

第四章 實驗結果與討論

本實驗主要藉由傳統的電容-電壓 $C-V$ 特性量測來探討氮化鎵薄膜材料表面態密度分佈情形。探討 $1/C^2-V$ 圖分佈偏離原有之理想線性關係的可能原因。從 $C-V$ 數據與理論推導，可模擬得表面態密度可能分佈情況。另外，我們將討論樣品經硫化銨與鹽酸表面處理後對表面態的影響。

4-1 非線性分佈 $1/C^2-V$ 結果分析

4-1-1 樣品基本量測

此實驗所選用之樣品為同一系列磊晶成長，但是薄膜厚度分別為 $1.2\ \mu m$ （樣品 1）與 $2.4\ \mu m$ （樣品 2）的未摻雜氮化鎵薄膜樣品。在電性量測前，樣品先須清洗及去氧化層的步驟，然後使用電子束蒸鍍系統在樣品表面鍍上鎳（Ni）做蕭基接觸（Schottky contact），在薄膜同一面上再鍍上鋁（Al）做歐姆接觸（Ohmic contact）形成金半界面之蕭基元件結構。圖 4-1 是在室溫下樣品 1 與樣品 2 的電流-電壓（ $I-V$ ）量測結果。以熱激發電流公式（2-3）式模擬其電流特性，可分別求得樣品 1 與樣品 2 的理想因子（ n ）分別為 1.117 與 1.156，表示蕭基元件的特性在一般水準之上。除此之外，由霍爾量測可分別求得樣品 1 與樣品 2 的載子濃度分別為 $8.0 \times 10^{16}\ cm^{-3}$ 及 $7.8 \times 10^{16}\ cm^{-3}$ ，

載子遷移率分別為 $30 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 及 $50 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。由上述基本電性量測可知，同一系列磊晶成長但薄膜厚度不同的兩個樣品，除了長晶條件相似外，其塊材之電學特性也差不多。

4-1-2 C-V量測結果與分析討論

對於蕭基元件，如同 2-3 節的討論，假設在理想情形下，金屬與半導體間無表面態存在，且 n 型半導體內摻雜濃度 (N_D) 均勻分佈，則空乏區電容 C 可表示為：

$$C = A \cdot \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V - kT/q)}} \quad (4-1)$$

對 $1/C^2 - V$ 作圖時，如圖 2-4 所示是理想之線性分佈，由電壓軸的截距所得之電壓值等於 $V_{bi} - kT/q$ 及由斜率等於 $\frac{2}{A^2 q \epsilon_s N_D}$ 的關係式，可分別求得內建電位 V_{bi} 與摻雜濃度 N_D 。

圖 4-2 是在室溫下樣品 1 與樣品 2 的電容-電壓 (C-V) 量測結果。樣品 2 的 $1/C^2 - V$ 曲線分佈是一般常見的情形，呈線性分佈；但是，樣品 1 的 $1/C^2 - V$ 曲線關係卻是偏離理想之線性分佈。造成 $1/C^2 - V$ 圖呈非線性分佈的原因一般可歸納為下列三種：(一) 是摻雜濃度 (N_D : doping density) 不均勻分佈、(二) 是深植能階缺陷 (N_T : deep level defect density) 不均勻分佈、(三) 是表面態密度 (D_{ss} : surface

state density) 不均勻分佈。接下來將分析樣品 1，討論造成其 $1/C^2 - V$ 圖呈非線性分佈是那一個因素主導。

首先，討論摻雜濃度對 $1/C^2 - V$ 分佈的影響。一般塊材 (bulk) 樣品中，除非是異質界面、或是量子井結構、還是刻意對摻雜濃度做變化，否則一般長晶條件下，都可得到摻雜濃度是均勻分佈的樣品。再就本實驗所選用之樣品來說，樣品 1 與樣品 2 是同一系列磊晶成長，雖然薄膜厚度不同 (樣品 1 為 $1.2 \mu m$ 與樣品 2 為 $2.4 \mu m$)，但在長晶條件相似，且塊材之電性量測如載子濃度分別為 $8.0 \times 10^{16} cm^{-3}$ (樣品 1) 及 $7.8 \times 10^{16} cm^{-3}$ (樣品 2) 與載子遷移率分別為 $30 cm^2 V^{-1} s^{-1}$ (樣品 1) 及 $50 cm^2 V^{-1} s^{-1}$ (樣品 2) 也很接近，在這樣的條件下，樣品 2 的摻雜濃度既然是均勻分佈，如圖 4-3 所示，那麼，我們認為樣品 1 與樣品 2 的摻雜濃度應該都可視為均勻分佈，所以排除不均勻分佈摻雜濃度對 $1/C^2 - V$ 圖呈非線性分佈關係的影響。

再者討論深植能階缺陷對 $1/C^2 - V$ 分佈的影響。首要了解深植能階缺陷 N_T 對電容值的影響，影響電容值的因素可視半導體之空乏區內淨電荷分佈的變化，如圖 4-4 所示，當反向偏壓增加時，空乏區寬度隨之增加，空乏區內除了原先摻雜濃度 N_D (此時摻雜濃度是均勻分佈，以便觀察深植能階缺陷的影響) 穩定提供電荷 (ΔN_D^+) 外，還有深植能階缺陷 N_T 也提供額外的電荷補償 (ΔN_T^+)，也就是空乏區內

淨電荷由摻雜濃度 N_D 與深植能階缺陷 N_T 貢獻。假設深植能階缺陷 N_T 是不均勻分佈，也就是隨反向偏壓 V 改變而深植能階缺陷 N_T 值非定值，用 $N_T(V)$ 表示，則 (4-1) 式中的 N_D 可用 $N_D + N_T(V) = N_{SCR}$ 等效表示⁽⁷⁾：

$$C = A \cdot \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_{SCR}}{2(V_{bi} - V - kT/q)}} \quad (4-2)$$

$$= A \cdot \sqrt{\frac{q\epsilon_s (N_D + N_T(V))}{2(V_{bi} - V - kT/q)}} = A \cdot \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V - kT/q)}} \cdot \sqrt{1 + \frac{N_T(V)}{N_D}}$$

(4-2) 式是考慮不均勻分佈深植能階缺陷對電容影響的關係式。在本實驗室以往的結果，一般氮化鎵薄膜樣品的深植能階缺陷值大約在 10^{14} cm^{-3} 左右⁽⁸⁾，但是摻雜濃度值一般都大於 10^{16} cm^{-3} ，如本實驗的樣品 1 約為 $8.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、而樣品 2 約為 $7.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，在 $N_D \gg N_T$ 條件下，使得 $\sqrt{1 + \frac{N_T(V)}{N_D}} \sim 1$ ，使得深植能階缺陷對電容值的影響幾乎可以忽略。所以，不均勻分佈深植能階缺陷對 $1/C^2 - V$ 圖呈非線性分佈關係的影響也可忽略排除。最後，表面態密度對 $1/C^2 - V$ 分佈的影響將在下一節討論。

4-1-3 表面態之模擬分析

關於表面態密度對 $1/C^2 - V$ 非線性分佈的影響，在第二章中曾

討論，對金半界面之蕭基元件結構而言，將表面態密度的影響加到傳統電容電壓關係式中，由電中性原理與高斯原理模擬分析，推得電容、電壓、表面態密度的關係式，表示如下：

$$\text{即公式 (2-41): } \frac{1}{C^2} = \frac{2}{e\epsilon_s N_D} \left[\frac{V + \gamma + \phi_{ms} + \frac{V_1}{4}}{\left(1 + \frac{\partial \gamma}{\partial V}\right)^2} \right]$$

$$\text{與公式 (2-42): } \gamma = \left(\frac{e\delta}{\epsilon_i} \right) \left(\int_{\phi_0}^{E_f - eV} D_{ss} dE \right)$$

。在 2-4-3 節中已介紹，由表面態密度對能帶分佈圖（圖 2-11 所示），藉由模擬 $\Delta\gamma$ 輪廓（profile）與表面態密度分佈輪廓相似的關聯，可模擬推估相對表面態密度值的能帶分佈圖（surface state density profile）。



首先，我們利用公式 2-41 與 2-42 模擬表面態密度的變化與 $\frac{1}{C^2} - V$ 圖分佈的關聯性。圖 4-5 (a) 是假設在傳導帶下方 0.8 至 1.8 個電子伏特的能階範圍之內，有一均勻分佈的表面態密度，經模擬結果得到一線性分佈的 $\frac{1}{C^2} - V$ 圖；反之，圖 4-5 (b) 是假設在傳導帶下方 0.8 至 1.8 個電子伏特的能階範圍之內，有一高斯曲線分佈之非均勻分佈的表面態密度，模擬結果得到一非線性分佈的 $\frac{1}{C^2} - V$ 圖。也就是要使 $\frac{1}{C^2} - V$ 圖呈非線性分佈，表面態密度分佈至少須為非均勻分佈的條件下。

再模擬分析，假設在傳導帶下方 0.8 至 1.8 個電子伏特的能階範圍之內，有三種均勻分佈的表面能態密度，其表面能態密度值分別為 5×10^{12} 、 2×10^{12} 、 $8 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (圖 4-6 中標示 $D_{ss} = 5 \times 10^{12}$ 、 $D_{ss} = 2 \times 10^{12}$ 、 $D_{ss} = 8 \times 10^{11}$)，由圖 4-6 可知，無論是何種均勻分佈之表面能態密度值，其 $\frac{1}{C^2} - V$ 圖的分佈都是呈現線性關係。而且，當表面能態密度值愈大時， $\frac{1}{C^2}$ 之數值也愈大，偏離理想(無表面能態密度)的 $\frac{1}{C^2} - V$ 曲線(圖 4-6 中標示 ideal)也愈遠。也就是若單純只考慮表面能態密度大小對電容值的影響，可由電容之實驗值判斷，當電容之實驗數據偏離理想值愈遠，就表示表面能態對電容的影響愈大。

圖 4-7 (a) 假設在傳導帶下方 0.8 至 1.8 個電子伏特的能階範圍之內，有五種線性遞減之不均勻分佈的表面能態密度 (D_{ss}) 分佈，其表面能態密度平均值均為 $2.0 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 但是表面能態密度變化幅度不一樣，分別為： $D_{ss} = 1 \times 10^{12} \times V + 2.5 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，範圍 $2.5 \sim 1.5 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (其最大值與最小值差距 $1.0 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，表示為：變化幅度 $1.0 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)、 $D_{ss} = 7.5 \times 10^{11} \times V + 2.375 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，範圍 $2.375 \sim 1.625 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (同理，變化幅度 $0.75 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)、 $D_{ss} = 5 \times 10^{11} \times V + 2.25 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，範圍 $2.25 \sim 1.75 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (變化幅度 $0.5 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)、 $D_{ss} = 4 \times 10^{11} \times V + 2.2 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，範圍 $2.2 \sim 1.8 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (變化幅度 0.4×10^{12}

$eV^{-1}cm^{-2}$)、 $D_{ss} = 3 \times 10^{11} \times V + 2.15 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$ ，範圍 2.15 ~ 1.85 $\times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$ (變化幅度 $0.3 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$)。圖 4-7 (b) 是上述五種線性遞減之不均勻分佈的表面態密度影響模擬所得之 $1/C^2 - V$ 圖，而圖 4-8 與圖 4-9 則是個別顯示這五種線性遞減之不均勻分佈表面態密度所得之 $1/C^2 - V$ 圖。為了區分曲線分佈，我們分別用一固定之曲率去逼近各 $1/C^2 - V$ 圖中的曲線，比較這相對的曲率值大小，做為曲線彎曲程度的依據。假設理想之直線(線性分佈)的曲率值為 0，則圖 4-8 中，表面態密度的變化幅度分別為 0.3, 0.4, $0.5 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$ 時所模擬的 $1/C^2 - V$ 圖之曲線，其分析所得之曲率值分別為 0.11、0.13、0.16，在這曲率值之範圍內，仍約略可視為是線性分佈。在本論文中，以曲率值為 0.20 當一分界，當曲率值大於 0.20 時，說明此曲線分佈明顯呈彎曲情形。圖 4-9 中，表面態密度的變化幅度達 0.75, $1.0 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$ 時之模擬的 $1/C^2 - V$ 圖之曲線，其曲率值分別達 0.26、0.35，也就是當表面態密度的變化幅度在 $0.75 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$ 以上，且隨著變化幅度持續增加，模擬所得的 $1/C^2 - V$ 圖分佈愈呈現彎曲情況。依此分析，圖 4-2 中樣品 1 與樣品 2 之曲率值分別為 0.32 及 0.10。

4-1-4 實驗結果與表面態之分析

圖 4-10 是樣品 1 與樣品 2 由 $C-V$ 量測數據再由公式 (2-41) 與公式 (2-42) 推算得的表面態密度能帶分佈圖。在傳導帶下方 0.78 至 1.78 個電子伏特的能階範圍之內，樣品 1 之表面態密度分佈從 5.4×10^{12} 變化至 $4.4 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 。在傳導帶下方 0.79 至 1.79 個電子伏特的能階範圍之內，樣品 2 之表面態密度分佈從 1.5×10^{12} 變化至 $1.1 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 。明顯看出樣品 1 之整體表面態密度值較大，而且樣品 1 表面態密度分佈的變化幅度約 $1.0 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 也比樣品 2 表面態密度分佈的變化幅度約 $0.4 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 來的大。可以知道樣品 1 與樣品 2 都存在表面態密度，但是樣品 1 的表面態密度值顯然較大而且變化幅度達到 $1.0 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，並根據 4-1-3 節的分析模擬，樣品 1 的表面態密度分佈的確使得 $1/C^2 - V$ 圖之曲線明顯彎曲、呈非線性分佈。至於樣品 2 雖然也存在表面態密度，但是因為表面態密度的變化幅度只有 $0.4 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，使得其 $1/C^2 - V$ 圖分佈是一般情形，較接近線性分佈。

為了再次確認由 $C-V$ 量測數據推算得的表面態密度分佈 (圖 4-10 所示)，我們假設先存在如圖 4-10 之表面態密度分佈，再反模擬推算得電容值。比較反模擬推算之 $1/C^2$ 值 (標示: simulated curve) 與一開始由實驗得之 $1/C^2$ 值 (標示: experimental result)，由圖 4-11 所示，明顯地，無論是樣品 1 還是樣品 2，兩者比較結果都非常

吻合，說明我們的樣品，由 $C-V$ 量測數據與公式 (2-41)、公式 (2-42) 推算得的表面態密度能帶分佈圖是恰當的。

4-2 表面處理結果分析

上述結果發現，表面態密度分佈的確影響氮化鎵薄膜材料的 $C-V$ 特性，我們也提出一考慮表面態對 $1/C^2 - V$ 曲線影響之模型，能夠看出 $1/C^2$ 的變化。另外，我們亦發現酸洗之過程會改變 n 型氮化鎵表面態之分佈。接下來將討論 n 型氮化鎵薄膜樣品在不做任何表面處理與進行硫化銨及鹽酸的表面處理時其表面態密度之變化。



4-2-1 樣品基本量測

接下來的實驗使用 n 型氮化鎵薄膜樣品做表面處理分析，由霍爾量測得到載子濃度為 $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，載子遷移率為 $490 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。樣品先經傳統有機溶液清洗後，將樣品分成三類：標示樣品 3 的是不再做任何表面處理 (un-treatment)、樣品 4 的是將樣品浸泡在 60°C 硫化銨 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 20 分鐘的表面處理、樣品 5 則是將樣品浸泡在鹽酸 (HCl) 與去離子水 (D.I. water) 1:1 溶液 4 分鐘的表面處理，然後使用電子束蒸鍍系統在樣品表面鍍上鎳 (Ni) 做蕭基接觸 (Schottky contact)，在薄膜同一面上再鍍上鋁 (Al) 做歐姆接觸 (Ohmic contact)

形成金半接面之蕭基元件結構。圖 4-12 是在室溫下所做的電流-電壓 ($I-V$) 量測結果，由熱激發電流公式 (2-3) 式來模擬其電流特性，可得樣品 3、樣品 4 與樣品 5 的理想因子 (n) 分別為 1.250、1.237 與 1.247。

4-2-2 表面處理對表面態之影響

一般在製作蕭基元件時，除非所有製程皆在真空中完成，否則大部分的蕭基元件在金屬與半導體接面處皆存在介面氧化層，另外樣品表面因晶格週期性排列的中斷產生缺陷，或是表面附著其他粒子等等，這些都統稱為表面態。表面態的存在，除了直接與薄膜材料相關外，亦與後續製程處理上有關。除此之外，我們亦發現酸洗之過程會改變 n 型氮化鎵薄膜樣品表面態之分佈。以下將討論樣品表面經過硫化銨與鹽酸蝕刻後，與未做任何表面處理的樣品比較，會有哪些基本改變，這樣的改變對表面態密度又有何影響。

首先，根據 C. Huh 等人⁽⁹⁾ 在 2000 年提出利用硫化銨表面處理在氮化鎵薄膜樣品，由歐傑電子能譜儀 (AES) 分析，如圖 4-13 (a) 所示，比較不做任何表面處理 (un-treatment) 與做硫化銨表面處理 ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$)，發現經硫化銨表面處理後氧原子的訊號明顯降低。再由 Y. J. Lin 等人⁽¹⁰⁾ 在 2000 年提出用硫化銨表面處理在氮化鎵薄膜樣

品，然後用X射線光電子能譜（XPS）對氧核層（core level）軌域分析，如圖 4-13（b）所示，可清楚發現跟氧化物相關的氧與鎵鍵結（O-Ga）訊號，比較不做任何表面處理（un-treatment）與做硫化銨表面處理（ $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ ）後，經硫化銨表面處理後的氧與鎵鍵結訊號幾乎是偵測不到了。綜合AES與XPS分析結果，可了解氮化鎵薄膜樣品經硫化銨表面處理後能有效清除薄膜表面氧原子的分佈，這與表面態密度值減少有正相關的訊息。

至於鹽酸表面處理，根據K. N. Lee等人⁽¹¹⁾在2000年提出利用鹽酸表面處理在氮化鎵薄膜樣品，用歐傑電子能譜儀（AES）分析，如圖 4-14（a）所示，比較不做任何表面處理（un-treatment）與做鹽酸表面處理（HCl）後，也可發現經鹽酸表面處理後氧原子的訊號一樣會明顯下降。再由I. Shalish等人⁽¹²⁾在2001年用鹽酸表面處理在氮化鎵薄膜樣品，由X射線光電子能譜（XPS）對氧核層（core level）軌域分析，如圖 4-14（b），比較不做任何表面處理（un-treatment）與做鹽酸表面處理（HCl）後，經鹽酸表面處理後氧與鎵（O-Ga）鍵結訊號也幾乎是偵測不到了。整理AES與XPS實驗分析，鹽酸表面處理與硫化銨表面處理的結果很相似，經過表面處理後，氮化鎵薄膜樣品也能有效清除薄膜表面氧原子的分佈，或許這與降低表面態密度值正相關。接下來將由電容電壓（C-V）量測結果來探討表面處理對表

面態密度的影響。

4-2-3 $C-V$ 量測結果與分析討論

圖 4-15 是在室溫下對樣品 3: 不做任何表面處理(un-treatment)、樣品 4: 硫化銨 ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$) 蝕刻表面處理與樣品 5: 鹽酸 (HCl) 蝕刻表面處理所做的電容-電壓 ($C-V$) 量測結果。觀察其 $1/C^2-V$ 圖分佈都是呈線性關係, 而且曲線彼此間的分佈像是平移而已。根據 4-1-3 節的模擬分析, 由其 $1/C^2-V$ 圖的分佈都是線性關係, 可以推測其表面態密度的變化幅度應當都很小, 另外 $1/C^2-V$ 圖曲線偏離較遠的樣品 3 推測其表面態密度值較大。

若比較圖 4-6 中未摻雜氮化鎵薄膜之理想 $1/C^2-V$ 曲線與圖 4-15 中 n 型氮化鎵薄膜之理想 $1/C^2-V$ 曲線之 $1/C^2$ 值大小, 因為 n 型氮化鎵薄膜之載子濃度較高, 即公式 (4-1) 中 N_D 值也較大, 自然 n 型氮化鎵薄膜之 $1/C^2$ 值比未摻雜氮化鎵薄膜之 $1/C^2$ 值來的低。另外, 若各自比較圖 4-6 與圖 4-15, 發現它們的理想 $1/C^2-V$ 曲線都是在最低處, 假如只單純考慮表面態存在之影響, 推測是因為此表面態為受體型態(acceptor-like)缺陷的因素, 使得電容值增加, $1/C^2$ 值低。

圖 4-16 所示是根據 $C-V$ 量測數據再由公式(2-41)與公式(2-42)

推算得的表面態密度能帶分佈圖。比較不做任何處理的樣品 3，在熱平衡下，在傳導帶下方 0.85 至 1.85 個電子伏特的能階範圍之內其表面態密度分佈從 3.5×10^{12} 變化至 $3.1 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，明顯大於硫化銨處理的樣品 4，在傳導帶下方 0.90 至 1.90 個電子伏特的能階範圍之內其表面態密度分佈從 2.2×10^{12} 變化至 $1.8 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 與鹽酸處理的樣品 5，在傳導帶下方 0.80 至 1.80 個電子伏特的能階範圍之內其表面態密度分佈從 2.1×10^{12} 變化至 $1.7 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 。可發現經硫化銨或鹽酸表面處理後，樣品的表面態密度值的確會下降，這與 4-2-2 節中引用，由 AES 與 XPS 分析，經過表面處理能有效清除氮化鎵薄膜表面氧原子的分佈，兩者的確有直接相關。再者，因為這三個樣品之表面態密度的變化幅度約只有 $0.4 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，與 4-1-3 節模擬分析對應，其 $1/C^2 - V$ 圖的分佈的確是呈線性關係。而且直接由 $1/C^2 - V$ 圖曲線偏離程度來判斷，樣品 3 之 $1/C^2 - V$ 圖曲線偏離較遠，分析所得之表面態密度值的確也比較大，與預期是相吻合。

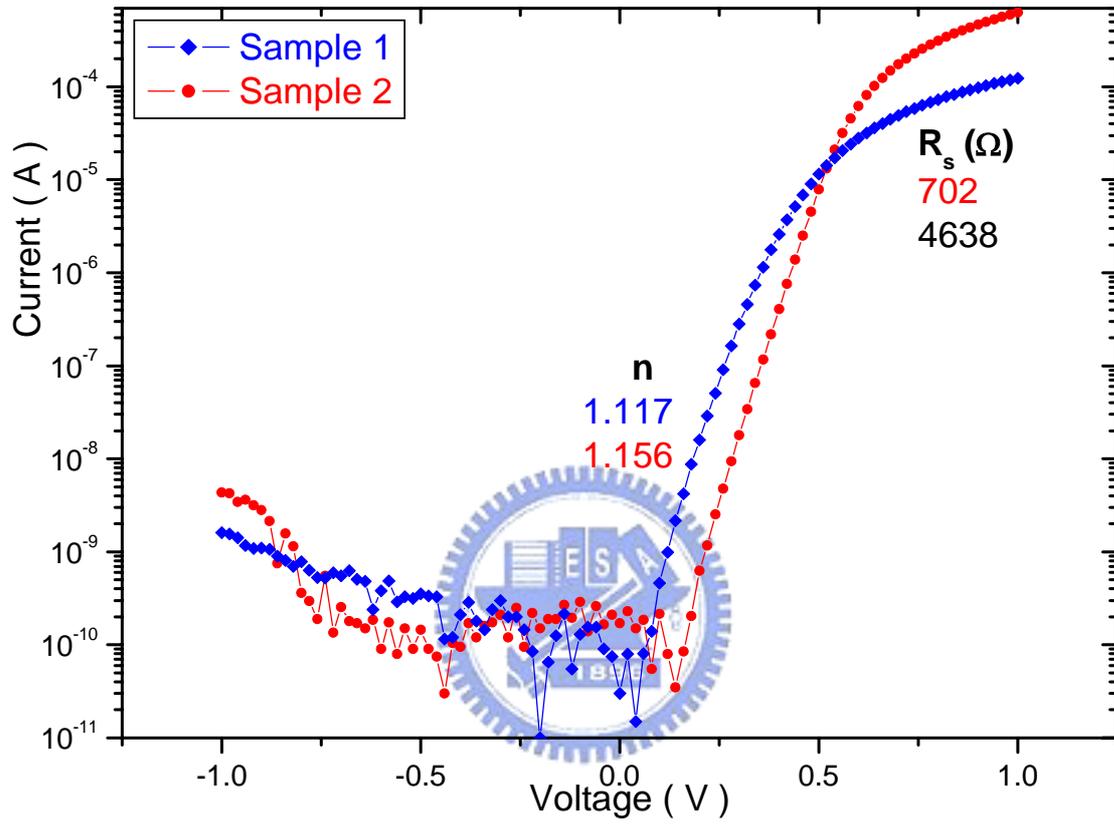


圖 4-1 氮化鎵蕭基二極體之電壓-電流特性關係

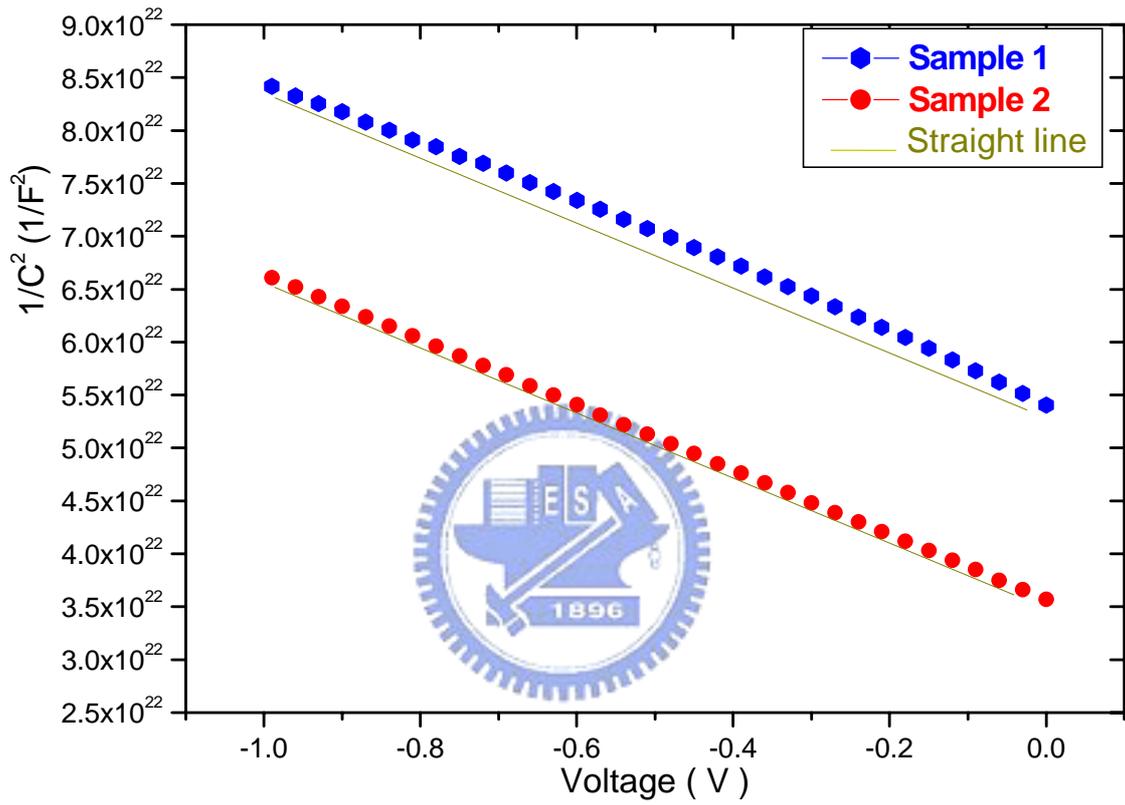


圖 4-2 氮化鎵蕭基二極體之電容-電流特性關係

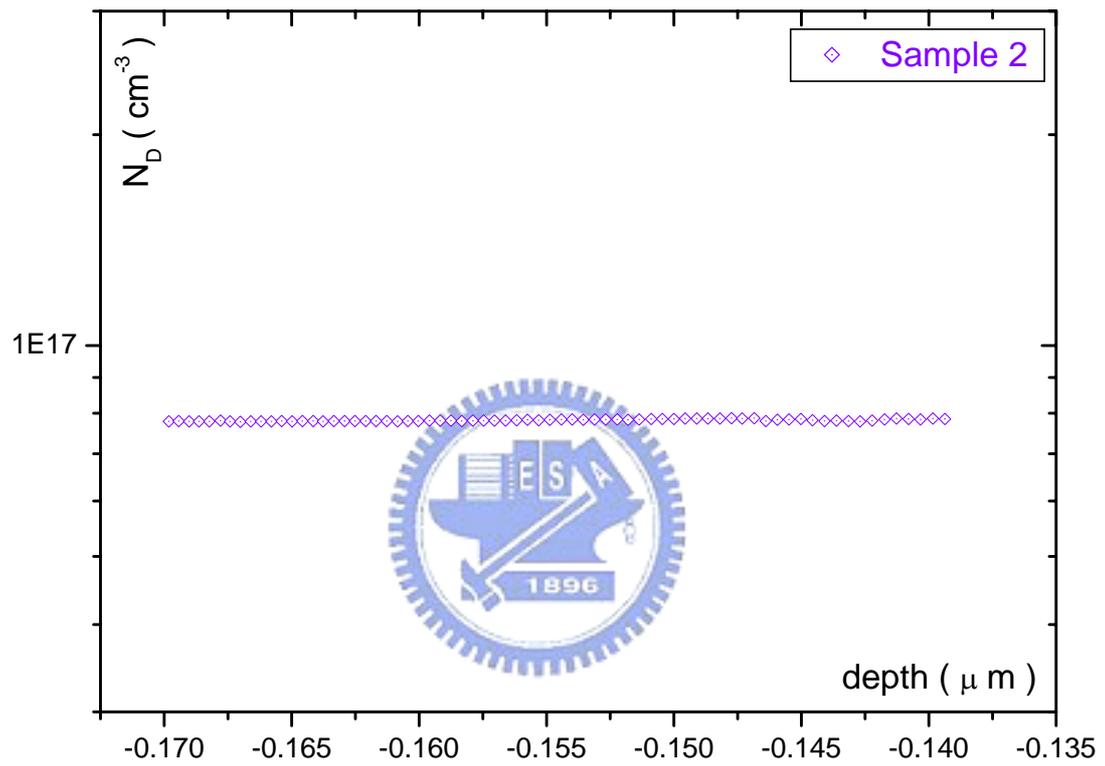


圖 4-3 樣品 2 摻雜濃度 N_D 分佈圖

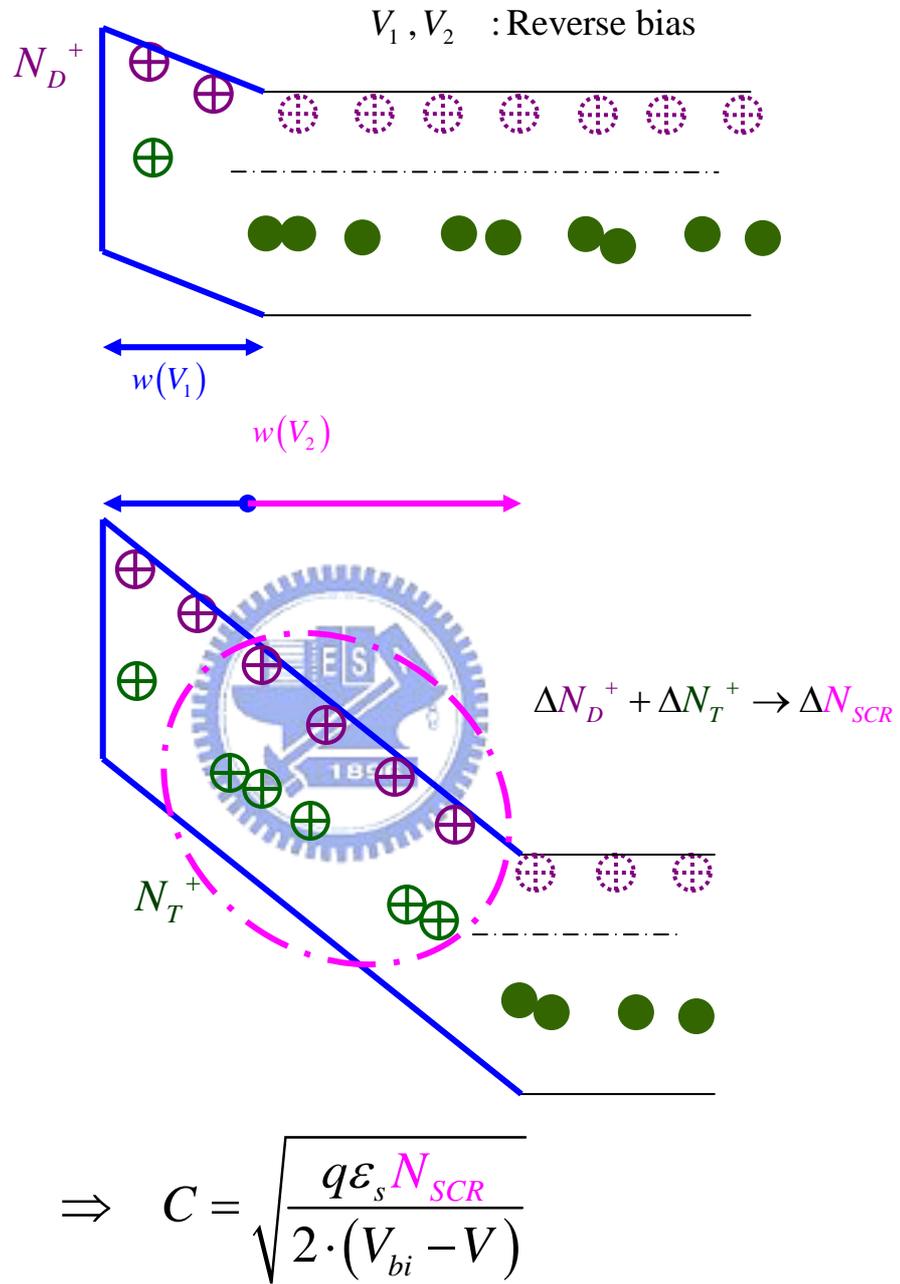
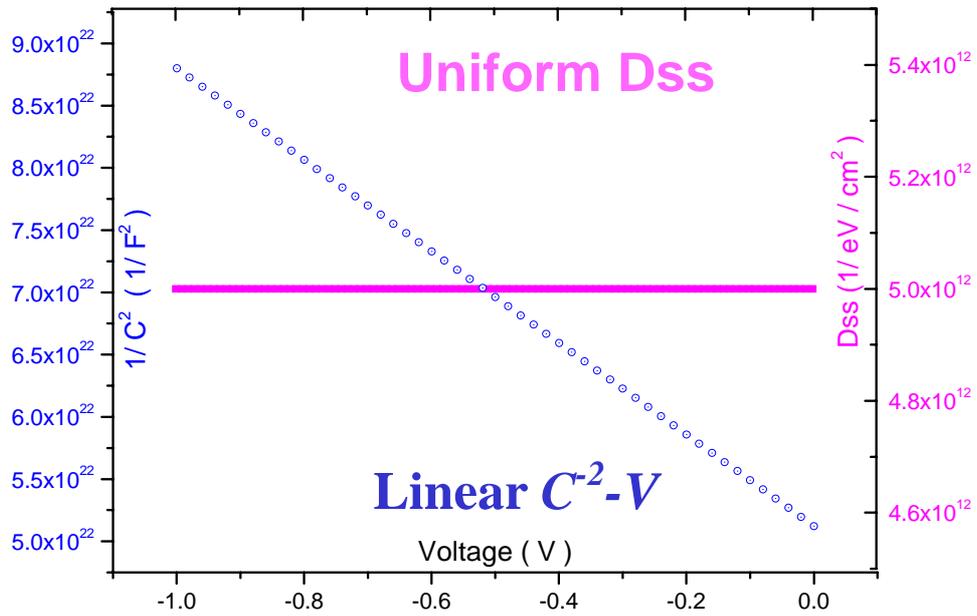
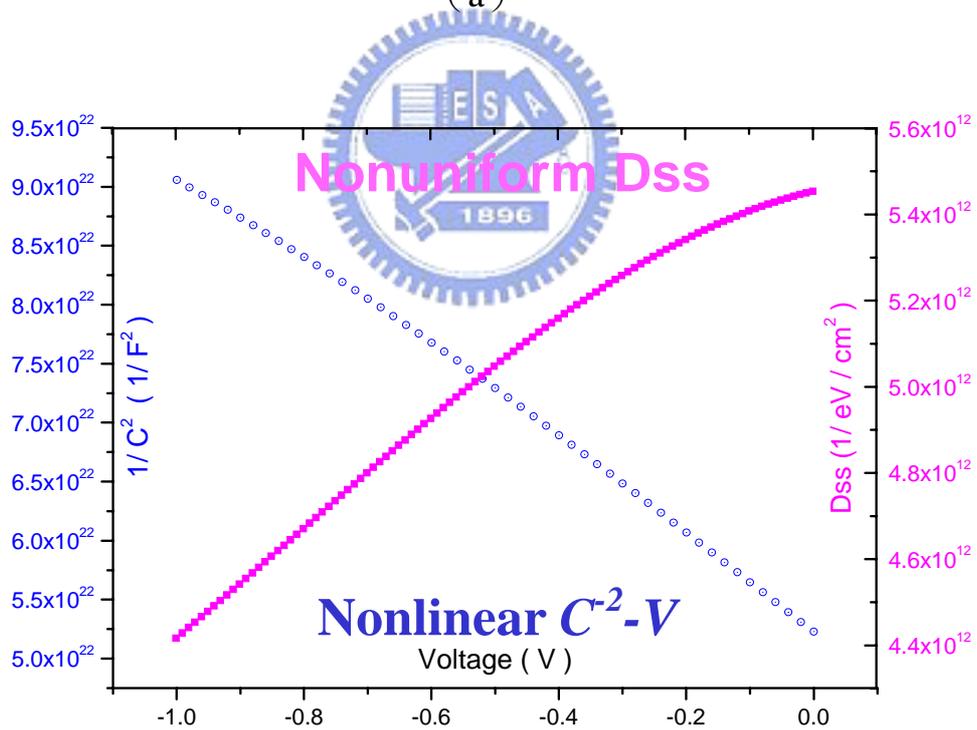


圖 4-4 電容值的變化與空乏區內摻雜濃度及深植能階缺陷

所提供之電荷的關係示意圖



(a)



(b)

圖 4-5 模擬：(a) 均勻分佈 D_{ss} ，得線性 $C^{-2}-V$ 分佈

(b) 不均勻分佈 D_{ss} ，得非線性 $C^{-2}-V$ 分佈

$C^{-2}-V$ vs. uniform

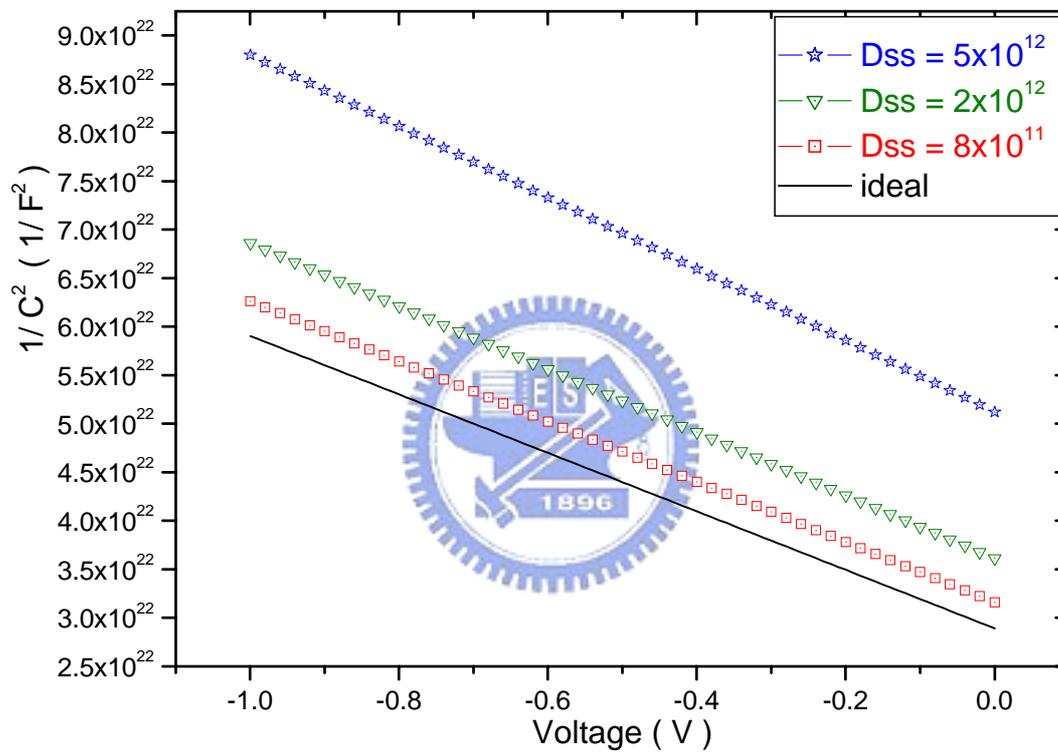
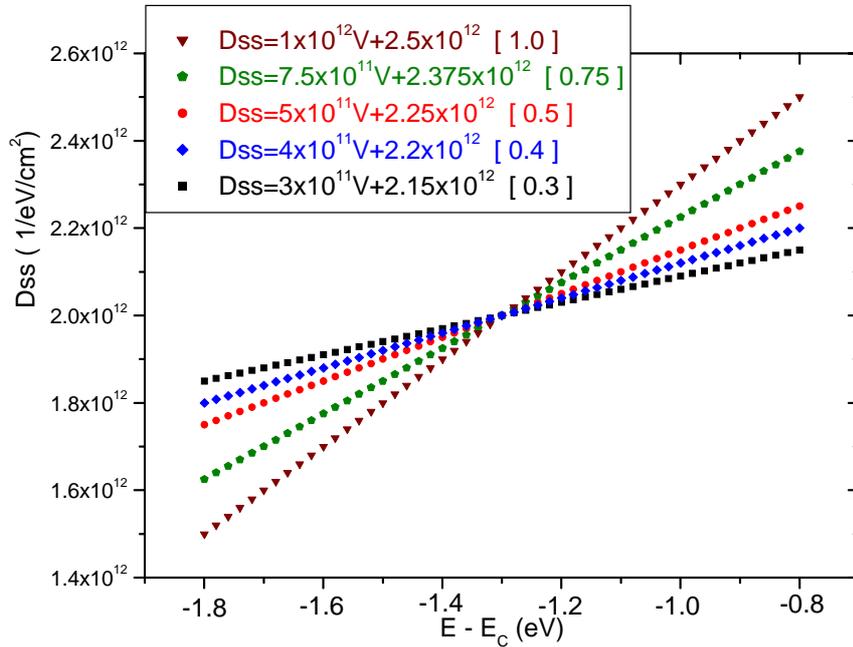


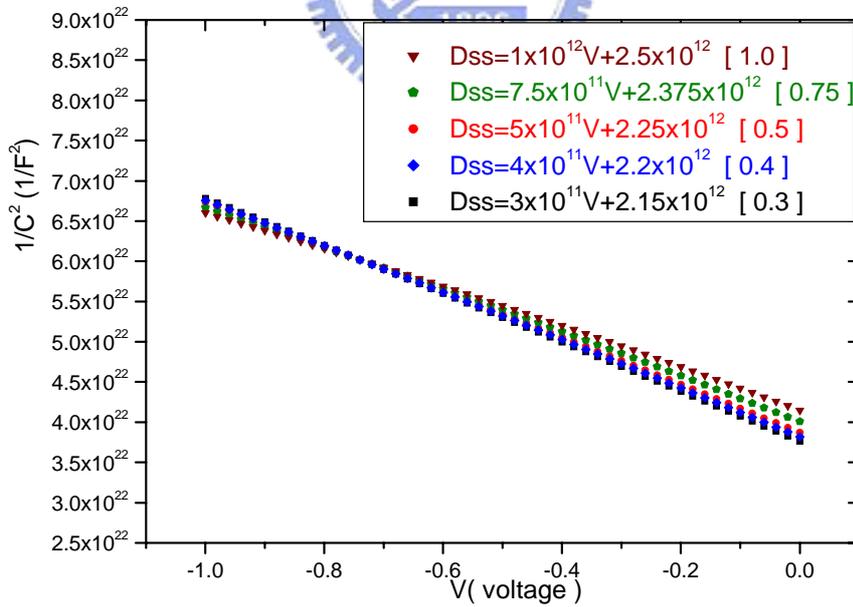
圖 4-6 模擬：三種不同均勻分佈的表面態密度

所得之 $C^{-2}-V$ 分佈圖

nonuniform Dss vs. $C^{-2}-V$



(a)



(b)

圖 4-7 模擬：五種非均勻分佈表面態密度與其 $C^{-2}-V$ 分佈圖

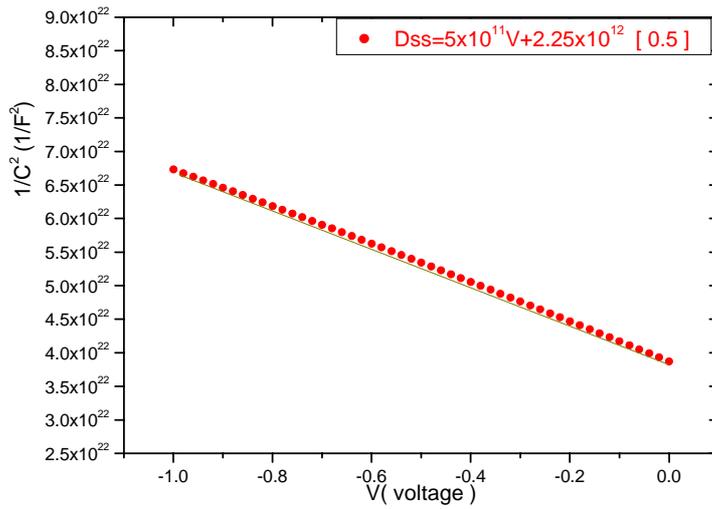
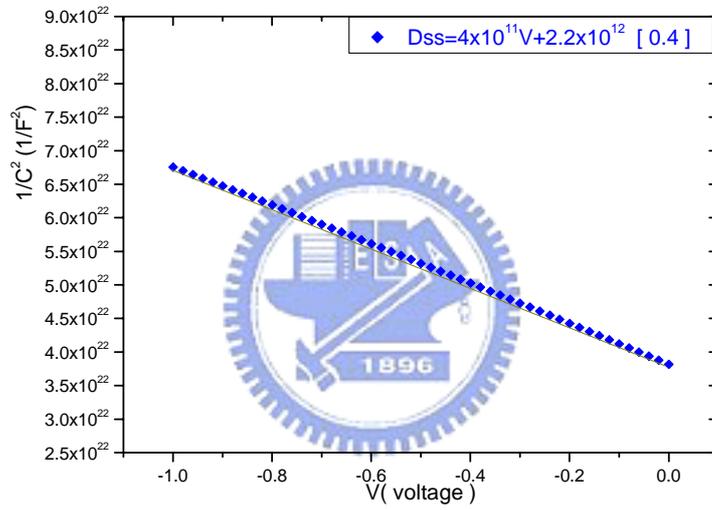
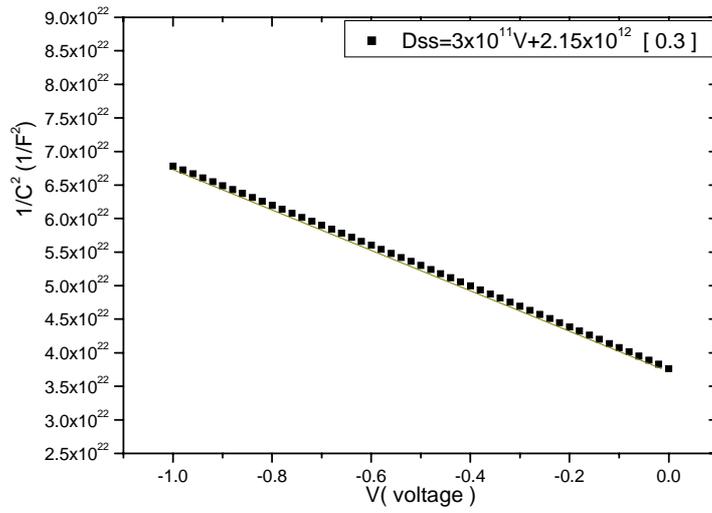


圖 4-8 模擬：不同非均勻分佈表面態密度所得之 $C^{-2} - V$ 分佈圖

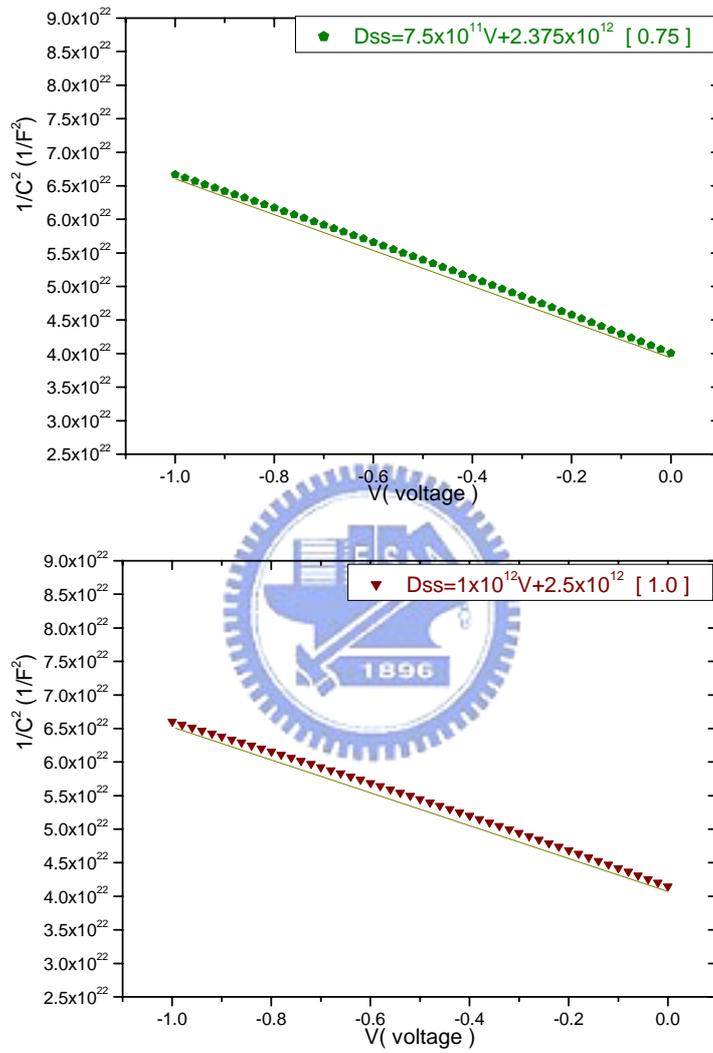


圖 4-9 模擬：不同非均勻分佈表面態密度所得之 $C^{-2} - V$ 分佈圖

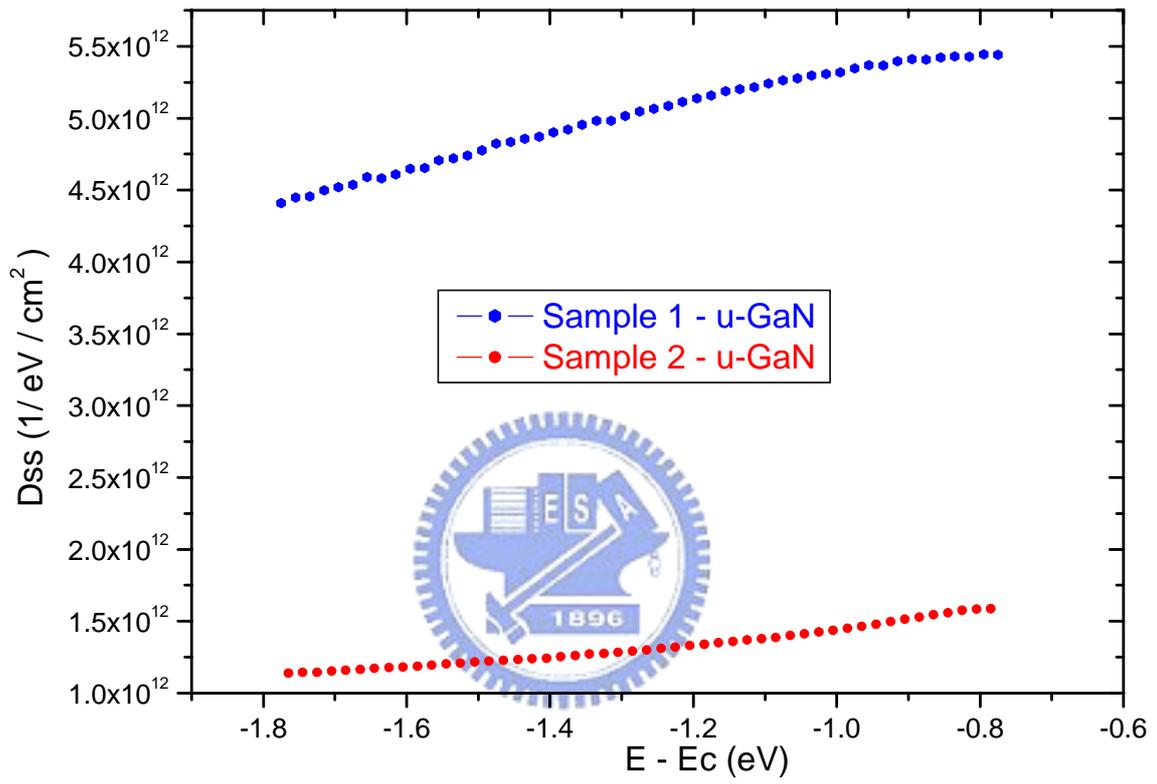


圖 4-10 樣品 1 與樣品 2 的表面態密度能帶分佈圖

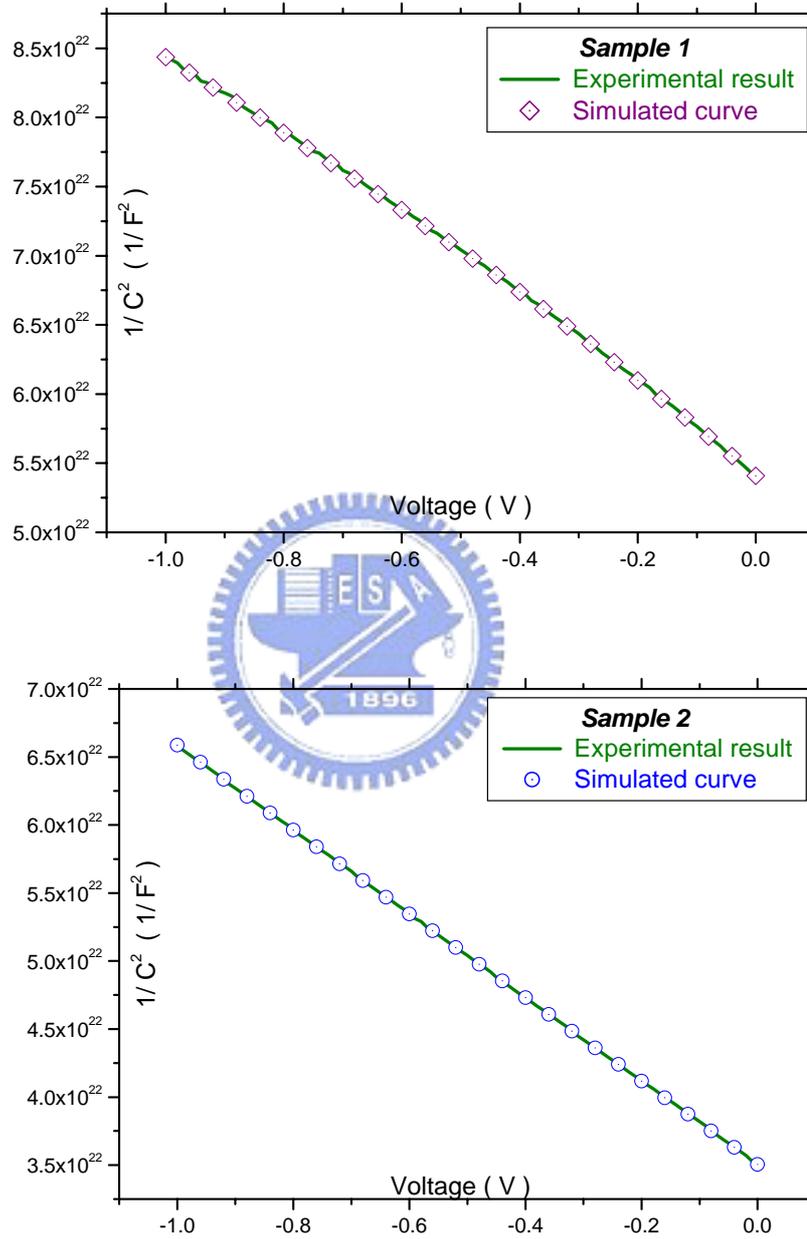


圖 4-11 實驗量得的 $C-V$ 數據與後來反推回得的 $C-V$ 數據

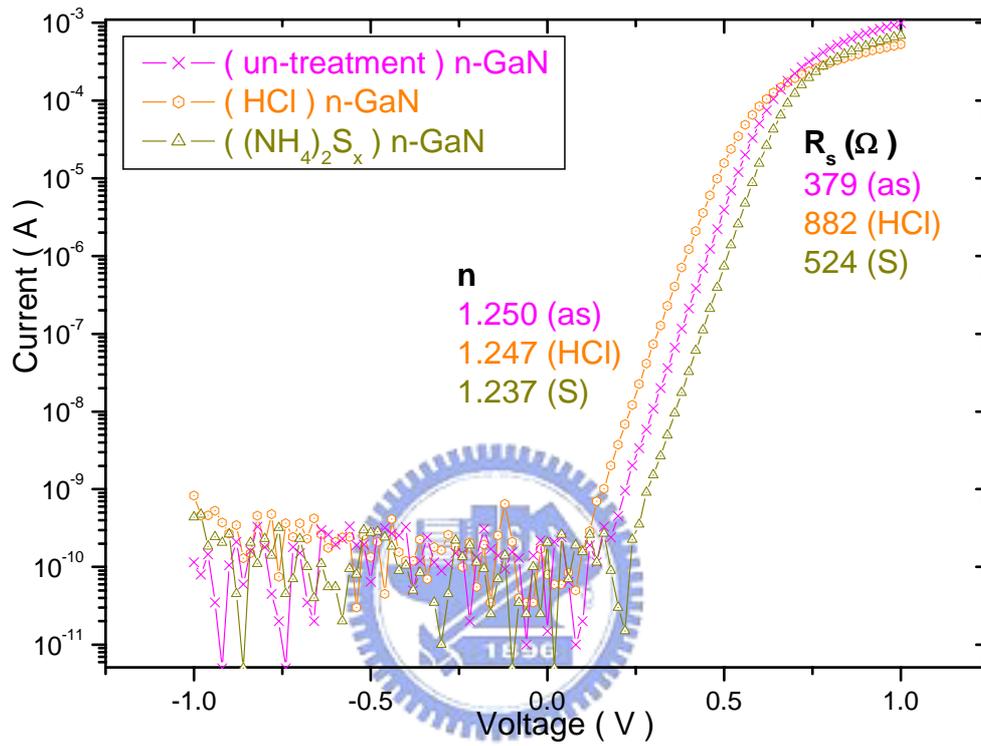
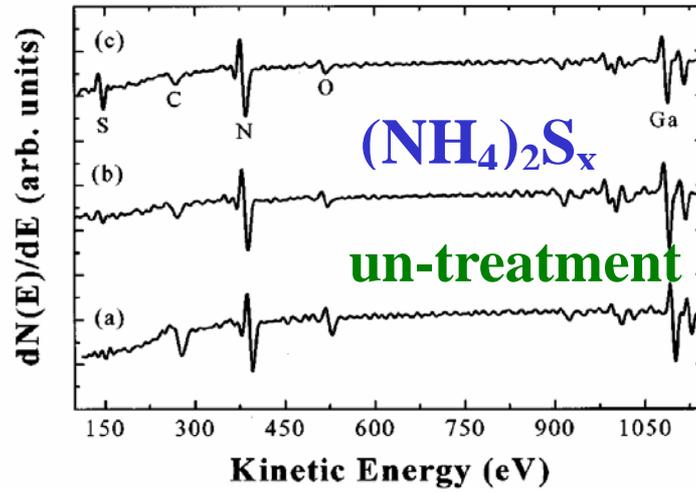


圖 4-12 氮化鎵蕭基二極體之電壓-電流特性關係

(a) AES



(b) XPS

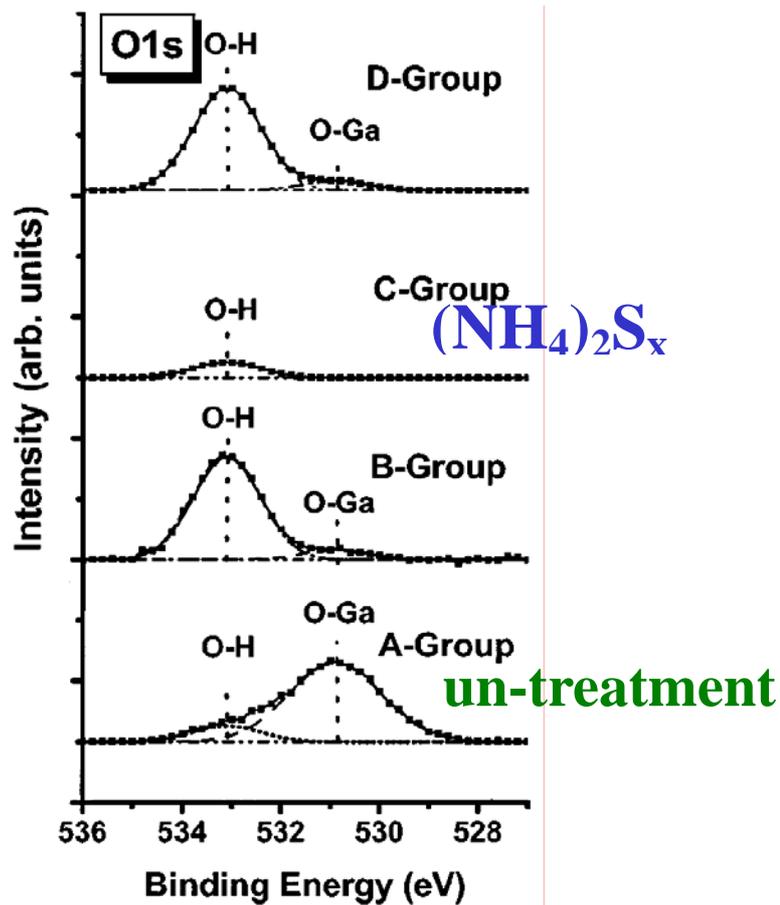


圖 4-13 (AES) 與 (XPS) 分析

硫化銨表面處理後的氮化鎵薄膜樣品表面

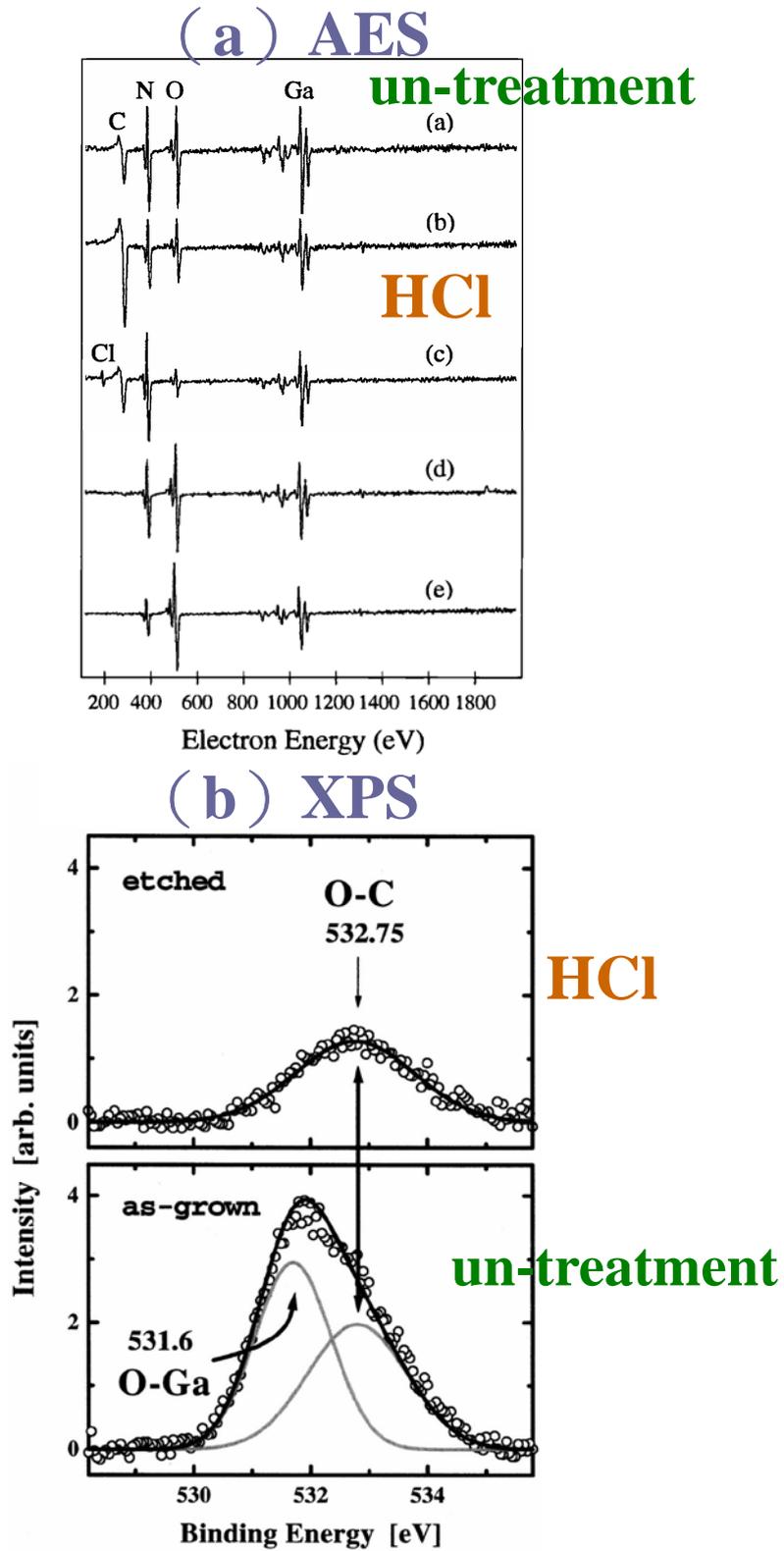


圖 4-14 (AES) 與 (XPS) 分析

鹽酸表面處理後的氮化鎵薄膜樣品表面

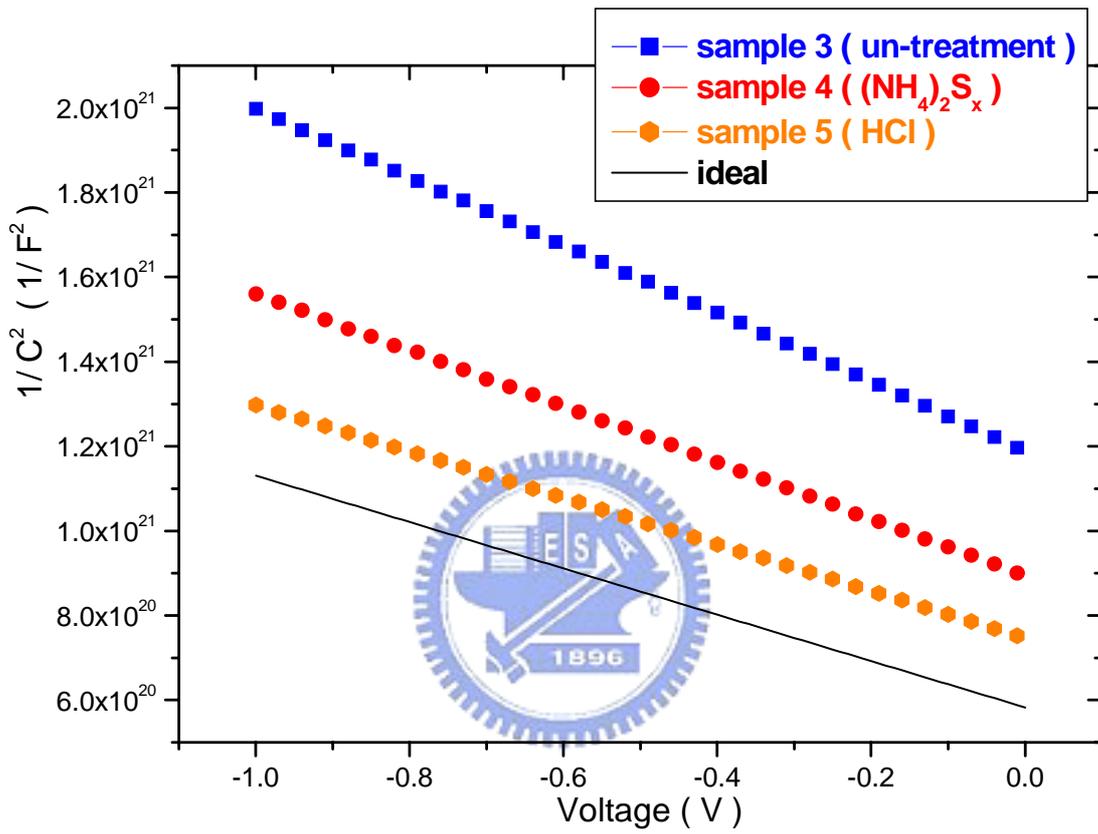


圖 4-15 氮化鎵蕭基二極體之電容-電流特性關係

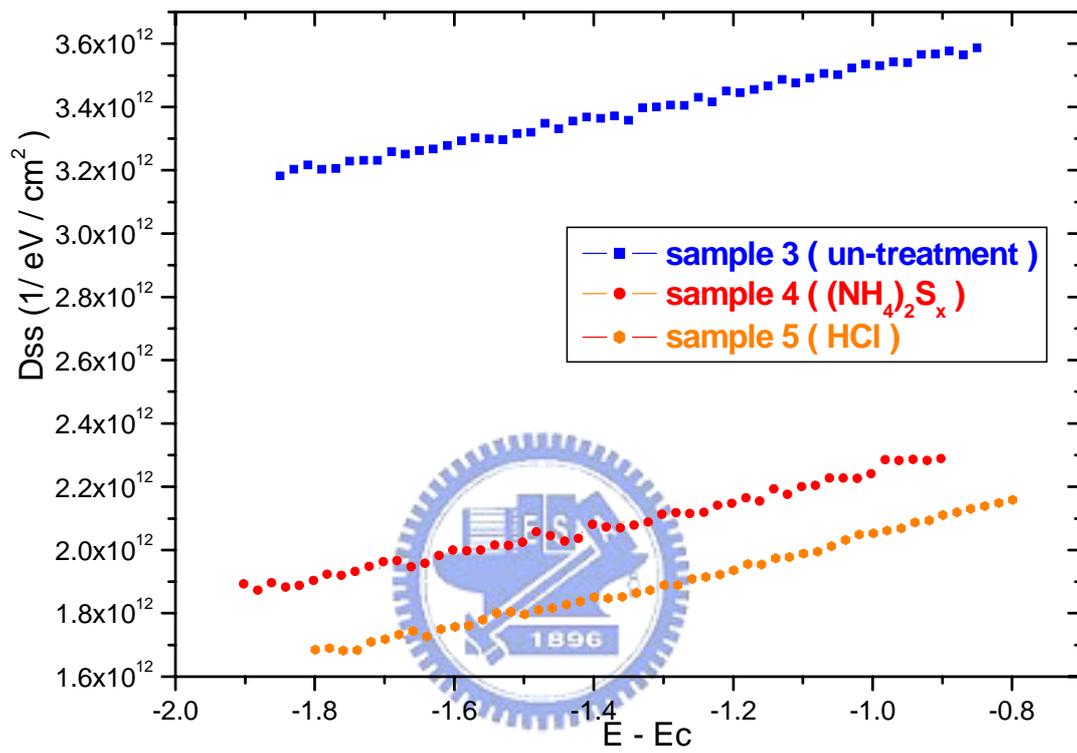


圖 4-16 表面態密度的能帶分佈圖

第五章 結論

本論文主要是以電容-電壓 (Capacitance-Voltage, C-V) 特性量測來探討氮化鎵薄膜材料表面態密度分佈情形，並藉由硫化銨與鹽酸之表面處理方式探討表面態密度的變化對 C-V 特性曲線的影響。

首先，對於兩個未摻雜氮化鎵薄膜樣品，其長晶條件相同但薄膜厚度分別為 $1.2\ \mu\text{m}$ (樣品 1) 與 $2.4\ \mu\text{m}$ (樣品 2)，由霍爾量測得樣品之載子濃度分別為 $8.0 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 及 $7.8 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ ，載子遷移率則分別為 $30\ \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 及 $50\ \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。由電容-電壓實驗結果發現樣品 2 的 $1/C^2 - V$ 圖分佈是呈理想之線性關係；但是樣品 1 的 $1/C^2 - V$ 圖分佈卻是呈現非線性關係。我們認為若蕭基元件結構之金屬-半導體接面之間存有表面態，電子將被捕捉形成表面電荷，由電中性原理，表面電荷與空乏區電荷相互補償，使得空乏區電容值產生變化，導致 $1/C^2 - V$ 圖曲線偏離原有之理想線性關係，由此定量描述表面態密度分佈如何影響 $1/C^2 - V$ 曲線關係，並由 C-V 量測結果得到表面態密度分佈。根據實驗數據與模型推算，我們發現在傳導帶下方約 0.78 至 1.78 個電子伏特的能階範圍之內，樣品 1 的表面態密度分佈從 5.4×10^{12} 變化至 $4.4 \times 10^{12}\ \text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ (變化幅度 $1.0 \times 10^{12}\ \text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$)，樣品 2 的表面態密度分佈從 1.5×10^{12} 變化至 $1.1 \times 10^{12}\ \text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ (變化幅度 $0.4 \times 10^{12}\ \text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$)。說明除了樣品 1 表面態密度值較大外，主要

是樣品 1 表面能態密度分佈的變化幅度達 $1.0 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 的成因，使得 $1/C^2 - V$ 圖明顯呈非線性分佈。

除此之外，我們發現酸洗之過程會改變 n 型氮化鎵薄膜之表面能態分佈。比較 n 型氮化鎵薄膜樣品在不做任何表面處理 (un-treatment) 與進行硫化銨 ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$) 及鹽酸 (HCl) 的表面處理之三種情況，我們可以由 C-V 數據得知表面處理對表面能態密度的影響，並且觀察其表面能態密度的變化。由實驗結果發現，在傳導帶下方約 0.85 至 1.85 個電子伏特的能階範圍之內，不做任何表面處理的樣品 3，其表面能態密度分佈從 3.5×10^{12} 變化至 $3.1 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ，明顯大於硫化銨處理的樣品 4 約從 2.2×10^{12} 變化至 $1.8 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 與鹽酸處理的樣品 5 約從 2.1×10^{12} 變化至 $1.7 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 。由於表面氧原子之存在是造成表面能態的主要成因，上述表面能態密度之降低應是與硫化銨及鹽酸處理可以有效清除氮化鎵表面之氧原子分佈之性質直接相關。