2010 TOPCO 崇越論文大賞

論文題目

氮化鋁鎵/氮化鎵/氮化銦鎵電流散佈層應用於

大面積氮化銦鎵發光二極體

報名編號:<u>SC0015</u>

論文摘要

在白光發光二極體照明上的應用,以大面積發光二極體提高輸出功率並且能 有效提升轉換效率是未來的發展趨勢。但隨著高電流注入時,會增加 N 型電極附 近電流擁塞的情況。所以本論文提供一雙異質接面 "氮化鋁鎵/氮化鎵/氮化銦鎵" 電流散佈層,並以高電流注入時可獲得較低的接面溫度,並改善了電流擁塞現象 及達到光強度的提升。

第一章 導論

在 1962 年第一顆紅光發光二極體 (Light emitting diode, LED) 被發表出來 之後,往後的 30 年間紅光與綠光發光二極體不斷的提升亮度與良率,而這些發 光二極體大都用 AlInGaP 材料作成,但是關鍵的藍光發光二極體一直因為 AlGaInN 異質材料的成長困難,而無法被製造出來以發光二極體作照明應用。

直到日本的 Nichia 公司於 1996 年成長氮化鎵藍光發光二極體在藍寶石基 板上,並且大量地生產更高效率的藍、綠光發光二極體,使得紅、藍、綠光發光 二極體全彩化的夢想得以實現。相較於目前普遍的照明光源如:白熾燈泡雖然價 格便宜,製作簡單,但發熱量大,效率差,壽命短,且易破損。日光燈雖較白熾 燈泡省電,卻有嚴重的重金屬廢棄物污染的問題,在今日節能減碳的訴求下,兩 者已不符需求,而發光二極體具有多項的優勢例如:環保、體積小、壽命長、低 電壓電流操作等。有鑑於發光二極體具有多項的優勢,因此已被廣泛地運用在極 重視環保以及節能、省碳的文明社會生活中,目前發光二極體的應用市場包含了 汽車用燈、交通信號燈、景觀照明、大型路燈以及手機、數位相機、LCD 等背光 源,未來更期許發光二極體能夠成就固態照明的夢想 [1-4]。

氮化鎵(GaN)、氮化鋁(AlN)、氮化銦(InN)等Ⅲ-V族半導體材料,近 年來被熱門廣泛地研究,主要是因為它們具有直接能隙(direct band-gap)的特 性,並且可以透過這三種材料彼此成份的調變,來形成三元(ternary)或四元 (quaternary)的化合物半導體,其能隙(band-gap)可以由 0.6 eV 到 6.5 eV, 而其所對應的發光波長可以從遠紅光到深紫外光波段,因此廣泛地被運用在發光 二極體(Light Emitting Diode, LED)、雷射二極體(Laser Diode, LD)等光電元 件。

往後的幾年間,發光二極體的相關技術如雨後春筍般的蓬勃發展,各界研究的方向不外乎是如何提升發光二極體的內部量子效率 (Internal Quantum

Efficiency)、外部量子效率(External Quantum Efficiency)及光萃取率(Light Extraction)。而目前大面積白光發光二極體的效率最高可達近 100 lm/W,已遠超 過白熾燈泡的 60 lm/W,與日光燈不相上下,雖製作成本仍較高,但相信在不久的 將來可以固態照明全面取代目前市面上所有的白熾燈泡。

第二章 研究動機

在近年來,因應如中國大陸『十城萬盞』大型固態照明的需求越來越多,所 以發展新一代高功率照明技術是一項重要的研究議題。而目前有關於增加 LED 發光效率的方法包括:表面粗化 (surface roughness)、改變 LED 外觀之幾何形狀 (shaping),元件面積大型化 (large area chip)、覆晶式元件 (flip-chip)等 [5-9]。 而吾主要朝向將 LED 元件面積大型化,增加元件的操作電流,達到發光強度增 加的效果。但是 LED 元件面積大型化過程中,勢必增加電流傳導的困難性,電 流分佈不均勻將會造成 LED 發光效率的不佳,更會造成元件的熱效應產生,嚴 重時元件將燒毀。

近幾年來,有許多技術研究指出可以增加電流散佈的特性如:設計元件電極 配置,來改善電流的均勻性,以得到高光強度輸出 [10-12]、或在 P 型氮化鎵下 方加入一高阻值電流阻擋層,以減少電流直接向下導通的成份,並增加側向式電 流散佈均勻性 [13-15]、以及以透明導電氧化物 (transparent conductive oxide, TCO) 薄膜取代金屬合金薄膜做為 P 型電流散佈層,並可以調整 P 型電流散佈層與 N 型氮化鎵接觸層的片電阻值匹配度,藉以改善透光及電流擁塞的問題 [16],而一 般的 N 型氮化鎵接觸層的片電阻較大於 P 型透明導電層,所以會使得 N 型區域 的電流散佈長度較短,使電子電洞復合發光區域圍繞於 N 型電極的周圍,元件會 形成較高的局部溫度及熱效應產生。

而改善電流擁塞的現象,主要概念可於大面積發光二極體在高電流注入時, 可使電流經由低阻值的 N 型電流散佈層增加側向傳導的能力,以期望改善電流的 均勻性。例如:以氮化鋁鎵 (AlGaN)/氮化鎵 (GaN) 異質接面形成二維電子氣 (Two-dimensional electron gas, 2-DEG) 具有較佳的電流散佈效果,並且可提升 LED 的發光效率;優化 N 型氮化鎵半導體的晶體品質與獲得較低的阻值得到較 高的發光效率、在 LED 的多重量子井的下方加入一層氮化銦鎵 (InGaN) 之電流 散佈層,可得到低串聯電阻與高功率 LED,如圖 1、2 所示 [17-20]。

吾探討傳統 N 型氮化鎵發光二極體,與單異質接面"氮化鋁鎵/氮化鎵"結構、雙異質接面"氮化鋁鎵/氮化鎵/氮化銦鎵"結構,應用於發光二極體及光強度的 改善,再分別以 STR Inc. 的模擬軟體建構三種發光二極體結構,分析能帶模擬及 電流傳導分佈、發光行為上的差異性。接著藉由量測分析 LED 的光電特性、接面溫度及量子井的壓電特性等,另外為了探討電流傳導(current spreading)的行為,採用傳導線模型量測(Transfer Length Method, TLM)與計算 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的片電阻值(Sheet resistance),並搭配 LED 等效模 型計算電流散佈長度(Spreading length)來分析電流的傳導以及發光行為的差異 性。



圖 1 具氮化銦鎵電流散佈層之發光二極體能帶結構圖



圖 2 具氮化銦鎵電流散佈層之光強度與調變電流分佈圖

第三章 研究方法

一、論文架構

本論文分成兩大部份:第一部份主要分析 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的特 性與形成的原因,並分析電流密度分佈對於電流散佈長度的變化,以及比較垂直與 側向電流密度的分佈情形,並以 STR Inc. (Semiconductor Technology Research) 所開發的 SimuLED 多尺度發光二極體模擬軟體分析。第二部份利用 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構應用於大面積發光二極體,並針對元件的改善與特性 進行分析與比較。

第二部份主要說明元件的結構設計、元件能帶模擬與三維空間的電流密度分析,以及探討壓電極化效應對於多重量子井的光性與物性實驗結果與分析。最後 將電流散佈的特性應用於元件上,分析元件的電性、光性及元件在高電流下的熱 穩定性實驗結果並歸納整篇論文,且作結論。

二、電流散佈層磊晶結構設計

在此章節中,吾主要說明 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的元件結構設計,以 及標準的元件製作流程。而吾主要以波長為 450 nm 的藍光發光二極體為研究對 象。分別在藍寶石基板上與不同的 N 型電流散佈層上,以有機金屬氣相沈積法 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)成長標準的發光二極體結 構;其基本的發光二極體結構如圖 3 所示,依序包括:20 nm 氮化鎵成核層 (GaN nucleation layer),1000 nm 無掺雜氮化鎵緩衝層 (un-doped GaN buffer layer), 3000 nm 矽掺雜 N 型氮化鎵歐姆接觸層(Si-doped GaN contact layer) 其濃度約 為 5×10^{18} cm⁻³,應力釋放層 (Strain Release Layer, SRL) - In_{0.06}Ga_{0.94}N (3 nm)/GaN (12 nm) 五個周期,多重量子井 In_{0.15}Ga_{0.85}N (3 nm)/GaN (10 nm) + 個周期,30 nm 鎂掺雜 P 型 Al_{0.1}Ga_{0.9}N 電子阻擋層 (Mg-doped Electron blocking layer) 其濃度約為 5×10^{17} cm⁻³,130 nm 鎂掺雜 P 型氮化鎵歐姆接觸層 (Mg-doped GaN contact layer) 其濃度約為 5×10^{18} cm⁻³,最後成長 P 型 In_{0.06}Ga_{0.94}N/GaN 超晶格歐姆接觸層(P-type super lattice contact layer)。

N 型電流散佈層的結構設計,吾期望獲得高度的電子聚集於 2-DEG 通道 中,可以降低 N 型電流散佈層的片電阻值,可使電子能更均勻散佈於水平面上, 如圖 4 所示,使電子更有效地注入於量子井中,增加電子與電洞的直接復合效率 (Radiative recombination efficiency),所以吾的電流散佈層結構設計分別為: LED A 為成長傳統 N 型氮化鎵接觸層,再成長標準發光二極體結構,如圖 3(a) 所示;

LED B 為傳統 N 型氮化鎵之上,成長 N 型 Al_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN 異質結構以及 標準發光二極體結構,而 AlGaN/GaN 之間具有較強的自發性極化,所以在 AlGaN/GaN 靠近 GaN 的介面側會形成 2-DEG,而矽掺雜濃度分別約 1×10¹⁸ cm⁻³/1×10¹⁸ cm⁻³,如圖 3(b) 所示;

LEDC為傳統N型氮化鎵之上,成長N型 In_{0.06}Ga_{0.94}N/GaN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N 異 質結構及標準發光二極體結構,而 GaN/InGaN 之間具有較強的壓電性極化,所以 在 GaN/InGaN 靠近 InGaN 的介面側會形成 2-DEG, 所以 In_{0.06}Ga_{0.94}N/GaN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N 可形成連續性雙通道 2-DEG,而掺雜濃度分別約 5×10¹⁸ cm⁻³/1×10¹⁸ cm⁻³,如圖 3(c) 所示。除了以上所述的發光二極體 結構作為元件分析,另外成長與電流散佈層同樣條件的N型磊晶半結構,分別為 Sample A、B、C 如圖 3 所示,作為材料的厚度與電性上的片電阻量測分析,將 於以下章節詳述。



圖 3 發光二極體設計結構示意圖: LED A 為傳統結構, LED B 具 AlGaN/GaN, LED C 具 AlGaN/GaN/InGaN 雙異質結構發光二極體



圖 4 元件與電流散佈層結構及位置,與增加電流散佈能力示意圖

第四章 研究分析

一、二維能帶模擬特性分析

能帶的傾斜與極化電場有關,所以吾所設計結構主要希望於異質接面中,可 以自發性極化與壓電性極化場的形成與方向性,形成連續性的二維電子氣以聚集 更多的電子於其中,以期降低整體的串聯電阻、片電阻值等,並可使電子較易於 側向導通。

由於大面積化發光二極體的電流擁塞問題可以經由降低 N 型半導體層的阻 值而改善電流擁塞的問題,所以本節主要分析三種發光二極體的 N 型電流散佈層 的形成原因,而以下所有能帶的模擬皆處於晶格全應變 (Fully strain)的情況,以 及處於注入電流密度為 90 A/cm²;以下藉由發光二極體的能帶模擬圖,觀察靠近 N 型半導體區域的電子濃度分佈狀況,並分析電流散佈層的差異性。

LED A 為標準發光二極體結構,而 N 型半導體層主要靠掺雜游離的電子作 為降低半導體層的阻值,如圖 5(a) 所示;而 LED B 的結構設計是加入一層 N 型 的 Al_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN 異質結構及標準發光二極體結構,而 AlGaN/GaN 之間具有較 強的自發性極化,所以在 AlGaN (Top layer)/GaN (Bottom layer) 結構會引發更多 的正離子於靠近 AlGaN 介面側,而靠近 GaN 的介面側會形成 2-DEG ,可以使 電子易聚集於此,如圖 5(b) 所示;而 LED C 的結構設計是加入一層 N 型 In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N 異質結構及標準發光二極體結構,而 GaN/InGaN 之間 具有較強的壓電性極化,所以在 GaN (Top layer)/InGaN (Bottom layer) 結構會引 發更多的正離子於 GaN 介面側,而靠近 InGaN 的介面側會形成 2-DEG, 所以 In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N 可形成雙通道 2-DEG,並且可使更多的電子濃度聚集 於此,如圖 5(c) 所示。

而根據能帶圖所示,LED A 的電子濃度於 N 型半導體中,約為 (1.2×10¹⁹ cm⁻³),而 LED B 的電子因為具有 2-DEG 的形成,所以電子濃度聚集約為 (2.6×10¹⁹ cm⁻³),而 LED C 的電子因為具有雙通道的 2-DEG 形成,所以理論上應可聚集更多的電子於其中,電子濃度分佈為 InGaN/GaN 介面中為 (4.45×10¹⁹ cm⁻³),電子濃度於 GaN/AlGaN 的異質接面中為 (2.6×10¹⁹ cm⁻³)。

根據模擬能帶圖的變化與理論上的電子濃度計算,搭配三維空間的模擬,模擬分析加入 AlGaN/GaN、AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的元件特性,及發光面積對電流密度的分佈情況,以及分析 N 型半導體層的側向與垂直方向的電流密度分佈,最後並搭配電流散佈長度的定義,以定量分析電流散佈層對於整體發光二極體元件電流密度分佈的差異度。





圖 5 具電流散佈層之發光二極體能帶模擬與電子濃度分佈圖

二、三維元件模擬特性分析

本節主要模擬試片在三維空間的光電特性,並調變注入電流的電流密度分佈 情況。如圖 6 所示,此圖為模擬調變注入電流分別為 150 mA、350 mA、500 mA, 以及由 Z 軸方向觀察電流密度的分佈。而整體的電流密度分佈情形隨著注入電流 變大,電流密度的擁塞現象隨之劇烈上升,是因為當通過二極體的電流密度加大 時,因為元件於 N 型半導體的側向電阻為固定值,而 P-N 接面間的垂直電阻會 隨著注入電流加大而下降,所以二極體接面間的壓降降低,通過的電流密度增加, 所以使得聚集於電極附近的載子增多,以及使得少數載子在異質接面中的的逸流 現象增多。所以才造成隨著電流增加,而電流擁塞現象也更加嚴重,如以下算式 可表示電流散佈長度與電流密度的關係式 [20-22]。

可以推至下式,得知電流散佈長度與電流密度的關係為:

$$L_{s} = \sqrt{\frac{2V_{a}}{J_{\theta}(\frac{\rho_{t}}{t_{t}} + \frac{\rho_{n}}{t_{n}})}}$$
(2)

如圖 6 所示,此圖為模擬調變注入電流於大面積發光二極體的電極設計與電 流密度分佈,其包括 P 型電極、 N 型電極與透明導電層;由模擬結果可以觀察 到,於調變電流模擬三種 LED 結構,電流散佈的特性於 LED C 為最佳,LED B 亦有 降 低電流 擁塞 的 現象,所以當加入 氮化 鋁 鎵 結構 或 是 雙 異 質 接 面 (InGaN/GaN/AlGaN)所形成的 2-DEG,可以有效地侷限電子並增加電子濃度而 降低 N 型半導體的阻值,而改善電流的散佈特性。



圖 6 模擬三維元件結構之調變注入電流對電流密度分佈圖

由圖 7 所示,為模擬三維空間中,水平方向(X軸方向)電流密度分量變化, 而此圖亦是分析調變電流為 350 mA 時的 N 型半導體區的電流密度分佈圖,垂 直軸為表示 N 型半導體區的厚度,水平軸為表示模擬元件 N 型電極之間的距 離,而此圖表示為電流導通時的水平方向(X軸方向, J_x)電流密度分量變化;在 此藉由定量比較電流散佈的影響程度,因 J(x) \propto 1/exp,所以當電流密度遞減至 J(x) = (1/ exp \Rightarrow 0.368) · J(0) 時,則定義其距離為電流散佈長度[23]; 而 LED A 的電流散佈長度則定在電流密度為 600 A/cm² 時,於 N 型電極間的距離為 382 µm,LED B 的電流散佈長度為 422 µm,LED C 的電流散佈長度為 460 µm,所 以可得知在電流散佈的模擬與改善有達到顯著的效果,而改善程度分別約 10 % (LED B)、20%(LED C)。

經由以上元件的結構分析與電流散佈的特性分析與模擬,此新穎的 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構應可以應用於元件上,並且可有效改善電流擁塞的情況,提升量子效率、降低操作電壓或元件的串聯阻值等光電特性;但是,由於此電流散佈層是由 InGaN/GaN/AlGaN 的雙異質結構所形成,接面之間具有晶格不匹配所形成的壓電效應,進而有效地侷限電子並增加電流散佈的特性,但也造成此雙異質結構對多重量子井的應力或極化效應造成影響,而影響發光二極體的量子效率與電子電洞的波函數分佈機率,進而改變發光效率。

所以吾將此 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構應用於元件上,分別以倒晶格向量 空間、光激發光量測,以分析量子井的應力與強度變化的關係;再以電激發光與 片電阻量測、發光二極體的接面溫度等光電特性,分析此 AlGaN/GaN/InGaN 異 質結構主要以何種因素提升光強度以及影響的程度與趨勢。



圖 7 三維元件結構於 350 mA 的水平(X-axis)方向電流密度分佈圖

三、元件極化效應與光激發螢光光譜特性分析

(一) 量子井應力分析

由於此電流散佈層是由 InGaN/GaN/AlGaN 的雙異質結構所形成,並且是利 用接面之間具晶格不匹配所形成的壓電效應,而有效的侷限電子並增加電流散佈 的特性。

而 R. Czernecki. et.al 研究團隊,對於雙異質 InGaN/GaN/AlGaN 結構的材料 特性提出相關的研究 [24]。利用氮化鋁鎵(AlGaN)形成的舒張應力(tensile strain)可以抵消氮化銦鎵形成(InGaN)的壓縮應力(compressive strain),並以 GaN 成長於 InGaN 之上使 InGaN 結構穩定。並且藉由量測異質結構的表面彎曲 程度、差排缺陷密度及 X-ray 繞射,說明此結構應為全應變(fully strain)結構。

但此雙異質結構可能具有應力的影響,而影響發光二極體的量子效率與電子 電洞的波函數分佈機率,進而改變發光效率。而量子井成長於異質結構的應力變 化,可由倒置空間向量圖(Reciprocal space mapping)分析並佐以變強度光激發 光、電激發光量測量子井的波長變化程度,分析量子井的應力與強度變化的關係, 以去除應力影響量子井發光效率的因素;並搭配元件的光影像分佈、片電阻分析 與接面溫度的分析以證明試片的光強度提升是由改善電流擁塞現象所造成。

所以吾以結構 LED A、B、C 量測倒置空間向量圖 (Reciprocal space mapping),分析量子井成長於異質結構的應力變化,並以變強度光激發光、電激發光量測量子井的波長變化程度,分析量子井的應力與強度變化的關係;並以結構 LED A、B、C 分析多重量子井的週期厚度與銦含量,以及與 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構同樣條件的 N 型磊晶半結構,作為量測估算異質材料的厚度以及鋁、銦的含量。

由圖 8 所示,假設多重量子井結構 A、B 與 C 為全應變 (fully strain)的狀態下時,於氮化鎵主峰左側的第一個繞射峰為超晶格應力釋放層(strain relase layer, SRL) 第一階繞射峰,而第二繞射峰則為多重量子井的第一階繞射峰;並利用布拉格定律推導,多重量子井的平均晶格常數均為 13 nm,以及量子井的平均銦含量為 15%。

吾對於量子井的應力變化分析,先以非對稱軸(1015)布拉格繞射分析倒晶 格向量空間量測(reciprocal space maps, RSM),如圖9所示。由倒晶格空間座標 (Q-space)得知,氮化鎵的繞射主峰與第一階 SRL 繞射峰、多重量子井的第一階 繞射峰幾乎重疊於同一 △Qx 軸上,表示多重量子井的水平 a 軸晶格常數與氮化 鎵的晶格常數幾乎相同,因此量子井結構的應力是處於全應變的狀態下,因此多 重量子井的應力不受到異質結構影響,進一步再以光激發光量測多重量子井的光 強度變化與影響。



圖 8 (In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN) 多重量子井 X-ray 繞射圖



圖 9(In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN) 多重量子井(105) 倒置空間圖

(二) 量子井定性壓電場特性分析

當 InGaN/GaN 量子井能帶結構受到極化場的作用時,其能帶結構會受到改變 而傾斜。此時量子井對載子的波函數(wave function)產生空間侷限效應,電子與 電洞重新分佈,稱之為量子侷限史塔克效應(quantum confined Stark Effect, QCSE),並會造成幅射復合的能量下降,所以在發光頻譜上會呈現紅位移 (red-shift)的現象,進而影響多重量子井的量子效率(quantum efficiency)。

當隨著電激發光的注入電流或是光激發光的強度逐漸提升時,量子井中的自 由電子與自由電洞數量也會隨之增加,逐漸遮蔽極化電場的影響,而傾斜的能帶 會隨著電流密度上升逐漸趨於平坦化,並且隨著壓電場的減小造成幅射復合的能 隙變大,進而造成光譜藍移 (blue-shift)的現象。吾由變化不同的電激發電流量、 光激發強度改變波峰位移量及強度變化,比較多重量子井成長於不同異質結構的 內建電場大小。由圖 10、11 所示,由定強度的光激發光量測觀察到,LED B 與 LED C 的波峰位移量非常接近,約為 3 nm 左右,以及光激發光變強度量測 (power dependent photoluminescence)積分光強度的變化量也非常接近,所以由 AlGaN/GaN、AlGaN/GaN/InGaN 異質結構所形成的LED B 與 LED C 結構的多重 量子井應不受到應力與極化效應的改變而影響發光效率。



圖 10 發光二極體結構於光激發光強度與光譜分析分佈圖



圖 11 發光二極體結構於變強度光激發光強度與波長位移量分佈圖

另外在電激發光的量測與分析結果如圖 12 所示,在量測上吾採用脈衝式電 流源以變電流的方式,循環周期 (duty cycle)為1%,1 KHz,量測變電流的波峰 位移量及強度變化。由變電流的電激發光量測觀察到, LED B 與 LED C 的波峰 位移量皆與傳統發光二極體 LED A 的波峰位移量相同,約藍移 6 nm 左右,表示 發光二極體的內建電場非常接近,並不受到異質結構的極化效應影響。

反而由觀察電激發光的光強度變化時,由圖 12 所示,於調變電流時,在越 高電流注入下,其 LED A 的光強度較易呈現飽和的現象,而 LED B 與 C 於高 電流注入時,則較不易呈現飽和的現象;由此可知,本章節的總結為,由 AlGaN/GaN、AlGaN/GaN/InGaN 異質結構所形成的 LED B 與 LED C 的多重量子 井應不受到應力與極化效應的改變而影響發光效率,反而應為異質結構所形成的 電流散佈層,改善電流擁塞的特性而提升發光二極體的發光效率,而以下章節主 要以分析具電流散佈層元件的光電特性,並以定量分析影響及改善的程度。



圖 12 發光二極體元件於脈衝式變電流電激發光強度與光譜分佈圖

四、元件電性與片電阻特性分析

(一) 片電阻量測與電流散佈特性分析

由前一章節的實驗可得知,量子井的光激發積分強度與應力變化非常接近, 所以量子井的發光效率提升應由提升 N 型電流散佈的效果所造成。

所以在評估此 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的元件特性時, 吾先藉由 N 型區 域的片電阻值的量測與定性分析,以確認此散佈層是否具有低電阻值的特性。再 藉由應用於大面積化的發光二極體結構上,量測元件的電流-電壓特性以觀察操作 電壓、串聯電阻與理想因子等基本電性的分析與討論。

如圖 13 所示,雙異質結構 (氮化鋁鎵/氮化鎵/氮化銦鎵) 的各別厚度亦利用 布拉格繞射量測估計鋁、銦含量及厚度,其氮化鋁鎵厚度及含量為 (30 nm, 10 %),氮化鎵厚度為 (20 nm)、氮化銦鎵厚度及含量為 (15 nm, 6%),並以此條件 成長 N 型半結構以量測片電阻與計算。



圖 13 氮化鋁鎵/氮化鎵/氮化銦鎵之 X-ray 繞射圖

吾以遷移長度量測法(Transfer Length Method, TLM)量測與計算片電阻值 與電流散佈的影響因子。而所謂的遷移長度量測理論,指的是將電流在金屬與半 導體間所經過的路徑,看成一個傳輸線的等效電路,並利用傳輸線阻抗的特性, 求出金屬與半導體歐姆接觸的特徵接觸電阻值與片電阻值。以及分析元件電流-電 壓特性的高電壓區域與低電流區域,可單獨分析元件的串聯電阻值與理想因子的 變化,而詳細的理論與計算則於下章節詳加敘述。 因為傳統元件的正、負電極必須製作在同一側(共平面電極),這種的電極 配置形式勢必存在電流均勻性的問題。Hyunsang Hwang 和 E. F. Schubert 所屬的 兩個研究團隊,對於傳統式發光二極體的電流傳導行為提出相關的研究 [25-27]。 而 x 為距 n-pad 之距離,根據理論公式定義出電流傳導長度(current spreading length)Ls 為:

$$\boldsymbol{L}_{s} = \sqrt{\left(\boldsymbol{\rho}_{c} + \boldsymbol{\rho}_{p}\boldsymbol{t}_{p}\right) \frac{\boldsymbol{\rho}_{n}}{\boldsymbol{t}_{n}} - \frac{\boldsymbol{\rho}_{t}}{\boldsymbol{t}_{t}}}^{-1}$$
(3)

可以清楚看出,最理想的電流均勻散佈條件為 ρ_n/t_n=ρ_t/t_t,所以在吾中希望 藉由量測 N 型半導體層的片電阻值 (sheet resistance) 與計算電阻率的變化,以定 性得知此結構應具有改善電流擁塞的特性。

並根據以上的量測模型, 吾採用圖 3 所示之 N 型半結構製作量測模型, 分 別為 sample A、B 與 C。量測的結果如圖 14 所示,隨著電極間的距離加大 sample A 的斜率為最大, sample C 的斜率最低, 並且可經由計算得知 sample C 的 片電阻值 (10 ohm/□) 為最小。由此結果得知, 具有 2-DEG 通道的電流散佈層 結構, 能有效降低片電阻值而增加側向導通的能力, 改善元件的電流擁塞情形。 而主要認為能夠改善發光二極體電流擁塞的影響因子, 可由式 (3) 得知改善電流 擁塞的因子可由降低 P 型透明導電層與 N 型半導體層的電阻率 (Resistivity), 以下則經由量測獲得的片電阻值計算 N 型半導體層的電阻率。

而以量測的 N 型半導體厚度約為 2 μ m,經由計算獲得 sample A、B、C 各 別的電阻率為 1×10⁻² Ω -cm、0.41×10⁻² Ω -cm、0.21×10⁻² Ω -cm,如表 1 所示。由此結果並搭配式 (4-1) 所示之改善電流擁塞的因子,因加入 N 型電流散佈層的 sample B、C 結構可以降低電阻率,所以可以將此電流散佈層應用於元件上,並且 改善電流擁塞的現象。



圖 14 N 型半導體層之總電阻值與電極間距分佈圖

表 1	Ν	型半導體層之片電阻值、	·電阻率	,接觸電阻值
-----	---	-------------	------	--------

	Sheet Resistance (ohm/sq)	Resistivity (ohm-cm)	Contact Resistance (ohm-cm²)
Sample A (n-GaN)	50	1×10-2	6.81×10⁻⁵
Sample B (AlGaN/GaN)	20.4	0.41×10-2	3×10-6
Sample C (AlGaN/GaN/InGaN)	10.2	0.21×10-2	2.8×10 ⁻⁵

(二) 元件電流電壓特性分析

元件為具有 N 型電流散佈層之大面積 (45 mil × 45 mil)發光二極體;在電性特性方面,定義額定電流 350 mA 時的順向偏壓為其操作電壓;並且在逆向偏壓為 -5 V 時定義元件的逆偏特性。

其電特性分別整理於圖 15 與表 2。由圖可知,LEDA、B 與 C 是 LEDs 各 自具有大約相同的逆向偏壓特性。吾主要以電流散佈層應用於元件,而順向偏壓 相較於傳統元件皆有較低的操作電壓,在此與元件之順向偏壓電特性最相關的因 素便在於元件的電流散佈能力;承如之前所描述,因具有二維電子氣通道形成的電 流散佈層,可以降低片電阻值與電阻率,進而提升 N 型電流的散佈能力使元件的 操作電壓與串聯電阻下降。



圖 15 元件之順向、逆向電流電壓特性曲線

表 2 元件之額定順向操作電壓、逆偏電流值與元件串聯阻值

	Vr @ 350 mA	lr @ -5 V	Series Resistance (ohm)
LED A (n-GaN)	3.71	1.35×10 ⁻⁶ A	1.89
LED B (AlGaN/GaN)	3.63	4.74×10 ⁻⁷ A	1.81
LED C (AlGaN/GaN/InGaN)	3.59	5.52×10 ⁻⁷ A	1.71

(三) 大面積元件光均匀分佈特性分析

由前一章節可得知,具有 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構之 LED B、C,藉由 元件電性上的量測可證明具改善電流擁塞的現象。以下將量測元件的二維光影像 分佈,從元件於空間上的發光強度與均勻度,比較電流散佈的改善程度。

另外,再將元件的電流擁塞改善程度比對元件的接面溫度,並定量分析元件 的接面溫度與光強度的變化。進而驗證光強度的提升是由改善電流擁塞的現象, 為降低元件的接面溫度所影響。 其光影像的分佈特性整理於圖 16 所示,其光強度主要以強度歸一化進行分 析,比較調變電流注入時的電流與光強度分佈的情形。當注入電流加大時,同樣 因為電流散佈的長度會因電流密度上升而下降,並且擁塞的情況大都圍繞於 N 型 電極附近。但 LED B、C 結構具有改善擁塞的能力,由圖中所示,其電流密度加 大時,與 LED A 相比仍有較多的發光面積圍繞於 P 型電極附近,達到改善電流 擁塞;進一步定量了解改善的程度以及電流擁塞的差異性,吾將光影像圖的強度 分佈數據化,以軟體計算光強度的幾何平均值 (root-mean square, RMS),由圖 17 所示。

LED A



圖 16 發光二極體之變電流二維光強度分佈影像圖

當降低電流擁塞的現象時,應可以獲得較為均勻的光影像分佈,與 LED A 相 比,光強度的離散程度由(9556 a.u) 各別降為 LED B(7795 a.u)、LED C(7098 a.u),而離散程度的下降,代表為光強度的峰值與最低值的分佈差異度越小;而改 善的程度經由計算後, LED C 與 LED A 相比約提升 20%,而LED B 與 LED A 相比約提升 10% 左右。經由以上光影像與強度分佈的分析,下一章節以發光二 極體的接面溫度銜接電流散佈的改善程度與電激發光強度的提升,是否為主要提 升的因素與改善程度。



RMS : 9556

RMS : 7795

RMS : 7098

圖 17 發光二極體注入電流 500 mA 之光強度離散程度分佈圖

(四) 元件接面温度與光功率分析

本節主要比較元件的接面溫度變化與電流擁塞的關係,由於電流擁塞的現象 會造成電極附近有局部高溫存在,雖然元件的光強度可能亦會上升,但也較亦達 到飽和與熱衰退的現象,並且較不易應用在高電流、高亮度的元件上。故本節主 要分析高電流注入時,具 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的元件是否適合應用於高 功率元件及接面溫度與光強度的定量分析。

吾主要以 250 mA、350 mA 的電流驅動及量測元件的接面溫度變化,如圖 18 所示。於 350 mA 各別量測 LEDA、 B 與 C 的接面溫度分別為 132.8 0 C、120.1 0 C 與 113.4 0 C ,其接面溫度隨著電流散佈的均勻性提升而下降,以及操作電壓 於高電流的驅動下,也隨之下降,此結果也顯示出具 AlGaN/GaN/InGaN 異質結 構之結構,可以降低元件的接面溫度與操作電壓,進而提升光輸出功率,其 LED C 的改善程度約為 20 0 C 左右。

而光強度主要利用封裝元件調變驅動電流,以積分球量測具有 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構發光二極體 LED A、 B 與 C 的發光強度值,而於 350 mA 的額定操作電流時所量測的光強度值分別為 93.7、105.6、115.2 mW,以 及外部量子效率也分別為 9.7 %、10.3 %、11.9 %,如圖 19 所示,其 LED B、C 的改善程度約為 10 %、20 % 左右。 由以上結果得知,具有強極化特性所形成的電流散佈層,因應力的方向與因 素而使量子井不受到極化效應的影響,進而以改善電流擁塞的現象,達到光強度 提升與元件接面溫度、操作電壓、串聯電阻等光電特性下降,使得 InGaN/GaN/AlGaN 散佈層結構適用於高功率發光二極體。



圖 18 發光二極體元件之接面溫度與熱穩定性分佈圖



圖 19 發光二極體之調變電流對外部量子效率與光強度分佈圖

第五章 結論

為了提高發光二極體之光強度,將發光二極體元件面積大型化,使元件操作 在高電流下,以得到更高的光強度輸出,但是由於元件面積大型化,電流均勻性 的問題也比小面積的元件具有更嚴重的電流擁塞現象,吾主要利用雙異質接面"氮 化鋁鎵/氮化鎵/氮化銦鎵"電流散佈層的發光二極體結構來改善電流均勻性的問 題。

故本論文在具有 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構之發光二極體的光電特性探討 方面,與傳統"氮化鎵"發光二極體相較之下,具單異質接面"氮化鋁鎵/氮化鎵"緩 衝層、雙異質接面"氮化鋁鎵/氮化鎵/氮化銦鎵"電流散佈層發光二極體的光強度改 善,依序增強至 (在350 mA 下)93.7 mW、105.6 mW、115.2 mW,以及外部量子 效率也分別為 9.7%、10.3%、11.9%,其 LED B、C 的改善程度約為 10%、20% 左右。另一方面,由於壓電極化效應可能會影響多重量子井的量子侷限史塔克效 應,所以吾以倒晶格向量空間量測具有此 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的量子井 結構,觀察發光二極體多重量子井的晶格應力變化,其氮化鋁鎵/氮化鎵/氮化銦鎵" 電流散佈層之多重量子井的應力處於全應變的狀態,並且與傳統結構、單異質接 面"氮化鋁鎵/氮化鎵"的應力狀態相近。

以及由變化不同的電激發電流量、光激發強度改變波峰位移量及強度變化, 比較多重量子井成長於不同 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的內建電場大小,由定 強度的光激發光量測觀察到,LED B 與 LED C 的波峰位移量非常接近,約為 3 nm 左右,以及光激發光變強度量測 (power dependent photoluminescence)積分光強 度的變化量也非常接近。另由變電流的電激發光量測觀察到, LED B 與 LED C 的 波峰位移量皆與傳統發光二極體 LED A 的波峰位移量相同,約藍移 6 nm 左右, 表示發光二極體的內建電場非常接近,並不受到異質結構的極化效應影響。但傳 統發光二極體 LED A 的電激發光強度卻與 LED B 與 LED C 不同,並且較易於高 電流注入下達到飽和,所以吾認為此異質結構應具有改善電流擁塞的特性。

而為了驗證與比較不同 AlGaN/GaN/InGaN 異質結構的光電特性,吾藉由片 電阻值的量測與計算,由此結果得知,具有 2-DEG 通道的電流散佈層結構,應能 有效降低片電阻值而增加側向導通的能力,改善元件的電流擁塞情形。經由計算 獲得 sample A、B、C 各別的電阻率為 $1 \times 10^{-2} \Omega$ -cm、 $0.41 \times 10^{-2} \Omega$ -cm、 0.21×10^{-2} Ω -cm,以及元件的操作電壓串聯電阻也隨著電流散佈的能力提升而下降,分別為 LED A @ 3.71 V, 1.89 Ω ; LED B @ 3.63 V, 1.81 Ω ; LED C @ 3.59 V, 1.71 Ω 。 當電流密度加大時,吾也藉由比較電流與光影像的分佈均勻能力是否提升, 其 LED B、C 與 LED A 相比具有較多的發光面積圍繞於 P 型電極附近,達到改 善電流擁塞;及進一步定量了解改善的程度以及電流擁塞的差異性,吾將光影像 圖的強度分佈數據化,以軟體計算光強度的幾何平均值 (root-mean square, RMS) 而離散程度的下降,代表為光強度的峰值與最低值的分佈差異度越小;光強度的 離散程度由 (9556 a.u) 各別降為 LED B (7795 a.u)、LED C (7098 a.u),而改善 的程度經由計算後, LED C 與 LED A 相比約提升 20%,而 LED B 與 LED A 相比約提升 10%。

最後,由於改善電流散佈的能力可以由增加 P 型氮化鎵接觸層與透明傳導層 的片電阻值以達到改善,但是其發光二極體的接面溫度反而會因電阻的增加而上 升,並且光強度並不一定隨之增加。但藉由加入異質結構形成的電流散佈層,可 以降低大面積化元件的片電阻值等特性,所以可藉由接面溫度的量測得知,於高 電流的驅動下,隨著電流散佈的均勻性提升,而使元件的接面溫度以及操作電壓 也隨之下降,此結果也顯示出,具電流散佈層之結構,可以降低元件的接面溫度 與操作電壓,進而提升光輸出功率,以及高電流注入量測發光二極體的接面溫度 亦依序降低為 (Ref @ 350 mA) 132.8 °C、120.1 °C、113.4 °C,可以增加商業上元 件使用的熱穩定性。

第六章 參考文獻

- B. Damilano, A. Dussaigne, J. Brault, T. Huault, F. Natali, P. Demolon, P. De Mierry, S. Chenot, and J. Massies, Appl. Phys. Lett., Vol. 93, 101117 (2008).
- [2] Sung-Nam Lee, H. S. Paek, H. Kim, T. Jang, and Y. Park, Appl. Phys. Lett., Vol. 92, 081107 (2008).
- [3] G. Chen, M. Craven, A. Kim, A. Munkholm, S. Watanabe, M. Camras, W. Götz, and F. Steranka, phys. stat. sol. (a) Vol. 205, pp. 1086-1092 (2008)
- [4] M. R. Krames et.al, Proc. SPIE, Vol. 3938, pp. 2-12 (2000)
- [5] Chul Huh et.al, J. Appl. Phys., Vol. 93, pp. 9383-9385 (2003)
- [6] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett., Vol. 84, pp. 855-857 (2004)
- [7] M. R. Krames et.al, Appl. Phys. Lett., Vol. 75, pp. 2365-2367 (1999)
- [8] S. J. Lee, S. W. Song, Proc. SPIE, Vol. 3621, pp. 237-248 (1999)
- [9] J. J. Wierer, et.al, "High-power AlGaInN flip-chip light-emitting diodes", Appl. Phys. Lett., Vol. 78, pp. 3379-3381 (2001)
- [10] X. Guo, Y.L. Li, and E. F. Schubert, Appl. Phys. Lett., Vol. 79, pp. 1936-1938 (2001)
- [11] Arpan Chakraborty, L. Shen, H. Masui, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra, Appl. Phys. Lett., Vol. 88, 181120 (2006)
- [12] Z. Gong, et.al, IEEE Trans. Electron. Devices., Vol. 54, pp. 2650-2658 (2007)
- [13] Chul Huh, et.al, Proc. SPIE, Vol. 4445, pp. 165-171 (2001)
- [14] Chul Huh, Ji-Myon Lee, Dong-Joon Kim, Seong-Ju Park, J. Appl. Phys., Vol. 92, pp. 2248-2250 (2002)
- [15] C. Liu, Y.H Chen, M.P Houng, Y-H Wang, Y-K Su, W-B Chen, S-M Chen, IEEEPhoton. Tech. Lett., Vol. 16, pp. 1444-1446 (2004)

- [16] H. Kim, Seong-Ju Park, and Hyunsang Hwanga, Appl. Phys. Lett., Vol. 81, pp. 1326-1328 (2002)
- [17] Chin-Hsiang Chen, J. Vac. Sci. Technol. (A) Vol. 24, pp. 1001-1004 (2006)
- [18] J. K. Sheu, G. C. Chi, and M. J. Jou, IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 13, pp. 1164-1166 (2001)
- [19] Y. T. Rebane, Y. G. Shreter, B. S. Yavich, V. E. Bougrov, S. I. Stepanov, W. N. Wang, phys. stat. sol. (a) Vol. 180, pp. 121-126 (2000)
- [20] I. Eliashevich, Y. Li, A. Osinsky, C. A. Tran, M. G. Brown, Proc. SPIE, Vol. 3621, pp. 28-36 (1999)
- [21] W. B. JOYCE, S. H. WEMPLE, J. Appl. Phys., Vol. 41, pp. 3818-3830 (1970)
- [22] Hyunsoo Kim, et.al, Appl. Phys. Lett., Vol. 90, 063510 (2007)
- [23] X. Guo and E. F. Schubert, Appl. Phys. Lett., Vol. 78, pp. 3337-3339 (2001)
- [24] R. Czernecki, et.al, Appl. Phys. Lett., Vol. 91, 231914 (2007)
- [25] X. Guo and E. F. Schubert, J. Appl. Phys., Vol. 90, pp. 4191-4195 (2001)
- [26] Hyunsoo Kim, Ji-Myon Lee, Chul Huh, Sang-Woo Kim, Dong-Joon Kim, Seong-Ju Park, Hyunsang Hwang, Appl. Phys. Lett., Vol. 77, pp. 1903-1904 (2000)
- [27] Hyunsoo Kim, Seong-Ju Park, and Hyunsang Hwang, Appl. Phys. Lett., Vol. 81, pp. 1326-1328 (2002)