

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

P 型氮化鎵蕭特基二極體研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2218-E-035-007-

執行期間：91 年 12 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

執行單位：逢甲大學電機工程學系(所)

計畫主持人：林祐仲

計畫參與人員：柯焜騰,李振道,許洲維

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 16 日

計畫中文摘要

關鍵字：氮化鎵，歐姆接觸，特徵接觸電阻，表面費米能階。

氮化鎵相關材料已被用於製作藍色發光二極體及雷射等光電元件，為改善元件的性能，必須有良好的p型及n型歐姆接觸特性。目前，p型氮化鎵的歐姆接觸製作較為困難，為達到p型氮化鎵之歐姆接觸需用較高溫之熱處理形成熱合金化歐姆接觸，此高溫處理將會對元件與材料造成某程度之影響，因此，本計畫重點在於發展p型氮化鎵非熱合金化歐姆接觸之外並與熱合金化歐姆接觸進行比較。茲分屬研究重點如下：

(A) p 型氮化鎵有效活化方式之開發與其對表面費米能階和產生自由載子濃度的特性分析，建立 p 型氮化鎵活化之機制

將 p 型氮化鎵經過不同形式之活化後經霍爾(Hall)觀測系統測量 p 型氮化鎵載子濃度，並以 x 光光電子能譜(XPS)術和深紫外光光電能譜(UPS)術觀測經活化的試片表面，整合分析 p 型氮化鎵的表面能帶分布情形。

(B) 金屬/p 型氮化鎵歐姆接觸特性分析

選擇合適之金屬蒸鍍在經有效活化後之 p 型氮化鎵上，以電流-電壓(I-V)法測量其特徵接觸電阻，並以 XPS 剖面分析技術深入研究熱處理前後金屬/p 型氮化鎵界面之特性。為了建立完善之歐姆接觸機制，也將製作金屬/p 型氮化鎵蕭特基二極體，以 I-V 和電容-電壓(C-V)法觀測界面之特性。

計畫英文摘要

Keywords: GaN, ohmic contact, specific contact resistance, surface Fermi level.

GaN has a 3.4 eV direct gap at room temperature and has attracted much interest for its application in optical devices in the short-wavelength region such as blue light emitting diodes (LEDs) and laser diodes (LDs). Other devices that have been demonstrated so far include ultraviolet photoconductive detectors, ultraviolet Schottky barrier photodetectors, metal – semiconductor field effect transistors, and high electron mobility transistors. Ohmic contacts to p-GaN with low resistance are essential in improving the performances of optical devices. In order to improve the ohmic performance of the metals/p-GaN samples, the samples were annealed at the higher temperature. High-temperature annealing led to the formation of defects, which resulted in degrading the performance of optical devices, in the p-GaN sample. So in this plan, we are devoted to improve the nonalloyed and alloyed ohmic contact of p-GaN samples under the various activations. Using the Van der Pauw-Hall measurement performed, the electron concentration of the p-GaN

epilayer was determined. A specific contact resistance was measured using the transmission line method (TLM) for metals contacts to the p-GaN samples. In order to investigate the interfacial characteristics for the metal/p-GaN, all samples were measured using current-voltage (I-V) method, capacitance-voltage (C-V) measurement, x-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS).

(A) Study the activation of p-GaN under the various conditions:

In this work, the position of surface Fermi level of p-GaN samples under the various activations can be obtained using UPS measurement and XPS measurement. Using the Van der Pauw-Hall measurement performed, the electron concentration of the p-GaN epilayer was determined. The Ga/N atomic concentration ratio on the activated p-GaN samples was measured by XPS. In order to understand the activation mechanisms of p-GaN samples under the various activations, all observed results from Hall, XPS, and UPS were further analyzed.

(B) Study the characteristics of metals nonalloyed and alloyed ohmic contacts to p-GaN samples

The characteristics of Pt, Ni and Au (nonalloyed and alloyed) ohmic contacts to the activated p-GaN are measured using I-V in this work. The interfacial characteristics for metal/p-GaN are analyzed using XPS measurement. The formation mechanisms of ohmic contacts for the metals/p-GaN will be investigated in this study. In order to understand the interfacial characteristics of metal/p-GaN samples, the fabricated Schottky diodes of p-GaN were analyzed using the C-V measurements.

一.前言:

在近幾年中,III -V 族氮化物為主的半導體被廣泛的研究。因為其發光的波長範圍可從藍光到紫外光,加上具有相當的發光效率,所以適合應用於製作成藍色發光二極體、藍光雷射二極體、藍光紫外光檢測器及蕭特基二極體等元件。

二.研究目的:

由於 p 型氮化鎵(p-GaN)磊晶層之電洞濃度無法有效的提高,因此,金屬/p 型氮化鎵要獲得良好歐姆接觸(具有低特殊接觸電阻(specific contact resistance, ρ_c)值)較為困難。在本次實驗中,我們利用金(Au)/鎳(Ni)/p 型氮化鎵在空氣環境中以 500°C 進行 3 分鐘熱處理之後,可獲得極低的 ρ_c (2×10^{-6} ohm-cm²),並進而延長熱處理時間探討其對 ρ_c 的影響,建立其歐姆接觸形成與退化的機制。然而在 p 型氮化鎵歐姆接觸研究已有諸多成果被發表,反觀 p 型氮化鎵的蕭特基接觸的研究並不多,所以我們也將研究 p 型氮化鎵蕭特基位障等特性。在本次實驗中,我們使用透明導電錫氧化膜(indium-tin-oxide, ITO)來製作 p 型氮化鎵蕭特基二極體並深入探討其接觸的特性。

三.文獻探討:

根據我們的了解,成長高品質 p 型氮化鎵鍍上 ITO 製作歐姆接觸和成長高品質 n 型氮化鎵鍍上 ITO 蕭特基接觸,已有許多人研究,然而,成長高品質 p 型氮化鎵,鍍上透明導電玻璃蕭特基接觸,卻未曾有人研究,而在我們的實驗中利用電流-電壓法量測 p 型氮化鎵蕭特基二極體的位障高度,此研究成果首次被發表。

四.研究方法:

本實驗分為兩部分:(1)熱處理時間對 p 型氮化鎵歐姆接觸的影響,我們利用 x 光光電子能譜(x-ray photoelectron spectroscopy,XPS)及 Cserveny 所提出的理論[1]來探討在熱處理過程中所形成的氧化鎳其電洞濃度的變化,與其界面的特徵接觸電阻、位障等彼此的相關性。首先利用金屬有機化學氣相磊晶法(metalorganic chemical vapor deposition,MOCVD)成長 p 型氮化鎵薄膜(其中緩衝層之上的鎂摻雜的氮化鎵活化後之電洞濃度為 2×10^{17} cm⁻³),以 Ni/Au(2.5/2.5nm)的金屬組合來做為 p 型氮化鎵的歐姆接點,並應用傳輸線模式(Transmission Line Model, TLM)測量經過不同熱處理時間後的 Au/Ni/p-GaN 的 ρ_c ,作為判斷歐姆接觸品質好壞的依據。然後,以 x 光光電子能譜術作為分析熱處理後所形成之 NiO/p-GaN 界面特性的工具,企圖觀察熱處理時間對熱合金化(alloyed)p 型氮化鎵歐姆接觸特性的影響。(2)利用 ITO 來製作 p 型氮化鎵蕭特基接觸的特性,利用電流密度-電壓(J-V)量測法量測 ITO 鍍在 p 型氮化鎵上的蕭特基二極體的電特性,同時用熱游子場放射(thermionic field emission,TFE)的模型來計算位障高度和 ITO 的功函數,最後利用 x 光光電子能譜進行觀測並對 ITO/p 型氮化鎵界面位障高度做一驗證。首先利

用 MOCVD 法在藍寶石(sapphire)基底上成長非摻雜的氮化鎵緩衝層,接著再成長鎂摻雜(鎂摻雜濃度為 $6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)的 p 型氮化鎵層,然後將試片浸入硫化銨溶液 30 分鐘,溫度為 60°C ,再用 Ni/Au(5/5nm)的金屬組合來做為 p 型氮化鎵的歐姆接點,最後,在鍍上 ITO(厚度為 300nm)製作蕭特基接觸。

五.結果與討論:

(1)熱處理時間對 p 型氮化鎵歐姆接觸的影響:

根據 TLM 實驗的所計算的資料(顯示於圖 1.)得知,在空氣環境下經過 3 分鐘 500°C 的熱處理之後,由於界面的 Ni 形成氧化鎳(NiO)(顯示於圖 2.)導致 ρ_c 的降低;但超過 3 分鐘的熱處理試片經觀測發現隨著熱處理時間的增加,其 ρ_c 也隨之增加 圖 3.顯示各組經不同時間熱處理之試片再經 XPS 觀測位於 NiO/p-GaN 界面處的 $\text{Ga}2p_{3/2}$ 能譜峰,間接了解其界面的能帶彎曲情況,這表示延長熱處理時間會引起費米能階(E_F)移向導帶底端(E_C)並造成 NiO/p-GaN 界面位障增高。因此,超過 3 分鐘的熱處理時間所導致 ρ_c 的增加是由於高位障形成所致。為了進一步深入探討,此次研究將 XPS 於 NiO/p-GaN 界面所觀測到 O/Ni 原子濃度相對比值進行分析(顯示於圖 1.,將 3 分鐘熱處理試片的 O/Ni 原子濃度比值設為 1)。結果顯示,當延長熱處理時間,其 O/Ni 相對比值將會增加。根據前人所發表的論文[2]指出,當 NiO 的 O/Ni 原子濃度比值增加將導致 NiO 的電洞濃度提高。這表示當 Au/Ni/p-GaN 在超過 3 分鐘的熱處理後位於界面之 NiO 的電洞濃度將會增加,導致歐姆接觸性能的退化,這間接暗示位於 NiO/p-GaN 界面的 NiO 若具高電洞濃度時將引發 p-GaN 表面能帶更加的彎曲,進而形成更高的位障造成 ρ_c 增加。

另一方面,於這次研究中引用 Cserveny 的理論[1]來顯示 NiO/p-GaN 的 NiO 的電洞濃度和界面位障高度變化的相對關係。由 Cserveny 的理論中可得公式(1)

$$\frac{\exp\left(\frac{-qV_{bi}^{NiO}}{KT}\right) + \frac{qV_{bi}^{NiO}}{KT} - 1}{\exp\left(\frac{qV_{bi}^{GaN}}{KT}\right) - \frac{qV_{bi}^{GaN}}{KT} - 1} = \frac{N_d^{GaN} \epsilon^{GaN}}{N_d^{NiO} \epsilon^{NiO}} \quad (1)$$

$$V_{bi} = V_{bi}^{GaN} + V_{bi}^{NiO} = |W^{GaN} - W^{NiO}|/q \quad (2)$$

其中 K 為波茲曼常數, T 為絕對溫度, V_{bi}^{GaN} 和 V_{bi}^{NiO} 則分別為 p 型氮化鎵和氧化鎳的內建電位, W^{GaN} 和 W^{NiO} 則分別為 p 型氮化鎵和氧化鎳的功函數, p 型氮化鎵的電洞濃度(N_d^{GaN})為 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, N_d^{NiO} 則是氧化鎳的電洞濃度, ϵ^{GaN} (GaN 的介電常數)為 9.5, [3] ϵ^{NiO} (NiO 的介電常數)為 11.9。[4]由上面(1)和(2)式可知,把 $W^{GaN}, W^{NiO}, \epsilon^{GaN}, \epsilon^{NiO}, N_d^{GaN}$ 視為常數時,則可知當 N_d^{NiO} 增加時, V_{bi}^{GaN} 也會增加,又已知 $V_{bi}^{GaN} = \phi - 0.13$ (0.13 eV 為 p 型氮化鎵內部 E_F 和 E_V 之間的能量差值[5]), ϕ 為位障高度,故位障高度也會隨之增加,此分析結果符合 XPS 所觀測的趨勢。圖 4.為 Au/NiO/p 型氮化鎵的能帶輪廓圖。根據圖 4.可列出(3)式

$$qV_{bi} = W^{GaN} - W^{NiO} = (4.1 + 3.4 - 0.13) - (1.4 + y) = 5.97 - y \quad (3)$$

由(2)和(3)式可得

$$qV_{bi}^{NiO} = 5.97 - y - qV_{bi}^{GaN} \quad (4)$$

根據文獻[6]的報導，當 NiO 的電洞濃度為 $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 時，其 E_F 位於 E_C 下方 3.5 eV 處，因此可用公式(5)表示之。

$$N_D^{NiO} = 1.6 \times 10^{16} \times \left(\exp \frac{y-3.5}{KT} \right) \quad (5)$$

將(4)和(5)式帶入(1)式可求得 y 值，從 y 值的變化可相對得知對界面之位障及內建電位的關係。根據公式(5)模擬的結果得知，在鎂摻雜的氮化鎵其電洞濃度為 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 時，只有 3 分鐘熱處理時間的試片所獲得 y 值小於 4eV ($y = 3.97 \text{ eV}$)，超過 3 分鐘熱處理的試片所獲得的 y 值均大於 4 eV，這是因為超過 3 分鐘之熱處理於界面將形成更高電洞濃度之 NiO，因此其 E_F 將低於 E_V 而成為簡併之 p 型 NiO。

(2)利用 ITO 來製作 p 型氮化鎵蕭特基接觸的特性:

圖 5. 為在室溫下順向偏壓蕭特基二極體的 J-V 曲線以及利用 TFE 模式去配合 J-V 特性的曲線,根據前人的研究利用 TFE 模式分析描述如下: [7] [8]

$$J = J_0 \exp [(qV - IR_S)/E_0] \quad (6)$$

$$E_0 = E_{00} \coth (E_{00}/kT) \quad (7)$$

$$J_0 = \frac{A^* T [\pi E_{00} q (\phi_B - V - \xi)]^{0.5}}{k \cosh (E_{00} / kT)} \exp \left[-\frac{q\xi}{kT} - \frac{q}{E_0} (\phi_B - \xi) \right] \quad (8)$$

$$E_{00} = (qh/4\pi) (N/m^*\epsilon)^{0.5} \quad (9)$$

其中 ϕ_B 為蕭特基位障, R_S 為串聯電阻, m^* ($m^*=0.6m_0$, m_0 為靜止的電洞質量) 為有效電洞質量 [9], ϵ ($\epsilon=9.5\epsilon_0$, ϵ_0 為真空中的介電常數, [10]) 為氮化鎵的介電常數, A^* ($A^*=103.8 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$, [11]) 為 p-GaN 的有效理查遜常數, h 為普朗克常數, V 為電壓, q 為電荷, N 為摻雜濃度, ξ 為價帶頂 (E_V) 和費米能階 (E_F) 之間的能量差。根據前人的研究 [12], 在溫度 300K, 電洞濃度為 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 p-GaN 中費米能階的位置位於價帶上方 0.13eV 處, 在本次實驗中藉由霍爾量測 (Hall measurement) 得到的電洞濃度為 $3.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 因此在本次實驗中, 假設 $\xi=0.1\text{eV}$, 我們利用公式 6, 7, 8 來配合 ITO/p-GaN 蕭特基二極體的 J-V 特性曲線 (如圖 5.) 根據圖 5. 的結果計算 E_0 和 E_{00} , 皆為 65meV, R_S 約為 25k Ω , 較大的 R_S 是因為在蕭特基和歐姆接觸之間有較大的空間 (spacing), [13] 因為有缺陷狀態位在靠近半導體表面處, 所以推導出的 E_{00} 值有可能包含穿隧的成分, 此外可以由公式 9, [14] 來獲得受體濃度, 估算 $N=7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 此值和鎂的摻雜濃度非常接近, 這指出在順向偏壓下的穿隧電流可歸因於重摻雜鎂 [15] 所造成缺陷的深層能階, Kwak et al. [15] 也指出, 電流傳輸於金屬和重摻雜鎂的 p 型氮化鎵介面的主要機制為重摻雜鎂所造成缺陷的深層能階, 此外 Yu et al. [14] 也指出當鎂摻雜層濃度為 10^{19} - 10^{20} cm^{-3} 時, 受體濃度在 p-GaN 近表面處為 10^{19} cm^{-3} , 他們發現此值約為經由霍爾量測 [14] 所得的電洞濃度 (10^{17} cm^{-3}) 的 100 倍, 我們的實驗結果 N 值和鎂摻雜濃度為 $6\text{-}7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以及電洞濃度為 $3.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 和前人的研究一致 [16]。此外, 利用公式 8 來計算在界面的位障為 3.2eV, 根據 ITO/p-GaN 蕭特基二極體, ϕ_B 值可由公式 10 求得, 描述如下: [17]

$$q\phi_B = \chi + E_g - W_{ITO} = 3.2 \text{ eV} \quad (10)$$

其中 W_{ITO} 為 ITO 的功函數, χ ($\chi=4.1\text{eV}$, [18]) 為 GaN 的電子親和力, E_g ($E_g=3.4\text{eV}$) 為在室溫下 GaN 的能隙, 所以由公式 10 可計算 ITO 的功函數為 4.3eV, 我們估算的 ITO 的功函數和前人研究 [19,20] 所得的相似。另一方面, 利用場放射 (field emission, FE) 模式分析 J-V 的特性如下: [7]

$$J = J_f \exp [(qV)/E_{OO}] \quad (11)$$

$$J_f = \frac{\pi A * T}{k C_1 \sin(\pi k T C_1)} \exp \left(- \frac{q \phi_B}{E_{OO}} \right) \quad (12)$$

$$C_1 = (2E_{OO})^{-1} \ln[-4(\phi_B - V) / \xi] \quad (13)$$

因為所觀測的電流太小以致於無法得到符合的參數來分析 FE 模式下 ITO/p-GaN 的 J-V 特性, 此外 E_{OO} 值為 65meV 沒有較 kT 值大很多, 因此 FE 不會發生 [7], 所以無法利用 FE 模式來分析位障值。為了再進一步證實我們利用 TFE 模式所估算的位障高度和功函數值是否正確, 我們再製作了 ITO/n-GaN 蕭特基二極體, 並且量測 ITO/n-GaN 蕭特基二極體的 J-V 特性曲線, 首先利用 MOCVD 法在藍寶石 (sapphire) 基底上成長非摻雜的氮化鎵緩衝層, 接著再成長矽摻雜 (矽摻雜濃度為 $6.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 的 n 型氮化鎵層, 用 Ti/Al (50/150nm) 的金屬組合來做為 n 型氮化鎵的歐姆接點, 然後將試片浸入硫化銨溶液 20 分鐘, 溫度為 60°C , 最後, 在鍍上 ITO, 厚度為 300nm, 以形成蕭特基接觸。由圖 6. 在 ITO/n-GaN 蕭特基二極體中用 J-V 法量測可以觀測到線性的特性 (形成歐姆接觸), 根據上述由蕭特基理論和 J-V 法量測所得到的 ITO 功函數為 4.3eV, 此值和 n-GaN 的電子親和力非常接近, 假設將 ITO 和 n-GaN 緊密的接觸, 在 ITO 和 n-GaN 之間會形成較低的位障而導致歐姆接觸的結構, 由此可知 TFE 模式可以用來計算 ITO/p-GaN 蕭特基二極體的位障高度, 所以我們估算的 ITO 功函數為 4.3eV 以及在 ITO/p-GaN 介面的位障高度為 3.2eV 是非常合理的, 此外, 在 n-GaN 為材料的裝置中, 未來也可以使用 ITO 來做歐姆接觸, 這還要再進一步的研究。為了要再進一步確認在 ITO/p-GaN 二極體的位障高度是否為 3.2eV, 我們也利用 XPS 來觀察 ITO/p 型氮化鎵界面的 p 型氮化鎵之表面費米能階的位置, 我們使用單色 Mg K α X 光為光源, 用 Au 4f $_{7/2}$ 的峰值為 83.86eV 以及 Cu 2p $_{3/2}$ 的峰值為 932.65eV 來作為參考修正, 利用 XPS 相關公式 (公式 14, 15) [21, 22] 的資料可以決定位障高度:

$$q\phi_n = E_G - E_V^i + (E_{\text{core}}^i - E_{\text{core}}^m) = E_G - (E_{\text{core}}^m - E_{\text{VC}}) \quad (14)$$

其中 $q\phi_n$ 為 n-GaN 的位障值, E_G 為半導體的能隙, E_{core}^m 為半導體蒸鍍金屬後核能階 (core level) 峰值的束縛能, E_{core}^i 為最初的核能階峰值的束縛能, E_V^i 為最初半導體價帶的束縛能, E_{VC} 為 $(E_{\text{core}}^i - E_V^i)$ 的值, 所有測量的束縛能都和 E_F 有關, 所以 ITO/p-GaN 的位障公式如下:

$$q\phi_p = E_{\text{core}}^{\text{ITO}} - E_{\text{VC}} \quad (15)$$

其中 $E_{\text{core}}^{\text{ITO}}$ 為 p-GaN 蒸鍍 ITO 後核能階 (core level) 峰值的束縛能, 圖 7. 為收集 p-GaN 尚未蒸鍍 ITO 的 Ga $_{3d}$ 核能階和價帶能譜圖, E_{VC} 計算為 17.8eV, 此值和前人

研究結果[23,24,25,26]相同,圖 8.為在 ITO/p-GaN 界面 Ga_{3d} 核能階的能譜圖,我們必須區別在由 ITO 貢獻的 O_{2s} 能譜和 p-GaN 貢獻的 Ga_{3d} 能譜之間的重疊訊號,圖 8.決定了 E_{core}^{ITO} 和 E_F 的相關位置,在去除 O_{2s} 能譜訊號後我們可以由圖 8.得到 $E_{core}^{ITO}=20.9eV$,所以利用公式 15.可以得到 p-GaN 的位障值 $q\phi_p$ 為 $3.1eV$,此值和我們用 J-V 量測所得到的值 $3.2eV$ 非常接近。

六.結論:

(1)熱處理時間對 p 型氮化鎵歐姆接觸的影響:

Au/Ni/p 型氮化鎵於空氣環境中以不同時間進行熱處理所獲得歐姆接觸的研究已經被驗證。根據實驗結果得知,當熱處理時間超過 3 分鐘, ρ_c 將隨著熱處理時間的延長而增加,這是由於熱處理過程中於界面所形成的 NiO 其電洞濃度提高所引發 p 型氮化鎵表面能帶更為彎曲,產生較高的位障,此高位障的形成將阻礙電洞在界面的傳導進而提高 ρ_c 值。

(2)利用 ITO 來製作 p 型氮化鎵蕭特基接觸的特性:

在本次實驗中我們研究 ITO/p-GaN 和 ITO/n-GaN 蕭特基二極體的 J-V 特性曲線,對 ITO/p-GaN 蕭特基二極體而言利用 TFE 的模式計算的位障高度為 $3.2eV$,也因此推導出 ITO 的功函數為 $4.3eV$,根據觀測 J-V 的特性曲線和 XPS 的量測結果,我們可以確實的利用 TFE 的模式推導出 ITO/p-GaN 蕭特基二極體的位障高度。

七.參考文獻:

- [1] S. I. Cserveny, Int. J. Electron. 25, pp.65-80 (1968)
- [2] S. H. Wang, S. E. Mohny, and R. Birkhahn, J. Appl. Phys. 91, pp. 3711-3716 (2002)
- [3] M. Razeghi and A. Rogalski, J. Appl. Phys. 79, pp.7433-7473 (1996)
- [4] K. V. Rao and A. Smakula, J. Appl. Phys. 36, p.2031 (1965)
- [5] H. Nakayama, P. Hacke, M. R. H. Khan, T. Detch-Prohm, K. Hiramatsu, and N. Sawaki, Jpn. J. Appl. Phys. 35, pp. L282-L284 (1996)
- [6] N. L. Peterson and C. L. Wiley, J. Phys. Chem. Solids 46, p.43 (1985)
- [7] Michael Shur, Physics of semiconductor devices (New Jersey, Prentice-Hall international, 1990), pp.204-209.
- [8] H. Morkoç, Nitride Semiconductors and Devices (Berlin, Springer, 1999), pp.198-200.
- [9] C. Merz, M. Kunzer, U. Kaufmann, I. Akasaki, and H. Amano, Semicond. Sci. Technol. 11, 712 (1996).
- [10] M. Razeghi and A. Rogalski, J. Appl. Phys. 79, 7433 (1996).
- [11] J. I. Pankove, S. Bloom and G. Harbeke, RCA Rev. 36, 163 (1975).
- [12] H. Nakayama, P. Hacke, M. R. H. Khan, T. Detch-Prohm, K. Hiramatsu, and N. Sawaki, Jpn. J. Appl. Phys. 35, L282 (1996).
- [13] J. K. Shen, Y. K. Su, G. C. Chi, M. J. Jou, and C. M. Chang, Appl. Phys. Lett. 72,

3317 (1998).

- [14] L. S. Yu, D. Qiao, L. Jia, S. S. Lau, Y. Qi, and K. M. Lau, Appl. Phys. Lett. 79, 4536 (2001).
- [15] J. S. Kwak, O. H. Nam, Y. Park, Appl. Phys. Lett. 80, 3554 (2002).
- [16] P. Kozodoy, H. Xing, S. P. DenBaars, U. K. Mishra, A. Saxler, R. Perrin, S. Elhamri, and W. C. Mitchel, J. Appl. Phys. 87, 1832 (2000).
- [17] B. L. Sharma, Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications (New York, Plenum Press, 1984), p.8.
- [18] S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa, T. Jimbo, and M. Umeno, Appl. Phys. Lett. 73, 809 (1998).
- [19] D. J. Milliron, I. G. Hill, C. Shen, A. Kahn, and J. Schwartz, J. Appl. Phys. 87, 572 (2000).
- [20] F. Nüesch, L. J. Rothberg, E. W. Forsythe, Q. T. Le, and Y. Gao, Appl. Phys. Lett. 74, 880 (1999).
- [21] J. R. Waldrop and R. W. Grant, Appl. Phys. Lett. 52, 1794 (1988).
- [22] J. R. Waldrop and R. W. Grant, Appl. Phys. Lett. 62, 2685 (1993).
- [23] T. Hashizume, S. Ootomo, S. Oyama, M. Konishi, and H. Hasegawa, J. Vac. Sci. Technol. B19, 1675 (2001).
- [24] V. M. Bermudez, J. Appl. Phys. 80, 1190 (1996).
- [25] J. R. Waldrop and R. W. Grant, Appl. Phys. Lett. 68, 2879 (1996).
- [26] C. I. Wu and A. Kahn, J. Appl. Phys. 86, 3209 (1999).

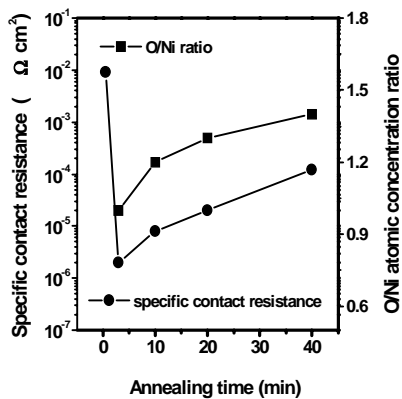


圖 1. ρ_c 和相關 O/Ni 的原子濃度相對比值與熱處理時間的關係圖

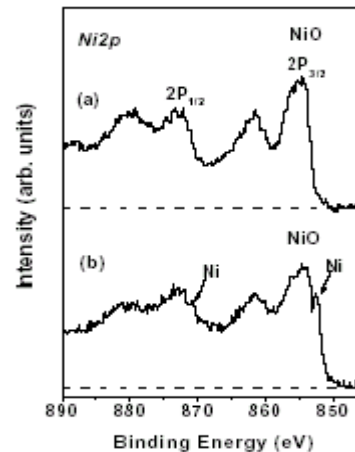


圖 2. 熱處理時間(a)3 分鐘和(b) 30 秒的 Ni2p 能譜圖

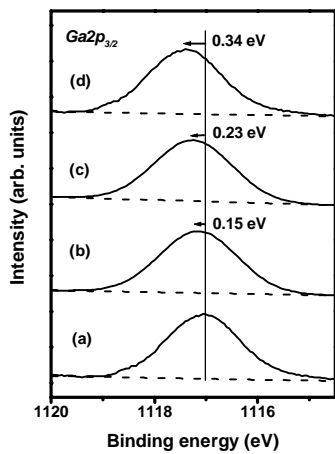


圖 3. 熱處理時間(a)3(b)10(c)20 及(d)40 分鐘的 Ga2p3/2 能譜圖

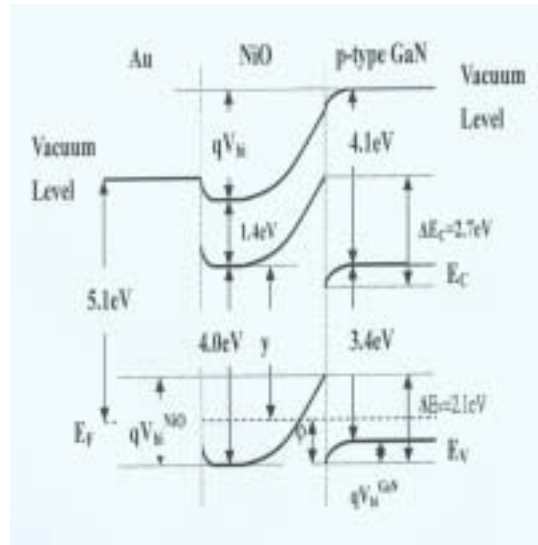


圖 4. Au/NiO/p 型 GaN 的能帶 輪廓圖

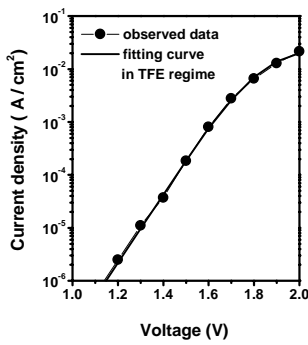


圖 5. ITO/p-GaN 蕭特基二極體的 J-V 特性曲線

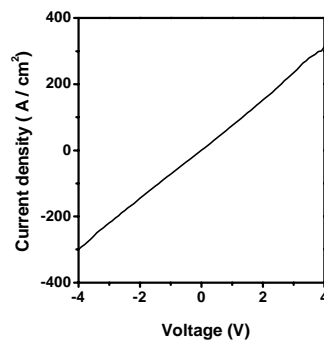


圖 6. ITO/n-GaN 蕭特基二極體的 J-V 特性曲線

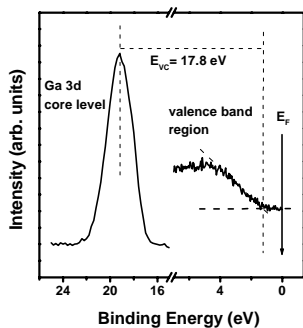


圖 7. p-GaN 尚未蒸鍍 ITO 的 Ga3d 核 能階和價帶能譜圖

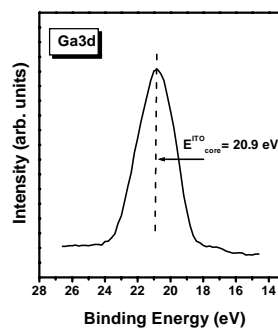


圖 8. ITO/p-GaN 介面 Ga3d 核能 階的能譜圖