

**การวัดค่าศักย์พื้นผิวบริเวณรอยต่อ P-N**

4



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **A MEASUREMENT OF SURFACE POTENTIAL IN P-N JUNCTION**



Miss Maytinee Jornjarun

Miss Sawita nititmongkhon

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การวัดค่าศักย์พื้นผิวบริเวณรอยต่อ P-N

นักศึกษา

นางสาวเมธิณี จรจรัส

นางสาวศวิตา นิธิสมงคล

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ปิติพร ถนอมงาม

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ อ.สุรชาติ กมลคิลก	
กรรมการ ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา	
กรรมการ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
กรรมการที่ปรึกษา ดร. ปิติพร ถนอมงาม	



(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การวัดค่าศักย์พื้นผิวบริเวณรอยต่อ P-N
นักศึกษา	นางสาวเมธิณี จรจรัส นางสาวศวิตา นิธิสมงคล
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปิติพร ถนอมงาม

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นการศึกษา Surface potential ที่บริเวณ p-n junction โดยการใช้เครื่อง AFM (Atomic force microscope) ซึ่งที่บริเวณ p-n junction อิเล็กตรอนในสารเอ็นจะเคลื่อนที่ไปแทนที่โฮลในสารพีเกิดเป็นช่วงรอยต่อที่เรียกว่า depletion region ทำให้รอยต่อนี้เกิด Surface potential ขึ้น ขอบเขตในการปฏิบัติงาน คือ จะมีการหาค่า Surface potential ในสภาวะปกติ เปรียบเทียบกับในสภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ (แสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 433nm) ซึ่งในการทดลองทั้งหมดจะใช้ Sample ทั้งหมด 8 ชนิดคือ 1. แผ่นซิลิกอนที่ทำการโดปสาร P/N 2. ไดโอดเบอร์ UF 4001 3. ไดโอดเบอร์ UF 4006 4. ไดโอดเบอร์ UF 4007 5. ไดโอดเบอร์ P600B 6. Zener diode เบอร์ 1N5242B 7. Zener diode เบอร์ 1N5239B 8. แผ่นโซลาร์เซลล์ ซึ่งในแต่ละแบบก็มี Surface potential ที่แตกต่างกันออกไป หลังจากนั้นจะทำการใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นให้กับบริเวณ p-n junction ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปทางสารพี เคลื่อนที่กลับมายังด้านสารเอ็น ทำให้ในกรณีที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง Surface potential จะมีค่าน้อยกว่าในสภาวะปกติ ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงของผลการทดลองที่เป็นโซลาร์เซลล์ Surface potential มีผลการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก จึงไม่อาจสรุปได้ว่า Surface potential มีการเปลี่ยนแปลงไปจริงหรือไม่ ในกรณีผลการทดลองของซิลิกอน wafer ที่โดปด้วยสารเจือ ในสภาวะปกตินั้นจะมีค่าของ Surface potential ต่ำกว่าในสภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ จากผลการทดลองซึ่งยังไม่ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนจึงยังควรต้องมีการศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยแสงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	A MEASUREMENT OF SURFACE POTENTIAL IN P-N JUNCTION
<b>Name</b>	Miss Maytinee Jomjarun Miss Sawita nititmongkhon
<b>Department</b>	Applied Physics <b>Faculty of Science</b>
<b>Program</b>	Applied Physics-Science and Industrial Instrumentation.
<b>Academic Year</b>	2007
<b>Special Project Advisor</b>	Dr. Pitiporn Thanomngam

### ABSTRACT

The purpose of special project is to study surface potential at p-n junction by AFM (Atomic force microscope). At p-n junction, electrons in n-material recombine with holes in p-material. The boundary of this special project is compared the value of surface potential in normal state and stimulated state with laser (laser in wavelength 400-800 nm). There are 8 type of sample in this experiment : 1. Si wafer doped with p/n material 2. Diode UF 4001 3. Diode UF 4006 4. Diode UF 4007 5. Diode UF P600B 6. Zener diode 1N5242B 7. Zener diode 1N5239B 8. Solar cell. Theoretically, after the junction was excited with laser, electrons in p-type semiconductor moved to n-type semiconductor. As a result, the value of surface potential in stimulated state should be lower non-excited state. Change of the solar cell surface potential value is very low. Therefore it can not be concluded that the change of surface potential value is due to the laser stimulation. For the doped silicon wafer, the value of surface potential in non-excited state is lower than the stimulated state. Since the result from the experiment is hardly to be concluded, further study must be performed in order to study the change of surface potential in pn junction due to photon stimulation.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตากรุณาของ ดร.ปิติพร ถนอมงาม ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ตลอดการศึกษา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ตั้งงามให้กับลูกศิษย์ทุกคนเสมอมา

ขอขอบคุณพันตำรวจโทวิวัฒน์ สิทธิสเรศ นักวิทยาศาสตร์(สบ๓) กลุ่มงานตรวจทางเคมีฟิสิกส์และชีววิทยา กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานตำรวจแห่งชาติ, พันตำรวจตรีชนสิทธิ์ แดงจัน นักวิทยาศาสตร์(สบ๒) กลุ่มงานตรวจทางเคมี ฟิสิกส์และชีววิทยา กองพิสูจน์หลักฐาน สำนักงานตำรวจแห่งชาติที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาในทางวิชาการที่ดียิ่ง

ขอขอบคุณพี่ๆห้องปฏิบัติการ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโครงการเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่คอยให้กำลังใจ และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ MAGNETIC MATERIALS RESEARCH LABORATORY ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ AFM (Atomic force microscope) ยี่ห้อ SIScanPanel รุ่น ULTRAObjective ในการศึกษาหาค่าความต่างศักย์บริเวณรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ

สำหรับคุณงามความดีและประโยชน์อันเกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ขอมอบให้บิดา มารดา อันเป็นที่รักและเคารพ ที่คอยเป็นกำลังใจในการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

นางสาวเมธิณี จจรรัส

นางสาวศวิตา นิธิสมงคล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	62
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองระดับพลังงานอะตอมของบอร์	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพระดับพลังงานและค่าพลังงานในแต่ละระดับพลังงานของไฮโดรเจนอะตอม	6
รูปที่ 2.3 แบบจำลองอะตอมของบอร์	7
รูปที่ 2.4 แผนภาพแถบพลังงานของ ฉนวน สารกึ่งตัว และตัวนำ	8
รูปที่ 2.5 ผลึกซิลิกอนแบบ 2 มิติ	10
รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกเพชรสำหรับซิลิกอนแบบ 3 มิติ	10
รูปที่ 2.7 กระบวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล	11
รูปที่ 2.8 การเกิดกระบวนการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล	11
รูปที่ 2.9 แผนภาพความหนาแน่นของพาหะนำประจุที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	11
รูปที่ 2.10 สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกแบบเอ็น	14
รูปที่ 2.11 พันธะเคมีและแผนภาพระดับพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบเอ็กทรินซิกแบบพี	15
รูปที่ 2.12 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาค จะแปรผันตรงกันสนามไฟฟ้า	16
รูปที่ 2.13 แผนภาพความเข้มข้นของพาหะนำประจุส่วนมากและส่วนน้อยของรอยต่อพีเอ็น	19
รูปที่ 2.14 เขตปลอดพาหะนำประจุและสนามไฟฟ้าภายในเนื่องจากอ็อนบวกและลบ	19
รูปที่ 2.15 พาหะข้างน้อยและพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิด N และ P	20
รูปที่ 2.16 การเกิดช่วงดีพลีชันเมื่อนำสารพีและเอ็นมาต่อกัน	20
รูปที่ 2.17 การไหลของกระแสอิเล็กตรอนใน	21
รูปที่ 2.18 (ก) ลักษณะการกระจายของอะตอมเจือสาร และ (ข) ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็น ชนิดชั้นบันได ก่อนเกิดรอยต่อ	22
รูปที่ 2.19 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น (ก) ก่อนเกิดรอยต่อ (ข) หลังจากเกิดรอยต่ออิเล็กตรอนและโฮลแพร่ข้ามรอยต่อ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในที่รอยต่อ และ (ค) รอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุล อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถข้ามรอยต่อได้	23
รูปที่ 2.20 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอน เนื่องจากการแพร่และการครีพท์ และของกระแสที่เกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะ	25
รูปที่ 2.21 ลักษณะการกระจายของ (ก) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (ข) สนามไฟฟ้า	

เอกสารนี้เป็นเอกสารภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและการวิจัย การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.22 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ในภาวะต่างๆ (ก) ก่อนเกิดรอยต่อ (ข) ขณะเกิดรอยต่อ (ค) ขณะรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล	29
รูปที่ 2.23 การวัด surface potential	31
รูปที่ 2.24 การไบแอสด้วยแรงดัน DC	31
รูปที่ 2.25 แสดงโหมดของ SSPM	34
รูปที่ 2.26 Construction of sensitivity enhanced Kelvin probe force microscope	34
รูปที่ 2.27 แอมพลิจูดของ sample ที่ถูกการไบแอส	36
รูปที่ 2.28 การ Modulation (upper curve) และสัญญาณ interferometer (lower curves) ด้วยการไบแอส โวลต์ที่ต่างกัน ในกรณี 2.28 (ก) เป็น work function ระหว่าง tip และ sample ที่ compensated ในกรณี 2.28 (ข) ไม่ compensated	36
รูปที่ 3.1 กรรมวิธีการล้างทำความสะอาดผลึกซิลิกอน	38
รูปที่ 3.2 พงซ์ดอคูมิน่าที่ใช้ในการขัดผลึกซิลิกอน	39
รูปที่ 3.3 Sample ของผลึกซิลิกอน wafer ที่โคปด้วยสารเจือ	40
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของทรานซิสเตอร์โคโอดที่นำมาใช้เป็น sample ในการทดลอง	40
รูปที่ 3.5 Sample ของโคโอดและซีเนอร์โคโอด	41
รูปที่ 3.6 แผ่นโซลาร์เซลล์ที่จะนำมาใช้เป็น sample	41
รูปที่ 3.7 sample ของแผ่น โซลาร์เซลล์	42
รูปที่ 3.8 sample ของผลึกซิลิกอน wafer ที่โคปด้วยสารเจือ	43
รูปที่ 3.9 sample ที่วางบริเวณ holder ของตัวเครื่อง	43
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการ calibration	44
รูปที่ 3.11 การ set ค่าของหน้าต่าง calibration	44
รูปที่ 3.12 การ calibration Image	45
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการ Scanning	45
รูปที่ 3.14 หน้าต่างของ tip Approach	46
รูปที่ 3.15 หน้าต่างของ Frequency Selection	46
รูปที่ 3.16 หน้าต่างของ Frequency Selection เมื่อเลือกที่ calibeation	47
รูปที่ 3.17 หน้าต่างต่อจากรูปที่ 3.16 เลือก continue เพื่อดำเนินการต่อ	47
รูปที่ 3.18 หน้าต่างของการปรับ Operating Point Adjust	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.19 หน้าต่างของ Approach Control	48
รูปที่ 3.20 หน้าต่างของ Scanning	49
รูปที่ 3.21 ภาพของ Sample ที่ได้จากการ calibration	49
รูปที่ 3.22 (ก) – (ค) sample ที่วางบน holder ที่มีขนาดของกำลังขยายที่แตกต่างกัน (20 เท่า, 50 เท่า, mode AFM)	50
รูปที่ 3.23 ภาพของ sample ซิลิกอนที่กำลังขยาย 20 เท่า	50
รูปที่ 3.24 ภาพของ sample ซิลิกอนที่กำลังขยาย 50 เท่า	51
รูปที่ 3.25 หน้าต่างของการตั้งค่า Adjust	51
รูปที่ 3.26 หน้าต่างของการปรับ sensor Adjust	52
รูปที่ 3.27 หน้าต่างของการเลือก Mode/channel	52
รูปที่ 3.28 หน้าต่างของโหมดที่เลือกใช้ในการสแกน	53
รูปที่ 3.29 หน้าต่างของ Tip Approach	53
รูปที่ 3.30 หน้าต่างของ Approach Control	54
รูปที่ 3.31 หน้าต่างการเลือก Single scan	54
รูปที่ 3.32 การสแกน junction โดยรูปซ้ายมือเป็นรูปของ topology และรูปทางขวามือเป็นรูปของ phase	55
รูปที่ 3.33 ภาพ 3D ของการสแกน sample	55
รูปที่ 3.34 (ก) – (ค) sample ที่วางบน holder ที่มีขนาดของกำลังขยายที่แตกต่างกัน (20 เท่า, 50 เท่า, mode AFM)	56
รูปที่ 3.35 (ก), (ข) กระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์	57
รูปที่ 3.36 การปรับค่า Adjust ในการกระตุ้นด้วยแสง	57
รูปที่ 3.37 รับค่า Sensor adjust ในขั้นตอนการกระตุ้นด้วยแสง	58
รูปที่ 3.38 หน้าต่างการเลือก mode/channel	58
รูปที่ 3.39 หน้าต่างการเลือก mode/channel เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการสแกนแบบกระตุ้นด้วยแสง	59
รูปที่ 3.40 หน้าต่างของ Tip Approach	59
รูปที่ 3.41 หน้าต่างของ Approach Control	60
รูปที่ 3.42 หน้าต่างการเลือก Single scan	60
รูปที่ 3.43 ภาพ 3D ของ Topology	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.44 ภาพ 3D ของ Potential	61
รูปที่ 4.1 การแสดง junction ของซิลิกอน wafer ที่โคปด้วยสารเจือ	63
รูปที่ 4.2 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด UF 4001	63
รูปที่ 4.3 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด UF 4006	64
รูปที่ 4.4 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด UF4007	64
รูปที่ 4.5 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด P600B	65
รูปที่ 4.6 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จาก Zener Diode 1N5242B	65
รูปที่ 4.7 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จาก Zener Diode 1N5239B	66
รูปที่ 4.8 การแสดง junction ของแผ่น โซลาร์เซลล์แผ่นที่ 1	67
รูปที่ 4.9 การแสดง junction ของแผ่น โซลาร์เซลล์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์แผ่นที่ 1 (รูปที่ 4.8) ที่นำไปฉีดด้วยผงขัดอลูมินาอีกครั้งเพื่อความราบเรียบที่เพิ่มมากขึ้น	67
รูปที่ 4.10 การแสดง junction ของแผ่น โซลาร์เซลล์ (แผ่นที่ 2) ที่พบความแตกต่างของ Surface potential บริเวณ junction	68
รูปที่ 4.11 การแสดง junction ของแผ่น โซลาร์เซลล์ (แผ่นที่ 2) ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์	68
รูปที่ 4.12 (ก) - 4.12(ข) การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่นำไปโคปด้วยสารเจือ	69
รูปที่ 4.13 (ก) - 4.13(ข) การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่นำไปโคปด้วยสารเจือ เมื่อนำไปกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งจะเป็นการนำผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยใช้ตำแหน่งและบริเวณเดิมแต่เพิ่มการใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นบริเวณ junction เพื่อเปรียบเทียบ surface potential	70
รูปที่ 5.1 sample ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1 (เลซินแบบขุ่น)	74
รูปที่ 5.2 sample ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 (เลซินแบบใส)	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์คอนและเจอร์มาเนียมแบบอินทรีนซิก

หน้า

12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

เมื่อวิทยาการไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในสมัยแรก ๆ วัสดุไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มักได้แก่ คิวนำไฟฟ้า เช่น สาย ทองแดง โลหะชนิดต่าง ๆ และฉนวนไฟฟ้า เช่น ยาง ลูกถ้วยเซรามิก เมื่อมีการพัฒนาหลอดสุญญากาศขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถขยายสัญญาณไฟฟ้า กำเนิดความถี่ ฯลฯ วัสดุไฟฟ้ายังคงเป็นพวกตัวนำและฉนวนอยู่เช่นเดิม สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน มีการค้นพบมานานพร้อม ๆ กับวัสดุชนิดอื่น ๆ แต่มิได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง จนกระทั่งปี พ.ศ. ๒๔๕๐ ซึ่งมีการคิดค้นทรานซิสเตอร์ได้สำเร็จเป็นครั้งแรก สารกึ่งตัวนำจึงได้รับความสนใจ และมีบทบาทในการพัฒนาวิทยาการด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก เพราะสามารถทำงานทดแทนหลอดสุญญากาศได้เกือบทั้งหมด ทำให้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา กินไฟฟ้าน้อย และมีราคาถูก ปัจจุบันเราจะพบสิ่งประดิษฐ์ ทำให้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิด ที่เราใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ เครื่องซักผ้า เตารีด ไมโครเวฟ รถยนต์ เครื่องคอมพิวเตอร์ ฯลฯ ดังนั้น สารกึ่งตัว นำจึงกลายเป็นวัสดุไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อการใช้ชีวิตในโลกยุคปัจจุบันและอนาคตสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากตัวนำและฉนวน คือ การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงได้ตาม

- อุณหภูมิ
- แสงที่ตกกระทบ
- ปริมาณสารเจือปน
- ปริมาณของจุดบกพร่องในเนื้อสาร

จึงทำให้สารกึ่งตัวนำมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อะตอมของสารกึ่งตัวนำในรูปผลึกจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบ ในกรณีที่ไม่มีสารเจือปนเลย เมื่ออุณหภูมิต่ำ ๆ จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นเลย อิเล็กตรอนที่อยู่ไมวงโคจรนอกสุดของแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นแขนเชื่อมระหว่างอะตอม แต่ความร้อนหรือแสงสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่ทำหน้าที่เป็นแขนเชื่อมเหล่านี้หลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ จึงเป็นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้ ทำให้สารกึ่งตัวนำเริ่มนำไฟฟ้าได้ ในกรณีที่มีการเติมสารเจือปนสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเจือปนลงไปในสารกึ่งตัวนำแท้ เช่น ซิลิกอน หรือเจอร์มาเนียม เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารกึ่งตัวนำประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็น (N-Type) และสารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-Type) การใส่สารเจือปนเป็นการใส่สารเจือปนจำนวนน้อยเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะได้สารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ขึ้นกับสารเจือปนที่ใช้

จากนั้นจึงนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นนี้ไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และนิยมเรียกว่า “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ” (semiconductor devices) ซึ่งอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างง่ายที่สุดคือ โครงสร้างรอยต่อ พี-เอ็น (p-n junction) ซึ่งได้แก่ไดโอดชนิดต่างๆ ที่รอยต่อพี-เอ็นนี้จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี ดังนั้น การศึกษาคุณสมบัติและทฤษฎีของรอยต่อพี-เอ็น จึงมีความสำคัญมาก เพราะความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ รอยต่อพี-เอ็น จะทำให้ง่ายต่อการศึกษาและเข้าใจการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ แม้ว่าสิ่งประดิษฐ์นั้นๆ จะมีลักษณะ โครงสร้างซับซ้อนและยุ่งยากเพียงใดก็ตาม

ซึ่งในโครงการพิเศษนี้เราจะเน้นศึกษาในเรื่องของการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ P-N เมื่อมีการกระจายตัวของศักย์พื้นผิวในบริเวณรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ และการนำเครื่องมือที่ชื่อว่า Kelvin probe force microscopy (KPFM) ซึ่งเป็นตัวที่ทำการติดตั้งเพิ่มขึ้นใน AFM (Atomic force microscope) เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดค่าศักย์พื้นผิว ซึ่งเมื่อได้ผลจากการทดลองจะสามารถนำไปเปรียบเทียบ ปรับปรุง และประยุกต์เพื่อใช้ในงานของการออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะและความหมายทางฟิสิกส์ของศักย์พื้นผิว
2. เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของศักย์พื้นผิวในรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ
3. เพื่อศึกษาหลักการวัดศักย์พื้นผิว
4. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้งาน Atomic force microscope (AFM) และนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดศักย์พื้นผิว

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเกี่ยวกับ โครงสร้างและคุณสมบัติต่างๆของสารตัวอย่าง
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของศักย์พื้นผิวบริเวณรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ
3. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของเครื่อง Atomic force microscope (AFM)
4. ศึกษาหลักการและระเบียบวิธีการวัด surface potential ของสารตัวอย่างด้วย AFM
5. สรุปผลและวิเคราะห์ผลการศึกษา

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีรอยต่อ P-N และศักย์พื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นจำเป็นต้องใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการและลักษณะการทำงานของเครื่อง Atomic force microscope (AFM) ในโหมดการวัดศักย์พื้นผิว
- ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาคุณสมบัติและการเตรียมรอยต่อ P-N ของสารกึ่งตัวนำ Atomic force microscope (AFM)
- ขั้นตอนที่ 4 นำสารกึ่งตัวนำ ไปวิเคราะห์เพื่อคุณลักษณะของศักย์พื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic force microscope (AFM)
- ขั้นตอนที่ 5 เสนอแนะผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้เพิ่มเติมในทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำและรอยต่อ P-N
2. สามารถนำความรู้ที่ได้เรียน มาประยุกต์ใช้กับระบบการวัดด้วยเครื่อง Atomic force microscope (AFM)
3. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการและการใช้งานของเครื่อง Atomic force microscope (AFM)
4. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการกระจายตัวของศักย์พื้นผิวของรอยต่อ P-N ในสารกึ่งตัวนำ

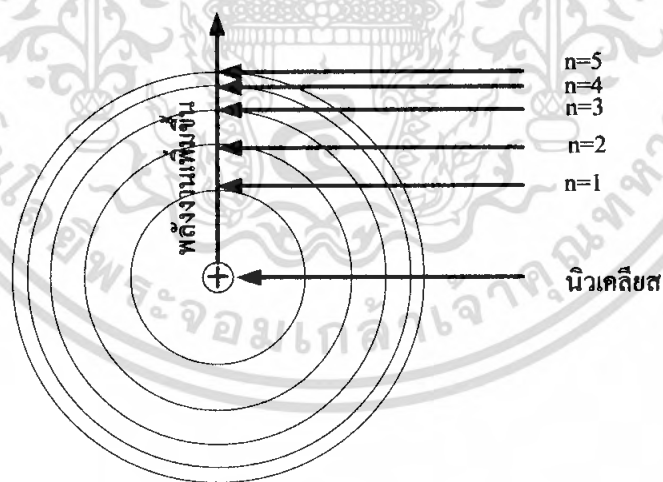
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานสารกึ่งตัวนำเบื้องต้น

##### 2.1.1 แบบจำลองของอะตอม

อะตอมเป็นอนุภาคที่เล็กสุดของของธาตุ และโมเลกุลเป็นอนุภาคที่เล็กที่สุดของสารประกอบ อะตอมและโมเลกุลต่างเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสสาร ทำให้สสารแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน อะตอมของธาตุมีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้พยายามสร้างแบบจำลองของอะตอม ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองอะตอมของโบร์ ในปี ค.ศ. 1912-1913 นีลส์บอร์ นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก ได้ศึกษาอะตอมของสเปกตรัมของไฮโดรเจน และได้เสนอแนวคิดที่ว่า อิเล็กตรอนรอบนอกนิวเคลียส อยู่ในเขตจำกัด มีระยะห่างจากนิวเคลียสหลายระยะ ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะหมุนรอบนิวเคลียสคล้ายกับวงโคจรของดาวเคราะห์ที่หมุนรอบดวงอาทิตย์ แนวคิดของนีลส์บอร์กล่าวว่า อิเล็กตรอนจะอยู่ได้ในระดับพลังงานที่กำหนดเท่านั้น ซึ่งได้มาจากแนวคิดเชิงควอนตัมของแมกซ์พลังค์ ดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองระดับพลังงานอะตอมของโบร์

เพื่อให้เห็นสิ่งที่นีลส์บอร์ได้ศึกษาอะตอมของ ไฮโดรเจนอย่างชัดเจนจะสรุปสาระสำคัญของแบบจำลองอะตอมของนีลส์บอร์เป็นข้อๆคือ

1. เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานในปริมาณที่เหมาะสม อิเล็กตรอนจะเลื่อนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับเดิม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ได้รับ อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานใหม่จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อะตอมไม่เสถียร และจะกลับมาอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำกว่าเพื่อให้อะตอมเสถียรโดยการคายพลังงาน

2. การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนไม่จำเป็นต้องเป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างระดับพลังงานถัดไปหรืออยู่ใกล้ชิดติดกัน แต่สามารถเปลี่ยนแปลงข้ามขั้นได้

3. อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำจะอยู่ห่างกันมากกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสูงกว่า ระดับพลังงานที่สูงขึ้นจะมีระยะห่างของระดับพลังงานแต่ละชั้นลดน้อยลง

จากข้อมูลของสเปกตรัมไฮโดรเจน บอร์ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ดให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น โดยเน้นเฉพาะลักษณะของอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียสเป็นหลัก

นอกจากนี้แล้วบอร์ยังได้สร้างสมการเพื่อใช้คำนวณหาระดับพลังงานของแต่ละสถานะพื้นของระดับพลังงานไฮโดรเจนอะตอมดังนี้

$$E_n = \frac{-313.6}{n^2} \text{ kcal / mol} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $n$  เป็นเลขควอนตัมหลัก หรือระดับพลังงานหลัก (ระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่) พิจารณาในกรณีที่  $n=1$

$$E_1 = \frac{-313.6}{1^2} = -313.6 \text{ kcal / mol} \quad (2.2)$$

ระดับพลังงานที่ 1 เป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนอะตอมมากที่สุด หาระดับพลังงานในขั้นถัดไป

$$E_1 = \frac{-313.6}{1^2} = -313.6 \text{ kcal / mol}$$

$$E_2 = \frac{-313.6}{2^2} = -78.4 \text{ kcal / mol}$$

$$E_5 = \frac{-313.6}{5^2} = -12.5 \text{ kcal / mol}$$

$$E_8 = \frac{-313.6}{8^2} = -4.9 \text{ kcal / mol}$$

$$E_{15} = \frac{-313.6}{15^2} = -1.39 \text{ kcal / mol}$$

จะพบว่าในระดับพลังงานที่สูงขึ้นไปจะมีพลังงานน้อยลง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสูงๆ เมื่อมีพลังงานเพียงเล็กน้อย ก็จะมีโอกาสที่จะเลื่อนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าได้ หรือ หลุดออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อนำเอาค่าพลังงานที่คำนวณได้ในแต่ละระดับชั้นพลังงานหลัก ไปเขียนกราฟแสดง ระดับพลังงาน เลขควอนตัม และพลังงาน ได้ดังนี้

ระดับพลังงาน	เลขควันตัม	พลังงาน
$E_x$	$n=x$	0
$E_4$	$n=4$	-19.6
$E_3$	$n=3$	-34.8
$E_2$	$n=2$	-78.4
$E_1$	$n=1$	-313.6

รูปที่ 2.2 แผนภาพระดับพลังงานและค่าพลังงานในแต่ละระดับพลังงานของไฮโดรเจนอะตอม

พลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้เกิดสภาวะเร้า คำนวณได้ดังนี้

$$E_{1 \rightarrow 2} = E_2 - E_1 = (-78.3) - (-313.6) = +235.2 \text{ kcal / mol}$$

$$E_{2 \rightarrow 3} = E_3 - E_2 = (-34.8) - (-78.4) = +43.6 \text{ kcal / mol}$$

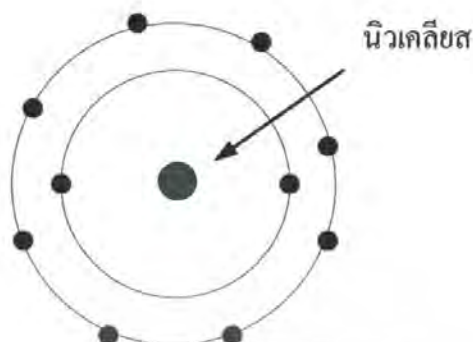
$$E_{3 \rightarrow 4} = E_4 - E_3 = (-19.6) - (-34.8) = +15.2 \text{ kcal / mol}$$

$$E_{4 \rightarrow 5} = E_5 - E_4 = (-12.5) - (-19.6) = +7.1 \text{ kcal / mol}$$

จะเห็นว่าในการเลื่อนระดับพลังงานจากสภาวะพื้น ไปยังสภาวะเร้าหรือเลื่อนสู่ระดับพลังงานที่สูงจะต้องใช้พลังงานสูง

สมการของบอร์ใช้คำนวณหาค่าระดับพลังงานในแต่ละระดับพลังงานของอิเล็กตรอนได้อย่างแม่นยำ สำหรับไฮโดรเจนอะตอมเท่านั้น แต่เมื่อนำไปอธิบายเส้นสเปกตรัมของอะตอมที่มีหลายอิเล็กตรอน บอร์ไม่สามารถนำไปอธิบายได้ แบบจำลองของบอร์จึงได้มีการแก้ไขเปลี่ยนแปลง โดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ชื่อหลุย วิกเตอร์ เดอเบรีย ในปี ค.ศ. 1924 และนักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย ชื่อ แอร์วิน ชเรอดิงเงอร์ ในปี ค.ศ. 1926 โดยมีโมเดลว่าอะตอมประกอบด้วยกลุ่มหมอกของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส ด้วยเหตุผลที่ว่าอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กมากและเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วตลอดเวลาไปทั่วอะตอม จึงไม่สามารถบอกตำแหน่งและความเร็วพร้อมๆกัน ที่แน่นอนของอิเล็กตรอนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



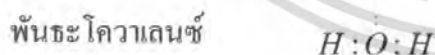
รูปที่ 2.3 แบบจำลองอะตอมของบอร์

### 2.1.2 พันธะเคมี

โมเลกุลเกิดจากอนุภาคของอะตอมยึดเหนี่ยวกัน แรงยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลเรียกว่า พันธะเคมี สารประกอบมีสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและรูปร่างโมเลกุลแตกต่างกันไป เนื่องจากว่าภายในโมเลกุลมีพันธะเคมีแตกต่างกัน เช่น พันธะเคมีไอออนิก พันธะเคมีโควาเลนต์ และพันธะเคมีโลหะ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะเคมีโควาเลนต์ ซึ่งจะใช้อธิบายพันธะเคมีของสารกึ่งตัวนำเป็นหลัก

### 2.1.3 พันธะโควาเลนต์

ในปี ค.ศ. 1924 จีออน ลิวอิส อธิบาย พันธะเคมีว่าเกิดจากอะตอมนำเอาอิเล็กตรอนมาร่วมกันเป็นคู่อิเล็กตรอน เพื่อเกิดเป็นพันธะ เช่น โมเลกุลของไฮโดรเจน เกิดจากอะตอมของไฮโดรเจน 2 อะตอม นำเอาอิเล็กตรอนเดี่ยวมาร่วมกันเป็นคู่อิเล็กตรอนคู่เพื่อเกิดเป็นพันธะ พันธะที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า พันธะ โควาเลนต์ โมเลกุลของน้ำเป็นตัวอย่างหนึ่ง ซึ่งเกิดพันธะ โควาเลนต์ โดยไฮโดรเจนแต่ละอะตอมใช้ 1 วาเลนซ์อิเล็กตรอนไปร่วมกับออกซิเจนหนึ่งอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 6 วาเลนซ์อิเล็กตรอน ดังนี้



อิเล็กตรอนที่มาร่วมกันเป็นคู่เพื่อเกิดเป็นพันธะเดี่ยวนั้นเรียกว่า อิเล็กตรอนคู่ร่วมพันธะ การเกิดพันธะโควาเลนต์ของธาตุในสารประกอบนั้น เกิดจากธาตุโลหะเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เพราะอโลหะมีพลังงานไอออไนเซชันสูงกว่าธาตุโลหะจึงให้อิเล็กตรอนได้ยาก ดังนั้นเมื่อโลหะทำปฏิกิริยากันจึงไม่มีอะตอมใดเป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอน แต่เป็นการนำเอาอิเล็กตรอนมาใช้ร่วมกันเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ขึ้น

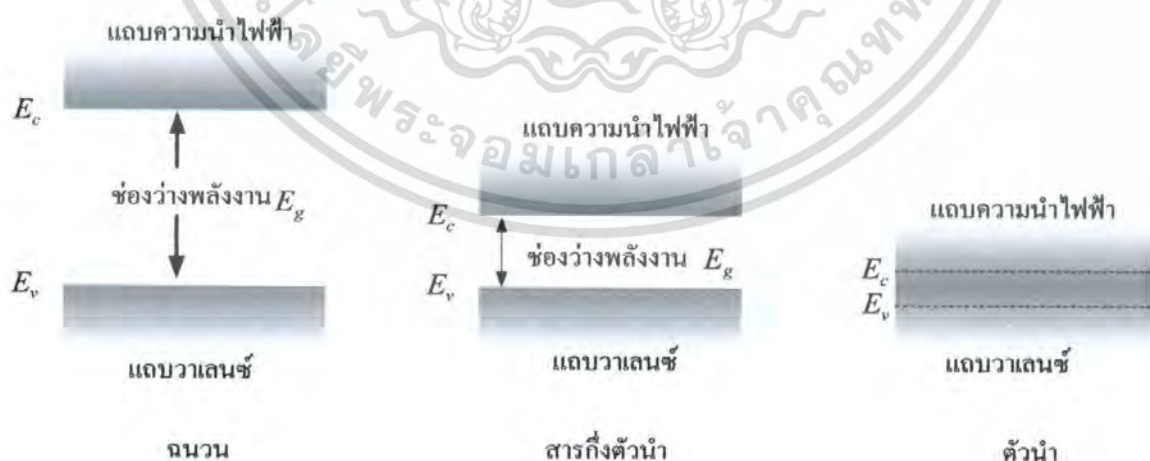
ลิวอิส ได้ตั้งข้อสังเกตว่าในการเกิดพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุไปเป็นสารประกอบหรือเป็นโมเลกุลอะตอมคู่หนึ่ง แต่ละธาตุจะพยายามทำให้ระดับพลังงานวงนอกสุดให้มีอิเล็กตรอนครบ 8 แนวโน้มดังกล่าวนำไปสู่ กฎออกเตต ซึ่งกล่าวว่าอะตอมพยายามทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนครบ 8

ในระดับวงนอกสุด จะโดยการให้อิเล็กตรอน รับอิเล็กตรอน หรือนำอิเล็กตรอนไปรวมระหว่างอะตอม อย่างไม่อย่างหนึ่ง

#### 2.1.4 ทฤษฎีแถบพลังงานของแข็ง

จากแบบจำลองอะตอมของบอร์ พบว่าอิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน อิเล็กตรอนวงนอกสุดจะมีระดับพลังงานต่ำสุด ดังนั้นจะมีโอกาสที่จะหลุดเป็นอิเล็กตรอนอิสระหรือเรียกว่าพาหะนำประจุ เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้มีการเคลื่อนที่ก็จะเกิดการนำกระแส ขึ้นอยู่กับปริมาณของอิเล็กตรอน ดังนั้นถ้าเราแบ่งสสารออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ สสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ตัวนำ และสารกึ่งตัวนำ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติการนำกระแสไฟฟ้า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การจำแนกประเภทของสสารเหล่านี้ตามความหนาแน่นของพาหะนำประจุที่สามารถเคลื่อนที่ได้ วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือใช้อธิบายคุณสมบัติเหล่านี้ก็คือ ทฤษฎีแถบพลังงาน กล่าวคือเมื่ออะตอมจำนวนมาก ถูกเรียงชิดติดกันจนกลายเป็นของแข็ง แต่ละระดับพลังงานของแต่ละอะตอม จะมีผลทำให้ระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องตามแบบจำลองของบอร์ ขยายกว้างขึ้นเป็นแถบพลังงานที่ต่อเนื่อง ซึ่งประกอบด้วยแถบพลังงานหลัก 3 แถบคือ

1. แถบพลังงานที่ถูกอิเล็กตรอนครอบครองเต็มทั้งหมด เรียกว่าแถบวาเลนซ์ ซึ่งอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงไม่มีการนำกระแสจากอิเล็กตรอน
2. ช่องว่างแถบพลังงานหรือแถบพลังงานต้องห้าม คือบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่
3. แถบนำไฟฟ้า คือแถบพลังงานที่อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ และแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.4 แผนภาพแถบพลังงานของ ฉนวน สารกึ่งตัว และตัวนำ

โคอะแกรมของแถบพลังงานของวัสดุที่คุณสมบัติเป็นฉนวน จะมีช่องว่างแถบพลังงานใหญ่ โดยทั่วไปมากกว่า  $9eV$  นั้นหมายความว่า อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะต้องได้รับพลังงานมากกว่า  $9eV$  จึงจะสามารถเลื่อนระดับพลังงานไปอยู่ในแถบความนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นแถบความนำไฟฟ้าของ

วัสดุที่เป็นฉนวนจึงไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ ทำให้วัสดุจำพวกฉนวนไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ ในทำนองเดียวกัน วัสดุสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ยกตัวอย่างเช่น ซิลิกอน จะมีค่าระดับพลังงานช่องว่าง  $E_g = 1.1eV$  ในสถานะอุณหภูมิสมบูรณ์ จะมีคุณสมบัติไม่กระแสไฟฟ้าได้เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเมื่อได้รับพลังงาน เช่น พลังงานความร้อน จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เลื่อนระดับพลังงานไปอยู่ในแถบความนำได้ ดังนั้นวัสดุชนิดแบบนี้จึงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นฉนวน(นำกระแสไฟฟ้าได้เล็กน้อย) และมีคุณสมบัติเป็นตัวนำเมื่อได้รับพลังงานเข้าไป เราจึงเรียกวัดวัสดุที่มีคุณสมบัติทั้ง 2 อย่างนี้ว่า สารกึ่งตัวนำ ส่วนในกรณีโลหะ จะพบว่าแถบพลังงานวาเลนซ์และแถบความนำจะซ้อนทับกัน ดังนั้นจึงสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ การประมาณจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น หรือได้รับพลังงานเข้าไป แล้วเลื่อนระดับเข้าสู่แถบความนำ มีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$n \approx \left[ 2 \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \right] e^{-E_g/2kT} \text{ electron/cm}^3 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $T$  คือค่าอุณหภูมิ หน่วย เคลวิน

$k$  คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์  $1.38 \times 10^{-23} J/K$  หรือ  $8.617 \times 10^{-5} eV/K$

$m_e$  คือมวลของอิเล็กตรอน  $9.1 \times 10^{-31} kg$

$h$  คือค่าคงตัวของพลังค์  $6.626 \times 10^{-34} \text{ Joules} \cdot s$

$E_g$  คือช่องว่างพลังงาน เขียนในหน่วยของ อิเล็กตรอน-โวลต์ ( $1eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$ )

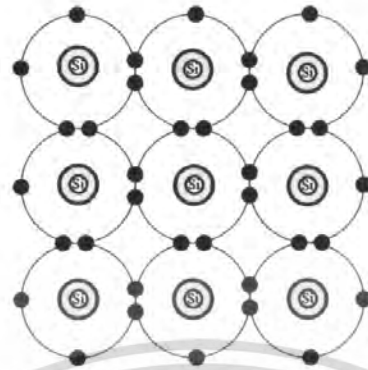
จำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่าช่องว่างพลังงาน  $E_g$  ของวัสดุ นั้นๆและอุณหภูมิ

## 2.2 วัสดุสารกึ่งตัวนำ

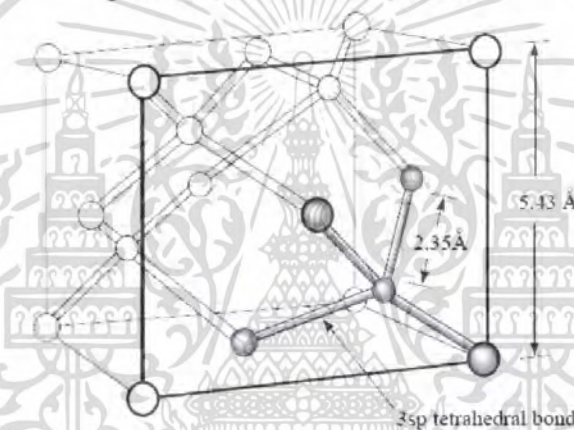
จากตารางธาตุทางเคมี เราพบว่าอะตอมของธาตุหมู่ 4 หรือธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว อะตอมจะมีการนำเอาอิเล็กตรอนเดี่ยวมารวมกันเป็นอิเล็กตรอนคู่เพื่อเกิดเป็นพันธะพันธะที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า พันธะ โควาเลนซ์ ทุกๆอะตอมจะมีอะตอมข้างเคียงและจะใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือเราเรียกโดยทั่วไปว่า สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เช่น ซิลิกอน(silicon : Si) แกลเซียมอาร์เซไนด์ ( Gallium Arsenide : GaAs )และ เจอร์มาเนียม ( Germanium : Ge) ซึ่งนับได้ว่าเป็นธาตุพื้นฐานที่สำคัญที่ถูกนำไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

### 2.2.1 สารกึ่งตัวนำแบบอินทรินซิก

ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างสารกึ่งตัวนำแบบอินทรินซิกที่เป็นซิลิกอน ประกอบการอธิบาย เนื่องจากซิลิกอน เป็นสารกึ่งตัวนำพื้นฐาน ที่ได้ถูกนำไปสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมากมาย เช่น ไดโอด ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ มอสเฟตทรานซิสเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ผลึกซิลิกอนแบบ 2 มิติ



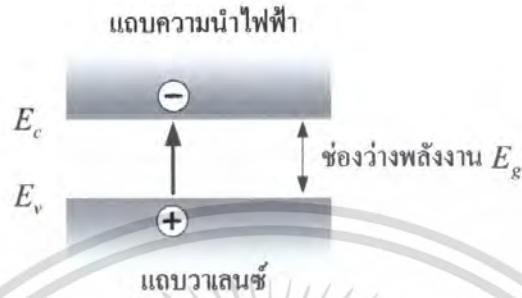
รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกเพชรสำหรับซิลิกอนแบบ 3 มิติ

ที่อุณหภูมิ 0 K อิเล็กตรอนทุกตัวจะคงสภาพในพันธะโควาเลนต์ และไม่มีอิเล็กตรอนอิสระซึ่งที่อุณหภูมินี้ โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ณ ที่อุณหภูมิห้อง พันธะโควาเลนต์บางตัวเกิดการแตกหัก ซึ่งเกิดจากการสั่นของอะตอมและวาเลนซ์อิเล็กตรอน จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่ได้รับพลังงานเพียงพอและเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น ซึ่งพลังงานที่ทำให้พันธะโควาเลนต์ของซิลิกอนเกิดการแตกหักที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ  $1.1\text{eV}$  ซึ่งจำนวนที่เกิดอิเล็กตรอนจะประมาณ  $10^{10}/\text{cm}^3$  ขณะที่อะตอมทั้งหมดของซิลิกอนจะประมาณ  $10^{23}/\text{cm}^3$

ถ้าเปรียบเทียบระหว่างอะตอมของเพชร ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเหมือนกัน จะต้องการพลังงานสูงกว่าที่จะทำให้พันธะเกิดการแตกหักซึ่งจะได้อิเล็กตรอนออกมาประมาณ  $10^8/\text{cm}^3$  ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งโครงสร้างผลึกของเพชร จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน พลังงานความร้อนภายในจะเพิ่มการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนหลุดจากพันธะโควาเลนต์ เข้าไปอยู่ในแถบพลังงานความนำ ซึ่งเป็นการกำหนดว่าในแถบพลังงานความนำจะมีเฉพาะอิเล็กตรอนอย่างเดียวและทำให้เกิดกระแสการ

ไหลในทิศทางเดียว ทุกครั้งที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานและข้ามแถบระดับพลังงานต้องห้ามไปอยู่ในแถบระดับพลังงานความนำจะทำให้เกิดโฮลในแถบระดับพลังงานวาเลนซ์ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนได้ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน เราเรียกว่ากระแสโฮล ซึ่งมีสภาพเป็นบวก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำเพิ่มขึ้นและเกิดกระแสเพิ่มขึ้นเช่นกัน



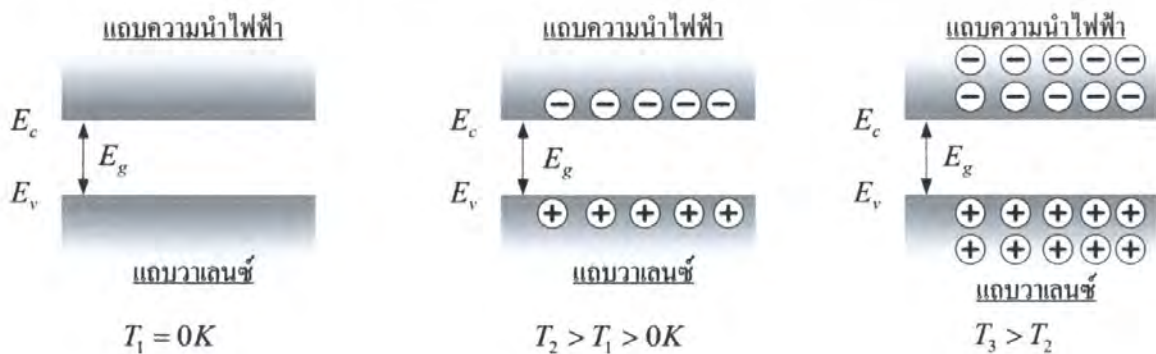
รูปที่ 2.7 กระบวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล



รูปที่ 2.8 การเกิดกระบวนการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล

ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอน  $n$ , และความหนาแน่นของโฮล  $p$ , ของสารกึ่งตัวนำแบบอินทรีนซิก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$n_i = p_i \approx \left[ 2 \left( \frac{2\pi m_c kT}{h^2} \right)^{3/2} \right] e^{-E_g/2kT} \tag{2.4}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

รูปที่ 2.9 แผนภาพความหนาแน่นของพาหะนำประจุที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

สำหรับซิลิกอนแบบอินทรินซิกหรือซิลิกอนบริสุทธิ์ที่  $300K$  จะมีอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบความนำ ทำให้เกิดโฮลในแถบวาเลนซ์เกิดขึ้น ซึ่งเราเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการเกิดอิเล็กตรอน  $G(T)$  หรือจำนวนคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อวินาที และในขณะเดียวกัน ก็จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่อยู่ในแถบความนำ มีระดับพลังงานลดลง และเคลื่อนกลับสู่แถบวาเลนซ์ เราเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการกลับมารวมตัวกันใหม่  $R(T)$  ซึ่งปรากฏการแบบนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลา โดยปกติแล้วเราจะคิดเป็นจำนวนคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลที่รวมตัวกันต่อหน่วยวินาทีเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอน ภายใต้เงื่อนไขสถานะสมดุล จะได้ว่า

$$G(T) = R(T) = kpn \quad (2.5)$$

สำหรับสารแบบอินทรินซิกในสถานะสมดุลและอุณหภูมิที่กำหนด เขียนสมการ (2.5) ใหม่คือ

$$G(T) = R(T) = kpn = kn_i^2(T) = kp_i^2(T) \\ np = n_i^2 = p_i^2 \quad (2.6)$$

ดังนั้นทำการลดรูปสมการจะได้สมการในรูปที่กระชับคือ

ซึ่งเราเรียกสมการ (2.6) นี้ว่า กฎการกระทำของมวล (mass action law) ของไอส์ไตน์

### ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของผลึกซิลิกอนและเจอร์มาเนียมแบบอินทรินซิก

คุณสมบัติ (300K)	ซิลิกอน	เจอร์มาเนียม
จำนวนอะตอม	14	32
ความหนาแน่นอะตอม ( $cm^3$ )	$5 \times 10^{22}$	$4.41 \times 10^{22}$
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ $\epsilon_r$	11.8	15.8
ช่องว่างพลังงาน $E_g$ (eV)	1.12	0.66
สภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอน $\mu_n$ ( $cm^2 / V - s$ )	1500	3900
สภาพความคล่องตัวของโฮล $\mu_p$ ( $cm^2 / V - s$ )	480	1900
$n_i = p_i$ จำนวน/ $cm^3$ )	$1.5 \times 10^{10}$	$2.4 \times 10^{13}$
จุดหลอมเหลว	1420	936

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 สารกึ่งตัวนำแบบเฮกซ์ทรินซิก

ซิลิกอนบริสุทธิ์ จะมีความเข้มข้นของอิเล็กตรอน ( $n_i$ ) และโฮล ( $P_i$ ) เท่ากันคือ ประมาณ  $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของซิลิกอนโดยขึ้นกับอุณหภูมิเป็นหลัก ทำให้ไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ ถ้าต้องการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเหล่านี้ของสารกึ่งตัวนำแบบอินทรินซิก โดยการเปลี่ยนแปลงพันธะทางเคมี โดยการเติมอะตอมสารเจือลงไป เพื่อกำหนดความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้สามารถควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ โดยสารกึ่งตัวนำแบบอินทรินซิกที่มีการเติมอะตอมสารเจือลงไป เราเรียกว่า สารกึ่งตัวนำแบบเฮกซ์ทรินซิก หรือ สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์

### สารกึ่งตัวนำแบบเฮกซ์ทรินซิกแบบเอ็น

ธาตุหมู่ 5 ในตารางธาตุทางเคมี คือ ธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น ธาตุฟอสฟอรัส อารเซนิก และ แอนติโมนี ถ้าเราเติม ธาตุในหมู่นี้ลงไป ในโครงสร้างผลึกซิลิกอนแบบอินทรินซิก อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์อิเล็กตรอนเหล่านี้ จะเข้าไปแทนที่วาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 4 ตัวของซิลิกอน ซึ่งอะตอมเหล่านี้จะรวมกันกับอะตอมของซิลิกอนได้พอดี ซึ่งกระบวนการนี้เราเรียกว่ากระบวนการสร้างพันธะโควาเลนซ์ของอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ในแลตทิซของซิลิกอนจะเหลืออิเล็กตรอน 1 ตัว ที่ต้องการพลังงานเพียง 0.05 eV ก็สามารถที่จะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ หรือเราเรียกว่าพลังงานการเกิด ไอออน นั้นหมายความว่าที่อุณหภูมิห้องเราสามารถสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ ซึ่งจะเห็นว่า โครงสร้างสารกึ่งตัวนำแบบนี้ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนได้โดยไม่เกิดโฮลในพันธะเกิดขึ้น ดังโครงสร้างผลึกของซิลิกอนที่ถูกเติมอะตอมสารเจือผู้ให้แบบนี้ เราจะเรียกว่าสารกึ่งตัวนำเฮกซ์ทรินซิกแบบเอ็น การที่สารกึ่งตัวนำแบบอินทรินซิกถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือผู้ให้ ซึ่งมีระดับพลังงาน  $E_D$  อยู่ใกล้ระดับพลังงานแถบความนำ ถ้าได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อย ก็จะให้เกิดกระบวนการไอออนไนซ์ให้อิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น หรือเรียกว่ากระบวนการเกิดอิเล็กตรอน และจะเกิดกระบวนการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้นตลอดเวลา นั่นคือจะมีอิเล็กตรอนบางส่วนลดระดับพลังงานมารวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ดังได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำเฮกซ์ทรินซิกแบบเอ็น จะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น ( สูงกว่าสารกึ่งตัวนำแบบอินทรินซิก ) และจำนวนของโฮลในแถบวาเลนซ์จะลดลง เนื่องจากกระบวนการรวมตัว ( ต่ำกว่าสารกึ่งตัวนำแบบอินทรินซิก ) ดังนั้น เราจะเรียกอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำแบบเฮกซ์ทรินซิกแบบเอ็น ว่า เป็นพาหะนำประจุส่วนมาก และ โฮล เป็นพาหะนำประจุส่วนน้อย



รูปที่ 2.10 สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกแบบเอ็น

จากทฤษฎีของกลศาสตร์ควอนตัม พบว่า ผลคูณของปริมาณพาหะนำประจุของสารกึ่งตัวนำทั้งแบบอินทรินซิกและเอ็กทรินซิกจะมีค่าคงที่ กฎนี้เรียกว่า กฎการกระทำมวลสาร ( Mass action law ) โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$p \cdot n = n_i^2$$

โดยที่  $p$  และ  $n$  คือปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำตามลำดับ ส่วน  $n_i$  คือปริมาณของโฮลหรืออิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำแบบอินทรินซิก ถ้ากำหนดให้

$N_d$  แทนจำนวนของอะตอมสารเจือผู้ให้ต่อหน่วยปริมาตร

$n_n, p_n$  แทนจำนวนอิเล็กตรอนอิสระและโฮลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกแบบเอ็นตามลำดับ

ณ อุณหภูมิห้อง ปริมาณอะตอมสารเจือผู้ให้  $N_d$  ต่อหน่วยปริมาตรที่เติมลง จะถูกกระตุ้นกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำ ดังนั้นพันธะทางเคมีของอะตอมสารเจือจะมีสภาพเป็นไอออนบวก  $N_d$  ตัวเช่นกัน แต่เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำแบบเอ็กทรินซิกจำเป็นต้องรักษาความเป็นกลางไว้ ดังนั้นประจุบวกและลบต้องเท่ากัน จะได้

$$N_d + p_n = n_n \approx N_d$$

เนื่องจากโฮลในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็กทรินซิกมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนอิสระ

**ตัวอย่าง 2.1** จงคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลของซิลิกอนที่เติมอะตอมสารเจือผู้ให้  $N_d = 10^{17}$  อะตอม /  $cm^3$

**วิธีทำ** ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน  $n_n \approx N_d$  ดังนั้นใช้กฎการกระทำมวลสาร

$$p_n n_n = n_i^2$$

ดังนั้น 
$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_d} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{17}} = 2.225 \times 10^3 \text{ โฮล / } cm^3$$

จะเห็นว่ามีความหนาแน่นของโฮลมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระมาก

ดังนั้นสภาพความนำของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกแบบเอ็นชนิดนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_n = (nq\mu_n) \cong (10^{17})(1.6 \times 10^{-19})(750) = 12.0 \text{ (โอมห์-ซม.)}^{-1}$$

**สารกึ่งตัวนำแบบเอ็กซีทรินซิกแบบพี**

ในกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำเอ็กซีทรินซิกแบบพี โดยใช้โบรอนซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เคมีลงไปเพื่อสร้างพันธะโควาเลนซ์กับซิลิกอนแล้ว ทำให้ขาดอิเล็กตรอนอยู่ 1 ตัว หรือเป็นตำแหน่งว่างอยู่ในโครงสร้างผลึกซึ่งเราเรียกว่า โฮล ซึ่งตำแหน่งว่างนี้ก็สามารถที่จะรับอิเล็กตรอนได้ เมื่ออิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียงเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งว่างนี้ก็จะทำให้เกิดตำแหน่งว่างใหม่เกิดขึ้น หรือในความหมายอีกอย่างหนึ่งก็คือ จะเกิดโฮลอิสระเกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้รอบโครงสร้างผลึก หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ อะตอมสารเจือผู้รับจะสร้างประจุบวกเคลื่อนที่ได้โดยอิสระ และเห็นว่าประจุลบของอะตอมโบรอนจะถูกยึดเหนี่ยวอยู่ภายในแลตทิซ และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นอะตอมสารเจือผู้รับจะทำให้เกิดโฮลอิสระ เราจะเรียกโครงสร้างผลึกอะตอมซิลิกอนที่ถูกเติมด้วยด้วยอะตอมสารเจือผู้รับว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กซีทรินซิกแบบพี ถ้ากำหนดให้

- $N_A$  แทน จำนวนของอะตอมสารเจือผู้รับต่อหน่วยปริมาตร
- $n_p, p_p$  แทน จำนวนอิเล็กตรอนอิสระและ โฮล ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในสารกึ่งตัวนำเอ็กซีทรินซิกแบบพีตามลำดับ

ณ อุณหภูมิห้อง ปริมาณอะตอมสารเจือผู้ให้  $N_A$  ต่อหน่วยปริมาตรที่เติมลง จะถูกกระตุ้นโฮลอิสระในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นพันธะทางเคมีของอะตอมสารเจือผู้รับจะมีสภาพเป็นไอออนลบ  $N_D$  ตัวเช่นกัน แต่เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำแบบเอ็กซีทรินซิกจำเป็นต้องรักษาความเป็นกลางไว้ ดังนั้นประจุบวกและลบต้องเท่ากัน จะได้

$$N_A + n_p = p_p \approx N_A \tag{2.8}$$

เนื่องจากโฮลอิสระในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็กซีทรินซิกแบบพี มีจำนวนมากกว่าอิเล็กตรอนอิสระมาก



**รูปที่ 2.11 พันธะเคมีและแผนภาพระดับพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบเอ็กซีทรินซิกแบบพี**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง 2.2 จงคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลของซิลิกอนที่เติมอะตอมโบรอน

จำนวน  $2 \times 10^{16}$  อะตอม /  $cm^3$  พร้อมสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 300K

วิธีทำ อะตอมของโบรอนเป็นอะตอมสารเจือผู้รับ ที่อุณหภูมิ 300K จะเกิดการไอออไนซ์เป็นอิเล็กตรอนอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น

ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์  $p_p \approx N_A$  ดังนั้นใช้กฎการกระทำมวลสาร

$$p_n n_n = n_i^2$$

ดังนั้น

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{2 \times 10^{16}} = 11.250 \times 10^3 \text{ โฮล} / cm^3$$

จะเห็นว่ามีย่านน้อยกว่าความหนาแน่นของโฮลอิสระในแถบวาเลนซ์มาก

ดังนั้นสภาพความนำของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกแบบพีชนิดนี้

$$\sigma_n = (nq\mu_n) \cong (2 \times 10^{16})(1.6 \times 10^{-19})(350) = 1.12 \text{ (โอมห์-ซม.)}^{-1}$$

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากสนามไฟฟ้า

กลไกการไหลของกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ กรณีแรกที่เราจะพิจารณานั้น คือการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงผลักดันของสนามไฟฟ้า โดยที่ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาค จะแปรผันตรงกันสนามไฟฟ้า จากรูป 2.12

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้า  $-q$  จะมีค่าเท่ากับ

$$v = -\mu_n \vec{E} \quad (2.9)$$

ส่วนความเร็วของโฮล ซึ่งมีประจุไฟฟ้า  $+q$  จะมีค่าเท่ากับ

$$v = +\mu_p \vec{E} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.12 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาค จะแปรผันตรงกันสนามไฟฟ้า

$$J_n^{dr} = (-q)nv = qn\mu_n \vec{E} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.12) การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อำนาจเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้า

เมื่อ  $n, p$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

$\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพความคล่องตัวของตัวของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

เราเรียกสมการความหนาแน่นของพาหะนำประจุทั้งสองในสมการ 2.10 และ 2.11 ว่าสมการกระแสเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า โดยที่ค่า  $\mu_n, \mu_p$  และ  $n, p$  เป็นอิสระจากสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม และถ้าเรากำหนดให้  $\sigma$  คือค่าการนำไฟฟ้าของพาหะนำประจุไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ มีหน่วยเป็น  $(1/\Omega - m)$  ดังนั้น  
ในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าการนำไฟฟ้าคือ

$$\sigma_n = q\mu_n n$$

และโฮลจะมีค่าการนำไฟฟ้าคือ

$$\sigma_p = q\mu_p p$$

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าจะมีพาหะนำประจุไฟฟ้าทั้งสองชนิด เราจะได้ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่เกิดจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าคือผลรวมของความหนาแน่นไฟฟ้าที่เกิดจากพาหะนำประจุทั้งสอง

$$J_{dr} = J_p^{dr} = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.13)$$

ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (2.14)$$

ค่าความต้านทานนั้นพิจารณาได้จากกฎของโอห์ม คืออัตราส่วนของแรงดันที่ตกคร่อมต่อหน่วยกระแสที่ไหลผ่าน ดังนั้นถ้าพิจารณาค่าความต้านทาน  $R$  ที่สกรไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านสารกึ่งตัวนำซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด  $A(m^2)$  และความยาวเท่ากับ  $L$  จะมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{L}{\sigma A} \quad (2.15)$$

**กระแสไฟฟ้าเนื่องการแพร่ของประจุพาหะ**

การแพร่ของพาหะนำประจุ เกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นในแต่ละจุดของสารกึ่งตัวนำมีความหนาแน่นของพาหะนำประจุไม่เท่ากัน เมื่อพาหะนำประจุมีการเคลื่อนที่จึงทำให้เกิดการไหลของกระแสเกิดขึ้น โดยอัตราการแพร่ของพาหะนำประจุจะแปรผันตรงกับความชันของความหนาแน่นของพาหะนำประจุนั้น

ถ้าเราพิจารณาการแจกแจงความหนาแน่นของพาหะนำประจุของโฮล  $J_p^{diff}$  โดยคาดคะเนว่าโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  (บวก) และเนื่องจากโฮลมีค่าประจุเป็นบวก จึงทำให้มีทิศทางของกระแสไปในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $J_p^{diff} \propto -\frac{dp}{dx}$  ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (2.16)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าประจุของโฮลมีค่าเป็นบวกดังนั้นจึงทำให้ สมการการแจกแจงความหนาแน่นของพาหะนำประจุของโฮลเท่ากับ  $-\frac{d(p)}{dt}$  หรือมีค่าความชันของสมการการแจกแจงความหนาแน่นของพาหะนำประจุของโฮลลดลงตามทิศทางเคลื่อนที่ของโฮล ดังนั้นทิศทางกระแสจะมีทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ ซึ่งค่า  $J_p^{diff}$  จะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของพาหะนำประจุไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตัว (Diffusion Coefficient) จะได้

$$J_p^{diff} = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $D_p$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ตัวของโฮล มีหน่วยเป็น ( $m^2 / sec$ )

ในทำนองเดียวกัน ดังนั้นความหนาแน่นกระแสเนื่องจากการแพร่ของอิเล็กตรอน  $J_p^{diff}$  คือ

$$J_p^{diff} = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $D_n$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ตัวของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็น ( $m^2 / sec$ )

**ความหนาแน่นกระแสทั้งหมด**

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า บางครั้ง เราเรียกว่ากระแสขยับเลื่อน ( drift current ) และความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากการแพร่ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสทั้งหมด คือ ผลรวมของความหนาแน่นกระแสทั้งสอง

$$J_{total} = J_n + J_p$$

$$J_{total} = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} + q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.19)$$

ดังนั้นถ้าเราพิจารณาแยกเป็นกรณีของความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ( $J_n$ ) และความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ โฮล ( $J_p$ ) แสดงสมการความสัมพันธ์ตามลำดับได้ดังนี้

$$J_n = J_n^{dr} + J_n^{diff} = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.20)$$

และ

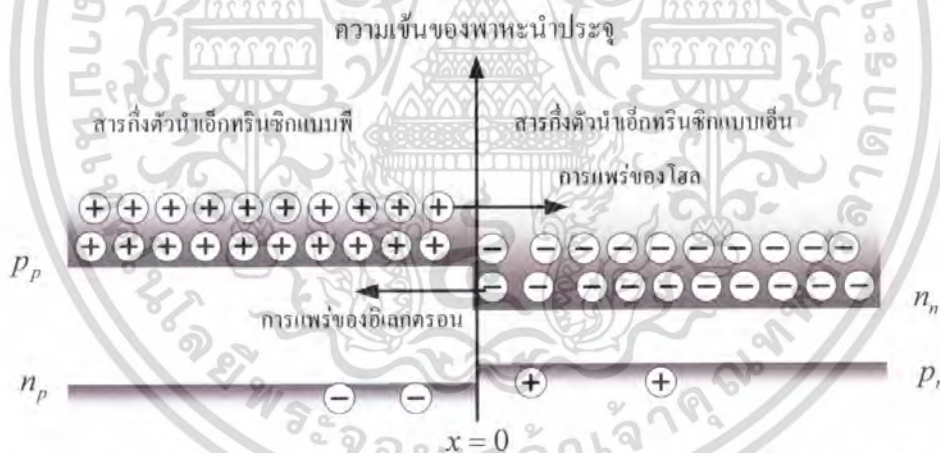
$$J_p = J_p^{dr} + J_p^{diff} = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.21)$$

### 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อพีเอ็น

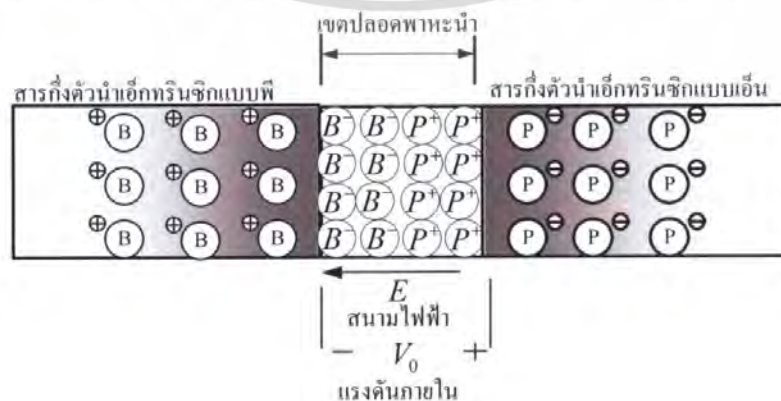
รอยต่อพีเอ็นเกิดจากการที่เรานำสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกแบบเอ็นและพีมาสัมผัสกันอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำส่วนมากจะมีรอยต่อพีเอ็นอย่างน้อยหนึ่งรอยต่อ ซึ่งจะมีคุณสมบัติ ในการเรียงกระแส การขยายสัญญาณ สวิตซ์ และฟังก์ชันการทำงานของวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ต่างๆ เมื่อนำสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกแบบเอ็นและพีมาสัมผัสเป็นเนื้อเดียวกัน ที่สภาวะสมดุลความร้อนหมายถึงระดับพลังงานเฟอร์มิจะคงที่ค่าเดียวกันตลอดทั้งชิ้นสารกึ่งตัวนำ เมื่อให้แรงดันระหว่างรอยต่อพีเอ็น รอยต่อพีเอ็นจะ

เอกส วิชาเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์เผยแพร่เนื้อหา การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่อยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนอีกต่อไป นั้นหมายความว่าระดับพลังงานเฟอร์มิมีขนาดไม่เท่ากันตลอดเนื้อสารกึ่งตัวนำ ที่รอยต่อพีเอ็นจะมีความจุไฟฟ้าค่าหนึ่ง เรียกว่า ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ซึ่งจะ เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่มีรอยต่อพีเอ็นอยู่ สิ่งที่เราต้องคำนึงเสมอก็คือ สารกึ่งตัวนำทั้งหมดเป็นผลึกรูปเดี่ยวซึ่งบริเวณหนึ่งถูกเจือด้วย อะตอมสารเจือผู้รับ เพื่อสร้างบริเวณพี และอีกบริเวณหนึ่งถูกเจือด้วยอะตอมสารเจือผู้ให้ เพื่อสร้าง บริเวณเอ็น รอยต่อที่แยกกันระหว่างบริเวณเอ็นและพีเรียกว่า รอยต่อเมทัลลurgical junction) ทางด้านบริเวณเอ็นจะมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะนำประจุส่วนมาก (และโฮลเป็นพาหะนำประจุ ส่วนน้อย อิเล็กตรอนทางด้านเอ็นซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าทางด้านพี จะแพร่ไปด้านพี ทำให้อะตอม สารเจือผู้ให้มีสภาพเป็นไอออนบวก ดังแสดงในรูป 2.13 ส่วนด้านบริเวณพี จะมีโฮลเป็นพาหะนำประจุ ส่วนมาก และอิเล็กตรอนเป็นพาหะนำประจุส่วนน้อย โฮลทางด้านพีซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าทางด้าน เอ็น จะแพร่ไปด้านเอ็น ทำให้อะตอมสารเจือผู้รับมีสภาพเป็นไอออนลบดังแสดงในรูป 2.13 ไอออนบวก และลบนี้ จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้าใกล้บริเวณรอยต่อ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 แผนภาพความเข้มข้นของพาหะนำประจุส่วนมากและส่วนน้อยของรอยต่อพีเอ็น



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.14 เขตปลอดพาหะนำประจุและสนามไฟฟ้าภายในเนื่องจากไอออนบวกและลบ ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำชนิด N มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนมากกว่าโฮล ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด P มีจำนวนโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนอิสระ จำนวนของอิเล็กตรอนอิสระหรือโฮลนี้ เรียกว่า พาหะ (Carrier) ในสารกึ่งตัวนำชนิด N จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ มากกว่าโฮล อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้ เรียกว่า พาหะข้างมาก (majority carrier) ส่วนโฮลที่มีจำนวนเพียงเล็กน้อยในเนื้อสารเรียกว่า พาหะข้างน้อย (minority carrier) ในสารกึ่งตัวนำชนิด P จะมีโฮลเป็นพาหะข้างมาก ส่วนอิเล็กตรอนอิสระจะเป็นพาหะข้างน้อย



รูปที่ 2.15 พาหะข้างน้อยและพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิด N และ P

รอยต่อพี-เอ็น

การนำสารกึ่งตัวนำพีและเอ็นมาเชื่อมต่อกัน ณ จุดที่เชื่อมต่อจะเกิดเป็นรอยต่อที่เรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น (P - N junction) อิเล็กตรอนในสารเอ็นจะเคลื่อนที่ไปแทนที่โฮลในสารพีเกิดเป็นช่วงรอยต่อที่เรียกว่า ช่วงดีพลีชัน (depletion region) และรอยต่อนี้ก็เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น จะมีค่ามากขึ้นอยู่กับจำนวนประจุที่เกิดขึ้นที่รอยต่อนั้น ซึ่งเมื่อชั้นของรอยต่อเริ่มก่อตัวขึ้นก็จะไปมีผลทำให้ไม่มีการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนอิสระ และ โฮลข้ามรอยต่ออีกต่อไป กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ประจุไฟฟ้าลบใน p-region ที่อยู่ใกล้กับบริเวณรอยต่อจะผลักอิเล็กตรอนอิสระจาก n-region ไม่ให้เข้ามารวมอีก จากปฏิกิริยานี้จะเป็นการป้องกันไม่ให้ Depletion Region ขยายกว้างออกไปอีก

ประจุไฟฟ้าบวก และประจุไฟฟ้าลบที่บริเวณรอยต่อนี้จะมีศักย์ไฟฟ้าสะสมในตัวระดับหนึ่งและเนื่องด้วยประจุทั้งสองมีขั้วตรงข้ามกัน จึงทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าปรากฏคร่อมรอยต่อ ซึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้านี้มีชื่อเรียกว่า กำแพงศักย์ไฟฟ้า (Barrier Potential) หรือ กำแพงแรงดันไฟฟ้า (Barrier Voltage)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรูปที่ 2.16 การเกิดช่วงดีพลีชันเมื่อนำสารพีและเอ็นมาต่อกัน

### การไบแอสสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น

เมื่อนำสารพี-เอ็นมาต่อกันเกิดช่วงดีพลีชันขึ้น ทำให้ในสภาวะปกติสารกึ่งตัวนำพี-เอ็นนี้จะไม่สามารถนำกระแสได้ เมื่อต้องการให้นำกระแสก็ต้องมีพลังงานจากภายนอกจ่ายแรงดันให้แก่สารกึ่งตัวนำนั้น เริ่มด้วยต่อแรงดันขั้วบวกเข้ากับที่สารพี และขั้วลบเข้ากับที่สารเอ็น อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดัน จะผลักอิเล็กตรอนในสารเอ็นให้เคลื่อนที่ข้ามช่วงดีพลีชัน ในขณะที่เดียวกันแรงดันที่จ่ายให้นี้ก็ทำให้อิเล็กตรอนในสารพีเคลื่อนที่ออกมา และเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดัน ดังนั้นจึงเกิดช่องว่างหรือโฮลขึ้น อิเล็กตรอนจากสารเอ็นจึงสามารถเข้ามารวมได้ ทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำกระแสได้ การจ่ายแรงดันเข้าที่จุดต่อของสารพี-เอ็นนี้เรียกว่า การไบแอส (bias) ดังนั้นการทำให้สารกึ่งตัวนำพี-เอ็นนำกระแส ได้ดีต้องต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับที่สารพี และขั้วลบเข้ากับที่สารเอ็นการไบแอสแบบนี้เรียกว่า การไบแอสตรง (forward bias) ถ้าจ่ายแรงดันกลับขั้วจากเดิมคือ ต่อขั้วบวกเข้ากับที่สารเอ็น และขั้วลบเข้ากับที่สารพี จะเรียกว่า ไบแอสกลับ (reverse bias) เมื่อทำเช่นนี้ อิเล็กตรอนที่สารเอ็นจะเคลื่อนที่ออกห่างจากรอยต่อ ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจากแหล่งจ่ายแรงดันก็จะเข้าไปรวมกับโฮลในสารพี ยิ่งทำให้ช่วงดีพลีชันเพิ่มมากขึ้น อิเล็กตรอนในสารเอ็นไม่สามารถข้ามช่วงดีพลีชันที่เพิ่มมากขึ้นไปรวมกับโฮลในสารพีได้ สารกึ่งตัวนำพี-เอ็นจำไม่นำกระแส



รูปที่ 2.17 การไหลของกระแสอิเล็กตรอนใน

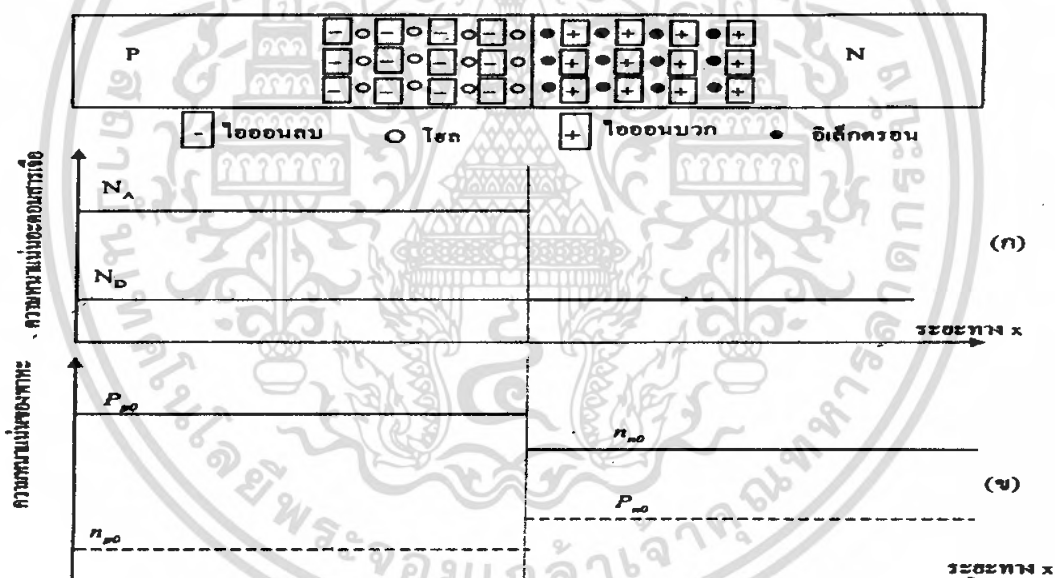
ในความเป็นจริงทางปฏิบัติจะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่อยู่ใกล้ๆ รอยต่อสามารถข้ามไปรวมกับโฮลในสารพีได้เล็กน้อย ส่งผลให้เกิดกระแสไหลขึ้นเป็นจำนวนน้อยมากๆ นั่นคือเกิดเป็นกระแสรั่วไหลขึ้น (leakage current) การไบแอสกลับหากจ่ายแรงดันสูงมากๆ และจ่ายเป็นระยะเวลาานาน ก็จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นเสียหาย แต่ก็มีกรณีการไบแอสกลับนี้ไปใช้กับอุปกรณ์ที่เรียกว่า ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) อันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันให้คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล (PN Junction at equilibrium)

### 2.4.1 ปฏิกิริยาการแพร่ที่รอยต่อแบบขั้นบันไดในภาวะสมดุล

รอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นได้ด้วยวิธีต่างๆ หลายวิธี และจะทำให้ได้รอยต่อที่มีลักษณะต่างกันอย่างไรก็ดี เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายและวิเคราะห์คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นในเบื้องต้นนี้ เราจะเริ่มพิจารณาถึงรอยต่อพี-เอ็นชนิดขั้นบันได (step junction) ซึ่งด้านพีจะมีอะตอมสารเจือชนิดพีกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ เช่นเดียวกับด้านเอ็นก็จะมีอะตอมสารเจือชนิดเอ็นกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) ซึ่งรอยต่อแบบขั้นบันไดในลักษณะนี้ สามารถสร้างได้ด้วยวิธีการแพร่สารเจือ (diffusion process) โดยที่จริงแล้วจะมีลักษณะเป็นรอยต่อชนิดลาด (graded junction) อย่างไรก็ตามอาจอนุมานให้มีรูปแบบเป็นรอยต่อชนิดขั้นบันไดได้ เช่นในกรณีที่ การกระจายความหนาแน่นของสารเจือบริเวณรอยต่อมีความชัน (slope) สูงๆ



รูปที่ 2.18 (ก) ลักษณะการกระจายของอะตอมเจือสาร และ (ข) ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็น ชนิดขั้นบันได ก่อนเกิดรอยต่อ

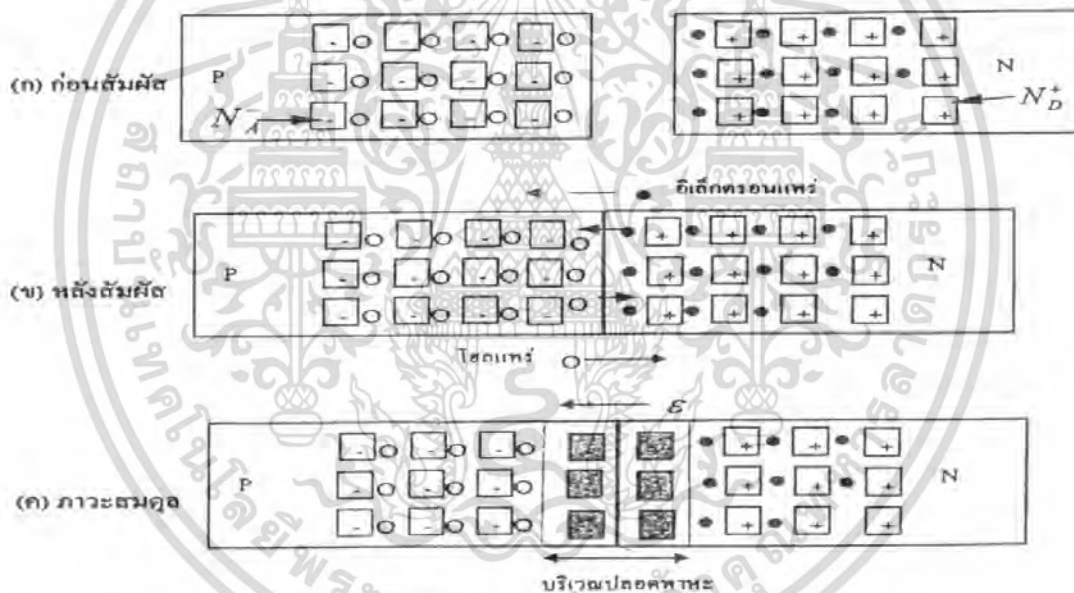
นอกจากนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์รอยต่อพี-เอ็น ชนิดขั้นบันไดนี้ ก็สามารถนำไปปรับใช้กับกรณีของรอยต่อชนิดลาดได้โดยง่ายและสะดวกอีกด้วย

ในการพิจารณารอยต่อชนิดขั้นบันไดนี้ ในเบื้องต้นจะสมมติการไหลของกระแสเพียง 1 มิติ เฉพาะในทิศทางแกน  $x$  เท่านั้นซึ่งกระแสนี้มีทิศทางตั้งฉาก กับพื้นที่หน้าตัดของรอยต่อที่มีอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และโฮลจากด้านที่มีความหนาแน่นสูงกว่าไปยังด้านที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า โดยโฮลจะเริ่มแพร่จากด้านพีไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านเอ็นเข้าไปในด้านพี ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข)

การแพร่ของพาหะไปยังด้านตรงข้ามนี้ จะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ๆกับรอยต่อเป็นอันดับแรก ดังนั้น ไอออนของอะตอมผู้ให้ และ ไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งเป็นประจุที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงสามารถแสดงประจุไฟฟ้าออกมาได้ โดย ไอออนบวกของอะตอมผู้ให้แสดงประจุไฟฟ้าบวกและ ไอออนลบของอะตอมผู้รับแสดงประจุลบ ดังนั้นจึงทำให้เริ่มมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณภายในรอยต่อและเรียกว่า “ สนามไฟฟ้าภายใน “ (built in electric field) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ค) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของ โฮลจากด้านพี และต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็น ไม่ให้ข้ามไปยังด้านตรงข้าม อย่างไรก็ดี ในช่วงแรกๆ เนื่องจากสนามไฟฟ้านี้มีค่าน้อย



รูปที่ 2.19 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น (ก) ก่อนเกิดรอยต่อ (ข) หลังจากเกิดรอยต่ออิเล็กตรอน และโฮลแพร่ข้ามรอยต่อ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในที่รอยต่อ และ (ค) รอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุลอิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถข้ามรอยต่อได้

แรงจากสนามไฟฟ้าที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของพาหะจึงมีค่าน้อยทำให้แรงที่เกิดจากการแพร่มีค่ามากกว่า ดังนั้น อิเล็กตรอนและ โฮล จึงสามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้ต่อไป แต่อัตราการแพร่จะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่สนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะมีประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในที่สุดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะมีค่ามากพอที่จะยับยั้งการแพร่ของอิเล็กตรอนและ โฮลได้พอดี อิเล็กตรอนและโฮลจึงไม่สามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้อีกต่อไป ในภาวะนี้กระแสของพาหะสุทธิ จะเป็นศูนย์ หรือก็คือกระแสที่เกิดจากการแพร่ของพาหะ (diffusion current) จะเท่ากับกระแสครีปที่ของพาหะ (drift current) ไม่มีการเคลื่อนที่ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

current) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ ซึ่งกระแสทั้งสองนี้มีทิศทางตรงกันข้าม กระแสรวมจึงเป็นศูนย์ เราเรียกภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” หรือ “equilibrium” บริเวณรอยต่อ ซึ่งมีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่นี้ จะเป็นบริเวณที่แทบจะไม่มีพาหะอยู่เลย เนื่องจากพาหะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าพัดพาออกไปหรือปัดออกไปนอกบริเวณนี้ ดังนั้นย่านนี้ จึงถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” หรือ “depletion region” และบริเวณนี้ก็คือ บริเวณซึ่งมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นนั่นเอง ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนี้ โดยทั่วไปมีน้อยกว่า 1 ไมครอน และการที่เกิดมีสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ หรือบริเวณปลอดพาหะ แสดงว่ามีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างด้านพี และด้านเอ็น ซึ่งเป็นผลจากการสัมผัสกัน ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ความต่างศักย์นี้ถูกเรียกว่า “ศักย์สัมผัส” หรือ “Contact potential” และศักย์สัมผัสที่ปรากฏบริเวณปลอดพาหะนี้ บางครั้งถูกเรียกว่า “กำแพงศักย์ภายใน” หรือ “ศักย์ภายใน” (built-in potential barrier or built in potential) ขนาดของศักย์ภายในนี้ ( $V_{bi}$ ) จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ด้านทั้งสองของรอยต่อและอุณหภูมิที่รอยต่อ แต่โดยทั่วไป จะมีค่าน้อยกว่า 1 โวลต์ สมการของกระแสที่เกิดจากการแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อ เขียนได้ด้วยสมการของกระแสการแพร่ดังนี้

กรณีของกระแสโฮลจากด้านพี

$$J_{p(diff)} = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.9)$$

สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดกระแส drift ของโฮลซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$j_{p(drift)} = pq\mu_p \varepsilon \quad (2.10)$$

ดังนั้นกระแสโฮลรวมหรือกระแสโฮลสุทธิที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น คือ

$$\begin{aligned} j_{p(total)} &= J_{p(diff)} + J_{p(drift)} \\ &= qD_p \frac{dp}{dx} - pq\mu_p \varepsilon \end{aligned} \quad (2.11)$$

ในภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อ สนามไฟฟ้าภายในมีค่ามากพอดี ที่จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลข้ามรอยต่อ หรือก็คือกระแสโฮลสุทธิเท่ากับศูนย์

$$j_{p(total)} = 0 = qD_p \frac{dp}{dx} - pq\mu_p \varepsilon$$

หรือ

$$J_{p(diff)} + J_{p(drift)} = 0 \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล (hole concentration)

$D_p$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล (hole's mobility)

$\mu_p$  คือ สภาพคล่องของโฮล (hole's mobility)

$\mathcal{E}$  คือ สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ (built in electric field)

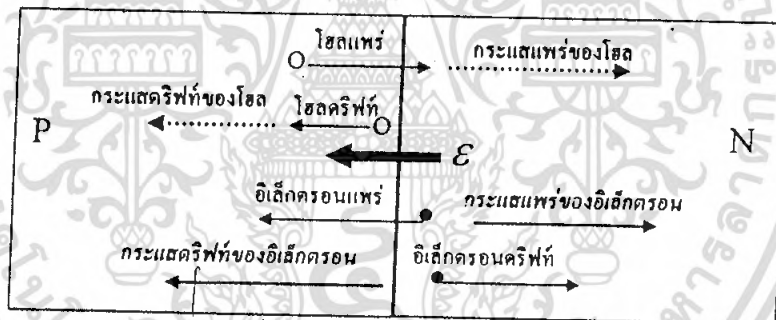
และสำหรับกรณีอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นก็สามารถพิจารณาได้ทำนองเดียวกันกับกรณีของโฮล กล่าวคือ ในภาวะสมดุล กระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนจะเท่ากับกระแสครีฟท์ของอิเล็กตรอน หรือ

$$J_{n(diff)} + J_{n(drift)} = 0$$

โดยที่  $J_{n(diff)}$  คือ กระแสการแพร่ของอิเล็กตรอน

หรือ  $J_{n(drift)}$  คือ กระแสครีฟท์ของอิเล็กตรอน

สำหรับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เนื่องจากการแพร่และการครีฟท์และทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.19



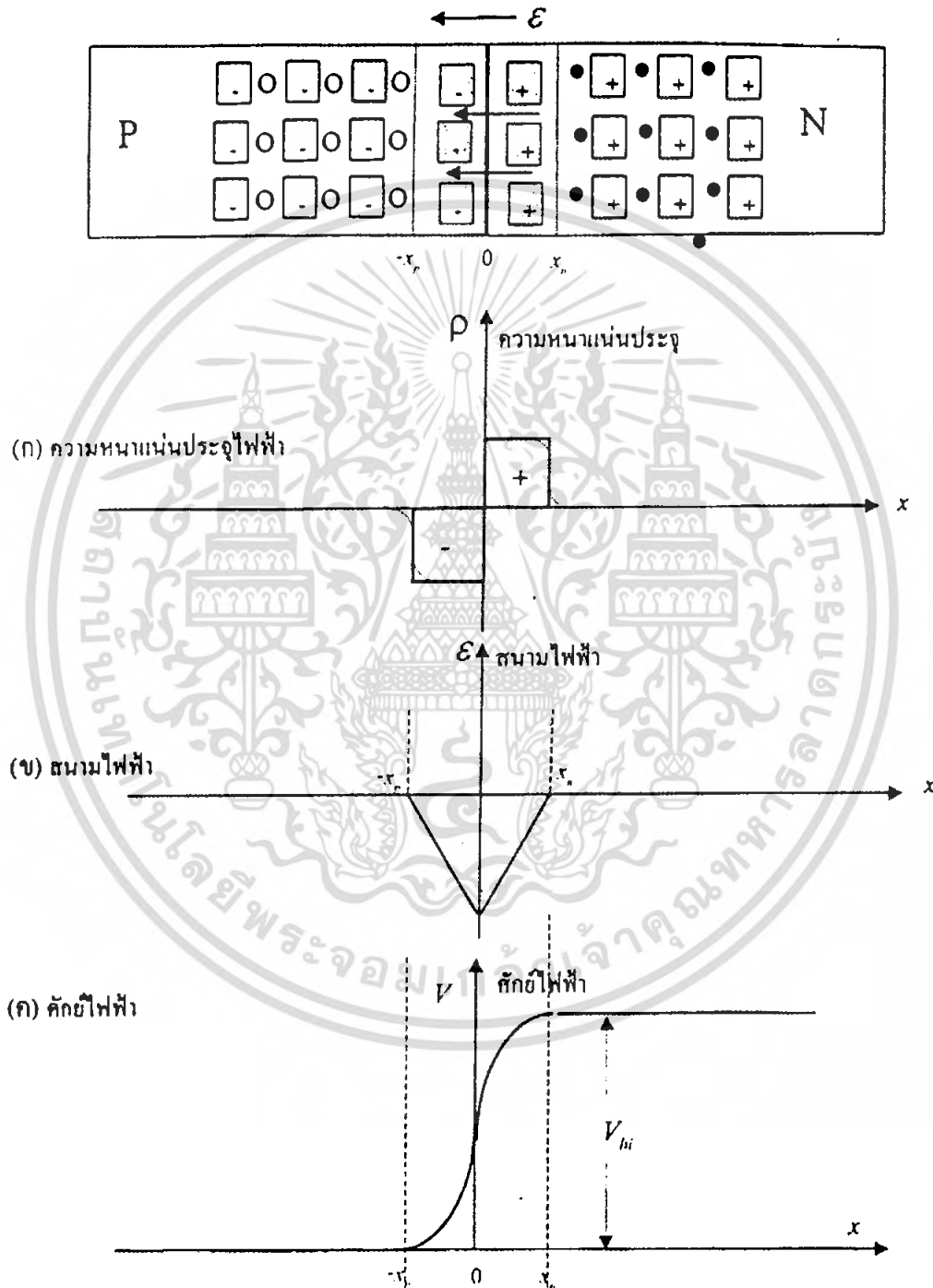
รูปที่ 2.20 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอน เนื่องจากการแพร่และการครีฟท์ และทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพี-เอ็น

ขณะที่รอยต่อพี-เอ็นอยู่ในภาวะสมดุล การกระจายของความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าภายใน และศักย์ภายใน ที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.20 (ก), (ข), (ค) ตามลำดับ

## 2.5 ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยต่อ (Built-in Potential : $V_{bi}$ )

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อพี-เอ็น หรือบริเวณรอยต่อที่ถูกเรียกว่า “ศักย์ภายใน” หรือ “แรงดันภายใน” (built in voltage :  $V_{bi}$ ) ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็น เข้าสู่ภาวะสมดุล สามารถถูกพิจารณาและหาสมการแสดงศักย์ภายในที่ปรากฏในบริเวณรอยต่อพี-เอ็น ในช่วงจากด้านพีที่ตำแหน่ง  $-x_p$  ถึงด้านเอ็นที่ตำแหน่ง  $x_n$  โดยที่  $x = 0$  เป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงกลางของรอยต่อ เนื่องจากเมื่อรอยต่อเข้าสู่ภาวะเอกสสารนี้เป็นเอกสสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมดุล กระแสดริฟท์และกระแสแพร่จะเท่ากัน ทำให้กระแสสุทธิเป็นศูนย์ เช่นกรณีของกระแส อิเล็กตรอน จะได้ว่า



รูปที่ 2.21 ลักษณะการกระจายของ (ก) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (ข) สนามไฟฟ้าภายใน และ (ค) ศักย์ไฟฟ้าภายใน ที่ปรากฏบริเวณรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

**ศักย์ไฟฟ้าภายใน ที่ปรากฏบริเวณรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_{n(x)} = J_{n(diff)} + J_{n(drift)} = 0$$

หรือ

$$0 = qD_{(n)} \frac{dn(x)}{dx} + n(x)q\mu_n \varepsilon(x)$$

ดังนั้น

$$\varepsilon(x) = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} = -\frac{kT}{q} \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} \quad (2.13)$$

แต่เนื่องจาก

$$\varepsilon(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad (2.14)$$

ดังนั้น

$$\varepsilon(x) dx = -dV(x) \quad (2.15)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.15) ตลอดบริเวณรอยต่อ จาก  $x = -x_p$  ถึง  $x = x_p$  จะได้เป็น

$$-\int_{-x_p}^{x_p} \varepsilon(x) dx = \int_{V(-x_p)}^{V(x_p)} dV(x) = V_{(x_p)} - V_{(-x_p)} = V_{bi} \quad (2.16)$$

แทนสมการ ที่ (2.13) ใน (2.16) จะได้เป็น

$$\begin{aligned} V_{bi} &= -\int_{-x_p}^{x_p} \varepsilon(x) dx = \frac{kT}{q} \int_{n(-x_p)}^{n(x_p)} \frac{1}{n(x)} dx(x) \\ &= \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{n(x_p)}{n(-x_p)} \right] \end{aligned} \quad (2.17)$$

ในกรณีของรอยต่อพี-เอ็น แบบชั้นบันได ซึ่งด้านพีถูกเติมด้วยอะตอมของผู้รับ  $N_A$  และด้านเอ็นถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้  $N_D$  ดังนั้น

$$n(x_p) = n_n = N_D \quad (2.18)$$

$$n(-x_p) = n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.19)$$

แทนสมการที่ (2.18) และ (2.19) ในสมการที่ (2.17) จะได้ว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น คือ

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{n_n}{n_p} \right] \quad (2.20)$$

หรือ

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] \quad (2.21)$$

ในกรณีรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน หรือซิลิคอนไดโอดที่เติมอะตอมผู้ให้  $N_D$  และอะตอมผู้รับ  $N_A$  โดยมีความหนาแน่นเท่ากันคือ  $N_D = N_A = 10^{15}$  อะตอม/ลบ.ซม. ที่อุณหภูมิ  $T = 300$  เคลวิน ค่าของศักย์ภายใน  $V_{bi} = (0.259) \ln \left( \frac{10^{30}}{10^{20}} \right) \approx 0.6$  โวลต์ ซึ่งถือเป็นค่าปกติทั่วไป ของซิลิคอนไดโอด และดังนั้นในกรณีของไดโอดที่เติมอะตอมสารเจือด้วยความหนาแน่นปกติดังในตัวอย่างนี้หรือที่เรียกว่า

“Nondegenerately doped diode” จะได้ว่า  $V_{bi} < \frac{E_g}{q}$  เสมอ หรือก็คือ  $V_{bi}$  มีค่าน้อยกว่า ขนาดของช่องว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงาน ( $E_g$ ) นั่นคือค่า  $V_{bi}$  ของไดโอดแบบซิลิคอน จะมีค่าน้อยกว่า 1.12 โวลต์ และไดโอดแบบเยอรมันเนียมจะมีค่า  $V_{bi}$  น้อยกว่า 0.661 โวลต์ และสำหรับแกเลียมอาร์เซไนด์จะมีค่า  $V_{bi}$  น้อยกว่า 1.42 โวลต์ตามลำดับ

นอกจากนี้ สมการที่ (2.20) อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{\frac{qV_{bi}}{kT}} \quad (2.22)$$

และเนื่องจากในภาวะสมดุล

$$p_p n_p = n_i^2 = n_n p_n \quad \text{หรือ} \quad \frac{P_p}{P_n} = \frac{n_n}{n_p}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{P_p}{P_n} = \frac{n_n}{n_p} = e^{\frac{qV_{bi}}{kT}} \quad (2.23)$$

หรือ

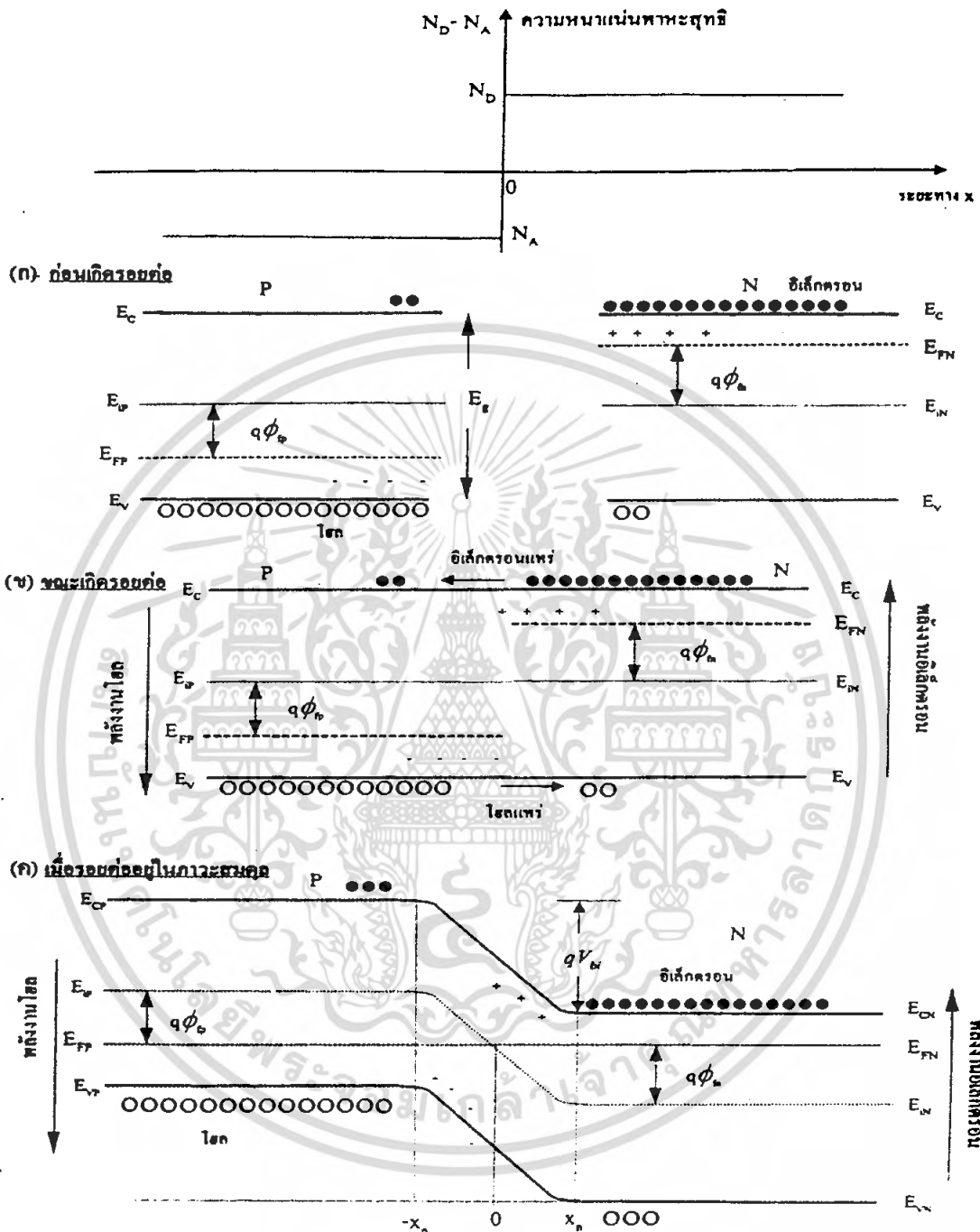
$$n_p = n_n e^{-\frac{qV_{bi}}{kT}} \quad \text{และ} \quad p_p = p_n e^{\frac{qV_{bi}}{kT}}$$

สมการที่ (2.23) ถูกเรียกว่า “กฎของรอยต่อ” (Law of junction) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของศักย์ภายใน กับอัตราส่วนของความหนาแน่นของโฮล และอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการคำนวณหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ต่อไป

## 2.6 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

ในตอนนี้เราพิจารณาลักษณะของแถบพลังงาน (Energy band) ของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล โดยเริ่มพิจารณาตั้งแต่ในขณะที่ยังไม่เกิดรอยต่อ จนกระทั่งเกิดรอยต่อขึ้น และจนในที่สุดรอยต่อเข้าสู่ภาวะสมดุล รูปที่ 2.21 (ก) แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำด้านพีและด้านเอ็น ในขณะที่ยังไม่เกิดรอยต่อ ซึ่งเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน ขนาดของช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) จึงเท่ากัน ระดับเฟอร์มี (Fermi level :  $E_{Fp}$ ) ของสารพีจะอยู่ต่ำกว่าระดับอินทรินซิก (intrinsic level :  $E_{ip}$ ) และระดับ (Fermi level :  $E_{Fn}$ ) ของสารชนิดเอ็นจะอยู่สูงกว่าระดับอินทรินซิก (intrinsic level :  $E_{in}$ )

จากรูปที่ 2.21 ค่าของ  $\phi_p$  ถูกเรียกว่า “ศักย์เฟอร์มีของสารชนิดพี” (Fermi potential of p-type) และค่าของ  $\phi_n$  เรียกว่า “ศักย์เฟอร์มีของสารชนิดเอ็น” (Fermi potential of n-type) เมื่อเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นแล้ว เนื่องจากความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนในด้านทั้งสองไม่เท่ากัน จึงเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะนี้ จากด้านที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ไปยังด้านที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า โดยโฮลจะแพร่จากด้านพีไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านเอ็นไปยังด้านพีดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ข)



รูปที่ 2.22 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ในภาวะต่างๆ (ก) ก่อนเกิดรอยต่อ (ข) ขณะเกิดรอยต่อ (ค) ขณะรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล

ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะบริเวณรอยต่อ และทำให้เกิดมีประจุไฟฟ้าบวกและลบของไอออนอะตอมสารเจือ มีผลทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ และสนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะ เมื่อรอยต่อเข้าสู่ภาวะสมดุล สนามไฟฟ้านี้จะมีเอกส ค่าน่ามากพอที่จะยับยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและ โฮลไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ หรืออีกนัยหนึ่งก็ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ กระแสครีฟท์จะเท่ากับกระแสแพร่ ดังนั้นกระแสรวมเป็นศูนย์ ระดับเฟอร์มิ  $E_F$  ของด้านทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านทั้งสอง ( $V_{bi}$ ) เสมือนกับเป็นกำแพงศักย์ (potential barrier) ต่อต้านไม่ให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ ทุกอย่างที่รอยต่อจึงถูกถ่างลงบ้าง เราเรียกว่าภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ค) ความชันของกราฟบริเวณปลอดพาหะ เป็นสิ่งแสดงขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อ จากรูปที่ 2.21 (ค) ซึ่งแสดงลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะที่อยู่ในภาวะสมดุล จะเห็นว่ากำแพงศักย์ที่รอยต่อ ( $V_{bi}$ ) หรือศักย์สัมผัส หมายถึง ความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างด้านพีและด้านเอ็นและเขียนได้ดังนี้

$$V_{bi} = V(x_n) - V(-x_p)$$

หรือ

$$V_{bi} = \frac{1}{q} [E_c(-x_p) - E_c(x_n)] = \frac{1}{q} [E_{cp} - E_{cn}]$$

หรือ

$$V_{bi} = \frac{1}{q} [E_i(-x_p) - E_i(x_n)] = \frac{1}{q} [E_{ip} - E_{in}]$$

หรือ

$$V_{bi} = \frac{1}{q} [(E_i - E_F)_{p-side} + (E_F - E_i)_{n-side}]$$

ในกรณีของไดโอด ที่ถูกเติมด้วยอะตอมของสารเจือความหนาแน่นไม่สูงมากนัก คือเป็นสารนอนตีเจนเนอเรต (nondegenerately doped) ค่า  $(E_{ip} - E_{FP})$  ของด้านพี และ  $(E_{FN} - E_{in})$  ของด้านเอ็นต่างก็จะมีค่าน้อยกว่า  $\frac{E_g}{2}$  ดังนั้นจึงทำให้ได้ว่า  $V_{bi} < \frac{E_g}{q}$  เสมอ ดังที่กล่าวมาแล้วนอกจากนี้ เนื่องจาก

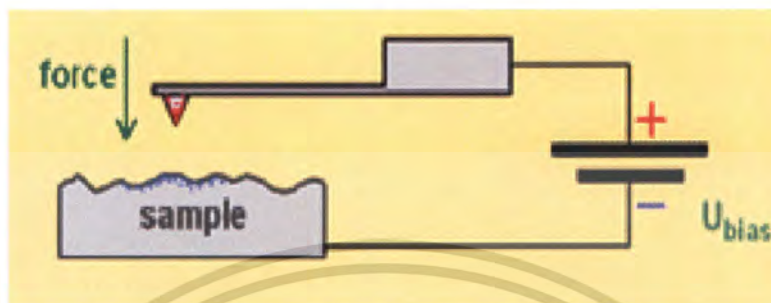
$P_p = n_i e^{(E_{ip} - E_{FP})/kT}$  ดังนั้นขณะที่รอยต่อพี-เอ็น อยู่ในภาวะสมดุล จะได้ว่า

$$E_{ip} - E_{FP} = kT \ln \frac{P_p}{n_i} = kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (2.24)$$

และเนื่องจาก  $n_n = n_i e^{(E_{FN} - E_{in})/kT}$  ดังนั้น

$$E_{FN} - E_{in} = kT \ln \frac{n_n}{n_i} = kT \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (2.25)$$

## 2.7 การวัด Surface Potential



รูปที่ 2.23 การวัด surface potential

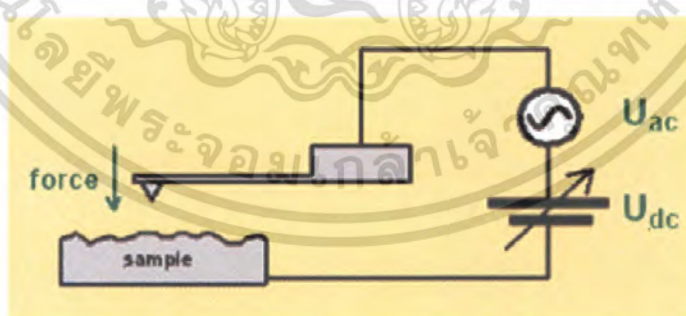
เริ่มต้นจะพบว่าแรงที่เกิดขึ้น sample กระทำกับ tip จะเป็นดังสมการ

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \cdot U^2 \quad (2.22)$$

โดยที่เรามีการตั้งสมมติฐานว่า tip และ sample เป็นตัวนำไฟฟ้า  
จากรูปจะพบว่า

$$U = U_{bias} + (\phi_2 - \phi_1) \quad (2.23)$$

แต่เนื่องจากค่า C จะมีผลทางไฟฟ้าก็ต่อเมื่อถูกไบแอสด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ แต่จากรูปจะพบว่าไม่เกิดแรงทางไฟฟ้าเพราะเป็นแรงดัน DC และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า C ดังนั้น  $\partial C$  เป็น 0 ทำให้แรงที่เกิดขึ้นเป็น 0



รูปที่ 2.24 การไบแอสด้วยแรงดัน DC

เมื่อไบแอสด้วย AC ดังนั้นจะพบว่าแรงที่เกิดจาก Sample กระทำกับ tip จะเปลี่ยนเป็นดังสมการ

$$U_{bias} = U_{DC} + U_{AC} \cdot \sin(\omega_{mod} \cdot t) \quad (2.24)$$

โดยที่ แรงที่วัดได้ที่หัวเข็มจะเป็น

$$F = f_0 + f_1 \cdot \sin(\omega_{mod} \cdot t) + f_2 \cdot \cos(2\omega_{mod} \cdot t) \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของแรงที่กระทำกับเข็มจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งขึ้นอยู่กับ

- แรงดันที่ modulation เข้าไป
- ค่าความถี่และค่าโอเวอร์โทนที่ modulation เข้าไป
- แอมพลิจูดของ  $f_1$  และ  $f_2$
- ซึ่งส่วนประกอบของแอมพลิจูดของแรงที่ได้ทำการ modulation เข้าไปแล้วจะเป็น

$$f_1 = U_{ac} \cdot \partial C / \partial z \cdot (U_{dc} - \Delta\phi)$$

การทำงานขณะสแกน

- $f_1$  จะเป็น 0 เมื่อแรงดัน DC ไปชดเชย work function ระหว่าง tip กับ sample
- ขณะที่ทำการวัดเข็มที่อยู่เหนือชิ้นงานจะส่งข้อมูลไปเพื่อทำการ feedback ให้ชดเชยแรง DC ที่ไบแอสอยู่ตลอดเวลา
- ในการ feedback แรงดันไบแอสจะมีค่าเฉพาะของการ feedback ซึ่งขึ้นอยู่กับ Surface potential ของชิ้นงาน
- สรุป Potential ระหว่าง tip กับ sample ได้จากแรงดันที่ไบแอสให้หัวเข็ม

## 2.8 ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่อง AFM

### The SSPM Mode

ในการวัดแบบ non-contact แบบมาตรฐาน จะมีการเพิ่มของ electrical potential จากภายนอก เข้าไปใน sample ซึ่งจะประกอบด้วย bias voltage และ harmonic ac เข้าไปด้วย ที่ความถี่  $\omega_{mod}$  จะเกิดการสั่นพ้องของ cantilever อย่างสม่ำเสมอ ความต่างศักย์จากภายนอกทำให้เกิดแรงมากระทำบน cantilever ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงทางไฟฟ้าและสภาพพื้นผิวของ sample ข้อมูลของคุณสมบัติบริเวณนี้จะสามารถแยกออกโดยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของ cantilever โดยการใช้เทคนิคของ lock-in Pmcontrol unit จะประกอบด้วย lock-in amplifier 2 chanal สำหรับประเมินค่าสัญญาณ interferometer ที่ modulation ความถี่  $\omega_{mod}$  และที่ harmonic สูงขึ้น

ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด (cantilever และ sample จะสามารถนำไฟฟ้าได้ทั้งคู่และไม่มีประจุที่อยู่บริเวณนั้นมาเกี่ยวข้อง) จะเกิดแรง electrical interaction ระหว่าง tip และ sample

$$force = \frac{1}{2} \cdot \{U_{bias} + \Delta\phi + U_{ac} \cdot \sin(\omega_{mod} \cdot t)\}^2 \cdot \partial C / \partial z \quad (2.26)$$

$\Delta\phi, C$ , และ  $z$  จะเป็น work function ของค่าความจุและระยะทางระหว่าง tip และ sample ตามลำดับ จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$force = \frac{1}{2} \cdot \partial C / \partial z \cdot \left\{ (U_{bias} + \Delta\phi)^2 + \frac{1}{2} U_{ac}^2 \right\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& + \partial C / \partial z \cdot (U_{bias} + \Delta\phi) U_{ac} \cdot \sin(\omega_{mod} t) \\
& - \frac{1}{4} \cdot \partial C / \partial z \cdot U_{ac}^2 \cdot \cos(2\omega_{mod} t)
\end{aligned} \tag{2.27}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความถี่ ac 2 ความถี่ ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรง คือ  $\omega_{mod}$  และ  $2\omega_{mod}$

จากรูปที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นถึง ส่วนประกอบการวัดค่า amplitude ของ  $\omega_{mod}$  เทียบกับ function ของ การ bias voltage นี้คือ function ความถี่เดียว มันจะมีรูปร่างที่แน่นอน และ magnitude จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง ตัวอย่างเช่น modulation amplifier ระยะห่างระหว่าง tip และ sample และอื่นๆ

ถึงแม้ว่าโดยปรกติแล้ว เงื่อนไขเหล่านี้ จะไม่เป็นที่รู้จักอย่างเพียงพอ จึงทำให้การอธิบายเชิงคุณภาพทำได้ยาก

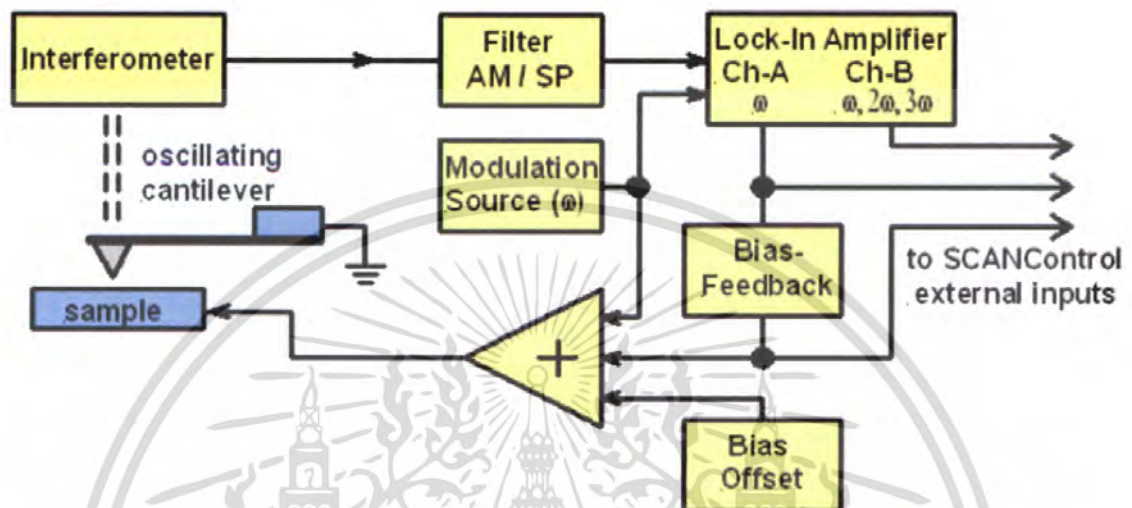
อย่างไรก็ตาม จากสมการที่ 2 จะเห็นว่าสัญญาณที่  $\omega_{mod}$  จะเป็นศูนย์ถ้าปรับค่าของ bias voltage ให้เท่ากับความต่างศักย์ของ work function  $\Delta\phi$  ระหว่าง tip และ sample ดังนั้นสัญญาณนี้จะสามารถใช้เทียบกับสัญญาณ error สำหรับ feedback circuit จะสมนัยกับการเปลี่ยนแปลงของ work function (surface potential) บน sample ซึ่งในที่นี้เราจะเรียก feedback loop นี้ว่า “bias-feedback”

ความสูงของ amplitude  $2\omega_{mod}$  จะแปรผันกับ gradient ของบริเวณค่าความจุระหว่าง tip และ sample สัญญาณนี้จะสามารถวัดได้ด้วยช่องที่ 2 ของ lock-in amplifier ในบางกรณีจะสามารถใช้ค่า  $3\omega_{mod}$  ในการประเมินค่าสัญญาณ interferometer ได้อีกด้วย ในกรณีอื่นค่าความจุจะขึ้นกับ voltage ที่ใช้กับ sample ในกรณีเหล่านี้ แรงทางไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ

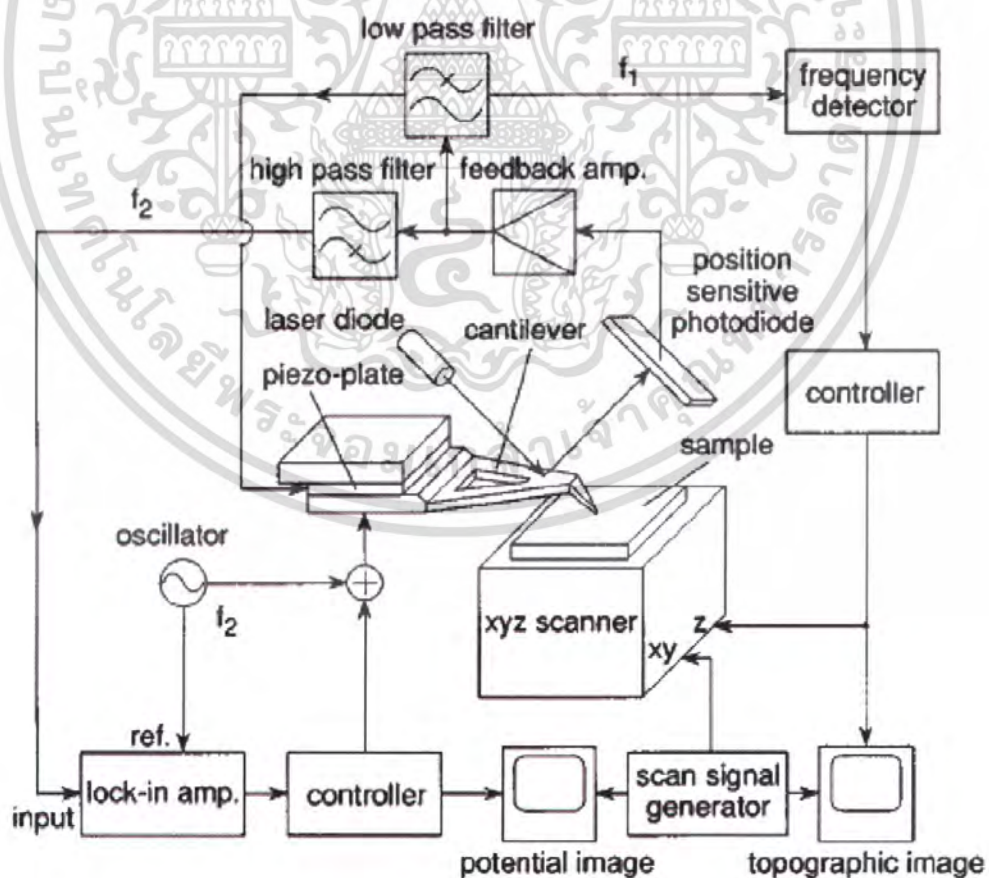
$$\begin{aligned}
force = & \frac{1}{2} \left\{ \left[ (U_{bias} + \Delta\phi)^2 + \frac{1}{2} U_{ac}^2 \right] \partial C / \partial z + (U_{bias} + \Delta\phi) U_{ac}^2 \frac{\partial^2 C}{\partial z \partial U} \right\} \\
& + \frac{1}{2} \cdot \left\{ 2(U_{bias} + \Delta\phi) U_{ac} \cdot \partial C / \partial z + \left[ (U_{bias} + \Delta\phi)^2 + \frac{1}{2} U_{ac}^2 \right] U_{ac} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z \partial U} - \frac{1}{4} U_{ac}^3 \frac{\partial^2 C}{\partial z \partial U} \right\} \cdot \sin(\omega t) \\
& + \frac{1}{2} \cdot \left\{ (U_{bias} + \Delta\phi) U_{ac}^2 \frac{\partial^2 C}{\partial z \partial U} - \frac{1}{2} U_{ac}^2 \cdot \partial C / \partial z \right\} \cdot \cos(2\omega t) \\
& - \frac{1}{8} \cdot U_{ac}^3 \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z \partial U} \cdot \sin(\omega 3t)
\end{aligned} \tag{2.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Block diagram of the SSPM set-up



รูปที่ 2.25 โหมดของ SSPM



รูปที่ 2.26 Construction of sensitivity enhanced Kelvin probe force microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าได้เห็นว่าเว็บไซต์นี้เกี่ยวข้องกับการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้ส่วนประกอบของ  $3\omega_{\text{mod}}$  จะแปรผันกับอนุพันธ์อันดับที่สอง  $\partial^2 C / \partial z \partial U$  ของค่าความจุบริเวณนั้น

ค่าของแรงจะสามารถอธิบายได้จากสมการ (1) – (3) ซึ่งโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับค่าระยะห่างระหว่าง AFM tip และ sample

เนื่องจากการสั่นของ cantilaver แรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นทิศทางเดียว แต่จะมีแรงด้าน gradient จากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าและแรง gradient จะรบกวนการสั่นของ cantilaver ในทิศทางต่างกัน โดยที่ 1. แรงจะส่งผลให้สัญญาณมีการเพิ่มขึ้น cantilaver จึงเกิดการเคลื่อนที่ 2. แรง gradient จะส่งผลให้ amplitude เกิดการเปลี่ยนแปลงของการสั่นของ cantilaver

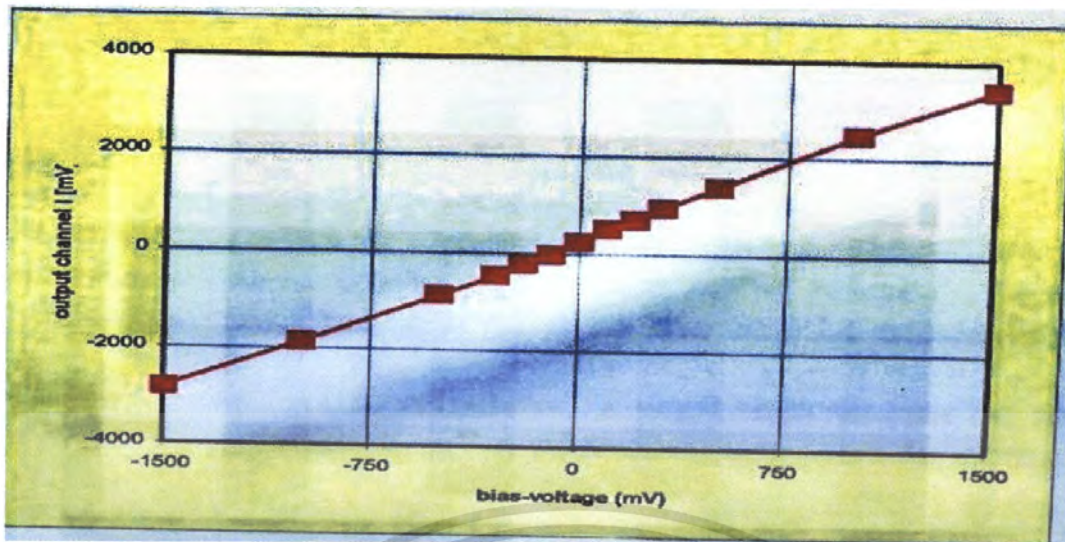
PMcontrol unit จะเตรียมการวิเคราะห์สัญญาณสองชนิดของการแยกสัญญาณ และสามารถทำให้ชนิดของสัญญาณมีลักษณะคล้ายกัน

ในการทดลองโดยปรกติแล้วเราค้นพบว่าสามารถที่จะเพิ่มสัญญาณเพื่อการควบคุมได้ดังแสดงในรูปที่ 4 ตัวอย่างสัญญาณ interferometer ในกรณี A ความแตกต่างของ work function ระหว่าง tip และ sample จะไม่เท่ากับการ bias โดย voltage

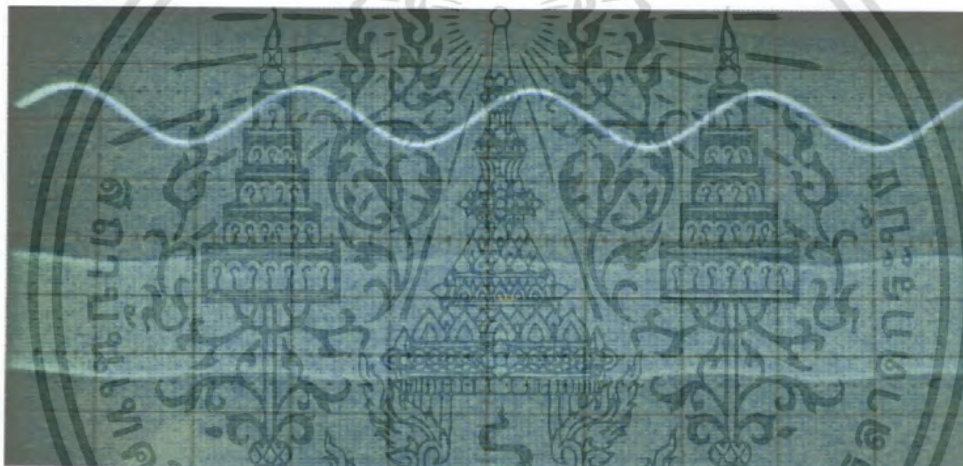
เนื่องจาก cantilaver สั่น การสั่นของมันจะไม่เพียงแต่ sense กับ additional force เท่านั้น แต่มันจะ sense กับ gradient ของแรงด้านจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้า แรงและ gradient ของแรงจะรบกวนการสั่นของ cantilaver ในหลายรูปแบบด้วยกัน ตัวอย่างเช่น 1. แรงจะทำให้เกิดสัญญาณ superimposed จากการเคลื่อนที่ของ cantilaver 2. gradient ของแรงจะส่งผลให้ amplitude เกิดการเปลี่ยนแปลงของการสั่นของ cantilaver

PMcontrol unit จะแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองสัญญาณ โดยสามารถเลือกสัญญาณที่จะนำมาวิเคราะห์ได้

ในการทดลอง โดยปรกติแล้วเราอาจพบว่าสัญญาณที่เกิดจาก superimposed จะเด่นกว่าสัญญาณอื่นดังรูปที่ 2.27 ตัวอย่างเช่น สัญญาณของ interferometer ในกรณี (ก) ค่าความแตกต่างของ work function ระหว่าง tip และ sample จะไม่ compensated โดยการ bias-voltage สัญญาณ interferometer จะสามารถมองเห็นได้ในรูปของ  $\omega$  และในกรณี (ข) ค่าความแตกต่างของ work function ระหว่าง tip และ sample จะสามารถมองเห็นได้ในรูปของ  $2\omega$  เพื่อที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ visible มองเห็นได้ โดยเลือกใช้ high modulation voltage และถูก compensated ด้วยการ bias-voltage โดยปรกติ superposition จะเกิดขึ้นได้น้อยมากหากไม่ใช้เทคนิคของ lock-in amplifier



รูปที่ 2.27 แอมพลิจูดของ sample ที่ถูกการไบแอส



รูปที่ 2.28 (ก)



รูปที่ 2.28 (ข)

รูปที่ 2.28 การ Modulation (upper curve) และสัญญาณ interferometer (lower curves) ด้วยการไบแอสโวลต์ที่ต่างกัน ในกรณี 2.28 (ก) เป็น work function ระหว่าง tip และ sample ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ compensated ในกรณี 2.28 (ข) ไม่ compensated นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเตรียม sample

Sample ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

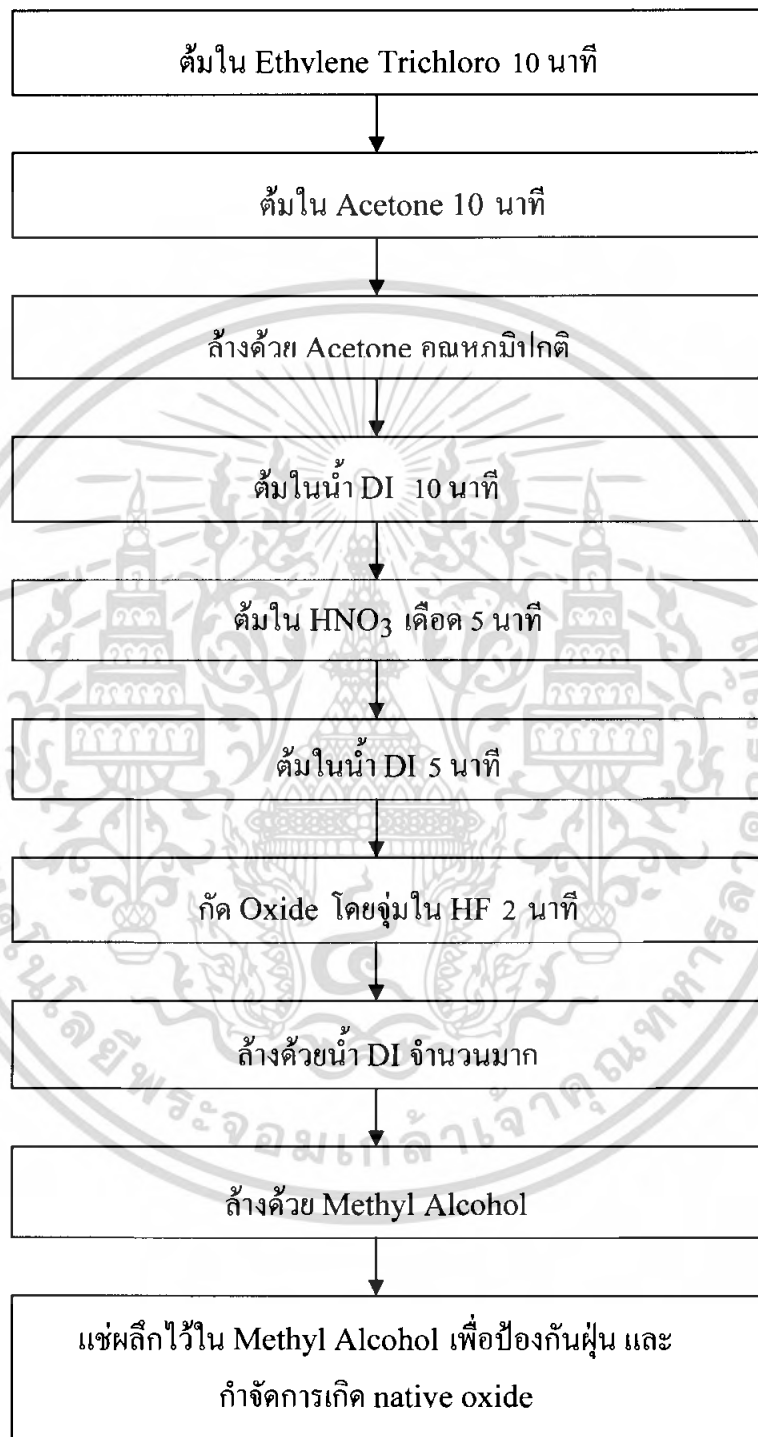
1. แผ่นซิลิกอนที่ทำการ โดปสาร P/N
2. แผ่นซิลิกอนที่ทำการ โดปสาร N/P
3. ไดโอดเบอร์ UF 4001
4. ไดโอดเบอร์ UF 4006
5. Zener diode เบอร์ 1N5242B
6. Zener diode เบอร์ 1N5239B
7. แผ่น โซลาเซลล์

ซึ่งจะเป็น sample ทั้งหมดในการทดลอง sample ที่เป็นแผ่นซิลิกอนอยู่แล้ว จะนำไปหล่อรวมกับเลซินเพื่อทำการทดลองได้เลย แต่ถ้าเป็น ไดโอดต้องทำการเปิดตัวอุปกรณ์เพื่อทำการหา junction ของผลึกซิลิกอน โดยการนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อหาบริเวณของ junction ก่อน

#### 3.1 การเตรียม junction ของผลึกซิลิกอน

1. คุณสมบัติของผลึกซิลิกอนที่ใช้ จะเป็นผลึกผิวเรียบมัน มีความหนาประมาณ 270 ไมครอน มีค่าความต้านทานประมาณ 0.1-0.2 โอห์ม-เซนติเมตร มีระนาบผลึก [100] ผลึกนี้เป็นผลึกชนิด พี สารเจือปนคือ โบรอน ที่ได้นำมาจากห้องปฏิบัติการวิจัย solar cell MTEC สาขาคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นำผลึกมาล้างทำความสะอาด โดยผ่านกรรมวิธีดังนี้



รูปที่ 3.1 กรรมวิธีการล้างทำความสะอาดผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกที่ผ่านการล้างทำความสะอาดจะถูกนำมาปลูก Oxide ( $SiO_2$ ) ทั้งสองด้านด้วยกรรมวิธี Thermal Oxidation (12:48 - 53) ที่ความร้อน 1000 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิด Oxide หนาประมาณ 3000 อังสตรอม ซึ่งเป็นความหนาที่เพียงพอในการป้องกันการแพร่ซึมสารเจือปน ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

2. sample ที่ได้จะมีขนาดเล็กจึงยากต่อการสแกนด้านข้างของ junction ดังนั้นจึงต้องนำไปหล่อรวมกับเลซิน เพื่อให้ง่ายต่อการสแกน

3. เมื่อได้ junction แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 ,เบอร์ 800 ,เบอร์ 1200 ,เบอร์ 2000 และเบอร์ 4000 ที่ต้องใช้กระดาษทรายหลายเบอร์เนื่องจากต้องใช้กระดาษทรายหยาบในการขัดผิวหน้าที่ไม่ต้องการออกไปก่อน หลังจากนั้นค่อยเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ผิวหน้าของ sample มีความราบเรียบมากขึ้น

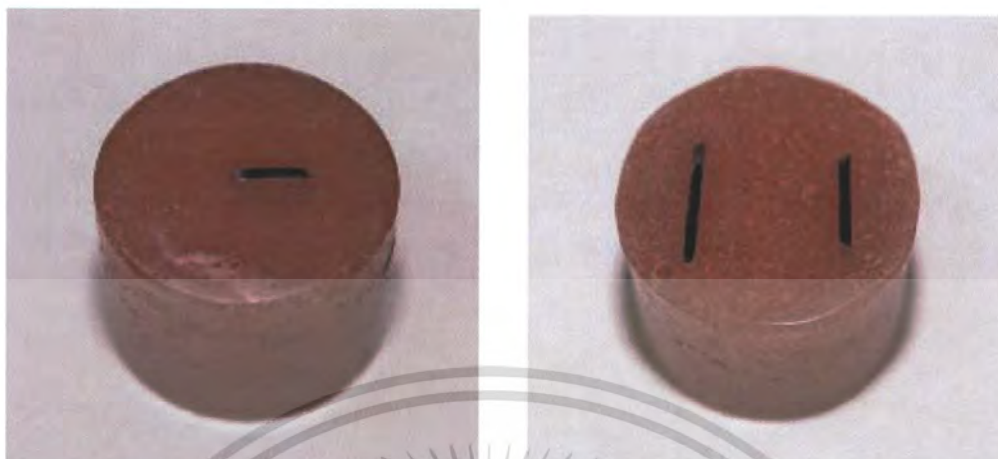
4. หลังจากนั้นนำมาขัดด้วยผงขัดอลูมินา หรือผงขัดเพชรขนาด  $1\mu m$  เพื่อเพิ่มความราบเรียบของผิวหน้า sample ให้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.2 ผงขัดอลูมินาที่ใช้ในการขัดผลึกซิลิกอน

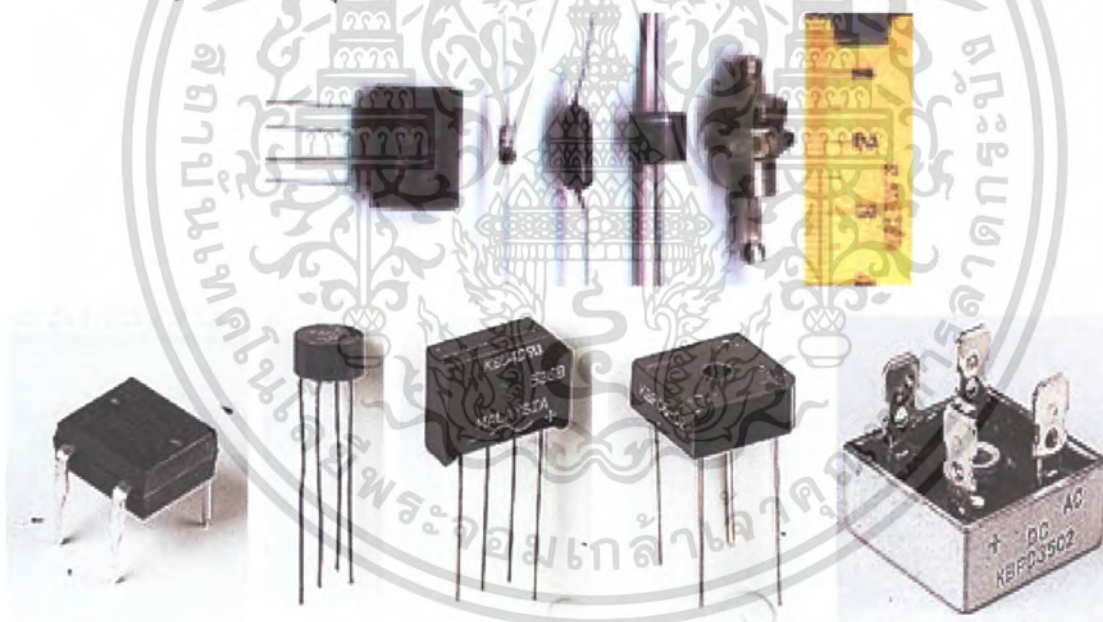
5. จะได้ผลึกซิลิกอนที่พร้อมต่อการหาค่า surface potential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 Sample ของผลึกซิลิกอนwafer ที่โคปด้วยสารเจือ

3.2 เตรียม junction จากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอด เป็นต้น



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของทรานซิสเตอร์ไดโอดที่นำมาใช้เป็น sample ในการทดลอง

1. นำไดโอดที่ต้องการจะทำการทดลองมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 ,เบอร์ 800 ,เบอร์ 1200 ,เบอร์2000 และเบอร์4000 เพื่อทำการเปิดผิวอุปกรณ์เพื่อทำการหา junction ของผลึกซิลิกอนในสารกึ่งตัวนำ และที่จะต้องใช้กระดาษทรายหลายเบอร์ เนื่องจากต้องใช้กระดาษทรายหยาบในการขัดผิวหน้าที่ไม่ต้องการออกไปก่อน หลังจากนั้นจึงค่อยเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ผิวหน้าของ sample มีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลังจากนั้นนำมาขัดด้วยผงขัดอลูมินา หรือผงขัดเพชรขนาด  $1\mu\text{m}$  เพื่อเพิ่มความราบเรียบของผิวหน้า sample ให้มากยิ่งขึ้น

3. จะได้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่พร้อมต่อการหาค่า surface potential



รูปที่ 3.5 Sample ของไดโอดและซีเนอร์ไดโอด

### 3.3 เตรียม junction จากแผ่น โซลาร์เซลล์

1. นำแผ่นโซลาร์เซลล์มาตัดแบ่ง จะสามารถแบ่งได้ทั้งหมด 4 อัน



รูปที่ 3.6 แผ่นโซลาร์เซลล์ที่จะนำมาใช้เป็น sample

2. นำแผ่นโซลาร์เซลล์ที่ได้แต่ละแผ่นไปหลอมรวมกับเรซิน

3. นำ sample ที่ได้ไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 ,เบอร์ 800 ,เบอร์ 1200 ,เบอร์ 2000 และเบอร์ 4000 ที่ต้องใช้กระดาษทรายหลายเบอร์เนื่องจากต้องใช้กระดาษทรายหยาบในการขัดผิวหน้าที่ไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการออกไปก่อน หลังจากนั้นค่อยเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ผิวหน้าของ sample มีความราบเรียบมากขึ้น

4. หลังจากนั้นนำมาขัดด้วยผงขัดอลูมินา หรือผงขัดเพชรขนาด  $1\mu\text{m}$  เพื่อเพิ่มความราบเรียบของผิวหน้า sample ให้มากยิ่งขึ้น ( ซึ่งขั้นตอนในการขัดก็จะเป็นเช่นเดียวกับการขัด sample ที่ได้จากผลึกซิลิกอน )

5. จะได้แผ่น โซลาร์เซลล์ที่พร้อมต่อการหาค่า surface potential



รูปที่ 3.7 sample ของแผ่นโซลาร์เซลล์

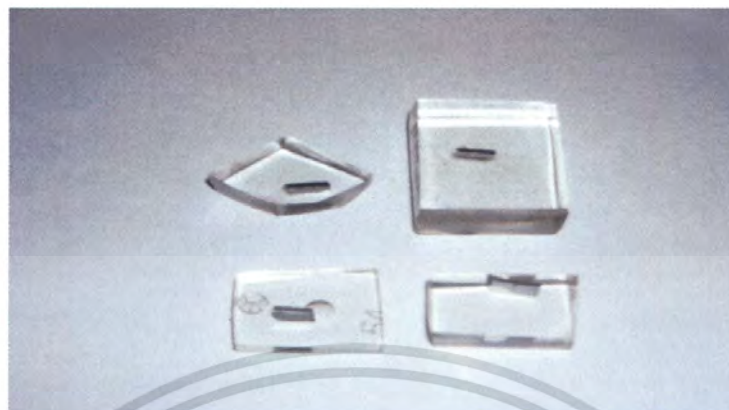
3.4 เตรียม junction จากแผ่นผลึกซิลิกอนที่ได้จากการโคปด้วยสารเจือ

1. นำผลึกซิลิกอนที่ได้มาหล่อรวมเข้ากับเรซิน
2. นำ sample ที่ได้ ไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 ,เบอร์ 800 ,เบอร์ 1200 ,เบอร์ 2000 และเบอร์ 4000 ที่ต้องใช้กระดาษทรายหลายเบอร์เนื่องจากต้องใช้กระดาษทรายหยาบในการขัดผิวหน้าที่ไม่ต้องการออกไปก่อน หลังจากนั้นค่อยเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ผิวหน้าของ sample มีความราบเรียบมากขึ้น

3. หลังจากนั้นนำมาขัดด้วยผงขัดอลูมินา หรือผงขัดเพชรขนาด  $1\mu\text{m}$  เพื่อเพิ่มความราบเรียบของผิวหน้า sample ให้มากยิ่งขึ้น ( ซึ่งขั้นตอนในการขัดก็จะเป็นเช่นเดียวกับการขัด sample ที่ได้จากผลึกซิลิกอน )

4. จะได้แผ่นผลึกซิลิกอนที่พร้อมต่อการหาค่า surface potential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 sample ของผลึกซิลิกอน wafer ที่โดปด้วยสารเจือ

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการ set ค่าเครื่อง AFM สำหรับการ calibration

1. นำ sample ไปวางที่ holder ของตัวเครื่อง ปรับกึ่งกลางจุดทรงรีที่กำลังขยาย 20 เท่า



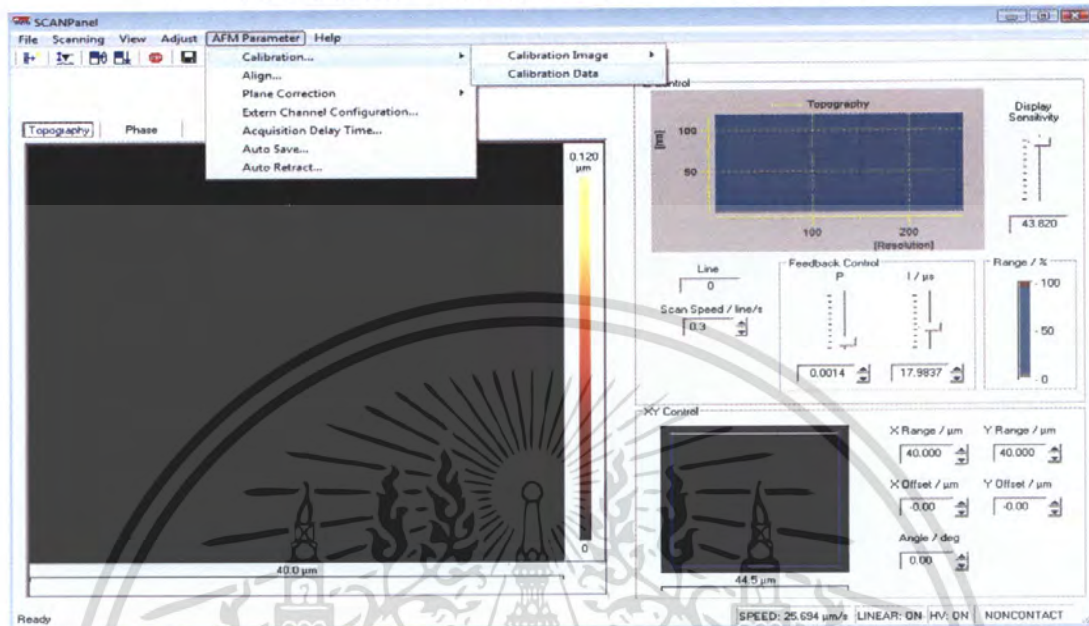
รูปที่ 3.9 sample ที่วางบริเวณ holder ของตัวเครื่อง

2. เรียกใช้งาน โปรแกรม  IC Capture 2.0 เพื่อดูภาพจากกล้องจุลทรรศน์ และหาบริเวณที่ภาพที่ต้องการจะแสดง

3. เปลี่ยนกำลังขยายเป็น 50 เท่า และ โหมดของ AFM ตามลำดับ

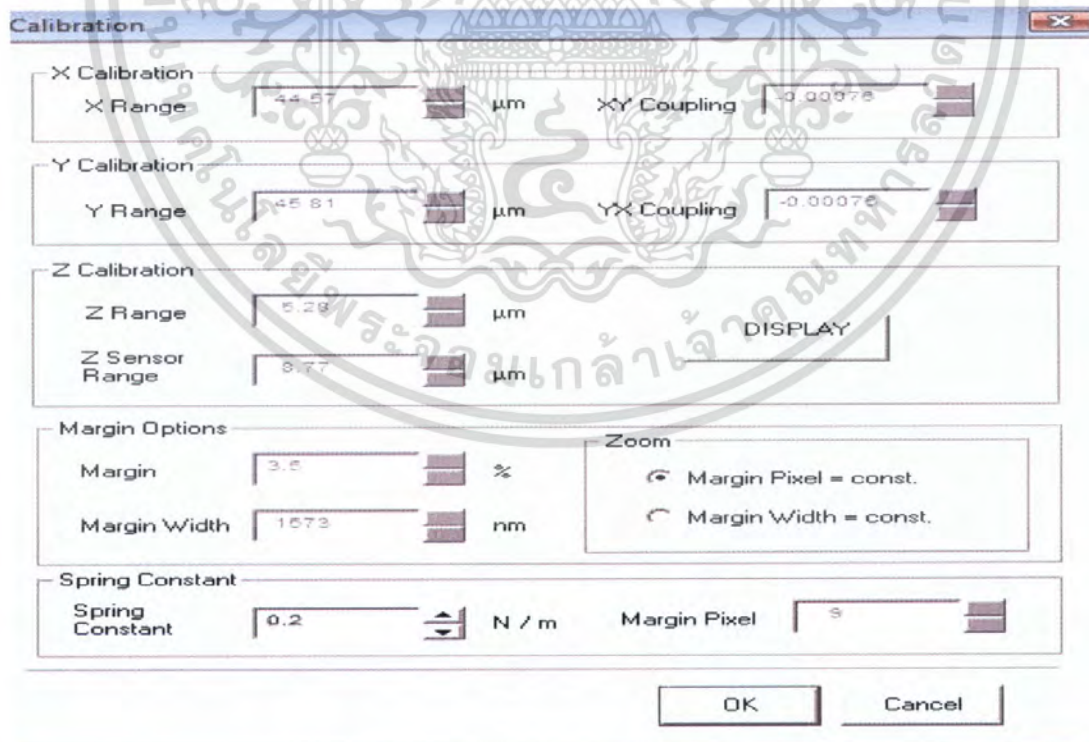
4. เรียกใช้งาน โปรแกรม  SIScanPanel set ค่าต่างๆของโปรแกรมดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือก AFM Parameter > calibration > calibration Data > Enter



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการ calibration

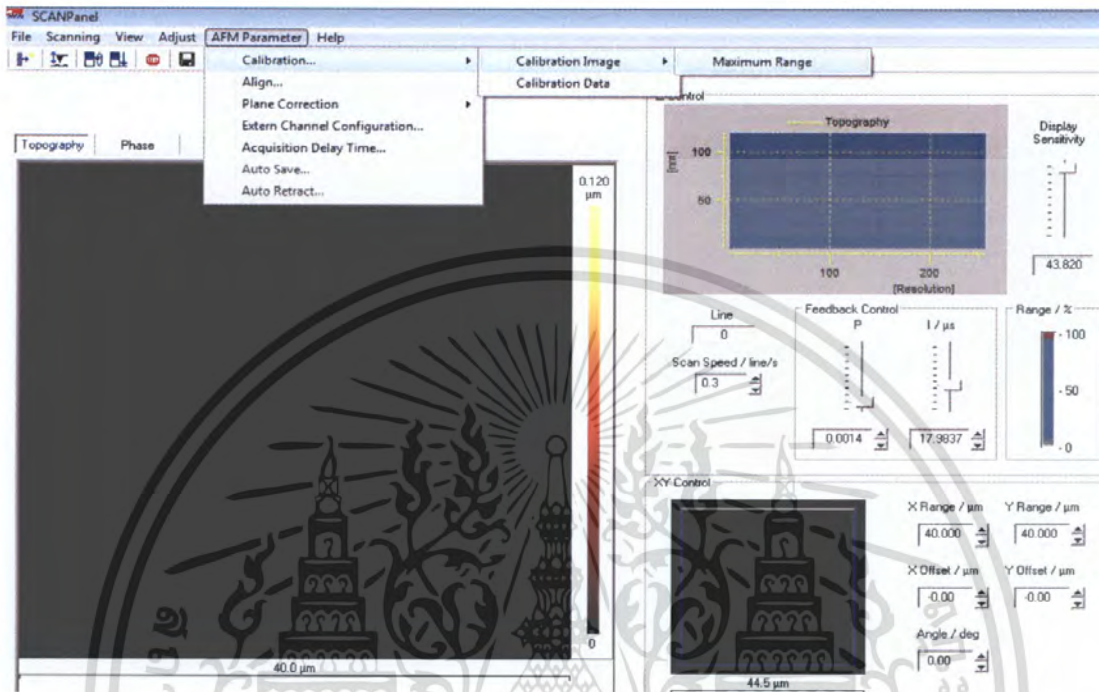
- จะมีหน้าต่างของการ calibration ขึ้นมาและ set ค่าต่างๆดังรูป



รูปที่ 3.11 การ set ค่าของหน้าต่าง calibration

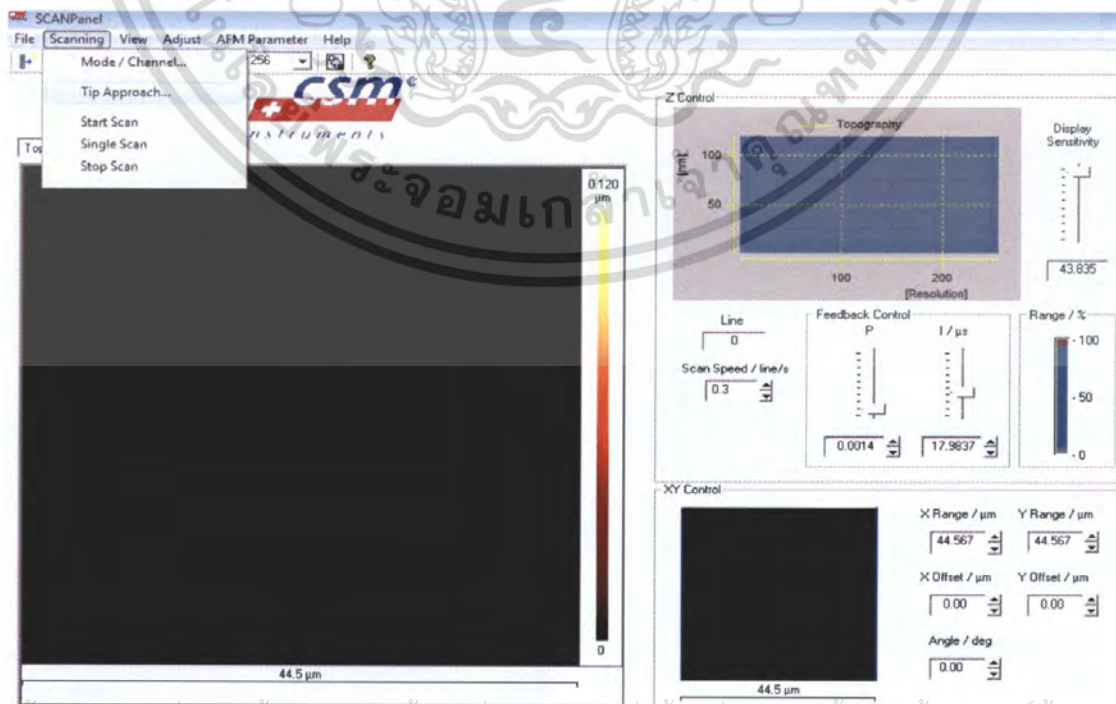
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือก AFM Parameter > calibration > calibration Image > MaximumRange > Enter



รูปที่ 3.12 การ calibration Image

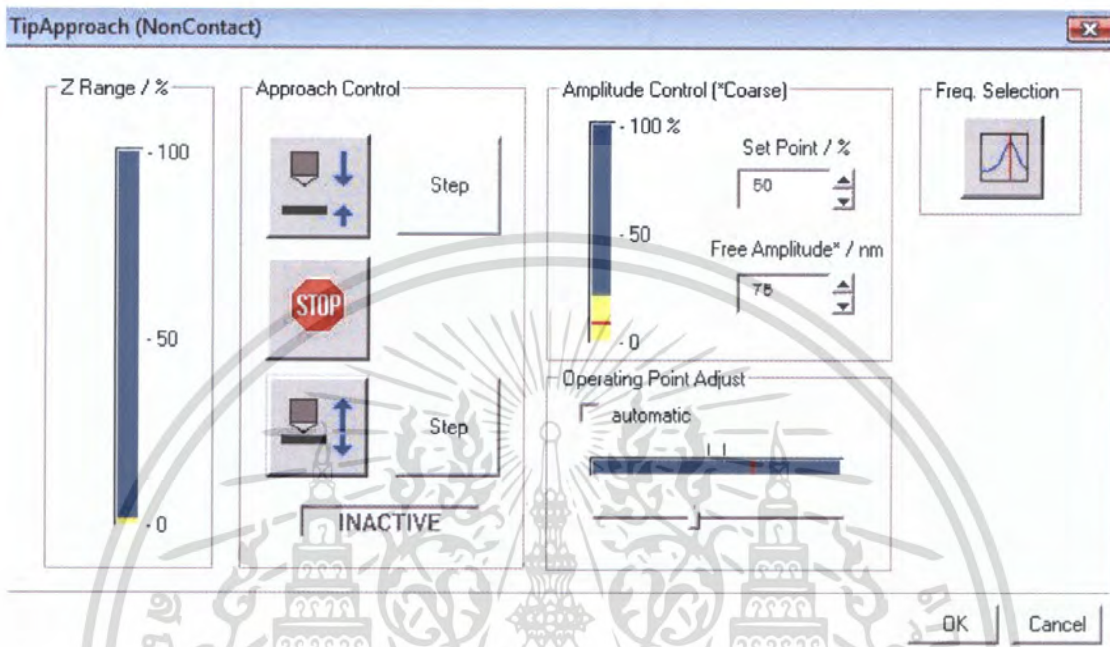
- เลือก Scanning > tip Approach



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการ Scanning

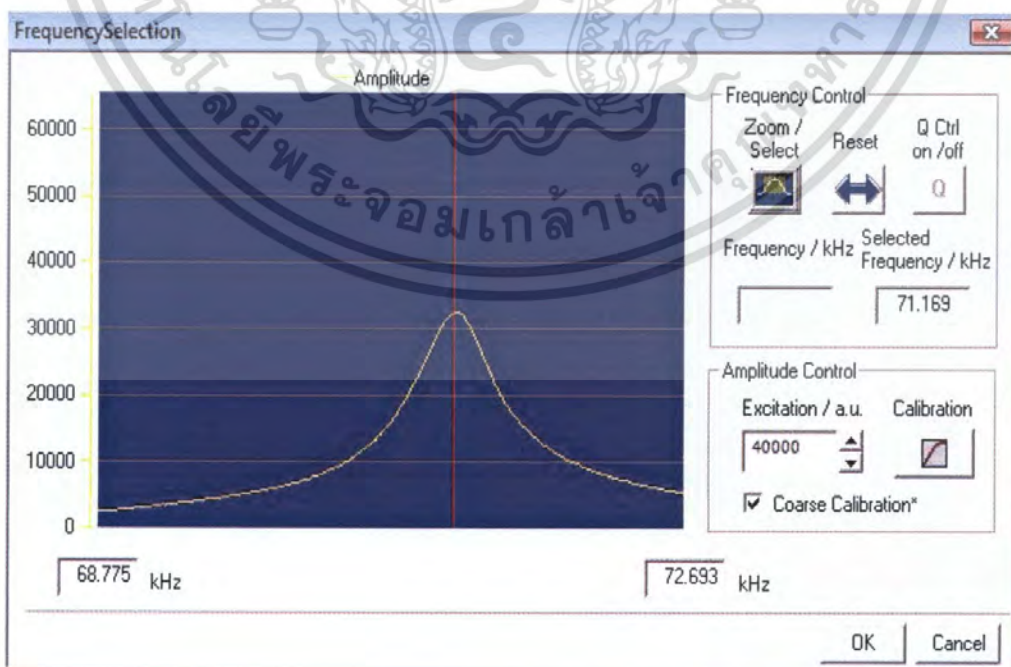
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จะมีหน้าต่างปรากฏดังนี้ แล้วทำการเลือก Freq Selection



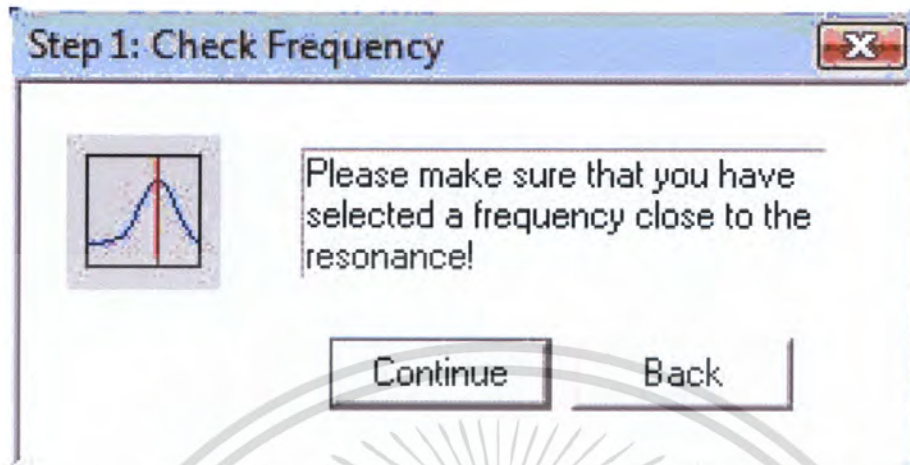
รูปที่ 3.14 หน้าต่างของ tip Approach

- จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขั้นดังรูป > กด continue เพื่อดำเนินการต่อ เลือก Freq Control > Zoom / Selection หรือ Reset เพื่อเลือก Amplitude ที่สูงที่สุด > Calibration



รูปที่ 3.15 หน้าต่างของ Frequency Selection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 หน้าต่างของ Frequency Selection เมื่อเลือกที่ calibration

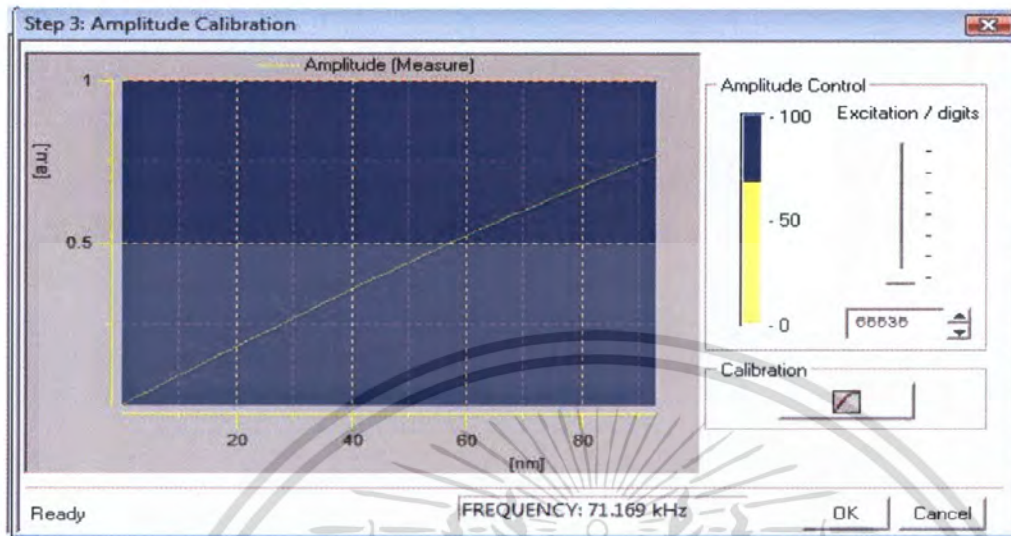
- เลือก continue เพื่อดำเนินการต่อ จะได้ดังรูป



รูปที่ 3.17 หน้าต่างต่อจากรูปที่ 3.16 เลือก continue เพื่อดำเนินการต่อ

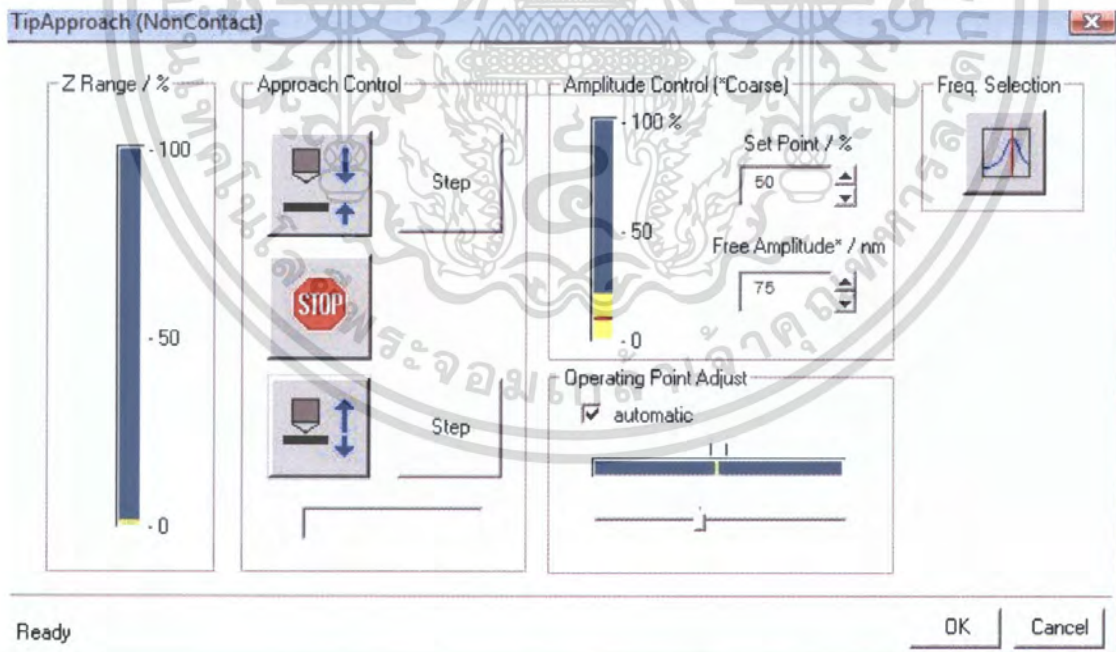
- ทำการปรับ Operating Point Adjust ให้เหมาะสม หรือปรับด้วยการกด Atomatitinue  
จะได้กราฟดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 หน้าต่างของการปรับ Operating Point Adjust

- เลือก Approach Control โดยให้เข็มกับขั้วงานเลื่อนเข้าหากัน โดยดูที่ Amplitude Control ให้แถบสีเหลืองมีความสูงระดับเดียวกับเส้นสีแดง กด OK เพื่อทำการรอการตั้งแตรกน sample



รูปที่ 3.19 หน้าต่างของ Approach Control

- เลือก Scanning > single Scan

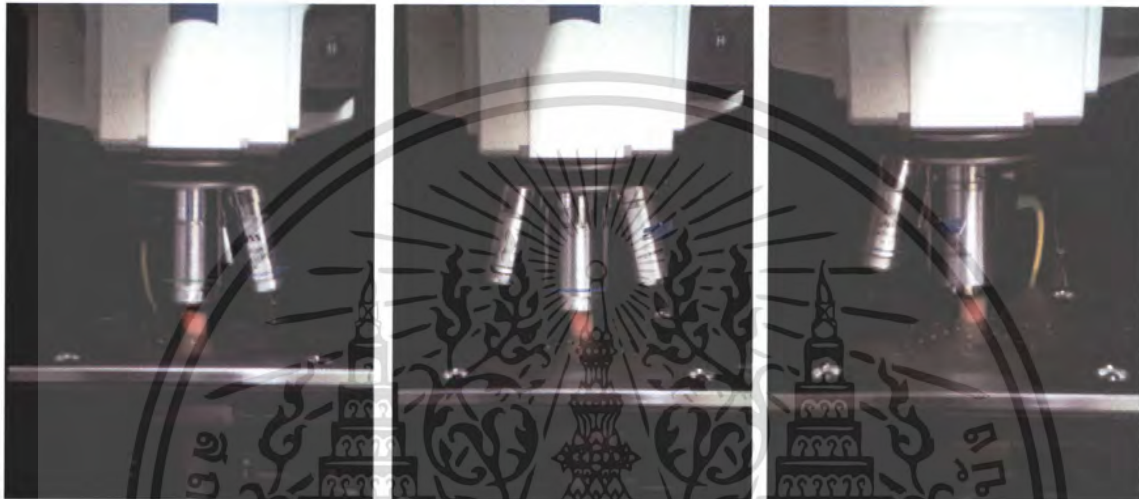
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการสแกน junction

ตอนที่ 1 ขั้นตอนการสแกน junction ผลึกซิลิกอน (Sample) ของไดโอด

- นำ sample ไปวางที่ holder ของตัวเครื่อง ปรับกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ 3.22 (ก)

รูปที่ 3.22 (ข)

รูปที่ 3.22 (ค)

รูปที่ 3.22 (ก) – (ค) sample ที่วางบน holder ที่มีขนาดของกำลังขยายที่ต่างกัน (20 เท่า, 50 เท่า, mode AFM)

- เรียกใช้งาน โปรแกรมเพื่อดู  ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ และหาบริเวณที่ภาพที่ต้องการจะสแกนโดย IC Capture ปรับกำลังขยายไปที่ 20 เท่าจะได้ภาพดังรูป



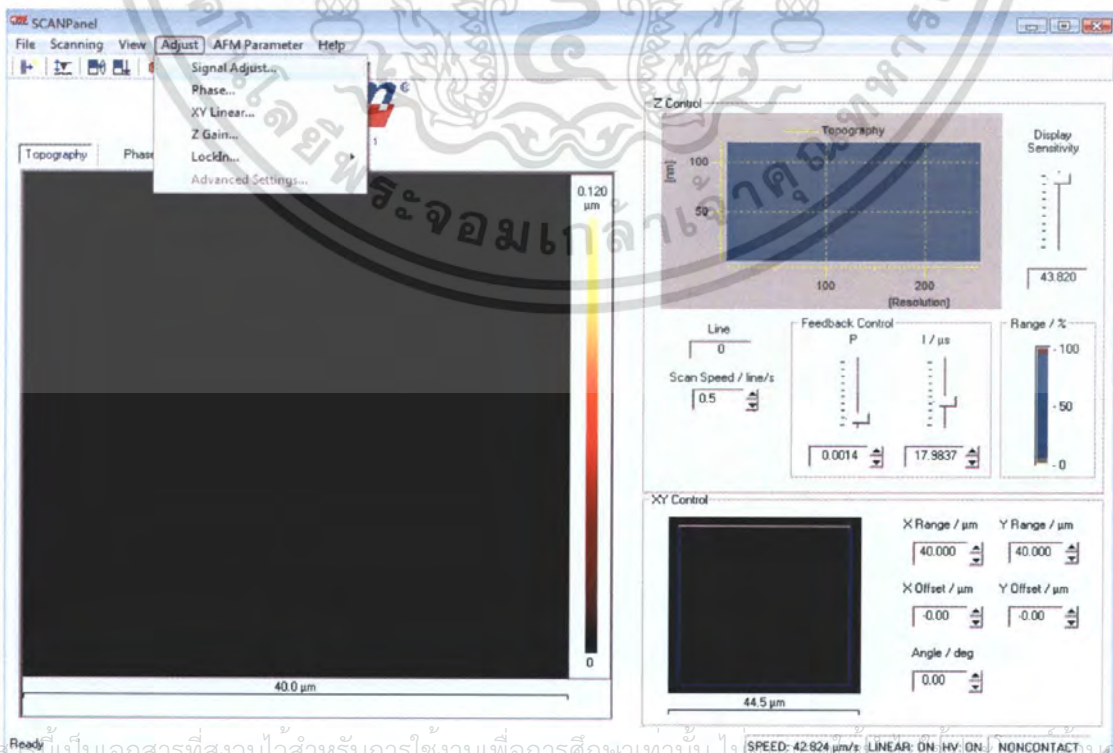
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น **รูปที่ 3.23 ภาพของ sample ซิลิกอนที่กำลังขยาย 20 เท่า** สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปลี่ยนกำลังขยายเป็น 50 เท่า และ โหมดของ AFM ตามลำดับ ได้ภาพดังรูป



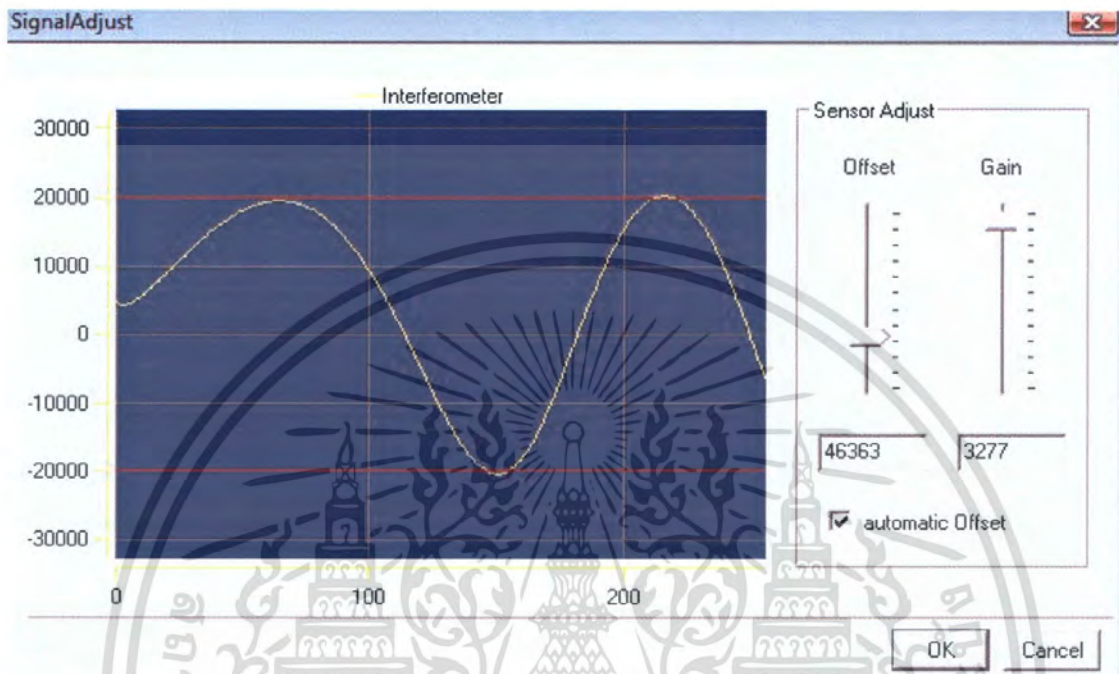
รูปที่ 3.24 ภาพของ sample ซิลิกอนที่กำลังขยาย 50 เท่า

4. เรียกใช้งาน โปรแกรม  จะได้นหน้าต่างดังรูป  
เลือก Adjust > signal Adjust



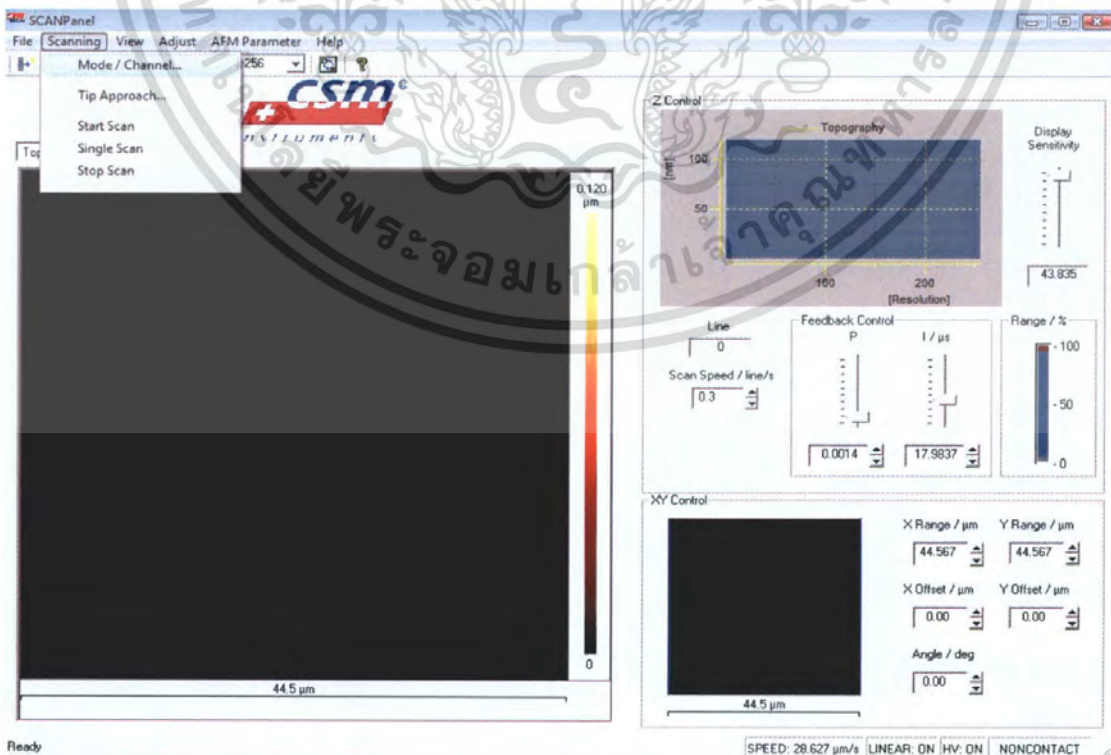
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
รูปที่ 3.25 หน้าต่างของการตั้งค่า Adjust  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากนั้นปรับค่า Sensor Adjust โดยปรับค่า offset และค่า Gain ให้ค่า Interferometer อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมคือพอดีกับเส้นสีแดงทั้งบนและล่าง หรือปรับด้วยการกด automatic offset > OK



รูปที่ 3.26 หน้าต่างของการปรับ sensor Adjust

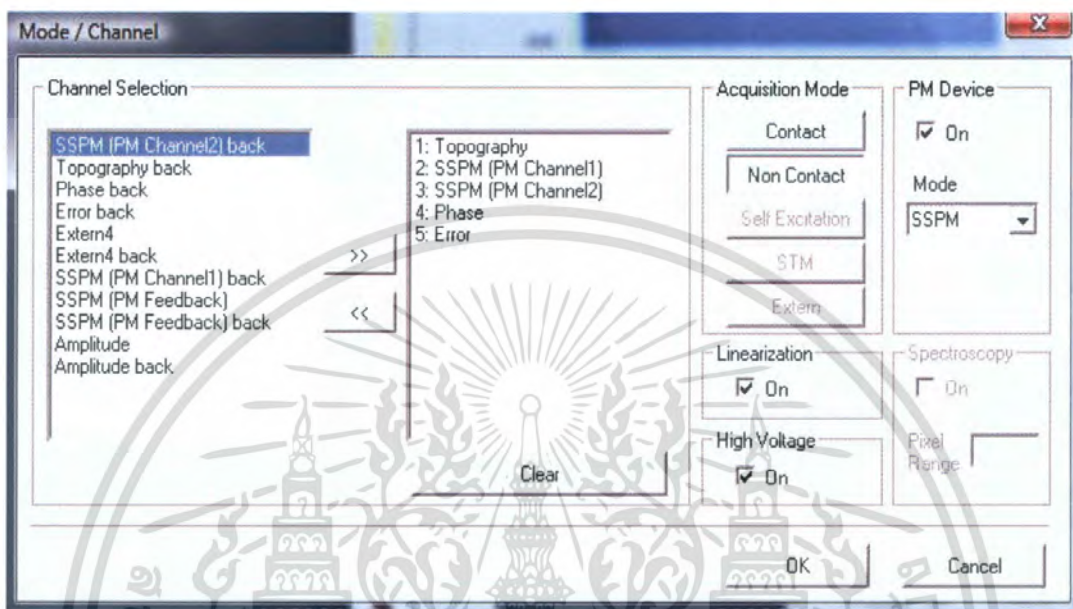
- เลือก Scanning > Mode/Channel



รูปที่ 3.27 หน้าต่างของการเลือก Mode/channel

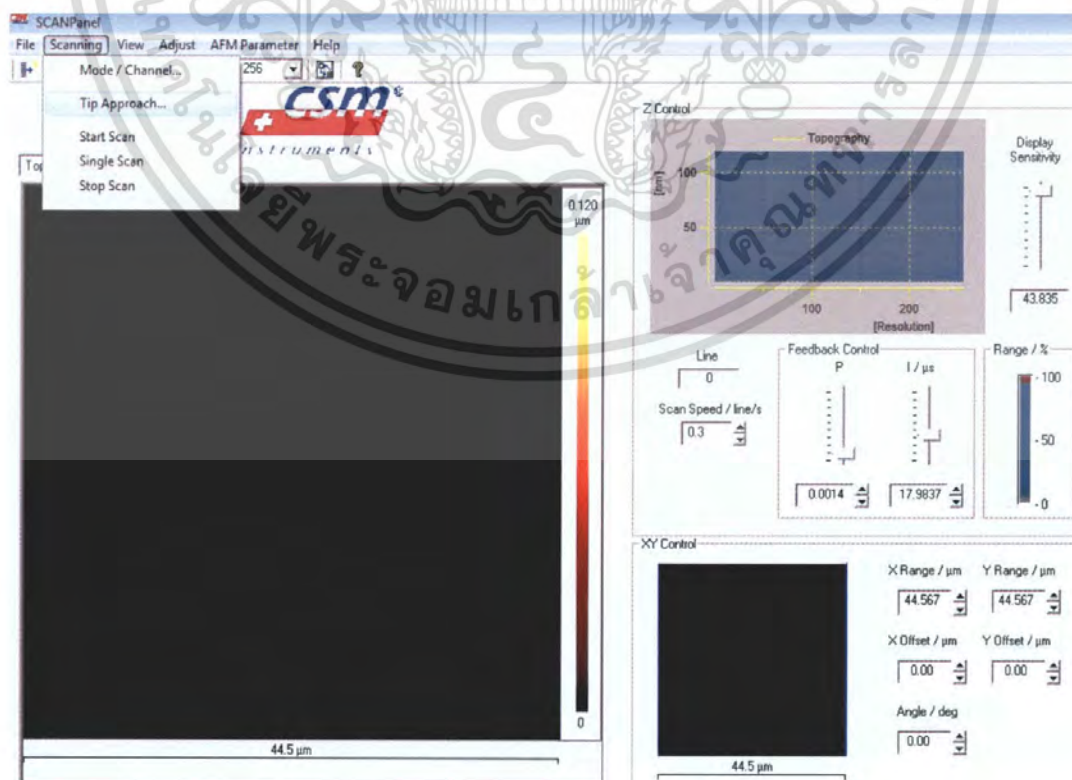
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาระดับปริญญาโทเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพื่อเลือกค่าหรือรูปแบบที่ต้องการทราบ ซึ่งก็คือค่าของ Topography, Phase, Amplitude, Error, Extern1, Extern2 ใน Channel Selection > OK



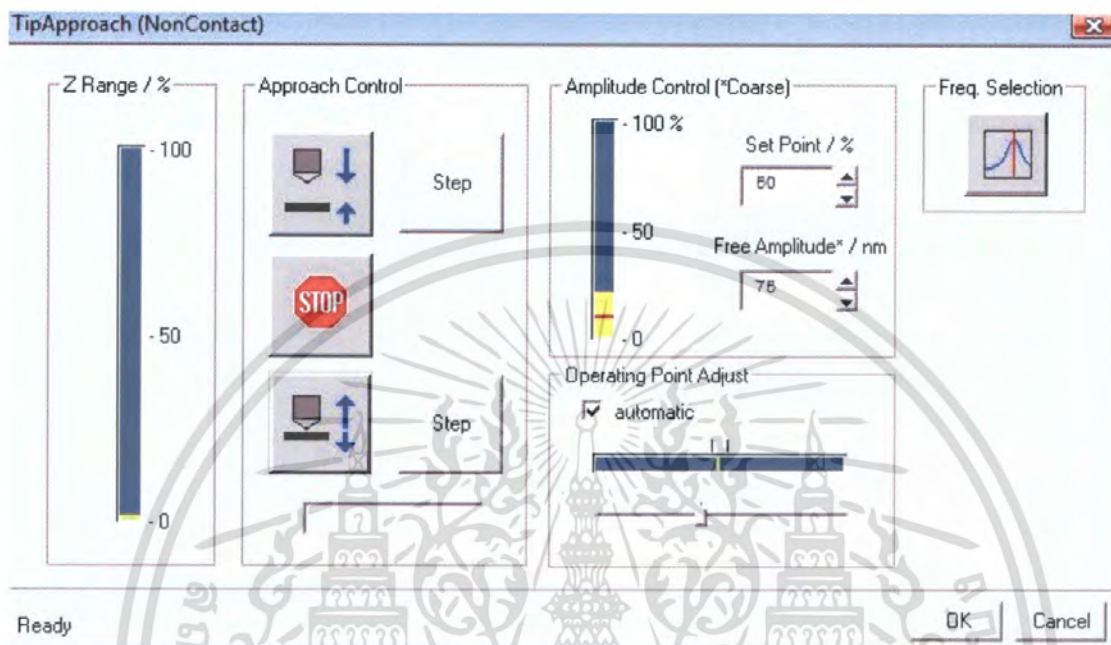
รูปที่ 3.28 หน้าต่างของโหมดที่เลือกใช้ในการสแกน

- เลือก Scanning > tip Approach



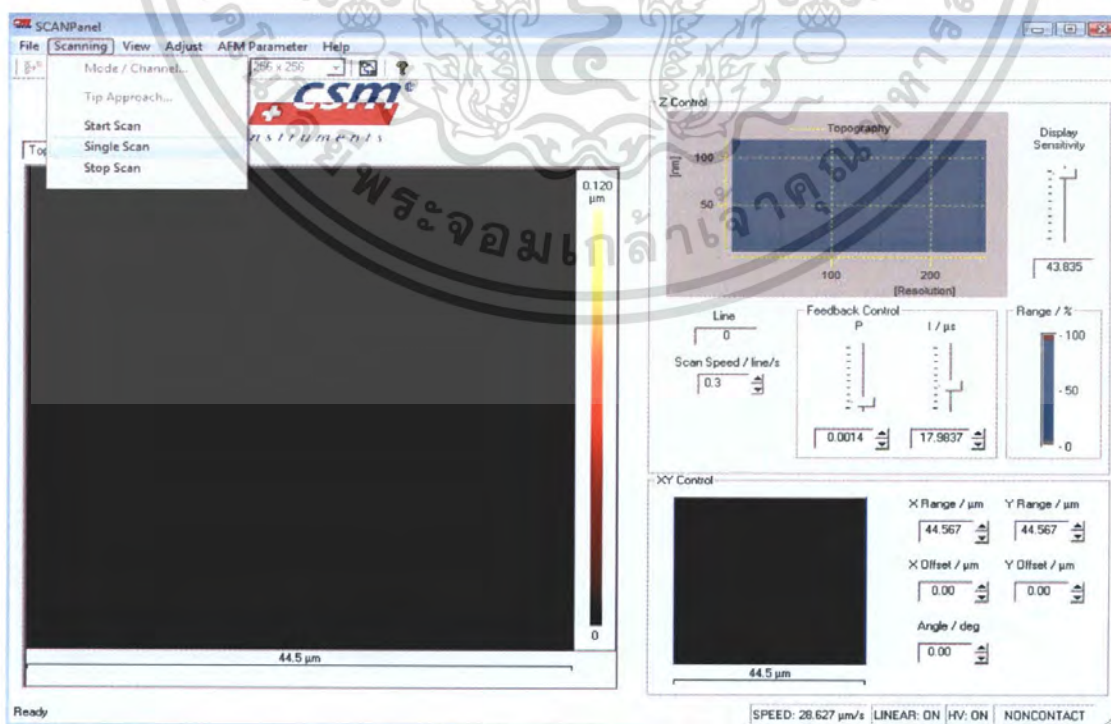
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.29 หน้าต่างของ Tip Approach  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือก Approach Control โดยให้เชื่อมกับชิ้นงานเลื่อนเข้าหากัน โดยดูที่ Amplitude Control ให้แถบสีเหลืองมีความสูงระดับเดียวกับเส้นสีแดง กด OK เพื่อทำการรอกการตั้งแสกน sample



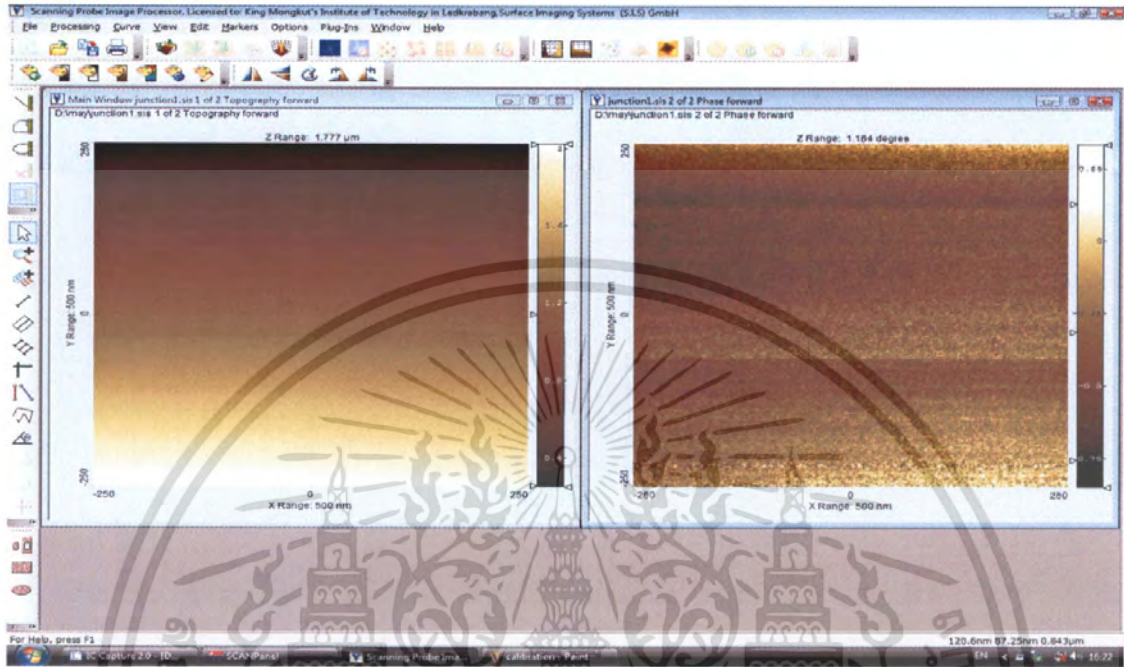
รูปที่ 3.30 หน้าต่างของ Approach Control

- เลือก Scanning > single Scan

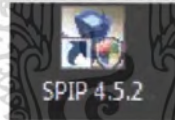


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่หรือดัดแปลงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการรอกนกว่าเครื่องจะทำการสแกนจนเสร็จ ได้รูป ดังภาพ

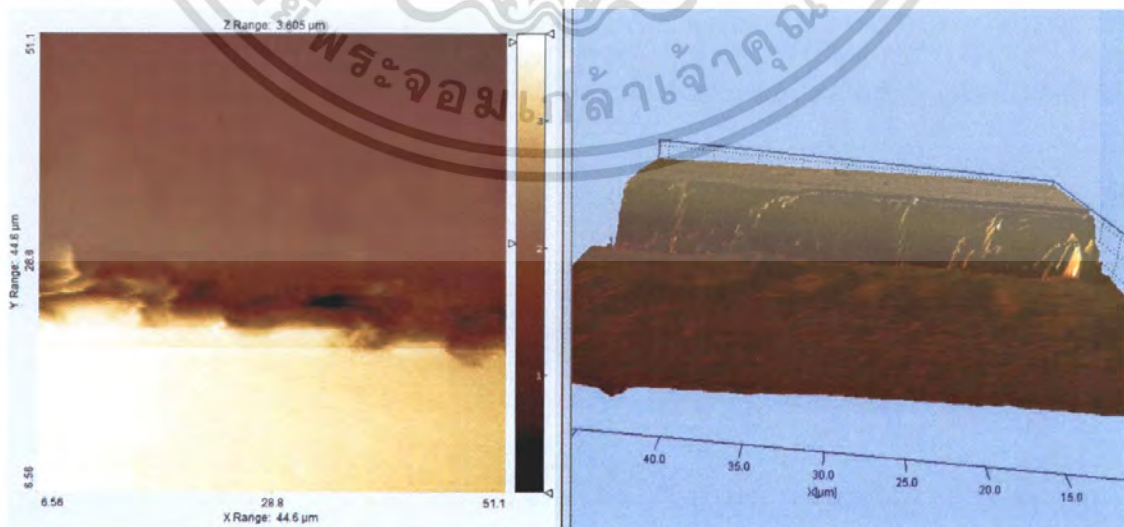


รูปที่ 3.32 การสแกน junction โดยรูปซ้ายมือเป็นรูปของ topography และรูปทางขวามือเป็นรูปของ phase



5. เรียกใช้งานโปรแกรม  
ลักษณะดังนี้

เพื่อดูภาพในรูปของ 3D ซึ่งภาพที่ได้จะมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.33 ภาพ 3D ของการสแกน sample ที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่ 6. เติลียร์ระบบและอุปกรณ์ทุกอย่างให้เหมือนอันอยู่ในสัภาพก่อนเริ่มการทำงาน ปิดเครื่อง

## ตอนที่ 2 ขั้นตอนการสแกน junction ของแผ่นโซลาร์เซลล์ (Sample)

โดยขั้นตอนการสแกน junction ของแผ่นโซลาร์เซลล์ แบบไม่ใช้แสง จะทำเช่นเดียวกับการสแกน junction ผลึกซิลิกอนของไดโอด

ตอนที่ 3 ขั้นตอนการสแกน junction ผลึกซิลิกอน (Sample) ที่ได้จากการโคปด้วยอะตอมของสารเจือ

โดยขั้นตอนการสแกน junction ผลึกซิลิกอน (Sample) ที่ได้จากการโคปด้วยอะตอมของสารเจือแบบไม่ใช้แสง จะทำเช่นเดียวกับการสแกน junction ผลึกซิลิกอนของไดโอด

## ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการสแกน junction แบบใช้แสง

- นำ sample ไปวางที่ holder ของตัวเครื่อง ปรับกึ่งจตุรทรงที่กำลังขยาย 20 เท่า




รูปที่ 3.34 (ก)

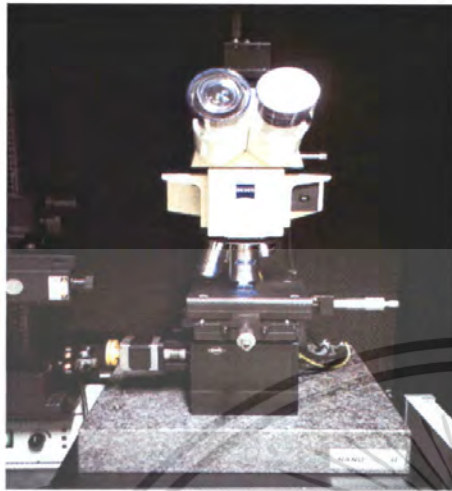
รูปที่ 3.35 (ข)

รูปที่ 3.36 (ค)

รูปที่ 3.22 (ก) – (ค) sample ที่วางบน holder ที่มีขนาดของกำลังขยายที่แตกต่างกัน (20 เท่า, 50 เท่า, mode AFM)

- เรียกใช้งานโปรแกรม  เพื่อดูภาพจากกล้องจุลทรรศน์ และหาบริเวณที่ภาพที่ต้องการจะสแกนโดยปรับกำลัง IC Capture ขยายไปที่ 20 เท่า, 50 เท่า และในโหมดของ AFM
- เปิดแสงเลเซอร์ (ความยาวคลื่น 433 nm) ปรับทิศทางของเลเซอร์เพื่อให้สามารถส่องผ่าน Sample โดยจะยิงแสงเลเซอร์เพื่อให้ตกกระทบกับด้านที่มีการโคปสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 (ก)

รูปที่ 3.35 (ข)

รูปที่ 3.35 (ก), (ข) กระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์

4. เรียกใช้งาน โปรแกรม

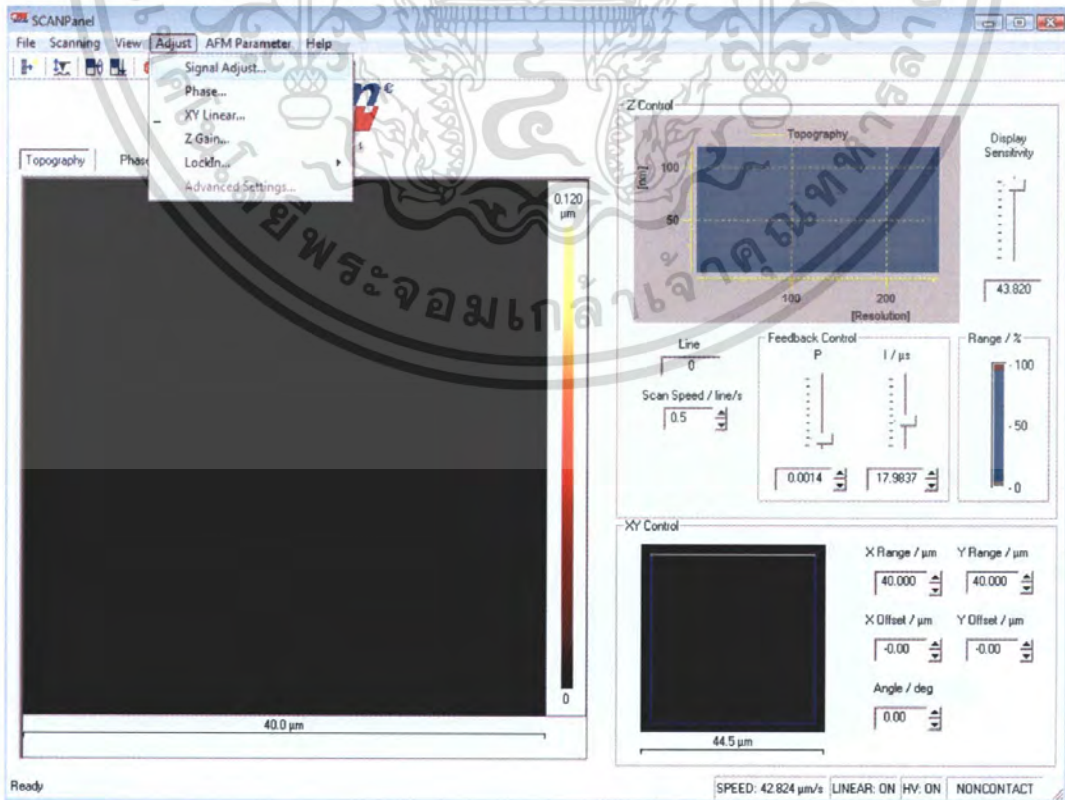


จะได้หน้าต่างดังรูป

SIScanPanel

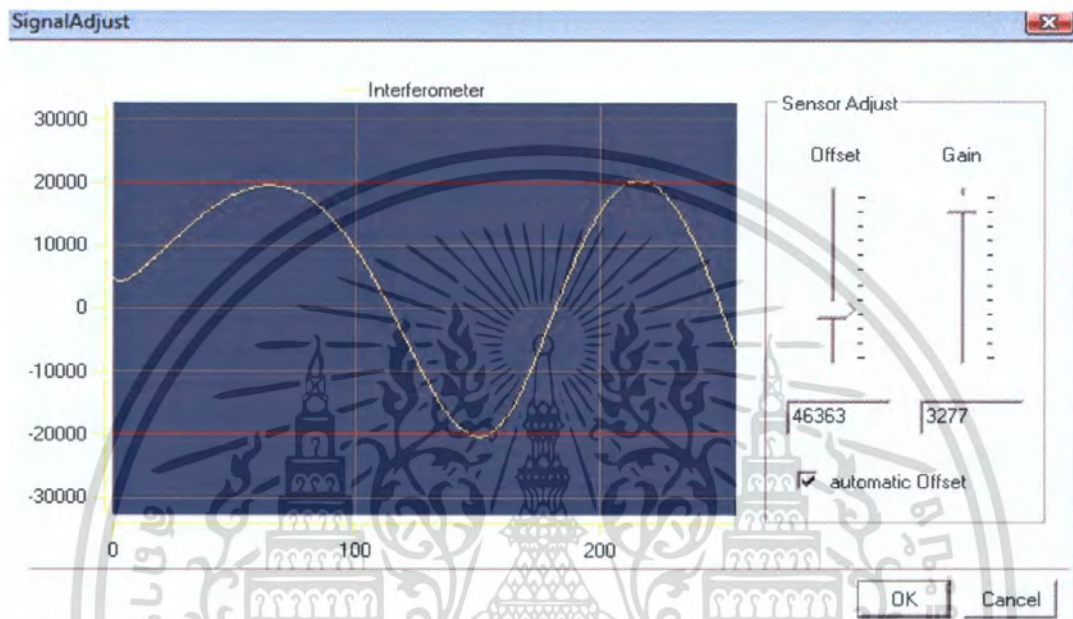
1.1ก

- เลือก Adjust > signal Adjust



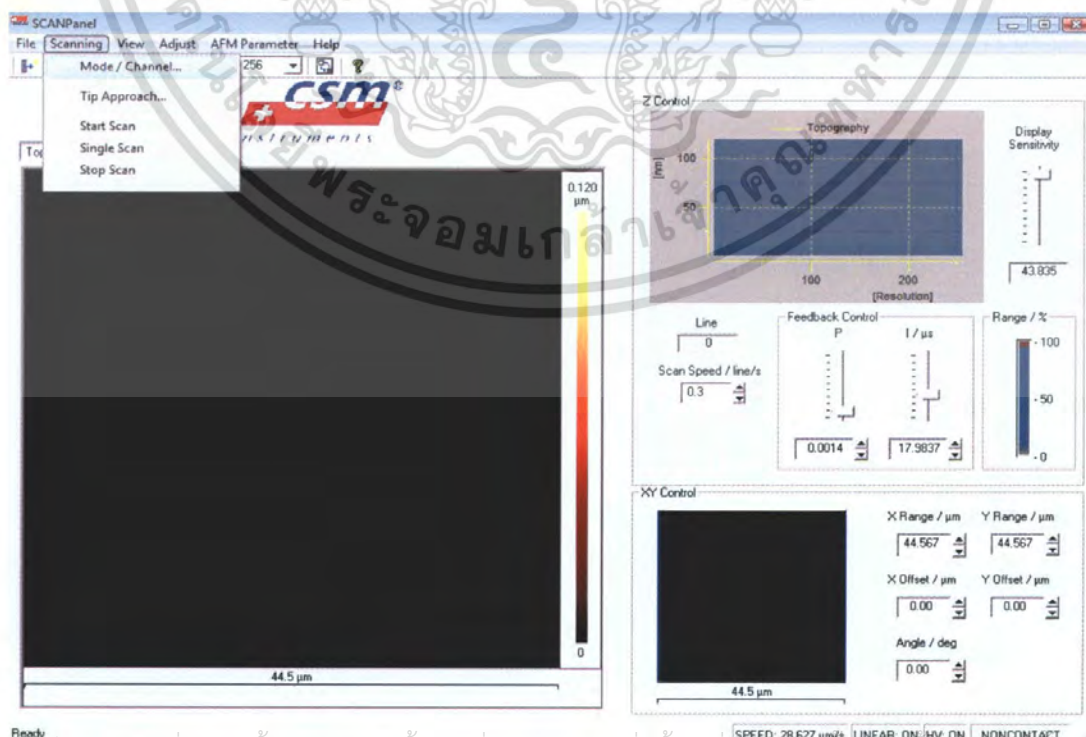
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 3.36 การปรับค่า Adjust ในการกระตุ้นด้วยแสง

จากนั้นปรับค่า Sensor Adjust โดยปรับค่า offset และค่า Gain ให้ค่า Interferometer อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมคือพอดีกับเส้นสีแดงทั้งบนและล่าง หรือปรับด้วยการกด automatic offset > OK



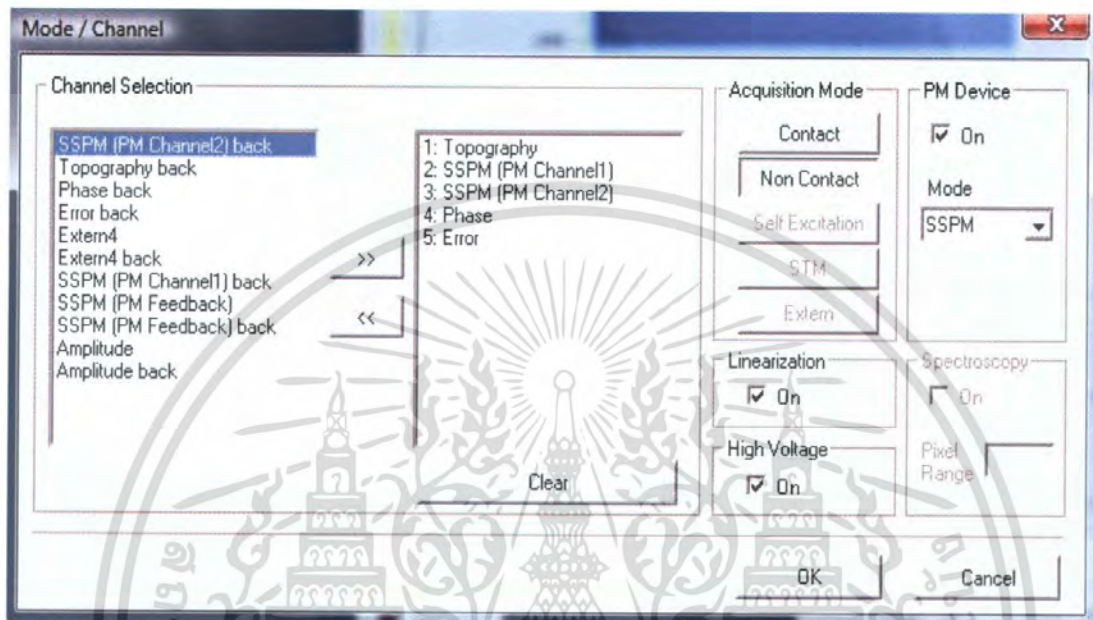
รูปที่ 3.37 รับค่า Sensor adjust ในขั้นตอนการกระตุ้นด้วยแสง

- เลือก Scanning > Mode/Channel



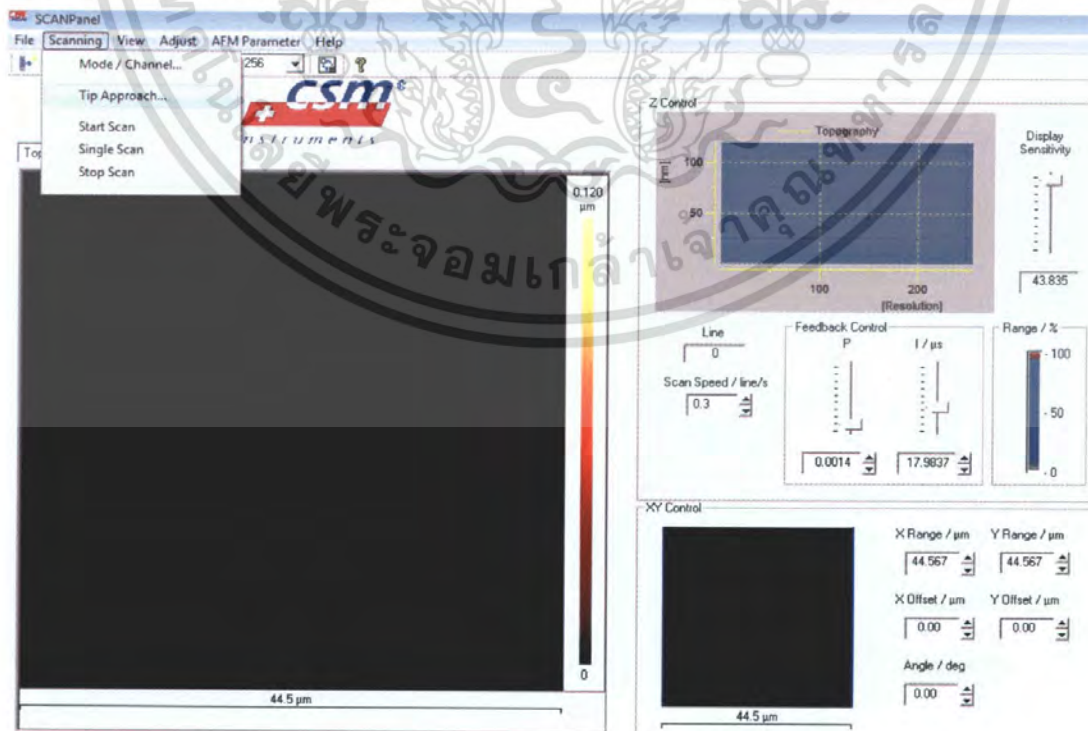
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรูปที่ 3.38 หน้าต่างการเลือก mode/channel ออกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือกค่าหรือรูปแบบที่ต้องการทราบ ซึ่งก็คือค่าของ Topography, Phase, Amplitude, Error, Extern1, Extern2 ใน Channel Selection > OK



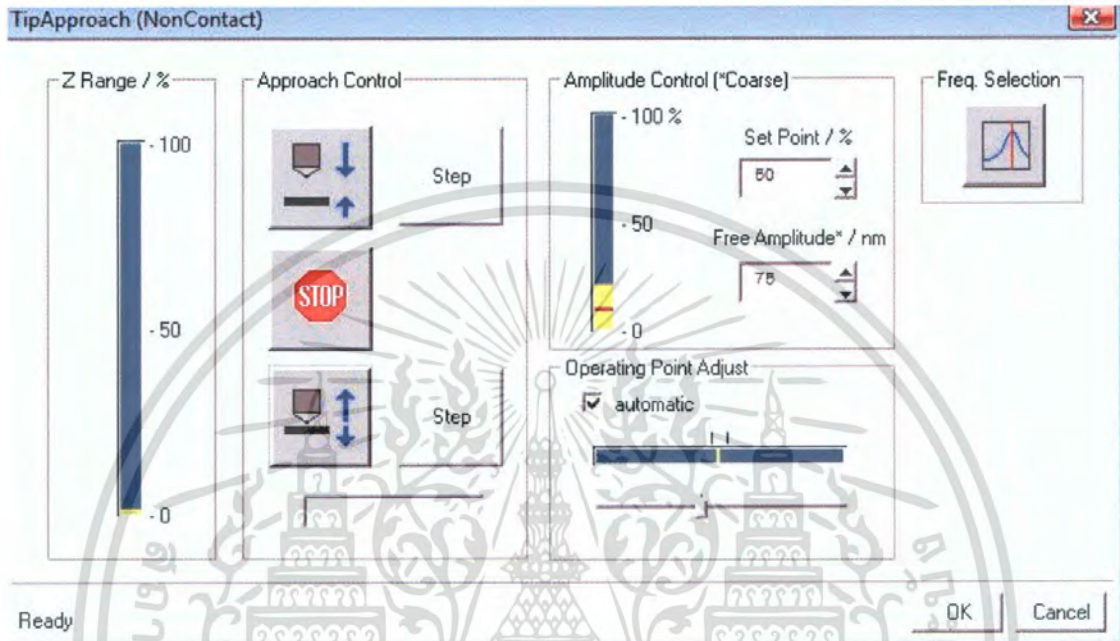
รูปที่ 3.39 หน้าต่างการเลือก mode/channel เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการสแกนแบบกระตุ้นด้วยแสง

- เลือก Scanning > tip Approach



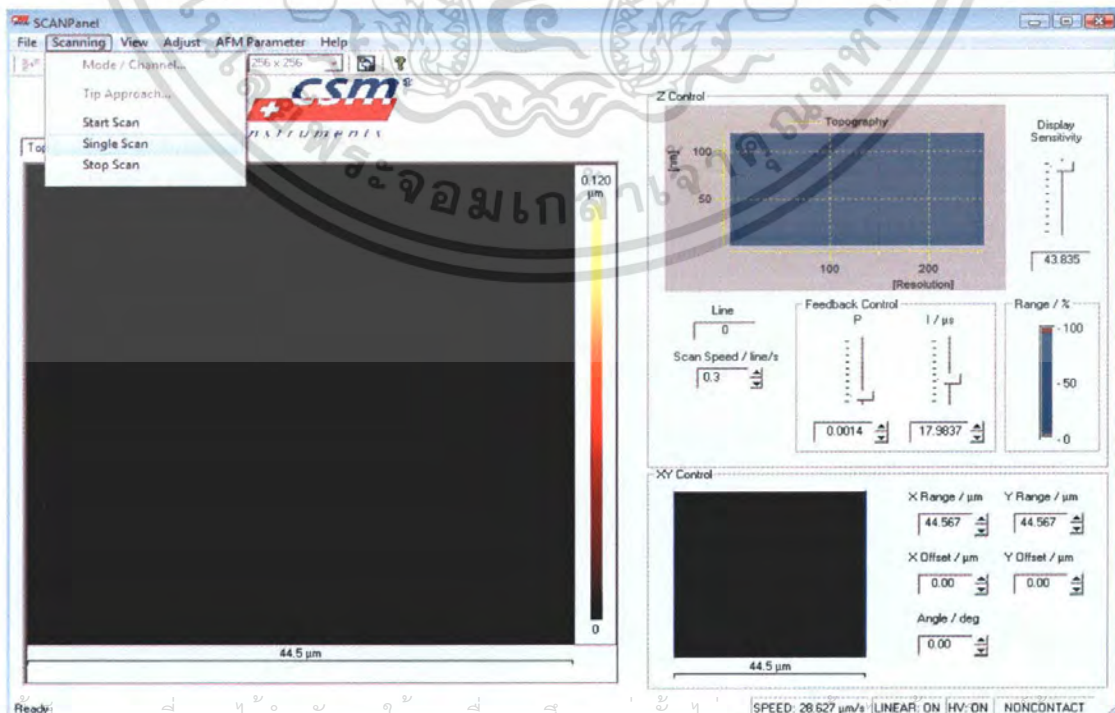
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.40 หน้าต่างของ Tip Approach ที่ถูกนำมาใช้ประกอบภาพให้เข้าใจประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือก Approach Control โดยให้เชื่อมกับชิ้นงานเลื่อนเข้าหากันโดยดูที่ Amplitude Control ให้แถบสีเหลืองมีความสูงระดับเดียวกับเส้นสีแดง กด OK เพื่อทำการรอกการสั่งเสกน sample



รูปที่ 3.41 หน้าต่างของ Approach Control

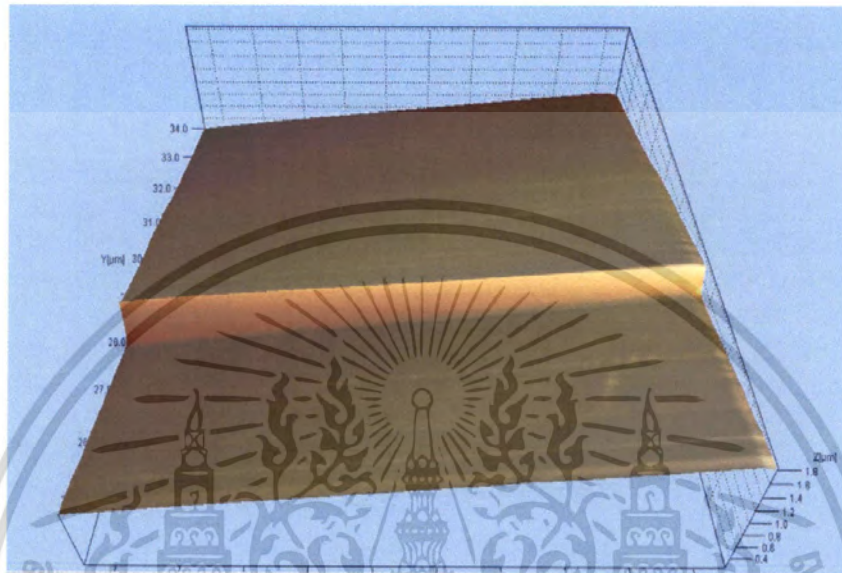
- เลือก Scanning > single Scan



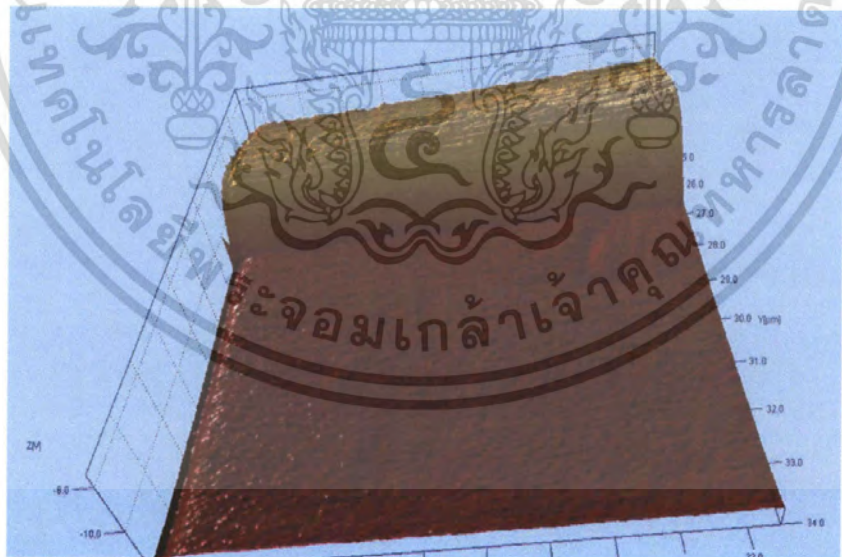
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.42 หน้าต่างการเลือก Single scan

- ทำการรอนกว่าเครื่องจะทำการเสกนจนเสร็จ ได้รูป ดังภาพ



รูปที่ 3.43 ภาพ 3D ของ Topology



รูปที่ 4.44 ภาพ 3D ของ Potential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### ผลการทดลอง

##### รูปที่ 4.1 ถึง 4.13

ภาพที่แสดงบนซ้าย	คือ	Topography forward
ภาพที่แสดงบนกลาง	คือ	SSPM (PM Channel 1)forward
ภาพที่แสดงบนขวา	คือ	SSPM (PM Channel 2)forward
ภาพที่แสดงล่างซ้าย	คือ	Phase forward
ภาพที่แสดงล่างขวา	คือ	ภาพ 3D ของ SSPM (PM Channel 1)forward

ซึ่งความหมายของภาพ ที่ประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเป็นดังนี้

**Topography forward** แสดง ค่าความราบเรียบบริเวณผิวหน้าของสารตัวอย่าง

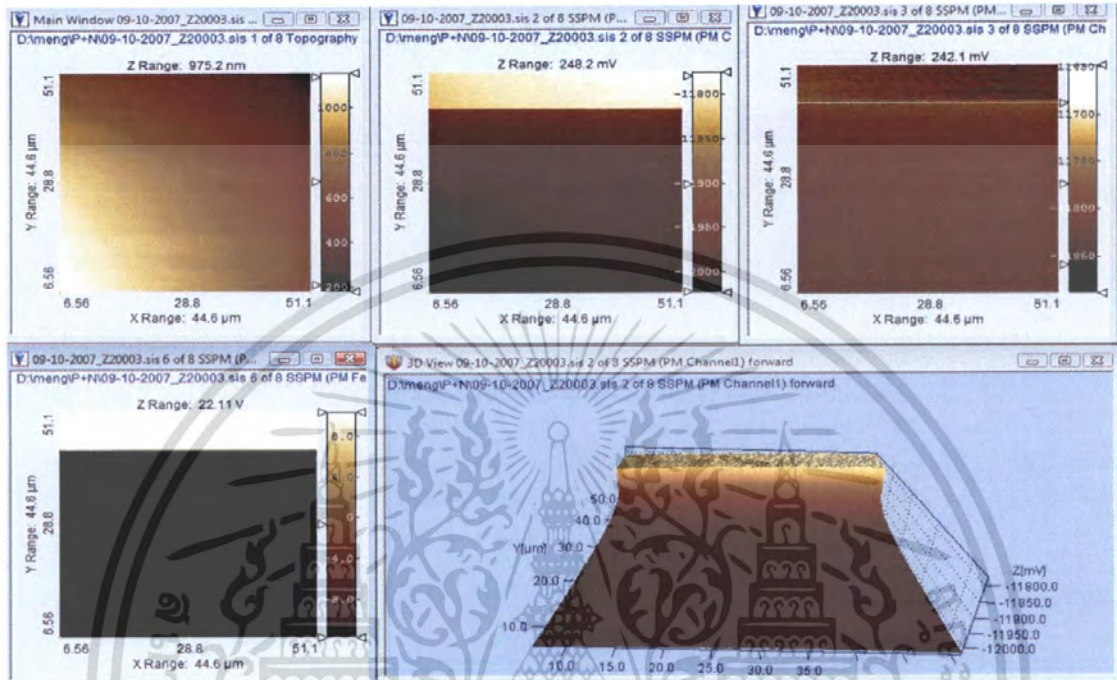
**SSPM (PM Channel 1) forward** แสดงค่า surface potential ของพื้นผิวสารตัวอย่าง โดยค่า surface potential ที่แสดงจะเป็นค่าที่อ้างอิงกับ ground ของระบบวัด

**SSPM (PM Channel 2) forward** แสดงค่า gradient ของ surface potential ของพื้นผิวสารตัวอย่าง

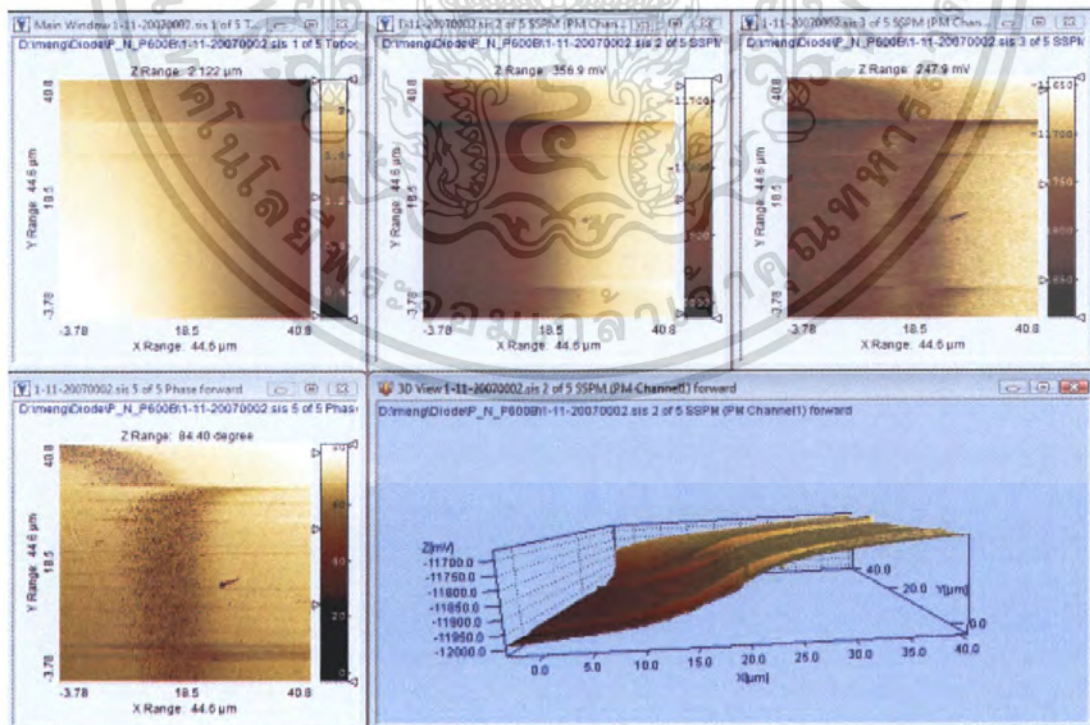
**Phase forward** แสดงค่า phase ของพื้นผิวซึ่งสามารถบอกถึงชนิดของพื้นผิวว่าเป็นสารชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

**ภาพ 3D ของ SSPM (PM Channel 1) forward** คือ ภาพสามมิติที่ได้จาก SSPM (PM Channel 1) ซึ่งเป็นภาพที่ใช้ค่า surface potential ภาพที่แสดงเป็นภาพของ surface potential ของ sample

ตอนที่ 1 เป็นการแสกน junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากซิลิกอน wafer และผลึกซิลิกอนของไดโอด

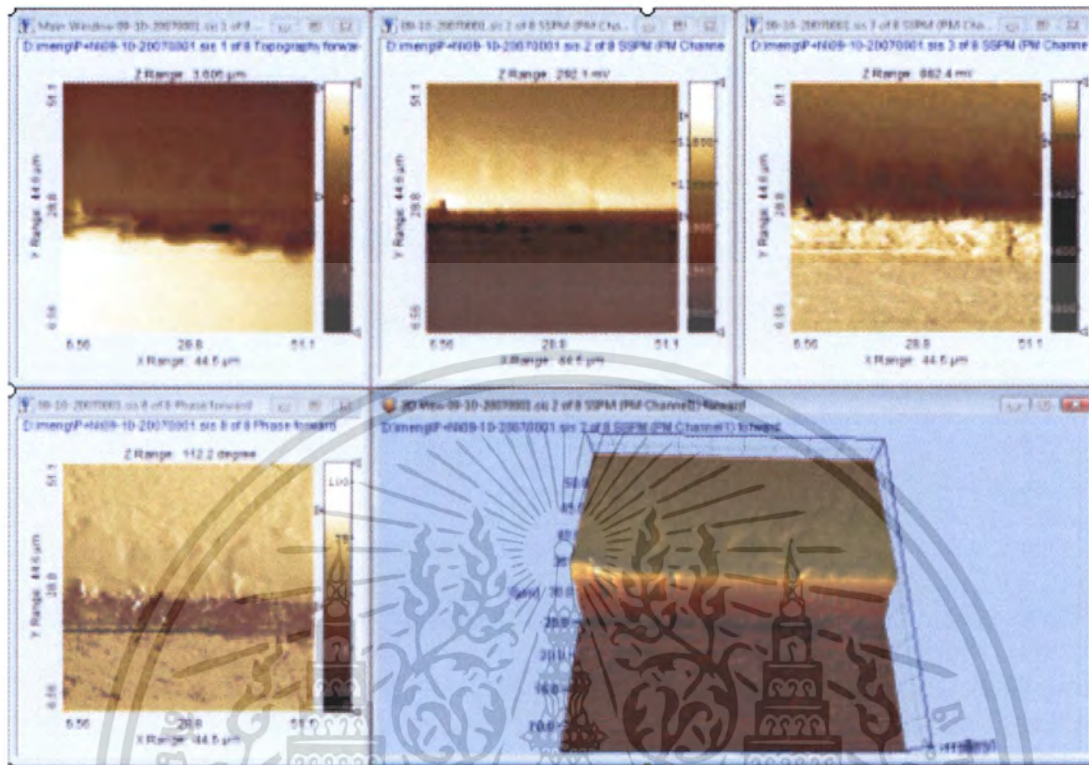


รูปที่ 4.1 การแสกน junction ของซิลิกอน wafer ที่โคปด้วยสารเจือ

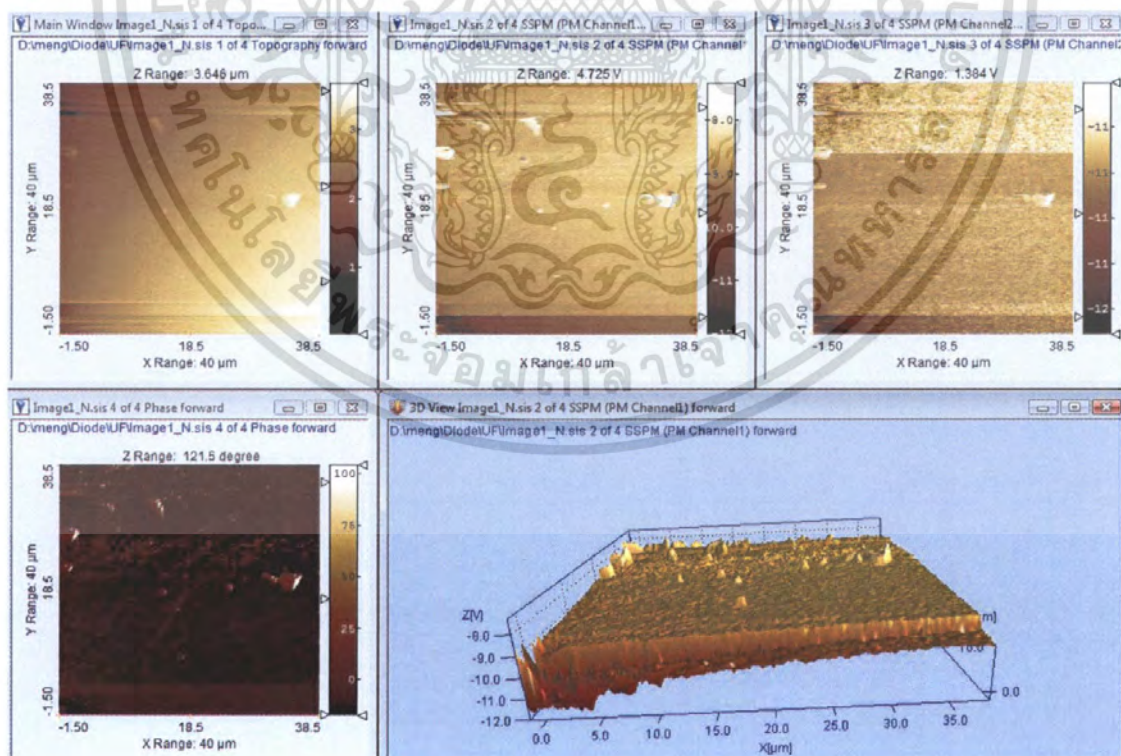


รูปที่ 4.2 การแสกน junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด UF 4001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

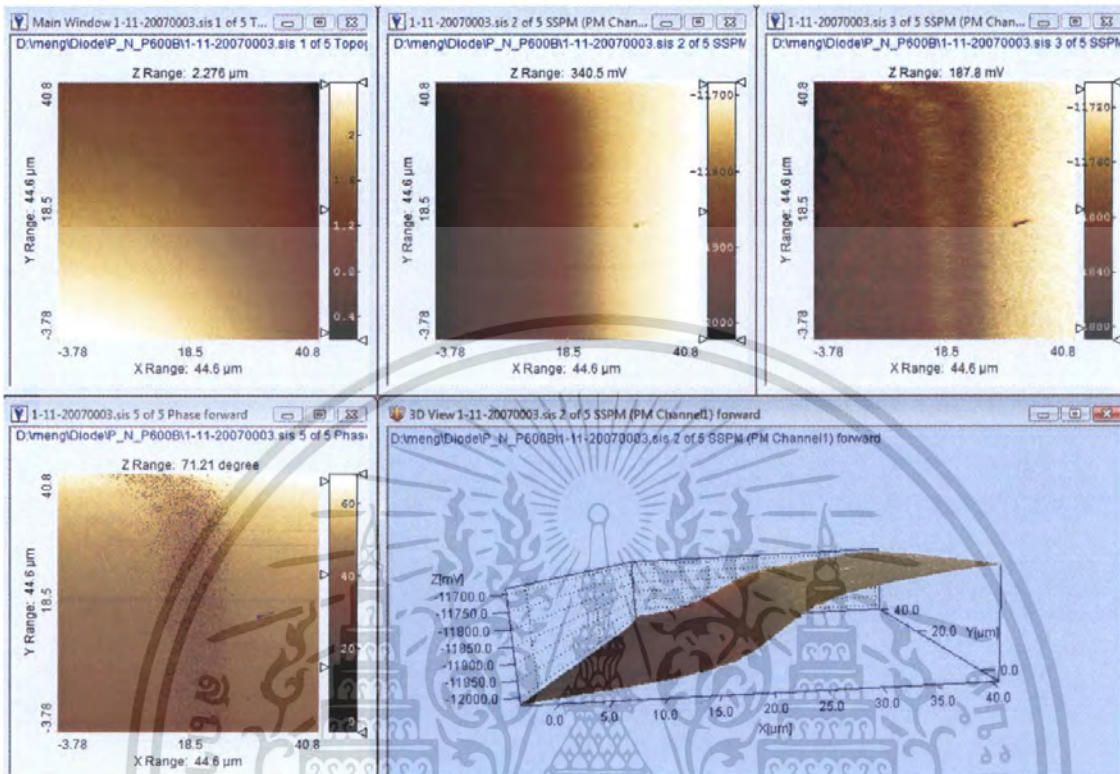


รูปที่ 4.3 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด UF 4006

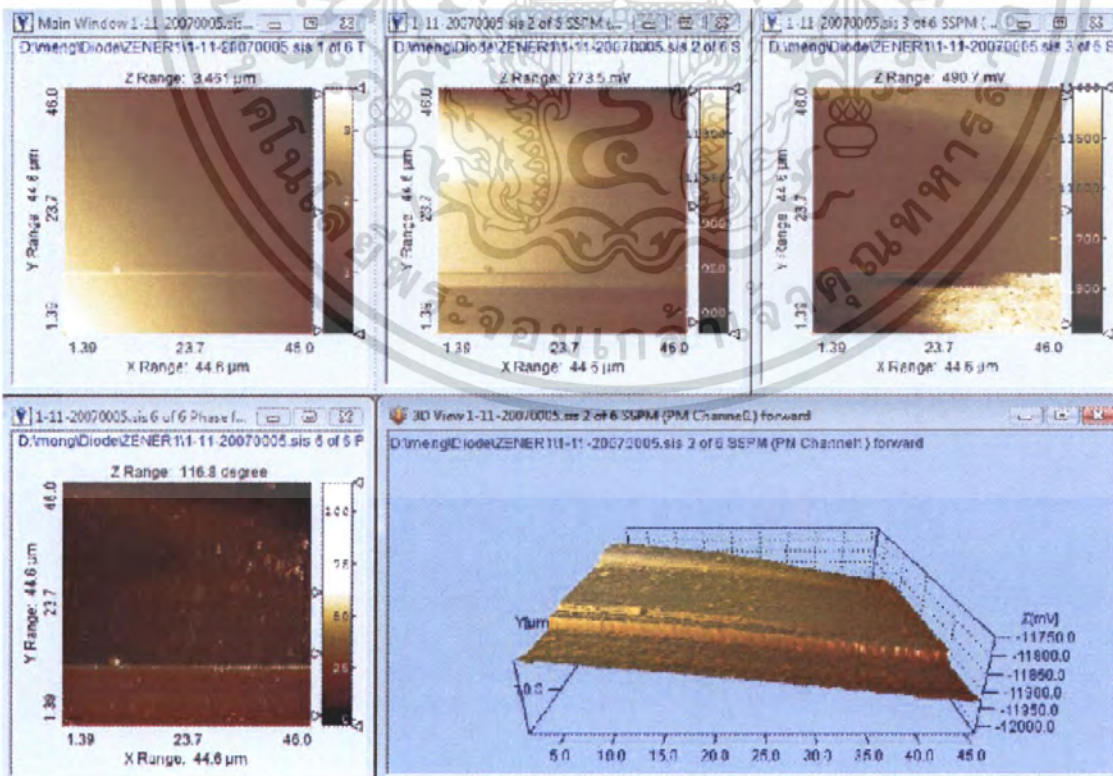


รูปที่ 4.4 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด UF4007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

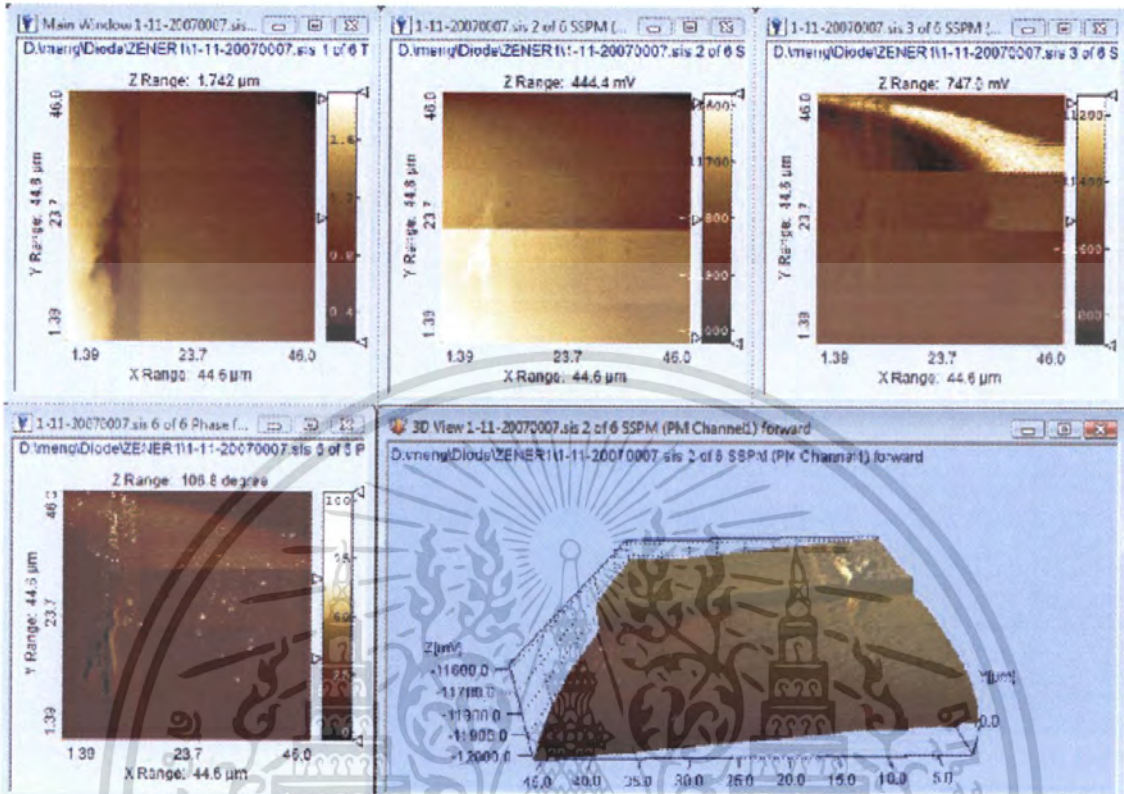


รูปที่ 4.5 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด P600B



รูปที่ 4.6 การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จาก Zener Diode 1N5242B

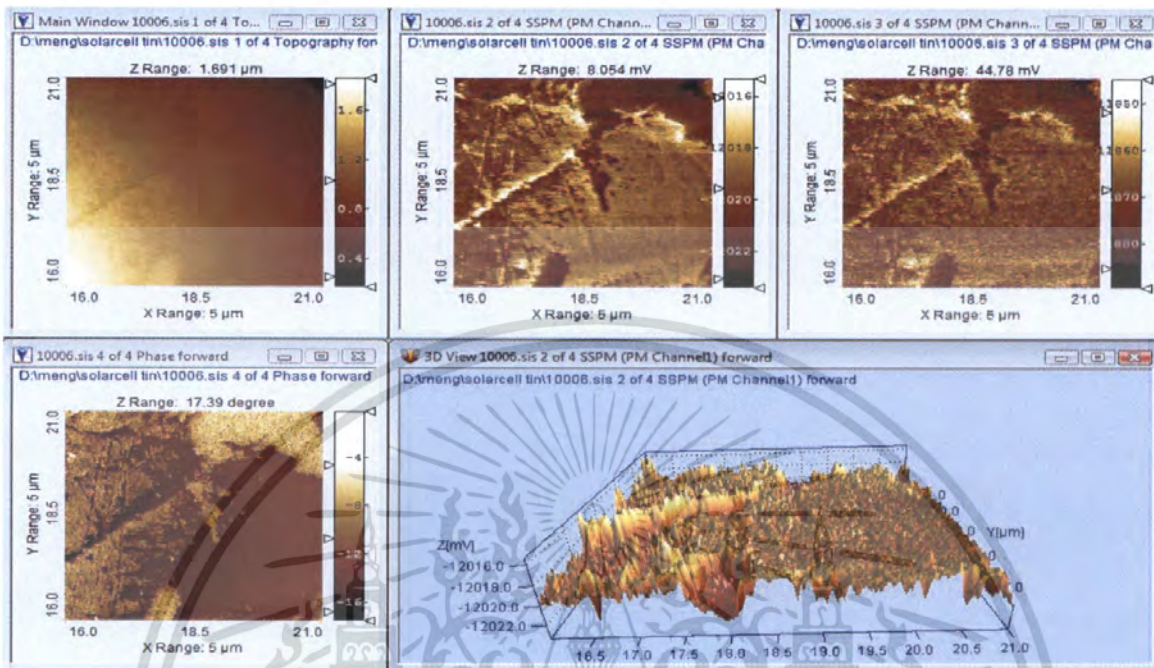
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



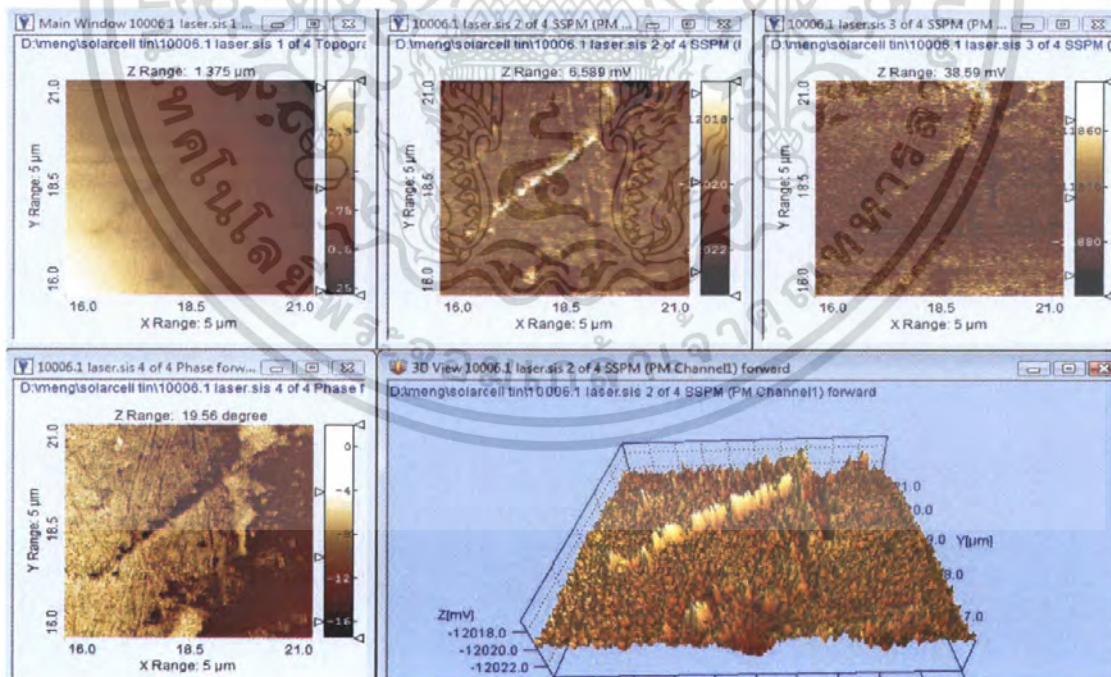
รูปที่ 4.7 การสแกน junction ของผลึกซิลิกอนที่ได้จาก Zener Diode 1N5239B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 เป็นการสแกน junction ของแผ่น โพลีซิลิโคน

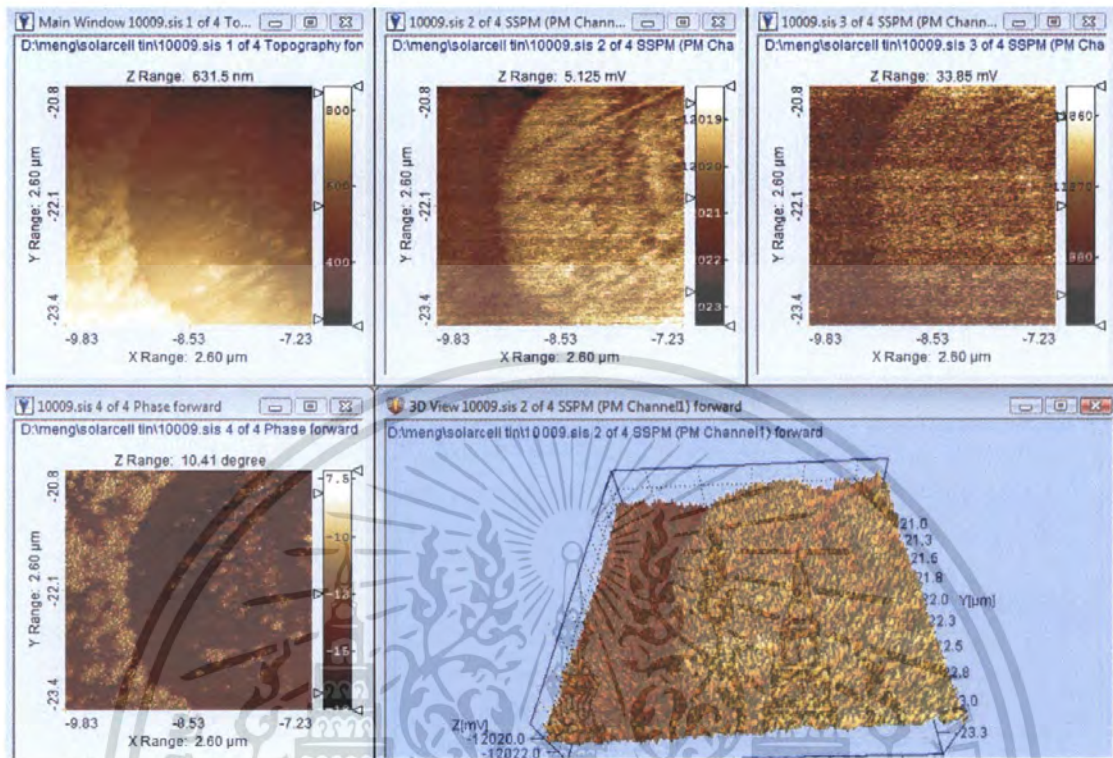


รูปที่ 4.8 การสแกน junction ของแผ่นโพลีซิลิโคนแผ่นที่ 1

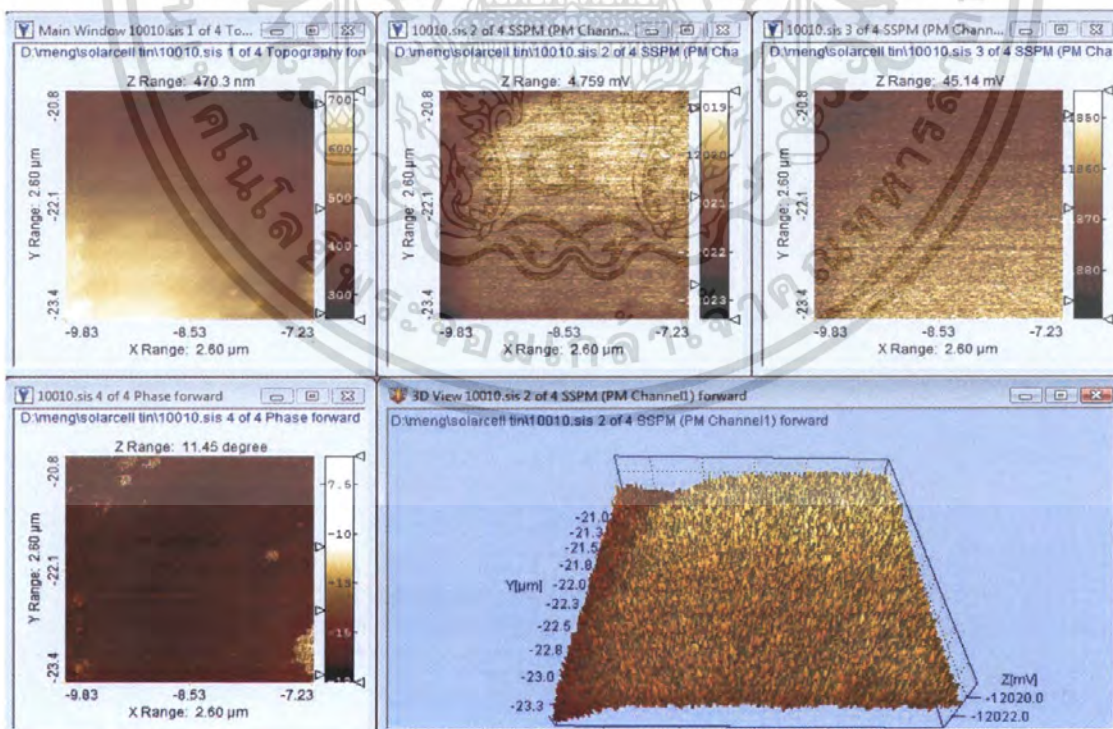


รูปที่ 4.9 การสแกน junction ของแผ่นโพลีซิลิโคนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์แผ่นที่ 1 (รูปที่ 4.8) ที่นำไปขัดด้วยผงขัดอลูมินาอีกครั้งเพื่อความราบเรียบที่เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

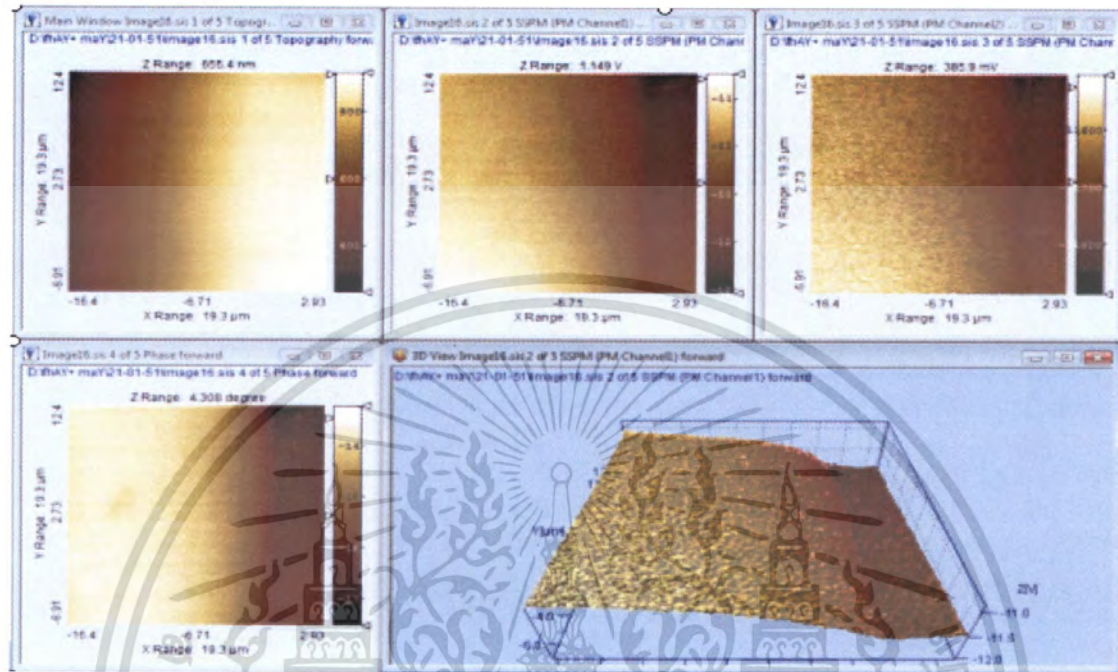


รูปที่ 4.10 การแสดง junction ของแผ่นโซลาร์เซลล์ (แผ่นที่ 2) ที่พบความแตกต่างของ surface potential บริเวณ junction

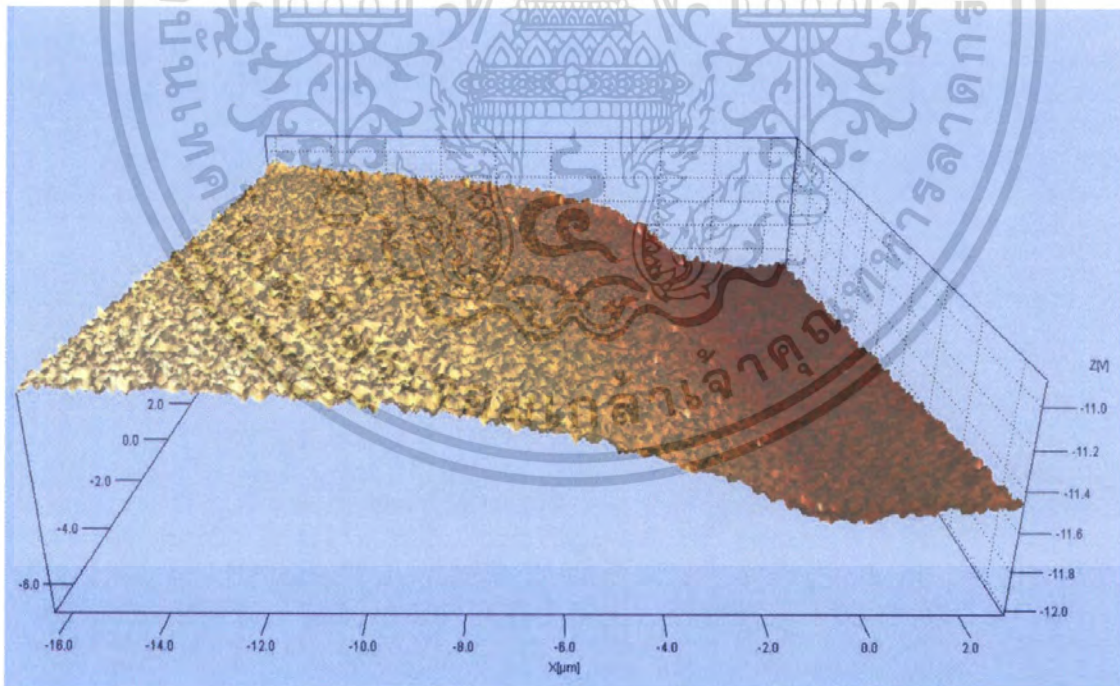


รูปที่ 4.11 การแสดง junction ของแผ่นโซลาร์เซลล์ (แผ่นที่ 2) ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 เป็นการสแกน junction ของผลึกซิลิกอนที่นำไปโคปด้วยสารเจือ



รูปที่ 4.12 (ก)

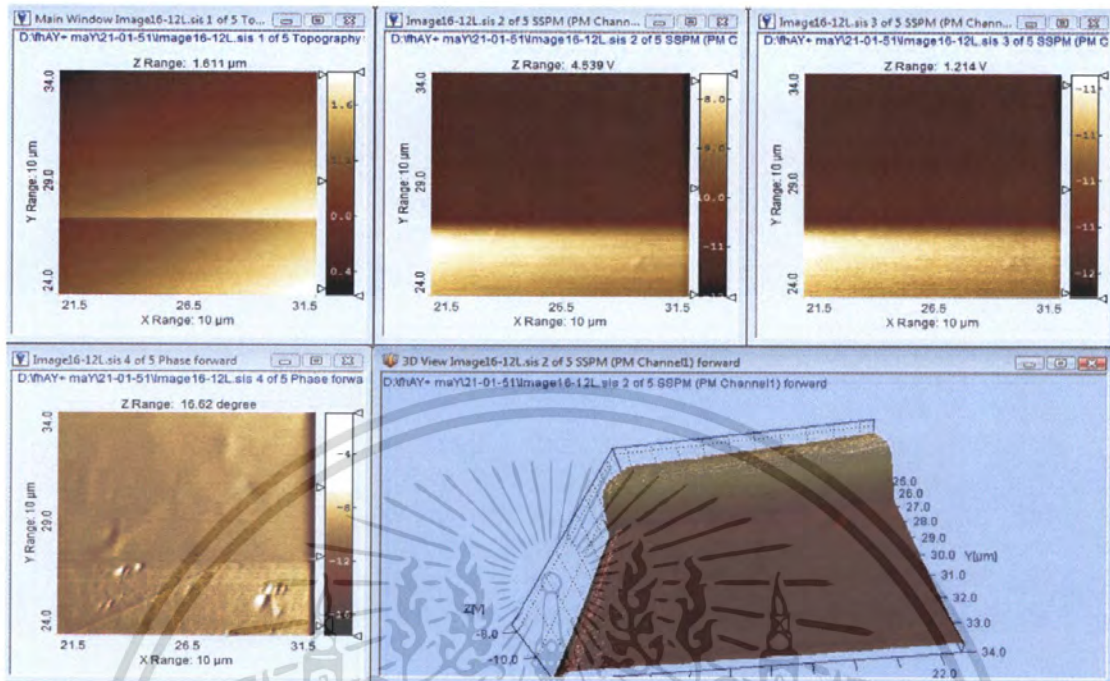


รูปที่ 4.12 (ข)

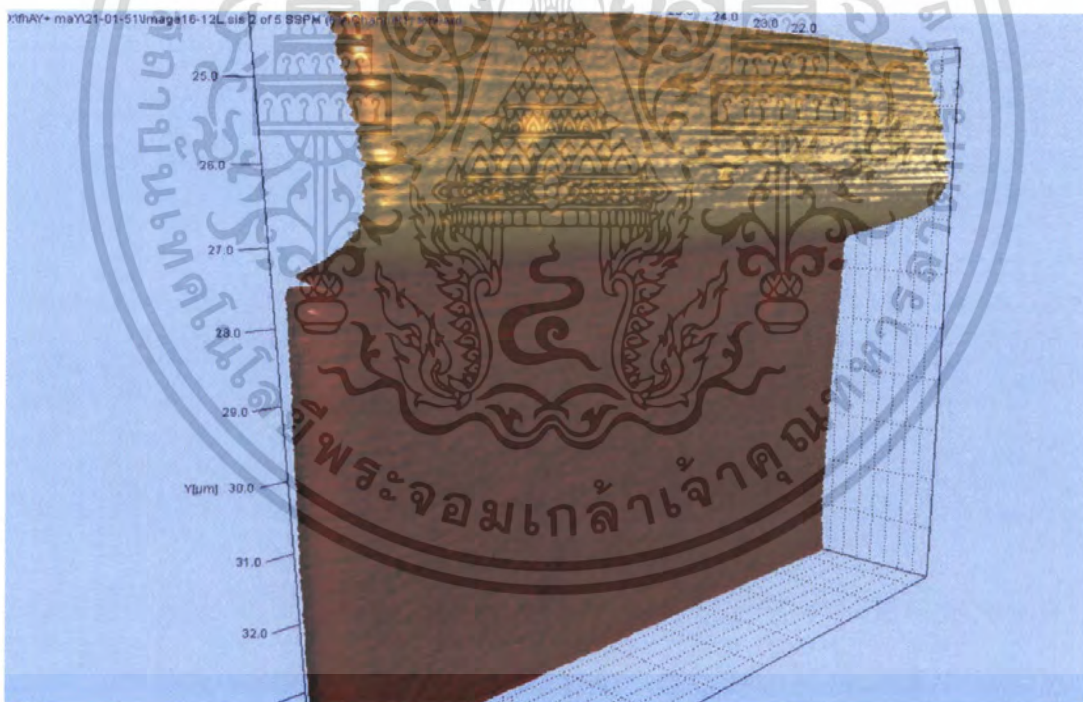
รูปที่ 4.12(ก) - 4.12(ข) การสแกน junction ของผลึกซิลิกอนที่นำไปโคปด้วยสารเจือ โดยที่ 4.12(ก)

คือ ค่าต่างๆที่วัดได้ และ 4.12(ข) คือภาพ 3D ของ SSPM (PM Channel 1) หรืออีกนัยหนึ่งคือโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาวิจัยค่า surface potential ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 (ก)



รูปที่ 4.13 (ข)

รูปที่ 4.13 (ก) - 4.13(ข) การแสดง junction ของผลึกซิลิกอนที่นำไปโดยปด้วยสารเจือ เมื่อนำไป กระตุ้นด้วยแสง ซึ่งจะเป็นการนำผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยใช้ตำแหน่งและบริเวณเดิมแต่ เพิ่มการใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นบริเวณ junction เพื่อเปรียบเทียบ surface โดยที่ 4.13(ก) คือ ค่าต่างๆ ที่วัดได้ และ 4.13(ข) ภาพ 3D ของ SSPM (PM Channel 1) หรืออีกนัยหนึ่งคือโหมดการวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 จะเป็นขั้นตอนการเตรียม sample ซึ่ง sample ที่ใช้ทั้งหมดจะใช้ด้วยกัน 3 ชนิด คือ

1. sample ที่ได้จากซิลิกอน wafer ที่นำไปโคปด้วยสารเจือ
2. sample ที่ได้จากผลึกซิลิกอนของไดโอด ซีเนอร์ไดโอด
3. sample ที่ได้จากแผ่นโซลาร์เซลล์

ซึ่งเมื่อได้ sample แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปเราก็จะทำการศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือในการทำการทดลอง รวมถึงเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าและคุณลักษณะของรูปภาพของบริเวณรอยต่อ จะสังเกตเห็นได้ว่าที่บริเวณรอยต่อมีความหนาแน่นของประจุสูงมาก ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่แสดงได้ คือมีความต่างของระนาบพื้นผิวของรอยต่อ ดังนั้นอาจสรุปได้ตามทฤษฎีว่า ที่บริเวณรอยต่อจะมีความหนาแน่นของพาหะประจุค่อนข้างสูง ที่บริเวณ p-n junction อิเล็กตรอนในสารเอ็นจะเคลื่อนที่ไปแทนที่โฮลในสารพีเกิดเป็นช่วงรอยต่อที่เรียกว่า depletion region ทำให้รอยต่อนี้เกิด Surface potential ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะ หรือความเข้มข้นของสารที่ทำการโคป ซึ่งในขั้นตอนการแสดกนของแต่ละ sample นั้นเป็นดังนี้

ในขั้นแรกเราได้ทำการแสดกน sample ที่ได้จากผลึกซิลิกอน wafer ที่นำไปโคปด้วยสารเจือ ซึ่งผลที่ได้ คือ จากการแสดกนจะเห็น junction ดังรูปที่ 4.1 จากนั้นต้องการศึกษาในสภาวะปกติกับในสภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 จะสามารถสรุปได้ว่า บริเวณ junction เปรียบเทียบผลในสภาวะปกติกับสภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงพบว่า ในที่สภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงนั้น (รูปที่ 4.13) จะมีค่า surface potential สูงกว่า ในสภาวะปกติ (รูปที่ 4.12) ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้จากทฤษฎี เนื่องจากเมื่อเกิดรอยต่อของสารพี และเอ็น อิเล็กตรอนในสารเอ็น จะแพร่ไปทางด้านพีจึงทำให้อันเอ็นมีสถานะเป็นประจุบวก และทางด้านพีมีสถานะเป็นประจุลบ จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ในกรณีที่รอยต่อถูกกระตุ้นด้วยแสงซึ่งทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้นที่บริเวณปลดพาหะ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากด้านพีกลับไปยังด้านเอ็นและโฮลจะเคลื่อนที่จากด้านเอ็นไปยังด้านพีโดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า แล้วเกิดการรวมตัวกับพาหะข้างน้อยในแต่ละด้าน ดังนั้น ความแตกต่างของ surface potential ที่เกิดขึ้นระหว่างด้านพีและเอ็นจึงควรมีค่าลดลง ในกรณีนี้จึงถือเป็นกรณีศึกษา ซึ่งต้องการการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

เนื่องจากโครงการนี้ต้องการศึกษาลักษณะของ surface potential ใน sample ชนิดอื่นๆ จึงได้เปลี่ยน sample มาเป็นผลึกซิลิกอนของไดโอด และซีเนอร์ไดโอด ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 4.2 - 4.7 ซึ่ง sample ผลึกซิลิกอนของไดโอด และซีเนอร์ไดโอดจะมีลักษณะของ surface Potential น้อยกว่า sample ของผลึกซิลิกอน wafer แต่ sample ที่เป็นผลึกซิลิกอนของไดโอด และซีเนอร์ไดโอด ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำมากระตุ้นด้วยแสงเพื่อเปรียบเทียบผลได้ เนื่องจากบริเวณรับแสงของไดโอดอยู่ที่ผิวหน้า ด้านบนจึงไม่สามารถทำได้เนื่องจากหัวของ AFM มีขนาดใหญ่จึงบังทางเดินแสงของเลเซอร์ ไม่ให้ มาตกกระทบยังผิวหน้าของไดโอดได้

หลังจากนั้นได้มีการเปลี่ยน sample ที่ต้องการศึกษามาเป็นแผ่น โซลาร์เซลล์ ซึ่งผลที่ได้คือ ยังไม่สามารถมองเห็นลักษณะของ Potential ได้ชัดเจนมากขึ้น เนื่องจากแผ่น โซลาร์เซลล์ที่ใช้ทำจากฟิล์มบาง จึงยากต่อการหา junction ผลแสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเห็นว่ามี ความแตกต่างของ surface potential แต่ในลักษณะที่น้อยมาก ดังนั้นจึงไม่อาจสรุปได้ว่าผลที่เกิดขึ้นนั้นเป็น surface potential จริงหรือไม่ จากนั้นจึงทำการกระตุ้นด้วยแสงในบริเวณและพื้นที่เดิม ผลแสดงดังรูป 4.11 จะเห็นว่า surface potential มีค่าลดลงจากในสภาวะปกติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ว่า เมื่อเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นแล้ว เนื่องจากความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนในด้านทั้งสองไม่เท่ากัน จึงเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะนี้ จากด้านที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ไปยังด้านที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า โดยโฮลจะแพร่จากด้านพีไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านเอ็นไปยังด้านพี ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะบริเวณรอยต่อ และทำให้เกิดมีประจุไฟฟ้าบวกและลบของไอออนอะตอมสารเจือ มีผลทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ และสนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะ เมื่อรอยต่อเข้าสู่ภาวะสมดุล สนามไฟฟ้านี้จะมีค่ามากพอที่จะยับยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล ไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ซึ่ง Surface potential จะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะ หรือความเข้มข้นของสารที่ทำการโด๊ปที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อนั้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ กระแสครีฟท์จะเท่ากับกระแสแพร่ ดังนั้นกระแสรวมเป็นศูนย์ ระดับเฟอร์มิ  $E_F$  ของด้านทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน ทำให้เกิด surface potential ระหว่างด้านทั้งสอง เสมือนกับเป็นกำแพงศักย์ (potential barrier) ต่อต้านไม่ให้อิเล็กตรอนและโฮล เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ ทุกอย่างที่ย่อยต่อจึงดูคล้ายสงบนิ่ง เราเรียกว่าภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” ความชันของกราฟบริเวณปลอดพาหะ เป็นสิ่งแสดงขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อ เป็นกำแพงศักย์ ซึ่งแสดงลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะอยู่ในภาวะสมดุล หรือศักย์สัมผัส หมายถึง ความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างด้านพีและด้านเอ็น หรือที่เรียกว่า surface potential

5.1 ตอนที่ 1 วัตถุประสงค์ในตอนต้นที่ 1 นี้ต้องการศึกษาถึงการ ใช้เครื่องมือ AFM และการหาบริเวณ junction เพื่อทำการแสกนค่า surface potential ซึ่ง sample ที่ใช้คือซิลิกอน wafer ที่โด๊ปด้วยสารเจือ รวมถึงผลึกซิลิกอนที่ได้จากไดโอด ซีเนอร์ไดโอด เนื่องจากผลึกซิลิกอน wafer ที่ได้มีขนาดเล็ก หรือแม้กระทั่ง ไดโอดและซีเนอร์ไดโอด ไม่มีฐานวางที่มั่นคง จึงได้นำไปทำการหล่อรวมกับเลซิน เพื่อให้ตัว sample มีขนาดใหญ่ขึ้น และได้ทำการขัดผิวหน้าออก จนเจอบริเวณ junction จากนั้นทำการขัดด้วยกระดาษทรายและผงขัดอลูมิน่าเพื่อเพิ่มความราบเรียบให้แก่ sample และบริเวณ junction เพื่อให้ง่ายต่อการแสกนหาบริเวณ junction เพราะถ้าไม่นำไปหล่อเลซินปัญหาที่จะเกิดขึ้นคือ tip ของ KPFM อาจแสกนไม่ได้เนื่องจากบริเวณของผลึกซิลิกอนมีขนาดเล็กเกินไป หรือถ้าในกรณีที่แสกนได้ tip อาจตกจาก sample ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องมือได้ และเมื่อได้ sample ที่พร้อมทำการปฏิบัติการ จึงนำไปทำการแสกนตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้ภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แสดงการหาบริเวณ junction ของ sample จะได้รูปของ surface potential ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 4 ดังรูปที่ 4.1-4.7

5.2 ตอนที่ 2 วัตถุประสงค์ในตอนี่ 2 นี้เพื่อต้องการแสกนดูความแตกต่างของ surface potential ของ junction เพื่อเปรียบเทียบรูปในการกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ และไม่กระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ ว่ามี surface potential ต่างกันอย่างไร เพื่อทำการวิเคราะห์และสรุปผล

ในขั้นตอนนี้การใช้แสงกระตุ้นไม่สามารถใช้เลซินแบบในขั้นตอนที่ 1 ได้ เนื่องจากเลซินแบบขั้นตอนที่ 1 นั้นขุ่น ดังรูป 5.1 ทำให้การกระตุ้นด้วยแสงนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะทำการกระตุ้นได้เพียงด้านเดียว คือด้านบนของ sample เท่านั้น ทำการกระตุ้นด้านข้างไม่ได้เนื่องจากเป็นเลซินแบบขุ่นแสงเลเซอร์ไม่สามารถเดินทางถึงบริเวณแผ่นซิลิกอนหรือบริเวณรอยต่อได้ และเนื่องจากด้านบนของ sample หัวของ tip นั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้น แสงเลเซอร์จึงไม่สามารถเดินทางได้ถึงบริเวณรอยต่อของ sample ได้เช่นกัน หรือบางกรณีอาจจะเดินทางผ่านถึงบริเวณ junction จากการสะท้อนหรือหักเหจากมุมต่างๆ แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าจะเกิดขึ้นได้จริงหรือไม่ และไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนเลซินเป็นแบบเลซินที่มีความใส เพื่อจะทำให้การกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ง่ายมากขึ้น และสามารถกระตุ้นในด้านที่แสงจะส่งผ่านถึงบริเวณผลึกซิลิกอนได้ นั่นก็คือด้านข้างของ sample ซึ่งตัวอย่างของ sample ที่ทำจากเลซินใสที่ใช้ในการทดลองเป็นดังรูป 5.2



รูปที่ 5.1 sample ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 1 (เลซินแบบขุ่น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 sample ที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 (เลซินแบบใส)

และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์และในสภาวะปกติ

ในขั้นตอนที่สองนี้จะมีการเปลี่ยน sample ที่ใช้ในการทดลอง จากไดโอด และซีเนอร์ ไดโอด ในขั้นตอนที่ 1 มาเป็น sample สองแบบ คือ 1. solar cell และ 2. แผ่นซิลิกอน wafer ที่โคปด้วยสารเจือ

สาเหตุที่ทำการเปลี่ยน sample เนื่องจากมีการตั้งสมมติฐานว่า 1. ถ้าใช้ sample เป็นผลึกซิลิกอนของไดโอด และซีเนอร์ ไดโอดเช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งไดโอด และซีเนอร์ ไดโอดนั้นมีบริเวณ junction อยู่ด้านบน ด้านข้างมีเพียงขาของไดโอดสองข้างซึ่งมีพื้นที่ที่เล็กมาก (ดังแสดงในรูปบทที่ 3 หน้า 42 รูปกลาง) ดังนั้นจึงมีพื้นที่รับแสงน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบผลแล้วระหว่างการกระตุ้นด้วยแสงและไม่กระตุ้นด้วยแสง ผลที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากจึงเสมือนกับไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงมีการเปลี่ยน sample ที่ใช้ในการทดลองมาเป็นแบบ

1. solar cell เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวในข้างต้นและ ผลึกซิลิกอนของไดโอด และซีเนอร์ ไดโอดมีการหาบริเวณ junction ที่กระทำในขั้นตอนที่ 1 เป็นไปได้ยาก แต่ในแผ่น solar cell ทำจากฟิล์มบางหลายๆชั้น ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานว่าน่าจะหาบริเวณรอยต่อได้ง่ายกว่า และ

2. แผ่นซิลิกอนที่ทำการโคปด้วยสารเจือ นั่นคือเป็นการเพิ่มพาหะประจุให้มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนอิสระ และโฮล ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานว่าน่าจะทำการหาบริเวณ junction ได้ง่ายกว่าเช่นกัน เนื่องจากการโคปด้วยสารเจือ นั้น เป็นการเพิ่มอัตราการแพร่ของพาหะ น่าจะมีผลทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ และสนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะทำให้เกิด เป็น surface potential ระหว่างด้านทั้งสองสูงขึ้น ดังนั้น จึงเปลี่ยนมาใช้ sample เป็น แผ่น solar cell และ แผ่นซิลิกอนที่ทำการโคปด้วยสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 ใช้ sample เป็น แผ่น solar cell เมื่อนำมาหล่อด้วยเลซินไอแล้วทำการขัดตามกรรมวิธีแล้ว จะพบปัญหาที่เกิดขึ้นคือ

5.2.1.1 เลซินไอเมื่อผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดแล้ว เลซินไอมีความอ่อนตัวมากกว่ากระจกใสที่ติดอยู่กับแผ่น solar cell ทำให้เมื่อทำการขัดเลซินไอมีการยุบตัวลงมากกว่ากระจกของแผ่น solar cell ทำให้บริเวณ surface มีความแตกต่างของระดับมาก ทำให้เครื่องไม่สามารถทำการแสกนได้

5.2.1.2 เมื่อทำการผสมตัวเร่งเลซินไอ (เพื่อให้มีความแห้งและแข็งที่เพิ่มมากขึ้น) จะพบปัญหาที่เกิดขึ้นคือ จะพบฟองอากาศเกิดขึ้นมากขึ้น และเลซินไอแห้งแข็งจนเกินไปและแตกร้าวได้ง่าย ทำให้เครื่องไม่สามารถทำการแสกนได้

5.2.1.3 มีการลองไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของเลซินไอ ผลปรากฏว่า 1 อาทิตย์ผ่านไปเลซินไอยังคงมีความอ่อนนุ่มอยู่ แห้งแค่บริเวณผิว แต่เนื้อในยังคงเหลวอยู่เช่นเดิม

ดังนั้นในขั้นตอนการใช้ solar cell ทำ sample มีการเสียเวลาไปไม่น้อย แต่ในที่สุด ก็ได้ sample เป็นจาก แผ่น solar cell มาทำการทดสอบ แต่ก็ยังเป็น sample ที่ไม่สมบูรณ์เท่าไรนัก เนื่องจากยังคงมีความอ่อนตัวของเลซินไออยู่เมื่อเทียบกับกระจกที่ติดอยู่กับแผ่น solar cell สังเกตและทดสอบได้ง่ายๆ โดยการดูเบาๆ บริเวณด้านที่เราจะทำการแสกนพบและรู้สึกถึงความไม่ราบเรียบระหว่างชิ้นงานที่เป็นกระจกที่ติดกับแผ่น solar cell และเลซินไอ แต่ท้ายสุดแล้วเราก็สามารถนำไปทำการแสกนได้เนื่องจากเราทำการกำหนดพื้นที่เป็นบริเวณเล็กๆ และใกล้บริเวณรอยต่อมากที่สุด จึงได้ผลของ sample เป็นจาก แผ่น solar cell ดังรูปที่ 4.10 ในสภาวะปกติ และรูปที่ 4.11 ในสภาวะที่กระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งในสภาวะที่กระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์จะพบว่าเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์แล้ว surface potential ระหว่างด้านทั้งสองมีการลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4

5.2.2 ใช้ sample เป็น แผ่นซิลิกอนที่ทำการ โด๊ปด้วยสารเจือ ปรากฏว่าสามารถทำได้ง่ายกว่าคือ แผ่นซิลิกอนที่ทำการ โด๊ปด้วยสารเจือและเลซินไอมีความอ่อนไม่แตกต่างกันมากนัก การขัดจึงไม่พบปัญหาดังเช่นการใช้แผ่น solar cell ดังนั้นเมื่อหล่อเลซินไอแล้วนำมาขัดตามกรรมวิธีปกติ ทำการแสกนบริเวณ junction เพื่อดูค่าความแตกต่างของ surface potential โดยการไม่ใช้แสงเลเซอร์กระตุ้น ดังรูปที่ 4.12 และการใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นดังรูปที่ 4.13 จะพบว่าเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์แล้ว surface potential ที่เกิดขึ้นที่บริเวณ junction ระหว่างด้านพีและด้านเอ็นมีความสูงเพิ่มมากขึ้น จากในสภาวะปกติ ซึ่งผิดไปจากความคาดหมายทางทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ดังนั้นในกรณีนี้ยังควรต้องมีการศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

สมเกียรติ สุภเดช. เขมิกอนดักเตอร์ ดีไวซ์.ฉบับพิมพ์13, มีนาคม 2549

จิรวัดน์ สุระเดโช และคณะ.สารกึ่งตัวนำและวงจร (ภาคปฏิบัติ) .ปีพิมพ์ , 1 / 2540

<http://www.bloggang.com/viewblog.php?id=zol&group=24&page=2>

[http://web.ku.ac.th/schoolnet//snet7/diode\\_6.htm](http://web.ku.ac.th/schoolnet//snet7/diode_6.htm)

<http://www.vcharkarn.com/include/vcafe/showkratoo.php?Pid=60094>

<http://www.chontech.ac.th/~electric/html/pn.htm>

<http://www.chontech.ac.th/~electric/e-learn/unit10/unit10.htm>

<http://www.ee.ku.ac.th/staff/toey/toey3.html>

[http://electronics.se-ed.com/contents/137s088/137s088\\_p03.asp](http://electronics.se-ed.com/contents/137s088/137s088_p03.asp)

[http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/Material1/index\\_solarcell.html](http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/Material1/index_solarcell.html)

<http://sandee.upc.ac.th/sandee/Electronic/4.TRANSISTORS.htm>

[http://www.geocities.com/toyga55/link\\_ele.htm](http://www.geocities.com/toyga55/link_ele.htm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

## 500mw Epitaxial Zener Diode

**COMCHIP**   
 www.comchiptech.com

## 1N5221B thru 1N5267B

Nominal Zener Voltage: 2.4 to 75V

Power Dissipation: 0.5W

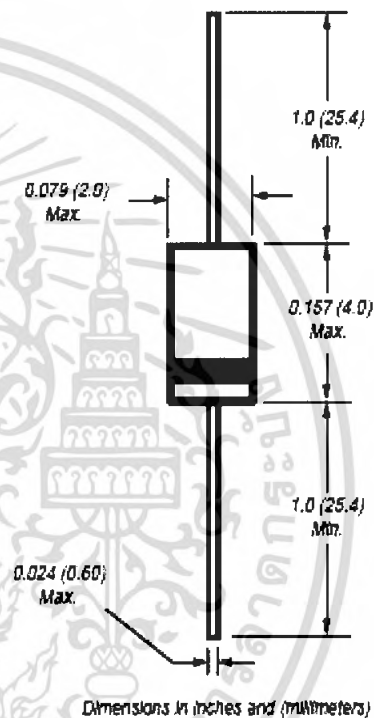
## Features

- 500mW Power Dissipation
- 2.4V - 75V Nominal Zener Voltage
- Low Noise
- Surface Mount Equivalents Available
- Hermetic Package
- VZ - Tolerance 5%

## Mechanical Data

- Case: DO-35, Glass
- Terminals: Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Approx. Weight: 0.13 grams

DO-35 Glass


**Maximum Ratings and Electrical Characteristics** @  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation (Note 1)	$P_d$	500	mW
Thermal Resistance, Junction to Ambient Air (Note 1)	$R_{\theta JA}$	300	$^\circ\text{C/W}$
Forward Voltage @ $I_F = 200\text{mA}$	$V_F$	1.1	V
Operating and Storage Temperature Range	$T_J, T_{STG}$	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

Notes: 1. Valid provided that leads are kept at  $T_L \leq 75^\circ\text{C}$  with lead length = 9.5mm (3/8") from case; derate above  $75^\circ\text{C}$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



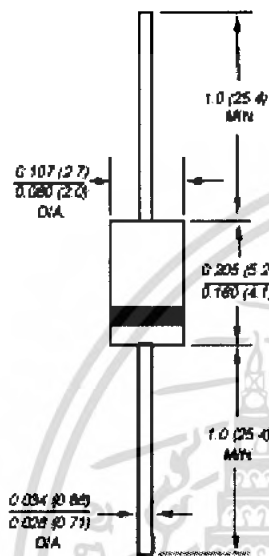
## UF4001 thru UF4007

Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

### Ultrafast Plastic Rectifier

Reverse Voltage 50 to 1000V  
Forward Current 1.0A

DO-204AL (DO-41)



#### Features

- Plastic package has Underwriters Laboratories Flammability Classification 94V-0
- Ideally suited for use in very high frequency switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes
- Ultrafast recovery time for high efficiency
- Excellent high temperature switching
- Soft recovery characteristics
- Glass passivated junction
- High temperature soldering guaranteed:  
250°C/10 seconds, 0.375" (9.5mm) lead length,  
5 lbs. (2.3kg) tension

#### Mechanical Data

Case: JEDEC DO-204AL molded plastic body over passivated chip  
 Terminals: Axial leads, solderable per MIL-STD-750, Method 2026  
 Polarity: Color band denotes cathode end  
 Mounting Position: Any  
 Weight: 0.012 ounce, 0.34 gram

### Maximum Ratings & Thermal Characteristics Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

	Symbol	UF 4001	UF 4002	UF 4003	UF 4004	UF 4005	UF 4006	UF 4007	Units
Maximum repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	600	600	1000	V
Maximum RMS voltage	$V_{RMS}$	35	70	140	290	420	560	790	V
Maximum DC blocking voltage	$V_{DC}$	50	100	200	400	600	600	1000	V
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5mm) lead length at $T_A=55^\circ\text{C}$	$I_{FAV}$	1.0							A
Peak forward surge current 6.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	$I_{FSM}$	30							A
Typical thermal resistance <sup>(1)</sup>	$R_{\theta JA}$ $R_{\theta JL}$	60 15							$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating junction and storage temperature range	$T_J, T_{STG}$	-55 to +150 $^\circ\text{C}$							$^\circ\text{C}$

### Electrical Characteristics Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

	Symbol	UF 4001	UF 4002	UF 4003	UF 4004	UF 4005	UF 4006	UF 4007	Units
Maximum instantaneous forward voltage at 1.0A <sup>(2)</sup>	$V_f$	1.0				1.7			V
Maximum DC reverse current $T_A=25^\circ\text{C}$ $T_A=100^\circ\text{C}$	$I_R$	10 50							$\mu\text{A}$
Maximum reverse recovery time $I_R=0.5\text{A}, I_F=1.0\text{A}, I_{RR}=0.25\text{A}$	$t_r$	50				75			ns
Typical junction capacitance at 4.0V, 1MHz	$C_J$	17							pF

#### Notes:

- (1) Thermal resistance from junction to ambient at 0.375" (9.5mm) lead length  
 (2) Pulse test, 300 $\mu\text{s}$  pulse width, 1% duty cycle



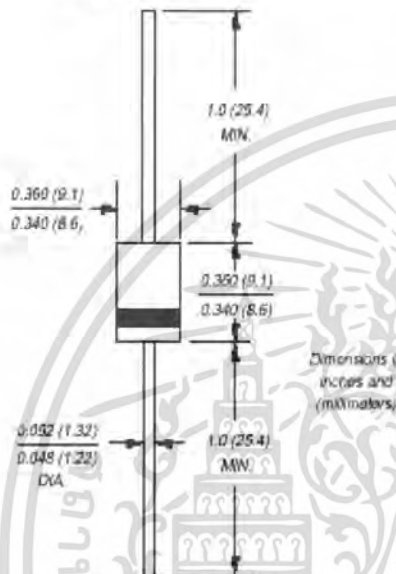
## P600A thru P600M

Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

### General Purpose Plastic Rectifier

Reverse Voltage 50 to 1000V  
Forward Current 6.0A

Case Style P600



#### Features

- Plastic package has Underwriters Laboratories Flammability Classification 94V-0
- High forward current capability
- Construction utilizes void-free molded plastic technique
- High surge current capability

#### Mechanical Data

Case: Void-free molded plastic body

Terminals: Plated axial leads, solderable per MIL-STD-750, Method 2026

High temperature soldering guaranteed: 250°C/10 seconds, 0.375" (9.5mm) lead length, 5 lbs. (2.3kg) tension

Polarity: Color band denotes cathode end

Mounting Position: Any

Weight: 0.07 oz., 2.1 g

#### Maximum Ratings & Thermal Characteristics Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified

Parameter	Symbol	P600A	P600B	P600D	P600G	P600J	P600K	P600M	Unit
Maximum repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	$V_{RMS}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	$V_{DC}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified current at $T_A=60^\circ\text{C}$ , 0.375" (9.5mm) lead length (Fig. 1) $T_L=60^\circ\text{C}$ , 0.125" (3.18mm) lead length (Fig. 2)	$I_{F(AV)}$				6.0				A
Peak forward surge current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	$I_{FSM}$				400				A
Typical thermal resistance <sup>(1)</sup>	$R_{\theta JA}$ $R_{\theta JL}$				20				$^\circ\text{C/W}$
Operating junction and storage temperature range	$T_J, T_{STG}$				-50 to +150				$^\circ\text{C}$

#### Electrical Characteristics Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified

Maximum instantaneous forward voltage at: 6.0A 100A	$V_F$				0.90 1.30			1.0 1.4	V
Maximum DC reverse current at rated DC blocking voltage $T_A=25^\circ\text{C}$ $T_A=100^\circ\text{C}$	$I_R$				5.0 1.0				$\mu\text{A}$ mA
Typical reverse recovery time at $I_F=0.5\text{A}$ , $I_R=1.0\text{A}$ , $I_T=0.25\text{A}$	$t_{rr}$				2.5				$\mu\text{s}$
Typical junction capacitance at 4.0V, 1MHz	$C_J$				150				pF

Note: <sup>(1)</sup> Thermal resistance from junction to ambient and from junction to lead at 0.375" (9.5mm) lead length.

P.C.B. mounted with 1.1" x 1.1" (28 x 28mm) copper pads

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยบริษัท Vishay Semiconductors เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในกรณีใดๆ บริษัท Vishay Semiconductors ขอสงวนสิทธิ์ในข้อกำหนดนี้ให้สามารถเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง [www.vishay.com](http://www.vishay.com)

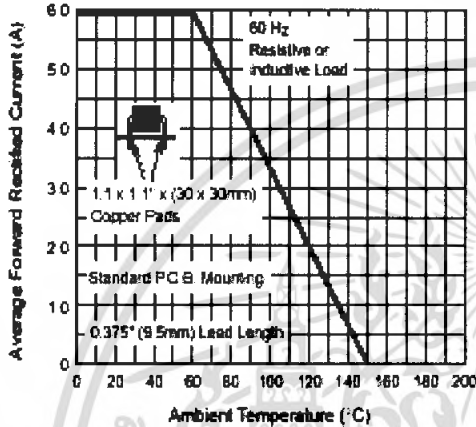
# P600A thru P600M



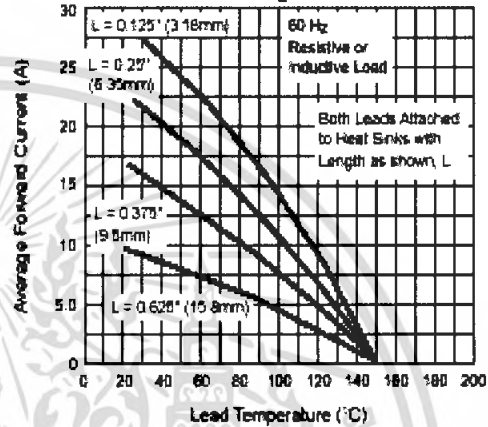
Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

## Ratings and Characteristic Curves (T<sub>A</sub> = 25 °C unless otherwise noted)

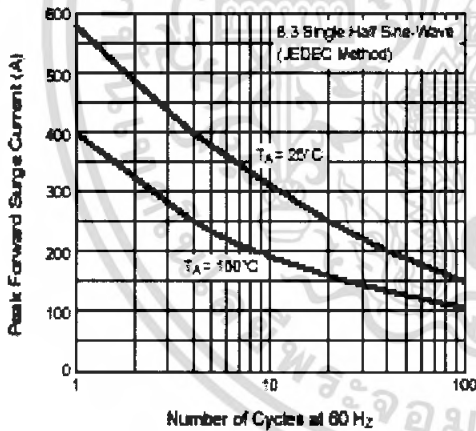
**Fig. 1 — Maximum Forward Current Derating Current**



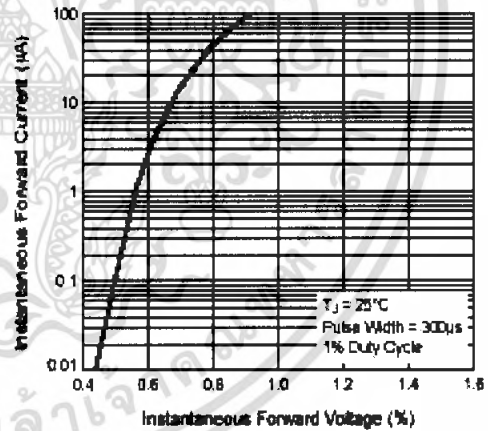
**Fig. 2 — Maximum Forward Current Derating Curve**



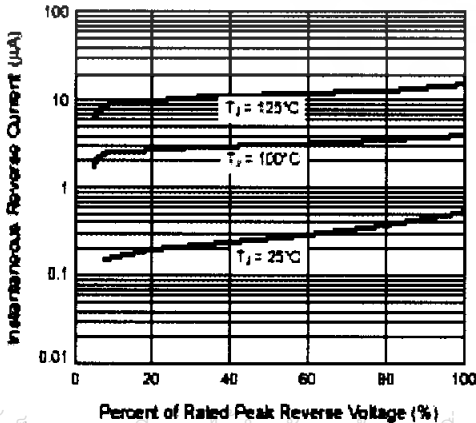
**Fig. 3 — Typical Instantaneous Forward Characteristics**



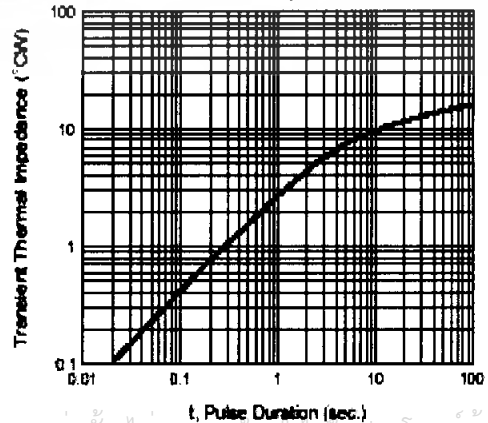
**Fig. 4 — Typical Instantaneous Forward Characteristics**



**Fig. 5 — Typical Reverse Characteristics**



**Fig. 6 — Typical Transient Thermal Impedance**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## Zeners 1N5221B - 1N5279B

Zeners 1N5221B - 1N5279B

### Absolute Maximum Ratings \* T<sub>K</sub> = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
P <sub>D</sub>	Power Dissipation	500	mW
	Derate above 50°C	4.0	mW/°C
T <sub>STG</sub>	Storage Temperature Range	-65 to +200	°C
T <sub>J</sub>	Maximum Junction Operating Temperature	+200	°C
	Lead Temperature (1/16" from case for 10-seconds)	+230	°C

Tolerance = 5%



\* These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.  
\*\* Non-recurrent square wave PW = 8.3ms, Ta = 50 degrees C.

### Electrical Characteristics T<sub>A</sub> = 25°C unless otherwise noted

Device	V <sub>Z</sub> (V) @ I <sub>Z</sub> (Note 1)			Z <sub>Z</sub> (Ω) @ I <sub>Z</sub> (mA)		Z <sub>ZK</sub> (Ω) @ I <sub>ZK</sub> (mA)		I <sub>R</sub> (μA) @ V <sub>R</sub> (V)		T <sub>C</sub> (%/°C)
	Min.	Typ.	Max.							
1N5221B	2.28	2.4	2.52	30	20	1.200	0.25	100	1.0	-0.085
1N5222B	2.375	2.5	2.625	30	20	1.250	0.25	100	1.0	-0.085
1N5223B	2.565	2.7	2.835	30	20	1.300	0.25	75	1.0	-0.080
1N5224B	2.66	2.8	2.94	30	20	1.400	0.25	75	1.0	-0.080
1N5225B	2.85	3	3.15	29	20	1.600	0.25	50	1.0	-0.075
1N5226B	3.135	3.3	3.465	28	20	1.600	0.25	25	1.0	-0.07
1N5227B	3.42	3.6	3.78	24	20	1.700	0.25	15	1.0	-0.065
1N5228B	3.705	3.9	4.095	23	20	1.900	0.25	10	1.0	-0.06
1N5229B	4.085	4.3	4.515	22	20	2.000	0.25	5.0	1.0	+/-0.055
1N5230B	4.465	4.7	4.935	19	20	1.900	0.25	2.0	1.0	+/-0.03
1N5231B	4.845	5.1	5.355	17	20	1.600	0.25	5.0	2.0	+/-0.03
1N5232B	5.32	5.6	5.88	11	20	1.600	0.25	5.0	3.0	0.038
1N5233B	5.7	6	6.3	7.0	20	1.600	0.25	5.0	3.5	0.038
1N5234B	5.89	6.2	6.51	7.0	20	1.000	0.25	5.0	4.0	0.045
1N5235B	6.46	6.8	7.14	5.0	20	750	0.25	3.0	5.0	0.05
1N5236B	7.125	7.5	7.875	6.0	20	500	0.25	3.0	6.0	0.058
1N5237B	7.79	8.2	8.61	8.0	20	500	0.25	3.0	6.5	0.062
1N5238B	8.265	8.7	9.135	8.0	20	600	0.25	3.0	6.5	0.065
1N5239B	8.645	9.1	9.555	10	20	600	0.25	3.0	7.0	0.068
1N5240B	9.5	10	10.5	17	20	600	0.25	3.0	8.0	0.075
1N5241B	10.45	11	11.55	22	20	600	0.25	2.0	8.4	0.076
1N5242B	11.4	12	12.6	30	20	600	0.25	0.1	9.1	0.077
1N5243B	12.35	13	13.65	13	9.5	600	0.25	0.1	9.9	0.079
1N5244B	13.3	14	14.7	15	9.0	600	0.25	0.1	10	0.080
1N5245B	14.25	15	15.75	16	8.5	600	0.25	0.1	11	0.082
1N5246B	15.2	16	16.8	17	7.8	600	0.25	0.1	12	0.083
1N5247B	16.15	17	17.85	19	7.4	600	0.25	0.1	13	0.084
1N5248B	17.1	18	18.9	21	7.0	600	0.25	0.1	14	0.085
1N5247B	18.05	19	19.95	23	6.6	600	0.25	0.1	14	0.085
1N5250B	19	20	21	25	6.2	600	0.25	0.1	15	0.086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่สินค้าหรือที่ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

**Electrical Characteristics** (Continued)  $T_A=25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted

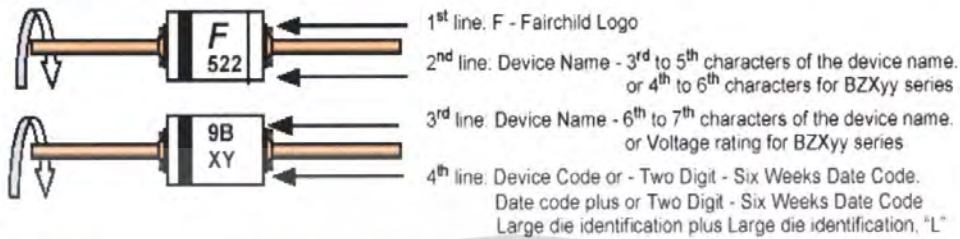
Device	$V_Z$ (V) @ $I_Z$ (Note 1)			$Z_Z$ ( $\Omega$ ) @ $I_Z$ (mA)		$Z_{ZK}$ ( $\Omega$ ) @ $I_{ZK}$ (mA)		$I_R$ ( $\mu\text{A}$ ) @ $V_R$ (V)		$T_C$ (%/°C)
	Min.	Typ.	Max.							
1N5251B	20.9	22	23.1	29	5.6	600	0.25	0.1	17	0.087
1N5252B	22.8	24	25.2	33	5.2	600	0.25	0.1	18	0.088
1N5253B	23.75	25	26.25	35	5.0	600	0.25	0.1	19	0.088
1N5254B	25.65	27	28.35	41	4.6	600	0.25	0.1	21	0.089
1N5255B	26.6	28	29.4	44	4.5	600	0.25	0.1	21	0.090
1N5256B	28.5	30	31.5	49	4.2	600	0.25	0.1	23	0.09
1N5257B	31.35	33	34.65	58	3.8	700	0.25	0.1	25	0.092
1N5258B	34.2	36	37.8	70	3.4	700	0.25	0.1	27	0.093
1N5259B	37.05	39	40.95	80	3.2	800	0.25	0.1	30	0.094
1N5260B	40.85	43	45.15	93	3.0	900	0.25	0.1	33	0.095
1N5261B	44.65	47	49.35	105	2.7	1000	0.25	0.1	36	0.095
1N5262B	48.45	51	53.55	125	2.5	1100	0.25	0.1	39	0.096
1N5263B	53.2	56	58.8	150	2.2	1300	0.25	0.1	43	0.096
1N5264B	57	60	63	170	2.1	1400	0.25	0.1	46	0.097
1N5265B	58.9	62	65.1	185	2.0	1400	0.25	0.1	47	0.097
1N5266B	64.6	68	71.4	230	1.8	1600	0.25	0.1	52	0.097
1N5267B	71.25	75	78.75	270	1.7	1700	0.25	0.1	56	0.098
1N5268B	80.75	85	89.25	330	1.5	2000	0.25	0.1	62	0.098
1N5269B	82.65	87	91.35	370	1.4	2200	0.25	0.1	68	0.099
1N5270B	96.45	91	95.55	400	1.4	2300	0.25	0.1	69	0.099
1N5271B	95	100	105	500	1.3	2600	0.25	0.1	76	0.099
1N5272B	104.5	110	115.5	750	1.1	3000	0.25	0.1	84	0.11
1N5273B	114	120	126	900	1.0	4000	0.25	0.1	91	0.11
1N5274B	123.5	130	136.5	1100	0.95	4500	0.25	0.1	99	0.11
1N5275B	133	140	147	1300	0.90	4500	0.25	0.1	106	0.11
1N5276B	142.5	150	157.5	1500	0.85	5000	0.25	0.1	114	0.11
1N5277B	152	160	168	1700	0.80	5500	0.25	0.1	122	0.11
1N5278B	161.5	170	178.5	1900	0.74	5500	0.25	0.1	129	0.11
1N5279B	171	180	189	2200	0.68	6000	0.25	0.1	137	0.11

 $V_F$  Forward Voltage = 1.2V Max. @  $I_F = 200\text{mA}$ 

## Notes:

1. Zener Voltage ( $V_Z$ )The zener voltage is measured with the device junction in the thermal equilibrium at the lead temperature ( $T_L$ ) at  $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  and 3/8" lead length.

Top Mark Information				
Device	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4
1N5221B	LOGO	522	1B	XY
1N5222B	LOGO	522	2B	XY
1N5223B	LOGO	522	3B	XY
1N5224B	LOGO	522	4B	XY
1N5225B	LOGO	522	5B	XY
1N5226B	LOGO	522	6B	XY
1N5227B	LOGO	522	7B	XY
1N5228B	LOGO	522	8B	XY
1N5229B	LOGO	522	9B	XY
1N5230B	LOGO	523	0B	XY
1N5231B	LOGO	523	1B	XY
1N5232B	LOGO	523	2B	XY
1N5233B	LOGO	523	3B	XY
1N5234B	LOGO	523	4B	XY
1N5235B	LOGO	523	5B	XY
1N5236B	LOGO	523	6B	XY
1N5237B	LOGO	523	7B	XY
1N5238B	LOGO	523	8B	XY
1N5239B	LOGO	523	9B	XY
1N5240B	LOGO	524	0B	XY
1N5241B	LOGO	524	1B	XY
1N5242B	LOGO	524	2B	XY
1N5243B	LOGO	524	3B	XY
1N5244B	LOGO	524	4B	XY
1N5245B	LOGO	524	5B	XY
1N5246B	LOGO	524	6B	XY
1N5247B	LOGO	524	7B	XY
1N5248B	LOGO	524	8B	XY
1N5247B	LOGO	524	9B	XY
1N5250B	LOGO	525	0B	XY
1N5251B	LOGO	525	1B	XY
1N5252B	LOGO	525	2B	XY
1N5253B	LOGO	525	3B	XY
1N5254B	LOGO	525	4B	XY
1N5255B	LOGO	525	5B	XY
1N5256B	LOGO	525	6B	XY
1N5257B	LOGO	525	7B	XY
1N5258B	LOGO	525	8B	XY
1N5259B	LOGO	525	9B	XY
1N5260B	LOGO	526	0B	XY
1N5261B	LOGO	526	1B	XY
1N5262B	LOGO	526	2B	XY
1N5263B	LOGO	526	3B	XY
1N5264B	LOGO	526	4B	XY
1N5265B	LOGO	526	5B	XY
1N5266B	LOGO	526	6B	XY
1N5267B	LOGO	526	7B	XY
1N5268B	LOGO	526	8B	XY
1N5269B	LOGO	526	9B	XY
1N5270B	LOGO	526	0B	XY
1N5271B	LOGO	527	1B	XY
1N5272B	LOGO	527	2B	XY
1N5273B	LOGO	527	3B	XY
1N5274B	LOGO	527	4B	XY
1N5275B	LOGO	527	5B	XY
1N5276B	LOGO	527	6B	XY
1N5277B	LOGO	527	7B	XY
1N5278B	LOGO	527	8B	XY
1N5279B	LOGO	527	9B	XY

**Top Mark Information** (Continued)**General Requirements:**

- 1.0 Cathod Band
- 2.0 First Line: F - Fairchild Logo
- 3.0 Second Line: Device name - For 1Nxx series, 3<sup>rd</sup> to 5<sup>th</sup> characters of the device name.  
For BZxx series, 4<sup>th</sup> to 6<sup>th</sup> characters of the device name.
- 4.0 Third Line: Device name - For 1Nxx series, 6<sup>th</sup> to 7<sup>th</sup> characters of the device name.  
For BZXyy series, Voltage rating
- 5.0 Fourth Line: XY or XYL - Two Digit - Six Weeks Date Code  
Where: X represents the last digit of the calendar year  
Y represents the Six weeks numeric code  
L represents the Large die identification
- 6.0 Devices shall be marked as required in the device specification (PID or FSC Test Spec).
- 7.0 Maximum no. of marking lines: 4
- 8.0 Maximum no. of digits per line: 3
- 9.0 FSC logo must be 20 % taller than the alphanumeric marking and should occupy the 2 characters of the specified line.
- 10.0 Marking Font: Arial (Except FSC Logo)
- 11.0 First character of each marking line must be aligned vertically

## TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

ACEx™	FAST <sup>®</sup>	ISOPLANAR™	Power247™	Stealth™
ActiveArray™	FASTR™	LittleFET™	POWEREDGE™	SuperFET™
Bottomless™	FPS™	MICROCOUPLER™	PowerSaver™	SuperSOT™-3
CoolFET™	FRFET™	MicroFET™	PowerTrench <sup>®</sup>	SuperSOT™-6
CROSSVOLT™	GlobalOptoisolator™	MicroPak™	QFET <sup>®</sup>	SuperSOT™-8
DOME™	GTO™	MICROWIRE™	QS™	SyncFET™
EcoSPARK™	HiSeC™	MSX™	QT Optoelectronics™	TinyLogic <sup>®</sup>
E <sup>2</sup> CMOS™	PC™	MSXPro™	Quiet Series™	TINYOPTO™
EnSigna™	i-Lo™	OCX™	RapidConfigure™	TruTranslation™
FACT™	ImpliedDisconnect™	OCXPro™	RapidConnect™	UHC™
FACT Quiet Series™		OPTOLOGIC™	μSerDes™	UltraFET <sup>®</sup>
Across the board. Around the world.™		OPTOPLANAR™	SILENT SWITCHER <sup>®</sup>	VCX™
The Power Franchise <sup>®</sup>		PACMAN™	SMART START™	
Programmable Active Droop™		POP™	SPM™	

## DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

## LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

## PRODUCT STATUS DEFINITIONS

### Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative or In Design	This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
No Identification Needed	Full Production	This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design.
Obsolete	Not In Production	This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่รับประกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้