

國立交通大學

材料科學與工程學系 碩士論文

利用鑽石複合材料當作高亮度發光二極體的散熱
管理

**Thermal Management of High Brightness Light Emitting
Diodes By Using Diamond Composite**

研究生：胡人立

指導教授：吳耀銓 教授

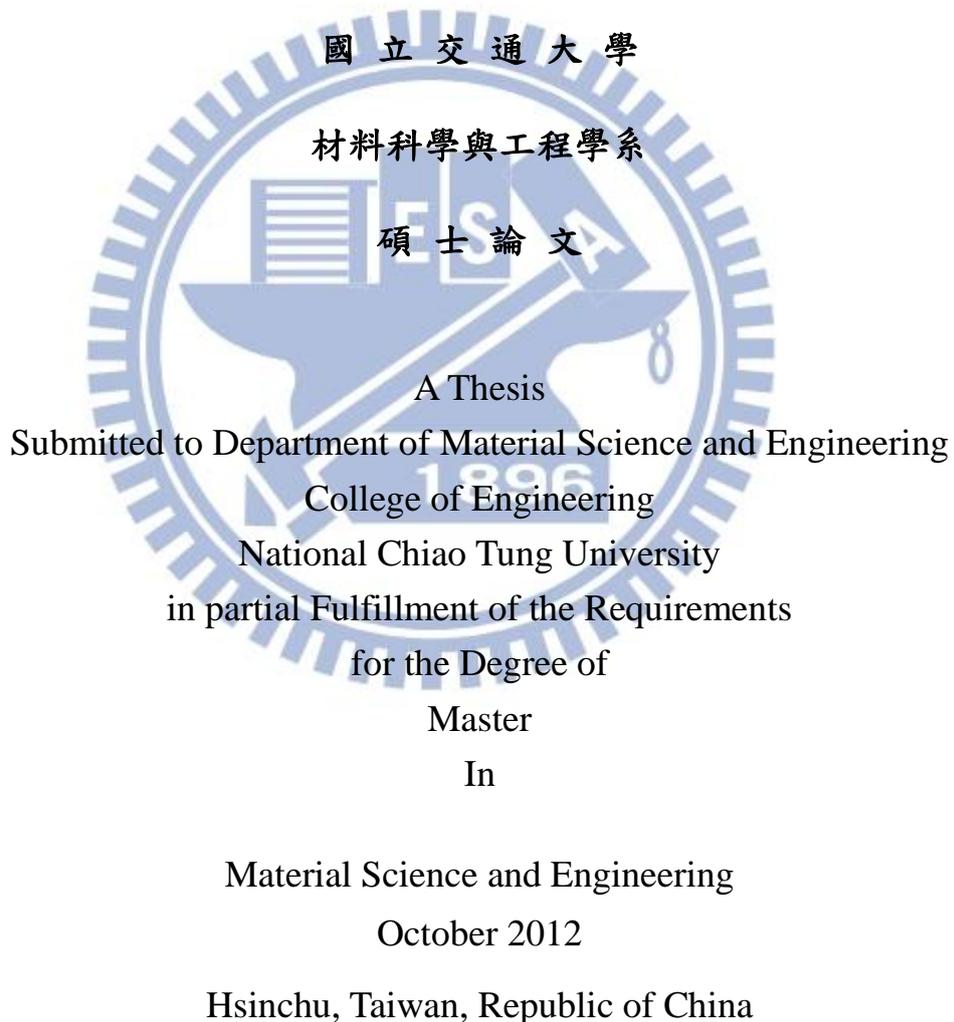
中華民國一百零一年十月

利用鑽石複合材料當作高亮度發光二極體的散熱管理

**Thermal Management of High Brightness Light Emitting Diodes By
Using Diamond Composite**

研 究 生：胡人立 Student：Jen-Li Hu

指 導 教 授：吳耀銓 Advisor：Prof. Yew-Chung Sermon Wu



中華民國一百零一年十月

利用鑽石複合材料當作高亮度發光二極體的散熱管理

研究生：胡人立

指導教授：吳耀銓 博士

國立交通大學材料科學與工程研究所碩士班

摘要

本研究的主要想法是將人造鑽石顆粒直接與晶片端接觸，提供一個導熱的通道。一共分為兩個主題：首先是在矽晶圓上製作規則的凹槽陣列，接著將人造鑽石顆粒填入凹槽，再將發光二極體結構轉移到高散熱的鑽石複合基板。主要是因為鑽石是熱的良導體，相較於原本的藍寶石基板有更好的散熱性質，可以使元件在更高的飽和電壓下驅動，以達到高功率的目標。然而鑽石的硬度極高並且無法導電，所以矽晶圓的部分就提供了後續製成的切割走道以及導電的通道。在實驗中分為圖案的選擇、填充人造鑽石、晶圓接合、雷射剝離、元件製作，分別分析討論，藉由改變製程來完成我們的想要的元件。

第二個主題是在矽晶圓上製作一個單層高密度分布的人造鑽石顆粒，利用晶元接合技術，選擇適當的接合材料做為封裝的固晶材料。在實驗中分為製作單層高密度分佈人造鑽石顆粒、焊錫與 BCB 接合、結構熱阻量測分別分析討論。在封裝領域提供一個新的想法藉由鑽石的高導熱性質，來提升固晶材料的散熱能力。

Thermal Management of High Brightness Light Emitting Diodes By Using Diamond Composite

Student : Jen-Li Hu

Advisor : Prof. YewChung Sermon Wu

Department of Material Science and Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

In this thesis, the main idea is the artificial diamond particles directly contact with the chip side, to provide a channel of heat dissipation. The thesis is divided into two themes: first, the artificial diamond particles were filled into the patterns of Si wafer, and then transferred LED to this high thermal conductivity diamond composite substrate. Because diamond is a good conductor of heat, compared with the sapphire substrate have a better heat dissipation properties. The transferred LED device could be operated in a much higher injection forward current and output power. However, diamond is extremely hard and not conductive, so the part of Si wafer is the role as cutting the aisle in follow-up processes and conductive channel. We have several issues including: pattern choice, fill artificial diamonds, wafer bonding, laser lift-off, and device fabrication. We change experimental conditions and processes for our desired device.

The second theme is the production of a single layer of high density

distribution of artificial diamond particles on Si wafer, and using wafer bonding technique, and selecting the appropriate bonding material as die-attach material. The experiment is divided into production of a single layer of high density distribution of artificial diamond particles on Si wafer, solder and BCB bonding ,and structural thermal resistance measurement were analyzed and discussed. Finally, we propose a new idea in electric packaging by using diamond which has high thermal conductivity to improve the ability of heat dissipation of die-attach material.



致謝

經過了兩年多的努力，我也到了可以寫致謝的一天，從大學一路回憶起來還真的必須感謝好多人。首先是吳耀銓教授，從專題生時代就一直給我教導，雖然就結果來講我的研究沒有做出成果來有一點遺憾，不過在跟老師腦力激盪的過程中真的學到很多，相信對於我以後去業界工作一定有很大的幫助，謝謝老師。再者，我必須感謝男排校隊的張振興教練，因為不是他選我讓我來念交大，說不定我現在在澳洲當苦勞呢！雖然上了研究所之後因為自己的規畫退出了球隊，但是還是會不時的關心教練跟球隊，看到現在球隊的發展跟教練幸福的家庭感到非常的開心，倘若以後有時間一定回去將我的所學傳承給學弟。

此外，實驗室的夥伴們也是給我幫助很多，且讓我在這裡一一的答謝。要先感謝中美矽晶以及林博文學長，不僅在實驗上提供我許多資源，而且在我加入 PSS 讀書會的時候學到很多有關於 LED 相關的知識與思考分析的模式，讓我在後來的實驗上有很大的幫助。然後我要感謝兩位專班的學長，也是我未來的上司，洪世欽與倪志鵬，你們給予我很多不管是製程上、實務經驗上非常多的幫助，當中不乏是我天馬行空想了半天的想法在 3 秒內被打槍的經驗，但是因為你們豐富的經驗讓我的實驗可以慢慢的實現。陳富鑫大哥在熱阻量測方面給我很多幫助，更可以學到一些封裝的知識，沒有你我的題目不會有結束的一天，謝謝你。還有遠在交大另一端的 NDL 李美儀學姊、賴東彥學長感謝你們很多製程上的幫忙。感謝王寶民博士，在跟你相處過程中讓我學到很多科學的想法。本實驗室兩腳書櫥謝承佑學長，從你身上我學到一些做實驗的技巧，還有多到數不清的專業知識，連網球也是我

最佳的球友，以後有機會還請你繼續給我指教。陳建誌學長與陳俞中學長，兩位奈米中心的中流砥柱，在實驗的好多製程都要感謝你們的幫忙。張岱民學長，我們算是革命的夥伴了，一開始進入一個全新的領域真的很辛苦也很茫然，從一開始的大海撈針，到中間的土法煉鋼搭配很多的腦力激盪最後才摸索出來方向，一路讓這個題目發展到現在，雖然沒有做出成果可以讓你發表論文實在是非常抱歉也感謝你對我龜毛個性的包含，也希望你在往後可以繼續實現我們的想法，祝福你。張勝傑學長，沒有在閒暇之餘一些運動還有娛樂的陪伴，我可能已經憂鬱症發作了，祝你實驗順利。

接著要來好好感謝我的兩位同學：竹南貴族邱郁珈和台積電 X 廠廠長牛振儀。雖然我們都有著各自的題目，做著不同的實驗，但是我們兩年來一路相互砥礪，在我不順的時候給我很多安慰，真的非常謝謝你們，也希望你們生活順心、青春永駐。還有其他材料 99 的大家，雖然大家各奔東西但是我永遠會記得這六年的同窗情誼，到時候有誰發達了可別忘了我阿。然後是要感謝實驗室的學弟妹們，碩二：黃冠賓、林敬富、方興凱、葉俊彥，碩一：陳孟彥、鄭建煊，碩零(大四)：石鈺慈、李偉群、陳怡璇。

最後我要謝謝我的家人，爸爸胡光廈、媽媽李麗卿、姐姐胡心焱，讓我從小可以快樂、平安的長大，培養我運動的興趣、獨立的個性，在我身心俱疲的時候無條件的支持我、鼓勵我，非常感謝你們。最後的最後要感謝我自己，雖然龜毛以及難搞的個性讓我吃了不少苦頭，但是也終究是到了一個人生的階段，在過一下米蟲生活之後，希望進入職場後可以吃苦耐勞一點，好減輕家庭的壓力。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iv
目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xi
一、緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	5
二、文獻回顧與理論背景研究.....	8
2.1 晶圓接合技術.....	8
2.2.1 晶圓接合技術的優點.....	9
2.2.2 晶圓接合技術的種類.....	9
2.2 高亮度高功率發光二極體.....	12
2.2.1 發光二極體的發光原理.....	13
2.2.2 簡介發光二極體的發展.....	14
2.2.1 雷射剝離技術(Laser Lift-Off).....	23
2.2.2 發光二極體的發光效率.....	25
三、實驗方法.....	36
3.1 製作結構化矽晶圓填充人造鑽石顆粒之高散熱復合基板.....	36
3.1.1 實驗設計整合流程.....	36
3.1.2 實驗流程.....	37

3.2	製作高密度單層人造鑽石顆粒導熱層	42
3.2.1	實驗設計整合流程	42
3.2.2	實驗流程	42
四、	結果與討論	46
4.1	製作結構化矽晶圓填充人造鑽石顆粒之高散熱復合基板. 46	
4.1.1	填充人造鑽石顆粒與圖形陣列的選擇	46
4.1.2	預先填充製程	48
4.1.3	預先接合製程	49
4.1.4	元件製作	50
4.2	製作高密度單層人造鑽石顆粒導熱固晶層	52
4.2.1	製作高密度單層人造鑽石顆粒	53
4.2.2	BCB、鍍錫接合及實際應用在 LED 固晶製程	54
4.2.3	熱阻值量測之原理	58
4.2.4	熱阻值量測之結果與討論	62
五、	結論與未來工作	70
5.1	結論	70
5.1.1	製作結構化矽晶圓填充人造鑽石顆粒之高散熱復合 基板.....	70
5.1.2	製作密度單層人造鑽石顆粒導熱固晶層	70
5.1	未來工作.....	71
六、	參考文獻	72

圖目錄

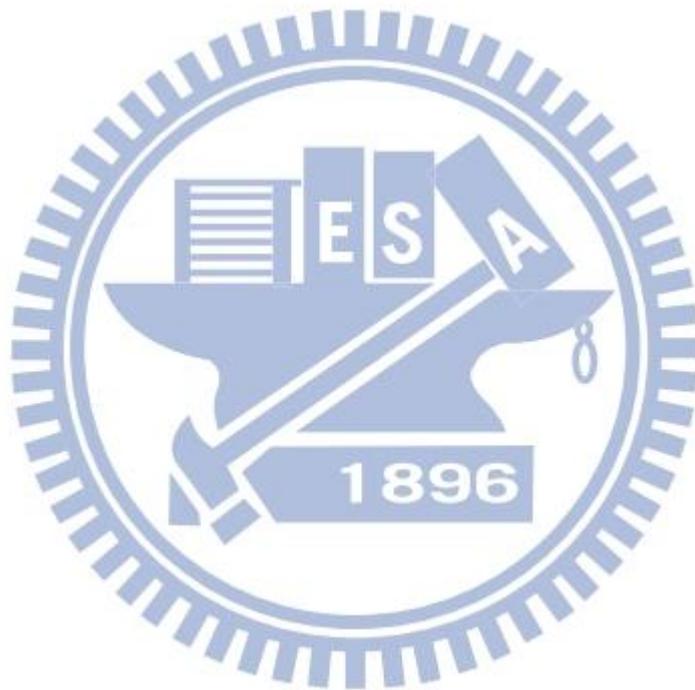
圖 1-1 傳統氮化鎵 LED 電極同側的情形.....	4
圖 1-3 LED 與銅基板的接合俯視圖。[1].....	6
圖 1-4 AllnGaP LED/ITO/Cu 在 500 °C/30 min 下接合的 Auger depth profiles 圖形[1].....	7
圖 1-5 傳統 GaAs sub.與 Cu sub.的 I-V 曲線[1].....	7
圖 2-1 常見半導體能帶與晶格常數、晶體結構圖[7].....	18
圖 2-2 發光二極體之發光原理.....	18
圖 2-3AlxGayInzN (0<x,y,z<1)合金能帶與晶格常數[7].....	19
圖 2-4a 層級零(晶粒層級)[7] b 層級一(封裝層級)[7].....	19
圖 2-4c 層級二(電路板層級)[7] d 層級三(模組層級)[7].....	20
圖 2-4e 層級四(燈具層級)[7].....	20
圖 2-5 藍光 LED 結構圖.....	21
圖 2-6a 垂直型 b 覆晶型.....	21
圖 2-7 砲彈型封裝.....	21
圖 2-8 Luxeon 型封裝.....	22
圖 2-9 用 38 ns，0.6 J/cm ² 單一脈衝雷射打在 GaN/Sapphire 界面處，氮化鎵薄膜的溫度隨時間和試片厚度之變化情形。[11].....	24
圖 2-10 幾何改變形狀 LED 示意圖[18].....	28
圖 2-11 比較 SiC 及 Sapphire 機板用 ATON 結構之光取出效率與角 τ 之關係圖[18].....	28
圖 2-12ATON-chip 的光取出路徑示意圖[18].....	29
圖 2-13 傳統的發光二極體封裝示意圖[19].....	29
圖 2-14 覆晶型發光二極體結構示意圖[19].....	29

圖 2-15 覆晶型與傳統發光二極體光取出效率比較圖[19].....	30
圖 2-16 不同表面粗造度的可能光行進路徑[20].....	30
圖 2-17 傳統與經表面粗糙化的 LED 分別在(a) Sapphire 和(b) Transparent metal layer 面檢測的發光功率差異[21].....	31
圖 2-18 DBR 型發光二極體示意圖[22]	31
圖 2-19 利用鏡面反射層防止光被吸光基板所吸收[23].....	31
圖 2-20 元件特性和溫度的關係[24]	33
圖 2-21 E.P. Cu/Ag/LED 結構的 SEM 俯視圖[27].....	34
圖 2-22 Electroplating Cu sub.與 Sapphire sub.藍光發光二極體的 L-I 圖[27].....	35
圖 3-1 四種圖案.....	37
圖 3-2 預先填充流程圖	38
圖 3-3 預先接和流程圖	40
圖 3-4 接合夾具.....	41
圖 3-5 單層鑽石之鉚錫接合流程	43
圖 3-6 單層鑽石之 BCB 接合流程.....	44
圖 3-7 單層鑽石之 LED 晶片與鉚錫接合流程.....	45
圖 4-1 四種圖型及填完鑽石的 SEM 圖.....	47
圖 4-2 預先接合製程試片 SEM 圖	49
圖 4-3 氮化鎳表面形貌與電極圖案 SEM 圖.....	51
圖 4-4 最終元件完成示意圖	51
圖 4-5 鑽石顆粒尺寸對熱傳導路徑影響示意圖	52
圖 4-6 單層高密度散佈鑽石上視 SEM 圖.....	53
圖 4-7 單層高密度散佈鑽石側視 SEM 圖.....	54

圖 4-8 DS30 之 SEM 圖.....	55
圖 4-9 DB30 之 SEM 圖.....	56
圖 4-10 S10 之 SEM 圖.....	56
圖 4-11 B3 之 SEM 圖.....	57
圖 4-12 打線後 LED 晶片上視圖.....	57
圖 4-13 熱阻量測結構示意圖.....	60
圖 4-14 熱阻量測結構圖.....	61
圖 4-15 不同溫度下脈衝電流與電壓關係圖.....	61
圖 4-16 提升功率記錄溫度變化與時間關係式意圖.....	61
圖 4-17 熱容與熱阻關係圖，積分(上圖)、微分(下圖).....	62
圖 4-18 熱容對熱阻微分圖.....	65
圖 4-19 單一導熱膠帶結構示意圖.....	66
圖 4-20 溫度與位置關係圖[31].....	66
圖 4-21 接觸熱阻示意圖[32].....	67
圖 4-22 添加鑽石固晶材料熱阻量測圖.....	67
圖 4-23 市售高階銀膠熱阻量測圖.....	68
圖 4-24 LED 晶片脫落表面 SEM 及成分分析圖.....	68

表目錄

表 2-1 各種塊材材料的熱傳導系數.....	34
表 4-1 各種試片熱阻實驗值	68
表 4-2 理論計算中各種材料的參數.....	69
表 4-3 各種試片理論計算值與實驗值.....	69



一、緒論

1.1 前言

自古以來，燈光一直是人們賴以生存的照明手段。最早的照明篝火，幫助人類戰勝了黑暗，擺脫了日出而作，日落而息的束縛，贏得了時間，使人類逐步從蠻荒步入文明。爾後隨著電的發現與鎢絲燈泡的發明，“照明科技”便在人類的生活中扮演著密不可分的角色，更隨著文明的發展、科技的進步，照明的功用不再只是點亮日常的生活，更具有提升生活品質、增進生活樂趣等等許多多元化、多功能的用途。此外，近年來環保意識抬頭，各項科技除了持續的發展更要能兼顧永續、環保的綠能概念，照明科技當然也不例外。由於一般白熾燈泡的壽命大約在 500~1000 小時左右，若以一天使用 8 小時計算，約 3 個月左右即達使用壽命，意味著使用白熾燈泡將製造出許多照明垃圾，因此，世界各國包括我國在內，已有諸多政策將在 2012 年開始陸續禁止使用白熾燈泡。其他具有省電優勢且使用壽命較白熾燈泡久的如螢光燈(日光燈管)、鹵素燈等，卻具有含有汞、光源閃爍、釋出紫外線等等缺點，並不是綠能照明的最佳的解決方案。相較之下，發光二極體元件(Light emitting diodes ,LED)的耗電量約是白熾燈的 1/8，日光燈的 1/2，

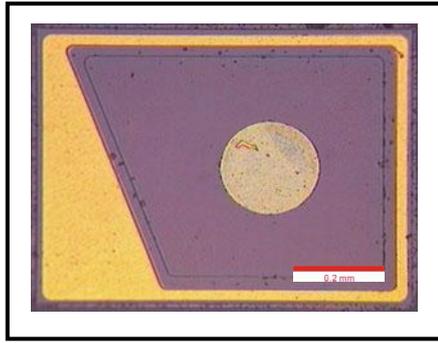
但壽命卻是日光燈的十倍，具有相當的潛力可替代目前的照明燈源，成為綠能照明的最終解決方案。

發光二極體元件，顧名思義是利用 p-n 二極體的概念，將輸入的電能轉換成光能輸出的電子元件。其實 LED 已經廣泛的被應用在交通號誌、面板背光源、裝飾燈具等用途上，但是這些用途的共通點是不需要太高的發光強度，換言之只需輸入低功率的電能即可達到所需的光強度，倘若要將 LED 取代目前的照明燈源，則需要更高發光強度的需求，意即需要輸入更高功率的電能來操作 LED 元件，將會面臨許多問題。總而言之不僅是 LED 的效能必須有所提升，另外可靠度的部分也面臨挑戰。

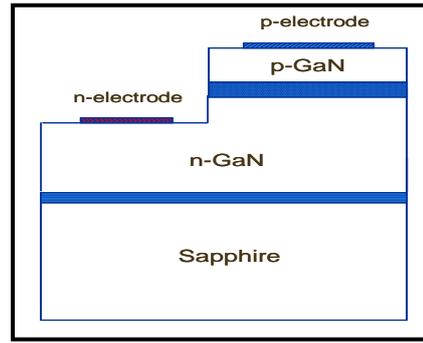
目前 LED 照明是結合高亮度藍光 LED 與螢光粉的技術來產生白光。在藍光 LED 的發展上，一般是在藍寶石基板(Sapphire Substrate)上利用有機金屬氣相磊晶系統(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)製作 LED 的結構。因此在元件的效能有所限制。因為藍寶石基板為電的絕緣體，使得 LED 元件的電極必須在同一側必須犧牲部分的發光面積(圖 1-1)；此外藍寶石導熱的性質也是不好，使得在高電流注入的情況下因為散熱性質不佳而使得原件特性下降。為了改善上述兩點問題，可以利用晶圓接合以及雷射剝離基板技術的搭配，將 LED 結構轉移到其他基板上(圖 1-2)。先在藍寶石基板上製作高品質的 LED，

然後藉由晶元接合將 LED 結構與導電性及導熱性較好而便於加工的基板接合。接著用雷射剝離技術將 LED 與藍寶石基板分離。如此一來，不必因為藍寶石是絕緣體將電極做在同側而犧牲發光面積；且在發展高功率、高電流的元件不會因為藍寶石散熱不佳而阻礙元件的表現。

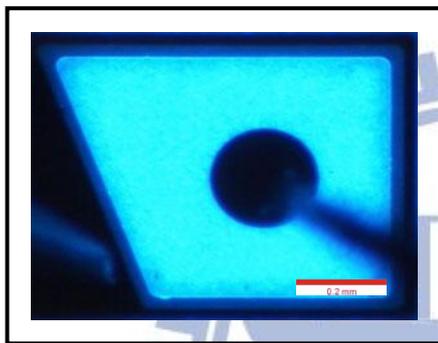
隨著高亮度 LED 的發展，輸入功率逐漸提升，焦耳熱效應 (Joule-heating effect) 亦是不可忽略的重要因素。由於光電轉換效率始終沒有很明顯的提升，一般來說只有 30~40% 的電子轉換成光射出，60~70% 的電子因為非輻射複合或是與材料原子的非彈性碰撞而形成熱能使 LED 溫度上升，隨著溫度的上升，又會有發光效率下降、發光強度達飽和、波長偏移、可靠度下降等問題產生，一個沒有額外導熱結構的 LED 裸晶片 (Bare Chip) 在 350mA 驅動下，溫度甚至可達 130°C！於是若要將 LED 應用到一般照明上，如何將多餘的熱有效的從發光主動層往外消散，以降低元件的溫度使其在高電流注入下還可以保持良好的效能在今 LED 的研究中已經成為一個重要的方向。



(a) 傳統 LED 電極在同側



(b) 傳統 LED 側視圖



(c) 用電流 0.5mA 點亮 LED，可發現因電極同側犧牲部份發光層。

圖 1-1 傳統氮化鎵 LED 電極同側的情形

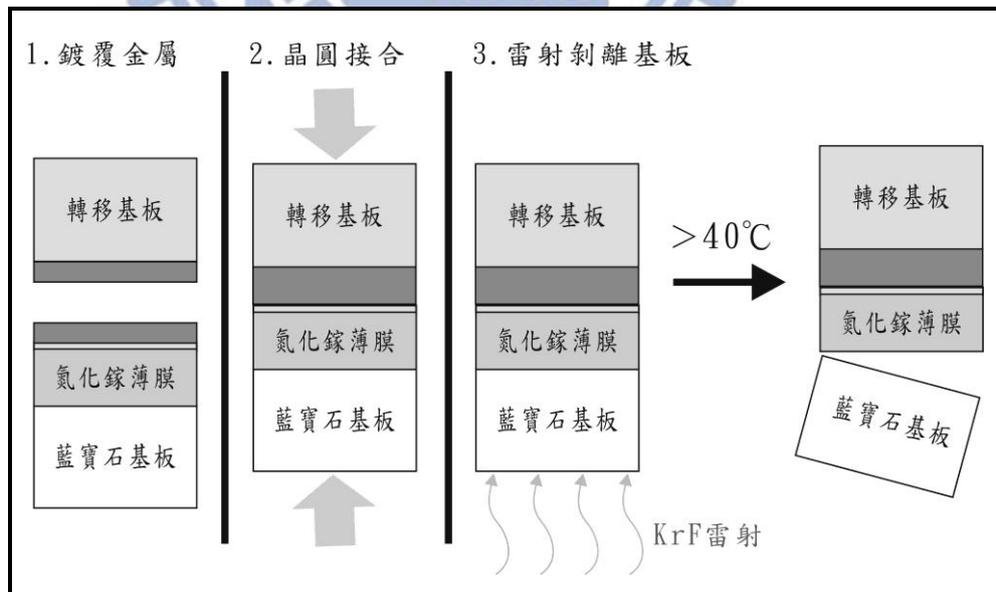


圖1-2藉由晶圓接合和雷射剝離基板將GaN轉移到其它基板

1.2 研究動機

本實驗室對於發光二極體一直以來都有多方面的研究，且在 2003 年成功的利用晶圓接合技術製作銅基板上的高功率紅光發光二極體(圖 1-3)，並且發表在 APL 期刊[1]引起各界的注意。研究中利用氧化銦錫(ITO)當作擴散阻障層(圖 1-4)將四元的磷化鋁銦鎵 LED 接合在銅基材上。被轉移到銅基板上的 LED 可以在更高的順向電流注入下操作，而且發光的強度比一般砷化鎵基板的 LED 高出三倍之多(圖 1-5)。這顯著的改善是因為銅基板具有較好熱傳導系數(401W/mK)。不過由於同屬於延展性極佳的材料，因此在製作元件的過程中，容易造成元件的損傷，尤其是在切割晶粒的步驟。雖然之前實驗室利用在矽晶圓上製作圖形陣列並蝕刻出凹槽，結合電鍍銅的方式將凹槽填平再以晶圓接合技術取代藍寶石基板。雖然成功的提升了散熱的能力，但是因為矽與銅熱膨脹系數差異很大，在接合退火的過程發生很多問題，造成在製程上的困難。

本實驗則是選擇在矽晶圓上製作圖形陣列利用乾蝕刻製作出更大更深的凹槽，然後填入人造鑽石，因為鑽石在低溫的範圍中熱膨脹係數是與矽差不多的(約 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)，可以減小熱應力的影響，並且利用人造鑽石的高熱導系數(1000~2000W/mK)來消散 LED 的熱配合矽成熟的

半導體製程來製作高散熱的複合基板取代藍寶石。另一方面也利用人造鑽石製作高散熱的固晶層取代一般的銀膠，使 LED 元件產生的熱可以更容易的往外消散。

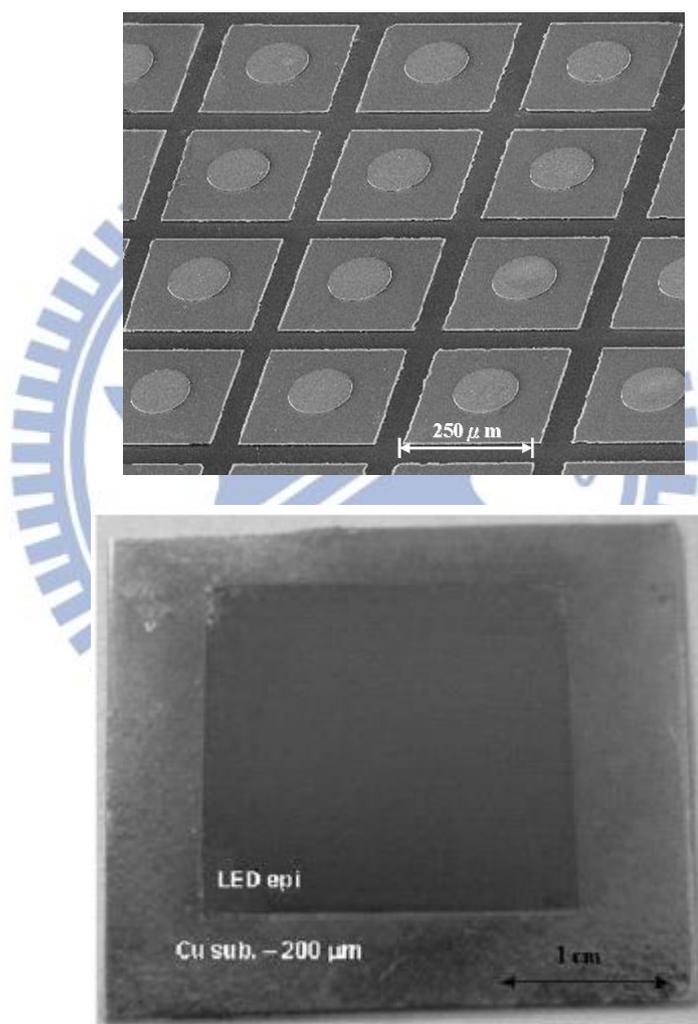


圖 1-3 LED 與銅基板的接合俯視圖。[1]

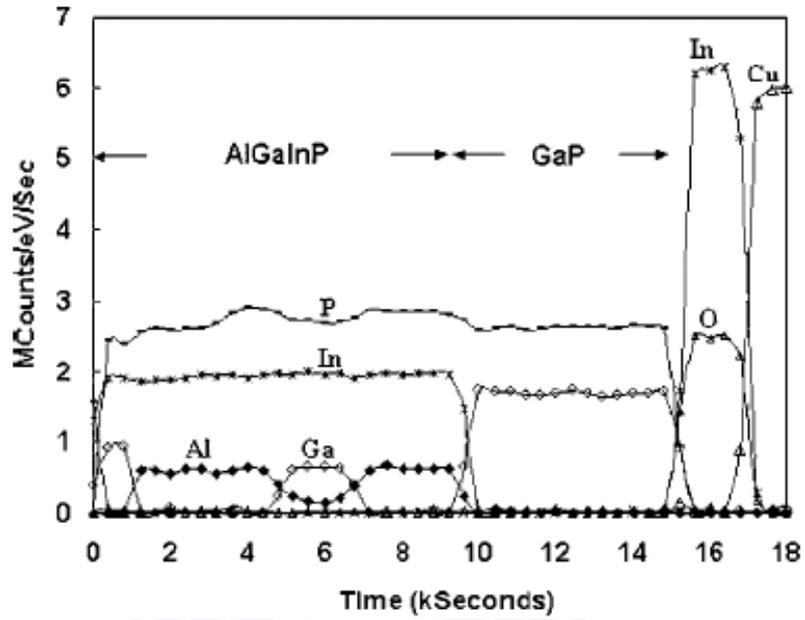


圖 1-4 AlInGaP LED/ITO/Cu 在 500°C/30 min 下接合的 Auger depth profiles 圖形[1]

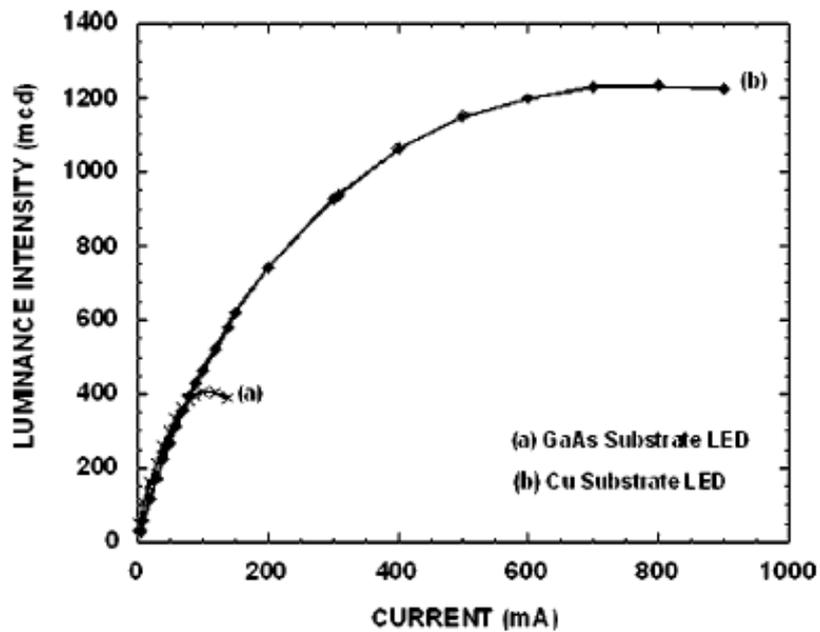


圖 1-5 傳統 GaAs sub.與 Cu sub.的 I-V 曲線[1]

二、文獻回顧與理論背景研究

2.1 晶圓接合技術

晶圓接合技術是將兩片晶圓互相接合，再進一步使表面原子反應，產生鍵結，讓兩片平面彼此間的鍵結能達到一定強度，而使這兩片晶圓純由原子鍵結成為一體。這種特性能使接合介面表保持絕對純淨，避免無預期之化學黏接物雜質污染，以符合現代微電子材料、光電材料及奈米材料等級微機電嚴格製做要求。這種技術可以接合不同晶格、不同種類之單晶或多晶材料。這項複合之材料具有不同的物理性質（如熱傳導度、機械強度）、化學性質（如活化能）、電子性質（如原子能帶）等，以製造具備特殊物理或化學特性之先進高性能光電材料，例如垂直腔式面射型雷射二極體（VCSEL）光電材料，或耐高溫電子材料，如絕緣層矽晶圓（SOI），或將矽和 III-V 半導體的整合在一起，發展光電積體電路（optoelectronic integration circuits）和 MMICs（monolithic microwave integrated circuits）。

2.2.1 晶圓接合技術的優點

晶圓接合的優點大致而言有下列幾項：

1. 使晶格不匹配(lattice mismatch)所產生的差排(dislocation)和缺陷(defect)僅限於接合界面區域，而不會延伸至元件活性層而影響元件特性。
2. 接合面牢固，接合的材料像單一的晶體材料一樣完全適合於切割、研磨以及拋光等機械加工技術。
3. 直接接合晶片，可以實現低電阻歐姆性質的導電特性及高透明度的光學性質，滿足了光電元件的要求。
4. 增加了元件設計的自由度。
5. 簡化了現有的技術，降低了光電元件集成的難度。
6. 設備簡單、價格便宜。

2.2.2 晶圓接合技術的種類[2][3]

一般晶圓接合的製程中有許多種類，以中間介質層（Intermediate layer）的有無來區分，晶圓接合可被分為兩大類：直接晶圓接合（Direct wafer bonding）與間接晶圓接合（Indirect wafer bonding）。

1. 直接晶圓接合

所謂直接晶圓接合即是在晶圓接合時不靠任何的中間介質層，例如：膠或者金屬層，直接由晶圓相互接觸後，經由高溫及同軸壓力使兩片晶圓產生接合，其主要有以下幾類接合法：

(1) 融合接合 (Fusing bonding)：

一般的泛指的晶圓接合就是所謂的融合接合，將欲接合的試片經清洗、旋乾後在微潔淨室內直接面對面接觸。利用二晶圓間的凡得瓦力或氫鍵的力量使其自然接觸在一起，再放置氣氛爐中作高溫退火處理。一般來說 Si/Si 接合的溫度約為 1000°C ，GaAs/GaAs 接合溫度大多為 $700\sim 900^{\circ}\text{C}$ ，使二試片間產生共價鍵結而成為一體，使界面強度能達到如塊材般的水準。

(1) 陽極接合法 (Anodic bonding) [4]：

當兩晶圓之接合兩端為導體 (或半導體) 及內含離子之絕緣體 (如鉀鈉玻璃) 時，可使用陽極鍵合法做晶圓接合。正極 (陽極) 接於導體或半導體晶圓材料，負極 (陰極) 接於含離子之絕緣體。加以電壓充電時，因界面不允許電流穿過，故在兩端接觸面附近形成電荷聚集現象，因此在兩結合面空間產生靜電場，吸引兩擬鍵合之晶圓片，並且可透過加熱的輔助將接合強度增強。

(2) 低溫接合：

一般的接合過程中的高溫製程，雖可增加接合強度，但高溫往往對材料性質產生很大影響，尤其近年來異質材料接合時熱應力常導致接合試片破裂或是無法接合大尺寸的試片。此外現今三度空間微電子元件及微機電元件製作對溫度非常敏感，低溫接合是不可避免的趨勢，低溫接合的方法主要有：(i) 長時間的低溫退火 (ii) 超高真空中進行接合退火 (iii) 表面活化晶圓接合 (Surface activated bonding ; SAB) [5]。

2. 間接晶圓接合

間接接合顧名思義是利用中間介質層來進行晶圓接合，而非靠兩晶片本身來接合。目的是為了要降低接合的溫度或者是比較特別的用途例如合金化之用，接合方式有下列幾種：

(1) 金屬共晶接合法 (Eutectic bonding)：

這方法是事先將兩具有共晶相的金屬分別鍍在兩不同的晶片上，經過清洗再將兩晶片接觸，接著於共晶溫度下執行退火，此時這兩層金屬就會產生共晶相，利用此方式材料就能在較相對低溫下進行接合。

(2) 塗佈化學介質層的方式來接合：

這些化學物質均有一種特性，亦即在室溫下為黏稠狀的液體，但再行升溫退火後會變為硬化的材料。製程大概如下：首先將化學物質塗佈在晶圓表面，接著退火之後這些化學物質會變的較為穩定並且具有強度，可以將兩晶片黏貼固定。目前使用較多的大多是旋塗式玻璃（Spin on glass：SOG）和 BCB（Bzocyclobutene）膠，這些膠大多使用於異質材料之低溫接合。

2.2 高亮度高功率發光二極體

半導體發光二極體之研究到現在已有近四十年的歷史，紅光、綠光及黃光發光二極體均逐漸研發成功。可以得到非常高的亮度，變成商業產品。但是藍光二極體的進展卻一直非常緩慢，直到 1993 年，日本日亞（Nichia）公司利用有機金屬氣相磊晶系統(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)製作氮化鋁銦鎵一族之材料到亮度極高的藍光二極體[6]，使得紅、藍、綠三基本色之光源齊全，而全彩的夢想得以實現，且可見光發光二極體中的高亮度高功率發光二極體的研發也大幅提升了發光二極體的應用層面。此外，發光二極體與其它照明系統比較起來可以節省 80-90%以上的能源，以氮化鎵為材料所研發的白光發光二極體可以取代現在的照明系統，使得能源的利用

更有效率。

2.2.1 發光二極體的發光原理

發光二極體將電能轉換成光能為可見光或是部分紅外光的光能而輻射出來，輻射能量的轉換分為兩個階段。首先，由於施加電能使得半導體中的電子受激發處在高能量的狀態，然後電子釋放能量降回低能量狀態時，會以光子的形式自發輻射釋放出能量，而這些光子能量相當於半導體能帶 E_g 的大小。對於均勻參雜 N 型與 P 型半導體的物質，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 carries)擴散至接面與多數載子複合，這整個自發放射(spontaneous emission)的過程。在接面兩側多數的少數載子會與多數的載子複合輻射而產生頻率為 ν 的光子，其關係式為 $h\nu = E_g$ 。

少部份的少數載子以非輻射的方式複合，而這些載子的能量則是以熱的形式消失在晶格中。輻射複合的比例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複合，不過大多數的複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，被注入的少數載子在該區域與多

數載子進行複合來放出能量。

2.2.2 簡介發光二極體的發展

一般而言一個發光二極體可以分為兩個部分：分別是晶粒(die)以及封裝(packaging)。晶粒的部分就又包含了基板跟發光二極體的結構；封裝就是除了晶粒之外其他的結構。打個比方晶粒就相當於是人的心臟，而封裝就是身體軀幹跟四肢。以下分別對兩個部分來進一步介紹：

晶粒

晶粒本身是一種半導體材料，利用參雜不同的物質可以使其成為 P 型或 N 型的半導體，當 PN 相互接觸時電子與電洞復合產生光子。目前常用的材料(圖 2-1)可以涵蓋能帶的範圍是 0.6(Ge)~6.28 eV(AIN)。此外，可以將這些材料分為：立方鑽石結構(cubic diamond structure ; Si, Ge, C)、立方閃鋅礦(cubic zincblende structure; III-Phosphides and III-Arsenides)、六角纖鋅礦結構(hexagonal wurtzite structure; III-nitrides)。在對於製作可見光區的二極體研究一向是不遺餘力，自從 60 年代開始先是鍮(Ge)和矽(Si)這兩種 IV 族材料作為研究重心。但由於兩者的能隙過小(Ge : 0.67eV ; Si : 1.12eV)，使得發出的光位於紅外光區，並不適合作為可見光 LED 的材料。。此外，發光二極體的發光機制是由於電子和電洞在反應區的結合，如圖 2-2。在瞬間放出相當於

能隙能量的光子，而相對於鍺和矽而言，都是非直接能隙材料，當非直接能隙材料的電子和電洞結合時，所釋放的光子需要滿足能量守恆[7]。不過非直接能隙材料無法提供所需的動量轉移，因此，在單純的材料中，必需要有聲子(phonon)參與能量轉移，才能發生光電轉移。相較於 IV 族，III-V 族複合材料如：InSb、InAs、GaSb、InP、GaAs。雖然上述材料具有直接能隙，但是對於可見光而言，能隙仍是過低。GaP 有效大的能隙(2.26eV)，可發出綠光但卻是間接能隙，發光效率不高，就純以二元的 III-V 族複合材料而言，並沒有高效率的可見光二極體。為了增加 II-V 族二元化合物的能隙且不改變其直接能隙的特性，使用合金(alloy)便成為獲得特性良好的方法之一。利用調變 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_z\text{N}$ ($0 < x, y, z < 1$) 合金的成分可以使其能帶改變從 0.7 到 6.28eV(圖 2-3)。為了進一步提升光電轉換的效率，在 1960 年代發展出多層量子井結構，其原理是利用不同材料的能帶將載子限制在特定區域來增加附合的機率。

封裝

封裝可以依層級分為五個部份:層級零(晶粒層級)(圖 2-4a)、層級一(封裝層級)(圖 2-4b)、層級二(電路板層級)(圖 2-4c)、層級三(模組層級)(圖 2-4d)、層級四(燈具層級)(圖 2-4e)。

晶粒層級：包含發光主動層與磊晶的基板，以藍光 LED 為例(圖 2-5)，由下往上依序是藍寶石基板(Sapphire substrate)、N 型氮化鎵、多層量子井結構、電子阻障層最後是 P 型氮化鎵。然而傳統的結構因為藍寶石基板散熱不佳，熱導系數約為 22 W/mK，不利於將主動層產生的熱往下傳導排出，為了改善這個問題在封裝發展出兩種結構，分別是垂直型(vertical) (圖 2-6a)與覆晶型(flip chip)(圖 2-6b)。若是以取代日光燈為目標，因為垂直型可以較容易的把尺寸做大搭配把 LED 轉移到高導電與高散熱的基板上，是更有發展性的一種方法。

封裝層級：早期的 LED 沒有高功率的需求，封裝都是選擇簡單的方式，更沒有對散熱需求做額外的設計；最早期的砲彈型封裝(圖 2-6)是把 LED 晶片貼合在銀支架上，頂部再以矽膠製成透鏡形狀，主動層產生的熱僅僅只能透過銀支架往下散熱，散熱的面積很小，因此整體熱阻值相當大。隨著高功率 LED 需求的增加，封裝熱阻值的問題慢慢浮現，開始有許多不同的高導熱封裝設計出現，其中 LumiLEDs 公司的 Luxeon 型封裝是相當成功的高導熱封裝方式(圖 2-7)；此一封裝封是將 LED 晶片貼合在一金屬散熱塊(Heat Slug)上，再將此結構跟電路板及散熱鰭片結合，由於散熱塊的面積比晶片大很多，相對的散熱面積就比砲彈型封裝大很多，因此可以有效的降低封裝熱阻值。另外封裝的固晶方式也是影響封裝熱阻值的一大因素，傳統的固晶皆為使用銀膠(Ag

Epoxy)將晶片貼合在封裝支架上，但銀膠的導熱係數只有約 5W/mK 左右，無法滿足高功率 LED 散熱的需求，因此目前的解決方法是改用焊錫接合或是金屬共晶接合(Au-Au、Au-Sn、Au-In etc.)的固晶方式，可有效的提高封裝整體的導熱係數，將取代銀膠形成高功率 LED 的主流固晶方式。

電路板與模組層級：封裝完成成的 LED 接著將貼合在電路板上，使得外部電源可經由電路板上的線路驅動 LED 元件，而傳統的銅箔印刷電路板是採用塑膠做為基板材料，不佳的散熱性難以被利用於高功率 LED 的產品上。新一代的高導熱電路板像是 MCPCB(Metal Core PCB)、薄膜陶瓷基板、覆銅陶瓷基板等，乃是利用其他散熱性質較好的材料取代塑膠基板，以提升電路板的散熱性能。

燈具層級：高功率的 LED 產品外往往會另外加上散熱鰭片的設計。除散熱鰭片的幾何形狀設計外，利用覆合金屬材料、陶瓷材料等來製作散熱鰭片，以提升導熱係數，還有改變貼合層材料的選擇，都是可以再進一步提升散熱模組性能的方法之一。

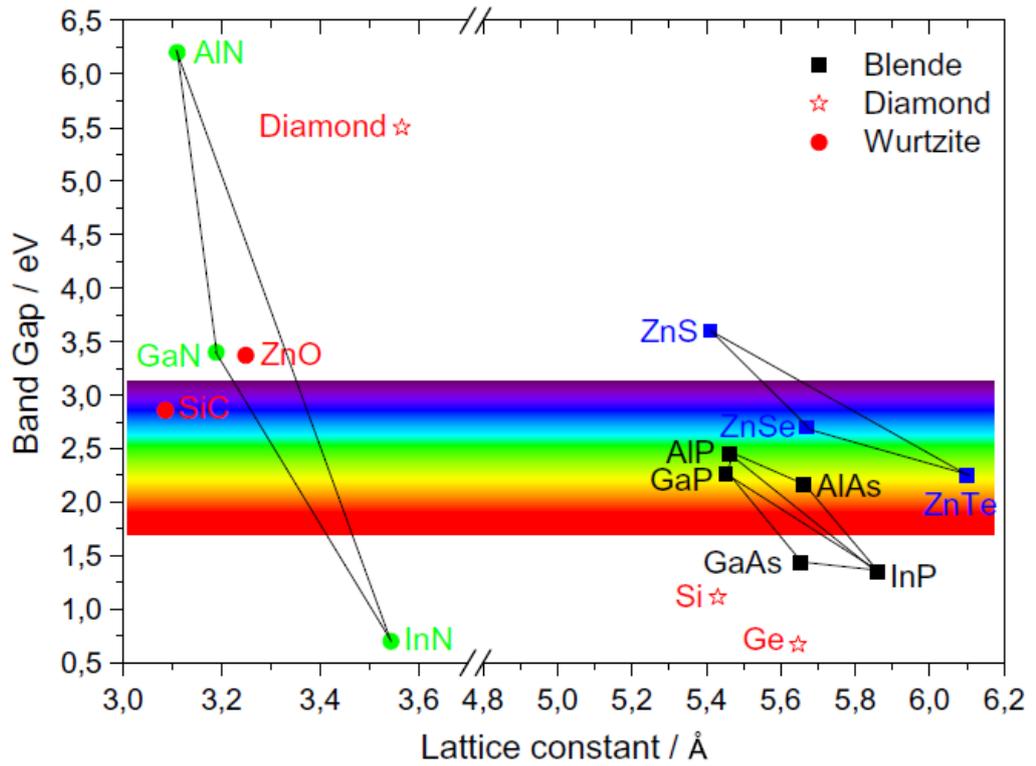


圖 2-1 常見半導體能帶與晶格常數、晶體結構圖 [7]

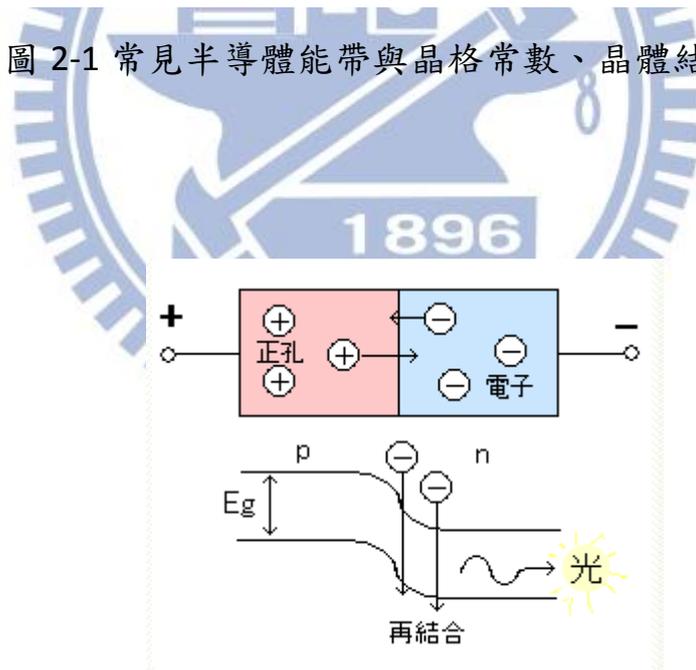


圖 2-2 發光二極體之發光原理

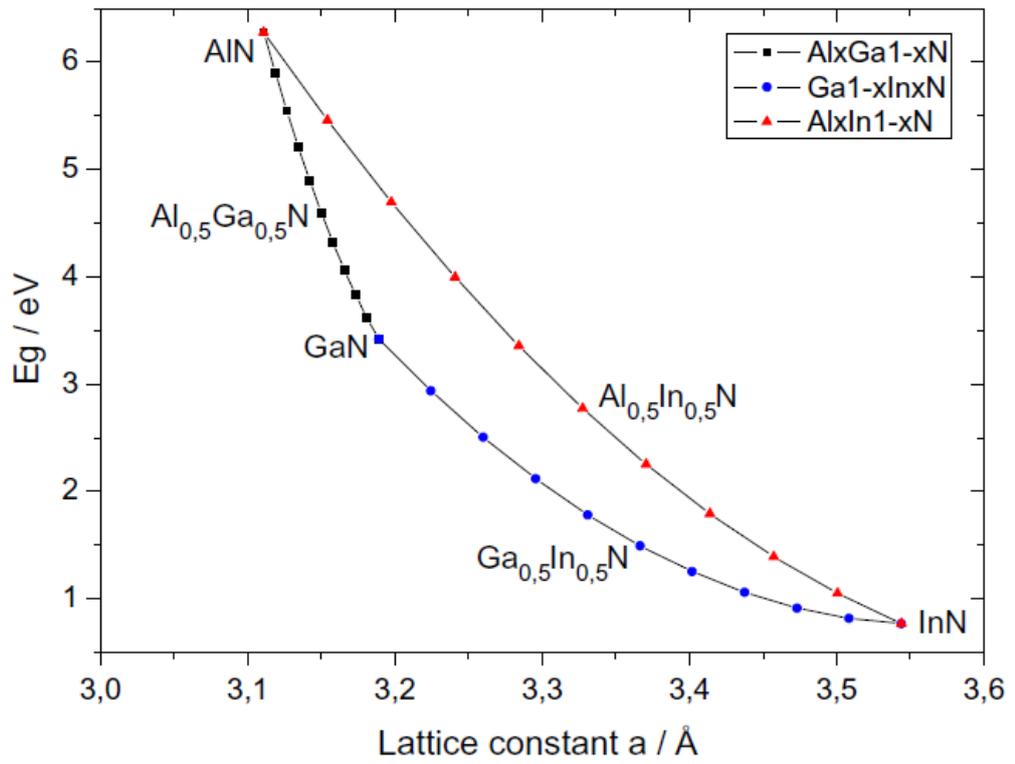


圖 2-3 $Al_xGa_yIn_zN$ ($0 < x, y, z < 1$) 合金能帶與晶格常數[7]

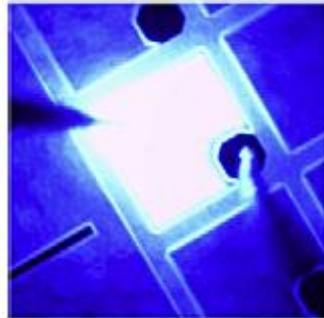


圖 2-4a 層級零(晶粒層級)[7]



圖 2-4b 層級一(封裝層級)[7]

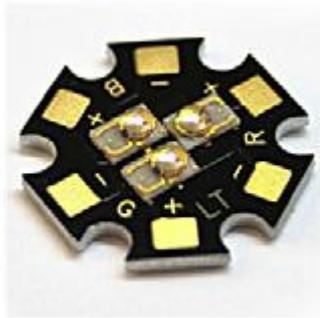


圖 2-4c 層級二(電路板層級)[7]



圖 2-4d 層級三(模組層級)[7]



圖 2-4e 層級四(燈具層級)[7]

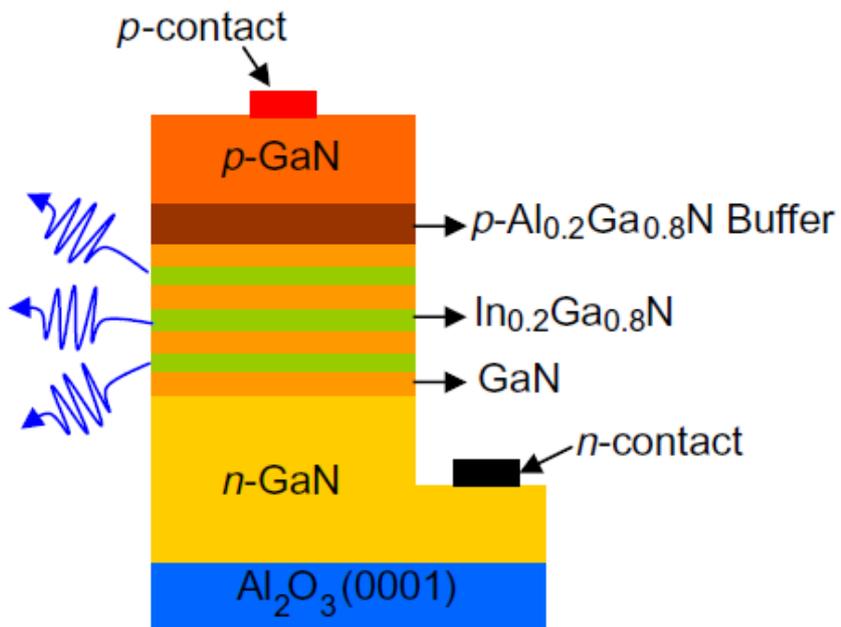


圖 2-5 藍光 LED 結構圖

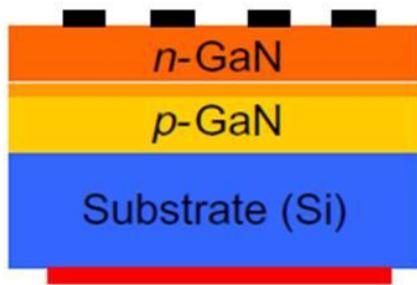


圖 2-6a 垂直型

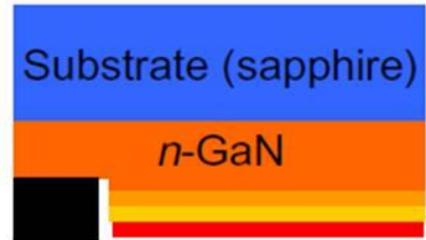


圖 2-6b 覆晶型



Gold Wire Bond

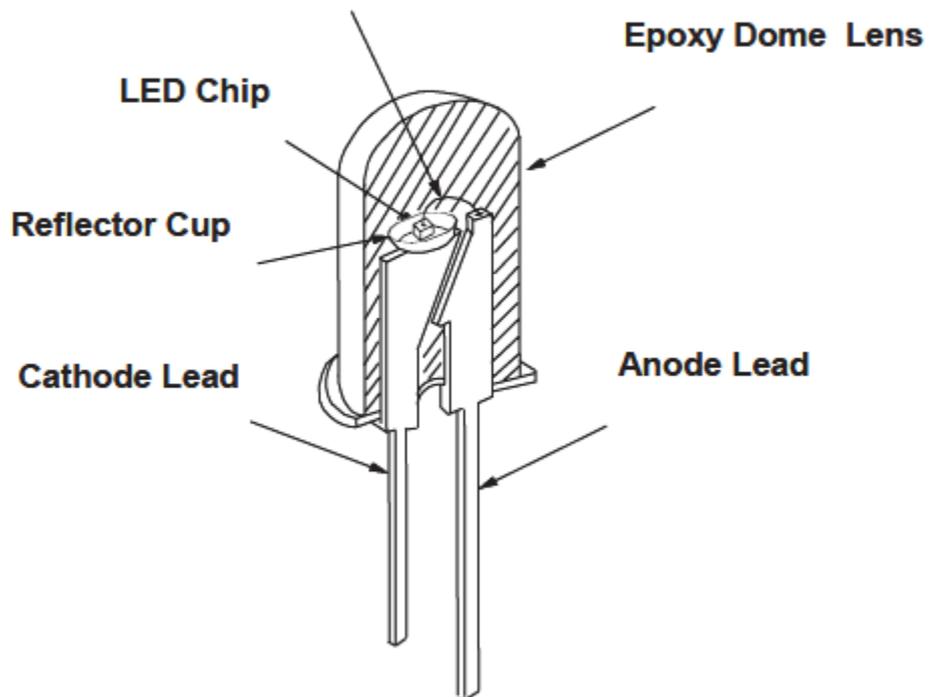


圖 2-7 砲彈型封裝

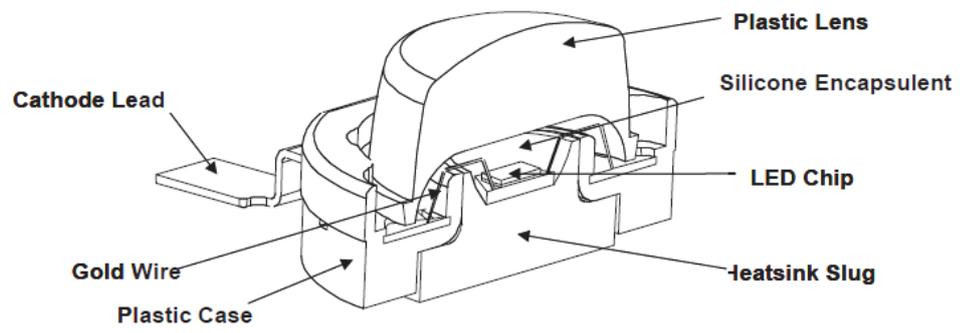
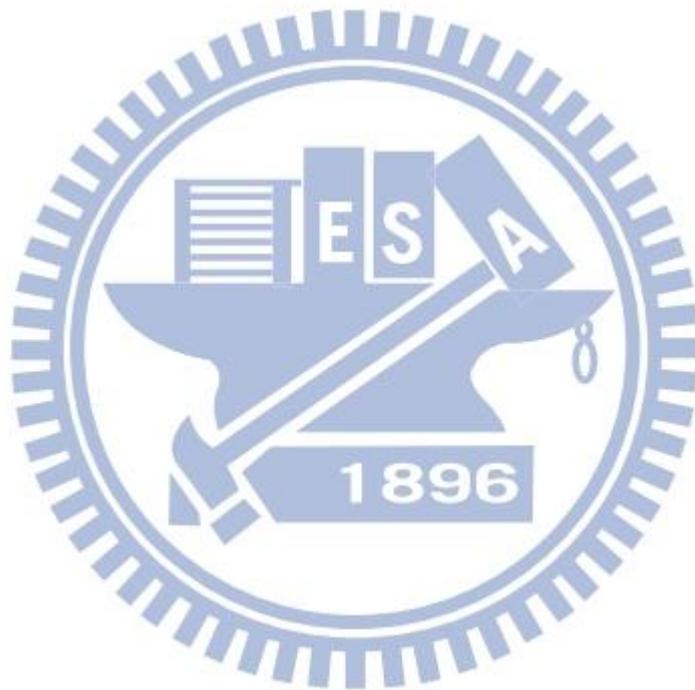


圖 2-8 Luxeon 型封裝



2.2.1 雷射剝離技術(laser Lift-Off)

在剝離藍寶石基板的研究中，可以用幾種不同的方法來完成，例如用化學-機械方式去除藍寶石[9]，或利用濕式蝕刻將犧牲層蝕刻掉[10]，或者使用脈衝雷射步驟來完成[11~13]。然而由於藍寶石基板太硬，且又沒有適當有效的濕式蝕刻方法可以蝕刻氮化鎵和與其相容的材料。因此目前在分離氮化鎵薄膜的技術上，雷射剝離技術是比較可行的方法。

雷射剝離基板是利用光與物質交互作用的原理，利用所謂選擇性能隙製程 (bandgap-selective processing)。即選擇適當波長的雷射光，其光子能量太小不足以激發藍寶石到激發態，讓藍寶石無法吸收此一能量的光子，可是卻可以被氮化鎵吸收而激發的光子。換言之，雷射光穿過藍寶石直到界面的氮化鎵才被吸收，氮化鎵將雷射光以熱的形式將能量釋出，如此一來氮化鎵因吸收雷射光而溫度升高。利用此法，我們讓在藍寶石與氮化鎵的界面處產生了局部高溫 (圖 2-9)。隨著雷射能量密的提高，界面處的溫度亦提高了，等到溫度超過氮化鎵的分解溫度時 (接近 1000°C)，氮化鎵會分解成鎵金屬和氮氣。這時候只要將試片加熱至鎵的熔點 (42°C) 以上，即可把鎵熔化而可以輕易的將氮化鎵與藍寶石基板分離，而達到去除藍寶石生長基板的目的。

目前雷射剝離製程技術已經被許多學術團體研究和應用。M. K. Kelly 等人[14]首先發表可以用脈衝雷射穿過透明的藍寶石基板到達與其界面處氮化鎵薄膜，使其因高溫而分解而分離其生長基板。M. K. Kelly 等人是使用 Q-switched Nd-YAG 三倍頻的雷射，這樣的光子能量是 3.49 eV 剛好超過氮化鎵的吸收邊界 (absorption edge)，而可以被氮化鎵所吸收。W. S. Wong 等人[11][12]也發表了紫外線雷射的製程分離氮化鎵薄膜，他們是用 KrF 準分子雷射，光子能量是 5 eV。

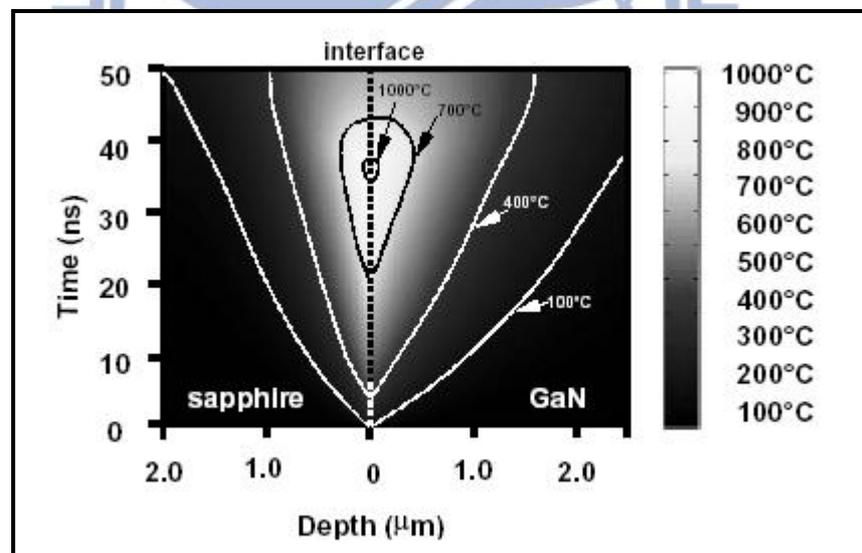


圖 2-9 用 38 ns， 0.6 J/cm^2 單一脈衝雷射打在 GaN/Sapphire 界面處，氮化鎵薄膜的溫度隨時間和試片厚度之變化情形。〔11〕

2.2.2 發光二極體的發光效率

讓發光二極體能朝高亮度高功率特性的方向發展，使其有更大的發揮空間和前景。因此，有許多的研究團隊致力於提高發光二極體的發光亮度及其功率。在不考慮磊晶品質的條件下，依現在的研究發現主要的概念有二方面：提高光取出效率（Light-extraction efficiency）及減少焦耳熱效應（Joule-heat effect），以下分別對這兩個主題作說明。

高光取出效率（Light-extraction efficiency）

半導體發光二極體的輻射發光效率（Radiant efficiency， η_R ）又被稱為功率轉換效率（Wall-Plug efficiency， η_{wp} ）是光輸出功率與輸入功率之比，其數值如式所示：

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

η_{ext} ：外部量子效率 η_v ：電壓效率

而外部量子效率（External quantum efficiency）數值的大小則可由下面的公式做表示[15]：

$$\eta_{ext} = \eta_{inj} \times \eta_{rad} \times \eta_{opt}$$

η_{inj} ：電流注入效率（Injection efficiency）

η_{rad} ：內部量子效率（Internal quantum efficiency or Radiative efficiency）

η_{opt} ：光取出效率 (Optical efficiency or Light-extraction efficiency)

η_{inj} 數值的提升主要是使電流能有良好的分佈及減少各材料間的接觸電阻。關於電流分散層 (Current Spreading layer) 則有 X. A. Cao 等人[16]及等人 J. Song[17]的研究，在此不做描述。 η_{rad} 數值的大小主要是由磊晶的品質來決定的，以現今的發展情況已可使內部量子效率達到 70%左右，而光取出效率 (η_{opt}) 則是目前發展高亮度高功率發光二極的瓶頸也是大家所關注的焦點。主要的概念是藉由結構及材料的改變以減少發光層產生的光在二極體內部的損耗。

近幾年以來已經有很多研究團體發表了製作高亮度高功率發光二極體的方法，依其製程方式大約可以區分為：

(1) 幾何變形 (Geometrically deformed)：

當光從高折射率的半導體材料 ($n_{GaN}=2.5$) 傳至空氣中 ($n_{air}=1$) 時，只有在臨界角 (Critical Angle) 內之光可以完全被射出，其它的光則在內部反射或被吸收。Schad 等人[18]用理論計算有斜邊結構的 Sapphire ($n_{sap}=1.785$) 與 SiC ($n_{sic}=2.7$) 基板中傾斜角 τ 對光取出功率之影響，如圖 2-10，發現當 $\tau = 64^\circ$ 時，光取出效率增加最多，如圖 2-11。如圖 2-12 所示，如為傳統的方形結構則其光取出路徑只有編號為(1)的區域，當傾斜 64° 時則光取出路徑包含了(1)及(2)的區域，

大幅提高了光的取出機率使其亮度提升。Osram 公司利用此法，將原本的平面方形 SiC 基板 GaN 發光二極體做成斜邊後 (ATON) 使光放出效率由 25% 增加至 52%。

(2) 覆晶技術 (Flip-chip technology) :

主要是因為發光二極體的封裝方式的限制，如圖 2-13，使得元件的發光效率主要是由上部取出的光來決定。而因為電流分散

層 (Current Spreading Layer) 及導線大多為吸光材料而使得元件所發出的光有一部份被其所吸收，而造成發光強度的下降。使用覆晶技術主要是讓光從透明的藍寶石基板取出而提升元件發光亮度，如圖 2-14。J. J. Wierer 等人[19]利用此法使外部量子效率相較於傳統藍光發光二極有 1.6 倍的提升，如圖 2-15。

(3) 表面織狀結構 (Surface texturing) :

主要是藉由表面粗糙的結構來減少全反射的發生，利用增加光的射出路徑進而提高元件的發光亮度，如圖 2-16[20]。在 1993 年時 I. Schnitzer 等人率先利用此種表面組織結構使外部量子效率由 9% 增高至 30%。而 C. Huh 及 T. Fujii[21] 等人也利用此方式有效的提高元件的發光效率，如圖 2-16。

(4) 反射鏡面 (Reflective mirror)。

因為紅光發光二極體所使用的砷化鎵 (GaAs) 基板為不透明的吸

光材料，藉由布拉格反射層（Distributed Bragg Reflector：DBR）[22]，如圖 2-17 及高反射率的金屬[23]（如：Ag、Pt、Al）使二極體發出的光不被吸收，如圖 2-18。而對於藍光發光二極體則無吸光基板的問題，因此、大多會配合晶圓接合技術將磊晶層轉移置至高導熱的導電基板上，將會再下一個主題作詳細的解說。

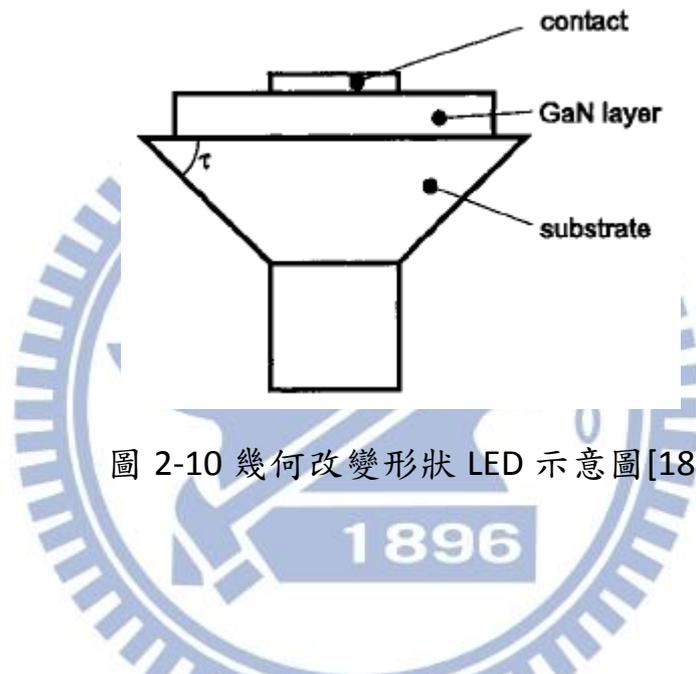


圖 2-10 幾何改變形狀 LED 示意圖[18]

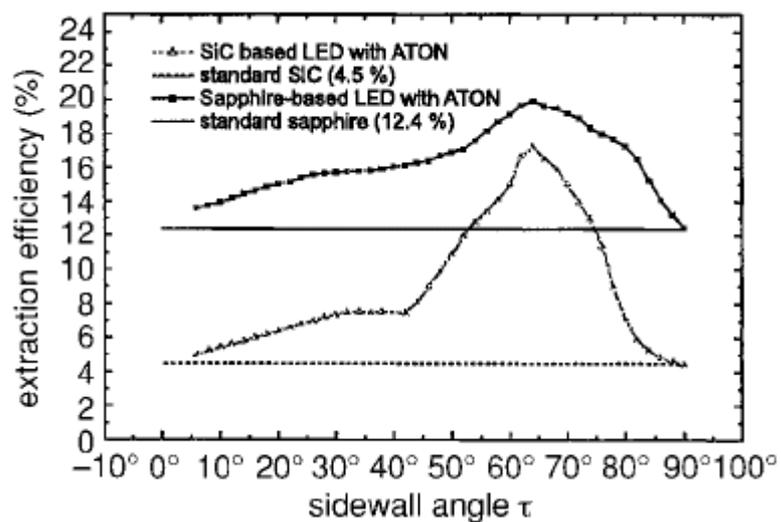


圖 2-11 比較 SiC 及 Sapphire 基板用 ATON 結構之光取出效率與角 τ

之關係圖[18]

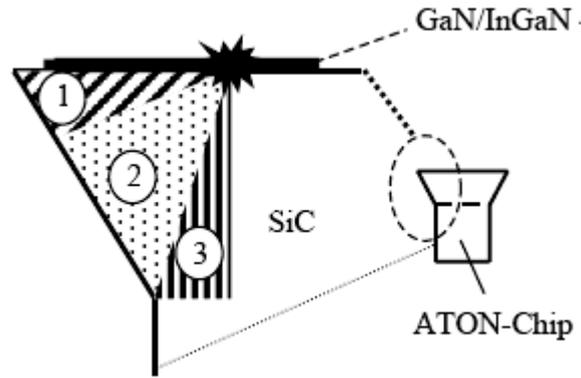


圖 2-12 ATON-chip 的光取出路徑示意圖[18]

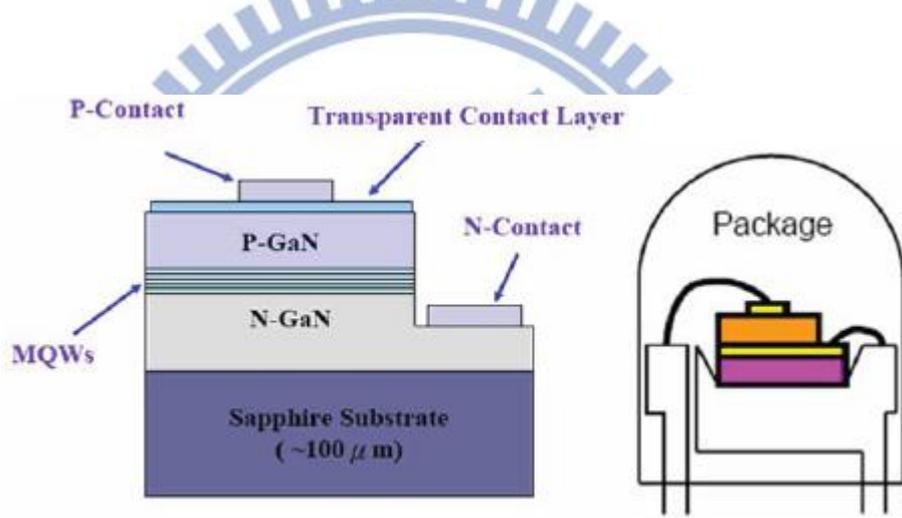


圖 2-13 傳統的發光二極體封裝示意圖[19]

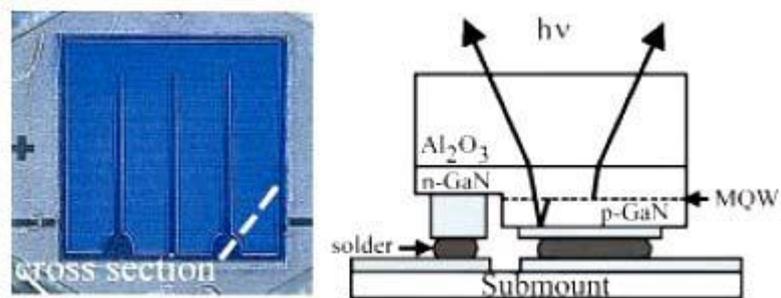


圖 2-14 覆晶型發光二極體結構示意圖[19]

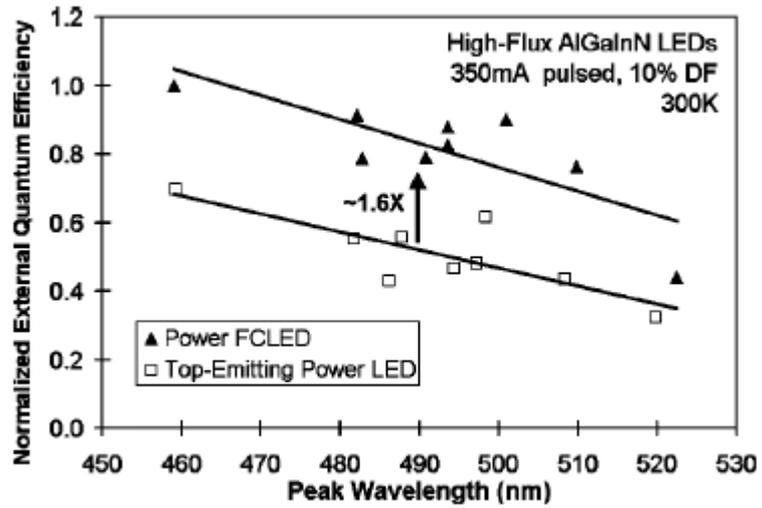


圖 2-15 覆晶型與傳統發光二極體光取出效率比較圖[19]

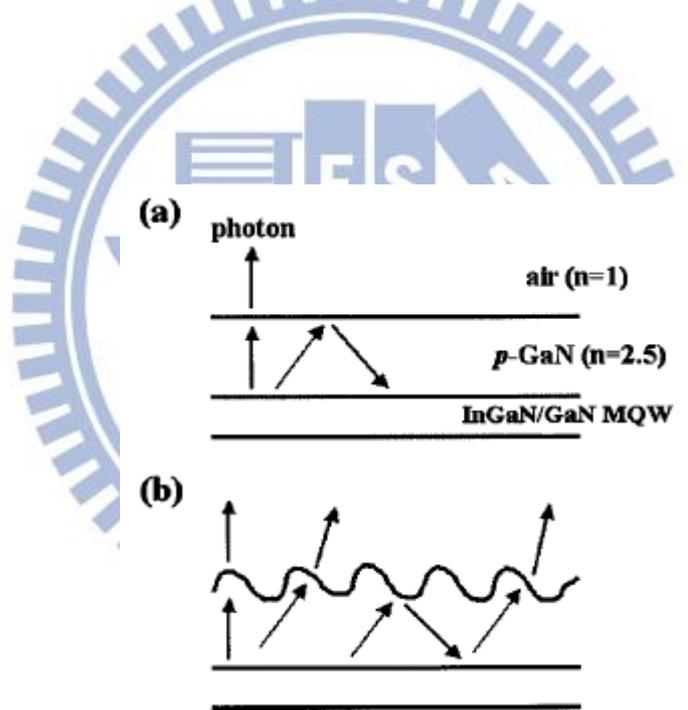


圖 2-16 不同表面粗造度的可能光行進路徑[20]

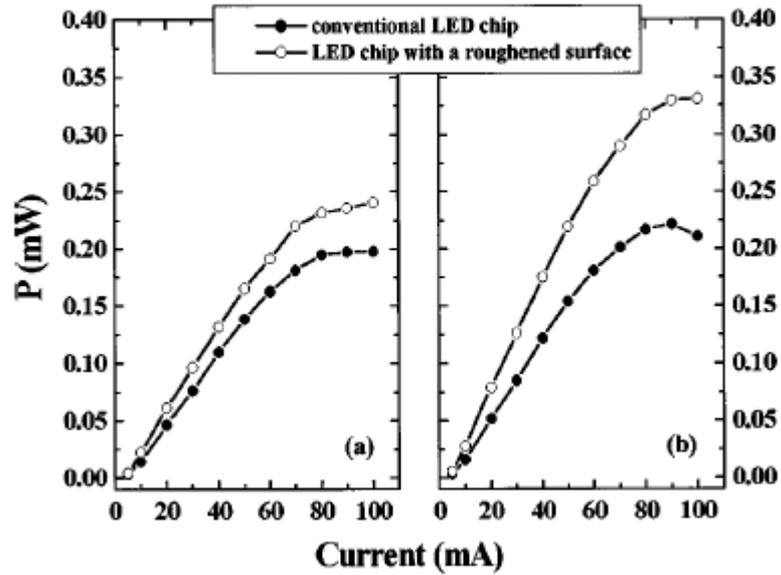


圖 2-17 傳統與經表面粗糙化的 LED 分別在(a) Sapphire 和(b) Transparent metal layer 面檢測的發光功率差異[21]

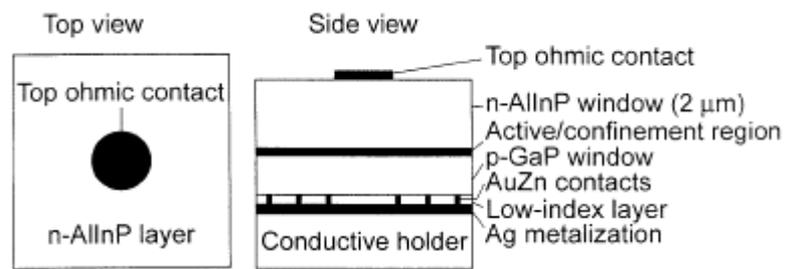


圖 2-18 DBR 型發光二極體示意圖[22]

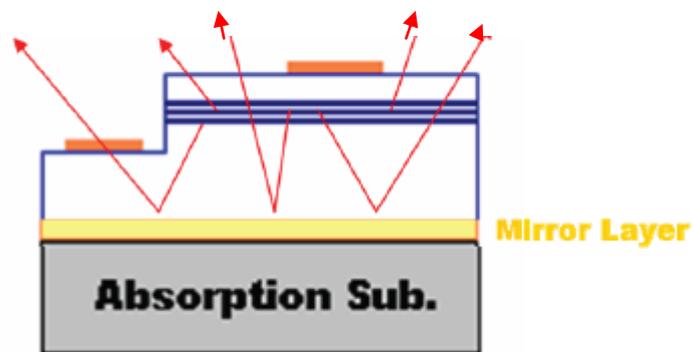


圖 2-19 利用鏡面反射層防止光被吸光基板所吸收[23]

減少焦耳熱效應 (Joule-heat effect)

電子因為偏壓而帶有能量，在行經材料內部時將會與構成材料的原子產生彈性碰撞或非彈性碰撞，若產生非彈性碰撞則電子將損失能量並將此能量轉移至構成材料的原子上，這些能量又轉換成熱的形式使得材料的溫度上升，因此所有通電的元件均不可避免有焦耳熱效應的發生。輸入功率的提升，電子帶有的能量越大，材料溫度的上升就越明顯。隨著高亮度 LED 的發展，順向注入電流逐漸增加也使得發光二極體產生較多的熱能，因為基板的導熱性不佳造成熱能聚集而使得二極體的特性下降，如圖 2-20[24]。經由導熱基板的替換或加大元件尺寸[25]可提升其發光功率。在導熱基板的置換上，R. H. Horng 等人[26-27]及 S. J. Wang 等人[28]利用高導熱的導電性基板去取代藍寶石。如表 2-1，配合鏡面反射層 (Al、Pt、Ag) 的應用，使其對於元件的亮度及功率都有大幅的提升。

Horng 等人也使用電鍍銅及 Ag mirror 的方法(圖 2-21)去提升其散熱性和銅不易切割的問題，使元件在 20mA 驅動下，發光強度有約 1.5 倍的提升，驅動電流也可提升至 180mA，與傳統藍寶石基板相較約有 2.5 倍的提升 (圖 2-19)。然而 LED 發展至今，光電轉換的效率還是沒有很大的提升，因此要解決 LED 散熱的問題，就必須降低 LED 的總熱阻值，而 LED 製作完成後的總熱阻值可視為一串聯熱阻值，在 LED 封

裝的每一個層級都必須更進一步降低其熱阻，如此一來才可以讓熱能從發光主動層可以更容易的往外消散。

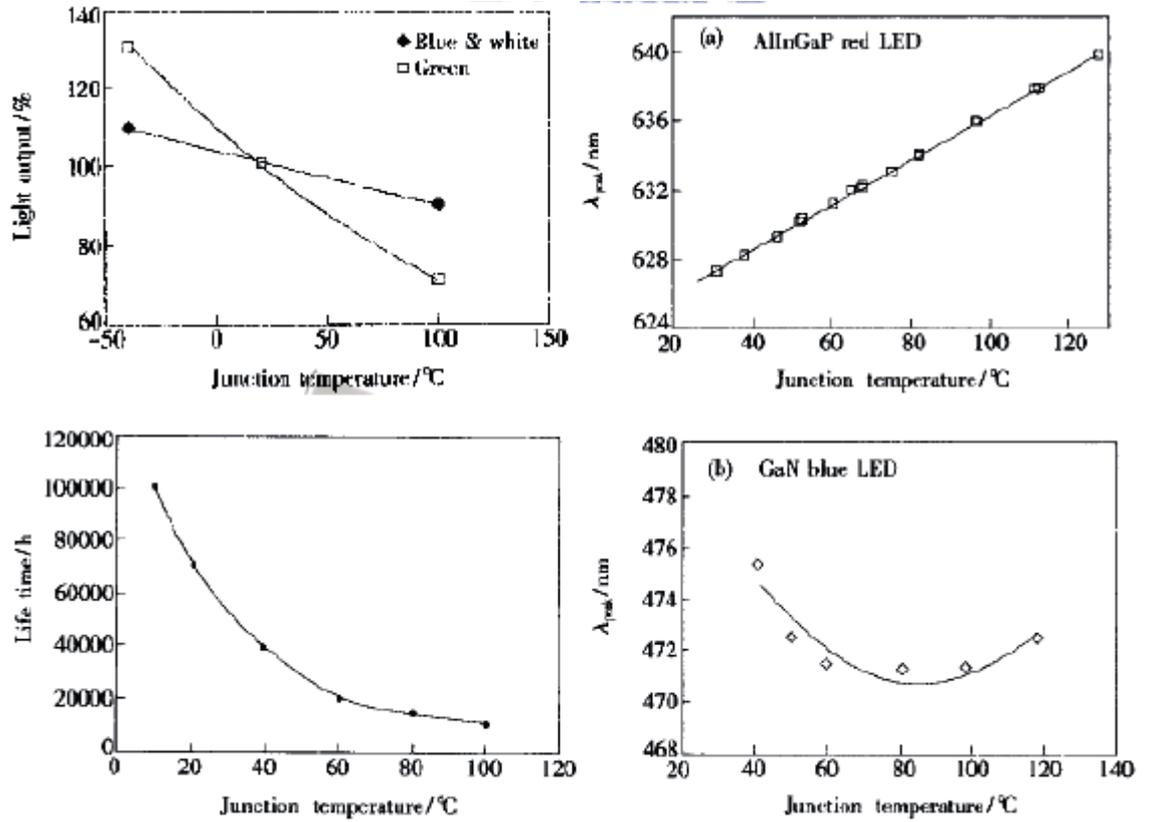


圖 2-20 元件特性和溫度的關係[24]

表 2-1 各種塊材材料的熱傳導系數

	Thermal Conductivity(W/mk)
Sapphire	39
Copper	401
Aluminum	247
Silicon	141
Nickel	90
GaAs	44
SiC	490
Diamond	1000-2000

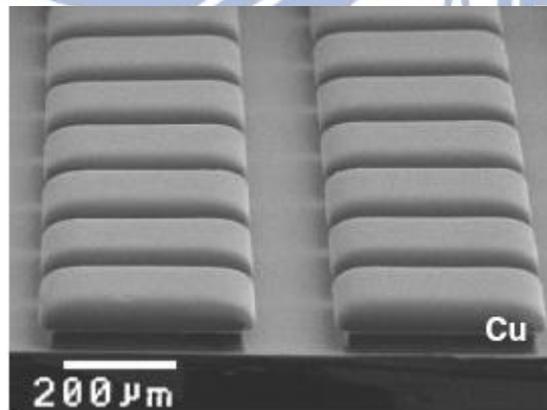


圖 2-21 E.P. Cu/Ag/LED 結構的 SEM 俯視圖[27]

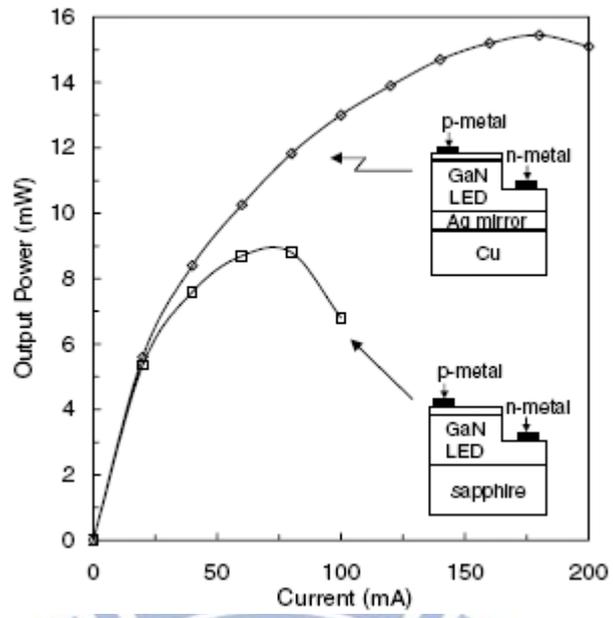


圖 2-22 Electroplating Cu sub.與 Sapphire sub.藍光發光二極體的 L-I



圖[27]

三、 實驗方法

3.1 製作結構化矽晶圓填充人造鑽石顆粒之 高散熱復合基板

3.1.1 實驗設計整合流程

本實驗的目的是要利用人造鑽石與矽擁有較好的散熱能力去取代原本的藍寶石基板，使元件能在較高的電流下驅動。矽基板的圖案設計盡可能的增加鑽石在散熱基板中所佔的比例，但亦需保留適當比例的矽走道區域來支撐整個結構，且鑽石不導電，最終此散熱基板取代LED元件原有基板做成垂直導通型(vertical type)的LED，將只能透過矽走道區域導電，若太少的矽走道區域會導致垂直導通的阻值過大，有可能會使得元件的電性表現下降，因此我們設計填充鑽石的比例約在80~85%左右，圖案可分為四種如圖3-1。而實驗過程中必須克服的問題首先是如何將人造鑽石填入結構化矽晶圓且將其固定，第二是選擇一個低溫接合的系統且接合介面提供足夠的機械強度可進行後續的製程。

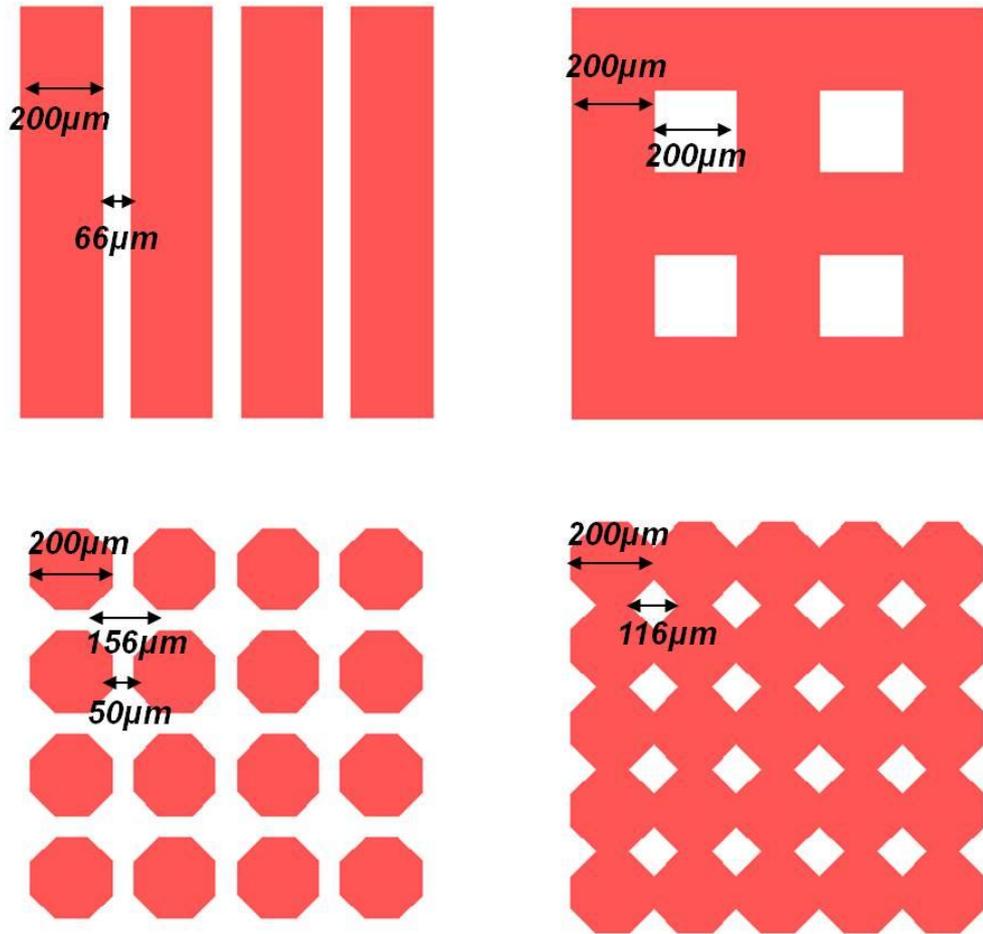


圖 3-1 四種圖案

3.1.2 實驗流程

在本實驗中所進行的製作流程有兩個，分別為

1. 預先填充流程(圖 3-2)
2. 預先接合流程(圖 3-3)

由兩種不同的製程方式面臨到的問題去做探討及研究，會再後面的結果與討論部份做詳細的分析和說明。

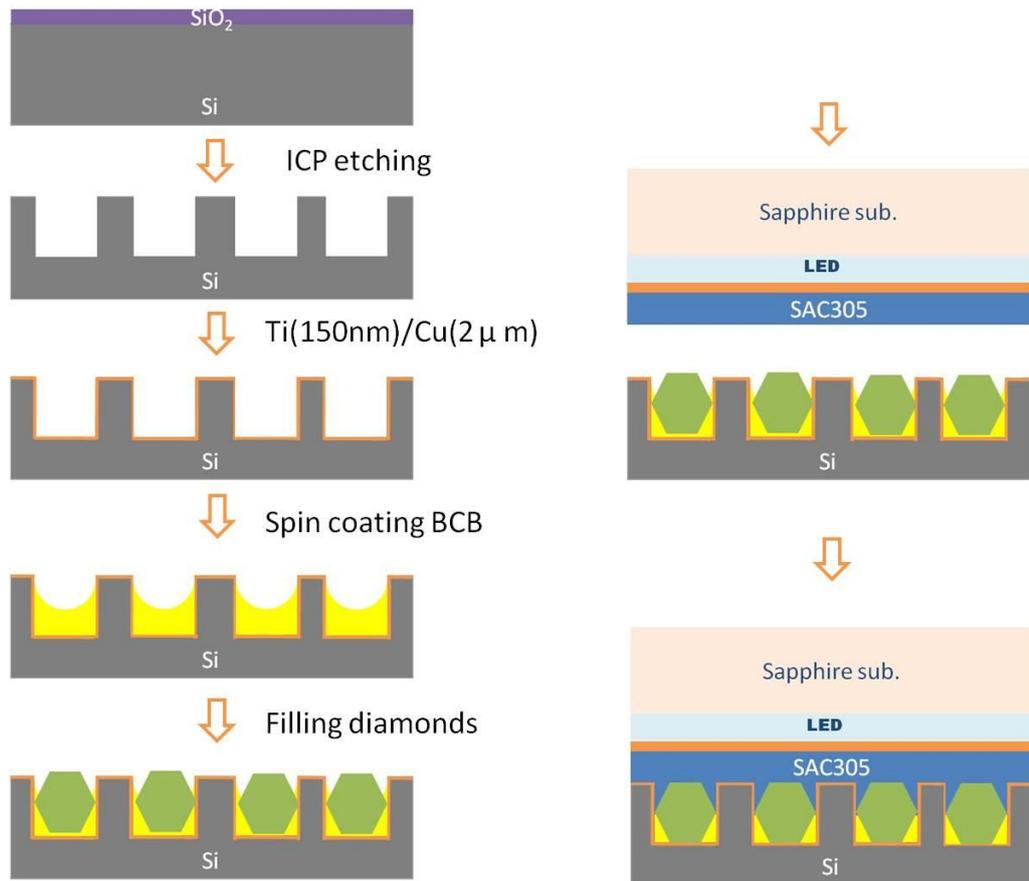
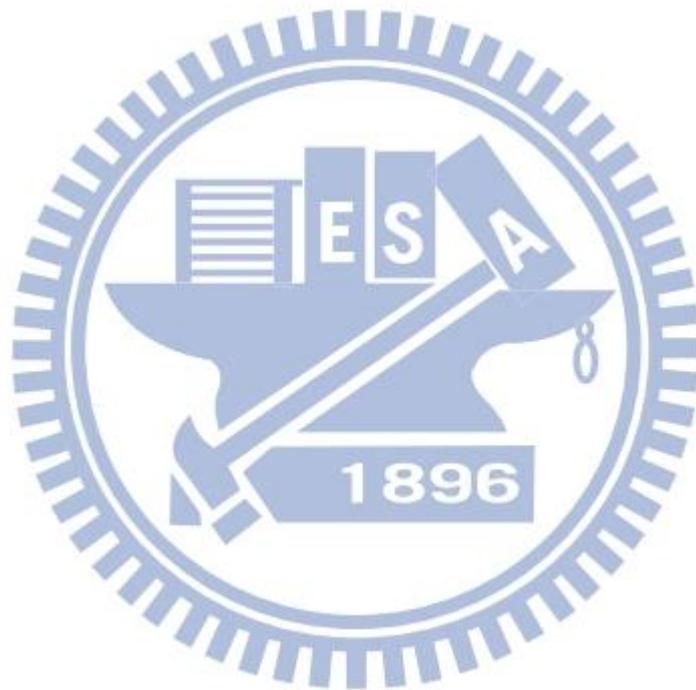


圖 3-2 預先填充流程圖

1. 在矽(Si)晶圓上鍍覆上厚度約 $2 \mu\text{m}$ 之二氧化矽層(SiO_2)做為蝕刻遮蔽層。
2. 利用黃光微影蝕刻定義出有規則排列之圖案陣列。
3. 利用感應偶合式電漿(Induce Couple plasma)機台，蝕刻矽晶圓至目標之深度，並移除蝕刻遮蔽層，製作出具有凹凸規則排列之矽晶圓結構。
4. 鍍覆上鈦(Ti)150nm、銅(Cu) $2 \mu\text{m}$ 作為接合金屬層。
5. 旋塗 BCB 將其填入溝槽中，目的是為了固定填入的人造鑽石

6. 將人工鑽石顆粒填充於矽晶圓結構之下凹區域。
7. 在 LED 磊晶片之 p-GaN 上鍍覆上氧化銦錫 (ITO) 150nm、銅 (Cu) 2 μm 作為接合金屬層。
8. 在 LED 磊晶片上塗抹一層 SAC305 錫膏。
9. 散熱基板與加工過的 LED 磊晶片利用夾具(圖 3-4)加壓在 250 $^{\circ}\text{C}$ 接合 5 分鐘。



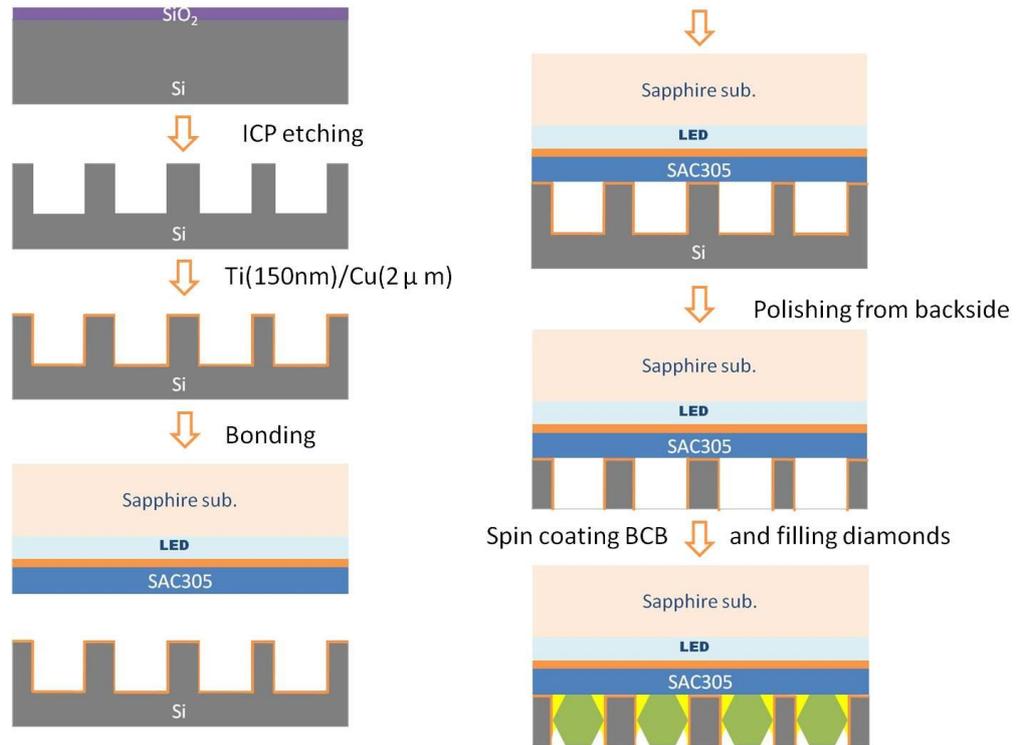


圖 3-3 預先接和流程圖

1. 在矽(Si)晶圓上鍍覆上厚度約 $2 \mu\text{m}$ 之二氧化矽層(SiO_2)做為蝕刻遮蔽層。
2. 利用黃光微影蝕刻定義出有規則排列之圖案陣列。
3. 利用感應耦合式電漿(Induce Couple plasma)機台，蝕刻矽晶圓至目標之深度，並移除蝕刻遮蔽層，製作出具有凹凸規則排列之矽晶圓結構。
4. 鍍覆上鈦(Ti)150nm、銅(Cu) $2 \mu\text{m}$ 作為接合金屬層。
5. 在 LED 磊晶片之 p-GaN 上鍍覆上氧化銦錫 (ITO) 150nm、銅(Cu) $2 \mu\text{m}$ 作為接合金屬層。

6. 在 LED 磊晶片上塗抹一層 SAC305 錫鉛膏
7. 基板與加工過的 LED 磊晶片利用夾具(圖 3-4)加壓在 250°C 接合 5 分鐘。
8. 從背面研磨至露出孔洞
9. 旋塗 BCB 將其填入溝槽中，目的是為了固定填入的人造鑽石
10. 將人工鑽石顆粒填充於矽晶圓結構之下凹區域。

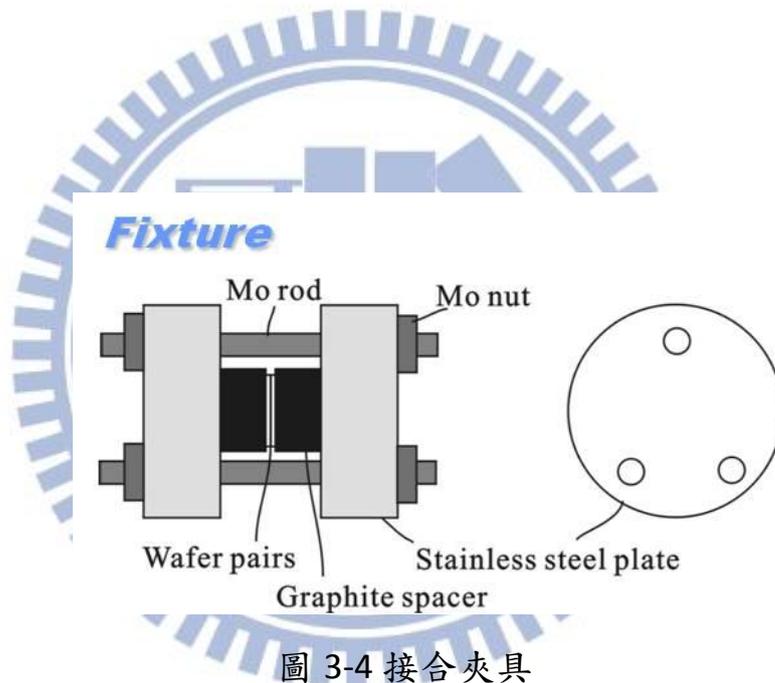


圖 3-4 接合夾具

3.2 製作高密度單層人造鑽石顆粒導熱層

3.2.1 實驗設計整合流程

本實驗的目的是利用人造鑽石良好的散熱能力搭配上鉚錫或是高分子材料來取代原本的固晶材料，使得 LED 發光主動層產生的熱可以更容易的往外消散。其中核心的想法是製作一層單層高密度的鑽石直接與 LED 晶片接觸使熱可以經過一個介面就進入鑽石中，再利用鉚錫或是 BCB 提供足夠的接合強度把晶片固定在電路板上。實驗中的難度是在於製作出一個單層且高密度的鑽石，接合的部分必須施加是當的壓力使 LED 晶片與鑽石接觸，若是壓力不足 LED 晶片與鑽石之間就會有多餘的接合材料；但壓力過大就會使晶片在接合過程中就碎裂了。

3.2.2 實驗流程

實驗分成三個部分，分別是：

1. 單層鑽石之鉚錫接合流程(圖 3-5)
2. 單層鑽石之 BCB 接合流程(圖 3-6)
3. 單層鑽石之 LED 晶片與鉚錫接合流程(圖 3-7)

前兩個部分是比較兩種複合固晶層的熱阻，第三部分是將複合固晶層實際應用在封裝的熱阻。

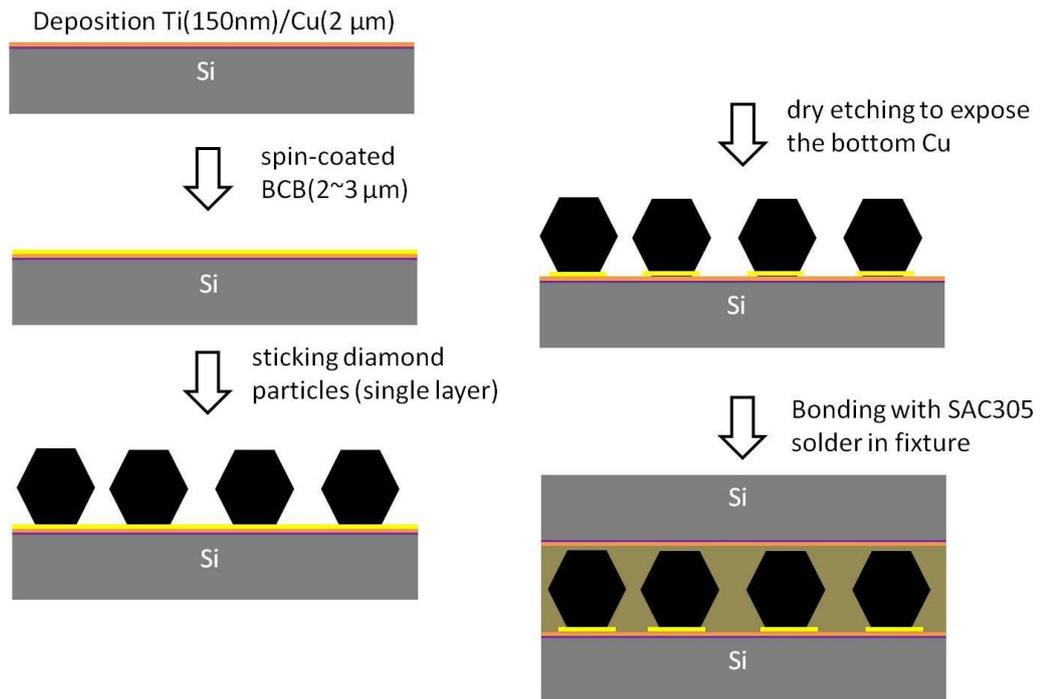


圖 3-5 單層鑽石之鉚錫接合流程

1. 在矽晶圓上鍍覆上鈦(150nm)、銅(2 μm)作為接合金屬層
2. 旋塗一層 BCB(2~3 μm)目的是為了黏著鑽石顆粒
3. 將單層人造鑽石顆粒黏著在矽晶圓上
4. 利用鑽石當作遮罩藉由乾式蝕刻去除 BCB 露出底部的金屬層
5. 在另一片鍍有相同接合金屬層的矽晶圓上塗上鉚錫膏與試片
用夾具加壓在 250°C 接合 5 分鐘

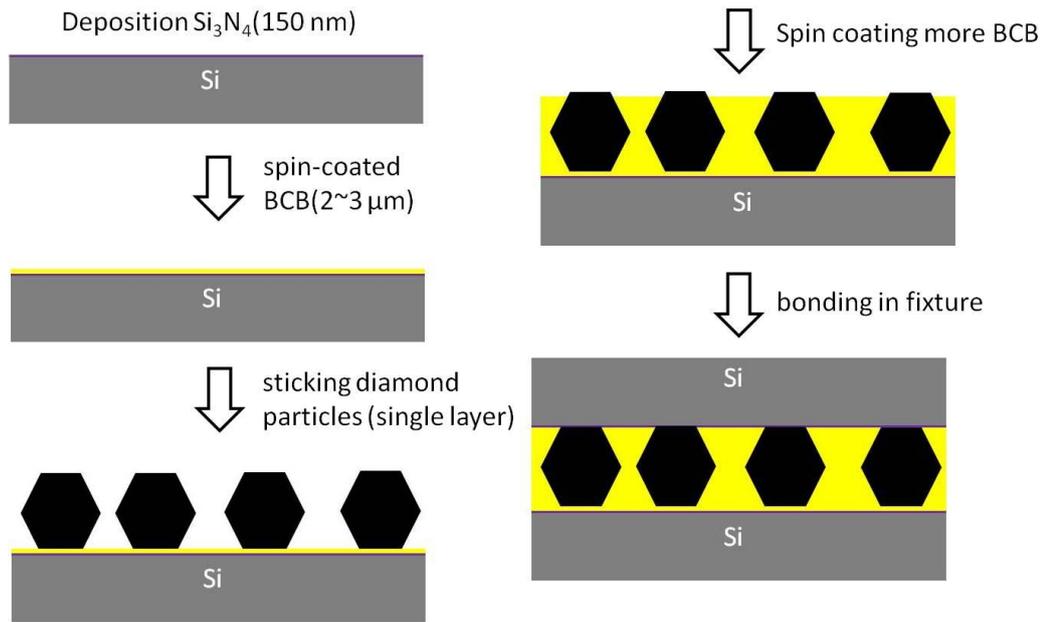


圖 3-6 單層鑽石之 BCB 接合流程

1. 在矽晶圓上鍍覆上氮化物(150nm)作為接著層
2. 旋塗一層 BCB(2~3 μm)目的是為了黏著鑽石顆粒
3. 將單層人造鑽石顆粒黏著在矽晶圓上
4. 旋塗更多的 BCB 使其厚度大約等於鑽石的大小
5. 將另一片鍍有相同接著層的矽晶圓與試片用夾具加壓在 250°C 接合 1 小時

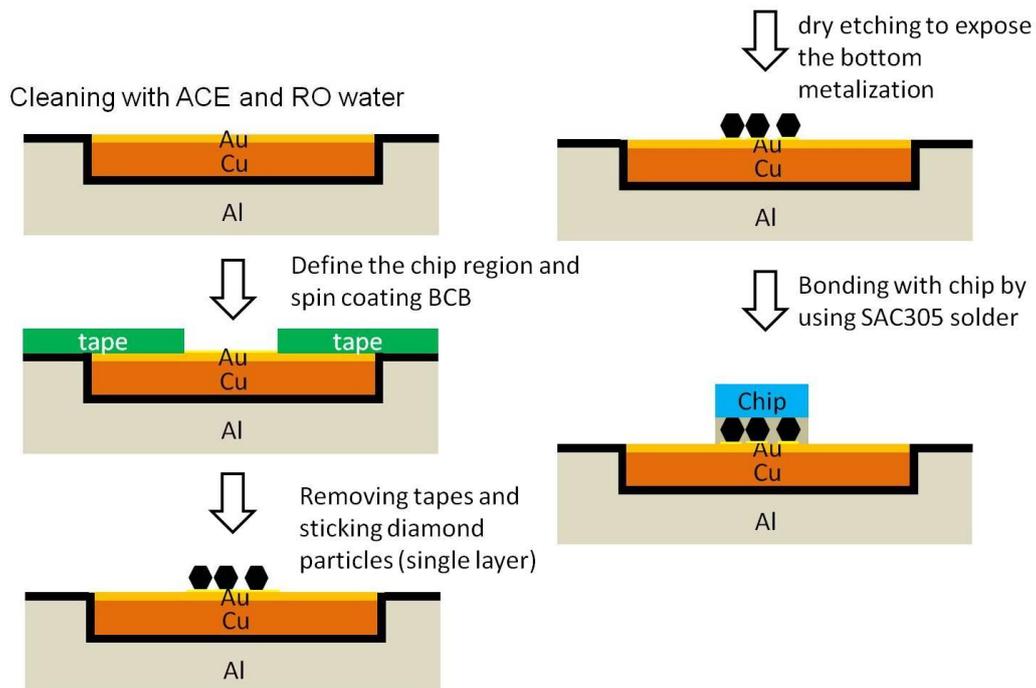


圖 3-7 單層鑽石之 LED 晶片與錒錫接合流程

1. 利用丙酮與 RO 水清洗表面
2. 利用真空膠帶定義出接合區域並旋塗 BCB
3. 移除真空膠帶且黏上單層的人造鑽石
4. 利用鑽石當作遮罩藉由乾式蝕刻去除 BCB 露出底部的金屬層
5. 利用 SAC305 錒錫將 LED 晶片接合在 star 板上

四、結果與討論

4.1 製作結構化矽晶圓填充人造鑽石顆粒之高散熱複合基板

4.1.1 填充人造鑽石顆粒與圖形陣列的選擇

本實驗的目的是將 LED 結構從藍寶石基板上移除，轉移到人造鑽石與矽晶圓的複合基板上。由於本實驗的設計是盡量增加鑽石的比例(約 80~85%)，其餘矽的部分是當作導電以及提供作為切割的走道。雖然圖型陣列的深寬比為一，然後因為圖型的尺寸很大(深： $200\ \mu\text{m}$ ，寬： $200\ \mu\text{m}$)，很難利用異質磊晶的方法來製作，所以我們選擇用市售的人造鑽石顆粒，將其填到圖案化矽晶圓，本實驗設計了四種圖型，如圖 3-1。一開始碰到的問題是如何把鑽石填入且把他固定，本實驗是選用 BCB 藉由其較低的黏滯係數可以用旋塗的方式先將 BCB 填到圖案化矽晶圓中，在鑽石顆粒填入後，利用 BCB 熱固性的性質來把鑽石顆粒固定住，且對強酸強鹼均有抗蝕性，熱處理後是很安定的固著材料。填完鑽石的基板如圖 4-1 所示，由於本實驗使用的人造鑽石製作的方是將大顆的鑽石利用高能量的撞擊所製作的碎裂鑽石所以再鑽石本身表面沒有特別的晶面，另一方面，粒徑的大小也不一致(約 $180\sim 220\ \mu\text{m}$)，

所以可以發現較小顆的會填的比較深而大顆的就會突出表面，造成基板的表面呈現有高低起伏的形貌。因為上述的兩的問題所以可以從圖中發現若圖型是有連通的空間就會比較能達到高的填洞率，表面的起伏也會比較差，因此本實驗是選用具有獨立空間的圖型來繼續進行後續的實驗。

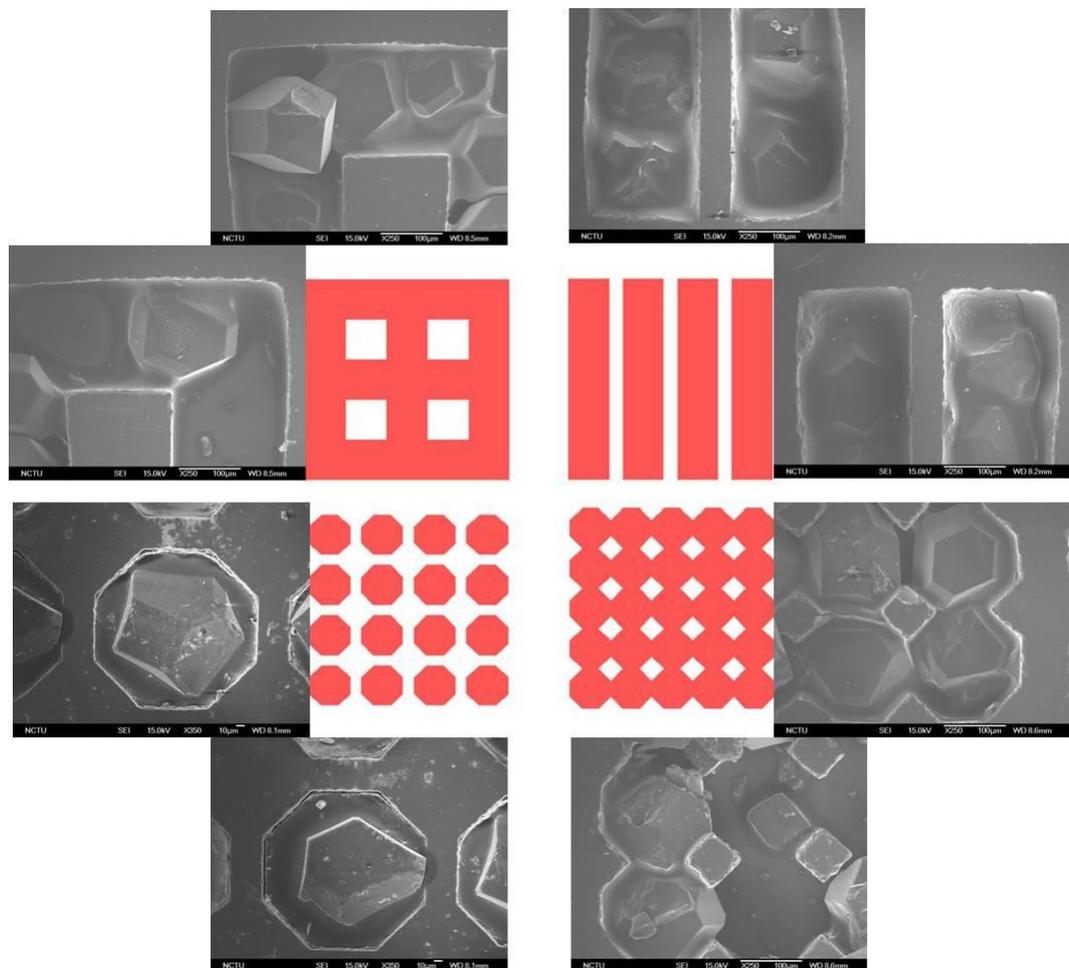


圖 4-1 四種圖型及填完鑽石的 SEM 圖

4.1.2 預先填充製程

在鑽石填充的製程與基板圖型確定後，進行了預先填充的製程，其流程方式如圖 3-2，然而得到的結果是失敗的。

失敗的原因還是因為鑽石粒徑不一所造成，由於基板表面的起伏過大產生兩個問題：第一是因為較大的鑽石顆粒無法填入凹洞中，使的接合材料(焊錫)的厚度很厚，而且晶片與基板無法接合的很平整；第二個問題，也是失敗的主因，在後續為了雷射剝離製程必須將藍寶石基板研磨拋光的過程中發生晶片與基板碎裂的情形。為了讓雷射可以進入藍寶石基板必須讓其表面有高的平整度，一般業界會使用化學機械研磨(Cheical Mechanical Polishing)的方式將藍寶石基板表面磨平拋光，可達到 $RMS \approx 0.5nm$ 的平坦度，但我們是使用小試片(約 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$)進行實驗，而 CMP 機台需要兩吋以上的大小方可進行研磨拋光，因此我們是利用鑽石砂紙，以手磨的方式將藍寶石基板表面拋光，但是因為突起的鑽石會使應力集中，最終使得晶片與基板碎裂。

4.1.3 預先接合製程

由於預先填充的製程無法成功，所以就設計的另一種製程，預先接合流程如圖 3-3 所示。不過因為鑽石粒徑大小的問題還是存在，因此還是有部分的鑽石無法與晶片端接觸，如圖 4-2 所示。此外由於在固定鑽石需要在 250°C 持溫一小時使 BCB 硬化，在此溫度下焊錫仍然會與金屬層(銅)有反應，若銅完全被使用完與焊錫反應成為介金屬化合物，接合的強度會下降，所以也有部分的試片在雷射剝離的製程中就分離了，但是最終還是有部分試片的接合強度是足以承受後續的製程。

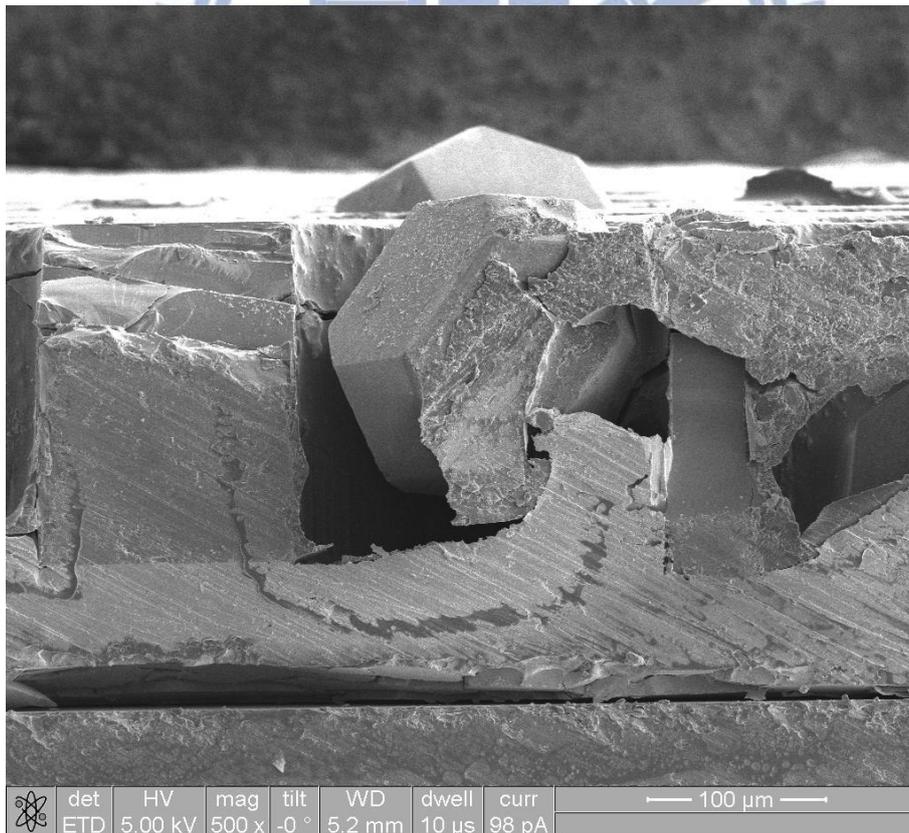


圖 4-2 預先接合製程試片 SEM 圖

4.1.4 元件製作

因為本實驗的試片是用手工的方式研磨拋光，平整度較為不均勻，因此雷射打在藍寶石基板表面的能量分布也會受到影響，因此剝離後的氮化鎵表面會有坑洞與不平整的現象。接著在氮化鎵表面以黃光微影的方式定義出電極圖案，並鍍上 Cr/Au 作為電極金屬，如圖 4-3 所示。

實驗最終希望將鍍好電極的結構，以矽走道做為切割走道，定義出 $225\ \mu\text{m} \times 225\ \mu\text{m}$ 的元件大小(如圖 4-4 所示)，但由於電極圖案與鑽石顆粒的對位極難進行，且在我們的結構中是利用焊錫做接合，此層金屬的硬度與矽和 GaN 主動層差異甚大，若以鑽石切割機(dicing saw)切割試片，會損傷切割刀片與破壞試片完整性，故實驗最終並無切割定義出 $225\ \mu\text{m} \times 225\ \mu\text{m}$ 的元件大小，若要做到此目標，必須重新設計圖案以提供鑽石與電極圖案的對位基準(alignment key)並使用雷射切割機切割試片方可完成元件製作。

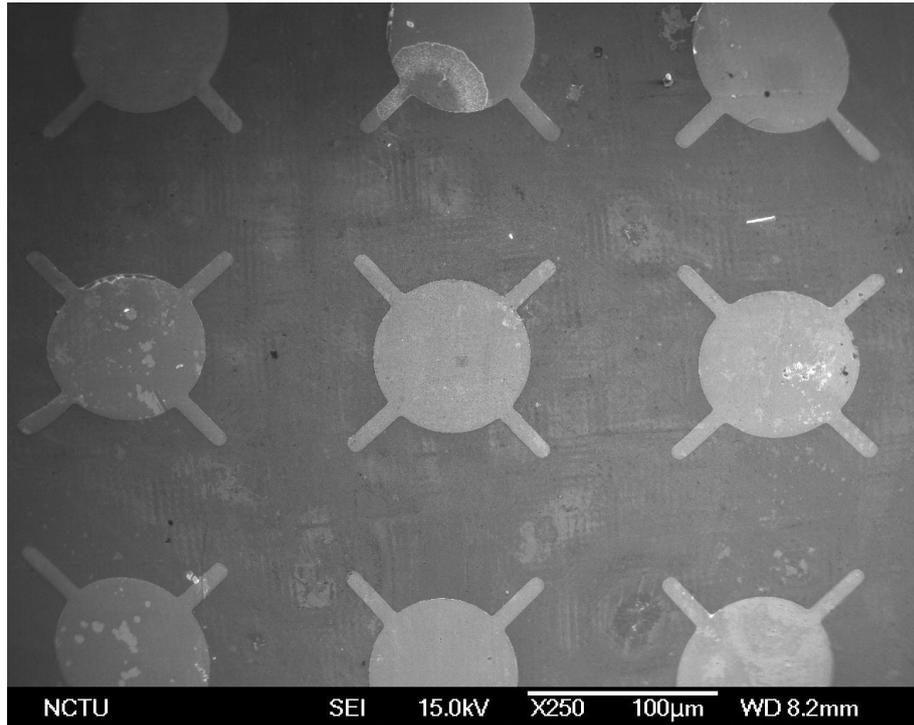


圖 4-3 氮化鎵表面形貌與電極圖案 SEM 圖



圖 4-4 最終元件完成示意圖

4.2 製作高密度單層人造鑽石顆粒導熱固晶層

隨著 LED 的發展注入電流越來越大，散熱的議題越來越重要。而含有鑽石的復合材料具有相當大的潛力，然而鑽石是一種非常穩定的材料所以若要與其反應需要給予高溫高壓才可能形成化學的鍵結。但是其製成的溫度高達上千度，難以與現今 LED 製成相容合。於是發展出另一個方向，2010 發表的論文[29]提出藉由添加鑽石顆粒於鉍錫膏中，使得熱阻值相較於無添加鑽石顆粒的焊錫膏可降低 3K/W。因此，若在同一厚度中添加較大的鑽石顆粒，相較於添加尺寸較小的鑽石顆粒，可以減少介面熱阻(interface thermal resistance)的影響，提供熱傳導的直接路徑(如圖 4-5 所示)。

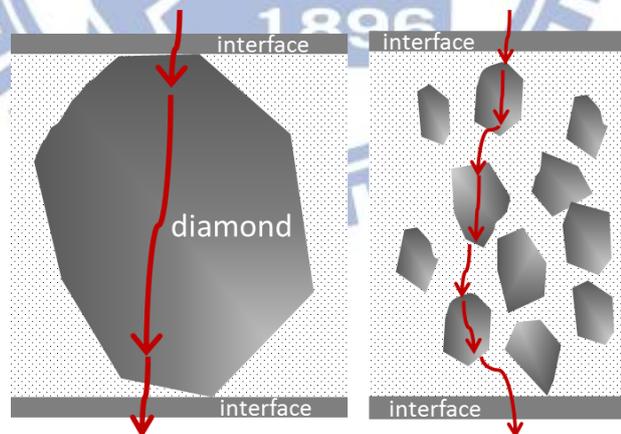


圖 4-5 鑽石顆粒尺寸對熱傳導路徑影響示意圖

4.2.1 製作高密度單層人造鑽石顆粒

由於我們的想法是盡量放大鑽石在固晶材料中的比列，且要與 LED 晶片直接接觸，來製造一個熱的通道。所以必須製作出一個單層散佈的鑽石顆粒，流程如圖 3-5、3-6 所示。而基板上的附著層是跟著選擇的接合材料改變。本實驗同樣也是選用 BCB 當作固定鑽石的材料，藉由控制旋塗的轉數及時間可以控制 BCB 的厚度，將鑽石顆粒散佈上去即可得到一層高密度的鑽石顆粒，然後再 250°C 持溫一小時使 BCB 硬化，其表面形貌如圖 4-6、圖 4-7 所示。

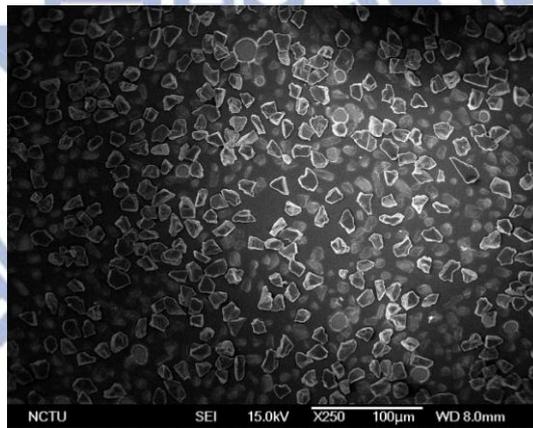


圖 4-6 單層高密度散佈鑽石上視 SEM 圖

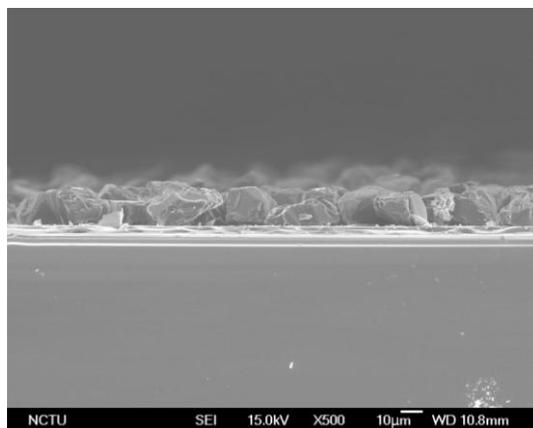


圖 4-7 單層高密度散佈鑽石側視 SEM 圖

4.2.2 BCB、錫接合及實際應用在 LED 固晶製程

我們將利用夾有”單層鑽石顆粒導熱層”的三明治結構，量測熱阻值來證實本實驗的想法。在三明治結構分為兩個部分：第一是以漢錫當作接合材料，其流程如圖 3-5 所示；第二是以 BCB 當作接合材料，其流程如圖 3-6 所示。本實驗的主要的想法是鑽石必須與 LED 晶片有接觸，所以在接合的過程中是利用本實驗室設計的夾具如圖 3-4 所示，其原理是利用不同材料的熱膨脹系數在高溫環境下產生的同軸應力給予試片加壓。焊錫接合介面如圖 4-8 所示，其中有添加鑽石焊錫的厚度大約為 $30\ \mu\text{m}$ ，厚度與鑽石的尺寸相當，所以推測鑽石與 LED 晶片是有直接接觸，此試片名稱為 DS30，圖中可以看到一些較小尺寸的鑽石顆粒，是在利用鑽石砂紙研磨拋光的過程中嵌上去的。另一組以 BCB 當作接合材料的接合介面如圖 4-9 所示，其中有添加鑽石 BCB 的厚度也是約為 $30\ \mu\text{m}$ ，約為一顆鑽石的厚度，此試片名稱為 DB30_{SS}。

另外也製作了兩組當作對造組，製程與上述兩組相仿，不過就沒有添加鑽石顆粒，然而本實驗的接合材料在接合的過程都是以液態的形式，因此少了鑽石的支撐厚度都比有添加鑽石的試片還要薄。無添加鑽石的焊錫接合介面如圖 4-10 所示，其中有看到黑色的顆粒是因為

研磨過程中鑽石砂紙上的鑽石嵌到焊錫中所留下的，焊錫的厚度約為 $10\mu\text{m}$ ，試片名稱為 S10。無添加鑽石的 BCB 接合介面如圖 4-11 所示，其厚度約為 $3\mu\text{m}$ ，試片名稱為 B3。以上的試片都會進行熱阻值的量測，在下一段落會進行分析及討論。

此外，我們也好奇把這樣的結構實際當作固晶材料，是否對於 LED 封裝的熱阻值可以進一步的降低。因此我們在量測熱阻值的 star 板上製作單層高密度的鑽石顆粒，搭配焊錫來做為固晶材料，其流程如圖 3-7 所示，完成後打上金線(如圖 4-12 所示)已輸入電流做後續的熱阻量測。

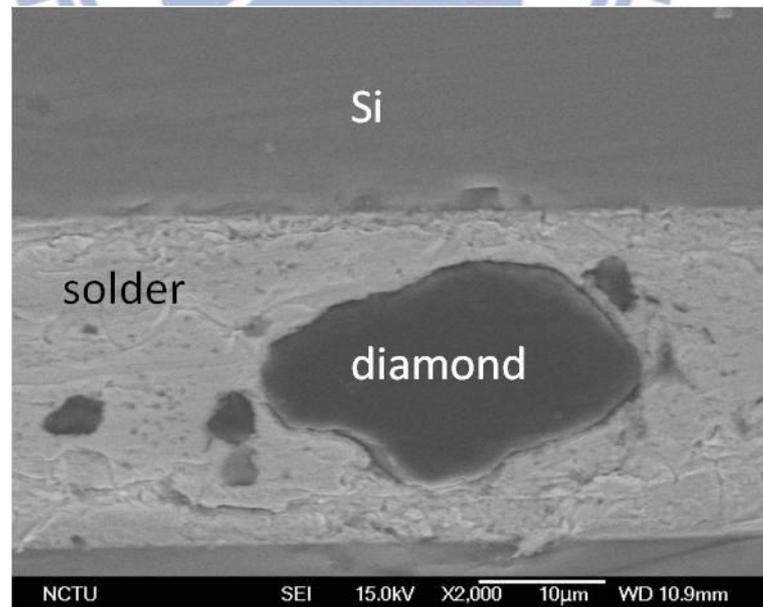


圖 4-8 DS30 之 SEM 圖

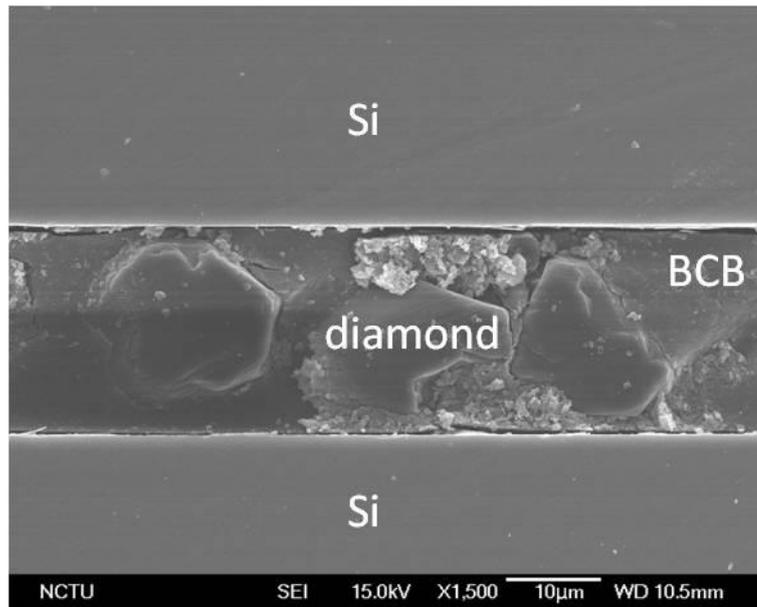


圖 4-9 DB30 之 SEM 圖

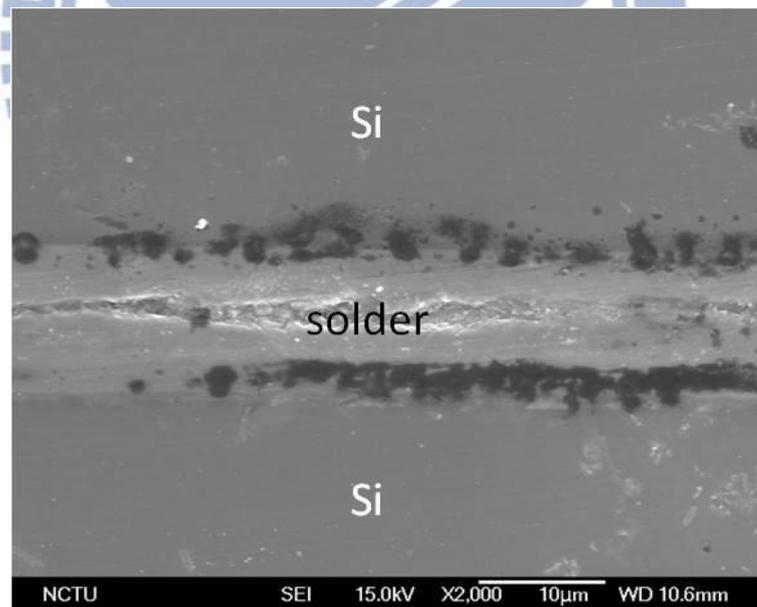


圖 4-10 S10 之 SEM 圖

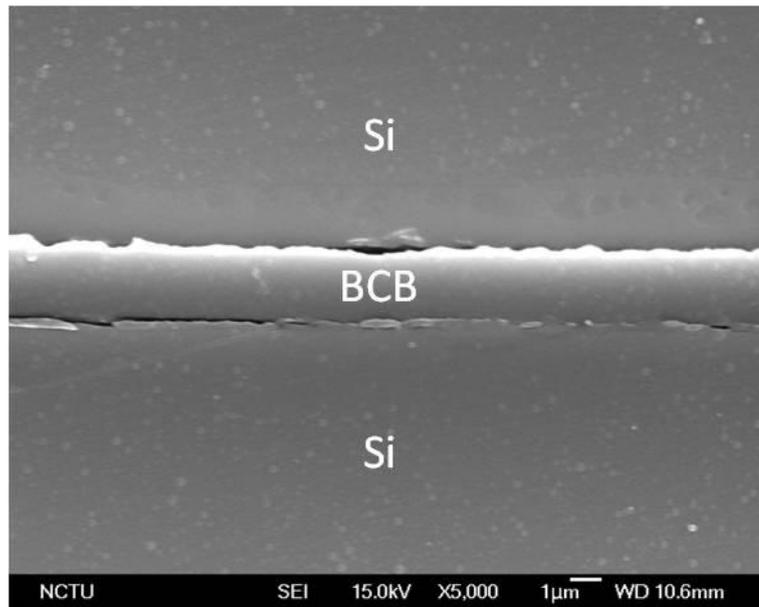


圖 4-11 B3 之 SEM 圖

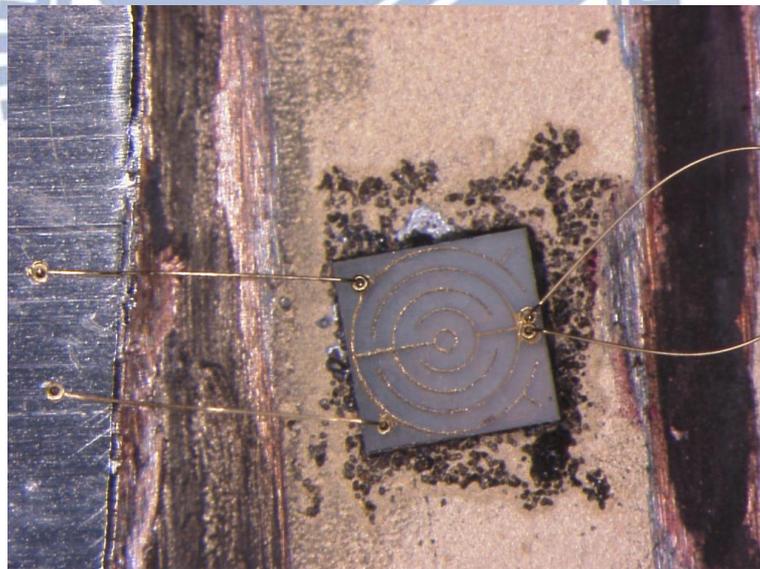


圖 4-12 打線後 LED 晶片上視圖

4.2.3 熱阻值量測之原理

本實驗量測熱阻的結構是將一 LED 以銀膠與焊錫固晶於一 star 板上，打上金線接出正負極，並蓋上一密封劑(Encapsulant)保護金線與 LED 晶片，接著以導熱膠帶(thermal pad)將三明治結構與 star 板以及量測載盤結合(如圖 4-13 所示)。此種量測方法是將 LED 封裝體(PKG)視為一發熱源，當有電流注入時，由於焦耳熱效應的關係晶片溫度上升，搭配量熱熱阻的儀器可以得到試片的熱阻值，實際量測模組照片如圖 4-14 所示。

量測的方式是利用 T3Ster (thermal transient tester)的儀器，可量測得 LED 元件的接面溫度(Junction Temperature)與各層封裝結構的熱阻抗值(Thermal Resistance)，對於 LED 元件特性的分析，封裝結構的改質，可靠度的實測等方面均提供了詳細的資訊。其量測的可以分為兩個部分：首先先量測出 LED 的接面溫度，再將得到的資料利用數學的轉換搭配上結構累積函數的想法，最終獲得每一層封裝材料的熱阻值。

量測接面溫度(Junction Temperature)的方式有很多種，在 T3Ster 量測模組裡是利用順向偏壓(Forward Voltage)的方式，其中又可以分成校準量測(calibration measurement)與實際溫度量測(actual junction temperature measurement) 兩部分。

1. 校準量測(calibration measurement)

目標：得 LED 順向偏壓與溫度的相關係數(dV_f/dT)。

原理：

$$V_f = \frac{n_{ideal}kT}{e} \ln\left(\frac{J_f}{J_s}\right) \quad \text{對溫度微分得} \quad \frac{dV_f}{dT} = \frac{d}{dT} \left[\frac{n_{ideal}kT}{e} \ln\left(\frac{J_f}{J_s}\right) \right]$$

$$\text{且 } J_f = J_s \left[\exp\left(\frac{eV_f}{n_{ideal}kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_s = e \left[\sqrt{\frac{D_n n_i^2}{\tau_n N_D}} + \sqrt{\frac{D_p n_i^2}{\tau_p N_A}} \right] \quad n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_{de} kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad M_c \propto T^{3/2} \quad N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_{dh} kT}{h^2} \right)^{3/2} \propto T^{3/2}$$

$$\text{代入得} \quad \frac{dV_f}{dT} = \frac{eV_f - E_g}{eT} + \frac{1}{e} \frac{dE_g}{dT} - \frac{3k}{e}$$

將 $eV_f - E_g$ 和 E_g 轉換成溫度的函數, 可得 $\frac{dV_f}{dT} \approx \frac{k}{e} \ln\left(\frac{N_D N_A}{N_C N_V}\right) - \frac{\alpha T(T+2\beta)}{e(T+\beta)^2} - \frac{3k}{e}$ 為一常數

方法：將 LED 置於一溫控箱內，施予脈衝電流驅動 LED，Duty

Cycle=0.1% 避免 LED 產生的熱能影響溫控箱的溫度，示波器記錄下在

不同溫度不同脈衝電流下的順向電壓值，得圖表如圖 4-15 [30]，由各

曲線的斜率可得順向偏壓與溫度的相關係數(dV_f/dT)。

2. 實際溫度量測(actual junction temperature measurement)

$$V_f = A + BT_o \quad \text{-----1}$$

$$T_j = \frac{(V_f - A)}{B} \quad \text{-----2}$$

由 calibration measurement 可得到上式 1 之 A 與 B，接著施加恆定電流驅動 LED，測得在該電流下的順向電壓值，再代入式 2 即可得到 T_j (junction temperature)。

下一步就是結構熱阻值的量測，其原理是，當 LED 通以一小電流

或是在一個控溫的環境下，整體封裝溫度會達到一熱平衡，接著增加一小功率使得 LED 接面溫度上升，整體封裝結構會再一次達到熱平衡，此時紀錄溫度變化與時間的關係圖(圖 4-16)，再經由一連串的數學模型轉換可得到熱容與熱阻抗的積分與微分函數關係圖，藉由關係圖的轉折點可對應得到某一層封裝結構的熱阻抗值，示意圖如圖 4-17。

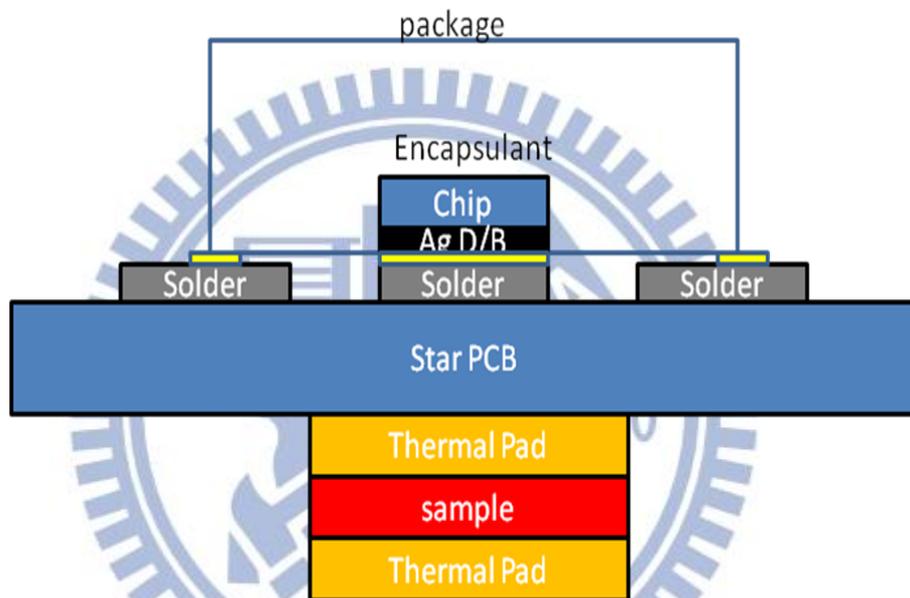


圖 4-13 熱阻量測結構示意圖

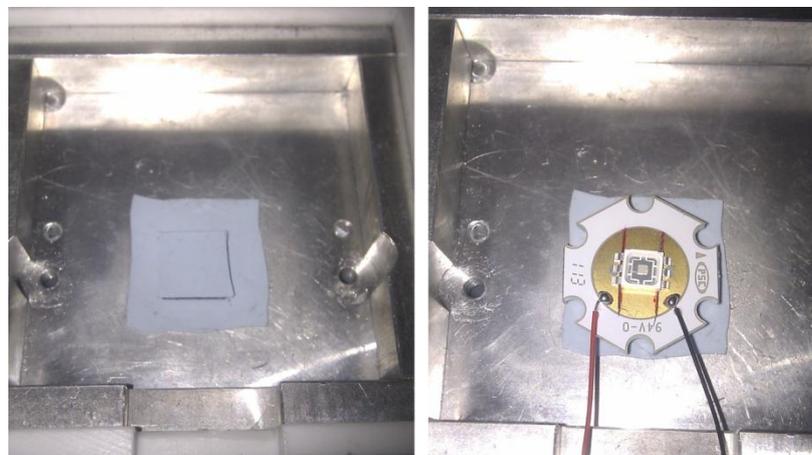


圖 4-14 熱阻量測結構圖

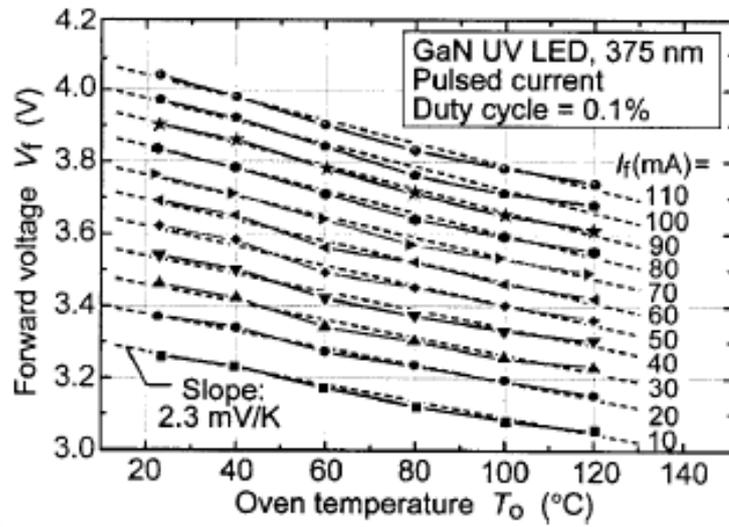


圖 4-15 不同溫度下脈衝電流與電壓關係圖

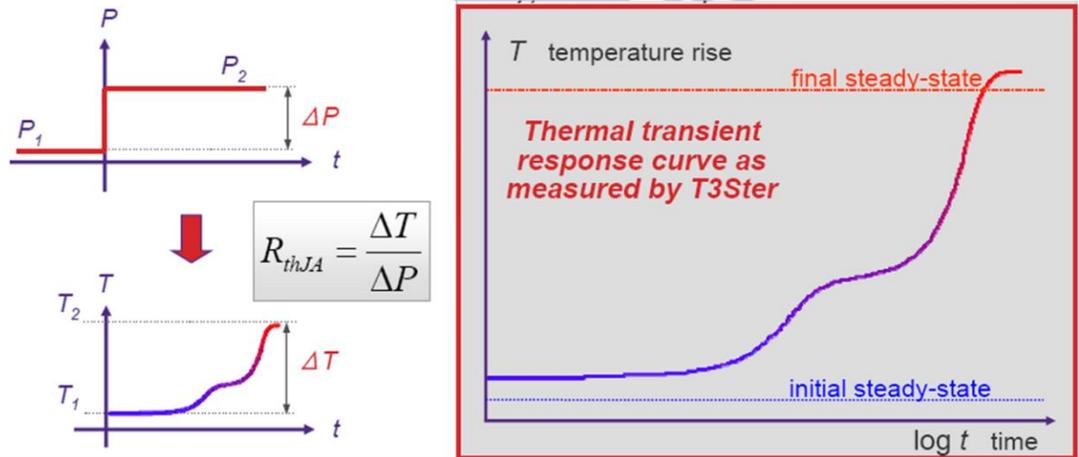


圖 4-16 提升功率記錄溫度變化與時間關係式意圖

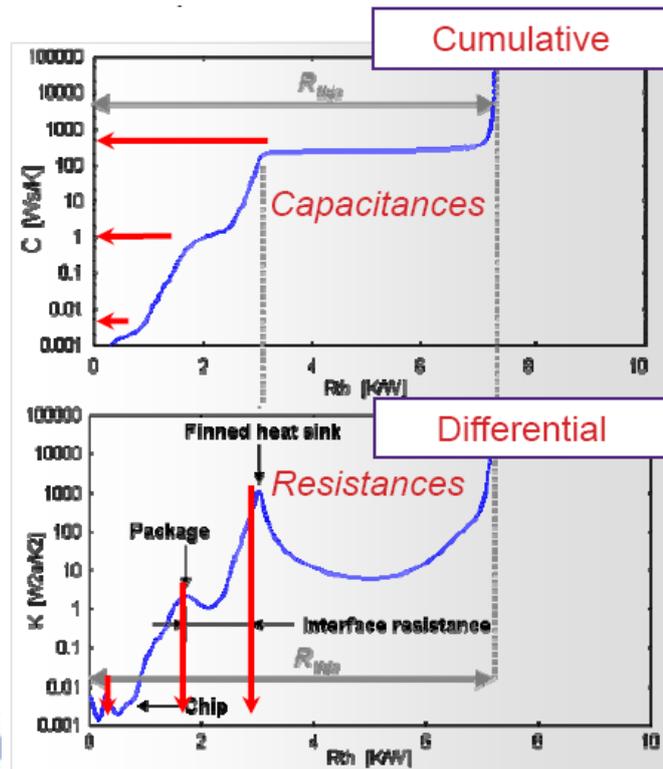


圖 4-17 熱容與熱阻關係圖，積分(上圖)、微分(下圖)

4.2.4 熱阻值量測之結果與討論

量測得到的熱容與熱阻抗微分圖如下圖 4-18 紅線所示，曲線主要可以分為封裝體(PKG)、焊錫與 star 板(Solder+ Star)、導熱膠帶(thermal pad)+試片(sample)+導熱膠帶(thermal pad)三個部分，可以發現在導熱膠帶(thermal pad)+試片(sample)+導熱膠帶(thermal pad)這部分並無明顯的波峰可區別導熱膠帶(thermal pad) 與試片的熱阻抗值，因此我們先量測單一 thermal pad 結構(圖 4-19)的熱阻值，可得到圖 4-18 藍線所示，再把紅線所得的熱阻值扣去 thermal pad 的熱阻抗即可得知試片的熱阻值。

得到的量測結果如表 4-1 所示，DS30 的熱阻值(1.83K/W)是優於 DB30SS(2.33/W)，其原因為接合材料的熱傳導系數的關係，因為焊錫的熱傳導系數約為 60(W/mK)是優於 BCB 的 0.3(W/mK)，因此 DS30 擁有較低的熱阻值。然而，若是比較相同的接合材料有無添加鑽石的話，可以發現沒有添加鑽石的 S10 與 B3 都優於相對的 DS30 與 DB30SS。其中有兩個原因，其一是接合材料厚度的關係，由於實驗中選擇的接合材料都是在液態下接合，當中間沒有鑽石的支撐施以同樣的壓力就會使得厚度更小，因為熱阻值是跟材料的厚度成正比，所以會得到較低的熱阻值；其二是原因是因為鑽石的尺寸的範圍約在 25~30 μm ，使得具有單層鑽石顆粒導熱層的矽晶圓與另一矽晶圓接合時，鑽石顆粒無法與矽晶圓的表面有良好的接觸甚至會產生空隙，使得熱阻值增加。這個觀點可以從 DB30S 的熱阻值(0.78K/W)間接得到證明，從結構上來看少了一層矽晶圓本身的熱阻之外，鑽石顆粒將與導熱膠帶直接接觸，由於導熱膠帶在加壓後較容易貼服在鑽石顆粒上，減少了因鑽石顆粒大小不均的因素與孔隙，因此可以更有效的降低熱阻值。

此外我們也做了熱阻值的理論計算，計算的模組是假設矽晶圓、接合材料層、矽晶圓的串連熱阻，其中在接合材料的部分若是有添加鑽石的試片，則視鑽石與接合材料為並聯。由於附著層及金屬層的厚度很小所以忽略其熱阻值，其中計算的參數如表 4-2 所示，計算後的

結果與實驗值如表 4-3 所示。可以發現理論計算的值都小於實驗值，其原因推測有兩點：

1. 介面熱阻(interface thermal resistance):

介面熱阻的定義是指當熱經過兩個不同材料時，在介面的溫度會產生一個不連續的現象，如圖 4-20[31]。若是導體或半導體與鑽石的系統，因為熱在導體或半導體中是以電子為載子，但是熱在鑽石中是以聲子當作載子，所以在介面轉換的過程中能量會有所損失，若是電子先在導體或半導體中轉換成聲子到了介面也會因為散射(scattering)的關係而損失能量。

2. 接觸熱阻(contact thermal resistance)

接觸熱阻是指兩量個材料接觸的時候，兩邊的表面不可能是完全平整的，如圖 4-21[32]的 a 圖所示。圖 4-21 的 b 圖的則是假設其中一邊是完全的平面而另一邊會有一個等效的表面，如此一來可以進一步估算接觸熱阻的值，但是這個模組只是用於較小的表面粗糙度並不適合用於本實驗的試片。但是由於鑽石尺寸不一勢必會存在接觸熱阻，使得整體熱阻值上升。

因為上述的兩種熱阻使得實驗值會大於理論計算值。

另外我們也嘗試將添加鑽石的復合固晶材料實際應用在 LED 的封裝上，其結構如圖 4-12 所示。利用相同的方法量測，得到結果如圖 4-22

所示，熱阻值為 9.34(K/W)，相較於市售比較高階的銀膠(圖 4-23)，熱阻值為 2.01，是高了約 4.6 倍。其原因除了銀膠很薄(小於 $5\mu\text{m}$)之外，另一個主因是我們所選取的接著層(鈦)與藍寶石基板的附著性不好，可以從圖 4-24 看到遺落下的材料經過 EDX 的分析可以發現其成分是少量的鈦與銅，可以證明鈦與藍寶石基板的附著力不足以承受後續的製程而造成 LED 晶片的脫落，及使沒有脫落的試片也很可能在介面的地方有著空隙，使得添加鑽石的固晶材料的熱阻值大增。

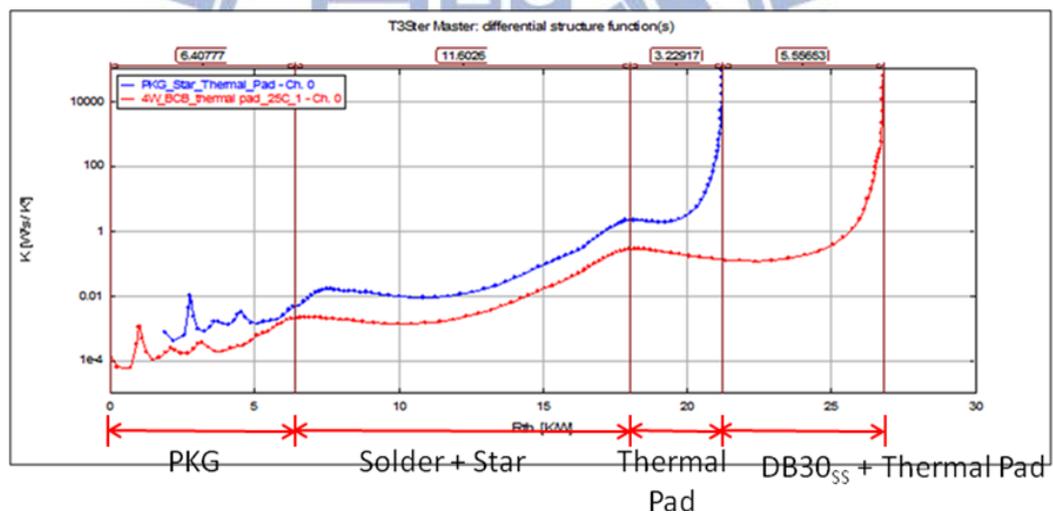


圖 4-18 熱容對熱阻微分圖

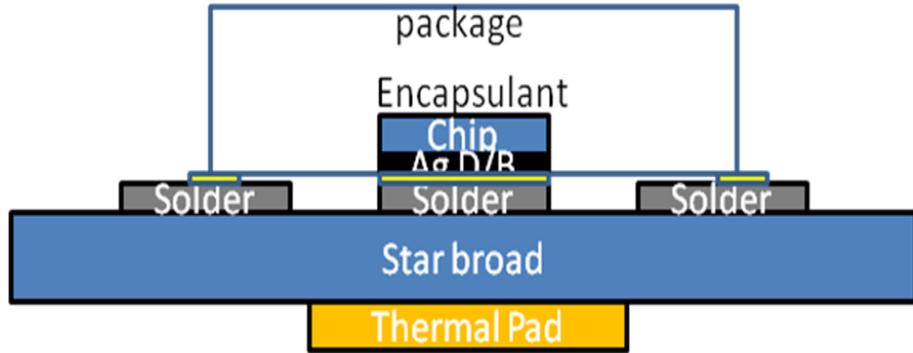


圖 4-19 單一導熱膠帶結構示意圖

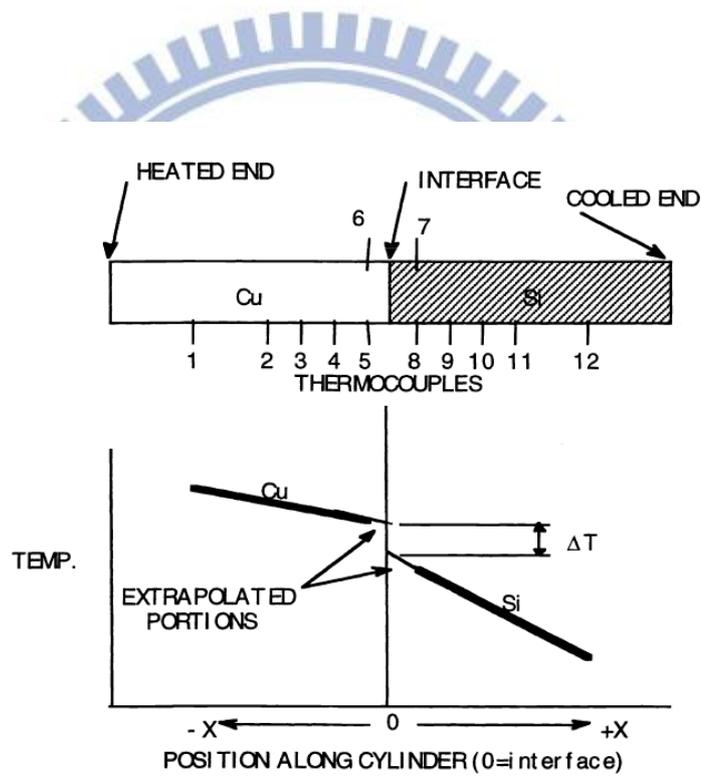


圖 4-20 溫度與位置關係圖[31]

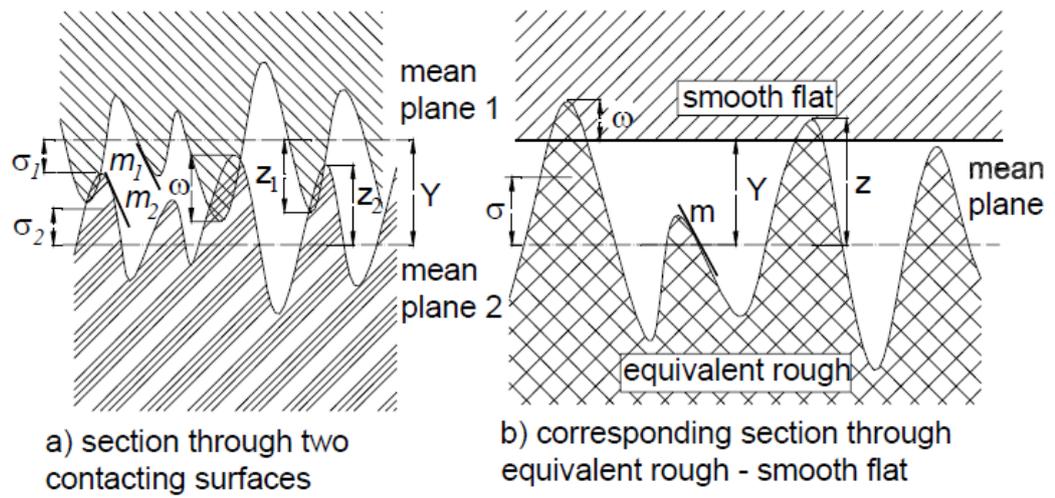


圖 4-21 接觸熱阻示意圖[32]

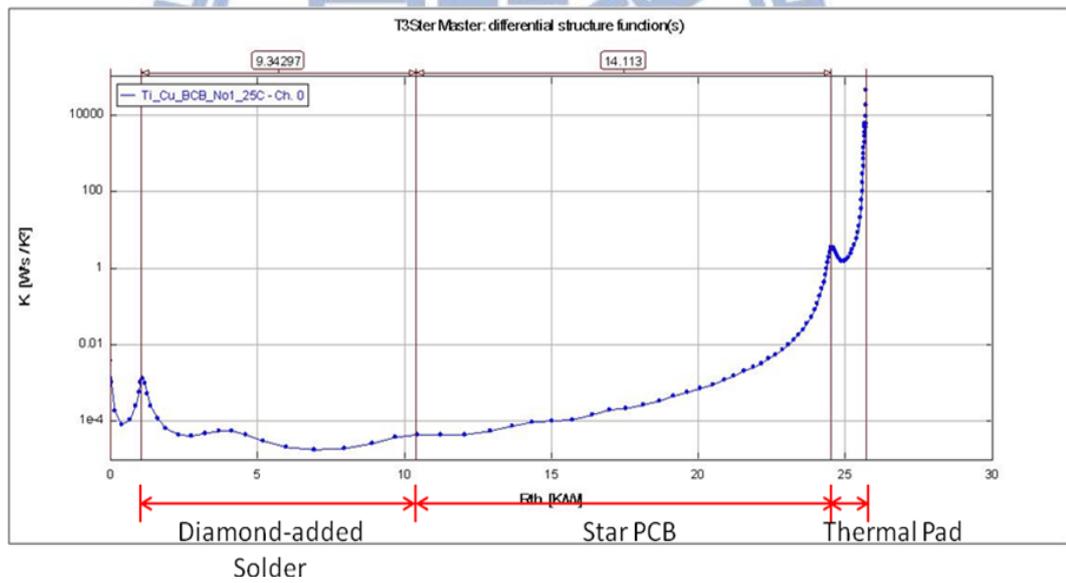


圖 4-22 添加鑽石固晶材料熱阻量測圖

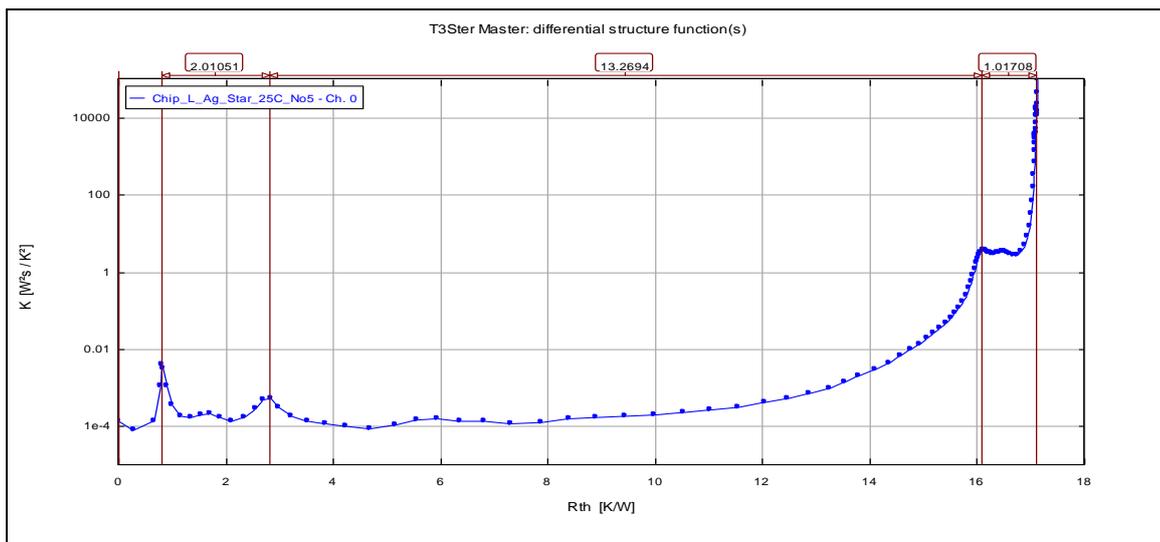
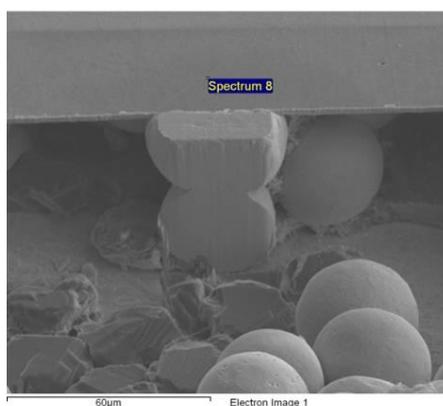


圖 4-23 市售高階銀膠熱阻量測圖



Element	Weight%	Atomic%
Ti K	6.66	8.64
Cu L	93.34	91.36
Totals	100.00	

圖 4-24 LED 晶片脫落表面 SEM 及成分分析圖

表 4-1 各種試片熱阻實驗值

	DS30	DB30 _{SS}	S10	B3	DB30 _S
R _{th} (K/W)	1.83	2.33	0.70	1.04	0.78

表 4-2 理論計算中各種材料的參數

	K (W/mK)	t (μm)
Diamond	1500	30
BCB	0.3	30(DB30 _{SS} , DB30 _S)
		3 (B3)
Solder	60	30(DS30)
		10 (S10)
Si	140	600

表 4-3 各種試片理論計算值與實驗值

	theoretical calculation	experiment
DB30 _{SS}	0.0862857	2.33
B3	0.186	1.04
DS30	0.08628089	1.83
S10	0.0865	0.70
DB30S	0.0432857	0.78

Unit : K/W

五、 結論與未來工作

5.1 結論

5.1.1 製作結構化矽晶圓填充人造鑽石顆粒之高散熱復合基板

在 LED 封裝散熱領域提出一個全新的想法，利用結構化矽晶圓，在其凹洞陣列中填充人造鑽石顆粒。這樣的結構是將鑽石當作導熱的通道，矽晶圓的部分是提供導電以及切割的空間。若成功製作出元件相信可以進一步增加散熱的能力、提升 LED 性質。

5.1.2 製作密度單層人造鑽石顆粒導熱固晶層

在 LED 封裝散熱領域提出一個全新的想法，利用單層高密度散佈的鑽石顆粒與晶元接合技術，選擇接合材料與其搭配的接著層或金屬反應層即可當作固晶材料使用。若提高鑽石與晶片的接觸程度可以大大降低熱阻值。此類高散熱固晶材料不僅可以使用在高亮度 LED 的封裝，也可以使用在其他高功率的晶片(power chip)的封裝。

5.1 未來工作

1. 預先將 LED 磊晶片的藍寶石基板端研磨拋光在進行後續製程。
2. 重新設計圖案以提供鑽石與電極圖案的對位基準(alignment key)。
3. 將試片尺寸放大以便於切割，並使用雷射切割機切割試片。
4. 選用更高品質的人造鑽石顆粒，不僅是尺寸會較為相同，在表面形貌上也會更加平整。
5. 選用更小尺寸的人造鑽石顆粒進一步減少固晶材料的厚度。



六、參考文獻

1. W. C. Peng, Y. S. Wu, "High-power AlGaInP light-emitting diodes with metal substrates fabricated by wafer bonding", Appl. Phys. Lett., vol.84, no.11, p1841, 2004.
2. 材料世界網，工業材料雜誌，170
3. <http://www.materialsnet.com.tw/MagCatalog.aspx?magid=1>
4. 吳耀銓 交通大學材料所 材料接合技術與應用課程講義
5. 李天錫等編著，「晶圓鍵合技術及其應用」，工業材料雜誌，170期，146頁，民國90年2月。
6. T. Suga, M. M. R. Howlader, T. Itoh, "A new wafer-bonder of ultra-high precision using surface activated bonding (SAB) concept", Electronic Components and Technology Conference, p1013, 2001.
7. Nakamura S, Senoh M, Mukai T. "P-GaN/n-InGaN/n-GaN double-hetero structure blue-light-emitting diodes", Jpn. J. Appl. Phys., 32, pL8, 1993
8. Kettel, Introduction to Solid State Physics, Ch4-5.
9. U. Lafont, H. v. Zeijl, S. v. d. Zwaag "Increasing the reliability of solid state lighting systems via self-healing approaches: A review", Microelectronics Reliability, Vol. 52, P 71, 2012
10. J. Haisma, G. A. C. M. Spierings, U. K. P. Biermann J. A. Pals "Silicon-on-Insulator Wafer Bonding-Wafer Thinning

- Technological Evaluations” Jpn. J. Appl. Phys. , vol. 28, p1426, 1989.
11. T. Detchprohm, H. Amano, K. Hiramatsu, I. Akasaki, ”
The growth of thick GaN film on sapphire substrate by using ZnO buffer layer” , J. Cryst. Growth, vol. 128, p384, 1993.
 12. W. S. Wong, M. Kneissl, Ping M., D. W. Treat, M. Teepe, N. M. Johnson, “ Integration of In_xGa_{1-x}N Laser Diodes with Dissimilar Substrates by Laser Lift-off”, MRS Proceedings, vol. 639,pG12.2, 2000
 13. W. S. Wong, T. Sands, and N. W. Cheung, “Damage-free separation of GaN thin films from sapphire substrates” Appl. Phys. Lett. Vol. 72, p 599, 1998.
 14. M. K. Kelly, O. Ambacher, R. Dimitrov, R. Handschuh, M. Stutzmann “Optical Process for Liftoff of Group III-Nitride Films” Physica Status Solidi (A), vol. 159, pR3, 1997.
 15. J. M. Poate, J. W. Mayer, editors, “Laser Annealing of Semiconductors”, Academic Press, New York, p.54, 1982.
 - A. Zakauskas, M. S. Shur and R. Caska, “Introduction to Solid-State Lighting” John Wiley and Sons, 2002.
 16. X.A Cao, E.B Stokes, P Sandvik, N Taskar, J Kretchmer, D Walker “Optimization of current spreading metal layer for GaN/InGaN-based light emitting diodes” Solid-State Electronics, Vol.46, p1235, 2002.
 17. Kwak, J. S. ; Park, Y. ; Seong, T. Y. , “Improvement of the light

- output of InGaN-Based light-emitting diodes using Cu-doped indium oxide/indium tin oxide p-type electrodes”, Appl. Phys. Lett. Vol.86, p213505, 2005.
18. S.S. Schad, M. Scherer, M. Seyboth and V. Schwegler, “Extraction Efficiency of GaN-based LEDs” Phys. Stat. Sol.(a) Vol.188, p127, 2001.
19. D. A Steigerwald, M. R. Krames, J. J. OShea, M. J. Ludowise, G. Christenson, Y. C Shen, C. Lowery, P. S. Martin, S. Subramanya, W. Gotz, N. F. Gardner, R. S. Kern, S. A. Stockman, “High-power AlGaInN flip-chip light-emitting diodes”, Appl. Phys. Lett. Vol.78, p3379, 2001.
20. K. S. Lee, E. J. Kang, S. J. Park, “Improved light-output and electrical performance of InGaN-based light-emitting diodes by microroughening of the p-GaN surface”, J. Appl. Phys. Vol.93, p9383, 2003.
21. Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. DenBaars, S. Nakamura, S., “Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening”, Appl. Phys. Lett., Vol.84, p855, 2004.
22. E. F. Schubert, J. W. Graff, K. Streubel, C. Karnutsch, “Omnidirectional Reflective Contacts for Light-Emitting Diodes”, IEEE electron device letters, Vol.24, p683, 2003.
23. R. H. Horng, S. H. Huang, D. S. Wu, Y. Z. Jiang, “Characterization of Large-Area AlGaInP/Mirror/Si Light-Emitting Diodes Fabricated by Wafer Bonding”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.43, p2510, 2004.

24. B. H. Yu, Y. H. Wang, "Junction Temperature and Thermal Resistance Restrict the Developing of High-power LED," Chinese Journal of Luminescence, Vol.26 ,p761, 2005.
25. N. Linder, R. Wirth, A. Jaeger, "High-Brightness AlGaInP light-emitting diodes", Proc. SPIE, Vol. 3938, p321, 2000.
26. D. S. Wu, S. C. Hsu, S. H. Huang, R. H. Horng, "Vertical-conducting p-side-up GaN/mirror/Si light-emitting diodes by laser lift-off and wafer-transfer techniques", Phys. Stat. sol.(a) Vol.201, p2699, 2004.
27. R. H. Horng, C. E. Lee, S. C. Hsu, S. H. Huang, C. C. Wu, C. Y. Kung, D. S. Wu, "High-Power GaN Light-Emitting Diodes with patterned copper substrates by electroplating", Phys. Stat. Sol.(a), Vol.201, p2786 , 2004 .
28. S. I. Na, G. Y. Ha, M. K. Kwon, I. K. Park, J. H. Lim, S. J. Park, M. H. Kim, D. Choi, K. N. Min, "Thermally stable and highly reflective AgAl alloy for enhancing light extraction efficiency in GaN light-emitting diodes" Appl. Phys. Lett., vol. 88 ,p043507, 2006
29. C.J. Chen, C.M. Chen, R.H. Horng " Thermal Management and Interfacial Properties in High-Power GaN-Based Light-Emitting Diodes Employing Diamond-Added Sn-3 wt.%Ag-0.5 wt.%Cu Solder as a Die-Attach Material" Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 39, p2618, 2010
30. Y. Xi and E. F. Schubert" Junction–temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage

method" Appl. Phys. Lett., Vol. 85, p2163, 2004

31. A.M. Khounsary, D. Chojnowski, and L. Assoufid "Thermal contact resistance across a copper-silicon interface" Proc. SPIE, Vol. 3151, p45, 1997
32. M. Bahrami, J. R. Culham and M. M. Yovanovich, "Thermal Resistances of Gaseous Gap for Conforming Rough Contacts" ,42nd AIAA Aerospace Meeting and Exhibit Reno, Nevada, USA, Jan 5-8, 2004

