

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

質子佈植在 μ -Disk 元件上之研製(2/2)

計畫編號:932001INER014

受委託機關(構):中央大學

計畫主持人:紀國鐘

報告日期:93年11月30日

目錄

中文摘要.....	2
英文摘要.....	3
計畫目的.....	4
計畫緣起.....	5
執行方法與進度說明.....	6
結論與建議.....	10
參考文獻.....	21

中文摘要

製作微米結構(micro-structures, 3~20 μm)元件以形成區域發光體來改善元件之發光效率，其主要應用與發光二極體(LED)類似，而由於其發光效率可被提升 30~50%，故一直是項熱門的研究題目。本研究主要以氮化鎵等 III-V 族化合物半導體為發光材料，再利用半導體微影方式製成發光元件。接著以離子佈植或蝕刻(etching)法以做成區域發光之微米結構元件。

在微尺寸元製作上，我們使用了離子佈植技術來做為元件之電流侷限與光侷限並且配合微尺寸電橋來做為發光區域與 p-電極墊層之間的連接，如此可以達到簡化製程的效果。在電流-電壓量測時發現，在相同尺寸與電壓下，我們的元件呈現的電流較其他文獻報導的高(約高出 12~7.5mA 之多)，推測其原因可能是我們所設計的微尺寸電橋具有降低串聯電阻之功用。發光效率之量測發現以 10 μm 之元件最佳，推測其原因可能是發光直徑與電橋寬度(12 μm)相當有關，其詳細緣由須進一步探討。

Abstract

Micro-structured compound semiconductors have recently attracted considerable interest due to their application for the enhanced quantum efficiency of optoelectronic devices. The enhanced light-extraction of individual light-emitting materials, fabricated by micro-structures, were compared with the conventional LEDs.

Micro-scale lithographic patterning and ion implantation are used to fabricate these micro-structure devices. Device characteristics, such as the current-voltage characteristics, light output power, will be compared with those conventional LEDs.

For simplified the LED processes, we used ion implantation technique for current and optical confinement, and an micro-scale electro-bridge to connect the p-electrode and bonding pad. Under the same bias-voltage (12V) that we observed higher current values(10mA, for 10 μm device) in our devices compared to the literature's result (2.5mA for 10 μm device). This phenomena might be due to our electro-bridge design have lower series resistance. The light emitting efficiency of the 10 μm device is the best. This might be related to the electro-bridge width (12 μm) similar to emitting diameter (10 μm).

計畫目的

近來有關三族氮化物之發光元件，如藍色發光二極極體(light emitting diode- LED)及雷射(laser diode)均朝向微型化。當元件尺寸縮小至與發光波長相當時，新的物理現象及性質立即展現，如調製自發輻射(modified spontaneous emission)、增強量子效率(enhanced quantum efficiency)、及降低微共振腔之放射起始值(lasing threshold)，皆為須探討之基本特性。而且因為微型化之發光二極極體或雷射較傳統的邊射型放射元件較容易在單一晶片上製作成陣列形式和達到各別控制的效果。因此我們將利用傳統黃光微影(photo-lithography)及離子佈植(ion implantation)製程來製作微結構發光二極體(micro-disk LED)並探討其展現之特性。

計畫緣起

氮化鎵藍光材料應用在全彩 LED 顯示器、DVD 藍光雷射及白光照明等方面，其重要性一直廣受世界之重視。但也因為此材料特性掌控不易，而造成目前元件發光效率技術發展上的甚大障礙。本計畫利用製作微米結構元件，即為突破此困境而規畫，一則有開發新的專利的可能，一則有創新技術之可能。目前世界上亦有相當研究群努力投入其中。

本校在離子佈植技術已有多年的經驗，尤其在 III-V 族之發光及感光元件(如 LED、PIN、APD)製作皆已有相當經驗。如以離子佈植技術將原生 p 型氮化鎵磊晶薄膜轉質成 n 型，而形成具有 p-n 介面之元件，已有相當良好經驗與成果。另本校因教育部卓越計畫而建立之微光電實驗室，可利用此實驗室來製作所需之微米微細結構。故提出此計畫，期能加速 LED 白光照明時代的來臨與並培養氮化鎵藍光材料相關研究之人材。

執行方法與進度說明

將具有 InGaN/GaN 多重量子井(multi quantum well- MQW)之 GaN 磊晶材料使用微影製程來定義微結構發光二極體元件之尺寸，依設計其直徑分別為 3、5、7.5、10、15、及 20 μm ，然後利用中電流離子佈植機將鎂離子(Mg^+)植入於氮化鎵磊晶材料，使其破壞原有之晶格達到元件光隔絕(isolation)及傳導電流侷限(current confinement)之效果。接著利用高密度電漿蝕刻機(high density plasma etcher, HDP)定義出 n 型與 p 型區域隨後，即製作金屬歐姆接觸，並進行 I-V、發光二極體之光性及電性量測。

電流-電壓特性方面，我們用 HP4156C 半導體分析儀量測之，圖 1 可以看到微尺寸的發光二極體在相同的驅動電壓下會隨著尺寸越小其導通電流越小，推測原因為其串聯電阻會隨尺寸較小而愈大的現象。在固定電壓(12V)下我們的元件與其他研究團隊(Kansan State University, KSU)的結果(如圖 2 所示)比較，元件尺寸相同時，發現我們的元件呈現的電流較大(10mA/22.5mA, NCU 10 μm /15 μm 元件，<2.5mA/12.5mA KSU 10 μm /12 μm 元件)。可能的原因有二，其一是我們的元件之串聯電阻值較低，其二是我們元件的漏電流較大。由於我們元件在反向偏壓下的漏電流約為 μA 的等級，因此第二個原因應可排除。在大尺寸(300x300 μm^2)元件上我們的特性也與 KSU 的特性相

近。因此我們設計的微尺寸電橋具有降低元件串聯電阻之功用。

圖 3 為將 I-V 曲線取對數(log scale)後結果，I 為串聯電阻效應(effect of series resistance)、II 為擴散電流區(diffusion current region)、III 為通道電流區(tunneling current region)，其中 I、II 區為在製程技術及環境溫度可改變，但 III 區則是磊晶所產生的晶體缺陷(dislocation)造成。另外在製作過程中會影響 III 區特性為 HDP 乾式蝕刻，這會增加被蝕刻之高原(etched mesa)邊牆(side wall)的長度，因為氮化鎵材料為離子鍵結，所以在蝕刻後元件側壁容易有表面復合(surface recombination)的現象，這結果會讓元件在操作時有漏電流產生，不過在我們的量測結果(圖 3)可看到元件在低注入電流時曲線都相當接近，表示在製程上所造成之漏電流並不明顯不致於影響到元件的特性。

若將電流轉換成電流密度(current density)，如圖 4 可看到當尺寸越小時相同電壓下電流密度會越大，這是因為小尺寸注入功率較低所導致的熱效應較小，與大尺寸 $70 \times 70 \mu m$ 相比較圖 5 最大可差約 100 倍，故小尺寸可驅動的電流密度要比大尺寸要來的大很多。

圖 6 為這次實驗中最小尺寸 $3 \mu m$ 實際點亮照片，再來我們利用固定之電流密度(current density) $J = 600(A/cm^2)$ 量測 $20 \mu m$ 至 $3 \mu m$ 微尺寸 LED 圖 7，結果發現小尺寸 $3 \mu m$ 元件波長(波長較長)與其他尺

寸有很大差異，尺寸大的 blue shift 的現象愈明顯圖 8、圖 9，雖然 blue shift 與 Quantum well 結構 band filling 效應以及 Quantum confined Stark Effect 有關，但發光尺寸大小所造成的不同藍移程度目前未有資料記載有這情形。band filling 即是當 Quantum well 中的電子濃度增加時，由於電子逐漸填滿 Quantum well 的能階，因此使得 Quantum well 中電子的費米能階(Fermi level) 上升，而造成其 band gap 將會增大，所以電子電洞復合(recombination)所產生之光子的能量會變大，波長變短，形成 blue shift。圖 10，不過我們觀察 20 μm 在電流密度=5700(A/cm^2) 時已開始因為熱效應佔優勢而紅移(red shift)，這個情形與電壓-電流量測時所看到的特性有相關，小尺寸面積的元件所能承受的電流密度會相對提高以至於 red shift 也會隨之往後移，在 0.1mA~18mA 下，可算出每一元件最大的藍移程度圖 11，3 μm 最大光子能量移動可到 50meV 較 20 μm 130meV 要來的小很多。

在電壓-電流密度量測及電激發光量測時尺寸較小的元件皆有較特殊的表現，在光強度量測時可驗證是否所有的能量輸入皆會轉變成光能輸出，小尺寸在光強度的表現也能優異於其它較大尺寸，這是我們所預期的，首先看到的是圖 12 電流對發光強度，在微尺寸 LED 20 μm 元件最高光強度約在 35mcd 左右，而最小尺寸 LED 3 μm 元件最高發

光強度則在 2mcd 左右，相差約 17.5 倍，但將光強度均一化 (normalize); 電流-光強度密度(單位面積所發出光強度)圖 13 和輸入電功率-光強度密度(圖 14)可以很明顯看到尺寸較小則發光強度密度相對會強很多，但如果要考慮輸入電功率對發光強度比時在小尺寸的發光面積上表現就沒有很理想(圖 15)。若再將電流與發光強度均一化圖 16，這圖可以清楚看出在單位面積流過的電流所轉換出來的單位平均光強輸出，量測結果並不如我們所預期，在 $3\mu\text{m}$ ~ $20\mu\text{m}$ 範圍內大尺寸的效率要比較小尺寸要來的好，在微尺寸的一些論文發表中有提到，電子電洞在 Quantum well 內接合所產生的光子若能在最短的距離經由側面或表面射出將對發光效率有很大的提昇，小尺寸與大尺寸相較之下，其邊緣效應會遠大於較大者，所以我們再利用積分球來加以驗證，發現跟我們在正面收光量測中所看到的一樣小尺寸元件並無特別好的發光效率產生(圖 17)，而 $10\mu\text{m}$ 元件發光效率最好，可能是我們設計的電橋寬度為 $12\mu\text{m}$ 與發光元件直徑相當，但其原因仍待探討。

結論與建議

在微尺寸 LED 的實驗中我們所要探討的是，將發光二極體做成不同微尺寸元件時所表現出的電性以及物理特性，當然在我們完成了元件製作與量測後也得到了一些結果，不論在元件設計上與量測上都有一些較特別的發現，雖然目前在 Micro-disk 研究中有相當多的論文發表，但普遍性的都是只針對發光效率提昇來做研究，我們論文中所發現不只在發光強度的提昇，另外在電流密度上，或是電流電子激發光量測 EL，小尺寸的發光元件都有較為異常的表現，分以下為四點來做說明：

1. 在微尺寸(Micro-Scale)元件設計上我們使用了微尺寸電橋方式來做連接，再配合離子佈值做電流與光侷限，這樣結果可以讓製程較為簡化且沒有高原蝕刻(mesa etching)需 30° 斜角的困難度，且在電流電壓量測時，在固定電壓(12V)下我們的元件與其他研究團隊(Kansas State University, KSU)的結果比較，元件尺寸相同時，發現我們的元件呈現的電流較大(10mA/22.5mA, NCU $10\mu\text{m}/15\mu\text{m}$ 元件， $<2.5\text{mA}/12.5\text{mA}$ KSU $10\mu\text{m}/12\mu\text{m}$ 元件)。可能的原因有二，其一是我們的元件之串聯電阻值較低，其二是我們元件的漏電流較大。由於我們元件在反向偏壓下的漏電流約為 μA 的等級，因此第二個原因應可排除。在大尺寸($300\times 300\ \mu\text{m}^2$)元件上我們的特性也與 KSU 的特性相

近。因此我們設計的微尺寸電橋具有降低元件串聯電阻之功用。，這樣的電橋連接可以提昇電流傳遞效率，這對於製作微尺寸的發光元件是一項很重要的優點。

2. 另外在電流密度量測時，發現微尺寸元件會因為尺寸越小所能承受的電流密度愈大，這是在一般發光二極體量測所討論，我們認為是為小尺寸其所注入功率較低所等效熱效應較小所造成。

3. 在做電流電子激發光量測 EL 時，不同尺寸會有不同的藍移(blue shift)現象，越小尺寸的微尺寸元件藍移程度會越小，而要達紅移最後燒毀的電流密度比大尺寸的要來的大很多，雖然藍移跟 band filling 相關，但尺寸的大小所影響的效應還未有見有詳細的報告，我們猜想是因為溫度效應與藍移效應競爭所造成的。

4. 我們所製作的 Micro-Scale LED 經由光強度量測(正面收光)可以了解在相同的電流密度下， $10\mu\text{m}$ 元件之發光效率較好可能是我們設計的電橋寬度為 $12\mu\text{m}$ 與發光元件直徑相當，但其原因仍待探討。

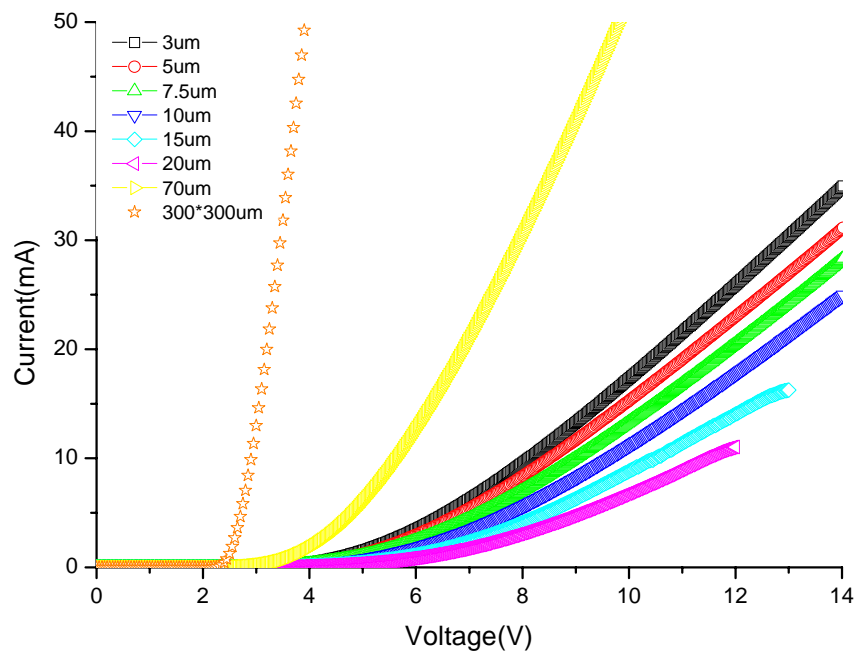


圖 1 不同尺寸變化對應 I-V 曲線

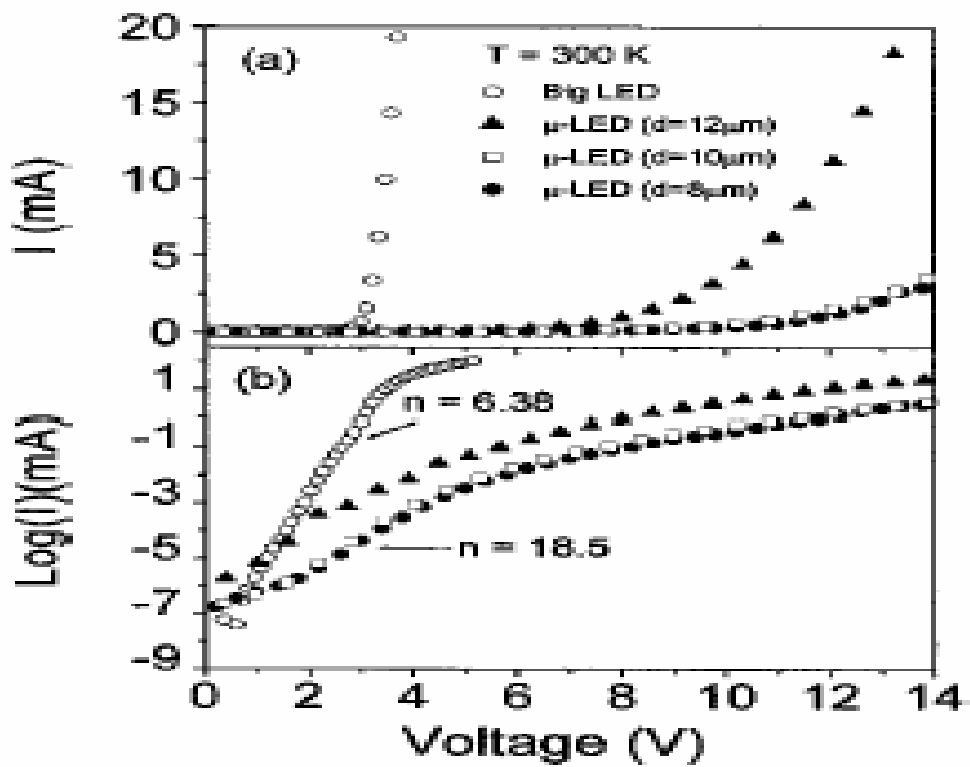


圖 2 Kansas 州立大學論文中 I-V 曲線

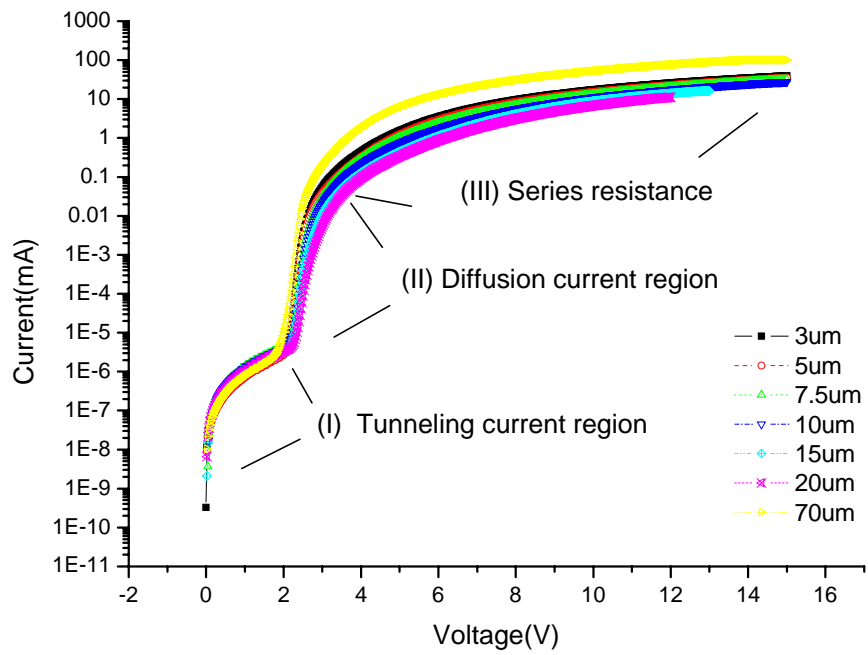


圖 3 不同尺寸變化對應 Log(I)-V 曲線

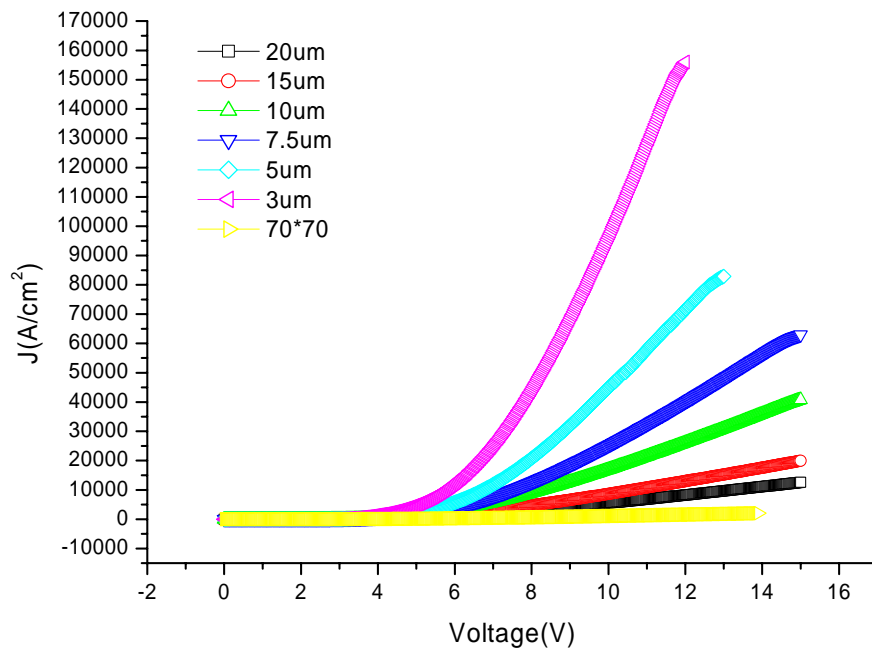


圖 4 不同尺寸變化對應 J-V 曲線

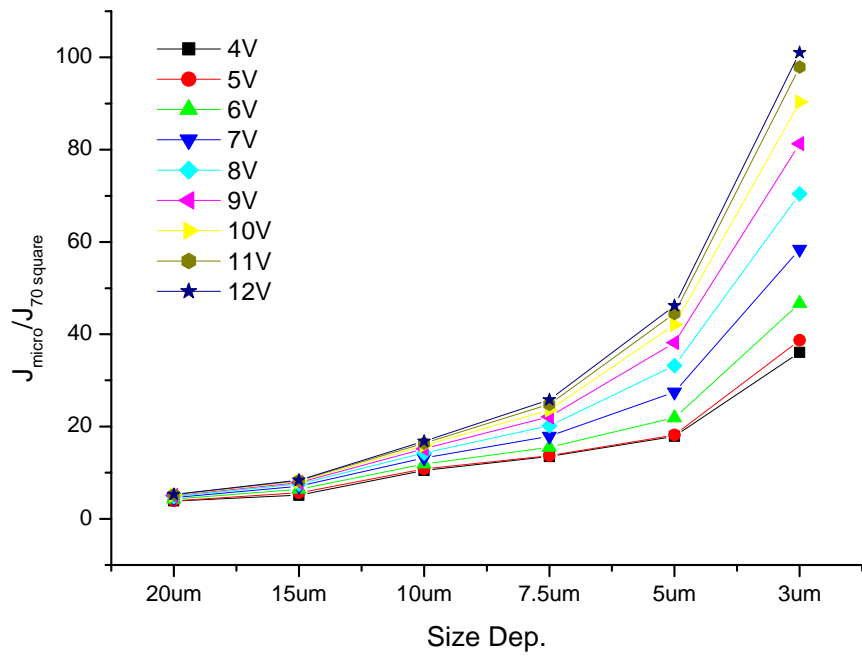


圖 5 不同電壓變化對 Size-J 曲線

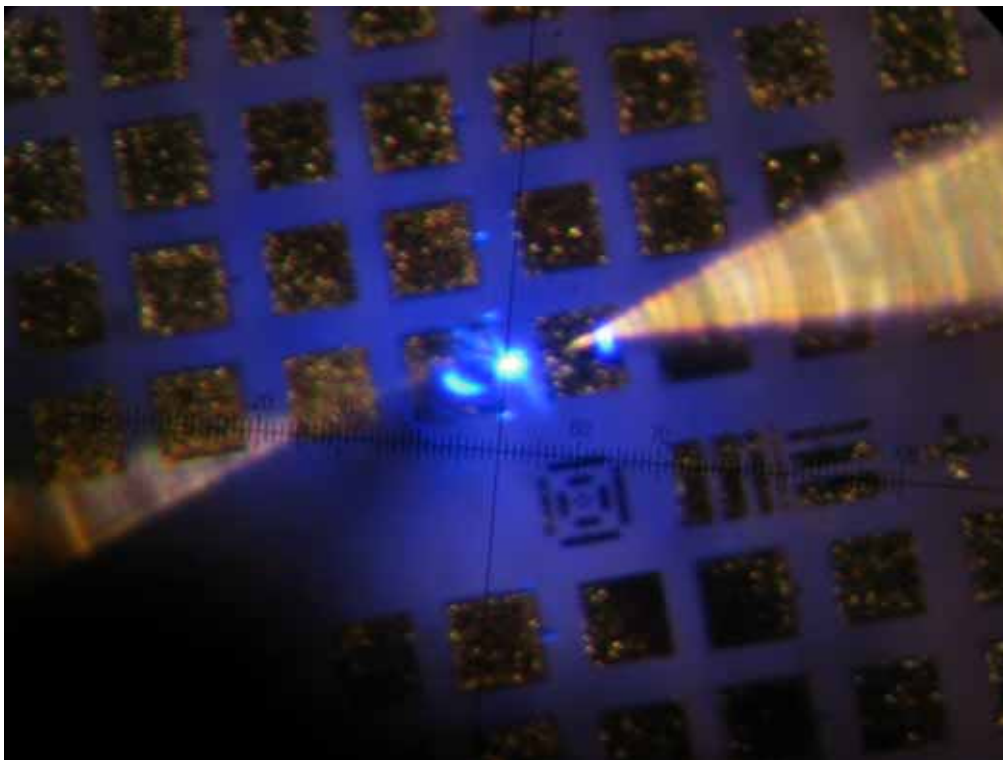


圖 6 Micro disk 直徑為 3um 發光照片

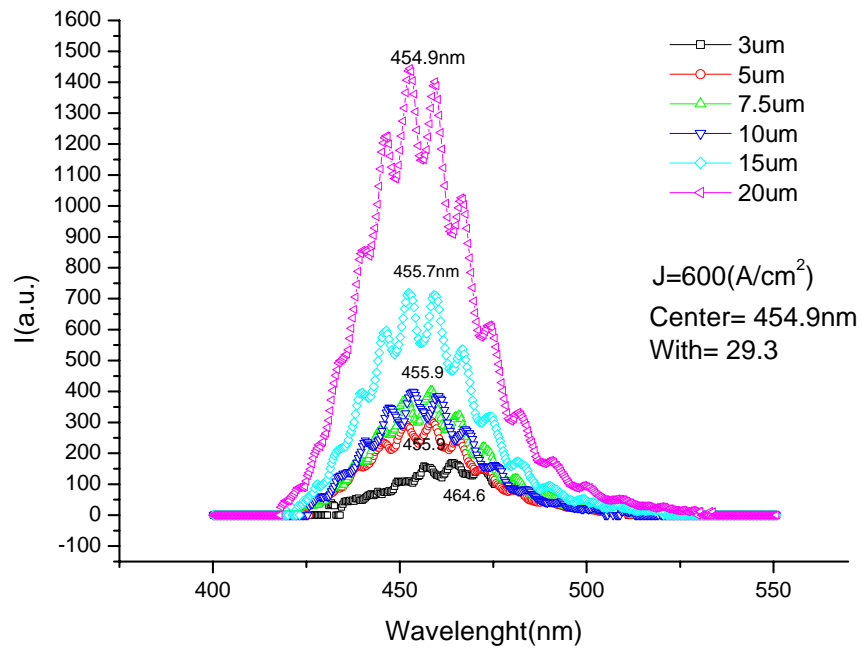


圖 7 電流密度 $J = 600(A/cm^2)$ 量測波長變化

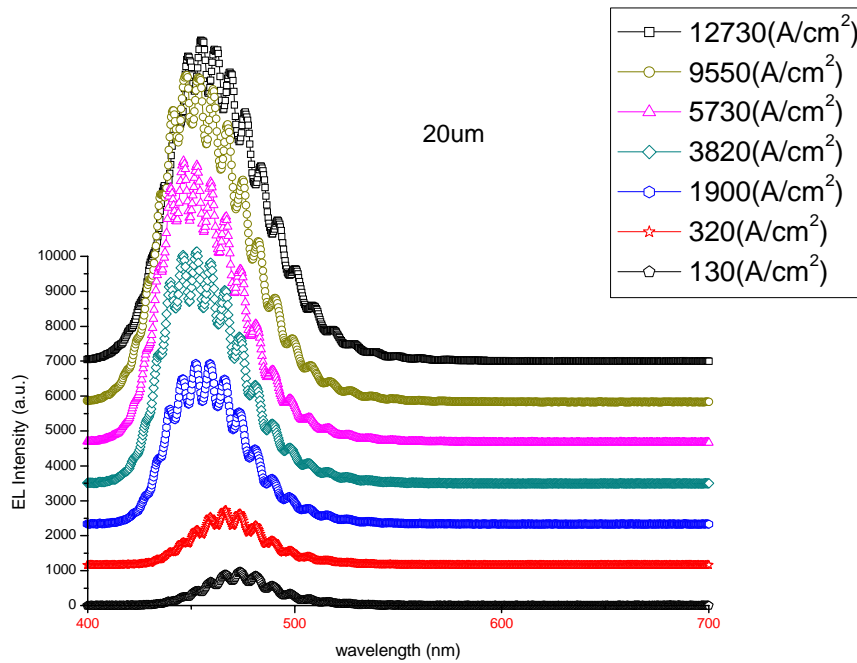


圖 8 以不同電流密度觀察 $20\mu m$ 元件之 EL 光譜

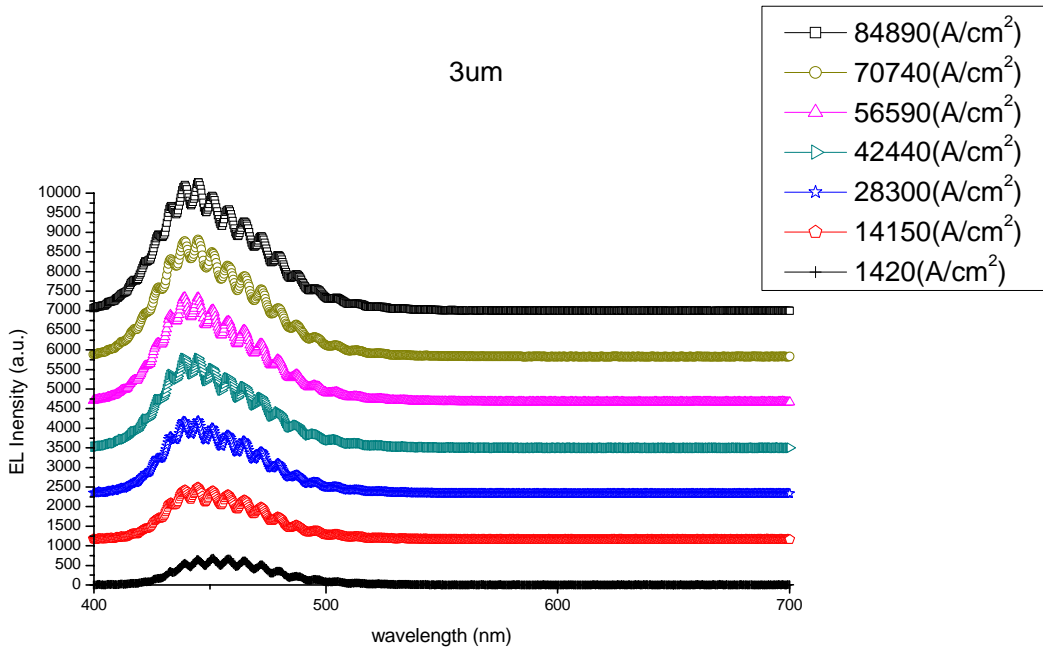


圖 9 以不同電流密度觀察 3μm 元件之 EL 光譜

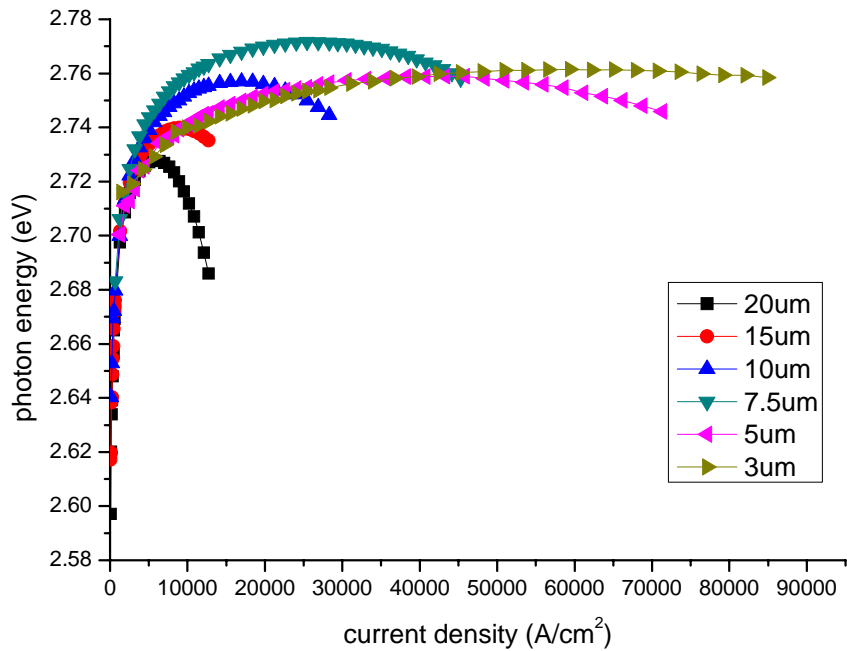


圖 10 以不同電流密度量測光子能量變化

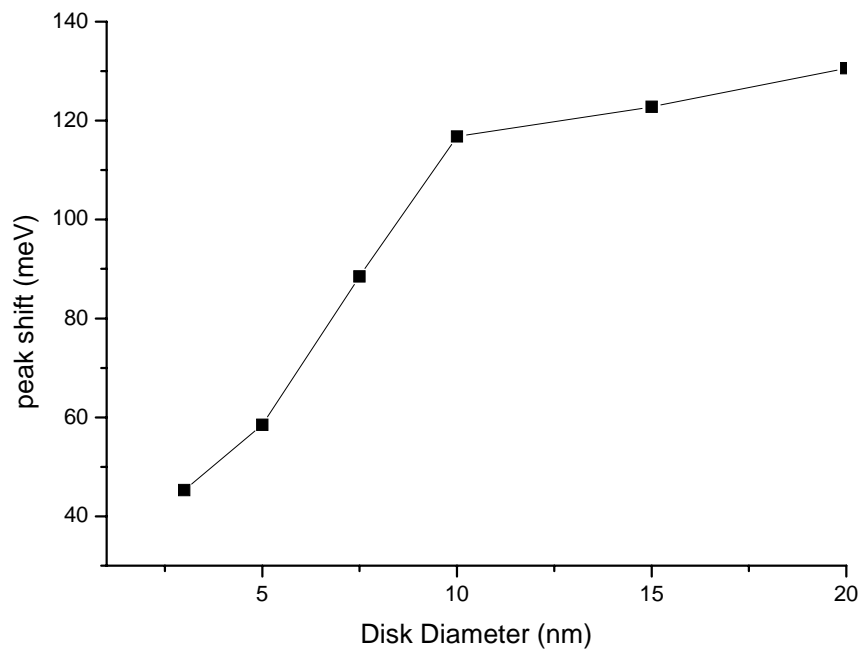


圖 11 不同尺寸對應光子能量位移程度(藍移)

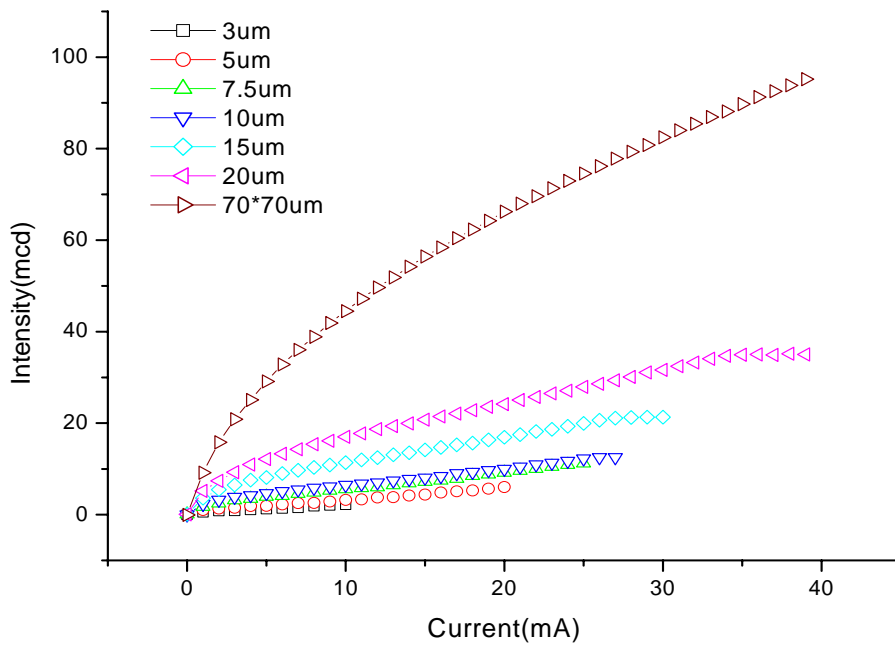


圖 12 正面收光量測:電流-光強度

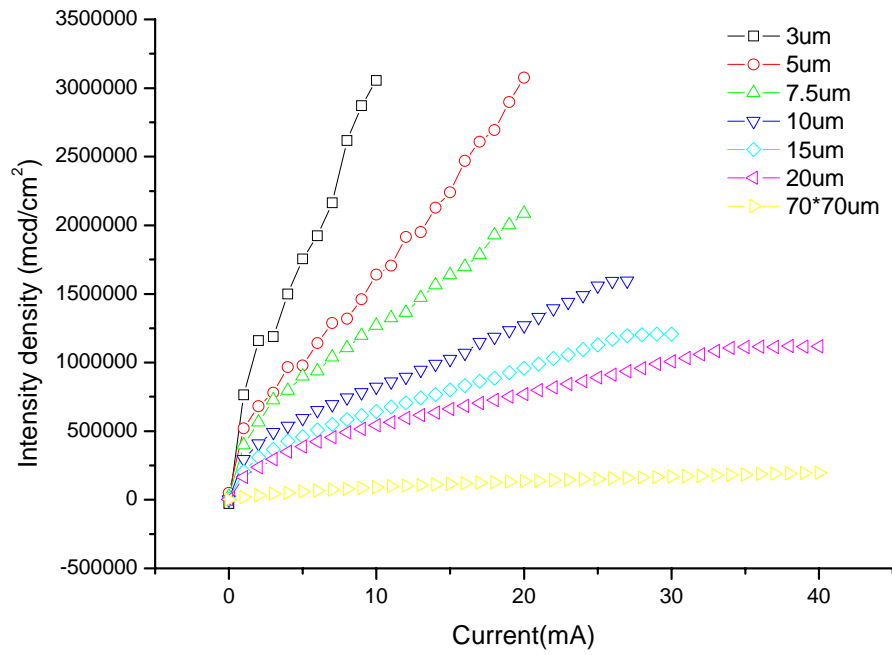


圖 13 正面收光量測: 電流-光強密度

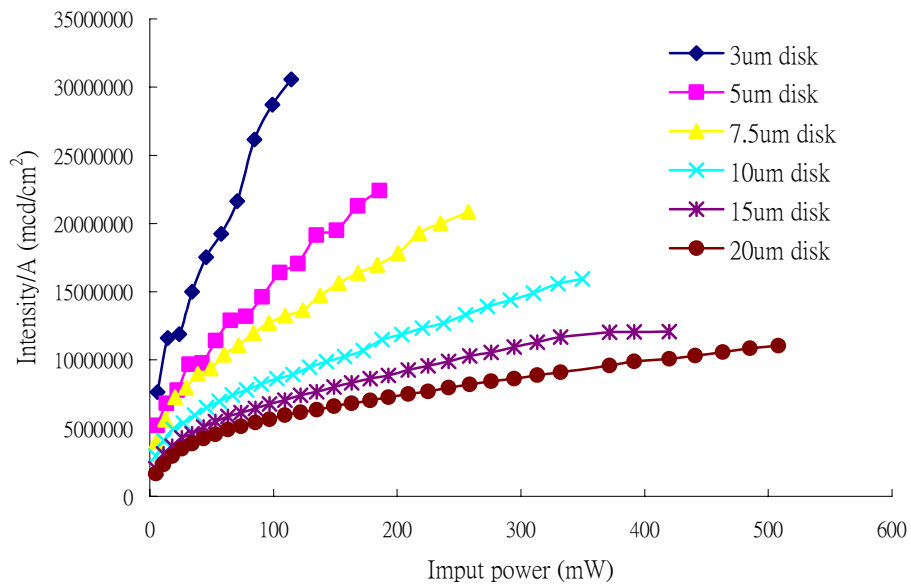


圖 14 正面收光量測: 輸入電功率-光強密度

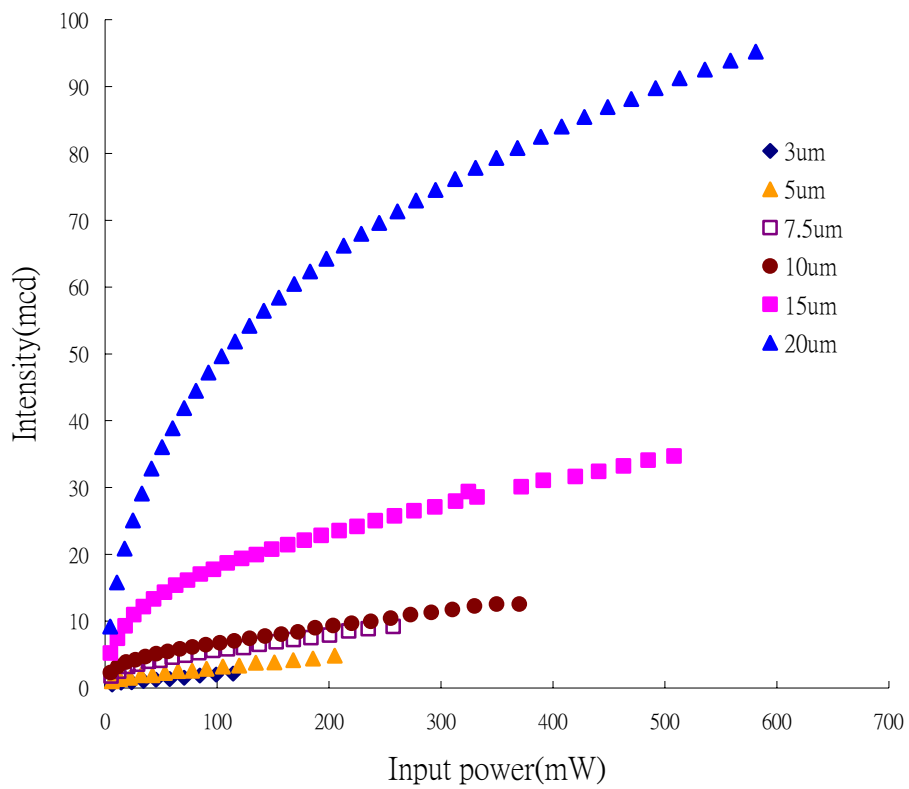


圖 15 正面收光量測:輸入電功率-輸出光強度

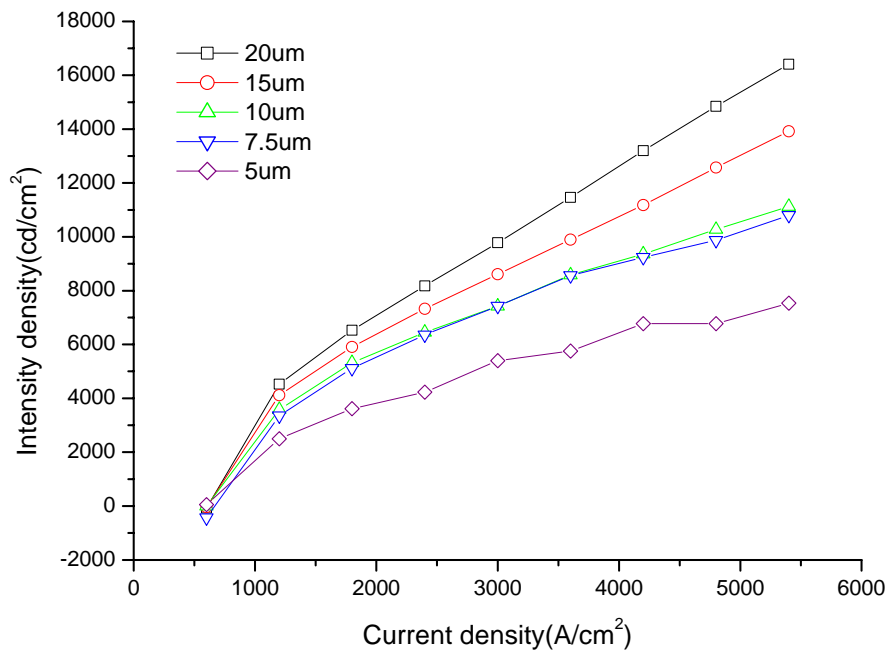


圖 16 正面收光量測:輸入電流密度-光強密度

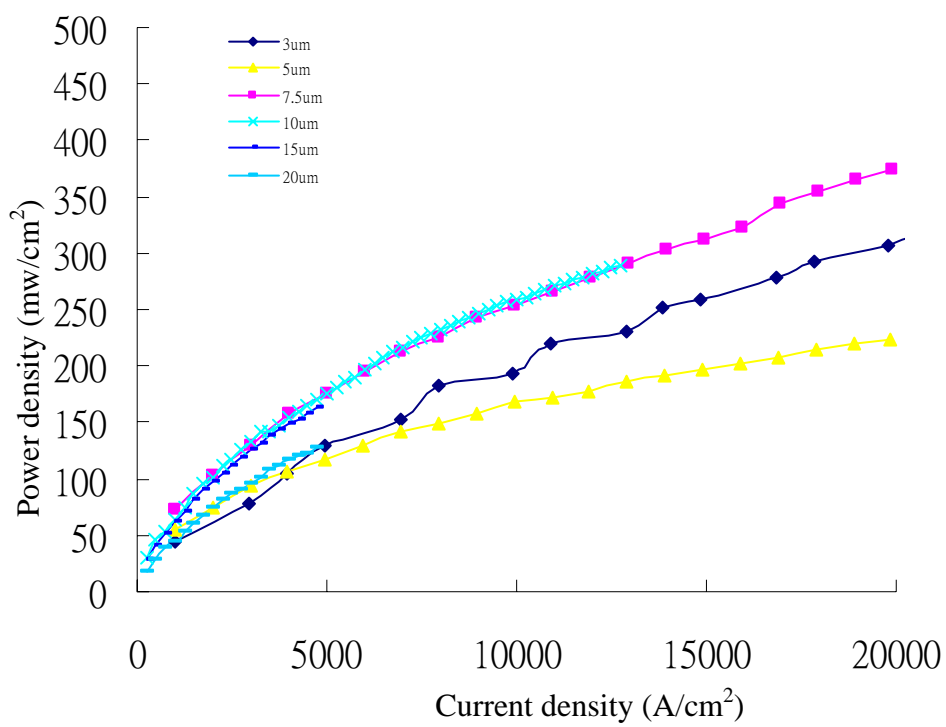


圖 17 積分球量測:輸入電流密度-光強密度

參考文獻

1. K. C. Zeng, L. Dai, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2563 (1999).
2. S. X. Jin, J. Li, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 631 (2000).
3. S. X. Jin, J. Li, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 3236 (2000).
4. H. X. Jiang, S. X. Jin, J. Li, J. Shakya, and, J. Y. Lin, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1303 (2001).
5. S. X. Jin, J. Shakya, J. Y. Lin and, H. X. Jiang, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3532 (2001).
6. S. Nakamura and G. Fasol, *The Blue Laser Diode* (Springer, New York, 1997).
7. H. Morkoc, S. Strite, G. B. Gao, M. E. Lin, B. Sverdlov, and M. Burns, *J. Appl. Phys.*, **76**, 1363 (1994).
8. R. K. Chang and A. J. Campillo, *Optical Processes in Microcavities* (World Scientific, Singapore, 1996).
9. R. A. Mair, K.C. Zeng, J. Y. Lin, H. X. Jiang, B. Zhang, L. Dai, H. Tang, A. Botchkarev, W. Kim, and H. Morkoc, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2898 (1997).
10. R. A. Mair, K.C. Zeng, J. Y. Lin, H. X. Jiang, B. Zhang, L. Dai, A. Botchkarev, W. Kim, H. Morkoc and M. A. Khan, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2898 (1997).