

國立交通大學

電子物理研究所

碩士論文

P 型氮化鋁鎵之歐姆接觸研究

Study of Ohmic Contact to p-type AlGaIn

研究生：陳彥偉

指導教授：李威儀 教授

中華民國九十五年八月

P 型氮化鋁鎵之歐姆接觸研究

Study of Ohmic Contact to p-type AlGaIn

研究生：陳彥偉

Student : Yan-Wei Chen

指導教授：李威儀 博士

Advisor : Wei-I Lee

國立交通大學
電子物理研究所
碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Electro-Physics

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Electro-Physics

August 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年八月

P 型氮化鋁鎵之歐姆接觸研究

學生：陳彥偉

指導教授：李威儀 博士

國立交通大學電子物理研究所

摘 要

氮化物半導體材料已成功應用在光電元件，例如發光二極體，雷射二極體。藍光可應用在顯示和資料儲存上。高品質的歐姆接觸可以改善元件的電性和光性。但在氮化物材料上要形成高品質的歐姆接觸卻有各式各樣的挑戰。然而，一般來說在缺乏高功函數的金屬和表面電洞濃度難提高的情況下，要做低電阻的歐姆接觸是相當困難。

研究下一世代的發光二極體和高功率雷射二極體光電元件在紫外波段(350nm 以下)引起大家的興趣。在本論文中，我們探討利用具應變的接觸層在 p-型氮化鋁鎵的歐姆接觸特性。在這次實驗中，我們使用鎂摻雜的 GaN 和 InGaN 來當作接觸層。

Study of ohmic contact to p-AlGaN

student : Yan-Wei Chen

Advisors : Dr.We-Lee

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Gallium nitride (GaN)-based semiconductor materials have been successfully applied to optoelectronic devices such as light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes (LDs) for display and data storage in the blue wavelength region. There are numerous challenges in forming high-quality ohmic contacts to GaN-based materials, which are crucial for improving the electrical and optical performances in the devices. In general, however, fabricating low-resistance ohmic contacts is difficult in the case of p-type GaN due to the absence of metals having a work function larger than that of p-GaN and the difficulty in increasing near-surface hole concentrations.

The research on next-generation LED and high-power LD optoelectronic devices in the ultraviolet (UV) wavelength region below 350 nm has become interesting. In this study, we demonstrated Ohmic contacts to p-type AlGa_N using Mg-doped GaN and InGa_N as a contact layer. Hope to Utilizing a strained-contact layer to bend band at the surface to enhanced tunneling transport.

誌 謝

轉眼間，又到了那鳳凰花開的季節，在交大兩年，有歡笑有淚水，不過在這期間倒是成長不少，當然首先要感謝老闆李博，教導了我研究生做事應有的態度，再三地在我們耳提面命的幾句經典名言，知者為知之，不知為不知，是知也。研究生要會想、會做。再一次跟老師說聲 老師謝謝您。

在交大的歲月中特別要感謝世昌學長，奇霖學長，信雄學長，淑梅姐，豐格學長的指導與幫忙及豐格學長在中科院時的研究團隊，龍哥，阿惠姐，鈞哥的協助。昭正，俊新，志柏，宗瑜，祖立學長，中興大學洪瑞華老師，亭恩，詩詠學姐，小華學長等人的協助。室友阿德、在交大資歷深厚的志明前輩在生活上的關照。還有那些曾經幫助過我而我忘記的人。感謝實驗室的好夥伴子強大哥跟虹諭大哥在課業上的指導。祝他們在學界跟業界各自闖出一番天地。也要感謝家人在精神上支持與關心。總而言之，言而總之，謝謝你們了。

最後也祝學弟妹們能夠順利畢業。實驗室就靠你們發光發熱了！

目 錄

中文摘要		I
英文摘要		II
誌謝		III
目錄		IV
表目錄		VI
圖目錄		VII
第一章	緒論	
1.1	前言	1
1.2	p-GaN 歐姆接觸的文獻回顧	2
1.3	p-AlGaN 歐姆接觸的文獻回顧	7
第二章	歐姆接觸原理	
2.1	前言	9
2.2	蕭基能障的形成	10
2.3	歐姆接觸	13
2.4	電流傳輸機制	14
第三章	量測技術	
3.1	歐姆接觸測試結構	16
3.1.1	Two-Terminal Contact Resistance Methods	16
3.1.2	Multiple Contact Resistance Methods	17
3.1.3	傳輸線方法(TLM)	20
3.2	霍爾量測	22
3.2.1	Definitions for Hall Measurements	23
3.2.2	Hall Measurements	24
第四章	樣品製備	
4.1	磊晶薄膜	25
4.1.1	長晶條件	25
4.1.2	晶片活化	26
4.2	製作流程	27
4.2.1	平臺隔離製作	30
4.2.2	垂直結構製作	33
4.2.3	電極製作	36
第五章	量測分析與討論	
5.1	I-V 量測	39
5.2	實驗討論	48

第六章	總結	53
參考文獻		54
附錄一	氮化物物理參數	
附錄二	金屬功函數	

表目錄

第五章

表 5-1	Sample A 參數平均值	40
表 5-2	Sample B 參數平均值	41
表 5-3	Sample C 參數平均值	42
表 5-4	Sample D 參數平均值	43
表 5-5	Sample E 參數平均值	44

圖目錄

第一章

- 圖 1.1 氮化物烏采結構之晶格常數與能帶關係圖 1
圖 1.2 p-氮化鎵-金屬界面的能帶圖(a)有氧化層(b)無氧化層 5

第二章

- 圖 2.1 蕭特基接觸示意圖 (a) n 型半導體 (b) p 型半導體 11
圖 2.2 歐姆接觸示意圖 (a) n 型半導體 (b) p 型半導體 12
圖 2.3 金屬-半導體界面在外加順向偏壓時，其內部的電流傳輸過程 14

第三章

- 圖 3.1 側向兩端點接觸電阻結構 (a)橫截面跟俯視圖 16
(b)接觸串列
圖 3.2 (a)測試結構 (b)半導體-金屬接觸可以由 ρ_c - ρ_s 17
等效電路表示
圖 3.3 (a)接觸底下電位隨距離 x 的變化(b)轉移長度是 16
 ρ_c 和 ρ_s 的函數
圖 3-4 (a)TLM 結構示意圖 (b)總電阻跟距離的關係 21
圖 3-5 一般常見的 van der Pauw 幾何圖形 22
圖 3-6 決定霍爾電壓的 van der Pauw 結構示意圖 23

第四章

- 圖 4-1 樣品結構圖 25
圖 4-2 實驗流程圖 27
圖 4-3 結構完成圖 28
圖 4-4 SEM 橫截面圖 29
圖 4-5 mesa 製作流程 30
圖 4-6 第一道光罩設計圖 32
圖 4-7 垂直結構製作 33
圖 4-8 第二道光罩設計圖 34
圖 4.9 移除 SiO_2 後 N_2 環境下 550°C 熱退火 10 分鐘後的 OM 照 35
圖 4-10 電極製作流程 37
圖 4-11 第三道光罩設計圖 38

第五章

圖 5-1	sample A 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖	40
圖 5-2	sample B 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖	41
圖 5-3	sample C 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖	42
圖 5-4	Sample D 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖	43
圖 5-5	sample E 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖	44
圖 5-6	R_T vs d 圖，p+GaN contact layer 厚度為 0Å 到 80Å 的變化	45
圖 5-7	R_T vs d 圖，不同 contact layer 在 20Å 之比較	45
圖 5-8	ρ_c v. s contact layer thickness	46
圖 5-9	p-AlGaN 表面附近的能帶圖	47
圖 5-10	具壓應變的結構示意圖	48
圖 5-11	Cap layer 假晶成長於 buffer layer, 在平行面的彈性應變	50
圖 5-12	cap 層中由極化引起的電場表示成合金成份的函數	51
圖 5-13	應用應變層當接觸層的能帶圖	52

第一章 緒論

1-1 前言

三-五族氮化物有一些獨特的性質，例如寬直接能隙(wide direct band gap)，高熱傳導性(thermal conductivity)和化學穩定性高，近年來被應用在藍、綠光到紫外光發光元件及高功率和高溫電子元件上。氮化鋁(AlN)、氮化鎵(GaN)、氮化銦(InN)在室溫下其能隙分別為6.2eV、3.4 eV 與0.7eV，若將此氮化物製成三元合金(alloy)材料時，則可以藉由調變合金中的組成而得到所需之發光波長，其發光光譜幾乎涵蓋所有可見光範圍，並且延伸至紫外光區域。圖1-1為氮化物烏采(wurtzite)結構晶格常數(lattice constant)與能帶關係圖。更詳細的參數見於附錄一。

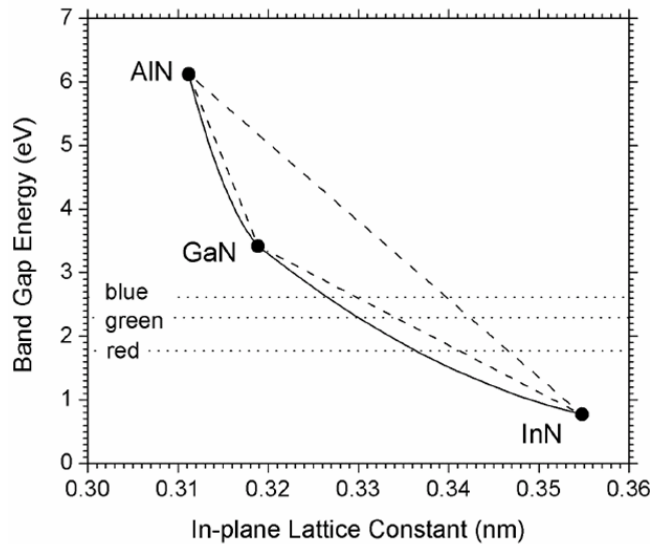


圖1-1 氮化物烏采結構之晶格常數與能帶關係圖

藍光發光二極體(Light Emitting Diode: LED)的最重要用途之一是造成全彩，尤其是對LED平面顯示器顯的格外重要。早期LED的資訊顯示幕是以紅、

綠或紅、黃色lamp來顯示，色彩顯的格外單調。另外，高能量藍光LD在光儲存市場亦被視為一個重要的里程碑，它將使目前DVD的規格躍昇到HD-DVD(High Density DVD)，以提供15Gbit的高容量儲存。而小體積的藍光雷射在雷射投影電視(Laser Projector)上將取代傳統藍光雷射的龐大體積，使得雷射投影電視輕、薄的理想又往前跨進一步。此外，藍光二極體另一被看好的是白光照明市場的應用。目前以藍光LED chip照射到螢光物質而發出白光的技術已成為主流，未來在成本降低之後，將逐漸取代龐大的傳統燈泡市場。

然而，氮化鎵及其相關材料，氮化銦鎵，氮化鋁鎵被應用在藍、綠、紫外線等發光二極體及藍射二極體等元件。這些元件都需要低電阻n-型及p-形金屬電接觸以得到良好的電流傳導，使操作電壓降低以減少熱損失。

1-2 p-GaN歐姆接觸的文獻回顧

大部份商業用氮化物為主的發光二極體使用鎂(Mg)摻雜來形成 p 型材料。鎂在 p 型氮化鎵中的活化能大約是 170meV，在室溫下，當摻雜的濃度為 10^{20}cm^{-3} 時，大約只有 1%~2%的摻雜原子可以被離子化，同時，鎂氫(Mg-H)鍵化合物的產生又會使得載子濃度再降低。這將提高 P 型氮化鎵的電阻率和金屬-p 型氮化鎵間的接觸電阻。

已有許多研究人員利用各種方法在 p 型氮化鎵上得到歐姆接觸。除了利用高功函數的金屬來降低金屬和半導體接面的位障高度(barrier height)之外，一些團隊把焦點集中在鍍金屬前的表面處理，另外也有人焦點集中在接觸的熱退火(annealing)上。因為熱處理會在界面處產生反應物，所以加熱處理的溫度，退

火時間，和退火環境都大大地影響接觸的性質。不同的加熱處理，在界面處產生各種不同的反應生成物，導致不同的電的特性。

大致上有以下的方法被提出：

- 提高 p-GaN 的摻雜濃度
- 金屬組合加熱退火條件
- 表面處理
- 利用應變層當作接觸層
- 利用超晶格當接觸層

提高 p-GaN 的摻雜濃度

1999年M. Suzuki等人在p-GaN表面蒸鍍Ta(60nm)/Ti(40nm)做為接觸材料 [1]，其原因是因為Ta和Ti對於氫原子有很強的鍵結能力，如此一來便可破壞p-GaN內部的Mg-H鍵結而提高摻雜濃度。實驗結果證實試片經過800°C合金化20分鐘後特徵接觸電阻可降至 $3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，但是試片置放在大氣中一段時間後會有劣化的情形發生。

金屬組合加熱退火條件

1998年，工研院光電所J. K. Ho等人將Ni/Au在空氣中或者O₂中熱處理後得到特性電阻約 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，1999年改變Ni及Au的厚度得到 $4 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，最低可達 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ [2]。2000年，韓國J. S. Jang [3]利用Pt(20nm)/Ru(50nm)在600°C 2分鐘熱退火後得到 $2.2 \pm (2.0) \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的特性電阻。2001年，V. Adivarahan等人使用Pd(1nm)/Ag(10nm)/Au(10nm)/Ti(30nm)/Au(20nm)金屬組合在氮氣800°C下1分鐘得到接近 $1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的特性電阻[4]。

表面處理

p-型歐姆接觸的一個重要議題是了解氮化鎵的表面和找出適當的化學蝕刻劑來清洗氮化鎵的表面以進行接下來的金屬接觸沉積。根據 Lau[5]，理想的金屬-半導體界面應該是完全乾淨，沒有界面氧化物或其它污染物。然而，氮化鎵很容易跟環境中的氧作反應，造成表面一個天然的氧化物。有了這個表面氧化層，就好像載子從金屬到半導體或半導體到金屬看到一個位勢障一樣，使特性電阻(specific contact resistance)增加，因此在金屬沉積前移除這層氧化物能夠降低特性電阻。

因為表面氧化層的存在造成特性電阻退化(degradation)可以被解釋如下。根據 Hattori 和 Izumi [6]，蕭基位障高度(Schottky barrier height: SBH)， Φ_B ，隨著界面絕緣氧化層厚度的改變，表示式如(1.1)

$$q\Phi_B = q\Phi_{B0} + \frac{2kT}{\hbar} (2m\chi)^{1/2} \delta \quad (1.1)$$

δ 為電洞從金屬注入到 p-型氮化鎵間的氧化層厚度， Φ_{B0} 是界面沒有表面氧化層的蕭基位障， m 是電洞平均穿隧等效質量， χ 為平均穿隧位障，如圖 1.2。為了降低位障高度 Φ_B ，等式右邊第二項應該被降到最低。位障高度增加是因為界面的污染層(contamination layer)。因此，移除表面氧化層導致 SBH 下降，且在界面底下的彎曲能帶被縮小，如圖 1-2(b)。

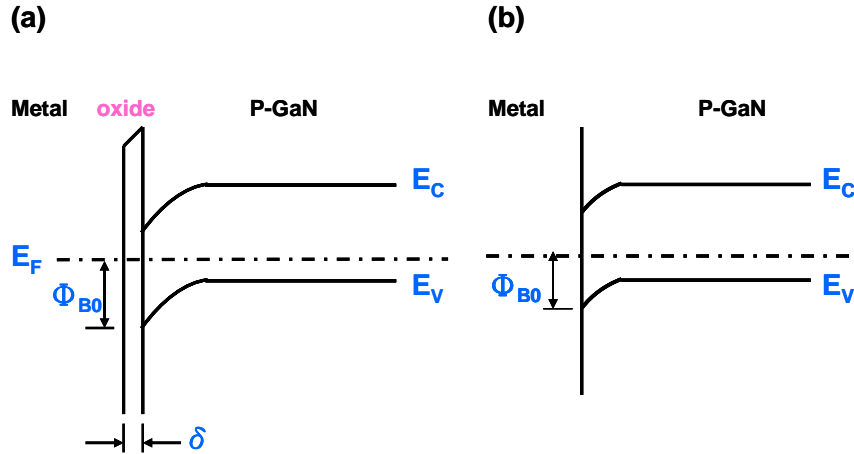


圖 1-2 p-氮化鎵/金屬界面的能帶圖(a)有氧化層(b)無氧化層。

另外，或許甚至更重要地，表面處理通常導致在界面處費米能階 (Fermi-level) 偏移。例如，Jang 和 Seong[7] 觀察發現，當用 BOE 做表面處理時，隨著表面處理時間增加，導致界面中的費米能量朝著價電帶 (valence band) 邊緣移動。Lee 等人，J. K. Kim 等人[8, 9] 也觀察到同樣的情形，Lee 等人證明兩步驟的表面處理，費米能階偏移到價電帶附近的受體能階，導致 Pt/p-型氮化鎵界面處的電洞看到的位障降低。

J-L Lee[10] 等人利用 HCl 溶液和煮沸的 KOH 溶液清洗 p-型氮化鎵表面，之後利用高功函數的 Pd(20nm)/Au(500nm) 組合鍍在其表面上，在沒有熱退火時比較兩者間的電性，I-V 特性圖中看出 KOH 處理過的比 HCl 還要線性。HCl 處理過的特性電阻為 $2.9 \times 10^{-1} \Omega \text{cm}^2$ ，KOH 處理過的為 $7.1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ ，下降兩個等級。因此煮沸的 KOH 表面處理是較有效的清除表面氧化層。

這個團隊也利用相同的金屬及厚度但這次使用煮沸的王水 (aqua regia) (HCl:HNO₃=3:1) 當作清洗溶液來研究歐姆接觸，並和沒清洗過樣品的作比較

[11]。I-V 特性圖中看出沒表面處理的特性電阻為 $2.9 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ ，王水處理過的特性電阻為 $4.3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ ，下降兩個等級。

後來，也是這個團隊[12]在鍍金屬前作了三組不同清洗過程的樣品，分別為 HCl(sample A)，煮沸的王水(sample B)，一組為王水處理過的樣品再浸泡到 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 十分鐘(sample C)，從 XPS 能譜圖看 O1s 結果顯示，simple B 和 sample C 的氧化層可以大量減少，這個發現指出，王水可以有效移除污染層。之後，把這些處理過的樣品拿到 E-beam 鍍 Pd(20nm)，由 TLM model 算出 sample C 的特性電阻為 $2.9 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ ，sample B 的特性電阻為 $7.0 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ ，比 sample C 還高一個等級，他們提出 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 可以保護乾靜的表面免於鍍金屬前的再氧化。

J-S Jang 提出[13]兩階段的清洗步驟，第一階段是 mesa 蝕刻後的清洗，準備了四組樣品，分別為無清洗(A)，煮沸的 BOE 超音波振盪十分鐘(B)，煮沸的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 超音波振盪十分鐘(C)，煮沸的 BOE 超音波振盪十分鐘樣品再放到煮沸的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 超音波振盪十分鐘(D)。第二階段是蒸鍍金屬前的清洗，所有的樣品浸 BOE 三十秒，由特性電阻的數據看出兩步驟清洗可以增強 p-型氮化鎵表面氧化層的移除，且樣品 D 得到最低的特性電阻約 $10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ 等級。

利用應變層當作接觸層

2001年，K. Kumakura[14]等人研究在 p-GaN 上成長一層很薄的鎂摻雜的氮化銦鎵可以有效降低接觸電阻。他們改變 p-InGaN 的厚度及銦含量，發現在 2nm 且銦含量為 19% 時得到最低的特性電阻為 $1.1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。造成如此低的特性電阻被歸因於 p 型氮化銦鎵可以有很高的電洞濃度以及極化場使 p-GaN 表面

能帶彎曲，增強載子穿隧機率來有效降低接觸電阻。

利用超晶格當接觸層

對於氮化鋁鎵/氮化鎵超晶格(superlattices)而言，由於彼此間晶格常數的不同，氮化鋁鎵會有一張應力(Tensile Strain)，再加上元素間極性的差異，使得氮化鋁鎵/氮化鎵超晶格結構內產生強烈的壓電場(Piezoelectric Field)和自發性偏極(Spontaneous Polarization)現象。由於內部偏壓效應，使得能帶產生傾斜現象，致使電洞容易從活化能帶游離出來。由半導體物理推得的公式可知 $p = N_A / \{1 + (1/g) \exp[(E_F - E_A)/kT]\}$ ，其中 N_A 是受體原子濃度， E_A 為受體能階， p 為游離的電洞濃度。故當 E_A 低於 E_F (Fermi Level)時，電洞容易游離出價帶，因此 p 型氮化鋁鎵/氮化鎵超晶格其電洞濃度會大於 p 型氮化鎵電洞濃度。2000 年 Li Y-L 等人研究 Ni 在 p-AlGa_{0.1}N/p-GaN 超晶格接觸層上的接觸特性，研究指出在沒有熱退火即呈現線性的 I-V 特性。在 400 度 C 熱退火後，特性電阻可以低到 $9.3 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$ 。2001 年，Zang[15] 等人研究利用十對 p-Al_{0.1}Ga_{0.9}N(Mg)/Ga_{0.9}N(Mg)，每層厚度為 50Å 的超晶格來當接觸層，來探討接觸特性。金屬沉積前利用 KOH 做表面處理，鍍上金屬後在空氣中 500 度 C 做熱退火，經由這幾個步驟後，量到的特性電阻為 $9 \times 10^{-5} \Omega\text{-cm}^2$ 。

1-3 p-AlGa_{0.1}N 歐姆接觸的文獻回顧

2001 年，T.V.Blank 等人[16]研究 Pd/p-Al_{0.06}Ga_{0.94}N，p-Al_{0.06}Ga_{0.94}N 的摻雜濃度在 3×10^{18} 到 10^{19}cm^{-3} 之間，經證明 Pd/p-Al_{0.06}Ga_{0.94}N 間的位障高度由 2.3V 變到約 0.05V，且呈現歐姆特性。2004 年，Han-Ki Kim[17] 等人研究 Pt(5nm)/Pd(5nm)/Au(10nm) 金屬組合在 p-Al_{0.11}Ga_{0.89}N 上的接觸特性，p-AlGa_{0.1}N 的摻雜

濃度為 $1.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。在熱退火後的接觸呈現線性的電流-電壓特性。在氮氣環境下熱退火 600°C 一分鐘量到的接觸電阻為 $3.1 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$ 。2004 年，B.A.Hull[18] 等人研究 Ni、Pd、Au 等金屬在 $\text{p-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ 的接觸行為，研究發現要降低接觸電阻，熱退火溫度必需超過 800°C 。而且溫度超過 700°C 時，Pd 跟 Au 的特性會比 Ni 來的好。



第二章 歐姆接觸原理

2-1 前言

當一個半導體元件或晶體電路(Integrated Circuit: IC)做好之後皆需要利用歐姆接觸(ohmic contact)以便和電子系統中的其他元件連接。當金屬-半導體做連結後，由於其功函數的差異，介面態的存在，及受到半導體摻雜的型式等各種情況所影響，會有兩種特性迥然不同的接觸出現。其一是具有整流特性的蕭基接觸(Schottky contact);另一種接觸則是雙向導通無整流特性的歐姆接觸。蕭基接觸在逆偏時有一低電流流過界面，而在順偏時電流很容易流過金屬-半導體界面。稱為整流界面。非整流之界面稱之歐姆接觸。歐姆接觸是一個低電阻界面，它提供金屬與半導體之間可作兩個方向的導通，理想的歐姆接觸，其電流對電壓特性曲線是呈現線性關係，其斜率代表的是接觸的電阻值。斜率越大代表電阻值越小，而外界供應半導體的電流只有少部份是消耗在金屬-半導體界面。一個好的歐姆接觸必須具備以下之特點

- (1) 低的特徵電阻
- (2) 抗氧化，抗腐蝕性高
- (3) 元件操作下有好的穩定性
- (4) 金屬連結時延展性高

2-2 蕭基能障的形成[21]

圖 2-1(a)接觸前，一個特定金屬及 n 型半導體的理想能帶圖。真空能階 (vacuum level) 被當作是一個參考能階。功函數的定義為真空能階跟費米能階的能量差，參數 Φ_M 是金屬的功函數(work function)， Φ_s 是半導體的功函數，而 χ 稱為電子親和力(electron affinity)。當金屬和半導體接觸後，能帶必須滿足(1) 兩者的真空能階必須連續，(2) 兩者的費米能階於熱平衡下應該相等。我們假設 Φ_M 大於 Φ_s 。這種情況下理想熱平衡金屬-半導體能帶圖顯示於 2-1(b) 中。接觸前半導體中的費米能階(Fermi-Level)比金屬中的費米能階還高。為了使整個系統的費米能階成為一個固定的常數來達熱平衡，電子會由半導體流進金屬中較低能量狀態。帶正電的施體離子會留在半導體之中，而產生一個空間電荷區(space charge region)。

參數 Φ_{Bn} 是半導體接觸的障礙高度(barrier height)，這是金屬之中試圖移動進入半導體之中電子所看到的障礙。這個障礙稱為蕭特基障礙(Schottky barrier)，理想而言，金屬-n 型半導體的能障為 $q\Phi_{Bn}$

$$q\phi_{Bn} = q(\phi_m - \chi) \quad (2-1)$$

對於金屬-p 型半導體間的能障為 $q\Phi_{Bp}$ 為

$$q\phi_{Bp} = E_g - q(\phi_m - \chi) \quad (2-2)$$

由以上的關係式暗示著可以由金屬功函數的選擇來控制障礙高度。金屬-n 型半導體要形成歐姆接觸比須選功函數低的金屬，金屬-p 型半導體要形成歐姆接觸必須選功函數高的金屬。

在半導體這邊， V_{bi} 是內建的位勢障礙(built-in potential barrier)。類似於 pn 接面的狀況，這個障礙乃是試圖移動進入金屬的傳導帶之中的電子所看到的障礙。內建位勢障為

$$V_{bi} = \phi_{Bn} - \phi_n \quad (2-3)$$

如同在一個 pn 接面狀況一般，這會使 V_{bi} 成為半導體摻雜的一個微弱的函數。

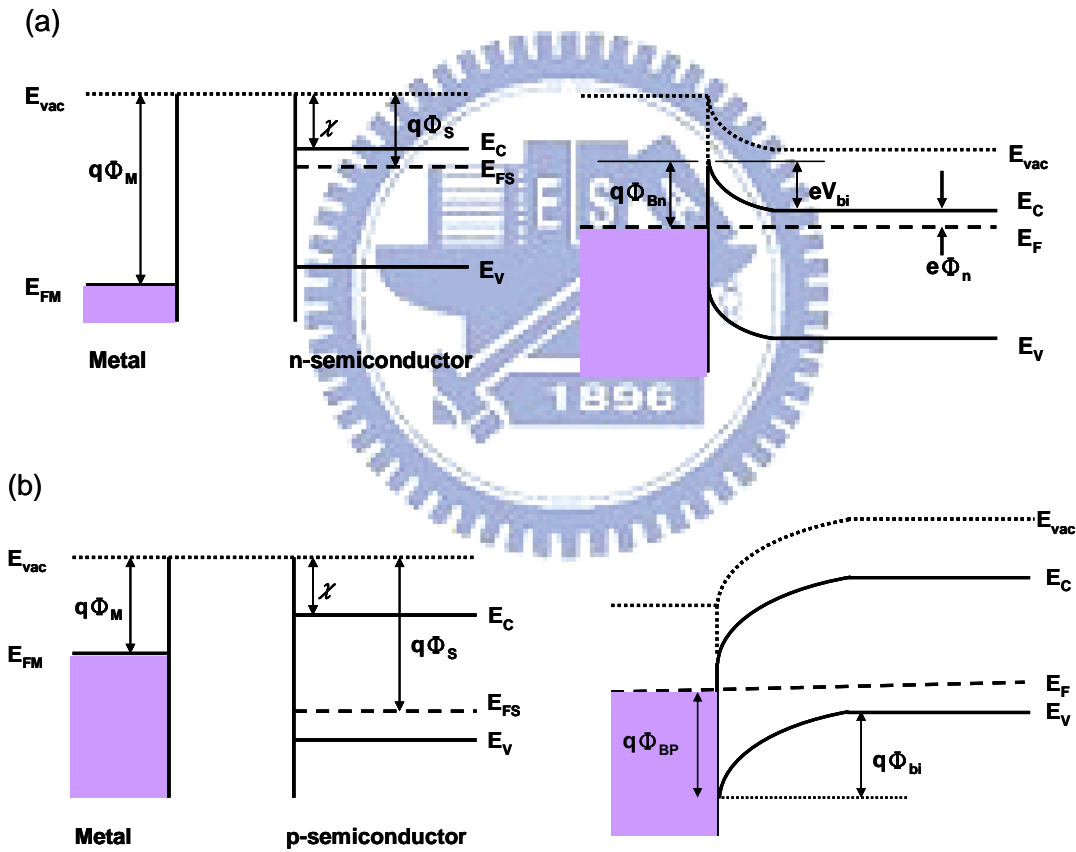


圖 2-1 蕭特基接觸示意圖 (a) n 型半導體 (b) p 型半導體。

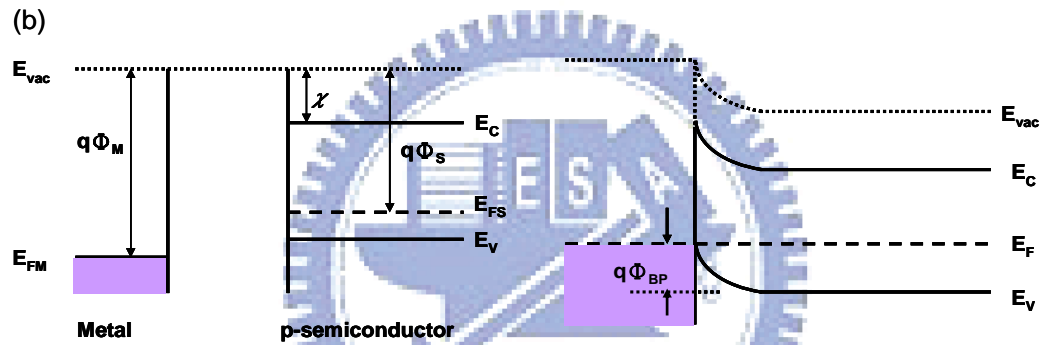
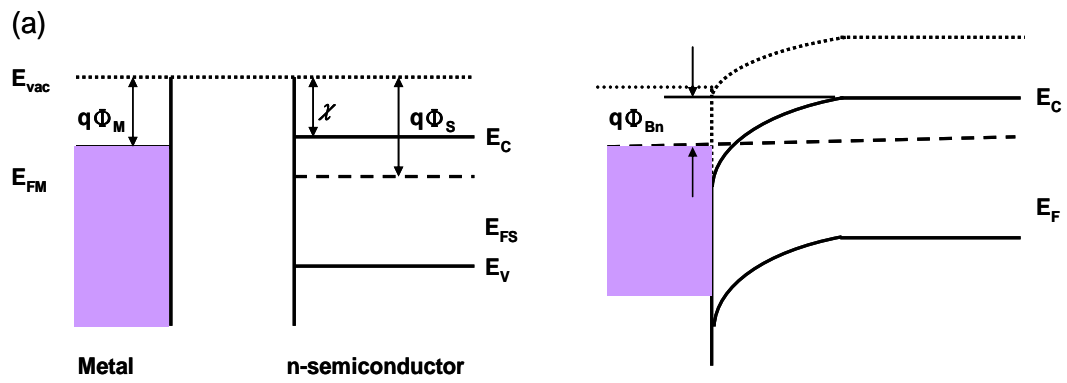


圖 2-2 歐姆接觸示意圖 (a) n 型半導體 (b) p 型半導體。

2.3 歐姆接觸[20,21]

當一金屬-半導體接觸電阻相對於半導體本體(bulk)，或串聯電阻(series resistance)可以忽略不計時，則可被定義為歐姆接觸(ohmic contact)。良好的歐姆接觸並不會顯著降低元件的性能，並且當通過所需電流時所產生的電壓降，相對於跨於元件主動區的電壓降來得小。

但是要怎麼去判斷一個歐姆接觸的優劣呢？主要是以特徵電阻(specific contact resistance)來作為評斷歐姆接面之電特性表現的標準，其定義為電壓對電流的導數，單位為 ohm-cm^2 ，其值與面積無關。

$$\rho_c = \left. \frac{\partial v}{\partial j} \right|_{A=0}$$

(2-4)

對歐姆接觸而言，我們希望 ρ_c 值儘可能地小。

對一個具有低度至適度半導體摻雜濃度的整流接觸而言，在這個接面之中，熱離子放射電流是主控的電流。因此，這種情況下的特徵電阻為

$$\rho_c = \frac{\left(\frac{kT}{e}\right) \exp\left(\frac{+e\phi_{Bn}}{kT}\right)}{A^*T^2}$$

(2-5)

對於一個具有高雜質摻雜的金屬-半導體接面，穿遂過程將會主控。求得特徵電阻為

$$\rho_c \propto \exp\left[\frac{+2\sqrt{\epsilon_s m_n^*}}{\hbar} \cdot \frac{\phi_{Bn}}{\sqrt{N_d}}\right]$$

(2-6)

2.4 電流傳輸機制

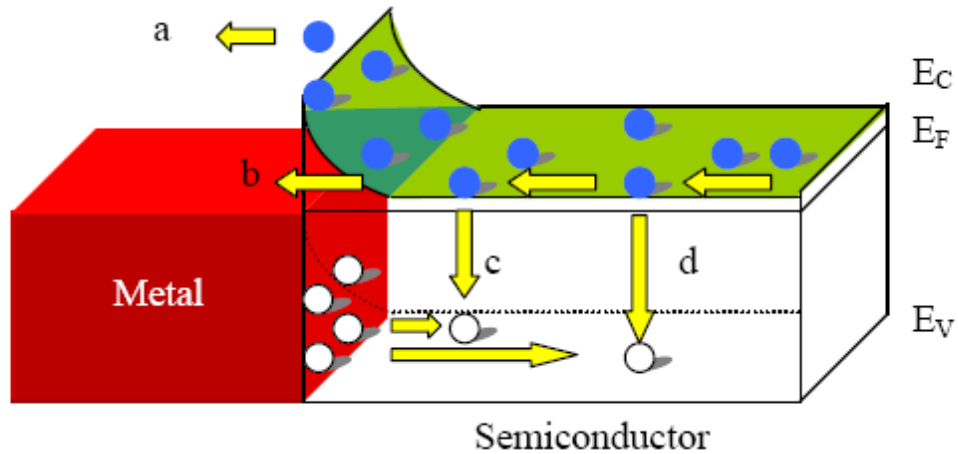


圖 2-3 金屬-半導體界面在外加順向偏壓時，其內部的電流傳輸過程。

圖 2-3 秀出金屬-n 型半導體在順偏下四個基本的傳輸過程[22]

- (a) 電子從半導體躍過位能障入射到金屬
- (b) 量子力學的穿遂位能障
- (c) 空間電荷區的再結合
- (d) 中性區的再結合

對低摻雜半導體而言，電流由熱離子放射(thermionic emission: TE)主導，如圖 2.3(a)所示，此機制為載子經由熱激發而越過位能障，達成電流的傳導。在中度摻雜濃度，電流由熱場發射(thermionic field emission: TFE)主導，如圖 2.3(b)所示，對高度摻雜而言，靠近傳導帶的位能障變得相當窄，電子可以直接穿透，這就是場發射(field emission: FE)。這三個機制可以由特徵能量加以區分，其定義為[19]

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N}{K_s \epsilon_0 m_{\text{tun}}^*}} = 1.86 \times 10^{-11} \sqrt{\frac{N(\text{cm}^{-3})}{K_s (m_{\text{tun}}^* / m)}} \quad [\text{eV}] \quad (2-7)$$

N 為摻雜濃度，單位為 cm^{-3} ， m_{tun}^* 是等效穿遂質量， m 是自由電子質量。



第三章 量測技術

3-1 歐姆接觸測試結構

歐姆的金屬-半導體接觸是被定義為金屬-半導體界面的電壓降跟元件的作用區(active region)相比之下很小，理想為零，描繪一個歐姆接觸的特性是特性電阻(specific contact resistance) ρ_c ，一般拿來作每一個歐姆接觸品質的比較，單位是 $\Omega\text{-cm}^2$ 。在這個章節，我們將說明各式各樣的量測技術和對應的測試結構。

3-1-1 Two-Terminal Contact Resistance Methods

這個方法是最早期也是最簡單，假如操作不當時其正確性是不可靠的 [24]。這些細分成兩點(two-element)結構和多點(multi-element)結構，多點結構為著名的接觸串列(contact strings 或 contact chains)。接觸串列技術被認為是一種粗糙的方法，對於要精算接觸電阻不是很有幫助。不過，通常用在製程監控上。圖 3.1(a)為兩點測試結構，3.1(b)為串列結構。

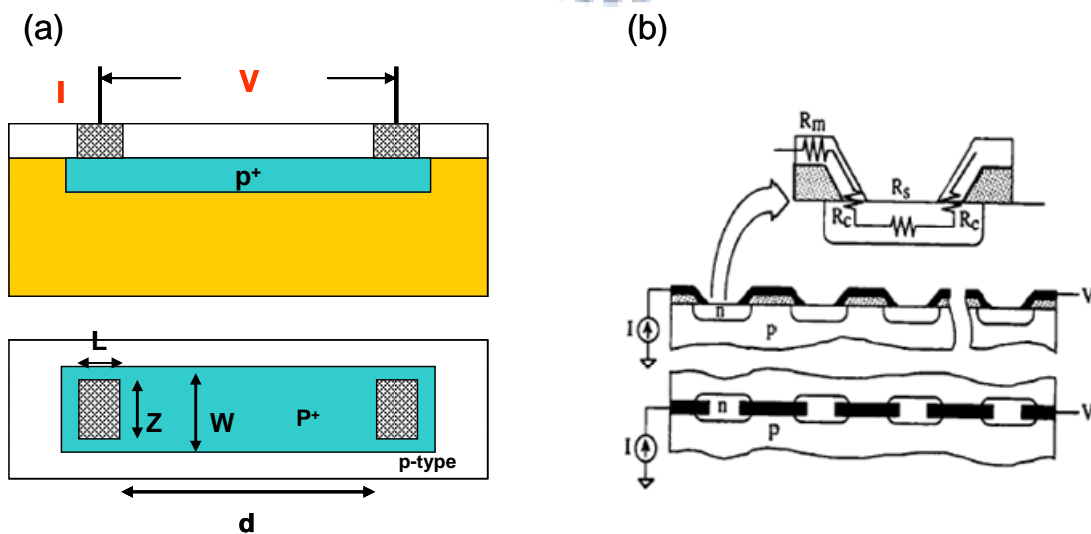


圖 3-1 側向兩端點接觸電阻結構 (a)橫截面跟俯視圖 (b)接觸串列。

為了限制電流流動，電極坐落的位置必須跟與基板剩餘部分隔離。可以利用平面技術來侷限佈植區或擴散區或者是利用蝕刻技術把圍繞在島狀物(island)旁的區域給吃掉，留下的區塊稱為高臺(mesa)。接觸電阻 R_c 為

$$R_c = \frac{\left(R_T - \frac{\rho_s d}{W} + R_d + R_w \right)}{2} \quad (3.1)$$

R_T 為總電阻， ρ_s 是 p^+ 層的片電阻， R_d 是因為在電極下電流擁擠所造成的電阻，假如 $Z < W$ ， R_w 為接觸寬度修正。對於 N 個島狀物， $2N$ 個接觸電阻的接觸串列測試結構，可求得

$$R_c = \frac{R_T - \frac{N \rho_s d}{W}}{2N} \quad (3.2)$$

3-1-2 Multiple Contact Resistance Methods

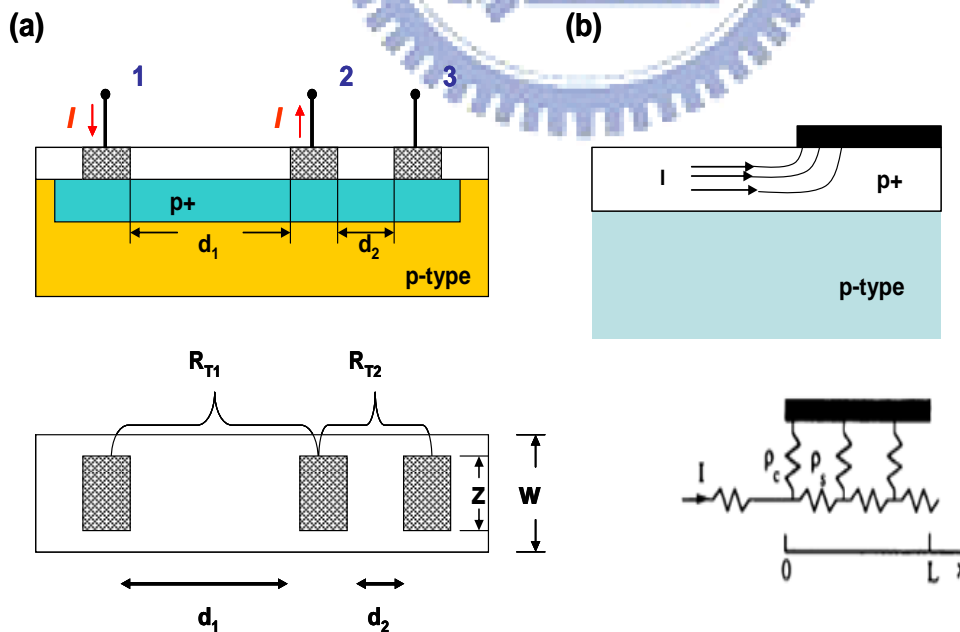


圖3-2 (a)測試結構 (b)半導體-金屬接觸可以由 ρ_c - ρ_s 等效電路表示，電流選擇電阻最小路徑[25]。

從圖 3.2(a)，總電阻和接觸電阻為

$$R_{T1} = \frac{\rho_s d_1}{W} + 2R_C$$

$$R_{T2} = \frac{\rho_s d_2}{W} + 2R_C$$

最後，

$$R_C = \frac{(R_{T2}d_1 - R_{T1}d_2)}{2(d_1 - d_2)} \quad (3.2)$$

從方程式(3.2)看出，這個結構不像兩端點結構那樣的含糊不明確，因為既不需要知道塊材的電阻，也不需要知道層的片電阻。這個結構只能夠決定接觸電阻，而相當有用且實際的參數。然而，特性電阻不能夠從這兩個電阻量測直接取得。Murrmann 和 Widmannn[26]使用一個簡單傳輸線方法(transmission line method: TLM)，使用半導體片電阻和接觸電阻把電流擁擠效應考慮進去，這方法可以萃取出特性電阻 ρ_c 。Berger[27]延伸這個方法。當電流從半導體流到金屬，它看到 ρ_c 和 ρ_s ，如圖 3.2(b)。電極下的電位分佈根據[27]由 ρ_c 和 ρ_s 決定

$$V(x) = \frac{I\sqrt{\rho_s\rho_c} \cosh\left(\frac{L-x}{L_T}\right)}{Z \sinh\left(\frac{L}{L_T}\right)} \quad (3.3)$$

L 為電極長度， Z 為電極寬度， I 為流進電極的電流。很明顯看出在電極邊緣 $x=0$ 處電壓最高，隨著 x 距離增加幾何指數的下降，顯示在圖 3.3(a)。電壓曲線 $1/e$ 的距離被定義為轉移長度(transfer length) $L_T = (\rho_c / \rho_s)^{1/2}$ ，也可從圖 3.3(b)看出，轉移長度是特性電阻的函數。使用方程式(3.3)，接觸電阻可以被寫為

$$R_C = \frac{V}{I} = \frac{\sqrt{\rho_s \rho_c}}{Z} \coth\left(\frac{L}{L_T}\right) = \frac{\rho_c}{L_T Z} \coth\left(\frac{L}{L_T}\right) \quad (3.4)$$

有兩個限制的情形來簡化方程式(3.4)，

$$L \leq 0.5L_T, \coth\left(\frac{L}{L_T}\right) \approx \frac{L_T}{L}, \quad R_C \approx \frac{\rho_c}{LZ} \quad (3.5)$$

$$L \geq 1.5L_T, \coth\left(\frac{L}{L_T}\right) \approx 1, \quad R_C = \frac{\rho_c}{L_T Z} \quad (3.6)$$

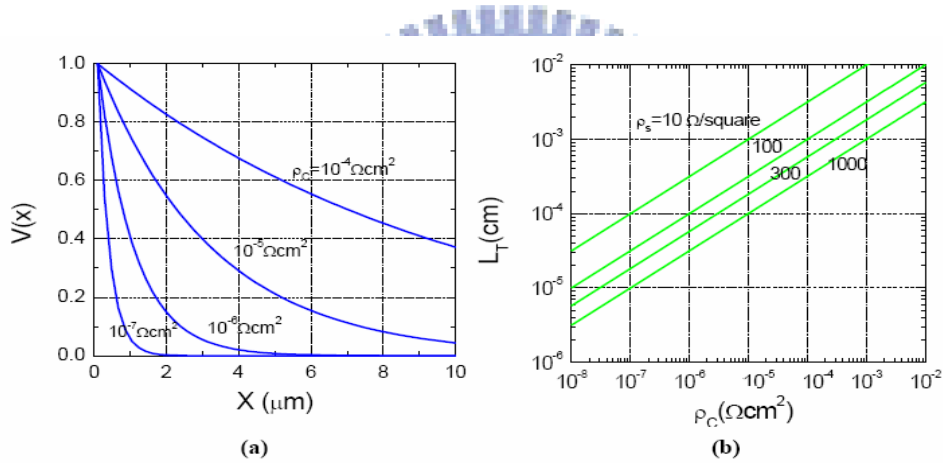


圖3-3(a)接觸底下電位隨距離 x 的變化，亦是 ρ_c 的函數(L & $Z = 100 \mu\text{m}$ ， $\rho_s = 100 \Omega/\text{square}$) (b)轉移長度是 ρ_c 和 ρ_s 的函數。

3-1-3 傳輸線方法(TLM)

傳輸線方法一開始是由 Shockley 所提出[28]。TLM 結構很像多點測試結構。只是傳輸線方法由超過三個電極所組成，如圖 3.4(a)。在這個論文裡，我們使用 TLM 來取出特性電阻。當接觸長度大於 $1.5L_T$ ，任意兩個電極間的總電阻可以寫成

$$R_T = \frac{\rho_s d}{Z} + 2R_C \approx \frac{\rho_s}{Z}(d + 2L_T) \quad (3.7)$$

總電阻可以被繪成間距 d 的函數，如圖 3.4(b)所示。從圖上可萃取出三個參數，由斜率得到片電阻，y 軸截距得到接觸電阻(R_C)，與 x 軸截距得到轉移長度(L_T)。最後，從方程式，可以得到特性電阻 ρ_c 。TLM 有時候與 x 軸交點得到的 L_T 值不是很清楚，導致錯誤的 ρ_c 值。這是因為接觸底下片電阻的不確定性引起。從 TLM 方法得到的片電阻包括接觸底下跟接觸間的片電阻。Reeves 和 Harrison 修正方程式(3.3)和(3.4)

$$R_{cf} = \frac{\rho_c}{L_{Tc} Z} \coth\left(\frac{L}{L_{Tc}}\right) \quad (3.8)$$

$$R_T = \frac{\rho_s d}{Z} + 2R_C \approx \frac{\rho_c}{Z} \left[d + 2 \left(\frac{\rho_{sc}}{\rho_s} \right) L_{Tc} \right]$$

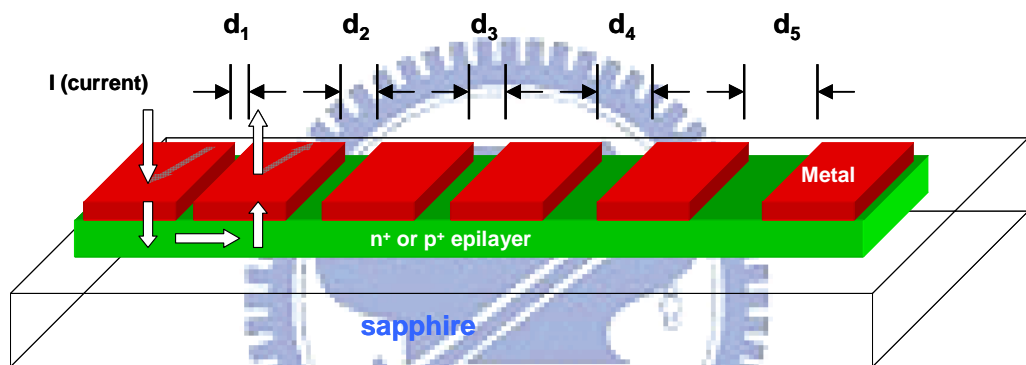
ρ_{sc} 是接觸底下的片電阻， $L_{Tc} = (\rho_{sc} / \rho_s)^{1/2}$ 。仍然可從斜率得到片電阻(ρ_s / Z)和由 $d=0$ 的截距得到 $2R_C$ 。 $R_T=0$ 的截距得到 $2L_{Tc}(\rho_{sc} / \rho_s)$ 取代簡單傳輸線方法的 $2L_T$ 。

從這個方法我們不能夠得到 ρ_c 值，因為 ρ_{sc} 這個參數仍然不知道。因此他們結合傳輸線方法(決定 R_C)和終端電阻方法(決定 R_{ce})。從方程式(3.8)，(3.9)，(3.10)，可以萃取出 L_{Tc} 和 ρ_c 。除了接觸底下和接觸間的片電阻以外，修改過的傳輸線方法可以決定接觸電阻和特性電阻。

$$R_{ce} = \frac{\sqrt{\rho_{sc}\rho_c}}{Z \sinh\left(\frac{L}{L_{TC}}\right)} = \frac{\rho_c}{ZL_{TC} \sinh\left(\frac{L}{L_{TC}}\right)} \quad (3.9)$$

$$\frac{R_{ce}}{R_c} = \frac{1}{\cosh\left(\frac{L}{L_{TC}}\right)} \quad (3.10)$$

(a)



(b)

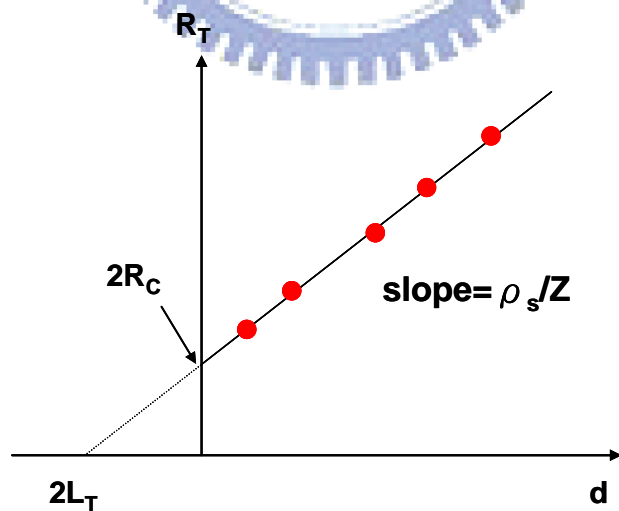


圖 3-4(a)TLM 結構示意圖 (b)總電阻跟距離的關係。

3.2 霍爾量測

一般較普遍的樣品，其幾何形狀並不完全是長條狀。Van der Pauw 根據霍爾效應的理論，對不規則形狀的樣品提出了新的量測方法。我們稱為 Van der Pauw 量測法。因為 van der Pauw 量測法對幾何形狀並沒有太多的限制，所以 van der Pauw 量測法成為對霍爾量測最普遍的方法。圖 3.1 為常見的幾何圖形

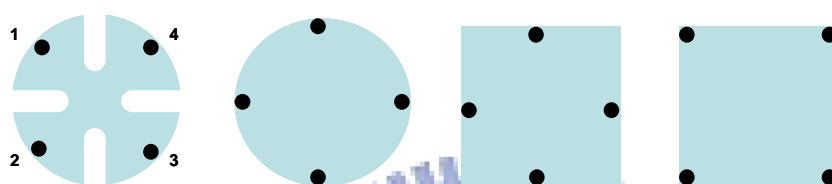


圖 3-5 一般常見的 van der Pauw 幾何圖形。

Van der Pauw 技術的霍爾量測目的是介由量測霍爾電壓來決定載子濃度。霍爾電壓由一連串的电壓量測，一固定大小的電流和一固定磁場垂直加在樣品平面，有幾項要點必需注意

- (1) 歐姆接觸的品質和大小
- (2) 樣品均勻性和厚度準確地決定
- (3) 不均勻的溫度所造成的熱磁效應(thermomagnetic effects)
- (4) 光電導效應(photoconductive effect)和光生伏打效應(photovoltaic effect)，在暗房量測可以降低這些效應
- (5) 樣品側向維度必須大於接觸點大小及樣品厚度
- (6) 必須正確地量測樣品溫度，磁場強度，電流及電壓。

3-2-1 Definitions for Hall Measurements

由霍爾量測，我們可以知道 n 型或 p 型材料的片載子濃度 n_s 或塊材載子濃度 n ，假如樣品的厚度已知。對厚的，重摻雜濃度的樣品其霍爾電壓可能相當小(微伏的等級)。得到正確結果的困難度不僅是小量的霍爾電壓，因為今天市場上品質好的數位電壓計是相當足夠的。較嚴重的問題來自於由接觸位置非對稱性，樣品形狀，有時不均勻的溫度所引起大的偏差電壓。

控制這問題最一般的方法是取得兩組霍爾量測，一組為正磁場方向，一組為負磁場方向。相關的定義如下

- I_{13} = 直流電流，從 1 流進從 3 取出。同樣地 I_{31} ， I_{42} ， I_{24}
- B = 固定及均勻的磁場強度平行 z 軸方向，點指向正 z 方向磁場為正，指向負 z 方向磁場為負，如圖所示。
- V_{24P} = 正磁場下，介於 2 和 4 間的電壓。同樣地 V_{42P} ， V_{13P} ， V_{31P} 。
作用在負磁場下，類似的定義為 V_{24N} ， V_{42N} ， V_{13N} ， V_{31N} 。

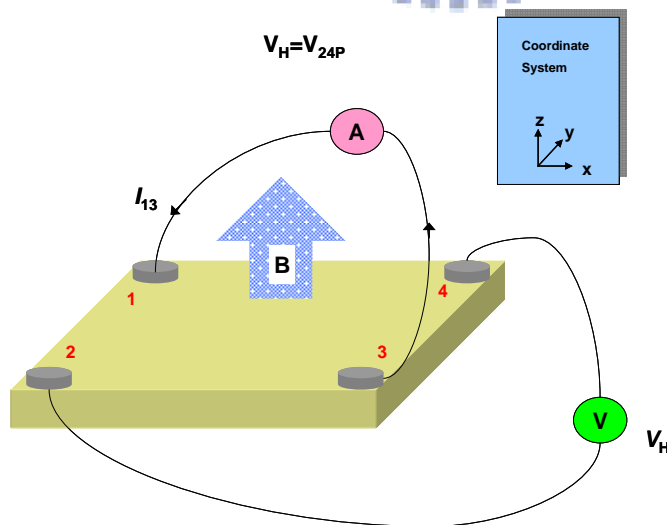


圖 3-6 決定霍爾電壓的 van der Pauw 結構示意圖。

3-2-2 Hall Measurements

霍爾量測的步驟為:

- 外加一正磁場 B
- 外加一電流 I_{13} 量 V_{24P}
外加一電流 I_{31} 量 V_{42P}
同樣地，分別量 V_{13P} ， I_{42} 和 V_{31P} ， I_{24} 。
- 將磁場反向(負磁場)
- 同樣地，分別量測 V_{24N} 和 I_{13} ， V_{42N} 和 I_{31} ， V_{13N} 和 I_{42} ， V_{31N} 和 I_{24} 。

Hall Calculations

計算載子濃度的步驟如下:

- 計算以下的值
 $V_C = V_{24P} - V_{24N}$ ， $V_D = V_{42P} - V_{42N}$
 $V_E = V_{13P} - V_{13N}$ ， $V_F = V_{31P} - V_{31N}$
- 樣品的型式由 $V_C + V_D + V_E + V_F$ 總合的極性來決定。假如總合為正(負)，樣品為 p-型(n-型)。
- 片載子濃度(單位: $\#/cm^2$)為

$$p_s = 8 \times 10^{-8} IB / [q(V_C + V_D + V_E + V_F)]$$
，假如電壓總合為正

$$n_s = \left| 8 \times 10^{-8} IB / [q(V_C + V_D + V_E + V_F)] \right|$$
，假如電壓總合為負

其中磁場 B 的單位為高斯(G)，電流為直流，單位是安培(A)。

- 假如樣品導電層的厚度已知，塊材的載子濃度(單位: $\#/cm^3$)可以被決定

$$n = n_s / d$$

$$p = p_s / d$$


樣品製備

4.1 磊晶薄膜第四章

4.1.1 長晶條件

實驗用的試片是以有機金屬化學氣相沉積系統(metalorganic chemical vapor deposition: MOCVD)來成長，有機金屬原料三甲基鎵(Trimethylgallium: TMGa)，三甲基鋁(Trimethylaluminum: TMAI)，分別作為三族 Al、Ga 的反應源。Ammonia(NH₃)作為五族 N 的反應源。而 CP₂Mg 作為 p 型摻雜的來源。

磊晶步驟是在 c-face(0001)面的藍寶石基板上依序成長 4μm 厚無摻雜氮化鎵，長晶溫度為 1050°C，接下來在 1000°C 的溫度下長一層 0.5μm 厚的 p-型氮化鎵，然後在 1000°C 溫度下長一層 1200 Å 的 p-型氮化鋁鎵，接著在 750°C 溫度下成長厚度為 20 Å、40 Å、80 Å 的 p⁺GaN，及一組 20Å 的 p⁺InGaN。如圖 4-1 所示。



p-AlGa_N 1200Å
p-GaN 0.5μm
u-GaN 4μm
sapphire

p⁺GaN 20Å
p-AlGa_N 1200Å
p-GaN 0.5μm
u-GaN 4μm
sapphire

p+GaN 40A
p-AlGaN 1200A
p-GaN 0.5um
u-GaN 4um
sapphire

p+GaN 80A
p-AlGaN 1200A
p-GaN 0.5um
u-GaN 4um
sapphire

p+InGaN 20A
p-AlGaN 1200A
p-GaN 0.5um
u-GaN 4um
sapphire



圖 4-1 樣品結構圖

4.1.2 晶片活化

由於 p-型氮化鎵中以鎂作雜質，鎂很容易跟氫形成 Mg-H 複合物，所以在磊晶完成後，我們將樣品送入高溫爐管在氮氣環境下進行退火，將氫釋出使鎂活化來提高電洞濃度。

4.2 製作流程

製程方面，吾人將製作成一流程圖，如圖 4-2 所示。最後完成的樣品如圖 4-3 所示。整個製程總共分為四個大步驟，依序是沉積，開出平臺(mesa)，開出電極間的凹槽，及電極製作。詳細說明於 4.2.1、4.2.2、4.2.3、4.2.4 小節中。

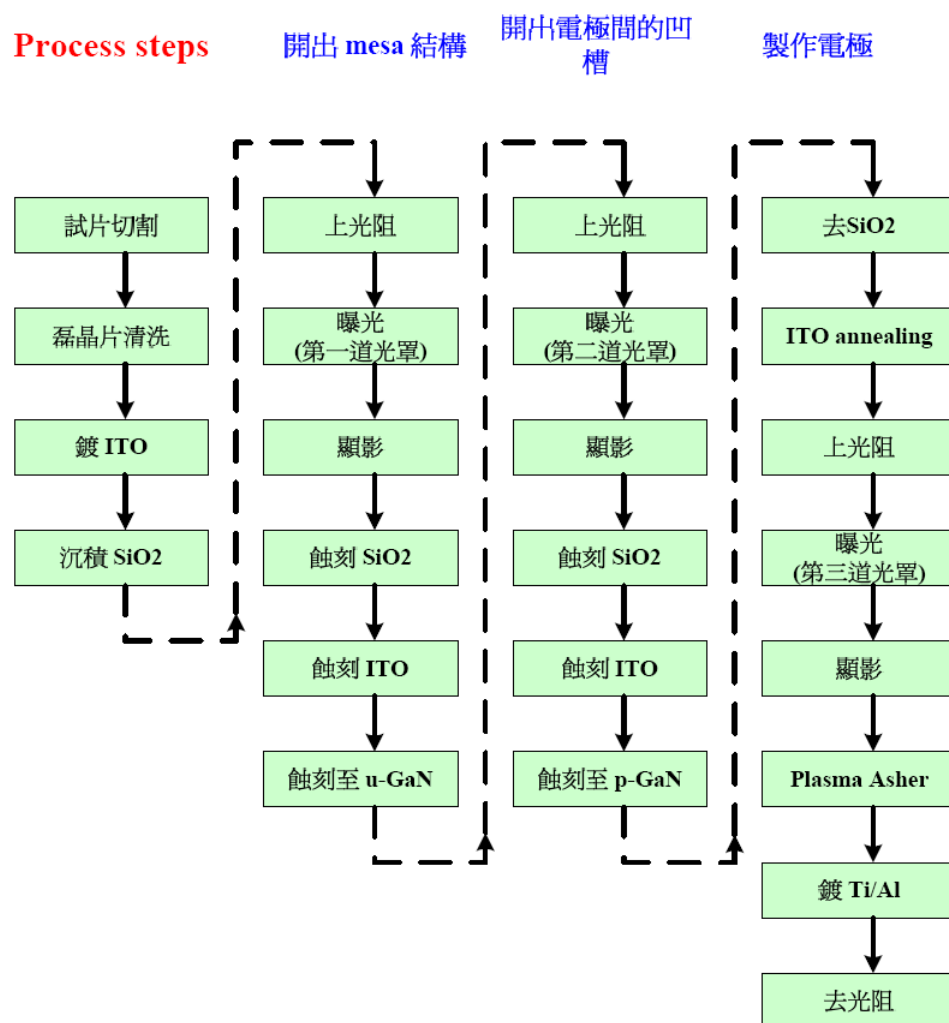


圖 4-2 實驗流程圖。

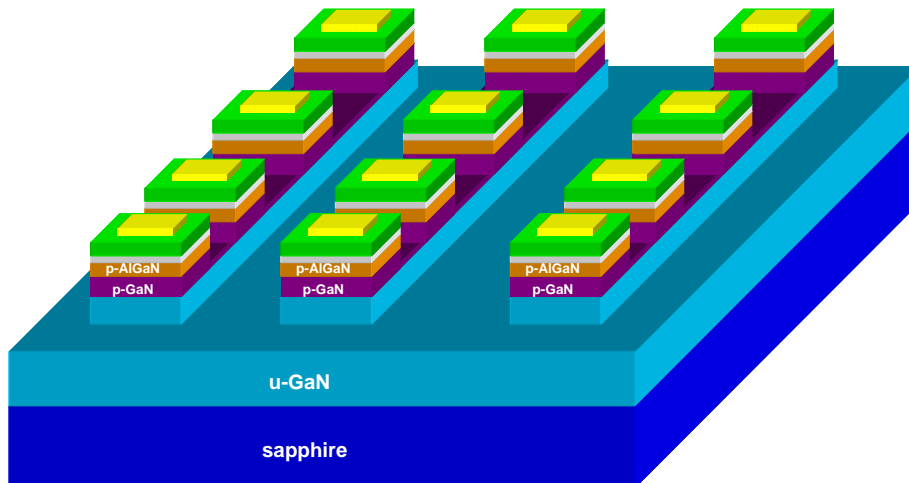


圖 4-3 結構完成圖。

晶片清洗:

- 將切割完成之試片，浸泡於煮沸的三氯乙烯溶液(TCE) 5分鐘，去除試片表面附著的粒子或油脂等有機污染物。
- 把試片以丙酮（ACE）沖洗乾淨，再把試片浸泡於沸騰的丙酮溶液中5分鐘，目的是為了去除殘餘的油脂及三氯乙烯溶液。
- 接著試片以異丙醇（IPA）洗去丙酮，並於煮沸的異丙醇中浸泡5分鐘，然後再以去離子水（D.I. water）沖洗5分鐘，最後把沖洗完的試片用氮氣吹乾。

薄膜沉積:

將清洗完的樣品送到 E-beam evaporator 腔體中，抽真空至 5×10^{-6} torr，接著鍍上一層 2000 Å 厚的 ITO，然後再鍍上一層約 1μm 厚的 SiO₂ 當作 ICP 的 hard-mask。在鍍 ITO，及 SiO₂ 時，同時放入空片，作為蝕刻率的測試。使用薄膜測厚儀量測厚度，得到的厚度跟由 SEM 圖看到的差不多，如圖 4-4 所示。

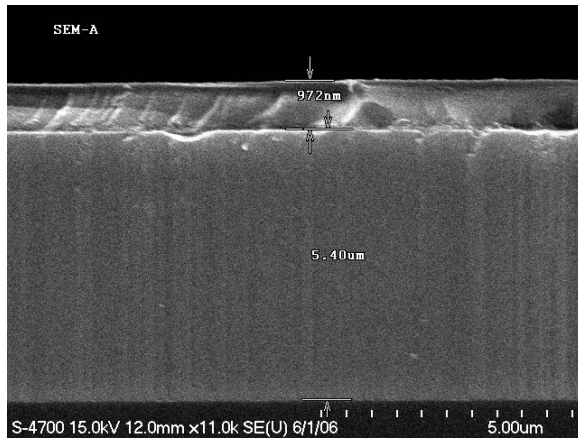


圖 4-4 SEM 橫截面圖。



4.2.1 平臺隔離製作

在沉積 SiO_2 之後，接著是定義平臺(mesa)結構，先用黃光微影技術定義想要的圖形，接著依序用 BOE，王水來蝕刻 SiO_2 及 ITO，最後利用 ICP 蝕刻至 u-GaN，圖 4-5 為製作流程，光罩設計如圖 4-6 所示。

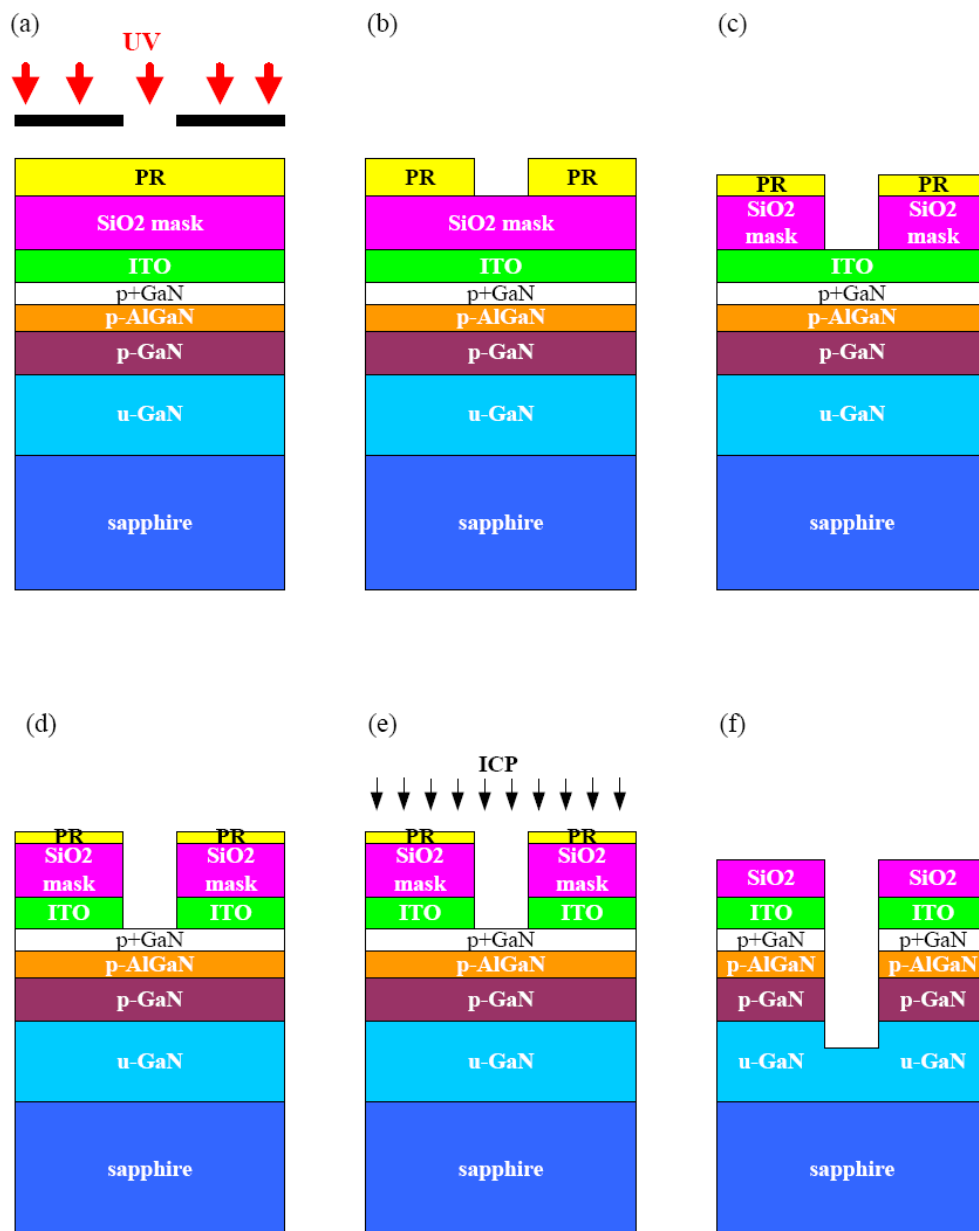


圖 4-5 mesa 製作流程。

黃光微影製程(lithography)的步驟:

1. 去水烘烤(Dehydrate Bake)或是預烤(Pre-Bake): 將樣品放在 110°C 的加熱平台 3 分鐘。
2. 上光阻附著劑: 採用 HMDS 光阻附著劑, 以 800rpm 的轉速預轉 5 秒, 以 3000rpm 的轉速旋轉 15 秒。
3. 上光阻(PR Spin Coating): 採用 AZ6112 正光阻, 以 1000rpm 的轉速旋轉 5 秒, 然後以 4000rpm 的轉速旋轉 25 秒, 光阻厚度約 1.2um。
4. 軟烤(Soft Bake): 將樣品置於 90°C 的熱墊板(Hot Plate)軟烤 3 分鐘。此步驟的目的是去除光阻部份溶劑將光阻由液態變固態, 以減少光阻的流動性, 使得光阻層對晶片表面附著能力加強。
5. 曝光(Exposure): 將樣品置於 Karl Suss 曝光機上進行曝光, 曝光時間 25 秒。
6. 顯影(PR Develop): 將曝完光的樣品置於 AZ300 顯影液中 10 秒之後再用 D.I.water 定影(Rinse)2 分鐘。定影完後的樣品放在光學顯微鏡(OM)底下觀察確定圖形無誤後, 將試片拿到 Hot Plate 去做硬烤。
7. 硬烤(Hard Baking): 將樣品置於 110°C 的熱墊板(Hot Plate)硬烤 3 分鐘。趕出光阻中多餘的有機溶劑使光阻的強度增強或消除駐波效應以利往後的蝕刻。
8. 蝕刻及去光阻(Etching & PR striping)

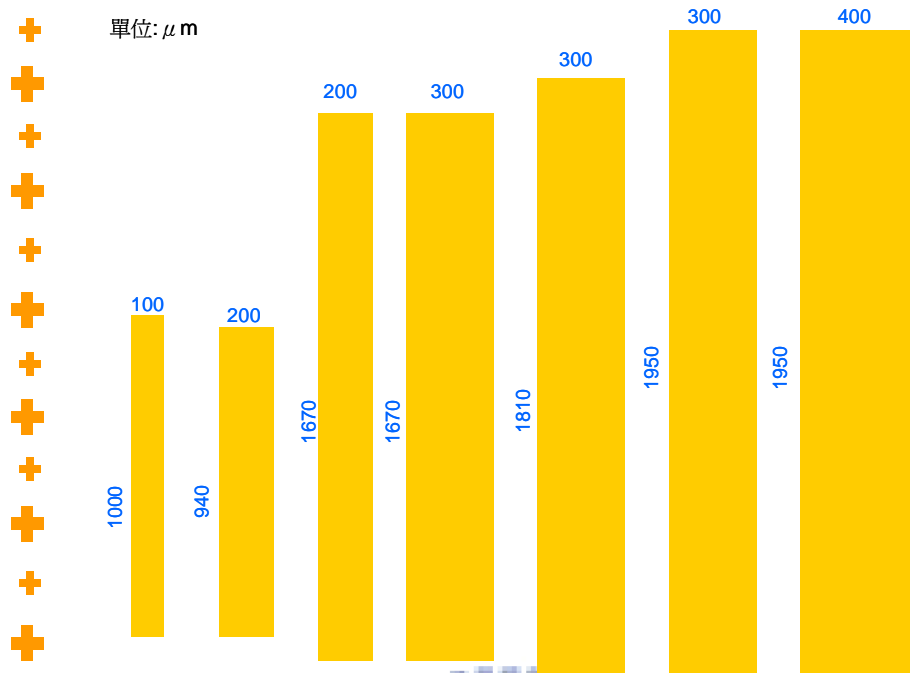


圖 4-6 第一道光罩設計圖。



4.2.2 垂直結構製作

垂直結構是在電極中間用 ICP 蝕刻至 p-GaN。其目的是為了確保電流垂直流過 ITO/p+GaN/p-AlGaN。除了 ICP 蝕刻深度不一樣外，其餘流程跟開 mesa 的步驟是一樣的。製作流程如圖 4-7 所示，第二道光罩設計如圖 4-8 所示。

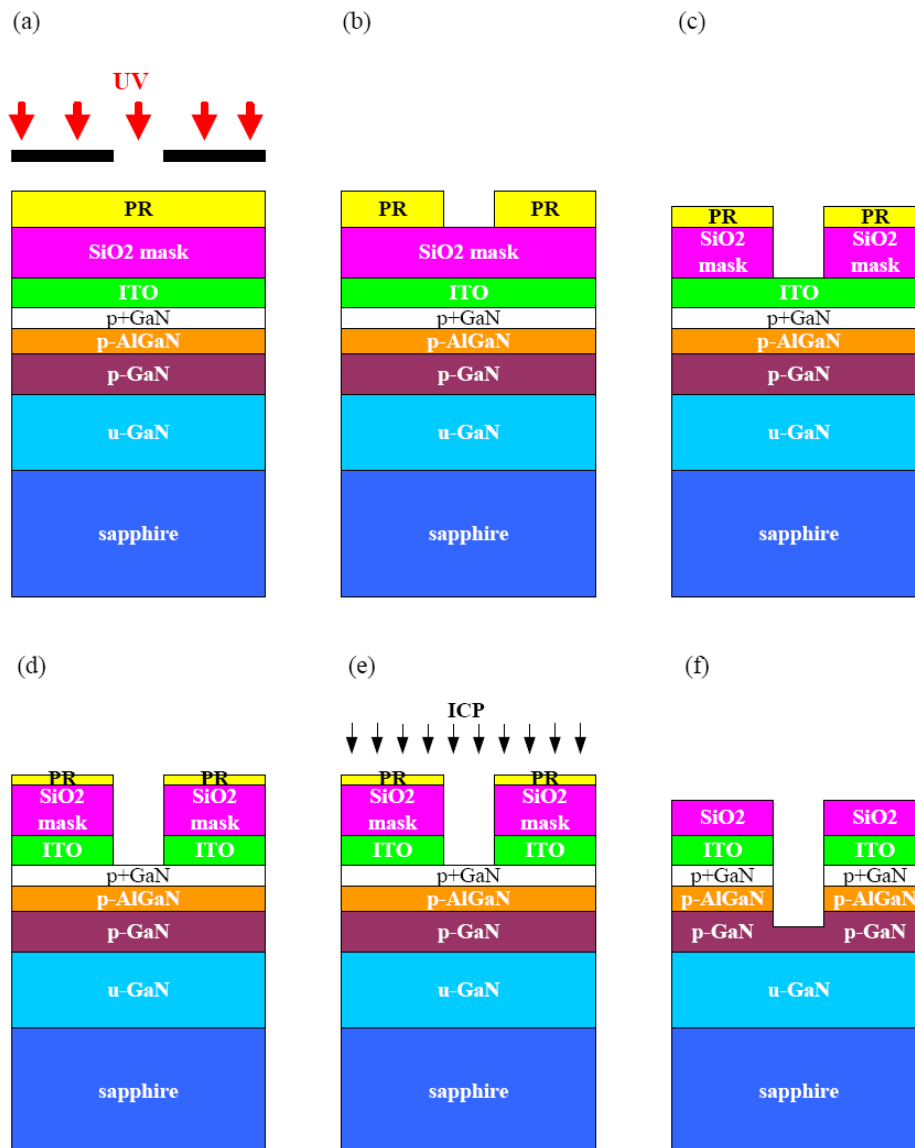


圖 4-7 垂直結構製作。

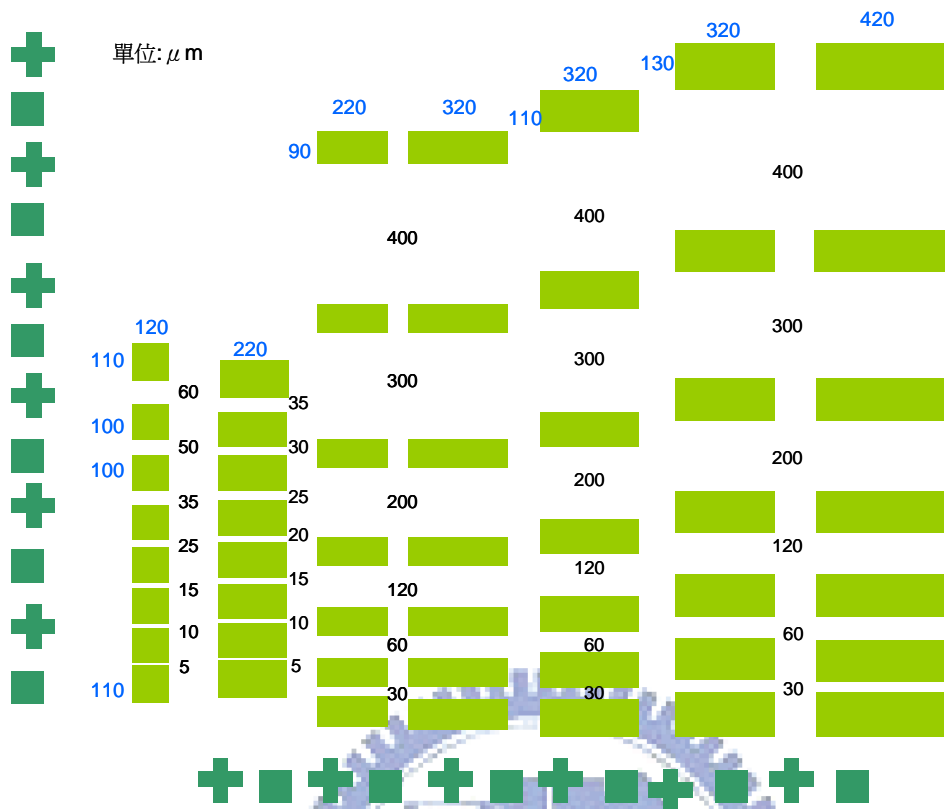
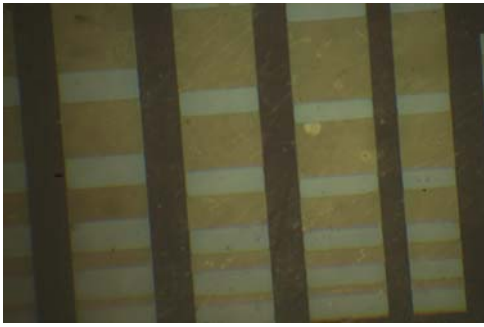
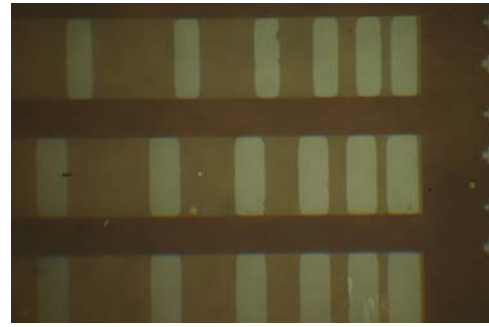


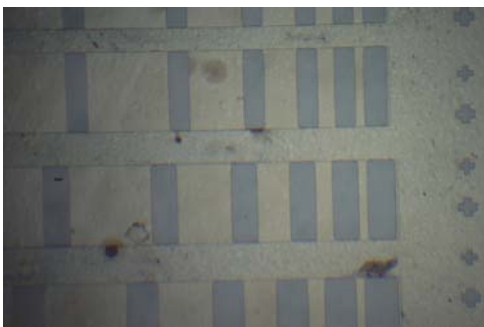
圖 4-8 第二道光罩設計圖。



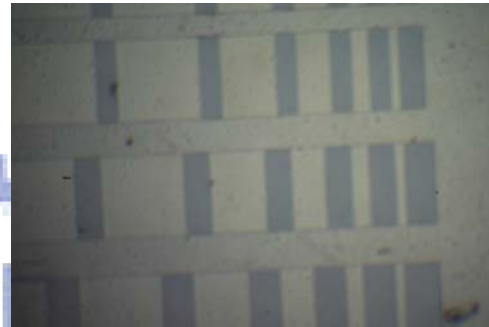
Sample A



Sample B



Sample C



sample D



Sample E

圖 4.9 移除 SiO_2 後 N_2 環境下 550°C 熱退火 10 分鐘後的 OM 照。

4.2.3 電極製作

垂直電極做完之後，接下來是鍍電極，我們採用 Lift-Off 製程。在鍍電極之前，我們先將 SiO_2 移除掉，再將試片送入爐管氮氣環境 500°C 三分鐘下進行熱退火，熱退火的目的是增強 ITO 的透光性及導電性。利用黃光微影的方式定義電極圖形，本實驗使用的電極圖形為矩形 TLM，顯影完後接著鍍金屬。黃光微影的部份跟前面製作 mesa 流程是一樣，只是省略最後一道硬烤的步驟，可以有助於之後的掀除 (lift off) 動作。將完成的黃光微影試片置於 Plasma Asher 中，以去除光學顯微鏡無法觀察之光阻薄膜。隨後拿去 E-beam 蒸鍍機腔體內抽真空至 5×10^{-6} torr 以下後鍍上 Ti/Al，即大功告成。製作流程如圖 4-10 所示，第二道光罩設計如圖 4-11 所示。



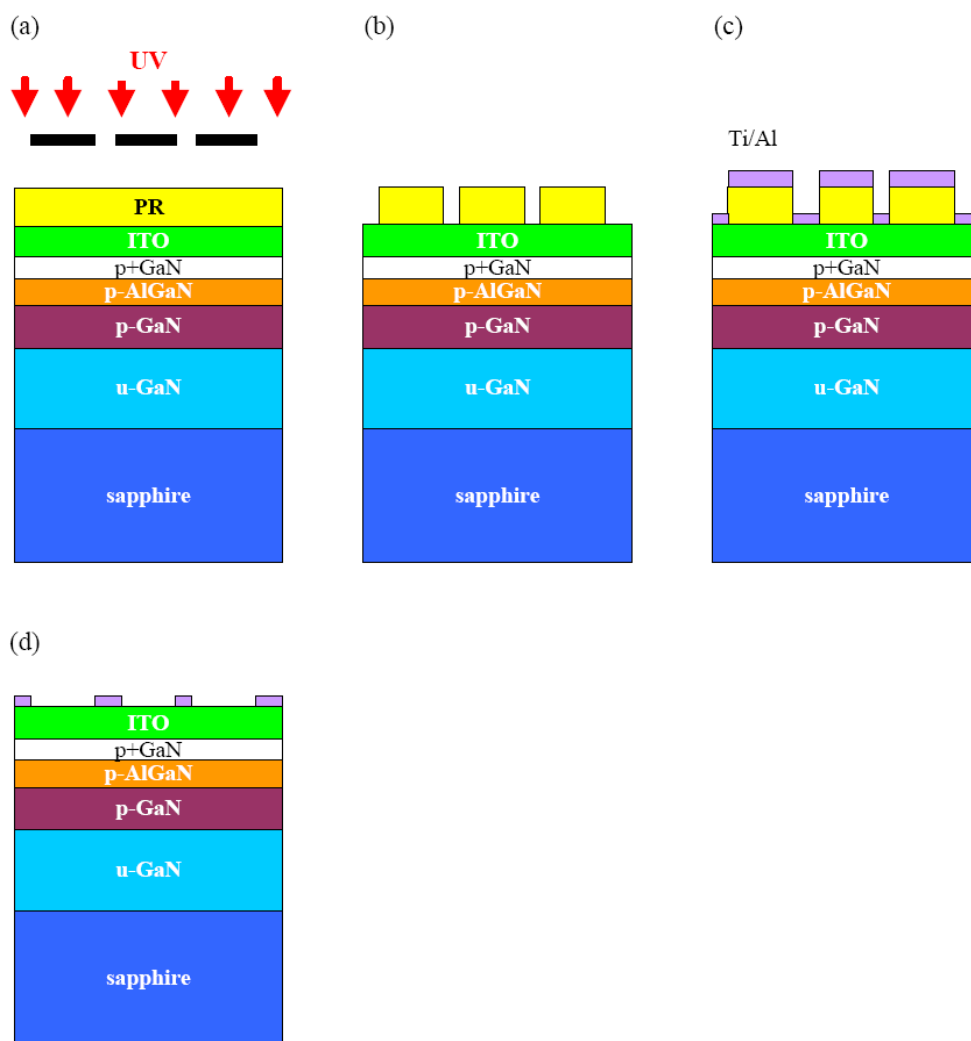


圖 4-10 電極製作流程。

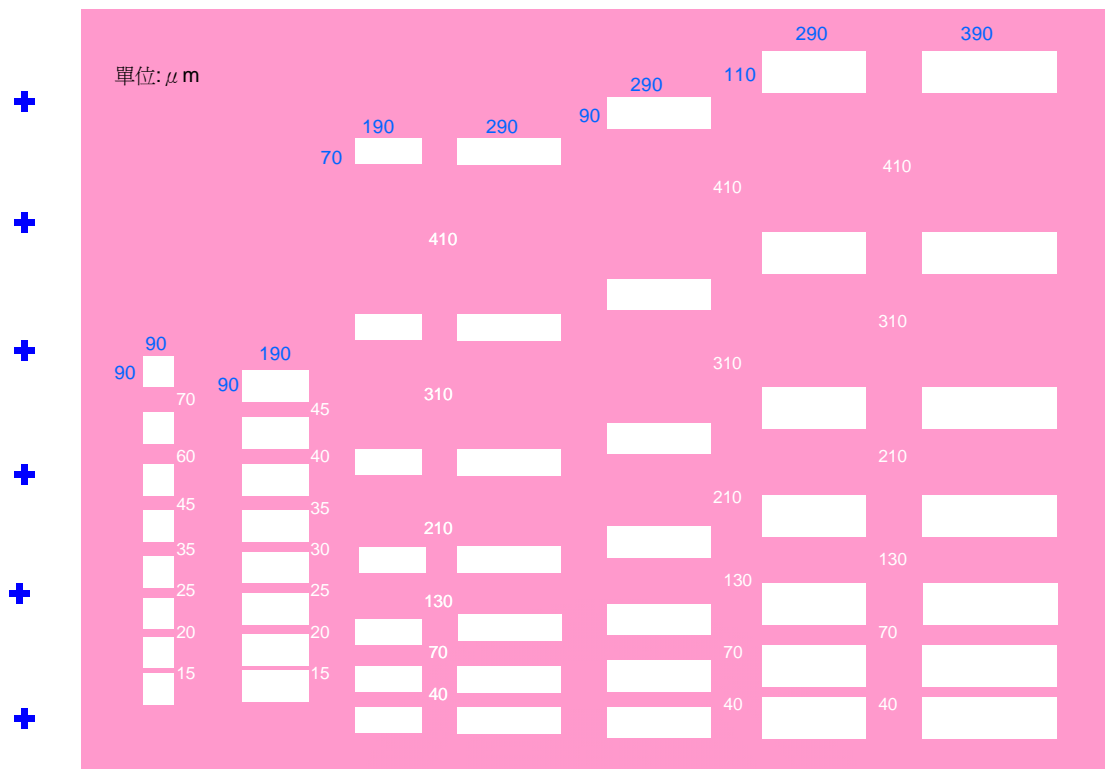


圖 4-11 第三道光罩設計圖。

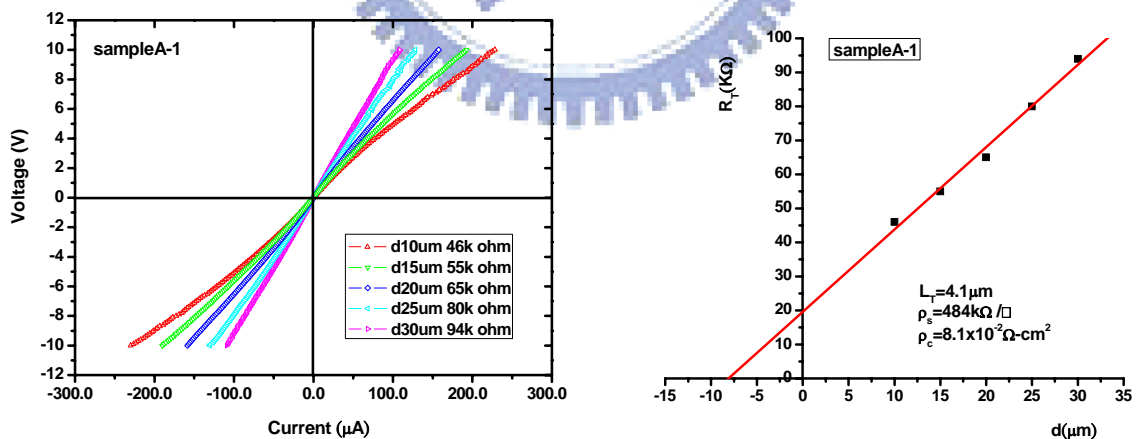


第五章 量測分析與討論

5-1 電流-電壓量測

在這次實驗中，我們採用矩型 TLM 來分析特性電阻，每個電極的長度為 $100\mu\text{m}$ ，寬度為 $200\mu\text{m}$ ，電極間的間距分別為 $10\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 。利用 keithy238 量測系統進行每個電極的 I-V 量測，電壓設定為 -10V 到 $+10\text{V}$ ，step 為 0.1V 。先判定曲線是否為線性。假如為線性的話可由 I-V 特性曲線斜率得到不同間距的總電阻。以間距為橫座標，間距間的總電阻為縱座標去作圖。由圖中的斜率我們可以得到片電阻值(ρ_s)，由 x 軸的截距可以得到轉移長度(L_T)，進而由關係式求得特性電阻($\rho_c=L_T^2 \cdot \rho_s$)。以下分別對五組樣品進行 I-V 量測。

I . Sample A (No contact layer)



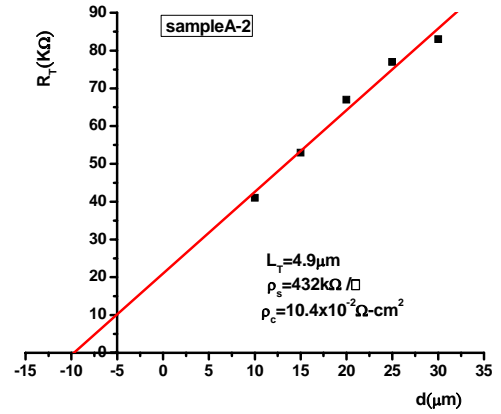
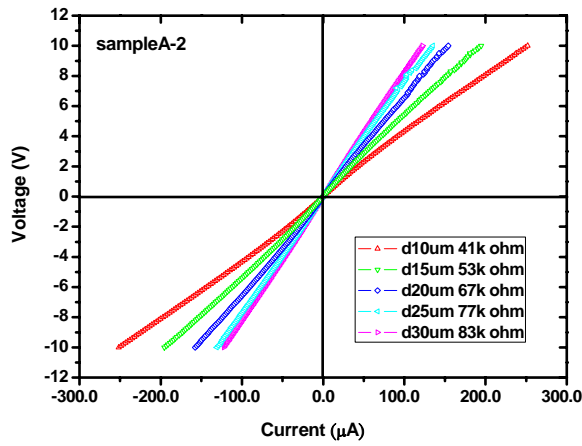


圖 5-1 sample A 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖

表 5-1 sampleA 參數平均值

	L_T (μm)	ρ_s ($\text{K}\Omega/\square$)	ρ_c ($\Omega\text{-cm}^2$)
sampleA-1	4.1	484	8.1×10^{-2}
sampleA-2	4.9	432	10.4×10^{-2}
sampleA-3	4.6	440	9.3×10^{-2}
sampleA-5	4.8	432	10×10^{-2}
sampleA-6	3.7	452	6.2×10^{-2}
sampleA-7	4.1	440	7.4×10^{-2}
sampleA-8	3.9	440	6.7×10^{-2}
平均	4.3	446	8.3×10^{-2}

II. Sample B ($p^+GaN : 20\text{\AA}$)

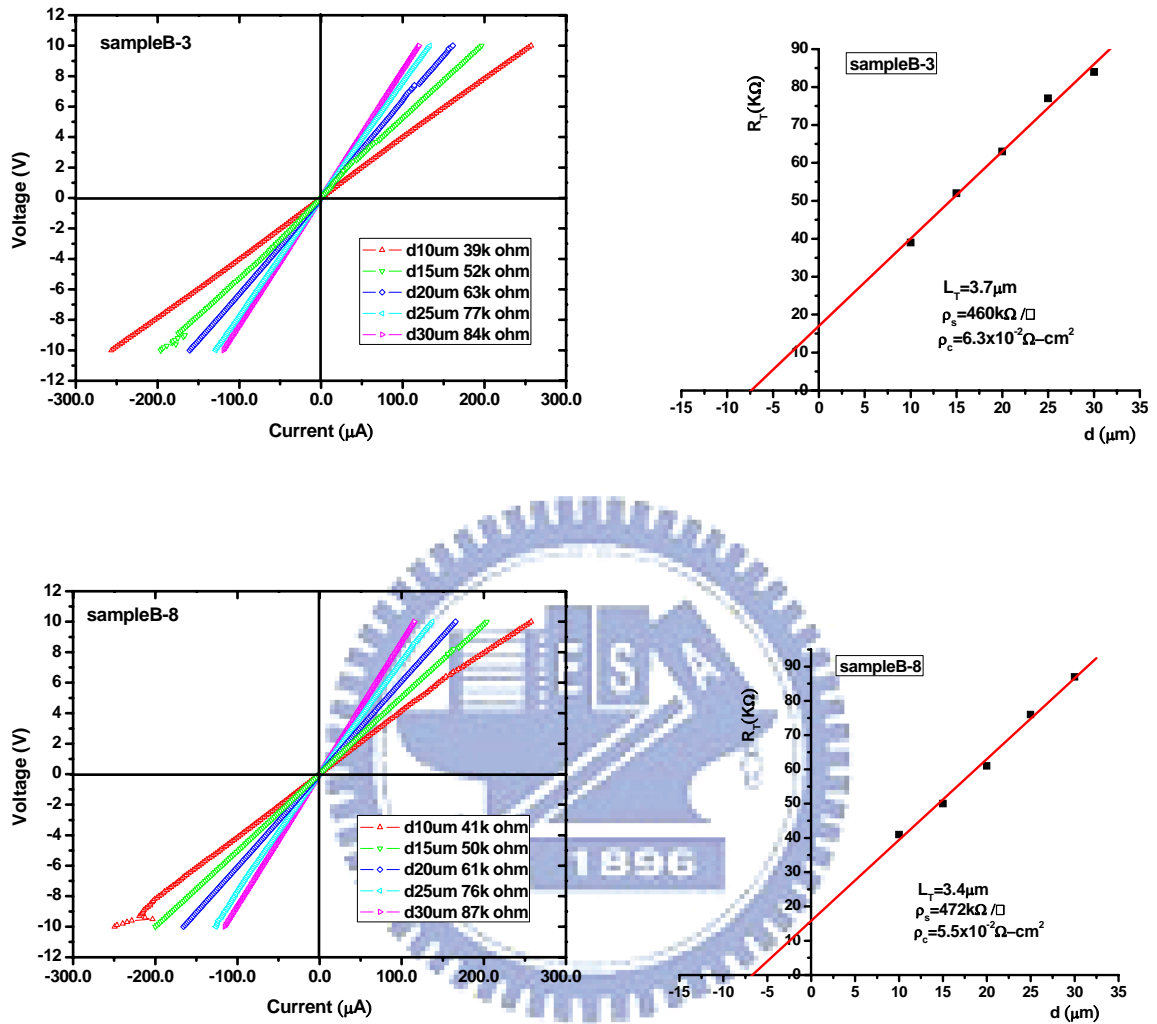


圖 5-2 sample B 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖

表 5-2 sampleB 參數平均值

	$L_T (\mu m)$	$\rho_s (K\Omega/\square)$	$\rho_c (\Omega-cm^2)$
sampleB-1	3.6	432	5.6×10^{-2}
sampleB-2	3.3	456	5.0×10^{-2}
sampleB-3	3.7	460	6.3×10^{-2}
sampleB-5	2.9	484	4.1×10^{-2}
sampleB-6	3.6	436	5.7×10^{-2}
sampleB-7	3.5	476	5.8×10^{-2}
sampleB-8	3.4	472	5.5×10^{-2}
平均	3.4	459	5.4×10^{-2}

III. Sample C ($p^+GaN : 40\text{\AA}$)

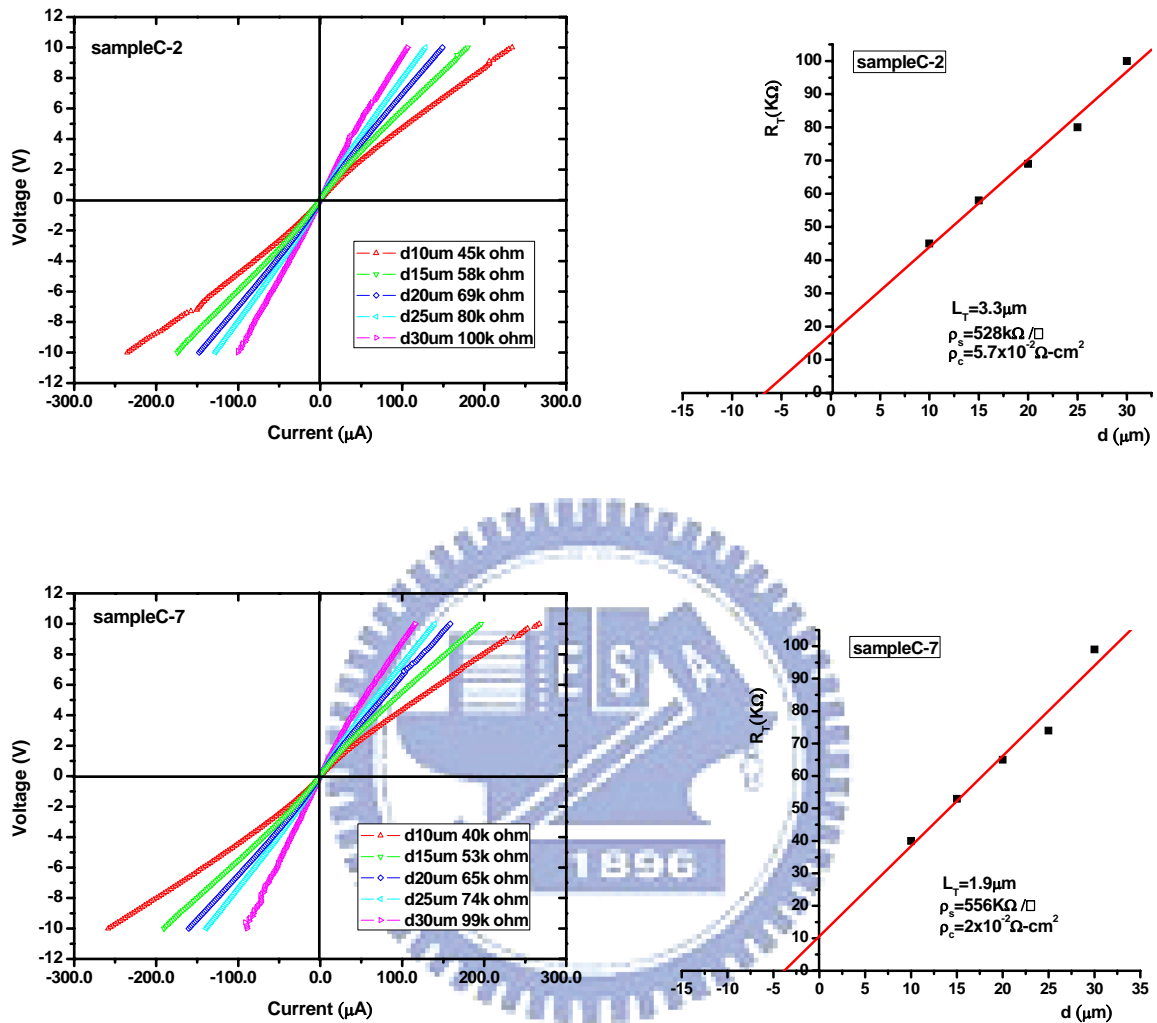


圖 5-3 sample C 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖

表 5-3 sampleC 參數平均值

	L_T (μm)	ρ_s ($K\Omega/\square$)	ρ_c ($\Omega\text{-cm}^2$)
sampleC-1	4.2	456	8.0×10^{-2}
sampleC-2	3.3	528	5.7×10^{-2}
sampleC-3	3.5	480	5.9×10^{-2}
sampleC-4	3.5	500	6.1×10^{-2}
sampleC-5	1.25	688	1.1×10^{-2}
sampleC-6	1.9	556	2.0×10^{-2}
sampleC-7	3.8	468	6.8×10^{-2}
平均	3.1	525	5.1×10^{-2}

IV. Sample D(p⁺GaN : 80Å)

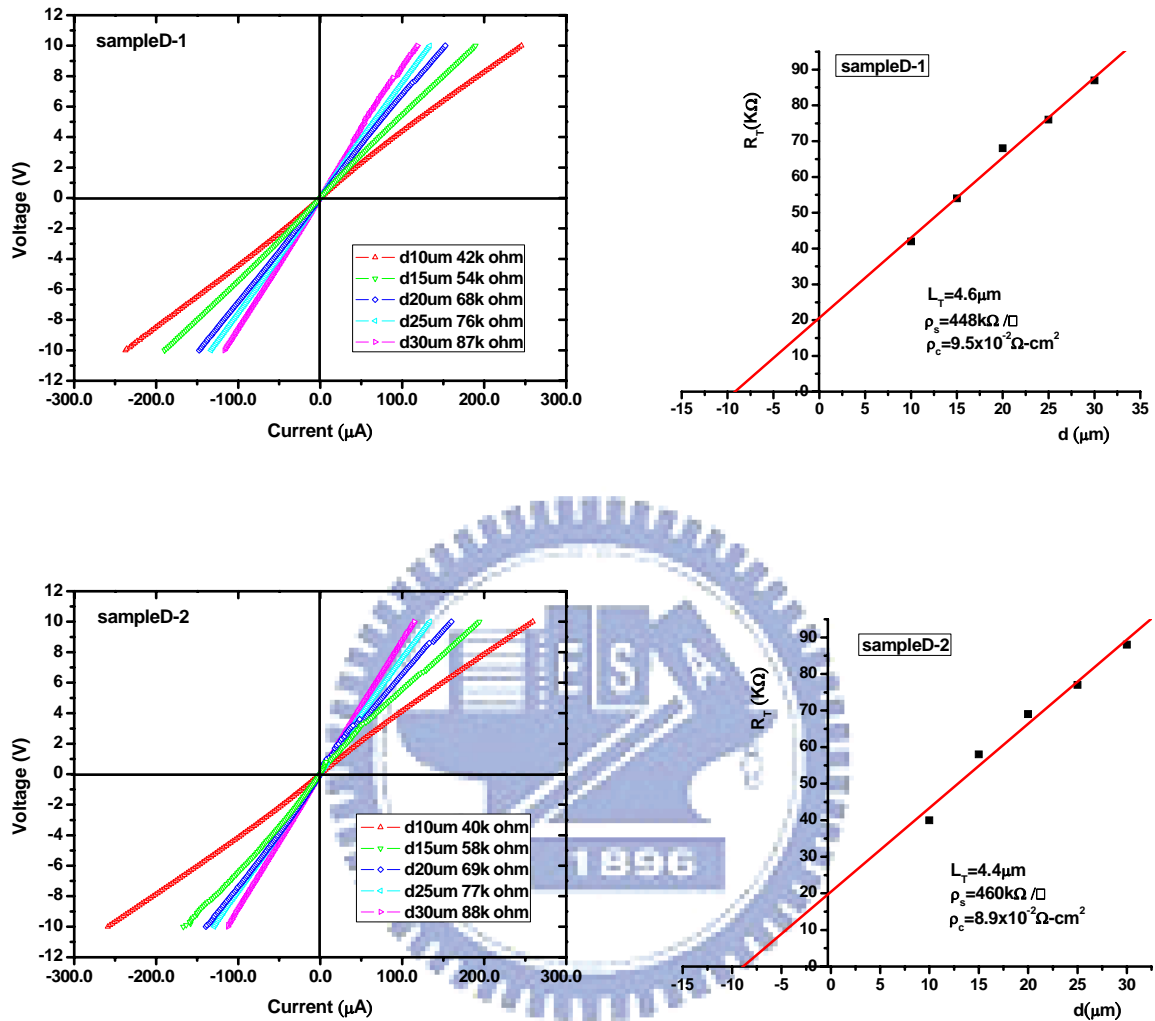


圖 5-4 sample D 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖

表 5-4 sampleD 參數平均值

	L_T (μm)	ρ_s ($K\Omega/\square$)	ρ_c ($\Omega\cdot cm^2$)
sampleD-1	4.6	448	9.5×10^{-2}
sampleD-2	4.4	460	8.9×10^{-2}
sampleD-3	4.7	440	9.7×10^{-2}
sampleD-5	4.3	424	7.8×10^{-2}
sampleD-6	5.1	408	10.6×10^{-2}
sampleD-7	3.1	460	4.4×10^{-2}
sampleD-8	1.8	588	1.9×10^{-2}
平均	4	461	7.5×10^{-2}

V. Sample E ($p^+InGaN : 20\text{\AA}$)

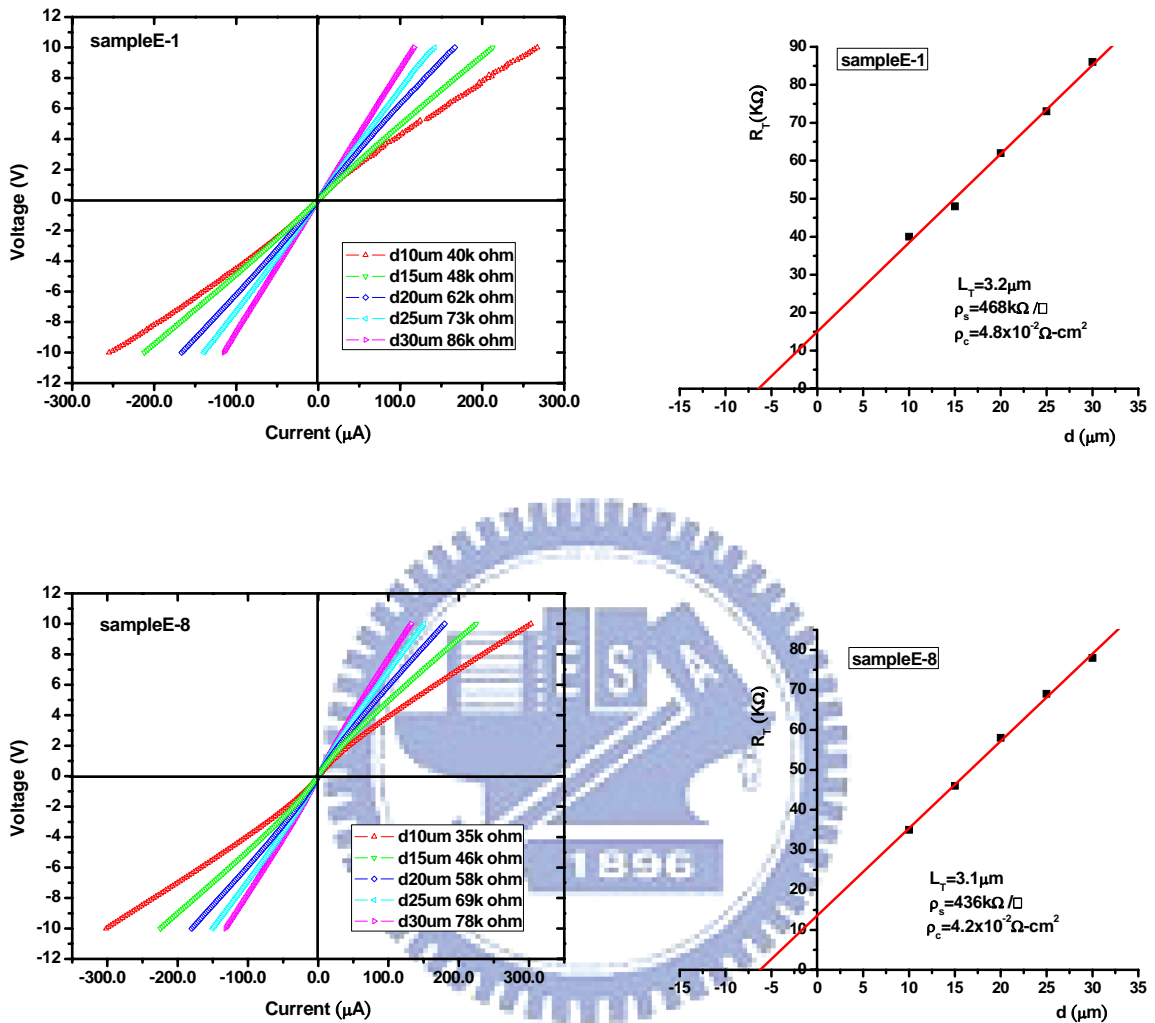


圖 5-5 sample E 的 I-V 特性曲線與 R_T vs d 圖

表 5-5 sampleE 參數平均值

	$L_T (\mu m)$	$\rho_s (K\Omega/\square)$	$\rho_c (\Omega\text{-cm}^2)$
sampleE-1	3.2	468	4.8×10^{-2}
sampleE-2	4.0	452	7.2×10^{-2}
sampleE-3	2.9	432	3.6×10^{-2}
sampleE-5	3.1	420	4.0×10^{-2}
sampleE-6	3.3	408	4.4×10^{-2}
sampleE-7	3.0	428	3.9×10^{-2}
sampleE-8	3.1	436	4.2×10^{-2}
平均	3.2	435	4.6×10^{-2}

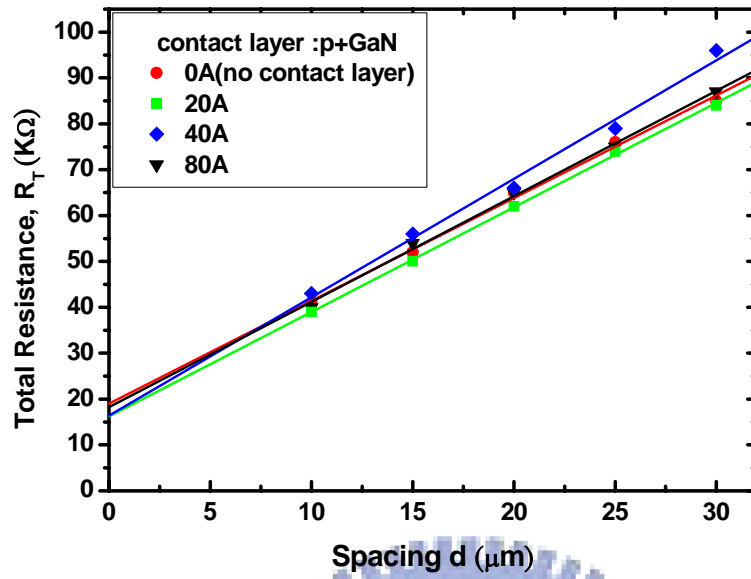


圖 5-6 R_T vs d 圖，p+GaN contact layer 厚度為 0\AA 到 80\AA 的變化。

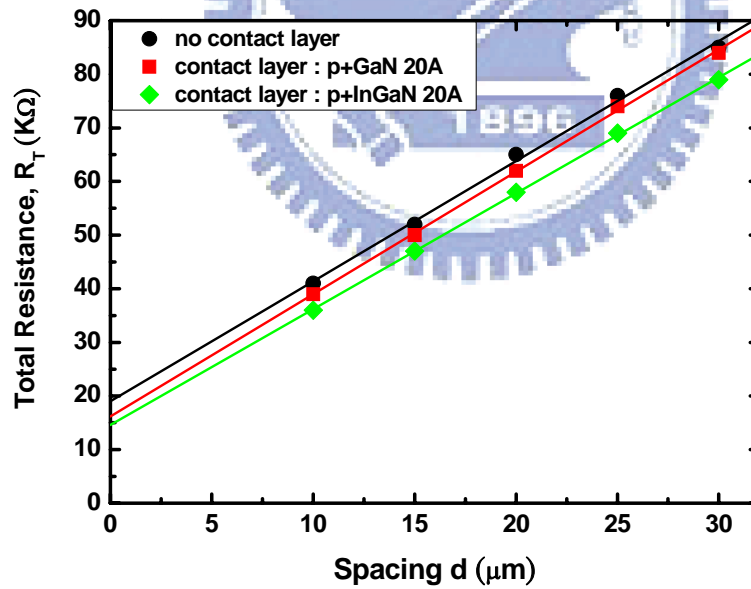


圖 5-7 R_T vs d 圖，不同 contact layer 在 20\AA 之比較。

對每一組樣品進行多點量測後，將得到的轉移長度 L_T ，片電阻 ρ_s ，特性電阻 ρ_c 取平均值，並將得到的 ρ_c 平均值與接觸層的厚度作圖，如圖 5-8。

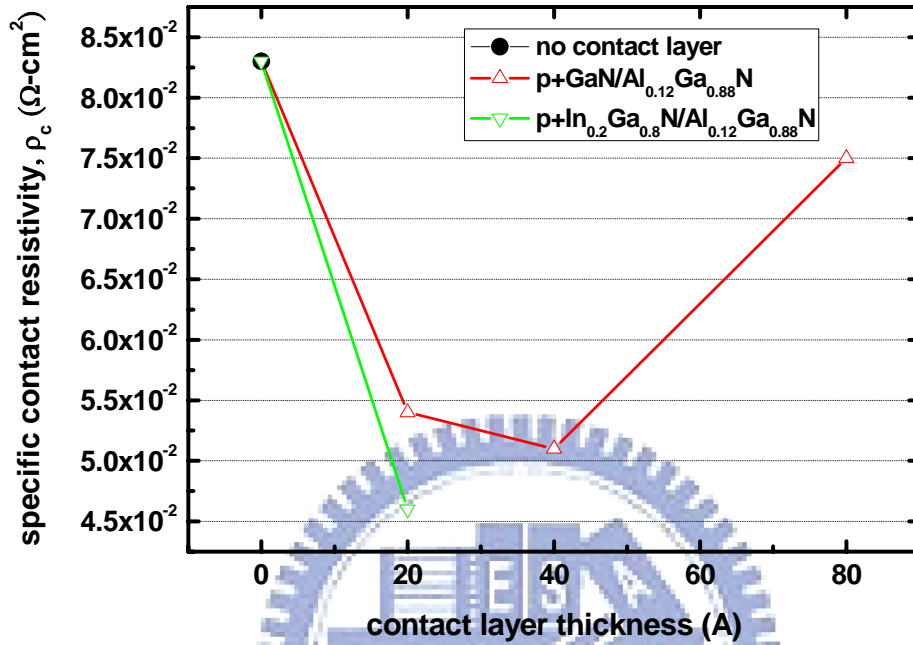


圖 5-8 ρ_c v.s contact layer thickness。

從圖 5.6 與 5.8 中觀察發現在 p-AlGa_{0.88}N 上具有不同厚度接觸層的特性電阻 (ρ_c) 都比沒有接觸層時低，且一開始會隨著 p+Ga_{0.88}N 接觸層厚度增加而下降，在 40Å 可以得到特性電阻為 $5.1 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}^2$ ，當隨著接觸層厚度提高後，特性電阻也會逐漸提高。這些現象跟 p+Ga_{0.88}N 接觸層內的應變 (strain) 有緊密的關係。

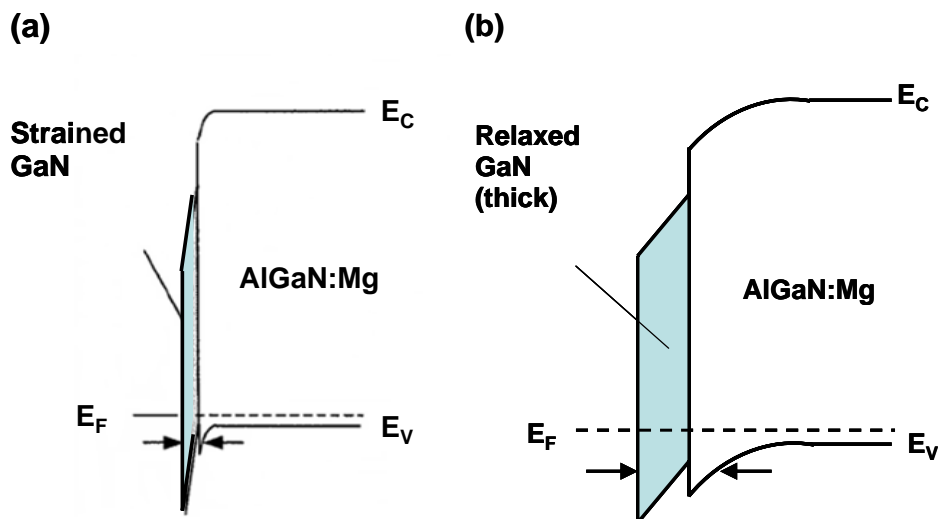


圖 5-9 p-AlGaN 表面附近的能帶圖。

從圖 5-7 與圖 5-8 中觀察發現，在相同厚度為 20\AA 時，接觸層為 p+InGaN 所得到的特性電阻($4.6 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}^2$)比接觸層為 p+GaN($5.4 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}^2$)低。

我們發覺利用 p-GaN 應變層在 p-AlGaN 上所得特性電阻並沒有想像中的好。我們回顧 2001 年日本 NTT K.Kumakura 所提出在 p-type GaN 上利用一層 p-type InGaN 應變層(strain-layer)來改善特性電阻。在 p-In_{0.14}Ga_{0.88}N 時，特性電阻可由 10^{-3} 等級下降到 10^{-5} 等級，在 p-In_{0.19}Ga_{0.81}N 時，下降到 10^{-6} 等級。而在本次實驗中，也只是改善幾倍而已。這當中的差異是值得我們去探討的。

5.2 實驗探討

當一 cap 層假晶(pseudomorphically)成長於應力釋放的 buff 層時，若 cap 層的晶格常數不同於 buffer 層的晶格常數，此時 cap 層會受到一應力而產生應變(strain)。應變定義為 cap 層受到應力時晶格常數改變量除於沒受應力時 cap 層的晶格常數，如式(5-1)。III-氮化物(烏采結構)其壓電極化(piezoelectric polarization)取決於平行方向(basal plane)的應變。

$$\varepsilon(x) = \frac{a_{buff} - a_{cap}(x)}{a_{cap}(x)} = \frac{\Delta a}{a} \quad (5-1)$$

往 c 軸方向成長，Ga-face 的磊晶層其自發極化方向朝著基板方向，也就是 [000-1] 方向。而在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 及 $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 系統中，上層的晶格常數比下層 buffer 層的晶格常數大，所以受到一壓縮(compress)應力，其壓電極化方向為 [0001]。

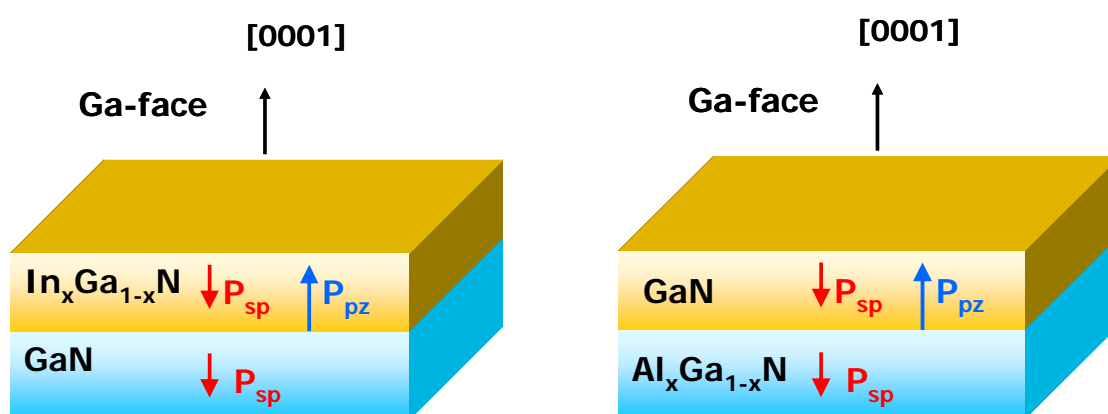


圖 5-10 具壓應變的結構示意圖

根據 vergard's law 晶格常數可以表示成組成份(alloy content, x)的函數，
 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 及 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的晶格常數表示為

$$a_{\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}(x) = 3.1986 - 0.0891x \quad (5-2)$$

$$a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}(x) = 3.1986 + 0.3862x \quad (5-3)$$

在假晶(pseudomorphic)成長的情況下，平行方向的應變(basal strain)可以直接由晶格常數計算得到：

■ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 系統

$$\varepsilon_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N on GaN}}(x) = \frac{-0.3862x}{3.1986 + 0.3862x} \quad (5-4)$$

■ $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 系統

$$\varepsilon_{\text{GaN on Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = \frac{-0.0891x}{3.1986} \quad (5-5)$$

並將(5-4)與(5-5)作圖，平行應變為合金成份的函數，如圖 5.10。圖中也明顯看見在相同合金成份下， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 在 GaN 上所造成的應變會比 GaN 在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 上的應變大。

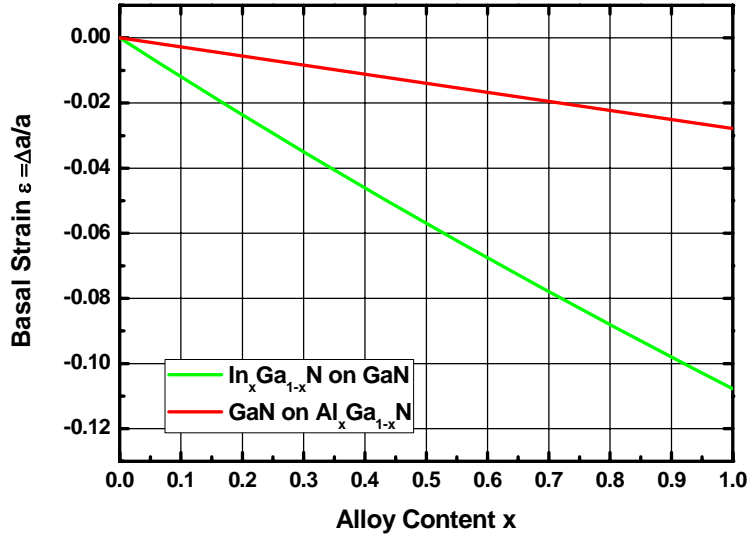


圖 5-11(Ga-faced)cap layer 假晶(pseudomorphic)成長於 buffer layer ，
在平行面的的彈性應變。負值指出為壓應變(compressive strain)。

壓電極化

氮化物半導體一般沿著 c 軸成長， $X_xY_{1-x}N$ 化合物的壓電極化(piezoelectric polarization)可以表示成平面應變(basal strain)的函數[29,30]

$$P_{X_xY_{1-x}N}^{pz}(x) = xP_{XN}^{pz}[\varepsilon(x)] + (1-x)P_{YN}^{pz}[\varepsilon(x)]$$

$$P_{GaN}^{pz} = [-0.918\varepsilon + 9.541\varepsilon^2] \text{ C m}^{-2}$$

$$P_{InN}^{pz} = [-1.373\varepsilon + 7.559\varepsilon^2] \text{ C m}^{-2} \quad (5-6)$$

自發極化

自發極化(spontaneous polarization)可以表示為[29]

$$P_{Al_xGa_{1-x}N}^{sp}(x) = [-0.09x - 0.034(1-x) + 0.019x(1-x)] \text{ C m}^{-2}$$

$$P_{In_xGa_{1-x}N}^{sp}(x) = [-0.042x - 0.034(1-x) + 0.038x(1-x)] \text{ C m}^{-2} \quad (5-7)$$

由 cap 層和 buff 層是自發極化和及 cap 層的壓電極化在 cap 層所造成的電場可以表示為[31]

$$E^{cap} \approx \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_{cap}} (-P_{cap}^{pz} - P_{cap}^{sp} + P_{buff}^{sp}) \quad (5-8)$$

對於壓應變($\epsilon < 0$)，電場指向 Ga-faced 烏采結構的負 c 軸方向，亦即朝基板的方向。在不考慮臨界厚度(critical thickness)所造成的應力釋放問題，可以將 cap 層由極化引起的電場表示為合金成份(alloy content, x)的函數，如圖 5.12。

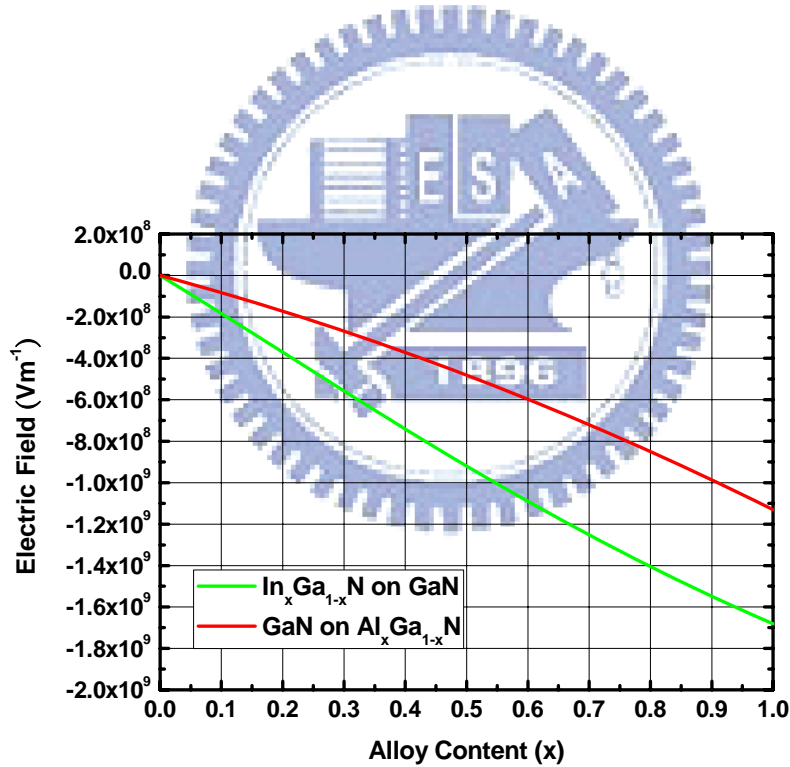


圖 5-12 cap 層中由極化引起的電場表示成合金成份的函數。

然而在從圖 5.12 找出在 In_{0.14}Ga_{0.86}/GaN，其 In_{0.14}Ga_{0.86}N 中的電場為 -0.26x10⁹ Vm⁻¹，In_{0.19}Ga_{0.81}N/GaN 其 In_{0.19}Ga_{0.81}N 層的電場為 -0.35x10⁹ Vm⁻¹，而本次實驗中所使用的 GaN/Al_{0.12}Ga_{0.88}N 在 GaN 層因極化引起的電場為

$-0.1 \times 10^9 \text{Vm}^{-1}$ 。

2002 年，T.Gessman 等人利用模擬與實驗分析去探討利用應變層來改善歐姆接觸行為。由應變引起的壓電極化和材料本身的自發極化在 cap 層中所造成的電場會使能帶彎曲導致二維電洞氣(two-dimensional hole gas: 2DHG)的形成。2DHG 的形成造成表面自由電洞大量增加，金屬-半導體間的穿隧寬度被縮減，允許電洞穿隧的機率提高，如圖 5.13。理論分析跟實驗結果發現當 cap 層的厚度達到一最小厚度 $d_{\min}(\sim -\Phi_B/E_{\text{cap}})$ 時，在界面處會形成 2DHG。ITO 功函數為 4.4eV 時， $\Phi_B=3.12\text{eV}$ ， d_{\min} 算出來約 312Å。然而，在這次實驗中，最厚的厚度為 80Å。所以特性電阻不能被有效降低的原因很有可能的原因是因為還沒有達到可以形成 2DHG 時的厚度。

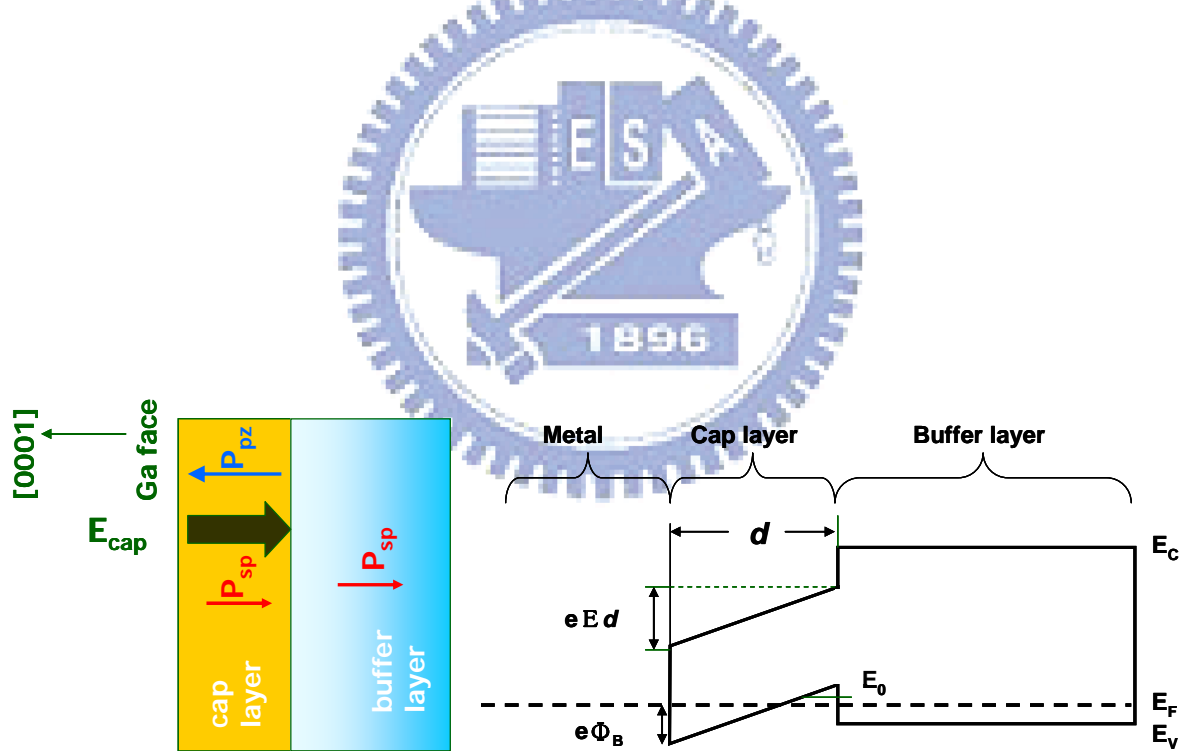


圖 5-13 應用應變層當接觸層的能帶圖

第六章 總結

近幾年來，利用應變引起的極化場，例如 p-AlGa_N/Ga_N 超晶格，和 p-InGa_N/p-Ga_N 已成功地被研究。由應變引起的極化效應(PE)和材料本身的自發極化所形成一 2DHG(two-dimensional hole gas) 在樣品表面附近引起一高密度的電洞。在有 PE 和 SP 的系統中，高濃度增加了電洞在金屬跟應變層(strain-layer)間的穿遂機率。因此可以有效降低特性電阻(specific contact resistivity)。

下一代，發光二極體和高功率雷射二極體光電元件在紫外波段(350nm 以下)引起大家的興趣，所以改善 p-AlGa_N 的歐姆接觸特性也是一個重要的議題。在本次實驗中，我們應用具有應變的應變層(strain-layer)成長在 p 型氮化鋁鎵上，試著利用極化效應來改善特性電阻。

然而，在本次實驗中，所量到的特性電阻一開始先隨著應變層的厚度增加而降低，到 p-Ga_N 為 40Å 時可以得到 $5.1 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}^2$ ，而後隨著特性電阻隨厚度增加而增加，這可以被歸因於晶格釋放(relaxation)。而當使用 p-InGa_N 作為應變層時，因為其應變較 p-Ga_N 大的關係，其效果確實是比同為 20Å 應變層為 p-Ga_N 還要低。

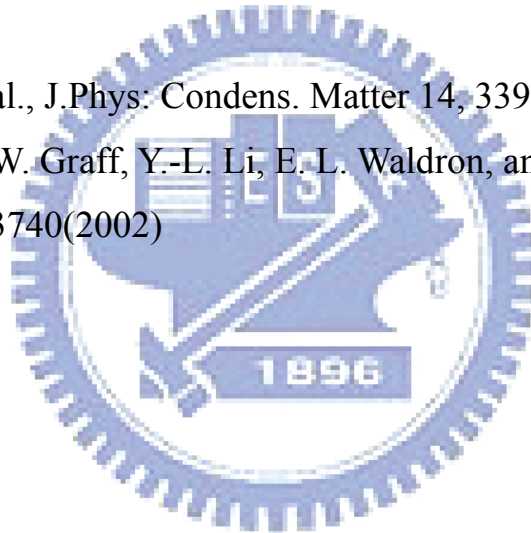
而這些改善的程度並不如當初想像的那麼好，所以去對應變層中因極化引起的電場大小去作一探討，發現 p-Ga_N 中的電場大小為 $-0.1 \times 10^{-9} \text{Vm}^{-1}$ ，跟 K. Kumakura 在 Ga_N 上成長 In_xGa_{1-x}N 作為應變層比較，在 In_{0.14}Ga_{0.86}/Ga_N，其 In_{0.14}Ga_{0.86}N 中的電場為 $-0.26 \times 10^9 \text{Vm}^{-1}$ ，In_{0.19}Ga_{0.81}N/Ga_N 其 In_{0.19}Ga_{0.81}N 層的電場為 $-0.35 \times 10^9 \text{Vm}^{-1}$ 。

若選擇適當的接觸層(合金組成成份級接觸層的厚度)，在接觸層中的電場可以降低位能障的寬度，使電洞穿遂機率增加，達到降低金屬-半導體間的接觸電阻，然而在本實驗中未能有效降低接觸電阻的可能原因是因為接觸層的厚度還未達到形成 2DHG 的最小厚度所導致。

參考文獻

- [1] M. Suzuki, T. Kawakami, T. Arai, S. Kobayashi, Y. Koide, T. Uemura, and N. Shibata, *Appl. Phys. Lett.* 74, 275 (1999).
- [2] J. K. Ho et al. *J. Appl. Phys.* 86, 4491(1999).
- [3] Ja-Soon Jang et al. *Phys. Stat. Sol. (a)* 180, 103 (2000).
- [4] V. Adivarahan et al. *Appl. Phys. Lett.* 78, 2781 (2001).
- [5] Q. Z. Liu and S. S. Lau, *Solid-State Electronics*, 42 (5), 677-691 (1998).
- [6] K. Hattori and Y. Izumi, *Journal of Applied Physics*, 53 (10), 6906 (1982).
- [7] J. S. Jang, and T. Y. Seong, *Journal of Applied Physics* 88 (5) 3064-3066 (2000).
- [8] J. L. Lee, J. K. Kim, J. W. Lee, Y. J. Park, and T. Kim, *Physica Status Solidi (a) Applied Research* 176 (1) 763-766 (1999).
- [9] J. K. Kim, J-L Lee, L. W. Lee, Y. J. Park and T. Kim, *Electronics Letters*, 35 (19)1676-1678 (1999).
- [10] J-L Lee, J. K. Kim, J. W. Lee, Y. J. Park and T. Kim, *Solid-State Electronics* 43,435-438 (1999).
- [11] J. K. Kim, J-L Lee, J. W. Lee, H. E. Shin, Y. J. Park and T. Kim, *Applied Physics Letters*, 73, 2953-2955 (1998).
- [12] J. K. Kim, J-L Lee, J. W. Lee, Y. J. Park and T. Kim, *J. Vac. Sci. Technol. B* 17(2) (1999)
- [13] J. S. Jang, S. J. Park and T. Y Seong, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 17(6), 2667-2670 (1999).
- [14] K. Kumakura, T. Makimoto, and N. Kobayashi , *Appl. Phys. Lett.*79,2588,(2001)
- [15] A. P. Zhang, B. Luo, J. W. Johnson, and F. Ren, *Appl. Phys. Lett.*79,3636(2001)
- [16] T.V.Blank et.al. *Semiconductor*,vol.35,No.5,529-532(2001)
- [17] Han-Ki Kim *Appl. Phys. Lett.*84,1710(2004)
- [18] B.A.Hull et.al. , *J.Appl.Phys.* 96,7325(2004)
- [19] D. K. Schroder , *Semiconductor Material and Device Characterization* , 2nd (1998) .
- [20] Donald A. Neaman, *Semiconductor Physics and Devices*, 3nd, McGraw Hill, 2003.
- [21] 李嗣涇, 管傑雄, 孫台平, 三民出版, 1995.

- [22] E. H. Rhoderick , R. H. Williams , Metal-Semiconductor Contacts , 2nd , New York , Oxford University Press , 1988.
- [24] M. V. Sullivan and J. H. Eigler , J. Electrochem. Soc. vol. 103 , pp. 218 , 1956.
- [25] D. K. Schroder , Semiconductor Material & Device characterization , 2nd ed: John Wiley & Son's Inc. , 1998.
- [26] H. Murrmann and D. Widmann , IEEE Trans. Electron Devices , vol. ED-16 , pp. 1022 , 1969.
- [27] H. H. Berger , Solid-State Electron , vol. 15 , pp. 145 , 1972.
- [28] W. Shockley , Rep. No. AFAL-TDR-64-207 , Sept. 1963.
- [29] V. Fiorentini, F. Bernardini, and O. Ambaccher, Appl. Phys. Lett. 80,1204(2002)
- [30] O. Ambacher et al., J.Phys: Condens. Matter 14, 3399(2002)
- [31] T. Gessmann, J. W. Graff, Y.-L. Li, E. L. Waldron, and E. F. Schubert, J. Appl. Phys. 92, 3740(2002)



<i>Room temperature properties of semiconductors</i>					
<i>Quantity</i>	<i>Symbol</i>	<i>AlN</i>	<i>GaN</i>	<i>InN</i>	<i>(Unit)</i>
Crystal structure		Wurtzite	Wurtzite	Wurtzite	–
Gap: Direct (<i>D</i>) / Indirect (<i>I</i>)		D	D	D	–
Lattice constant	a_0	3.112	3.191	3.545	Å
	c_0	4.982	5.185	5.703	Å
Bandgap energy	E_g	6.28	3.425	0.77	eV
Intrinsic carrier concentration	n_i	9.4×10^{-34}	1.9×10^{-10}	920	cm^{-3}
Effective DOS at CB edge	N_c	6.2×10^{18}	2.3×10^{18}	9.0×10^{17}	cm^{-3}
Effective DOS at VB edge	N_v	4.9×10^{20}	1.8×10^{19}	5.3×10^{19}	cm^{-3}
Electron mobility	μ_n	300	1500	3200	cm^2/Vs
Hole mobility	μ_p	14	30	-	cm^2/Vs
Electron diffusion constant	D_n	7	39	80	cm^2/s
Hole diffusion constant	D_p	0.3	0.75	-	cm^2/s
Electron affinity	χ	1.9	4.1	-	V
Minority carrier lifetime	τ	-	10^{-8}	-	s
Electron effective mass	m_e^*	$0.40 m_e$	$0.20 m_e$	$0.11 m_e$	–
Heavy hole effective mass	m_{hh}^*	$3.53 m_e$	$0.80 m_e$	$1.63 m_e$	–
Relative dielectric constant	ϵ_r	8.5	8.9	15.3	–
Refractive index near E_g	n	2.15	2.5	2.9	–
Absorption coefficient near E_g	α	3×10^5	10^5	6×10^4	cm^{-1}

