

國立交通大學

電子工程學系

電子研究所碩士班

碩士論文

以掃描探針測量矽半導體載子濃度



Scanning Probe Microscopy Technique for Carrier
Concentration Measurement in Silicon

研究生：蘇柏智

指導教授：崔秉鉞 教授

中華民國九十三年六月

以掃描探針測量矽半導體載子濃度
Scanning Probe Microscopy Technique for Carrier Concentration
Measurement in Silicon

研究生：蘇柏智

Student : Po-Chih Su

指導教授：崔秉鉞

Advisor : Bing-Yue Tsui

國立交通大學

電子工程學系 電子研究所



Submitted to Institute of Electronics
College of Electrical Engineering and Computer Science
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Electronic Engineering
June 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

以掃描探針測量矽半導體載子濃度

研究生：蘇柏智

指導教授：崔秉鉞

國立交通大學電子工程學系 電子研究所碩士班

摘 要

掃描探針顯微術是近年來發展迅速的一種表面分析技術，具有非破壞性、二維量測、高空間解析度等諸多優點。KFM (Kelvin Probe Force Microscopy)是其中一種，能夠量測試片表面電位。藉由量測矽半導體的表面電位，KFM 可望應用於載子濃度的二維量測。

本論文首先改良既有的 KFM 系統的回饋控制電路，以得到較佳的掃描結果。接著探討試片的表面處理，發現經過氧化處理與氫氟酸浸泡會使試片表面產生 Si-F 及 Si-O 鍵結而導致表面電位影像對比劣化，而使用丙酮超音波震盪、氫氟酸浸泡、去離子水沖洗，可有效消除上述鍵結，提升影像對比。此外，以 KFM 量測試片的表面電位差，以展阻、電容-電壓法、二次離子質譜儀分別量測試片的表面濃度，建立兩者之間的校正關係，並與理論值相比較，探討彼此產生差異的原因。本論文亦針對剖面量測作了先期研究，以對貼研磨的方式嘗試剖面試片的製作，並根據 KFM 量測的要求逐步加以改進，以期將來能夠利用 KFM 量測元件剖面的二維載子分佈。

Scanning Probe Microscopy Technique for Carrier Concentration Measurement in Silicon

Student : Po-Chih Su

Advisor : Bing-Yue Tsui

Department of Electronics Engineering

Institute of Electronics

National Chiao Tung University

ABSTRACT

Scanning probe microscopy (SPM) is one of the surface analysis techniques which are developed rapidly in recent years. It has advantages of non-destructive, 2-D measurement, and high spatial resolution. Kelvin probe force microscopy (KFM) is one application of the SPM technique. The KFM measures surface potential of sample. By means of measuring the surface potential of silicon semiconductor, KFM is capable of 2-D measurement of carrier distribution.

Before the measurement of surface potential, the feedback control circuit was modified to improve the signal response. Then, this thesis studied sample preparation method. It was observed that the oxidized or HF-dipped sample surface was covered by Si-O or Si-F, respectively, and resulted in degraded contrast of surface potential image. These bonds were removed effectively and image contrasts were promoted after the samples were ultrasonic oscillated in acetone, dipped in HF, and rinsed by D.I. water. After the surface potential differences were measured by KFM, several methods including spreading resistance profiling (SRP) method, capacitance-voltage (C-V) method, and secondary ion mass spectroscopy (SIMS) were employed to determine the surface carrier/dopant concentration in order to setup the correlation between surface potential difference and surface carrier/dopant concentration. This thesis

also beforehand studied on the preparation of cross-sectional sample. Although the results are not perfect, it is looked forward that KFM can be applied on 2-D carrier profiling of nano-devices.



誌 謝

隨著本論文的完稿付梓，兩年的碩士班研究生涯即將劃上句點。於此之間，首要感謝的是指導教授 崔秉鉞老師的提攜與鞭策，於學生進行實驗與撰寫論文之時費心指導。並以其豐富的學識、嚴謹的態度、敏銳的思路，樹立了優秀的典範，令學生受益良多。

同時，要特別感謝清華大學物理系果尚志教授，在學生從事研究期間，提供良好的掃描探針系統，使實驗得以順利進行。還要感謝曾賢德學長以及果教授研究群的其他成員，針對研究過程中所遭遇的疑難，給予寶貴的建議與必要的協助。

感謝國家奈米元件實驗室以及交通大學奈米中心，提供優良的機台設備以及管理完善的實驗環境。尤其感謝諸位操作員的辛勤努力，以及郭美玲小姐、楊君惠小姐在分析方面所提供的實用建議。此外，漢磊科技公司吳志良先生、閱康科技公司陳榮欽博士不吝提供適時的協助，在此一併感謝。對於諸位口試委員提出的斧正與指教，更要在此表示最誠摯的感謝之意。

在從事研究的期間，方國龍、林家彬、黃誌鋒、謝志民、張修維等學長，蕭逸璿、呂智勛、張志廉等同學，盧季霈、金立峰、李宜澤、薛聖銘等學弟，以及交大電子所的其他學長與同學，無時無刻給予支援與鼓勵，相伴前行，使本論文得以完成，在此致以最真切的謝意。

更要感謝父母親的辛苦栽培與堅定支持，使我得以專心向學，順利完成學業。

僅以此論文獻給所有對我付出關心的親朋好友。

目 錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	ii
誌謝	.....	iv
目錄	.....	v
表目錄	.....	vii
圖目錄	.....	viii
第一章	緒論	1
1.1	研究動機.....	1
1.2	掃描探針顯微術的發展.....	2
1.3	掃描探針顯微術在半導體載子濃度測量上的應用.....	3
1.4	文獻回顧.....	4
1.5	論文架構.....	5
第二章	KFM 系統	14
2.1	測量原理.....	14
2.2	儀器系統.....	15
2.3	回饋控制電路.....	16
第三章	實驗方法	27
3.1	平面試片製作.....	27
3.2	表面處理.....	28
3.3	濃度量測法.....	30
3.3.1	SRP 量測.....	31
3.3.2	C-V 法.....	32
3.3.3	SIMS 分析.....	33
第四章	表面電位與表面濃度	44
4.1	表面電位量測.....	44
4.2	表面濃度量測.....	44
4.3	表面電位與表面濃度關係.....	49
第五章	剖面量測的先期研究	74

5.1	試片製作法.....	74
5.2	剖面量測結果.....	77
5.3	小結.....	78
第六章	結論與展望	88
6.1	結論.....	88
6.2	未來工作建議.....	89
參考文獻	.....	91
簡歷	.....	95



表目錄

第三章

- 表 3-1 平面試片的種類與離子植入條件。
表 3-2 量測前試片表面處理條件。

第四章

- 表 4-1 As^+ 植入的片電阻值、表面濃度、濃度對深度的積分值以及 L_D 或 L_{TF} 值。
表 4-2 BF_2^+ 植入的片電阻值、表面濃度、濃度對深度的積分值以及 L_D 或 L_{TF} 值。
表 4-3 基板濃度。
表 4-4 (a) n^+p 試片的線性關係係數。(b) p^+n 試片的線性關係係數。



圖目錄

第一章

- 圖 1-1 掃描穿隧顯微鏡探針在試片表面進行掃描。以 P_x 、 P_y 控制探針的水平位置。控制單元 CU 在探針上加適當偏壓 V_p 以維持固定的穿隧電流 J_T ，並經由回饋控制探針的高度，藉此探測試片的表面形貌。
- 圖 1-2 原子力顯微鏡的探針結構。
- 圖 1-3 掃描探針顯微術及其分支。
- 圖 1-4 掃描電容顯微鏡示意圖。探針在覆有二氧化矽層的試片表面掃描，測量 MOS 結構的 C-V 特性，並由 dC/dV 訊號區分 p 型 n 型區域。
- 圖 1-5 全空乏型三閘極鰭狀電晶體的剖面穿透式電子顯微鏡照片。
- 圖 1-6 (a)熱擴散摻雜的試片所得的表面電位影像，電位差約 130 mV。(b)離子植入摻雜的試片所得的表面電位影像，電位差約 260 mV。
- 圖 1-7 對 pn 接面加以不同的逆向偏壓所得的表面電位差值變化。
- 圖 1-8 平面 pn 區域的掃描影像。(a)表面形貌。(b)當表面狀態為親水性且水接觸角幾乎為 0° 時的 KFM 掃描電位影像。(c)經過 100°C ，3 hr 的高溫處理後所得的電位影像。(d)在相對濕度 0.6 % 的氮氣環境下所得到的電位影像。

第二章

- 圖 2-1 KFM 系統示意圖。
- 圖 2-2 利用 KFM 測量 pn 區域的表面電位差。 E_F 為費米能階， E_v 為真空能階， eV_p 為 p 型區域的功函數， eV_n 為 n 型區域的功函數。(a)連接示意圖。(b)不加偏壓時的能帶結構圖。(c)測量 n 型區域，在試片上加偏壓 $-(V_m-V_n)$ 使 E_v 相等，得表面電位 $-(V_m-V_n)$ 。(d)測量 p 型區域，得 $-(V_m-V_p)$ 。由此量得 pn 區域表面電位差 V_p-V_n 。
- 圖 2-3 探針。
- 圖 2-4 SPA300HV 掃描探針系統。
- 圖 2-5 (a)掃描器。(b)掃描器安裝於主腔體內。
- 圖 2-6 KFM 回饋控制電路。
- 圖 2-7 使用內建回饋控制電路所得的表面電位掃描結果。(a)探針由左而右掃描所得。(b)探針由右而左掃描所得。(c)兩者的切面

輪廓與相對位移。

- 圖 2-8 使用自製回饋控制電路所得的表面電位掃描結果。(a)探針由左而右掃描所得。(b)探針由右而左掃描所得。(c)兩者的切面輪廓與相對位移。

第三章

- 圖 3-1 第一類試片 (n^+p 及 p^+n) 的製作步驟。
圖 3-2 第二類試片 (n^+n 及 p^+p) 的製作步驟。
圖 3-3 (a)試片經丙酮震盪、浸泡 DHF、去離子水沖淨之後所得的表面電位影像。(b)試片於浸泡 DHF 後，省略去離子水沖洗步驟所得的影像。(c)試片經 RTO 步驟所得的表面電位影像。(d)經硫酸與過氧化氫 3:1 溶液浸泡 10 分鐘之後所得的影像。
圖 3-4 僅經氫氟酸浸泡與經氫氟酸浸泡後以水沖洗，所得 F 1s 的 XPS 能譜。
圖 3-5 僅經氫氟酸浸泡與浸泡後以水沖洗，所得 O 1s 的 XPS 能譜。
圖 3-6 經 RTO、硫酸加過氧化氫溶液浸泡，與未經氧化處理的矽表面所得 Si 2p 的 XPS 能譜。
圖 3-7 展阻量測及其試片準備。
圖 3-8 以圓柱形金屬探針量測展阻。

第四章

- 圖 4-1 n^+p 試片的表面電位。(a)植入劑量為 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的掃描影像，(b)得到表面電位差 76 mV。(c)植入劑量為 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的掃描影像，(d)得到表面電位差 30 mV。
圖 4-2 p^+n 試片的表面電位。(a)植入劑量為 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的掃描影像，(b)表面電位差 103 mV。(c)植入劑量為 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的掃描影像，(d)表面電位差 36 mV。
圖 4-3 試片植入劑量與所得表面電位的關係。
圖 4-4 SRP 量測結果(交通大學)。(a) n^+n ，(b) p^+p 。
圖 4-5 SRP 量測結果(漢磊科技)。(a) n^+n ，(b) p^+p 。
圖 4-6 利用 C-V 法得出的載子濃度。(a) As^+ 植入，(b) BF_2^+ 植入。
圖 4-7 SIMS 分析結果(NDL)。(a) n^+n ，(b) p^+p 。
圖 4-8 SIMS 分析結果(清華大學貴重儀器中心)。(a) n^+n ，(b) p^+p 。
圖 4-9 SIMS 分析結果(閱康科技)。(a) n^+n ，(b) p^+p 。
圖 4-10 (a) n^+p 及 p^+n 試片的片電阻值。(b) n^+n 及 p^+p 試片的片電阻值。
圖 4-11 表面電位差與各組植入區域表面濃度的關係。(a) n^+p ，(b) p^+n 。
圖 4-12 表面電位差與所有植入區域表面濃度的關係。(a) n^+p ，(b) p^+n 。
圖 4-13 表面電位差與選取的植入區域表面濃度的關係。(a) n^+p ，(b) p^+n 。

圖 4-14 由於表面能態的影響，使得載子空乏，表面能帶結構彎曲。(a)n 型半導體的表面淨電荷為負，能帶向上彎曲。(b)p 型半導體表面淨電荷為正，能帶向下彎曲。

圖 4-15 以表面電位差換算載子濃度。(a)As⁺植入，雜質向 p 型區域擴散。(b)BF₂⁺植入，雜質向 n 型區域擴散。

第五章

圖 5-1 斜角試片經鑽石膏研磨後，試片表面的光學顯微鏡影像。左側為為研磨區域，右側為斜角研磨區域，其中亮點為入射在探針懸臂背面的雷射光。

圖 5-2 斜角試片經鑽石膏研磨後，利用掃描探針技術量得的(a)表面形貌影像，(b)表面形貌切面輪廓，斜角為 37'。

圖 5-3 以 AFM 觀察經鑽石膏研磨後的試片表面形貌。(a)表面形貌影像。(b)表面形貌切面輪廓。

圖 5-4 斜角研磨試片經 CMP 拋光後，試片表面的光學顯微鏡影像。

圖 5-5 斜角研磨試片經 CMP 拋光後，利用 alpha-stepper 所得的試片表面輪廓。

圖 5-6 對貼研磨試片經鑽石砂紙拋光後，試片表面的光學顯微鏡影像。

圖 5-7 對貼研磨試片經 CMP 拋光後，試片表面的光學顯微鏡影像。(a)可見表面平坦，少有刮痕。(b)拋光後形成的皺摺狀表面。

圖 5-8 以 AFM 觀察經鑽石砂紙研磨後的試片表面形貌。(a)表面形貌影像。(b)表面形貌切面輪廓。

圖 5-9 以 AFM 觀察經 CMP 過後的試片表面形貌。(a)表面形貌影像。(b)表面形貌切面輪廓。

圖 5-10 npn 結構的剖面量測結果。(a)表面電位影像。(b)表面電位切面輪廓。(c)根據表面電位差計算濃度分佈與 SIMS 縱深分析結果。

第一章 緒論

1.1 研究動機

自從 1960 年代，金氧半場效電晶體(MOSFET)問世之後，微電子工業及積體電路技術的發展日新月異。數十年來，元件尺度的微縮已成為積體電路製程技術發展的指標，在此趨勢之下，金氧半場效電晶體已經成功地微縮了 100 倍，但是再微縮至奈米尺度時，傳統的源、汲極接面結構將面臨許多新的問題。

在金氧半場效電晶體製程中，一般使用離子植入(ion implantation)進行源、汲極區域的雜質摻雜(dopant)，並以高溫退火(annealing)使摻雜的雜質活化(activation)。而當元件微縮到至 $1\ \mu\text{m}$ 以下時，高溫製程所造成的雜質側向擴散，將會影響等效通道長度(effective channel length)，進而造成臨界電壓(threshold voltage)的改變，以及其他更嚴重的短通道現象(short channel effect)。奈米尺度元件的特性對雜質濃度分佈非常敏感，要設計正確的奈米尺度元件，不僅是雜質縱深分佈，還必須能夠精確掌握側向分佈。但現有的展阻測量(Spreading Resistance Profiling, SRP)及二次離子質譜儀(Secondary Ion Mass Spectrometer, SIMS)等技術均難以對此區域直接進行側向擴散的測量。

為了得到源、汲區域雜質濃度的二維分佈，傳統上以 TCAD 適配(Technology Computer Aided Design fitting)方式進行。首先以 SIMS 分析得知縱深方向分佈，再推算側向接面，並利用元件實際特性與模擬結果進行比對與修正，進而得到符合實際結果的模型參數。然而，此一方式具有相當程度的誤差，尤其當元件微縮至 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下時，雜質側向擴散對元件特性的影響愈見顯著，TCAD 適配方式已無法滿足需求。

近年來，掃描探針顯微術(Scanning Probe Microscopy, SPM)發展迅速，

其功能已由早期的表面形貌測量，發展至能夠進行各種表面資訊的二維掃描。因此有機會藉由掃描探針顯微術進行源、汲界面雜質二維分佈的直接測量，取代傳統的 TCAD 適配方式。

1.2 掃描探針顯微術的發展

掃描探針顯微術是近年來發展極為快速的一項表面分析技術。此一技術是利用具有奈米級針尖的探針在待測試片表面上進行掃描，具有非破壞性及奈米級空間解析度等特點，能夠直接而快速地提供材料表面特性的資訊。

1982 年，G. Binnig 與 H. Rohrer 發明了掃描穿隧顯微鏡(Scanning Tunneling Microscopy, STM)，使得人類首次得以直接觀測表面原子影像 [1]。STM 是利用探針尖端與試片表面之間的穿隧電流作為測量訊號，並控制試片位置，使穿隧電流大小保持固定，藉此得到具有原子解析度的表面形貌影像(圖 1-1)。但由於 STM 測量的是穿隧電流，因此待測試片必須能夠導電，大大地限制了 STM 的應用範圍。為了克服此一限制，1985 年，G. Binnig、C. F. Quate 及 Ch. Gerber 在 STM 的基礎之上發展出一套能夠探測探針尖端與試片表面之間凡得瓦爾力(van der Waals force)的原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy, AFM) [2]。在 AFM 系統中，微小的探針通常附在一懸臂(cantilever)之上，當探針尖端接近試片表面進行掃描時，兩者之間的凡得瓦爾力會造成懸臂的偏移與振動，再經由穿隧電流、電容感應或光學等方式感測懸臂的位置變化，可藉此方式探測物體表面(圖 1-2)。

經過二十年左右的發展，以 STM 及 AFM 為基礎所發展出的表面分析技術已形成一龐大系統，統稱為掃描探針顯微術(圖 1-3)。其中以掃描力顯微術(Scanning Force Microscopy, SFM)應用最廣 [3]。有別於 STM 測量穿隧電流，SFM 主要利用探針與試片表面之間的作用力進行測量，包含原子力、

電力、磁力、摩擦力等等，如 AFM 測量凡得瓦爾力，靜電力顯微鏡 (Electrostatic Force Microscopy, EFM) 和 KFM(or KPFM, Kelvin Probe Force Microscopy) 測量電作用力，側向力顯微鏡 (Lateral Force Microscopy, LFM) 測量摩擦力，均屬此類。此外，如近場光學顯微儀 (Scanning Near-field Optical Microscopy, SNOM)、掃描電容顯微鏡 (Scanning Capacitance Microscopy, SCM) 亦屬 SPM 的一部分。

1.3 掃描探針顯微術在半導體載子濃度測量上的應用

半導體係一種導電能力介於導體與絕緣體的材料，可藉由適當的雜質摻雜將使其內部的電子電洞濃度產生變化，以控制其導電性。以能帶 (energy band) 結構的觀點來看，半導體材料的費米能階 (Fermi level) 介於傳導帶 (conduction band) 與價電帶 (valence band) 之間，不同的雜質種類與濃度將造成不同的載子濃度，而使費米能階在能帶結構中的相對位置產生變化，進而造成電位能的改變。以 pn 接面而言，由於 p 型與 n 型半導體各具有相異的載子 (carrier) 濃度，因而兩者之間存有一表面電位的差異。半導體雜質濃度的測量，傳統上常以 SIMS 進行縱深方向分析，其特點在於可直接測量材料內部的雜質元素種類與濃度縱向分佈，但無法進行二維平面的測量。

1989 年，C. C. Williams 等人首度將掃描電容顯微鏡應用在半導體載子濃度的測量，是掃描探針技術在此方面的首次應用 [4]。其原理是利用金屬探針接觸覆有二氧化矽層的試片表面，形成微小的「金屬-氧化物-半導體」(MOS) 結構，並在探針上加以適當的偏壓訊號，測量其電容-電壓 (C-V) 特性，並由微分電容 (dC/dV) 資訊得知試片表面的載子濃度 (圖 1-4)。SCM 技術經過十餘年的發展，已經有成功應用於二維濃度分佈的實例 [5-8]，但因為需要測量電容，探針面積不能太小，所以造成了空間解析度的限制 [9,10]。圖 1-5 是最近發表的全空乏型三閘極鰭狀電晶體 (FinFET) 的剖面穿

透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)照片 [11]，閘極長度 25 nm，矽晶層厚度 40 nm。在如此微小的元件區域，雜質縱深分佈對元件的影響遠低於側向分佈，傳統的 SIMS 以及 SRP 均無法適用。側向分佈的空間解析度必須達到 1~3 nm 以下，SCM 的空間解析度亦無法滿足需求，因此必須尋找空間解析度更好的測量技術。

本論文擬探討的 KFM 測量技術亦為一種掃描探針顯微術。有別於掃描電容顯微鏡測量電容，KFM 能夠藉由探測電作用力測量表面電位 [12,13]。而對於半導體材料而言，表面電位受其載子種類與濃度所決定，因此 KFM 技術亦有機會應用在雜質濃度的測量。有關 KFM 在 pn 接面測量上的應用，已見於近年來發表的許多文獻之中 [14-17]。KFM 為掃描探針技術，可進行二維平面掃描，具有非破壞性及高解析度的優點，且其利用測量表面電位得知載子濃度的方式亦與 SIMS 測量雜質元素濃度的原理有所不同 [18]。因為是直接探測試片表面電位，沒有 SCM 針尖接觸面積的限制，只要探針尖端面積可以縮小，空間解析度即可改善，例如利用單層奈米碳管作為探針針尖(single wall carbon nano tube) [19,20]，即可望將解析度提高至 1 nm 左右。

1.4 文獻回顧

1995 年 A. Kikukawa 等人在 Appl. Phys. Lett. 發表利用 KFM 掃描探針技術測量矽 pn 接面中，p 型與 n 型區域的位能差異 [12]。除了利用能帶結構說明 KFM 測量半導體表面電位的原理之外，更在其實驗中，利用熱擴散(thermal diffusion)及離子植入方式分別在 p 型矽晶片上摻雜磷(phosphorus, P)元素與砷(arsenic, As)離子，在試片表面形成 pn 區域圖案。經由測量，可在 pn 區域之間得到分別為 130 mV 及 260 mV 的電位差異(圖 1-6)。

2001 年 G. H. Buh 等人在 J. Appl. Phys. 提出 KFM 掃描探針技術在 pn 接

面測量上的應用 [16]。在其論文中，除了說明 KFM 利用探針尖端與試片表面的電作用力測量表面電位的原理之外，更在 pn 接面兩端加以逆向偏壓 (reverse bias)，觀察偏壓大小對測量結果的影響(圖 1-7)。

而在 H. Sugimura 等人於 2002 年 Appl. Phys. Lett.發表的論文中，更進一步地探討了試片表面狀態對測量的影響 [17]。在實驗中利用高溫處理控制親水性(hydrophilicity)，發現較高溫的處理會使得試片較接近疏水性(hydrophobic)，可提高表面電位對比(圖 1-8)。

如前所述，KFM 為直接測量表面電位資訊，因此如欲利用此一技術進行載子濃度分佈的測量，必須首先建立量得的表面電位資訊與載子濃度的關係。目前已知的文獻之中仍未對此作深入探討，故此一關係的建立為本論文所欲研究的重要課題。

1.5 論文架構



本論文共分為六章。本章說明研究動機及其背景。第二章介紹 KFM 的原理以及本實驗所使用的掃描探針系統。第三章至第六章詳述實驗內容。首先於第三章介紹試片製作方式，並探討表面處理對測量結果的影響。第四章介紹平面 pn 區域表面電位的測量結果，並與表面濃度作對照，求得彼此的換算關係，以期能夠利用 KFM 測量試片表面濃度。第五章介紹剖面測量的試片製作與結果。第六章總結上述各章，並對未來工作提出建議。

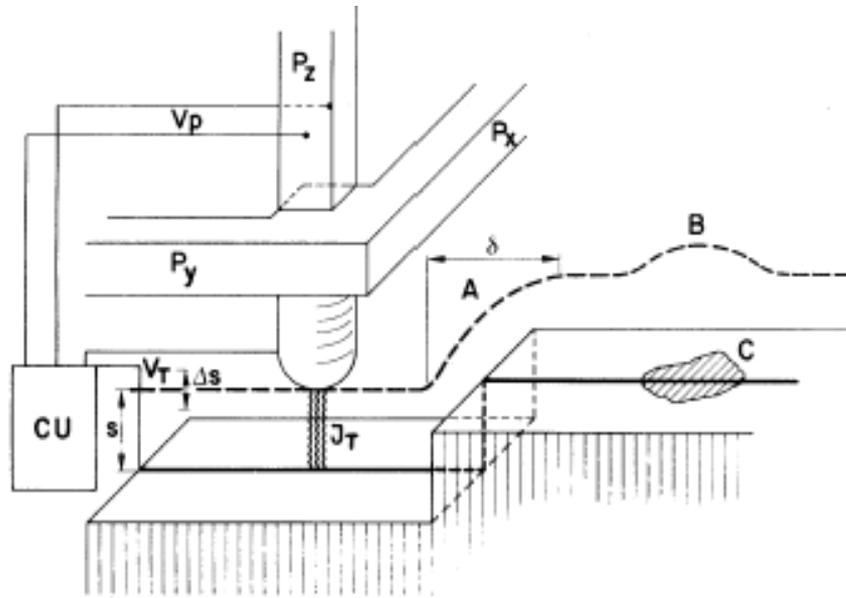


圖 1-1：掃描穿隧顯微鏡探針在試片表面進行掃描 [1]。以 P_x 、 P_y 控制探針的水平位置。控制單元 CU 在探針上加適當偏壓 V_p 以維持固定的穿隧電流 J_T ，並經由回饋控制探針的高度，藉此探測試片的表面形貌。

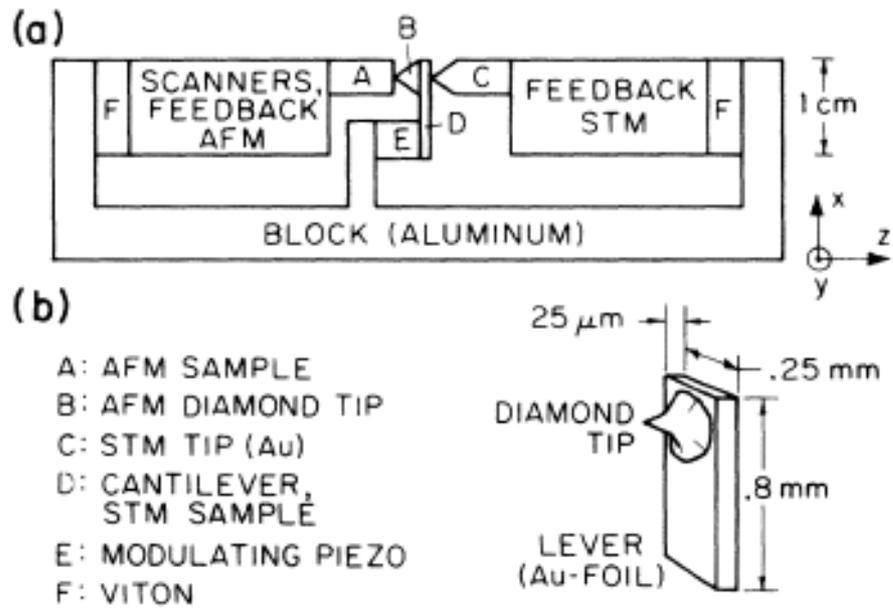


圖 1-2：原子力顯微鏡的探針結構 [2]。

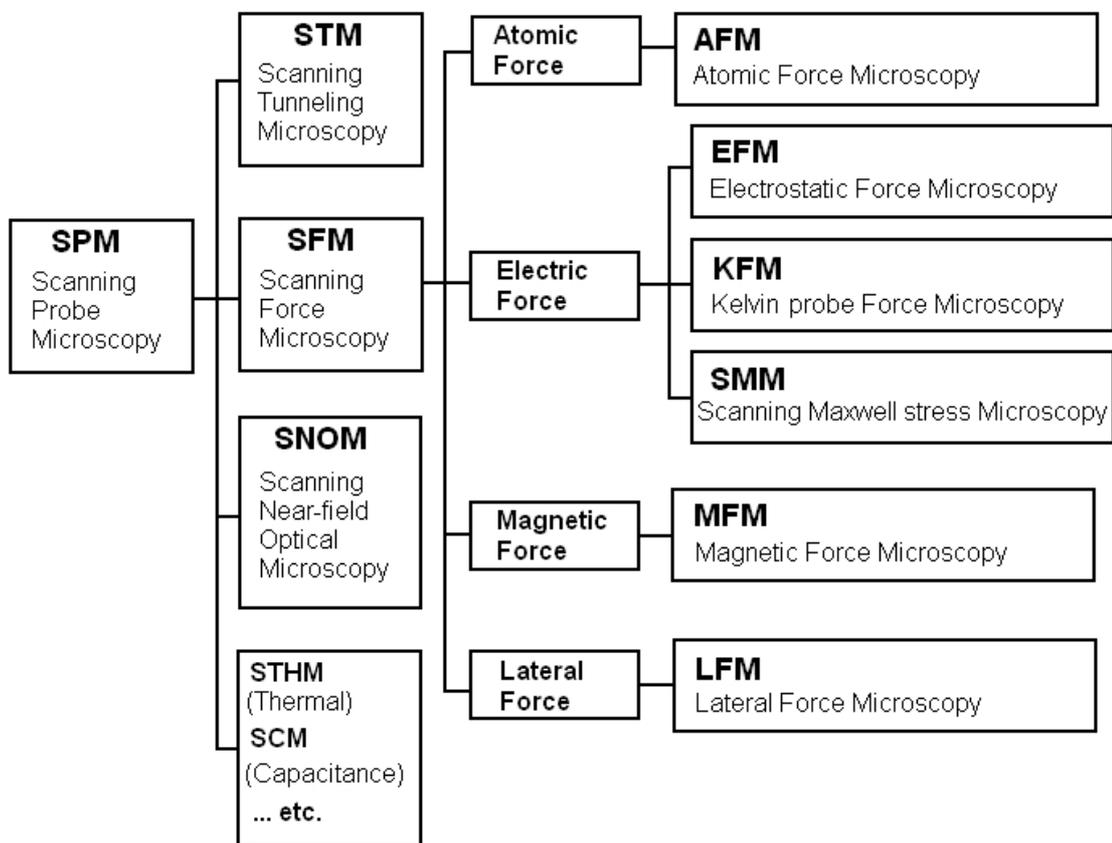


圖 1-3：掃描探針顯微術(SPM)及其分支 [3]。

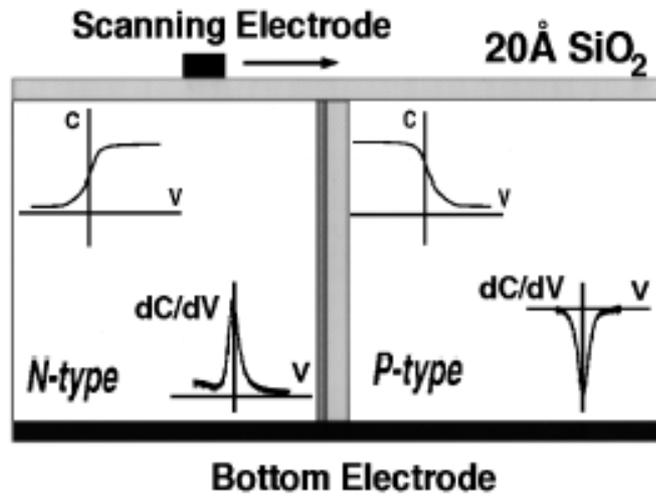


圖 1-4：掃描電容顯微鏡示意圖 [6]。探針在覆有二氧化矽層的試片表面掃描，測量 MOS 結構的 C-V 特性，並由 dC/dV 訊號區分 p 型與 n 型區域。



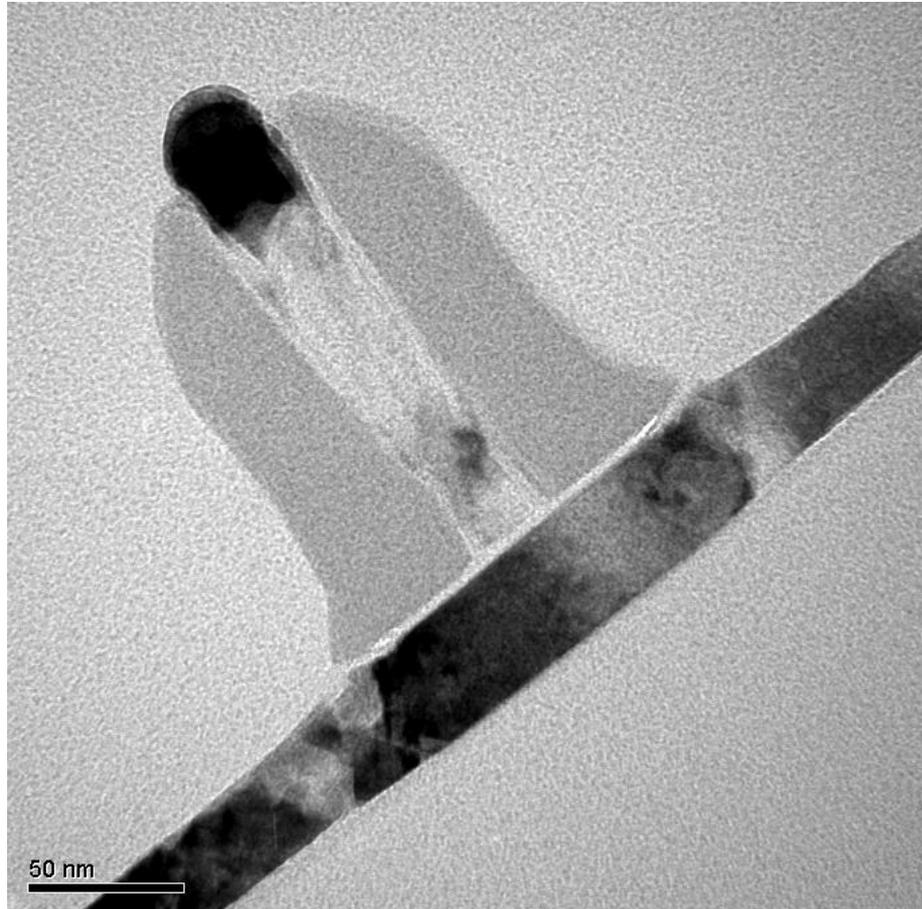


圖 1-5：全空乏型三閘極鰭狀電晶體的剖面穿透式電子顯微鏡照片 [11]。

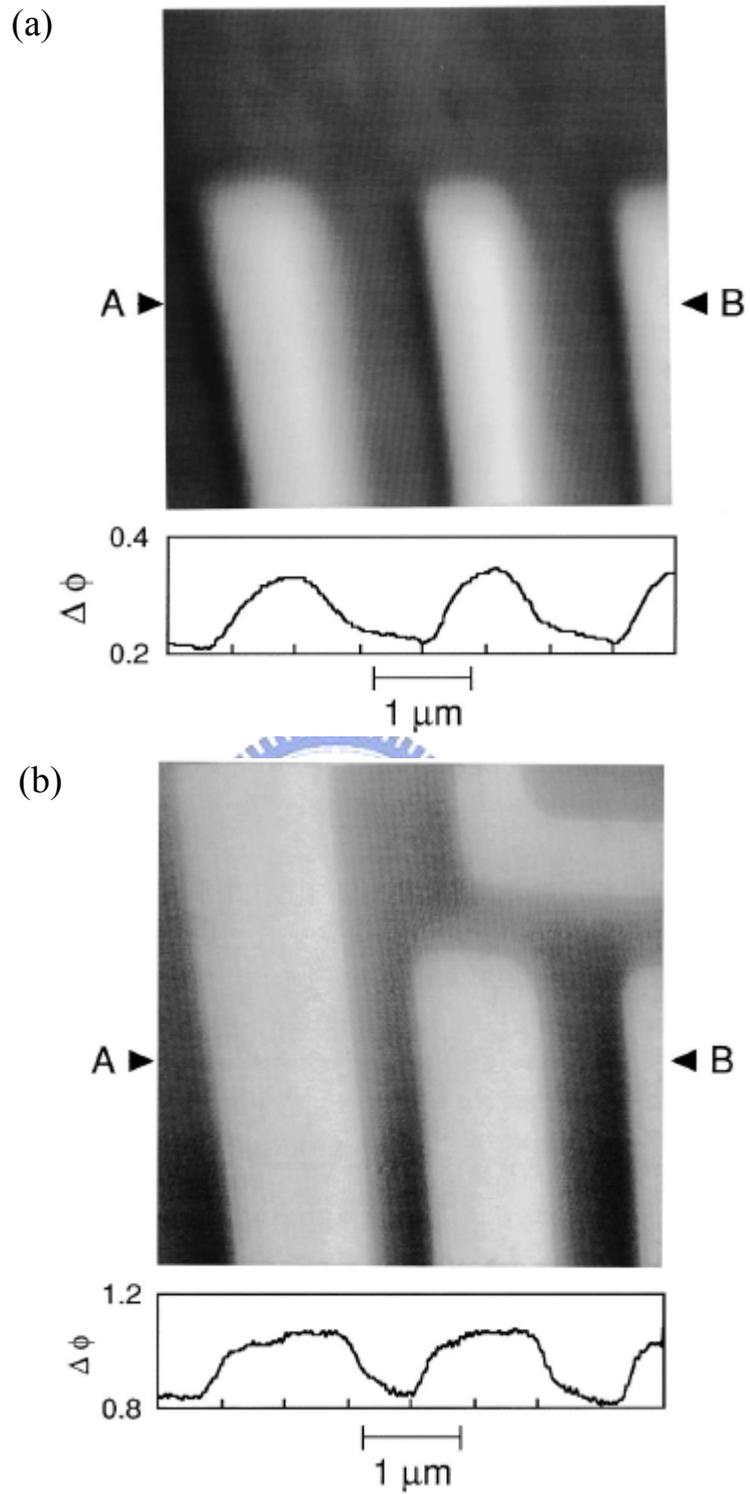


圖 1-6：(a)熱擴散摻雜的試片所得的表面電位影像，電位差約 130 mV。(b)離子植入摻雜的試片所得的表面電位影像，電位差約 260 mV [14]。

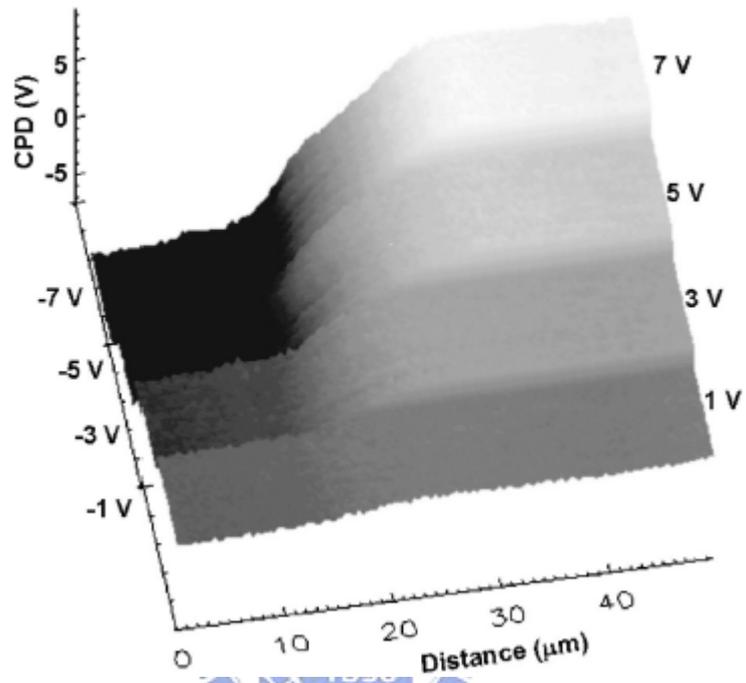


圖 1-7：對 pn 接面加以不同的逆向偏壓所得的表面電位差值變化 [16]。

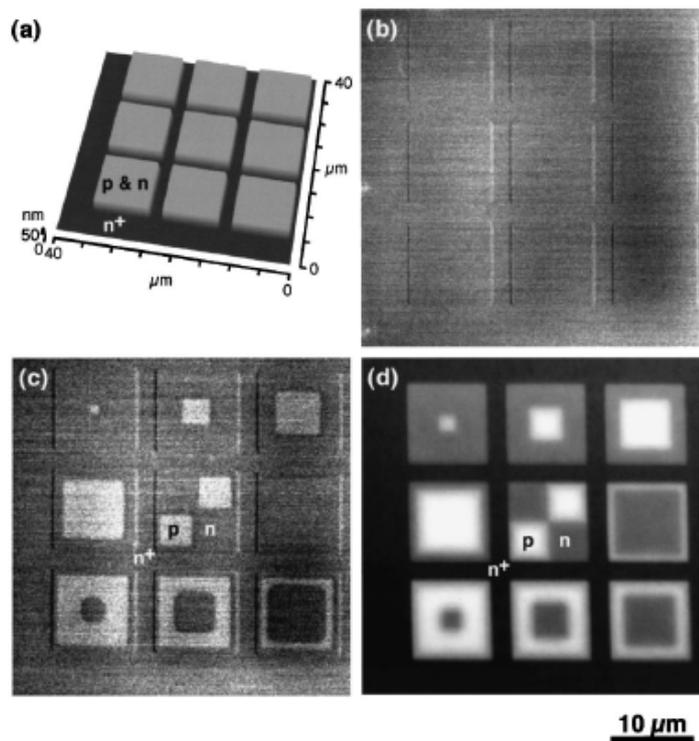


圖 1-8：平面 pn 區域的掃描影像 [17]。(a)表面形貌。(b)當表面狀態為親水性且水接觸角(water contact angle)幾乎為 0° 時的 KFM 掃描電位影像。(c)經過 100°C ，3 hr 的高溫處理後所得的電位影像。(d)在相對濕度 0.6 % 的氮氣(nitrogen)環境下所得到的電位影像。

第二章 KFM 系統

KFM 是本實驗用以測量表面電位的掃描探針技術。在本章中，將介紹 KFM 測量表面電位的原理，所用的儀器系統，以及為了完善掃描效能所製作的硬體單元。

2.1 測量原理

KFM 的原理是藉由探測探針與試片之間的電交互作用力，測量試片的表面電位。由於探針與試片之間的作用力尚包含凡得瓦爾力，因此必須使探針針尖與試片表面的距離保持固定，使凡得瓦爾力為定值，以利電交互作用力的測量。在實際操作中，為了固定凡得瓦爾力，一般使探針以自然振盪頻率 ω_0 附近的頻率 ω_1 進行振盪，並偵測因凡得瓦爾力造成的振盪頻率變化，再經由回饋控制，施加適當電壓於試片台下方的壓電陶瓷 (piezoelectric ceramic) 材料，藉由控制試片高度維持探針針尖與試片表面的間距，並藉此得到表面形貌的資訊。

而在電力的探測方面，其中的作用力包含了探針針尖與試片表面等效電容的電容力與兩者之間電荷的庫倫靜電力。假設試片表面有電荷 $+q_e$ ，則探針亦感應一電荷 $-q_e$ ，而若探針與試片間的等效電容為 C ，試片表面電位為 $-V_s$ ，則探針感應電荷 $+CV_s$ ，此外再外加偏壓 $V_b = V_{dc} + V_{ac}\sin\omega_2 t$ 於試片上，則探針感應電荷 $-CV_b$ 。因此，探針上的總電荷為 $q_{tip} = -(CV_b + q_e - CV_s)$ ，而試片相對於探針的電位差為 $V = V_b - V_s = V_{dc} + V_{ac}\sin\omega_2 t - V_s$ 。則探針與試片間的作用力 F_t 為

$$\begin{aligned}
F_t &= F_a + F_c + F_e \\
&= F_a + \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} V^2 - \frac{q_{tip} q_e}{4\pi\epsilon z^2} \\
&= F_a + \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} (V_{dc} - V_s)^2 + \frac{\partial C}{\partial z} \frac{V_{ac}^2}{4} + \frac{q_e^2}{4\pi\epsilon z^2} + \frac{q_e C (V_{dc} - V_s)}{4\pi\epsilon z^2}, \\
&\quad + \left[\frac{\partial C}{\partial z} (V_{dc} - V_s) + \frac{q_e C}{4\pi\epsilon z^2} \right] \cdot V_{ac} \sin \omega_2 t - \frac{\partial C}{\partial z} \frac{V_{ac}^2}{4} \cos(2\omega_2 t)
\end{aligned} \tag{2.1}$$

其中， F_a 為凡得瓦爾力， F_c 為電容力， F_e 為庫倫靜電力， z 為探針針尖與試片表面的距離 [12,13,16,21]。

此式包含三個部分，與 ω_2 無關的 dc 項，與 ω_2 有關的項，以及與 $2\omega_2$ 有關的二倍頻項。此時可利用鎖相放大器(lock-in amplifier)鎖定 ω_2 頻率，得其振幅 $\left[\frac{\partial C}{\partial z} (V_{dc} - V_s) + \frac{q_e C}{4\pi\epsilon z^2} \right] \cdot V_{ac} \sin \omega_2 t$ 。在假設表面電荷為零($q_e=0$)的情況下，可由此得到 $V_{dc}-V_s$ ，再經過回饋電路，控制 V_{dc} 使 $V_{dc}-V_s$ 保持為零，則 $-V_{dc}$ 即為 $-V_s$ ，由此可量得表面電位(圖 2-1)。

使用 KFM 測量半導體 pn 接面的概念如圖 2-2 所示。藉由控制加在試片上的偏壓，可量得試片材料對於探針的功函數(work function)差。例如，對 p 型及 n 型區域分別量得 $-(V_m-V_p)$ 與 $-(V_m-V_n)$ ，即相減可得到 pn 區域的表面電位差 (V_p-V_n) [14]。

2.2 儀器系統

探針是掃描探針測量系統中最為關鍵部分。掃描力顯微鏡所使用的探針包含一個扁長狀懸臂，一端固定，另一端則附有突出的針尖(圖 2-3)。探針的材質為矽，並以鉑銱合金(PtIr)鍍於表面，對於針尖而言，鉑銱合金可用以增加導電性，並藉由鉑銱合金所具有的低化學活性，提高探針的穩定性；而對於懸臂背面而言，鉑銱合金有助於增強對雷射光的反射特性，進而提升靈敏度。當探針在試片表面進行掃描時，針尖與試片表面的作用力會使懸臂產生彎曲，此時使用雷射光入射於懸臂背面，並以光二極體(photo

diode)作為光感測器(position sensitive photo detector, PSPD)感測反射光的偏折，經由計算可得知其作用力。為了提高空間解析度，探針針尖通常極為微小，僅為數個奈米。而懸臂為扁平長條狀，其長度達數百微米，而厚度僅 3 μm ，可提升受力彎曲的靈敏度，以期能夠準確探測針尖與試片表面的作用力。

本實驗使用日本 Seiko Instruments Inc. (SII)的 SPA300HV 機台(圖 2-4)，並配合 SPI3800N Electronics Console 控制系統以及作為訊號處理與繪圖之用的電腦主機，組成可在真空環境下工作的掃描探針系統。其中，SPA300HV 為主要部分，包括主腔體(main body)、探針座(probe holder)、雷射感測頭(laser head)、掃描器(scanner)(圖 2-5)及真空系統。

主腔體包括試片台、連接各個內外部訊號的端子，以及能夠較大幅度移動試片台的機械裝置。探針座用以放置並固定探針，其上方有一透明玻璃窗口，使雷射光能夠入射至探針懸臂。雷射感測頭固定在探針座的上方，包含雷射光源及光感測器，用以偵測探針懸臂的偏折。掃描器是由具有三軸位移的壓電陶瓷所構成，可藉由外加電壓改變其形變量，除使水平位置能夠精準定位，亦可用以改變試片台的高度，以控制探針針尖與試片表面的距離。真空系統採用油式機械幫浦(mechanical pump)先粗抽至壓力 1.5×10^{-1} torr 左右，再配合磁浮式渦輪幫浦(turbo pump)細抽至 10^{-5} torr 以下。此外，為避免震動影響掃描訊號，整個主腔體均固定在避震桌上。

2.3 回饋控制電路

如前所述，進行 KFM 測量時，必須控制 V_{dc} ，使 $V_{\text{dc}} - V_{\text{s}}$ 保持為零，則所加的 V_{dc} 即為 $-V_{\text{s}}$ ，因而量得表面電位。

然而，在實際所用的探針系統中，其內建的 KFM 功能有諸多限制，如回饋控制電路的響應過慢，為得到清晰而準確的影像必須將掃描速度放

慢，降低了掃描取圖的效率。又如回饋量的設定、 ω_2 頻率的選擇範圍均有所限制，無法大範圍地自由調整。因此有必要自行製作外接的回饋控制電路，再配合外接的波形產生器及鎖相放大器，進行 ω_2 部分的訊號處理，以期能夠更進一步完善 KFM 掃描取圖的功能。

該電路的運作是由鎖相放大器輸入 $V_{dc}-V_s$ ，當此項為正值，即令 V_{dc} 減小，以使 $V_{dc}-V_s$ 保持為零，反之亦然。此時所欲測量的表面電位 $-V_s$ 即為 $-V_{dc}$ ，故輸出 $-V_{dc}$ 為所量得的表面電位訊號。而加在試片上的偏壓亦由此一電路加以控制，故另需輸入頻率 ω_2 的弦波，與 V_{dc} 相加之後輸出成為加在試片上的偏壓。由此可知，此電路共有兩個輸入端及兩個輸出端，如圖 2-6。

電路的第一級為反向放大器，可將由鎖相放大器輸入的訊號 INPUT 1 放大，其放大增益可利用可變電阻 VR2 加以調變。第二級為反向積分器，若由前一級送進的訊號為正值，則送出的訊號逐漸減小，若送入為負值，則逐漸上升，其時間常數可經由可變電阻 VR3 調變。此一積分器的輸出即為 $-V_{dc}$ ，亦即所欲測量的 $-V_s$ ，故將此訊號輸出，為 OUTPUT 1。第三級為加法器，將上一級送進的 $-V_{dc}$ 反向再與 ω_2 頻率弦波 INPUT 2 加總，最後成為 OUTPUT 2，作為加在試片上的偏壓，輸出至試片台。

電路的實際製作採用 HA17741 運算放大器(operational amplifier)三枚，電阻 R_1 、 R_g 、 R 各為 1 k Ω 、100 k Ω 、10 k Ω ，電容 C 為 100 nF，輸入、輸出均以 BNC 接頭與外界電路連接，並以正負定電壓作為電源。為防止外界雜訊干擾，另製作金屬外盒加以防護。

圖 2-7 為使用內建回饋控制電路所得的表面電位影像，圖 2-8 為使用自製的外接回饋控制電路所得的表面電位影像，其中圖(a)與圖(b)分別為記錄探針由左至右（去）與由右至左（回）的結果。經由比較可以發現，探針去回影像之間具有相對位移，此一位移取決於探針掃過某一測量點至記錄該點數值所需要的時間，該時間的長短又由所用回饋控制電路的響應快慢

所決定。此一效應會造成在掃描影像的平移，而平移量則為探針於該時間中在試片表面所掃過的距離。對於去回影像而言，兩者之間的相對位移即為掃描影像平移量的兩倍。由於內建電路的響應較慢，因此圖 2-7 所示的相對位移較大，而使用外接電路則可降低相對位移 3~4 倍，由此可知，使用此一外接電路確實使回饋響應特性得到改善。

此外，圖 2-8 中，亮區與暗區之間的過渡區(transition region)輪廓較為陡峭，相對於圖 2-7 中較為平緩的過渡區輪廓，使用外接回饋控制電路可以得到較接近理想的結果。另外，使用外接電路所得的影像較為清晰，有助於空間解析度的提高，且一併使用外接的波形產生器及鎖相放大器，可配合實際需要，較大範圍調整設定參數，均為此一外接回饋控制電路的優點所在。



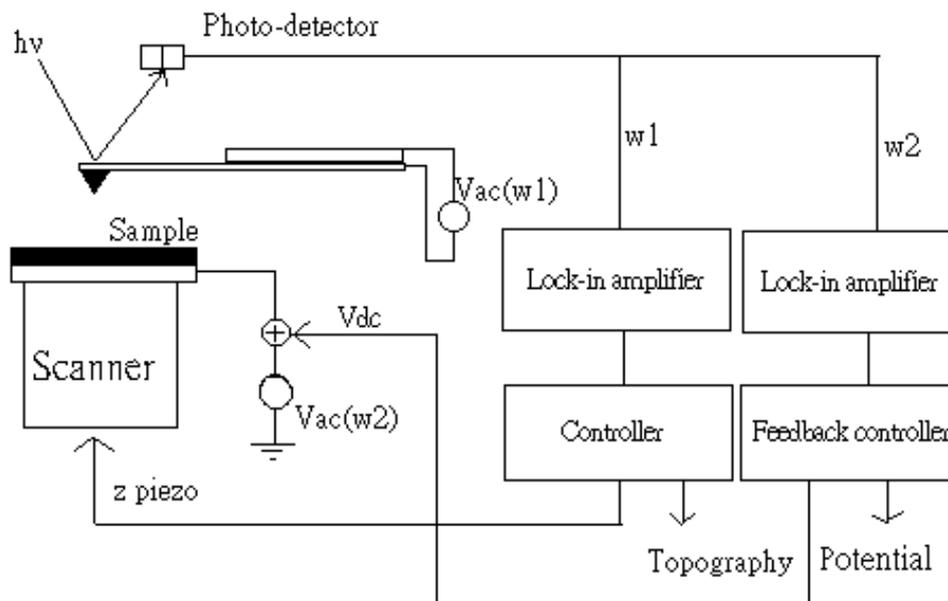


圖 2-1：KFM 系統示意圖。



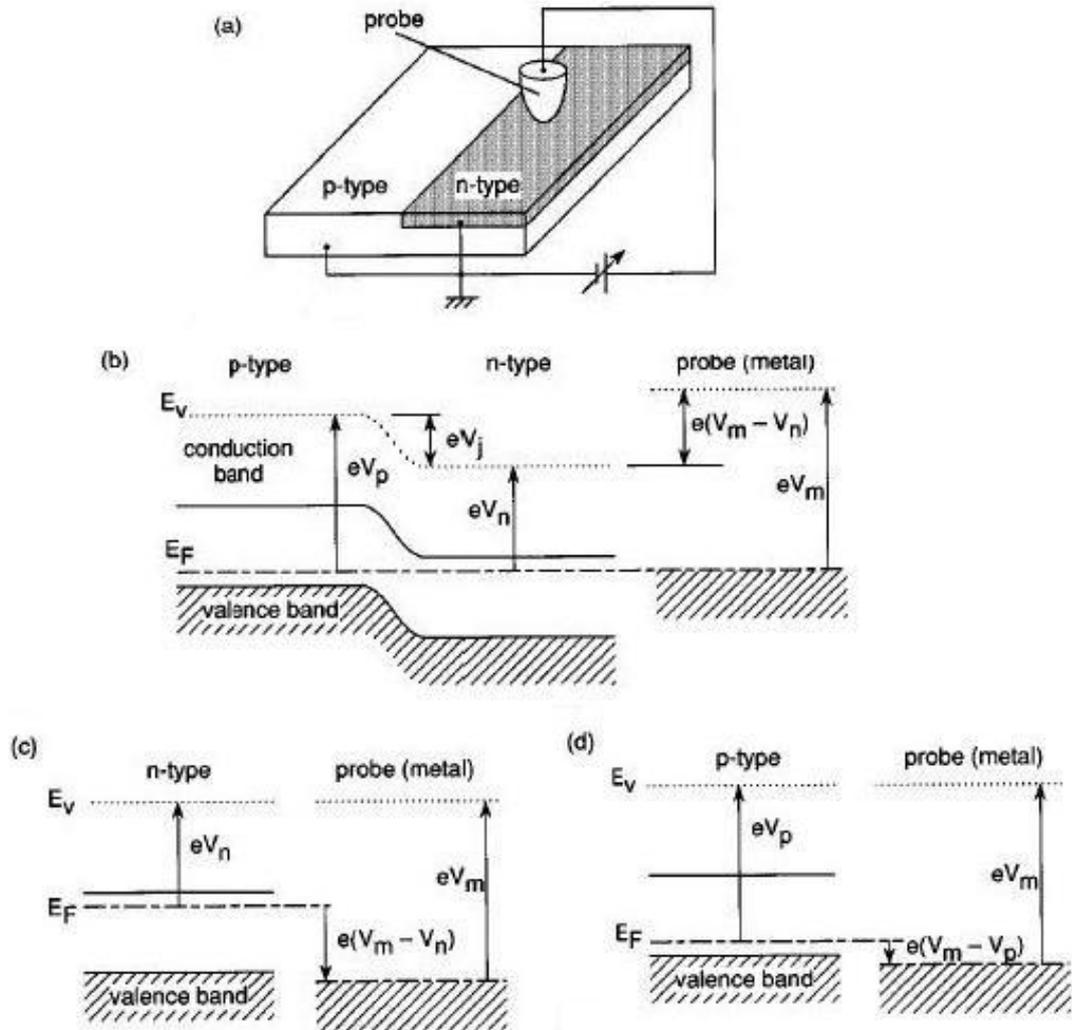


圖 2-2：利用 KFM 測量 pn 區域的表面電位差 [14]。 E_F 為費米能階， E_v 為真空能階(vacuum level)， eV_p 為 p 型區域的功函數， eV_n 為 n 型區域的功函數。(a) 連接示意圖。(b) 不加偏壓時的能帶結構圖。(c) 測量 n 型區域，在試片上加偏壓 $-(V_m - V_n)$ 使 E_v 相等，得表面電位 $-(V_m - V_n)$ 。(d) 測量 p 型區域，得 $-(V_m - V_p)$ 。由此量得 pn 區域表面電位差 $V_p - V_n$ 。

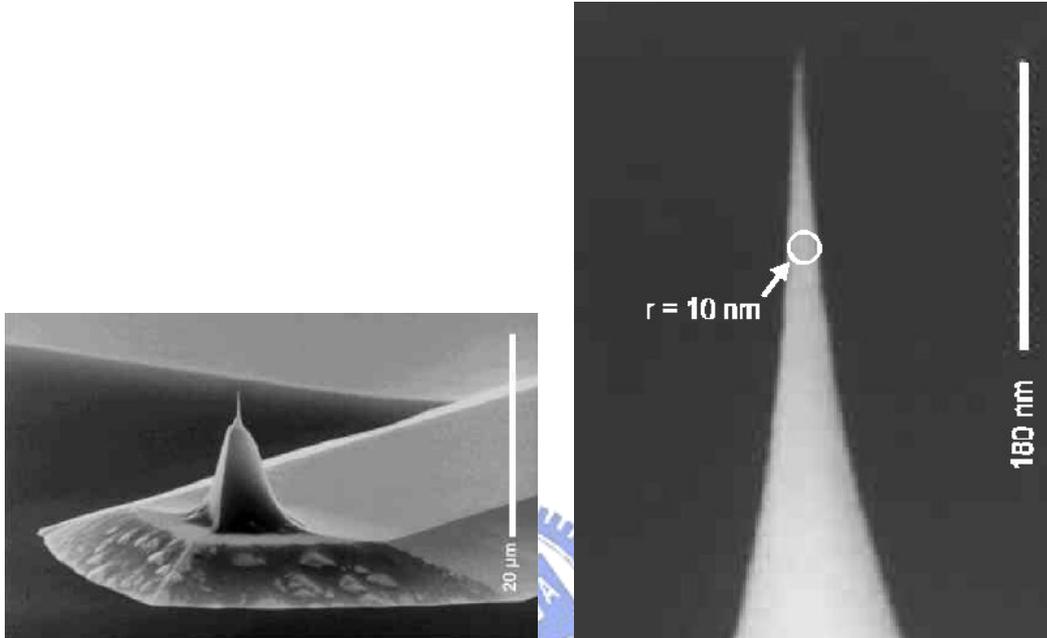


圖 2-3：探針 [22]。

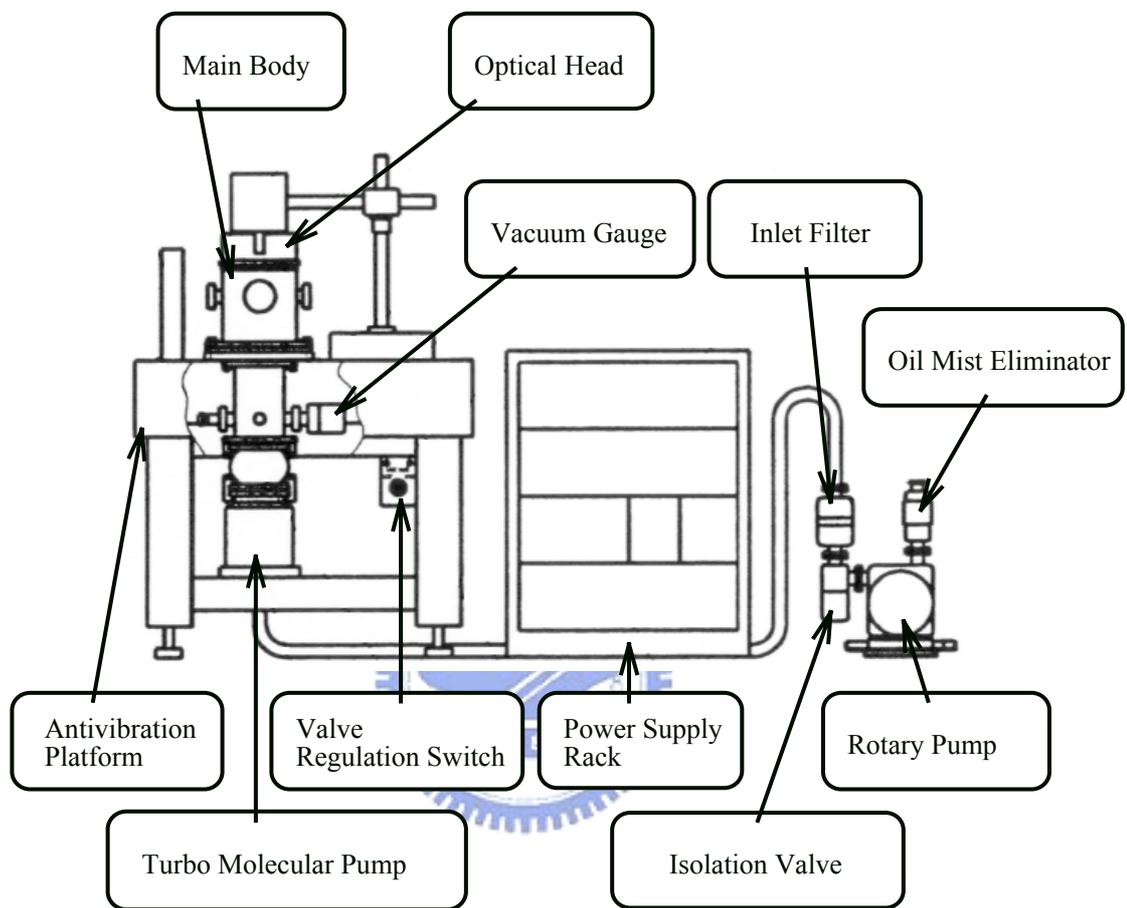


圖 2-4：SPA300HV 掃描探針系統 [23]。

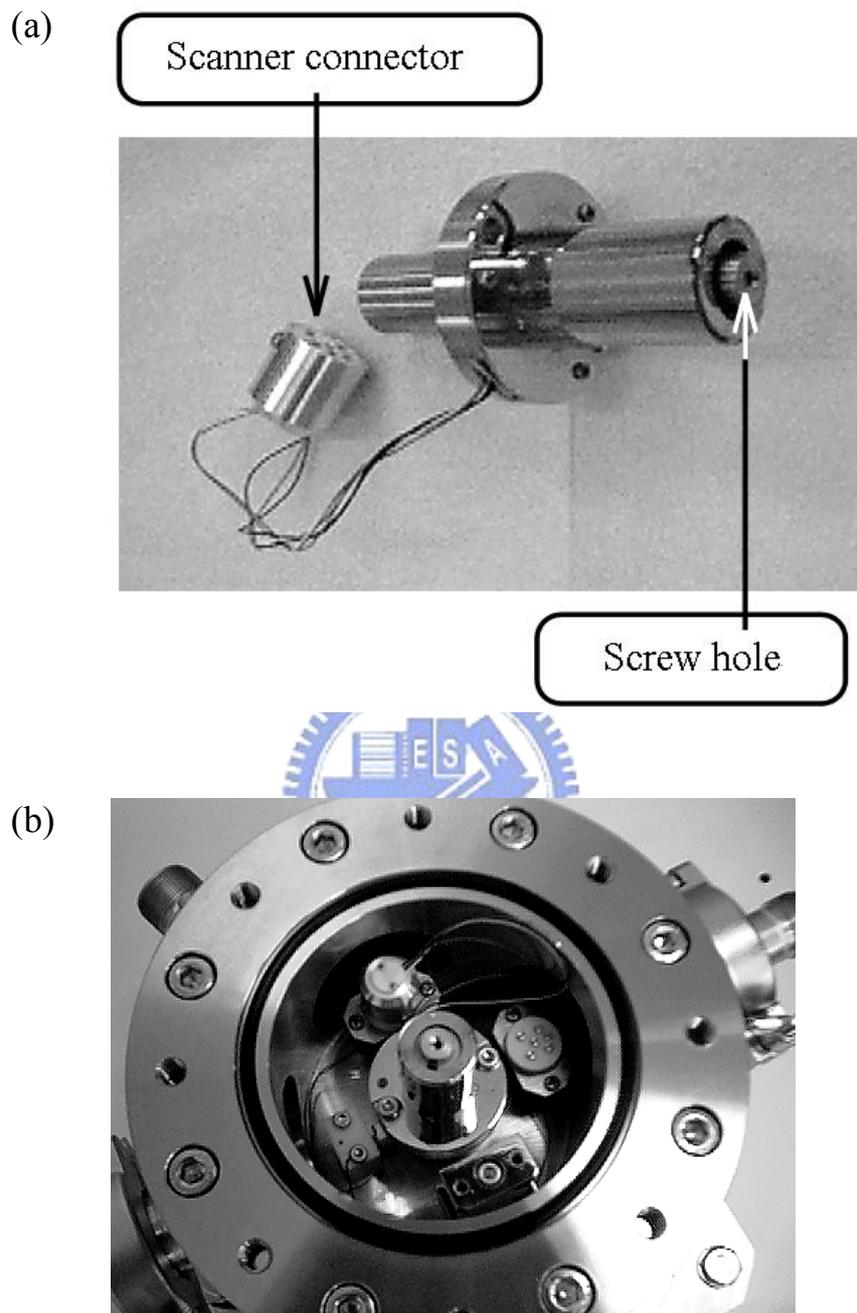


圖 2-5：(a)掃描器。(b)掃描器安裝於主腔體內 [23]。

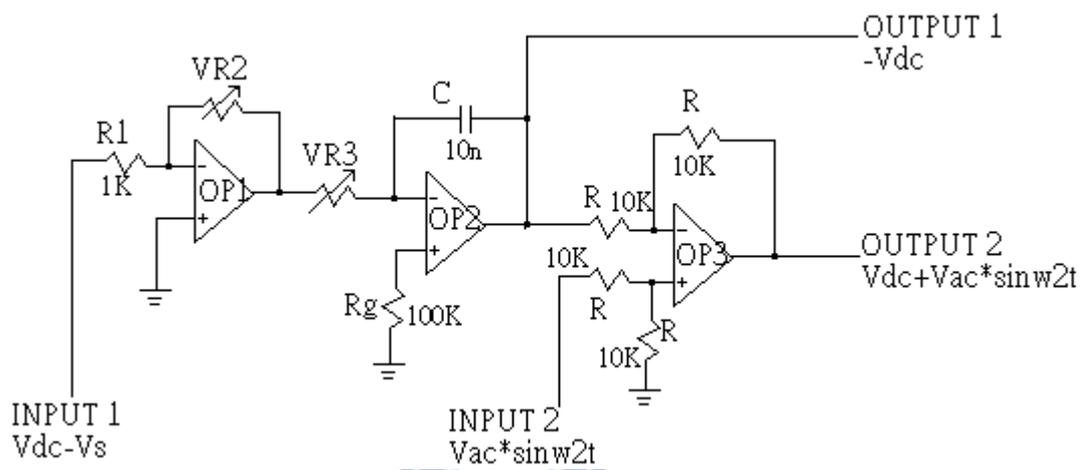


圖 2-6：KFM 回饋控制電路。



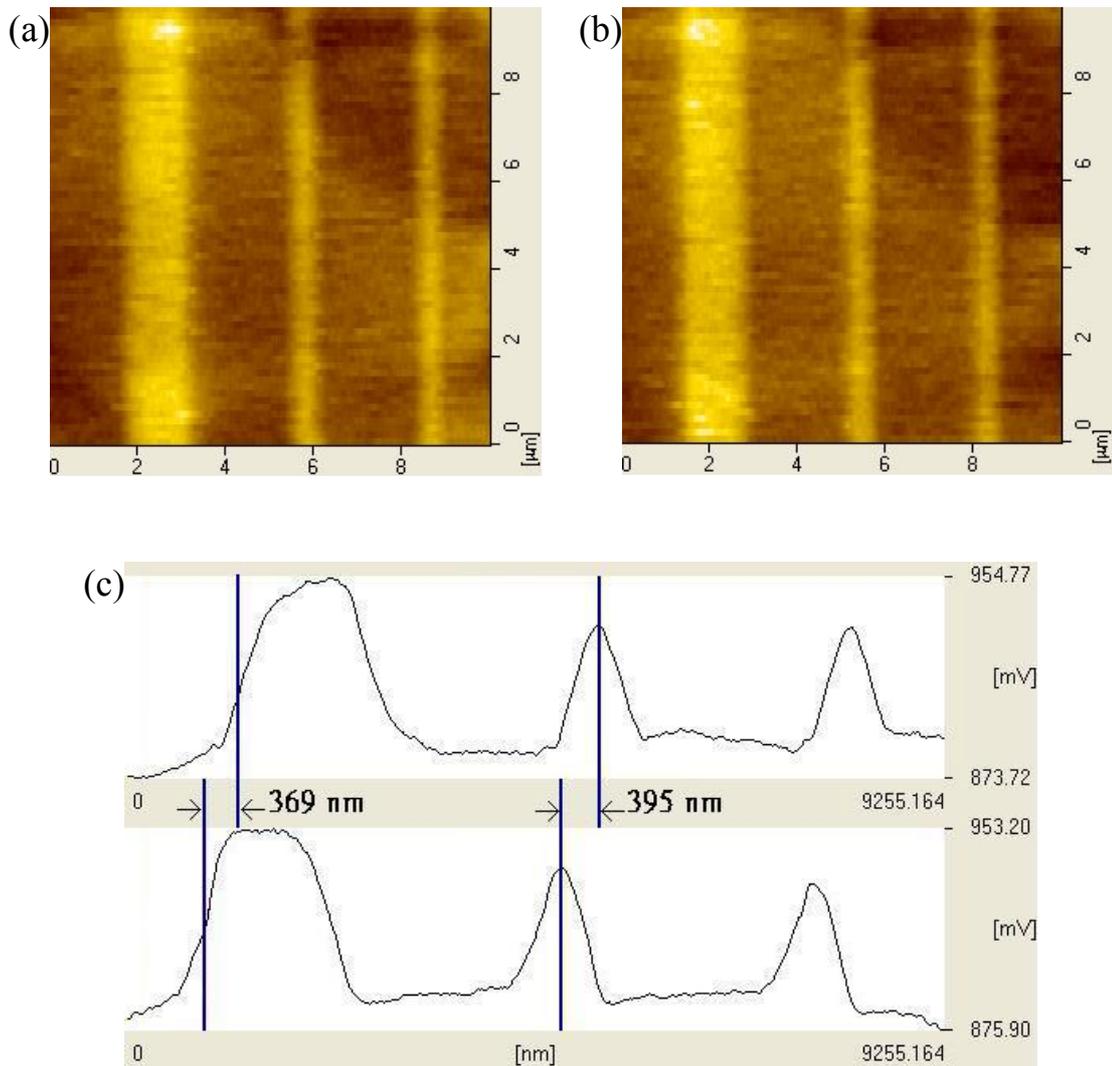


圖 2-7：使用內建回饋控制電路所得的表面電位掃描結果^[註]。(a)探針由左而右掃描所得。(b)探針由右而左掃描所得。(c)兩者的切面輪廓與相對位移。

^[註] 本實驗製作之平面 pn 區域試片為寬度不等的長條狀圖案。以本頁所示掃描影像為例，此為 n⁺p 試片，亮區線條表面電位較高，為未受離子植入的 p 型區域，暗區背景則表面電位較低，為受離子植入的 n⁺區域。

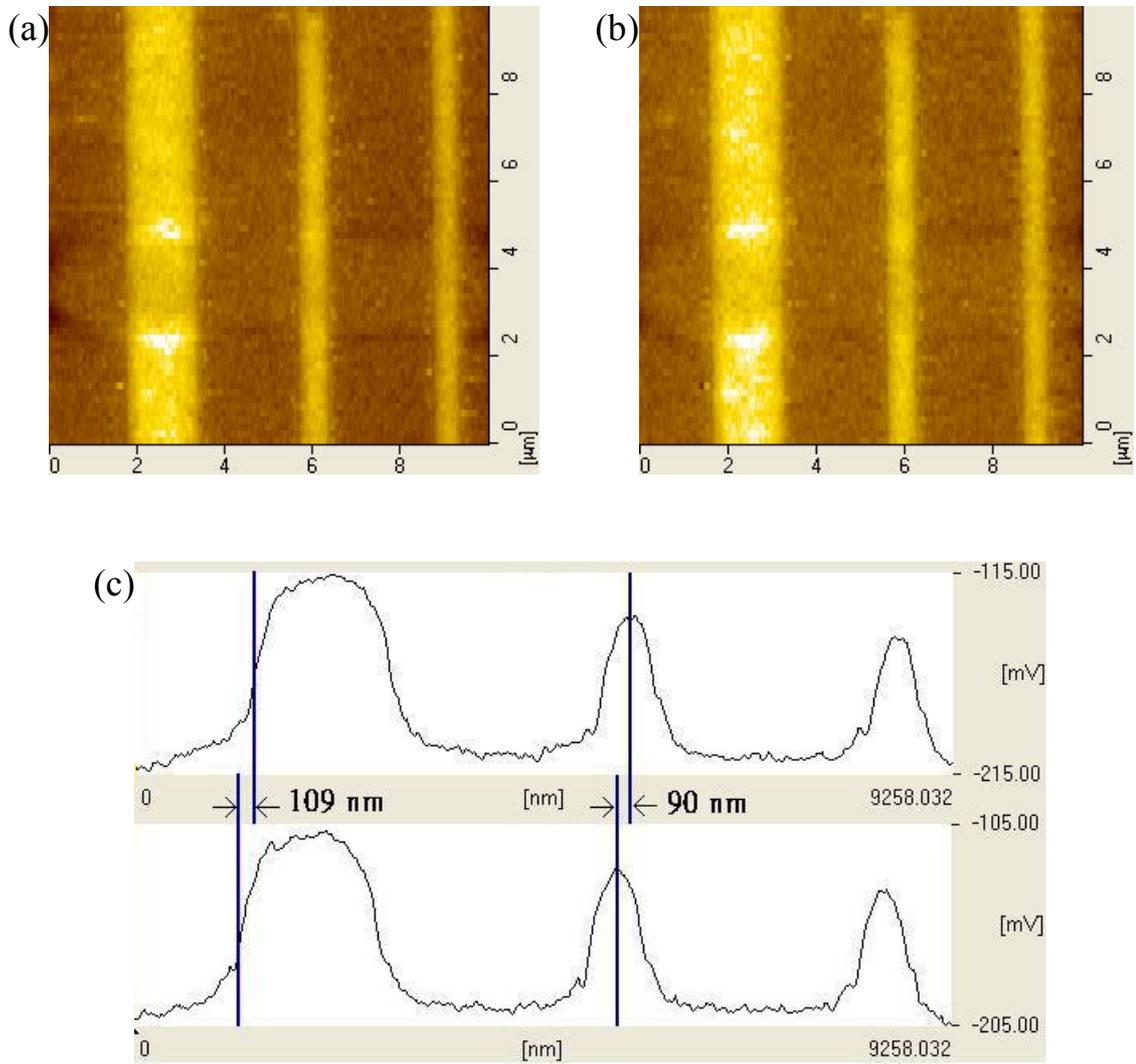


圖 2-8：使用自製回饋控制電路所得的表面電位掃描結果。(a)探針由左而右掃描所得。(b)探針由右而左掃描所得。(c)兩者的切面輪廓與相對位移。

第三章 實驗方法

欲利用 KFM 進行量測載子濃度，必須先求出量得的表面電位與表面濃度之間的彼此關係。為此，本實驗製作一系列試片以分別量測表面電位與表面濃度。本章將說明這些試片的結構與製作流程，並由於 KFM 對試片表面狀態甚為敏感，將對量測前表面處理對結果的影響作一探討，最後介紹用以校正表面濃度的幾種方式。

3.1 平面試片製作

在本實驗中，用以進行 KFM 量測的試片共有 n^+p 和 p^+n 兩種，是利用微影(lithography)和離子植入方式在試片表面形成 p 型和 n 型區域，為第一類試片。此外，另製作與前述試片具有相同植入條件的 n^+n 及 p^+p 兩種第二類試片，以進行表面濃度的量測。有別於前述第一類試片經由微影步驟，第二類試片不經微影步驟，進行整片(blanket)的離子植入。

因此，所製作的試片共有 n^+p 、 p^+n 、 n^+n 、 p^+p 四種，其中， n^+p 及 n^+n 是分別在 p 型及 n 型矽基板(substrate)上植入 As^+ ；而 p^+n 和 p^+p 則是分別在 n 型及 p 型矽基板上植入 BF_2^+ 。所有離子植入能量均為 20 KeV，植入劑量由高至低分別有 5×10^{15} 、 2×10^{15} 、 1×10^{15} 、 2×10^{14} 、 5×10^{13} 、 1×10^{13} cm^{-2} 等六種。故共有 24 個條件不同的試片，如表 3-1。

離子植入後，利用 PECVD 在 350 °C 沈積 250 nm 厚的氧化層，以避免高溫活化時，雜質向外擴散。再使用高溫爐管進行 950 °C、30 min 的退火(anneal)，使雜質活化(activation)，之後將氧化層去除(圖 3-1、3-2)。

利用上述的兩類試片，可分別以 KFM 進行表面電位量測以及以其它傳統方法進行表面濃度量測，得到一系列表面電位與表面濃度的關係。關於此一部份的結果與討論，將於次章詳述。

3.2 表面處理

KFM 是一種表面分析技術，試片的表面狀態對於量測結果的影響甚為顯著。由於試片製作完成之後通常放置若干時間始進行 KFM 掃描量測，為了消除試片表面因環境所造成的污染物以及久置於大氣而生成的原生氧化物(native oxide)，必須在量測前進行潔淨試片的步驟。此外，為了瞭解氧化表面利用 KFM 量測的結果，並與乾淨矽表面的量測結果相比較，另以經過氧化處理的試片進行量測，加以探討。

由於丙酮(acetone)為一種有機溶劑，常用以清除表面污染物，在此為了進行試片表面的污染物去除，將試片浸泡於丙酮中進行超音波震盪(ultrasonic oscillation)約 3 至 5 分鐘。而對於試片表面的原生氧化物，則是使用 1 %的稀釋氫氟酸(diluted hydrofluoric acid, DHF)溶液浸泡約數十秒鐘加以去除。最後再以去離子水(de-ionized water, D.I. water)沖洗並吹乾，始進行 KFM 量測。此外，為了探討浸泡 DHF 後的去離子水沖洗對量測結果的影響，另設計省略沖洗步驟的試片處理條件，加以探討。

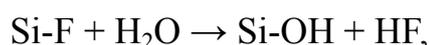
而在氧化的試片處理方面，則分別以 900 °C、1 min 快速熱氧化(Rapid Thermal Oxidation, RTO)以及以 100 °C 的硫酸(H₂SO₄)與過氧化氫(H₂O₂) 3:1 溶液浸泡 10 分鐘生成化學氧化物(chemical oxide)等兩種分式進行，使試片表面生成薄氧化層。因此，在此對四種量測前表面處理方式進行研究，其條件如表 3-2 所示。

圖 3-3(a)所示為試片經過丙酮震盪，DHF 浸泡，並以去離子水沖洗所得的表面電位影像，圖 3-3(b)則為試片省略去離子水沖洗所得的影像。而圖 3-3(c)為試片經 RTO 處理所得的表面電位影像，而圖 3-3(d)則為試片經硫酸加過氧化氫溶液浸泡所得的影像。比較此四種表面處理條件所得的結果，可發現試片經過丙酮震盪，DHF 浸泡，並以去離子水沖洗所得的影像對比

最佳，兩種經氧化處理的試片所得結果次之，而試片經丙酮震盪，DHF 浸泡，但省略去離子水沖洗所得的影像對比最差。影像對比反應的是表面電位差值，圖 3-3 的現象表示表面處理方式對表面電位影響很大。

為了更進一步瞭解表面處理對表面電位影像造成影響的原因，在此利用 XPS (X-ray Photoelectron Spectrometer, X 光光電子能譜儀)對經過不同表面處理的試片進行分析。觀察試片經 HF 浸泡而未經沖洗所得的 F 1s 能譜(圖 3-4)，可發現在能量 686 eV 及 689.9 eV 處各有一峰值存在，其中 686 eV 為 Si-F 鍵結中 F 1s 電子的束縛能(binding energy)，證實矽表面經過 HF 浸泡後，表面會有 Si-F 的鍵結產生 [24]。而 689.9 eV 則與 H-F 或 C-F 鍵結所形成的束縛能接近，可能是因試片表面的 HF 殘留或吸附大氣中的碳原子所造成。比較試片經 HF 浸泡後以水沖洗所得的分析結果，則未能於 F 1s 能譜中發現明顯峰值，表示試片經去離子水沖洗，可有效減少因 HF 浸泡而在表面造成的 Si-F 鍵結。

此外，比較上述兩種試片的 O 1s 能譜(圖 3-5)，可發現經沖洗步驟的試片，相對於未經沖洗者，具有較強的 OH 鍵結訊號 [24,25]。由此可進一步推測，HF 浸泡之後的去離子水沖洗步驟，會在試片表面進行替代反應



而使得表面的 Si-F 鍵結轉變成 Si-OH 鍵結 [24,26]。

而比較 RTO、硫酸加過氧化氫溶液浸泡，與未經氧化處理矽表面的 Si 2p 能譜(圖 3-6)，可發現經過氧化處理的試片除了 Si-Si 鍵結訊號之外，另具有 Si-O 鍵結訊號存在 [27]。由此可知，經過 RTO 或硫酸加過氧化氫溶液浸泡的試片，其表面存在 Si-O 的鍵結。

由於經過氫氟酸浸泡的矽表面會被 Si-F 鍵結所覆蓋，而造成表面態，導致了費米能階被釘住(Fermi level pinning)的現象 [28]。因此試片浸泡 HF 而未以水沖洗，會使表面電位受到表面的 Si-F 鍵結影響，不論試片內部

電位為何，表面電位都很接近，使得掃描影像的對比下降。而在去離子水沖洗之後，Si-F 已大多轉變成為 Si-OH 鍵結，表面能態的影響降低，故可以得到較大的表面電位差。

至於生成氧化物的試片表面電位影像對比不佳，H. Sugimura 等人曾藉由水接觸角觀察覆有氧化層表面的親水特性，並研究對於在大氣中進行 KFM 量測所得表面電位對比的影響 [17]。利用不同溫度控制表面狀態，發現當試片表面為疏水性，可以得到較為明顯的表面電位對比；若為親水表面，則會得到對比降低，掃描影像模糊的結果。並提出推測，由於親水性表面易吸附大氣中的水氣，造成電偶極(dipole moment)，因而在大氣環境下進行 KFM 量測之時，系統所加的偏壓會使得這些試片表面電偶極的淨位向(net orientation)受到改變，對待測表面電位產生屏蔽作用，從而造成表面電位對比下降的結果。

但對於本實驗而言，KFM 量測均在約 10^{-5} torr 的真空環境下進行，即使試片表面為親水狀態，其所吸附的水氣亦為真空系統所帶走，因此應無前述屏蔽作用發生。在本實驗中，氧化處理過程在試片表面所造成的介面缺陷，可能會導致捕捉能態(trap state)的存在 [29]，在進行 KFM 量測時，由於外加偏壓的關係，導致捕捉電荷的改變，從而對表面電位量測造成干擾，應為導致掃描影像劣化的可能原因。

由上述結果可歸納出，試片經丙酮震盪、DHF 浸泡，並以去離子所沖洗，所量得的表面電位影像對比最佳，為適合於 KFM 量測前試片表面潔淨的處理方式。

3.3 濃度量測法

在表面濃度的量測上，本實驗利用展阻(SRP)法、電容-電壓(C-V)法，以及二次離子質譜儀(SIMS)分析加以進行。現將此三種方法的原理簡介如

下：

3.3.1 SRP 量測

SRP 為一種量測半導體載子濃度分佈的方法。其試片準備方式是將試片固定在具有已知斜角(bevel angle)的圓柱上，再置於玻璃板上利用鑽石膏進行研磨，使其在表面形成一個小角度的斜角研磨面。而展阻探針則是由兩根並列的金屬探針所構成，量測時使探針接觸研磨斜面，並以固定間距在斜面上移動，量測各點的展阻值(圖 3-7)。通常試片在研磨前會在表面覆蓋絕緣層，由於絕緣體阻值極高，故可藉展阻值變化定義出待測試片表面的位置。

圖 3-8 為圓柱形金屬探針接觸試片表面，量測展阻值的示意圖，其中， I 為由探針流入試片表面的電流， r 為圓柱探針半徑， ρ 為待測材料的電阻率。由於電流會以探針接觸點為中心向試片內部展開，故稱之為展阻。

對圓柱形探針而言，若試片具固定電阻率與相當厚度，其展阻值 R_{sp} 可表示為


$$R_{sp} = \frac{\rho}{4r}, \quad (3.1)$$

若探針尖端為半球形，若接觸半徑為 r ，則展阻值可表示為

$$R_{sp} = \frac{\rho}{2\pi r}. \quad (3.2)$$

實際上，探針所量到的阻值尚包含探針本身的內電阻、兩根探針之間的電阻，以及探針與試片之間的接觸電阻，在換算電阻率時必須加以修正。

在載子濃度的計算方面，則是由一組濃度不一的標準試片先行得出載子濃度與電阻率的關係，與電阻率相比較，可得出待測試片的載子濃度 [30]。但對於一般非均勻濃度的試片，縱深方向各個位置的展阻值除了由電阻率所決定以外，還受到試片結構、濃度分佈的影響，使之間的關係變得十分複雜。在展阻量測系統中，通常已有許多內建模型，在進行換算時依

照試片結構選取適當模型，即可計算出試片縱深方向的電阻率及載子濃度分佈。

3.3.2 C-V 法

C-V (電容-電壓) 法為一種量測半導體載子濃度的方法。量測前先製作介電層與電極，形成 MOS 電容結構，再根據所量測的 C-V 特性加以分析。以 p 型半導體為例，當金屬電極外加偏壓 V，則定義小訊號電容 C 為

$$C = -\frac{dQ_s}{dV}, \quad (3.3)$$

其中， Q_s 為半導體中的電荷。此電容的量測方式是利用直流偏壓上疊加頻率 10 kHz 至 1 MHz，振幅 10 至 20 mV 的交流訊號，量測高頻 C-V 特性。

對於 MOS 結構，在適當的偏壓條件下，電場會使半導體產生空乏層 (depletion layer)，而交流訊號會造成電荷量的變化 dQ_s ，並使空乏層寬度 W 產生改變，其關係為

$$dQ_s = -qN_A(W)dW, \quad (3.4)$$

其中，A 為電容面積， $N_A(W)$ 為深度 W 處的載子濃度。代入前式，可得

$$C = -\frac{dQ_s}{dV} = qAN_A(W)\frac{dW}{dV}. \quad (3.5)$$

而空乏區寬度為

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}(V - V_{FB} - V_i)}{qN_A}}, \quad (3.6)$$

其中， ε_{Si} 為矽的介電係數(permittivity)。代入前式得

$$\begin{aligned} N_A(W) &= -\frac{C^3}{q\varepsilon_{Si}A^2 dC/dV} = \frac{2}{q\varepsilon_{Si}A^2 d(1/C^2)/dV} \\ &= 2 \left[q\varepsilon_{Si} \frac{d(1/C^2)}{dV} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

可由此計算空乏層內的載子濃度的縱深分佈 [31,32]。

在對於實際的載子濃度縱深量測而言，其結果受到 Debye 長度(L_D)的限

制。由於可移動的主要載子分佈並未與摻雜分佈一致，在濃度梯度大的位置，可明顯發現載子分佈會向低濃度區域擴張，其距離與 L_D 有關，使得量測結果在矽表面以下幾個 L_D 的範圍內並非真實的載子濃度。 L_D 為

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} kT}{q^2 N_A}}, \quad (3.8)$$

一般以深度 $3L_D$ 以後的結果為有效的濃度數值。

對於高濃度摻雜的情況，摻雜簡併(degenerate)會造成量子效應的出現。根據統計力學，粒子的熱能(thermal energy) $\frac{2}{3}kT$ 此時會由費米能(Fermi-energy) $E_V - E_F$ 取代 [33]，因此非簡併情況的 L_D 則變成 Thomas-Fermi 長度(L_{TF})

$$L_{TF} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}(E_V - E_F)}{3q^2 N_A}} = \left(\frac{\pi}{3N_A}\right)^{1/6} \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} h^2}{4\pi q^2 m^*}}, \quad (3.9)$$

其中， m^* 為載子的等效質量(effective mass)， h 為普朗克常數(Planck's constant) [34]。

3.3.3 SIMS 分析

SIMS 為一種量測試片摻雜元素分佈的分析技術。其原理是利用如氧(O_2^+)或銫(Cs^+)等具有活性的一次離子，對試片進行撞濺(sputter)，產生二次離子，再以能量分析器及質量分析器偵測二次離子訊號。實際量測時，藉由控制一次離子的參數可滿足不同的分析需求，如高強度、高能量的一次離子由於具有較高撞蝕率，適合用於較大深度的縱深分析，而對於薄膜或表面分析，則使用低能量、低強度的一次離子進行撞濺。

分析上，可依據荷質比(m/z)的差異分辨出不同質量的元素離子。在摻雜濃度的定量上，需事先以標準試片求得待測元素與基質材料之間，二次離子訊號強度的相對感度因子(Relative sensitivity factor, RSF)，再利用換算關係

$$\rho_i = \frac{I_i}{I_m} RSF, \quad (3.10)$$

其中， ρ_i 與 I_i 分別為待測元素濃度及其二次離子訊號強度， I_m 為基質二次離子訊號強度，即可得出摻雜元素濃度 [35]。



試片種類	編號	植入能量	植入劑量		
第一類 Patterned implant →表面電位量測	n ⁺ p	20 KeV	5×10 ¹⁵ cm ⁻²		
			2	2×10 ¹⁵ cm ⁻²	
	As ⁺ implant on p-sub		3	1×10 ¹⁵ cm ⁻²	
			4	2×10 ¹⁴ cm ⁻²	
			5	5×10 ¹³ cm ⁻²	
			6	1×10 ¹³ cm ⁻²	
	p ⁺ n	20 KeV	7	5×10 ¹⁵ cm ⁻²	
			8	2×10 ¹⁵ cm ⁻²	
			BF ₂ ⁺ implant on n-sub	9	1×10 ¹⁵ cm ⁻²
				10	2×10 ¹⁴ cm ⁻²
				11	5×10 ¹³ cm ⁻²
				12	1×10 ¹³ cm ⁻²
第二類 Blanket implant →表面濃度量測	n ⁺ n	20 KeV	1	5×10 ¹⁵ cm ⁻²	
			2	2×10 ¹⁵ cm ⁻²	
			As ⁺ implant on n-sub	3	1×10 ¹⁵ cm ⁻²
				4	2×10 ¹⁴ cm ⁻²
				5	5×10 ¹³ cm ⁻²
				6	1×10 ¹³ cm ⁻²
	p ⁺ p	20 KeV	7	5×10 ¹⁵ cm ⁻²	
			8	2×10 ¹⁵ cm ⁻²	
			BF ₂ ⁺ implant on p-sub	9	1×10 ¹⁵ cm ⁻²
				10	2×10 ¹⁴ cm ⁻²
				11	5×10 ¹³ cm ⁻²
				12	1×10 ¹³ cm ⁻²

表 3-1：平面試片的種類與離子植入條件。

表面處理	試片	a	b	c	d
丙酮超音波震盪 3~5 min		●	●	●	●
100 : 1 氫氟酸浸泡 ~20 sec		●	●		
快速熱氧化 900°C, 1 min				●	
硫酸：過氧化氫=3:1 溶液浸泡 100°C, 10 min					●
去離子水沖洗		●		●	●

表 3-2：量測前試片表面處理條件。

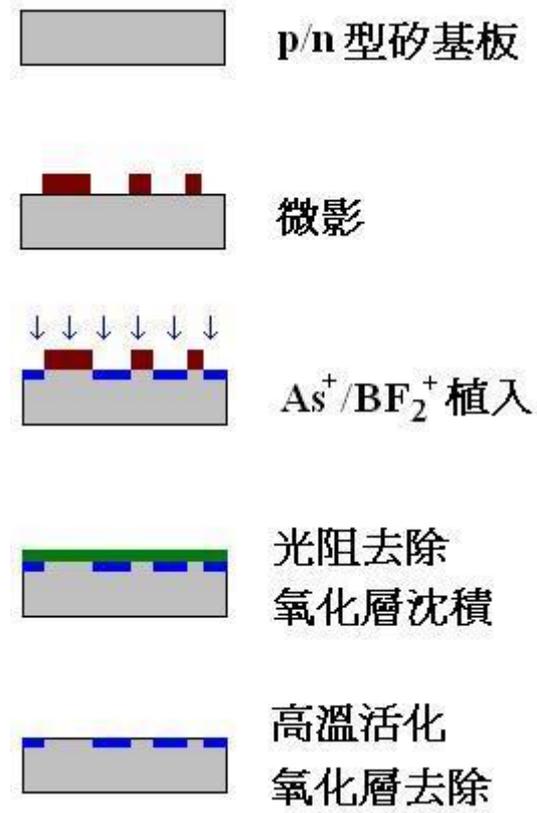


圖 3-1：第一類試片（n⁺p 及 p⁺n）的製作步驟。

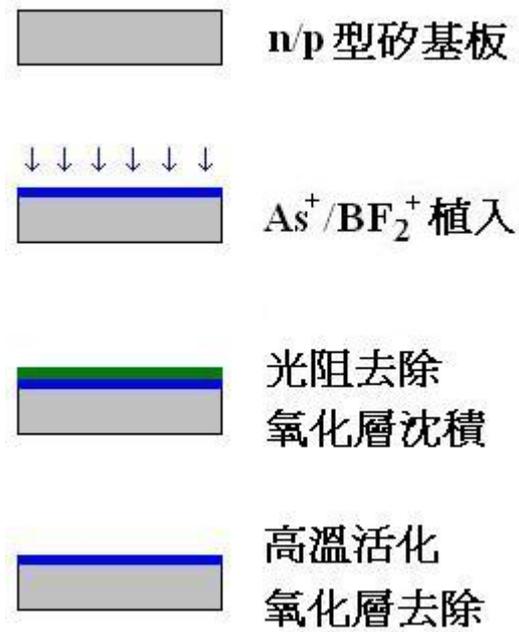


圖 3-2：第二類試片 (n⁺n 及 p⁺p) 的製作步驟。

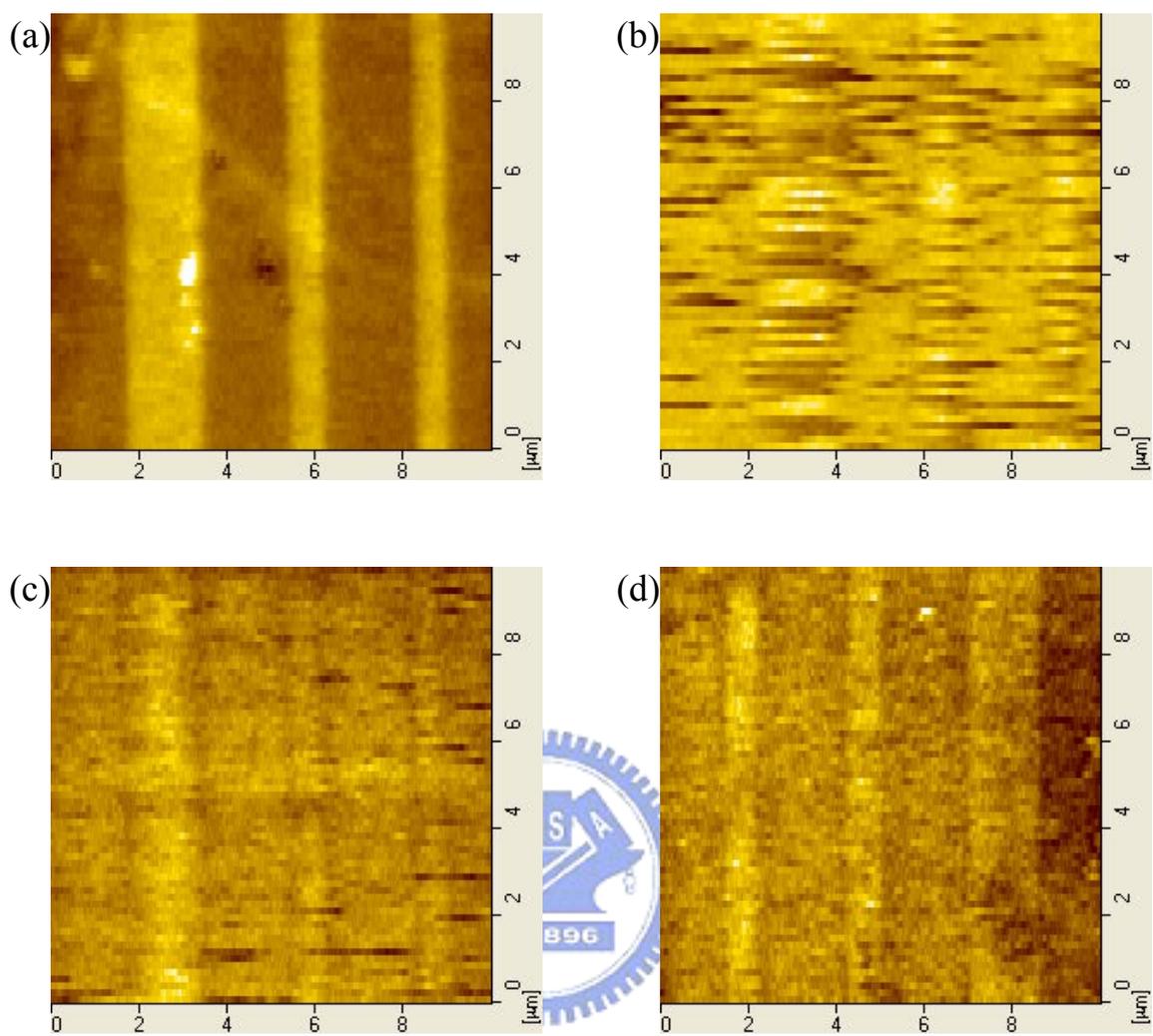


圖 3-3：(a)試片經丙酮震盪、浸泡 DHF、去離子水沖淨之後所得的表面電位影像。(b)試片於浸泡 DHF 後，省略去離子水沖洗步驟所得的影像。(c)試片經 RTO 步驟所得的表面電位影像。(d)經硫酸與過氧化氫 3:1 溶液浸泡 10 分鐘之後所得的影像。

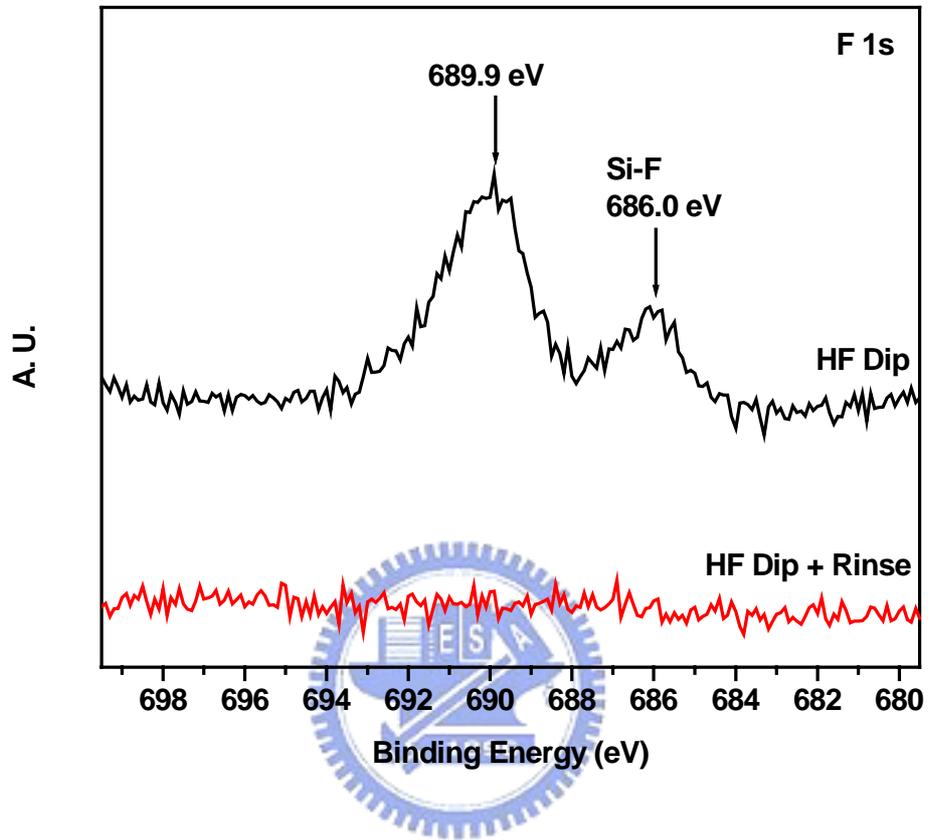


圖 3-4：僅經氫氟酸浸泡與經氫氟酸浸泡後以水沖洗，所得 F 1s 的 XPS 能譜。

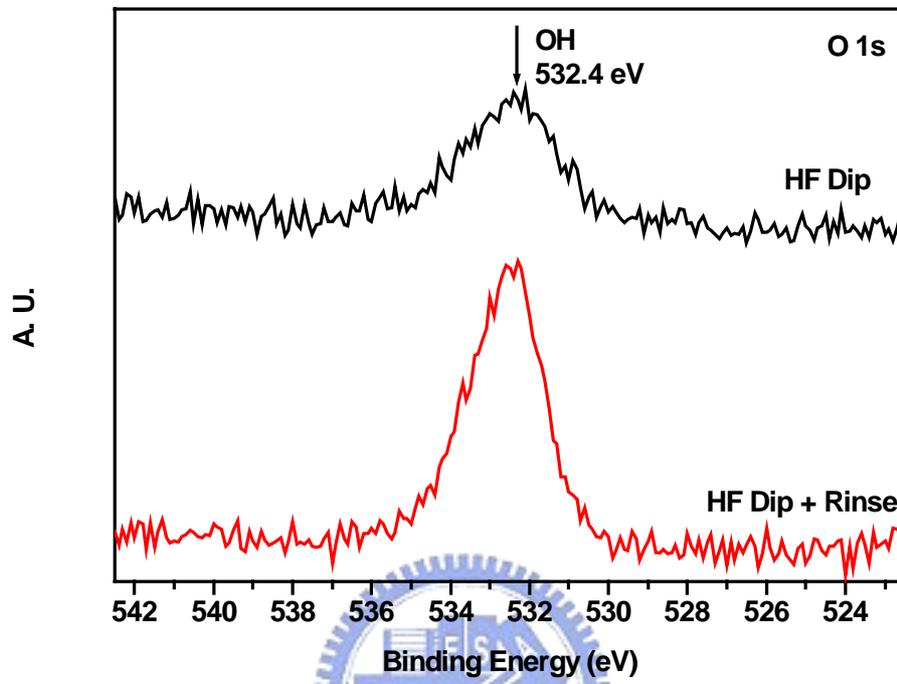


圖 3-5：僅經氫氟酸浸泡與浸泡後以水沖洗，所得 O 1s 的 XPS 能譜。

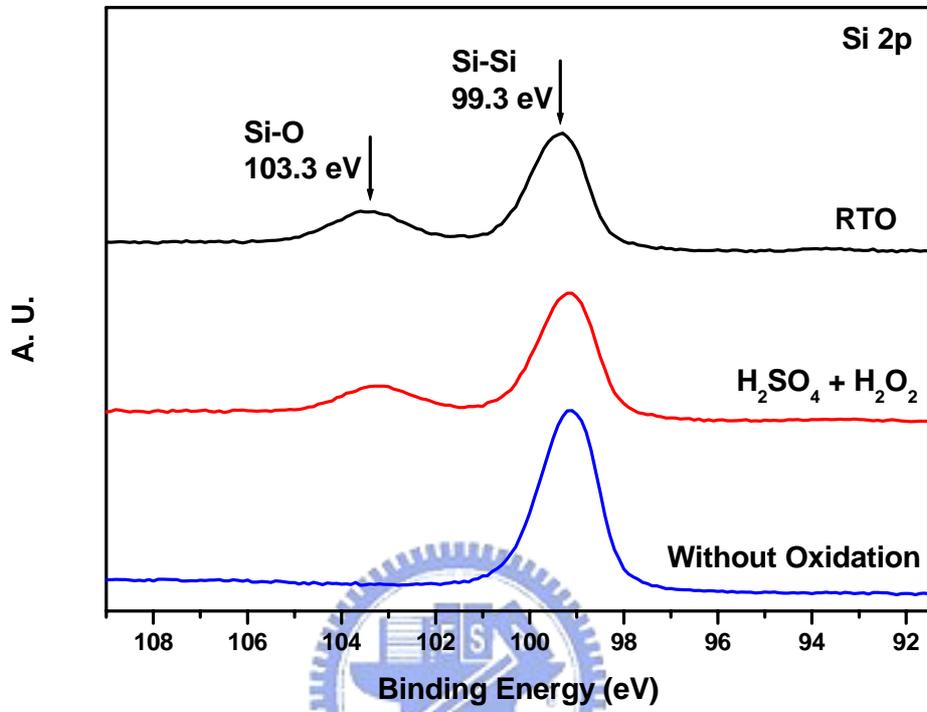


圖 3-6：經 RTO、硫酸加過氧化氫溶液浸泡，與未經氧化處理的矽表面所得 Si 2p 的 XPS 能譜。

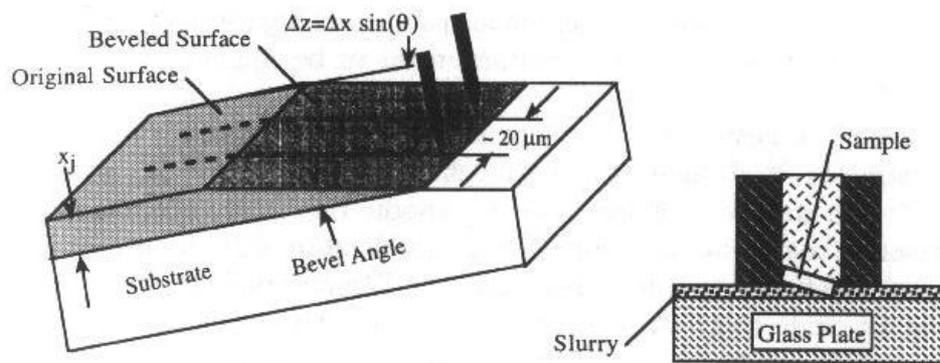


圖 3-7：展阻量測及其試片準備 [30]。

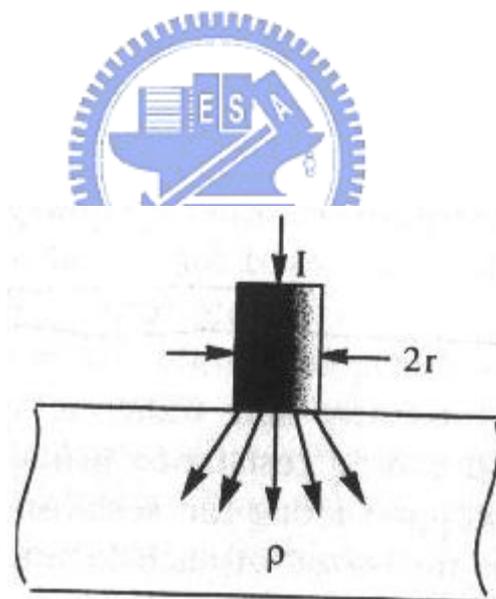


圖 3-8：以圓柱形金屬探針量測展阻 [30]。

第四章 表面電位與表面濃度

欲利用 KFM 進行量測載子濃度，必須先將直接量得的表面電位對於實際表面濃度作適當校正，求其彼此關係。此一關係的建立即為本章所將探討的主要內容。

4.1 表面電位量測

表面電位的量測是利用平面 n^+p 及 p^+n 兩種試片進行的。由於 p 型區域具有較高的表面電位，而 n 型區域的表面電位較低，故可利用 KFM 量測得到此兩者之間的表面電位差。圖 4-1, 4-2 分別是 n^+p 及 p^+n 試片的表面電位影像與電位差。以 n^+p 試片為例，p 型區域為未受離子植入區域，其表面濃度即為 p 型基板原有濃度；而 n 型區域為植入 As^+ 所形成，其劑量愈高，則表面濃度愈大，表面電位愈低，而與 p 型區域的表面電位差亦愈大。同理， p^+n 試片的 p 型區域受 BF_2^+ 離子植入，劑量愈高，與未受植入的 n 型區域的表面電位差就愈大。

利用 KFM 量測以一系列劑量進行離子植入所製作的平面 pn 區域試片，可分別得到 pn 區域之間的表面電位差。圖 4-3 為 n^+p 及 p^+n 試片植入劑量與表面電位差值的關係，可發現植入劑量愈大，與未植入的基板之間的表面電位差就愈大。

4.2 表面濃度量測

離子植入區的表面濃度，為分別利用前章所述的 SRP、C-V 法，及 SIMS 分析等方法對 n^+n 及 p^+p 試片加以量測。

圖 4-4 是利用位於交通大學奈米中心的 SRP 系統所得到載子縱深分佈，量測時試片研磨 34' 斜角。圖 4-5 則為利用漢磊科技公司的 SRP 系統量

測的結果，研磨角度為 $1^{\circ}09'$ 。兩者均是以 SSM 150 Spreading Resistance System 展阻量測儀進行量測。

在上述載子濃度分佈中，可發現在深度大約 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 處具有最大載子濃度，往表面方向則逐漸遞減。這可能是由於探針在斜面上氧化物與矽的介面附近量測時，由於該處氧化層極薄，易為探針所刺穿，造成表面附近資訊的失真。因此，在讀取表面濃度值時，應排除此效應，取縱深分佈中的最大載子濃度為表面濃度。

用以進行 C-V 量測的電容結構製作方式，首先以 PECVD 在 $350\ ^{\circ}\text{C}$ 沈積 $48\ \text{nm}$ 厚的氧化物作為介電層，再以熱阻絲蒸鍍系統(thermal evaporation coater)進行 $500\ \text{nm}$ 厚的鋁金屬蒸鍍，並經微影與濕式蝕刻(wet etching)製作金屬電極，再於試片背面蒸鍍鋁作為背電極，完成 MOS 電容結構。量測所用為直徑 $270\ \mu\text{m}$ 的圓形電容，以 Agilent 4284A，配合針測台(probe station)進行 $100\ \text{kHz}$ 的高頻 C-V 量測。最後第三章所述方式計算載子濃度分佈，結果如圖 4-6。

在利用 C-V 法所得的載子濃度分佈中，在表面具有最高的數值，隨著深度愈深而漸減，直到趨近於穩定值。這是由於 C-V 曲線由累積(accumulation)區進入空乏區時，斜率漸增的情況所造成的，故在此範圍內的計算結果，並不能代表真正的載子濃度。而前章所提到的 Debye 長度及 Thomas-Fermi 長度的限制，亦使得 C-V 量測結果必須在至少 $3L_D$ 或 $3L_{TF}$ 深度以外才能適用，如本實驗中各試片依濃度高低， L_D 值約略在 $0.9\ \text{nm}$ 到將近 $4\ \text{nm}$ 不等，而只有在 BF_2^+ 植入，劑量為 5×10^{15} 及 $2\times 10^{15}\ \text{cm}^{-2}$ 的試片， L_{TF} 才大於 L_D ，為 $0.92\ \text{nm}$ 。雖然 C-V 法有上述的限制，使得無法直接量測表面濃度，但對於本實驗的試片而言，這些限制的影響範圍約為數個奈米，在此範圍內的真實載子濃度應不致於有過大變化，仍可代表表面載子濃度，因而讀取表面以下適當深度的數值作為表面濃度，如圖 4-6 所標記。

在 SIMS 分析方面，圖 4-7 為於國家奈米元件實驗室(NDL)進行分析所得到的摻雜元素縱深分佈，所用儀器為 Cameca IMS-5F。圖 4-8 為利用清華大學貴重儀器中心 SIMS 分析所得的結果，所用儀器為 Cameca IMS-4F。圖 4-9 為利用閎康科技公司 SIMS 所得的結果，所用儀器為 Cameca IMS-5F。均是以 Cs^+ 離子源偵測 As 元素，以 O_2^+ 離子源偵測 B 元素，並以相同條件下標準試片的結果進行定量。

在 SIMS 分析結果中，靠近表面的摻雜濃度往往會急遽上升或下降，這是由於 SIMS 分析的表面效應所造成的，使得距離表面約 20 nm 深度的數值不能代表真實的摻雜濃度 [35]。因此必須排除此一範圍，讀取穩定之後的數值作為表面濃度。

除了表面濃度的量測，圖 4-10 為利用四點探針(four-point probe)分別量測縱深結構為 n^+p , p^+n , n^+n , p^+p 四種試片的片電阻(sheet resistance, R_s)。在 n^+p 及 p^+n 試片中，由於 pn 接面的存在，使得量測的有效範圍僅為高濃度區域，其厚度為接面深度，故可見片電阻值隨著植入劑量的減少而快速上升。而 n^+n 及 p^+p 試片並無接面的存在，所量得的阻值為高濃度區域與下方基板等效電阻並聯的結果，故其值較小，並隨著植入劑量的減少而上升，以基板片電阻值為上限。在本實驗所用的矽基板中，p 型基板的片電阻值為 $397 \Omega/\text{sq}$ ，n 型基板為 $40.8 \Omega/\text{sq}$ ，因此 n^+n 及 p^+p 試片各植入劑量的片電阻值變化幅度較小。

綜合以上所述，將片電阻值、各組表面濃度值，SRP 與 SIMS 的濃度分佈對深度的積分值，以及 C-V 法所用的 L_D 或 L_{TF} 值，列於表 4-1, 4-2。

SRP 是利用材料導電性進行的載子濃度量測方法。其結果易受到試片製作與量測系統的影響。在本實驗中，利用 SRP 量得濃度值皆低於 SIMS 所得的結果，而積分值亦低於植入劑量，且濃度愈低差異愈顯著，這可能是因為研磨後的裸露試片受到表面電荷的影響，產生載子空乏的現象，也

正因為如此，在愈低濃度的情況下，受到的影響愈嚴重。由於 SRP 所得的載子濃度於低劑量試片中明顯偏低，故 SRP 應以高濃度所得的結果較為可靠。

此外，兩組 SRP 結果之間也有所差異，譬如在漢磊科技的結果中，As⁺ 植入劑量 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的試片，深度可達 0.5 μm 以上，而 BF₂⁺ 植入劑量 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的試片，深度亦達 0.8 μm ，較另一組結果及各組 SIMS 結果均高出甚多，顯見並不合理。比較各個試片的載子分佈，其輪廓形狀亦相差甚多，而峰值位置的趨勢也未完全合理，尤以交通大學的結果差異最明顯。由此可知，以 SRP 量測載子濃度分佈，其本身存在著相當多的誤差。因為 SRP 試片製作時必須研磨斜面，而研磨所用的鑽石膏、技術的優劣、表面因研磨而損傷的程度，皆會造成程度不一的影響。而在量測系統方面，展阻探針的特性，例如與試片表面的接觸面積、針刺深度，皆使量得的阻值有所變化，影響最後的結果。諸如上述這些操作上的變異，都是造成結果差異的可能因素。

C-V 法則是利用半導體的空乏特性進行載子濃度量測，可得空乏區域內的載子濃度。其濃度愈低，愈容易形成空乏，其寬度也愈大，在 C-V 特性上表現出明顯的空乏電容效應。而在本實驗中，利用此方式量測植入區域濃度，由於待測濃度較高，對於植入劑量在 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 以上的試片而言，於所加偏壓範圍內，不易形成空乏區，故至多僅量得數奈米深的載子濃度，且所得濃度差異不大。如欲量得更深位置的濃度，必需加大所施加的偏壓，但其所造成的大電場易使 MOS 結構中的氧化層產生崩潰(breakdown)，導致電容結構的損壞。

而 SIMS 分析則是量測雜質濃度，與前述二者所量測的對象不同。在本實驗的 SIMS 結果中，可發現在 n⁺n 試片中，清大貴儀所得的濃度偏高，且積分值嚴重高於植入劑量，應不為真實的摻雜濃度。而 NDL 所得的濃度與

積分值偏低，閔康的結果則介於兩者之間，其積分值與植入劑量較接近，應較為可靠，此誤差來源應是分析定量時所用相對感度因子的差異所造成的。而 p^+p 試片的結果亦有所出入，但之間差異不大。而在雜質深度方面，NDL 所得的結果，均較其他二者為淺。此外，試片於離子植入後雖經高溫退火，但並非所有雜質均能活化完全，尤以高植入劑量的試片，其雜質濃度已高於固態溶解度(solid solubility)，使得 SIMS 結果未能完全代表真實載子濃度。

除此之外，比較積分值與植入劑量，可發現除了清大貴儀的 SIMS 結果以外，濃度積分值皆小於植入劑量，造成差異的原因除了濃度量測的誤差外，亦有可能是離子植入時的劑量誤差所造成。

總而言之，就 SRP 及 SIMS 分析的結果而言，可發現無論是植入 As^+ 或是 BF_2^+ ，其植入劑量愈高則濃度愈高。此外亦可發現較高的植入劑量，會造成較大縱深分佈的趨勢。這可能是由於較高的植入劑量會在晶格(lattice)中造成較高密度的缺陷，如空位(vacancy)及間位(interstitial)，會導致擴散率(diffusivity)的提高，進而在高溫退火的過程中增強摻雜元素的擴散，造成較深的分佈 [36]。此外，較高劑量所造成的高摻雜濃度與為摻雜區域之間具有較高濃度梯度，亦為使擴散效應增強的原因之一。

此外，由於表面濃度結果需與 pn 區域試片利用 KFM 所量得的表面電位差作比較。因此，除量測離子植入區域的濃度外，亦需量測未受離子植入區，即晶圓基板本身的濃度。由於基板本身具有均勻濃度，可由四點探針所量得的片電阻值，經厚度修正求得電阻率，即可得出濃度。由四點探針所量得的片電阻 R_s

$$R_s = \frac{\pi V}{\ln 2 I}, \quad (4.1)$$

與四點探針量測電阻率的公式

$$\rho = 2\pi SF \left(\frac{V}{I} \right). \quad (4.2)$$

可得

$$\rho = 2\ln(2)SFR_s = 1.386SFR_s, \quad (4.3)$$

其中，S 為探針針距，F 為厚度修正參數

$$F = \frac{T/S}{2\ln[\sinh(T/S)/\sinh(T/2S)]}, \quad (4.4)$$

其中，T 為試片厚度。由此可計算電阻率 [37]，並換算濃度。

此外，由於 SRP 的量測結果在深度達一定程度後，無論植入劑量為何均趨近於某一較低的數值，可見已超過離子植入與雜質擴散所能到達的深度，因此可由該處的載子濃度得知基板濃度。而由晶圓的電阻率規格，亦可分別得出 p 型與 n 型晶圓的基板濃度。上述基板濃度結果如表 4-3，可見 p 型基板濃度約為 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ，而 n 型基板則為 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 左右。

4.3 表面電位與表面濃度關係

結合表面電位差($\Delta\phi_s$)與表面濃度(C_s)量測結果，可發現兩者的對數值具有線性關係。首先，將表面電位差分別對已有的各組表面濃度值以關係式

$$\log(C_s) = A + B \log(\Delta\phi_s) \quad (4.5)$$

作適配，求其線性關係，如圖 4-11 所示。以 n^+p 試片為例，清大貴儀 SIMS 所得的濃度值明顯偏高，而 SRP 所得的濃度值於低濃度時偏低，加上 C-V 法所得濃度值在高濃度區域有趨近飽和的現象，使得各組線性關係之間存在相當大的差異，甚至達到兩個數量級以上。 p^+n 試片亦有類似情況，於高濃度的誤差將近一個數量級，於低濃度時則將近兩個數量級。

此外，若將所有濃度值作出一條線性關係的適配，如圖 4-12 所示。但

由於在原有的各組數據中，並非每個濃度值都能代表真實的載子濃度。如低濃度時的 SRP 濃度值明顯偏低，高濃度時的 C-V 法所得濃度有趨近飽和的現象，且 SIMS 亦未能完全代表載子濃度，因此有必要將這些濃度值作適當取捨。在此捨去低濃度時的 SRP 數值，高濃度時的 C-V 與 SIMS 數值，重新作線性適配，如圖 4-13 所示。由於選取了較為合理的表面濃度數據，所以此結果應較能夠代表表面濃度與表面電位差的實際關係。

(4.5)式中的係數 A, B 如表 4-4 所示。經由此一關係，對於 p 區域濃度約為 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的 n^+p 試片，可藉由量測兩區域的表面電位差，得到 n 區域的表面濃度。亦可在 n 區濃度約為 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 p^+n 試片中，藉由量測表面電位差，得到 p 區域的表面濃度。

在第二章，曾對 KFM 量測原理作了探討，依照圖 2-2 所示，以 KFM 量測 pn 區域電位的原理，理論的電位差應相當於 pn 接面的內建電位(built-in potential, V_{bi})



$$V_{bi} = \frac{pn}{n_i}, \quad (4.6)$$

其中，p, n 分別為 p 型與 n 型區域的多數載子濃度， n_i 為本質載子密度 (intrinsic carrier density)。依本實驗的試片條件計算出的內建電位應為 0.7~0.8 V 左右，但實際利用 KFM 量測 pn 區域所得到的表面電位差值卻小於此數值甚多。而且由圖 4-3 之中可以發現，表面電位差與表面濃度兩者的對數值之間呈現線性關係。但理想的 pn 接面內建電位與兩區域多數載子濃度乘積的對數成正比，若固定其中一區域的濃度，則理論的電位差($\Delta\phi_B$)應與另一區域的濃度呈現半對數關係

$$\log(C_S) = D + E(\Delta\phi_B), \quad (4.7)$$

顯然與實驗所得的(4.5)式有所不同，兩式相比，可得到 $\Delta\phi_B$ 與 $\Delta\phi_S$ 之間的數學關係為

$$A + B \log(\Delta\phi_S) = D + E(\Delta\phi_B), \quad (4.8)$$

或寫作

$$\Delta\phi_S = F + G \cdot 10^{\Delta\phi_B} = F + G' \exp(\Delta\phi_B). \quad (4.9)$$

理論的 pn 接面內建電位，一般是考慮塊材(bulk)內部的接面，計算接面形成時，載子在垂直於接面的方向移動，所造成空間電荷(space charge)的程度，與表面 pn 接面的情況未必相同。對於矽表面而言，往往具有表面態存在，而這些表面態分為施體型(donor type)與受體型(accepter type)兩種，前者若位於費米能階以上，會因釋放電子而帶正電性；後者若位於費米能階以下，則因捕捉電子而帶負電性。假設表面態因捕捉或釋放電子而帶有表面電荷 Q_{ss} ，則半導體在表面附近會產生空間電荷 Q_{sc} ，以補償表面的電荷，使 $Q_{ss} + Q_{sc} = 0$ 滿足，維持電中性 [38]。表面附近的能帶也因此而彎曲，造成真空能階與費米能階的差值（即所量得的表面電位，見圖 2-2）改變。以 p^+n 接面為例，假設在塊材內部的理想情況下， p^+ 與 n 型區域真空能階與費米能階的差分別為 ϕ_p 及 ϕ_n ，則電位差 $\Delta\phi_B$ 應為

$$\Delta\phi_B = (\phi_p - \phi_n). \quad (4.10)$$

而在受表面態影響的情況下，就 p^+ 區域而言，費米能階較靠近價電帶邊界，若兩種表面態在能帶中均勻分佈，則帶正電的施體型表面態將多於帶負電的受體型表面態，使表面淨電荷量 Q_{ss} 為正，使表面附近的電洞產生空乏，能帶向下彎曲。而 n 型區域則恰好相反，由於費米能階較靠近傳導帶邊界，使其主要受到帶負電的受體型表面態影響， Q_{ss} 為負，而造成電子空乏，使能帶向上彎曲，如圖 4-14 所示意。分別假設 p^+ 與 n 型區域表面能帶向下或向上彎曲的量為 $\Delta\phi_p$ 與 $\Delta\phi_n$ ，則表面電位差為

$$\begin{aligned} \Delta\phi_S &= (\phi_p - \Delta\phi_p) - (\phi_n - \Delta\phi_n) = (\phi_p - \phi_n) - (\Delta\phi_p + \Delta\phi_n) \\ &< (\phi_p - \phi_n) = \Delta\phi_B. \end{aligned} \quad (4.11)$$

由上式可知，由於 p^+ 與 n 型區域在受到表面態的影響時均產生載子空乏，

而使得表面費米能階的位置都趨向能帶中間，因而造成了表面電位差小於理論值甚多的情況。

此外，對於 n 型濃度為定值的情況下， $\Delta\phi_n$ 為定值，則 p^+ 區域濃度變化時，表面態的效應僅造成 $\Delta\phi_p$ 的改變。而 p^+ 區域的載子濃度 p 與費米能階 E_{fp} 的關係為

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_i - E_{fp}}{kT}\right) \propto \exp\left(-\frac{E_{fp}}{kT}\right), \quad (4.12)$$

其中， E_i 為本質半導體的費米能階。進一步推導可得到

$$\frac{dp}{dE_{fp}} \propto \exp\left(-\frac{E_{fp}}{kT}\right) \quad (4.13)$$

$$\Delta E_{fp} \propto -\Delta p \cdot \exp\left(\frac{E_{fp}}{kT}\right). \quad (4.14)$$

在這裡， ΔE_{fp} 為受到表面態影響時，費米能階在能帶結構中的改變量，與 $\Delta\phi_p$ 相當。代入(4.11)式，可得

$$\begin{aligned} \Delta\phi_s &= (\phi_p - \phi_n - \Delta\phi_n) - \Delta\phi_p = (\phi_p - \phi_n - \Delta\phi_n) + a \cdot \exp\left(\frac{E_{fp}}{kT}\right) \\ &= b + a \cdot \exp\left(\frac{E_{fp} - E_{fn}}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{E_{fn}}{kT}\right) = b' + a' \exp\left(\frac{\Delta\phi_B}{kT}\right). \end{aligned} \quad (4.15)$$

其數學形式與(4.9)式類似，亦與實驗中所觀察到的結果相符合。

如上所述，KFM 所量得的表面電位差確實因為受到許多非理想因素的影響，而使得與理論值之間有所差異。在無法排除這些因素的情況下，如欲將 KFM 應用在載子濃度的量測，至少必須固定這些非理想因素的影響，使得所量到的表面電位差與表面濃度之間具有穩定的關連性，再透過實驗建立此二者之間的關係，將 KFM 應用於載子濃度的量測。

由於 KFM 所量的表面電位差為相對數值，因此若欲量測完全未知試片的表面濃度，必須與適當的參考電位加以比較，一般使用具有穩定電位的情性金屬，如金或鉑，作為參考電位，量測待測試片與金屬之間的表面電

位差 [39]。

而對於矽的 pn 區域試片而言，若已知某一區域具有低載子濃度，則可量測其他區域與該低濃度區域的表面電位差。由圖 4-3，在低劑量區，表面電位差的變化幅度不大，可知 KFM 所量得的表面電位對於低濃度並不敏感，可忽略該低濃度區與本實驗所用基板之間因載子濃度不同所造成的表面電位差異，利用本章所得的校正關係，換算高濃度區域的載子濃度。

圖 4-15 為利用實際 KFM 量得表面電位差，以之前所述線性關係換算載子濃度。圖(a)為經 20 KeV, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ As}^+$ 離子植入，並以 950 °C, 30 min 活化的 n^+ 區域在表面附近向低濃度的 p 型區域側向擴散的情況。而圖(b)為經 BF_2^+ 植入並活化的 p^+ 區域在表面附近向低濃度的 n 型區域側向擴散的情況，植入能量、劑量與退火條件與圖(a)相同。可發現採用不同的換算關係往往得到相當大的結果差異，而側向擴散長度分別為 0.4 μm 及 1 μm 左右。側向擴散長度雖無法直接測量，但依經驗約為縱向擴散深度的 0.7 倍左右 [40]。同樣條件下的試片，參考 SIMS 所得的縱向擴散深度約為 0.2 μm 及 0.5 μm (圖 4-7 ~ 4-9)，而實際側向擴散應低於此長度。由此可知，KFM 所得的側向擴散長度較實際還長，其結果未必能夠真實反映該區域的載子濃度變化，其可能原因可由下列幾點來進行探討。首先，針對目前的 KFM 系統而言，例如所用的鎖相放大器，其輸出數值是將前一段時間的偵測訊號積分平均的結果，如此一來，當量測一個實際上突變的邊界時，往往只能得到比較平滑的漸變輪廓。若欲改善這樣的現象，可將積分時間減少，但同時卻會造成雜訊的增加，影響表面電位掃描影像的清晰度。再則，系統內部訊號處理的響應特性，也是造成差異的原因，雖然在本論文第二章曾經就回饋控制電路進行改善，但仍無法得到完全的改善。此外，探針的特性也是造成差異的原因。如以全新的 PtIr 探針而言，針尖等效半徑約為 20 nm，而在使用一段時日之後，針尖會產生磨損的現象，使得針尖的等效半

徑增加，甚至可達數百奈米。如此一來，除了損失空間解析度，也會造成等效探測面積的增加，致使在某一位置所量得的電位數值，實際上是由相當範圍內的試片表面電位所共同決定。欲排除此效應，可選用針尖等效半徑較小的探針進行量測，但隨著針尖的縮小可能會導致訊號的弱化與雜訊的增加，則是必須加以考慮的問題。

因此，本章雖已建立了表面電位差與載子濃度之間的換算關係，但在量測擴散所形成的載子濃度變化時，目前所用的量測系統仍有許多不足之處。將可針對造成差異的確切原因加以檢討，並作進一步的改善，以強化 KFM 系統量測載子濃度輪廓的功能。

綜而言之，本章利用 KFM 表面電位差的量測結果，求得與表面濃度之間的校正關係，以期應用在表面電位差對表面濃度的轉換。但由於各組表面濃度量測的差異，使得所求出的校正關係也具有誤差。此外，KFM 所量得的表面電位差低於理論值甚多，且對於低濃度而言，表面電位對於濃度變化並不敏感，且僅有數個 mV 左右，很容易受到雜訊的影響。這些因素，皆使得 KFM 的適用範圍受到限制。

As ⁺ implant dose (cm ⁻²)		5×10 ¹⁵	2×10 ¹⁵	1×10 ¹⁵	2×10 ¹⁴	5×10 ¹³	1×10 ¹³
Sheet resistance (Ω/sq.)	n ⁺ p	46.22	88.76	155.5	905.8	2114	4680
	n ⁺ n	19.66	26.59	29.91	35.22	35.28	36.37
交大 SRP	conc. (cm ⁻³)	7.6×10 ¹⁹	4.9×10 ¹⁹	2.2×10 ¹⁹	9.5×10 ¹⁷	4.5×10 ¹⁷	4.0×10 ¹⁶
	integration(cm ⁻²)	1.4×10 ¹⁵	4.4×10 ¹⁴	1.9×10 ¹⁴	5.6×10 ¹²	3.9×10 ¹²	4.5×10 ¹¹
漢磊 SRP	conc. (cm ⁻³)	4.9×10 ¹⁹	3.3×10 ¹⁹	6.8×10 ¹⁸	2.6×10 ¹⁷	8.3×10 ¹⁶	1.7×10 ¹⁶
	integration (cm ⁻²)	1.64×10 ¹⁵	4.47×10 ¹⁴	9.31×10 ¹³	2.40×10 ¹²	1.02×10 ¹²	2.42×10 ¹¹
C-V method	conc. (cm ⁻³)	2.1×10 ¹⁹	2.0×10 ¹⁹	1.8×10 ¹⁹	1.4×10 ¹⁹	6.4×10 ¹⁸	1.3×10 ¹⁸
	L _D or L _{TF} (nm)	0.90	0.92	0.97	1.10	1.63	3.17
NDL SIMS	conc. (cm ⁻³)	1.0×10 ²⁰	4.8×10 ¹⁹	2.4×10 ¹⁹	6.7×10 ¹⁸	2.3×10 ¹⁸	2.0×10 ¹⁸
	integration (cm ⁻²)	1.32×10 ¹⁵	4.08×10 ¹⁴	1.63×10 ¹⁴	3.67×10 ¹³	1.29×10 ¹³	5.65×10 ¹²
貴儀 SIMS	conc. (cm ⁻³)	1.3×10 ²¹	4.7×10 ²⁰	3.0×10 ²⁰	3.3×10 ¹⁹	2.4×10 ¹⁹	3.3×10 ¹⁸
	integration (cm ⁻²)	1.60×10 ¹⁶	4.88×10 ¹⁵	2.35×10 ¹⁵	2.02×10 ¹⁴	1.64×10 ¹⁴	2.48×10 ¹³
閔康 SIMS	conc. (cm ⁻³)	3.0×10 ²⁰	1.3×10 ²⁰	6.4×10 ¹⁹	1.4×10 ¹⁹	5.0×10 ¹⁸	9.1×10 ¹⁷
	integration (cm ⁻²)	4.40×10 ¹⁵	1.23×10 ¹⁵	4.54×10 ¹⁴	8.91×10 ¹³	3.27×10 ¹³	8.02×10 ¹²

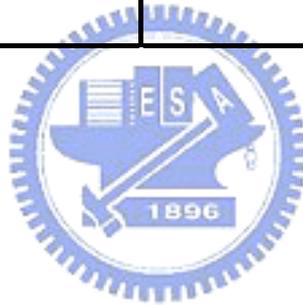
表 4-1：As⁺植入的片電阻值、表面濃度、濃度對深度的積分值以及 L_D 或 L_{TF} 值。

BF ₂ ⁺ implant dose (cm ⁻²)		5×10 ¹⁵	2×10 ¹⁵	1×10 ¹⁵	2×10 ¹⁴	5×10 ¹³	1×10 ¹³
Sheet resistance (Ω/sq.)	p ⁺ n	61.55	112.0	267.9	832.3	2301	5850
	p ⁺ p	38.82	78.54	129.0	221.3	296.7	332.7
交大 SRP	conc. (cm ⁻³)	6.5×10 ¹⁹	3.1×10 ¹⁹	1.9×10 ¹⁹	3.7×10 ¹⁸	5.9×10 ¹⁷	7.9×10 ¹⁶
	integration(cm ⁻²)	1.5×10 ¹⁵	4.8×10 ¹⁴	2.4×10 ¹⁴	4.9×10 ¹³	7.5×10 ¹²	53×10 ¹¹
漢磊 SRP	conc. (cm ⁻³)	4.0×10 ¹⁹	2.1×10 ¹⁹	1.4×10 ¹⁹	2.9×10 ¹⁸	3.3×10 ¹⁷	3.2×10 ¹⁶
	integration (cm ⁻²)	1.84×10 ¹⁵	6.73×10 ¹⁴	2.58×10 ¹⁴	5.43×10 ¹³	4.06×10 ¹²	4.98×10 ¹¹
C-V method	conc. (cm ⁻³)	2.1×10 ¹⁹	2.1×10 ¹⁹	1.7×10 ¹⁹	1.3×10 ¹⁹	5.6×10 ¹⁸	9.7×10 ¹⁷
	L _D or L _{TF} (nm)	0.92	0.92	1.00	1.15	1.75	3.77
NDL SIMS	conc. (cm ⁻³)	7.7×10 ¹⁹	5.2×10 ¹⁹	3.6×10 ¹⁹	1.6×10 ¹⁹	4.7×10 ¹⁸	1.0×10 ¹⁸
	integration (cm ⁻²)	2.44×10 ¹⁵	1.06×10 ¹⁵	5.46×10 ¹⁴	1.78×10 ¹⁴	4.91×10 ¹³	9.47×10 ¹²
貴儀 SIMS	conc. (cm ⁻³)	1.2×10 ²⁰	6.9×10 ¹⁹	4.6×10 ¹⁹	1.9×10 ¹⁹	5.1×10 ¹⁸	1.2×10 ¹⁸
	integration (cm ⁻²)	4.30×10 ¹⁵	1.65×10 ¹⁵	7.91×10 ¹⁴	2.48×10 ¹⁴	7.00×10 ¹³	1.35×10 ¹³
閎康 SIMS	conc. (cm ⁻³)	7.1×10 ¹⁹	4.2×10 ¹⁹	3.0×10 ¹⁹	1.3×10 ¹⁹	3.6×10 ¹⁸	9.1×10 ¹⁷
	integration (cm ⁻²)	2.48×10 ¹⁵	9.79×10 ¹⁴	4.66×10 ¹⁴	1.49×10 ¹⁴	4.24×10 ¹³	8.98×10 ¹²

表 4-2：BF₂⁺植入的片電阻值、表面濃度、濃度對深度的積分值以及 L_D 或 L_{TF} 值。

		p-substrate	n-substrate
Wafer spec.	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	15~25	2~4
	Concentration (cm^{-3})	$5.33 \times 10^{14} \sim 8.89 \times 10^{14}$	$1.14 \times 10^{15} \sim 2.34 \times 10^{15}$
4-point probe	Sheet resistance ($\Omega/\text{sq.}$)	397	40.8
	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	24.80	2.548
	Concentration (cm^{-3})	5.37×10^{14}	1.80×10^{15}
交大 SRP	Concentration (cm^{-3})	5×10^{14}	2×10^{15}
漢磊 SRP	Concentration (cm^{-3})	4.8×10^{14}	1.5×10^{15}

表 4-3：基板濃度。



(a)

n^+p	A	B
交大 SRP	12.32318	4.08347
漢磊 SRP	11.32379	4.46338
C-V method	16.89771	1.37829
NDL SIMS	15.82017	2.15429
貴儀 SIMS	15.36171	3.01921
閎康 SIMS	14.84928	2.97483
所有濃度值	14.42914	3.01225
選取的濃度值	15.93808	2.07342

(b)

p^+n	A	B
交大 SRP	14.52143	2.63326
漢磊 SRP	14.02947	2.81334
C-V method	17.13861	1.16163
NDL SIMS	16.54461	1.68156
貴儀 SIMS	16.49806	1.77654
閎康 SIMS	16.46516	1.68397
所有濃度值	15.86622	1.95838
選取的濃度值	16.77862	1.45934

表 4-4：(a) n^+p 試片的線性關係係數。(b) p^+n 試片的線性關係係數。

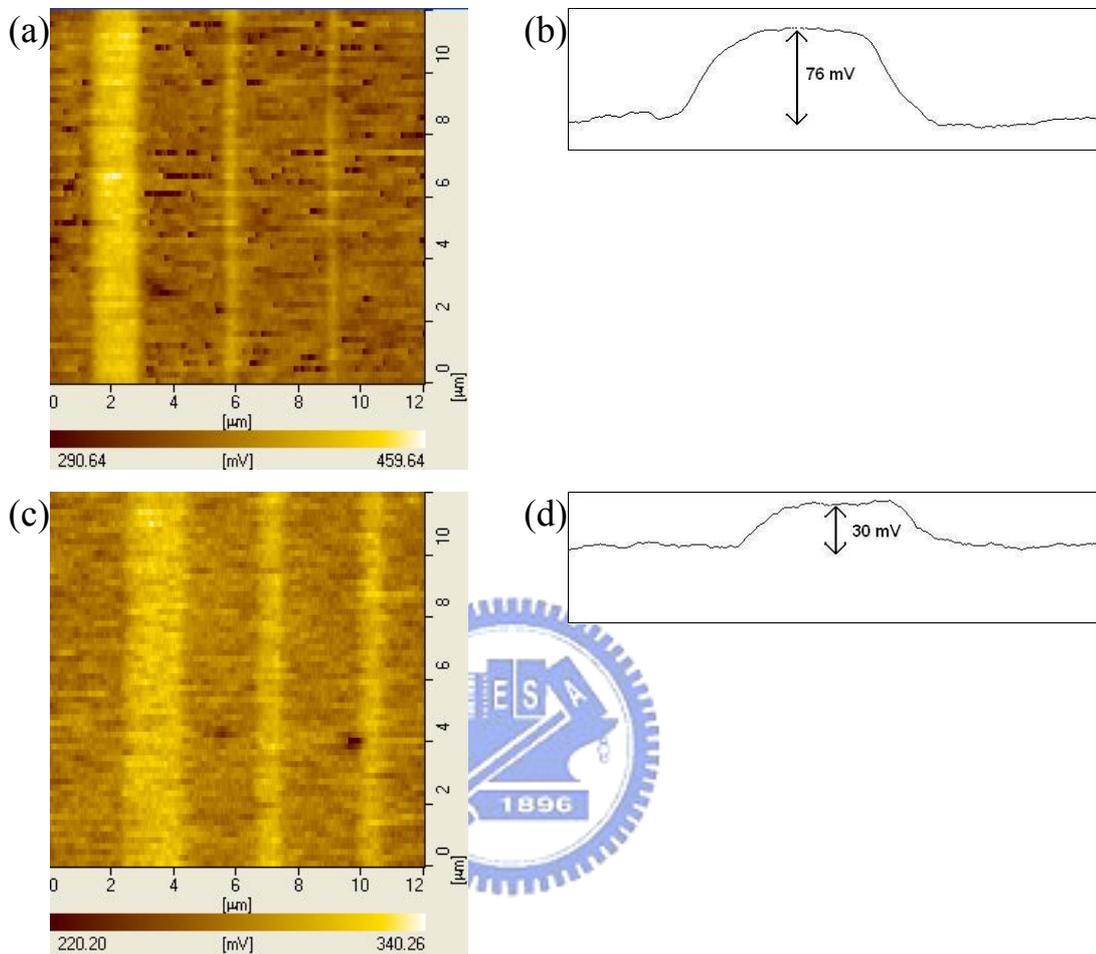


圖 4-1： n^+p 試片的表面電位。(a)植入劑量為 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的掃描影像，(b)得到表面電位差 76 mV。(c)植入劑量為 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的掃描影像，(d)得到表面電位差 30 mV。

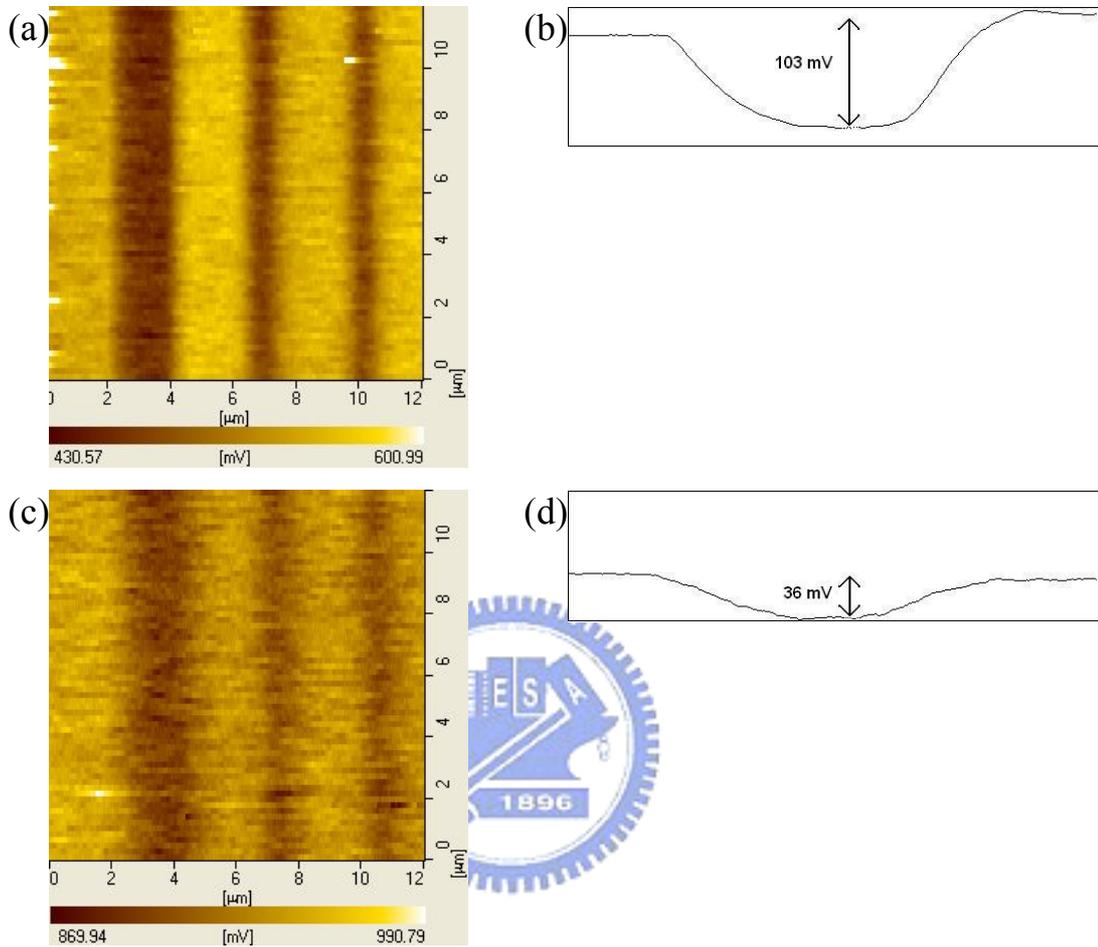


圖 4-2：p⁺n 試片的表面電位。(a)植入劑量為 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的掃描影像，(b)表面電位差 103 mV。(c)植入劑量為 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的掃描影像，(d)表面電位差 36 mV。

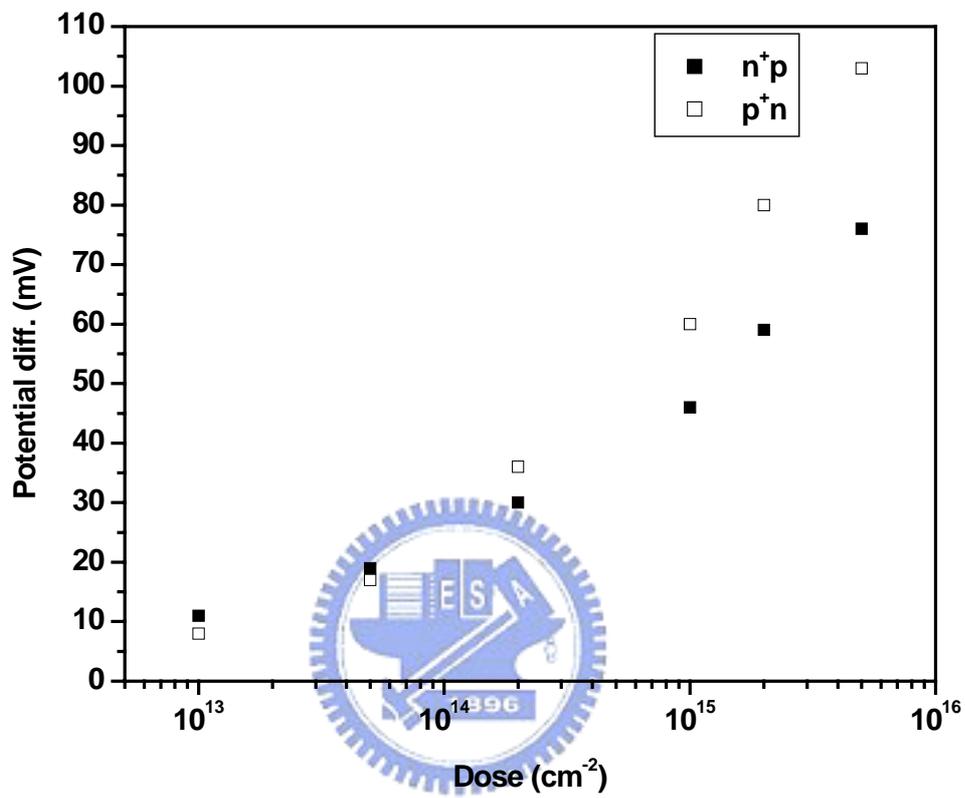
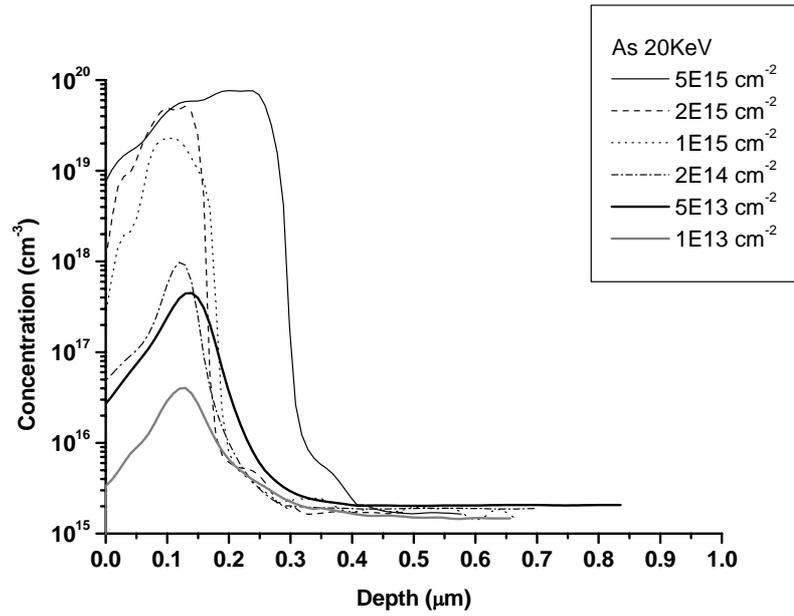


圖 4-3：試片植入劑量與所得表面電位的關係。

(a)



(b)

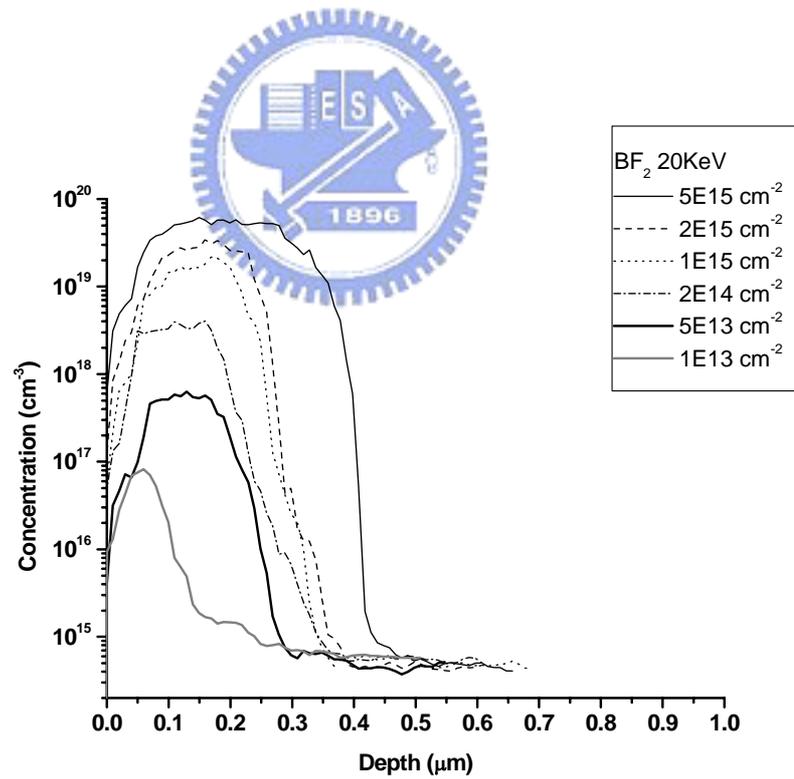


圖 4-4：SRP 量測結果(交通大學)。 (a) n^+n ，(b) p^+p 。

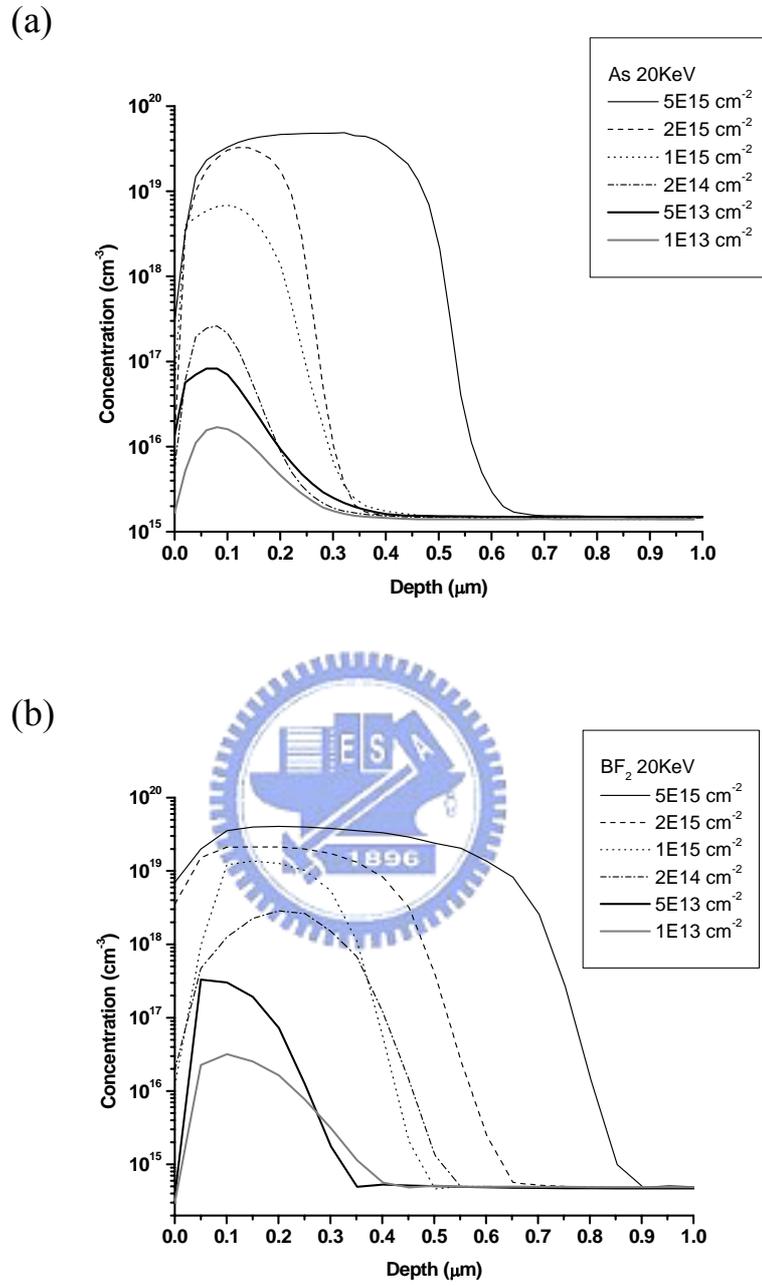
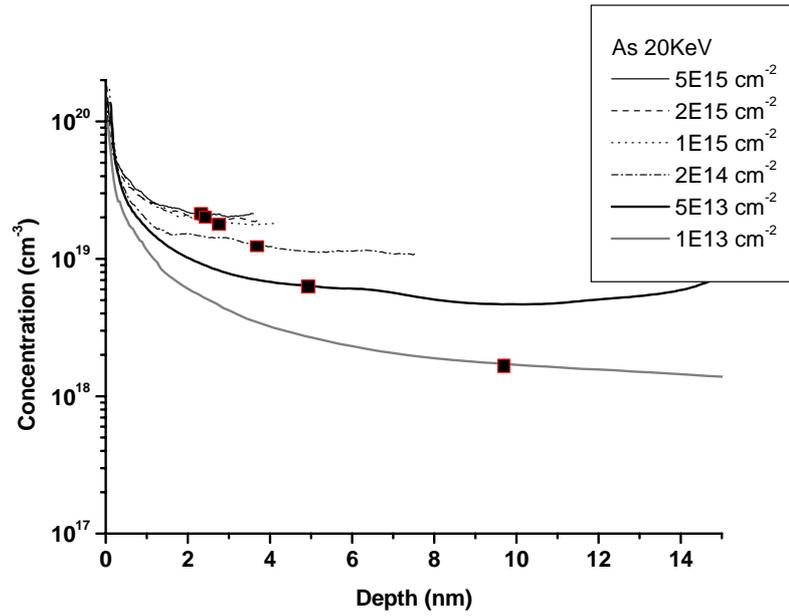


圖 4-5：SRP 量測結果(漢磊科技)。(a)n⁺n，(b)p⁺p。

(a)



(b)

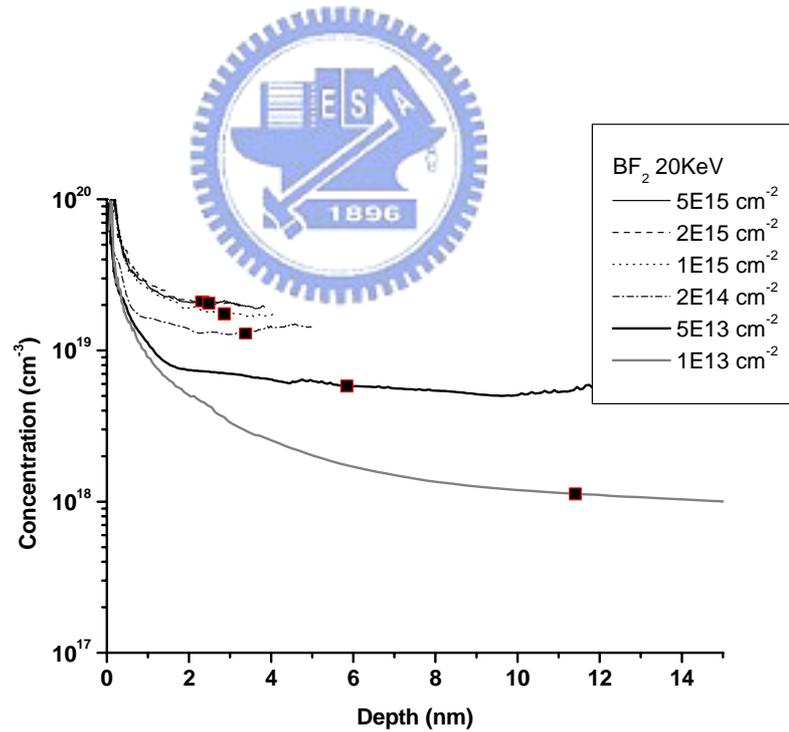
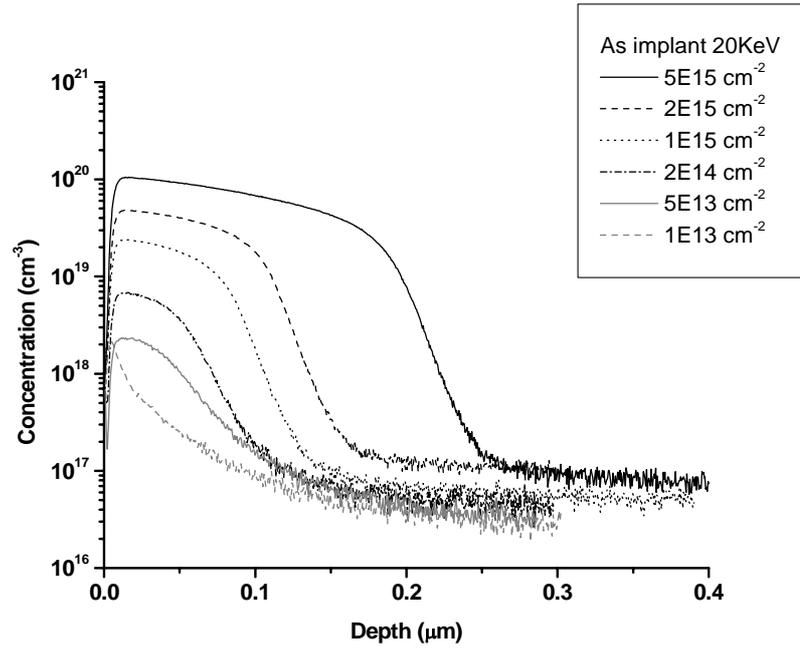


圖 4-6：利用 C-V 法得出的載子濃度。(a)As⁺植入，(b)BF₂⁺植入。

(a)



(b)

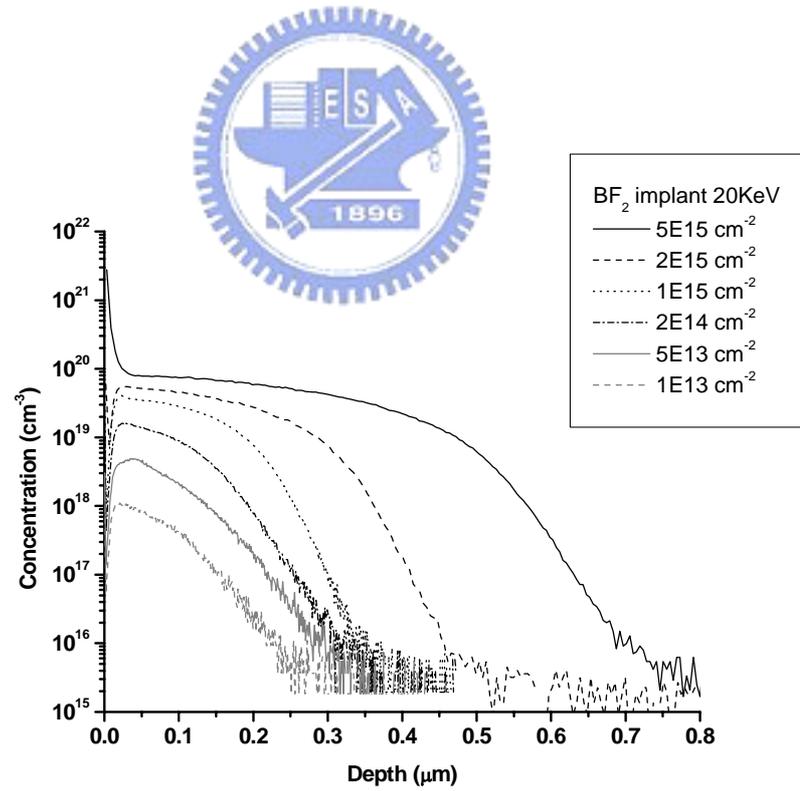
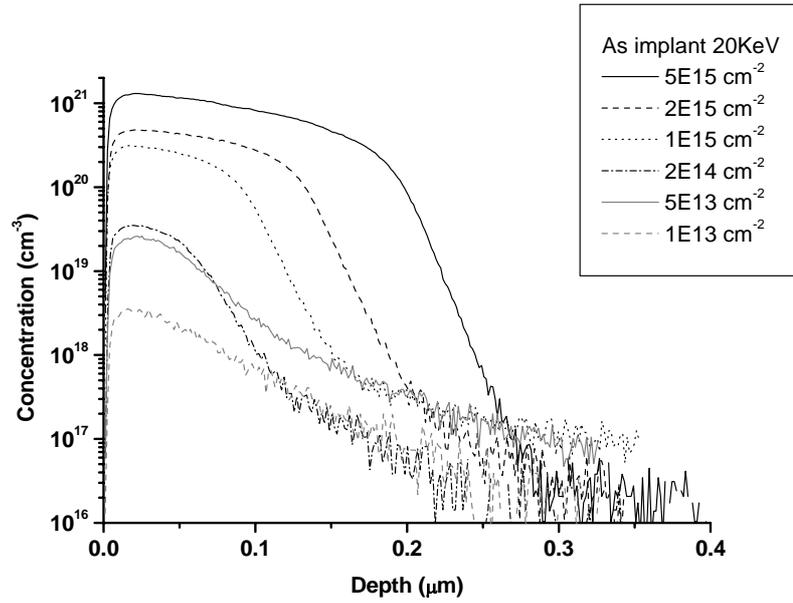


圖 4-7：SIMS 分析結果(NDL)。 (a)n⁺n， (b)p⁺p。

(a)



(b)

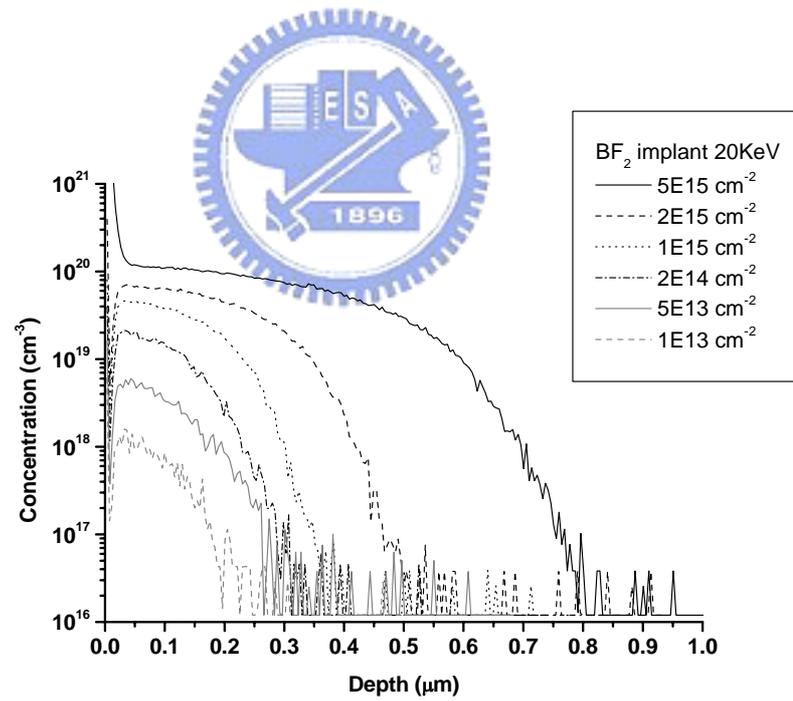
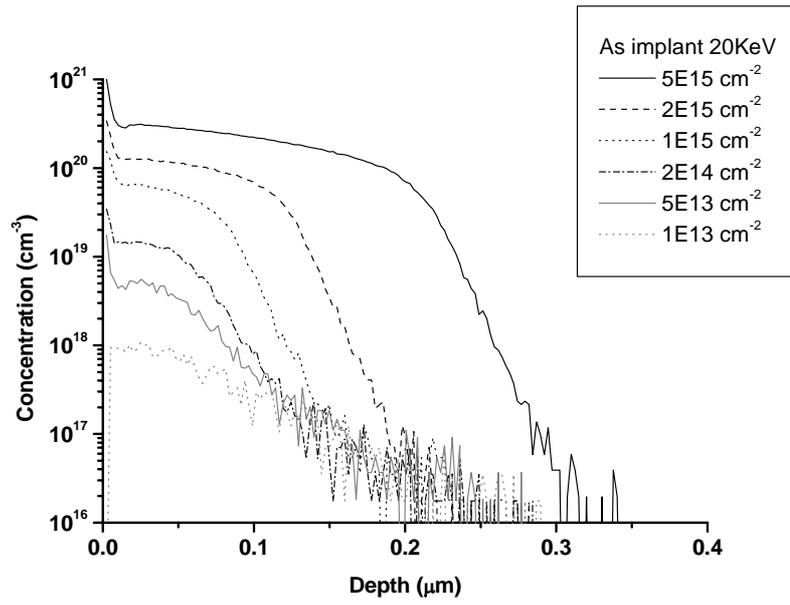


圖 4-8：SIMS 分析結果(清華大學貴重儀器中心)。(a)n⁺n，(b)p⁺p。

(a)



(b)

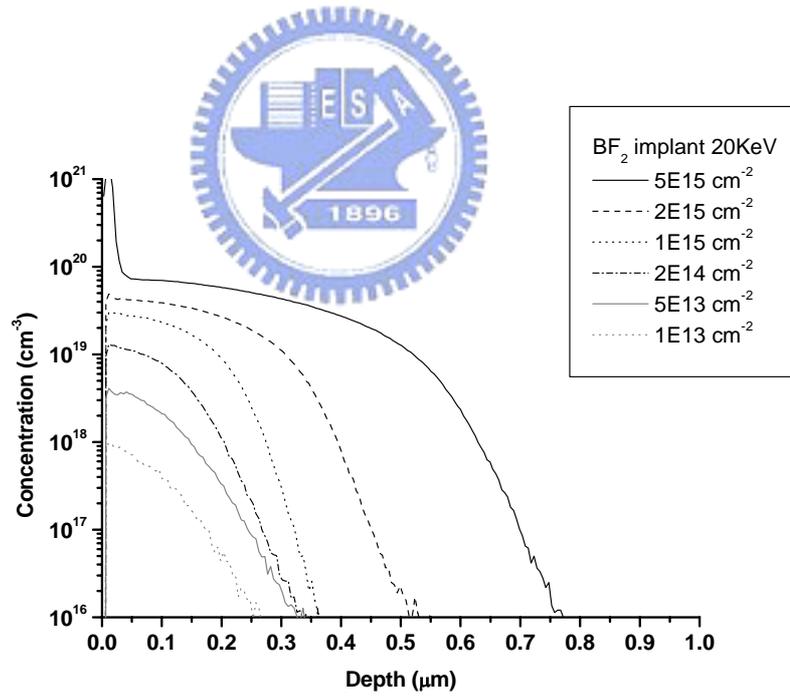
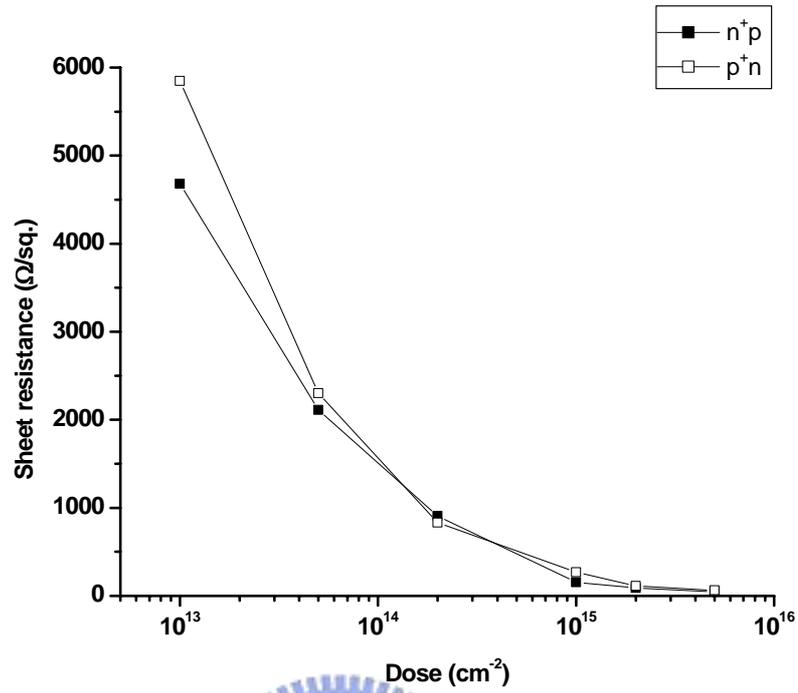


圖 4-9：SIMS 分析結果(閱康科技)。(a)n⁺n，(b)p⁺p。

(a)



(b)

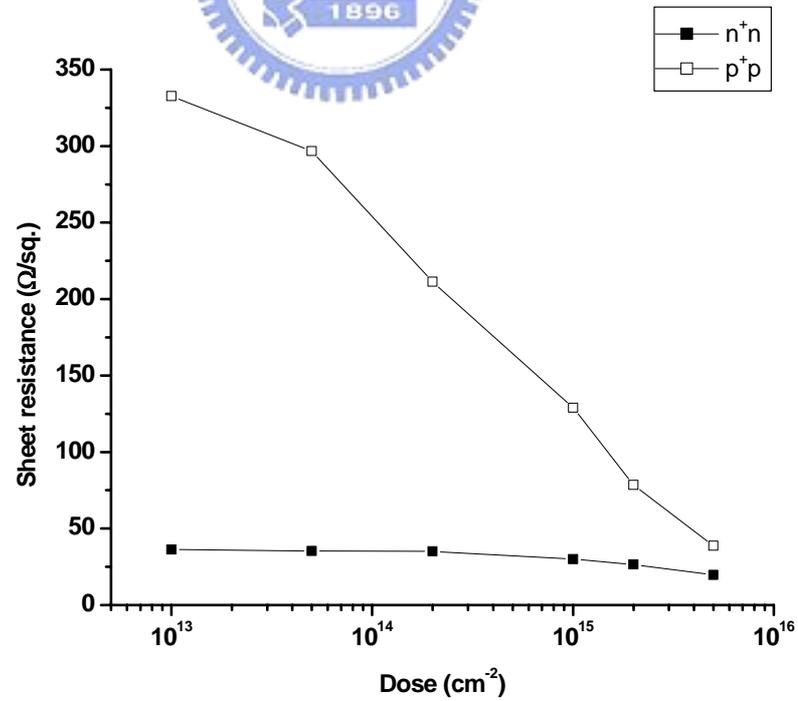


圖 4-10：(a) n^+p 及 p^+n 試片的片電阻值。(b) n^+n 及 p^+p 試片的片電阻值。

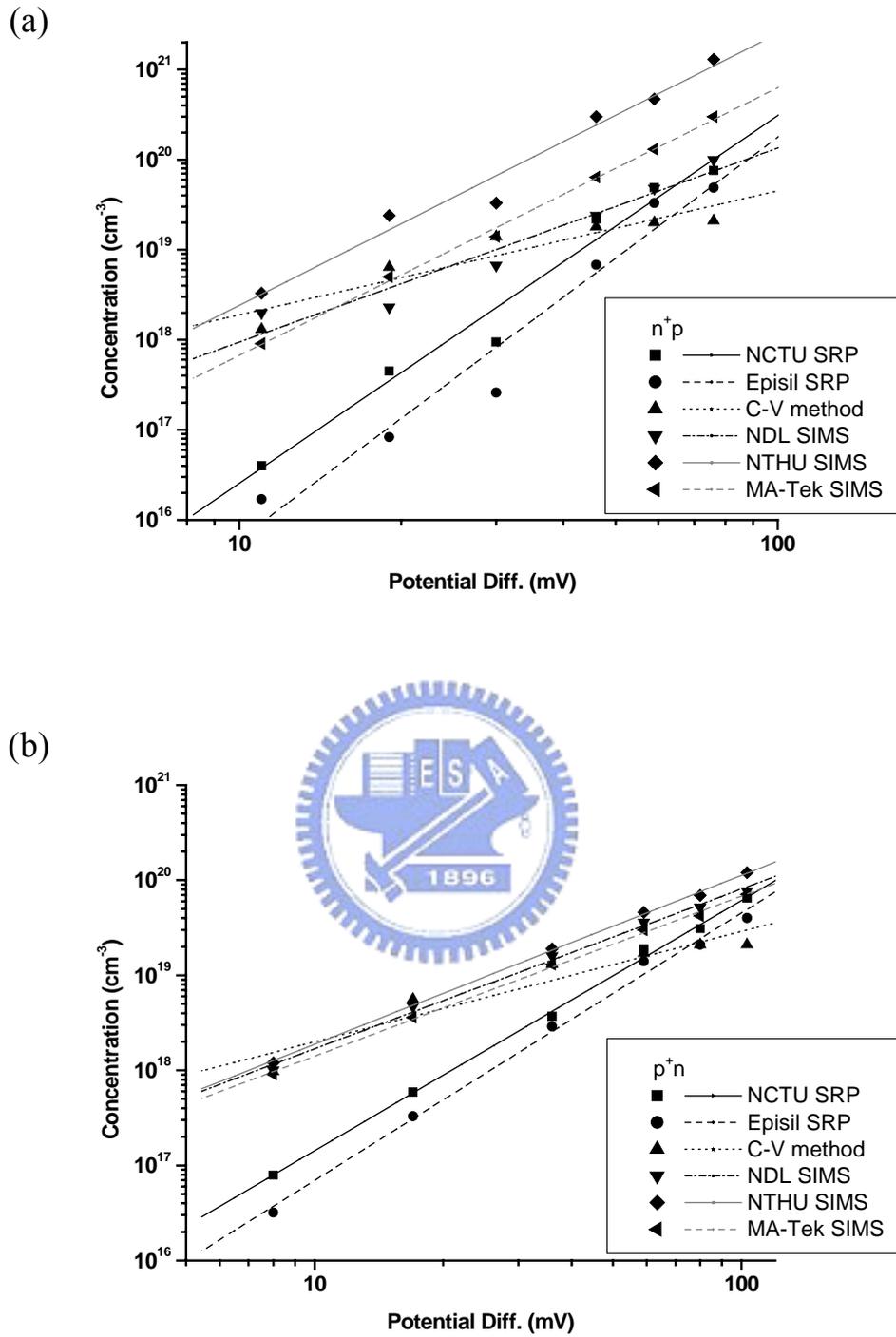


圖 4-11：表面電位差與各組植入區域表面濃度的關係^[註]。(a) n^+p ，(b) p^+n 。

^[註] NCTU：交通大學奈米中心，Episil：漢磊科技公司，NDL：國家奈米元件實驗室，NTHU：清華大學貴重儀器中心，MA-Tek：閎康科技公司。

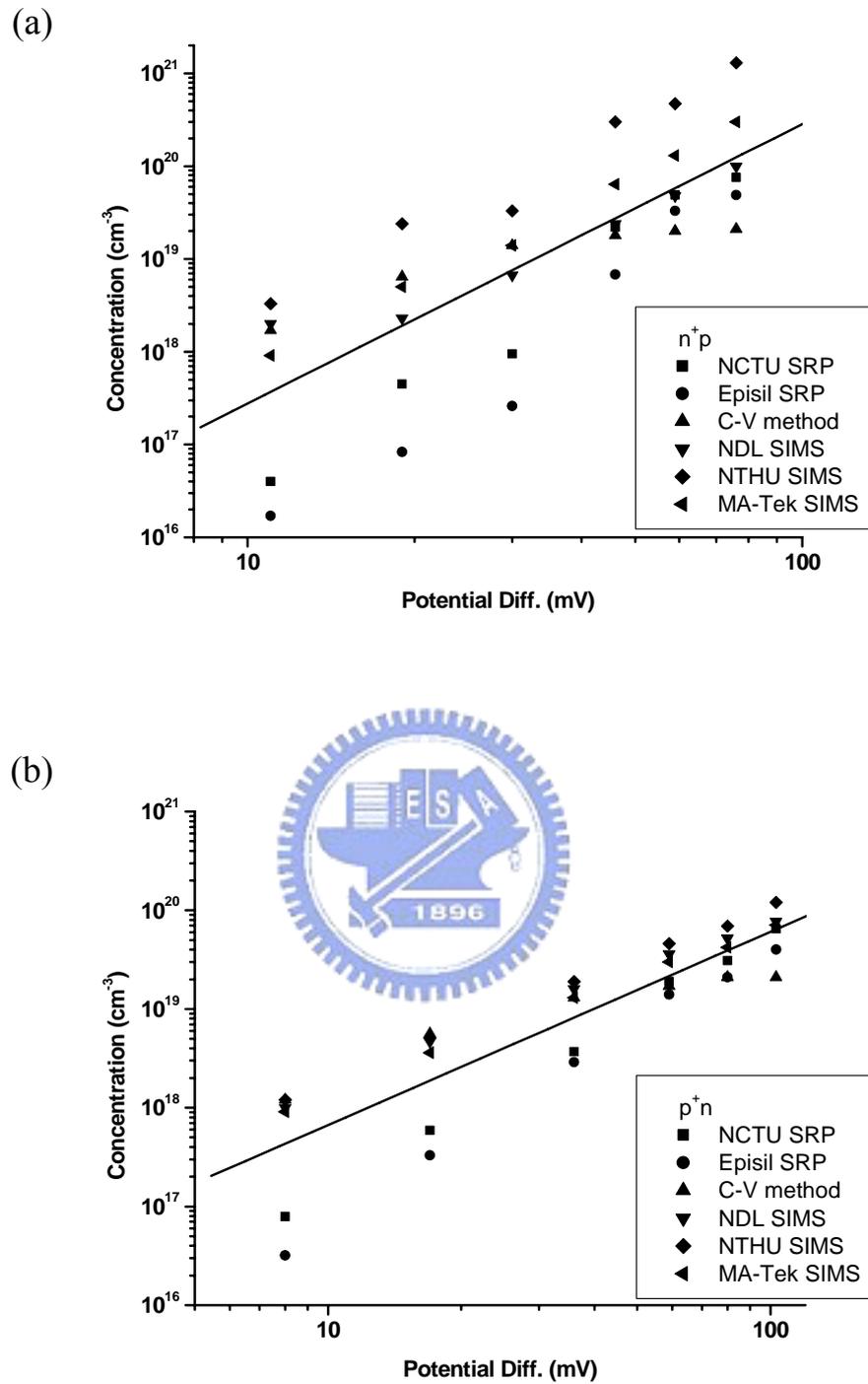


圖 4-12：表面電位差與所有植入區域表面濃度的關係。(a) n^+p ，(b) p^+n 。

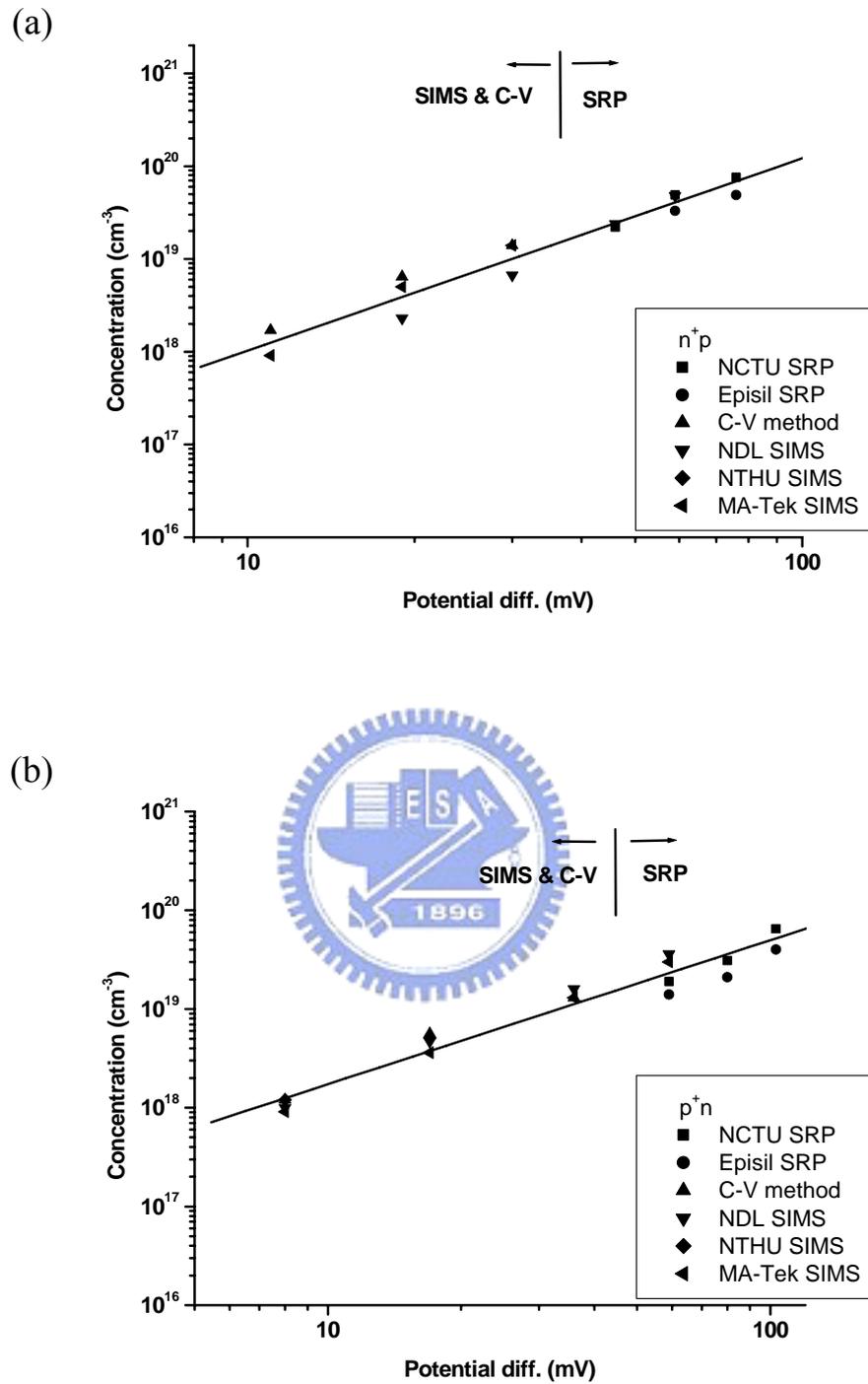


圖 4-13：表面電位差與選取的植入區域表面濃度的關係。(a) n^+p ，(b) p^+n 。

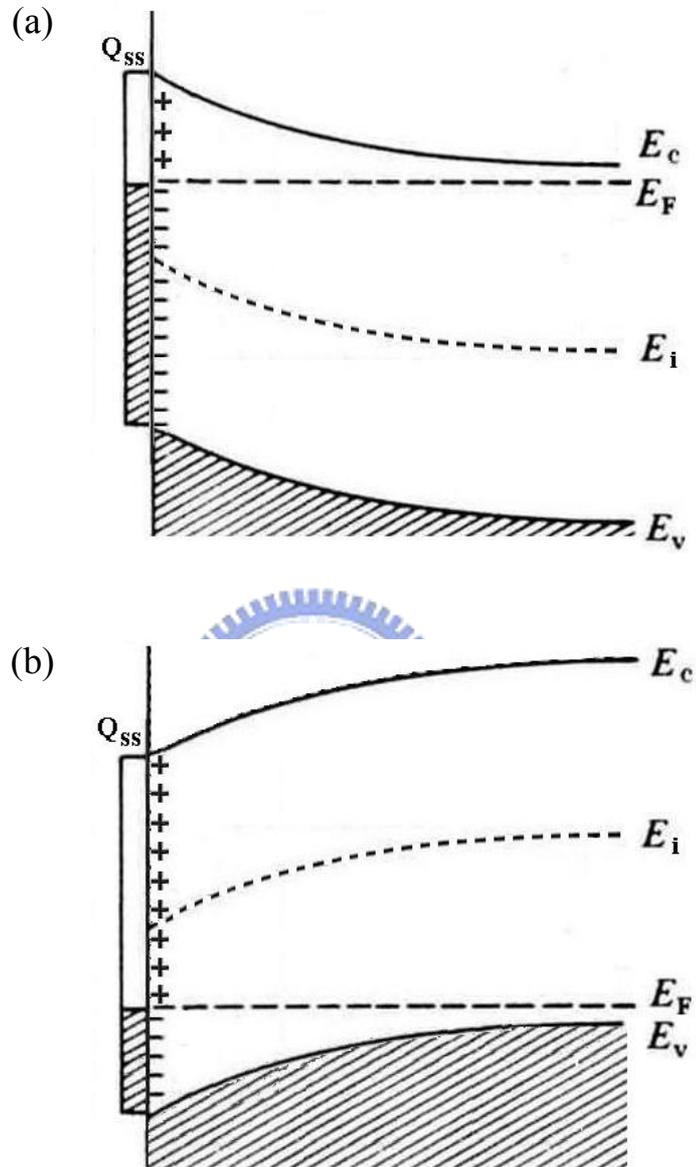
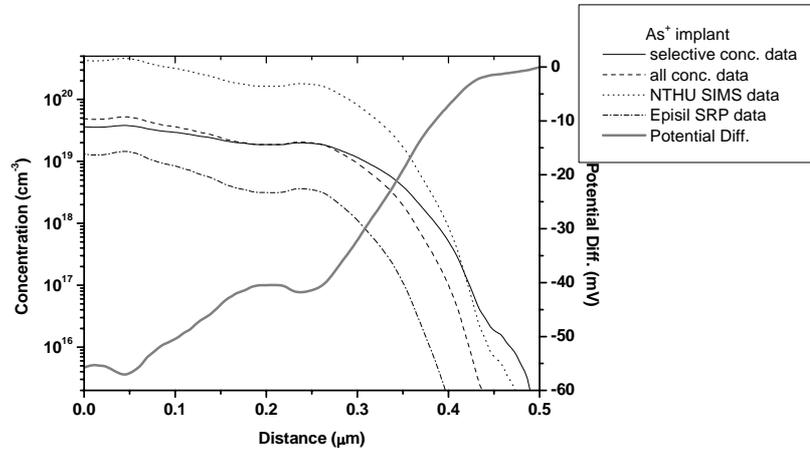


圖 4-14：由於表面態的影響，使得載子空乏，表面能帶結構彎曲。(a)n 型半導體的表面淨電荷為負，能帶向上彎曲。(b)p 型半導體表面淨電荷為正，能帶向下彎曲。

(a)



(b)

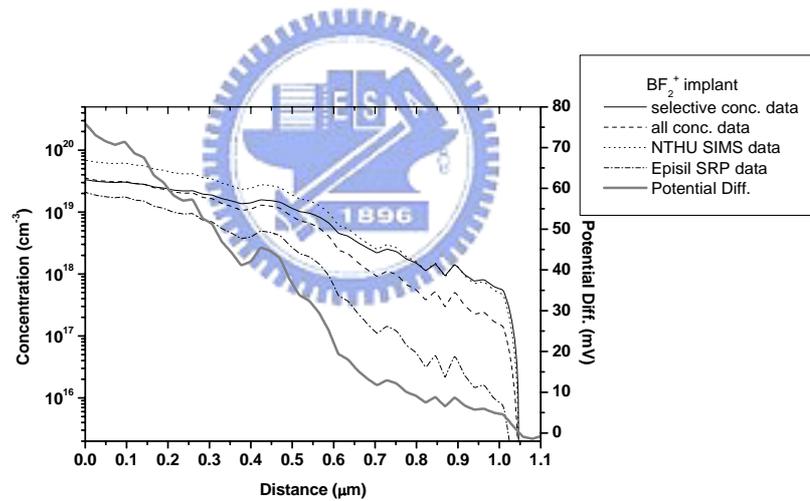


圖 4-15：以表面電位差換算載子濃度。(a)As⁺植入，雜質向 p 型區域擴散。
(b)BF₂⁺植入，雜質向 n 型區域擴散。

第五章 剖面量測的先期研究

對於實際 MOSFET 元件而言，欲利用 KFM 量測元件剖面的載子濃度二維分佈，必須製作適合於 KFM 量測的剖面試片。本章將介紹 KFM 剖面試片製作的方式與得到的初步結果。

5.1 試片製作法

剖面試片的製作，一般採用研磨的方式進行。在常用的分析技術中，已有若干廣為使用的試片研磨方法，可供參考應用。在此為了廣泛探討各種研磨與拋光方式的實際效果，首先使用 SRP 所用的斜角研磨製作試片，以瞭解研磨技術在 KFM 量測上的適用情況。之後將此進一步應用，利用 TEM 所用的對貼研磨進行二維剖面的試片製作。

斜角研磨方法，是在表面研磨出一個小角度斜角，使欲量測的縱深結構暴露出來。實際使用此法是以 $0.25\ \mu\text{m}$ 的鑽石膏加潤滑油塗佈於研磨玻璃板上，再將此玻璃板放置於在轉盤上，使試片在其上研磨。經過研磨，會在試片上產生一已知的斜角，若角度為 θ ，則造成將縱深結構放大 $1/\sin(\theta)$ 倍的效果，例如磨製斜角角度為 $34'$ ，則相當於將縱深方向放大約 100 倍。

圖 5-1 為研磨後的試片在光學顯微鏡下所見的影像，原先的試片表面覆有氧化層，因此在左側未研磨區域，所見者為表面的氧化層，而右側為研磨區域，所見為經過研磨而露出的矽表面，在兩區域之間有明顯邊界。圖 5-2 為利用掃描探針技術所得的表面形貌影像，可以觀察到研磨所造成的斜角。

試片的研磨應力求減少刮痕，提高表面平坦度，以減低表面形貌起伏對量測表面電位訊號所造成的干擾。以 $0.25\ \mu\text{m}$ 的鑽石膏進行試片研磨會在表面造成許多細小刮痕，圖 5-3 為利用 AFM 得到的表面形貌影像，可發現

表面在研磨方向上留有許多刮痕，使得表面的高低起伏可達數十奈米。為了提高表面平坦度，嘗試在鑽石膏研磨後，另以 CMP (Chemical Mechanical Polishing, 化學機械研磨) 步驟作最後拋光。

進行 CMP 拋光步驟是將少量研磨漿料 (slurry) 塗佈在拋光專用的圓形絨布上，再固定於轉盤上加以研磨。所用的研磨漿料是 Klebosol 1501-50，其中以 KOH 作為溶液基質，pH 值為 10.8，含有粒徑 70 nm 的 SiO₂ 顆粒，佔 30 wt %，使用時一般以水稀釋 3~10 倍。所用的研磨絨布為 Extec Alphasam 17258，其上為人造纖維所組成。由於 CMP 本身兼具物理研磨與化學蝕刻的機制，於柔軟的絨布上進行研磨之後，往往無法在斜角試片上維持明顯的轉角。如圖 5-4 為經上述步驟研磨拋光後，利用光學顯微鏡所見的影像，發現未能在其上定出明確的研磨邊界。圖 5-5 為利用薄膜測厚儀 (alpha-stepper) 在與研磨邊界垂直的方向上量得的表面輪廓，發現在研磨邊界附近的斜角無法維持應有的角度，而形成較為圓滑的轉角。如此一來，若所欲觀測的縱深為數百奈米，則在斜面上的距離可達數十微米之譜，將造成量測定位上的困擾。

上述斜角研磨為 SRP 使用的試片製作方法，嚴格說來，僅能用於縱深方向的一維量測，仍不能滿足量測二維剖面的試片需求。因此，在利用斜角研磨方式對於研磨技術有初步瞭解之後，為了進一步製作可供二維剖面量測的試片製作技術，使用類似 TEM 對貼研磨的方式製作試片。

KFM 的試片要求與 TEM 不同之處，在於 TEM 試片必須要求厚度達到極薄的程度，而 KFM 試片則要求表面拋光平坦，並將研磨時所用的黏膠清除乾淨，以利量測時試片台與試片之間的導電。

此方式首先將原有的整片試片切割成數個長條狀小片，以 G1 膠對貼，此種黏膠係屬熱固膠，因而於對貼後加熱約半小時使其固化。之後以熱融膠固定於已切割的小片玻璃上，方可開始研磨。研磨時以雙面膠帶將試片

黏貼於手指指尖，利用置於轉盤上的圓形砂紙上進行研磨，轉盤轉數為每分鐘 180~140 轉，並同時注水於砂紙上帶走研磨所生的微粒。研磨尚須隨時注意試片狀況及各處厚度是否均等，控制所施力道與方向。

首先將試片的其中一面由 240 號砂紙開始研磨，由粗至細，直到以 600 號砂紙研磨完畢。之後將玻璃片加熱，軟化熱融膠，使試片脫離玻璃片，翻轉試片使先前磨的一面黏貼於玻璃片上，作為背面，黏妥後再從最粗的砂紙開始研磨，此片為正面。為了兼顧研磨效率與表面平坦度，依序使用由粗至細的砂紙進行研磨，從 240 號至 4000 號可見試片表面由粗糙而逐漸平坦光亮。

在 4000 號砂紙之後即可進行拋光。首先使用 $1\ \mu\text{m}$ 與 $0.5\ \mu\text{m}$ 的鑽石砂紙，使用方式與一般砂紙相同，可進一步減少刮痕，使表面更為平坦。之後再使用氧化鋁(Al_2O_3)粉末進行拋光，使用時置適量粉末於絨布上，加適量水調和，再使用轉盤以每分鐘 40~120 轉的速度進行研磨，過程中不再注水。以氧化鋁粉末進行拋光，最細可達 $0.05\ \mu\text{m}$ ，但由於氧化鋁粉加水後呈現糊狀，往往使研磨後的表面有粉末殘留，不易去除。之後再應用之前所建立的 CMP 方式進行最後拋光，使用時轉盤的轉數約為每分鐘 180~240 轉，以指尖施加壓力研磨，其使用方式與之前所述相同，但由於此非斜角試片，不存在轉角圓滑的問題。

圖 5-6 為僅以鑽石砂紙拋光的試片在光學顯微鏡下所得的影像，仍可在表面發現許多刮痕。圖 5-7 為經過 CMP 拋光後的狀態，在此試片的部分區域可見表面呈皺摺狀，但在局部範圍內尚稱平坦，不至於對量測造成影響。但由於經過 CMP 之後，試片表面可能會形成破壞層(damage layer)，對待測表面造成覆蓋，故在 CMP 研磨後，另在乾淨絨布上注以清水稍加研磨，以消除此一極薄的破壞層。

研磨拋光完成之後，需將試片從玻璃片上取下，除以加熱方式使熱融

膠軟化之外，亦可用丙酮將熱融膠溶解。以加熱方式恐使對貼試片之間產生滑動或分離，故以浸泡丙酮方式為佳。倘若對貼試片造成分離，僅能以試片邊緣進行量測，則較大的表面形貌起伏會對表面電位造成影響。

拋光是製作剖面試片的關鍵步驟，其目的在於消除研磨步驟所留下的刮痕，使表面更加平坦。圖 5-8 是以 AFM 觀察經過鑽石砂紙研磨過後的試片表面，可發現具有相當程度的表面形貌起伏，從而對 KFM 量測表面電位造成影響。若使用氧化鋁粉末進行研磨，雖可進一步消除刮痕，但容易在表面殘留污染物。而以 CMP 方式進行拋光，所得的表面最為平坦，圖 5-9 為利用 AFM 觀察試片經過 CMP 之後的表面形貌，可發現其高低起伏約略在 1~2 nm 左右，可大幅減少先前研磨步驟所造成的刮痕，提高表面平坦度，以避免表面電位訊號受到表面形貌起伏的影響。

5.2 剖面量測結果



本實驗中用以進行剖面量測的試片為經由硼(boron, B)植入所形成的 npn 結構，經退火活化步驟後，在表面沈積 480 nm 氧化物。試片製作採用對貼研磨，使用前述方式製作試片，最後以 CMP 拋光，並消除破壞層。圖 5-10 為利用 KFM 量得的表面電位影像，圖(c)為根據圖 4-13 的關係計算載子濃度分佈，對照 SIMS 分析結果可發現當硼濃度極大之處存在表面電位的最大值，載子濃度約 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，與 SIMS 峰值相近。但就整個載子分佈輪廓而言，與 SIMS 有相當差異，尤其在深度小於 0.2 μm 的範圍內，愈接近表面，表面電位愈急速增加。這可能是由於深度淺的位置接近試片對貼處，其試片表面可能有較大的高低起伏，影響量測結果。關於此一問題，可從剖面試片的製作方式著手解決。如於試片切割研磨之前先行覆蓋一層金屬，可使得量測的位置遠離對貼處，同時亦可利用此金屬的表面電位作為參考電位，有利於載子濃度的換算。

5.3 小結

在剖面表面電位量測中，製作試片極為關鍵。在本實驗中，參酌其他量測技術對於剖面試片的製作，嘗試各種研磨拋光技術，並根據量測結果與 KFM 量測的需求加以改進，以期製作少表面刮痕、少表面污染、易於量測定位的剖面試片。經由針對研磨拋光技術的試驗與探討，業已初步建立 KFM 二維剖面試片的製作技術。

在 KFM 二維剖面量測方面，未來除了可以更進一步熟練試片製作的技術之外，亦可將其結果與平面試片量測結果作比較，以建立完整的剖面量測技術。



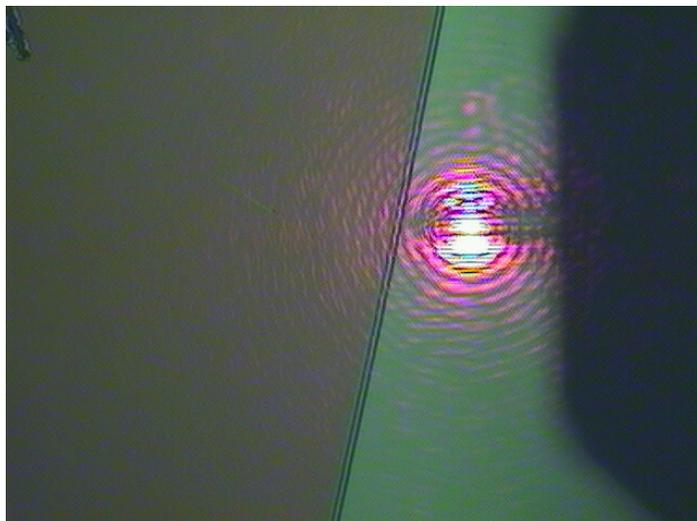


圖 5-1：斜角試片經鑽石膏研磨後，試片表面的光學顯微鏡影像。左側為為研磨區域，右側為斜角研磨區域，其中亮點為入射在探針懸臂背面的雷射光。



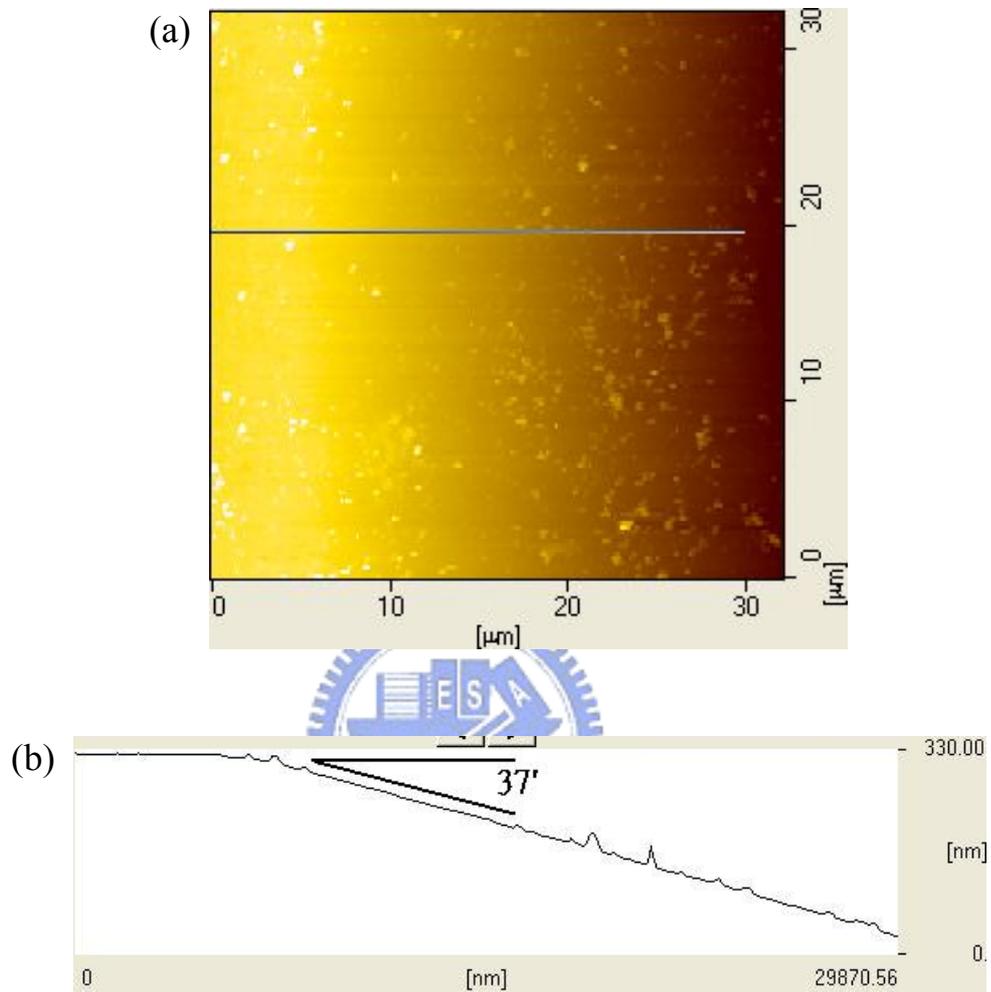


圖 5-2：斜角試片經鑽石膏研磨後，利用掃描探針技術量得的(a)表面形貌影像，(b)表面形貌切面輪廓，斜角為 37° 。

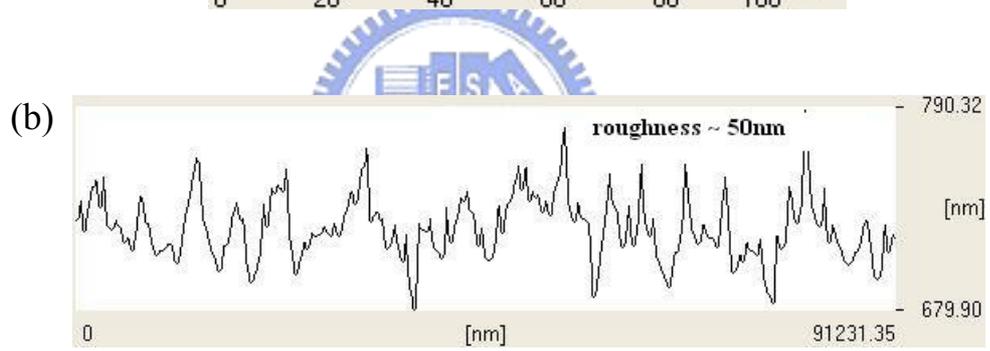
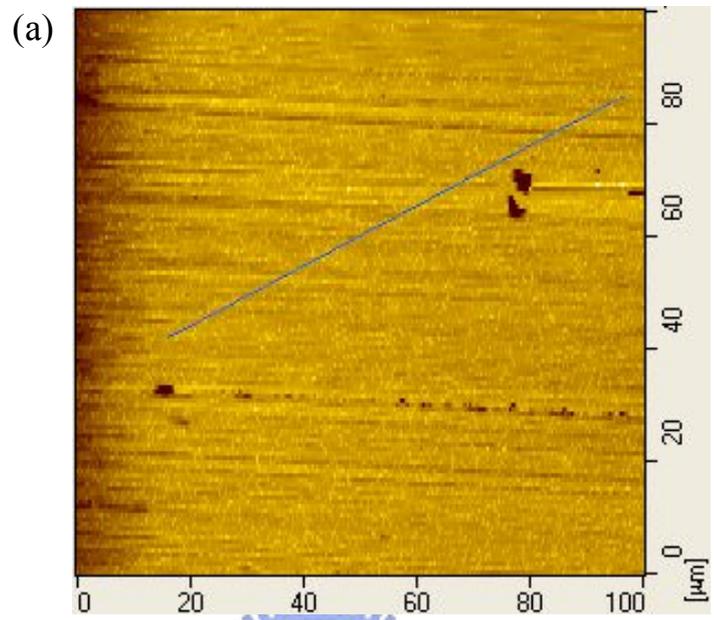


圖 5-3：以 AFM 觀察經鑽石膏研磨後的試片表面形貌。(a)表面形貌影像。
(b)表面形貌切面輪廓。

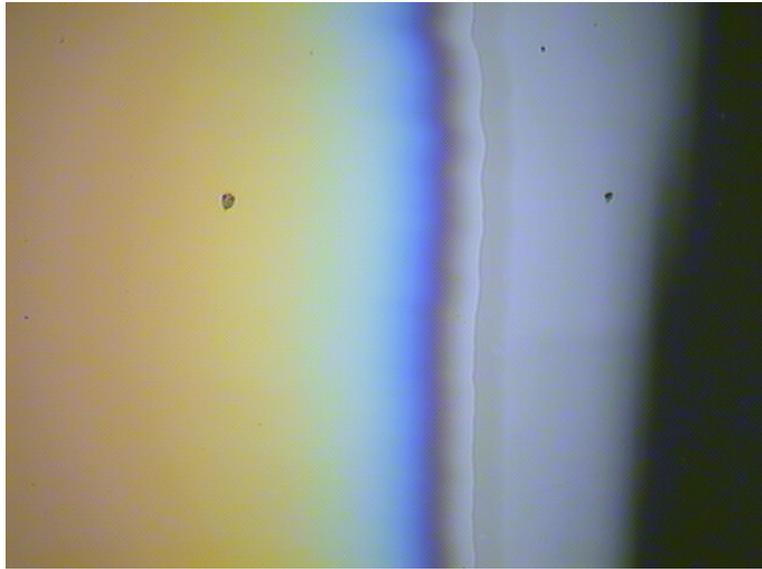


圖 5-4：斜角研磨試片經 CMP 拋光後，試片表面的光學顯微鏡影像。

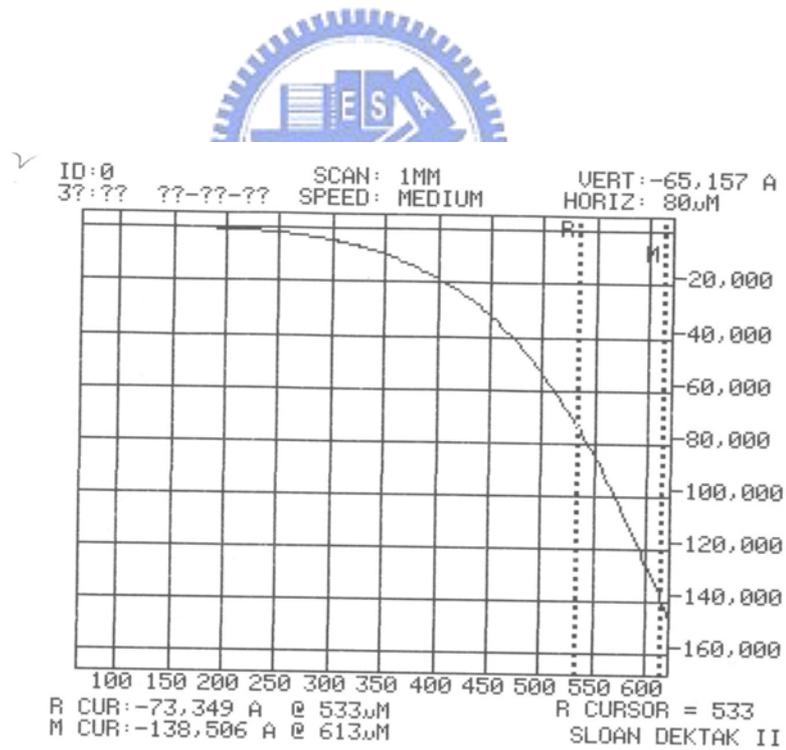


圖 5-5：斜角研磨試片經 CMP 拋光後，利用 alpha-stepper 所得的試片表面輪廓。



圖 5-6：對貼研磨試片經鑽石砂紙拋光後，試片表面的光學顯微鏡影像。



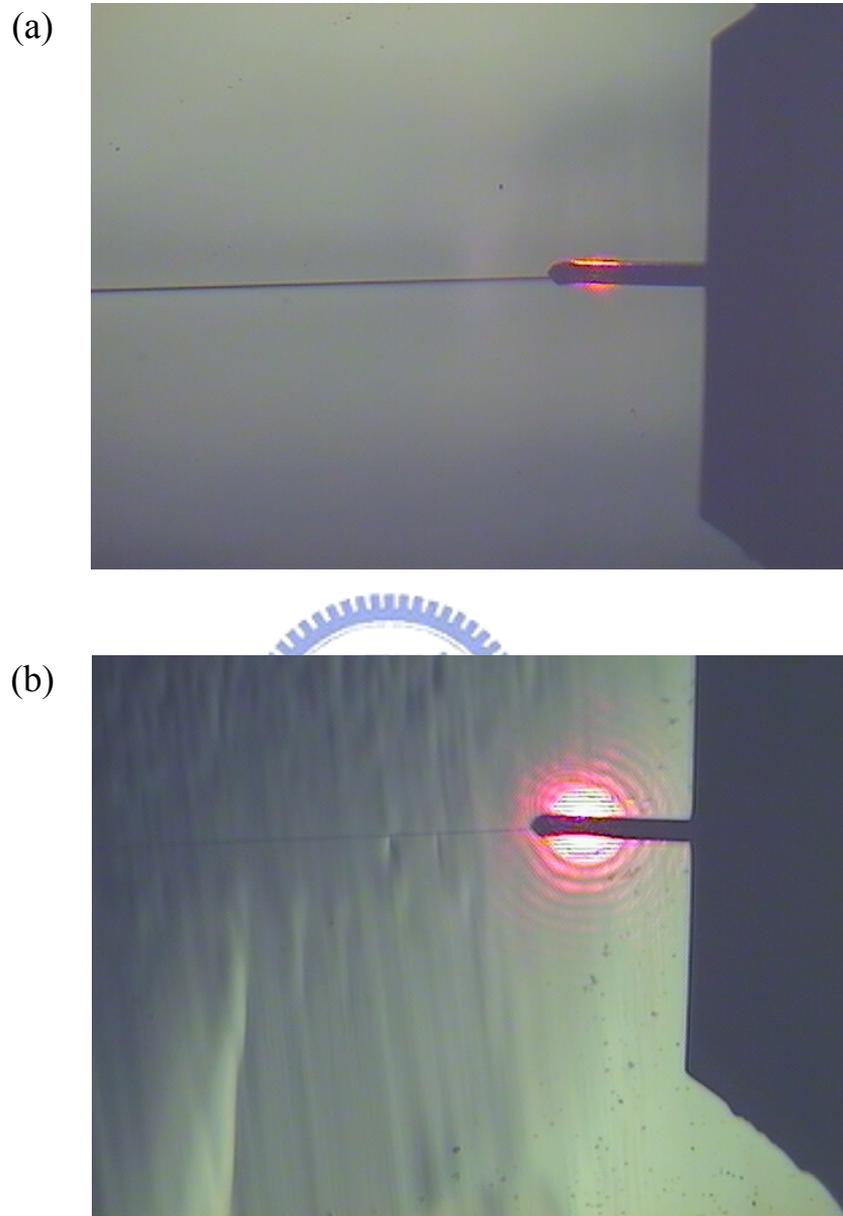


圖 5-7：對貼研磨試片經 CMP 拋光後，試片表面的光學顯微鏡影像。(a)可見表面平坦，少有刮痕。(b)拋光後形成的皺摺狀表面。

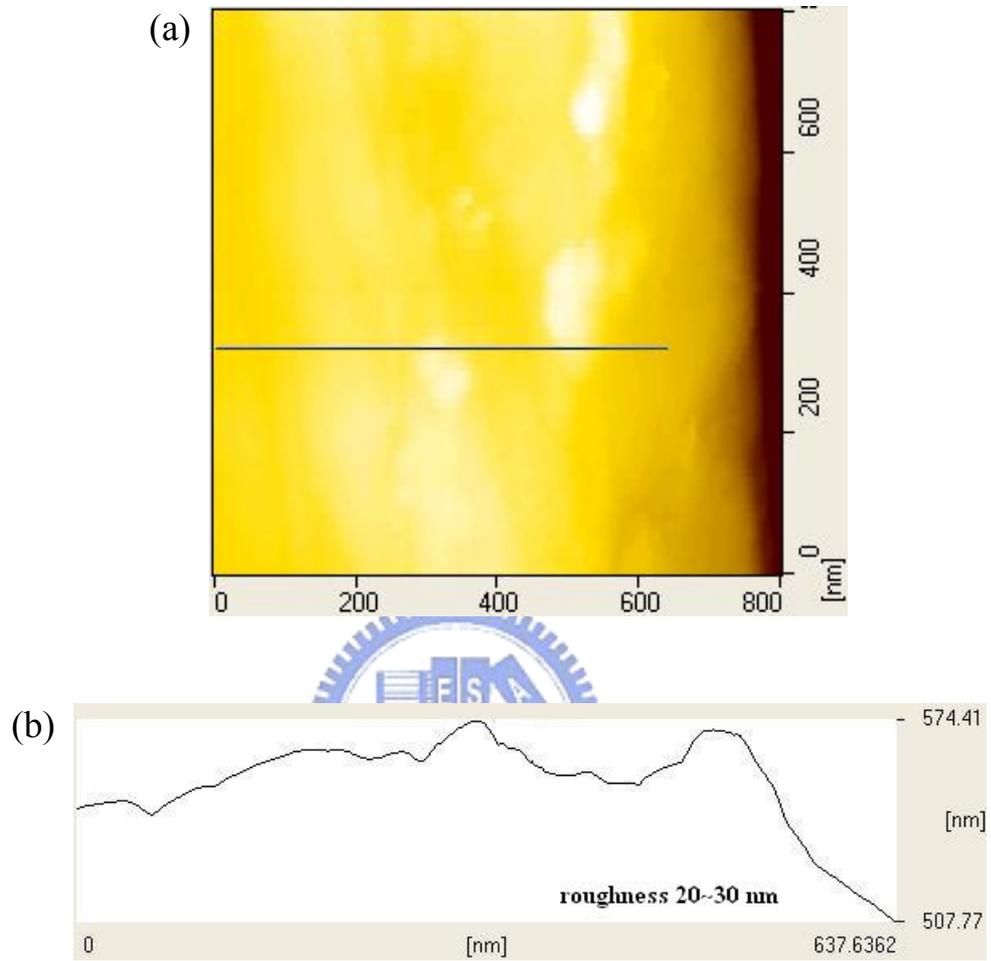


圖 5-8：以 AFM 觀察經鑽石砂紙研磨後的試片表面形貌。(a)表面形貌影像。
(b)表面形貌切面輪廓。

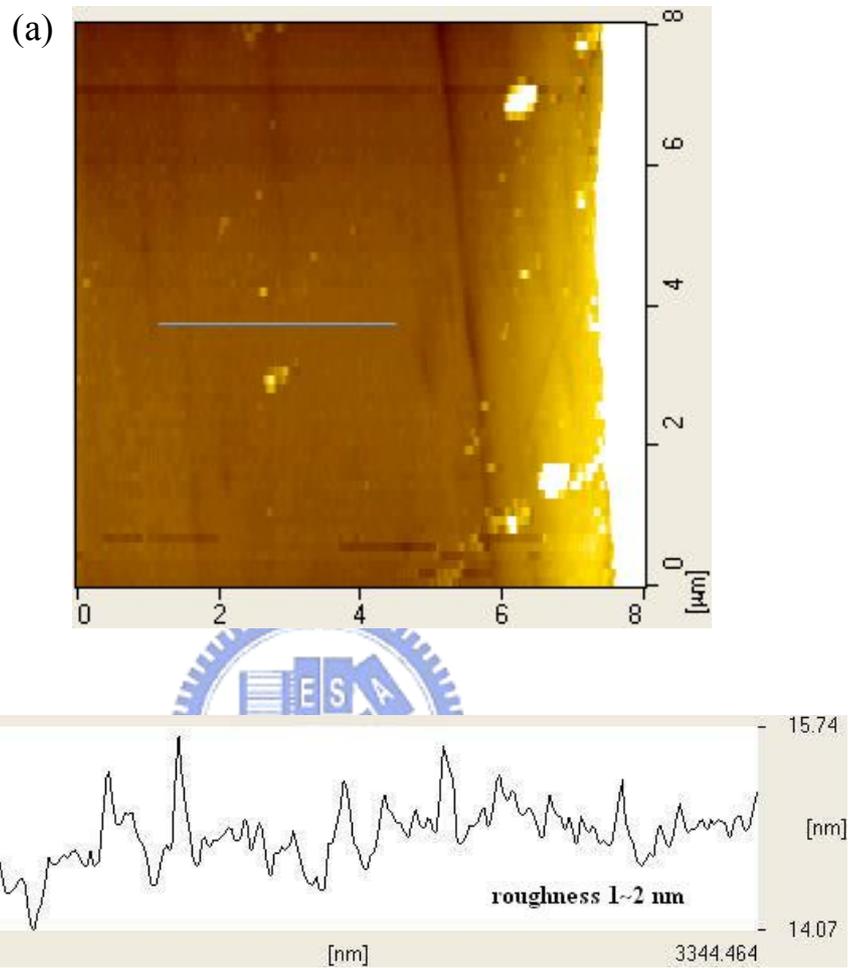


圖 5-9：以 AFM 觀察經 CMP 過後的試片表面形貌。(a)表面形貌影像。(b)表面形貌切面輪廓。

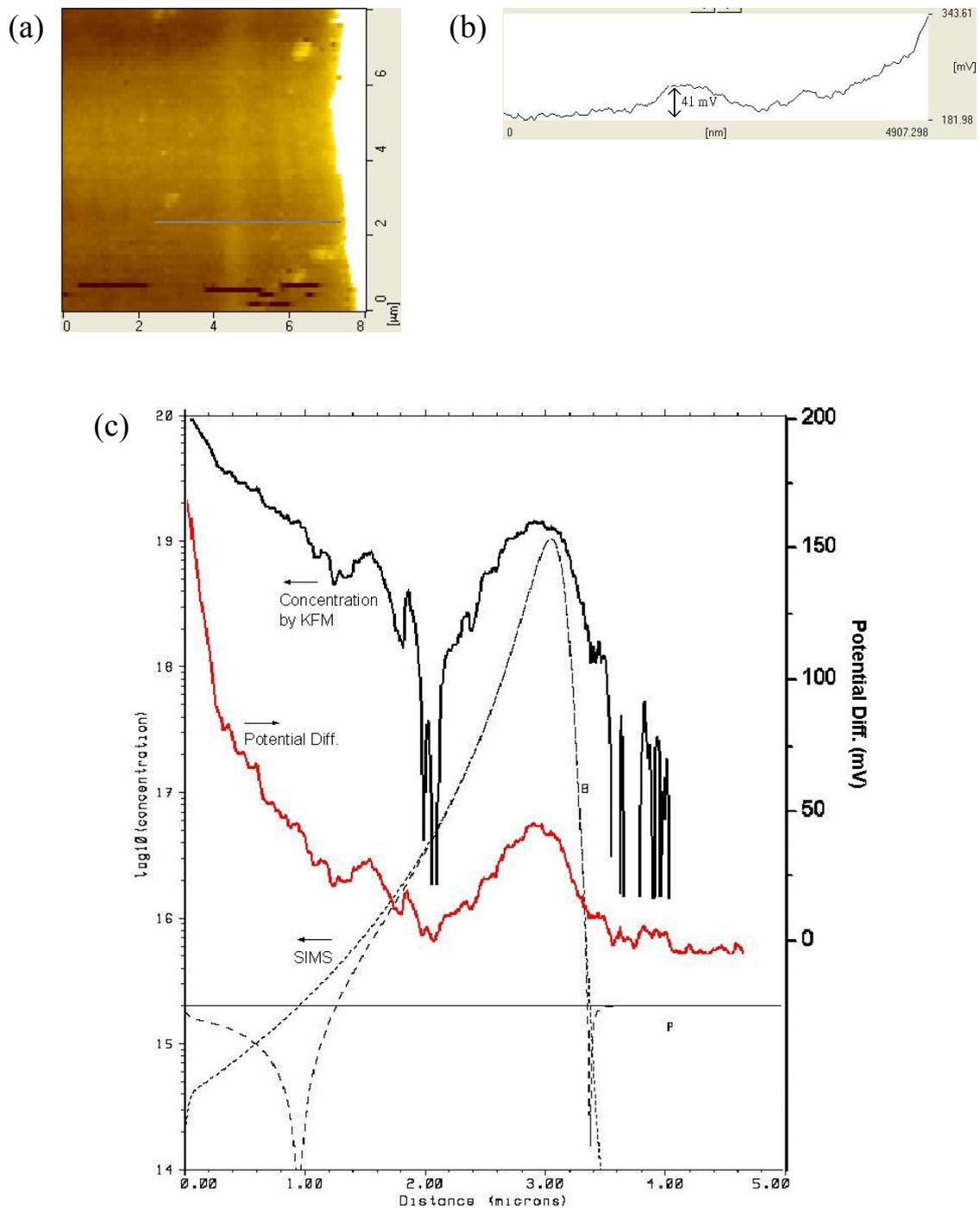


圖 5-10：npn 結構的剖面量測結果。(a)表面電位影像。(b)表面電位切面輪廓。(c)根據表面電位差計算濃度分佈與 SIMS 縱深分析結果。

第六章 結論與展望

6.1 結論

掃描探針顯微術是一種二維的表面測量技術，本論文的主要內容在於探討 KFM 在矽半導體 pn 接面測量的應用，並由此建立起二維載子濃度的測量方法。

於第二章，介紹了 KFM 的原理以及系統的組成。並製作回饋控制電路，以改善系統內建電路的響應特性。從改善之後的掃描影像看來，響應特性確實提升了 3~4 倍，而由於訊號處理的能力增強，也使得影像較為清晰。但在以 KFM 進行表面電位掃描的過程中也發現到，系統的狀態對於掃描結果有顯著的影響。諸如探針的振盪特性、參數的設定、掃描速度的快慢、外加振盪頻率的選擇，會對訊號的靈敏度、雜訊的大小、電位輪廓的失真…等方面造成影響。在進行掃描測量時，必須選擇適當的探針，並根據實際情況調整設定參數，以取得最佳的掃描影像。

由於 KFM 對於試片的表面狀態非常敏感，不同的試片處理方式經常造成測量結果的明顯差異。故本論文於第三章以四種經過不同表面處理方式的試片進行掃描，發現試片經過丙酮超音波震盪、氫氟酸浸泡、去離子水沖洗過後所得的表面電位影像對比最佳，經表面氧化處理或氫氟酸浸泡後未經去離子水沖洗的試片表面電位影像對比均不理想。此外，亦利用 XPS 分析上述處理過後的表面狀態與化學鍵結，發現若表面存在 Si-F 或 Si-O 鍵結時，這些鍵結可能會影響表面電位，造成影像對比的下降。由此可知，建立起適合於 KFM 測量的標準處理方式是十分重要的，必須先透過這樣的步驟排除試片之間表面狀態的差異，才能夠定量地探討表面電位差與載子濃度之間的關係。

有關於利用 KFM 測量平面 pn 接面的研究文獻已見於許多期刊之上，

惟仍少有將表面電位對比與 pn 區域濃度作定量探討。本論文利用離子植入製作一系列濃度不等的試片，分別測量其表面電位差與表面濃度，求得二者之間的定量關係。在表面濃度的測量方面，分別利用 SRP、C-V 法、SIMS 分析得到共六組表面濃度結果，但由於測量原理與方法本身的限制，所得的結果並不完全一致，因此必須選取合理的數值計算與表面電位差的定量關係。於 KFM 測量結果中發現，可能是由於試片表面的狀態與塊材內部不同，因而所得到的表面電位差小於理論值甚多，而在低濃度的情況下，KFM 的表面電位差也對濃度的變化不敏感。諸如上述現象，使得僅能夠根據實驗結果來求得定量關係，而這樣的關係則必須在相同的操作條件下才能夠適用，也使得 KFM 在載子濃度測量的應用受到了限制。

在剖面的二維測量方面，本論文討論了剖面試片的製作方式。首先以 SRP 研磨斜角的方式進行試片研磨的嘗試。但斜角研磨僅為縱深測量的一種方法，如欲製作真正的二維剖面試片，則採用如 TEM 對貼研磨的方式製作試片。但由於 KFM 與 TEM 兩種技術在試片的要求上並不相同，因此雖然使用了對貼研磨的方式但仍有許多細節有待克服。在第五章，根據 KFM 測量的實際需要，針對拋光的方式、表面高低起伏對電位測量的影響等方面作了探討，並能夠觀察到因載子濃度不同而造成的表面電位變化，但在剖面掃描影像中，往往也發現在接近試片對貼處的表面電位會有失真的現象，尚待進一步解決。

6.2 未來工作建議

首先，可進一步探討測量系統對於掃描結果的影響。針對不同需求，可能必須選用不同的探針或設定不同的條件，以取得最佳的掃描影像。而在進行掃描測量的同時，用以偵測懸臂振盪的雷射光源以及用以試片定位的光學顯微鏡光源會對測量造成影響。當光線入射於試片表面時，可能會

增加載子的產生速率，使載子濃度改變，造成了表面電位的飄移。關於照光所造成的影響，可做進一步的探討。

pn 區域的電位測量，因受限於許多表面效應的影響，而使其電位差值小於理論值甚多，其之間的定量關係，也與理想狀況不同。可就此更深入地加以研究，並進一步著手改善。

又由於 KFM 所測量為試片表面不同區域之間的表面電位差，如欲測量未知試片的表面載子濃度，可嘗試利用性質穩定的惰性金屬作為參考電位，同時進行掃描，以得到相對於金屬的表面電位。

在剖面測量方面，相較於平面的測量，還涉及到剖面試片的製作，使得所遭遇的狀況更形複雜。因此目前這此仍面臨一些製作試片的問題，必須根據實際情況加以改善，而主要原則是要提高研磨過後表面的平坦度，並以適當處理消除如 CMP 過後的表面破壞層。此外，亦可嘗試使用聚焦離子束(Focused Ion Beam, FIB)等方式製作剖面試片，比較表面電位影像的差異。

而在建立起利用 KFM 測量載子濃度的方法之後，如欲應用在實際元件的剖面測量，則必須進一步提高空間解析度以滿足需求。例如以奈米碳管作為探針針尖，可縮小針尖的等效面積，提高空間解析度。

綜而言之，在利用掃描探針技術測量載子濃度分佈的技術上，本論文已先就系統特性、試片處理，以及表面電位差的定量關係做了探討，並嘗試應用在剖面試片的測量。雖然如此，仍然還有一些問題尚待解決，以建立完整而可靠的測量方法，發揮掃描探針測量技術的優點，在元件分析上獲得應用。

參考文獻

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, “Surface studies by scanning tunneling microscopy,” *Physical Review Letters*, Vol. 49, No. 1, pp. 57-61, 1982.
- [2] G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber, “Atomic force microscope,” *Physical Review Letters*, Vol. 56, No. 9, pp. 930-933, 1986.
- [3] 曾賢德、果尚志, 「掃描探針量測設備及半導體奈米級加工」, 電子月刊, 第七卷第三期, 130-144 頁, 2001 年 3 月。
- [4] C. C. Williams, J. Slinkman, W. P. Hough, and H. K. Wickramasinghe, “Lateral dopant profiling with 200 nm resolution by scanning capacitance microscopy,” *Applied Physics Letters*, Vol. 55, No. 16, pp. 1662-1664, 1989.
- [5] G. Neubauer, A. Erickson, C. C. Williams, J. J. Kopanski, M. Rodgers, and D. Adderton, “Two-dimensional scanning capacitance microscopy measurements of cross-sectioned very large scale integration test structures,” *Journal of Vacuum Technology B*, Vol. 14, No. 1, pp. 426-432, 1996.
- [6] M. L. O’Malley, G. L. Timp, S. V. Moccio, J. P. Garno, and R. N. Kleiman, “Quantification of scanning capacitance microscopy imaging of the pn junction through electrical simulation,” *Applied Physics Letters*, Vol. 74, No. 2, pp. 272-274, 1999.
- [7] H. Edwards, V. A. Ukraintsev, R. S. Martin, F. S. Johnson, P. Mens, S. Walsh, S. Ashburn, K. S. Wills, Harvey, and M.-C. Chang, “pn-junction delineation in Si devices using scanning capacitance spectroscopy,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, No. 3, pp. 1485-1495, 2000.
- [8] P. A. Rosenthal, Y. Taur, and E. T. Yu, “Direct measurement and characterization of n^+ superhalo implants in a 120 nm gate-length Si metal-oxide-semiconductor field-effect transistor using cross-sectional capacitance microscopy,” *Applied Physics Letters*, Vol. 81, No. 21, pp. 3993-3995, 2002.
- [9] H. Edwards, R. McGlothlin, R. S. Martin, E. U, and M. Gribelyuk, R. Mahaffy, C. K. Shih, R. S. List, and V. A. Ukraintsev, “Scanning capacitance spectroscopy: an analytical technique for pn-junction delineation in Si devices,” *Applied Physics Letters*, Vol. 72, No. 6, pp. 698-700, 1998.
- [10] D. M. Schaadt, E. J. Miller, E. T. Yu, and J. M. Redwing, “Lateral variations in threshold voltage of an $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ heterostructure field-effect

- transistor measured by scanning capacitance spectroscopy,” *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 1, pp. 88-90, 2001.
- [11] B. Y. Tsui and C. P. Lin, “A novel 25 nm modified-Schottky-barrier FinFET with high performance,” *IEEE Electron Devices Letters*, Vol. 25, No. 6, pp. 430-432, 2004.
- [12] J. M. R. Weaver, and D. W. Abraham, “High resolution atomic force microscopy potentiometry,” *Journal of Vacuum Technology B*, Vol. 9, No. 3, pp. 1559-1561, 1991.
- [13] M. Nonnenmacher, M. P. O’Boyle, and H. K. Wickramasinghe, “Kelvin probe force microscopy,” *Applied Physics Letters*, Vol. 58, No. 25, pp. 2921-2923, 1991.
- [14] A. Kikukawa, S. Hosala, and R. Imura, “Silicon pn junction imaging and characterization using sensitive enhanced Kelvin probe force microscopy,” *Applied Physics Letters*, Vol. 66, No. 25, pp. 3510-3512, 1995.
- [15] S. Kitamura and M. Iwatsuki, “High-resolution imaging of contact potential difference with ultrahigh vacuum noncontact atomic force microscope,” *Applied Physics Letters*, Vol. 72, No. 7, pp. 3154-3156, 1998.
- [16] G. H. Buh, H. J. Chung, J. H. Yi, I. T. Yoon, and Y. Kuk, “Electrical characterization of an operating Si pn-junction diode with scanning capacitance microscopy and Kelvin probe force microscopy,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 90, No. 1, pp. 443-448, 2001.
- [17] H. Sugimura, Y. Ishia, K. Hayashi, O. Takai, and N. Nakagiri, “Potential shielding by the surface water layer in Kelvin probe force microscopy,” *Applied Physics Letters*, Vol. 80, No. 8, pp. 1459-1461, 2002.
- [18] P. De Wolf, R. Stephenson, T. Trenkler, T. Clarysee, and T. Hantschel, and W. Vandervorst, “Status and review of two-dimensional carrier and dopant profiling using scanning probe microscopy,” *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol. 18, No. 1, pp. 361-368, 2000.
- [19] S. S. Wong, A. T. Woolley, T. W. Odom, J.-L. Huang, P. Kim, D. V. Vezenov, and C. M. Lieber, “Single-wall carbon nanotube probes for high-resolution nanostructure imaging,” *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 23, pp. 3465-3467, 1998.
- [20] C. L. Cheung, J. H. Hafner, T. W. Odom, K. Kim, and C. M. Lieber, “Growth and fabrication with single-walled carbon nanotube probe microscopy tips,” *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 21, pp. 3136-3138, 2000.
- [21] O. Vatel and M. Masafumi, “Kelvin probe force microscopy for potential distribution measurement of semiconductor devices,” *Journal of Applied*

- Physics*, Vol. 77, No. 6, pp. 2358-2362, 1994.
- [22] NANOSENSORS product guide.
- [23] SPI 3800N Hardware Guide M-2, SPA380HV SPM Unit.
- [24] T. Takahagi, A. Ishitani, and H. Kuroda, "Fluorine-containing species on the hydrofluoric acid etched silicon single-crystal surface," *Journal of Applied Physics*, Vol. 69, No. 2, pp. 803-807, 1991.
- [25] S. R. Kasi, M. Liehr, and S. Cohen, "Chemistry of fluorine in the oxidation of silicon," *Applied Physics Letters*, Vol. 58, No. 25, pp. 2975-2977, 1991.
- [26] D. Graf, M. Grundner, and R. Schulz, "Oxidation of HF-treated Si wafer surfaces in air," *Journal of Applied Physics*, Vol. 68, No. 10, pp. 5155-5161, 1990.
- [27] C. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis, and J. F. Moulder, "Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy," Perkin-Elmer Corporation, 1979.
- [28] B. R. Weinberger, G. G. Peterson, T. C. Eschrich, and H. A. Krasinski, "Surface chemistry of HF passivated silicon: X-ray photoelectron and ion scattering spectroscopy results," *Journal of Applied Physics*, Vol. 60, No. 9, pp. 3232-3234, 1986.
- [29] S. Wolf and R. N. Tauber, "Silicon Processing for the VLSI Era," Vol. 1, 2nd ed., Lattice Press, pp. 288-295, California.
- [30] D. K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization," 2nd ed., John Wiley and Sons, pp. 31-35, New York, 1998.
- [31] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Device," 2nd ed., John Wiley and Sons, pp. 362-379, Central Book Company, Taipei, 1985.
- [32] D. K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization," 2nd ed., pp. 62-70, John Wiley and Sons, New York, 1998.
- [33] R. Eisberg and R. Resnick, "Quantum Physics of atoms, solids, nuclei, and particles," 2nd ed., pp. 384-387, John Wiley and Sons, 1985.
- [34] E. F. Schubert, J. M. Kuo, and R. F. Kopf, "Theory and experiment of capacitance-voltage profiling on semiconductors with quantum-confinement," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 19, No. 6, pp. 521-531, 1990.
- [35] 汪建民主編，「材料分析」，中國材料科學學會，383-411 頁，新竹，民 87。
- [36] S. Wolf and R. N. Tauber, "Silicon Processing for the VLSI Era," Vol. 1, 2nd ed., pp. 353-357, Lattice Press, California.
- [37] D. K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization," 2nd ed., pp. 2-10, John Wiley and Sons, New York, 1998.
- [38] W. Mönch, "Semiconductor Surface and Interface," 2nd ed., Springer, pp.

54-60, 1995.

- [39]S. Ono, M. Takeuchi, and T. Takahashi, “Kelvin probe force microscopy on InAs thin films grown on GaAs giant step structures formed on (110) GaAs vicinal substrates,” *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 8, pp. 1086-1088, 2001.
- [40]S. Wolf and R. N. Tauber, “Silicon Processing for the VLSI Era,” Vol. 1, 2nd ed., pp. 350-351, Lattice Press, California.



簡 歷

姓名：蘇柏智

出生年月日：民國 69 年 7 月 29 日

出生地：台北市

地址：台北縣新莊市建中街 90 巷 18 號 3 樓

學歷：國立交通大學電子物理學系

(87 年 9 月 ~ 91 年 6 月)

國立交通大學電子研究所

(91 年 9 月 ~ 93 年 6 月)

已發表論文：

Po-Chih Su, Chih-Ming Hsieh, and Bing-Yue Tsui, “PN junction surface potential images measured by Kelvin probe force microscopy,” WSEAS Transactions on Electronics, Vol. 1, pp. 124-127, 2004.

Po-Chih Su, Chih-Ming Hsieh, Bing-Yue Tsui, Shien-Der Tzeng, and Shangjr Gwo, “Surface potential images of pn junction measured by Kelvin probe force microscopy,” Symposium on Nano Device Technology 2004, pp. 194-197.

碩士論文題目：

以掃描探針測量矽半導體載子濃度

Scanning Probe Microscopy Technique for Carrier Concentration Measurement in Silicon