

國立交通大學

工學院半導體材料與製程設備學程

碩 士 論 文

氮化鎵發光二極體光取出效率提升的研究

The Improvement of GaN LED light extraction

研 究 生：李煌川

指導教授：張翼 博士

中 華 民 國 一 百 年 十 二 月

氮化鎵發光二極體光取出效率提升的研究

The Improvement of GaN LED light extraction

研 究 生：李煌川

Student : Huang Chuan Lee

指導教授：張翼 博士

Advisor : Dr. Chang Edward Yi

國 立 交 通 大 學

工學院半導體材料與製程設備學程

碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Semiconductor Material and Process Equipment

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

in

Semiconductor Material and Process Equipment

December 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 一 百 年 十 二 月

氮化鎵發光二極體光取出效率提升的研究

研究生：李煌川

指導教授：張翼 博士

國立交通大學工學院半導體材料與製程設備學程

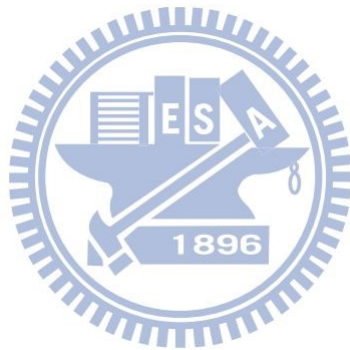
碩士論文

摘要

本研究在探討如何利用高溫磷酸濕式化學蝕刻技術，來達到增加 LED 光萃取效率之目的。由於蝕刻結果取決於其晶格結構，蝕刻會沿者藍寶石的晶格面進行，這種方法主要是減少光在 LED 內部反射而造成的發光層及電子、電洞對光的吸收，光在內部反射的次數越多，路徑越長，則造成的損失越大。透過改變 LED 的幾何形狀，可以縮短光在 LED 內部的反射路徑，以期達到增加 LED 光萃取效率之目的。

研究方法首先製作切割道為 $30\mu\text{m}$ 的 Pattern，使用電漿輔助化學氣相沉積(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition；PECVD)系統在藍寶石基板上方沉積 SiO_2 ，用 Laser scribe 先將切割道做切割動作，進而利用 SiO_2 當作蝕刻遮罩層，在高溫磷酸與硫酸混合液中蝕刻藍寶石基板，進行藍寶石基板的側邊蝕刻(Side Wall Etching；

SWE)，探討 LED 的光取出效率。研究方法分為三個：一是不同混合液濃度比例，在固定溫度及時間的條件。二是改變溫度條件下，固定混合液比例及時間的條件。三是改變時間，固定混合液比例及溫度的條件。將 Wafer 確認 SWE Width (μm)及亮度的變化，並用 SEM 進行切割道及 EPI Layer 外觀分析，進行光電特性量測，發現本研究提出的光取出效率方法，可以有效提高亮度。



The Improvement of GaN LED light extraction

Student : Huang Chuan Lee

Advisor : Dr. Chang Edward Yi

Degree Program of Semiconductor Material and Process Equipment

College of Engineering

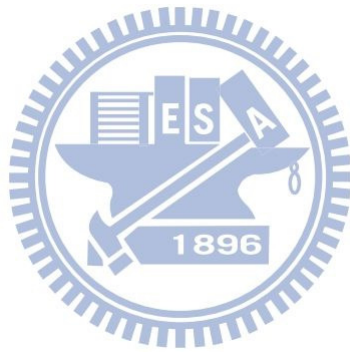
National Chiao Tung University

ABSTRACT

In this thesis, we propose a method to increasing of LED light extraction by using high temperature wet etcher of phosphoric acid. In this method, we change geometric figure of LED chip. It decreased the reflection when the light met the sidewall of chip. The reflection occurred will increased possibility of light absorption.

This technology was achieved by deposition SiO_2 on sapphire using by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) and making the laser cut by laser scribe. The SiO_2 was adopted the block layer and then etched in the mixture of high temperature phosphoric acid and sulfuric acid. The efficiency of sidewall etched profile on light extraction is shown in this thesis. There are three conditions of this study. The first was the changing concentrations of solution with fixed operation temperature and process time. Second was changing the operation temperature with fixed concentration of solution and process time. Third was changing the process time with fixed concentration of solution and process temperature. The results are verified by SWE width (μm), luminous intensity and SEM observation about laser scribe shape and epi layer sidewall profile. Base on the optical and the electrical

characterization data, the method proposed in this thesis may increase the luminous intensity of LED through the light extraction efficiency.



誌 謝

在這說長不長，說短不短，兩年多的研究所進修生活即將過去，因為有許多人的幫助與支持鼓勵讓我能順利畢業。首先，最感謝我的恩師，張翼教授對我的指導與多方面的啟發，讓我的知識增長，視野更加寬大，於求學期間在課業與生活上諄諄指導、鼓勵及關懷，使學生受益良多，在此獻上我最誠摯的謝意。這篇論文的完成，也要感謝口試委員謝宗雍教授和張立教授，在百忙之中抽空當我的口試評審委員，指導我的碩士論文，謝謝你們提出的寶貴意見，才使得我的論文更加圓滿與豐富。

能順利完成碩士論文，還要歸功於一起工作的公司同事們，從旁協助與指導。特別感謝~~志偉、昶鳴、彥志傾囊相授專業知識，及寶貴的實驗心得，並且陪伴我度過工作中最艱辛的創廠時段與論文實驗過程，也因為有你們讓枯燥的生活增添許多熱鬧的氣氛，使得在後續的學習上有了強而有力的後盾。其實要感謝的人太多了，不及備載，總之，有了大家的幫忙，才能讓我在這要收割的時候得以完備，非常謝謝大家。

最後，更要感謝我的家人，我的爸爸、媽媽、妹妹，當然還有一路相挺的老婆思慧，因為沒有你們在我求學的過程中不斷的給予支持

與鼓勵，才得以完成碩士學位，另外還有一位開心果，品萱寶貝女兒，
讓生活變得更有樂趣，與即將出生的兒子，全是我動力來源，真的非常
謝謝你們！



2011 年 12 月 於新竹 My Home 社區

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vii
圖目錄.....	x
表目錄.....	xiv
第一章 緒論.....	1
1.1 前言	1
1.2 LED 的演進與發展.....	3
1.3 LED 的應用	5
第二章 文獻回顧與理論背景研究	7
2.1 LED 的光取出原理.....	7
2.2 影響發光二極體之光取出效率	10
2.2.1 內部量子效率(Internal Quantum Efficiency)	12
2.2.2 光取出效率(Light Extraction Efficiency)	13
2.3 增加光取出率的方法	14
2.4 蝕刻溶液對基板之反應機制	21

2.5	GaN 光取出理論分析與模擬.....	23
2.6	濕式蝕刻 GaN 之蝕刻輪廓分析.....	25
2.7	發光二極體的製程技術	26
2.7.1	微影製程	26
2.7.2	金屬化製程	29
2.7.3	化學氣相沉積製程	32
2.7.4	合金製程	34
2.7.5	蝕刻製程	35
2.7.6	研磨製程	38
2.7.7	切割製程	40
第三章	SWE 製程對光取出效率提升之研究.....	43
3.1	研究動機	43
3.2	實驗流程 (SWE 製程).....	45
3.3	蝕刻溶液比例、溫度與時間參數	47
3.3.1	蝕刻溶液比例參數	47
3.3.2	溫度變化參數	48
3.3.3	時間變化參數	48
第四章	結果與討論	49
4.1	不同磊晶結構實驗	49

4.2	蝕刻溶液比例、溫度與時間參數對亮度的影響	51
4.2.1	蝕刻溶液比例的效果	51
4.2.2	溫度變化的效果	53
4.2.3	時間變化的效果	57
4.3	無 SWE 與 SWE 蝕刻製程亮度驗證	60
第五章 總結.....		63
參考文獻.....		65



圖目錄

圖 1-1 發光二極體的發展概況示意圖	5
圖 2-1 發光二極體之發光機制	8
圖 2-2 光子的自發放射過程	9
圖 2-3 (a)光在半導體內界面反射示意圖和(b)半球形 P 型區結構示意圖.....	12
圖 2-4 (a)平面晶片之光路徑和(b)有組織粗糙表面晶片之光路徑.....	14
圖 2-5 有表面組織 LED 截面圖	15
圖 2-6 光被有吸收性基板吸收	16
圖 2-7 用透明基板可以使光不被吸收再行放出	16
圖 2-8 在有吸收性基板上加反射鏡，DBR 也可將光自下反至上	16
圖 2-9 圖案化藍寶石基板 LED 結構圖	17
圖 2-10 傳統發光二極體封裝示意圖	18
圖 2-11 覆晶技術結構	19
圖 2-12 正向偏壓下的 TIP LED	22
圖 2-13 光子在內部反射的路徑橫截面	20
圖 2-14 GaN 蝕刻率	23
圖 2-15 Sapphire 蝕刻率	23

圖 2-16 為 LED 磊晶層側壁形貌對變化對光取出的影響示意圖.....	24
圖 2-17 為取出效率隨側壁傾斜角的變化.....	25
圖 2-18 微影的 8 個步驟.....	28
圖 2-19 顯影後光阻的典型影像.....	28
圖 2-20 熱阻式蒸鍍.....	30
圖 2-21 電子槍蒸鍍.....	31
圖 2-22 電漿濺鍍.....	31
圖 2-23 電漿 CVD 之薄膜形成.....	33
圖 2-24 LPCVD 系統.....	33
圖 2-25 PECVD 系統.....	34
圖 2-26 爐管設備.....	35
圖 2-27 RTP 設備.....	35
圖 2-28 等向性蝕刻的輪廓.....	37
圖 2-29 非等向性蝕刻的輪廓.....	37
圖 2-30 濕式化學蝕刻的機制.....	37
圖 2-31 電漿蝕刻方式.....	38
圖 2-32 研磨法.....	40
圖 2-33 切削法.....	40
圖 2-34 輪刀式.....	42



圖 2-35 鑽石式	42
圖 2-36 雷射式	42
圖 2-37 隱形切割概略圖	43
圖 3-1 SWE LED 之製作流程圖	47
圖 4-1 各層磊晶結構經 SWE 後之角度(a)SEM 分析圖(b)截面示意圖	49
圖 4-2 GaN 經 SWE 後之角度	50
圖 4-3 SWE Width 量測 (a)OM 圖 (b)SEM 圖 (c)截面示意圖	50
圖 4-4 在固定蝕刻時間及溫度條件，不同混酸比例下對切割道的蝕刻 寬度的差異	51
圖 4-5 在固定蝕刻時間及溫度條件，不同的混酸比例與亮度的關係	52
圖 4-6 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 5 : 2$ 、 240°C 、7min，SEM 分 析圖	52
圖 4-7 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、7min，SEM 分 析圖	52
圖 4-8 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 7 : 2$ 、 240°C 、7min，SEM 分 析圖	53
圖 4-9 在固定蝕刻時間及相同混酸比例，不同蝕刻溫度下對切割道的 蝕刻寬度的差異	54
圖 4-10 在固定蝕刻時間及相同混酸比例，不同蝕刻溫度與亮度的關	

係	54
圖 4-11 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 230°C 、7min，SEM 分析圖.....	55
圖 4-12 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、7min，SEM 分析圖.....	55
圖 4-13 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 260°C 、7min，SEM 分析圖.....	55
圖 4-14 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 260°C 、7min，金相顯微鏡及 SEM 分析圖.....	56
圖 4-15 在固定蝕刻溫度及相同混酸比例，不同蝕刻時間下對切割道的蝕刻寬度的差異	57
圖 4-16 在固定蝕刻溫度及相同混酸比例，不同蝕刻時間與亮度的關係.....	58
圖 4-17 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、2min，SEM 分析圖.....	58
圖 4-18 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、5min，SEM 分析圖.....	58
圖 4-19 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、8min，SEM 分析圖.....	59

圖 4-20 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、10min，SEM 分析圖.....	59
圖 4-21 Sapphire 表面吸光物質與不同蝕刻時間關係圖(a)2 分鐘 (b)5 分鐘 (c)8 分鐘	60
圖 4-22 SWE 清洗步驟示意圖.....	60
圖 4-23 SWE 清洗前後 SEM 圖片	61
圖 4-24 光受吸光物質(雷切結晶物)影響示意圖	61
圖 4-25 有無 SWE 對亮度的影響比較圖	62
圖 4-26 有無 SWE 發光影像差異。a. 有 SWE；b. 無 SWE.....	62



表 2-1 正、負光阻比較.....	29
表 2-2 乾、濕式蝕刻比較.....	37
表 3-1 LED 光之萃取效率方法比較	45
表 4-1 有無 SWE 對亮度的影響比較表.....	61

第一章 緒論

1.1 前言

人們的生活不斷地發展和需求，對自然環境大量的開發，以及世界各國對能源過度的使用，讓大自然環境不斷的被破壞，使得地球溫室效持續的惡化。這幾年來世界各地更飽嘗氣候變遷的惡果，頻繁的風災、水災和地震，而且規模一次比一次還大，這也說明了大自然反撲的力量！因此節能減碳的環保意識逐漸成為這世代的共識，而發展永續的綠色能源以及節能科技，更是當前首要的任務。

由於全球能源取得成本不斷攀升，能源的生產、開發，與消耗的速度出現落差，能源不敷使用的現況可能在十年內無法完全紓解，其中，全球大約 19% 的能源消耗，便是用於照明，若照明方面的能源消耗可以獲得大幅度的改善，對全球的能源問題，也能獲得緩解，而應用於生活各層面的白熾燈泡，其實發光效率有限，若可改用效能更高的替代方案則勢在必行。

自古以來，照明用光源的演化一直是代表人類文明進步的象徵之一。從使用火炬、油燈到今日的電燈和日光燈，使用的光源越來越便

捷、安全、舒適和穩定；進入 21 世紀之後，人民的生活水準將繼續提升，現今的人們在享受先進科技的同時，將要考量到能源成本的問題，因此各項電子產品的設計，除了要能符合基本功能外，更要朝著輕、薄、短、小、高效率並且附帶環保價值之目標邁進。因此，選擇無污染顧慮的材料製作新光源，加速提升其發光效率，增進其應用功能，已成為現代化政府不容忽視之要務之一。

新一代的照明光源發光二極體(Light-Emitting Diodes, LEDs)，目前在各項技術上皆有重大突破，最關鍵的時間點在 1996 年日本開發出以藍光 LED 為基礎的白光 LED，正式揭開照明光源新應用。近年來由於磊晶技術及品質不斷的改善，大大的提升內部量子效率，而光萃取效率的問題也因元件設計和封裝的關係，有了很大的提升，使得量產之產品化的 LED 發光效率早已超過 100 lm/W，此發光效率已經可以取代傳統照明燈源。

LED 是由化合物半導體製作而成的發光元件，經由電子與電洞之結合，可將電能轉換成光的形式釋出。它不同於一般的白熾燈泡，其優點有省電節能、壽命長、無須暖燈時間、反應速度快和環保優勢的固態冷光源 LED，再加上其體積小、耐衝擊、適合量產，容易配合應用上的需求而製成極小型式或陣列式的元件。

因此 LED 在應用端所扮演的角色越來越重要，如常見的手機背

光源、汽車照明、大尺寸顯示器背光源等應用，甚至在未來的 LED 一般照明與緊急照明等商品應用，LED 的規模與潛在商機，帶給市場無限的想像空間。展望未來，LED 照明應用將成為帶動高亮度 LED 產業成長的主要動力之一。因此，高效率、高亮度之 LED 在未來市場上的需求將持續增加，而如何提升 LED 元件各方面的效能，以滿足未來所需是現階段重要的研究課題。

1.2 LED 的演進與發展

發光二極體(Light Emitting Diode, LED)是一種由半導體技術所製成的光源，是繼 1950 年代 Si 半導體技術發達後，逐漸於 III-V 族化合物半導體發展而成。LED 的發光原理係利用半導體中的電子和電洞結合而發出光子，和傳統使用電阻加熱發光的燈泡，或者真空管放電的日光燈，基本上有很大的不同。

LED 的製作過程和製作矽晶圓 IC 相似，首先，使用超高純度的鋁、鎵、銦(即元素週期表中的 III 族元素 Al、Ga、In)和氮、磷、砷(V 族元素 N、P、As)為材料，於高溫下反應成化合物，經單晶生長技術製成單晶棒，切割、研磨、拋光成晶片作為基板，再使用磊晶技術將發光材料生長於基板上，完成之磊晶片經半導體黃光、蒸鍍和蝕

刻製程，細切加工成 LED 晶粒。

由於電子和電洞結合所放出的光子能量因材料而異，因此 LED 的發展史事實上相當於一部材料開發史，並且和材料的製作技術的精細化息息相關。LED 於 1970 年代開始商品化，首先使用氣相磊晶法 (HVPE) 將 GaAsP 磊晶生長於 GaP 基板上，製成橘紅色 GaAsP/GaP 系 LED；接著於 1980 年代進入 GaAs 和 AlGaAs 等材料系列，可製成高亮度紅色和紅外 LED，生產方式以液相磊晶法 (LPE) 為主；至 1990 年代，進一步以 AlGaInP/GaAs 和 InGaN/GaN 等材料系列為主，發光效率都超過高亮度標準，波長自長而短，顏色涵蓋所有可見光範圍，以 550nm 綠光為分界，長波段的黃、橘、紅光 LED 以 AlGaInP/GaAs 材料製成，而短波的藍綠、藍光 LED 則以 GaInN/Sapphire 或 GaInN/SiC 材料製作，生產技術都以有機金屬氣相磊晶 (MOCVD) 為主。如圖 1-1 為發光二極體的發展概況之示意圖：

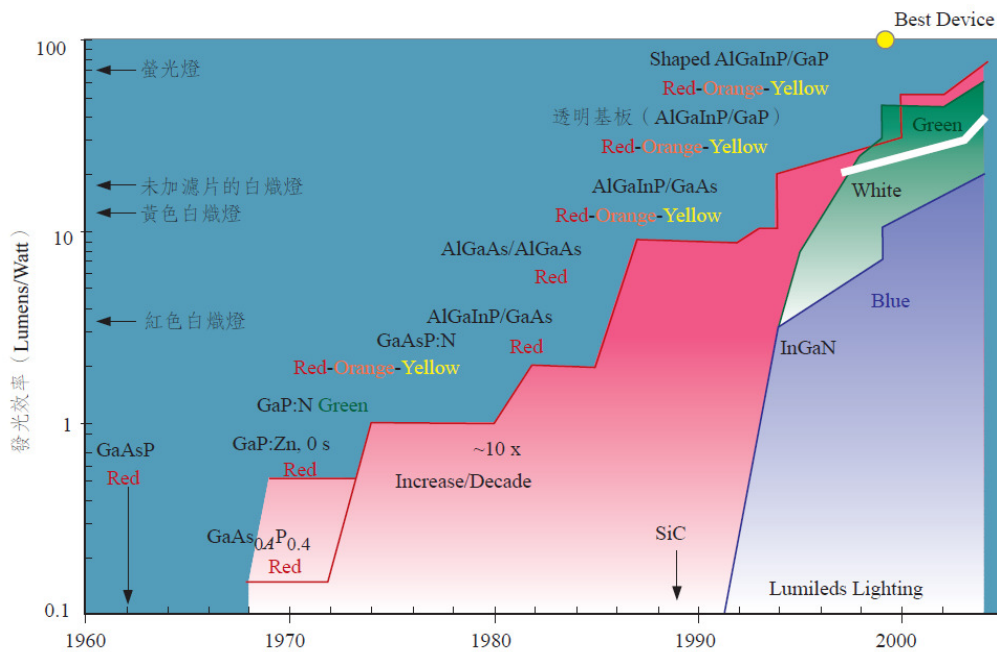


圖1-1 發光二極體的發展概況示意圖[2]

1.3 LED 的應用

LED 晶粒尺寸小，顏色選擇性多，應用時排列組合的方式有很大的彈性，配合各式各樣的應用需求，也發展出多樣化的封裝型式。單顆 LED 最常見的封裝為頭部成子彈形或方形，加上兩隻細長的金屬接腳，廣泛使用於各項電器產品裡。近來，配合輕薄短小的電子產品，各種表面黏著型 LED 應運而生，以其下表面的鉅材取代金屬腳，可以直接固定於 PC 板上，尺寸可小到 0.5 公分以下，可被放置在手機按鍵或螢幕的背光源裡。此外，配合特殊需求，將數顆或數十顆 LED 組裝在一起，做成使用於表示阿拉伯數字、跑馬燈及室內顯示

幕；若組合多個小燈而成的 LED 大燈，則可使用於戶外大型彩色顯示幕、高速公路上的交通指示板等；另外，組合 40 顆紅光 LED 經歷而成的直線陣列，體積小，光度強並集中，且可個別點燈，則是常用於雷射印表機等精密光學機具中。

因為 LED 色彩純正，以三原色的 LED 當背光源時，TV 的色彩飽和度可達 NTSC100 以上，傳統的電視或使用 CCFL 當背光源時，只能達 NTSC70 左右，因此 LED 背光可讓 TV 的色彩更加豐富和自然，大幅提升其附加價值。

LED 在汽車上的各種車燈應用，是非常成功。最先使用於第三煞車燈，由於 LED 的點燈速度可達奈秒級水準，較傳統秒級的燈泡型燈具，可提供高速行駛的車輛駕駛人比較長的緊急煞車時間，大幅提高安全保障。另外，LED 也成為駕駛盤儀表板、方向燈或煞車燈的主流光源，車用傳統燈具大都以燈泡加蓋濾光罩，改用 LED 後除了可省電和減輕保養負擔外，還可將燈盒厚度大幅縮小。而且 LED 體積小，車燈設計的自由度擴大，透過各色 LED 組合，各種酷炫的設計，很容易吸引使用者，若再增加點亮時間控制的適當安排，則可以提高產品之附加價值。

交通號誌應用方面，LED 消耗的電力只有傳統燈泡的 10~15%，加上壽命可增長 10 倍，儘管 LED 的期初設置成本高出許多，使用約

2 年後，所節省的電費和維護費就足以回本了，因此逐漸被世界各地廣泛使用。

隨著 LED 的亮度逐年提升，過去只能在室內使用的各種顯示功能，逐漸擴大到各種戶外應用，很多只能使用燈泡的場合，又多了一種選擇機會。但目前 LED 的實際應用範圍仍僅限於所謂的特殊照明，離一般照明應用還有一段距離，主要原因為白光 LED 的效率和價格之改善速度太慢，亟需各國政府大力投入，才能加速研發的腳步。

第二章 文獻回顧與理論背景研究



2.1 LED 的光取出原理

LED 是利用電能直接轉化為光能的原理，在半導體內正負二個端子施加電壓，當電流通過，使電子與電洞相結合時，剩餘能量便以光的形式釋放，依照使用的材料不同，其能階高低使光子能量產生不同波長的光，人眼所能接受到各種顏色的光。

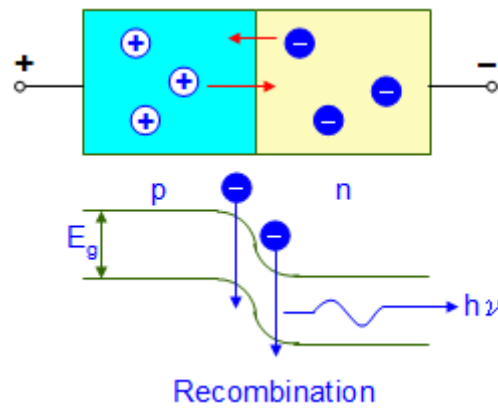


圖 2-1 發光二極體之發光機制

進一步說明，發光二極體將電能轉換成光能，成為可見光或部分紅外光的光能而輻射出來，然而輻射能量的轉換發生於兩個階段：首先，施加電能使得半導體中的載子能量高於平衡狀態時的值，這些載子在更高的能階狀態下以光子自發輻射的狀態釋放出能量，這些能量相當於半導體能隙 E_g 的大小。對於均勻摻雜的 n 型與 p 型半導體物質，當這兩接面結合時會形成一個 p-n 接面，在 p-n 接面提供一個順向偏壓時，電流載子的能量增加，在順向偏壓下少數載子注入接面的兩側，且這些多餘的少數載子(Excess Minority Carriers)會擴散至接面與多數載子復合，這就是整個自發放射(Spontaneous Emission)的過程。如圖 2-2 所示為光子的自發放射過程示意圖。

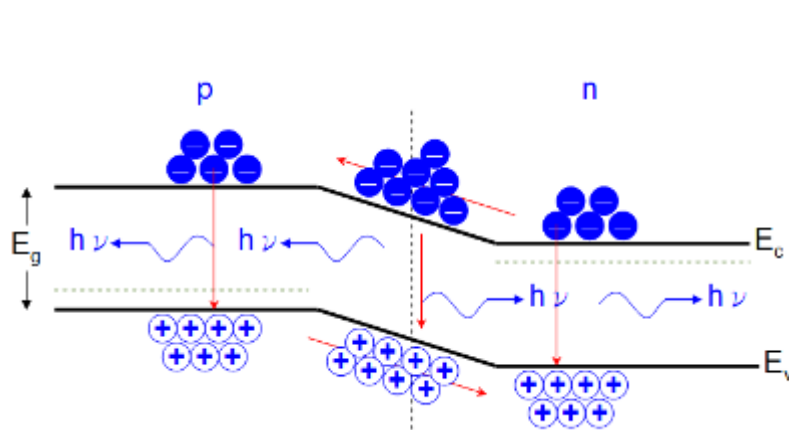


圖 2-2 光子的自發放射過程

在接面兩側被注入的少數載子會與多數的主要載子輻射復合而產生頻率為 ν 的光子，關係式如下：

$$h\nu = E_g$$

另外，少部份的少數載子則會以非輻射的方式復合，而這些載子的能量則以熱的形式消失在晶格中。輻射復合的比率正比於順向偏壓的注入比例，儘管有部分的少數載子擴散至遠離接面的區域而發生復合，但大多數的復合作用還是發生在接面邊界。依照這種方式，二極體的順向電流流動是依靠少數載子的注入，而被注入的少數載子則在該區域與多數的主要載子進行復合而放出能量。當施加逆向偏壓於發光二極體時，橫過空乏區不會發生載子注入的情形，因此也不會有光的放射。少數載子與多數主要載子復合放出的能量和光的關係可由下式表示：

$$E_\lambda = h\nu \quad (E_\lambda \text{ 為電子電洞所放出的能量})$$

在實際發光二極體， E_λ 會隨著所使用物質的能隙和使用情況而不同，以及摻雜種類和摻雜的含量不同， E_λ 的值也會有些微的差異性，因此所釋放出之光子波長的均一性會有所不同。

2.2 影響發光二極體之光取出效率

LED的輻射發光效率(Radiant Efficiency, η_R)又稱功率轉換效率(Wall-Plug Efficiency, η_{wp})，是光的輸出功率與輸入電流功率之比。

$$\eta_{wp} = \eta_{ext} \times \eta_v$$

η_{ext} ：外部量子效率(External Quantum Efficiency)

η_v ：電壓效率

η_{ext} 外部量子效率等於內部量子效率(Internal Quantum Efficiency, η_{int})乘以光取出效率(Extraction Efficiency, C_{ex})。所以 $\eta_{wp} = \eta_{int} \times C_{ex} \times$

η_v ，內部量子效率是光子的數目與電子電洞結合的數目比，因此 $\eta_{int} = (P_{opt}/hf)/(I/q)$ ； $\eta_v = hf/qV$

$$\eta_{int} = (P_{opt}/hf)/(I/q) ; \eta_v = hf/qV$$

$$\text{故 } \eta_{wp} = (P_{opt} \times C_{ex}) / (IV)$$

P_{opt} ：光輸出功率

I ：電流

V ：電壓

h ：Plankian係數

f ：頻率

q ：電荷

因此，在輸入功率一定的情况下，要改進電光轉換效率就要改進內部量子效率和提高光取出效率。

一般平面結構的LED成長在具有光吸收的基板上，並以環氧樹脂做圓頂形封裝，此種結構光取出效率可能低至4%左右。主要原因：一是電流分佈不當以及光被材料本身吸收；二是光不易從高折射率的半導體傳至外圍低折射率的空氣。

影響光取出效率有三個原因：

一.材料本身的吸收：要減少本身材料吸收及電流分佈不當而產生的損失：1.厚的窗口層(Window Layer)或電流分佈層使電流均勻分布並增大表面透過率；2.用電流堵塞(Current Blocking)技術，使電流不在電接觸區域下通過；3.用透明或不吸光的材料做基板或者在活性層下設置反射鏡將光反射至表面。

二.Fresnel損失 η_{Fr} ：當光以折射率為 n_1 的某種物質到折射率為 n_2 的某種物質時，一部分光會被反射回去，那麼Fresnel損失係數為： $\eta_{Fr}=4/(2+n_1/n_2+n_2/n_1)$ ；若 $n_1=3.4$ ， $n_2=1$ ，則 $\eta_{Fr}=0.702$ ，也就是70.2%的光可以穿透半導體與空氣的介面。

三.全反射角(Critical Angel)損失 η_{Cr} ：只有小於臨界角內的光可以完全被射出，其他的光則被反射回內部或吸收。因此臨界角 $\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ ；若 $n_1=3.4$ ， $n_2=1$ ，則 $\theta_c=17^\circ$ 。解決方法，一般情況下是用環氧樹脂做成圓頂，放在LED晶片上，可以大大增加臨界角，但是製造成本同時會增加。

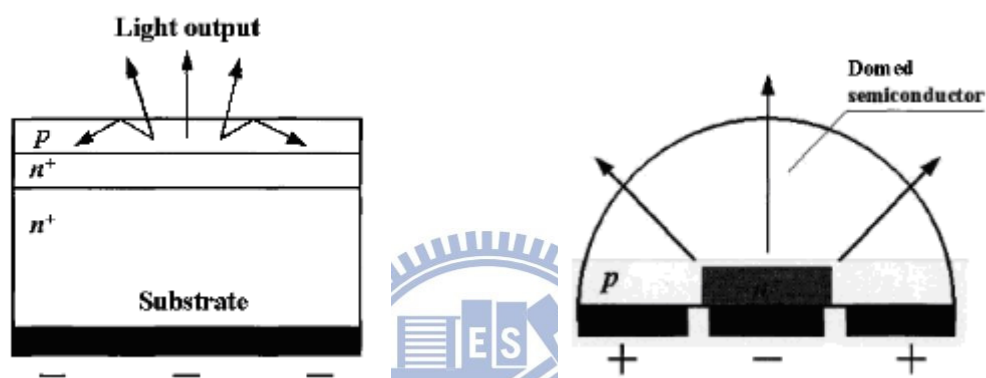


圖2-3 (a)光在半導體內界面反射示意圖(b)半球形P型區結構示意圖

2.2.1 內部量子效率(Internal Quantum Efficiency)

當元件受到外界偏壓後，首先於電極介面產生電子流和電洞流，並受電場影響朝發光層移動，流至發光層附近時，受到所設計之電子和電洞侷限層所產生的高能障所阻擋，大量電子和電洞會掉入發光層中的量子井層，使該薄層內之電子/電洞密度超高，讓二者很容易找到對象結合而放出光子，若以產出的光子數除以電子或電洞數，結果被稱為內部量子效率(Internal Quantum Efficiency；或簡稱 IQE)，可表

現 LED 磊晶材料及結構之優劣。

內部量子效率(η_{int})其定義為：每秒從發光層放射出的光子數與每秒輸入 LED 元件的電子數之比值，理想的 LED 主動區中，每個注入的電子復合後會放射出一個光子(因此理想比值為 1)，其數值的大小主要是由磊晶的品質來決定的。

2.2.2 光取出效率(Light Extraction Efficiency)

光子在發光層產生後，開始於 LED 晶粒材料中傳播，受到傳播介質的光學作用之影響，最後部分光子逃離 LED 晶粒，而部份光子經多次反射，最終被晶粒材料吸收，變成其熱能；若以逃出品粒的光子數除以發光層產出的總光數，結果被稱為光取出效率(Light Extraction Efficiency；或簡稱 LEE)，可表現晶粒形狀和結構之優劣。

光取出效率(C_{ex})定義為射出元件外部(即外界，空氣中)之光子數與發光層(主動區)產生的光子數目之比值，在理想的 LED 中，當主動區內載子復合成光子後，這些光子若能全部輻射至外界，那這個 LED 的光取出效率(Light Extraction Efficiency)也是百分之百，然而實際上，主動區所產生的光子可能會因為各種損耗機制，無法百分之百傳播到外界。

2.3 增加光取出效率的方法

如何提高光取出效率則是目前發展高亮度高功率發光二極體的瓶頸，主要概念還是藉由結構及材料的改變來減少發光層產生的光在二極體內部的損耗，依製程大致可分為：

1. 有表面纖狀結構或粗糙面：

目的是增加光之射出面，原理主要是藉由表面粗糙的結構來減少全反射的發生，利用光的射出路徑增加光子逃脫機率，進而提高元件的發光亮度[8]。

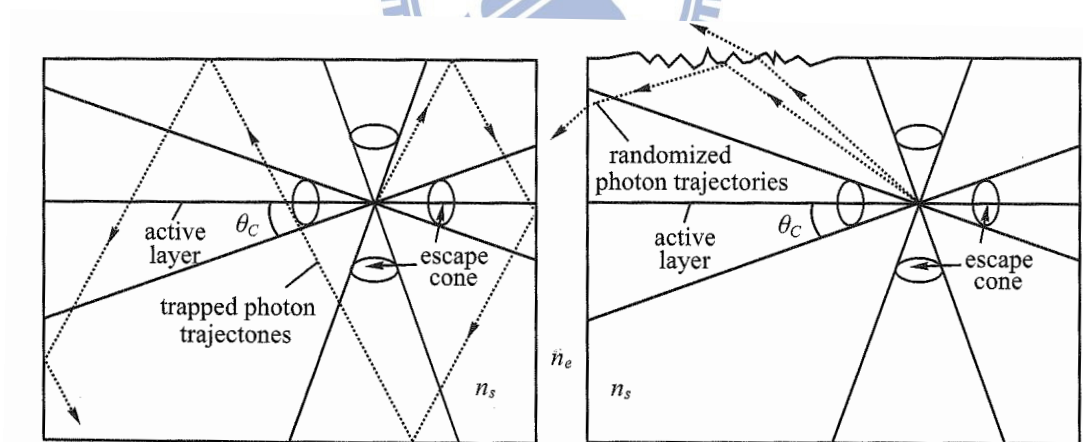


圖 2-4 (a)平面晶片之光路徑 (b)有組織粗糙表面晶片之光路徑

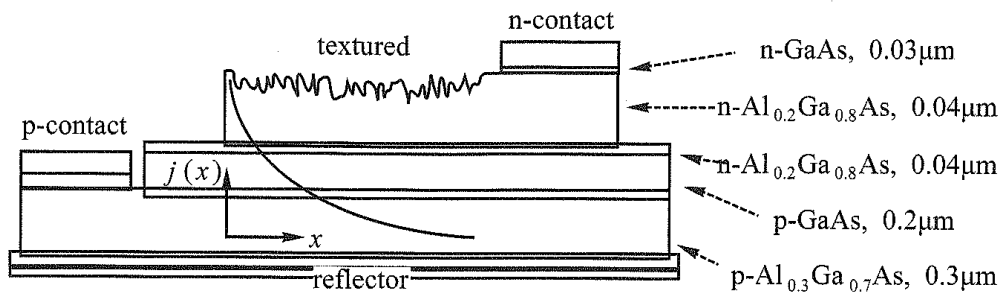


圖 2-5 有表面組織 LED 截面圖

2. 用透明基板或反射鏡[28]：

一般有光吸收的基板，很多光會被基板吸收減少光輸出，圖。若是用透明基板可以減少光被吸收，但透明基板製作不易而且成本高，所以大部分在有光吸收的基板上加反射鏡。反射鏡有很多種，一般用高反光金屬材料，例如：Al、Ag、Pt 等，可使二極體所發出的光不會被吸收，因此被應用來當光的反射層使用。另外一種則是用 DBR(Distributed Bragg Reflector)用多層 $\lambda/4$ 厚不同折射率的材料做成反射鏡。它的結構是利用不同折射率的材料多層交錯堆疊而成，利用折射率的週期性變化，讓入射處形成建設性干涉，因而形成很高的反射率。

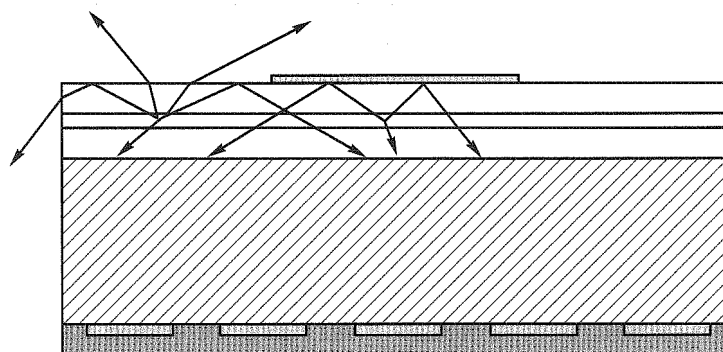


圖 2-6 光被有吸收性基板吸收

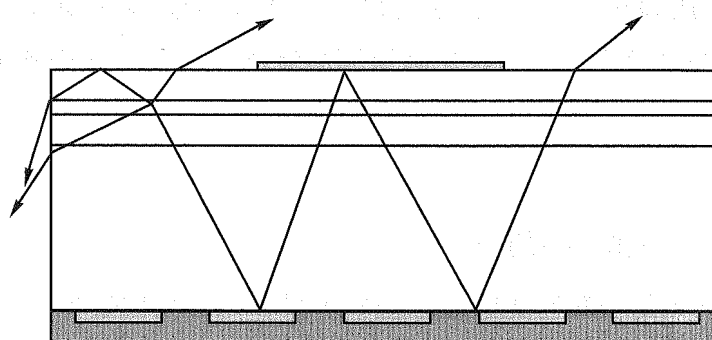


圖 2-7 用透明基板可以使光不被吸收再行放出

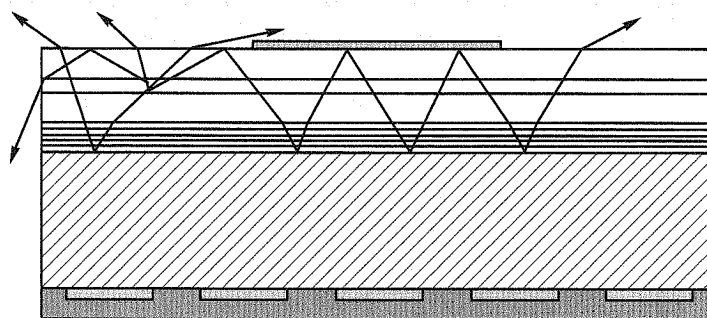


圖 2-8 在有吸收性基板上加反射鏡，DBR 也可將光自下反至上

3. 圖案化藍寶石基板：

Patterned sapphire substrate(PSS)是近年來才發展出，可以同時增

加內部量子效率和光取出效率的方法[9] [18]。將藍寶石基板表面利用乾式或濕式蝕刻作成圖案，藉由表面上形成規則的凹凸的形狀，破壞光在二極體內部的反射路徑，減少全反射的發生，將光子的路徑導引至逃脫角內，讓從量子井(MQW)產生的光可以比較容易被取出，進而增加元件的發光強度[19] [20] [22]。

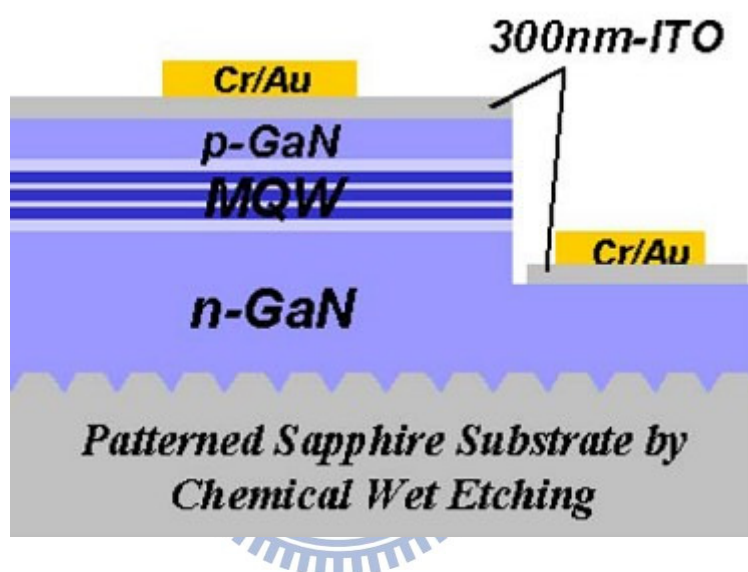


圖 2-9 圖案化藍寶石基板 LED 結構

4. 覆晶技術：

一般傳統 GaN LED 的封裝方式，是使用磊晶面向上的封裝方式，讓元件的發光效率主要是由上部取出的光決定，通常 p-GaN 上接觸電極面積的設計都很大，因為要使主動區能有均勻的電流分佈，所以大面積的電極面積會阻擋光的射出，圖為傳統發光二極體封裝，因為電流分散層(Current Spreading Layer)及導線大多為吸光材料，使得元件所發出的光會有一部分被吸收，造成發光強度下降。

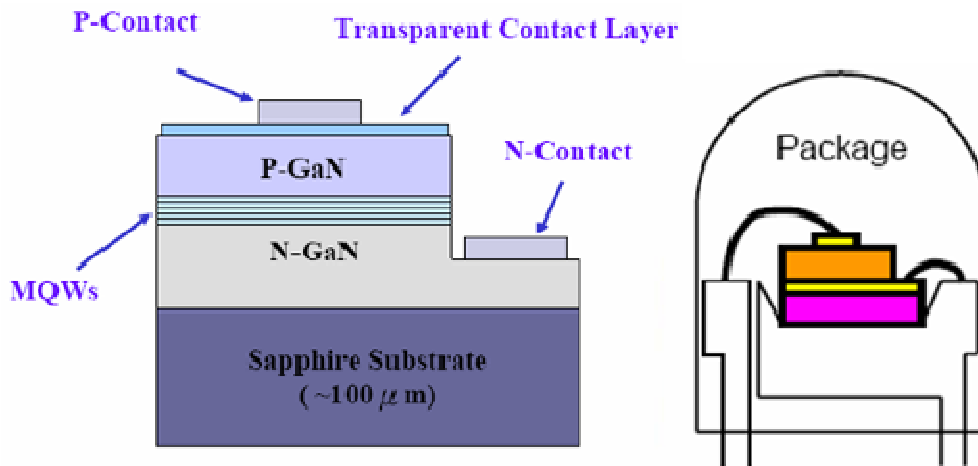


圖 2-10 傳統發光二極體封裝示意圖

覆晶技術則是讓光可以從透明的藍寶石基板取出而提升元件的發光亮度，GaN LED的全反射臨界角過小，光會發生全反射的機率很大，所以大部分的光都在GaN/Air介面被反射回去，再次被主動層或其他因素所吸收，故外部量子效率很低，如果光改由折射係數與空氣較接近且透明的藍寶石基板($n_{\text{Sapphire}}=1.785$)那一面射出，則Sapphire/Air界面的臨界角會比GaN/Air界面大，因此可增加光出量，改善外部量子效率低的問題，圖2-11為覆晶技術結構圖。

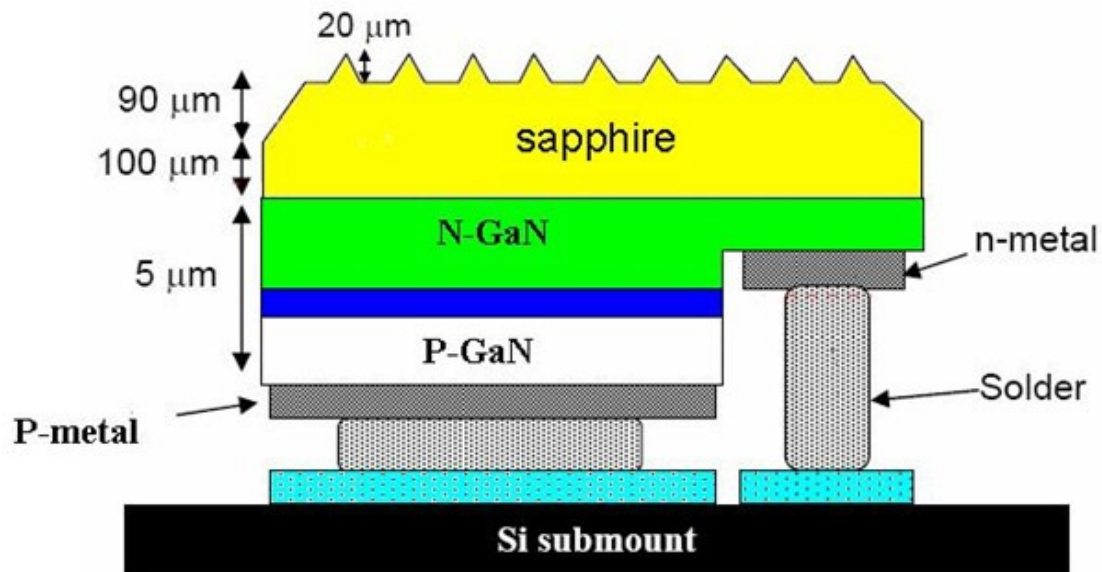


圖2-11 覆晶技術結構[4]

5.幾何形狀改變之結構：

一般 LED 多用平面正方形或長方形的結構，但這些結構容易製造卻也限制了光的輸出。因為一般半導體材料折射係數與封裝環氧樹脂的差異大，而使交界面全反射臨界角小，而矩形的四個截面互相平行，光子在交界面離開半導體的機率變小，讓光子只能在內部全反射直到被吸收殆盡，使光轉成熱的形式，造成發光效果更不佳。

因此，改變 LED 形狀是一個有效提升發光效率的方法。HP 公司所發展的 TIP(Truncated Inverted Pyramid)型晶粒結構，4 個截面將不再是互相平行，而光就可很有效地被引出來，外部量子效率則大幅提升至 55%。

然而 HP 的 TIP LED 只適用在易於加工的四元紅光發光二極體上，對於使用硬度極高的藍寶石(Sapphire)基板之 GaN 系列發光二極體而言有相當的困難。2001 年初，Cree 公司用同樣的結構，挾著其基板是 SiC 的優勢，也成功將 GaN/SiC 發光二極體同樣作成具有斜面之 LED，並將外部量子效率大幅提昇至 32%。

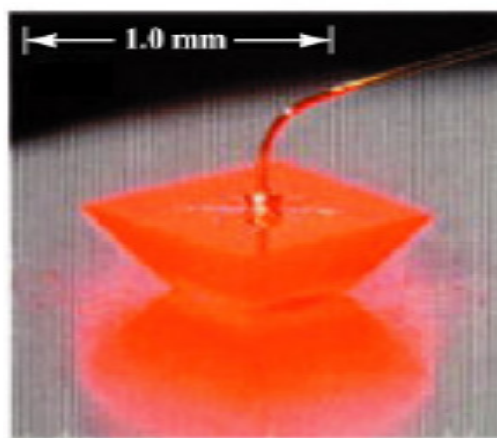


圖 2-12 正向偏壓下的 TIP LED[5]

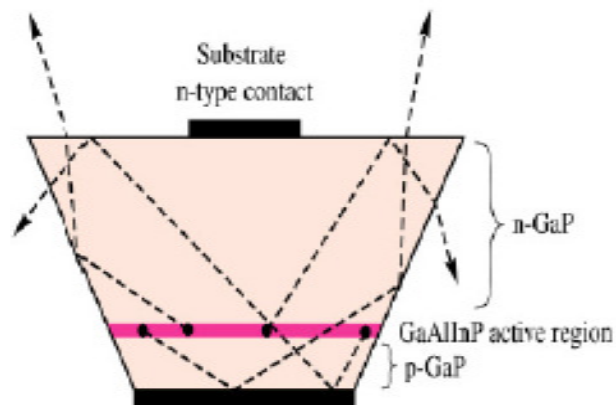
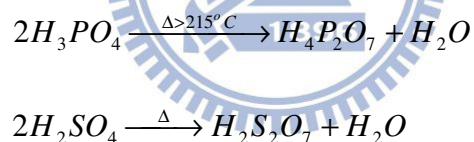


圖 2-13 光子在內部反射的路徑橫截面

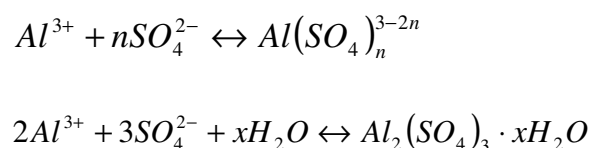
2.4 蝕刻溶液對基板之反應機制

藍寶石基板是由 Al_2O_3 所組成，Al 與 O 彼此之間鍵結很強，導致藍寶石基板結構緻密而且性質穩定，使用化學溶液與其他常用的製程溫度均無法進行有效的蝕刻，通常需使用硫酸(H_2SO_4)或磷酸(H_3PO_4)且在，高溫($>200^\circ C$)才能有效的進行蝕刻[2]。磷酸在低於 $200^\circ C$ 下的蝕刻現象較為明顯，當溫度高於 $200^\circ C$ 以上時，純硫酸的蝕刻速度明顯的比磷酸快上許多。酸液由 $200^\circ C$ 的加熱至 $300^\circ C$ ，蝕刻速率有近千倍的差距。這是因為當溫度超過硫酸或磷酸的沸點時，會讓蝕刻液產生脫水(Dehydrate)的效果：



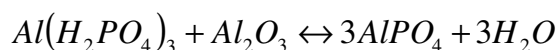
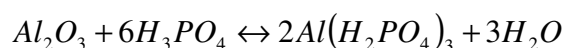
因此脫水的現象會讓蝕刻溶液的酸度(Acidity)增加，進而增加蝕刻溶液對藍寶石基板的蝕刻速度，此現象尤其對屬於弱酸性且蝕刻速率較低的磷酸更為明顯。因此，使用純磷酸需特別注意溫度對於蝕刻速率的影響。

Sapphire 基板在高溫下與純硫酸的反應式為：



和純硫酸的蝕刻反應最終會形成 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ 的固態沉澱物，這些固態的硫酸鋁沉澱物在反應過程中會隨機沉澱分佈於藍寶石基板的表面，在化學反應的過程中扮演著蝕刻阻擋層的角色，導致藍寶石基板表面有多邊形角錐的出現。

Sapphire 基板在高溫下與純磷酸的反應式為：



磷酸在藍寶石的蝕刻過程中，會特別針對表面缺陷進行蝕刻的動作，與純硫酸反應不同的是，純磷酸與藍寶石反應後並不會有固態沉澱物產生，反應過程中所產生的 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 和 AlPO_4 皆可溶解於磷酸中[31]。

圖 2-14、圖 2-15 為磷酸與硫酸溶液分別對 GaN 與 Sapphire 之蝕刻率[15]。

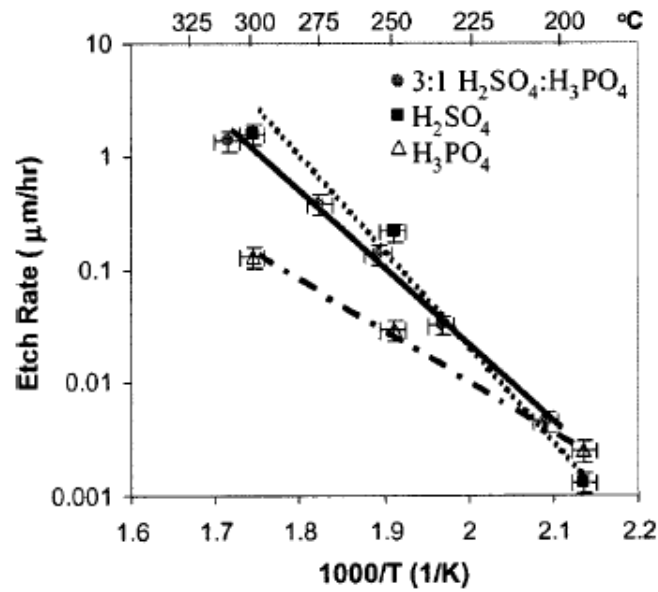


圖 2-14 GaN 蝕刻率

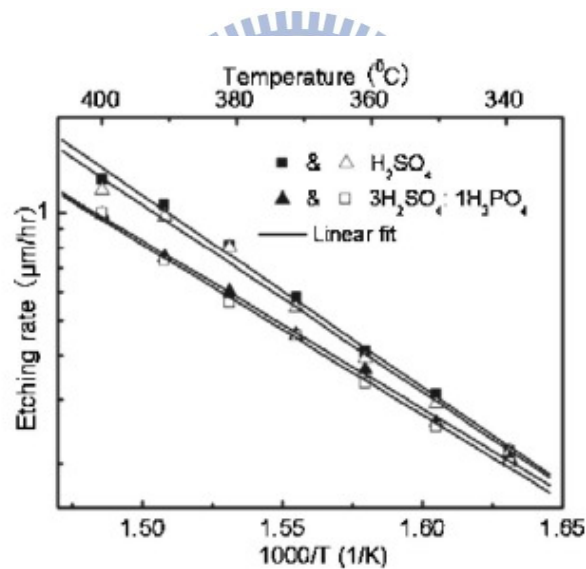


圖 2-15 Sapphire 蝕刻率

2.5 GaN 光取出理論分析與模擬

LED 的發光效率是最重要的一項技術指標，進一步提高其發光效率是 LED 走向通用照明領域的必經之路，也是目前 LED 產業面臨

的一項最大的技術難題。由於 GaN 折射率 n 值約 2.5 導致光在材料內部多次全反射影響元件發光效率。由圖 2-16 可知，矩形結構的 LED 幾乎將出射角大於全反射臨界角的光線全部限制在元件內部，所以將 LED 元件的側面做成斜面可有效地減少元件與空氣界面處的全反射，使更多的光以更短的距離傳輸出去。經驗證，當基板側面以傾斜角方式，光的萃取效率可以達到 20% 以上，有機會提高了 LED 的萃取效率和出光效率。

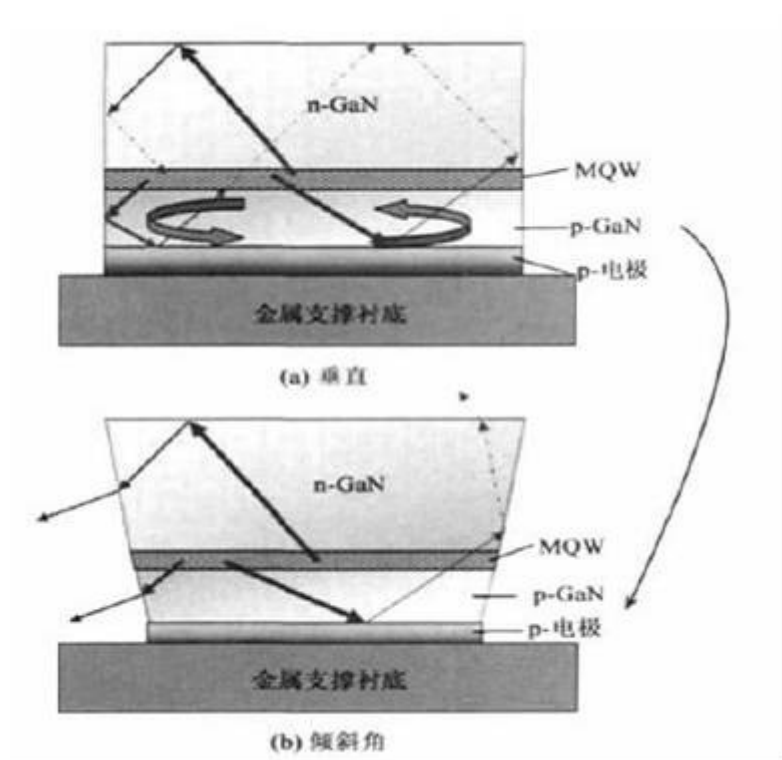


圖 2-16 為 LED 磊晶層側壁形貌對變化對光取出的影響示意圖

採用光線追蹤方法對具有不同傾斜角的 LED 萃取效率進行模擬計算。模擬元件尺寸為 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ ，傾斜角在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之

間變化時，取出效率 η 的變化如圖 2-17 所示。由圖可以看出：隨著側壁傾斜角 θ 變化，取出效率有明顯變化，傾斜角達到 35° 以上時，取出效率與 30° 時相比大大提高， $40^\circ \sim 45^\circ$ 時基本達到飽和，傾斜角大於 45° 則增加製造難度，並且對取出效率的提高作用不明顯。 45° 傾斜角側壁比垂直側壁(傾斜角為 0)提升超過 20% 以上。[32]

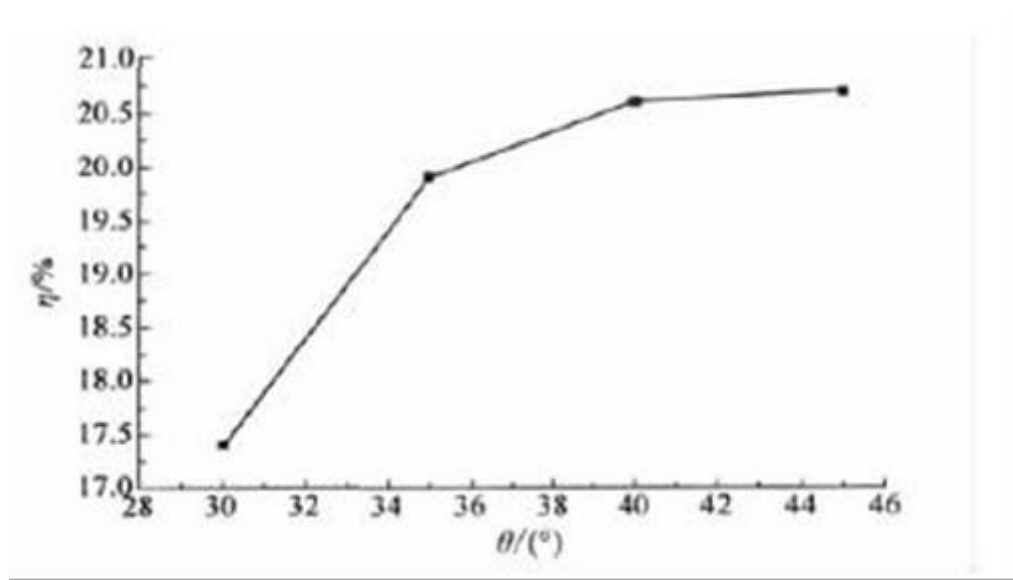


圖 2-17 為取出效率隨側壁傾斜角的變化

2.6 濕式蝕刻 GaN 之蝕刻輪廓分析

GaN 是由鎵 (Ga) 原子與氮 (N) 原子以六方 (hexagonal) 最密堆積而成。我們利用下列向量夾角計算公式求證，如式(1)表示：

$$\cos \phi = \frac{hd + ke + \frac{1}{2}(he + kd) \frac{3}{4} \lg \left(\frac{a}{c} \right)^2}{\left[h^2 + k^2 + hk + \frac{3}{4} \ell^2 \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[d^2 + e^2 + de + \frac{3}{4} g^2 \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \dots(1)$$

[hkil]與[defg]是 Miller-Bravais index 中的任意向量； Φ ：此兩個向量的夾角($a=3.189\text{\AA}$ ， $c=5.185\text{\AA}$)。計算可得[10-10]與[10-1-2]的夾角為 46° [15]，故[10-1-2]與[0001]夾角則為 44° 。

2.7 發光二極體的製程技術

半導體元件製程是藉由一系列複雜的物理及化學反應而形成。後續將介紹發光二極體常用之製程技術的概念和方法。

2.7.1 微影製程

微影的目的是在晶圓上印製臨時的電路結構以用於往後的蝕刻及電極製作製程。主要是利用光敏的光阻材料均勻塗佈在wafer上，及控制曝光量而在晶圓上產生三維的圖案。黃光製程分成下列8個步驟[27]：

1. 氣相塗底：晶圓的表面經由濕式清洗及DI水洗淨用來去除污染物，接著去水烘烤是在密閉的反應室中進行，去除晶圓表面的水氣，隨即以hexamethyldisilazane(HMDS)進行塗底來提升附著力。
2. 旋轉塗佈：利用真空平盤吸附固定晶圓，將液態光阻滴在晶圓上，並使晶圓旋轉讓光阻能塗佈均勻。
3. 軟烤：用來去除光阻內大部分溶劑，軟烤製程可改善附著性，提升晶圓上光阻的均勻性且在蝕刻中會有較佳的線寬。一般使用溫度在90~100℃，時間為30秒。
4. 對準及曝光：將光罩及塗佈上光阻之晶圓在適當位置對準，對準後光罩和晶圓曝於UV光下，使光罩影像轉移至塗有光阻的晶圓。UV光能使光阻的光敏化合物活化。
5. 曝光後烘烤：光阻曝後烘烤溫度在100~110℃間。
6. 顯影：將光阻上可以溶解的區域用顯影液的化學物質溶解。
7. 硬烤：此目的主要使剩餘的光阻溶劑揮發及提升光阻對晶圓表面的附著力。硬烤溫度約120~140℃。
8. 顯影後檢視：檢查光阻圖案的品質，發現光阻品質有問題或製程特性有異常則立刻加以改善，並可將光阻去除進行重工。

微影製程所使用的光阻，可分為正光阻和負光阻，一般LED將負光阻用在Lift-off製程。

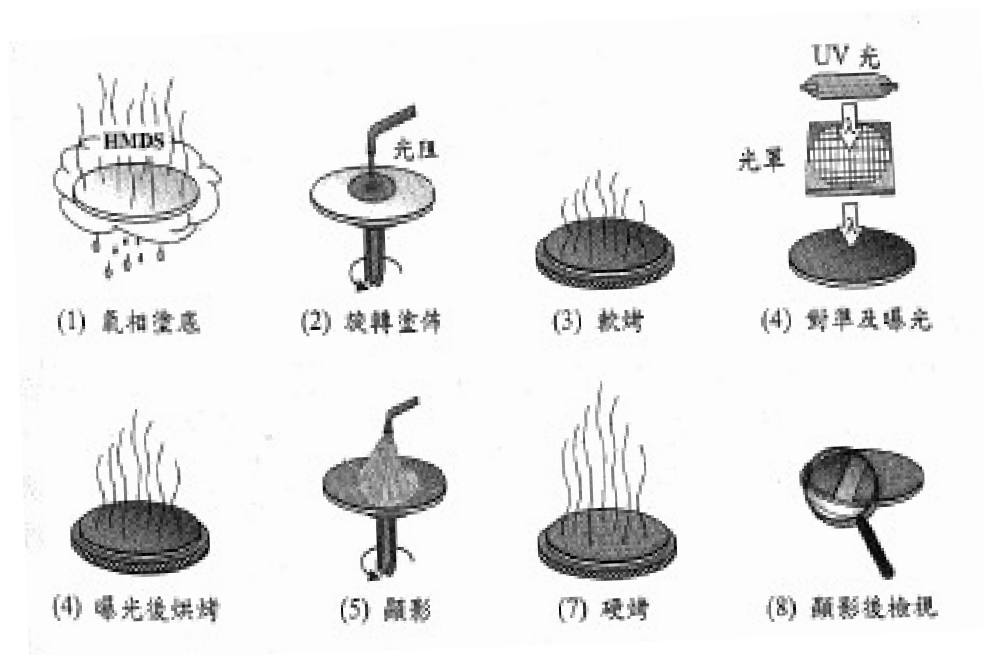


圖2-18 微影的8個步驟

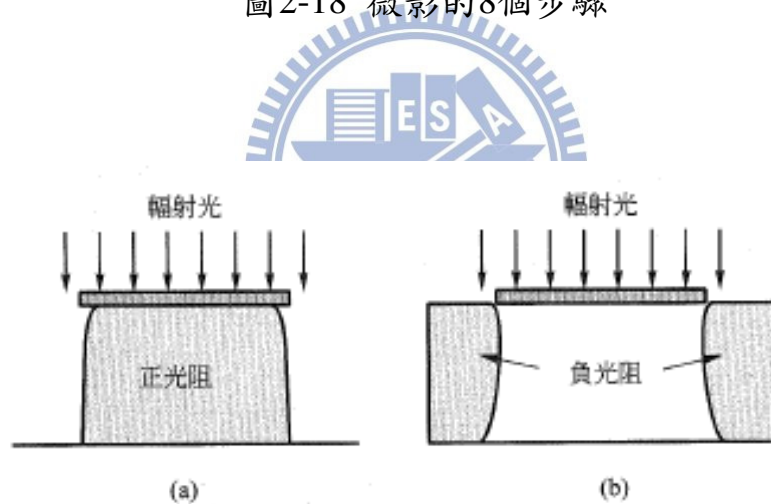


圖2-19 顯影後光阻的典型影像

	Negative Photoresist	Positive Photoresist
成分	(酚醛或環氧樹脂)本身易溶於顯影劑	(聚異戊二烯橡膠)光阻本身難溶於顯影液
照光反應	照光後產生鏈結(曝光聚合)	照光後解離成小分子，可溶於顯影劑(曝光分解)
特性	較適合使用lift-off製程	解析度較好

表2-1 正、負光阻比較

2.7.2 金屬化製程

金屬化製程常見的有三種：熱阻式蒸鍍；電子槍蒸鍍及電漿濺鍍。

1. 熱阻式蒸鍍：只適合用於熔點較低的金屬，當系統被抽真空到 10^{-6} Torr高真空下，將大電流流過裝有金屬的陶瓷坩鍋或鎢舟，因溫度很高所以金屬會被蒸發而使金屬蒸鍍到金屬上。
2. 電子槍蒸鍍：系統抽真空到 10^{-6} Torr高真空下，將電子束加速、引導撞擊坩鍋內的金屬，坩鍋內的金屬因電子束撞擊被加熱而蒸發，因此金屬可蒸鍍到金屬上。
3. 電漿濺鍍：在電漿中形成離子化的氬氣體，氬作為濺鍍離子源主要是因為氬氣是相當重並且為化學性鈍氣，可避免和成長薄膜或靶材

反應。當高能量的電子撞擊中性的氬氣，將外圍電子撞擊移出，形成帶正電的氬離子，此粒子撞擊負電位的靶材，則可將金屬濺擊出。

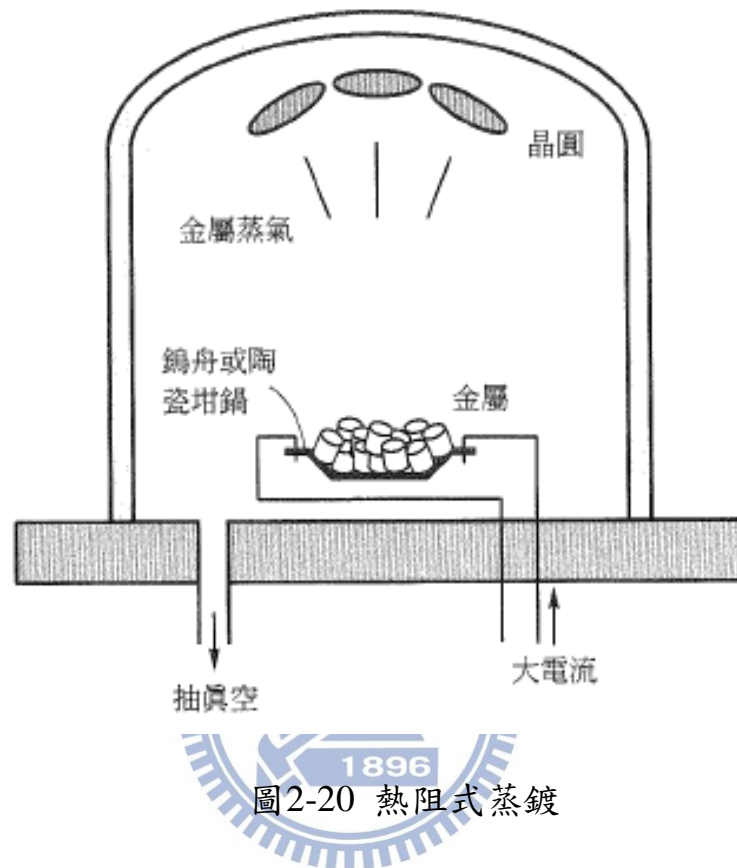


圖2-20 熱阻式蒸鍍

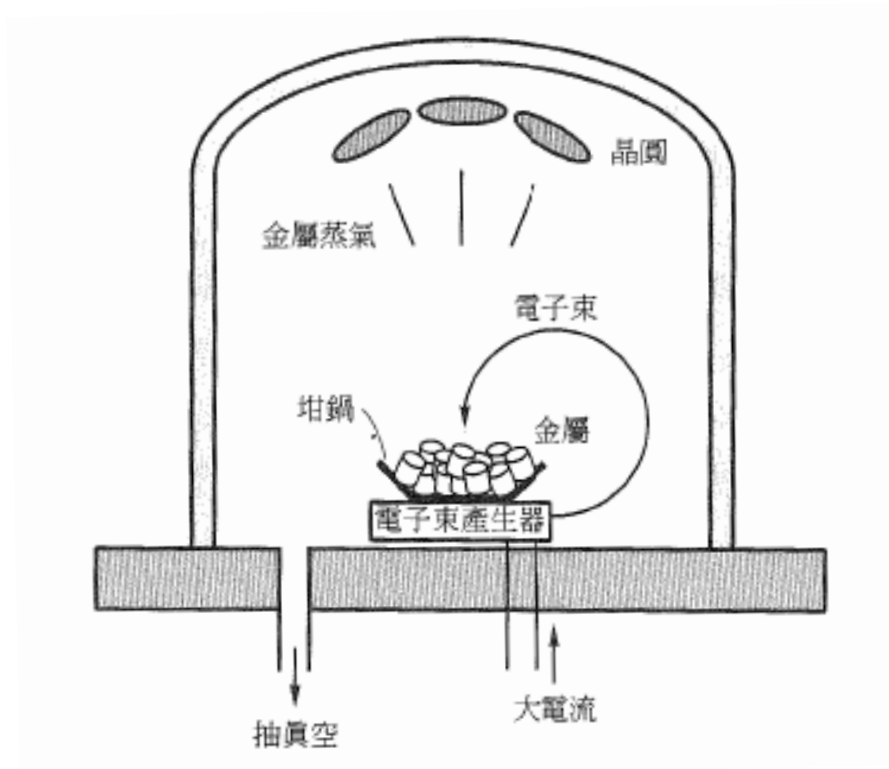


圖2-21 電子槍蒸鍍

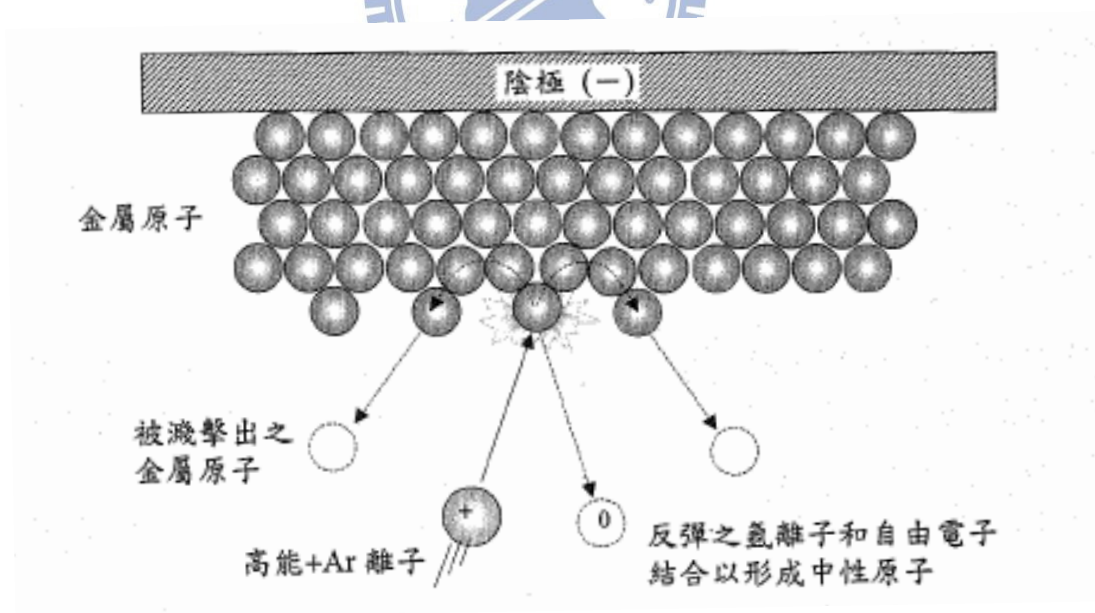


圖2-22 電漿濺鍍

2.7.3 化學氣相沉積製程

CVD(chemical vapor deposition)是藉著氣體混合物發生化學反應，成長我們所要的薄膜。一般在晶圓表面或其近處加熱提供能量到系統中來加速反應作用。CVD反應有8個主要步驟：

1. 氣體傳輸至沉積區域
2. 薄膜先前物形成
3. 薄膜先前物在晶圓上
4. 先前物吸附
5. 先前物擴散
6. 表面反應
7. 副產物從表面移除
8. 副產物從反應器移除



目前常用沉積薄膜的方法有二種：低壓化學氣相沉積法(low pressure CVD，LPCVD)；電漿增強化學氣相沉積法(plasma enhanced CVD，PECVD) [29]：

1. LPCVD：在0.1~10torr中成長薄膜也就是低壓環境中成長薄膜。
2. PECVD：電漿中的反應物是化學活性較高的離子或自由基，可促進基板表面的化學反應速率，因此PECVD在較低的溫度即可沉積薄

膜。

此外，使用PECVD成長 SiO_2 有二道製程，分別為：Current Blocking Layer (CB)主要為對LED封裝約可提升5 %的效果；Passivation Layer (PV)主要目的為1. 焊線保護：可保護因金球過大時、打歪時，造成Ir問題。2. 阻絕來自封裝材的雜質/應力/濕氣的影響。

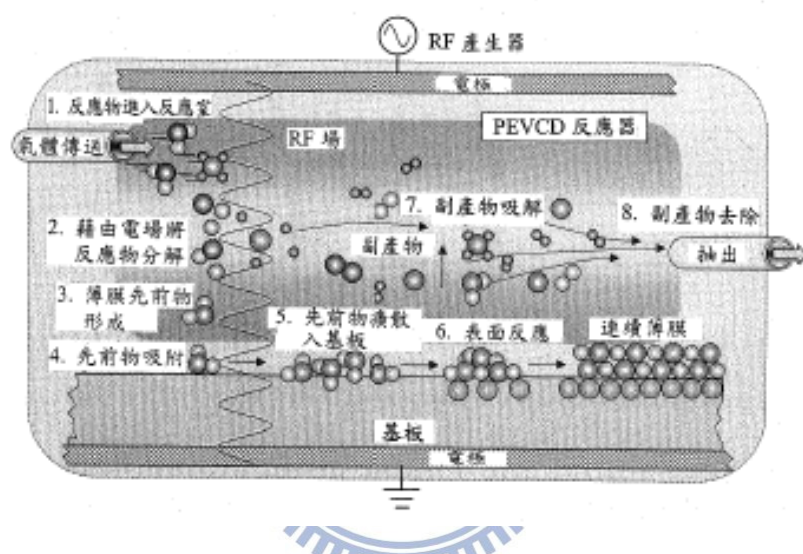


圖2-23 電漿CVD之薄膜形成

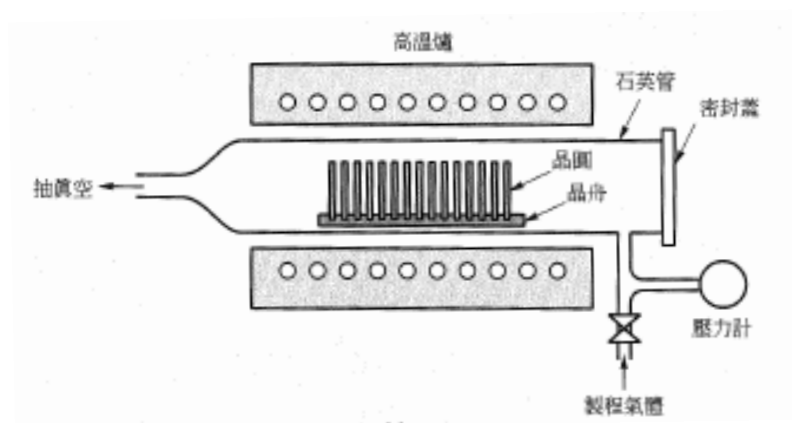


圖2-24 LPCVD系統

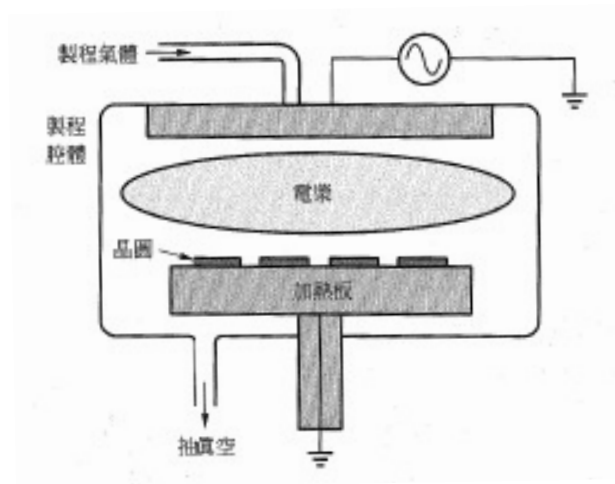


圖2-25 PECVD系統

2.7.4 合金製程

合金製程LED主要是採用爐管設備(furnace)及快速熱處理器(rapid thermal processor, RTP)。爐管是每一石英製程管，圍繞金屬電阻製成的加熱線圈而形成多個加熱區，而加熱區數目是很重要的，因為可以控制爐管中間受熱部份接近等溫區，使溫度差控制在很小的範圍內。快速熱處理器是以鎢鹵素燈當作加熱源，燈管通常放在晶片的上方或底部，晶片藉由從燈管選擇性輻射吸收而受熱，主要優點有：可降低熱預算；較小的反應室空間，週遭較潔淨；晶圓製程時間短；由於是冷壁加熱，可降低污染[30]。

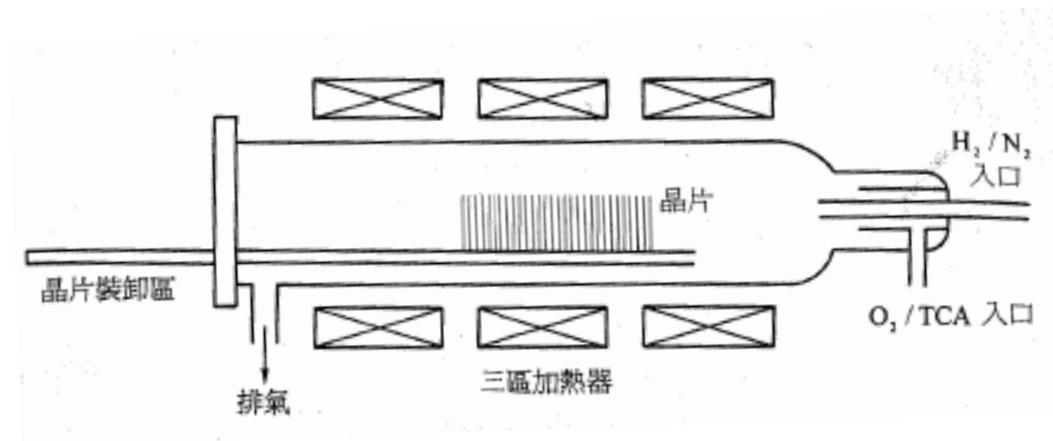


圖2-26 爐管設備

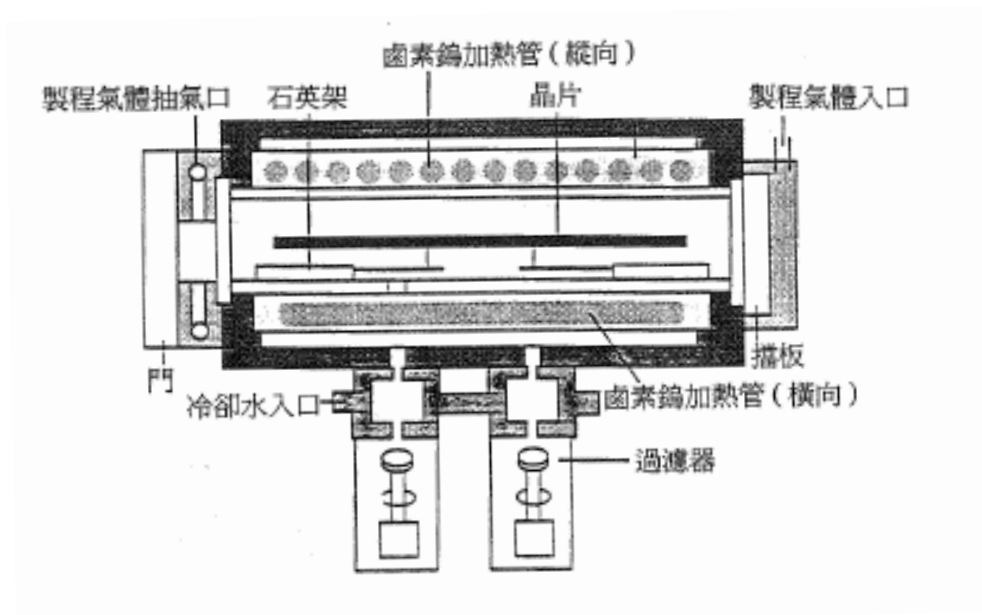


圖2-27 RTP設備

2.7.5 蝕刻製程

蝕刻製程主要是將微影製程製作好pattern晶粒圖案之晶圓，利用物理性撞擊或化學反應去除先前所沉積的薄膜或基板。薄膜經蝕刻後

所呈現的 profile 有二種形式，為等向性 (isotropic) 與非等向性 (anisotropic)，在製程中是相當重要的關鍵，簡單來說等向性就是每個方向都是受到同樣均等量的蝕刻反應；而非等向性是具有某一特定方向才會受到反應，尤其是垂直方向的蝕刻是很明顯，而水平方向的蝕刻能力是很弱的，因此蝕刻後薄膜的輪廓非常的直，角度會將近 90° 。目前晶圓蝕刻的方法有二種：濕式蝕刻法 (wet etching)；乾式蝕刻法 (dry etching)。

1. 濕式蝕刻法：是最早被使用的技術，運用化學反應進行蝕刻，特徵為過程中只有化學反應參與，且為等向性蝕刻。反應機制有三個步驟：a. 溶液裡的反應物經由擴散效應到達被蝕刻薄膜表面；b. 反應物與表面產生化學反應；c. 生成物再利用擴散效應，隨著溶液被排出。
2. 乾式蝕刻法：運用電漿將蝕刻用的氣體離子化之後，與材料進行化學反應或者物理性撞擊，具有非等向性蝕刻。反應機制有三個步驟：a. 物理離子轟擊蝕刻：施以偏壓讓電漿中帶正電的離子加速往晶片表面的薄膜轟擊，因在低壓真空抽氣的系統中，被轟擊出的蝕刻物會被抽走。b. 化學反應蝕刻：利用電漿中的反應氣體與蝕刻表面原子產生反應，形成高揮發性生成物，再經由真空抽氣的系統抽離。c. 離子輔助反應蝕刻：此機制主要為物理離子轟擊與化學反應蝕刻的結合。

	Wet Etch	Dry Etch
Etch Profile	Isotropic	Anisotropic to isotropic,
Etch rate	High	Acceptable, controllable
Selectivity	High	Acceptable, controllable
Equipment cost	Low	High
Throughput	High (batch)	Acceptable

表2-2 乾、濕式蝕刻比較

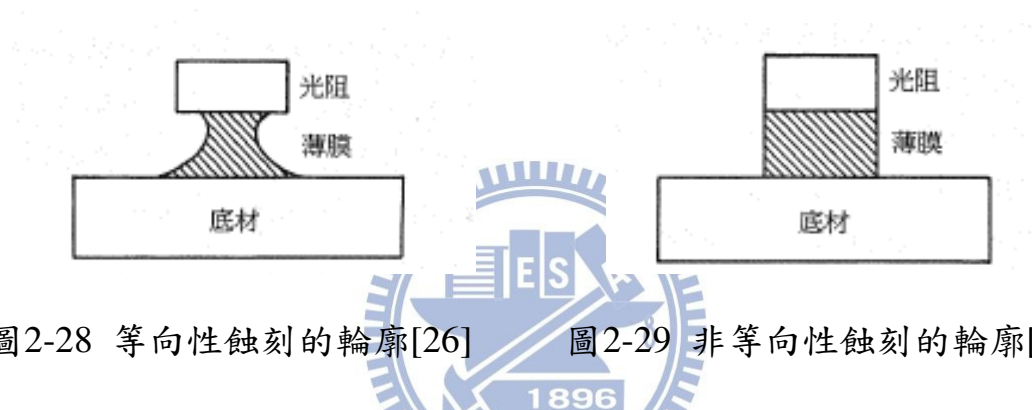


圖2-28 等向性蝕刻的輪廓[26]

圖2-29 非等向性蝕刻的輪廓[26]

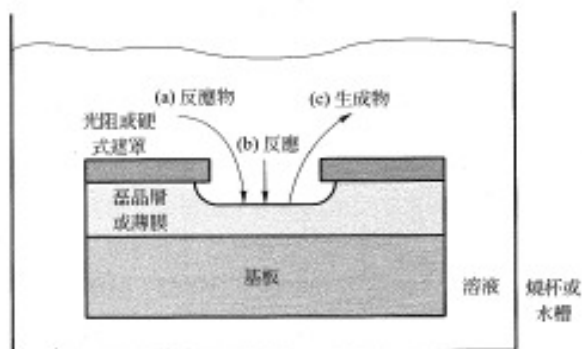


圖2-30 濕式化學蝕刻的機制

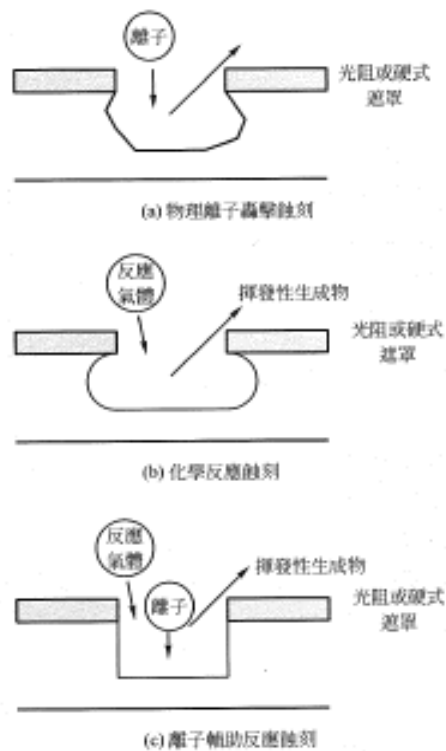


圖2-31 電漿蝕刻方式

2.7.6 研磨製程

現行晶圓的厚度約為 $430\mu\text{m}$ 到 $650\mu\text{m}$ ，為了將製作好 pattern 晶粒圖案之晶圓方便切割或減少元件的串聯電阻及散熱問題，通常需將晶圓研磨減薄到 $90\mu\text{m}$ 或 $150\mu\text{m}$ 。目前晶圓研磨的方法有二種：研磨法(lapping)；切削法(grinding)。

研磨法，其工作方法包含：

1. 將承載盤放在加熱平台上加熱至 $120^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。
2. 將蠟均勻塗抹在承載盤上。

3. 把晶片正面貼上，放上吸蠟紙吸除多餘的蠟並進行加壓製程而將晶片壓合貼平，使其完全黏貼在承載盤上，避免氣泡產生造成破片。
4. 將承載盤安裝於研磨機的固定器上，一旁注入研磨液，通常研磨液成分為乙二醇(或純水)+氧化鋁粉(或碳化矽粉、鑽石粉)。
5. 把承載盤對著研磨盤施加壓力，同時承載盤及研磨盤朝著相反方向轉動，將晶片磨薄到設定的厚度。
6. 之後把研磨盤換成質地較軟的銅盤或錫盤，把研磨完粗糙的背面拋亮。

切削法，其工作方法包含：

1. 將陶瓷板放在加熱平台上加熱至 $120^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。
2. 將蠟均勻塗抹在陶瓷板上。
3. 把晶片正面貼上，放上吸蠟紙吸除多餘的蠟並進行加壓製程而將晶片壓合貼平，使其完全黏貼在陶瓷板上，避免氣泡產生造成破片。
4. 利用切削輪把晶片背面磨薄，到設定的厚度。
5. 之後取下陶瓷板更換到拋光盤上，之後把粗糙的背面拋亮。



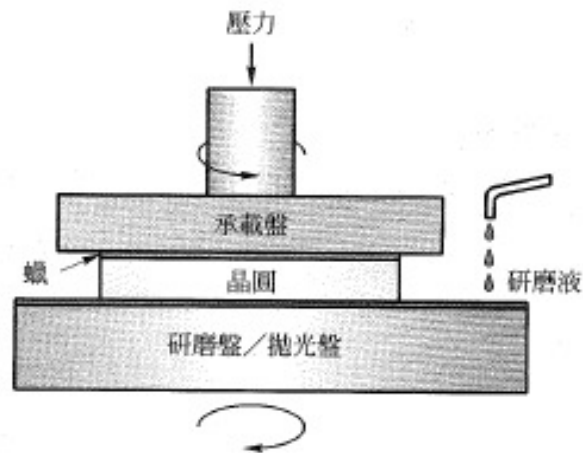


圖 2-32 研磨法

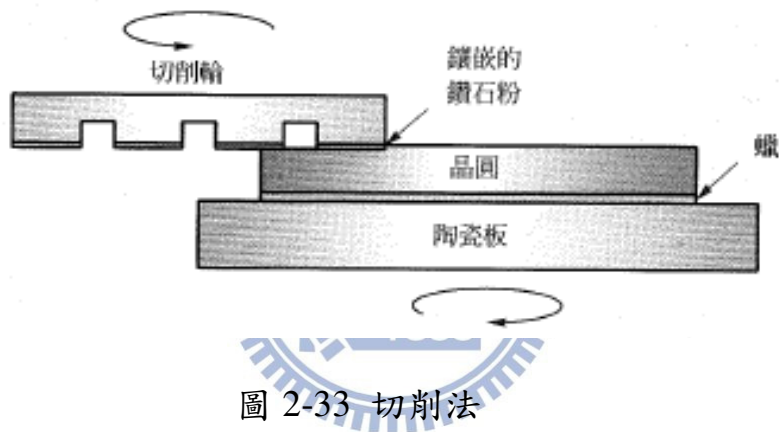


圖 2-33 切削法

2.7.7 切割製程

一般當磊晶片完成pattern製作並經研磨變薄後，就需要開始執行晶片切割。目前晶粒切割的方法有三種：輪刀式；鑽石式；雷射式。

輪刀式：將切割刀片的表面鑲嵌鑽石粉，並以高速旋轉方式切割晶片，這樣就可以將晶片分割，利用此技術可以得到晶片具有整齊的矩形。因GaN系發光二極體所採用的藍寶石基板很難切割刀具耗損大，

故此方法主要是用來切割GaAs及Si的Wafer。

鑽石式：此為尖端鑲嵌上特殊形狀的鑽石工具，並利用鑽石的稜線切過晶圓的正面，之後在另外一面施加適當的力量，便可將晶片分割了。此方法是早期用來切割GaN系發光二極體所採用的藍寶石基板，但所得到的晶片邊緣並不整齊。

雷射式：目前主要用來切割GaN系發光二極體所採用的藍寶石基板，是使用可以讓基板吸收的波長之聚焦雷射光束，雷射光束會在晶片表面燒出一個小洞，接下來移動雷射光束或晶片，則可以將洞連成線，然後在另外一面施加適當的力量，便可以將晶片分割了。此方法可以得到晶片具有整齊的矩形，但是有時候會被雷射切割過程中加熱所產生的再結晶物質，這些再結晶物質會對於藍光有吸收的作用進而導致LED光強下降，稍後的論文中會再詳述此一機制。

另外針對雷射式也開發出新的應用，隱形切割(stealth dicing)係將雷射聚光於工件內部，在工件內部形成變質層，通過擴展膠膜分割晶粒的切割方法。此設備適合對於要求高亮度的元件，加工後並不會產生再結晶物質而降低亮度，但是隱形雷射機台造價較貴會使得LED晶粒製作成本上升，所以在本論文中提出使用較便宜的傳統雷射切割方式來提升LED晶粒光強，藉此提升產品競爭力。

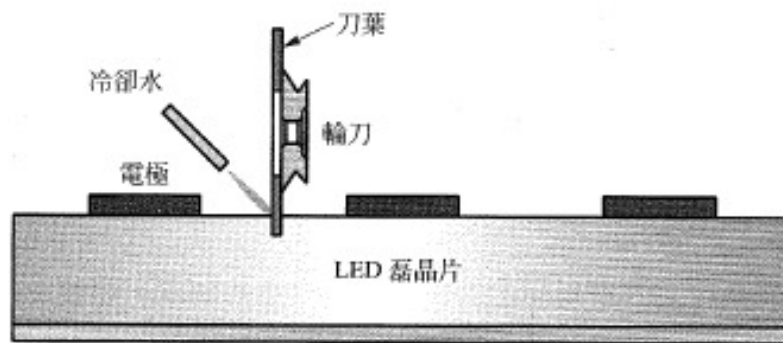


圖2-34 輪刀式

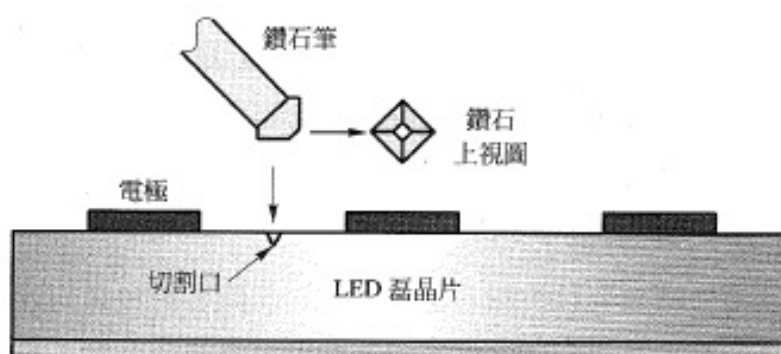


圖2-35 鑽石式

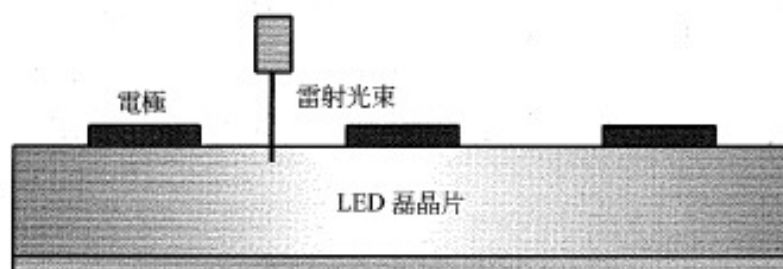


圖2-36 雷射式

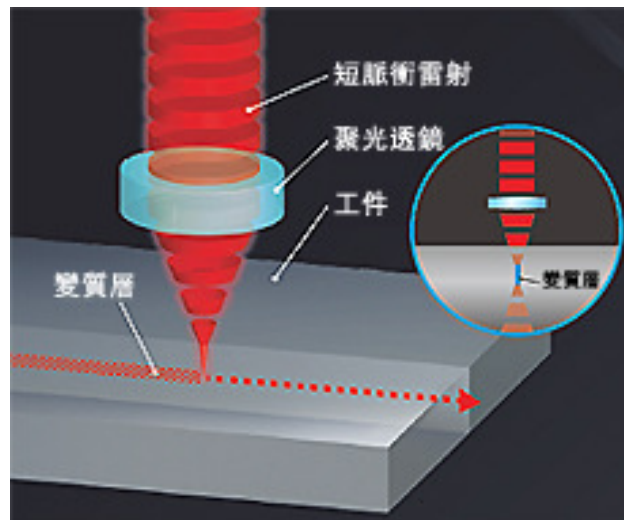


圖2-37 隱形切割概略圖



第三章 SWE 製程對光取出效率提升

之研究

3.1 研究動機

在 HB-LED 結構中，除了主動層(Active Region)及其他層會吸收

光之外，另外必須注意的就是半導體的高折射係數(High Refractive Index)，這將使得 LED 所產生的光受到侷限(Trapped Light) [7]。從主動區所發射的光線在到達半導體與周圍空氣之界面時，如果光的入射角大於逃逸角錐(Escape Cone)之臨界角(Critical Angle; α_c)時，則會產生全內反射(Total Internal Reflection)；對於高折射係數之半導體而言，其臨界角都非常小，當折射係數為 3.3 時，其全內反射角則只有 17° ，所以大部份從主動區所發射的光線，將被侷限(Trapped)於半導體內部，這種被侷限的光有可能會被較厚的基板所吸收。此外，由於基板之電子與電洞對，會因基板品質不良或效率較低，導致有較大機率產生非輻射復回(Recombine Non-Radiatively)，進而降低 LED 效率。所以如何從半導體之主動區萃取光源，以進而增加光萃取效率(Light Extraction Efficiency)，乃成為各 LED 製造商最重要的努力目標。

目前有三種方法可增加 LED 光之萃取效率：(1)第一種方法是在 LED 磊晶前，進行藍寶石基板的蝕刻圖形化(Pattern Sapphire Substrate; PSS) [18]；(2)第二種方法是在 LED 磊晶後，進行藍寶石基板的側邊蝕刻(Sapphire Sidewall Etching; SSE) [11] [12] [17]，以及(3)基板背面粗糙化(Sapphire Backside Roughing; SBR)。本文研究探討如何利用高溫磷酸濕式化學蝕刻技術搭配傳統雷射切割方式，來達到增加 LED

光萃取效率之目的[6] [10] [23]。此外，針對 LED 生產線之高產能與高良率需求時，在製程系統設計製作上必須考慮到哪些因數，亦將進行詳細探討，以期達到增加 LED 光萃取效率之目的[14] [15] [16] [21] [24] [25]。

	Pattern Sapphire Substrate; PSS	Side Wall Etching; SWE	Sapphire Backside Roughing; SBR
優點	1.圖形好定義	1.成本低	1.成本低
	2.Dislocation(差排)數量可有效降低	2.速度快產量大	2.製程簡易
		3.製程簡易	
缺點	1.成本高	1.對雷射側邊debris之蝕刻速度較難控制	1.蝕刻速度較難控制
	2.Chamber髒，易受污染磊晶製程對PSS表面潔淨度要求較高	2.亮度易受蝕刻速率影響	2.晶片薄操作不易，易破片
	3.PSS圖形易受基板翹曲而行成大小不一的形狀，均勻性不易控制	3.磊晶底層結構易受蝕刻製程時間影響而過蝕刻	3.4~6" handling issue
	4.多一道製程		4.大尺寸會有uniformity問題

表3-1 LED光之萃取效率方法比較

3.2 實驗流程 (SWE 製程)

1. 準備 2 吋藍寶石基板，MOCVD 成長完 EPI Layer。
2. 使用 Aligner 進行黃光微影製程在表面上開出 MESA Pattern 的光阻的圖案。
3. 利用 ICP 進行 Dry etch，之後將光阻去除。
4. 用 PECVD 在藍寶石基板上鍍上一層 15000Å 的 Oxide 當 Hard Mask，經由爐管進行 Oxide Film 之退火，以增加 Oxide 之附著性

(用以應付後續之蝕刻步驟，增加抗蝕能力)。

5. 使用雷射切割機先做切割道切割。
6. 將晶片放入磷酸及硫酸的混合溶液中，利用混合溶液蝕刻 EPI Layer 及 Sapphire，經濕蝕刻後 Epi Layer 形成 Undercut，並將 Sapphire 上雷射切割時所形成的吸光物質(結晶物)去除，最後再用 BOE 溶液將 Oxide 給移除(SWE 的過程如圖 3-1 紅色虛線圈起來處表示之)。
7. 利用 PECVD 成長 Oxide Film，使用 Aligner 進行黃光微影製程在表面上開出 CB Pattern 的光阻圖案。
8. 用 BOE 溶液進行 SiO_2 蝕刻，之後使用 Stripper 將光阻去除。
9. 使用 PVD 濺鍍 ITO Film，使用 Aligner 進行黃光微影製程在表面上開出 ITO Pattern 的光阻圖案。
10. 用 ITO 蝕刻液進行蝕刻，之後使用 Stripper 將光阻去除。
11. 使用 Aligner 進行黃光微影製程在表面上開出 Pad Pattern 的光阻圖案，E-Gun 蒸鍍 Metal Layer，再 Lift-off 製程後做成 P-N Pad。
12. 用 PECVD 在藍寶石基板上鍍上一層 Oxide Film，使用 Aligner 進行黃光微影製程在表面上開出 PV Pattern 的光阻圖案。
13. 用 BOE 溶液進行 SiO_2 蝕刻，之後使用 Stripper 將光阻去除。
14. 經由點測機測試 Chip 之光、電性。

如上所述之步驟於下圖 3-1 之流程圖中表示[1] [3]:

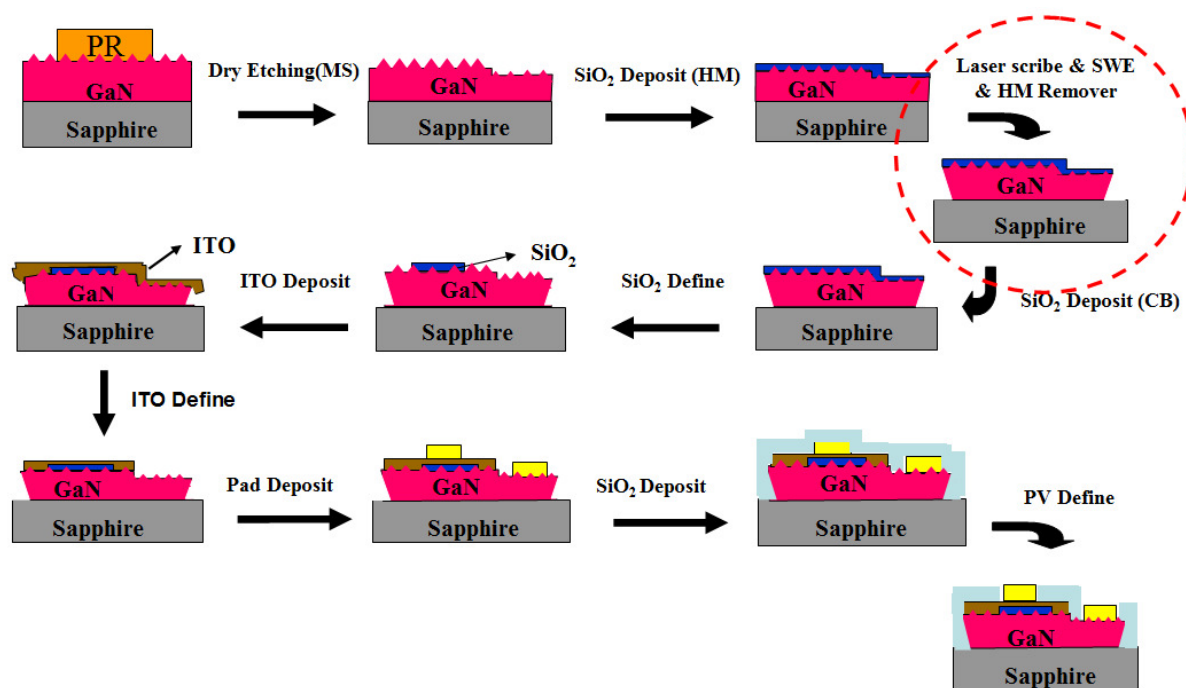


圖 3-1 SWE LED 之製作流程圖

(SWE 的過程如紅色虛線圈起來處表示之)

3.3 蝕刻溶液比例、溫度與時間參數

3.3.1 蝕刻溶液比例參數

蝕刻溶液溫度：240℃之恆溫控制

蝕刻溶液成分：蝕刻為硫酸(96 wt%)與磷酸(86 wt%)依比例混合之混

酸溶液

蝕刻時間：7 分鐘

蝕刻溶液比例：硫酸(96 wt%):磷酸(86 wt%) = 5 : 2、6 : 2、7 : 2 三種
條件

3.3.2 溫度變化參數

蝕刻溶液成分：蝕刻為硫酸(96 wt%)與磷酸(86 wt%)依比例混合之混
酸溶液

蝕刻溶液比例：為 6 : 2

蝕刻時間：7 分鐘

蝕刻溶液溫度：230℃、240℃及 260℃



3.3.3 時間變化參數

蝕刻溶液成分：蝕刻為硫酸(96 wt%)與磷酸(86 wt%)依比例混合之混
酸溶液

蝕刻溶液比例：為 6 : 2

蝕刻溶液溫度：240℃

蝕刻時間：2、5、8、10 分鐘

第四章 結果與討論

4.1 不同磊晶結構實驗

蝕刻溶液成分：蝕刻為硫酸(96 wt%)與磷酸(86 wt%)依比例混合之混
酸溶液

蝕刻溶液比例：為 6：2

蝕刻時間：7 分鐘

蝕刻溶液溫度：240℃

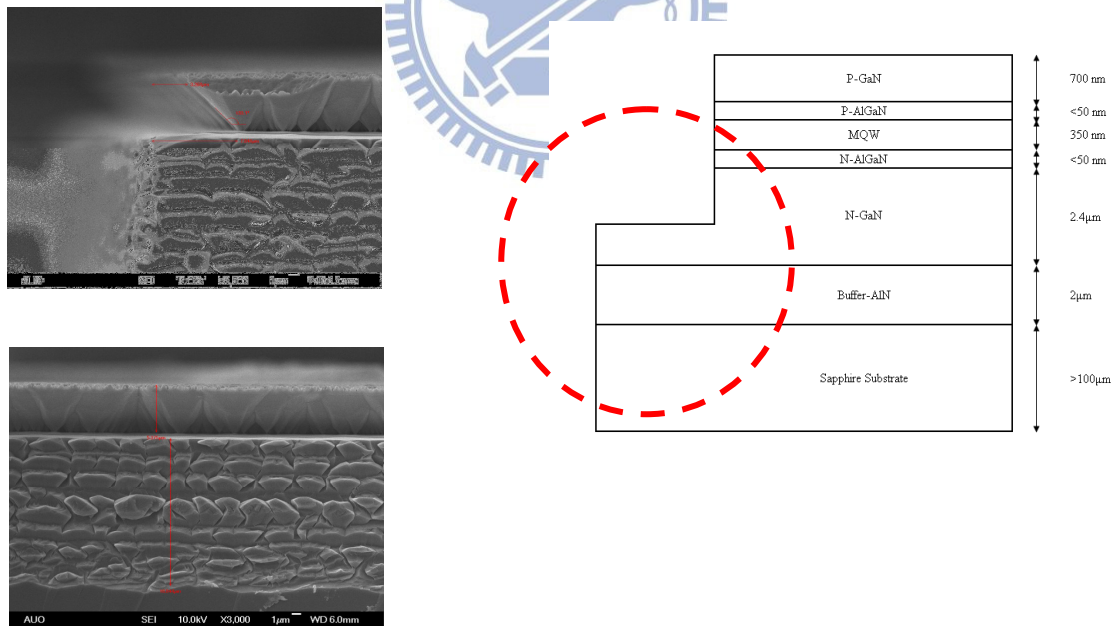


圖 4-1 各層磊晶結構經 SWE 後之角度(a)SEM 分析圖 (b)截面示意圖

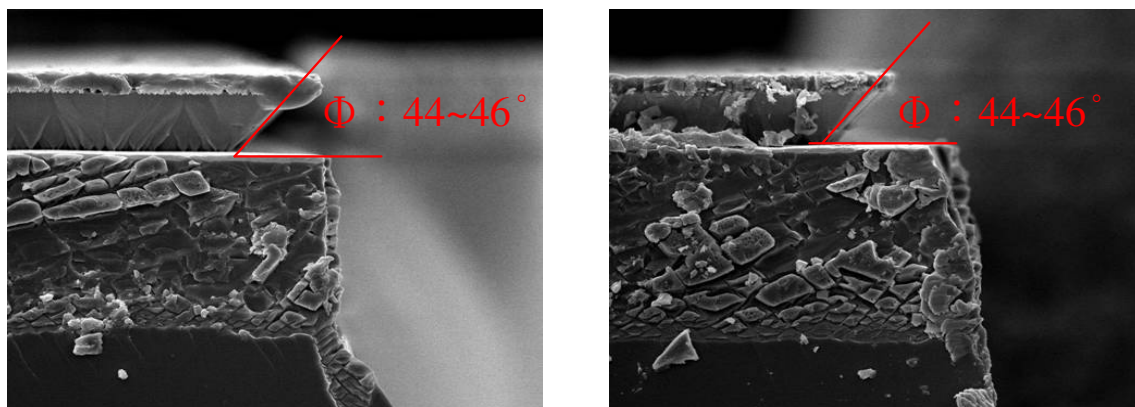


圖 4-2 GaN 經 SWE 後之角度

小結：

1. 不同磊晶層經 SWE 後則對 Undercut 的角度沒有影響。
2. GaN 蝕刻後量測之角度約 $44\sim 46^\circ$ 與參考文獻計算所得接近。

附註：SWE Width 量測定義

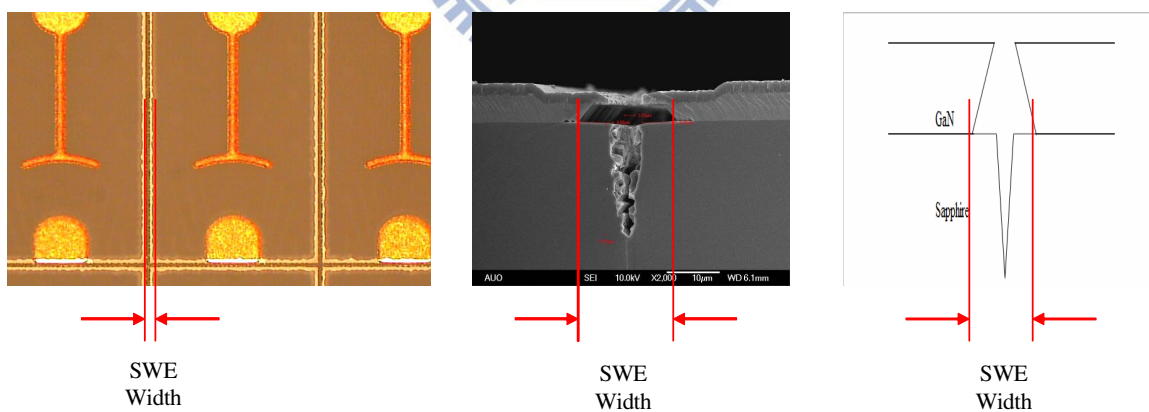


圖 4-3 SWE Width 量測 (a)OM 圖 (b)SEM 圖 (c)截面示意圖

4.2 蝕刻溶液比例、溫度與時間參數對亮度的影響

4.2.1 蝕刻溶液比例的效果

蝕刻溶液溫度：240°C 之恆溫控制

蝕刻溶液成分：蝕刻為硫酸(96 wt%)與磷酸(86 wt%)依比例混合之混酸溶液

蝕刻時間：7 分鐘

蝕刻溶液比例：硫酸(96 wt%):磷酸(86 wt%) = 5 : 2、6 : 2、7 : 2 三種條件

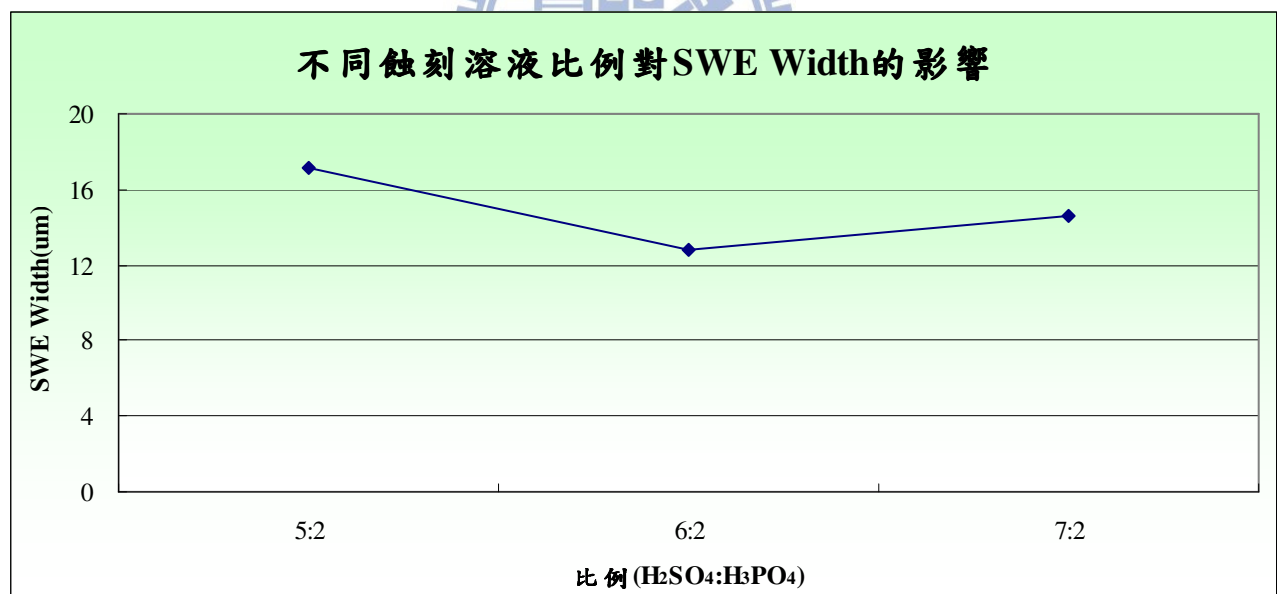


圖 4-4 在固定蝕刻時間及溫度條件，不同混酸比例下對切割道的蝕刻寬度的差異

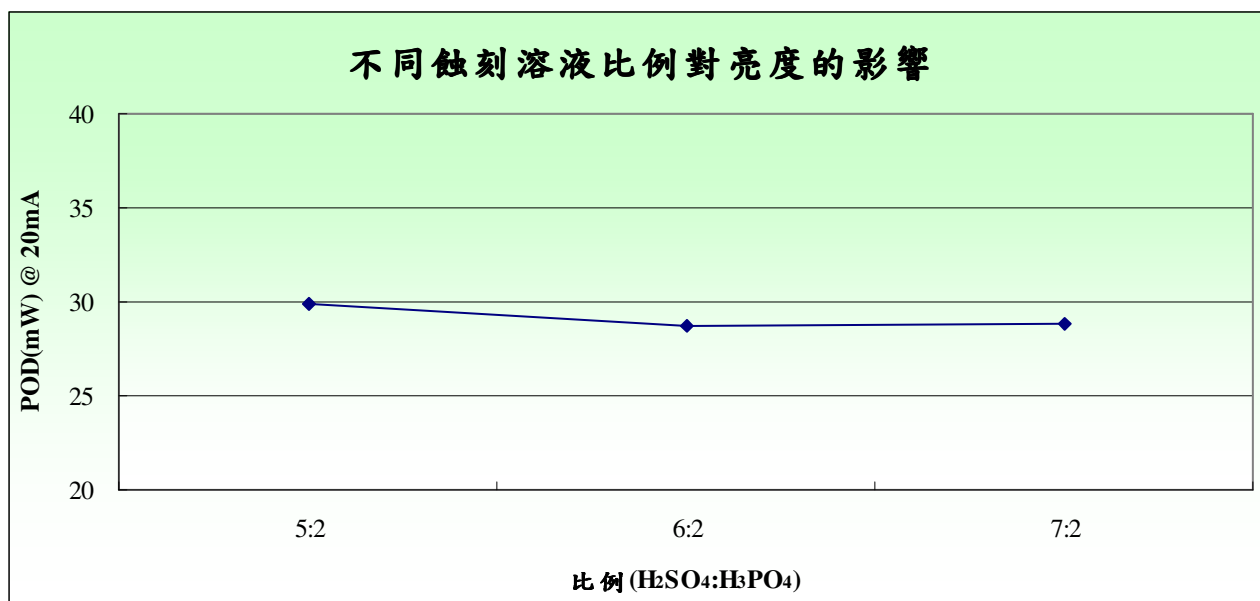


圖 4-5 在固定蝕刻時間及溫度條件，不同的混酸比例與亮度的關係

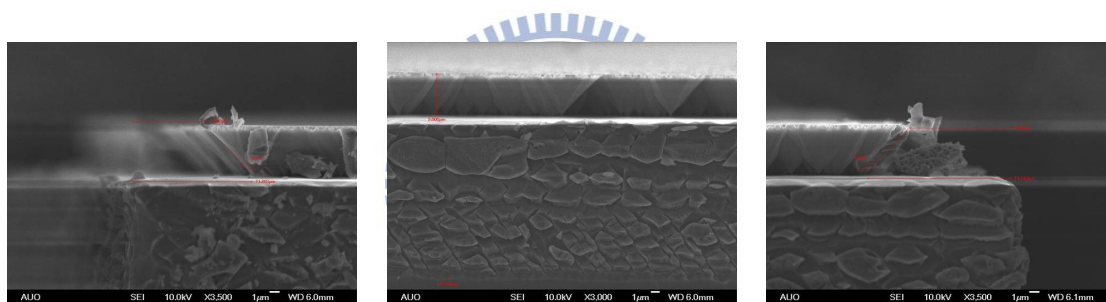


圖 4-6 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_3\text{PO}_4=5:2$ 、 240°C 、7min，SEM 分析圖

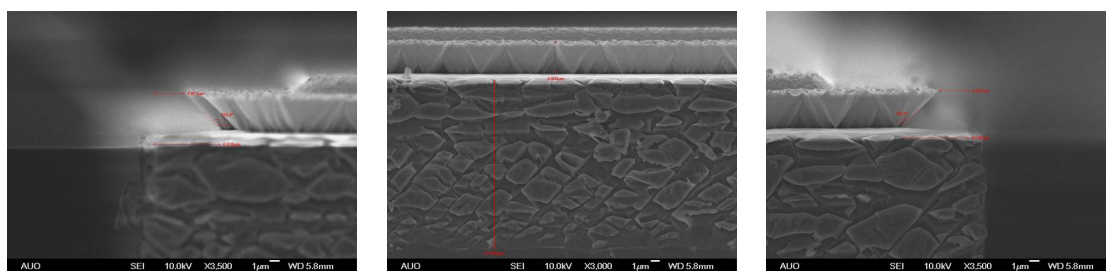


圖 4-7 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_3\text{PO}_4=6:2$ 、 240°C 、7min，SEM 分析圖

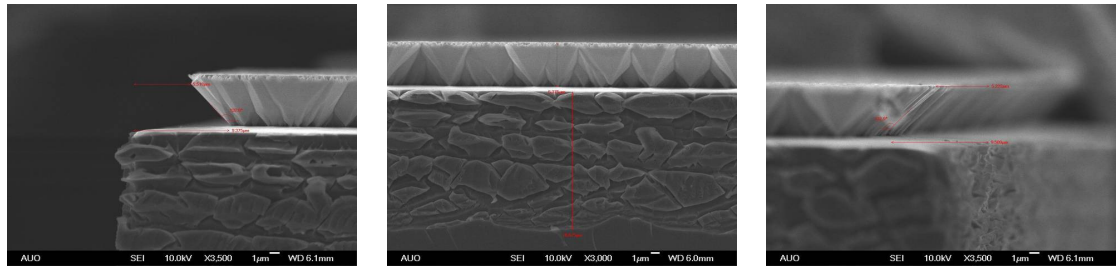


圖 4-8 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 7 : 2$ 、 240°C 、7min，SEM 分析圖

小結：

- 1.在固定蝕刻時間及溫度條件，依據不同的混酸比例得知，磷酸含量較高所得到的亮度較亮。
- 2.由 SEM 圖片比較，在固定蝕刻時間及溫度條件， $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 7 : 2$ 去除吸光物質(雷切結晶顆粒)之效果較差些。

4.2.2 溫度變化的效果

蝕刻溶液成分：蝕刻為硫酸(96 wt%)與磷酸(86 wt%)依比例混合之混酸溶液

蝕刻溶液比例：為 6：2

蝕刻時間：7 分鐘

蝕刻溶液溫度： 230°C 、 240°C 及 260°C

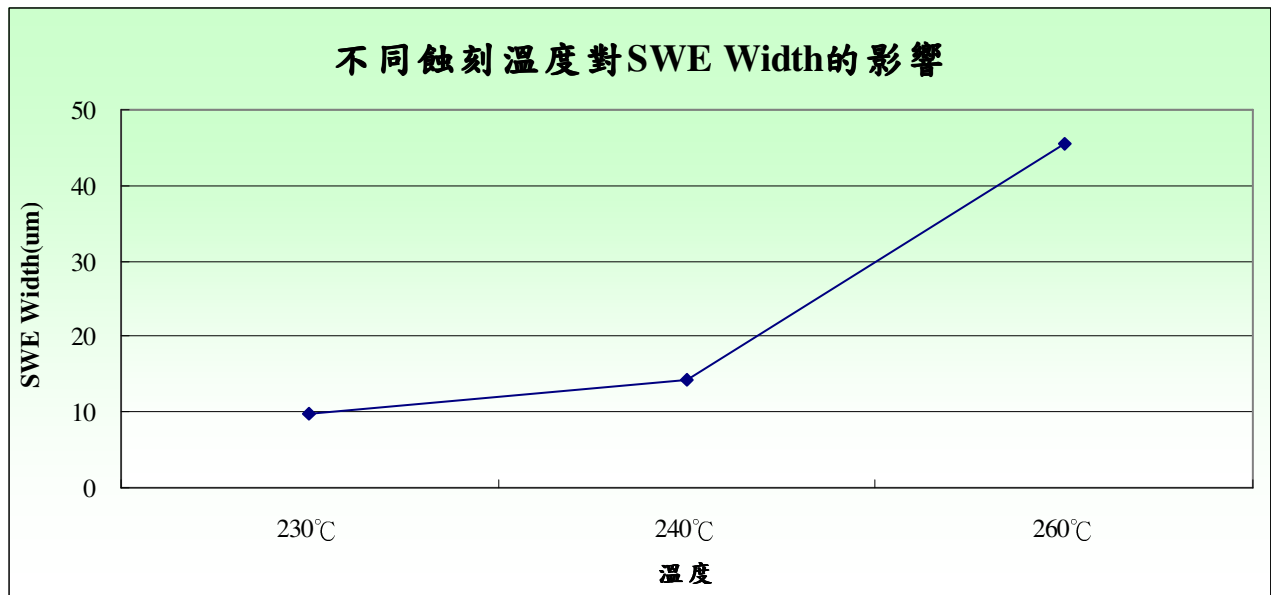


圖 4-9 在固定蝕刻時間及相同混酸比例，不同蝕刻溫度下對切割道的蝕刻寬度的差異

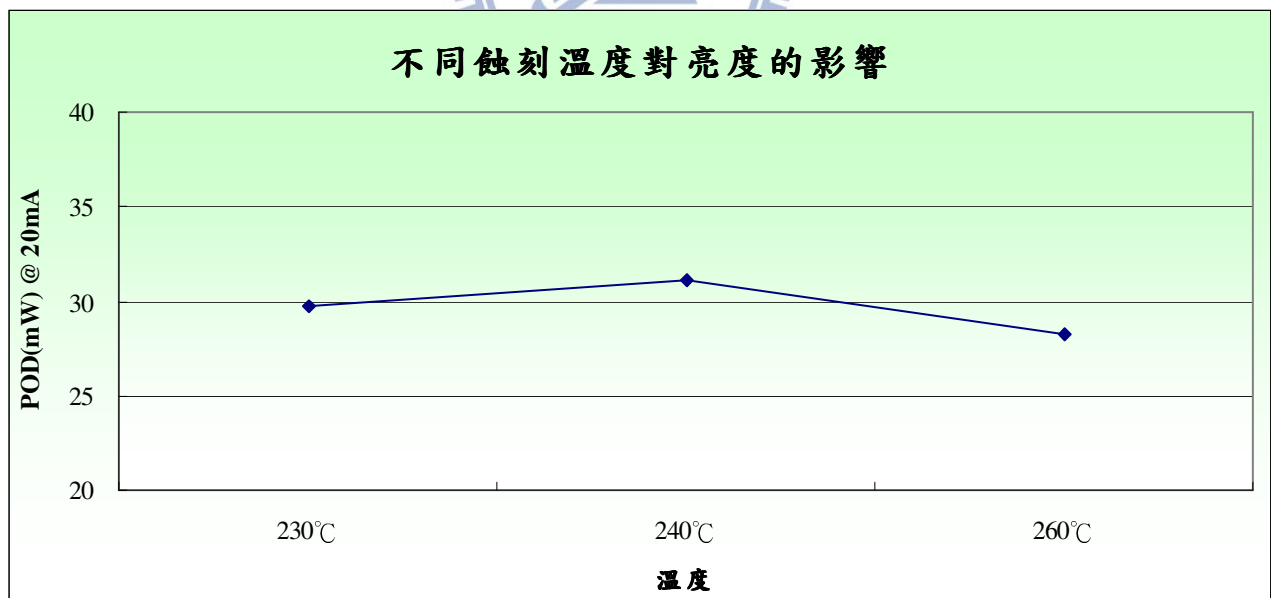


圖 4-10 在固定蝕刻時間及相同混酸比例，不同蝕刻溫度與亮度的關係

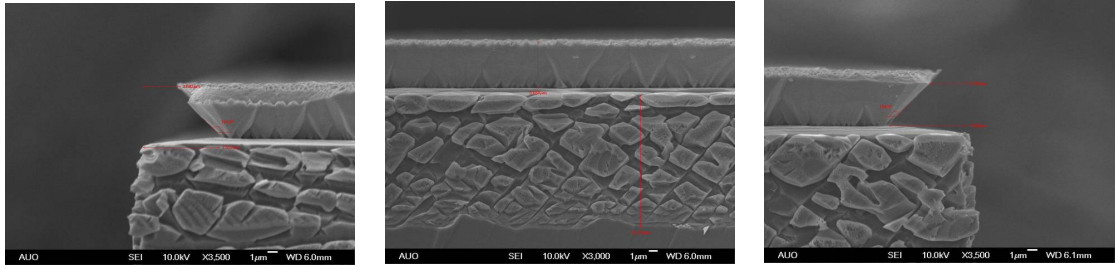


圖 4-11 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 230°C 、7min，SEM 分析圖

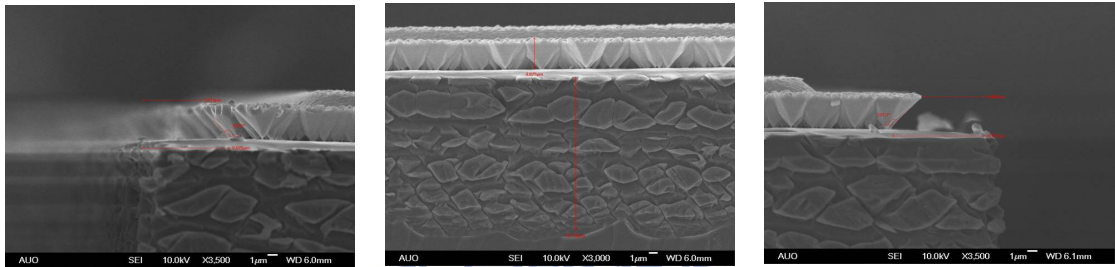


圖 4-12 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、7min，SEM 分析圖

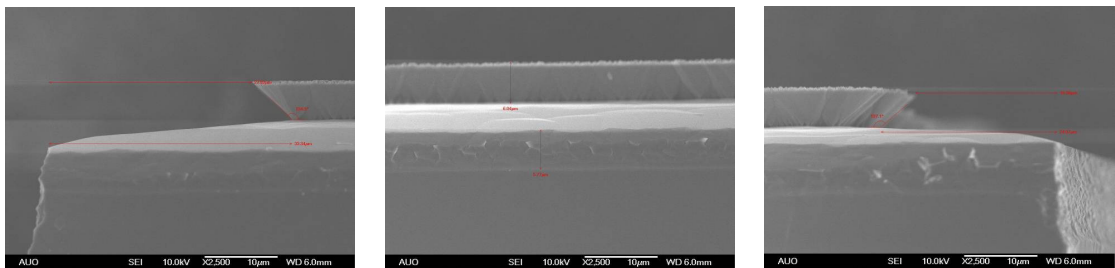


圖 4-13 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 260°C 、7min，SEM 分析圖

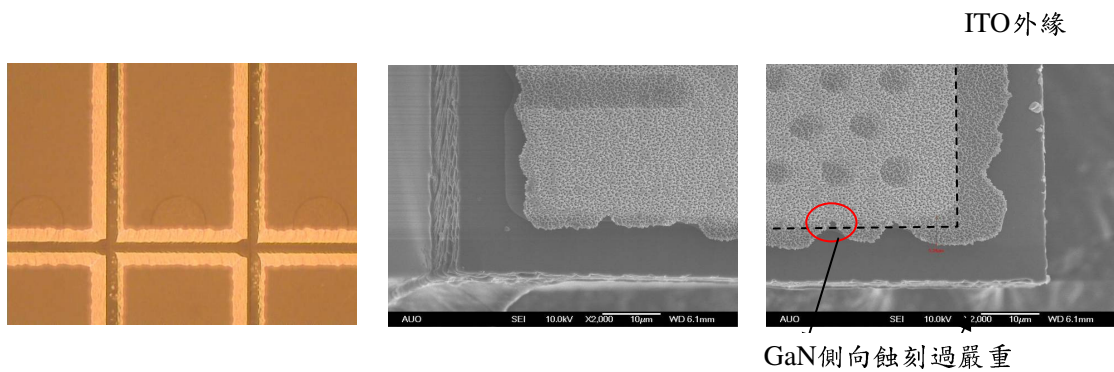


圖 4-14 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 260°C 、7min，金相顯微鏡及 SEM 分析圖

小結：

- 1.在固定蝕刻時間及相同混酸比例，不同蝕刻溫度對切割道的蝕刻寬度的差異，溫度越高蝕刻寬度越大，成正比關係。
- 2.由固定蝕刻時間及相同混酸比例，不同蝕刻溫度與亮度的關係圖， 240°C 時亮度是最亮的。
- 3.經 SEM 圖片比較，在固定蝕刻時間及相同混酸比例，溫度越高去除吸光物質(雷切之結晶顆粒)效果較佳。
- 4.蝕刻溫度越高亮度反而沒有變更亮，原因為蝕刻後造成元件損傷，使得發光面積變小，因此亮度會變暗。

4.2.3 時間變化的效果

蝕刻溶液成分：蝕刻為硫酸(96 wt%)與磷酸(86 wt%)依比例混合之混酸溶液

蝕刻溶液比例：為 6：2

蝕刻溶液溫度：240℃

蝕刻時間：2、5、8、10 分鐘

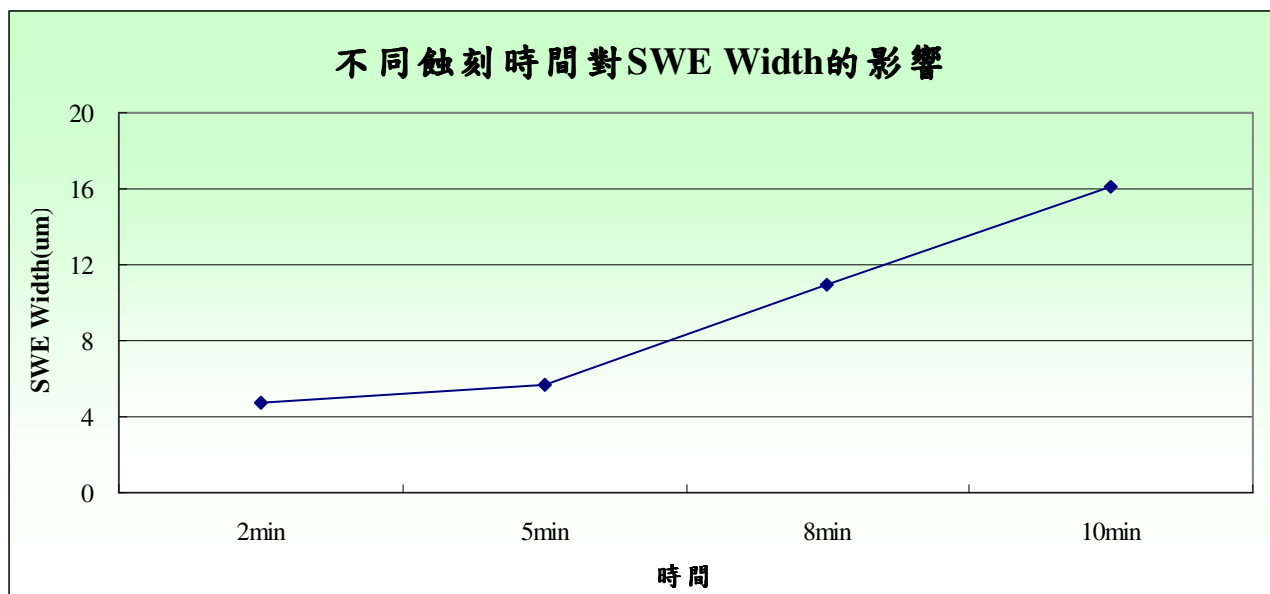


圖 4-15 在固定蝕刻溫度及相同混酸比例，不同蝕刻時間下對切割道的蝕刻寬度的差異

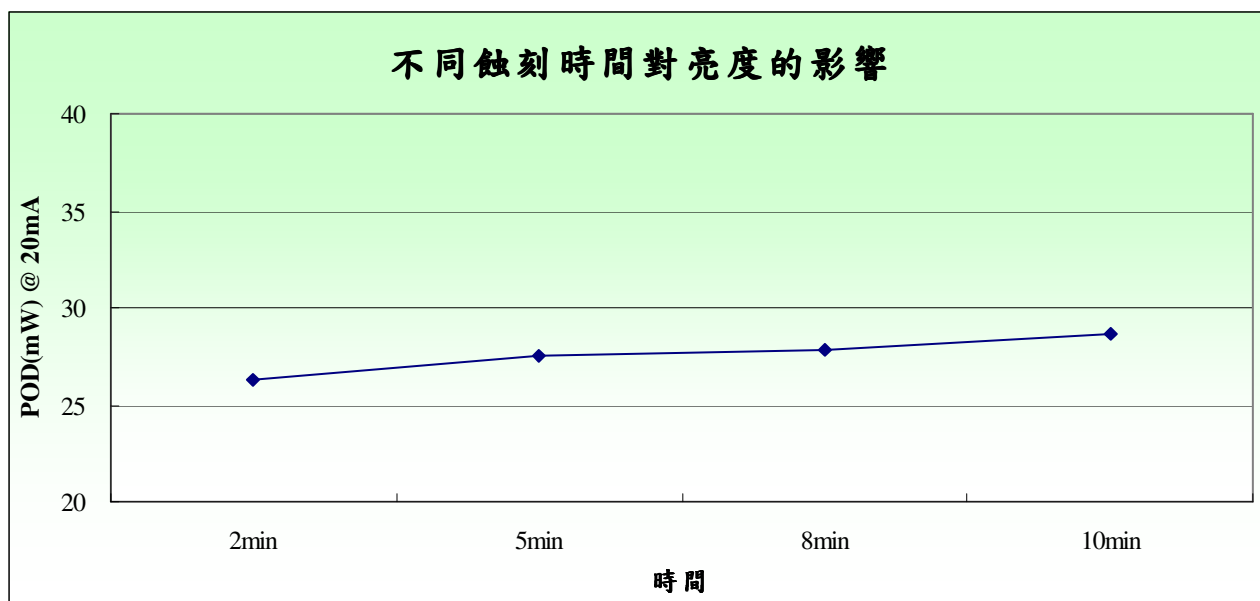


圖 4-16 在固定蝕刻溫度及相同混酸比例，不同蝕刻時間與亮度的關係

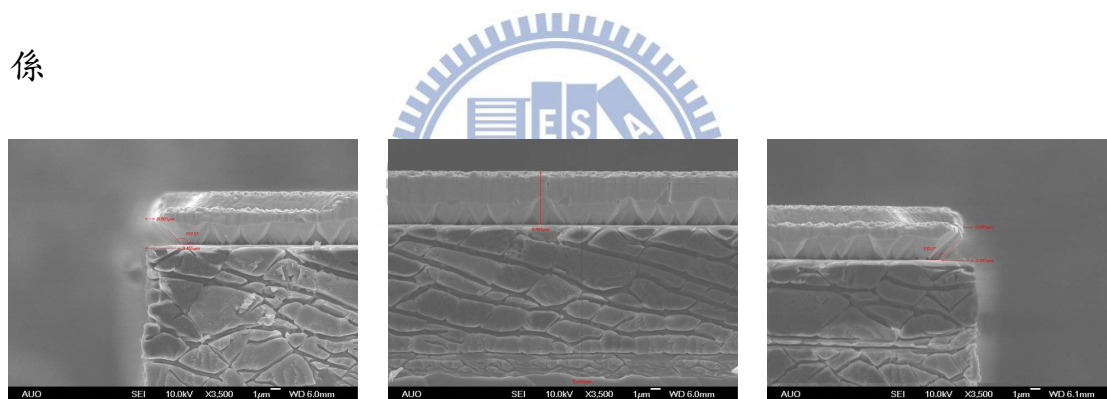


圖 4-17 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、2min，SEM 分析圖

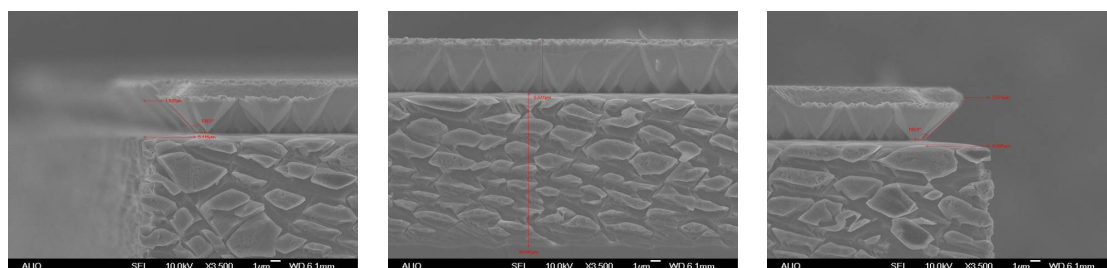


圖 4-18 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、5min，SEM 分

析圖

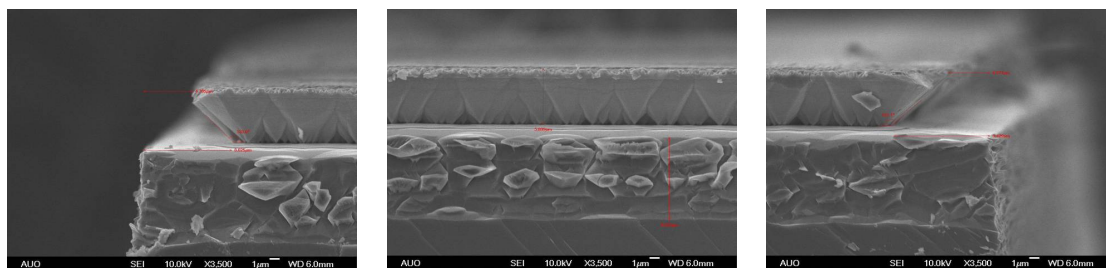


圖 4-19 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、8min，SEM 分

析圖

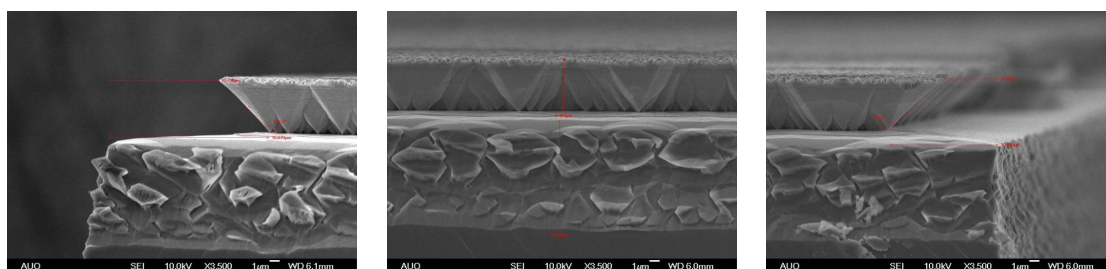


圖 4-20 蝕刻溶液條件 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 6 : 2$ 、 240°C 、10min，SEM

分析圖

小結：

- 1.在固定蝕刻溫度及相同混酸比例，不同蝕刻時間下對切割道的蝕刻寬度的差異，時間越久蝕刻寬度越大，幾乎非線性關係。
- 2.在固定蝕刻溫度及相同混酸比例，不同蝕刻時間與亮度的關係，10分鐘亮度是最亮的。
- 3.蝕刻時間越久亮度越亮，但前提需不能造成元件損傷，否則會影響發光面積。

4. 不管蝕刻時間 2、5、8、10 分鐘，所得到 GaN 之 undercut 角度是固定的。

5. 由 SEM 圖片比較，在固定蝕刻溫度及相同混酸比例，蝕刻時間越長則去除 sapphire 表面吸光物質(雷切結晶物)效果越好，如圖 4-20 所示。

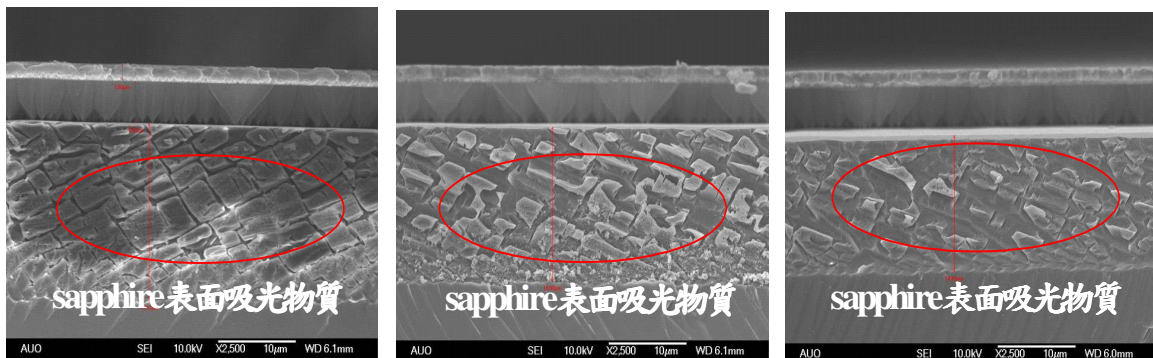


圖 4-21 Sapphire 表面吸光物質與不同蝕刻時間關係圖(a)2 分鐘 (b)5 分鐘 (c)8 分鐘

4.3 無 SWE 與 SWE 蝕刻製程亮度驗證

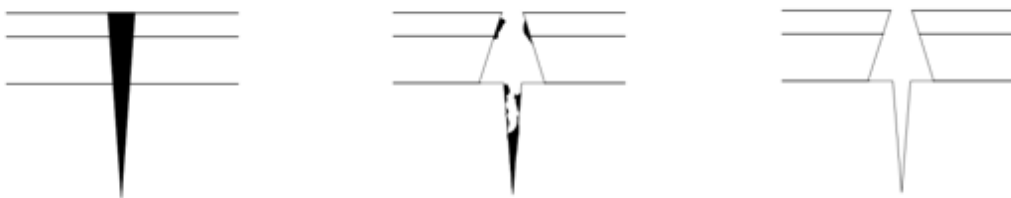
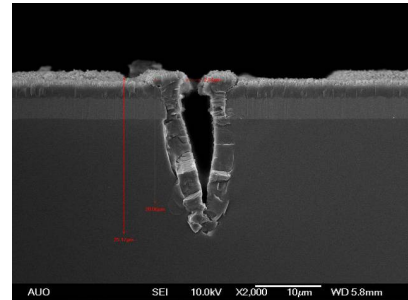
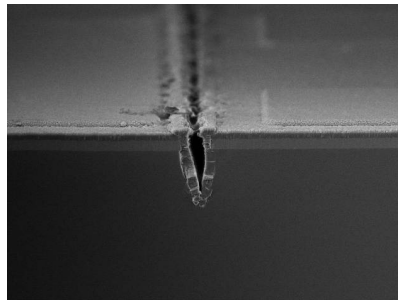


圖 4-22 SWE 清洗步驟示意圖。a. 清洗前；b. 清洗後，未將雷切造成之再結晶物完全清洗乾淨；c. 清洗後，將吸光物質(再結晶物)完全清

洗乾淨。

清洗前



清洗後

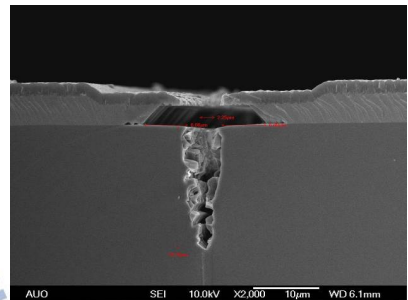
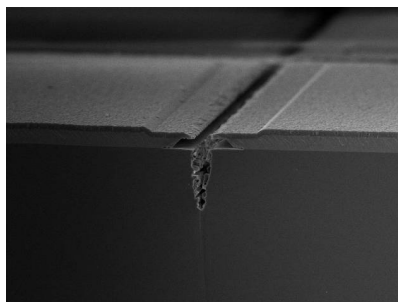


圖 4-23 SWE 清洗前後 SEM 圖片

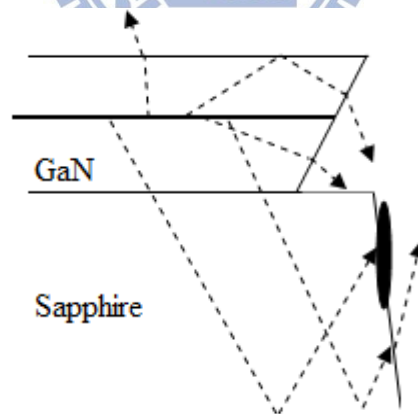


圖 4-24 光受吸光物質(雷切結晶物)影響示意圖

Temp	比例(H ₂ SO ₄ :H ₃ PO ₄)	SWE	POD_AVG(mW)	亮度提升
240℃	6:2	無	26.90	NA
		有	30.08	11.82%
		有	29.58	9.96%

表 4-1 有無 SWE 對亮度的影響比較表

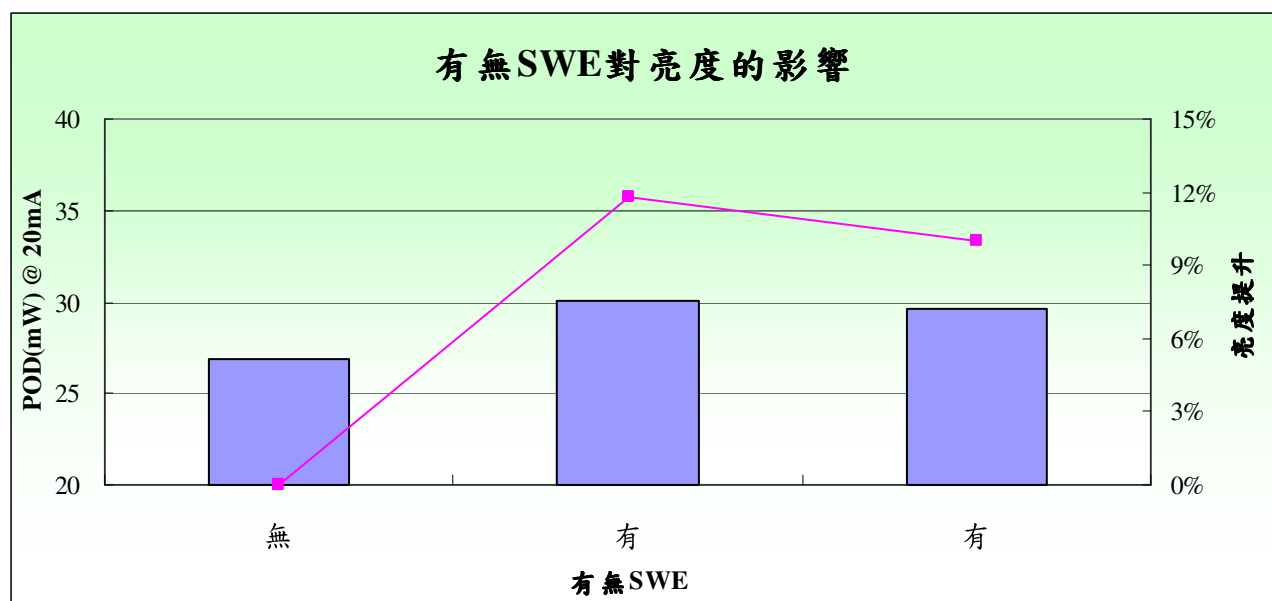


圖 4-25 有無 SWE 對亮度的影響比較圖

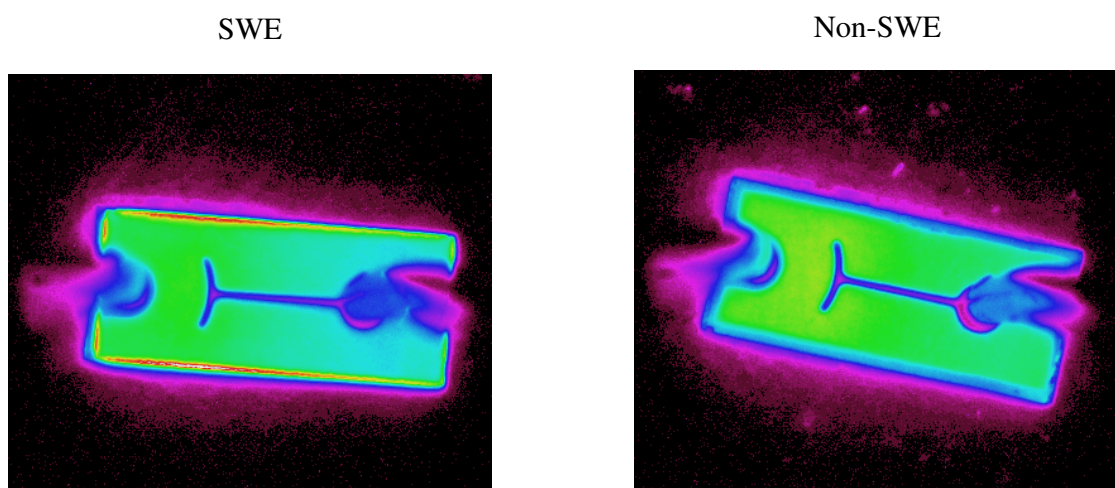


圖 4-26 有無 SWE 發光影像差異。a. 有 SWE；b. 無 SWE

小結：

- 1.雷切後再結晶物會將切割道都塞滿；SWE 清洗後發現除了雷切後之再結晶物幾乎去除外，也將 EPI Layer 蝕刻出 Undercut。
- 2.有 SWE 可使亮度提升約 9~12%。
- 3.由發光影像差異，發現經 SWE 邊緣的光能被萃取出來。

第五章 總結



本實驗研究為利用高溫磷酸進行濕式蝕刻，1.發現不同磊晶層結構經 SWE 後則對 Undercut 的角度沒有變化，主要因為濕蝕刻所呈現的角度是受晶格方向所影響。2.GaN 蝕刻後量測之角度約 44~46°與參考文獻計算所得接近。3.變動蝕刻溶液混合比例得知，磷酸含量較高所得到的亮度較亮。依據 SEM 圖片比較，硫酸比例偏高去除雷切結晶顆粒之效果較差些。4.變動蝕刻溫度條件，溫度越高則蝕刻寬度越大。依據 SEM 圖片比較，溫度越高去除雷切之再結晶顆粒效果較佳。另外，蝕刻溫度越高亮度反而沒有變更亮，原因為蝕刻後造成元件損傷，使得發光面積變小，因此亮度會變暗。5.變動蝕刻時間長短，蝕

刻時間越久蝕刻寬度越大，亮度也越亮，主要為去除吸光物質(再結晶物)效果較好。依據 SEM 圖片比較，蝕刻時間越久去除雷切之結晶顆粒效果較佳。最後，6.驗證有無 SWE 之亮度，經由 SWE 清洗可將雷切後之再結晶物去除外，也可使亮度提升。並從發光影像，發現經 SWE 邊緣的光能被萃取出來，亮度約可提升 9~12%。

本文針對藍寶石基板之高溫磷酸濕式蝕刻製程，可藉由基板表面幾何圖形之變化，來改變 LED 的散射機制，或將散射光導引至 LED 內部，進而由逃逸角錐中穿出，增加晶粒的側向光，所以成為增加 LED 光萃取效率的有效技術。



參考文獻

- [1] Lee et al., High Brightness GaN-Based Light Emitting Diodes, Journal of display technology, **3**, 2, 2007
- [2] 郭浩中、賴芳儀、郭守義，LED 原理與應用，Page **177~180**，五南出版公司，民國 98 年
- [3] E. Fred Schubert, Light-Emitting Diodes, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, Cambridge University Press, ISBN-13 978-0-521-86538-8, page **121-221**, (2006)
- [4] Shao-Hua Huang et al., “Improved light extraction of nitride-based flip-chip light-emitting diodes via sapphire shaping and texturing”, IEEE Photonics Technol. Lett., **18**, 2623, (2006)
- [5] 陳建隆，發光二極體之原理與製程，Page **6.2~6.23**，全華科技圖書股份有限公司，(2006)
- [6] D.S.Kuo et al., “Nitride-Based LEDs With Phosphoric Acid Etched Undercut Sidewalls”, IEEE Photonics Technol. Lett., **21**, 510, (2009)
- [7] Sven-Silvius Schad, “Extraction Efficiency of GaN-Based LEDs”, Annual Report 2000, Optoelectronics Department, University of Ulm, **99-104**
- [8] Hung-Wen Huang et al., “Efficiency Enhancement of GaN-Based

- Power-Chip LEDs with Sidewall Roughness by Natural Lithography”,
Electrochemical and Solid-State Letters, **10**, H59-H62, (2007)
- [9] Ya-Ju Lee et al., “High Brightness GaN-Based Light-Emitting Diodes”,
Journal of Display Technology, **3**, 118, (2007)
- [10] Chih-Chiang Kao et al., “Light-Output Enhancement in a
Nitride-Based Light-Emitting Diode With 22° Undercut Sidewalls”,
IEEE Photonics Technol. Lett., **17**, 19, (2005)
- [11] C. S. Chang et al., “Nitride-Based LEDs With Textured Side Walls”,
IEEE Photonics Technol. Lett., **16**, 750, (2004)
- [12] C. W. Kuo et al., “Optical Simulation and Fabrication of
Nitride-Based LEDs With the Inverted Pyramid Sidewalls”, IEEE
Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1
- [13] W.Y. Fu et al., “Geometrical Shaping of InGaN Light-emitting Diodes
by Laser Micromachining”, 1
- [14] Lei Ma et al., “Comparison of Different GaN Etching Techniques”,
CS MANTECH Conference, April 24-27, Vancouver, British
Columbia, Canada, **105**, (2006)
- [15] D. A. Stocker et al., “Crystallographic wet chemical etching of GaN”,
Appl. Phys. Lett., **73**, 2654, (1998)
- [16] D. A. Stocker et al., “Crystallographic Wet Chemical Etching of
p-Type GaN ”, Journal of The Electrochemical Society, **147**, 763-764,

(2000)

- [17] Chia-Feng Lin et al., “Enhanced Light Output in Nitride-Based Light-Emitting Diodes by Roughening the Mesa Sidewall”, IEEE Photonics Technol. Lett., **17**, 2038, (2005)
- [18] Jing Wang et al., “Fabrication of Patterned Sapphire Substrate by Wet Chemical Etching for Maskless Lateral Overgrowth of GaN”, Journal of The Electrochemical Society, **153**, C182-C185, (2006)
- [19] D. S. Wu et al., “Fabrication of Pyramidal Patterned Sapphire Substrates for High-Efficiency InGaN-Based Light Emitting Diodes”, Journal of The Electrochemical Society, **153**, G765-G770, (2006)
- [20] M. H. Lo et al., “High efficiency light emitting diode with anisotropically etched GaN-sapphire interface”, Appl. Phys. Lett., **95**, 041109, (2009)
- [21] Li-Chuan Chang et al., “Output power enhancements of nitride-based light-emitting diodes with inverted pyramid sidewalls structure”, Solid-State Electronics, **56**, 8-12, (2011)
- [22] F. Dwikusuma et al., “Study on Sapphire Surface Preparation for III-Nitride Heteroepitaxial Growth by Chemical Treatments”, Journal of The Electrochemical Society, **149**, G603-G608, (2002)
- [23] Seong-Jin Kim, “Improvement of GaN-Based Light-Emitting Diode by Indium-Tin-Oxide Transparent Electrode and Vertical Electrode”,

IEEE Photonics Technol. Lett., **17**, 1617-1619, (2005)

- [24] Seong-Jin KIM, “Vertical Electrode GaN-Based Light-Emitting Diode Fabricated by Selective Wet Etching Technique”, Japanese Journal of Applied Physics, **44**, 2921–2924, (2005)
- [25] D. Zhuang, J.H. Edgar , “Wet etching of GaN, AlN, and SiC: a review”, Materials Science and Engineering, **48**, 1–46, (2005)
- [26] 莊達人，VLSI 製造技術，Page **145~382**，高立圖書有限公司，民國 87 年
- [27] 羅文雄、蔡榮輝、鄭岫盈譯，半導體製造技術，Page **269~558**，滄海書局，(2004)
- [28] 史光國，現代半導體發光及雷射二極體材料技術，全華出版，第 2 章，民國 93 年
- [29] 姜庭隆譯，半導體製程，滄海書局，Page **163~443**，(2001)
- [30] 張俊彥，積體電路製程及設備技術手冊，民國 86 年
- [31] 蕭豐慶，“藍寶石基板上圖案的形貌與其對氮化鎵磊晶成長的影響”，國立交通大學，碩士論文 (2010)
- [32] Huang Yajun et al., “Fabrication of Vertical GaN-Based LEDs with Oblique Side Walls Structure”, Semiconductor Technology, **36**, 3, (2011)