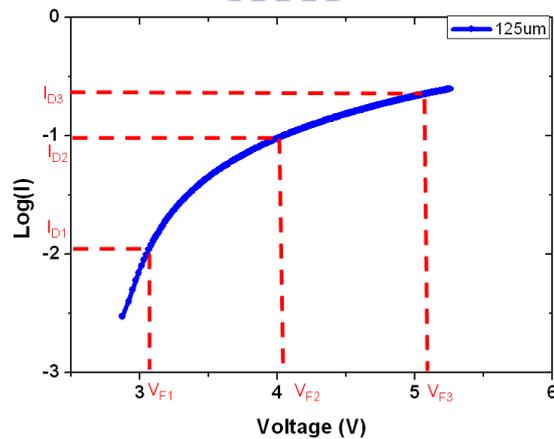


圖 3.2.4 125um×125um 微晶粒 LED 之 LogI-V 特性曲線

$$R_s = \frac{(V_{F2} - V_{F1}) + (V_{F1} - V_{F3}) \cdot \left\{ \frac{\ln(\frac{I_{D1}}{I_{D2}})}{\ln(\frac{I_{D1}}{I_{D3}})} \right\}}{(I_{D2} - I_{D1}) + (I_{D1} - I_{D3}) \cdot \left\{ \frac{\ln(\frac{I_{D1}}{I_{D2}})}{\ln(\frac{I_{D1}}{I_{D3}})} \right\}} \quad (3.2.1 \text{ 式})$$

$$N = \frac{(V_{F1} - V_{F2}) + R_s \cdot (I_{D2} - I_{D1})}{V_T \cdot \ln(\frac{I_{D1}}{I_{D2}})} \quad (3.2.2 \text{ 式})$$

$$I_s = \frac{I_{D1}}{\exp(\frac{V_{F1} - R_s \cdot I_{D1}}{N \cdot V_T})} \quad (3.2.3 \text{ 式})$$

即可獲得此面積之微晶粒 LED 的  $R_s$ 、 $N$  和  $I_s$  參數值。如  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$  微晶粒 LED 的  $R_s$  為  $7.749\Omega$ 、 $N$  為 4.5 和  $I_s$  為 25pA。其中表 3.2.2 中表示出不同微晶粒 LED 面積之  $N$  值範圍約為 3~5 之間[22-27]。將這些參數帶入 SPICE 二極體模型裡，於 SPICE 裡模擬微晶粒 LED 之電路模型如圖 3.2.5 左所示，外加一直流電壓源並串接一微晶粒 LED，而圖 3.2.5 右圖為將 SPICE 模擬結果與量測結果互相比較，右圖中有  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ (紅線與黑線)與  $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ (藍線與綠線)兩種微晶粒 LED 數據，實心黑線與藍線為模擬結果，空心紅線與綠線為量測結果，我們可知道模擬與量測結果為互相吻合，此模型即為微晶粒 LED 模型。

	微晶粒LED面積種類				
微晶粒LED面積	50×50	100×100	150×150	200×200	250×250
N	4.9	4.5	4.3	4	3.8
	微晶粒LED面積種類				
微晶粒LED面積	300×300	350×350	400×400	450×450	
N	3.7	3.6	3.5	3.3	

表 3.2.2 為 9 種不同微晶粒 LED 面積之理想因子

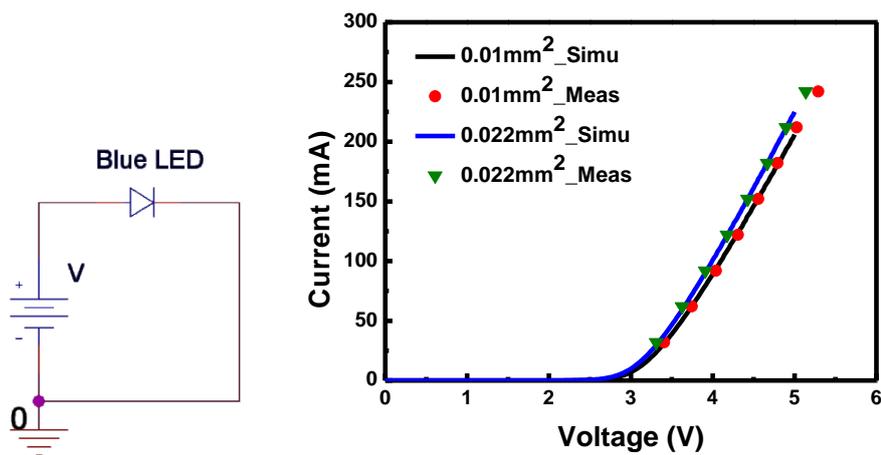


圖 3.2.5 SPICE 裡模擬微晶粒 LED 之電路模型與模擬結果

為了能模擬微晶粒 LED 在不同面積下的光輸出功率特性，我們利用電激發光使用光二極體感測器(Photodiode Sensor)來收集微晶粒 LED 正向出光的強度。量測示意如圖 3.2.2，電源供應器為 Kethley 238，再外加上一台 Power meter。量測結果如圖 3.2.6 微晶粒 LED L-I 特性曲線所示，隨著微晶粒 LED 愈來愈小，則電流密度愈來愈大發光效率愈低。

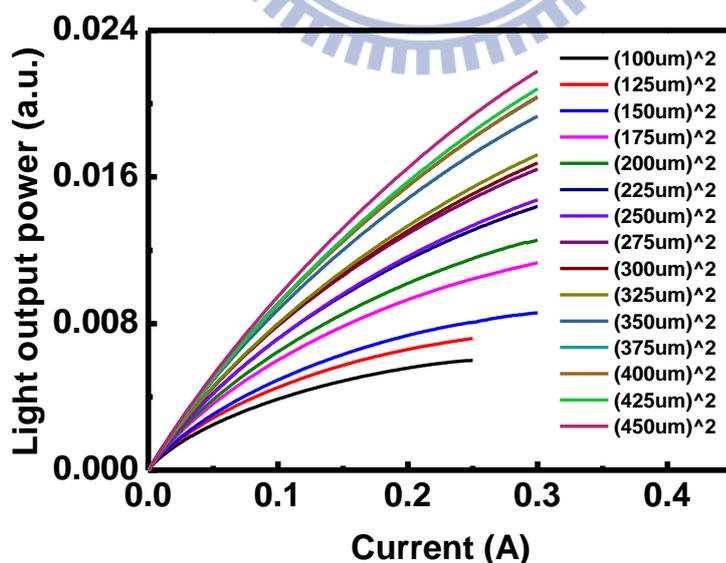


圖 3.2.6 微晶粒 LED 之 L-I 特性曲線

但光輸出功率對電流的曲線並不能完整的考慮到面積對微晶粒 LED 的

影響，必須將電流換算為電流密度，如此才能清楚知道單位面積與單位光輸出功率之間的關係。換算出的 L-J 曲線如圖 3.2.7 所示，我們將這些數據建成 WB-ACLED 的光輸出功率 (light output power) 的資料庫，以供後續 WB-ACLED 計算使用。

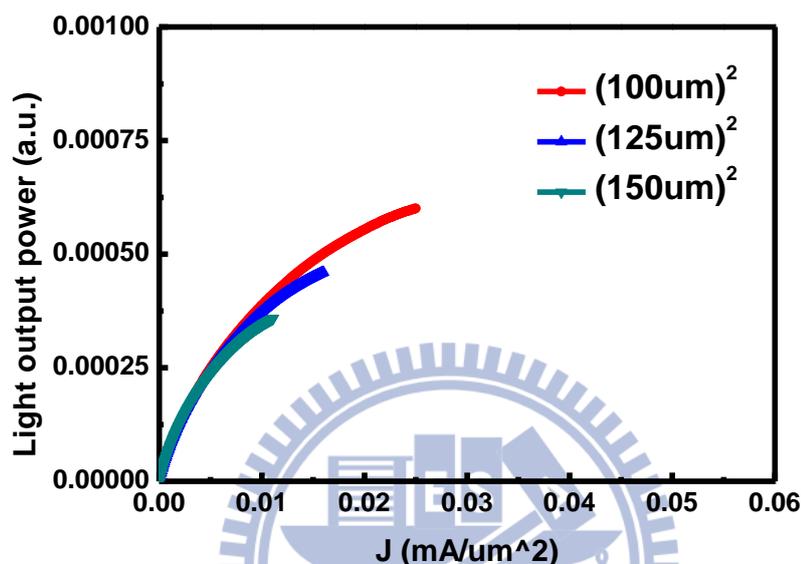


圖 3.2.7 微晶粒 LED 之 L-J 特性曲線

### 3.3 建立 WB-ACLED 電路模型

上一小節我們已完成微晶粒 LED 之建立，接下來將利用此微晶粒模型來組成一 WB-ACLED 電路模型。因 WB-ACLED 工作於用交流不需額外的 AC to DC 轉換器(Converter)，所以此電路模型將直接外加於交流訊號源上，並串接一額外的限流電阻(Current limiting resistor)，因交流源為一時變的電壓源，在沒有外加限流電阻的情形下 LED 電流差值將會非常大，結果會造成元件的損害與壽命減短，因此串接額外的限流電阻是有其必要性，不但能保護元件不受損害在優良的設計條件下還能提升元件的工作效率。

WB-ACLED 電路模型如圖 3.3.1 所示，由惠斯頓電橋的原理來看可將電路分解為半波整流電路與全波整流電路兩部分來看，其中半波整流電路中的

微晶粒 LED 為 D1 到 D40，全波整流電路中的微晶粒 LED 為 D41 到 D55，R5 為額外串接的限流電阻，而圖中左邊為整個電路模型之 60Hz 110V 交流源。

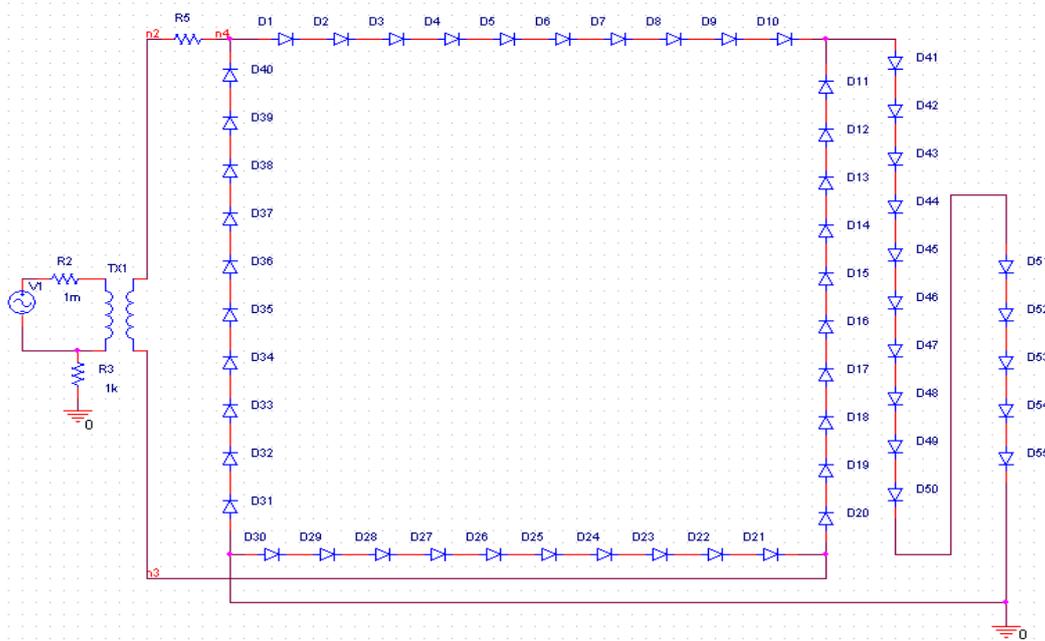


圖 3.3.1 SPICE 裡 WB-ACLED 電路模型

執行結果如圖 3.3.2 所示，Current 指瞬時電流值， $V_{in}$  指輸入的瞬時電壓值， $V_{chip}$  指跨壓在 WB-ACLED 兩端之瞬時電壓值，由圖中可知道 WB-ACLED 在輸入電壓約為 105V 才導通，是因為這個 WB-ACLED 是設計為整顆晶片總共有 55 顆微晶粒 LED，導向導通為 35 顆微晶粒 LED，單顆微晶粒導通電壓約為 3V，電流最大值約為 20mA，有效值電流約為 10mA，一個週期下導通時間約為 63%，瞬間電流脈衝時間約為 5msec。

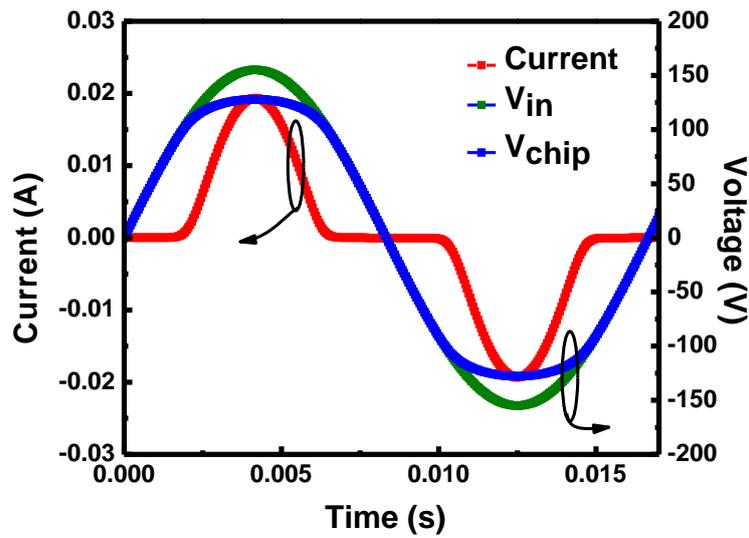


圖 3.3.2 SPICE 模擬 WB-ACLED 之時變 I-V 特性曲線

以上是建立 WB-ACLED 電性的模型，接下來我們還要建立 WB-ACLED 光性的模型，首先必須先定義計算光輸出功率的算式，如下所示：

$$L(t) = N_C \times \left( \frac{I_D(t)}{A_C} \right) \times A_C \times \eta_C + 2N_S \times \left( \frac{I_D(t)}{A_S} \right) \times A_S \times \eta_S \quad (3.3.1 \text{ 式})$$

其中式子的參數如下，

- ⊙  $I_D$ ：WB-ACLED 導通時的輸入電流
- ⊙  $A_C$ ：全波整流微晶粒 LED 面積
- ⊙  $N_C$ ：全波整流微晶粒 LED 顆數
- ⊙  $\eta_C$ ：全波整流微晶粒 LED 光輸出效率
- ⊙  $A_S$ ：半波整流微晶粒 LED 面積
- ⊙  $N_S$ ：半波整流微晶粒 LED 顆數
- ⊙  $\eta_S$ ：半波整流微晶粒 LED 光輸出效率

光輸出功率主要是由圖 3.2.6 換算為圖 3.2.7 所得，但 WB-ACLED 是工作於交流下，電流會在週期內隨著時間而重覆改變，所以我們還得將光輸出功率帶入一時變函數內，如下式所示

$$L = \int_0^T \frac{L(t)}{T} dt \quad (3.3.2 \text{ 式})$$

經由 3.3.2 式對一固定週期內的光輸出功率積分後除與週期時間，即為該 WB-ACLED 晶片之光輸出功率。如此我們的 WB-ACLED 的電性與光性模型建立完成，之後改變的參數將由這些算式於 Matlab 計算所得後並寫入 SPICE 模擬軟體裡跑完電性再與光性資料再連結並比對計算後即為模擬結果。

### 3.4 最佳化 WB-ACLED 設計方法

WB-ACLED 可分為半波整的微晶粒 LED 串與全波整流的微晶粒 LED 串，在固定 WB-ACLED 之晶片總面積前提下，可知道有兩樣設計因素將會影響到 WB-ACLED 晶片的工作效率，第一個因素為不同數目的半波整流之微晶粒 LED 與全波整流之微晶粒 LED，第二個因素為不同半波整流之微晶粒 LED 與全波整流之微晶粒 LED 的面積比例設計，以上兩樣因素改變皆會影響到 WB-ACLED 的操作功率與單一週期導通下發光面積佔全部面積的多寡。

此小節將介紹如何利用前述兩樣因素來找出 WB-ACLED 在什麼樣的條件下設計才是最佳化的結果。

#### 3.4.1 WB-ACLED 顆數比分析

WB-ACLED 在設計於交流電 110V 下工作時，必須考慮到導通時每顆微晶粒 LED 之平均跨壓必需操作於正常電壓範圍，至少要 3.2V LED 才算導通，順向總偏壓最大為 155V 瞬間電壓值，故順向導通之微晶粒 LED 總導通電壓不能設計超過此電壓值，否則 WB-ACLED 將無法導通；而逆向偏壓不能超過其半波整流微晶粒 LED 串的總崩潰電壓值，經由量測單顆 LED 操作於逆向偏壓其崩潰電壓值約為 40V，故從 WB-ACLED 電路結構上來看半波整流微晶粒 LED 一串(如圖 3.4.1 之 A 點至 B 點支路)至少要大於 4 顆的微晶粒 LED 使能確保 WB-ACLED 不至於崩潰。由圖 3.4.1 WB-ACLED 之微晶粒 LED 顆數設計示意圖所示，半波整流微晶粒 LED

串數目設計為 4~10 顆，而全波整流微晶粒 LED 串顆數設計為 1~27 顆，WB-ACLED 全部顆數為 17 至 67 顆。

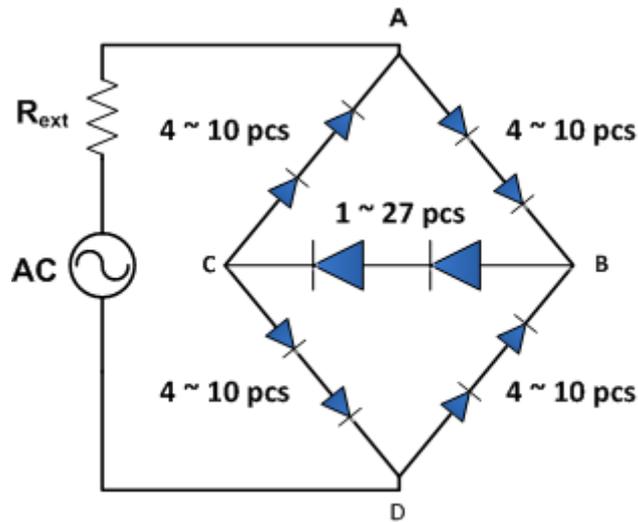


圖 3.4.1 WB-ACLED 之微晶粒 LED 顆數設計示意圖

設定好顆數的下限值與上限值後，再來還要固定 WB-ACLED 晶片總面積與輸入功率這兩項因素，因為在固定晶片總面積與輸入功率下我們去比較光輸出功率與晶片電效率才會有意義，否則在不固定的總面積下會影響到串聯電阻進而變動到輸入功率，輸入功率的變動對光輸出功率是影響很顯著的。我們模擬時固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$  與  $0.55\text{mm}^2$  這兩種，輸入功率定為 1W 與 2W 兩種。

為了達到整個 WB-ACLED 模組的輸入功率能達到一定值，必須透過額外的限流電阻來限制輸入功率。圖 3.4.2 為我們自己寫的 Matlab 程式，主要是透過 Matlab 來固定電路條件與計算微晶粒 LED 模型的參數並寫入 SPICE 電路檔裡。圖中 Side LED[4:1:10] 表示半波整流微晶粒 LED 從最初 4 顆遞增 1 顆一直到 10 顆為止，Center LED[1:1:27] 表示全波整流微晶粒 LED 從最初 1 顆遞增 1 顆一直到 27 顆為止。Root-Mean-Square  $I_{\text{rms}}$  指輸入有效值電流固定於 10mA 表示將會固定輸入功率為 1W。Ratio of area 代表全波整流微晶粒 LED 面積除與半波整微晶粒 LED 面積的比值。

WB-ACLED Chip Area 代表 WB-ACLED 晶片總面積的固定值，如圖中我們固定為  $1.24\text{mm}^2$ 。以上述條件為例來做設定，跑完模擬後共會獲得 189 顆在固定面積比值(ratio of area, r)、晶片面積與輸入功率下不同晶片顆數的 WB-ACLED 晶片。

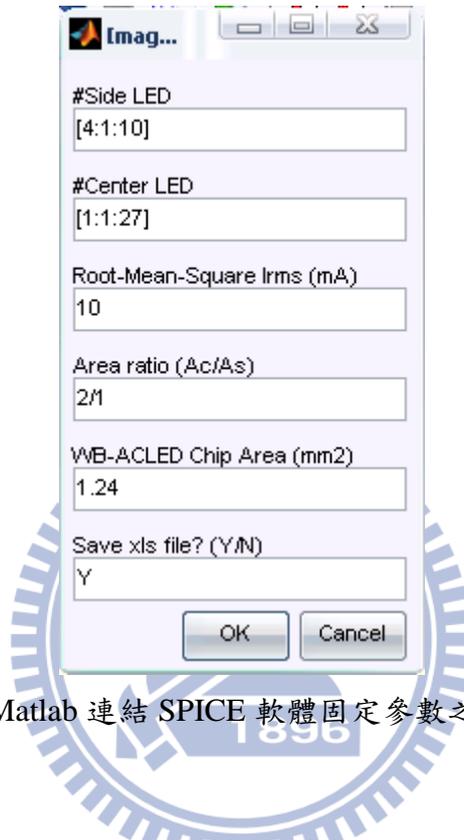


圖 3.4.2 Matlab 連結 SPICE 軟體固定參數之設定介面

接下來進入 WB-ACLED 模擬結果分析部分，我們設定半波整流微晶粒 LED 顆數為 4 到 10 顆，全波整流微晶粒 LED 顆數為 1 到 27 顆，晶片總面積固定為  $1.24\text{mm}^2$ 、面積比值為 1。

### ⊙ 當輸入功率為 1W 時：

由圖 3.4.3 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數總串聯電阻值中可知道隨著 WB-ACLED 之半波整流微晶粒 LED 顆數與全波整流微晶粒 LED 顆數的增加，則總串聯電阻  $R_s$  會愈來愈大(顏色由藍到紅表示為小到大)，由之前述第三章第一小節裡的關係式，我們知道當總晶片面積固定的前提下，隨著晶片微晶粒 LED 顆數的增加則每顆微晶粒 LED 之面積變小會造成串聯電阻

變高。

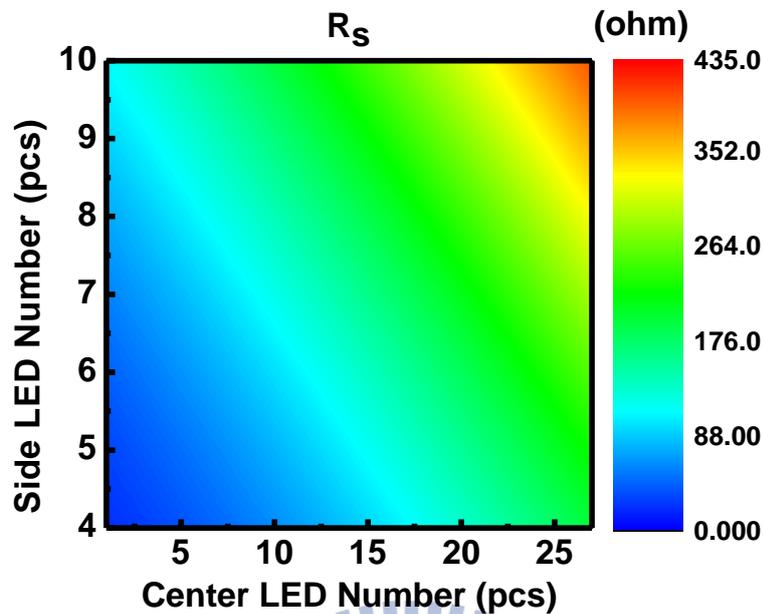


圖 3.4.3 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數總串聯電阻值

比較

整個 WB-ACLED 晶片模組定義裡包含了一顆額外的限流電阻，該限流電阻會與 WB-ACLED 晶片分配該 1W 的輸入功率，在模組之輸入功率 1W 中有多少功率座落於 WB-ACLED 晶片上即是我們所指的晶片效率 (Chip Efficiency)。計算方式為將 WB-ACLED 消耗功率除與輸入功率即得到晶片效率該比值。由圖 3.4.4 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數晶片效率三維分佈圖所示，隨著 WB-ACLED 之半波整流微晶粒 LED 顆數與全波整流微晶粒 LED 顆數的增加，則晶片效率會愈高，會有這樣的趨勢是因為從圖 3.4.3 中我們知道當微晶粒 LED 顆數愈多則串聯電阻值愈大，克希荷夫電壓定律 (Kirchhoff's voltage law) 定義在任一個閉合迴路中，電源的電動勢代數和等於各元件電壓降的代數和 [28]，而座落於 WB-ACLED 的電壓會隨著微晶粒 LED 顆數的增加而愈來愈高，因此 WB-ACLED 的消耗功

率必定愈高，進而促使晶片效率的提升。

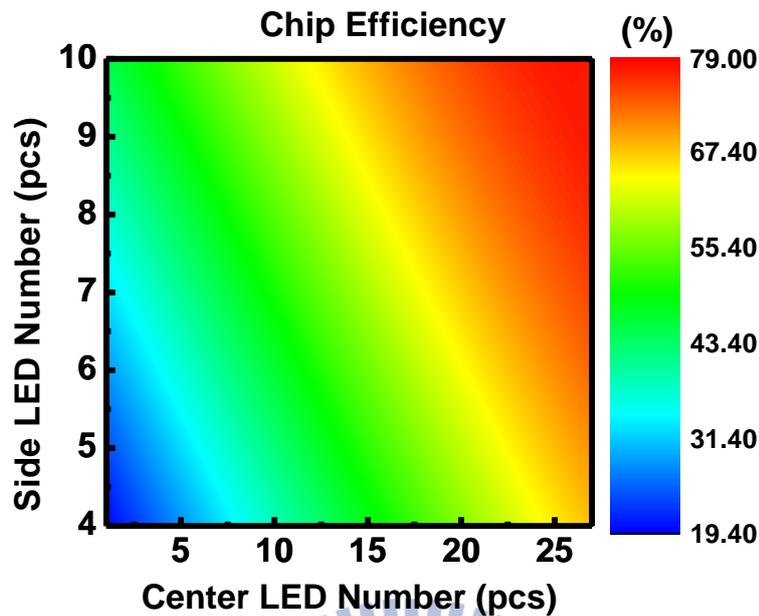


圖 3.4.4 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數晶片效率比較

由圖 3.4.5 的 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數光輸出功率比較中，我們可以知道隨著半波整流微晶粒 LED 與全波整流微晶粒 LED 的顆數增加則 WB-ACLED 的光輸出功率會愈高。在固定晶片總面積的條件下，當我們增加晶片的微晶粒 LED 時雖然單顆微晶粒 LED 的面積變少了，但是晶片整體在一半週下的發光面積卻是提升的，而其中又以增加全波整流微晶粒 LED 的顆數的提升效果較增加半波整流微晶粒 LED 的顆數來的明顯。

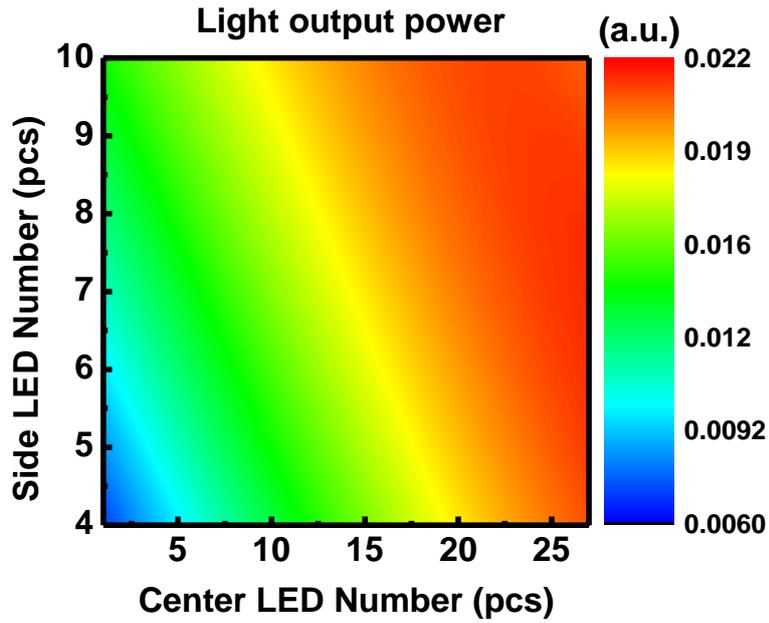


圖 3.4.5 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數光輸出功率比

較

ⓐ 當輸入功率為 2W 時：

接下來將輸入功率提到升到 2W，相當於將電流密度提升了 2 倍，在半波整流微晶粒 LED 與全波整流微晶粒 LED 的面積比值為 1 時則總 WB-ACLED 的總串聯電阻並不會改變，如圖 3.4.6 所示。

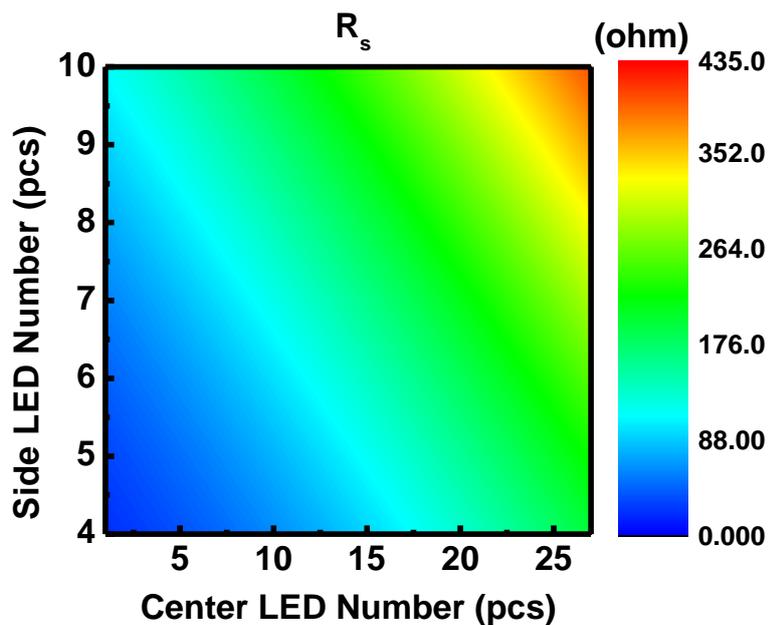


圖 3.4.6 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數總串聯電阻值

比較

當輸入功率變高時，電路必須遵守克希荷夫電壓定律，因此 WB-ACLED 晶片兩端的跨壓會較 1W 時來的更高，但趨勢會與輸入功率為 1W 時一致，如圖 3.4.7 所示，晶片效率會隨著半波整流微晶粒 LED 與全波整流微晶粒 LED 的顆數增加而提升。

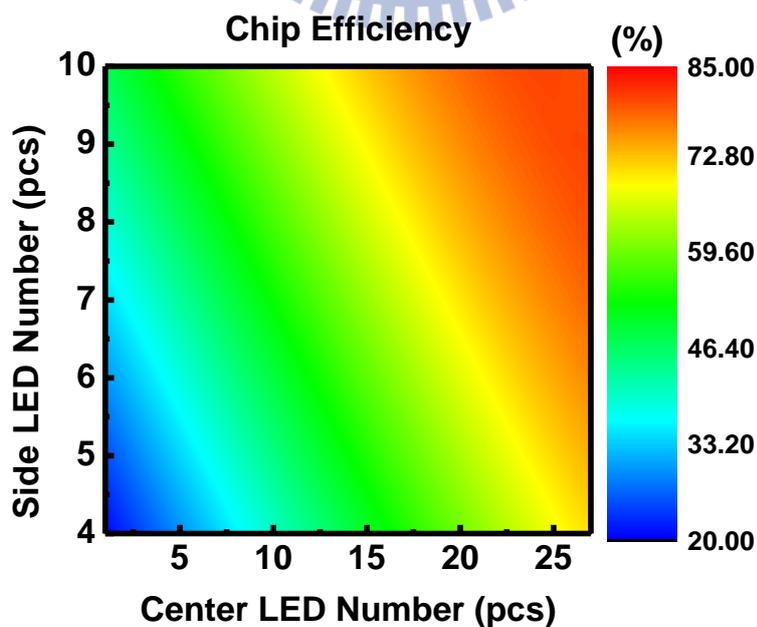


圖 3.4.7 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數晶片效率比較

當 WB-ACLED 晶片的輸入功率為 2W 時，與 1W 最大的不同在於光輸出功率的改變。第一點，當輸入功率為 1W 時光輸出功率的峰值出現在半波整流微晶粒 LED 顆數為 7 而全波整流微晶粒 LED 顆數為 27 (SLN : CLN = 7 : 27) 的座標；但輸入功率提升到 2W 時，光輸出功率的峰值出現於半波整流微晶粒 LED 顆數為 5 而全波整流微晶粒 LED 顆數為 27 (SLN : CLN = 5 : 27) 的座標。這個結果是由於輸入功率的提升間接造成微晶粒 LED 的電流密度升高，而當 LED 電流密度過高時多餘的載子無法有效轉換為光子，因此只能以熱的形式釋放能量造成 LED 的溫度升高，而當溫度愈高時則會增強非輻射復合 (non-radiative recombination) 的機率而降低輻射復合機率 (radiative recombination)。

輸入功率為 2W 時的光輸出功率平均較輸入功率為 1W 時提升了 60%。

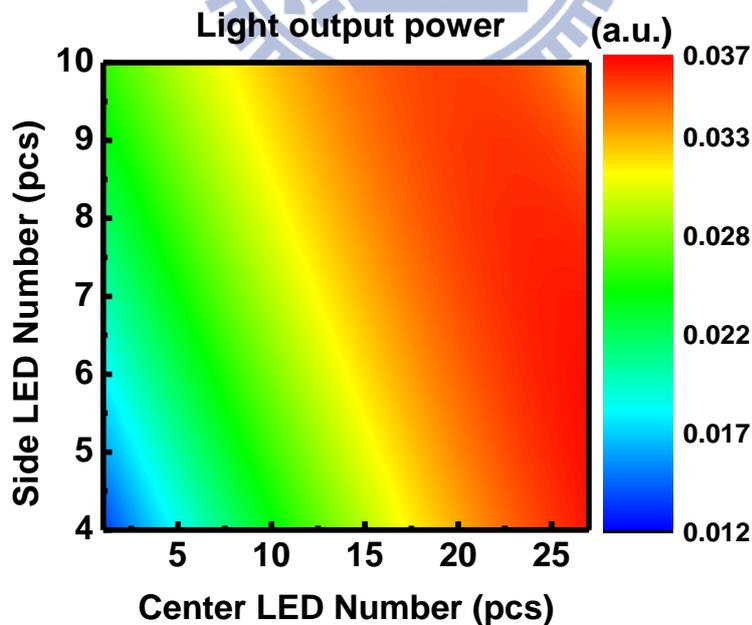


圖 3.4.8 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變微晶粒 LED 顆數光輸出功率比

較

### 3.4.2 WB-ACLED 面積比分析

上一小節介紹完了微晶粒 LED 顆數比定義與分析後，接下來我們要定義 WB-ACLED 面積比值(ratio of area, r)，由圖 3.4.9 中可知道  $A_S$  被定義為半波整流微晶粒 LED 的面積，而  $A_C$  被定義為全波整流微晶粒 LED 的面積，而圖中左邊為面積比值(為 2 的示意圖，右邊為面積比值為 24 的示意圖。面積比值定義如 3.4.1 式，

$$r = \frac{\text{全波整流微晶粒LED面積(area of center LED)}}{\text{半波整流微晶粒LED面積(area of side LED)}} = \frac{A_C}{A_S} \quad (3.4.1 \text{ 式})$$

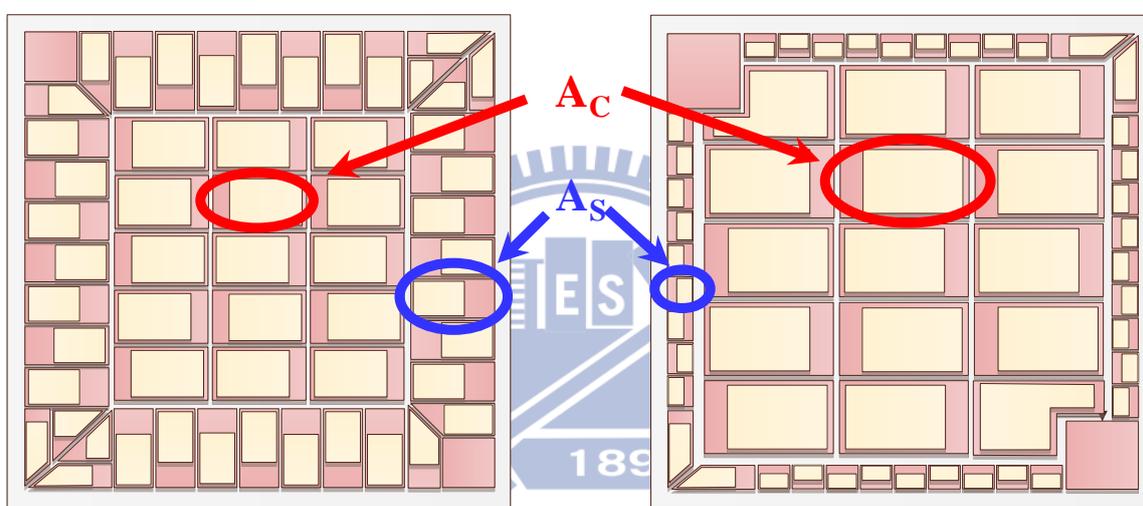


圖 3.4.9 WB-ACLED 之半波微整流微晶粒 LED 與全波整流微晶粒 LED 的面積比定義示意圖

定義完面積比值後，可以利用第三章第一節與面積有關的關係式將此值帶入後可獲得新不同面積的微晶粒 LED 參數，將這些參數寫入 LED 模型後即可開始執行模擬。我們將面積比值整的範圍設為 1 到 25，半波整流微晶粒 LED 顆數為 10 顆( $SLN=10$ )，全波整流微晶粒 LED 顆數為 15 顆( $CLN=15$ )，WB-ACLED 晶片面積固定為  $0.55\text{mm}^2$  和  $1.24\text{mm}^2$ ，輸入功率固定在 1W。

模擬結果如圖 3.4.10 所示，圖中兩種面積的 WB-ACLED 的趨勢均一致，但  $1.24\text{mm}^2$  的光輸出功率較  $0.55\text{mm}^2$  下降來的快。而在變面積比

值方面，兩種不同面積的 WB-ACLED 均在面積比值為  $2^{0.5}$  時有最高的光輸出功率的表現。

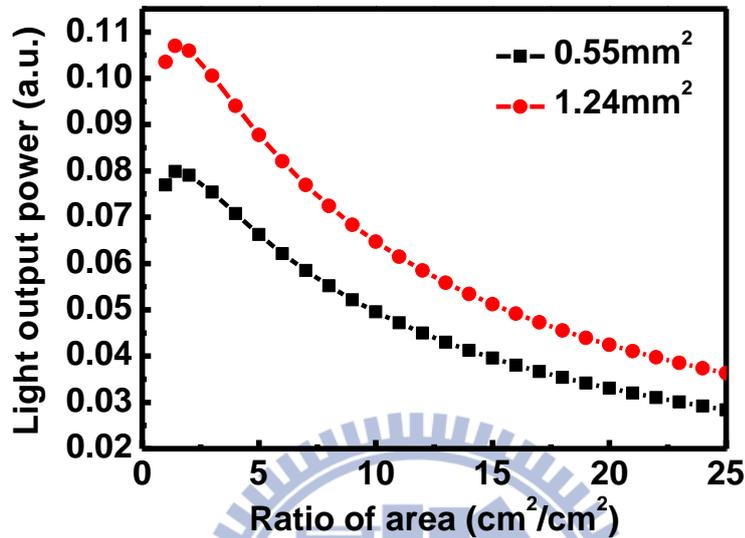


圖 3.4.10 SPICE 之 WB-ACLED 晶片模型變面積比值與光輸出功率比較

### 3.5 WB-ACLED 電性與光性結果討論

在固定 WB-ACLED 晶片面積比值與總面積時，我們發現隨著半波整流微晶粒 LED 的顆數與全波整流微晶粒的顆數增加，晶片效率會愈來愈高，尤其以增加全波整流微晶粒的顆數更為明顯。

在固定 WB-ACLED 晶片面積比值與總面積時，我們去改變半波整流微晶粒 LED 的顆數與全波整流微晶粒 LED 的顆數，發現輸入功率為 1W 時在半波整流微晶粒 LED 顆數為 7，而全波整流微晶粒顆數為 27 時，有最高的光輸出功率；當輸入功率為 2W 時，最高的光輸出功率在半波整流微晶粒 LED 顆數為 5 而全波整流微晶粒 LED 顆數為 27 時。

在固定 WB-ACLED 晶片半波整流微晶粒 LED 與全波整流微晶粒 LED 的顆數與總面積時，我們去改變面積比值，發現輸入功率為 1W 時在面積比值为 2 下，WB-ACLED 有最大的光輸出功率。

## 第四章

# WB-ACLED 製程之量測與實驗結果

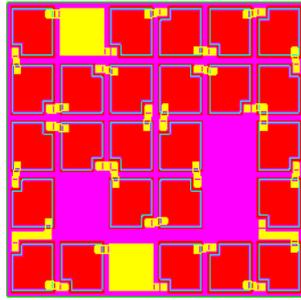
### 4.1 WB-ACLED 之光罩設計與製程

第三章第四節經過模擬 WB-ACLED 的電性與光性後，我們知道了隨著微晶粒 LED 顆數的增加可提升晶片效率，又當面積比值為 2 時有最高的光輸出功率，將這些結果我們挑出幾組 WB-ACLED 就微晶粒顆數與面積比值設計出光罩並實際做出晶片量測，以下先介紹設計的光罩，之後再介紹 WB-ACLED 元件製程。

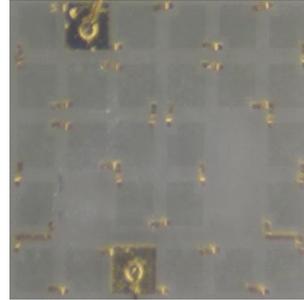
#### 4.1.1 固定面積比值變微晶粒 LED 顆數光罩設計

##### ◎ 固定半波整流微晶粒 LED 顆數為 5 顆

這小節我們選定一組 WB-ACLED 其條件為固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$ ，半波整流微晶粒 LED 顆數固定為 5 顆，而全波整流微晶粒 LED 顆數從最初的 5 顆，每次遞增 5 顆全波整流微晶粒 LED 一直到 25 顆為止，所以在這組 WB-ACLED 裡共有五種 WB-ACLED 晶片，分別為(SLN=5, CLN=5, r=1)、(SLN=5, CLN=10, r=1)、(SLN=5, CLN=15, r=1)、(SLN=5, CLN=20, r=1)、(SLN=5, CLN=25, r=1)。我們想經由這樣的設計，證明在固定晶片總面積的前提下，隨著增加 WB-ACLED 的微晶粒 LED 顆數的確會增加光輸出功率。光罩圖與實體 WB-ACLED 如圖 4.1.1~5 所示。

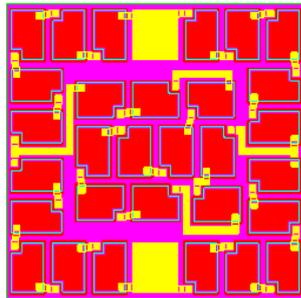


(a)

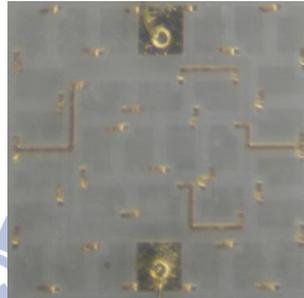


(b)

圖 4.1.1 SLN=5，CLN=5，r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

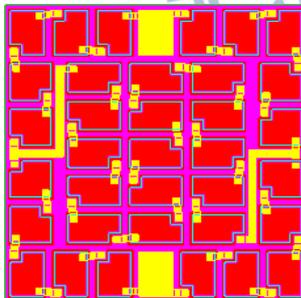


(a)

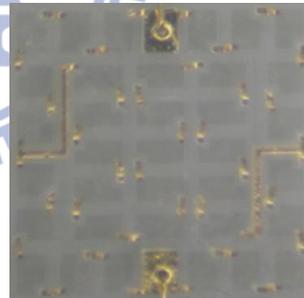


(b)

圖 4.1.2 SLN=5，CLN=10，r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

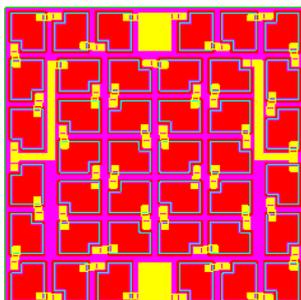


(a)

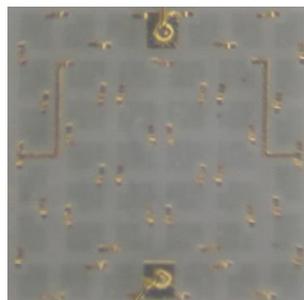


(b)

圖 4.1.3 SLN=5，CLN=15，r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖



(a)



(b)

圖 4.1.4 SLN=5, CLN=20, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

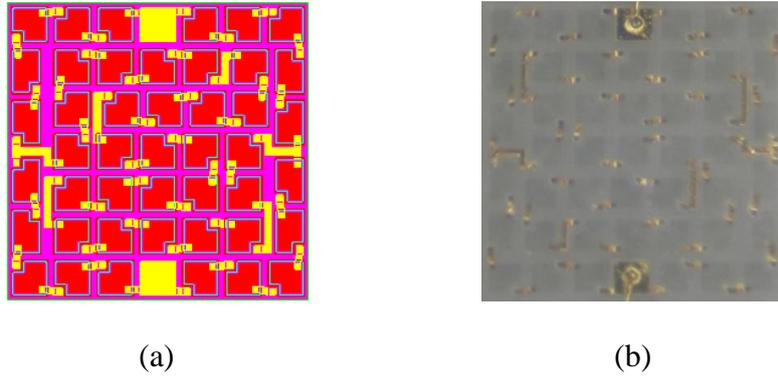


圖 4.1.5 SLN=5, CLN=25, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

### ◎ 固定 WB-ACLED 總顆數為 45 顆微晶粒 LED

此小節我們固定 WB-ACLED 總顆數，但改變半波整流微晶粒 LED 顆數與全波整流微晶粒 LED 顆數之間的比例，這一組 WB-ACLED 共有四種 WB-ACLED 晶片，分別為(SLN=6, CLN=21, r=1)、(SLN=7, CLN=17, r=1)、(SLN=8, CLN=13, r=1)、(SLN=9, CLN=9, r=1)。我們想經由此設計，來證明增加全波整流微晶粒 LED 的顆數，的確較增加半波整流微晶粒 LED 的顆數來更能有效的增強光輸出功率。光罩圖與實體 WB-ACLED 如圖 4.1.6~9 所示。

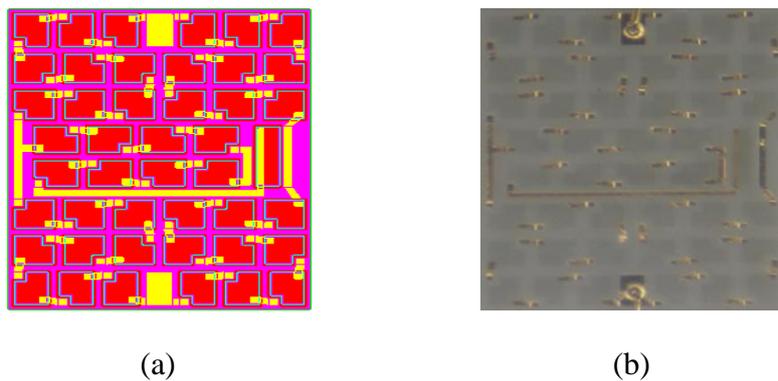
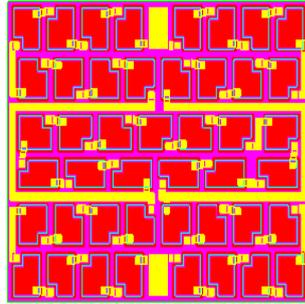
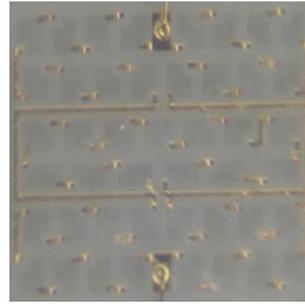


圖 4.1.6 SLN=6, CLN=21, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

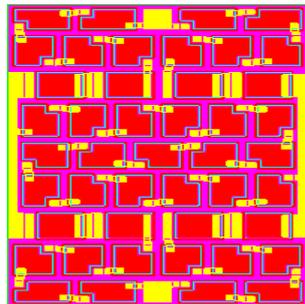


(a)

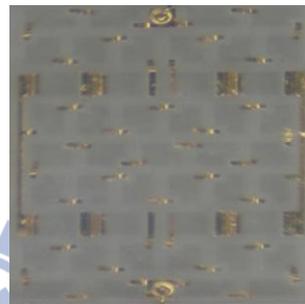


(b)

圖 4.1.7 SLN=7, CLN=17, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

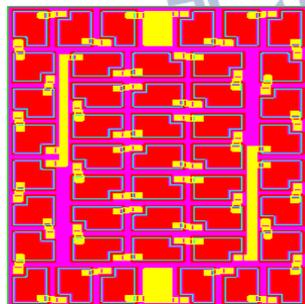


(a)

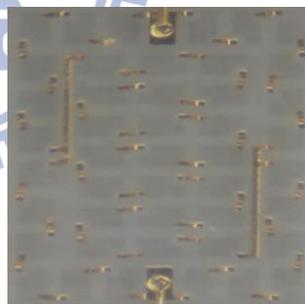


(b)

圖 4.1.8 SLN=8, CLN=13, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖



(a)



(b)

圖 4.1.9 SLN=9, CLN=9, r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

#### 4.1.2 固定微晶粒 LED 顆數變面積比值光罩設計

##### ④ 固定 WB-ACLED 總顆數為 65

我們將 WB-ACLED 總顆數為 65，其中半波整流微晶粒 LED 為 10 顆，全波整流微晶粒 LED 為 25 顆，面積比值有 1、2 與 5，

三種面積比值，因此這一組的 WB-ACLED 共有 3 種 WB-ACLED 晶片，分別為(SLN=10，CLN=25，r=1)、(SLN=10，CLN=25，r=2)與(SLN=10，CLN=25，r=5)。這樣設計的想法是因為在微晶粒 LED 顆數最多時會有最高的光輸出功率，再加上當面積比值為 2 時又是變面積比值中較高的光輸出功率所在。光罩圖與實體 WB-ACLED 如圖 4.1.10~12 所示。

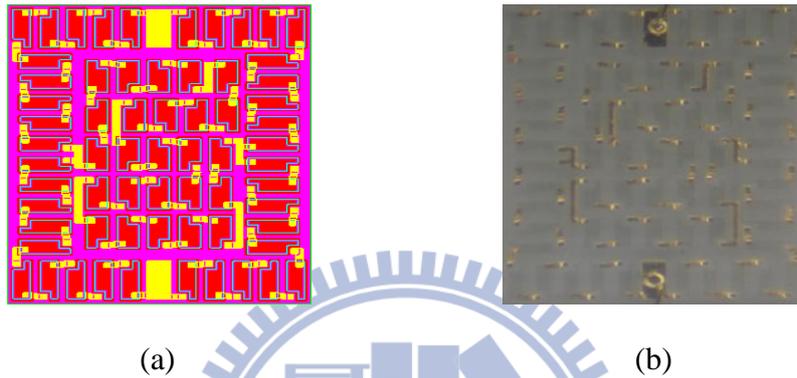


圖 4.1.10 SLN=10，CLN=25，r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

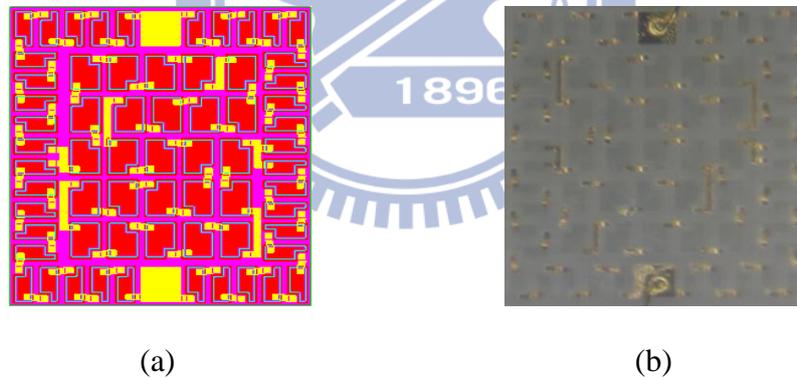


圖 4.1.11 SLN=10，CLN=25，r=2 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

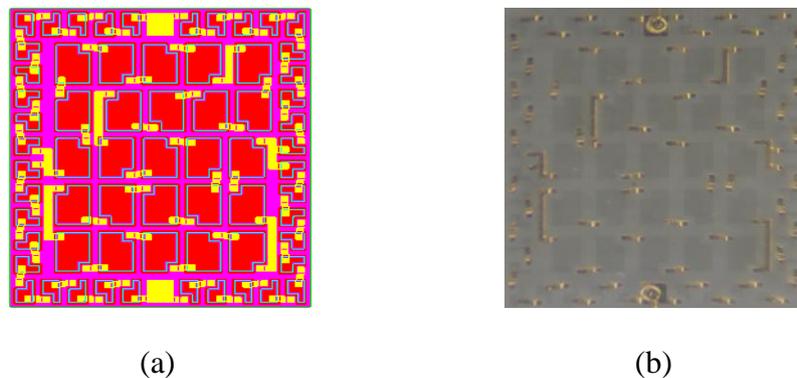


圖 4.1.12 SLN=10，CLN=25，r=5 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

② 固定 WB-ACLED 總顆數為 67

我們將 WB-ACLED 總顆數為 67，其中半波整流微晶粒 LED 為 10 顆，全波整流微晶粒 LED 為 27 顆，面積比值有 1、2 與 5，三種面積比值，因此這一組的 WB-ACLED 共有 3 種 WB-ACLED 晶片，分別為(SLN=10，CLN=27，r=1)、(SLN=10，CLN=27，r=2)與(SLN=10，CLN=27，r=5)。會再多增加這樣的條件是由於我們想比較當顆數不同時，當面積比值為 2 時是否也為光輸出功率最大的位置。光罩圖與實體 WB-ACLED 如圖 4.1.13~15 所示。

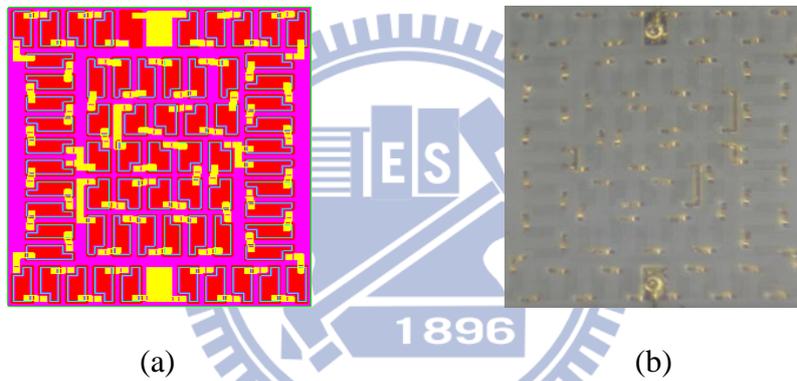


圖 4.1.13 SLN=10，CLN=27，r=1 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

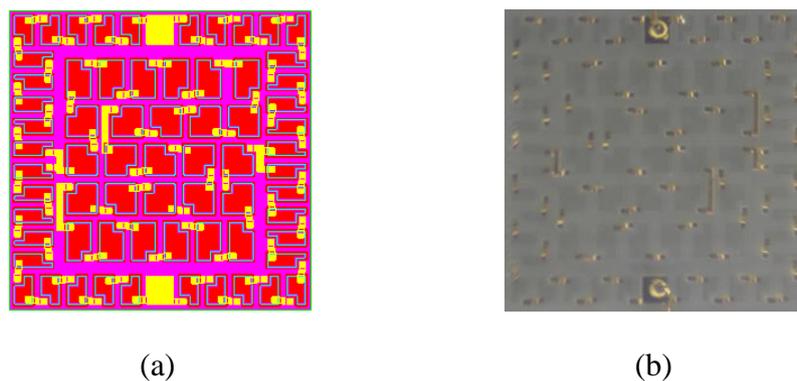
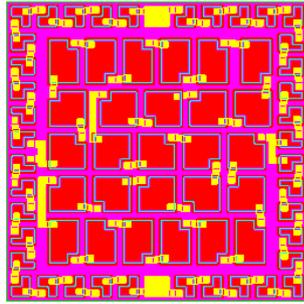
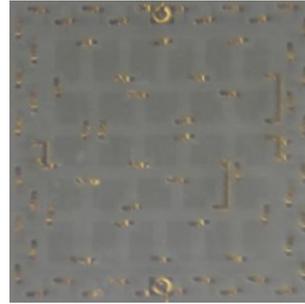


圖 4.1.14 SLN=10，CLN=27，r=2 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖



(a)



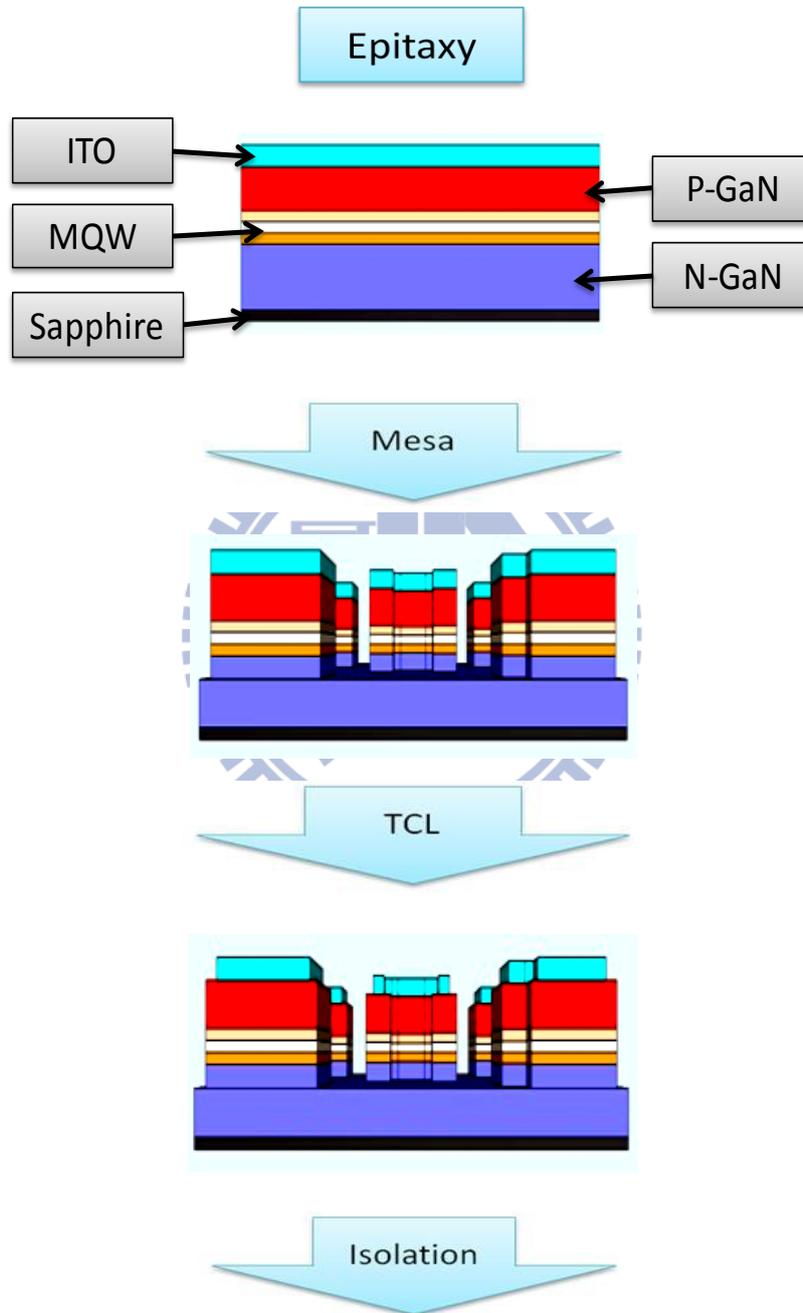
(b)

圖 4.1.15 SLN=10，CLN=27，r=5 之 WB-ACLED (a)光罩圖(b)OM 圖

### 4.1.3 WB-ACLED 元件製程

這一小節要說明氮化鎵 WB-ACLED 元件製程流程，製程順序與一般 LED 大同小異，詳細流程圖如下圖 3.4.16 所示，氮化鎵 WB-ACLED 的磊晶結構由下往上依序為藍寶石基板(Sapphire)、N-type 氮化鎵、多層量子井、P-type 氮化鎵、電流散佈層(current spreading layer)氧化銦錫 (Indium tin oxide)。利用有機金屬氣相沈積(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)法於 c-face(0001)方向的藍寶石基板上成長氮化鎵結核層(nucleation layer)，接著是約 4 $\mu\text{m}$  厚度之摻雜矽(Si)的 n-type 氮化鎵披覆層(n-GaN cladding layer)，氮化銦鎵/氮化鎵多層量子井主動層(InGa $\text{N}$ /GaN MQW active layer)，摻雜鎂(Mg)的 p-type 氮化鋁鎵披覆層(p-AlGa $\text{N}$  cladding layer)，最後是電流散佈層氧化銦錫。第一道光罩為 Mesa，主要是由表面的氧化銦錫導電層往利用乾式蝕刻往下蝕刻至 N-type 氮化鎵層，深度約為 2 $\mu\text{m}$ 。第二道光罩為 TCL，主要是將氧化銦錫導電層側邊往內蝕刻縮小 10 $\mu\text{m}$  以避免後續製程造成短路的可能性。第三道光罩為 Isolation，由 N-type 氮化鎵層利用乾式蝕刻往下蝕刻至藍寶石基板，將每顆微晶粒 LED 獨立起來。第四道光罩為 Passivation，主要是在晶片表面使用電漿輔助化學氣相沈積(PECVD)長一層二氧化矽絕

緣層並開出需要鍍上金屬的孔洞，以便於後續微晶粒 LED 之間的連接。  
第五道光罩為 Metal line，鍍上一層 Cr/Pt/Au 的金屬層將微晶粒 LED 與  
微晶粒 LED 用金屬線連接起來。經由這五道光罩的步驟基本上就能完成  
一完整的 WB-ACLED 製程。



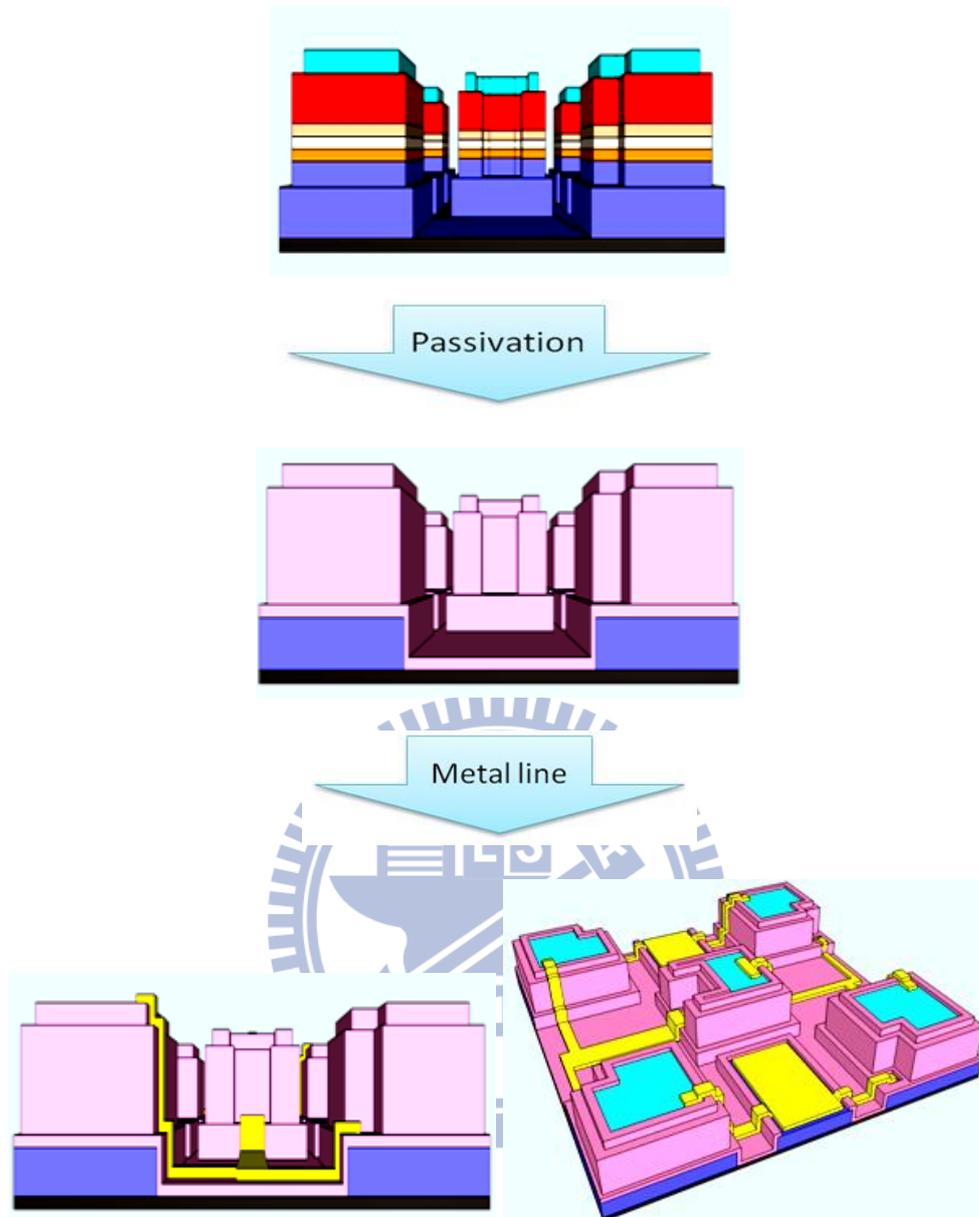


圖 4.1.16 WB-ACLED 製程流程圖

## 4.2 WB-ACLED 之電性與光性量測分析

下完製程並做完 WB-ACLED 晶片後，還要將晶片放於置具中並固晶打線完即為完整的元件。接下來先簡單介紹 ACLED 的量測設備，設備示意圖如圖 4.2.1 所示，我們利用電腦來控制 AC 電流源來驅動元件，並將元件放置於 12 吋之積分球內。但是在 AC 電流源與積分球的線路之間，會再加上一個可變的限流電阻，其電阻值範圍為約  $0\Omega\sim 10K\Omega$ 。

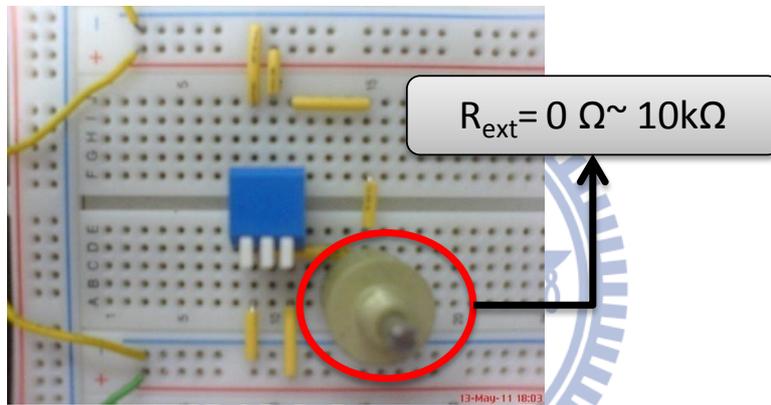
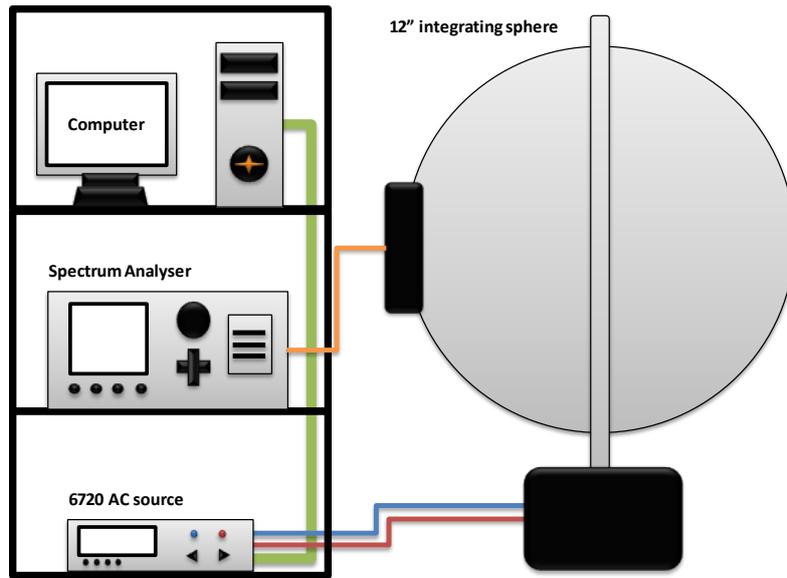


圖 4.2.1 ACLED 量測設備系統示意圖與限流電阻電路

#### 4. 2. 1 WB-ACLED 變顆數比值之電性與光性量測分析

##### ◎ 固定半波整流微晶粒 LED 顆數為 5 顆

第三章的小節中，已有說明過此組 WB-ACLED 均是固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$  且面積比值為 1，在固定半波整流微晶粒 LED(SLN)為 5 的條件下，全波整流微晶粒 LED 顆數(CLN)由 5 每顆晶片遞增 5 顆直到 25 顆，交流下的 IV 曲線如圖 4.2.2 所示。顆數愈多則 WB-ACLED 的切入電壓愈高。

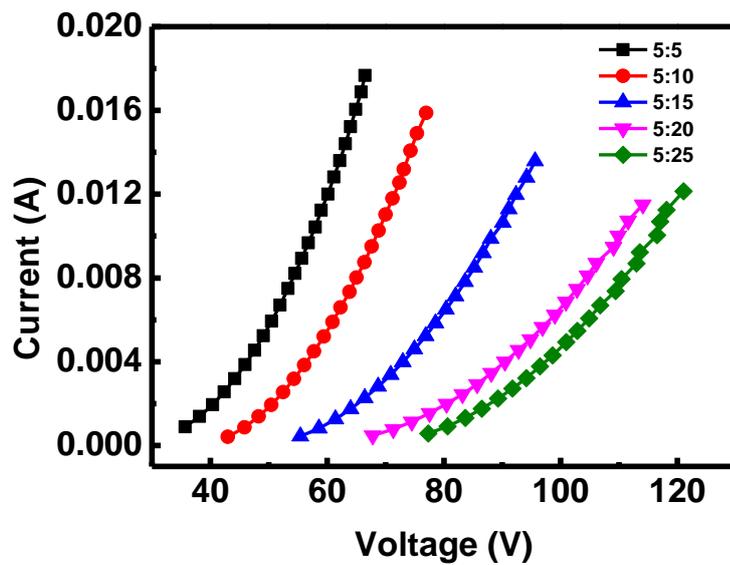


圖 4.2.2 固定  $r=1$ 、 $SLN=5$ 、 $CLN=5\sim 25$  之 WB-ACLED 的 IV 曲線

圖 4.2.3 為固定  $r=1$ 、 $SLN=5$ 、 $CLN=5\sim 25$  之 WB-ACLED 的 PL 曲線，X 軸為座落在 WB-ACLED 上的輸入功率，Y 軸為光輸出功率，不同顏色(符號)的曲線代表不同顆數條件的 WB-ACLED 晶片，由圖中可觀察到隨著微晶粒 LED 顆數的增加，光輸出功率會愈來愈高。

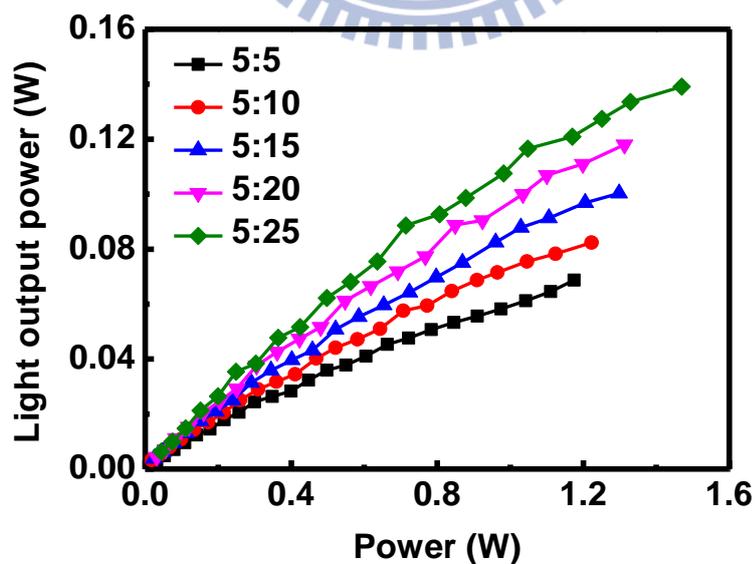


圖 4.2.3 固定  $r=1$ 、 $SLN=5$ 、 $CLN=5\sim 25$  之 WB-ACLED 的 PL 曲線

下圖 4.2.4 固定  $r=1$ 、 $SLN=5$ 、 $CLN=5\sim 25$  之 WB-ACLED 模擬

與量測的光輸出功率比較圖，固定輸入功率為 1W，X 軸代表不同微晶粒 LED 顆數的 WB-ACLED 晶片(共有五顆)，Y 軸代表光輸出功率，黑色曲線為模擬數據，紅色曲線為實際量測數據，模擬與量測的趨勢均一致，隨著微晶粒 LED 顆數的增加光輸出功率會愈高。

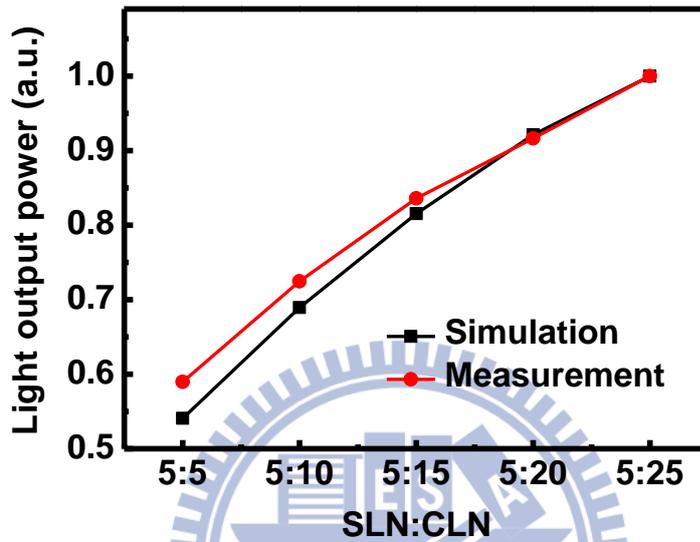


圖 4.2.4 固定  $r=1$ 、 $SLN=5$ 、 $CLN=5\sim 25$  之 WB-ACLED 模擬與量測的光輸出功率比較圖

下表格為這五顆 WB-ACLED 晶片量測數據，隨著微晶粒 LED 顆數的增加功率因數(Power factor, PF)均可保持在 90 以上，已符合美國能源之星規範，住宅應用功率因數大於 70，商業應用功率因數大於 90 [29]，而  $SLN=5$ 、 $CLN=25$  的光輸出功率較  $SLN=5$ 、 $CLN=5$  的提升了 70%。

SLN : CLN	5:5	5:10	5:15	5:20	5:25
Voltage	64 V	73.14 V	90.1V	106.1 V	110.4 V
Wavelength	453 nm	456 nm	455 nm	456 nm	454 nm
Input Power	1 W	1 W	1W	1W	1 W
PF	98.6	98	97.2	96	95
Light output power	58.2mW	71.4mW	82.5 mW	90.4mW	98.7mW

表 4.2.1 固定  $r=1$ 、 $SLN=5$ 、 $CLN=5\sim 25$  之 WB-ACLED 量測數據

### ② 固定 WB-ACLED 總顆數為 45 顆微晶粒 LED

此組 WB-ACLED 固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、面積比值為 1、微晶粒 LED 總顆數為 45 下，分別有四種 WB-ACLED 晶片為別為 SLN=6、CLN=21，SLN=7、CLN=17，SLN=8、CLN=13，SLN=9、CLN=9。圖 4.2.5 為該四種 WB-ACLED 之 IV 曲線，雖然微晶粒 LED 的總顆數相同，但是在一個半週下導通的顆數是不同的，SLN=6、CLN=21 單次導通 33 顆，SLN=7、CLN=17 單次導通 31 顆，SLN=8、CLN=13 單次導通 29 顆，SLN=9、CLN=9 單次導通 27 顆。因為 SLN=6、CLN=21 這組切入電壓最高，而 SLN=9、CLN=9 的切入電壓最低。

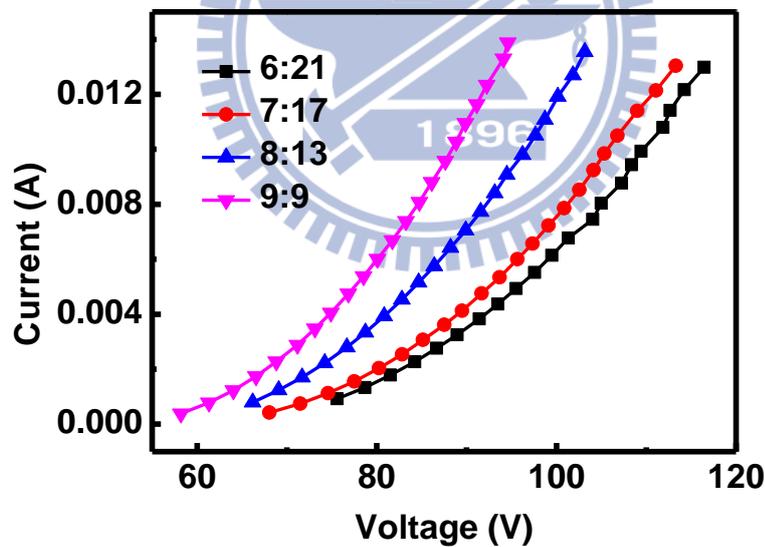


圖 4.2.5 固定  $r=1$ 、SLN=6~9、CLN=9~21，總顆數為 45 之 WB-ACLED 的 IV 曲線

圖 4.2.6 為固定  $r=1$ 、SLN=6~9、CLN=9~21，總顆數為 45 之 WB-ACLED 的 PL 曲線，X 軸為座落於晶片上的輸入功率，Y 軸為光輸出功率，不同顏色的線(符號)代表不同條件的 WB-ACLED 共

有四顆，由圖中我們可發現 SLN=6、CLN=21 這顆 WB-ACLED 之光輸出功率是高於其它三顆。在固定總顆數與總面積的條件下，每顆的微晶粒 LED 之面積都是相同的，因此串聯電阻與電流分佈十分接近，而在交流源半個週期下 SLN=6、CLN=21 這顆 WB-ACLED 晶片導通的微晶粒 LED 顆數是 33 顆高於其它三顆，因此光輸出功率高於其它三顆 WB-ACLED。

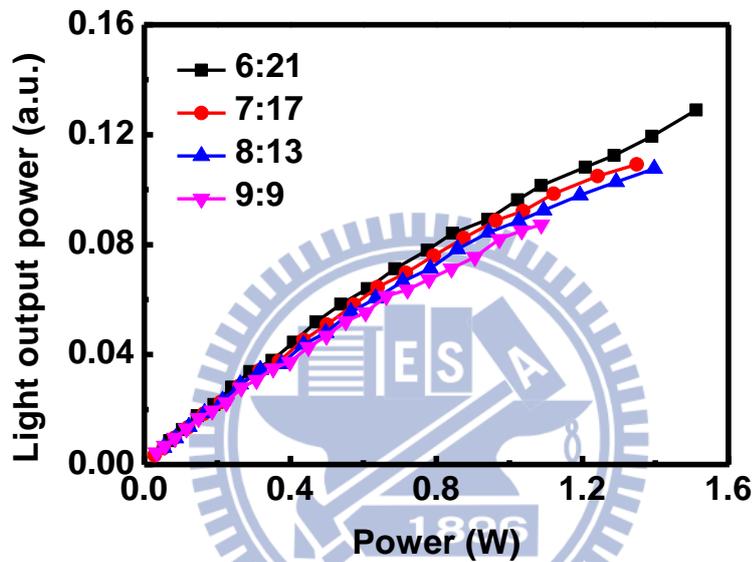


圖 4.2.6 固定  $r=1$ 、SLN=6~9、CLN=9~21，總顆數為 45 之 WB-ACLED 的 PL 曲線

圖 4.2.7 為固定  $r=1$ 、SLN=6~9、CLN=9~21，總顆數為 45 之 WB-ACLED 模擬與量測的光輸出功率比較圖，固定輸入功率為 1W，X 軸代表不同微晶粒 LED 顆數的 WB-ACLED 晶片(共有四顆)，Y 軸代表光輸出功率，黑色曲線為模擬數據，紅色曲線為實際量測數據，模擬與量測的趨勢均一致，隨著全波整流微晶粒 LED 顆數的增加與半波整流微晶粒 LED 顆數的減少，則 WB-ACLED 的光輸出功率愈高。

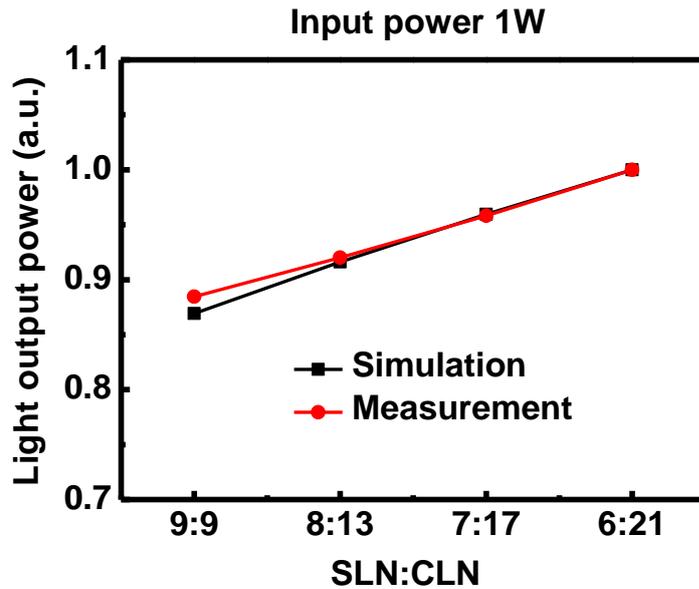


圖 4.2.7 固定  $r=1$ 、 $SLN=6\sim 9$ 、 $CLN=9\sim 21$ ，總顆數為 45 之 WB-ACLED

模擬與量測的光輸出功率比較圖

下表 4.2.2 為固定  $r=1$ 、 $SLN=6\sim 9$ 、 $CLN=9\sim 21$ ，總顆數為 45 之 WB-ACLED 的細詳量測數據，固定輸入功率為 1W，四種 WB-ACLED 的功率因數皆在 90 以上符合美國能源之星的規範。而  $SLN=6$ 、 $CLN=21$  這顆晶片的光輸出功率較  $SLN=9$ 、 $CLN=9$  來的提高 13%。

SLN : CLN	9:9	8:13	7:17	6:21
Voltage	94.11 V	97.7 V	106.8 V	108.4
Wavelength	454 nm	454 nm	454 nm	454 nm
Input Power	1 W	1 W	1 W	1 W
PF	95	96	95	95.6
Light output power	85.1mW	88.6 mW	92.2mW	96.2 mW

表 4.2.2 固定  $r=1$ 、 $SLN=6\sim 9$ 、 $CLN=9\sim 21$ ，總顆數為 45 之 WB-ACLED 量測數據

#### 4. 2. 2 WB-ACLED 變面積比之電性與光性量測分析

② 固定 WB-ACLED 總顆數為 65

此組 WB-ACLED 固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、微晶粒 LED 總顆數為 65 顆(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5。圖 4.2.8 為該組 WB-ACLED 的 IV 曲線，黑線之面積比值為 1 的 WB-ACLED，紅線之面積比值為 2 的 WB-ACLED，藍線之面積比值為 5 的 WB-ACLED，在相同導通的微晶粒 LED 顆數下其切入電壓非常接近，但面積比值為 2 的切入電壓較其它面積比值來得低，且 IV 曲線斜率較陡串聯電阻較小。

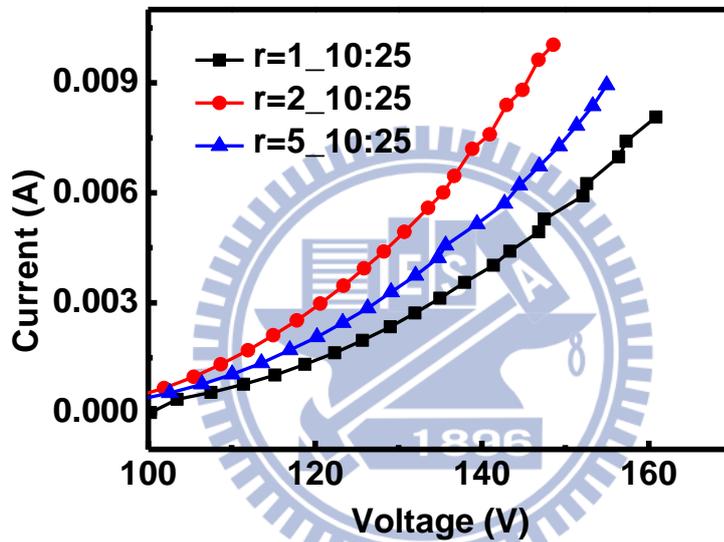


圖 4.2.8 固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 的 IV 曲線

圖 4.2.9 為固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 的 PL 曲線，X 軸為座落於晶片上的輸入功率，Y 軸為光輸出功率，不同顏色的線(符號)代表不同條件的 WB-ACLED 共有三顆，黑線之面積比值為 1 的 WB-ACLED，紅線之面積比值為 2 的 WB-ACLED，藍線之面積比值為 5 的 WB-ACLED，從圖中可發現到面積比值為 2 的 WB-ACLED 晶片其光輸出功率高於面積比值為 1 與 5 的 WB-ACLED。

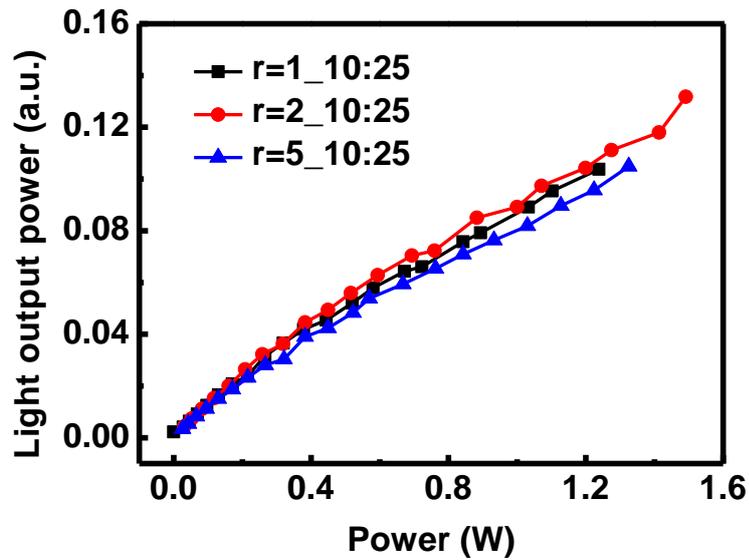


圖 4.2.9 固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5

之 WB-ACLED 的 PL 曲線

圖 4.2.10 為固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 模擬與量測的光輸出功率比較圖，固定輸入功率為 1W，X 軸代表不同面積比值的 WB-ACLED 晶片(共有三顆)，Y 軸代表光輸出功率，黑色曲線為模擬數據，紅色曲線為實際量測數據，模擬與量測的趨勢均一致，模擬於面積比值為 2<sup>0.5</sup> 時擁有最高的光輸出功率，而實際元件於面積比值為 2 時也較其它面積比值的光輸出功率還來得高。

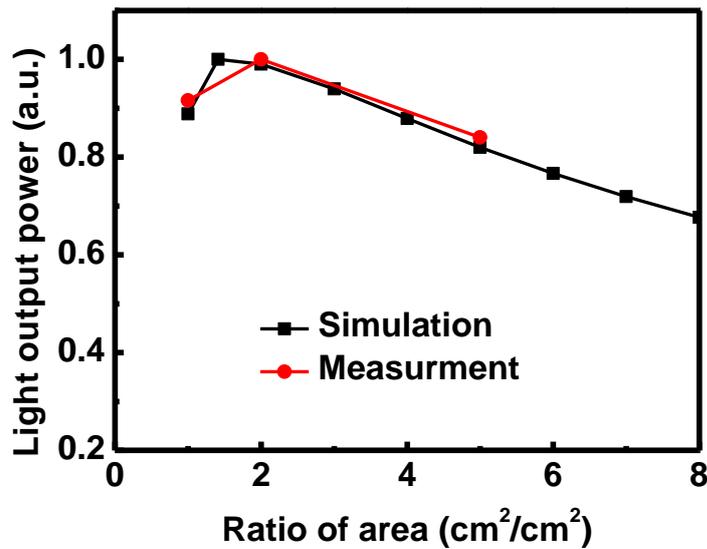


圖 4.2.10 固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 模擬與量測的光輸出功率比較圖

表 4.2.3 為 固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 詳細量測數據，固定輸入功率為 1W，三種 WB-ACLED 的功率因數皆在 90 以上符合美國能源之星的規範。面積比值為 2 的 WB-ACLED 之光輸出功率較面積比值為 1 的光輸出功率提高了 9%。

SLN : CLN	10:25		
	r = 1	r = 2	r = 5
Voltage(V)	156.4 V	140.9 V	149.2 V
Wavelength	454nm	454nm	455nm
Input Power(W)	1 W	1W	1 W
PF	94	93.9	93.8
Light output power	89.2 mW	97.3 mW	81.8 mW

表 4.2.3 固定總顆數為 65(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 量測數據

◎ 固定 WB-ACLED 總顆數為 67

表 4.2.4 為 固定總顆數為 67(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 量測數據，其中因面積比值為 1 的 WB-ACLED 晶片損壞無實際量測數據，但當面積比值為 2 時光輸出功率的確也較面積比值為 5 時來的高。這組 WB-ACLED 主要是預防變面積比值中有其中一組因晶片損壞無法比較才設計，就不再補上 IV 曲線、PL 量測與模擬分析。

SLN : CLN	10:27		
	r = 1	r = 2	r = 5
Voltage(V)	X	144.9 V	156.5 V
Wavelength	X	454nm	454nm
Input Power(W)	X	1 W	1 W
PF	X	93.8	93.9
Light output power	X	99.7mW	89mW

表 4.2.4 固定總顆數為 67(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5 之 WB-ACLED 量測數據

### 4.3 WB-ACLED 之發光強度分佈量測與分析

第三節主要是將設計的三組 WB-ACLED 做 Beam View 量測，量測其發光強度分佈，以該數據去分析電流分佈的情形。

#### ■ 固定半波整流微晶粒 LED 顆數為 5 顆

圖 4.3.1~5 為 WB-ACLED 皆為固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$  且面積比值為 1，在固定半波整流微晶粒 LED(SLN)為 5 的條件下，全波整流微晶粒 LED 顆數(CLN)由 5 每顆晶片遞增 5 顆直到 25 顆的 Beam View 之光輸出功率分佈圖，由圖中可知道隨著顆數的增加其光輸出功率的確也較強，均勻性也較佳。

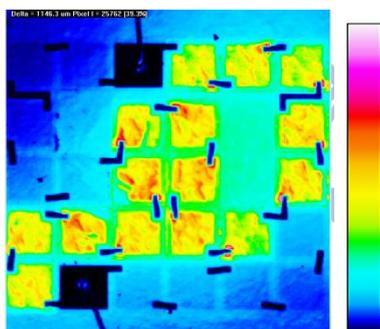


圖 4.3.1 SLN : CLN = 5 : 5

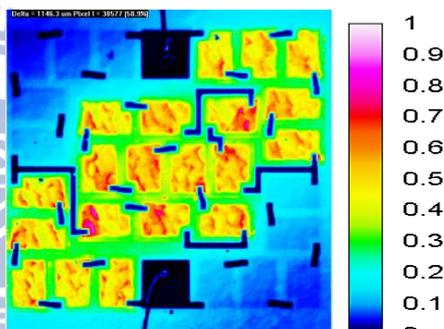


圖 4.3.2 SLN : CLN = 5 : 10

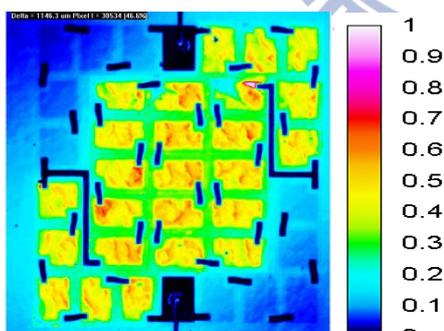


圖 4.3.3 SLN : CLN = 5 : 15

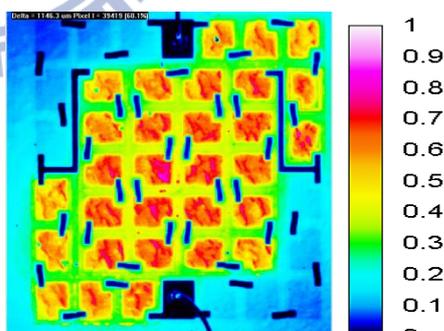


圖 4.3.4 SLN : CLN = 5 : 20

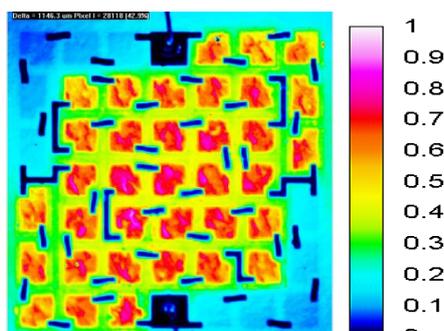


圖 4.3.5 SLN : CLN = 5 : 25

## ■ 固定 WB-ACLED 總顆數為 45 顆微晶粒 LED

圖 4.3.6~9 為 WB-ACLED 之 Beam View 圖，晶片條件為固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、面積比值為 1、微晶粒 LED 總顆數為 45 下，分別有四種 WB-ACLED 晶片為別為 SLN=6、CLN=21，SLN=7、CLN=17，SLN=8、CLN=13，SLN=9、CLN=9。這四種 WB-ACLED 在光輸出功率上只些微的差距，因此電流分佈均勻度平分秋色。

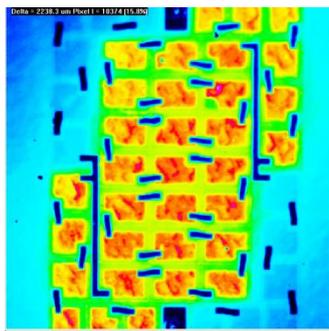


圖 4.3.6 SLN : CLN = 6 : 21

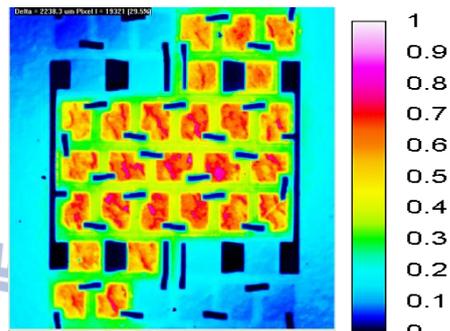


圖 4.3.7 SLN : CLN = 7 : 17

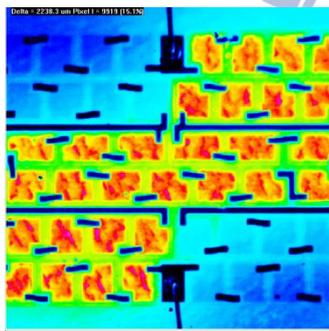


圖 4.3.8 SLN : CLN = 8 : 13

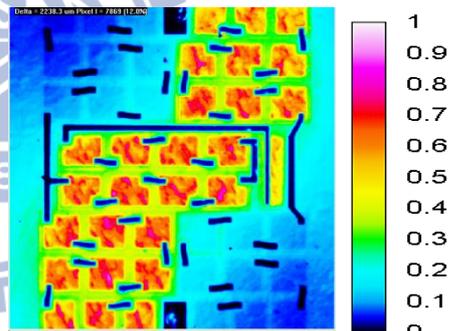


圖 4.3.9 SLN : CLN = 9 : 9

## ■ 固定 WB-ACLED 總顆數為 65

圖 4.3.10~12 為 WB-ACLED 之 Beam View 圖，條件為固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、微晶粒 LED 總顆數為 65 顆(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 1、2、5。在電流分佈上圖 4.3.10 最均勻，隨著面積比值愈大半波整流微晶粒 LED 的面積愈小而電流密度愈大，全波整流微晶粒 LED 的面積愈大而電流密度愈小，因此造成電流分佈愈不平均。

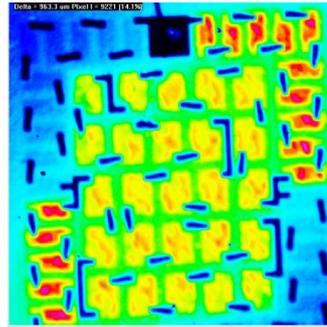
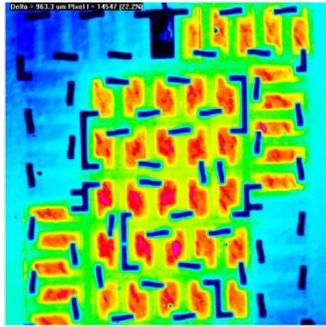


圖 4.3.10 SLN : CLN = 10 : 25、 $r=1$  圖 4.3.11 SLN : CLN = 10 : 25、 $r=2$

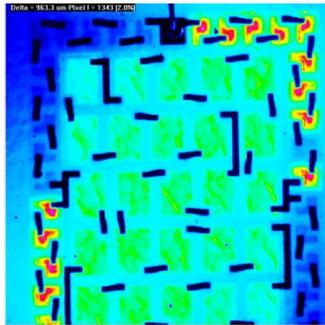


圖 4.3.12 SLN : CLN = 10 : 25、 $r=5$

#### ■ 固定 WB-ACLED 總顆數為 67

圖 4.3.13~14 為 WB-ACLED 之 Beam View 圖，條件為固定晶片總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、微晶粒 LED 總顆數為 67 顆(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 2 與 5。圖 4.2.8 為固定總顆數為 67 顆(SLN=10、CLN=25)，面積比值為 2 與 5。

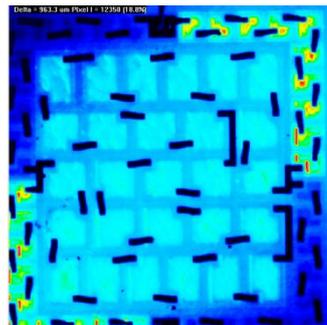
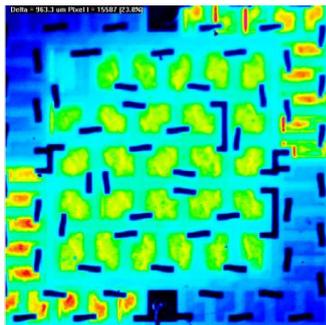


圖 4.3.13 SLN : CLN = 10 : 27、 $r=2$  圖 4.3.14 SLN : CLN = 10 : 27、 $r=5$

## 第五章

### 總結

目前台灣業界 ACLED 的發光效率已可達到 86~93 lm/W(2010 第一季),已超越了白熾燈泡和省電燈泡的 60 lm/W,因此在亮度上已可取代現有的傳統燈泡與鹵素燈。

本論文研究橋式型 WB-ACLED 的最佳化設計,透過 SPICE 電路模擬軟體成功的建立了不同面積條件下 WB-ACLED 操作於交流時的電性特性,並且透過設計與量測不同面積的微晶粒 LED 建立了光性資料庫,將光性資料寫入 Matlab 透過數學式計算不同面積下的電流密度之單位面積光輸出功率,成功的模擬出 WB-ACLED 操作於交流下時的平均光輸出功率。

在固定 WB-ACLED 總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、輸入功率為 1W 和面積比值為 1 之條件下,發現了當半波整流微晶粒 LED 顆數(SLN)為 5、全波整流微晶粒 LED 顆數(CLN)為 25 的 WB-ACLED,較 SLN 為 5、CLN 為 5 的光輸出功率提高了 60%。而在模擬情形下,WB-ACLED 最大的光輸出功率發生在 SLN 為 5~8、CLN 為 25~27 的區域。

在固定 WB-ACLED 總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、輸入功率為 1W、總微晶粒 LED 顆數為 45 和面積比值為 1 之條件下,發現 SLN 為 6、CLN 為 21 的光輸出功率,較 SLN 為 9、CLN 為 9 的光輸出功率提高了 8%。證實了增加 CLN 較 SLN 來的更能提高光輸出功率。

在固定 WB-ACLED 總面積為  $1.24\text{mm}^2$ 、輸入功率為 1W、總微晶粒 LED 顆數為 65,其中 SLN 為 25、CLN 為 10,於模擬情形下,發現 WB-ACLED 的面積比值從 1 改變到 25 時,面積比值為 2 時有最高的光輸出功率表現,並且這此結果與實驗互相符合,當面積比值為 2 時的 WB-ACLED 之光輸出功率,較面積比值為 1 的 WB-ACLED 之光輸出功率提高了 9%。

## Reference

- [1] S. Nakamura M. Senoh, and T. Mukai, "High-Power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes", *Appl. Phys. Lett* 62, 2390 (1993).
- [2] J. I. Pankove, and T. D. Moustakas, "*Gallium Nitride (GaN) I-Semiconductors and Semimetals Voume 50*", Academic Press, San Diego, California, USA (1998).
- [3] S. Nakamura and G. Fasol, *The Blue Laser Diode* (Springer, New York, 1997).
- [4] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes 2<sup>nd</sup> ed.* (Cambridge University Press, New York, 2006).
- [5] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, and S. Nagahama, "High-power InGaN single-quantum-well-structure blue and violet light-emitting diodes", *Appl. Phys. Lett.* 67, 1868 (1995).
- [6] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, "Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films," *Jpn. J. Appl. Phys.* 31, L139 (1992).
- [7] J. Piprek, "Nitride Semiconductor Devices", WILEY-VCH verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim (2007).
- [8] G.B. Stringfellow, and M. G. Craford, "high Brightness Light Emitting Diodes: Semiconductors and Semimetal Volume 48", Academic Press, San Diego, California, USA (1997).
- [9] G. O. Mueller and R. Mueller-Mach, "*Set The Pace in White Space-White LEDs for illumination and Backlighting*", *Proceedings of Intertech Phosphor Global Summit*, San Diego, (2005).
- [10] S. Nakamura, "InGaN multiquantum-well-structure laser diodes with GaN-AlGaN modulation-doped strain-layer", *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.* 4, 483 (1998).

- [11] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, "high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-green-light-emitting diodes", J. Appl. Phys. 76, 8189 (1994).
- [12] M. Kurata, "Numerical Analysis for Semiconductor Devices", D. C. Heath & Company, Lexington Massachusetts (1982).
- [13] J. P. Ao, H. Sato, T. Mizobuchi, K. Marioka, S. Kawano, Y. Muramoto, Y. B. Lee, D. Sato, Y. Ohno, and S. Sakai, phys. Stat. sol. (a) 194, 376 (2002).
- [14] J. Cho, J. Jung, J. H. Chae, H. Kim, H. Kim, J. W. Lee, S. Yoon, C. Sone, T. Jang, Y. Park, and E. Yoon, Jpn. J. Appl. Phys. 46, L1194 (2007).
- [15] G. A. Onushkim, Y. J. Lee, J. J. Yang, H. K. Kim, J. K. Son, G. H. Park, and Y. Park, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 21, no. 1, pp.33-35 (2009).
- [16] H. H. Yen, H. C. Kuo, and W. Y. Yeh, Jpn. J. Appl. Phys. 47, pp.8808-8810 (2008).
- [17] H. H. Yen, W. Y. Yeh, and H. C. kuo, phys. Stat. sol. (a) 204, 2077 (2007).
- [18] <http://college.itri.org.tw/Topiclearn.aspx?id=132>
- [19] 台達電子 AC & HV LED 晶粒製作技術簡介
- [20] SPICE 2 User's Guide, University of California Berkeley, Electronics Research Labs, Berkeley, CA.
- [21] P. Antognetti and G. Massobrio, Semiconductor Device Modeling With SPICE, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY, 1988.
- [22] V. A. Dmitriev, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 1, 29 (1996).
- [23] H. C. Casey, Jr., J. Muth, S. Krishnankutty, and J. M. Zavada, Appl. Phys. Lett. 68, 2867 (1996).
- [24] P. Perlin, M. Osinski, P. G. Eliseev, V. A. Smagley, J. Mu, M. Banas, and P. Sartori, Appl. Phys. Lett. 69, 1680 (1996).
- [25] A. Chitnis, A. Kumar, M. Shatalov, V. Adivarahan, A. Lunev, J. W. Yang, G. Simin, M. Asif Khan, R. Gaska, and M. Shur, Appl. Phys. Lett. 77, 3800 (2000).
- [26] C. Sah, R. N. Noyce, and W. Shockley, Proc. IRE 45, 1228 (1957).
- [27] L. Esaki, Phys. Rev 109, 603 (1958).
- [28] [http://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff's\\_circuit\\_laws](http://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff's_circuit_laws)
- [29] [http://www.energystar.gov/index.cfm?c=new\\_specs.ssl\\_luminaires](http://www.energystar.gov/index.cfm?c=new_specs.ssl_luminaires)