

國立交通大學

電子工程學系

電子研究所碩士班

碩士論文

圖案化藍寶石基板氮化鎵系發光二極體
之電雜訊量測及分析研究

Noise Measurement and Analysis of Nitride-Based Light
Emitting Diodes Grown on Patterned Sapphire Substrates

研究生：管金儀

指導教授：林國瑞 教授

郭浩中 教授

中華民國一〇一年七月

圖案化藍寶石基板氮化鎵系發光二極體
之電雜訊量測及分析研究

Noise Measurement and Analysis of Nitride-Based Light
Emitting Diodes Grown on Patterned Sapphire Substrates

研 究 生：管金儀

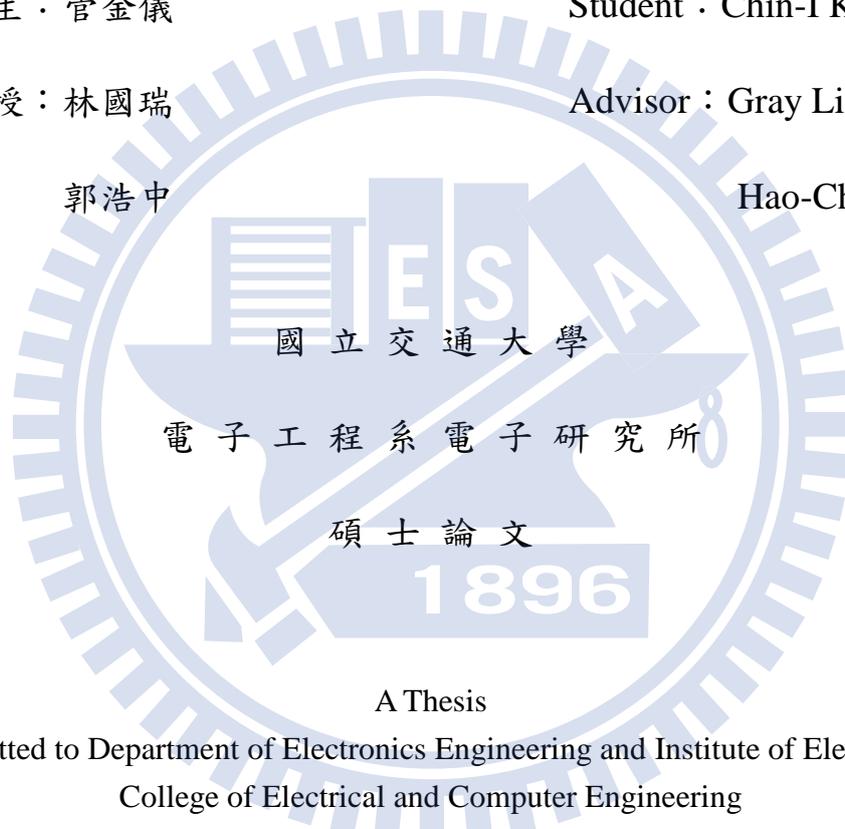
Student : Chin-I Kuan

指 導 教 授：林國瑞

Advisor : Gray Lin

郭浩中

Hao-Chung Kuo



電子工程系電子研究所
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Electronics Engineering and Institute of Electronics
College of Electrical and Computer Engineering
National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

For Degree of

Master

in

Electronics Engineering

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

圖案化藍寶石基板氮化鎵系發光二極體 之電雜訊量測及分析研究

學生：管金儀

指導教授：林國瑞 博士
郭浩中 博士

國立交通大學

電子工程學系 電子研究所碩士班

摘要

本論文研究氮化鎵鎵發光二極體 (InGaN LED) 之低頻電雜訊特性與發光元件品質的關係；我們首先量測不同注入電流下之電雜訊頻譜，接著以經驗公式對個別頻譜作低頻的擬合分析，最後計算元件之雜訊指數並與 LED 品質作對應。實驗之 LED 樣品特別選取不同磊晶基板條件，分為三個部份來進行：(1) 成長在平面藍寶石基板、圖案化藍寶石基板以及氮化鎵基板 LED，(2) 成長在一次與二次濕蝕刻之圖案化藍寶石基板 LED，(3) 成長在不同乾蝕刻高度之圖案化藍寶石基板 LED；分析結果顯示品質較佳的 LED，其雜訊指數亦較大。由於所萃取的雜訊指數代表雜訊強度對應電流的變化率，高品質的 LED 在低電流因此對應較低的雜訊振幅；我們同時透過材料與缺陷分析來驗證雜訊量測用於分析 LED 品質的可靠性。

Noise Measurement and Analysis of Nitride-Based Light Emitting Diodes Grown on Patterned Sapphire Substrates

Student : Chin-I Kuan

Advisor : Dr. Gray Lin

Dr. Hao-Chung Kuo

Department of Electronics Engineering &
Institute of Electronics Engineering National Chiao Tung University

Abstract

In this thesis, the device quality of InGaN light-emitting diodes (LEDs) is investigated by studying their low-frequency noise characteristics. We firstly measure the electrical noise spectra of LEDs under different current injection. Then the individual spectrum is fitted by empirical formula in low-frequency range. Finally the noise exponent is calculated and correlated to the LED quality. The LED samples grown on controlled substrates are intentionally selected for noise characterization, they are: (1) LEDs grown on flat sapphire substrate, patterned sapphire substrate (PSS) and GaN substrate, (2) LEDs grown on first and second wet-etched patterned sapphire substrate, (3) LEDs grown on dry-etched patterned sapphire substrate with different pattern height. Analysis has shown that high quality devices are associated with large noise exponent. Since the extracted noise exponent stand for the ratio of noise intensity change to incremental current, high quality LEDs therefore possess lower noise intensity under low injected current. By the way, we have confirmed the LED quality by separate material and defect characterization.

致 謝

碩士班兩年生涯，在人生的旅途中看似短暫，但卻是讓我在知識、學識以及生活相處都突飛猛進的一段時間。回首過去，我會說這是一段驚險刺激的冒險旅程，也是我度過最美好的時光。

首先非常感謝林國瑞老師，老師豐富的學識與涵養，以及在實驗上謹慎的態度，都是值得我學習的地方。另外我也特別感謝光電所郭浩中老師的指導與鼓勵，老師幽默風趣、內容充實的課程令我印象深刻，更提供了我許多機會與契機，使我在碩士班的路途上一路順遂，非常感謝老師這兩年來對我的鼎力支持。同時感謝李建平老師提供了完善良好的研究環境，使我能順利地進行研究，老師在Meeting提供的意見與指導也使我在茫茫研究中突破盲點，實在是獲益良多。還要感謝林聖迪老師總是默默的關心我，能夠講出實驗室全部同學的名字實在很不簡單，老師在口試時清晰的分析和寶貴的意見使我重新了解到研究的缺失與不嚴謹，非常感謝您的幫助。在此我必須說，沒有李良箴學姐的幫忙，我是絕對不可能完成學位的，打從碩一就一直麻煩您教我使用頻譜分析儀，還有您慷慨提供的計算軟體，同時也教導了我很多關於雜訊的理論和量測時遇到的困難，量測時遇到瓶頸，我第一個想到的就是您。至於研究契機，我要感謝工研院電光所的陳秋伶小姐，提供了和林國瑞老師的產學合作計畫，讓我有充足的LED樣品進行研究。也要感謝和我一起討論的陳宗德和戴君帆，在我剛接觸LED雜訊這一塊領域時給了我很多有用的意見還有LED製程的幫助。

陪伴我度過許多日子的實驗室成員們，首先感謝李宗霖學長在低溫雜訊量測實驗的幫忙，平常也都多虧您的照顧，也感謝鄭旭傑學長和林岳民學長提醒我許多實驗細節，使我做實驗能更加謹慎，另外也要感謝巫朝陽學長在實驗室的幫忙和告訴我許多有用的知識。同屆奮鬥的好同學，首先感謝翁思強這兩年來一路幫我打點，無論是生活還是休閒都是我的好夥伴，連最後的口試咖啡都要麻煩你幫

我買。還有整天充滿意見的陳明睿(大學長)以及低調的王參豪，你們陪我度過無數的實驗和提醒我去重訓、吃飯。也要感謝孔祥義和林佑龍幫我拍SEM以及一起討論改善我的口試投影片。還有感謝李書誠在我無聊時陪我聊天解悶，以及學長馬江智，在準備畢業流程的這段時光裡也讓我學習了很多。也特別感謝孫耘和李依珊，我們同為六月的畢業生，在論文、口試和投影片方面向妳們詢問最多，也謝謝妳們不厭其煩地為我解說。最後我要感謝光電所的王朝勳學長，我的LED知識幾乎都是來自於你，不但教導我很多基本觀念，並解答我在製程或是研究上遇到的問題，還親自帶領我做製程與實驗量測，非常感謝你的付出。

我的家人，父親與母親永遠是我最佳的避風港與堡壘，從小到大碩士畢業一路走來，只有你們無怨無悔的付出才能成就今天的我，默默在背後支持我的家人，不論何時何地都能和我分享悲傷喜悅，使我永遠能提起勇氣面對人生的挑戰，在此，我將這份畢業的喜悅僅獻於你們。



目錄

摘要	i
Abstract	ii
致謝	iii
目錄	v
表目錄	viii
圖目錄	ix
第一章 緒論	1
1.1 發光二極體簡介	1
1.2 I/f 低頻電雜訊	2
1.3 圖案化藍寶石基板 LED	3
1.4 研究動機與目的	4
第二章 基礎理論	5
2.1 藍寶石基板材料特性	5
2.2 藍寶石基板缺陷分析	6
2.3 圖案化藍寶石基板	9

2.4	藍寶石基板蝕刻技術	12
2.4.1	濕式蝕刻	12
2.4.2	乾式蝕刻	13
2.5	低頻 $1/f$ 電雜訊	14
2.5.1	$1/f$ 電雜訊起源	14
2.5.2	$1/f$ 電雜訊分析原理	16
2.6	以重複取樣方式量測低頻電雜訊	19
第三章	實驗製程與量測系統	21
3.1	晶片設計與成長	21
3.1.1	多種基板 LED 製備	21
3.1.2	濕式蝕刻圖案化藍寶石基板 LED 製造流程	23
3.1.3	乾式蝕刻圖案化藍寶石基板 LED 製造流程	31
3.2	發光二極體製程	39
3.3	量測系統架設	42
3.3.1	LED 直流電特性量測系統	42
3.3.2	LED 積分球量測系統	43
3.3.3	低頻電雜訊量測系統	44
3.3.4	低頻雜訊重複取樣量測系統	46

第四章	實驗結果與討論	48
4.1	多種基板 LED 特性分析	48
4.2	濕式蝕刻藍寶石基板LED特性分析	52
4.3	乾式蝕刻藍寶石基板LED特性分析	59
4.3.1	光電特性量測分析	59
4.3.2	低頻雜訊量測分析	62
4.3.3	LED磊晶品質分析	69
第五章	結論與未來展望	76
5.1	結論	76
5.2	未來展望	77
	參考資料	80
	簡歷(Vita)	85

表目錄

第二章

表 2-1 蝕刻方式特性比較	13
----------------	----

第三章

表 3-1 一次蝕刻圖形尺寸	24
----------------	----

表 3-2 二次蝕刻圖形尺寸	25
----------------	----

第四章

表 4-1 三種基板LED順向偏壓、逆向漏電流、出光強度、FWHM	50
-----------------------------------	----

表 4-2 一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED順向偏壓、逆向漏電流、出光強度	55
--	----

表 4-3 一次濕式蝕刻LED β 統計表	58
-----------------------------	----

表 4-4 二次濕式蝕刻LED β 統計表	58
-----------------------------	----

表 4-5 F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED 順向偏壓、逆向漏電流、出光強度	61
--	----

表 4-6 F.S. LED β 統計表	68
----------------------------	----

表 4-7 1.3 μm LED β 統計表	68
---	----

表 4-8 1.5 μm LED β 統計表	68
---	----

表 4-9 1.7 μm LED β 統計表	68
---	----

表 4-10 F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED XRD 強度與半高寬	70
--	----

圖目錄

第一章

圖 1-1	LED 檯燈及背光源 LCD	1
圖 1-2	LED 在通入電流 $100\mu\text{A}$ 時的雜訊頻譜	2
圖 1-3	兩個 trap 的 Flicker noise [5]	3

第二章

圖 2-1	藍寶石晶格示意圖	5
圖 2-2	藍寶石晶柱及基板	6
圖 2-3	四種點缺陷	7
圖 2-4	(a) 刃差排	7
	(b) 螺旋差排	7
圖 2-5	貫穿式差排 TEM 影像[22]	8
圖 2-6	氮化鎵與藍寶石基板晶格不匹配示意圖	8
圖 2-7	光線由氮化鎵薄膜至空氣示意圖	9
圖 2-8	圖案化藍寶石基板 SEM 影像[25]	10
圖 2-9	(a) 平面藍寶石基板[25]	10
	(b) 圖案化藍寶石基板 TEM 影像圖[25]	10

圖 2-10	使用兩種 PSS 基板成長 GaN 薄膜流程圖	11
圖 2-11	使用 MOCVD 成長(a) 0 分鐘 (b) 10 分鐘 (c) 30 分鐘 (d)70 分鐘的基板 SEM 俯視圖	12
圖 2-12	快閃記憶體的 V_{th} 變動示意圖	14
圖 2-13	V_{th} 變動所對應的雜訊頻譜	15
圖 2-14	LED 電雜訊頻譜	17
圖 2-15	β 計算流程圖，(a)不同電壓下 LED 的雜訊頻譜	17
	(b)取對數 log 後做線性 Fitting，找出 Y 軸截距	18
	(c)電流對 Y 軸截距作圖，斜率即為 β	18
圖 2-16	多重取樣雜訊計算的頻譜	20
 第三章		
圖 3-1	磊晶結構示意圖	22
圖 3-2	圖案化藍寶石基板 LED SEM 側視圖	22
圖 3-3	(a)一次濕式蝕刻 AFM 俯視圖	24
	(b)一次濕式蝕刻 AFM 側視圖	24
圖 3-4	(a)二次濕式蝕刻 AFM 俯視圖	25
	(b)二次濕式蝕刻 AFM 側視圖	25
圖 3-5	濕式蝕刻流程圖	26

圖 3-6	藍寶石晶格結構 (a)頂視圖	27
	(b)側視圖	27
圖 3-7	(a)一次濕式蝕刻 SEM 俯視圖	27
	(b) SEM 斜角俯視圖	28
圖 3-8	二次蝕刻過程示意圖	28
圖 3-9	(a)二次濕式蝕刻 SEM 俯視圖	28
	(b) SEM 斜角俯視圖	29
圖 3-10	磊晶結構示意圖	30
圖 3-11	一次濕式蝕刻基板 SEM 側視圖	30
圖 3-12	二次濕式蝕刻基板 SEM 側視圖	31
圖 3-13	(a)高度 1.3 μm 的圓錐圖形 SEM 俯視圖	32
	(b)高度 1.3 μm 的圓錐圖形 SEM 側視圖	33
圖 3-14	(a)高度 1.5 μm 的圓錐圖形 SEM 俯視圖	33
	(b)高度 1.5 μm 的圓錐圖形 SEM 側視圖	34
圖 3-15	(a)高度 1.7 μm 的圓錐圖形 SEM 俯視圖	34
	(b)高度 1.7 μm 的圓錐圖形 SEM 側視圖	35
圖 3-16	乾式蝕刻流程圖	35
圖 3-17	乾蝕刻基板磊晶結構剖面圖	36
圖 3-18	平面藍寶石基板磊晶後之 SEM 側視圖	37

圖 3-19	圓錐高度為 1.3 μm 磊晶後之 SEM 側視圖	37
圖 3-20	圓錐高度為 1.5 μm 磊晶後之 SEM 側視圖	38
圖 3-21	圓錐高度為 1.7 μm 磊晶後之 SEM 側視圖	38
圖 3-22	LED 製程流程圖	40
圖 3-23	完成製程之 LED 立體示意圖	41
圖 3-24	B1500A 外觀	42
圖 3-25	積分球量測系統外觀	43
圖 3-26	雜訊量測系統	45
圖 3-27	儀器架設及設定示意圖	45
圖 3-28	重複取樣雜訊量測系統	47
圖 3-29	儀器架設及設定示意圖	47

第四章

圖 4-1	三種基板 LED I-V 曲線圖	49
圖 4-2	三種基板 LED L-I-V 曲線圖	49
圖 4-3	三種基板 LED EL 光譜	50
圖 4-4	不同電流下的雜訊頻譜	51
圖 4-5	三種基板 LED β 值計算	52
圖 4-6	一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板 LED I-V 曲線圖	53

圖 4-7	一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板 LED L-I-V 曲線圖	54
圖 4-8	一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED EL光譜	55
圖 4-9	不同電流下的雜訊頻譜	56
圖 4-10	一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED β 計算圖	57
圖 4-11	一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED β 分佈統計圖	58
圖 4-12	F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED I-V曲線	60
圖 4-13	F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED L-I-V曲線	61
圖 4-14	F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED EL光譜	62
圖 4-15	不同電流下的雜訊頻譜	63
圖 4-16	F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED β 計算圖	63
圖 4-17	F.S. LED在不同注入電流下的雜訊頻譜	65
圖 4-18	1.3 μ m LED在不同注入電流下的雜訊頻譜	65
圖 4-19	1.5 μ m LED在不同注入電流下的雜訊頻譜	66
圖 4-20	1.7 μ m LED在不同注入電流下的雜訊頻譜	66
圖 4-21	F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED β 計算圖	67
圖 4-22	F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED β 分佈統計圖	69
圖 4-23	F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED XRD rocking curve與Fitting line	70
圖 4-24	InGaN/GaN量子井之TEM	71

圖 4-25	藍寶石基板圓錐圖形與GaN薄膜交界處(一)	72
圖 4-26	藍寶石基板圓錐圖形與GaN薄膜交界處(二)	72
圖 4-27	F.S. LED EPD	73
圖 4-28	1.3 μm PSS LED EPD	74
圖 4-29	1.5 μm PSS LED EPD	74
圖 4-30	1.7 μm PSS LED EPD	75

第五章

圖 5-1	300K不同注入電流雜訊頻譜	78
圖 5-2	77K不同注入電流雜訊頻譜	78
圖 5-3	溫度300K至77K注入電流1mA雜訊頻譜	79

第一章 緒論

1.1 發光二極體(LED)簡介

近年來，氮化鎵/氮化鎵(InGaN/GaN)發光二極體(Light emitting diodes)已全面應用於LCD顯示器、照明光源及交通燈號...等日常生活用具中，主因於氮化鎵材料有著相當寬的直接能隙(3.4eV)、搭配銦和鋁的摻雜可使出光波長從紫外光延伸到黃光，此外相比於其他三五族材料它的熱導性和環境穩定性也較高。而激發螢光粉(YAG:Ce)所產生的白光也是目前最受矚目的固態照明，可望取代傳統光源，如水銀燈或鎢絲燈泡。但如要提高其商業用途，勢必要提高其出光和使用壽命，而目前氮化鎵LED主要問題在於基板和磊晶層的晶格常數相差過大，約為16%，造成磊晶後氮化鎵薄膜之差排錯位密度(Threading Dislocation Density)高達 $10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ [1]。因此，如何降低錯位差排密度將是當前最重要的課題。現今改善方式有側向長晶(Epitaxial Laterally Overgrown, ELOG)、圖案化藍寶石基板(Patterned Sapphire Substrate)、氮化鎵基板、碳化矽(SiC)基板等方式，但由於成本、技術、時間的考量，目前的主流是圖案化藍寶石基板。圖 1-1 為LED應用於檯燈照明及 2012 倫敦奧運主會場，倫敦碗。



圖 1-1 LED 檯燈及背光源 LCD

(照片取自網站：<http://www.ledinside.com.tw/>與 <http://london2012stream.com/Stream>)

1.2 $1/f$ 低頻電雜訊

電雜訊通常來自於電子元件本身和外部接線電路，其中與頻率無關的雜訊如熱雜訊(Thermal noise)、散彈型雜訊(Shot noise)、爆發型雜訊(Burst Noise)。而與頻率相關的雜訊有 $1/f$ 低頻雜訊(又稱Flicker noise)、產生-再復合雜訊(Generation-Recombination noise, g-r noise)。本論文主要探討為元件在低頻率時所產生的 $1/f$ 雜訊，圖 1-2 所示即為LED在通入電流為 $100 \mu\text{A}$ 時的雜訊頻譜。

電雜訊之一的無規則電報訊號(Random Telegraph Signal)，起因可推測是由於帶電載子在元件內的陷阱(Trap)困住逃脫(Trapping-detrapping)產生的訊號，其單一陷阱所對應的雜訊頻譜特性是 $1/f^2$ ，而 $1/f$ 低頻雜訊可視為無規則電報訊號(RTS)的疊加 [2-5]，如圖 1-3 所示，很明顯地有兩段 $1/f^2$ 區域。其特性依據元件品質、p-n 介面、通入電流有所不同。再透過雜訊經驗公式模型(Noise empirical formula model) [6] 計算：

$$S_n(f) = C_0 \frac{I^\beta}{f^\gamma} \quad (1-1)$$

而在低頻區域雜訊斜率(γ)趨近於1，可計算出雜訊指數 β 。藉由比較不同結構LED的 β ，再推測出LED晶格品質及其可靠度[7]。

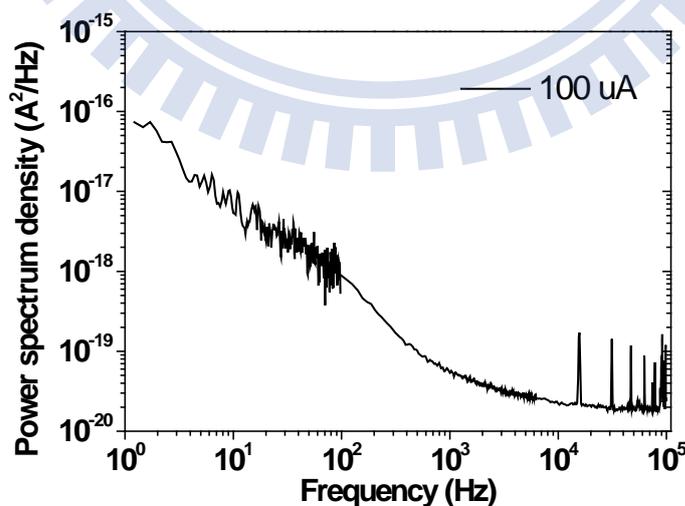


圖 1-2 LED 在通入電流 $100\mu\text{A}$ 時的雜訊頻譜

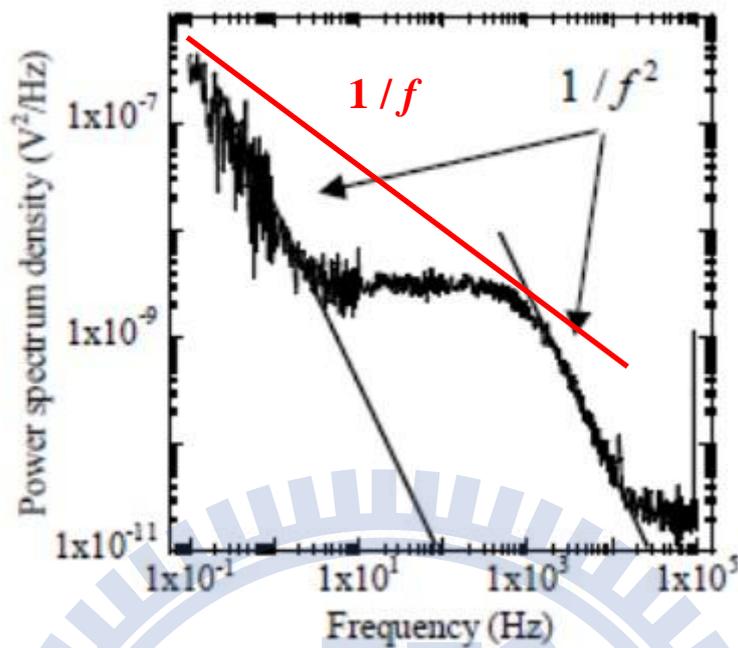


圖 1-3 兩個 trap 的 Flicker noise [5]

1.3 圖案化藍寶石基板 LED

目前使用側向長晶技術(epitaxial lateral overgrowth, ELOG)可有效降低差排錯位密度至 10^7 cm^{-2} [8], [9]。但過程複雜且費時，必須使用有機金屬化學氣相沉積(MOCVD)做二次成長，其中過程樣品易受污染。現今已被圖案化藍寶石基板技術(Patterned Sapphire Substrate, PSS)取代，相比於ELOG，PSS只需MOCVD一次成長，可提高產量，且成長過程不中斷，降低污染。其中基板圖案有條狀[10]、孔洞[11]、金字塔型[12]、矩形[13]，不同圖案會影響成長模式、光萃取效率(Light extraction)及差排錯位密度[13], [14]。目前PSS已被驗證可以減少兩個數量級的差排錯位密度[15]，此外也被驗證可以增加光萃取效率進而提升整體發光效率[16]。基於上述兩種優勢，圖案化藍寶石基板已是未來發展的潮流。

1.4 研究動機與目的

氮化鎵系藍光LED發展至今已有將近二十年，但由於缺乏晶格匹配的基板，故在磊晶時造成的缺陷(Defects)一直是一大憂患，並直接反應在出光、壽命、可靠度上。現今低頻電雜訊已是舉世公認的一種分析材料品質的檢驗方式，最主要在於能準確地反應半導體內的晶格品質[17-19]。我們打算藉由分析電雜訊和LED缺陷的關係，進而探討其可靠度。實驗樣品以目前主流的圖案化藍寶石基板為主，藉由製程改變基板上的圖案來設計不同品質的LED，進而探討缺陷和雜訊的關聯性，我們期望能找出一套可以正確地反應與比較晶格品質的雜訊量測方式。

目前LED元件樣品的量測分析方式以DC直流量測為主流，如I-V曲線或是包含出光的L-I-V曲線。在此我們提供另一種分析技巧，低頻雜訊分析計算，以雜訊的角度切入，我們期望能以不同的方式來檢測LED的品質。而用分析雜訊的方式來評估LED品質，比起傳統測試，它有著更加敏感、非破壞性的優點，而通入的電流僅數mA，不至於損害到LED本身。

第二章 基礎理論

2.1 藍寶石基板材料特性

藍寶石基板(Sapphire substrate)的化學組成為氧化鋁(Al_2O_3)，即兩個鋁原子和三個氧原子以共價鍵形式結合，晶格排列為六方最密堆積(Hexagonal)。圖2-1為藍寶石晶格示意圖，晶格常數(Lattice constant)分別為 $a_0 = 4.748\text{\AA}$ ， $c_0 = 12.957\text{\AA}$ 。C-Plane長晶技術是目前最普遍、最成熟的技術，大多LED也都沿此平面生長，R-Plane或M-Plane藍寶石基板主要用來生長非極性/半極性GaN薄膜，以提高發光效率。另外藍寶石的光學穿透帶很寬，從近紫外光(190nm)到中紅外線(9350nm)都有很好的透光性。目前藍寶石基板是由藍寶石晶柱(Ingots)切割而成，如圖2-2所示。而成長晶柱方式有柴氏拉晶法(簡稱CZ法)、凱氏長晶法(簡稱KY法)兩種主流。另外也可使用碳化矽(SiC)作為基板，比起藍寶石在導熱、導電方面都佔優勢，但由於目前成本過高而無法大量生產。

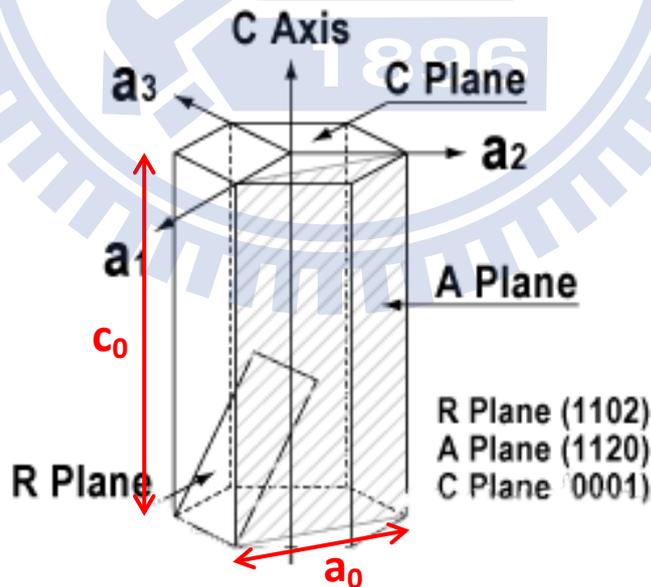


圖 2-1 藍寶石晶格示意圖

(圖片引用自網站：<http://www.nanoclub.tw/>)



圖 2-2 藍寶石晶柱及基板

(圖片引用自網站：<http://www.luxmaterial.com/>)

2.2 藍寶石基板缺陷分析

藍寶石基板上的氮化鎵以MOCVD磊晶成長為主流，所謂磊晶(epitaxy)即由希臘字epi(在…之上)與taxis(排列)組合而成，在一平面上整齊排列原子。而排列次序有瑕疵則稱為缺陷，首先介紹四種點缺陷：空缺型(Vacancy)、間隙型(Interstitial)、置換型(Substitutional)與錯位型(Antisite)，如圖2-3所示。當點缺陷連成一線時，形成線缺陷又稱為差排(Dislocation)，其中分為刃差排(Edge dislocations)和螺旋差排(Screw dislocations)，另有混合差排(Mixed type dislocations)。圖2-4 (a)為刃差排(b)為螺旋差排。由差排理論可知，晶體內部的差排會隨著磊晶成長延伸到磊晶層的表面[20], [21]，而由基板和薄膜間因晶格不匹配所產生的差排則稱為貫穿式差排(threading dislocation)，最明顯的特徵是會持續延伸至氮化鎵薄膜表面，圖2-5為貫穿式差排的TEM影像[22]。

以目前最為普遍的磊晶方式來說，用MOCVD在藍寶石基板C-Plane上成長氮化鎵，在室溫下氮化鎵晶格常數為 3.189\AA ，藍寶石為 4.758\AA ，而成長於上方的氮化鎵分子會以旋轉30度沉積於藍寶石基板上(如圖2-6所示)。經由計算：

$$\frac{|a_{Al_2O_3} - \sqrt{3}a_{GaN}|}{a_{Al_2O_3}} = 16\% \quad (2-1)$$

氮化鎵與藍寶石基板之間有著16%之晶格不匹配，造成氮化鎵薄膜之差排錯位密度(Threading Dislocation Density)高達 $10^8 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ [1]。

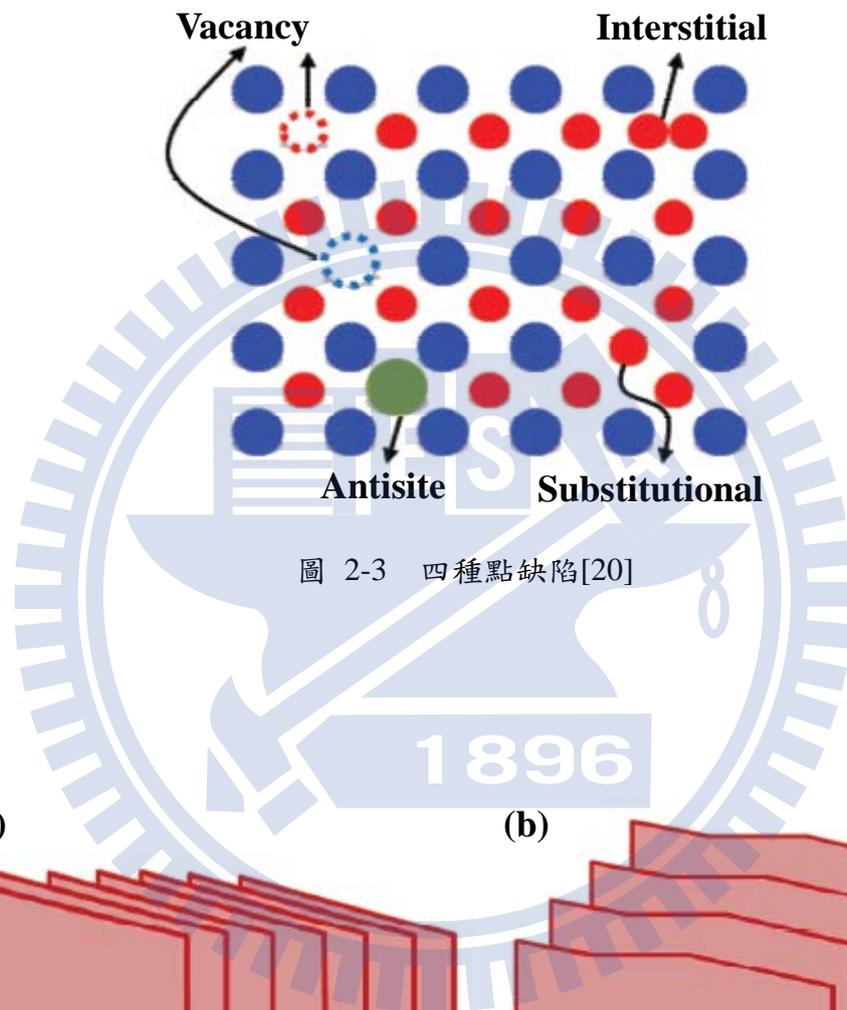


圖 2-3 四種點缺陷[20]

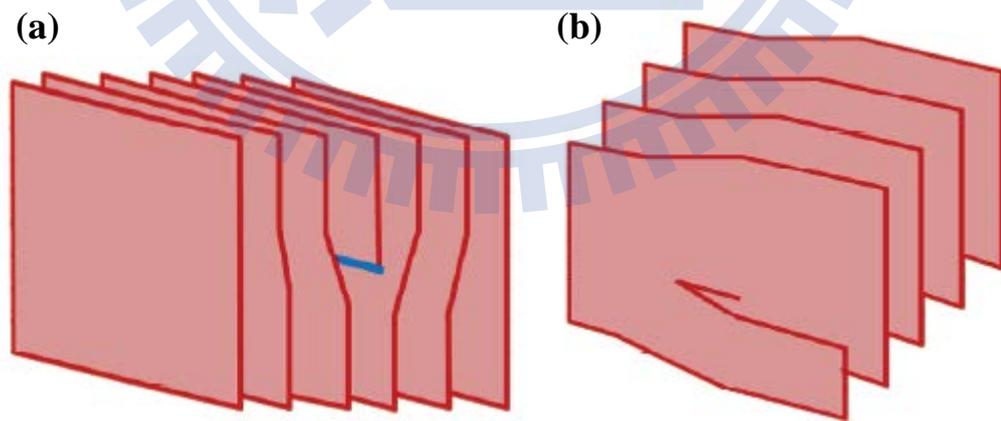


圖 2-4 (a)刃差排 (b)螺旋差排[20]

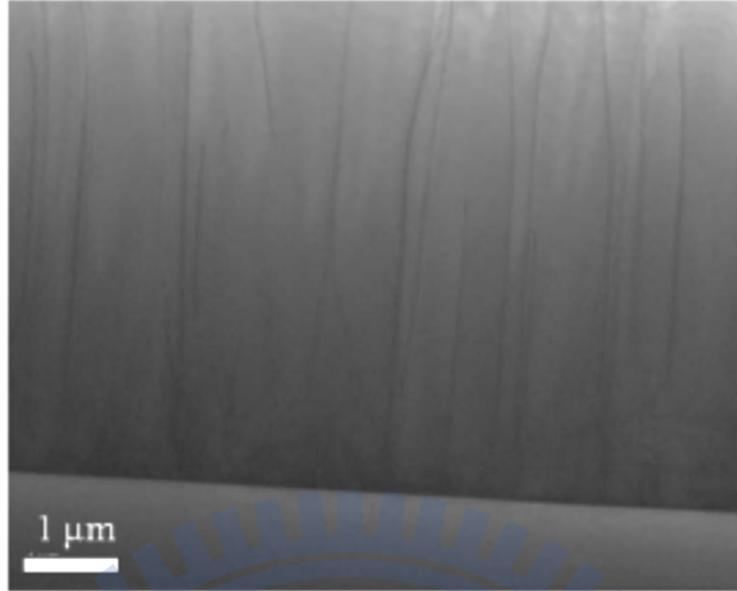


圖 2-5 貫穿式差排TEM影像[22]



圖 2-6 氮化鎵與藍寶石基板晶格不匹配示意圖

2.3 圖案化藍寶石基板

外部量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)是評估LED的一項重要指標，是內部量子效率(Internal Quantum Efficiency, IQE)和光萃取效率(Light Extraction Efficiency, LEE)的乘積。

$$\eta_{EQE} = \eta_{IQE} \times \eta_{LEE} \quad (2-2)$$

由於基板和氮化鎵薄膜的晶格不匹配所產生的錯位差排導致內部量子效率低落。GaN薄膜的折射率為2.45，遠高於空氣的1，而全反射角約為23.57度[$\theta_c = \sin^{-1}(n_{air}/n_{GaN})$]，而相差甚大的折射係數導致光逃逸角錐只有23.57度(如圖2-7所示)，換言之有約73.8%的光線是反射回LED內部的，最終被吸收轉化成熱。因此如何減少內部的差排密度及增加出光效率是現今LED最重要的議題[23], [24]。以Woei-Kai Wang等人發表的論文為例[25]，採用圖案化藍寶石基板技術可以降低晶體內部缺陷並提升出光，圖2-8是其基板凹槽狀圖案SEM影像圖，圖2-9 (a)是傳統平面藍寶石基板和(b)圖案化藍寶石基板的TEM橫截面影像圖，可以很明顯地看出差排缺陷密度有大幅度的減少。

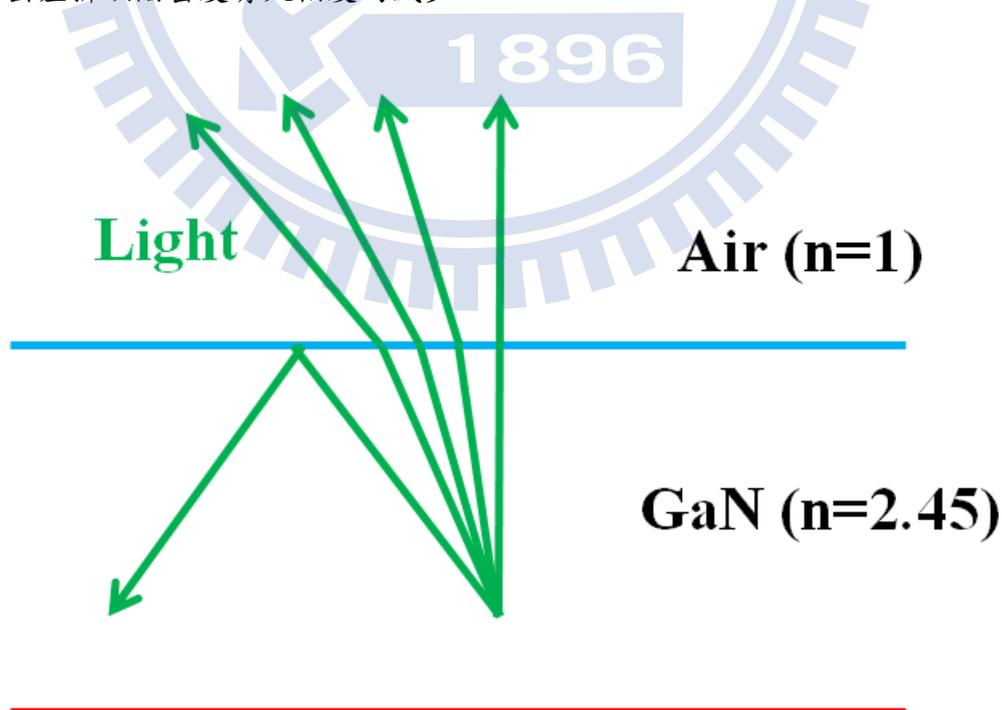


圖 2-7 光線由氮化鎵薄膜至空氣示意圖

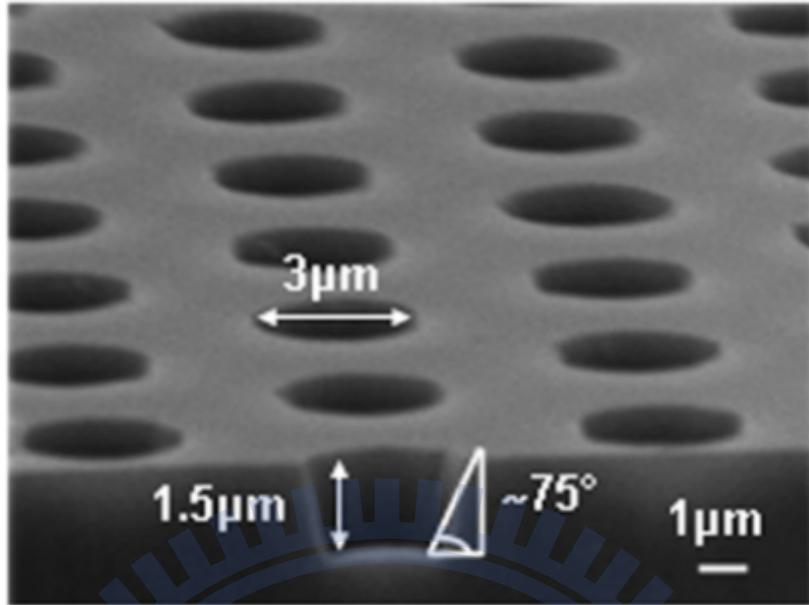


圖 2-8 圖案化藍寶石基板SEM影像[25]

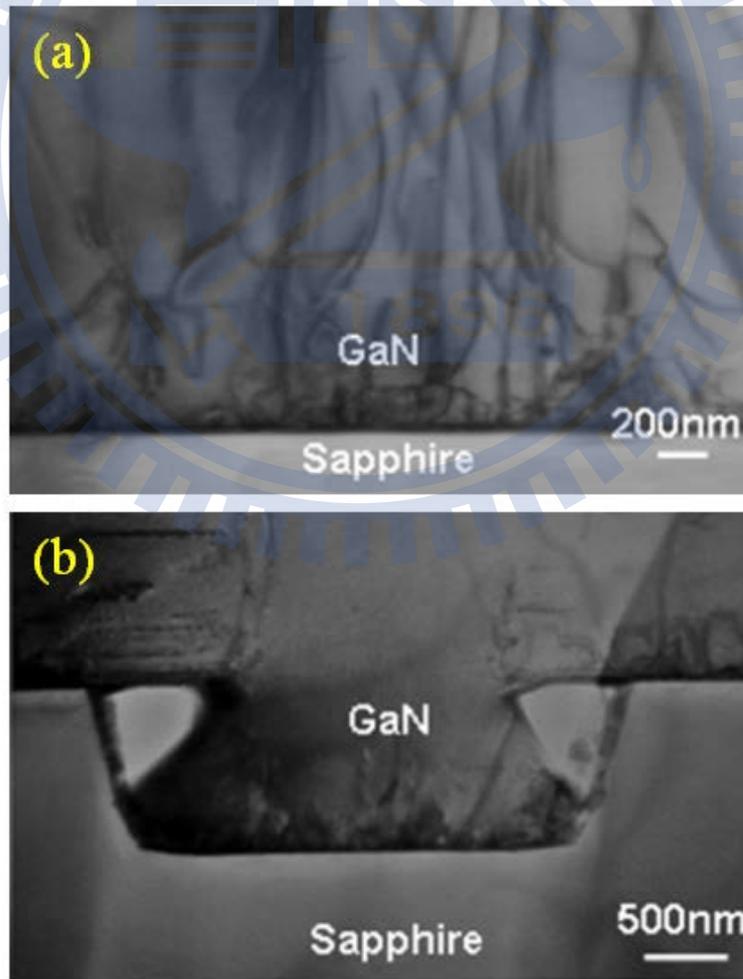


圖 2-9 (a)平面藍寶石基板 (b)圖案化藍寶石基板TEM影像圖[25]

在Jae-Hoon Lee等人所發表的兩篇論文中，製作了圓錐形(Cone-Shape)的基板圖案，其優點有在長晶時有類似ELOG (Epitaxial Lateral Overgrowth)的效果、比起傳統條狀(stripe)圖案可以更快成長出平坦的氮化鎵薄膜[26]，並可以舒緩因晶格不匹配所產生的應力問題[27]。圖2-10是條狀和圓錐狀基板在成長氮化鎵薄膜時的流程圖，由於GaN較易成長於平坦的C-Plane，故容易沉積於基板平面處，而難以在傾斜及有弧度的圖案側面堆積，圖2-11是圓錐狀基板使用MOCVD成長(a) 0分鐘 (b) 10分鐘 (c) 30分鐘 (d)70分鐘的基板SEM俯視圖，也證實了氮化鎵是從圓錐間的平坦處開始沉積，而圓錐頂端是在最後由四周的氮化鎵橫向成長並覆蓋住，此種成長方式類似ELOG。

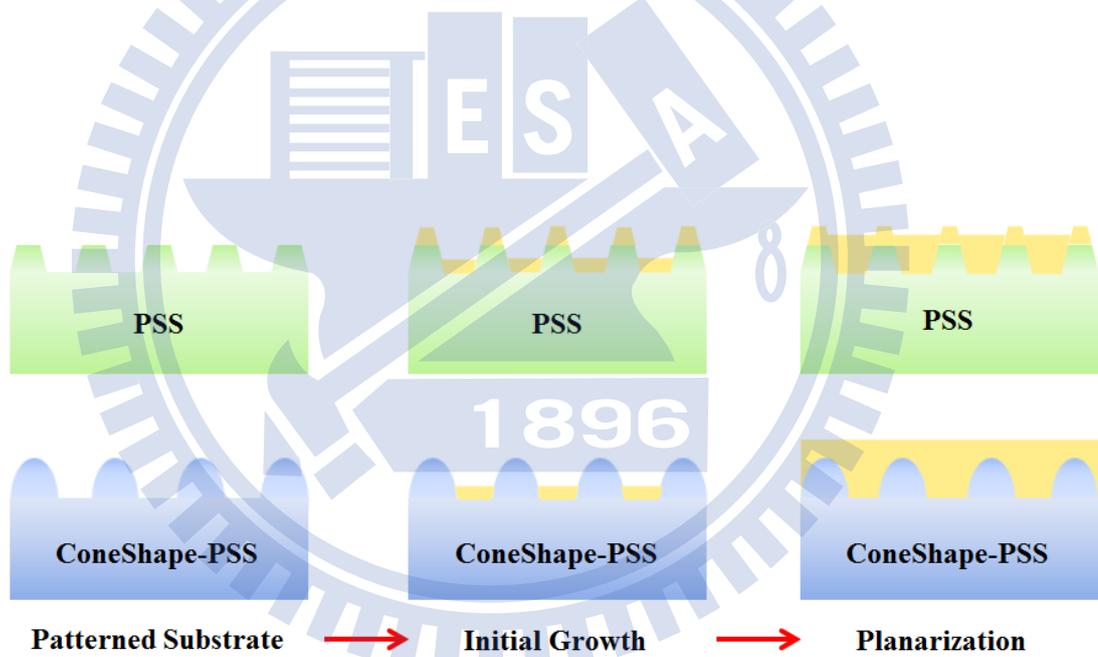


圖 2-10 使用兩種PSS基板成長GaN薄膜流程圖

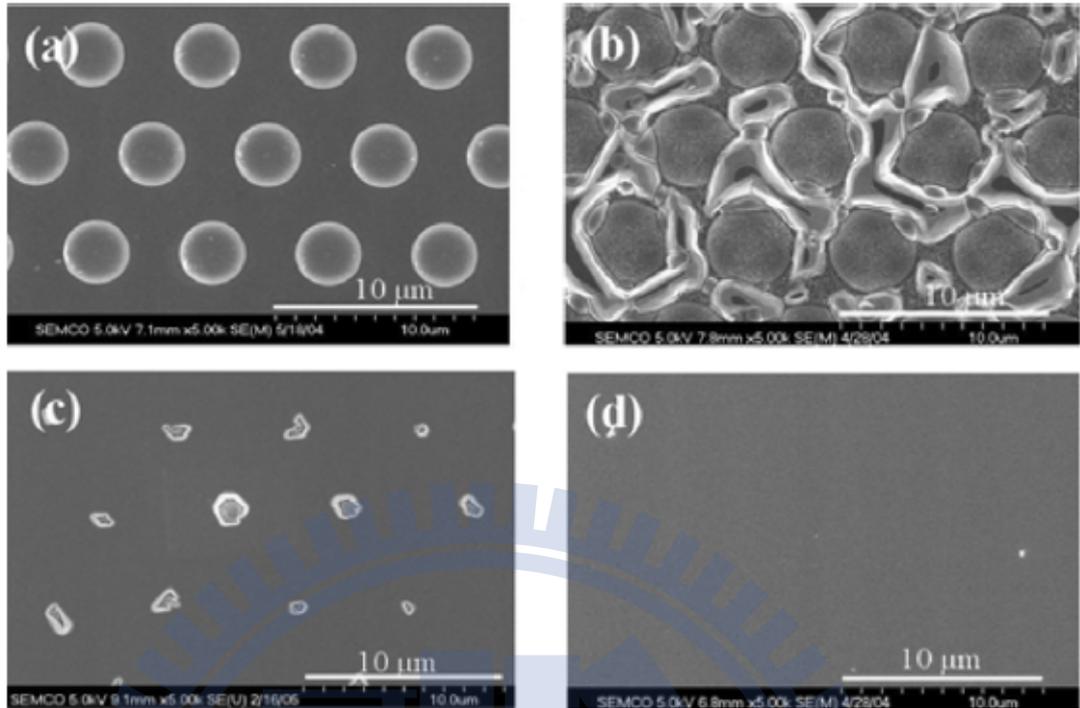


圖 2-11 使用MOCVD成長(a) 0分鐘 (b) 10分鐘 (c) 30分鐘 (d)70分鐘的圖案化藍寶石基板SEM俯視圖[27]

2.4 藍寶石基板蝕刻技術

本節分為二個蝕刻製程來說明，濕式蝕刻(Wet etching)、乾式蝕刻(Dry etching)，目前業界也是以這兩種技術為主，兩種方式各有優缺點。濕式蝕刻成本低、產量大、選擇比(Selectivity)低，但其原理為化學蝕刻，因此方向性較差，為等向性蝕刻。乾式蝕刻則相反，擁有相當好的選擇比，可以蝕刻出尖銳的平邊，為非等向性蝕刻，但缺點是成本高，產量低。以下分別就這兩種方法進行說明。

2.4.1 濕式蝕刻(Wet etching)

濕式蝕刻的重點機制在於溶液成分及比例的調配，目前的藍寶石基板蝕刻液有磷酸、硫酸與其兩者之混和溶液。若以純磷酸在270°C下蝕刻並不會有特定的晶面產生，整體來說相當平坦，藍寶石基板表面是整體向下蝕刻;若以純硫酸

也在270°C下蝕刻則會發現表面有很多三角錐或多角錐，有表面粗化的情形發生，此種情況稱為自然圖案(Nature pattern)。經實驗後發現採用硫酸與磷酸溶液體積比例為3：1至5：1在溫度為250°C至300°C之蝕刻溶液效果最好[28]。

2.4.2 乾式蝕刻(Dry etching)

藍寶石基板的乾式蝕刻主要採用感應式耦合電漿蝕刻機(Inductively Coupled Plasma, ICP)進行蝕刻，蝕刻過程中包含物理蝕刻和化學蝕刻。在反應腔體內藉由高電壓產生電漿，其成分有電子、正負離子、中性原子等，正離子提供物理轟擊打壞表面鍵結，再藉由負離子所產生的化學反應蝕刻。使用氣體為氯氣(Cl₂)及三氯化硼(BCl₃)，通入氣體的比例也會影響基板圖案。一般來說通入的氯氣比例越高，基板的圖案高度則越低，但寬度越大。

	成分	蝕刻速率	選擇比	蝕刻方向
濕式蝕刻	H ₂ SO ₄ /H ₃ PO ₄	高	低	等向性
乾式蝕刻	Cl ₂ /BCl ₃	低	高	非等向性

表 2-1 蝕刻方式特性比較

2.5 低頻 $1/f$ 電雜訊

2.5.1 $1/f$ 電雜訊起源

目前 $1/f$ 雜訊的起因有眾多說法，我整理現今論文研究可大致分為三大主流：

1. 載子的困住與脫逃：由於載子發生困住與逃脫(Trapping-detrapping)缺陷及載子產生-再復合(Generation-Recombination)所造成的RTS雜訊($1/f^2$)疊加而成[2-5]，經由計算可得勞倫茲分佈(Lorentzian Distribution)，由下式表示：

$$S_I \propto \frac{2\tau}{1+(\omega\tau)^2} \quad (2-3)$$

$$S_I \propto \begin{cases} \text{constant for } f \ll f_c \equiv \frac{1}{2\pi\tau} \\ \frac{1}{f^2} \text{ for } f \gg f_c \end{cases} \quad (2-4)$$

τ 是載子平均生命期，而 $\omega=2\pi f$ 。圖2-12為一個快閃記憶體(Flash Memory)的臨界電壓變動(Threshold Voltage Fluctuation)示意圖，圖2-13為其所對應的雜訊頻譜。這應證了一個二階(two-level) RTN(Random Telegraph Noise)所產生的雜訊頻譜有 $1/f^2$ 特徵[5]。

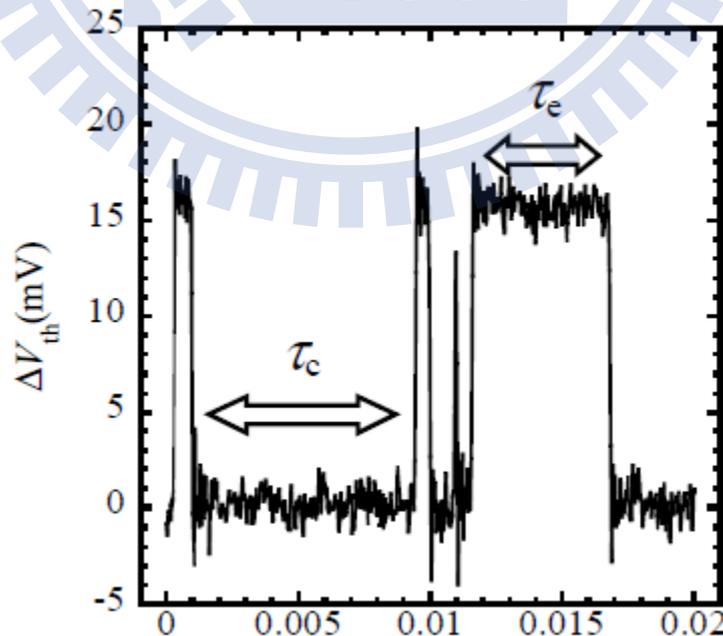


圖 2-12 快閃記憶體的 V_{th} 變動示意圖[5]

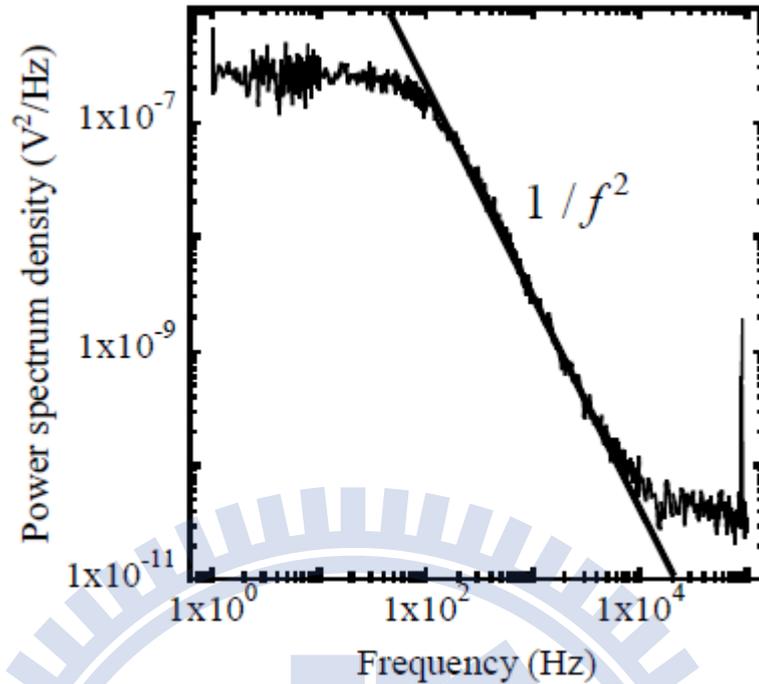


圖 2-13 V_{th} 變動所對應的雜訊頻譜[5]

2.遷移率調變：因缺陷所造成的載子遷移率變動(Mobility Fluctuation)理論[29]，主張載子在半導體中移動有一定機率陷入缺陷(Traps)中，而改變了周遭材料的電荷分佈(Charge Distribution)及使缺陷能階發生位移(Shift of energy level)。這導致電子的等效遷移率(Effective mobility)降低。另外眾所皆知的Hooge formula也證實了這一點[30]，其方程式如下所示：

$$S_n = \alpha \frac{I^2}{fN} \quad (2-5)$$

其中 α 為Hooge參數依照元件有不同的值，以GaN光二極體(Photodiode)來說其值大約為 10^{-2} 至 10^{-4} ， N 為電流總載子數， I 是總電流。

3.介面與串聯電阻： $1/f$ 雜訊由介面(Junction)和串聯電阻(Series Resistance)所產生的雜訊構成，介面部分包含空乏區所產生的雜訊 S_{jun} 和電流 I 的成正比，而串聯電阻產生的雜訊 S_{sr} 則和電流的二次方成正比[31], [32]，相關公式如下所示：

$$S_V = S_{jun} \left(\frac{dV_F}{dI_F} - R_S \right)^2 + S_{sr} R_S^2 \quad (2-6)$$

$$S_{jun} = \frac{\alpha q I}{\tau f} \quad (2-7)$$

$$S_{sr} = C_{1/f} \frac{I^2}{f} \quad (2-8)$$

在式2-6中，元件雜訊可以看成介面部分和串聯電阻所產生的雜訊加總而成， dV_F/dI_F 表示微分電阻 r_d ， R_S 是串聯電阻。式2-7和2-8分別表示接面和串聯電阻的雜訊， α 為常數，對於GaN材料來說多介於 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 之間， q 是電子基本電量， τ 是載子平均複合時間常數。值得注意的是當 $r_d \gg R_S$ 時，元件總體雜訊是由介面雜訊(Junction Noise)主導，但隨著注入電流上升，由串聯電阻所產生的雜訊最終將為元件的主要雜訊來源。

2.5.2 $1/f$ 電雜訊分析計算原理

本論文針對氮化銦鎵LED低頻電雜訊做分析，圖2-14為在全頻域下LED之雜訊頻譜，在低頻區域($<100\text{Hz}$)可以發現雜訊有 $1/f$ 特性，因此根據Hooge-type equation[33]：

$$S_n(f) = C_0 \frac{I^\beta}{f^\gamma} \quad (2-9)$$

$$\log(S_n) = \log C_0 + \beta \log I - \gamma \log f \quad (2-10)$$

而 S_n 為雜訊強度(Power Spectral Density)， C_0 是常數， γ 是雜訊強度對應到頻率的斜率，由圖2-13可約略估計在1左右，式(2-10)為對式(2-9)兩邊取對數(log)，並藉由輔助軟體的Fitting可得知大約是0.9~1.1之間。 β 則是針對不同電流下的雜訊強度計算出來的雜訊指數，不同的元件對應的值也不同，以氮化鎵光偵測器來說，其值約在1至3之間，目前尚未有研究將其應用於氮化鎵發光二極體，我們在之前的研究發現 β 可作為元件晶格品質及缺陷密度的指標[7]，圖2-15為計算流程圖，(a)不同電壓下LED的雜訊頻譜，(b)取對數log後做線性Fitting，找出Y軸截距，(c)電流對Y軸截距作圖，斜率即為 β 。

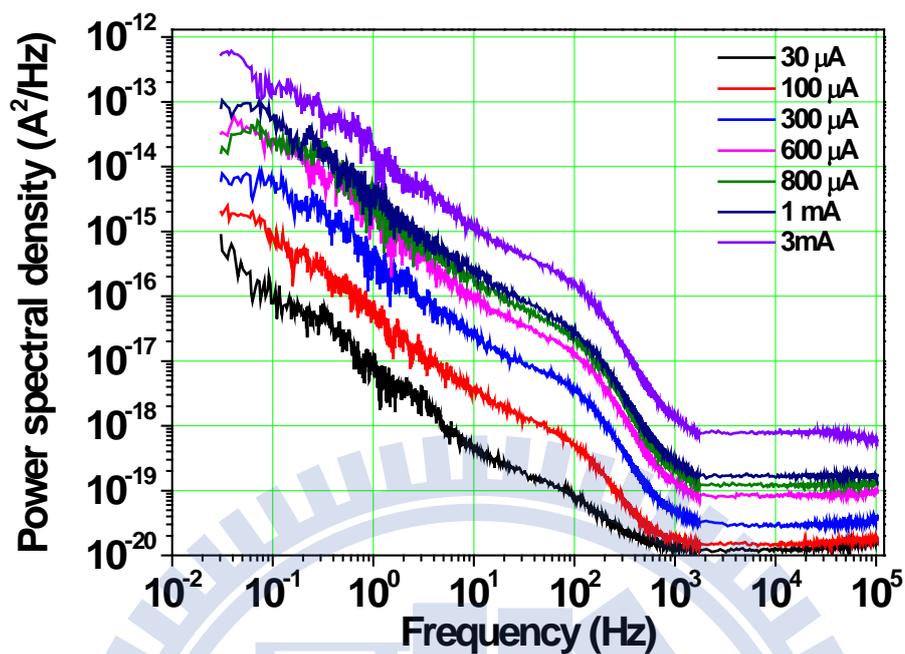


圖 2-14 LED全頻域電雜訊頻譜

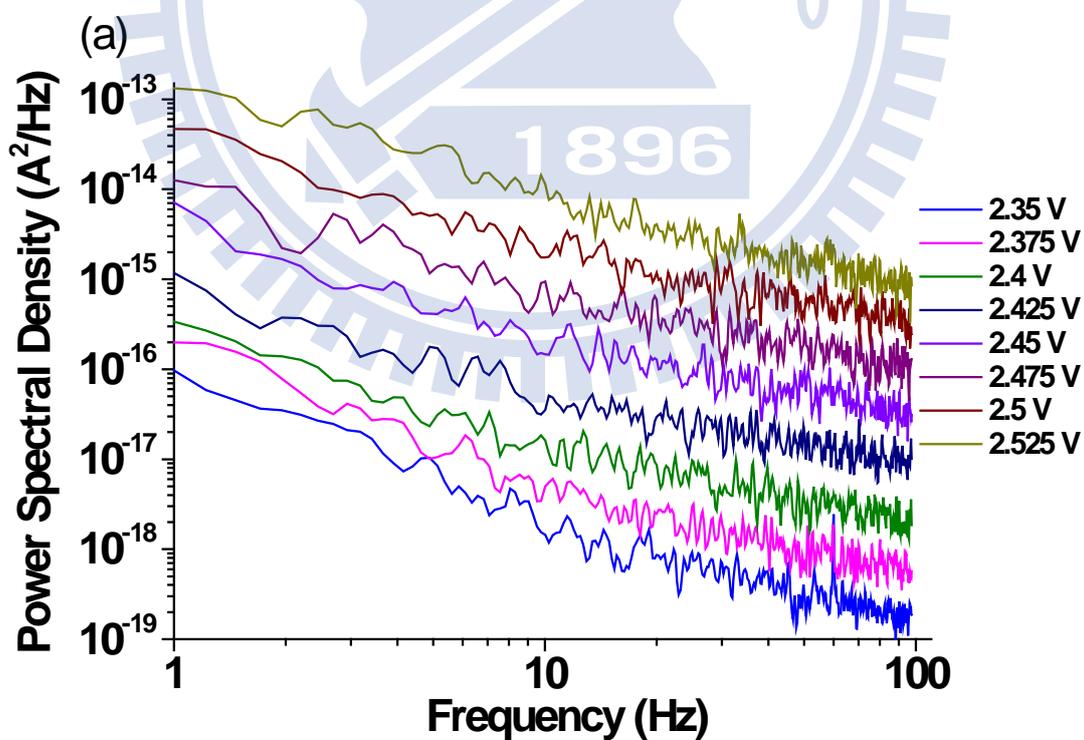


圖 2-15 β 計算流程圖，(a)不同電壓下LED的雜訊頻譜

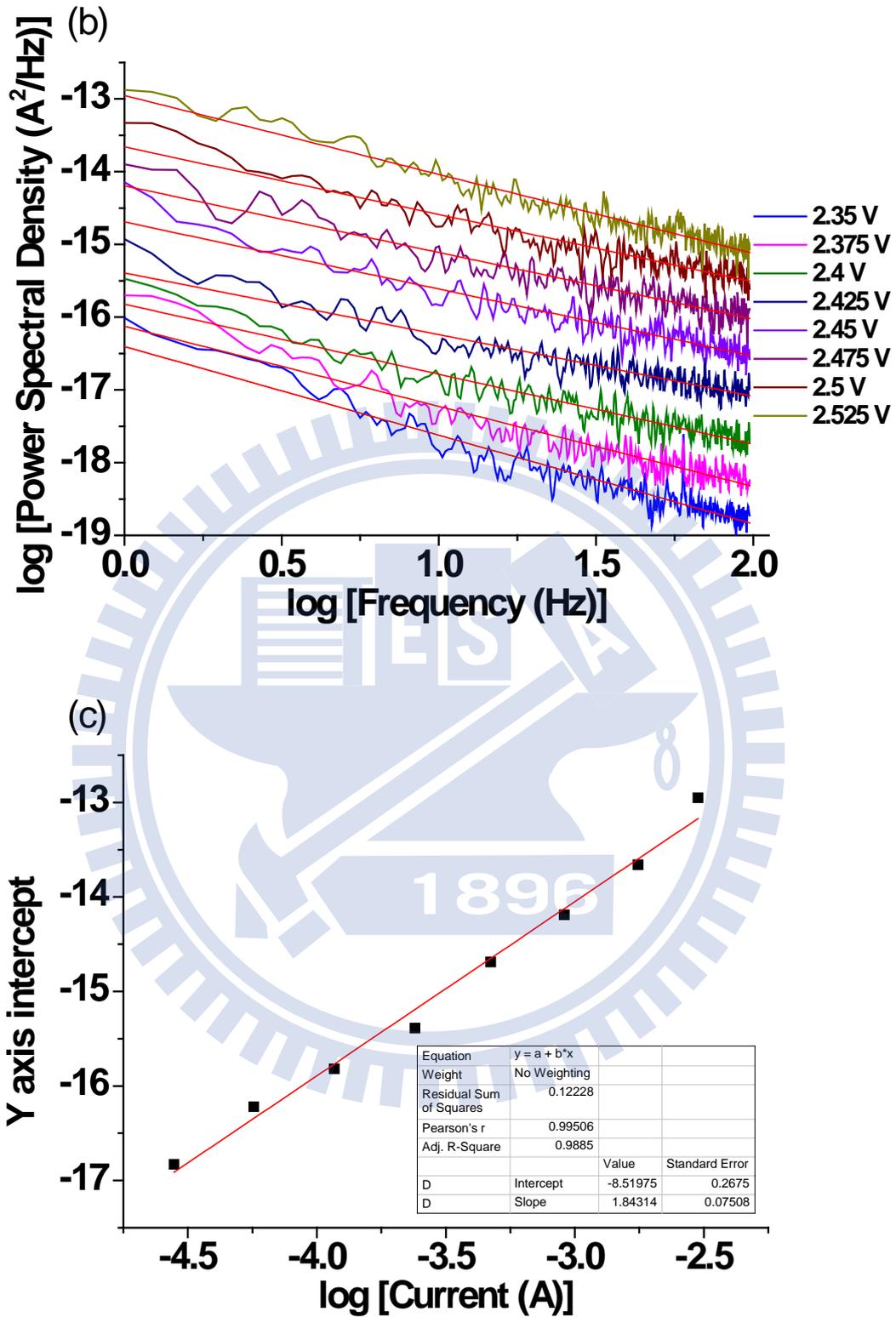


圖 2-15 β 計算流程圖，(b)取對數log後做線性Fitting，找出Y軸截距

(c)電流對Y軸截距作圖，斜率即為 β 。

2.6 以重複取樣方式量測低頻電雜訊

傳統雜訊量測所取得的資料是儀器將雜訊做快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)的結果，可直接分析從儀器取出的資料的優點，但其缺點是資料點數太少和量測頻率最低只有1Hz。若改以SR780(Stanford Research Systems)量測，先取得雜訊在時域(Time Domain)的頻譜，再自行透過電腦利用雜訊的隨機性進行重複取樣(Over Sampling)的FFT運算[33-35]，可以將採樣頻率推至0.1Hz，同時在低頻處也有更多資料點可作分析，增加頻譜的準確性。

對於低頻率的雜訊(0.1Hz)來說，平均每十秒只出現一次，而FFT使取其一千次做平均，那必須花費掉三個小時左右，而這段時間內儀器也不能受到干擾。為此，利用雜訊的隨機分佈特性，針對不同間隔的雜訊進行重複取樣，意即擷取不同間隔的雜訊可以組成新的雜訊頻譜。首先將取樣頻率(Sampling Rate)設定為4096Hz，意即每秒可取4096個資料點，則每取一點需要時間為 $1/4096$ 秒。取樣長度(Capture Length)設為1024000個點，再把這些資料點每1000個點切一段，則共可切1024段。在做傅立葉轉換時，頻寬減半為2048Hz的頻域中會有1024個點，此時解析度即最低頻率為2Hz。若將取樣時間加倍則頻寬減半1024Hz，同理在頻寬為1024Hz的頻域中會有1024個點，解析度則可降至1Hz。最後再將這些多次計算而出的頻譜整合，即可組合出點數密集的雜訊頻譜。凡是量測都會有極限，此法也不例外，由於平均次數的關係，至少需要100次的平均即最大取樣時間倍率為 2^3 ，在訊號不失真的前提下最低只能降至0.25Hz而。重複取樣量測的特點是只需花費較少時間，可以得到頻率更低的雜訊頻譜，以上述例子為例，以4096Hz擷取時域頻譜1024000個點大約耗時256秒，這是唯一需要等待的時間，之後皆由電腦進行FFT運算，即可得到0.25Hz至2048Hz的雜訊頻譜，而高於2048Hz的頻譜因訊號出現頻繁，用SR780擷取即可，圖2-16為使用此方法所取得的雜訊頻譜。

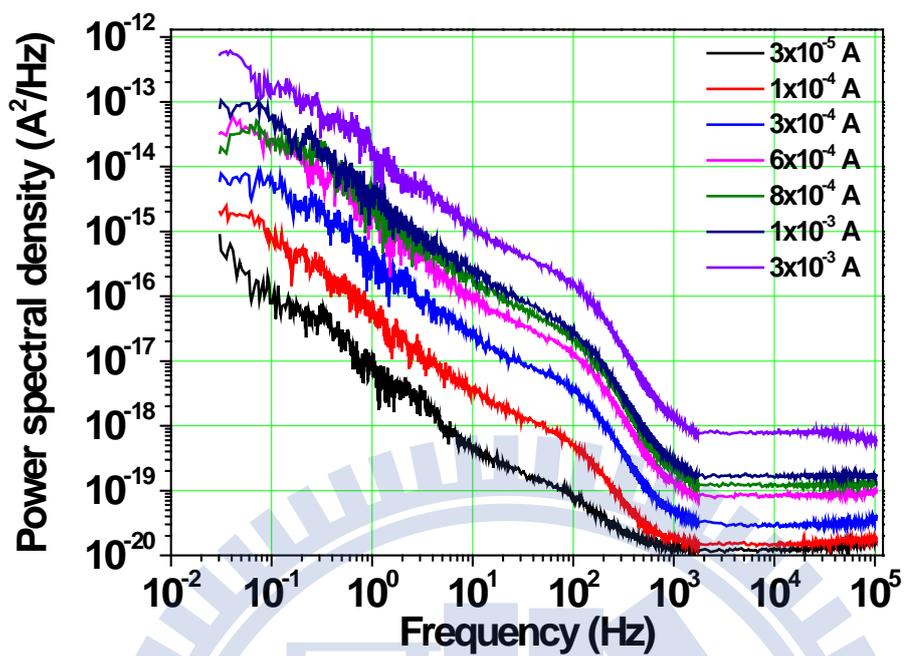


圖 2-16 重複取樣雜訊計算的頻譜

第三章 實驗製程與量測系統

3.1 晶片設計與成長

實驗樣品準備方面，分成三個部分：(1)成長於三種不同基板的 LED 樣品，分別是氮化鎵基板(GaN Substrate)、圖案化藍寶石基板(PSS)、平面藍寶石基板。(2)利用濕式蝕刻技術製造一次、二次蝕刻藍寶石基板。一次蝕刻的藍寶石基板圖形，其角錐頂端仍為平坦的 C-plane，此區域在磊晶過程中會產生缺陷，經由二次蝕刻可將頂端修成尖頂[28]。(3)利用乾式蝕刻技術製造三種不同高度的圓錐型圖案化藍寶石基板。以下分別敘述樣品製備流程。

3.1.1 多種基板 LED 製備

氮化鎵基板是由氫化物氣相沈積法(Hydride Vapour Phase Epitaxy, HVPE)製造而成，圖案化藍寶石基板(PSS)則使用電感耦合電漿蝕刻機(Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching, ICP/RIE)進行乾式蝕刻。

磊晶方面，使用有機金屬化學氣相沉積(MOCVD)在三種基板上成長同樣結構的氮化鎵薄膜，首先是30-100 nm的GaN buffer，接著是未摻雜的氮化鎵(undoped GaN)和摻雜矽(Si-doped)的n型氮化鎵(n-type GaN)各2 μ m，其電子濃度是 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，再來成長超晶格(Super lattice) 30至100nm，用來減少從基板延伸上來的缺陷以及增加射向基板光線的反射率，總共有兩層分別是十五對的 $\text{Al}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}/\text{GaN}$ 各2nm和十對的 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}/\text{GaN}$ 各2nm，接著是量子井部分，成長 $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ 2.4nm而GaN位障12nm，共八對形成多重量子井(Multi Quantum Well, MQW)，再來是電子阻隔層(Electron Barrier Layer, EBL) $\text{Al}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{N}$ ，用以阻隔溢流電子厚度為20nm，最後是摻雜鎂(Mg-doped)的p型氮化鎵(p-type GaN)，其電子濃度是 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，圖3-1為磊晶結構示意圖，圖3-2為磊晶完成的圖案化

藍寶石基板LED SEM側視圖。

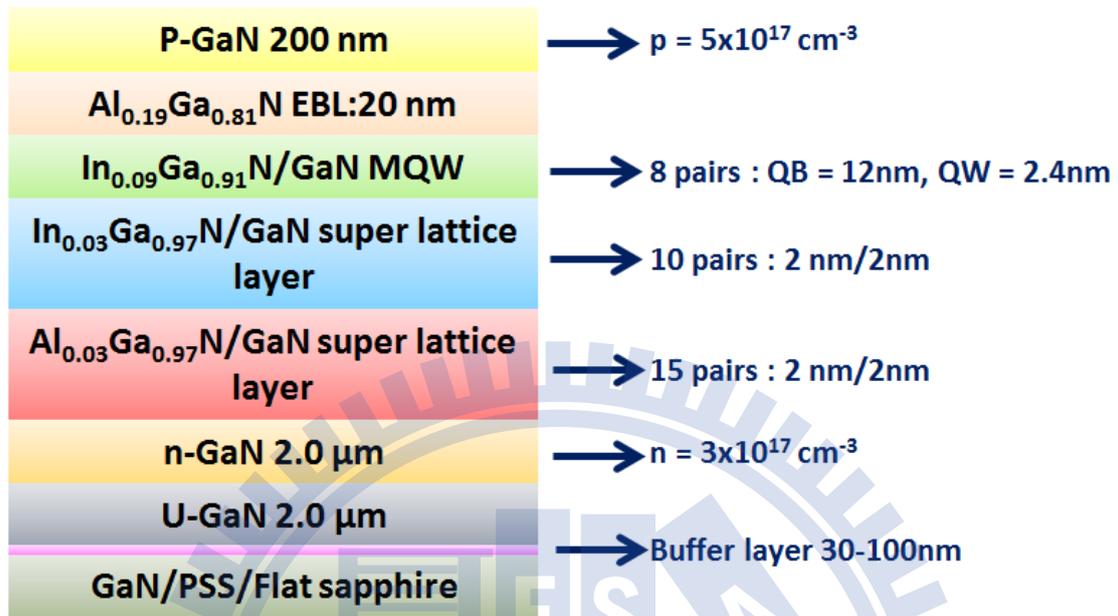


圖 3-1 磊晶結構示意圖

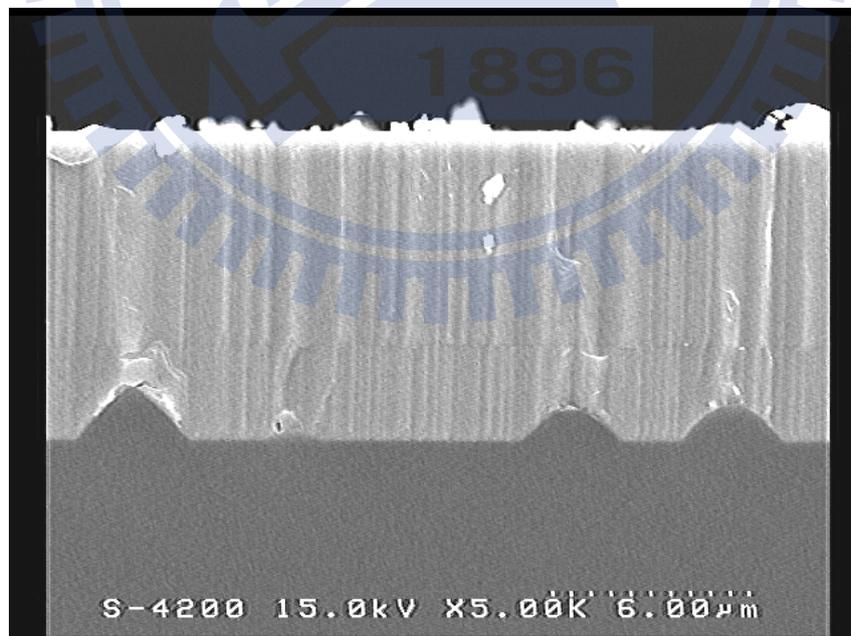


圖 3-2 圖案化藍寶石基板LED SEM側視圖

3.1.2 濕式蝕刻圖案化藍寶石基板 LED 製造流程

濕式蝕刻圖案化藍寶石基板詳細製作流程如下：

1. 製作二氧化矽阻擋層：

將晶圓置入濺鍍機系統(Sputter)中，沉積約3000Å的二氧化矽(SiO₂)薄膜。

2. 塗佈光阻附著劑：

以氣相塗抹方式塗佈脫水劑六甲基二矽氮烷(HexaMethyl DiSilazane, HMDS)，其用途為脫水及增強光阻與晶圓之附著力。

3. 塗佈光阻及去除邊緣光阻：

使用以初轉1000rpm/10sec、末轉4500rpm/30sec塗佈正光阻AZ4620，厚度約為1.6μm，再以棉花棒沾取少量丙酮去除邊緣堆積光阻，以90°C烘烤90秒

4. 曝光顯影：

使用波長為380nm的深紫外線(DUV)曝光機曝光10秒，再以顯影劑AZ300顯影約25秒，之後120°C硬烤光阻2分鐘。

5. 圖案轉移至二氧化矽阻擋層：

使用緩衝氧化層蝕刻劑(Buffer Oxide Etch, BOE)蝕刻二氧化矽，其成分為氫氟酸(HF)與氟化銨(NH₄F)以1：7調配而成的混和溶液，蝕刻時間為150秒。再以硫酸去除光阻。

6. 第一次濕式蝕刻：

採用硫酸與磷酸比例為5：1之混和溶液作為蝕刻液，溶液溫度為305°C，蝕刻時間是250秒，硫酸和磷酸的純度分別為96%和86%。圖3-3(a)為完成一次蝕刻之基板俯視圖，(b)為AFM所量測之高度分佈圖，表3-1則對應到圖3-3(b)之尺寸分佈。

7. 第二次濕式蝕刻：

蝕刻溶液的成分及比例同一次蝕刻，為溫度降至275°C，蝕刻時間是150秒，此次目的在於把圖形頂端的C-plane平面修為尖狀，減少磊晶缺陷。圖3-4(a)

為二次蝕刻之基板俯視圖，(b)為AFM所量測之高度分佈圖，表3-2則對應到圖3-4(b)之尺寸分佈。

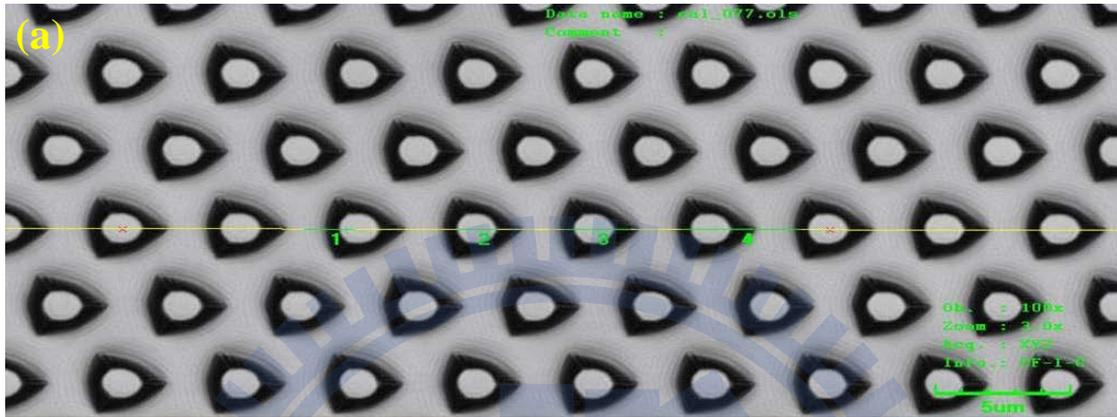


圖 3-3(a) 一次濕式蝕刻AFM俯視圖



圖 3-3(b) 一次濕式蝕刻AFM側視圖

1. Height	2. Top Surface Diameter	3. Bottom Surface Diameter	4. Period
1.2 μm	1.829 μm	2.87 μm	4.57 μm

表 3-1 一次蝕刻圖形尺寸

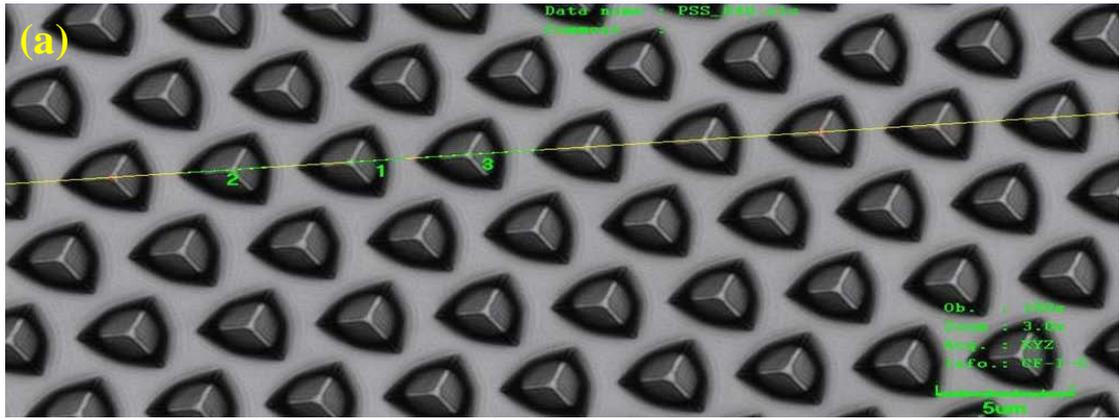


圖 3-4(a) 二次濕式蝕刻AFM俯視圖

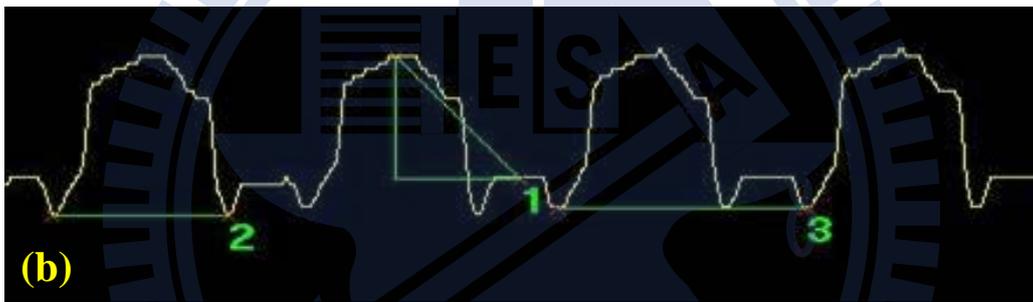


圖 3-4(b) 二次濕式蝕刻AFM側視圖

1. Height	2. Bottom Surface Diameter	3. Period
1.36 μm	3.1 μm	4.4 μm

表 3-2 二次蝕刻圖形尺寸

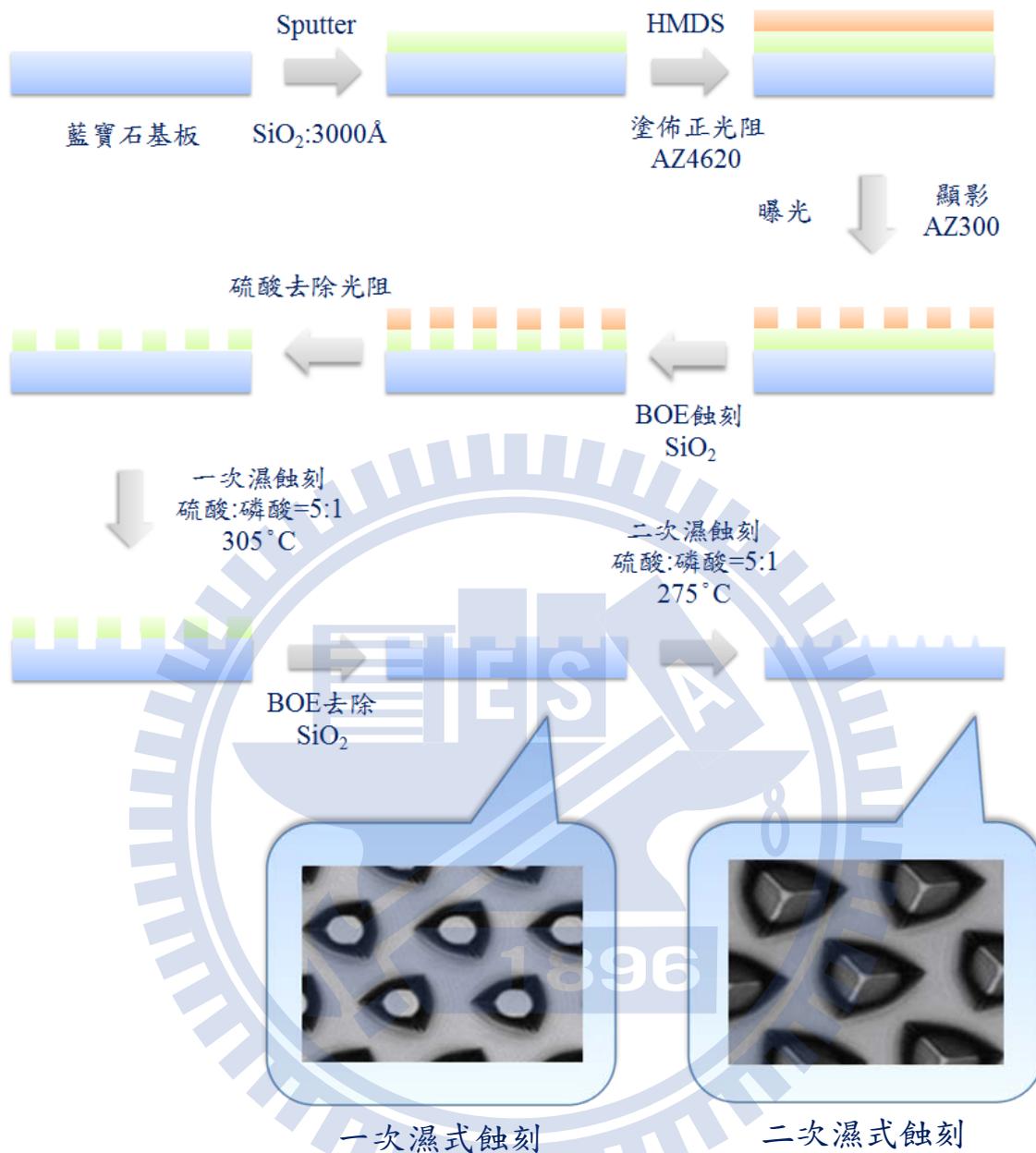


圖 3-5 一次、二次濕式蝕刻流程圖

經由上述的一次及二次濕式蝕刻可以得到兩種基板圖形，如圖3-3(a)與圖3-4(a)所示，其中差異為圖形頂端形狀，圖3-5為一次、二次濕式蝕刻流程圖。圖3-6為藍寶石晶格結構(a)頂視圖，(b)側視圖，頂端有C-plane、R-plane、N-plane三種晶格面，因此蝕刻速率也均不相同，由快到慢依序為C>R>N>A。圖3-7(a)為一次濕式蝕刻的SEM俯視圖，(b)為SEM斜角俯視圖，特徵是頂端平坦且邊緣呈現三角狀圖形，三角形的三面即為R-plane，三尖面部分是N-plane。二次蝕刻

則是針對頂端平坦的C-plane，磊晶時容易累積缺陷，因此將其蝕刻為尖形，圖3-8為二次蝕刻示意圖，圖3-9為二次濕式蝕刻的SEM俯視圖，(b)為SEM斜角俯視圖，頂端部分已被蝕刻為尖形，邊緣三角形特徵則更加明顯。

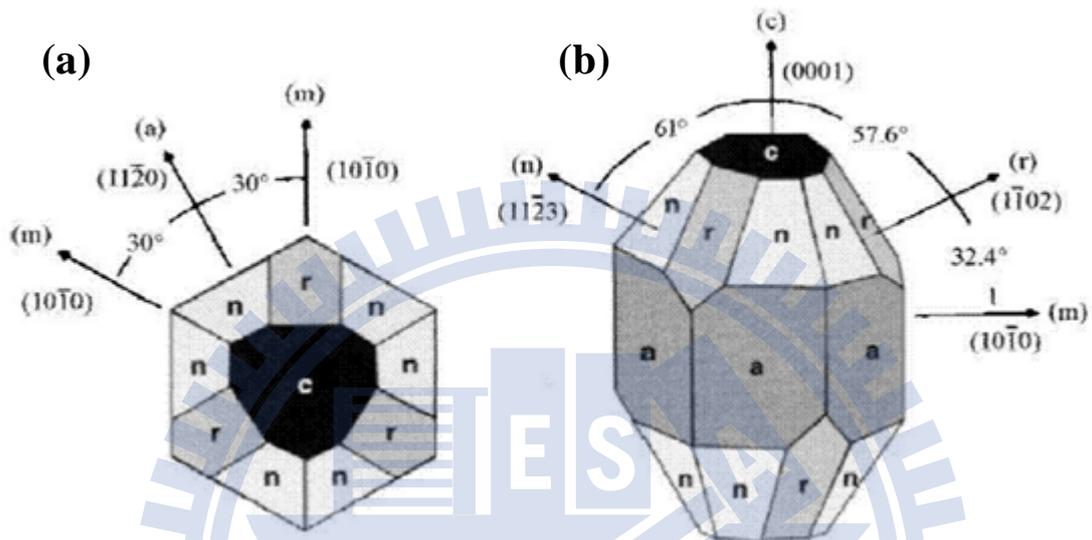


圖 3-6 藍寶石晶格結構 (a)頂視圖，(b)側視圖

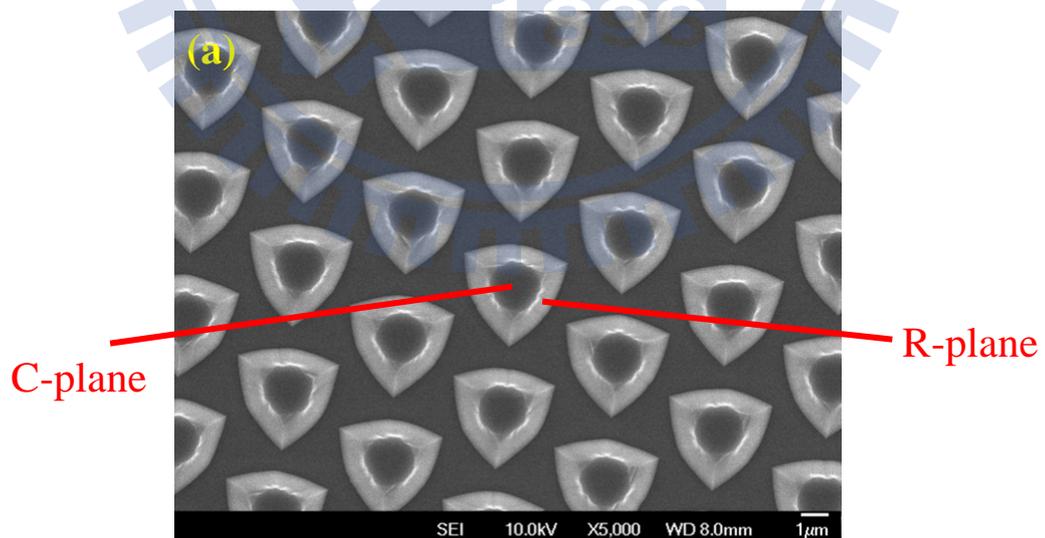


圖 3-7(a) 一次濕式蝕刻SEM俯視圖

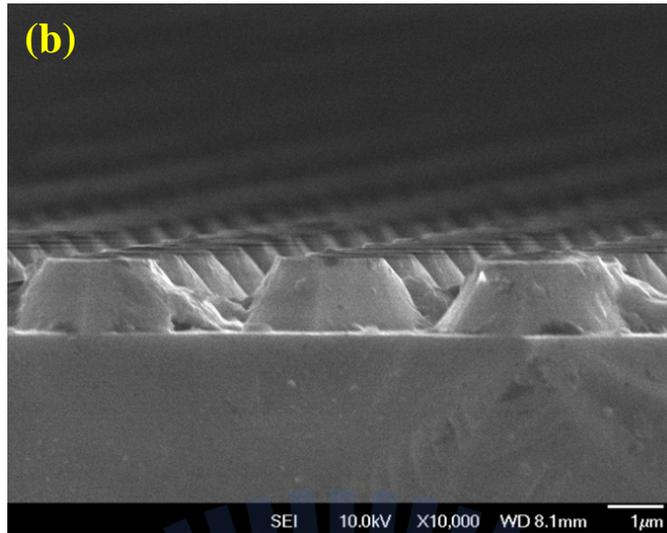


圖 3-7(b) SEM斜角俯視圖

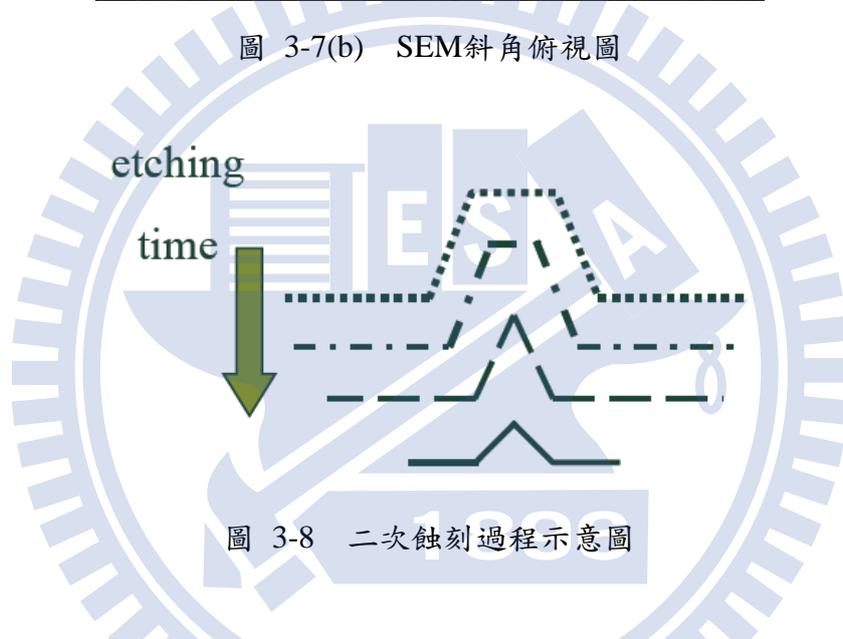
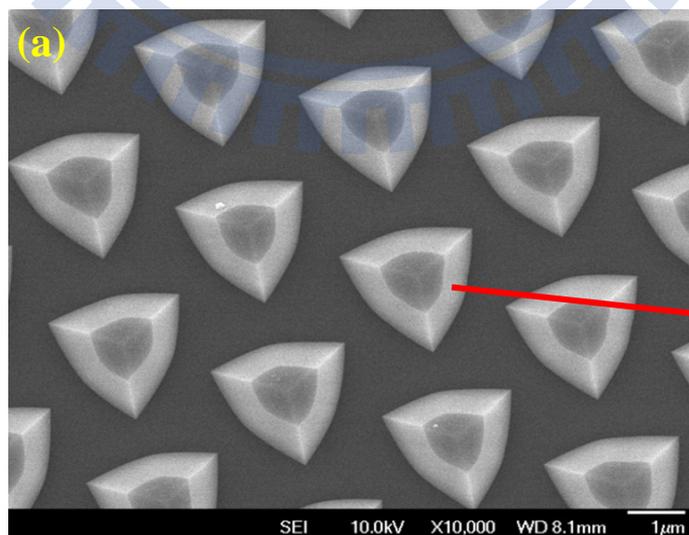


圖 3-8 二次蝕刻過程示意圖



R-plane

圖 3-9(a) 二次濕式蝕刻SEM俯視圖

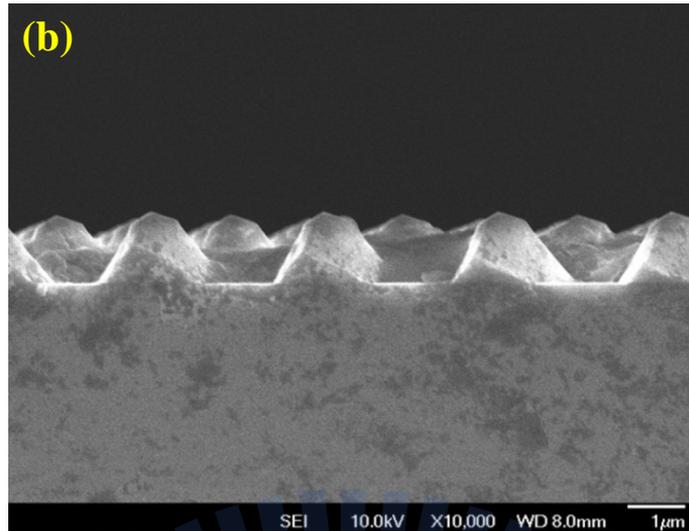


圖 3-9(b) SEM斜角俯視圖

磊晶方面，在一次及二次濕式蝕刻藍寶石基板上成長相同的氮化鎵結構，首先是50nm的氮化鎵成核層(GaN nucleation layer)，接著是未摻雜的GaN 2 μ m與摻雜矽的n型GaN 2 μ m，再來成長五對發光波長在450nm的氮化銦鎵(InGaN)量子井，最後是200nm摻雜鎂的p型GaN，詳細結構圖如圖3-10。圖3-11為磊晶後的一次濕式蝕刻基板SEM側視圖，梯形般的圖案是其最大特徵，表示圖形頂端依舊是平坦的C-plane。圖3-12則為磊晶後的二次濕式蝕刻基板SEM側視圖，基板部分有尖形圖案，即為二次蝕刻最佳證明。

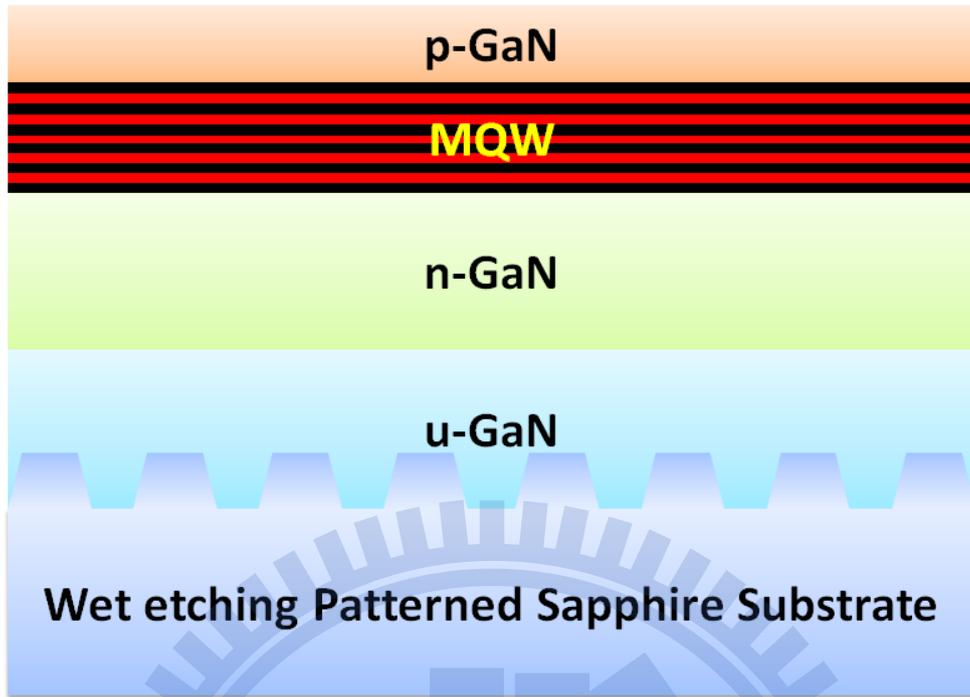


圖 3-10 磊晶結構示意圖

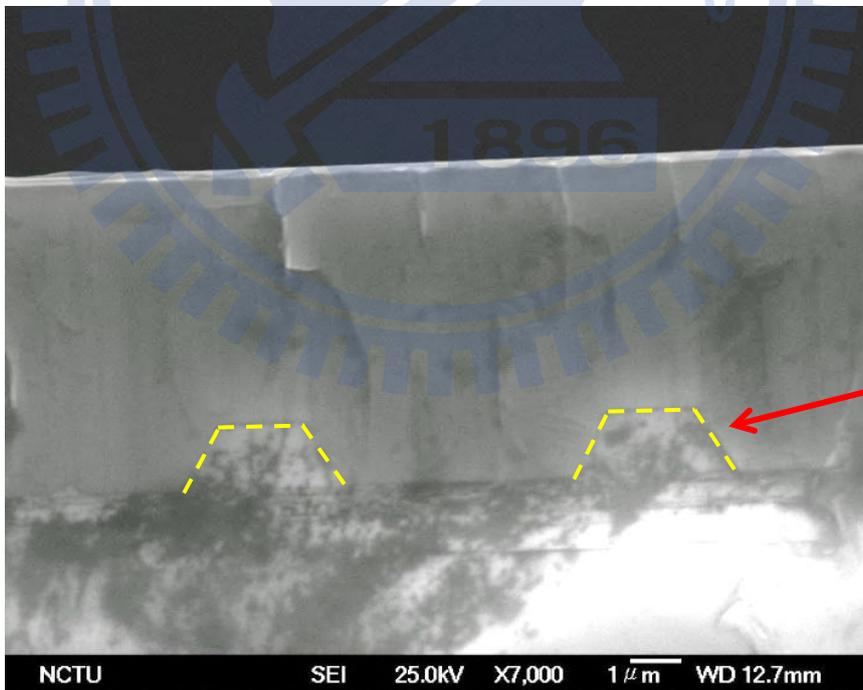


圖 3-11 一次濕式蝕刻基板SEM側視圖

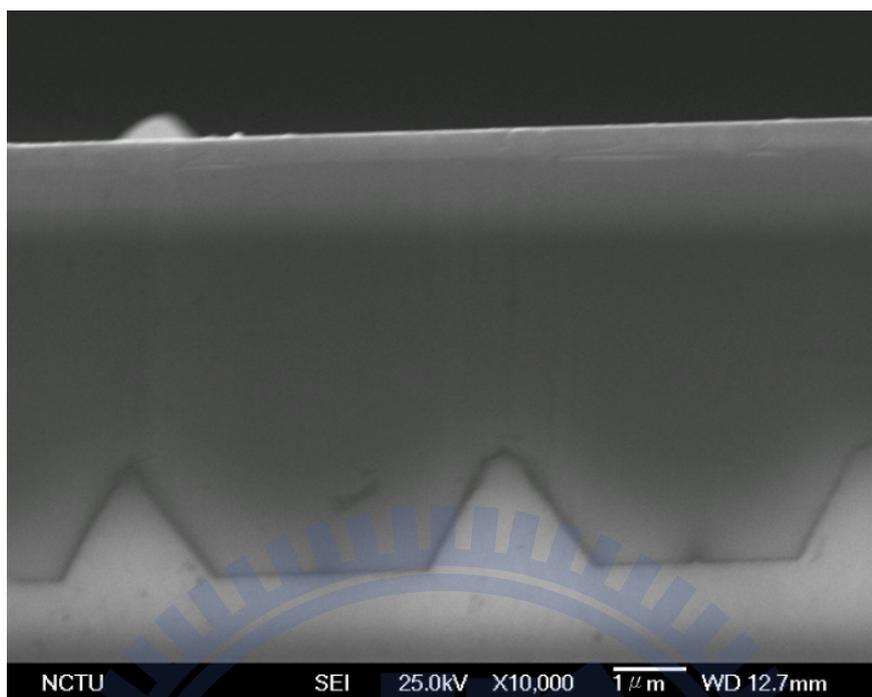


圖 3-12 二次濕式蝕刻基板SEM側視圖

3.1.3 乾式蝕刻圖案化藍寶石基板 LED 製造流程

乾式蝕刻圖案化藍寶石基板詳細製作流程如下：

1. 塗佈光阻附著劑：
以氣相塗抹方式塗佈脫水劑六甲基二矽氮烷(HexaMethyl DiSilazane, HMDS)，其用途為脫水及增強光阻與晶圓之附著力。
2. 塗佈光阻及去除邊緣光阻：
使用以初轉1000rpm/10sec.、末轉4500rpm/30sec.塗佈負光阻HR200，厚度約為1.6 μ m，再以棉花棒沾取少量丙酮去除邊緣堆積光阻，以90°C烘烤90秒
3. 曝光顯影：
使用波長為380nm的深紫外線(DUV)曝光機曝光10秒，再以顯影劑WNRB顯影約25秒，之後120°C硬烤光阻2分鐘。
4. 圖案轉移至二氧化矽阻擋層：
使用緩衝氧化層蝕刻劑(Buffer Oxide Etch, BOE)蝕刻二氧化矽，其成分為氫氟

酸與氟化銨以1：7調配而成的混和溶液，蝕刻時間為150秒。

5. ICP蝕刻藍寶石基板：

使用感應耦合電漿蝕刻機(ICP)，通入三氯化硼(BCl_3)和氯氣(Cl_2)兩種氣體，三氯化硼和氯氣的比例各是85%和15%。最後調整蝕刻時間可蝕刻出三種圓錐高度，分別為 $1.3\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 、 $1.7\mu\text{m}$ ，最後再使用硫酸去除殘餘光阻。圖3-13(a)為高度 $1.3\mu\text{m}$ 的圓錐圖形藍寶石基板SEM俯視圖，(b)為SEM側視圖。圖3-14(a)為高度 $1.5\mu\text{m}$ 的圓錐圖形藍寶石基板SEM俯視圖，(b)為SEM側視圖。圖3-15(a)為高度 $1.7\mu\text{m}$ 的圓錐圖形藍寶石基板SEM俯視圖，(b)為SEM側視圖。

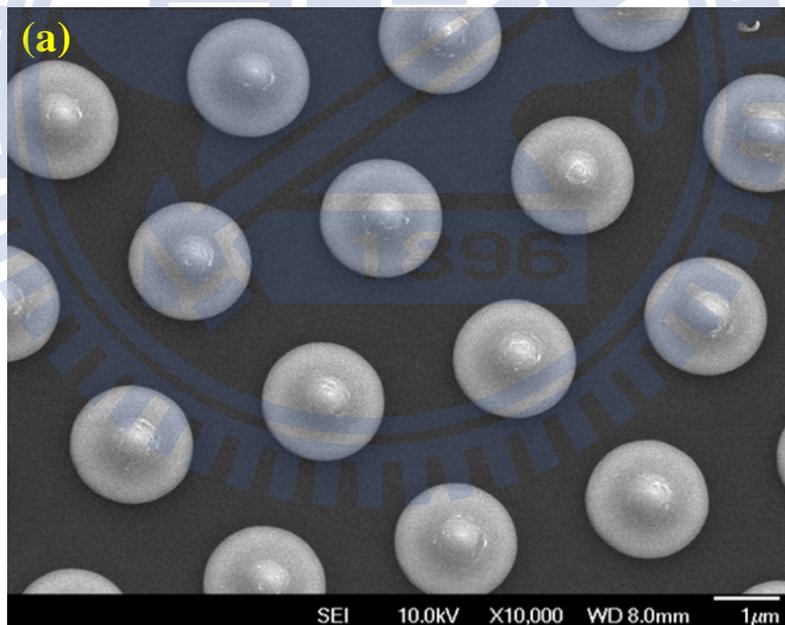


圖 3-13(a) 高度 $1.3\mu\text{m}$ 的圓錐圖形SEM俯視圖

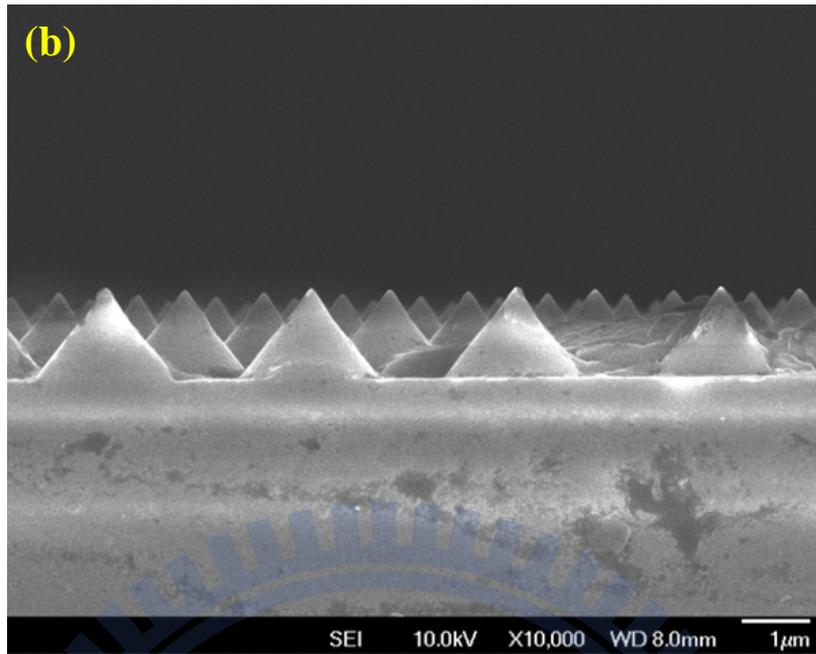


圖 3-13(b) 高度 $1.3\mu\text{m}$ 的圓錐圖形SEM側視圖

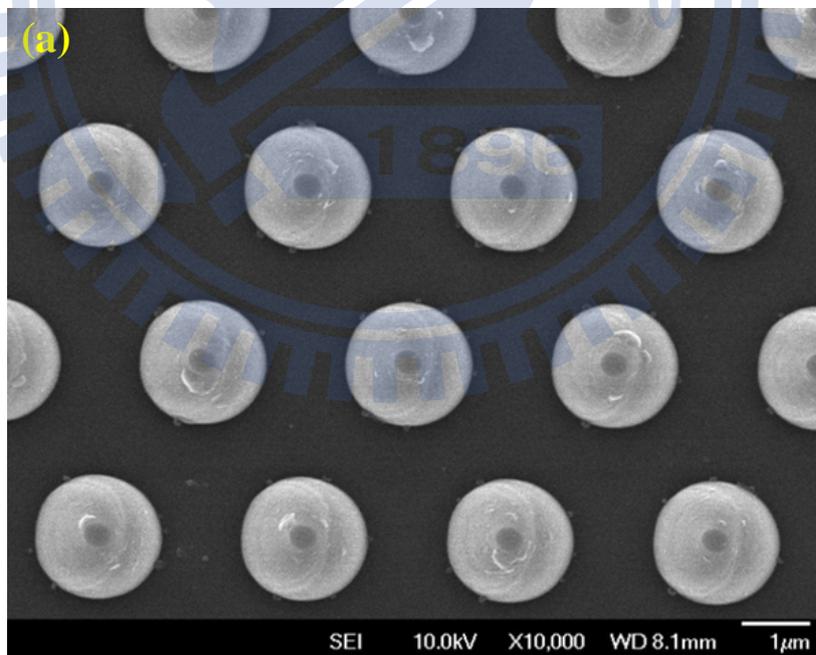


圖 3-14(a) 高度 $1.5\mu\text{m}$ 的圓錐圖形SEM俯視圖

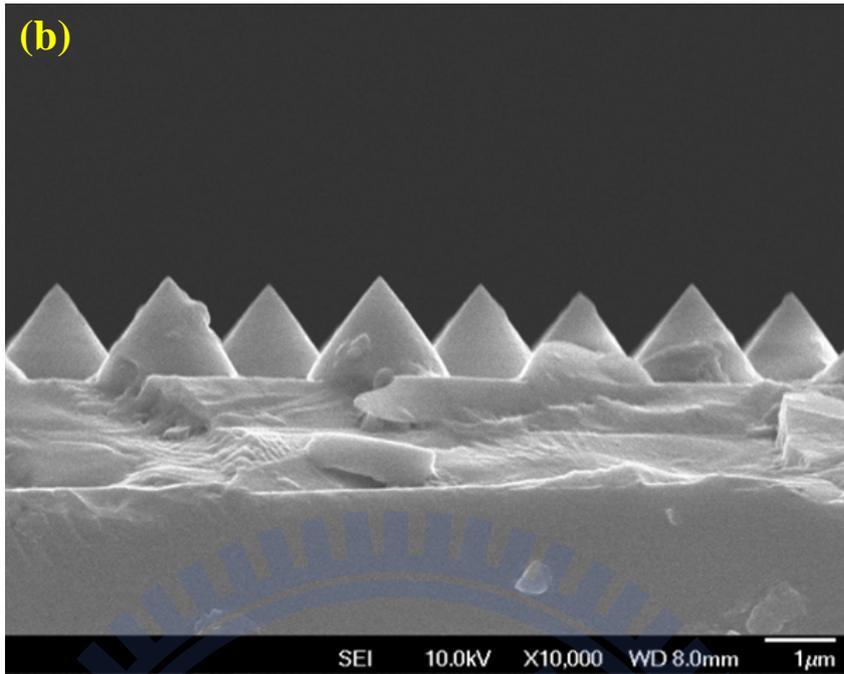


圖 3-14(b) 高度1.5 μm 的圓錐圖形SEM側視圖

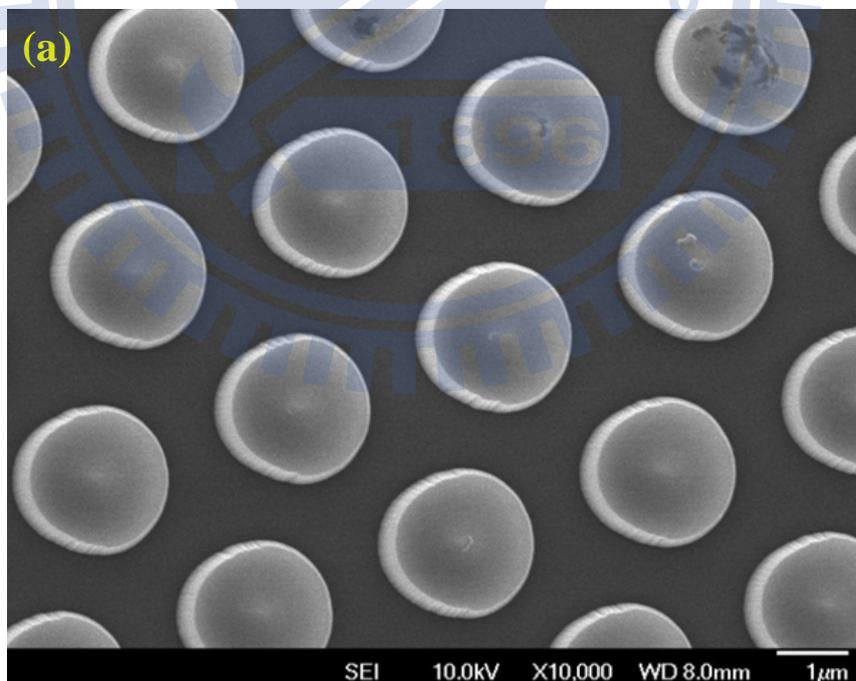


圖 3-15(a) 高度1.7 μm 的圓錐圖形SEM俯視圖

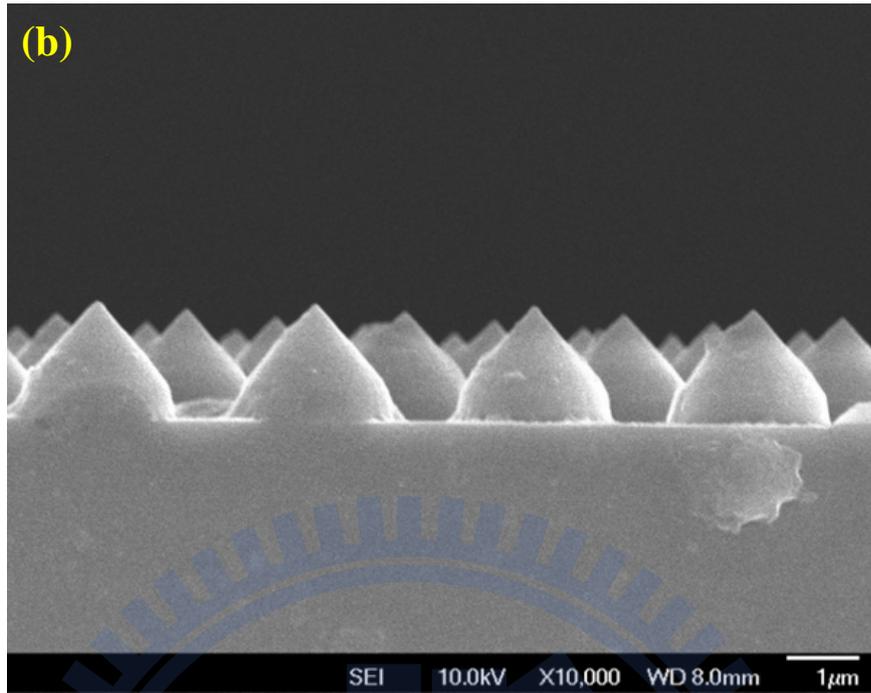


圖 3-15(b) 高度1.7 μm 的圓錐圖形SEM側視圖

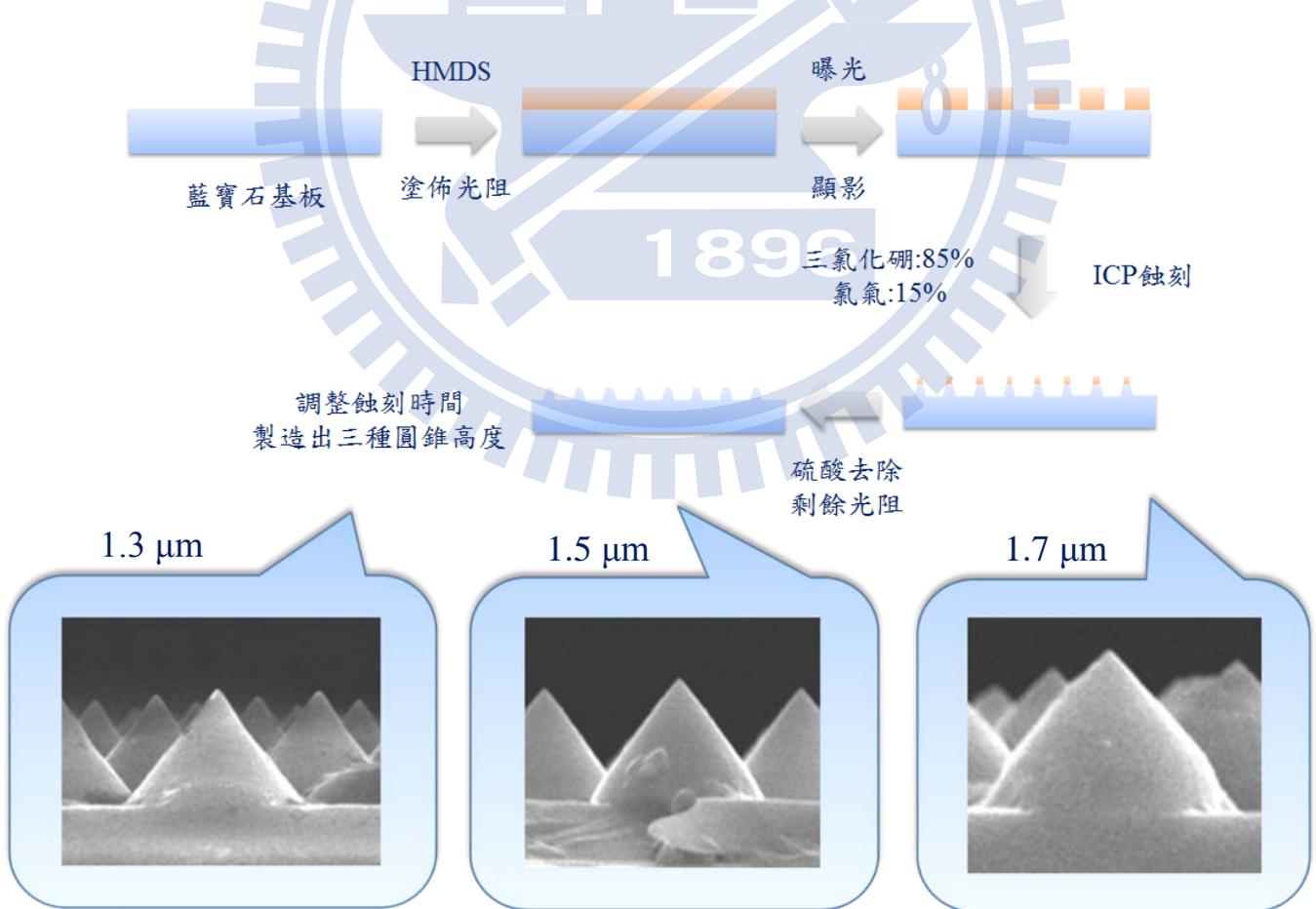


圖 3-16 乾式蝕刻流程圖

磊晶部分，我們使用MOCVD在三種圓錐高度的圖案化藍寶石基板與平面藍寶石基板上方成長相同的磊晶結構。首先成長25nm的GaN成核層，接著成長未摻雜的GaN薄膜2.65 μm 和雜矽的n型GaN 2.3 μm ，再來是n型載子侷限層n-AlGaN厚度是15nm。接著在上方成長15對InGaN/GaN多重量子井主動層，量子井厚度為4nm，而障壁層GaN厚度為12nm。之後成長上一層薄的p型載子侷限層p-AlGaN 10nm和摻雜鎂的電子阻擋層(EBL) p型AlGaN/GaN(8nm/2nm)，最後是200nm摻雜鎂的p型GaN。詳細的磊晶結構圖如圖3-17所示，圖3-18、圖3-19、圖3-20、圖3-21分別是平面藍寶石基板、圖形高度為1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm 之藍寶石基板磊晶後的SEM側視圖。

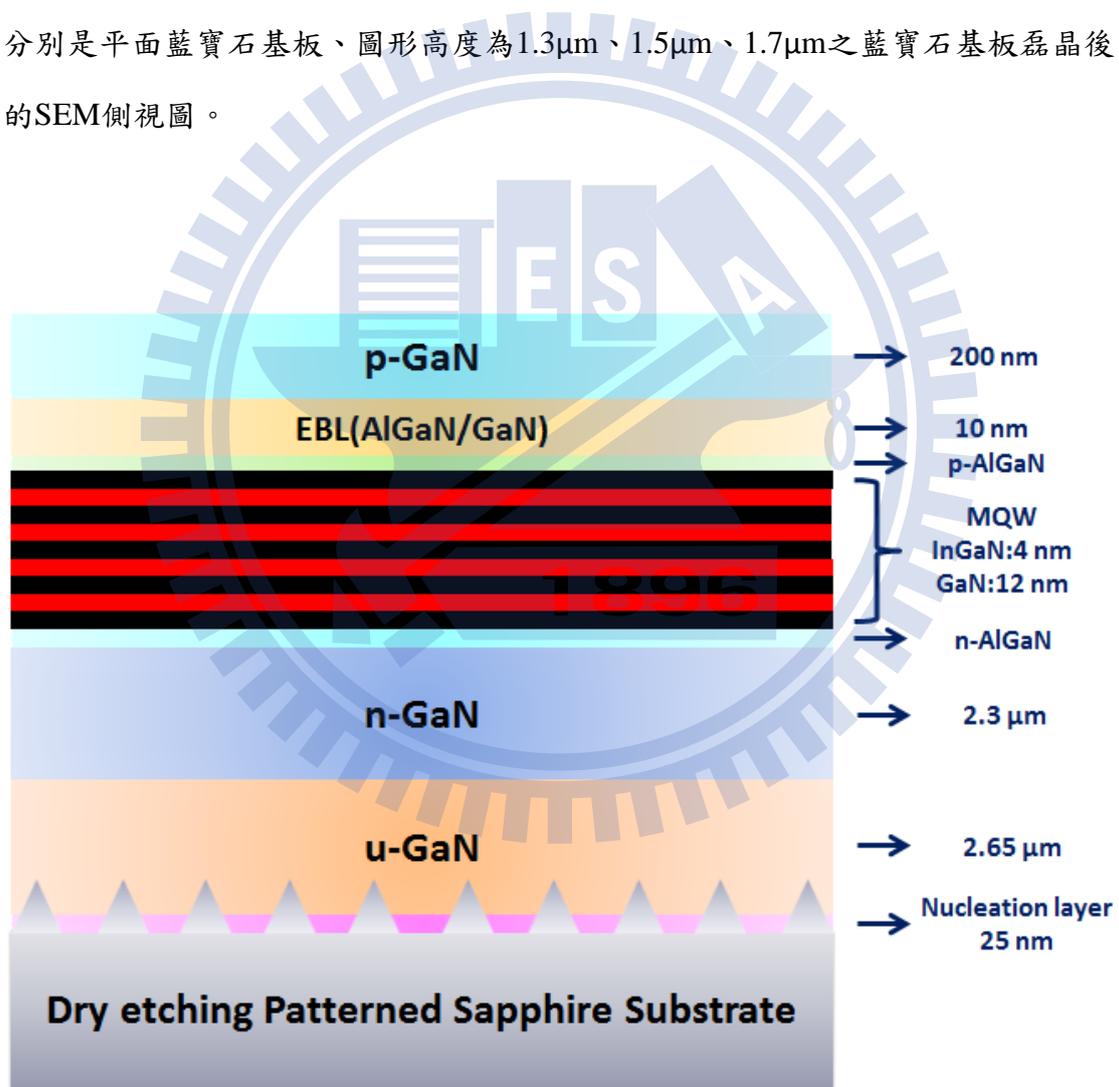


圖 3-17 乾蝕刻基板磊晶結構剖面圖

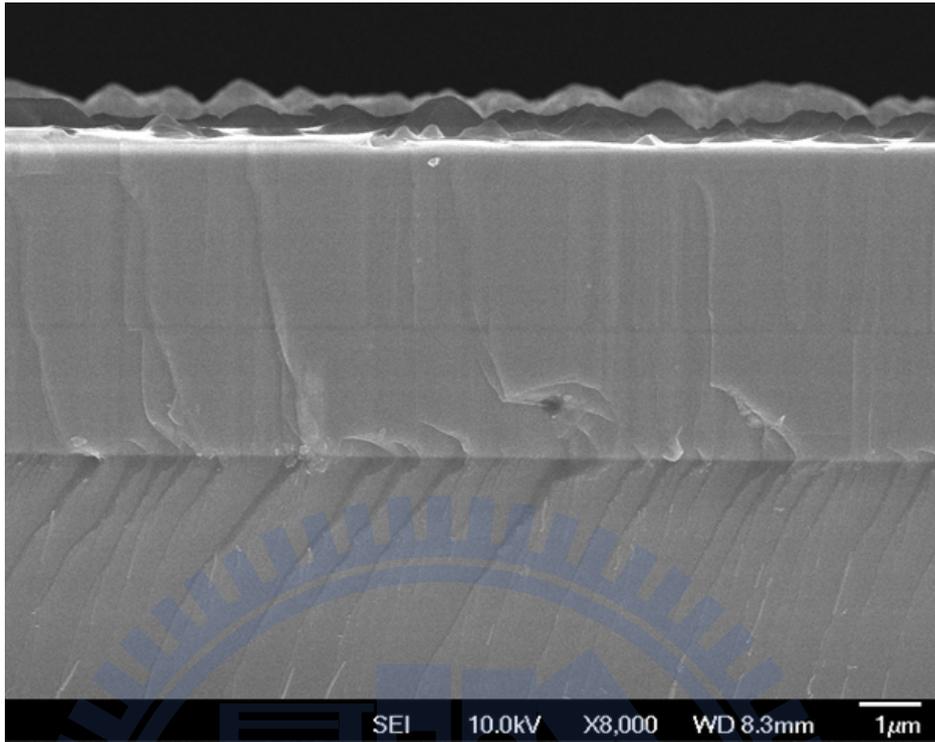


圖 3-18 平面藍寶石基板磊晶後之SEM側視圖

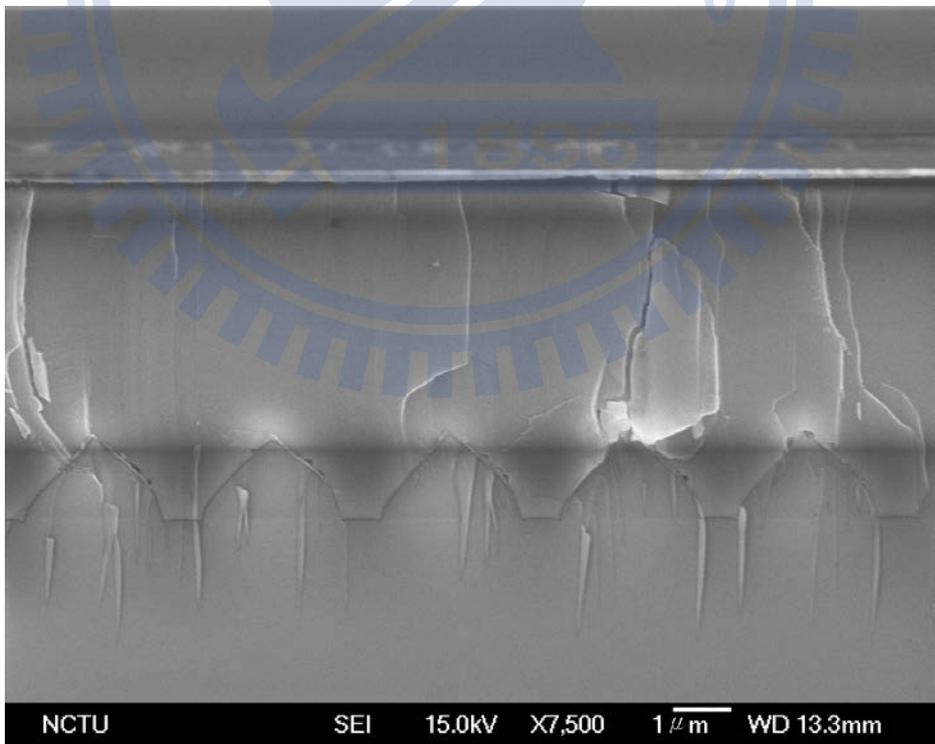


圖 3-19 圓錐高度為1.3μm磊晶後之SEM側視圖

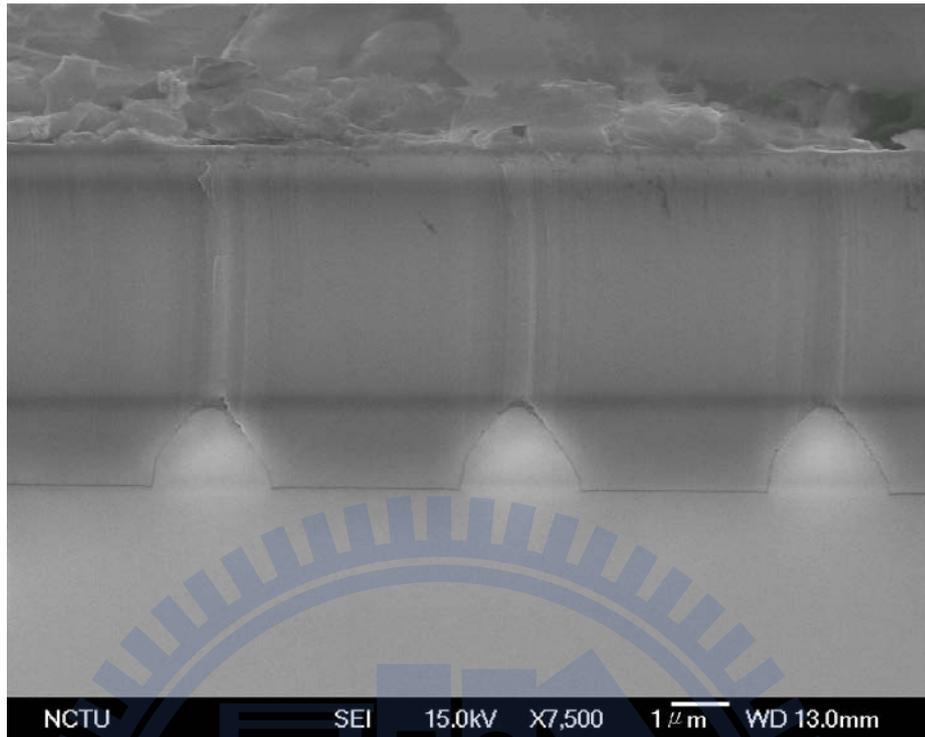


圖 3-20 圓錐高度為 $1.5\mu\text{m}$ 磊晶後之SEM側視圖

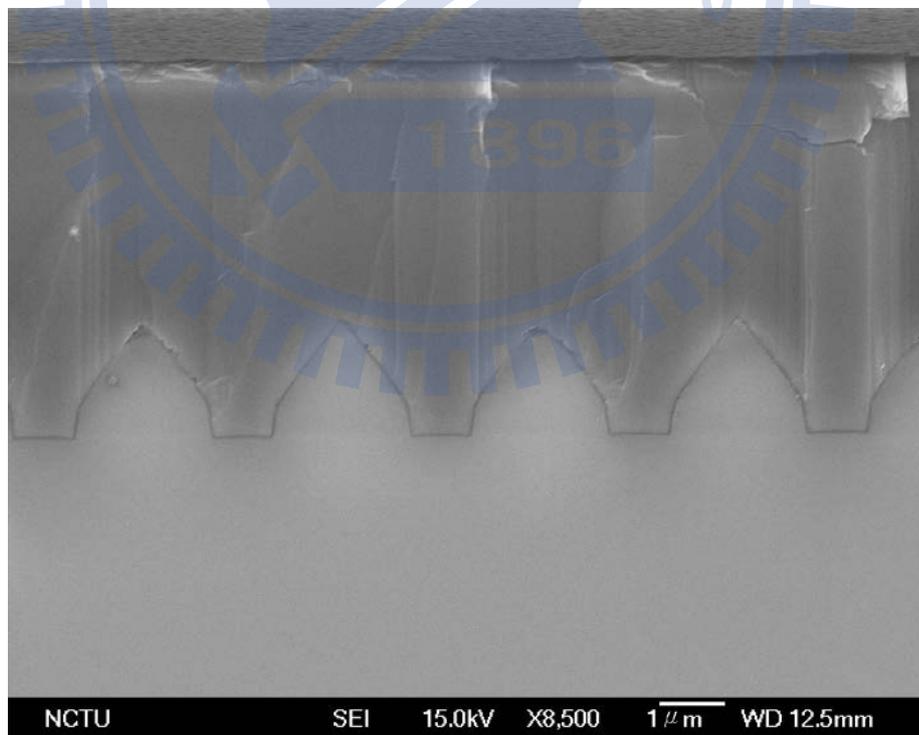


圖 3-21 圓錐高度為 $1.7\mu\text{m}$ 磊晶後之SEM側視圖

3.2 發光二極體製程

以下為發光二極體製程流程(chip process)，以三道黃光微影區分為三個步驟，分別為(1)定義蝕刻平台(mesa)，(2)製作透明導電層(ITO)，(3)製作p型及n型電極。圖3-22為製程流程圖，圖3-23為完成製程的LED立體圖。

(1) 定義蝕刻平台(mesa)

首先以丙酮和甲醇的混和溶液清洗晶圓，接著先以PECVD沉積 $0.5\mu\text{m}$ 的二氧化矽(SiO_2)再使用第一道黃光微影定義出蝕刻平台(mesa)，接著以BOE蝕刻未被光阻覆蓋的 SiO_2 ，這步驟必須注意 SiO_2 的側蝕問題，如果側蝕太過嚴重會發生下一道黃光微影無法完全對準的問題，故蝕刻時間的掌控極為重要，最後以丙酮去除光阻後使用ICPRIE蝕刻未受 SiO_2 保護的GaN，使用氣體為 Cl_2 與 BCl_3 ，蝕刻深度約為 $1.3\mu\text{m}$ 。

(2) 製作透明導電層(ITO)

首先蒸鍍 250nm 的氧化錫銻(Indium Tin Oxide, ITO)作為透明導電層，接著使用第二道黃光微影定義出p型GaN的導電層部分，再以王水蝕刻未被光阻覆蓋的ITO，最後同樣以丙酮洗去光阻並在 500°C 下退火10分鐘使ITO更加堅固。

(3) 製作p型及n型電極

利用第三道黃光微影定義出p型和n型GaN的電極區塊，接著以電子槍蒸鍍系統(E-gun Evaporator)蒸鍍鉻(Cr)、鉑(Pt)、金(Au)，厚度依序為 100 nm 、 100 nm 、 2500 nm ，最後使用金屬剝離方式(Lift-off)將晶圓置於丙酮中，去除覆蓋於光阻上的金屬。此步驟結束後即完成所有製程，可先磨薄藍寶石基板再使用雷射刀切割晶圓成為LED晶粒即可開始量測。

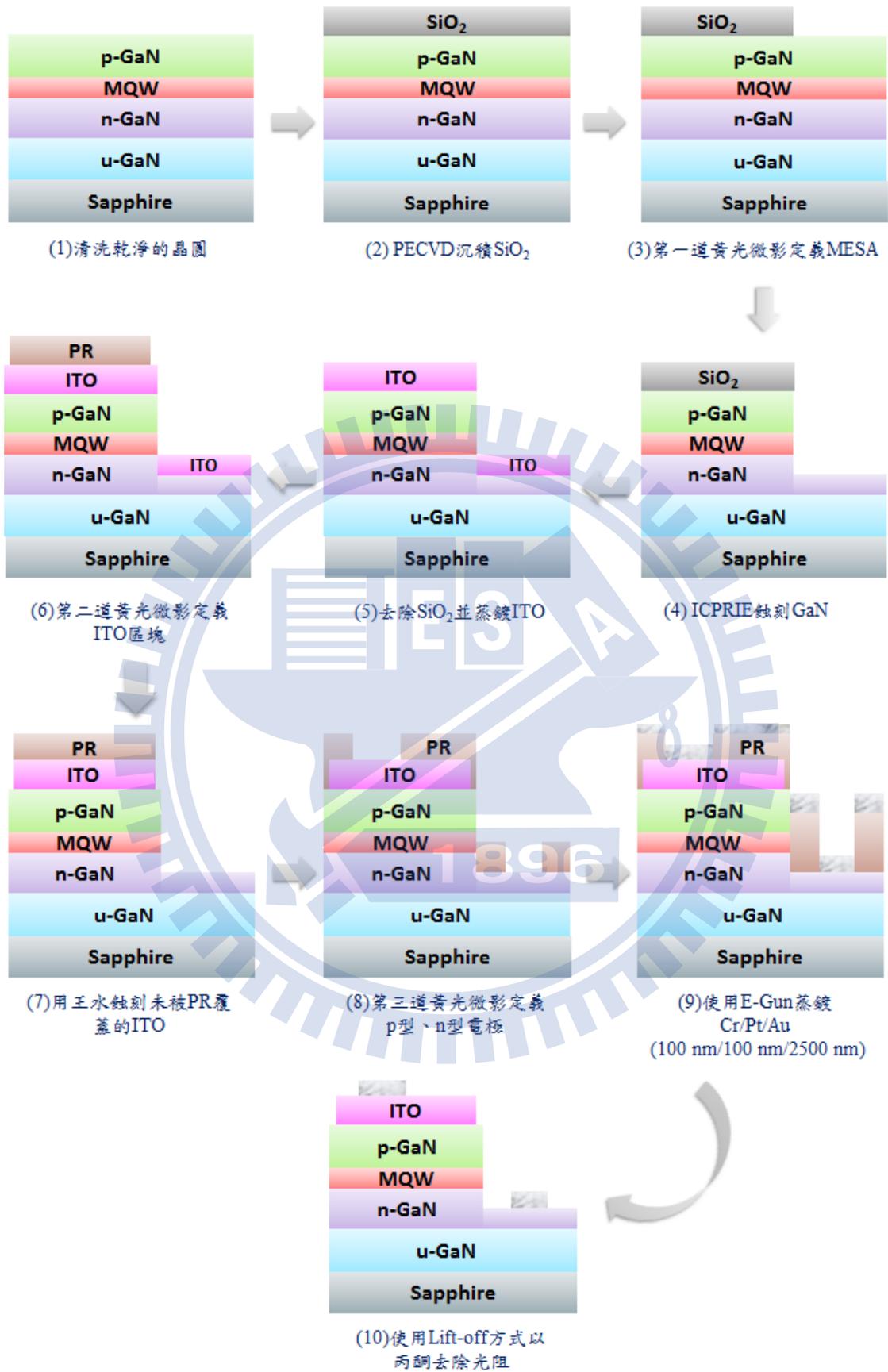


圖 3-22 LED製程流程圖

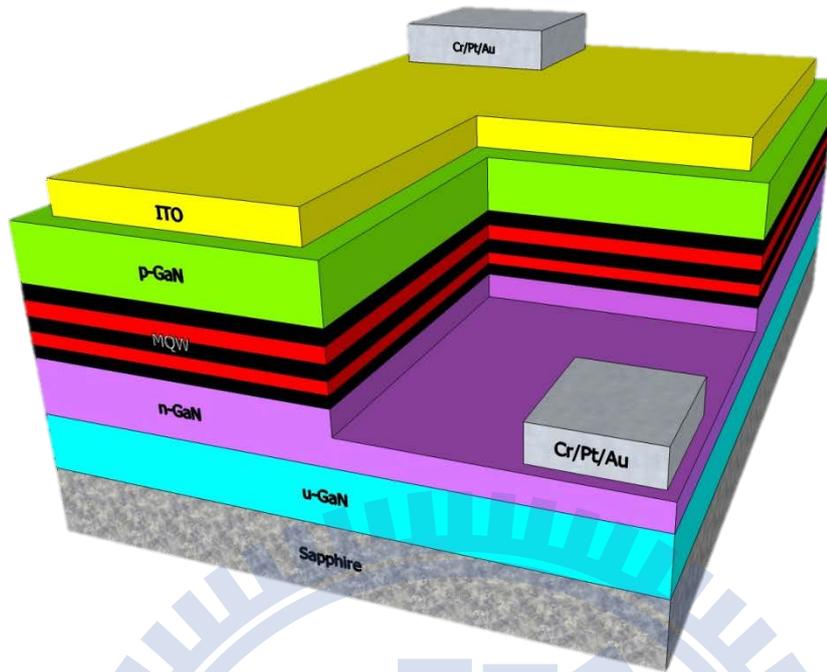


圖 3-23 完成製程之LED立體示意圖



3.3 量測系統架設

量測系統方面，總共分為四個部分，分別為LED電特性量測、LED積分球量測、低頻電雜訊量測及低頻雜訊重複取樣量測，以下為四種量測方式介紹。

3.3.1 LED直流電特性量測系統

半導體元件最基礎的即是I-V曲線，可用於量測二極體起始電壓、順逆偏漏電情況…等，進而分析出串、並聯電阻(Series and parallel Resistance)，理想因子(Ideality factor, n)。本論文使用Agilent B1500A進行直流量測分析，圖3-24為B1500A外觀展示圖。



圖 3-24 B1500A外觀

3.3.2 LED積分球量測系統

積分球量測系統用於LED光源強度量測，藉由積分計算球體內每塊區域的收光配合輔助燈校正，可以得知LED的出光強度進而計算外部量子效率、繪製L-I-V曲線。也可以測量色彩的特性，如CIE的色度座標值、相對色溫、流明值及演色性。圖3-25為積分球量測系統外觀展示圖。



圖 3-25 積分球量測系統外觀

3.3.3 低頻電雜訊量測系統

雜訊量測系統由三個部分組成，LED、電流放大器SR570 (Current Amplifier)、頻譜分析儀SR770 (Spectral Analyzer)。LED避免受到外界電波(電器用品交流電訊號)干擾，必須置於鐵盒中以杜絕電磁波。由於在低電流時雜訊振幅相當小，所以需要放大器放大訊號。對於放大倍率(Sensitivity)，我們選擇對訊號頻寬影響最小的1mA/V，其頻寬最大可至1MHz。另外在量測前也需要校正放大器，避免輸入和輸出端有誤差，最簡單的方式是關閉儀器輸出，此時若有量測到電流即是機器本身的誤差，可以利用位移電壓(Offset voltage)修正。儀器設置方面，首先將LED接至電流放大器SR570輸入端，元件所需偏壓亦由SR570提供，再將SR570輸出端接至頻譜分析儀SR770。SR770量測頻率範圍為0至97.41Hz，雜訊訊號平均1000次、自動設定Input range (Auto-range)，雜訊強度單位為dBV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。注入電流由30 μA 至3 mA，電流太低則無法量到雜訊訊號，若太大則放大器會有過載(Overload)的問題。但整體來說小電流確保元件在量測過程中不會受到損傷及老化，這也是以雜訊分析LED品質的好處。圖3-26是架設完成的雜訊量測系統，LED位於黑色鐵箱中，將線接至SR570輸入端，再將輸出端接至SR770，儀器設定如上所述，圖3-27為儀器架設及設定示意圖。



圖 3-26 雜訊量測系統

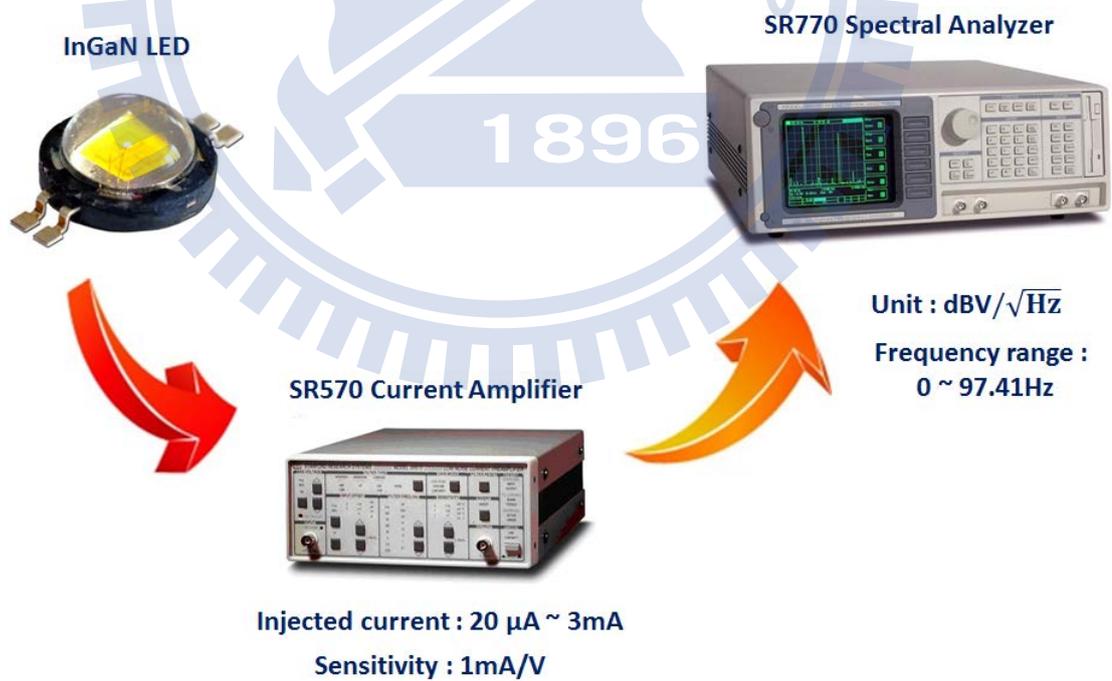


圖 3-27 儀器架設及設定示意圖

3.3.4 低頻雜訊重複取樣量測系統

此量測系統可分為四個部份，LED、電流放大器(SR570)、電壓放大器(SR560)、頻譜分析儀(SR780)。SR570設置如3.3.3節所述，並提供量測所需電壓。另外增設SR560作為訊號緩衝之用，降低進入SR780之訊號振幅。所以我們將SR560的增益(Gain)設為1，並關閉濾波器功能，使個頻率的訊號都能進入頻譜分析儀。儀器架設方面，首先將LED接至SR570輸入端，再將其輸出端接至SR560輸入端，最後輸出端接至SR780，即完成儀器架設。SR780量測時設定單位為 V_{rms}/\sqrt{Hz} ，先在頻域(Frequency Domain)下抓取全頻域雜訊頻譜(Full-span spectrum)，接著再切換至時域(Time Domain)以GPIB線做連結配合電腦程式抓取時域頻譜，最後利用電腦進行傅立葉轉換再和先前取得的全頻頻譜組合，即可得到一張頻率可低至0.1 Hz的雜訊頻譜。圖3-28為架設完成的重複取樣雜訊量測系統，圖3-29為儀器架設及設定示意圖。



圖 3-28 重複取樣雜訊量測系統

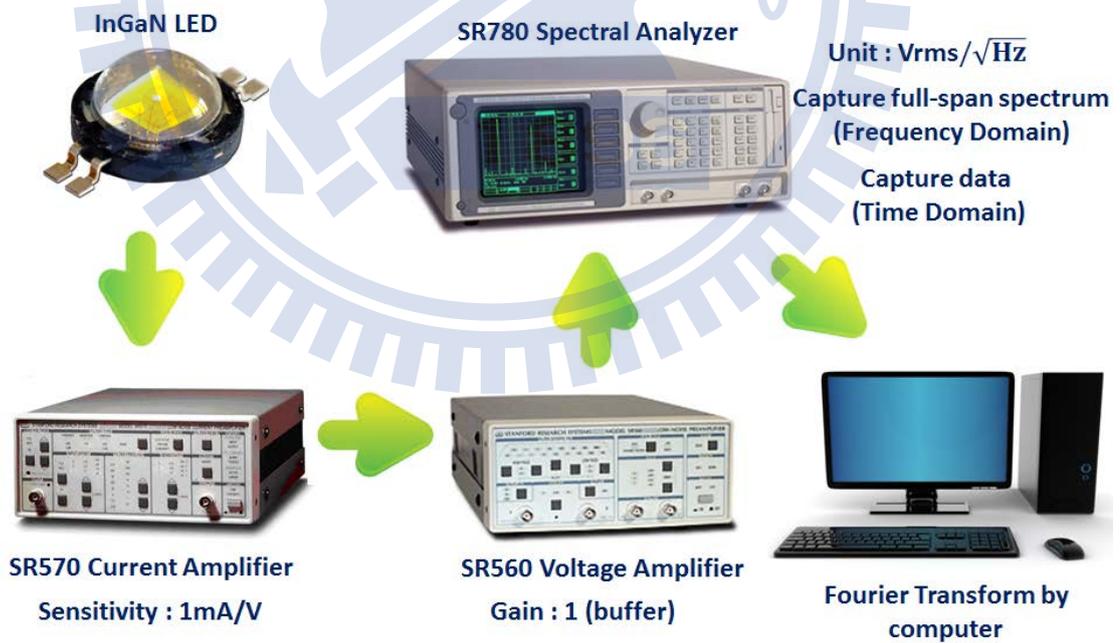


圖 3-29 儀器架設及設定示意圖

第四章 實驗結果與討論

4.1 多種基板LED特性分析

首先比較三種基板LED(GaN基板LED、PSS LED、平面藍寶石基板LED)對電性、光性及雜訊的影響。先看I-V曲線，圖4-1為三種基板LED的semi-log曲線，由圖可知在逆向偏壓(-2V)時，以氮化鎵基板LED的漏電流最低，再來是PSS LED，最大的為平面藍寶石基板LED，其值依序為 2.68×10^{-11} A、 4.14×10^{-10} A、 1.2×10^{-9} A。至於順向偏壓方面，在低電流部分氮化鎵基板LED的漏電也是最低，而PSS LED居中，平面藍寶石基板LED最大，這說明了氮化鎵基板LED有較少的缺陷，因此在二極體未啟動前，其漏電流較低。

圖4-2為三種基板LED的L-I-V曲線圖，其中的高電流I-V曲線並沒有很明顯的差異，可以確定是相同結構。而出光方面隨著電流的上升而增加，當注入電流為20mA時氮化鎵基板LED、PSS LED、平面藍寶石基板LED出光依序為21.43mW、10.5mW、8.21mW。

圖4-3為三種基板LED在注入電流為100mA時的電激發光譜(EL spectrum)，GaN基板LED、PSS LED、平面藍寶石基板LED的最大強度依序為979.132a.u.、687.994a.u.、574.404a.u.，對應的波長分別為445.2nm、445.6nm、445.8nm，此波長為藍光。說明了使用GaN基板的LED由於有較少的缺陷，因此出光較強，同時相同的波長代表三種LED有著相同的主動層結構。而半高寬(FWHM) GaN基板LED、PSS LED、平面藍寶石基板LED依序是33 nm、34 nm、36 nm，也說明了GaN基板LED有較佳的光特性。

最後整理成一張表4-1，內有三種基板LED的順向偏壓、逆向漏電流、出光強度、FWHM。

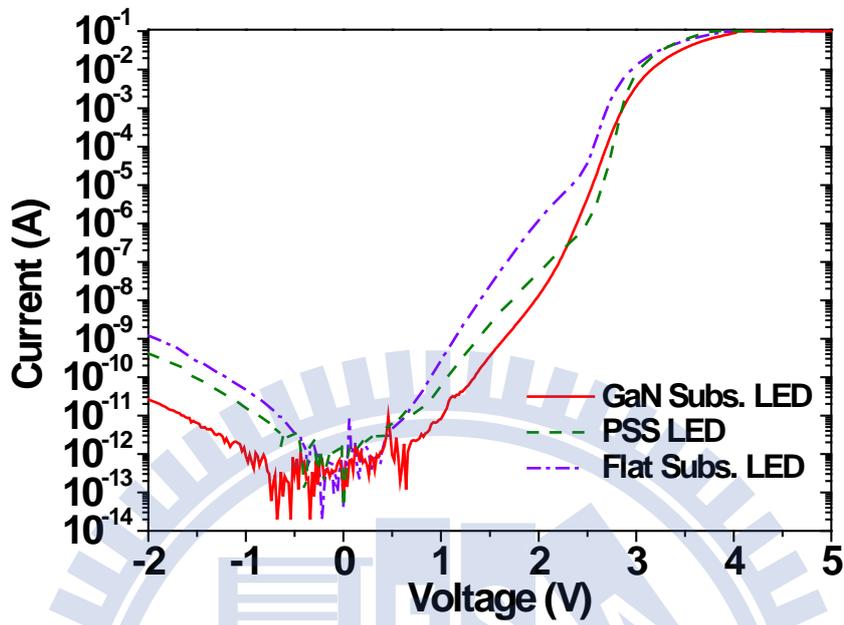


圖 4-1 三種基板LED I-V曲線圖

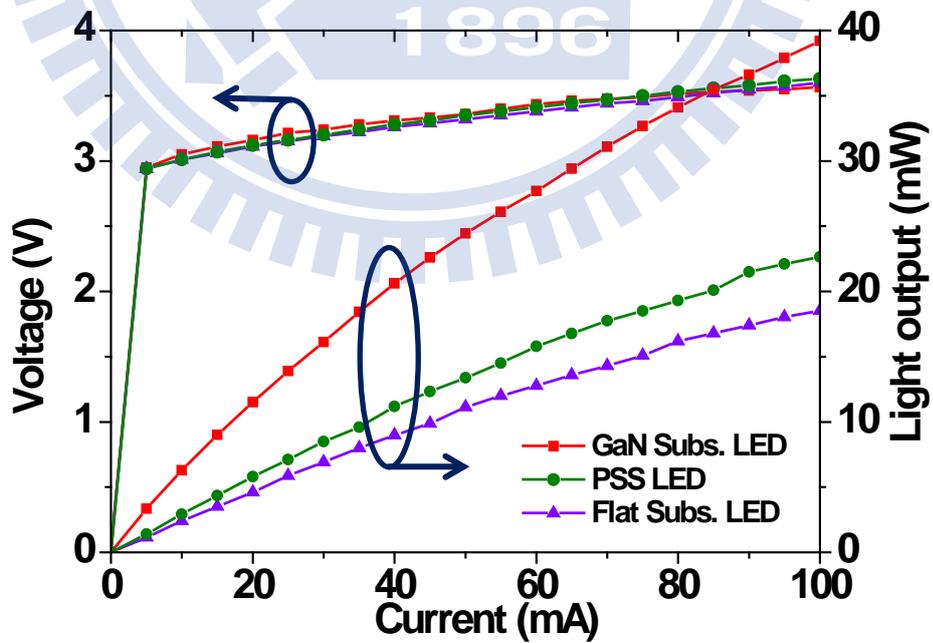


圖 4-2 三種基板LED L-I-V曲線圖

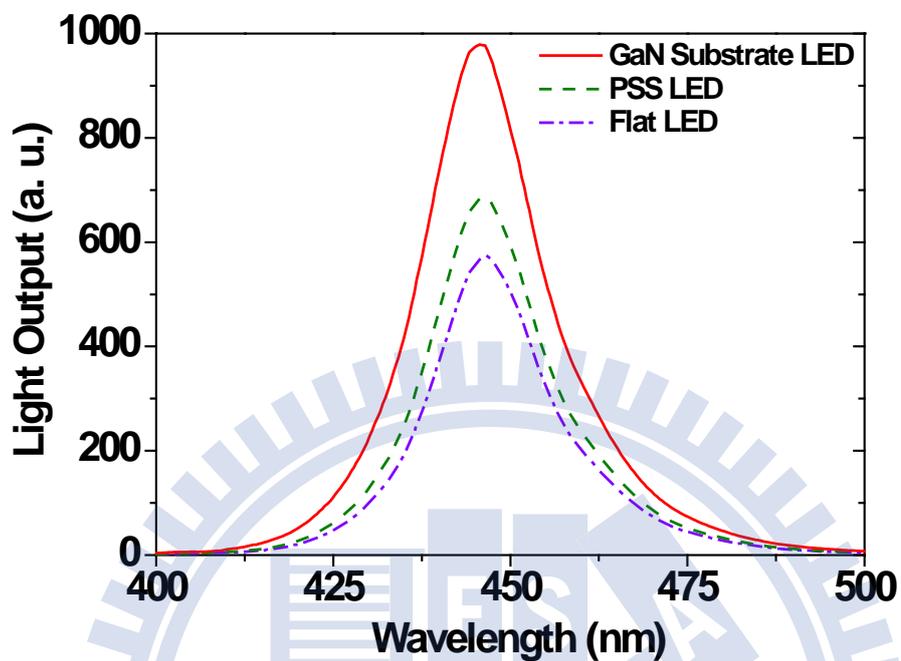


圖 4-3 三種基板LED EL光譜

Item	順向偏壓(V) (20mA)	逆向漏電流(A) (-2V)	出光大小(mW) (20mA)	半高寬 (nm)
Flat Sap. LED	3.12	1.2×10^{-9}	8.21	36
PSS LED	3.11	4.14×10^{-10}	10.5	34
GaN Subs. LED	3.16	2.68×10^{-11}	21.43	33

表 4-1 三種基板LED順向偏壓、逆向漏電流、出光強度、FWHM

接著是雜訊分析，利用第三章所提到的量測系統與方法，擷取低頻電雜訊頻譜，如圖4-4所示，為PSS LED不同電流下的雜訊頻譜。再利用線性Fitting找到電流指數 β ，針對電流和雜訊振幅(B)作圖，其斜率即為電流指數 β 。我們發現 β 的值和LED晶格品質有密切的關係[7]，如圖4-5所示，氮化鎵基板LED有最大的 β 值2.03，其次為PSS LED 1.87，最小的是平面藍寶石基板LED 1.69。Hooge的經驗公式證實了 I/f 雜訊和 I^2 的關係[19]，更進一步以McWhorter Model來分析，此理論假設自由載子因進入跳出在接面的陷阱(Trapping and detrapping)產生的遷移率變化(Carrier mobility fluctuation)導致雜訊的產生，而根據此模型理想二極體(Ideal diode) I/f 雜訊與 I^2 成正比[36], [37]。由上述實驗可找出電流指數 β 和晶格品質與缺陷的相關性， β 值越大則LED品質越好，缺陷也較少。

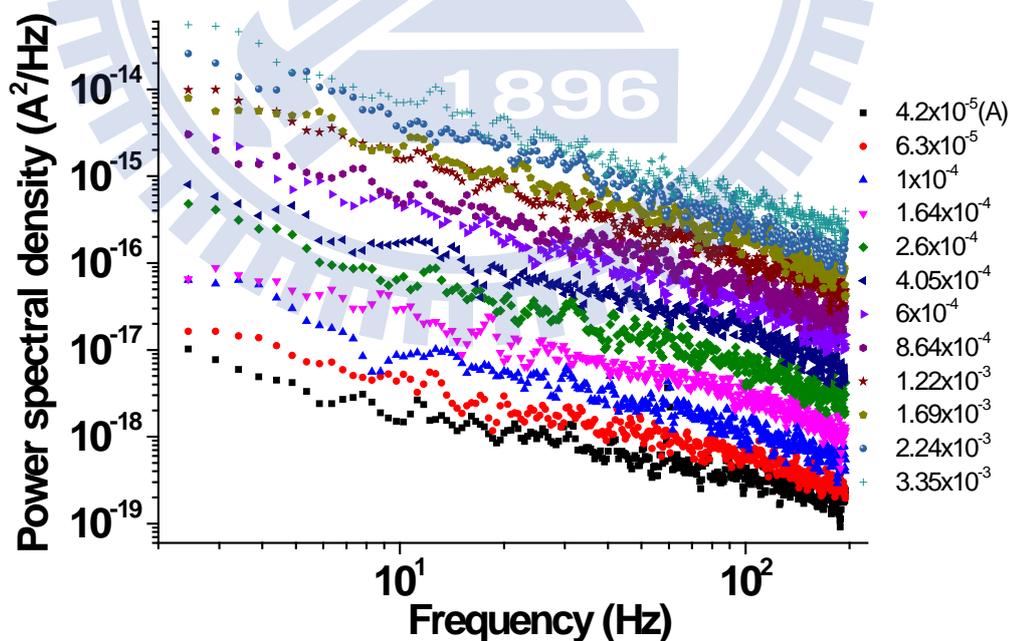


圖 4-4 PSS LED不同電流下的雜訊頻譜

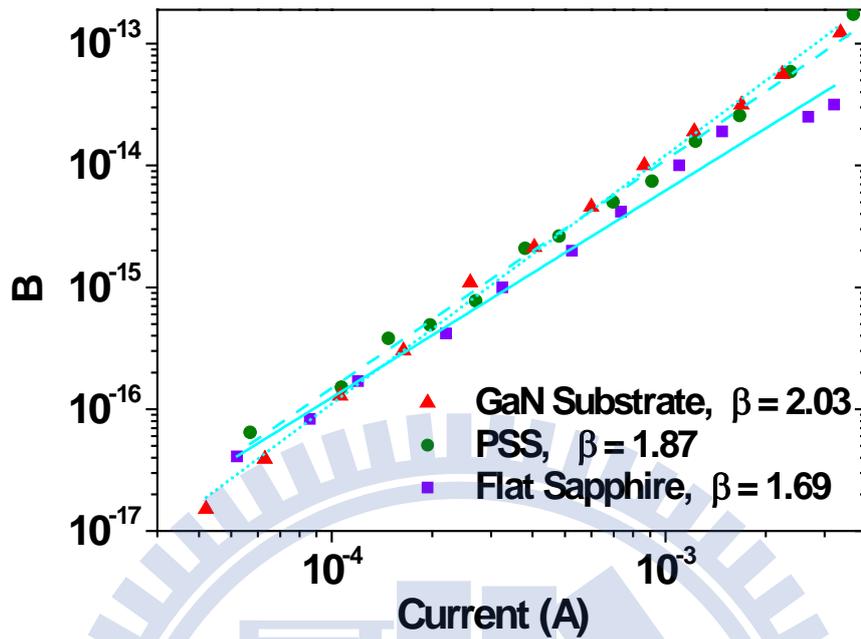


圖 4-5 三種基板LED β 值計算

4.2 濕式蝕刻藍寶石基板LED特性分析

此節分別量測比較使用一次與二次溼式蝕刻藍寶石基板之LED光電特性與低頻電雜訊。首先是I-V曲線圖，如圖4-6，由整體的I-V曲線關係來看，一次濕式蝕刻的藍寶石基板LED的漏電流明顯地較二次濕式蝕刻的藍寶石基板LED來的大。在-5V時，一次濕式蝕刻藍寶石基板LED其漏電流為 10^{-7} A，而二次濕式蝕刻藍寶石基板LED為 10^{-8} A，順偏部分也有相同的情形。這是由於一次濕式蝕刻的藍寶石基板其圖案頂端為平面，在磊晶過程中容易有缺陷產生，而二次濕式蝕刻藍寶石基板圖形頂端為尖狀，GaN不易成長於此，需由四周的GaN包覆。此差異造就缺陷密度的不同，進而影響了漏電情形。

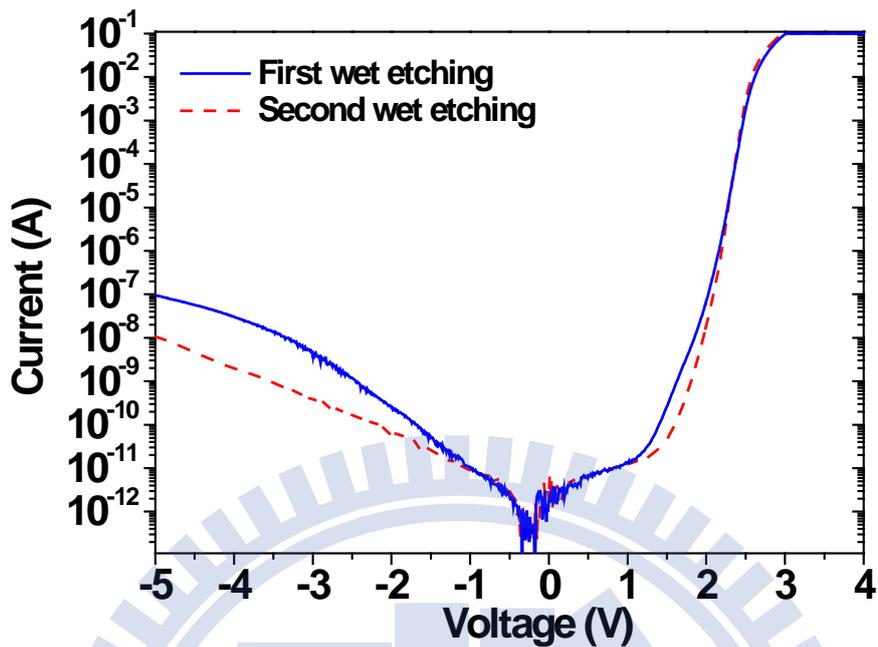


圖 4-6 一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED I-V曲線圖

圖4-7為一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED的L-I-V曲線圖，在高電流區域，兩者的I-V曲線並無明顯差異，以350mA為基準其電壓分別是3.45V與3.47V，這代表他們有著同樣的磊晶結構。而出光則是二次濕式蝕刻藍寶石基板LED略大，以注入電流為350mA做標準，一次濕式蝕刻藍寶石基板LED其出光為201.3mW，而二次濕式蝕刻藍寶石基板LED為221.3mW。這是由於缺陷的減少以及不同的基板圖案使光逃逸角錐擴大，而導致LED出光的增加。表4-2為一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED的順向、逆向偏壓、出光效率整理表格。

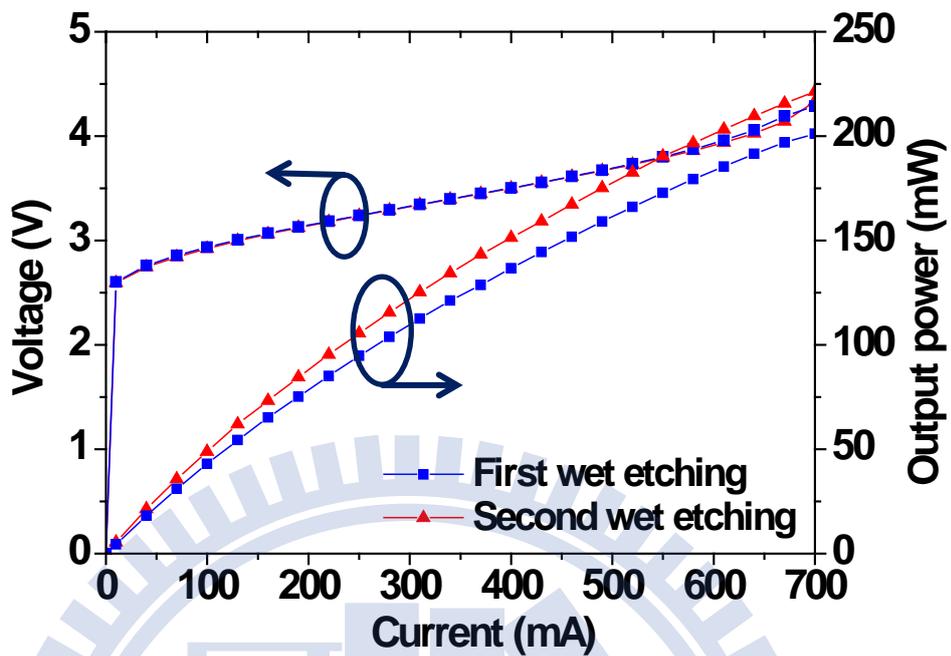


圖 4-7 一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED L-I-V曲線圖

圖4-8為一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED的電激發光譜，同樣也可以發現在注入電流為350mA時，一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED最大光強度分別是1698.27a.u.、1573.06a.u.，而對應到的波長為464.83nm、464.52nm。相同的波長但不同的出光效率說明了主動層結構一樣，但是由於基板圖案的設計導致出光效率有所差異。

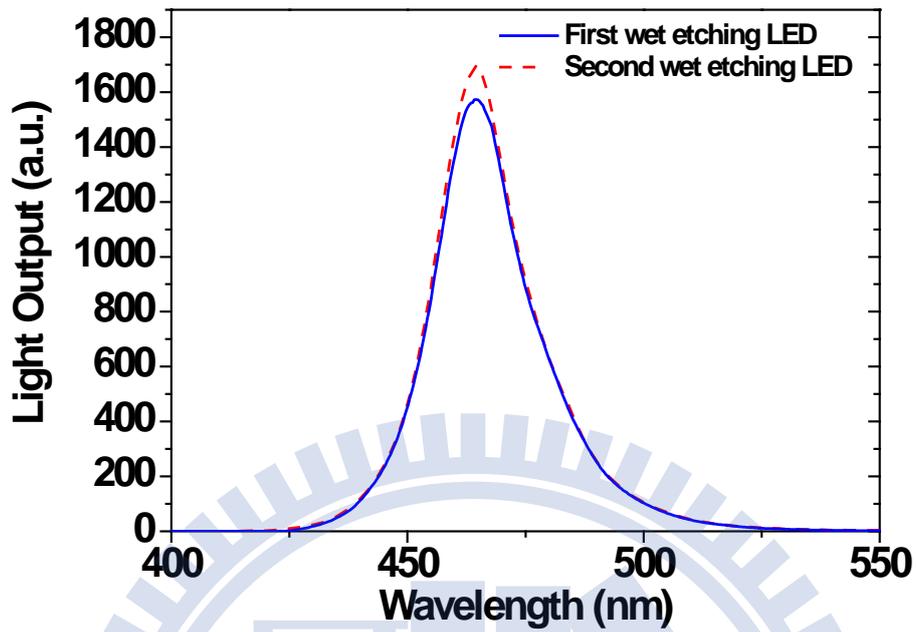


圖 4-8 一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED EL光譜

Item	順向偏壓(V) (350mA)	逆向漏電流(A) (-5V)	出光大小(mW) (350mA)
First wet etching LED	3.45	1×10^{-7}	138.7
Second wet etching LED	3.47	1×10^{-8}	126.2

表 4-2 一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED 順向偏壓、逆向漏電流、出光強度

接著是低頻雜訊分析，圖4-9為二次濕式蝕刻藍寶石基板LED不同注入電流下的雜訊頻譜，而圖4-10為 β 計算圖，一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED的 β 依序為1.71、1.79，也可以看出不同電流對應的雜訊振幅(B)很明顯地二次濕式蝕刻藍寶石基板LED較一次濕式蝕刻藍寶石基板LED還要低，這說明了二次濕式蝕刻藍寶石基板LED因缺陷所產生的雜訊較低。另外較大的 β (1.79)也反應了二次濕式蝕刻藍寶石基板LED擁有較好的晶格品質，這和I-V曲線、L-I-V曲線所得到的結果相同。二次濕式蝕刻藍寶石基板LED由於尖頂的圖案特徵，因此GaN薄膜缺陷比起一次濕式蝕刻藍寶石基板LED低，漏電較低、出光效率較高，由雜訊分析量測也得到相同的結果。

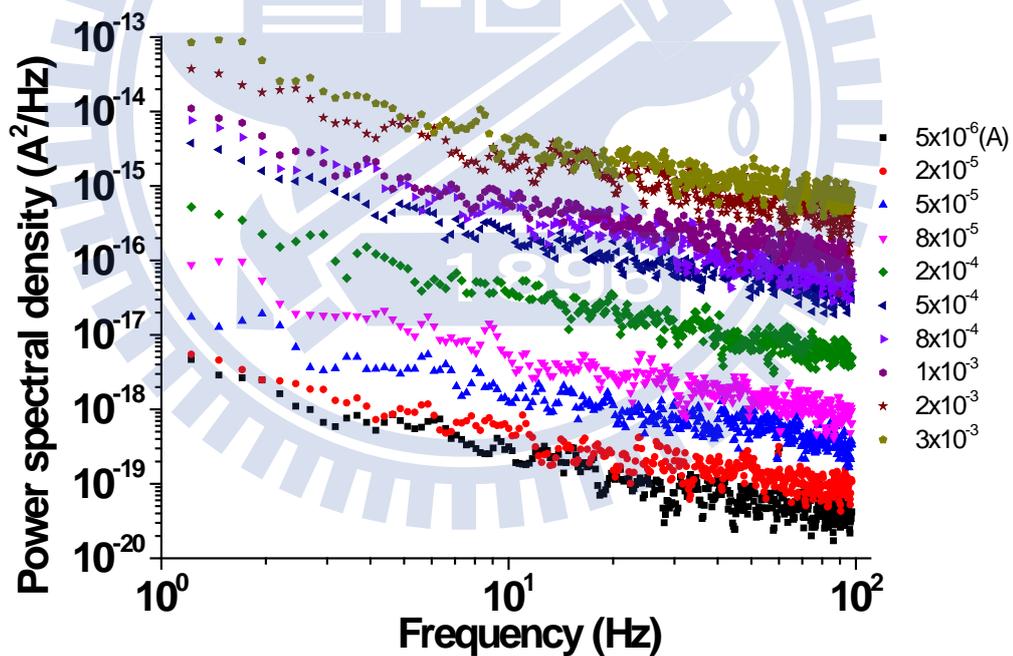


圖 4-9 二次濕式蝕刻藍寶石基板LED不同電流下的雜訊頻譜

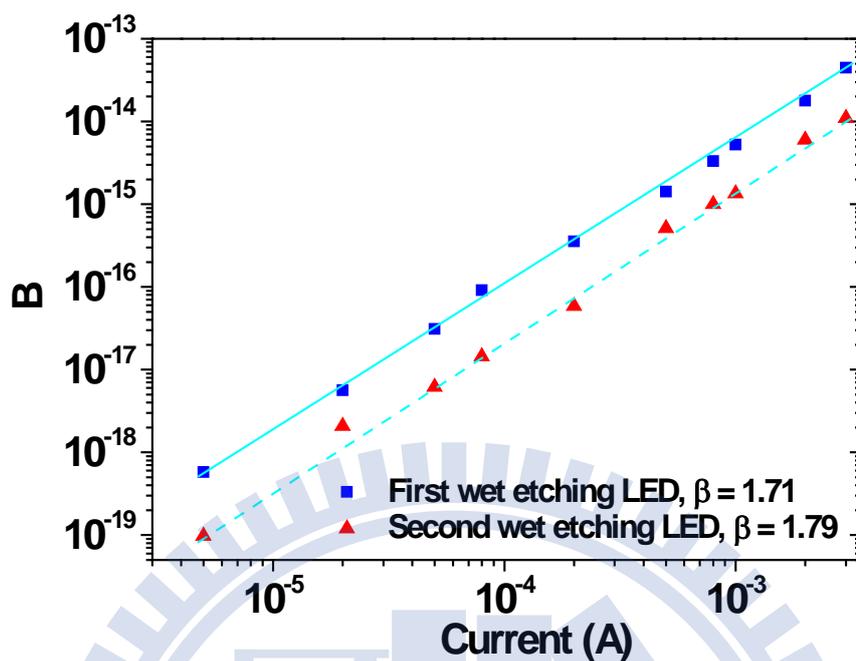


圖 4-10 一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED β 計算圖

針對 β 量測的準確度，我們同時量測了兩種樣品各五顆，目的在於確認 β 的分佈與其誤差範圍。表4-3與表4-4分別為一次濕式蝕刻與二次濕式蝕刻基板五顆LED的 β 計算值。可以發現每顆LED其 β 並非一致，一次濕式蝕刻LED β 分布約為1.71至1.77，而二次濕式蝕刻LED β 分布約為1.77至1.88，由整體趨勢來看，是二次濕式蝕刻LED β 均略大於一次濕式蝕刻LED。一次濕式蝕刻LED β 平均值為1.732，誤差約為 1.73 ± 0.03 ，而二次濕式蝕刻LED β 平均值為1.804，誤差約為 1.804 ± 0.05 ，還在可接受範圍內。圖4-11為兩種樣品LED各五顆針對 β 分佈作圖，可以看到一次與二次蝕刻LED其 β 有明顯的分布區塊差異，由此可更加確認 β 的準確性。

First Wet Etching LED	1	2	3	4	5	Average
β	1.71	1.72	1.72	1.77	1.74	1.732

表 4-3 一次濕式蝕刻LED β 統計表

Second Wet Etching LED	1	2	3	4	5	Average
β	1.79	1.77	1.76	1.88	1.82	1.804

表 4-4 二次濕式蝕刻LED β 統計表

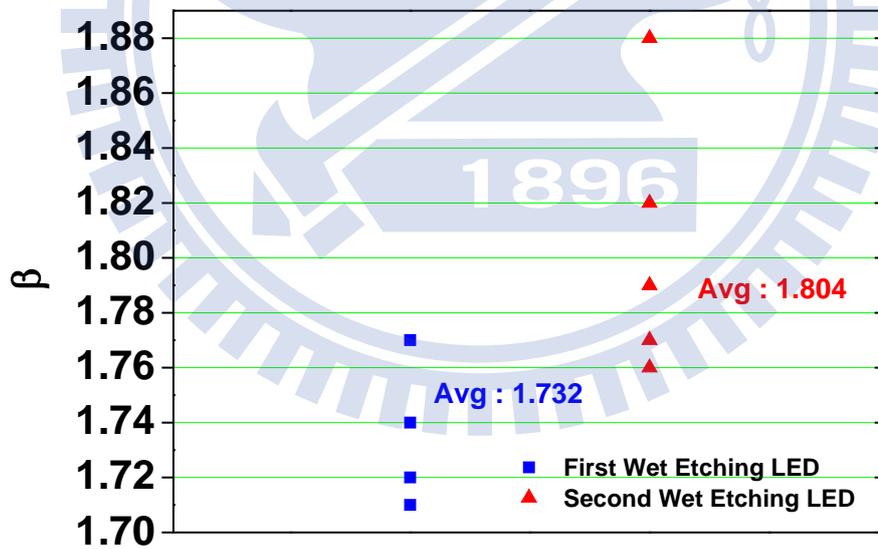


圖 4-11 一次與二次濕式蝕刻藍寶石基板LED β 分佈統計圖

4.3 乾式蝕刻藍寶石基板LED特性分析

此節分為三個部分，依序討論乾式蝕刻藍寶石基板LED的光電特性、低頻雜訊分析、材料品質與老化測試，希望藉由多項實驗證明雜訊和薄膜晶格品質的關係。

4.3.1 光電特性量測分析

首先是I-V量測，圖4-12為三種圖形高度PSS LED及平面藍寶石基板(Flat Sapphire, F.S.) LED的I-V曲線，由圖可知F.S. LED在順向、逆向偏壓時有最大的漏電流，而1.7 μm 的LED則最小。以-5V來說，F.S. LED、1.3 μm LED、1.5 μm LED、1.7 μm LED其漏電流分別為 $3.35 \times 10^{-7} \text{A}$ 、 $1.63 \times 10^{-7} \text{A}$ 、 $5.62 \times 10^{-8} \text{A}$ 、 $5.2 \times 10^{-8} \text{A}$ ，順向偏壓漏電流方面，再通入電壓為1V時，LED尚未導通，此時產生的漏電流即因缺陷或是其他路徑使得電流未經過主動層而流過元件，同時也發現F.S. LED有最大的漏電流，說明不同的PSS結構所導致沉積於上方的Ga_N薄膜品質隨之改變，這反應在晶格品質及缺陷密度上，而F.S. LED表現則比三種PSS LED都還要來的差，後續會有更詳細的材料分析。

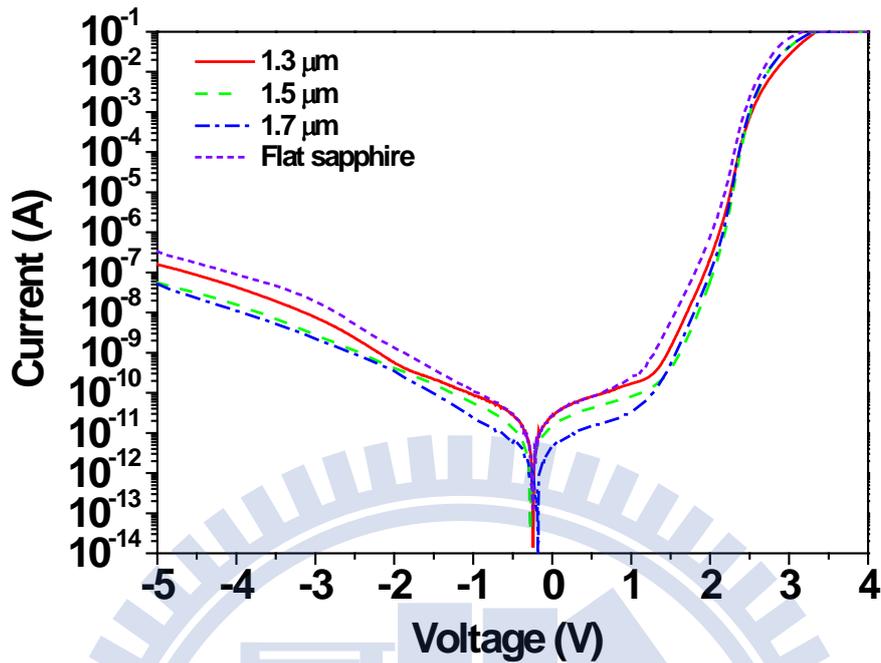


圖 4-12 F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED I-V 曲線

圖4-13為三種圖形高度PSS LED及F.S. LED的L-I-V曲線，在注入電流為350mA時，F.S. LED、1.3 μm LED、1.5 μm LED、1.7 μm LED出光依序為205.3mW、259.5mW、266.4mW、282.1mW。其中1.7 μm LED擁有最大的出光效率，我們推測可能原因是圖形高度越高，射向基板的光線因為全反射而再次向上散射的機率越大，另外晶格品質也較好，因此有較多因輻射復合的光子產生。至於高電流區域的I-V曲線，以350mA來說，F.S.LED、1.3 μm LED、1.5 μm LED、1.7 μm LED的順向偏壓依序為3.99V、3.84V、3.79V、3.73V，這樣的差異可能是在金屬蒸鍍或是封裝過程中受到雜質的影響，導致有多餘的電壓消耗在接面上。表4-5整理了四種LED的順向偏壓、逆向偏壓、出光強度。

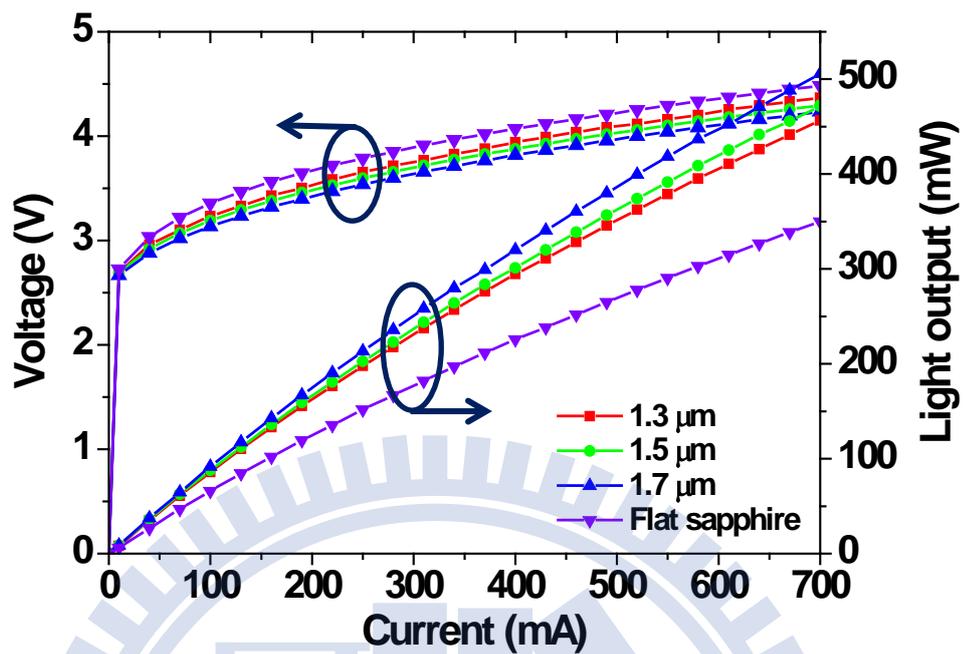


圖 4-13 F.S. LED、1.3µm、1.5µm、1.7µm PSS LED L-I-V 曲線

Item	順向偏壓(V) (350mA)	逆向漏電流(A) (-5V)	出光大小(mW) (350mA)
1.3µm LED	3.84	1.63×10^{-7}	259.5
1.5µm LED	3.79	5.62×10^{-8}	266.4
1.7µm LED	3.73	5.2×10^{-8}	282.1
F.S. LED	3.99	3.35×10^{-7}	205.3

表 4-5 F.S. LED、1.3µm、1.5µm、1.7µm PSS LED 順向偏壓、
逆向漏電流、出光強度

圖4-14為F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED電激發光譜，F.S. LED、1.3 μm LED、1.5 μm LED、1.7 μm LED在注入電流為100mA時所對應到的出光強度分別是2622a.u.、3841.04a.u.、3522.06a.u.、3402.68a.u.，而波長依序為458nm、459.37nm、458.68nm、458.2nm，此波段為藍光，而結果和L-I-V曲線相同，1.7 μm 的PSS LED擁有最大的出光，而F.S. LED是最低。

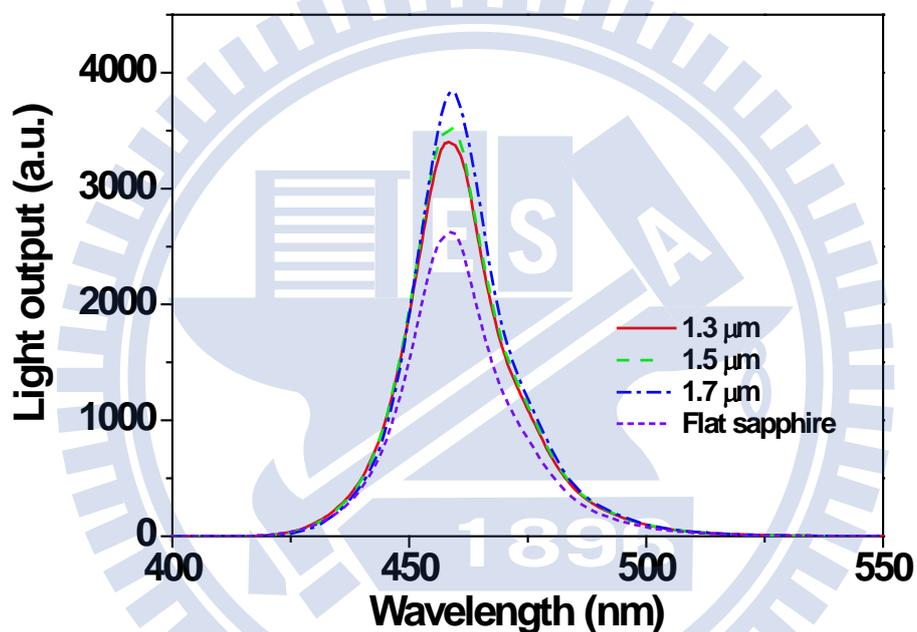


圖 4-14 F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED EL光譜

4.3.2 低頻雜訊量測分析

在低頻雜訊分析部分，首先以SR570搭配SR770作為量測系統，做初步分析。圖4-15為針對不同注入電流所得到的雜訊頻譜，雜訊振幅隨著電流上升，而圖4-16為F.S. LED及三種高度的PSS LED β 計算圖，F.S. LED、1.3 μm LED、1.5 μm LED、1.7 μm LED的 β 分別為1.58、1.7、1.76、1.84。同前面章節的結果，1.7 μm LED擁有最大的 β 值，顯示晶格品質較其餘兩者來的好，而F.S. LED最差。雜訊分析

結果與I-V曲線大致相同，F.S. LED 漏電最嚴重，而PSS LED方面1.3 μm LED缺陷較多且漏電流較大，1.7 μm LED則狀況最好。

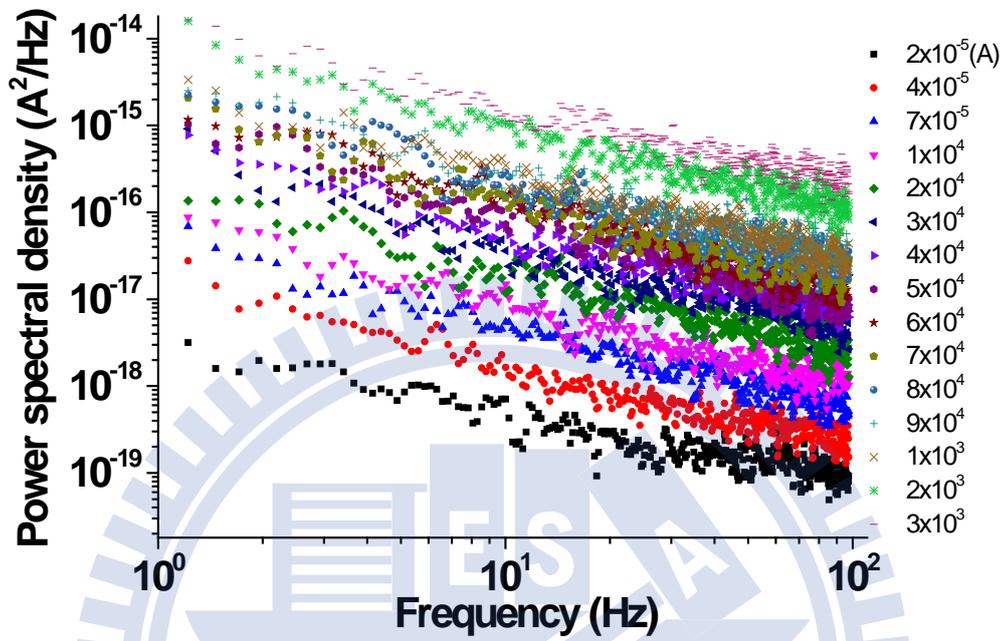


圖 4-15 1.7 μm LED不同電流下的雜訊頻譜

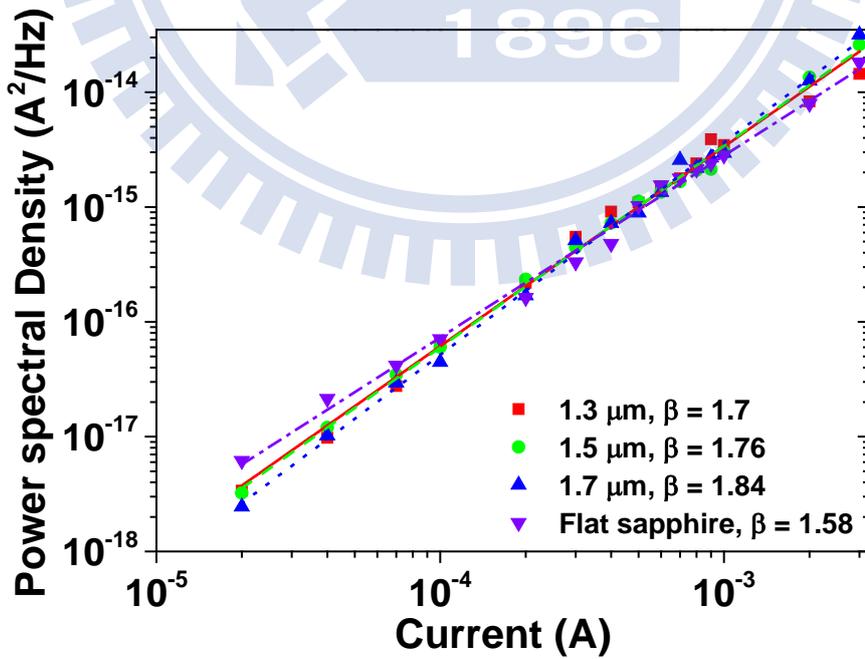


圖 4-16 F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED β 計算圖

接著以低頻雜訊重複採樣量測系統分析雜訊，目的是確認之前得到的量測結果，其特點是可將雜訊頻譜頻率下限推至0.1Hz，我們期望可以得到更加精準的低頻雜訊頻譜，並對 β 做更準確的分析預測。圖4-17、圖4-18、圖4-19、圖4-20分別為F.S. LED、圓錐高度1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm 之PSS LED在不同注入電流量下的雜訊頻譜，圖4-21為針對雜訊頻譜做fitting量得的 β 值，PSS LED方面1.7 μm PSS LED有最大的 β ，1.3 μm PSS LED之 β 最小，而F.S. LED β 則為1.58，比PSS LED均來的小。在高電流區域由於電流密度已相當高，此時缺陷影響有限，仍有大量載子可進行復合，故雜訊振幅在此區域沒有太大差異。但在低電流時，載子密度並未遠大於缺陷密度，所以缺陷多寡和被侷限與否有著密切的關聯，越大的雜訊振幅代表內部陷阱(Trap)越多，所以產生較多的雜訊，而 β 取決於雜訊隨著電流的變化幅度。在低電流時，PSS LED方面，1.7 μm PSS LED由於雜訊振幅最低，故經計算後有較大的 β ，相反地，1.3 μm PSS LED雜訊振幅最高，變化幅度小，即 β 較小。而F.S. LED由於缺陷遠比上述三種PSS LED要多，因此雜訊震幅最大，相對 β (1.58)是最小的。

我們由兩種低頻雜訊分析方式均得到相同的結果，也確認了此系統的準確性，因此可以做出初步的結論，1.7 μm PSS LED由於在低電流時雜訊振幅較小，顯示其缺陷密度較低，同理1.3 μm PSS LED缺陷密度較高。同時也比較了F.S. LED，未做PSS結構缺陷密度必定是較高的，而量測結果也與預期相同。

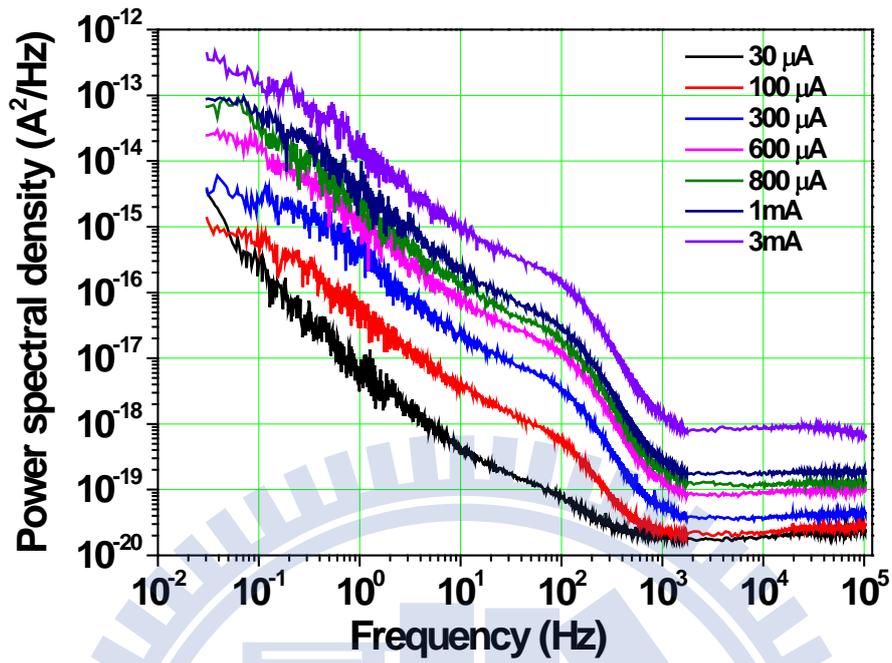


圖 4-17 F.S. LED在不同注入電流下的雜訊頻譜

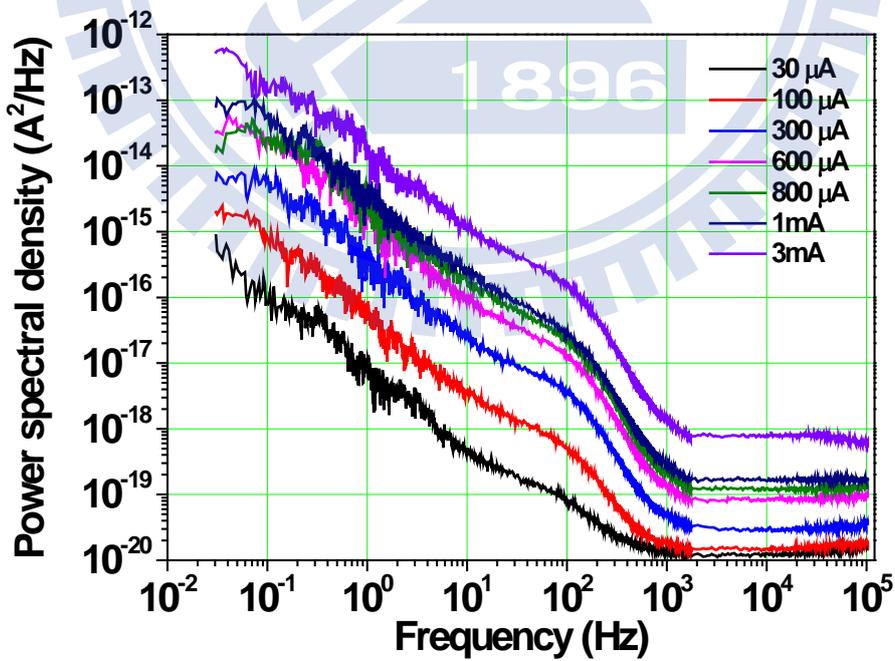


圖 4-18 1.3μm LED在不同注入電流下的雜訊頻譜

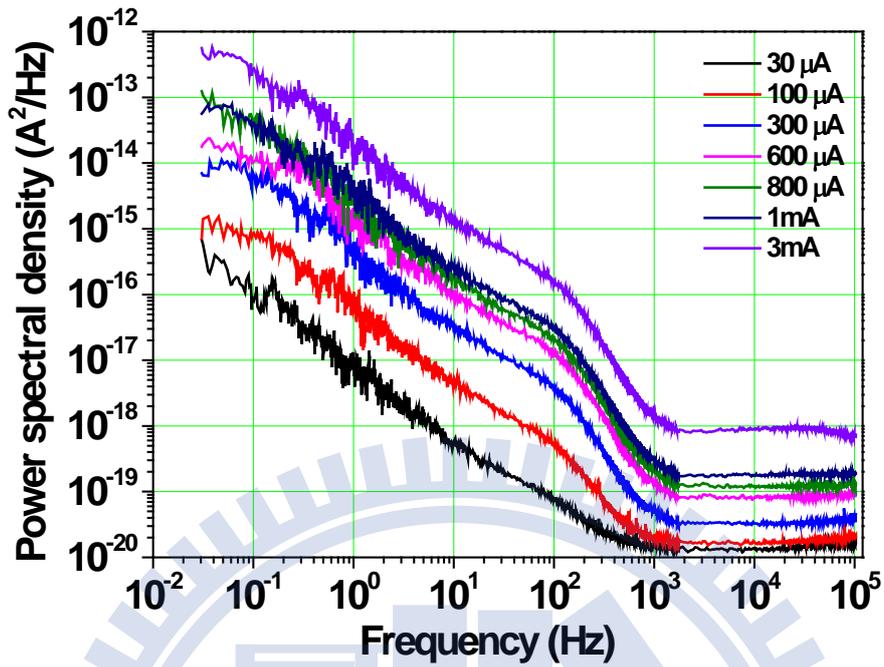


圖 4-19 1.5µm LED在不同注入電流下的雜訊頻譜

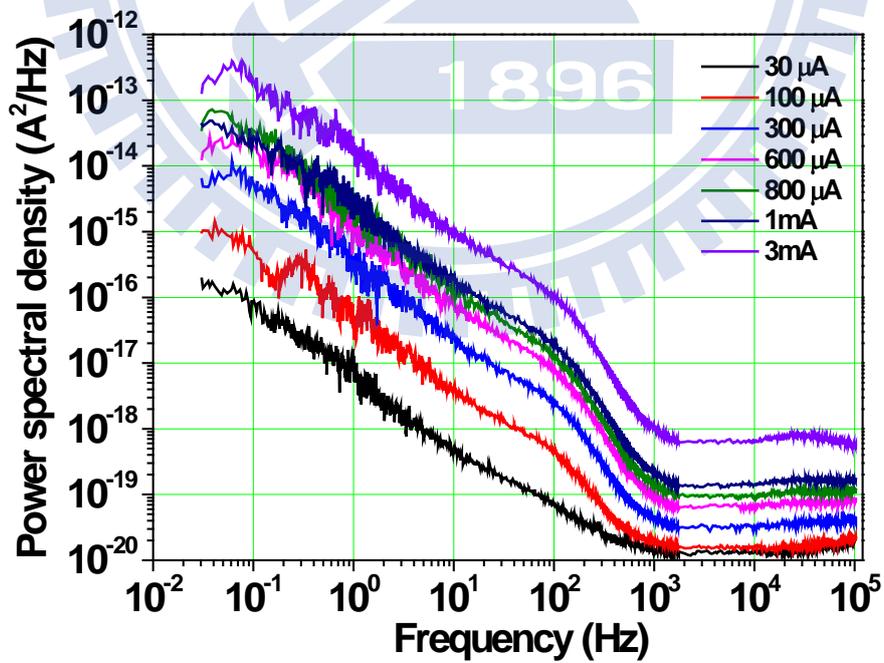


圖 4-20 1.7µm LED在不同注入電流下的雜訊頻譜

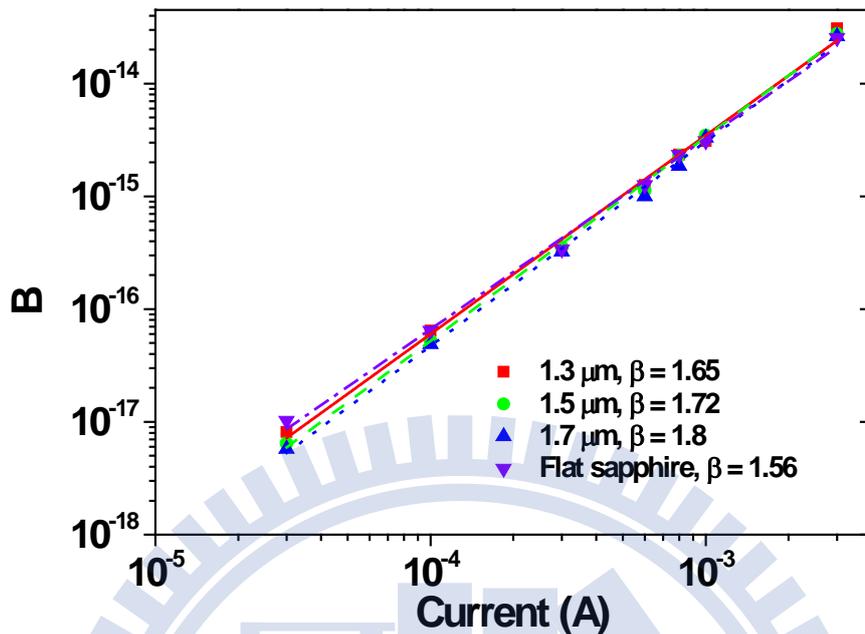


圖 4-21 F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED β 計算圖

我們同樣針對乾式蝕刻LED做 β 的準確性分析，準備三種圖案高度PSS LED及平面藍寶石基板LED各五顆，量測其 β 值並做平均。表4-6、表4-7、表4-8、表4-9分別為F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED β 計算表，經過統計，F.S. LED其 β 分佈為1.51至1.62，平均值為1.572。1.3 μm LED其 β 分佈為1.62至1.69，平均值為1.662。1.5 μm LED其 β 分佈為1.7至1.79，平均值為1.744。1.7 μm LED其 β 分佈為1.75至1.83，平均值為1.796。大致上針對每種PSS LED， β 是有一定的分佈範圍。而在誤差值方面，F.S. LED是 1.572 ± 0.06 、1.3 μm LED是 1.662 ± 0.04 、1.5 μm LED是 1.744 ± 0.05 、1.7 μm LED是 1.796 ± 0.04 。圖4-22是針對這四種LED各五顆對應 β 的分佈統計圖，可以看到四種LED其 β 有明顯不同的分佈區塊，儘管1.5 μm 、1.7 μm PSS LED有部分重疊，但趨勢的呈現依舊是1.7 μm LED有較大的 β ，而F.S. LED β 最小，因此可更加確認 β 的準確性。

F.S. LED	1	2	3	4	5	Average
β	1.56	1.6	1.51	1.62	1.57	1.572

表 4-6 F.S. LED β 統計表

1.3 μm LED	1	2	3	4	5	Average
β	1.62	1.65	1.68	1.68	1.69	1.662

表 4-7 1.3 μm LED β 統計表

1.5 μm LED	1	2	3	4	5	Average
β	1.7	1.72	1.75	1.77	1.79	1.744

表 4-8 1.5 μm LED β 統計表

1.7 μm LED	1	2	3	4	5	Average
β	1.75	1.78	1.8	1.82	1.83	1.796

表 4-9 1.7 μm LED β 統計表

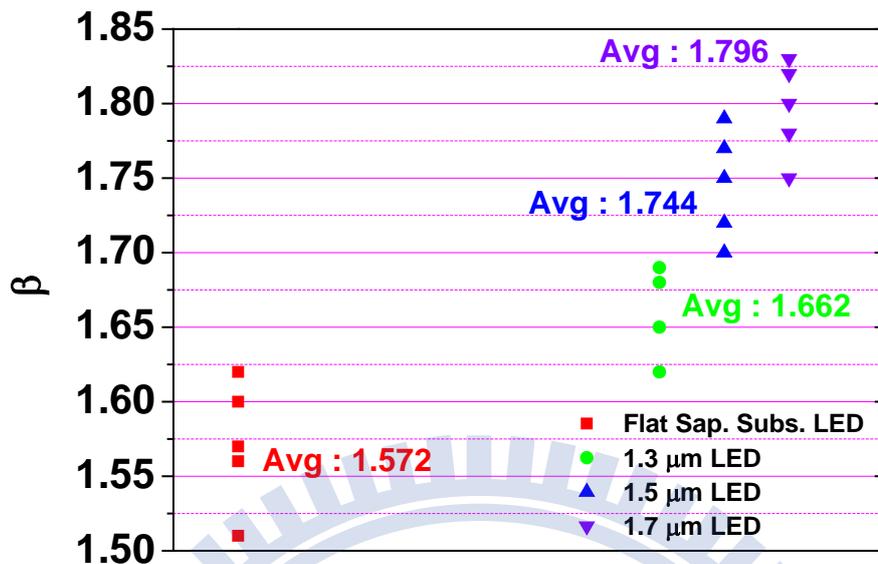


圖 4-22 F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED β 分佈統計圖

4.3.3 LED磊晶品質分析

為了證實雜訊分析與LED晶格品質的關係與正確性，我們做了以下材料分析來驗證雜訊量測所得到的結果：XRD(X-Ray Diffraction)、TEM(Transmission electron microscopy)、EPD(Etch Pit Density)，以下將各別介紹實驗結果。

首先是三種圖案高度PSS LED的XRD結果，圖4-23為F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED的(102)面Rocking Curve強度分布圖。接著使用高斯函數(Gauss function)做Fitting，可計算出半高寬與強度。表4-10整理了F.S. LED、1.3 μ m、1.5 μ m、1.7 μ m PSS LED之XRD強度與半高寬，可知PSS LED部分1.3 μ m PSS LED其半高寬最大且強度最低，而1.7 μ m PSS LED半高寬最小強度最強，F.S. LED則比上述三種PSS LED都還要差。因此可由此得知1.7 μ m PSS LED晶格品質最佳，而F.S. LED最差。

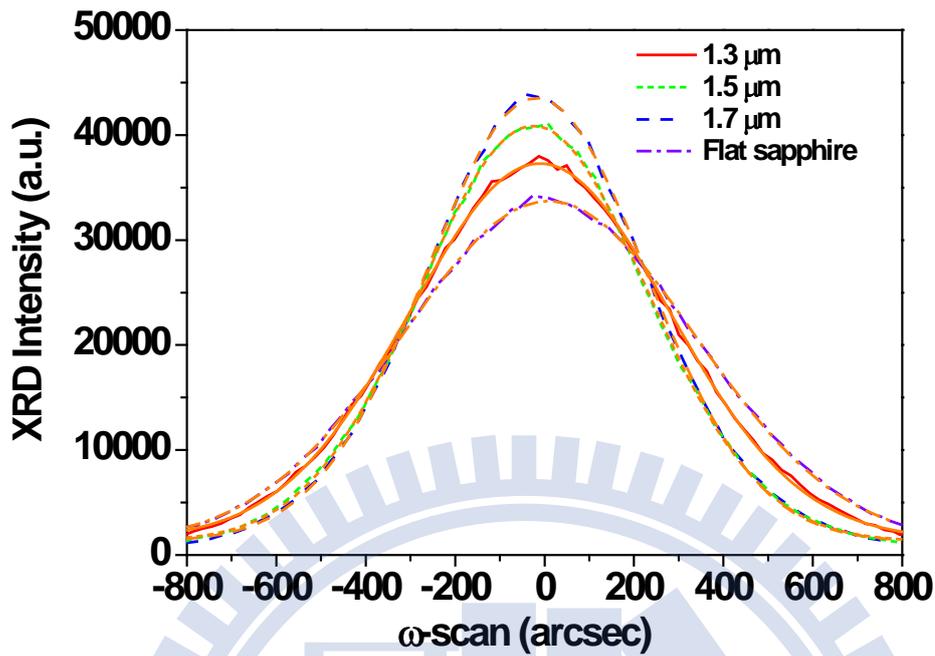


圖 4-23 F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED XRD rocking curve與 Fitting Line

Sample	F.S. LED	1.3 μm PSS LED	1.5 μm PSS LED	1.7 μm PSS LED
最大強度 (a.u.)	32618	35788	39577	42231
半高寬 (arcsec)	773	683	605	580

表 4-10 F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED XRD 強度與半高寬

圖4-24為成長於不同圓錐高度的圖案化藍寶石基板LED之量子井部分TEM圖形，由於使用PSS作為基板的關係，降低了GaN薄膜的錯位差排，在圖中所看到的是幾乎沒受到缺陷影響的完整量子井，而壁壘分明的InGaN多重量子井也代表了相當好的量子井晶格結構。另外圖4-25和圖4-26為藍寶石基板圓錐圖案與GaN薄膜的交界處，雖然依舊可以看到錯位差排在圓錐的周圍形成，但在圓錐上方的GaN薄膜部分，其錯位差排密度是較平面少的。

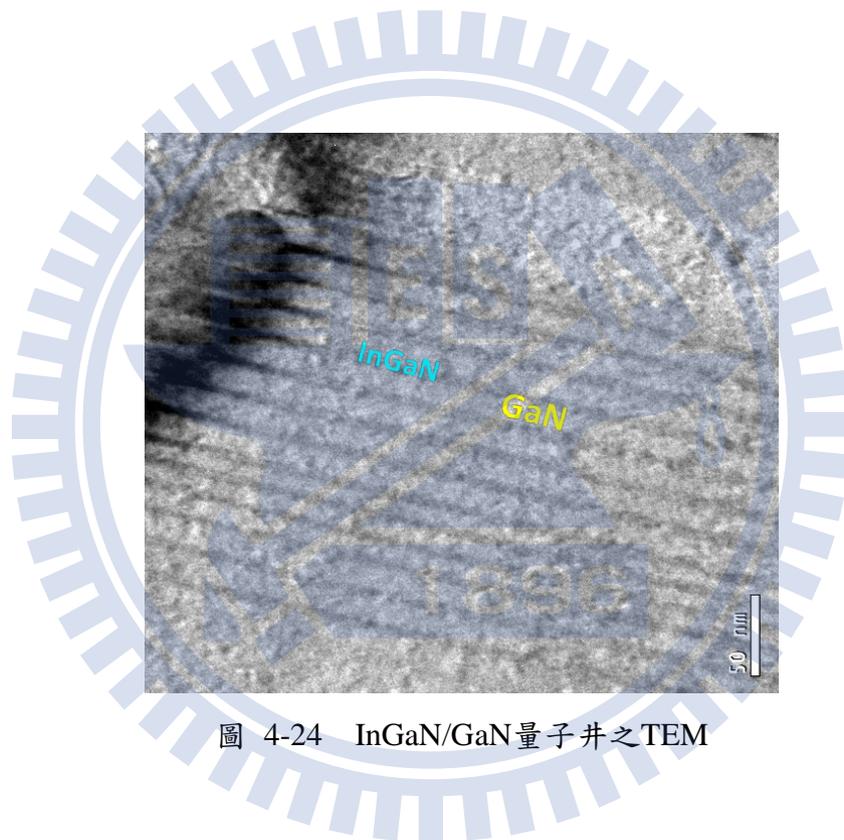


圖 4-24 InGaN/GaN量子井之TEM

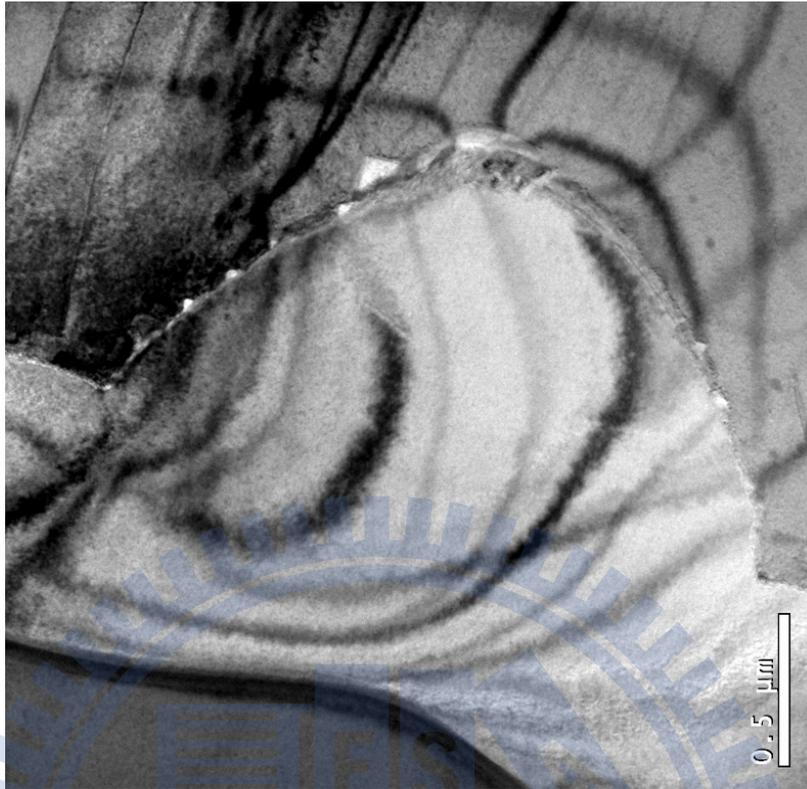


圖 4-25 藍寶石基板圓錐圖形與Ga_N薄膜交界處(一)

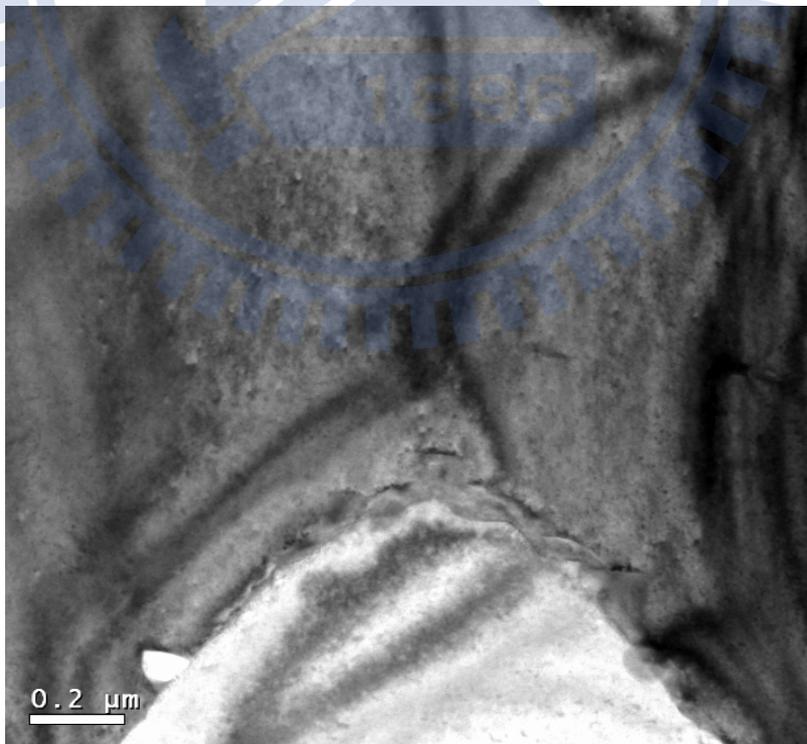


圖 4-26 藍寶石基板圓錐圖形與Ga_N薄膜交界處(二)

接著使用EPD (Etch Pit Density)檢視材料的缺陷密度，溶液配製使用加熱至215°C的磷酸蝕刻3分鐘，使其表面缺陷因蝕刻而形成凹洞方便觀察，再藉由電子顯微鏡觀測其缺陷密度。圖4-27、圖4-28、圖4-29、圖4-30分別為F.S. LED、1.3 μm 、1.5 μm 、1.7 μm PSS LED的EPD SEM俯視圖，經由計算得知其缺陷密度依序為 $5.24 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、 $2.12 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.88 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.68 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。正如之前量測結果，F.S. LED擁有最大的缺陷密度，而PSS LED方面圖案高度為1.3 μm 的LED缺陷密度較高，圖案高度為1.5 μm 的LED缺陷密度居中，圖案高度為1.7 μm 的LED缺陷密度最低。



圖 4-27 F.S. LED EPD

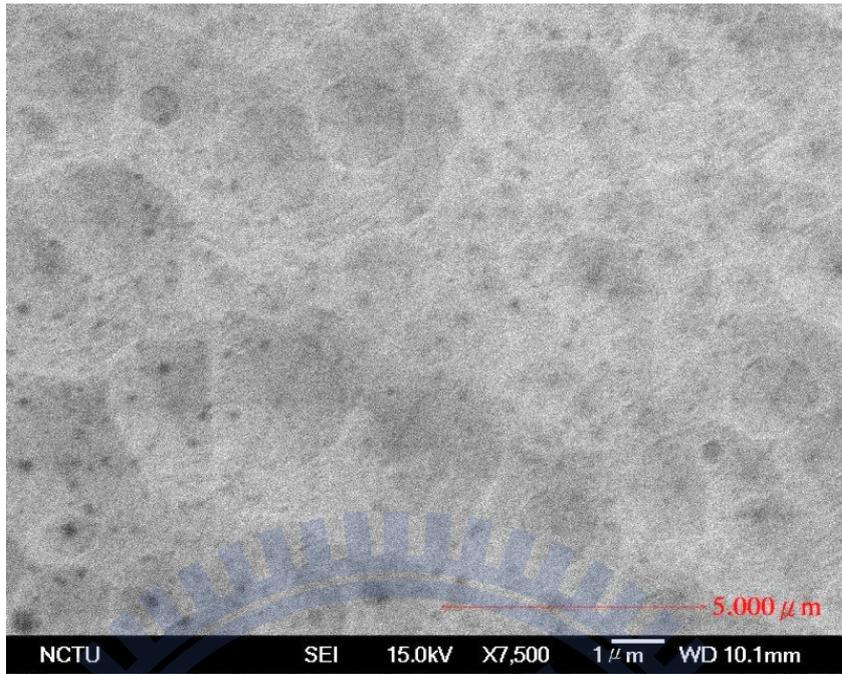


圖 4-28 1.3µm PSS LED EPD

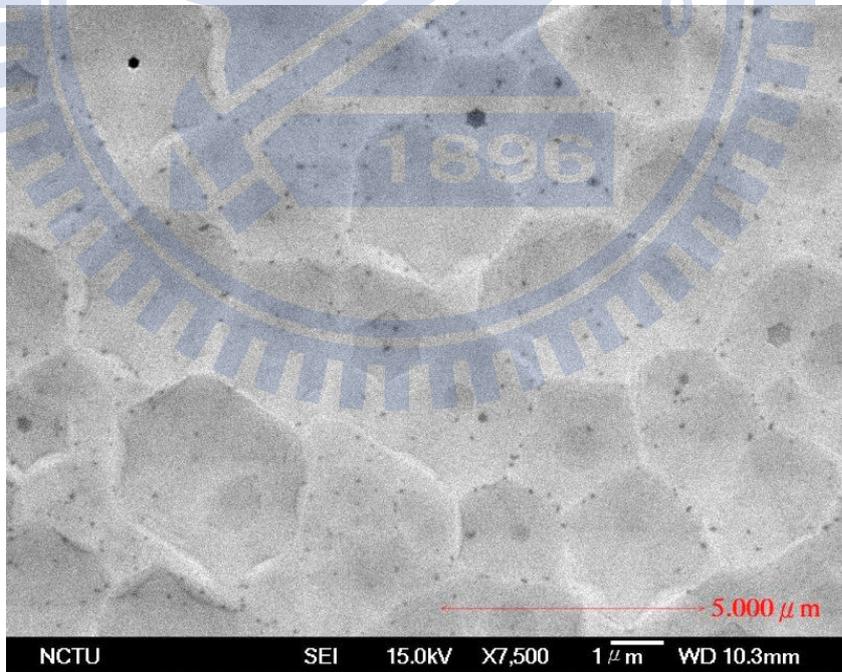


圖 4-29 1.5µm PSS LED EPD

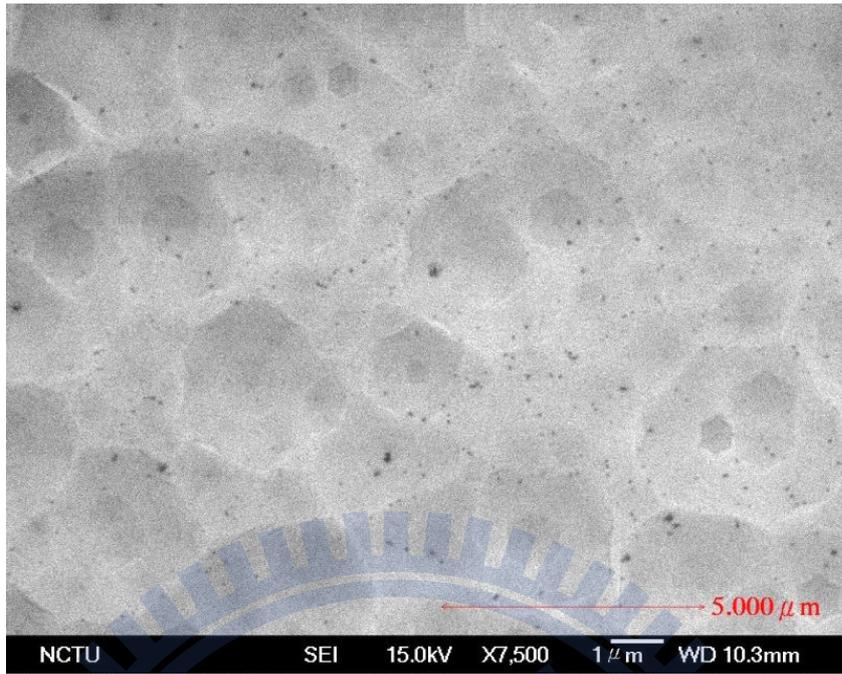


圖 4-30 1.7 μ m PSS LED EPD

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

本研究首先證明了InGaN/GaN LED雜訊會因不同基板而改變，這是由於基板和氮化鎵薄膜之間的晶格不匹配所造成的缺陷，在導通時影響載子在半導體內的活動所產生額外的雜訊，我們觀察到在低頻域有 $1/f$ 特性的雜訊頻譜，時藉由量測與分析這些低頻雜訊可以分辨出晶格品質的差異。接著也成功製作了溼式與乾式蝕刻圖案化藍寶石基板LED，並做了光性、電性及雜訊的比較。濕式蝕刻圖案化藍寶石基板LED方面，我們發現二次蝕刻的藍寶石基板LED擁有較好的電性及出光率，同時雜訊分析也顯示其晶格品質較好，比起一次蝕刻的藍寶石基板LED有較大的雜訊指數(β)。在乾式蝕刻圖案化藍寶石基板LED方面，分別製作圖案高度為 $1.3\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 、 $1.7\mu\text{m}$ 的圓錐，同時也加入平面藍寶石基板作為對照。經過磊晶與製程後，量測電性及光性均發現高度 $1.7\mu\text{m}$ 的圓錐圖案藍寶石基板LED最好，高度 $1.5\mu\text{m}$ 居中，最差的為高度 $1.3\mu\text{m}$ 。另外也同時以兩種雜訊分析方式比較，第一種雜訊量測方式較為簡易，低頻量測範圍在1Hz至100Hz，優點是快速、便利，但缺點是精準度不佳。因此我們使用第二種雜訊量測方式來改善，自行擷取時域頻譜並藉由電腦進行傅立葉轉換可將低頻域推至0.01Hz，並觀察到更具 $1/f$ 特性的低頻雜訊頻譜，對於雜訊分析的準確性來說，有非常大的幫助。我們由雜訊分析的結果推斷不同圓錐高度的圖案化藍寶石基板LED的品質，為了更加確認雜訊的量測結果，我們同時也做了氮化鎵薄膜的材料分析，而XRD和EPD兩種材料分析均指出 $1.7\mu\text{m}$ 的圓錐圖案藍寶石基板LED晶格品質最好，半高寬最小且缺陷密度最低，而平面藍寶石基板LED其量測結果均較三種PSS LED來的差。由材料分析的結果可確認以低頻雜訊來評斷LED晶格品質的確是一種新興的品質分析方式，其優點是非破壞性、敏感度高、快速便利。

5.2 未來展望

此雜訊分析研究目的在於快速、準確地分析LED品質，期望能在LED品質分析上提供多一種的選擇或是驗證。目前雖然可得到單一差異LED的相對值，但對於不同結構仍無法互相比較分析。因此在未來仍有很多的改進空間，例如整理經驗公式找出可換算各種LED量測參數的方法、量測環境的屏蔽設置也可以再改善，由目前的雜訊頻譜發現其實外在交流電(60Hz)依舊嚴重影響實驗，這部分可以由LED的外部屏蔽物著手。另外我們也針對雜訊來源做了探討，透過比較品質較差的LED和改變溫度來探討不同頻域、電流、溫度下的雜訊頻譜。最後實驗中最佔時間的是低頻雜訊頻譜的擷取，雖然透過重複取樣系統已大幅縮短取樣時間，但若是推動商業化勢必要針對此點改進。

探討雜訊起源也是我們未來的重要目標之一，首先從變溫的雜訊頻譜著手，圖5-1是常溫(300K)下不同注入電流的雜訊頻譜，也是一般最常見的頻譜，而圖5-2是在77K時不同注入電流的雜訊頻譜，可以很明顯地看出整體雜訊振幅下降、 $1/f^2$ 雜訊特徵較不明顯以及 $1/f$ 雜訊往高頻延伸三種趨勢。另外針對同一注入電流、不同溫度的雜訊量測即如圖5-3所示，注入電流固定於1 mA，實驗結果指出溫度在300K至100K之間，雜訊頻譜僅有振幅下降的現象，目前推測原因是載子因溫度降低而動能減少，進出缺陷而產生的雜訊因此降低。溫度在100K至77K則發現 $1/f^2$ 雜訊特徵逐漸消失以及 $1/f$ 雜訊的延伸，目前推測原因是低溫(77K)時有其他缺陷出現並主導了雜訊頻譜。

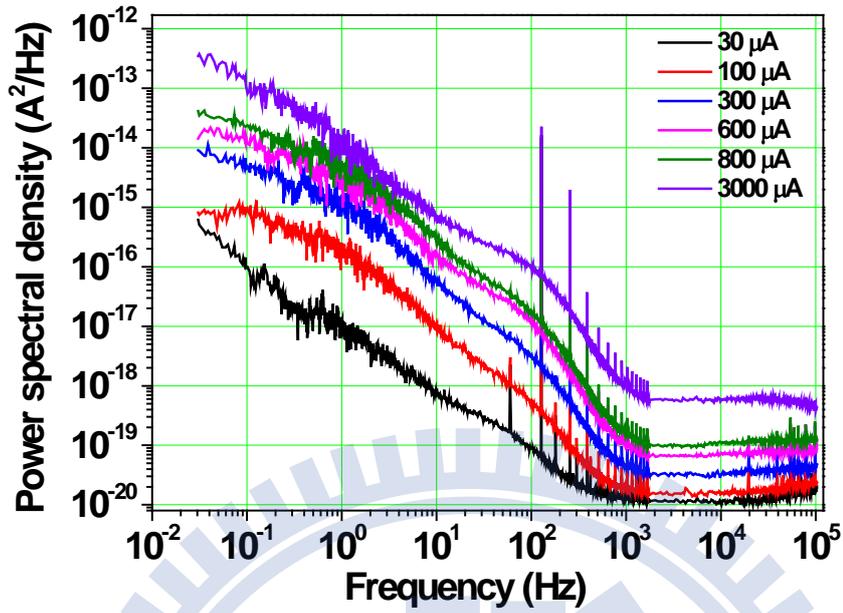


圖 5-1 300K不同注入電流雜訊頻譜

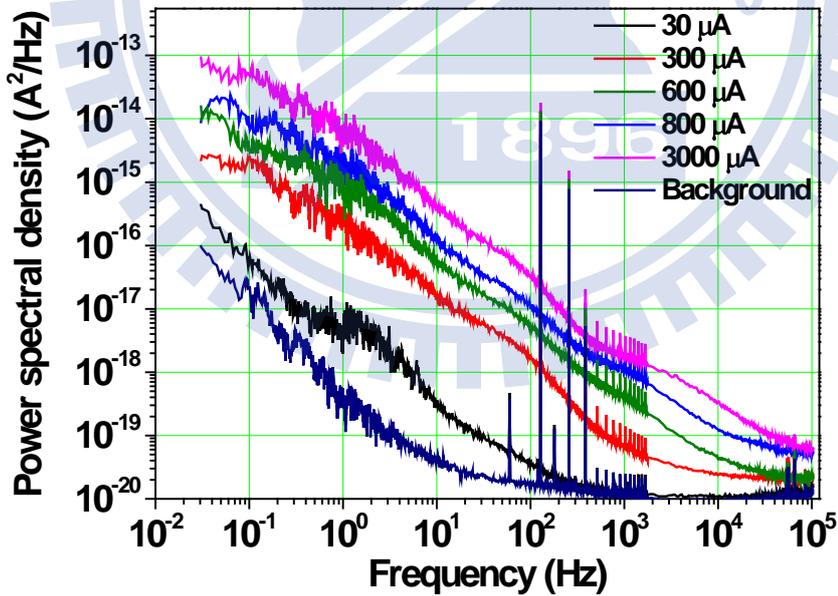


圖 5-2 77K不同注入電流雜訊頻譜

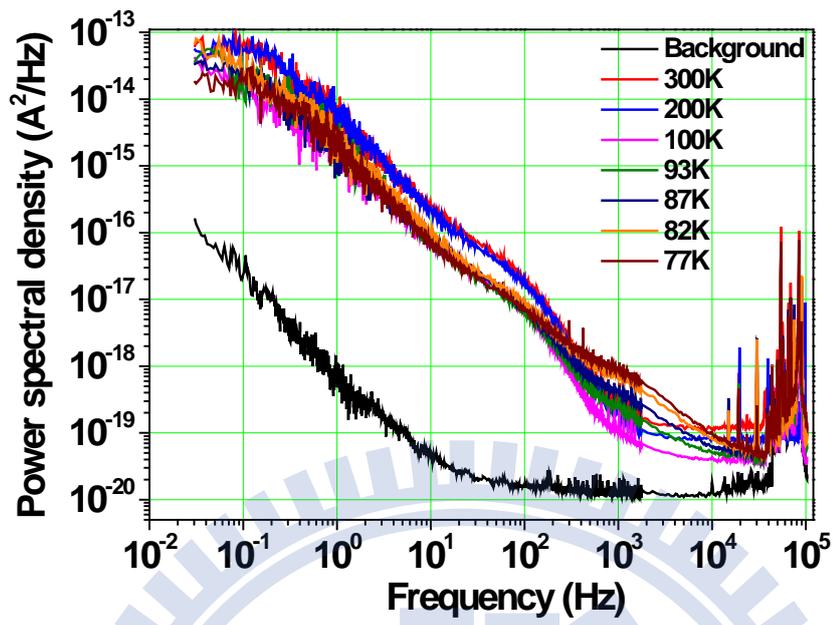


圖 5-3 溫度300K至77K注入電流1 mA雜訊頻譜

參考資料

- [1] B. Heying, X.H. Wu, S. Keller, Y. Li, D. Kapolnek, B.P. Keller, S.P. Denbaars, and J.S. Speck, "Role of threading dislocation structure on the x-ray diffraction peak widths in epitaxial GaN films," *Applied Physics Letters*, vol. 68, pp. 643-645, 1996.
- [2] M. J. Kirton and M. J. Uren, "Noise in solid-state microstructures: a new perspective on individual defects, interface states and low-frequency (1/f) noise", *Adv. Phys.* vol. 38, pp. 367-468, 1989.
- [3] K. K. Hung, P. K. Ko, C. Hu and Y. C. Cheng, "A unified model for the flicker noise in metal-oxide-semiconductor field-effect transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 37, pp. 654-665, 1990.
- [4] M. J. Chen, T. K. Kang, Y. H. Lee, C. H. Liu, Y. J. Chang, and K. Y. Fu, "Low-frequency noise in n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistors undergoing soft breakdown," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, pp. 648-653, 2001.
- [5] N. Tega, H. Miki, T. Osabe, A. Kotabe, K. Otsuga, H. Kurata, S. Kamohara, K. Tokami, Y. Ikeda, and R. Yamada, "Anomalously Large Threshold Voltage Fluctuation by Complex Random Telegraph Signal in Floating Gate Flash Memory," *IEEE Electron. Devices Meeting, 2006, IEDM '06 Tech. Dig., International*, pp. 1-4, Dec. 2006
- [6] F.N. Hooge, Kedzia J, Vandamme LKJ. "Boundary scattering and 1/f noise," *J. Appl. Phys.* vol. 50, pp. 8087-9, 1979.
- [7] K. L. Su, G. Lin, S. T. Yang, T. T. Chen, and C. L. Chen, "Spectral Analysis of Noise Sources in InGaN Light Emitting Diodes," *Digest of CLEO 2011*, paper

number JWA93.

- [8] T. Mukai, K. Takekawa, and S. Nakamura, "InGaN-based blue light-emitting diodes grown on epitaxial laterally overgrown GaN substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.37, pp. 839-841, 1998.
- [9] I. Kidoguchi, A. Ishibashi, G. Sugahara, and Y. Ban, "Air-bridged lateral epitaxial overgrowth of GaN thin films," *Appl. Phys. Lett.*, vol.76, pp. 3768-3770, 2000.
- [10] Y. J. Lee, T. C. Hsu, H. C. Kuo, S. C. Wang, Y. L. Yang, S. N. Yen, Y. T. Chu, Y. J. Shen, M. H. Hsieh, M. J. Jou, and B. J. Lee, "Improvement in light-output efficiency of near-ultraviolet InGaN- GaN LEDs fabricated on stripe patterned sapphiresubstrates," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 122, pp. 184-187, 2005.
- [11] W. K. Wang, D. S. Wu, S. H. Lin, P. Han, R. H. Horng, T. C. Hu, D. T. C. Huo, M. J. Jou, Y. H. Yu, and A. Lin, "Efficiency improvement of near-ultraviolet InGaN LEDs using patterned sapphire substrates," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 41, pp. 1403-1409, 2005.
- [12] D. S. Wu, W. K. Wang, K. S. Wen, S. C. Huang, S. H. Lin, R. H. Horng, Y. S. Yu, and M. H. Pan, "Fabrication of pyramidal patterned sapphire substrates for high-efficiency InGaN-Based Light Emitting Diodes," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 153, pp. 765-770, 2006.
- [13] C. Wang, C. J. Chang, and S. W. S. Chi, "Effects of lens shape on GaN grown on microlens patterned sapphire substrates by Metall organic Chemical Vapor Deposition," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, pp. 304-307, 2010.
- [14] J. B. Kim, S. M. Kim, Y. W. Kim, S. K. Kang, S. R. Jeon, N. Hwang, Y. J. Choi, and C. S. Chung, "light extraction enhancement of GaN-based light-emitting diodes using volcano-shaped patterned sapphire substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 49, pp. 042102, 2010.
- [15] Lu Min, Chang Xin, Fang Hui-Zhi, Yang Zhi-Jian, Yang Hua, Li Zi-Lan, Ren

- Qian, Zhang Guo-Yi, and Zhang Bei, "Etch-pits and threading dislocations in thick LEO GaN films on sapphire grown by MOCVD," *Phys. stat. sol.* vol. 1, no. 10, 2438-2440, 2004.
- [16] D. S. Wu, W. K. Wang, W. C. Shih, R. H. Hong, C. E. Lee, W. Y. Lin and J. S. Fang, "Enhanced output power of near-ultraviolet InGaN-GaN LEDs grown on patterned sapphire substrates," *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 17, no. 2 February, 2005.
- [17] F. N. Hooge, T. G. M. Kleinpenning, and L. K. J. Vandamme, "Experimental studies on $1/f$ noise," *Rep. Progr. Phys.* vol.44, 1981.
- [18] S. Sawyer, S. L. Rumyantsev, M. S. Shur, N. Pala, Yu. Bilenko, J. P. Zhang, X. Hu, A. Lunev, J. Deng, and R. Gaska, "Current and optical noise of GaN/AlGaIn light emitting diodes," *J. Appl. Phys.* vol. 100, pp. 034504, 2006.
- [19] F. N. Hooge, " $1/f$ noise sources," *IEEE Trans. Electron Devices* 41, pp. 1926, 1994.
- [20] 林若璇, 「氮化鎵基材漏電行為與材料品質之奈米尺度研究」, 國立中央大學, 碩士論文, 民國97年。
- [21] P. Bhattacharya, "Semiconductor Optoelectric Devices," Prentice Hall, 1994.
- [22] P. C. Tsai, Ricky W. Chuang, and Y. K. Su, "Lifetime Tests and Junction-Temperature Measurement of InGaN Light-Emitting Diodes Using Patterned Sapphire Substrates," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 591-596, 2007.
- [23] T. S. Zheleva, O. H. Nam, M. D. Bremser, and R. F. Davis, "Dislocation density reduction via lateral epitaxy in selectively grown GaN structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no. 17, pp. 2472-74, Oct. 1997.
- [24] A. Sakai, H. Sunakawa, and A. Usui, "Defect structure in selectively grown GaN films with low threading dislocation density," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no.

- 16, pp. 2259–2261, Oct. 1997.
- [25] W. K. Wang, D. S. Wu, S. H. Lin, P. Han, R. H. Horng, T. C. Hsu, D. T. C. Huo, M. J. Jou, Y. H. Yu, A. Lin, “Efficiency improvement of near-ultraviolet InGaN LEDs using patterned sapphire substrates,” *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, vol. 41, pp. 1103, 2005.
- [26] J. H. Lee, J. T. Oh, Y. C. Kim, and J. H. Lee, “Comparison of InGaN-Based LEDs Grown on Conventional Sapphire and Cone-Shape-Patterned Sapphire Substrate,” *IEEE Trans. Electron Devices* vol. 57, no. 1, 2010.
- [27] J. H. Lee, D. Y. Lee, B. W. Oh, and J. H. Lee, “Stress reduction and enhanced extraction efficiency of GaN-based LED grown on coneshape patterned sapphire,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 18, pp. 1563–1564, Sep. 15, 2008.
- [28] 邱偉哲，「藍寶石基板上的圖案尺寸與形狀對氮化鎵磊晶成長的影響」，國立交通大學，碩士論文，民國97年。
- [28] D. V. Kuksenkov, H. Temkin, A. Osinsky, R. Gaska, and M. A. Khan, “Low-frequency noise and performance of GaN p-n junction photodetectors,” *J. Appl. Phys.* vol. 83, no. 4, 1998.
- [29] F. N. Hooge, “ $1/f$ noise is no surface effect”, *Physics Letters*, vol. 29A, pp. 139-140, 1969.
- [30] J. I. Lee, J. Brini, A. Chovet, C. A. Dimitriadis, “Flicker noise by random walk of electrons at the interface in nonideal Schottky diodes”, *Solid-State Electronics*, vol. 43, pp. 2185-2189, 1999.
- [31] S. Bychikhin, D. Pogany, L. K. J. Vandamme, G. Meneghesso and E. Zanoni, “Low-frequency noise sources in as-prepared and aged GaN-based light-emitting diodes,” *J. Appl. Phys.* vol. 97, pp. 123714, 2005.
- [32] F. N. Hooge, J. Kedzia, L. K. J. Vandamme, “Boundary scattering and $1/f$ noise,”

J. Appl. Phys. vol. 50, pp. 8087-8089, 1979.

- [33] L. C. Li, K. H. Huang, J. A. Wei, Y. W. Suen, T. W. Liu, C. C. Chen, L. C. Chen, and K. H. Chen, “Low-frequency contact noise of a GaN nanowire device by using cross spectrum technique,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 50, 2011.
- [34] L. C. Li, S. Y. Huang, J. A. Wei, Y. W. Suen*, M. W. Lee, W. H. Hsieh, T. W. Liu, and C. C. Chen, “Correlated Electric Fluctuations in GaN Nanowire Devices,” *J. Nanosci. Nanotechnol.* vol. 9, pp. 1000, 2009.
- [35] 李良箴，「氮化鎵奈米線的多出雜訊之特性」，國立中興大學，博士論文，民國96年。
- [36] X. Y. Chen, A. Pedersen, A. D. van Rheeën, “Effect of electrical and thermal stress on low-frequency noise characteristics of laser diodes,” *Microelectronics Reliability*, vol. 41, pp. 105-110, 2001.
- [37] Van der Ziel A, “The surface recombination model of p-n diode Flicker noise,” *Physica*, vol. 48, pp. 242-246, 1970.

簡歷 (Vita)

姓名：管金儀, Chin-I Kuan

性別：男

出生年月日：民國77年8月27日

籍貫：臺灣臺南

學歷：國立臺南第一高級中學 (92.9 - 95.6)

國立中央大學電機工程學系學士 (95.9 - 99.6)

國立交通大學電子研究所碩士班 (99.9 - 101.7)

碩士論文題目：

圖案化藍寶石基板氮化鎵系發光二極體之電雜訊量測及分析研究

Noise Measurement and Analysis of Nitride-Based Light Emitting Diode Grown on

Patterned Sapphire Substrates