

# InGaN-GaN 多層量子井(MQW)並搭配一層半絕緣 Mg 摻雜的 GaN 覆蓋層之金屬-半導體-金屬光檢測器

莊文魁\*、余佳霖、張守進

國立成功大學電機系暨微電子所

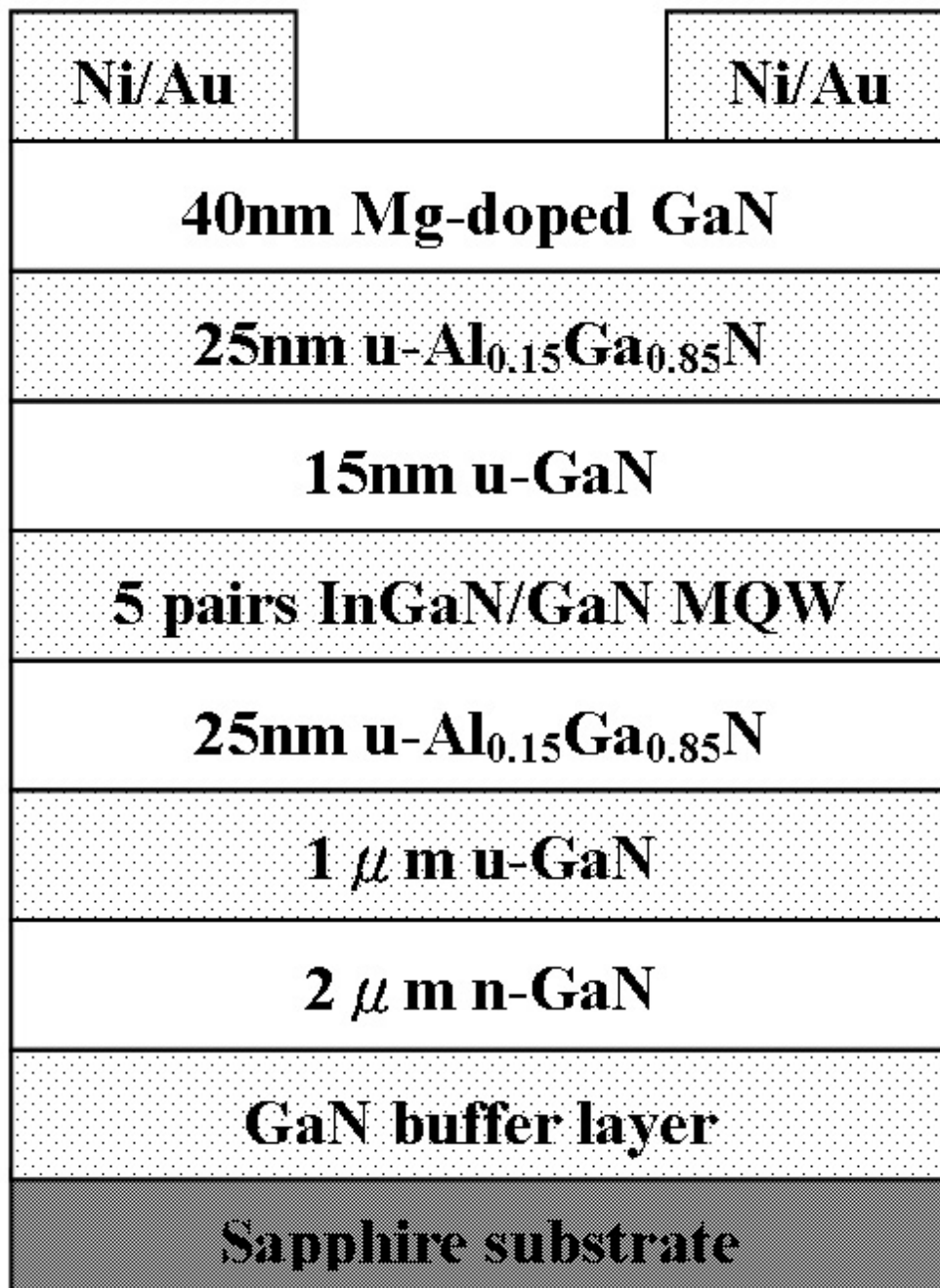
Email:rwchuang@mail.ncku.edu.tw

IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 19, No. 11, pp. 846-848, June 1, 2007

由於 III 族氮化物半導體本身具有直接能隙與寬能隙的特性，因此這一系列的材料非常適合用於製作紫外光(UV)光檢測器，特別是藉由調變 InGaN 之間的 In 與 Ga 的比例，InGaN 的吸收頻譜也因此拓展到從紫外光(UV)，至可見光(VIS)，到紅外線(IR)這一個相當大的範圍。至目前為止，大部份的研發動力主要著重於開發利用單一的體積薄膜(bulk-like epilayer)以作為吸收層的 III 族氮化物光檢測器。除此之外，其它元件，譬如像已  $p$ - $n$  界面( $p$ - $n$  junction)、蕭基能障(Schottky barriers)或金屬-半導體-金屬等等，也可導入多層量子井(MQW)至元件架構內作為吸收層，而其主要優點包括發射與檢測元件功能可以作相互整合的容易度相對提昇、藉由改變 In-Al 之間的比例與量子井寬度去做更有彈性地調變材料的吸收頻譜特性，以及提昇多色彩之感測像素的製作可能性。



至目前為止，擁有各種不同結構的氮化鎵光檢測器已經陸陸續續被發表於文獻期刊上。在這當中，MSM 光檢測器擁有幾項獨特的優點，譬如像其結構易於與場效電晶體(field-effect transistor)作相互製程整合於單一基板上。但是，MSM 檢測元件的主要缺點是其元件易於產生因磊晶層內的高差排缺陷密度(dislocation density)所造成的高漏電流。而此問題的其中一項解決之道是運用金屬-絕緣體-半導體(metal-insulator-semiconductor 或 MIS)的結構來降低漏電流。在此，我們提出另外的一個類似 MIS 的結構，此特色主要是在長晶的過程當中，在 MSM 元件的最上層多成長了一層未活化及 Mg 摻雜之 GaN 磊晶層。一層未活化的 GaN 磊晶層，其片電阻( $> 10^6 \Omega\text{-cm}$ )相對來說則是非常之高，而主要原因是因為殘餘施體的補償效應(compensation of residual donors)所產生。而加了這一層高片電阻磊晶層有助於降低元件的漏電流。因此，我們主要的研究目標是評估及分析多加了一層半絕緣及 Mg 摻雜氮化鎵磊晶層於 MSM 檢測器之上的最終光電特性。

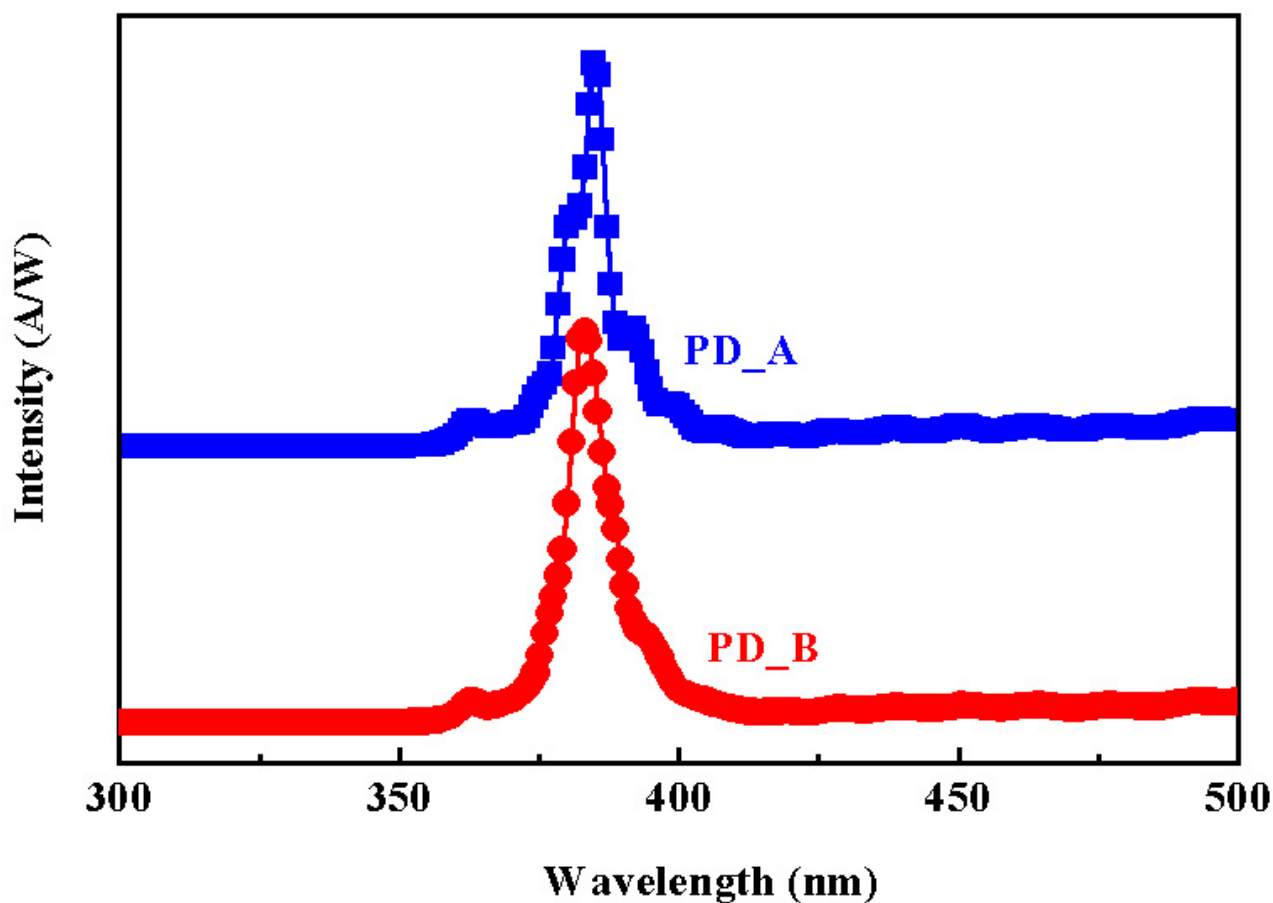


圖（一）光檢測元件結構的示意圖。

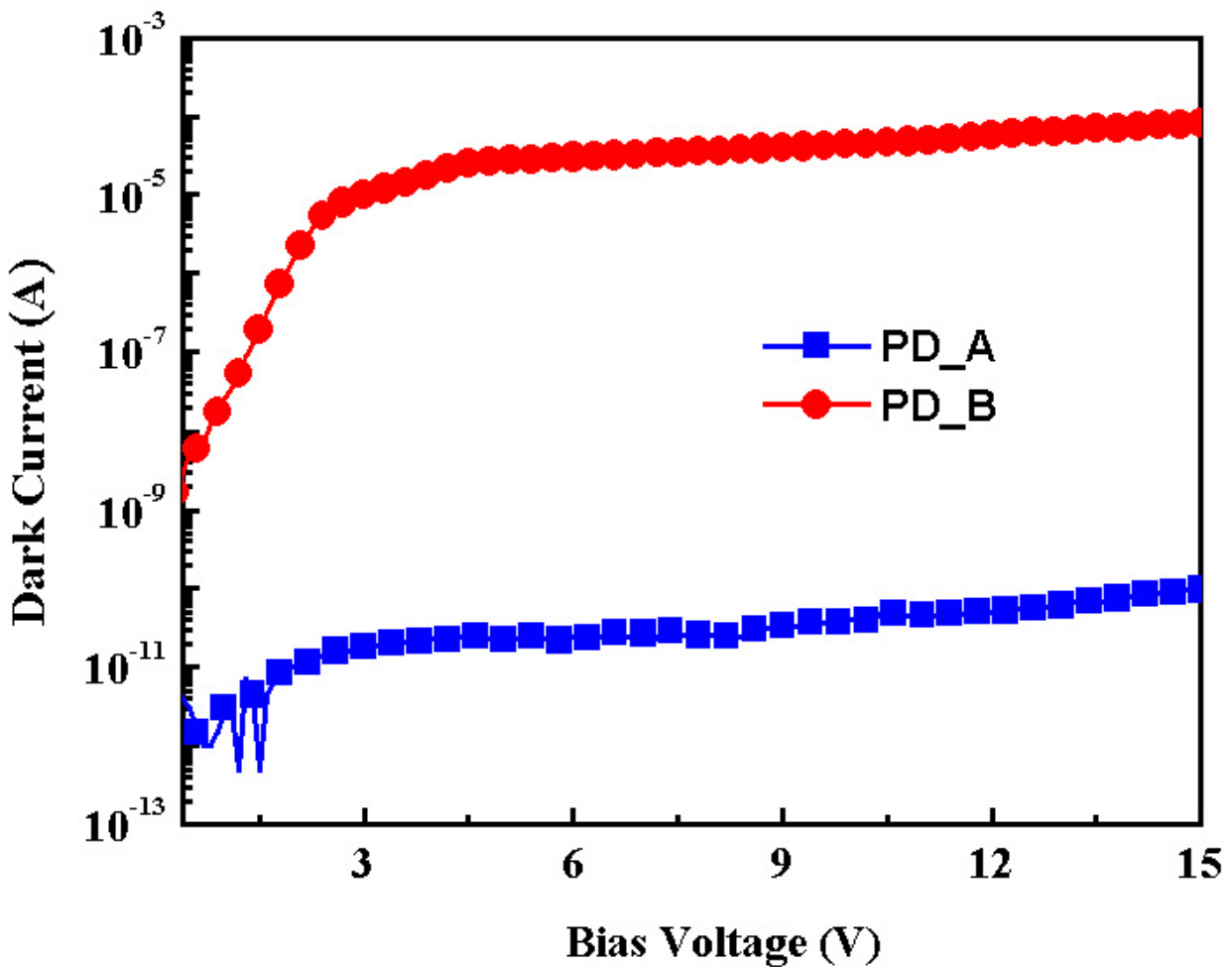
整個元件磊晶結構是經由金屬有機化學氣相沉積法(MOVPE)的方式成長於c-面藍寶石基板上。整個結構細節依成長順序如下：25 nm厚的低溫Ga<sub>0.15</sub>N結核層(nucleation layer)、2 μm厚的Si摻雜n-型Ga<sub>0.15</sub>N、1 μm厚的無摻雜Ga<sub>0.15</sub>N、25 nm厚的無摻雜Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N、無摻雜的InGa<sub>0.15</sub>N/GaN MQW主動層、15 nm厚的無摻雜Ga<sub>0.15</sub>N披覆層，25 nm厚的無摻雜Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N與40 nm厚未活化之Mg摻雜Ga<sub>0.15</sub>N覆蓋層(此元件結構以PD\_A記號作代表)。其主動層則包括5對的MQW，含蓋3 nm厚的In<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N量子井層及12 nm厚的Ga<sub>0.15</sub>N能障層。未活化的Mg摻雜Ga<sub>0.15</sub>N覆蓋層其特性則等同於一層高電阻(> 10<sup>8</sup>Ω/ )的絕緣體。為了作比較，我們也同時準備了沒有一層高電阻Mg摻雜覆蓋層的光檢測磊晶樣品(此元件結構以PD\_B記號作代表)。圖（一）為本元件結構的示意圖。Ni/Au (40 nm/100 nm)則沉積於MQW MSM UV PDs作為接觸電極之用。此元件的指叉狀電極的大小為，24 μm寬、100 μm長及指叉電極間6 μm的距離。擁有4對指狀電極的指叉狀電極使檢測器的主動區域面積達到100×234 μm<sup>2</sup>。

圖(二)為兩組MQW光檢測元件結構在是否加入無未活化Mg-摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層情況下所得到的室溫光激發光(PL)頻譜之相互比較圖。根據實驗結果顯示, PD\_A與PD\_B的PL波長之最高值分別為384.9 and 383 nm。兩者在PL波長最高值之間的微差距大概是磊晶成長溫度的跳動所引起的。我們知道MQW元件的PL波長之最高值與磊晶成長溫度之間的關係是息息相關的;通常來講, 1°C的差別將會造成PL波長最高值1-2 nm的移動。此外, 與Ga<sub>N</sub>相關的頂峰(peak)在PD\_A與PD\_B的PL頻譜都分別顯示在其當中。另外, PD\_A與PD\_B的PL半高寬(FWHMs)則分別為69.5 meV及73.7 meV, 而這兩值代表了兩個磊晶結構是非常好的。

圖(三)為兩組PDs的I-V曲線圖。根據實驗結果顯示, PD\_A的暗電流大約為 $10^{-11}$  A, 而PD\_B的暗電流至少是6個orders of magnitude之大。在同時施加•5 V的反向偏壓的情況下, PD\_A的反向漏電流為 $2.25 \times 10^{-11}$  A, 而PD\_B的反向漏電流則升高至 $2.75 \times 10^{-5}$  A。擁有比較低的反向漏電流主要是因為添加了一層比較厚及能障比較高的Mg摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層所造成的正面效果。除此之外, 沿著MSM檢測元件之蕭基界面的高漏電流主要是因為表面缺陷(有可能是threading或TD差排缺陷)所造成的。所以, 加了一層Mg摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層可以阻擋多數經由TD表面缺陷路徑的漏電流。

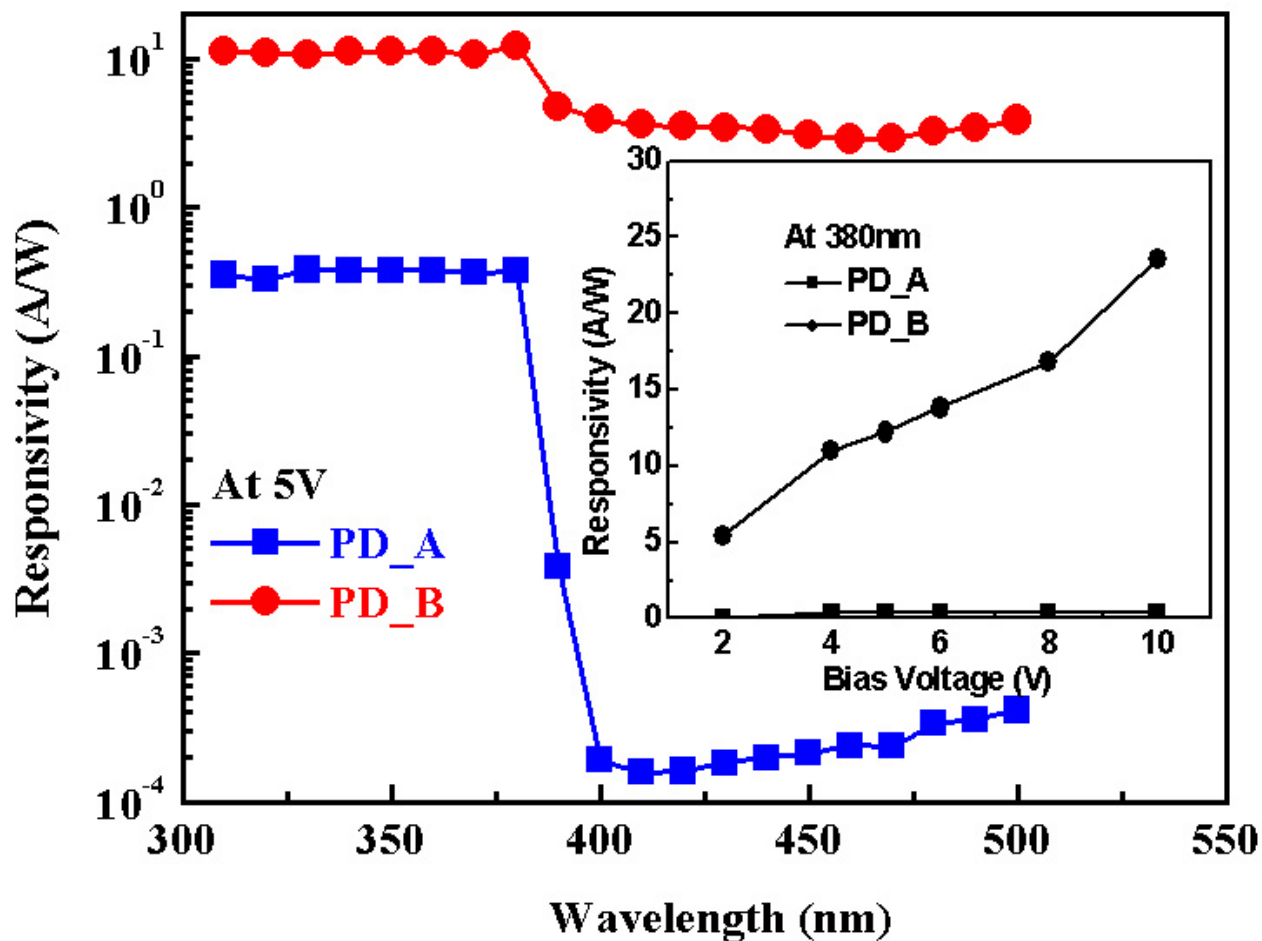


圖(二)兩組MQW光檢測元件結構在是否加入無未活化Mg-摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層情況下所得到的室溫光激發光(PL)頻譜之相互比較圖。



圖（三）兩組PDs的I-V曲線圖。

圖（四）為兩組PDs在施加5 V情況下所得到的室溫光譜響應率。兩個光譜響應曲線在短波長的範圍之內是相對地平緩，而發生在380 nm的cut-off主要是由於兩個PDs的InGaN/GaN MQW所造成的吸收效應而引起的，如先前的圖（二）所示。此結果顯示本元件的磊晶品質是相當好的。至於穿插在圖（四）內的曲線圖是PD\_A與PD\_B在380 nm波長的情況下所量測到的光譜響應率對施加偏壓之間的關係圖。根據實驗結果顯示，施加偏壓對PD\_A的光譜響應率基本上是沒什麼影響，然而PD\_B的光譜響應率則是隨偏壓而增加。除此之外，根據圖（四）所示，PD\_A與PD\_B的光譜響應率在380 nm波長的情況下分別為0.372 and 12.21 A/W。此實驗結果顯示，PD\_B擁有一個高內部增益(high internal gain)的特性。產生內部增益的其中一項因素可能是電子經由陰極注入的增加促成電洞被捕捉及局限在表面區域，進而造成能障高度的降低。如果這個因素是成立的話，我們的實驗結果顯示藉由一層Mg摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層所帶來的表面狀態鈍化(passivation of surface states)，其元件的內部增益可以有效的被抑制。因此，從PD\_A所量測到少許的內部增益應該是多加了一層Mg摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層所帶來很正面的表面狀態鈍化效果。在此，UV對VIS（可見光）衰減率則定義為在380 nm波長所得到的光譜響應率除以在400 nm波長所得到的光譜響應率。所以，從PD\_A與PD\_B所得到的UV對VIS（可見光）衰減率分別為 $1.96 \times 10^3$ 和3.13。在前述的結果當中，請注意PD\_B在各個波長所量測到的光譜響應率是遠高於理論質；這代表了量子效率是大於100%。此結果可能是由於高暗電流及表面狀態(surface states)所引起的內部增益效應所造成的。由此看來，多加了一層Mg摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層至檢測元件結構的確有助於提昇UV對VIS（可見光）的衰減率。



圖（四）兩組PDs在施加5 V情況下所得到的室溫光譜響應率。

總而言之，我們成功地製備了多加了一層Mg摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層之III族氮化物半導體MQW MSM PDs。根據實驗結果顯示，多加了一層Mg摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層有助於降低光檢測器的暗電流。再者，擁有一層Mg摻雜Ga<sub>N</sub>覆蓋層之PDs，其元件在380 nm波長的情況下所得到的光譜響應率與UV 對VIS（可見光）的衰減率分別為0.372 A/W及 $1.96 \times 10^3$ 。