

## GaN層在施壓下的重結晶作用

S. Dhara,<sup>1,\*</sup> C. R. Das,<sup>2</sup> H. C. Hsu,<sup>3</sup> Baldev Raj,<sup>2</sup> A. K. Bhaduri,<sup>2</sup> L. C. Chen,<sup>3</sup> K. H. Chen,<sup>3,4</sup> S. K. Albert,<sup>2</sup> and Ayan Ray<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Institute for Innovations and Advanced Studies, National Cheng Kung University, Tainan-701, Taiwan.

<sup>2</sup>Metallurgy and Materials Group, Indira Gandhi Center for Atomic Research, Kalpakkam-603102, India

<sup>3</sup>Center for Condensed Matter Sciences, National Taiwan University, Taipei-106, Taiwan

<sup>4</sup>Institute of Atomic and Molecular Sciences, Academia Sinica, Taipei-106, Taiwan

<sup>5</sup>Department of Physics, Indian Institute of Technology, Kharagpur- 721 302

s\_dhara2001@yahoo.com

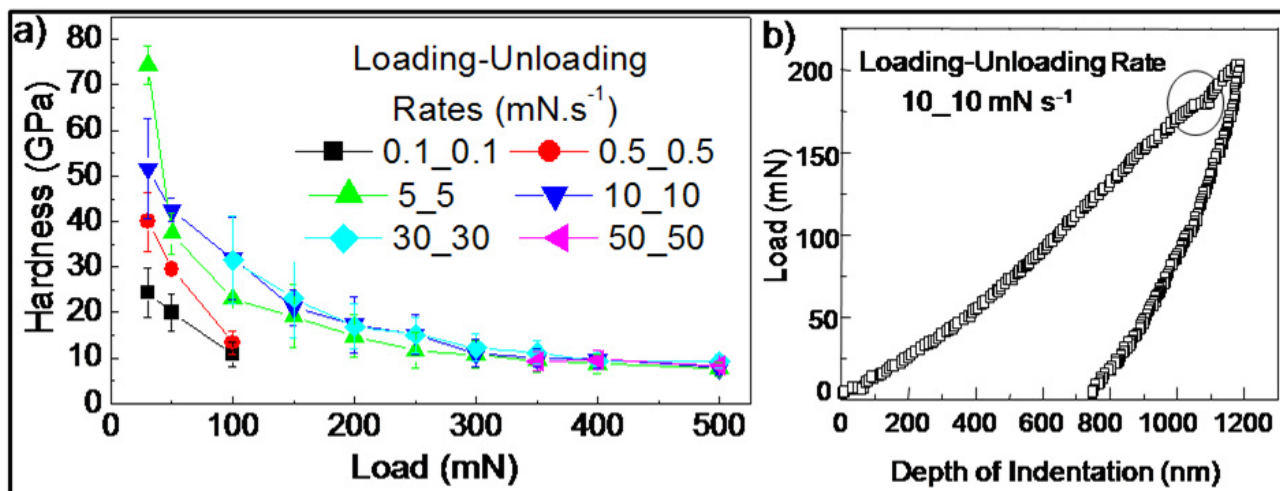
Applied Physics Letters 92, 143114 (2008)

### 中

村修二努力研發發現GaN可以做為365nm藍色光源的材料，他也因為此項發現在2006年得到了千年技術獎。藍光二極體雷射無論在列印技術方面（1200dpi使用6mm optics得到17  $\mu$ m spot size 和1mm depth of field），在高密度記憶容量DVD或在使用白光光源（RGB三原色）的顯示設備等都有極大的市場。可是GaN的高密度晶格錯位和相應造成的問題對GaN藍光雷射的應用造成很大的阻礙。因而，GaN光電元件面臨的挑戰之一為消除造成晶格錯位的應力。在長GaN層時可以預先長一層緩衝層〔2〕或使用側邊過度成長的方法〔3〕來減少系統的殘留應力。使用以上方法生長的GaN層，晶格錯位密度明顯地減少，進而使缺陷也減少了。（晶格錯位會造成雙軸應力和hydrostatic stress，以上二項和點缺陷、延伸缺陷都有密切關係。）

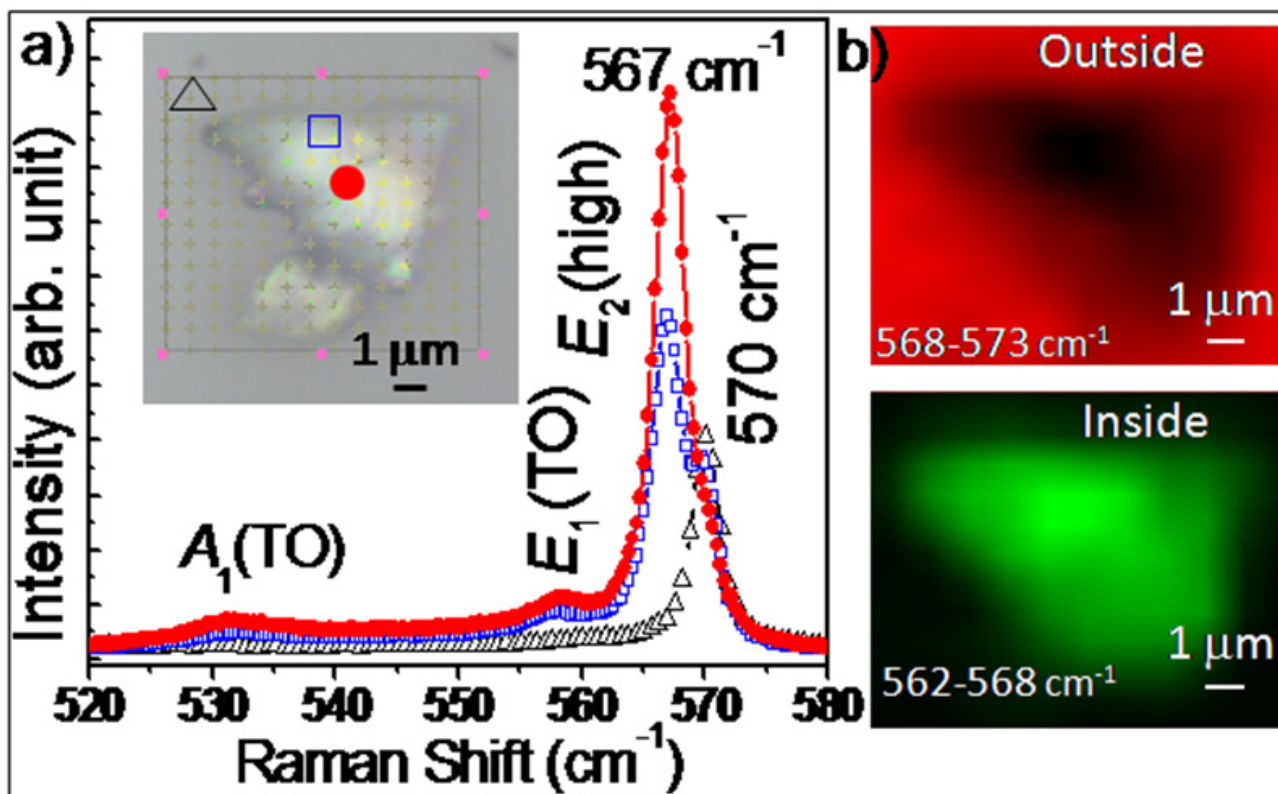


使用上段所言的〔2, 3〕項技術在長GaN層時的確有明顯地減少晶格錯位密度。我們也使用了另一方法，即在GaN層上使用不同重量和不同的加壓和釋放頻率，使GaN層重結晶。並且使用514.5nm Ar<sup>+</sup>雷射來對感興趣的地方做拉曼光譜進行驗證。



圖一(a)在GaN層(0001)上加壓量測其硬度值,並使用不同加壓和釋放頻率。(b)在 $10\text{mN}\cdot\text{s}^{-1}$ 的加壓和釋放頻率之下的典型加壓釋放曲線,圖上所圈示之區域為‘pop-in’burst。

使用高壓( $> 100\text{ GPa}$ )或低加壓釋放頻率( $\leq 0.5\text{ mN s}^{-1}$ )時GaN層的強度和bulk GaN的硬度相當(即 $\sim 10\text{ GPa}$ )。在以上述方法加壓的情況之下,缺陷會主要發生在表面。當加壓頻率增加時,晶格錯位即缺陷也會增加來使材料的強度增強。缺陷的產生可以用晶格的位移來解釋,也可以解釋結晶材料依據深度變化的硬度。圖1(b)是一般的加壓釋放曲線,圖中圓圈的部份為“pop-in”burst。“pop-in”burst的成因為重結晶過程中的集結作用和晶格錯位源點的移動。



圖二(a)GaN層凹陷域之內和之外三點的拉曼光譜,上方插入圖為光學顯微鏡圖,圖上的點各對應三條拉曼光譜.(b)光譜上不同區在空間上對應陷凹區域內外之圖

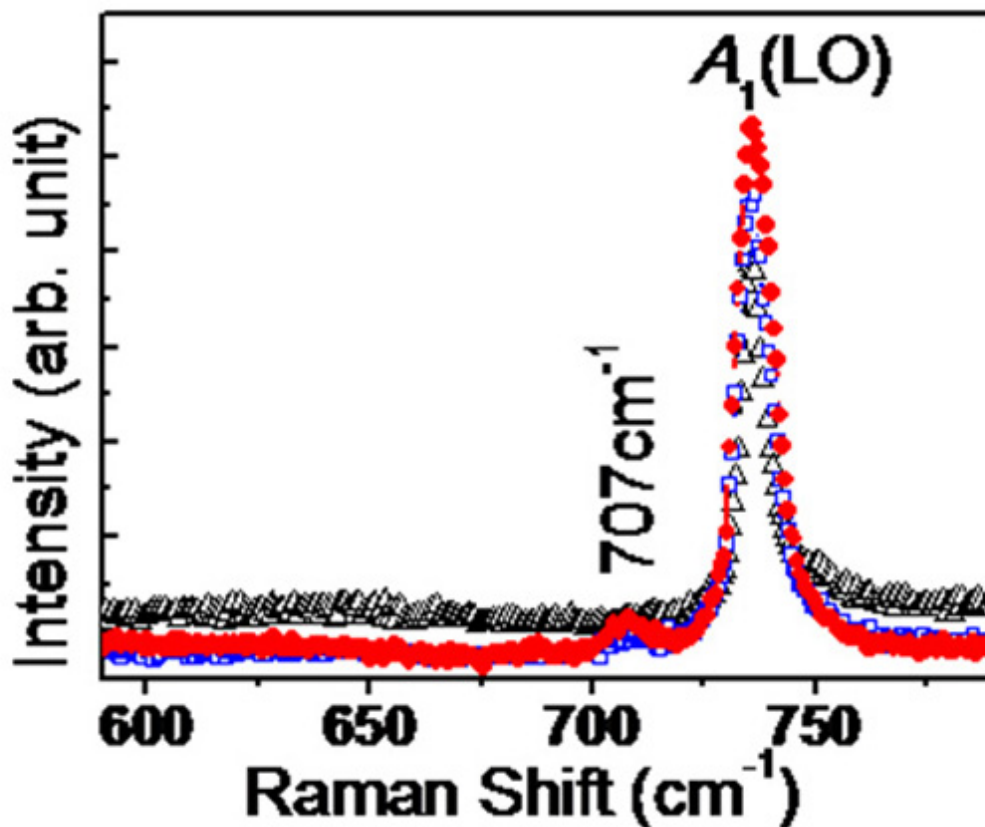
圖二為使用拉曼光譜儀來分析研究凹陷區域附近的結構變化,拉曼光譜儀所使用的光源為 $632.8\text{ nm}$ 的He-Ne雷射。在凹陷區域之外量到了 $570\text{ cm}^{-1}$ 的 $E_2(\text{high})$  mode,此項結果和長在紅寶石上的GaN之量測結果相似。圖二上方插入圖為光學顯微鏡圖,圖上的三個點分別表示在凹陷區之內和之外我們所據取光譜的點。拉曼量測的光譜結果顯示,從凹陷區的邊緣進入到凹陷區的中央時phonon mode慢慢地紅移到 $567\text{ cm}^{-1}$ 。此項結果和在bulk GaN以及沒有應力的GaN的奈米結構上的量測和實驗結果一致。在凹陷區邊緣的量測結果顯示了double peak,可解釋為沒應力區和有應力區交互作用的結果。光譜上的 $568\text{--}573\text{ cm}^{-1}$ 區域使用紅色顯示而 $562\text{--}568\text{ cm}^{-1}$ 區域使用綠色顯示,紅色表示了凹陷區之外,而綠色表示在凹陷區之內。以上說明 $567\text{ cm}^{-1}$ 和 $570\text{ cm}^{-1}$ 的峰值分別來自有應力區和無應力區。圖二之拉曼光譜也顯示了在 $531\text{ cm}^{-1}$ 和 $559\text{ cm}^{-1}$ 有值峰,分別對應 $A_1(\text{TO})$ 和 $E_1(\text{TO})$  mode。根據GaN wurtzite晶格的selection rule, GaN的(0001)面應該是沒有TO phonon mode的。但在凹陷區內晶格可能會有一些晶格面位移使得以上兩項TO phonon mode產生。

假設在凹陷區域只有hydrostatic stress的話,圖二a的 $E_2(\text{high})$ 峰值位置之 $3\text{ cm}^{-1}$ 位移需要小於 $1\text{ GPa}$ 的應

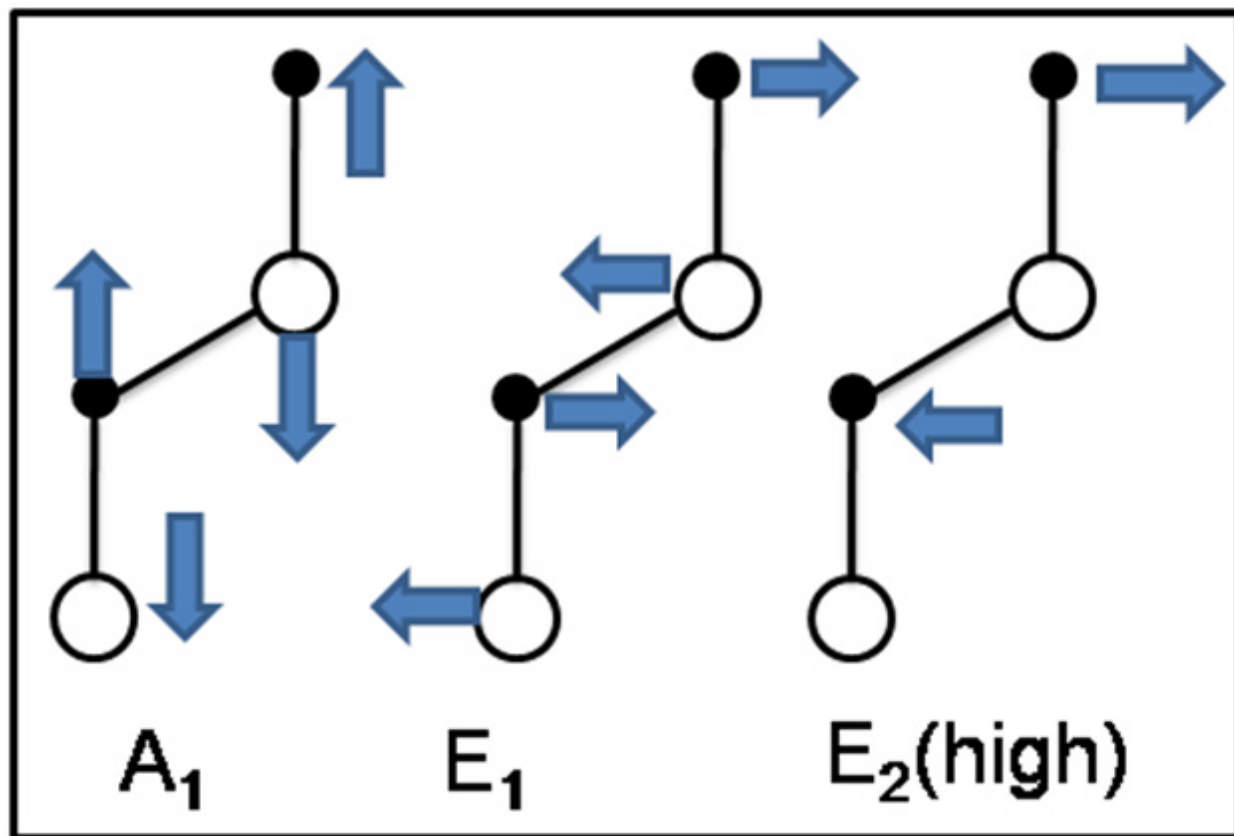
力。只有hydrostatic stress的話，拉曼峰值的壓力系數為 $-3.55 \text{ cm}^{-1} \text{ GPa}^{-1}$ 〔7〕。〔8〕中的indenter(加壓器)所產生的壓力分佈為

$$p(r) = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \frac{\cosh^{-1}(a/r)}{\tan \Psi}, 0 \leq r \leq a \quad \dots\dots\dots (1)$$

$E$ 為Young's modulus,  $\nu$ 為Poisson's ratio (0.22 for GaN層),  $a$ 為接觸面的半徑和 $r$ 為表面的radial coordinate. Berkovich加壓器( $\sim 65.3^\circ$ )有實驗觀察所得的100GPa modulus, 在中央區域的壓力值可以使用Eq(1)計算得到為10GPa (在邊緣區)到55GPa (在中央)。使用此項技術的施壓器可以得到估值壓力值 1 GPa, 此壓力值對應的拉曼光譜上的 $3 \text{ cm}^{-1}$ 位移。



圖三．在凹陷區內部和外部附近所取各點（圖二a上所示）的微拉曼光譜



圖四 . Wurtzite結構上的光學phonon mode

有趣地，在凹陷點附近不同點所取的拉曼光譜裡對應 $A_1$ (LO) mode的 $736\text{ cm}^{-1}$ 峰值並沒有因位置的不同而改變。陷凹區裡那一點所取到光譜線在 $707\text{ cm}^{-1}$ 附近有一個微小的峰值。此峰值所產生的原因可以歸咎於奈米GaN晶體的表面optic mode〔9〕。圖四為Wurtzite晶體結構上的拉曼散射情況，對應LO mode of  $A_1$ 的phonon是在z方向上振動。所以在拉曼光譜上LO mode of  $A_1$  峰值的沒有變化說明了垂直於xy平面的晶格mode並沒有改變。根據圖二中 $E_2$ (high)和TO mode的改變，可以推測出應力是在xy平面釋放因而Raman在xy上對應的 mode有所改變。所以，phonon mode的改變可能是因為晶格錯位的重結晶作用和晶格錯位攀爬的凹陷壓力之下的平面壓力釋放。因為施壓而產生高hydrostatic stress造就了材料晶格錯位的攀爬。

在GaN上使用Berkovich加壓器造就了加壓誘發的重結晶作用。在施壓體積之下計算出的應力量度和重結晶作用所需要的應力相對應。在加壓區的中央位置晶格錯位應力被釋放。本文章所討論的缺陷力學，將對消除GaN的晶格錯位有助益。

## References

1. S. Nakamura, G. Fasol, S. J. Pearton, *The Blue Laser Diode: The Complete Story*, Springer Verlag (Berlin, 2000).
2. H. Matsubara, S. Yoshimoto, H. Saito, Y. Jianglin, Y. Tanaka, and S. Noda, *Science* 319, 445 (2008).
3. Y. Chen, R. Schneider, S. Y. Wang, R. S. Kern, C. H. Chen, and C. P. Kuo, *Appl. Phys. Lett.* 75, 2062 (1999).
4. S. Dhara, C. R. Das, H. C. Hsu, Baldev Raj, A. K. Bhaduri, L. C. Chen, K. H. Chen, S. K. Albert, and Ayan Ray, *Appl. Phys. Lett.* 92, 143114 (2008).

5. Y. Gaillard, C. Tromas and J. Woirgard, *Phil. Mag. Lett.* 83, 553 (2003).
6. T. Azuhata, T. Sota, K. Suzuki, S. Nakamura, *J. Phys.:Condens. Matter* 7, L129 (1995).
7. A. R. Goni, H. Siegle, K. Syassen, C. Thomsen, and J.-M. Wagner, *Phys. Rev. B* 64, 035205 (2001).
8. K. L. Johnson, *Contact mechanics*, p. 107. (Cambridge: Cambridge University Press; 1985).
9. C. L. Hsiao, L. W. Tu, T. W. Chi, M. Chen, T. F. Young, C. T. Chia, and Y. M. Chang, *Appl. Phys. Lett.* 90, 043102 (2007).

*Copyright 2008 National Cheng Kung University*