

利用於基板底部製作週期性柱狀結構來提升氮化鎵發光二極體出光亮度的表現

洪茂峰^{1,*}、王建鈞²、劉建志³、王永和²

¹成功大學微電子研究所

²成功大學光電科學與工程研究所

³南榮技術學院電機工程學系

mphoung@eembox.ncku.edu.tw

APPLIED PHYSICS LETTERS 91, 121109 _2007_

近年來由於全球暖化與環保議題的逐步受到重視，因此如何節能減碳，已經成為各國的科技發展重點。由於發光二極體是屬於冷發光，並非一般常用的白熾燈泡是屬於熱輻射發光，因此其電光轉換效率可有大幅度的提升，更能夠達到省能源的效果。截至目前為止，拜於磊晶技術的提升，目前發光二極體內部量子效率已經可以達到90%以上，甚至接近100%，但有鑑於發光二極體半導體材料的折射率與空氣之間的折射率差異頗大，因此在此兩介質介面間，會形成相當小的臨界角與相當大的Fresnel反射，使的發光二極體的光粹取效率大幅下降，導致整體的外部量子效率過低，因此從1962年第一顆紅光發光二極體發展出來後，就有許多科學家相繼思考解決此問題的方法。



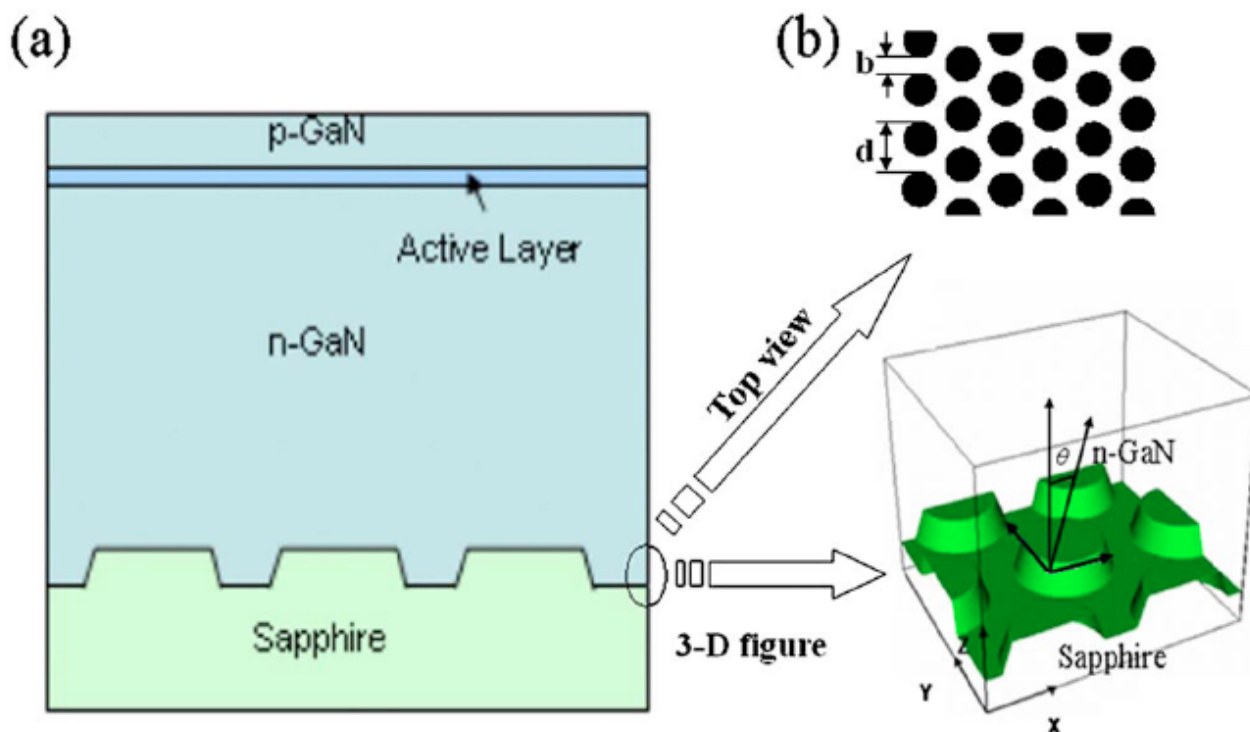
從過去一開始的chip-shaping到近期的surface-texturing的技術，皆能有效的改善外部量子效率過低的問題，於shaping LEDs上，可利用半圓形或是倒梯形的形狀來加以改善，但是由於製成過於複雜以及價錢過於昂貴，因此不適合量產，後續又有利用表面粗化的方式來加以改善此類問題，例如近期發展出來的利用奈米級光罩加上蝕刻、後段低溫成長或是光電化學蝕刻來達到表面粗化的效果，也由於半導體奈米及製程技術的進步，後續更甚至有利用奈米壓印或是利用電子束撰寫的技術來達到表面形成奈米級週期性陣列結構，近似於光子晶體的形式，來達成提升發光二極體出光效率的效果，但以上方式，都會造成發光二極體表面材料的損壞，甚至是會減少發光層的發光面積，有可能會造成表面懸鍵的增加，使的發光二極體在電光特性上的表現有下降的可能。

另一方面，Yamada提出了基板圖樣化的的方式來提升出光效率。其原理是希望利用基板的圖樣化，適度的增加磊晶的品質減少磊晶時差排的產生，來提升內部量子效率，藉此來提升整體發光二極體的外部量子效率。同時Wu等人在近期也提出了若適當的設計週期性的陣列結構，其將成為良好的反射層，能夠避免金屬材質的反射層其消光係數所產生電磁波吸收的問題，能夠達到更佳的反光效率，來提升元件出光的效果。

而本實驗室在此希望能夠在不破壞發光二極體磊晶的結構情況下，適當的提升發光二極體的出光亮度，因此我們將對基板上週期性陣列結構對光特性影響作一探討，並且希望能夠利用此結構來增強發光二極體垂直方向光的強度，來增加發光二極體光的指向性。

在發展之初，我們先利用FDTD的軟體加以探討氮化鎵材料的發光二極體在基板上製作不同陣列尺寸下，其對光特性的影響，之後再藉由模擬出來的結果加以實做比對。如圖一是本實驗的架構圖，藍寶石基板的折射率設定為1.76，而氮化鎵材料折射率則為2.5。而發光層的位置在空氣下方600nm處，氮化鎵整體材料

的厚度為 $5\ \mu\text{m}$ ，而底部柱狀結構深度為 $0.45\ \mu\text{m}$ 。之後將針對週期性陣列結構作一調變，柱狀結構的直徑設為 a ，兩柱狀結構之間的距離設為 b ，則週期設為 $a+b=d$ 。在本篇的研究將固定柱狀結構的直徑為 $1.5\ \mu\text{m}$ ，而兩柱狀結構間的距離則為 0.25 到 1.25 間做變化。



圖一 具有基板底部製作週期性柱狀結構之氮化鎵發光二極體

模擬出來的結果如圖三所示，當 d/b 的比例為 3 時有最佳的出光效率提升，可達 30% 左右。其詳細的尺寸關係請參考表一。為了進一步驗證模擬結果的準確性，因此進一步的將此結果實現在發光二極體上，其掃描式電子顯微鏡圖如圖二所示。

為了進一步解釋所設計的週期性柱狀陣列結構對光提升所造成的趨勢作一解釋，因此在這裡可以看成是一多狹縫繞射所造成的干涉現象，又為了解釋上的方便，因此在理論探討上，以雙狹縫繞射的模型加以解釋。根據雙狹縫的理論公式，可得到其強度可寫成是：

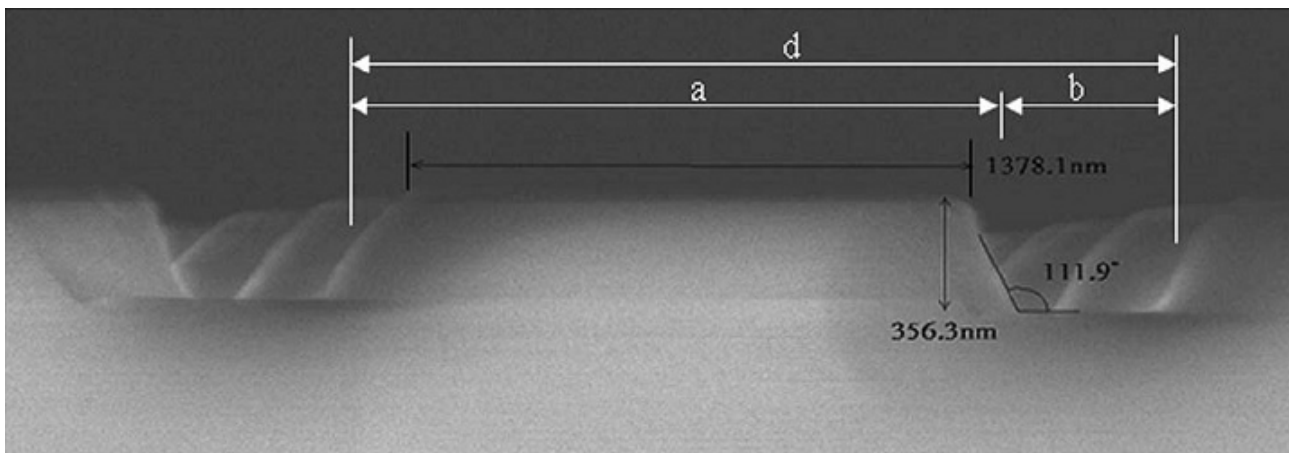
$$I = 4A_0^2 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \cos^2 \gamma$$

在這裡

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda} b \sin \theta \text{ 以及 } \gamma = \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

在此方程式裡， I 是強度， A_0 是振幅， b 是狹縫寬度， d 是狹縫分開的距離， θ 是介面垂直方向上的夾角。

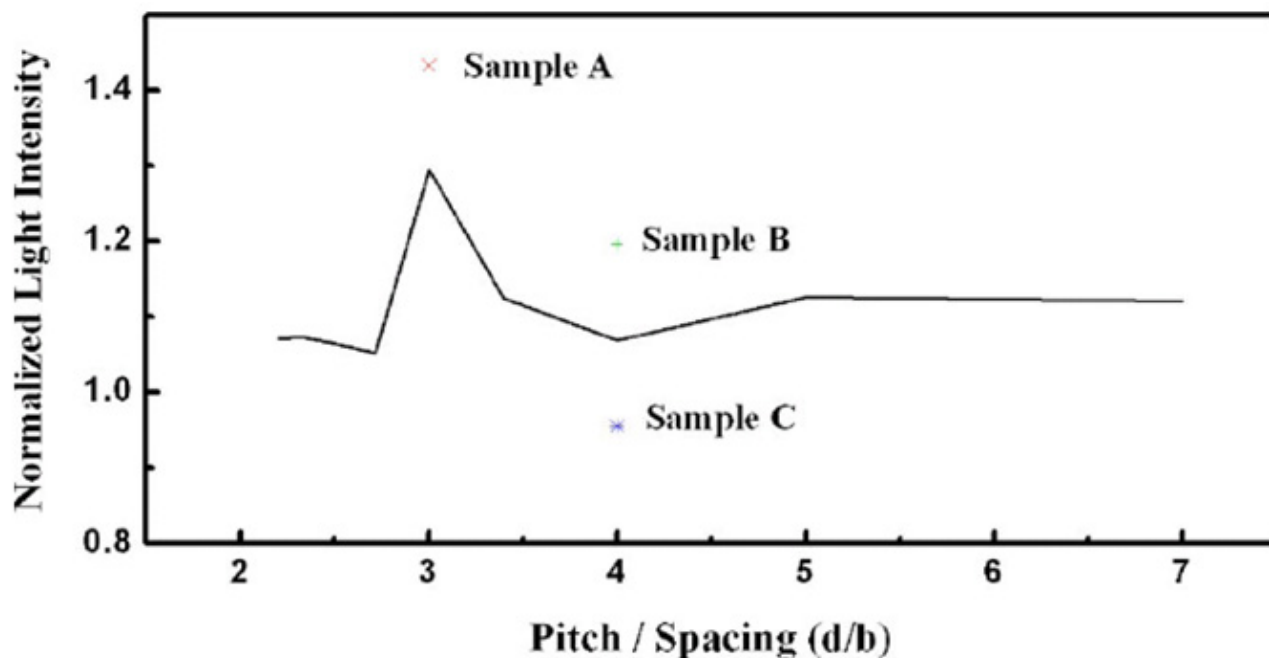
而以上的參數也可以同等對應成柱狀結構的距離 b 與柱狀結構的週期 d 。而在這裡，為了瞭解垂直方向光強度增加的趨勢，因此將探討第 0 階其強度的大小，來瞭解其發光二極體光的指向性變化。



圖二 基板底部週期性柱狀結構之掃描式電子顯微鏡圖

由雙狹縫原理可以發現，當 b 逐漸下降，其0階振幅的半高寬將會上升，當 b 趨近於零時， $(\sin^2\beta)/\beta^2$ 項則趨近於1，將會由 $\cos^2\gamma$ 項來主導，此項則是代表著干涉條紋的數目。因此當 b 不斷下降時，則 d/b 隨之上升，於圖三可以發現在 $d/b=3$ 之前有上升的趨勢，可以解釋成因為0階的半高寬不斷上升，增加了發光二極體垂直方向光的出光強度，但當 b 小到一定程度時， $(\sin^2\beta)/\beta^2$ 項則趨近於1，將會由 $\cos^2\gamma$ 項來主導，因此增加了干涉條紋的情況下，使的0階強度下降，垂直方向光的強度開始減弱，因此提升出光效率的效果，開始有下降的趨勢。

本實驗分別利用了A、B及C三組樣品做驗證，其 d/b 分別為3 ($d/b=1.5/0.5$)，4 ($d/b=2/0.5$)，及4 ($d/b=4/1$)，在圖三中可以發現在相同的 b 的情況下，樣品A優於樣品B，此趨勢與模擬的結果一致，可以利用先前所提到的模型加以解釋，然樣品B與樣品C在 d/b 皆為4的情況下，樣品B其出光效率之提升優於樣品C，可以推測是因為樣品C的柱狀結構尺寸為樣品B的兩倍，因此在相同的單位面積下，其柱狀結構單元數較少，減少了其光繞射的機制，因此可能反而使光更容易向下穿透，導致出光效率比商用發光二極體更差。



圖三 d/b 與提升出光效率之關係圖

因此在這裡本實驗在所提出的結構尺寸範圍區間中，已經得到最佳化的發光二極體出光效率提升，可以達

到30%左右，同時也提出了適當的物理模型加以解釋，且模擬及實驗得到的結果相互符合，除了證明此模型於此區間範圍可以適用及方便簡化並加以預測可能的趨勢結果外，也可以進一步證明模擬軟體的準確性，外來可以利用模擬軟體加以預測可能的尺寸結構所造成的趨勢加以判斷，除了縮短研發的時程外，更可進一步減少研發時所造成金錢上的花費。在此，未來希望利用此方法找到更精確的模型外，也可以得到最佳的出光效率尺寸結構大小。

Copyright 2008 National Cheng Kung University