

使用低溫中間層之高響應度氮化鎵p-i-n感光二極體

蘇炎坤^{1*}、林家慶²、張守進²、藍文厚³、黃國欽⁴、陳文瑞⁵、黃鍾億⁶、賴韋志⁶、林文仁⁷、程一誠⁷

¹成功大學微電子所, 電機系, 尖端光電中心

²成功大學微電子所, 電機系, 尖端光電中心

³高雄大學電機系

⁴交通大學電物所

⁵虎尾科技大學電機系

⁶成功大學光電所

⁷中山科學研究院材料與光電研究所

yuch@mail.ncku.edu.tw

Applied Physics Letters 91, 173502 (2007)

Abstract

本文詳細探討具有低溫氮化鎵中間層之氮化鎵p-i-n紫外光感光二極體特性。我們發現具有低溫氮化鎵中間層之感光二極體在5 V逆向偏壓下, 其漏電流只有143pA。我們也發現由於載子倍增效應的關係, 具有低溫氮化鎵中間層之感光二極體可以在一個小電場(~ 0.4 MV/cm)的條件下增強其響應度。此類感光二極體, 其紫外光光電流增益值為13, 並具有一個值較大的游離係數($\alpha=3.1 \times 10^5$ cm⁻¹)。而且, 具有低溫氮化鎵中間層之感光二極體可以達到一個最高的響應度為2.27 A/W。

氮化物半導體由於其優異的光電特性已經被商業化應用於發光二極體¹(LEDs)與雷射二極體²(LDs)上。另一方面, 以氮化物半導體為基礎之元件由於具有寬直接能隙、高崩潰電場與高操作溫度等特性, 同樣也適合作為紫外光偵測之檢測器。因此, 氮化鎵感光二極體有潛力應用於化學感測、火焰與熱源偵測與飛彈偵測等等^{3,4}。過去幾年內, 不同型態之氮化鎵p-i-n感光二極體已經被製作與發表⁵⁻¹²。在本論文中, 我們呈現在本質吸收層中插入一層低溫氮化鎵(Low-temperature GaN, LT-GaN)薄層的p-i-n感光二極體特性。我們已知必須使用LT-GaN層當作成核層來成長高品質氮化鎵磊晶薄膜¹³。我們也知道LT-GaN中間層能夠抑制缺陷延伸至後續生長之高溫氮化鎵(High-temperature GaN, HT-GaN)磊晶層^{14,15}。LT-GaN覆蓋層同時也可作為氮化鎵肖特基二極體之保護層^{16,17}。在此, 我們則是將LT-GaN層應用於氮化鎵p-i-n結構中吸收層的中間插入層。在本文中, 我們將詳細探討具有與不具有LT-GaN中間層之感光二極體元件之光電特性。



本實驗之元件結構皆是使用低壓有機金屬氣相磊晶系統成長於c-plane (0 0 0 1)藍寶石基板上。TMGa、TMAI與NH₃分別作為Ga、Al與N元素之來源。SiH₄與Cp₂Mg分別作為n型與p型摻雜之來源。載流氣體為氫氣與氮氣。長晶時使用兩階段成長法, 先在520°C成長低溫氮化鎵成核層, 再升溫至1120°C成長高溫磊晶層。整個p-i-n感光二極體結構包含25-nm厚的氮化鎵成核層, 4- μ m厚的矽摻雜n型氮化鎵層, 1- μ m厚的無摻雜氮化鎵吸收層, 20-nm厚的鎂摻雜p型氮化鎵層, 與一層鎂摻雜氮化鋁鎵/氮化鎵超晶格結構, 最後是一層12-nm厚的p型氮化鎵接觸層(試片A)。其中, 鎂摻雜氮化鋁鎵/氮化鎵超晶格結構包含三對8-nm厚的氮化鋁鎵層與8-nm厚的氮化鎵層。使用p型氮化鋁鎵/氮化鎵超晶格結構的目的在於達到更高的電洞濃度與更多的光子入射¹⁸。另外一個p-i-n結構則是在1- μ m厚的無摻雜氮化鎵吸收層中間插入一層30-nm厚的LT-GaN層(試片B), 其餘結構與試片A相同。氮化鎵p-i-n感光二極體元件隨後以傳統黃光製程與感應耦合電漿蝕刻方式製作。在電極製作上, Ni-Au蒸鍍在p型氮化鎵表面作為p-電極, 另一方面, Cr-Pt-Au則蒸鍍在n型氮化鎵層作為n-電極。

接著將試片厚度研磨至100 μm 並製作成 325×325 μm^2 大小之元件。元件製作完成後，我們以HP-4156B半導體參數分析儀量測感光二極體之電流-電壓(current-voltage, I-V)特性。光譜響應度則是以JOBIN-YVON SPEX 1000M System搭配氙燈光源執行量測。所有光學系統均使用一個UV增強矽感光二極體校正。

圖1為本實驗製作之感光二極體在氙燈光源照射下所量測的室溫光電流圖。由圖中可發現試片B在逆偏壓20 V後其光電流大量地增加，此一現象也顯現出試片B的內部電流增益。相對地，試片A的光電流在整個量測範圍內幾乎持平不變，如圖1所示。圖1的插入圖則為室溫下所量測的兩者感光二極體的暗電流圖。試片A在逆偏壓5 V與40 V的暗電流分別為15.7 pA與36.6 nA，而試片B在逆偏壓5 V與40 V的暗電流分別為143 pA與147 nA。試片B中，暗電流的微量增加可歸因於從LT-GaN中間層形成的漏電路徑。我們也發現兩個試片的逆向崩潰電壓均大於40 V。因此，試片B的電流增益與雪崩倍增效應無關。

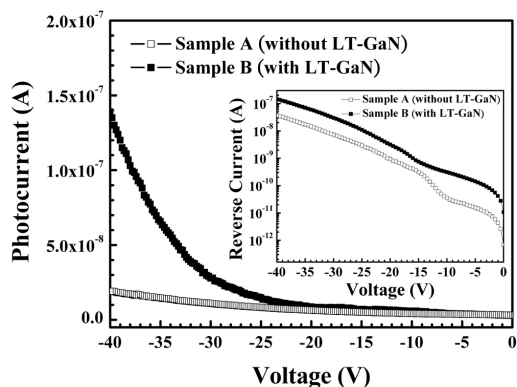


圖 1、在氙燈光源照射下所量測試片A與試片B之光電流圖。插入圖為兩者試片之暗電流特性圖。

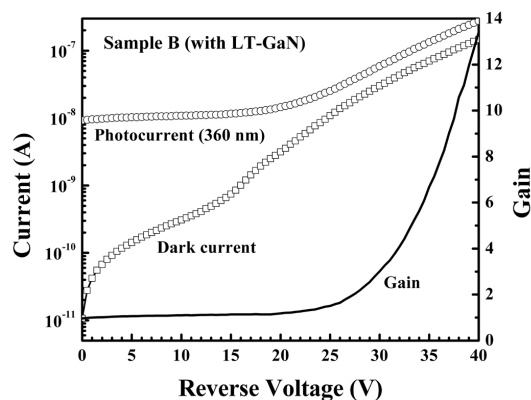


圖 2、試片B在360 nm照光條件下與不照光之逆向I-V特性。右軸標示為光電流增益。

圖2為試片B之360 nm光電流與暗電流比較圖。圖2右軸標示則為試片B之電流增益，並以偏壓為1 V之光電流值作為電流增益初始參考點。從圖2可以發現電流增益在逆偏20 V時發生，並在逆偏40 V時電流增益值達到13(受限於量測設備)。我們已知雪崩型感光二極體可藉由雪崩倍增效應得到電流增益，雪崩倍增不僅與高電場強度有關，而且與載子在空間中的距離有關。為了使氮化鎵雪崩型感光二極體操作在雪崩模式下，在本質層厚度為100與300 nm的傳輸距離下電場強度必須達到3.5與2.8 MV/cm，才有雪崩倍增效應^{19,20}。與這些雪崩型感光二極體比較，試片B的吸收層厚度較大於雪崩型感光二極體的吸收層厚度。所以，本實驗所提出的p-i-n結構(試片B)可以較低的電場強度，約0.4 MV/cm(以40 V逆偏壓橫跨1000 nm厚之本質層來計算)，達到載子倍增的效果。我們也知道LT-GaN的磊晶品質不比HT-GaN的磊晶品質來的好。因此，在LT-GaN的能隙裡應該存在一些缺陷相關能階，而缺陷捕獲載子之鍵結能應小於晶格鍵結能。因此，在LT-GaN能隙裡的缺陷能階裡的被捕獲載子僅需較小能量即可引起載子倍增。所以，我們在試片B產生載子倍增所需的電場強度遠小於其他已發表之氮化鎵雪崩型感光二極體^{19,20}。我們從圖2也可發現電流增益緩慢地上升，意謂著沒有電漿放射現象產生¹⁹。

圖3為試片B之游離係數相對於不同逆向偏壓之圖形。我們可以假設氮化鎵之電子(α_e)與電洞(α_h)游離程度相同($\alpha_e = \alpha_h = \alpha$)²¹，而游離係數可由下列方程式求出：

$$M = \frac{1}{1 - \int_0^L \alpha dx}$$

其中M為倍增增益值，L為發生倍增區域之長度， α 為游離係數。因為載子倍增現象只發生在具有LT-GaN中間層之感光二極體，因此，我們可以假設倍增區域長度即是LT-GaN中間層的厚度，也就是說L=30nm。而游離

係數由上述方程式求出為 $3.1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 。此游離係數大於Carrano et al.¹⁹ ($\alpha=9.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$)與Limb et al.²⁰ ($\alpha=3.3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$)所發表的感光二極體游離係數之值。較大的游離係數可歸因於由LT-GaN中間層之缺陷能階產生大量的倍增載子所致。從圖3，我們也可發現游離係數隨偏壓電壓增加有飽和的趨勢。此一飽和趨勢亦顯示出倍增載子是由中間能態所產生，並非來自價電帶²²。

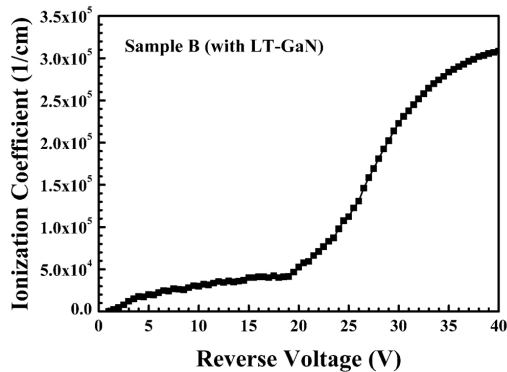


圖 3、試片B之離子化係數相對於不同逆向偏壓。

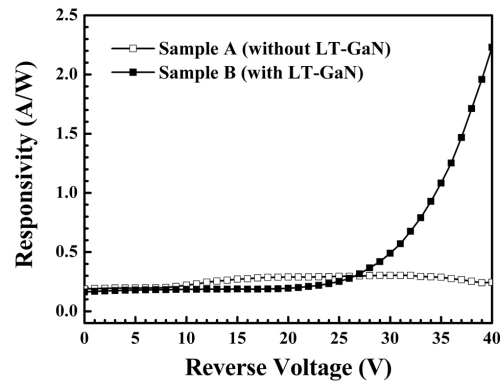


圖 4、試片A與試片B在不同逆向偏壓下所量測之360 nm光響應度。

圖4為試片A與試片B在360 nm波長下所量測之光響應度圖形。從試片A可以發現一個典型的氮化鎵p-i-n感光二極體隨偏壓變化之光響應度。光響應度會隨著所加偏壓增加而稍微增加。試片A在逆向偏壓為0與40 V時，其360 nm波長之光響應度分別0.18為0.24 A/W。相對地，由於載子倍增效應的關係，試片B的光響應度隨著所加偏壓增加而大量增大。試片B在逆向偏壓為0與40 V時，其360 nm波長之光響應度分別0.16為2.27 A/W。從圖4，我們也可以發現在逆向偏壓小於25 V時，試片B的光響應度略小於試片A的光響應度。這是由於在試片B中，照光產生之載子被LT-GaN中間層的缺陷能階補償所致。另一方面，當逆向偏壓大於25 V時，試片B的光響應度則遠大於試片A的光響應度。這是由於在試片B中，載子倍增效應由在LT-GaN中間層同樣的缺陷能階引起所致。當在逆向偏壓為40 V時，試片B的光響應度是試片A的光響應度的9.5倍。

在本文中，具有低溫氮化鎵中間層之氮化鎵p-i-n紫外光感光二極體被製作與討論。我們發現具有低溫氮化鎵中間層之感光二極體在5 V逆向偏壓下，其漏電流只有143 pA。我們也發現由於載子倍增效應的關係，具有低溫氮化鎵中間層之感光二極體可以在一個小電場($\sim 0.4 \text{ MV/cm}$)的條件下增強其響應度。此類感光二極體，其紫外光光電流增益值為13，並具有一個值較大的游離係數($\alpha=3.1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$)。而且，具有低溫氮化鎵中間層之感光二極體可以達到一個最高的響應度為2.27 A/W。此一光響應度是傳統氮化鎵p-i-n感光二極體光響應度的9.5倍。

Reference

- S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa and S. C. Nagahama, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 1868 (1995).
- S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, and H. Kiyoku, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, L1059 (1997).
- A. Hirano, C. Pernot, M. Iwaya, T. Detchprohm, H. Amano, and I. Akasaki, *Phys. Stat. Sol. (a)*. **188**, 293 (2001).
- M. Razeghi and A. Rogalski, *J. Appl. Phys.* **79**, 7433 (1996).
- D. Walker, A. Saxler, P. Kung, X. Zhang, M. Hamilton, J. Diaz, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 3303 (1998).
- G. Y. Xu, A. Salvador, W. Kim, Z. Fan, C. Lu, H. Tang, H. Morkoc, G. Smith and M. Estes, B. Goldenberg, W. Yang, and S. Krishnankutty, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2154 (1997).

- A. Osinsky, S. Gangopadhyay, R. Gaska, B. Williams, M. A. Khan, D. Kuksenkov and H. Temkin, Appl. Phys. Lett. **71**, 2334 (1997).
- C. K. Wang, T. K. Ko, C. S. Chang, S. J. Chang, Y. K. Su, T. C. Wen, C. H. Kuo, and Y. Z. Chiou, IEEE Photon. Technol. Lett. **17**, 2161 (2005).
- S. J. Chang, T. K. Ko, Y. K. Su, Y. Z. Chiou, C. S. Chang, S. C. Shei, J. K. Sheu, W. C. Lai, Y. C. Lin, W. S. Chen, and C. F. Shen, IEEE Sensors J. **6**, 406 (2006).
- T. K. Ko, S. C. Shei, S. J. Chang, Y. K. Su, Y. Z. Chiou, Y. C. Lin, C. S. Chang, W. S. Chen, C. K. Wang, J. K. Sheu, and W. C. Lai, IEEE Sensors J. **6**, 964 (2006).
- Y. C. Cheng, J. C. Lin, and W. J. Lin, Abstracts and Schedule of UK compound semiconductors 2006 (Abstract Book), Paper No. F-O-3 11.45 SBLT02.
- G. Y. Xu, A. Salvador, W. Kim, Z. Fan, C. Lu, H. Tang, H. Morkoc, G. Smith, M. Estes, B. Goldenberg, W. Yang, and S. Krishnankutty, Appl. Phys. Lett. **71**, 2154 (1997).
- S. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys. **30**, L1705 (1991).
- M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Yamaguchi, C. Wetzel, H. Amano, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, L316 (1998).
- E. D. Bourret-Courchesne, S. Kellermann, K. M. Yu, M. Benamara, Z. Liliental-Weber, J. Washburn, S. J. C. Irvine, and A. Stafford, Appl. Phys. Lett. **77**, 3562 (2000).
- S. J. Chang, C. L. Yu, C. H. Chen, P. C. Chang, and K. C. Huang, J. Vac. Sci. Technol. A. **24**, 637 (2006).
- M. L. Lee, J. K. Sheu, W. C. Lai, S. J. Chang, Y. K. Su, M. G. Chen, C. J. Kao, G. C. Chi, and J. M. Tsai, Appl. Phys. Lett. **82**, 2913 (2003).
- L. S. Yeh, M. L. Lee, J. K. Sheu, M. G. Chen, C. J. Kao, G. C. Chi, S. J. Chang, and Y. K. Su, Solid-State Electron. **47**, 873 (2003).
- J. C. Carrano, D. J. H. Lambert, C. J. Eiting, C. J. Collins, T. Li, S. Wang, B. Yang, A. L. Beck, R. D. Dupuis, and J. C. Campbell, Appl. Phys. Lett. **76**, 924 (2000).
- J. B. Limb, D. Yoo, J. H. Ryou, W. Lee, S. C. Shen, R. D. Dupuis, M. L. Reed, C. J. Collins, M. Wraback, D. Hanser, E. Preble, N. M. Williams, and K. Evans, Appl. Phys. Lett. **89**, 011112 (2006).
- M. Trivedi and K. Shenai, J. Appl. Phys. **85**, 6889 (1999).
- J. C. Carrano, T. Li, P. A. Grudowski, C. J. Eiting, R. D. Dupuis, and J. C. Campbell, J. Appl. Phys. **83**, 6148 (1998).