

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

自聚性量子點顯微電性暫態量測研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2112-M-009-032-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學電子物理學系(所)

計畫主持人：陳文雄

共同主持人：陳衛國，周武清，李明知

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 自聚性量子點顯微電性暫態量測研究

計劃編號: NSC-93-2112-M-009-032

執行期間: 93/8/1~94/7/31

主持人: 陳文雄 交通大學電子物理系

### 一、中文摘要

在本計畫執行期間,我們利用掃描電場力顯微術(Electric force microscopy, EFM)進行氮化鎵自聚性島狀量子結構的微觀電性量測。由金屬探針和樣品的基頻及二倍頻靜電力,我們建立電荷在島狀結構上的作用力模型,對於日後利用掃描電位顯微術的結果討論將能夠獲得更精確的定量分析。

### 二、英文摘要

Electric force microscopy (EFM) was performed to study microscopic electric properties of GaN quantum disk-like island. By detecting ac vibration of metal probe acting in  $\omega$  and  $2\omega$ , we establish a fine model to explain electrostatic force from surface charges. We believe this study is useful for further work on surface microscopic electric characterization.

### 三、緣由與目的

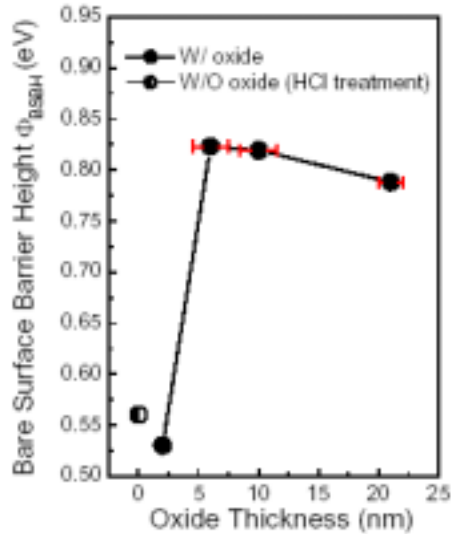
近年來由於奈米尺度的材料以及元件結構逐漸被成功地製備,尤其是對於半導體材料,利用分子束磊晶(molecular beam epitaxy, MBE)或是有機金屬氣相磊晶(metalorganic vapor phase epitaxy, MOVPE)的技術,由於異

質成長的晶格不匹配(lattice mismatch),可以在基材表面自我成長(self-assembling)出島狀結構。例如砷化銦/砷化鎵(InAs/GaAs)的島狀結構可以將尺寸縮小至數奈米的等級,已經達到量子點(quantum dot)的有效範圍。

這些量子點結構雖然已經證實能夠大幅增加整體(macroscopic)發光性質,但是由於自我成長量子點的尺寸大小仍然不夠均勻,以致於增加發光的半高寬(FWHM)。因此,例如近場光學顯微術(scanning near-field optical microscopy, SNOM)或是表面增強拉曼光譜等等設備在近年逐漸受到大家的重視,以期能夠了解單一個量子點的結構和發光特性。

雖然如此,對於單一個奈米結構的電性量測卻是少見許多。一般常用的技術是利用掃描穿隧顯微術(scanning tunneling spectroscopy, STM),藉由表面原子和探針尖端的穿隧電流紀錄表面形貌及局域電子分布。雖然掃描穿隧顯微術可以達到原子級的空間解析度,但必須在超高真空下方能得到如此結果。因此近年來,大部分的研究群改由利用原子力顯微術(atomic force microscopy, AFM)進行奈米尺度的表面電性研究。我們在近年便曾經利用原子力顯微術中的掃描電位顯微術模式(scanning Kelvin probe microscopy

mode, SKM)研究氮化鎵薄膜表面氧化層厚度對於表面電位的影響,藉此估計表面能態密度。



圖一 不同氧化層厚度的SKM結果

雖然如此,對於利用原子力顯微術進行局域電性量測仍然有許多未解之處,尤其是表面電位會隨著表面電荷的分布而改變,以致於在不同量測距離會導致量測值的誤差等等問題,我們將在這個計畫年度利用掃描電場顯微術(scanning electric field microscopy, EFM)對於探針對表面靜電作用力的模型進行定量的探討。

#### 四、實驗步驟

本實驗採用低壓有機金屬化學氣相沉積系統(MOVPE)成長氮化鎵島狀結構。以(0001)面之藍寶石( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )作為基板上,首先成長厚度 2 微米的氮化鋁鎵鋁( $\text{AlGaIn}$ )緩衝層,其鋁組成為 11%,藉以調變與藍寶石基板間晶格不匹配產生之應力;之後將反應腔溫度降低至 900 成長氮化鎵島狀結構。

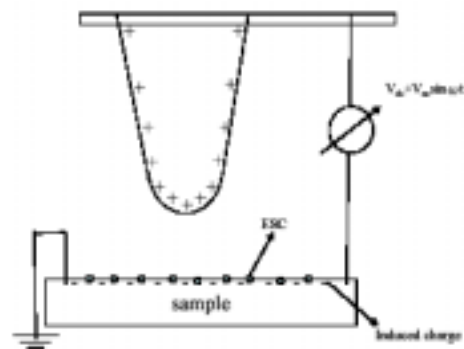
如何釐清氮化鎵島狀結構上局域電荷的電場作用形式,我們利用 NT-MDT 公司生產的 p47H 原子力顯微鏡系統,在大氣環境下進行掃描電場力顯微術的分析,藉由量測金屬探針與表面電荷的靜電作用力對距離的影響,提

出電荷和探針作用的模型。

#### 五、結果與討論

在本計畫執行期間,我們經由掃描電場力顯微術的原理,發展出表面電荷和金屬探針之間的受力模型。所謂原子力顯微術是利用固定探針與樣品之間的受力,利用壓電桿的位移量紀錄樣品表面形貌。若是探針表面度上一層金屬,除了形貌所提供的作用力之外,接地的導電樣品和探針形成電容(capacitance)結構,因此若在探針上外加偏壓時,整個電容所產生的靜電力可以令我們觀察到樣品表面電荷所形成的電場。又由於探針尖端的曲率半徑僅有 30-50 奈米,對於日後奈米元件結構的電性量測將有相當大的助益。

對於探針和樣品之間的靜電作用力模型,我們以圖二表示,



圖二 探針與樣品的電容結構示意圖

在進行掃描電場力顯微術是奠基於輕敲式掃描模式(tapping mode),探針以固定頻率  $\omega$  和 2 倍頻率  $2\omega$  振盪,並且在探針與接地樣品中外加偏壓  $V_{DC} + V_{ac} \sin \omega t$ 。因此我們可以得到在基頻與二倍頻的靜電力,分別以  $F_{\omega}$  和  $F_{2\omega}$  表示。

由圖二所示,金屬探針和樣品表面形成一個圓錐和無限大平板的電容結構,假設樣品表面存在有局域電荷(bound charge),此系統所受到的靜電

力將可以表示為：

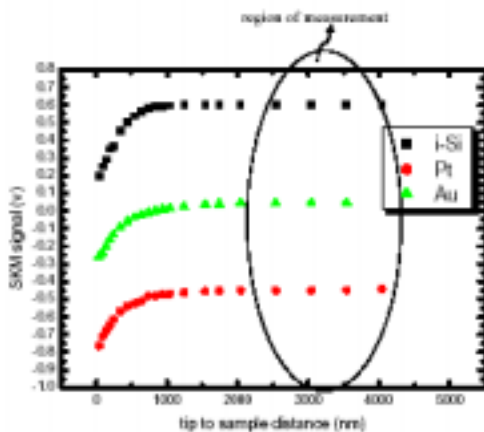
$$F = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} (V_{DC} + V_{ac} \sin \omega t - V_{CPD})^2 + F_C$$

$$F(\omega) = \frac{\partial C}{\partial z} (V_{DC} - V_{CPD}) + F_C$$

$$F(2\omega) = \frac{1}{4} \frac{\partial C}{\partial z} V_{ac}^2$$

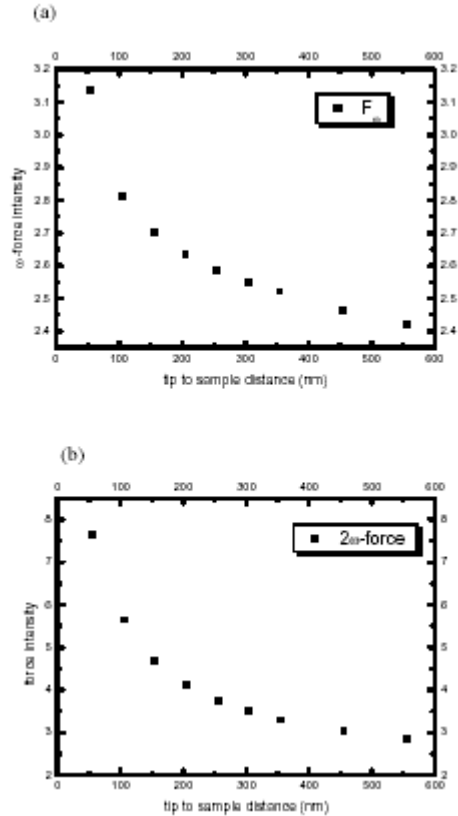
$$\therefore F_C = F(\omega) + \frac{4F(2\omega)}{V_{ac}} (V_{DC} - V_{CPD})$$

其中  $V_{CPD}$  代表探針與樣品之間的電位。因此探針所受到的靜電作用力包含了電容力以及表面電荷所提供的靜電力  $F_C$ 。所謂『掃描電位顯微術』的工作原理在於調變外加直流偏壓使得基頻受力  $F(\omega)$  為零，此時的外加偏壓值即為  $V_{DC} = V_{CPD}$ 。但是由於表面電荷的作用，我們發現所量測的電位會隨著探針與樣品的距離加大而增加，至於 1000 奈米之後而趨近飽和，如圖三所示。在飽和區域時， $V_{DC} = V_{CPD}$  的關係成立，但是當探針逐漸接近樣品時，將會受到表面電荷的影響。為了證實表面電荷靜電力的作用模式，我們進行了不同距離的  $F(\omega)$  和  $F(2\omega)$  量測。



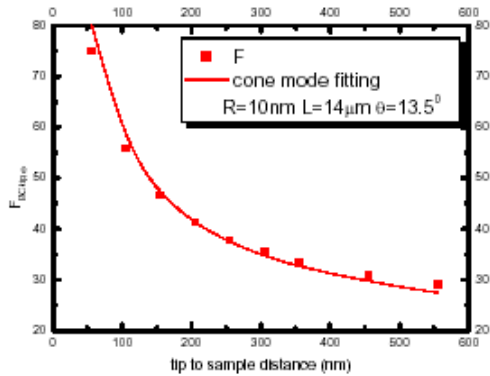
圖三 不同距離下的掃描電位值

圖四對於量測距離時的  $F(\omega)$  我們確實發現這兩個作用力隨著增加距離而降低。



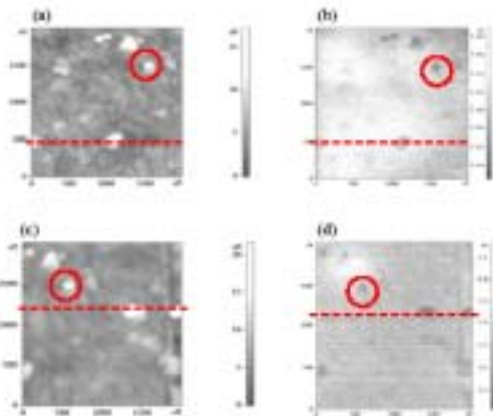
圖四 對於平坦表面的基頻與二倍頻掃描電場力顯微術量測結果

早期的研究群對於這個結果的解釋通常是透過探針和樣品的平行板電容作用力，但是由於探針的曲率半徑遠小於樣品，因此當距離大於曲率半徑時，我們必須將這個幾何結構視作圓錐體和無限大平板的組合。因此利用上述對於電荷作用力的描述，我們可以得到如圖五的實驗結果，並且利用圓錐體(cone model)模型[1]得到相當接近的模擬結果。在這個情形之下我們假設外加交流偏壓時，自由電子將會聚集在樣品和探針的表面，形成一個圓錐體和無限大平板的電容。相對的，被侷限在樣品表面的局域電荷和探針表面自由電子所形成的靜電力(即  $F_C$ )也可以用這個模型加以說明。



圖五 利用圓錐體模型模擬靜電受力

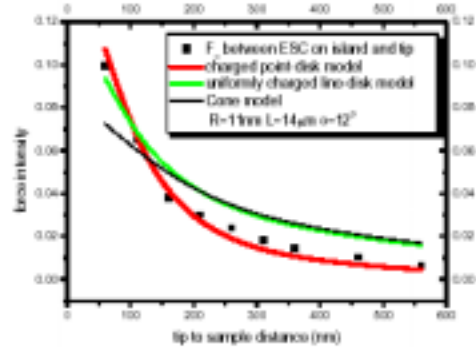
但是對於奈米等級的表面結構而言，由於聚集在結構的表面電荷無法視作無限大平行板，因此我們對於成長氮化鋁鎵表面的氮化鎵島狀結構進行相同的量測，如圖六所示。



圖六 利用圓錐體模型模擬靜電受力

我們發現在島狀結構的位置靜電力較平坦處低，代表在島狀結構位置的局域電荷較高。對於在島狀結構和平坦處的靜電荷作用力  $F_c$  的差異，由圖七可以發現利用圓錐體-無限大平板的模型明顯不適用，相反的若將島狀結構視為一個圓盤，而所有的靜電荷均勻分布在這個圓盤之上[2]時，可以得到相當吻合的模擬結果。由於探針和樣品距離由 50 到 600 奈米，而島狀結構的高度僅有約 10 奈米左右，因此可以近似為圓盤結構，亦即形貌的變化並不會影響靜電力的偵測。從我們的實驗結果，已經可以對於奈米尺度的表面結構進行電荷偵測，因此對於日後奈米元件的應用將有相當大的助

益，例如被寫入矽量子點儲存元件的電子半衰期等等重要的性質都可以利用這個設備加以解析。



圖七 利用圓盤模型模擬靜電受力

## 六、結論

我們在這個計畫執行期間的實驗結果顯示，我們可以得到對於一個近乎無限大的平坦樣品表面，電荷幾乎均勻分布在樣品表面，因此對於探針的作用力可以用圓錐體模型來模擬。至於分布在氮化鎵島狀結構上的電荷，由於島狀結構的高度相較於探針和樣品的距離小到可以忽略，我們可以將電荷視作分布在圓盤上。對於這樣的結果，我們可以建立一套合理的電荷作用力模型，對於日後利用掃描電位顯微術的結果討論將能夠獲得更精確的定量分析。

## 七、參考資料

- [1] S. Patil *et al.* J. Appl. Phys. **88**, 6940 2000
- [2] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*, 2<sup>nd</sup> Ed. 1992