

การศึกษาคณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร

STUDIED ON CHARACTERISTICS OF MIS DIODE FROM  
SEMICONDUCTING DIAMOND



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-059-6

การศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร

STUDIED ON CHARACTERISTICS OF MIS DIODE FROM SEMICONDUCTING DIAMOND



ภาณุพันธ์ โอพารกิจไพบูลย์  
PANUPHAN ORANKIJPAIBOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-059-6

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 39738  
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ย. 2544



ฉบับนี้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปขาย  
หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDIED ON CHARACTERISTICS OF MIS DIODE FROM  
SEMICONDUCTING DIAMOND**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2001**

**ISBN 974-648-059-6**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษาคุณสมบัติของไดโอดชนิด MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร  
STUDIED ON CHARACTERISTICS OF MIS DIODE FROM  
SEMICONDUCTING DIAMOND


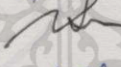
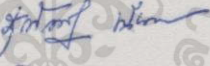
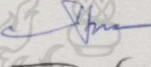
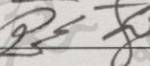
ชื่อนักศึกษา            นายภาณุพันธ์ โอฬารกิจไพบูลย์

รหัสประจำตัว            39061044

ปริญญา                    วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์      รศ.ดร.วิสุทธิ รุติรุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวกาศ	
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
อาจารย์สุรศักดิ์	นิยมเจริญ	
ผศ.ดร.ตะวัน	สุน้อย	
รศ.ดร.วิสุทธิ	รุติรุ่งเรือง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 4 มกราคม 2544 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

  
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัคร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....13.....เดือน.....พ.ศ.....2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร
นักศึกษา	นายภาณุพันธ์ โอพารกิจไพบูลย์
รหัสนักศึกษา	39061044
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS โดยพิจารณาถึงผลของความหนาฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก  $1\ \mu\text{m}$ ,  $2\ \mu\text{m}$ ,  $3\ \mu\text{m}$  และ  $4\ \mu\text{m}$  และผลของอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอนที่เจือให้กับฟิล์มเพชรชนิดพี 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm และการทำงานของไดโอดในที่มีอุณหภูมิสูงตั้งแต่อุณหภูมิห้อง,  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $150^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$  และ  $250^{\circ}\text{C}$  ซึ่งพบว่า ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกสามารถลดปริมาณกระแสรั่วย้อนกลับได้อย่างชัดเจนเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้น และมีแรงดันพังทลายสูงขึ้นด้วย ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้กระแสรั่วย้อนกลับเพิ่มขึ้นน้อยมาก ในทางตรงกันข้ามกลับทำให้มีปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และจากการทดลองพบว่า ไดโอดโครงสร้าง MIS มีอัตราการกรองกระแสสูงถึงประมาณ  $10^4$  เท่าขณะเปรียบเทียบกับเมื่อไบอัสทั้งสองทิศทางขนาด 10 V และสามารถพิสูจน์ได้ว่า มีกลไกการไหลของกระแสไปข้างหน้าอยู่ 2 ลักษณะ นั่นคือลักษณะการไหลของกระแสก่อนการนำไฟฟ้าแบบ Frenkel-Poole emission และลักษณะการไหลของกระแสช่วงนำไฟฟ้าแบบ Schottky emission นอกจากนั้นไดโอดโครงสร้าง MIS สร้างจากฟิล์มเพชรที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. นี้มีเสถียรภาพในการทำงานได้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง  $250^{\circ}\text{C}$

<b>Thesis Title</b>	Studied on Characteristics of MIS Diode from Semiconducting Diamond
<b>Student</b>	Mr.Panuphan Orankijpaiboon
<b>Student ID</b>	39061044
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2001
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

### ABSTRACT

In this thesis, the characteristics of Metal / Intrinsic / Semiconductor (MIS) diode from semiconducting diamond was studied. Thickness of intrinsic layer (1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  and 4  $\mu\text{m}$ ), Boron/Carbon (B/C) concentration ratio of p-type layer (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm and 1000 ppm) and temperature of operation (27°C, 100°C, 150°C, 200°C and 250°C) were studied. The investigation demonstrated that reverse leakage current was decreased effectively only when the intrinsic thickness was increased, resulting the higher breakdown voltage. In contrast, forward current flowed increasingly only when B/C ratio was increased, resulting the better current rectification ratio, approximately  $10^4$  times, at  $\pm 10$  V biasing consideration. The mechanism of the forward current was derived from Frenkel-Poole emission step for electrical pre-conduction and Schottky emission step for electrical post-conduction. Furthermore, MIS diode from semiconducting diamond that fabricated at ERC, KMITL, could operate stably at relatively higher temperature, not exceeding to 250°C.

## กิตติกรรมประกาศ

ทั้งในส่วนของงานวิจัยและส่วนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ที่ให้แนวความคิด คำปรึกษา การแก้ไขปัญหาและสนับสนุนมาด้วยอย่างดีตลอด ขอขอบพระคุณ Prof.Dr.Masamori Iida จาก Tokai University สำหรับคำแนะนำทางวิชาการที่เป็นประโยชน์อย่างมาก ขอขอบพระคุณ Assoc.Prof.Yoichi Yasumura ที่ช่วยให้คำปรึกษาอย่างดี ขอขอบพระคุณ อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวิพล สิทธิชีวกาศ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเดช และ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย สำหรับคำแนะนำและความรู้เพิ่มเติมต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาในระดับบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้มาด้วยดี ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ (พี่หนู) พี่ภควัต ทรายสุวรรณ พี่กอบศักดิ์ ศรีประภา น้อง ๆ ห้องวิจัยสารนำไฟฟ้ายิ่งยวด อู๋ - จุก - พี่ดา บัณฑิตศึกษา และเพื่อน ๆ อีกมากมายที่ให้คำแนะนำและกำลังใจที่มีค่าอย่างมากมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณไพรัช วิทยาขจรศาสตร์ จากบริษัท NS Electronics ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Raman Spectroscope และ X-Ray Diffractometer

ท้ายที่สำคัญที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในทุก ๆ สิ่งที คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ ๆ ทั้ง 4 สนับสนุนและมอบให้อย่างมีคุณค่าด้วยดีมาตลอดเวลา...

ภาณุพันธ์ โอพารกิจไพบูลย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	XI
ศัพท์เทคนิค.....	XIII
คำนำ.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพชร.....	1
1.1.1 ลักษณะ โครงสร้างของเพชร.....	1
1.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร.....	2
1.2 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	2
1.2.1 ในระบบต้องมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ.....	3
1.2.2 ในระบบต้องกระตุ้นก๊าซอนุภาคคาร์บอน.....	3
1.2.3 ในระบบต้องมีอุณหภูมิของฐานรองเหมาะสม.....	4
1.2.4 ในระบบต้องมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง.....	4
1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเพชร.....	5
1.3.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy.....	5
1.3.2 การวิเคราะห์ด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	7
1.3.3 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM).....	7
1.4 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร.....	9
1.4.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มิก.....	9
1.4.2 รอยสัมผัสแบบชอตต์กี.....	9

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	11
2.1 ขอตค้ทีที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	11
2.2 ไดโอดโครงสร้าง MIS.....	14
2.2.1 ภาวะสมดุลย์ทางความร้อน.....	14
2.2.2 ภาวะไ้รับการไบอัสจากภายนอก.....	16
2.2.2.1 ภาวะการให้ไบอัสไปข้างหน้า.....	16
2.2.2.2 ภาวะการให้ไบอัสย้อนกลับ.....	17
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	26
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....	26
3.1.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอน.....	26
3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร.....	26
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	28
3.3 กระบวนการกำจั้ดชั้นฐานรองซิลิกอน.....	30
3.4 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร.....	30
3.4.1 การสร้างรอยสัมผัสแบบ โอห์มิก.....	30
3.4.1.1 การสร้างรอยสัมผัสแบบ โอห์มิกด้วยโลหะทองคำ.....	30
3.4.1.2 การสร้างรอยสัมผัสแบบ โอห์มิกด้วยโลหะเงิน.....	32
3.4.2 การสร้างรอยสัมผัสแบบขอตค้ที.....	32
3.5 กระบวนการสร้างขอตค้ทีไดโอดจากฟิล์มเพชร.....	32
3.6 กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขต่าง ๆ.....	34
3.6.1 ศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค.....	34
3.6.2 ศึกษาผลของอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี.....	38
3.6.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS.....	39
3.6.4 ศึกษาค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และVของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	40
4.2 ผลการตรวจสอบขอตัก์ไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	42
4.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ได้.....	42
4.2.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอตัก์ไดโอด.....	43
4.3 ผลการตรวจสอบไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	47
4.3.1 ผลความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค.....	47
4.3.2 ผลของความเข้มข้นของโบรอนในฟิล์มเพชรชนิดพี.....	51
4.3.3 ผลการทำงานในอุณหภูมิสูงของไดโอดโครงสร้าง MIS.....	57
4.3.4 ค่าความจุไฟฟ้าขอไดโอดโครงสร้าง MIS สร้างจากฟิล์มเพชร.....	59
4.3.5 การตรวจสอบกระบวนการไหลของกระแสในไดโอดโครงสร้าง MIS.....	61
4.3.5.1 การตรวจสอบการไหลของกระแสแบบ Schottky emission.....	61
4.3.5.2 การตรวจสอบการไหลของกระแสแบบ Frenekl-Poole emission...63	
4.3.5.3 การตรวจสอบการไหลของกระแสแบบ Tunnel emission.....	66
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	71
หนังสืออ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก.....	76
ภาคผนวก ข.....	78
ภาคผนวก ค.....	79
ภาคผนวก ง.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	82

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าระหว่างเพชร ซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนด์.....	2
1.2 เปรียบเทียบความหนาแน่นการนิวเคลียชันของเพชร และข้อดีข้อเสียการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยวิธีต่าง ๆ.....	4
2.1 กระบวนการนำกระแสผ่านชั้นฉนวนพื้นฐานในไดโอดโครงสร้าง MIS.....	17
3.1 เงื่อนไขความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2 เงื่อนไขอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีที่ใช้ในการทดลอง.....	39
4.1 ค่าตัวแปรพื้นฐานต่าง ๆ ของฟิล์มเพชรชนิดพีจากการทดลอง.....	43
4.2 ค่ากระแสอิ่มตัวของความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสเมื่อมีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ.....	46
4.3 ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ทำให้ไดโอดเงื่อนไขต่าง ๆ มีกระแสรั่วเกิดขึ้น 0.2 $\mu\text{A}$ .....	50
4.4 ค่าแรงดันไบอัสไปข้างหน้าที่ทำให้ไดโอดเงื่อนไขต่าง ๆ มีกระแสไหล 0.2 $\mu\text{A}$ .....	51
4.5 ปริมาณกระแสไหลของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่มีชั้นอินทรินซิกหนา 3 $\mu\text{m}$ เมื่อพิจารณาการให้ไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับขนาด 3 V.....	54
4.6 ตัวอย่างการหาค่า $\eta_2$ สำหรับการไหลแบบ Frenkel-Poole จากการทดลอง.....	66
ข-1 ขอดความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สัมพัทธ์จากระนาบของฟิล์มเพชร.....	78
ข-2 แสดงค่า Inter-planar Spacing มาตรฐานของเพชร (ASTM 6-675).....	78

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะโครงสร้างของผลึก.....	1
1.2 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	3
1.3 ลักษณะสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติ และเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบชดลวดความร้อน.....	6
1.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระนาบของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	7
1.5 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วย วิธี CVD แบบความร้อน.....	8
1.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบ โอห์มระหว่าง โลหะกับฟิล์มเพชร.....	9
1.7 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบชอตต์กีระหว่าง โลหะกับฟิล์มเพชร.....	10
2.1 ไดอะแกรมแถบพลังงานของชอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	12
2.2 ลักษณะไดโอดโครงสร้าง MIS.....	14
2.3 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติภาวะสมดุลย์ความร้อน.....	15
2.4 แถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติเมื่อได้รับการไบอัสลบที่ชั้น โลหะ.....	16
2.5 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงปลอดประจุพาหะ.....	18
2.6 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงกลับประจุพาหะ.....	18
2.7 ลักษณะแถบพลังงานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างจนวนกับสารกึ่งตัวนำของไดโอด ในช่วงกลับประจุพาหะ.....	19
2.8 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น space charge เทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิว โดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี $N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิห้อง.....	22
2.9(ก) แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ (ข) การกระจายของประจุพาหะส่วนกลับประจุของไดโอด.....	24
3.1 คริมเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิกอนขนาดเมล็ดผลึก 0.25 ไมครอน.....	27
3.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังจากขัดด้วยคริมเพชร ขนาดเมล็ด 0.25 ไมครอน.....	27
3.3 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD.....	28
3.4 ไดอะแกรมระบบ CVD อย่างง่าย ๆ ที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ.....	31
3.6 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างซอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	33
3.7 ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สร้างทับฟิล์มเพชรชนิดพี.....	36
3.8 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	37
4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD.....	40
4.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD.....	41
4.3 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD.....	41
4.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	42
4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของซอตต์กีไดโอด กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ.....	44
4.6 คุณลักษณะกึ่งลึอกกระแส-แรงดันของซอตต์กีไดโอด กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ.....	45
4.7 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 10 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ.....	48
4.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 50 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ.....	48
4.9 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 100 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ.....	49
4.10 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 500 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ.....	49
4.11 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 1000 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ.....	50
4.12 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 1 $\mu\text{m}$ กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ.....	52
4.13 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 2 $\mu\text{m}$ กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ.....	52
4.14 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 3 $\mu\text{m}$ กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ.....	53
4.15 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 4 $\mu\text{m}$ กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ.....	53
4.16 คุณลักษณะกึ่งลึอกกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 0 $\mu\text{m}$ กรณี B:C ต่าง ๆ.....	55
4.17 คุณลักษณะกึ่งลึอกกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 1 $\mu\text{m}$ กรณี B:C ต่าง ๆ.....	55
4.18 คุณลักษณะกึ่งลึอกกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 2 $\mu\text{m}$ กรณี B:C ต่าง ๆ.....	56
4.19 คุณลักษณะกึ่งลึอกกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 3 $\mu\text{m}$ กรณี B:C ต่าง ๆ.....	56
4.20 คุณลักษณะกึ่งลึอกกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 4 $\mu\text{m}$ กรณี B:C ต่าง ๆ.....	57
4.21 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 1000 ppm และชั้น i หนา 4 $\mu\text{m}$ ขณะทำงานในอุณหภูมิต่าง ๆ.....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 คุณลักษณะกึ่งไดโอดกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 1000 ppm และชั้น i หนา 4 $\mu\text{m}$ ขณะทำงานในอุณหภูมิต่าง ๆ.....	58
4.23 ตัวอย่างค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS มีอัตราส่วน B:C 100 ppm และความหนาของชั้นอินทรีนซิคต่าง ๆ.....	60
4.24 ตัวอย่างค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS มีอัตราส่วน B:C 500 ppm และความหนาของชั้นอินทรีนซิคต่าง ๆ.....	60
4.25 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสแบบ Schottky ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิค 3 $\mu\text{m}$ .....	62
4.26 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสแบบ Schottky ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิค 4 $\mu\text{m}$ .....	62
4.27 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสแบบ Frenkel-Poole ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิค 3 $\mu\text{m}$ .....	64
4.28 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสแบบ Frenkel-Poole ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิค 4 $\mu\text{m}$ .....	65
4.29 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสแบบ Tunnel ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิค 3 $\mu\text{m}$ .....	67
4.30 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสแบบ Tunnel ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิค 4 $\mu\text{m}$ .....	68
4.31 ลักษณะแถบพลังงานของ ไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากเพชร.....	70
ก-1 Raman Spectroscopy รุ่น system 2000 ของบริษัท Renishaw.....	76
ก-2 Single Crystal X-Ray Diffractometer.....	76
ก-3 เครื่อง Scanning Electron Microscope ของ JEOL รุ่น JSM-5410.....	77
ง-1 เครื่อง Vacuum Evaporator.....	81
ง-2 เครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test System).....	81

# สัญลักษณ์

## สัญลักษณ์

## ความหมาย

$E_0$	ระดับพลังงานที่สูญญากาศ
$E_{FAI}$	ระดับพลังงานเฟอร์มิของอลูมิเนียม
$E_{fp}$	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$E_{Cp}$	ระดับพลังงานความนำของสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$E_i$	ระดับพลังงานอินทรินซิก
$E_{vp}$	ระดับพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$E_g$	ช่องว่างแถบพลังงาน
$\phi_{Cd}$	ฟังก์ชันงานของคาร์บอน โครงสร้างเพชร
$\phi_M$	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_B$	ค่าความสูงกำแพงศักย์
$V_{bi}$	ค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน
$\chi_s$	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ
$\chi_c$	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของคาร์บอน โครงสร้างเพชร
$A$	พื้นที่ผิวขั้วสัมผัส
$A \cdot$	ค่าคงที่ Richardson
$m_b$	ค่ามวลยังผลของโฮล
$h$	ค่าคงที่ของ Planck
$k$	ค่าคงที่ของ Boltzmann
$V_A$	แรงดันไบอัสภายนอก
$d$	ความหนาของชั้นอินทรินซิกหรือฉนวน
$W_0$	ความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะ
$\epsilon_i$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นอินทรินซิกหรือฉนวน
$\epsilon_s$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ
$n_{po}$	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$p_{po}$	ความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$N_D^+$	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ที่มีไอออนบวก

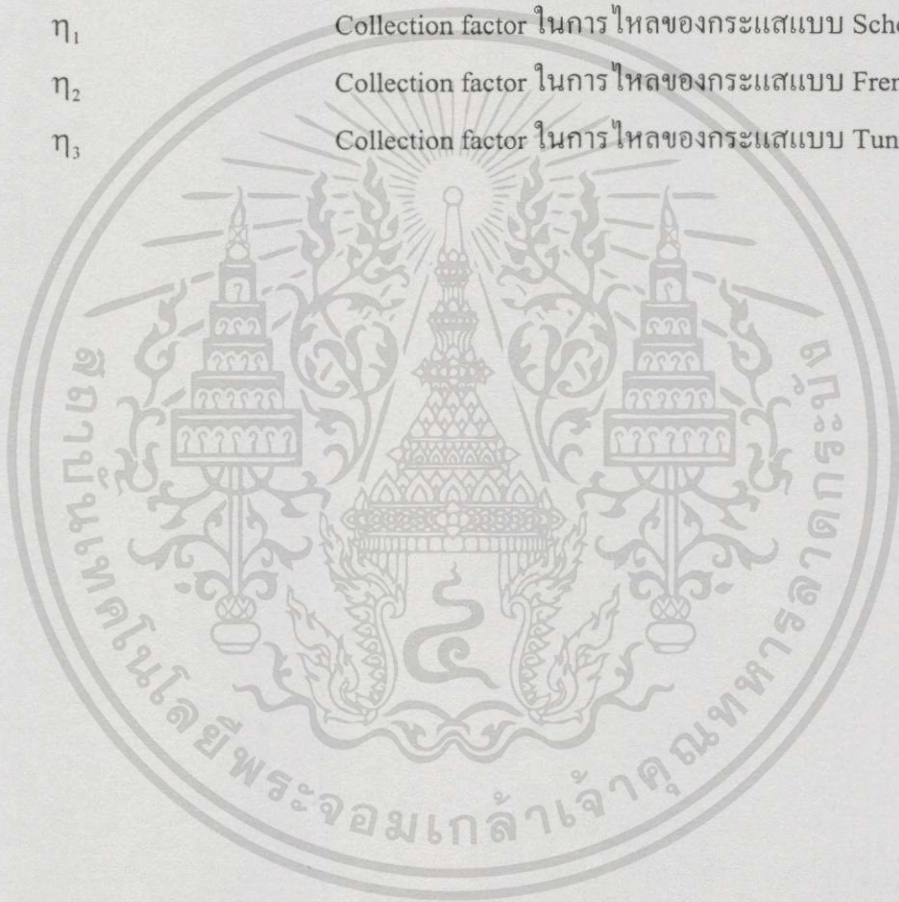
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

### สัญลักษณ์

### ความหมาย

$N_A$	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับที่มีอิออนลบ
$L_D$	Extrinsic Debye Length
$C_i$	ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนหรือชั้นอินทรีนซิค
$C_D$	ค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดประจุพาหะ
$\eta_1$	Collection factor ในการไหลของกระแสแบบ Schottky
$\eta_2$	Collection factor ในการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole
$\eta_3$	Collection factor ในการไหลของกระแสแบบ Tunnel



## ศัพท์เทคนิค

กระตุ้น	Activation
กระแสไปข้างหน้า	Forward Current
กระแสรั่วไหลย้อนกลับ	Leakage Reverse Current
กระแสอิ่มตัว	Saturated Current
กราไฟต์	Graphite
การกัด	Etching
การนิวเคลียส	Nucleation
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	X-ray Diffraction
การสะสมประจุพาหะ	Accumulation of Carrier
กาวเงิน	Silver Paste
ครีมเพชร	Diamond Paste
ความคล่องตัว	Mobility
ความเร็วครีฟท์	Drift Velocity
ความสูงของกำแพงศักย์	Barrier Height
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric Constant
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice Constant
ค่าความจุไฟฟ้า	Capacitance
เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ	Vacuum Evaporator
ฉนวน	Insulator
ชอตต์กีไดโอด	Schottky Diode
ฐานรอง	Substrate
ตัวเก็บประจุ	Capacitor
ไตรคลอโรเอทิลีน	Trichloroethylene
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden Energy Band
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized Water
บริเวณปลอดประจุพาหะ	Depletion Region
ไบอัสตรง	Forward Bias

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ไบอัสย้อนกลับ	Reverse Bias
พลังงานกระตุ้น	Activation Energy
พิกัดความต้านทานทางไฟฟ้า	Resistivity
เพชร โครงผลึกเชิงซ้อน	Polycrystalline Diamond
เพชร โครงผลึกเดี่ยว	Single-crystal Diamond
ฟังก์ชันงาน	Work Function
ฟิล์มเพชรชนิดพี	p-type Diamond
ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก	Intrinsic Diamond
ภาวะสมดุลย์ความร้อน	Thermal Equilibrium
ยูนิตเซลล์	Unit Cell
รอยสัมผัสแบบชอตต์คิก	Schottky Contact
รอยสัมผัสแบบโอห์มิก	Ohmic Contact
ระดับพลังงานแบนราบ	Flat-band Energy
แลตทิซ	Lattice
ศักย์ไฟฟ้าภายใน	Built-in Voltage
สถานะพื้นผิว	Surface State
ส่วนกลับประจุพาหะ	Inversion of Carrier
ไส้ทั้งสแตน	Tungsten Wire
อัตราการนิวเคลียเอชัน	Nucleation Rate
อัตราขยายการไหลของกระแส	Current Rectification Ratio
อิเล็กตรอน	Electron
อิเล็กตรอนอันดับที่สอง	Secondary Electron
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	Electronic Devices
อัลตราโซนิค	Ultrasonic
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethyl-alcohol
โฮล	Hole
ไฮโดรคาร์บอน	Hydrocarbon

## คำนำ

ในทุกวันนี้เมื่อกล่าวถึงเพชรหรือสารกึ่งตัวนำเพชร ย่อมเป็นที่รู้จักกันดีในเรื่องของคุณสมบัติที่โดดเด่นทั้งทางกายภาพและทางไฟฟ้า และยังสามารถสังเคราะห์เพชรขึ้นได้จากกระบวนการที่ค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน และค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ จึงเป็นที่สนใจอย่างยิ่งในหมู่นักวิจัยในเชิงวิศวกรรม มีการศึกษาและประยุกต์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์อย่าง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็เช่นเดียวกัน เป็นการศึกษาและพัฒนาไดโอดโครงสร้าง MIS ที่ใช้ฟิล์มเพชรเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการปรับปรุงโครงสร้างจากขอตักไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรเช่นกัน เนื่องจากยังมีข้อเสียในเรื่องของกระแสรั่วไหลย้อนกลับและขีดจำกัดในการทำงานของขอตักไดโอด ซึ่งไม่ตรงกับจุดประสงค์หลักของคุณสมบัติของเพชรซึ่งทำงานในที่ที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสารกึ่งตัวนำทั่วไป โดยจะมีรายละเอียดของการพัฒนาและปรับปรุงดังนี้

ในบทที่ 1 จะเป็นบทนำเพื่อที่จะทำความรู้จักกับสารกึ่งตัวนำเพชรอย่างคร่าว ๆ ก่อน และหลักการในการสังเคราะห์เพชรที่เป็นองค์ประกอบสำคัญหนึ่งเพื่อที่จะสร้างให้สำเร็จก่อน อีกทั้งยังบอกถึงหลักการโดยสังเขปของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยทั้งการวิเคราะห์ในลักษณะของพื้นผิวฟิล์มเพชร ระนาบ ความหนา หรือแม้กระทั่งความเป็นไปได้ของความเป็นเพชรด้วย และยังกล่าวถึงคุณลักษณะพื้นฐานของการทำขั้วสัมผัสระหว่างโลหะต่าง ๆ กับฟิล์มเพชรอีกด้วย

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีของขอตักไดโอดที่เคยสร้างจากฟิล์มเพชรมาแล้ว นอกจากนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีของไดโอดโครงสร้าง MIS ทั้งในอุดมคติและตัวอย่างเล็กน้อยที่เคยสร้างจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน โดยอธิบายในลักษณะของทฤษฎีแถบพลังงานและสมการความสัมพันธ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้กับการนำไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ รวมไปถึงค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดซึ่งสามารถอธิบายถึงลักษณะการทำงานขณะได้รับการไบอัสย้อนกลับอีกด้วย

ในบทที่ 3 จะเป็นกระบวนการสร้างและการทดลองประกอบด้วยกระบวนการสร้างขอตักไดโอดและไดโอดโครงสร้าง MIS และมีเงื่อนไขต่าง ๆ ในการทดลองด้วยเช่นเดียวกัน

ในบทที่ 4 เป็นการแสดงผลการทดลอง เมื่อทำการตรวจสอบทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าภายหลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการสร้าง ในส่วนแรกจะเป็นผลการทดลองยืนยันคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ ส่วนต่อมาเป็นผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของขอตักไดโอดเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองตามเงื่อนไขต่าง ๆ ของไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อปรับปรุงลักษณะการทำงานและข้อเสียของขอตักไดโอดดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น พร้อมด้วยการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

ในบทที่ 5 เป็นส่วนของการสรุปผลการทดลองที่ได้ศึกษาและวิจารณ์ผลการทดลอง และนำข้อมูลพื้นฐานที่ได้เป็นแนวทางและในการนำไปพัฒนาเพื่อนำไปสู่การใช้งานที่เหมาะสมในโอกาสต่อไป

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านไม่มากก็น้อย



# บทที่ 1

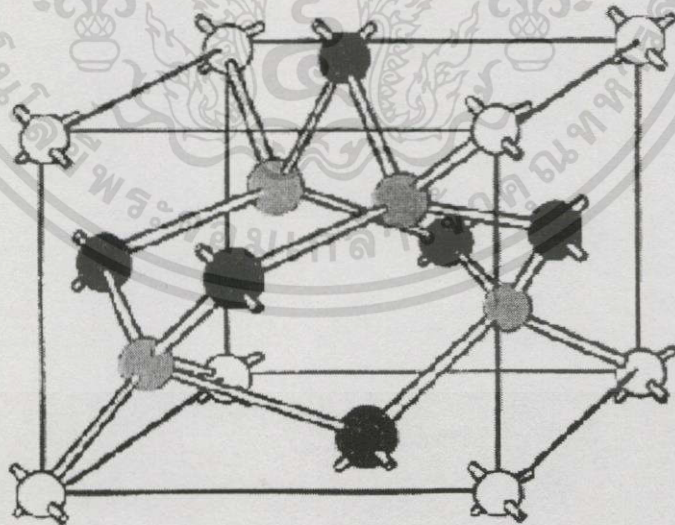
## บทนำ

ในปัจจุบันนี้ สารกึ่งตัวนำเพชรได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ด้วยกระบวนการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน กอปรด้วยคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัว ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของเพชร คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร และรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร ดังจะกล่าวต่อไป

### 1.1 ลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพชร [1]

#### 1.1.1 ลักษณะโครงสร้างของเพชร

เพชรเป็นธาตุคาร์บอนซึ่งอยู่ในหมู่ที่ 4 ของตารางธาตุ โดยจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบที่เรียกว่า โครงสร้างเพชร (diamond structure) นั่นคือ เมื่อพิจารณา unit cell ของเพชรจะพบว่า มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบโครงสร้าง fcc (face-centered cubic structure) 6 อะตอม อะตอมที่มุมทั้ง 8 ของ unit cell 8 อะตอม และอีก 4 อะตอมภายใน unit cell ซึ่งจะอยู่ในระยะ  $\frac{1}{4}$  ใน 4 ของความยาวในแนวทแยงมุมของ unit cell โดยคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวกับอะตอมคาร์บอนรอบข้างทั้งสี่ตัวแบบ tetrahedral ด้วยพันธะโควาเลนต์ แบบ  $sp^3$  ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลักษณะโครงสร้างของผลึกเพชร

จะเห็นได้ว่า อะตอมคาร์บอนจะยึดเหนี่ยวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม 2 วง เป็นระนาบ {111} ในลักษณะซ้อนทับและกลับหัวกันอยู่ โดยที่อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน ถ้าพิจารณาในทิศทางระนาบ {111} จะมีลักษณะการเรียงลำดับชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยมในลักษณะ ABC ABC ABC ... ทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567 Å ค่าระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุด หรือความยาวพันธะมีค่า 1.54 Å

### 1.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพชรกับวัสดุสารชนิดอื่นที่ใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ในปัจจุบัน ได้แก่ ซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ เป็นต้น สามารถเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 1.1 [2-3]

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ทางไฟฟ้าระหว่างเพชร ซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์

คุณสมบัติทางไฟฟ้า	เพชร	ซิลิกอน	แกลเลียมอาร์เซไนด์
ความกว้างแถบพลังงานต้องห้าม (eV)	5.5	1.12	1.43
ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ )	2000 (5)	1500	8500
ค่าความคล่องตัวของโฮล ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ )	1800 (5)	600	420
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	5.5	11.8	12.8
ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	3.567	5.431	5.663
ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3.515	2.42	5.32
Breakdown Field (MV/cm)	10	5	6
Thermal Conductivity (W/cm.K)	20	1.5	0.5

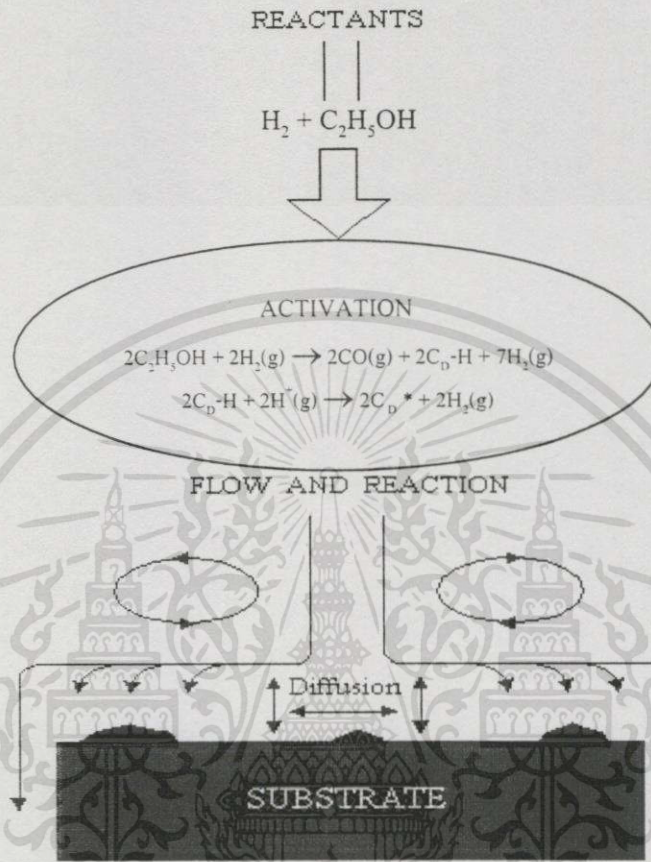
\* สำหรับกรณีสารกึ่งตัวนำเพชรชนิด Polycrystalline [4]

จะเห็นได้ว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำเพชรเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์แล้วน่าสนใจและโดดเด่นกว่ามาก ถ้าพิจารณาถึงขีดจำกัด หรือขีดความสามารถในการนำไปใช้งานในสภาวะบางอย่าง เช่น สภาวะที่ใช้งานในที่อุณหภูมิสูง ความถี่สูง หรือแม้แต่สภาวะกัมมันตภาพรังสีสูง ๆ

## 1.2 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน

ในการศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอาศัยการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (Hot-Filament CVD) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ความดันต่ำหรือความดันบรรยากาศ และเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากค่อนข้างง่าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ซับซ้อน และที่สำคัญคือ ต้นทุนในการสร้างต่ำ โดยจะมีหลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งในที่นี้มีเอทิล-แอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) เป็นไอระเหยที่มีอนุภาคของคาร์บอนเป็นตัวอย่าง



รูปที่ 1.2 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน [1]

### 1.2.1 ในระบบต้องมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

Angus et al. [5] ได้เสนอถึงพฤติกรรมของอะตอมไฮโดรเจน เป็นส่วนสำคัญในการกำจัดและลดปริมาณกราฟไฟต์ ทำให้อะตอมคาร์บอนโครงสร้างเพชรยังคงมีพันธะแบบ  $sp^3$  อยู่ นอกจากนั้นยังคงช่วยให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้นด้วย [6] เนื่องจากไฮโดรเจนจะช่วยเข้าไปก่อกำเนิดพันธะกับอะตอมคาร์บอนบริเวณพื้นผิวที่พันธะขาดอยู่ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะแบบ  $sp^3$  ของเพชรไปเป็นแบบ  $sp^2$  หรือ  $sp^1$  ได้

### 1.2.2 ในระบบต้องกระตุ้นก๊าซอนุภาคคาร์บอน

จากรูปที่ 1.2 ในบริเวณที่มีการกระตุ้น (Activation) ก๊าซทั้งสองชนิด สำหรับวิธี CVD แบบ hot-filament จะอาศัยความร้อนจากอุณหภูมิประมาณ 2000 องศาเซลเซียส ของขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนทั้งสเดน เป็นผลให้โมเลกุลของก๊าซทั้งสองเกิดการแตกตัวเป็นคาร์บอนอะตอม และไฮโดรเจนอะตอม ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่านจากบริเวณกระตุ้นไปยังฐานรอง โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงเป่าก๊าซเฟส

### 1.2.3 ในระบบต้องมีอุณหภูมิของฐานรองเหมาะสม

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนี้ อุณหภูมิมีความสำคัญอย่างมากต่อการก่อตัวและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนให้อยู่ในโครงสร้างเพชร รวมทั้งระนาบของฟิล์มเพชรที่จะเกิดขึ้นด้วย Spitsyn et al. [5] เสนอผลการทดลองไว้ว่า อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสมทำให้เกิดเป็นเพชรได้ ในช่วงตั้งแต่ 500 – 1200 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับวิธีการใช้

### 1.2.4 ในระบบต้องมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแต่ละครั้งพบว่า การเลือกใช้ฐานรองที่จะนำมาสร้างมีส่วนสำคัญมากเช่นกัน เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวของฐานรองมีผลต่อลักษณะการก่อตัวของเพชร ได้แก่ ความหนาแน่นและอัตราการนิวเคลียสเป็นต้น จึงมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยกันหลายวิธี ในตารางที่ 1.2 จะบอกถึงอัตราการนิวเคลียสและข้อดีข้อเสียของการเตรียมพื้นผิวฐานรองก่อนนำไปสังเคราะห์เพชรดังนี้

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบความหนาแน่นการนิวเคลียสของเพชร และข้อดีข้อเสียการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยวิธีต่างๆ [5]

Pretreatment Method	Nucleation Density	Advantages	Disadvantages
No Pretreatment	$10^3 - 10^5$	Large, separate grain No damage, impurity	Discontinuous film not practical
Scratching	$10^6 - 10^{10}$	Proven technology Reproducible	Dirty, damage surface Difficult to control
Ultrasonic Scratching	$10^7 - 10^{11}$	Uniform, reproducible	Dirty, damage surface
Ion implantation	$10^5 - 10^6$	In situ process	low $N_d$
Biasing	$10^8 - 10^{11}$	In situ process High $N_d$ possible	Diamond nuclei are defective

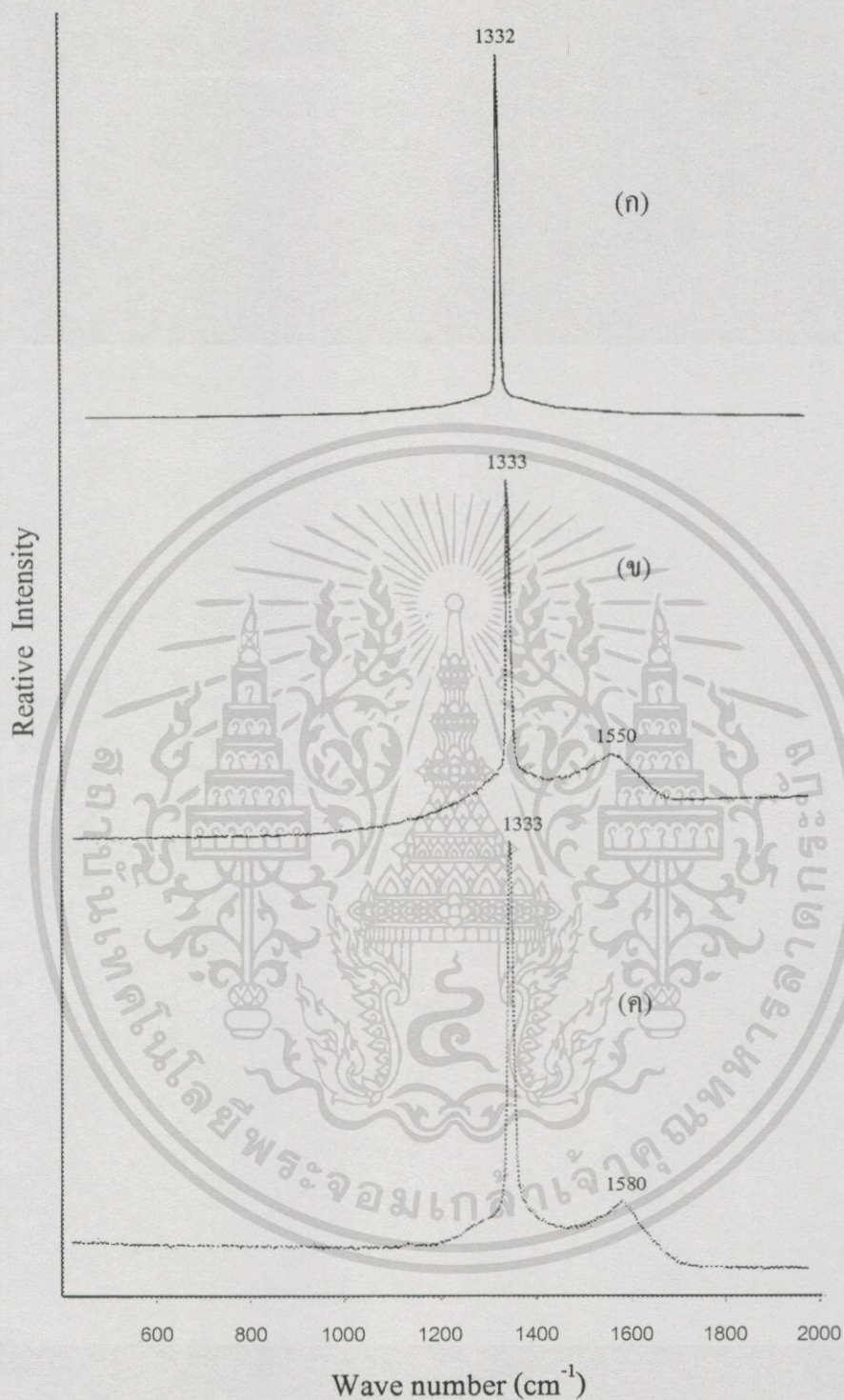
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเพชร

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างด้วยสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรโดยสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นด้วยวิธี CVD แบบความร้อน ดังนั้นหลังจากที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชรแล้ว จึงจำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มสังเคราะห์ที่ได้ เพื่อยืนยันว่า ฟิล์มที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไปนี้เป็นฟิล์มเพชรที่มีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐาน โดยสังเขปของวิธีที่เราใช้ตรวจสอบฟิล์มที่สังเคราะห์ขึ้นได้นี้ และในการศึกษาครั้งนี้จะอาศัยการตรวจสอบฟิล์มด้วยกัน 3 วิธีได้แก่ วิธี Raman Spectroscopy วิธี X-ray Diffraction และวิธี Scanning Electron Microscopy

#### 1.3.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy [1,5,7]

Raman spectroscopy เป็นวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของวัสดุโดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสง โดยทำการวัดการลดลงของความเข้มลำแสงที่ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน (non-absorbing medium) ผลของ Raman นี้จะเป็นการกระเจิงในระดับโมเลกุล นั่นคือการกระเจิงของแสงนี้เกิดขึ้นจากโฟตอนของลำแสงกับการสั่นภายในแลตทิซหรือโฟนอน ดังนั้น Raman spectroscopy จึงเป็นวิธีที่นิยมนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ Raman สูง ดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่าง ๆ ของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร กราไฟต์ และคาร์บอนอะมอร์ฟัส เป็นต้น โดยที่ค่าสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติมียอดอยู่ที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 1.3(ก) และลักษณะสเปกตรัมของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.3(ข) และ 1.3(ค) โดยที่ยอดของกราฟ Raman อันดับหนึ่งที่หนึ่งสำหรับคาร์บอนโครงสร้างเพชร อะมอร์ฟัสและกราฟไฟต์ จะมีค่าอยู่ที่  $1333\text{ cm}^{-1}$ ,  $1550\text{ cm}^{-1}$  และ  $1580\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ จากรูปที่ 1.3(ข) และ 1.3(ค) บอกได้ว่า ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรที่ใกล้เคียงธรรมชาติ และบริสุทธิ์มาก แต่ยังมีปริมาณกราฟไฟต์และคาร์บอนอะมอร์ฟัสปะปนอยู่บ้าง ข้อดีสำคัญที่สุดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วย Raman spectroscopy นี้ ก็เป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงานหรือฟิล์มเพชรที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อได้ เครื่อง Raman Spectroscope แสดงไว้ในภาคผนวก ก-1



รูปที่ 1.3 ลักษณะสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติ และเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน [8]

(ก) เพชรธรรมชาติ

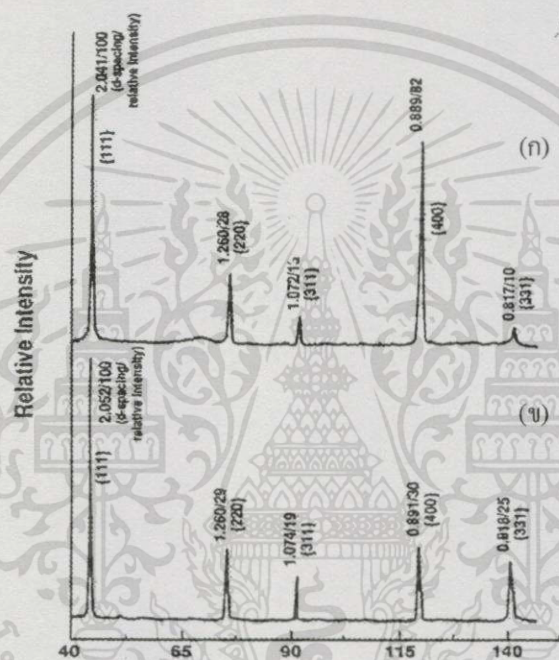
(ข) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณคาร์บอนอะมอร์ฟิสปะปนอยู่

(ค) เพชรสังเคราะห์ที่มีปริมาณกราฟิต์ปะปนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3.2 การวิเคราะห์ด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [1,5]

การตรวจสอบระนาบของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นนี้ เป็นลักษณะการวิเคราะห์ทางกายภาพโดยอาศัยคุณสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบในแลตทิซแสดงรูปร่างของอุปกรณ์ในภาคผนวก ก-2 โดยจะมีการแสดงผลออกมาในลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ กับค่ามุม  $2\theta$  หรือค่า interplanar spacing ( $d$ ) และจะได้ว่า ในแต่ละตำแหน่งของค่า  $2\theta$  หรือค่า  $d$  ของค่ายอดสูงสุดของกราฟที่ได้ สามารถบอกระนาบของฟิล์มเพชร  $\{hkl\}$  ได้โดยเทียบกับค่าของวัสดุมาตรฐานในภาคผนวก ข ในรูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ระนาบของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน



รูปที่ 1.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของเพชร

(ก) ระนาบ {100}

(ข) ระนาบ {111}

### 1.3.3 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) [1,5,9]

ในการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ หรือแม้กระทั่งความหนาของฟิล์มเพชรก็ตาม เราสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธี SEM ดังแสดงรูปเครื่องมือในภาคผนวก ซึ่งยังสามารถบอกได้ถึงระนาบของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้อีกด้วย SEM สามารถตรวจสอบฟิล์มได้ถึงระดับที่เล็กกว่าไมครอน โดยทำการโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปยังพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ แล้วทำการตรวจจับอิเล็กตรอนอันดับที่สอง (secondary electron) ที่หลุดผ่านออกมาจากพื้นผิว โดยที่ความสว่างหรือความเข้มของการส่งผ่านอิเล็กตรอนอันดับสองออกมานั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวที่ทำการวัดนั้น ๆ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะถูกขยายไปแสดงภาพที่จอมอนิเตอร์ และความละเอียดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

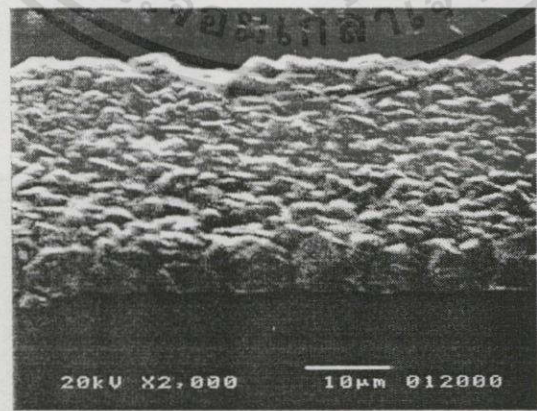
ภาพที่ได้กำหนดได้โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งสามารถโฟกัสได้ละเอียดถึงเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 10-20 นาโนเมตรเท่านั้นดังแสดงเครื่องมือในภาคผนวก ก-3 ในรูปที่ 1.5 จะแสดงตัวอย่างของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่ได้ตรวจสอบด้วย SEM โดยในรูปที่ 1.5(ก) เป็นฟิล์มเพชรที่มีระนาบ {100} ส่วนในรูปที่ 1.5(ข) เป็นฟิล์มเพชรระนาบ {111} ซึ่งเป็นระนาบที่ต้องการใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และในรูปที่ 1.5(ค) เป็นลักษณะของความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้



(ก) ระนาบ {100}



(ข) ระนาบ {111}



(ค) ความหนาของฟิล์มเพชร

รูปที่ 1.5 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน [8]

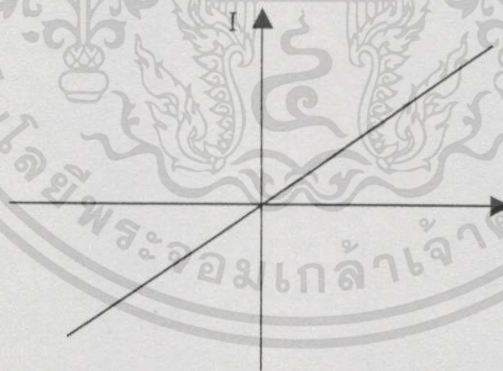
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร

ในการพัฒนาสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้แล้ว เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น จำเป็นต้องคำนึงโลหะที่จะนำไปใช้เป็นขั้วสัมผัสกับฟิล์มเพชรด้วยในหัวข้อนี้ จึงจะกล่าวถึงรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ประเภทคือ รอยสัมผัสแบบโอห์มิก และรอยสัมผัสแบบชอตต์กี

### 1.4.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มิก

โดยทั่วไปการสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกของโลหะกับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นตัวผ่านการไหลของกระแสทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า สามารถสร้างขึ้นได้โดยการพิจารณาจากความแตกต่างของฟังก์ชันงานของทั้งสารกึ่งตัวนำและโลหะที่จะนำมาใช้เป็นขั้วสัมผัส หรือการแพร่สารเจือมาก ๆ เป็นชั้นบาง ๆ ของสารกึ่งตัวนำก่อนทำขั้วสัมผัส หรือการทำลายพื้นผิวสารกึ่งตัวนำก่อนทำขั้วสัมผัส สำหรับการสร้างรอยสัมผัสของโลหะกับฟิล์มเพชร สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างและการนำไปใช้งาน เช่น ขั้วสัมผัสโลหะอินเดียมกับฟิล์มเพชรเป็นแบบโอห์มิก แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานในอุณหภูมิสูงเนื่องจากอินเดียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ [1] การใช้กาวเงินเป็นขั้วโลหะ หรือการทำให้ผิวฟิล์มเพชรเสียหาย แล้วใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วโลหะ ก็เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก และยังสามารถลดความต้านทานของรอยสัมผัสได้ด้วยการให้ความร้อนเป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะกระแส-แรงดันแล้ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.6 โดยในการสร้างขั้วสัมผัสโอห์มิกของการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยกาวเงินเป็นขั้วโลหะ



รูปที่ 1.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบโอห์มิกระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร

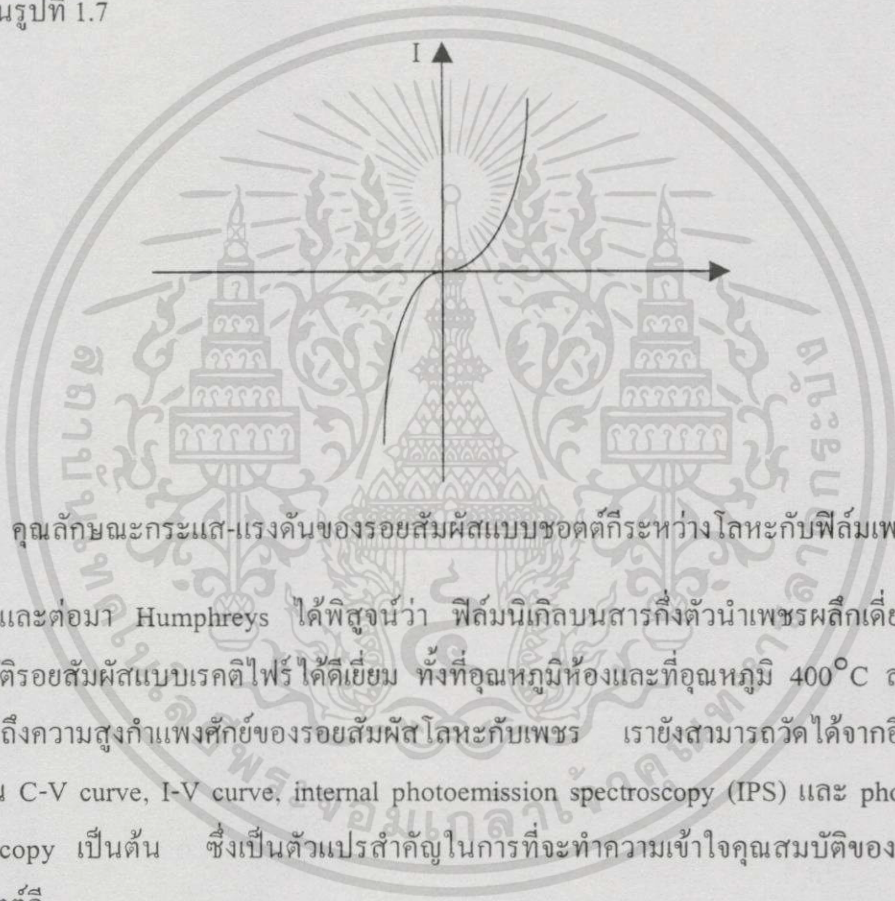
### 1.4.2 รอยสัมผัสแบบชอตต์กี

รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์หรือเรียกอีกอย่างว่า รอยสัมผัสแบบชอตต์กี ได้ถูกนำมาพัฒนาใช้ประโยชน์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากเพชร ซึ่งในการพิจารณารอยสัมผัสแบบชอตต์กีนี้ก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับรอยสัมผัสแบบโอห์มิก นั่นคือ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำเพชร เช่นค่าความสูงของกำแพงศักย์ ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติสารของโลหะเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อย เช่น ค่าเวิร์คฟังก์ชัน และอิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะกระแสและแรงดันของรอยสัมผัส จะขึ้นอยู่กับเตรียมและธรรมชาติของพื้นผิวของเพชรอย่างมาก ซึ่งสังเกตได้ว่า ยังไม่มีวิธีที่แน่นอนในการเตรียมเพชร ซึ่งต่างจากกรณีของสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ เช่น ซิลิกอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์

รอยสัมผัสแบบขอตต์กีนี้สามารถเกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำชนิดเพชรได้ทั้งในผลึกธรรมชาติ ผลึกสังเคราะห์ที่เติมสารเจือโบรอน และแบบไฮโมอิกแพกเซี่ยลที่สังเคราะห์ขึ้นโดย CVD และแบบฟิล์มโพลีคริสตัลไลน์ในหลายลักษณะการใช้ ยกตัวอย่างเช่น การใช้พอยท์โพรบ (point probes) วิธีการเคลือบฟิล์มโลหะต่าง ๆ เช่น อลูมิเนียม ดังแสดงตัวอย่างคุณลักษณะกระแส-แรงดันในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบขอตต์กีระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร

และต่อมา Humphreys ได้พิสูจน์ว่า ฟิล์มที่เกิดบนสารกึ่งตัวนำเพชรผลึกเดี่ยวจะแสดงคุณสมบัติรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ได้ดีเยี่ยม ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  ส่วนในการพิจารณาถึงความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสโลหะกับเพชร เรายังสามารถวัดได้จากอีกหลายวิธีด้วย เช่น C-V curve, I-V curve, internal photoemission spectroscopy (IPS) และ photoelectron spectroscopy เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการที่จะทำความเข้าใจคุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบขอตต์กี

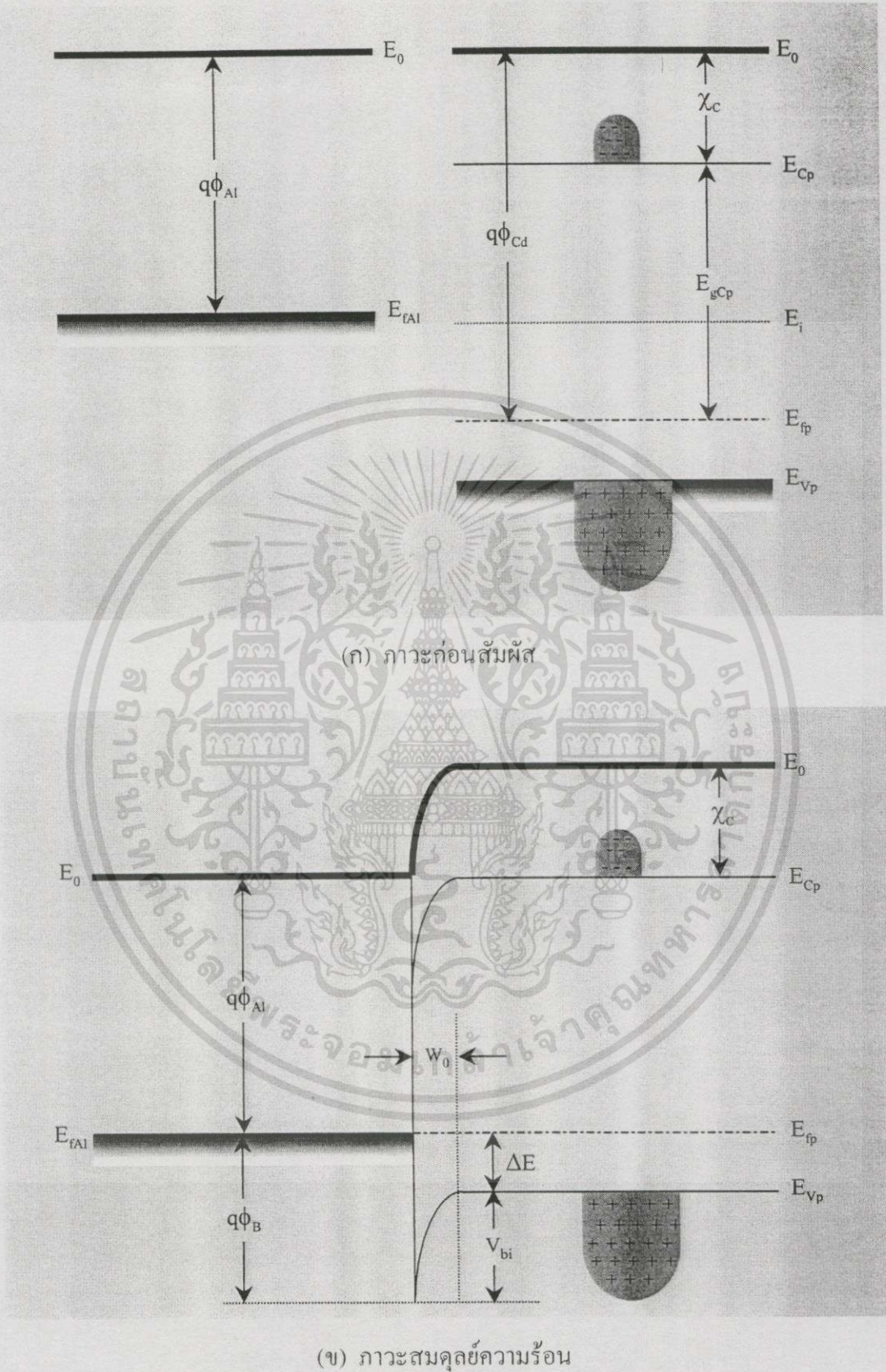
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ถึงสารกึ่งตัวนำเพชรที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการ CVD แบบความร้อนได้โดยง่าย อีกทั้งยังสามารถสร้างรอยสัมผัสขึ้นระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการเป็นพื้นฐานที่จะนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารกึ่งตัวนำเพชรต่อไป เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานที่ได้เปรียบกว่าสารกึ่งตัวนำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ซิลิกอน และ เยอรมันเนียม อย่างที่ทราบกันแล้วว่ารอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะออลูมิเนียมนี้เป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์หรือแบบขอตต์กินัน สามารถนำมาทำเป็นไดโอดประเภทรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะได้เช่นกัน ขอตต์กินันไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรจึงได้มีการทำการศึกษากันดังจะกล่าวต่อไป

#### 2.1 ขอตต์กินันไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร [1-2]

ขอตต์กินันไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรเป็น ไดโอดที่อาศัยคุณสมบัติจากรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะ โดยในที่นี้จะพิจารณารอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีและโลหะออลูมิเนียม ดังแสดงแบบจำลองแถบพลังงานก่อนสัมผัสกันไว้ในรูปที่ 2.1(ก) เมื่อเปรียบเทียบความต่างของระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะออลูมิเนียม ( $E_{F_{Al}}$ ) และของฟิล์มเพชรชนิดพี ( $E_{F_p}$ ) กับระดับพลังงานสุญญากาศ ( $E_0$ ) ขณะยังไม่ได้สัมผัสกันนั้น จะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่า ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของฟังก์ชันงาน (work function) ของทั้งสองวัสดุ นั่นคือเมื่อมีการสัมผัสกันเกิดขึ้นดังในรูปที่ 2.1(ข) จะทำให้เกิดการถ่ายเทหรือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานที่สูงกว่า (อิเล็กตรอนจากโลหะออลูมิเนียม) ข้ามรอยสัมผัสไปยังระดับพลังงานที่ต่ำกว่า (ฟิล์มเพชรชนิดพี) จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน (ระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกัน) เป็นผลให้เกิดการโค้งงอของระดับพลังงานอื่นในส่วนของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีหรือนั่นคือ ทำให้เกิดกำแพงศักย์ (Barrier Height :  $\phi_B$ ) ขึ้นบริเวณรอยสัมผัสของฟิล์มเพชรชนิดพีกับพื้นผิวของโลหะออลูมิเนียม และพบว่าขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทำให้เกิดการรวมตัวกับประจุโฮลที่ระดับวาเลนซ์บริเวณพื้นผิวของฟิล์มเพชรชนิดพี ทำให้เกิดบริเวณปลดปล่อย (depletion region) ขึ้นในระยะ  $W_0$  หรือเกิดศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in voltage :  $V_{bi}$ ) ขึ้น จะเห็นว่า ค่ากำแพงศักย์ขึ้นจากโลหะออลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี ( $q\phi_B$ ) ในภาวะสมดุลความร้อนจะมีค่าเท่ากับสมการที่ 2.1 [6]



รูปที่ 2.1 โคอะแกรมแถบพลังงานของจอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร

(ก) ภาวะก่อนสัมผัสกัน

(ข) ภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q\phi_B = v_{bi} + \Delta E \quad (2.1)$$

$$\Delta E = q\chi_C + E_{gc} - q\phi_{Al} \quad (2.2)$$

และเมื่อมีการนำไฟฟ้าขึ้น จะมีปริมาณกระแสไหล (I) ดังสมการที่ 2.3 [7-8]

$$I = I_S [\exp(qV_A / kT) - 1] \quad (2.3)$$

โดยจะมีค่า  $I_S$  เป็นกระแสในสภาวะสมดุลย์ความร้อน ( $V = 0$ ) เป็น

$$I_S = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.4)$$

และ

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.5)$$

โดยที่

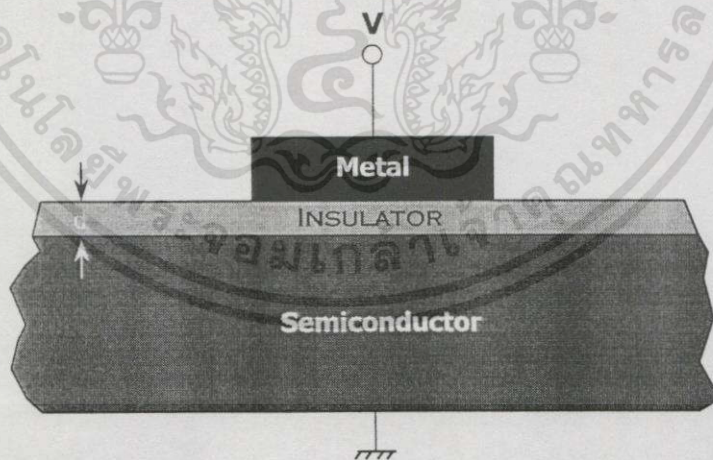
- $q\phi_B$  = ค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส
- $q\phi_{Al}$  = ฟังก์ชันงานของอลูมิเนียม
- $q\phi_{Cd}$  = ฟังก์ชันงานของฟิล์มเพชรชนิดพี
- $q\chi_C$  = อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของฟิล์มเพชร
- $q\phi_B$  = กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี
- $E_0$  = ระดับพลังงานที่สูญญากาศ
- $E_{fAl}$  = ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะอลูมิเนียม
- $E_i$  = ระดับพลังงานอินทรินซิก
- $E_{fp}$  = ระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชรชนิดพี
- $E_{scd}$  = ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเพชร
- $w_0$  = ระยะปลอดประจุพาหะในชั้นฟิล์มเพชร
- $I_S$  = กระแสอิ่มตัวของไดโอด ในขณะที่  $V = 0$
- $A$  = พื้นที่ของรอยสัมผัส
- $A^*$  = ค่าคงที่ Richardson
- $m_h^*$  = มวลยังผลโฮลของเพชร =  $3.64 \times 10^{-31}$  kg [ ]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่อธิบายข้างต้น จะเห็นว่า ซอตต์กัไดโอดมีคุณสมบัติของการเรกติไฟร์ได้อย่างดี แต่ก็พบว่า ในทางปฏิบัติจริง ซอตต์กัไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้ มีกระแสรั่วไหลย้อนกลับเกิดขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้า หรือนั่นคืออัตราการกรองการไหลของกระแสต่ำ (Low current rectification ratio) ซึ่งเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ต่อการประยุกต์ใช้งานบางประเภท [1-2] ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะลดปัญหาของการเกิดกระแสรั่วไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นกับรอยสัมผัสแบบนี้ นั่นคือทำการเพิ่มชั้นฉนวนขึ้นระหว่างรอยสัมผัสแบบซอตต์กัไดโอดนี้ โดยในที่นี่จะทำการศึกษาการใช้ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกเป็นชั้นฉนวนขึ้น [9] เพราะฉะนั้นจึงควรมาทำความเข้าใจทฤษฎีที่น่าจะสอดคล้องกับแนวความคิดที่จะนำมาแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสร้างซอตต์กัไดโอดนี้ ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงการทำความเข้าใจการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติดังต่อไปนี้

## 2.2 ไดโอดโครงสร้าง MIS (Metal-Insulator-Semiconductor Diode) [10]

ในปี ค.ศ.1951 Moll และ Pfann&Garette ได้เสนอโครงสร้าง MIS หรือโครงสร้างรอยต่อของโลหะ (metal) / ฉนวน (insulator) / สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ขึ้นเป็นครั้งแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และในเวลาต่อมาก็มี Frankl และ Lindner จึงทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้าง MIS ดังนั้นในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงทฤษฎีของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติโดยเลือกพิจารณาเฉพาะกรณีของชั้นสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี ดังแสดงต่อไปนี้

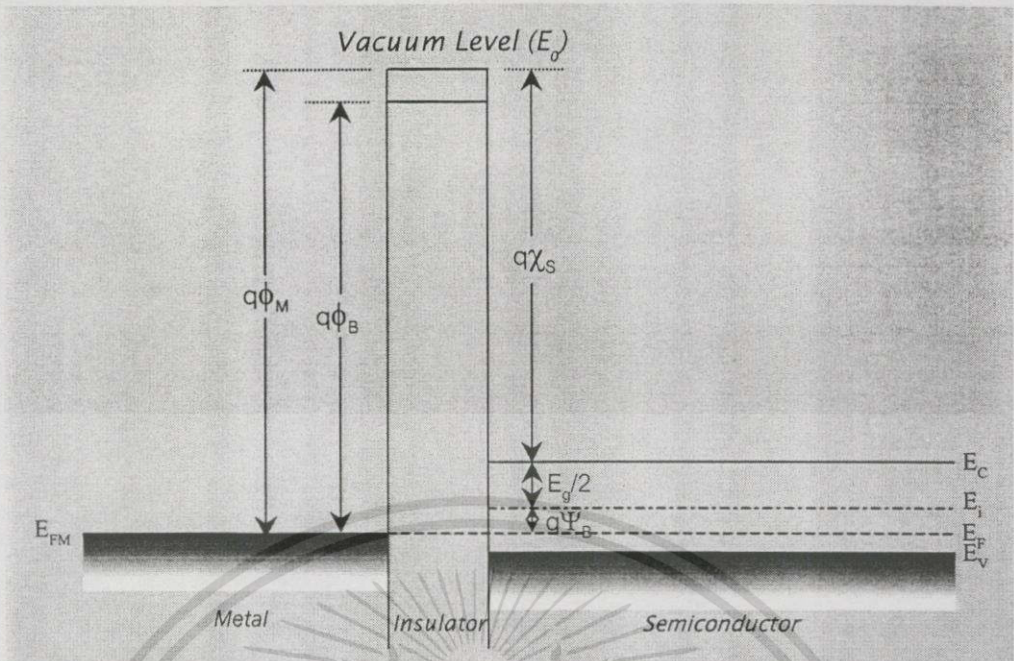


รูปที่ 2.2 ลักษณะไดโอดโครงสร้าง MIS

### 2.2.1 ภาวะสมดุลย์ทางความร้อน

ในรูปที่ 2.3 แสดงถึงลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติขณะอยู่ในภาวะสมดุลย์ความร้อน หรือ ไม่มีแรงดันไบอัสจากภายนอกกระทำ ( $V=0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติภาวะสมดุลความร้อน

ซึ่งสามารถนิยามคุณสมบัติของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติได้ดังต่อไปนี้

1. ค่าความแตกต่างของพลังงานฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_{ms}$ ) ในภาวะสมดุลความร้อนเป็นศูนย์ หรือนั่นคือ ช่วงระดับพลังงานแบนราบ (flat-band condition) ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$\phi_{ms} \equiv \phi_m - \left( \chi_s + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad (2.6)$$

โดยที่  $\phi_{ms}$  = ค่าต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

$\phi_m$  = ฟังก์ชันงานของโลหะ

$\chi_s$  = อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ

$E_g$  = แถบพลังงานช่องว่างของสารกึ่งตัวนำ

$\psi_B$  = ค่าต่างของกัมพางศักย์ระหว่างระดับ  $E_f$  กับระดับ  $E_i$

$\phi_B$  = กัมพางศักย์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

2. ประจุต่าง ๆ ไม่สามารถปรากฏอยู่ในโครงสร้างได้แม้ในกรณีที่มีการให้ไบอัส โดยประจุเหล่านี้จะปรากฏในสารกึ่งตัวนำในปริมาณเท่ากับในชั้นโลหะ แต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกันที่บริเวณพื้นที่ติดกับชั้นฉนวน

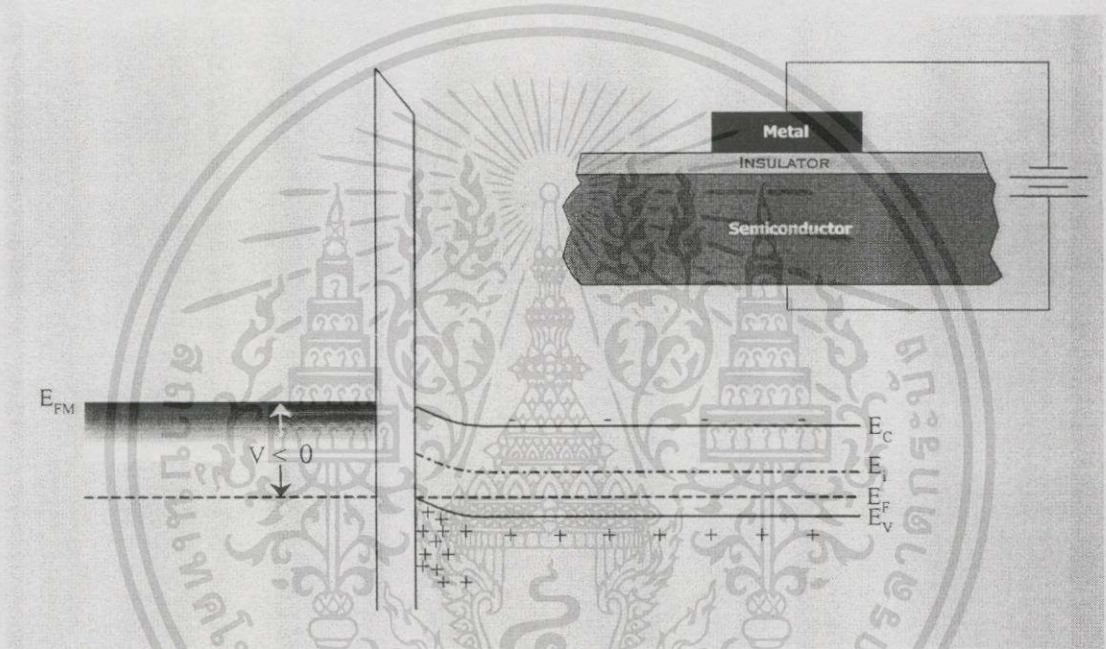
3. ประจุพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฉนวนภายใต้กรณีการให้ไบอัส นั่นคือ พิกัดความต้านทานของฉนวนมีค่าเป็นอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ภาวะได้รับการไบอัสจากภายนอก

### 2.2.2.1 ภาวะการให้ไบอัสไปข้างหน้า (Forward Bias)

เมื่อให้ศักยคาบที่ชั้นโลหะและศักยคาบวทที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีของไดโอด โครงสร้าง MIS ในอุดมคติ จะทำให้แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดในภาวะสมดุลย์จาก รูปที่ 2.3 เปลี่ยนเป็นรูปที่ 2.4 นั่นคือประจุพาหะโฮลในระดับพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ ( $E_v$ ) มีพลังงานสูงขึ้น และระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ( $E_{Fp}$ ) อยู่ในระดับคงที่เนื่องจากไม่มี กระแสไหลผ่านรอยต่อของฉนวน



รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติเมื่อได้รับไบอัสลบที่ชั้นโลหะ

ภายในโครงสร้างดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงทำให้ระดับพลังงานวาเลนซ์ที่บริเวณ รอยต่อกับฉนวนมีลักษณะโค้งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความหนาแน่นของประจุพาหะโฮลที่บริเวณ พื้นผิวสารกึ่งตัวนำมีปริมาณสูงขึ้นเกิดการสะสมของประจุพาหะส่วนมากโฮล (accumulation of hole majority carriers) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เนื่องจากในทางอุดมคติแล้วถือว่าการนำไฟฟ้าในชั้น ฉนวนนี้มีค่าเป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริงแล้วพบว่า ฉนวนสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยสนามไฟฟ้า สูง ๆ โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ลักษณะการไหลของกระแสผ่านชั้นฉนวน หรือการนำไฟฟ้าของไดโอด โครงสร้าง MIS นี้มีได้หลายลักษณะซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับการไหลของกระแสผ่านชั้นฉนวนแบบ Schottky emission เป็นลักษณะการนำไฟฟ้าเดียวกันกับการนำไฟฟ้าของรอยสัมผัสขอดีคกี นั่นคือ ขึ้นอยู่กับความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 กระบวนการนำกระแสผ่านชั้นฉนวนพื้นฐานในไดโอดโครงสร้าง MIS [9]

รูปแบบการนำกระแส	สมการความสัมพันธ์
Schottky Emission	$I = \left( \frac{4\pi q m_h^* k^2}{h^3} \right) \cdot A T^2 \exp \left[ \frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/4\pi\epsilon_1 d})}{kT} \right]$
Frenkel – Poole Emission	$I \approx \frac{AV}{d} \exp \left[ \frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/\pi\epsilon_1 d})}{kT} \right]$
Tunnel or Field Emission	$I \approx \frac{AV^2}{d^2} \exp \left[ \frac{-4d\sqrt{(2m_h^*)} \cdot (q\phi_B)^{3/2}}{3q h V} \right]$

ส่วนในลักษณะการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole emission มีลักษณะการไหลคล้ายกับ Schottky emission แต่ว่าการไหลของกระแสผ่านเข้าไปในชั้นของฉนวนนี้ ประจุพาหะส่วนใหญ่จะถูกแตรปด้วยสถานะพลังงานว่างภายในชั้นฉนวนนี้ ซึ่งจะต้องได้รับพลังงานจากภายนอกที่สูงขึ้นได้แก่ การให้ไบอัสหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้น และสำหรับลักษณะการไหลของกระแสแบบ Tunnel emission เป็นลักษณะการไหลของกระแสที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิเลย

2.2.2.2 ภาวะการให้ไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias)

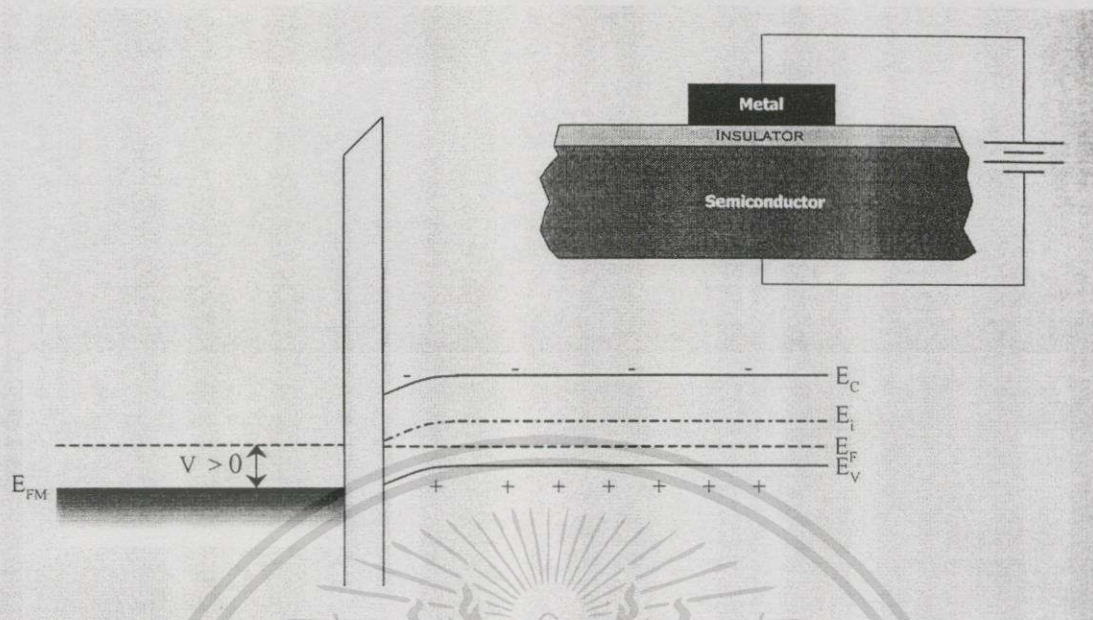
เมื่อให้ศักดาบวกที่ชั้น โลหะและศักดาลบที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ จะทำให้แถบจำลองแถบพลังงานของไดโอดในภาวะสมดุลย์จากรูปที่ 2.3 เปลี่ยนแปลงเป็นรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 โดยสามารถแยกพิจารณาได้ 2 ช่วงดังนี้

1) ช่วงปลอดประจุ (Depletion of majority carrier)

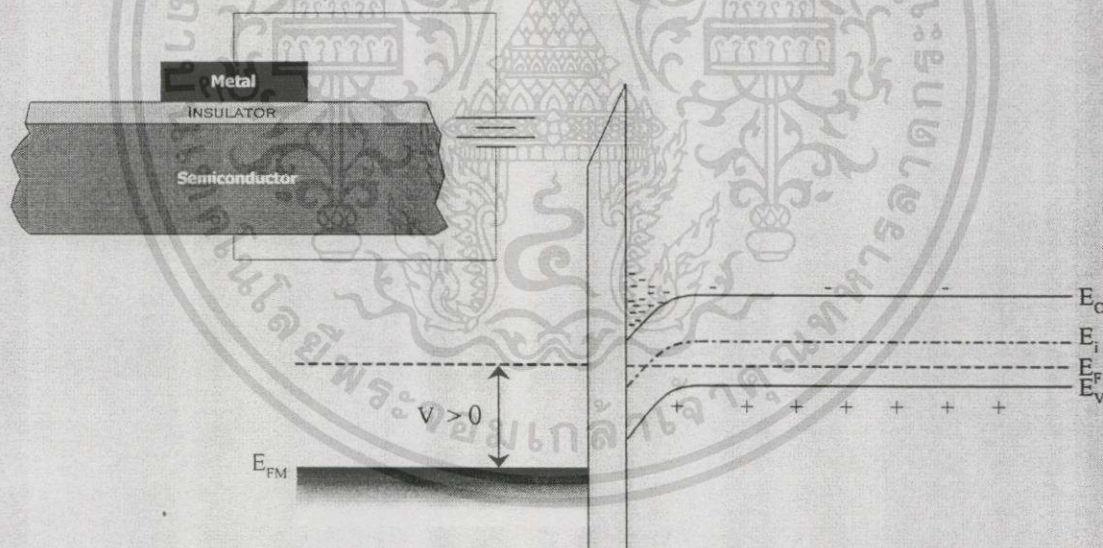
เป็นช่วงที่เริ่มให้ไบอัสบวกแก่ชั้น โลหะ ทำให้ประจุพาหะส่วนมากโฮลของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อกับฉนวนเกิดการรวมตัว (recombination) กับประจุลบที่ถูกส่งผ่านมา เกิดเป็นช่วงปลอดประจุพาหะ ประจุโฮลที่ระดับพลังงานวาเลนซ์จึงมีพลังงานลดลง ทำให้แถบพลังงานวาเลนซ์มีลักษณะโค้งงอออกห่างจากระดับพลังงานเฟอร์มิดังแสดงในรูปที่ 2.5

2) ช่วงส่วนกลับประจุพาหะ (Inversion)

เมื่อให้ศักดาบวกเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากช่วงปลอดประจุพาหะดังที่กล่าวข้างต้นจนกระทั่งพลังงานที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับค่าแฟกซ์ของสารกึ่งตัวนำ จะเป็นช่วงที่ปริมาณประจุพาหะของทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณพื้นผิวมีค่าเท่ากัน ( $n_s = p_s = n_i$ ) หรือเป็นช่วงที่ระดับพลังงานอินทรินซิกตัดกับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำนั่นเองดังแสดงในรูปที่ 2.6



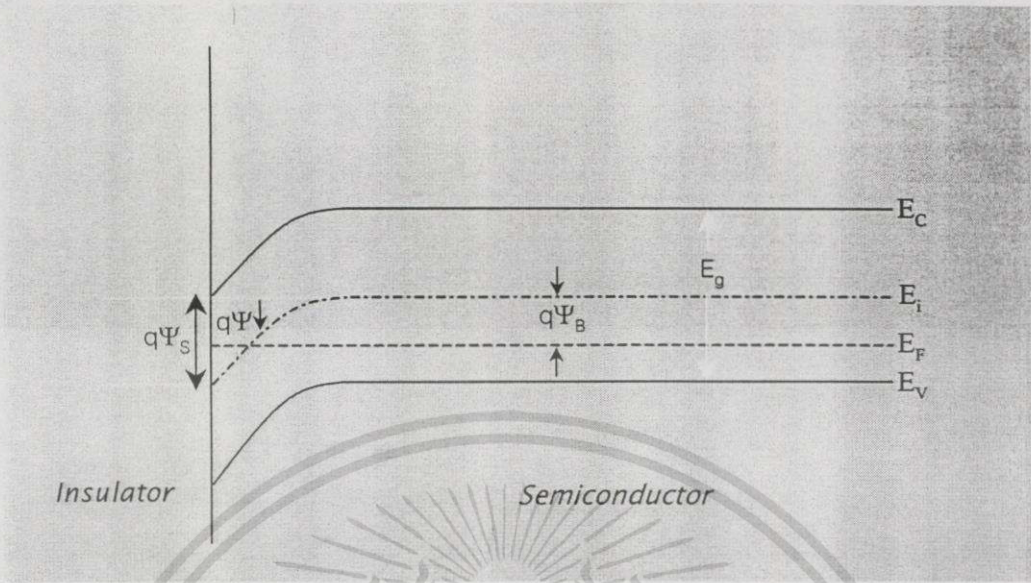
รูปที่ 2.5 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงปอดประจุ



รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงกลับประจุพาหะ

และถ้าไบอัสต่อจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำ (semiconductor surface potential ;  $\psi_s$ ) สูงกว่าค่ากำแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำ ( $\psi_s > \psi_B$ ) ปริมาณประจุพาหะส่วนน้อยอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวจะมีมากกว่าประจุพาหะส่วนมากโฮล หรือเป็นช่วงที่ระดับพลังงานอินทรีนซิกข้ามผ่านระดับพลังงานเฟอร์มิลงมาดังแสดงในรูปที่ 2.6 เช่นกันทำให้เกิดเป็นช่วงส่วนกลับประจุพาหะขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำของไดโอด ในช่วงกลับประจุพาหะ

ถ้าพิจารณาถึงรายละเอียดในโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 กำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ หรือ ค่า  $\psi$  ให้มีค่าเป็นศูนย์ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำชนิดพี บริเวณส่วนสัมผัสกับชั้นโลหะนี้เป็น  $\psi_s$  และความหนาแน่นของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดที่กำหนดได้ดังนี้

$$n_p = n_{p0} \exp(q\psi / kT) = n_{p0} \exp(\beta\psi) \tag{2.7}$$

$$p_p = p_{p0} \exp(-q\psi / kT) = p_{p0} \exp(-\beta\psi) \tag{2.8}$$

โดยในที่นี้  $\psi$  เป็นบวกจากการพิจารณาในรูปที่ 2.8

$n_{p0} \cdot p_{p0}$  = ความหนาแน่นประจุพาหะอิเล็กตรอน, โฮล ในเนื้อสารกึ่งตัวนำภาวะสมดุลย์

$$\beta \equiv q/kT$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากพิจารณาค่าความหนาแน่นประจุพาหะที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ( $n_s, p_s$ ) จะมีค่าเท่ากับ

$$n_s = n_{p0} \exp(\beta\psi_s) \tag{2.9}$$

$$p_s = p_{p0} \exp(-\beta\psi_s)$$

จากสมการของ Poisson ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำในรูปของระยะทางจะได้

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p_p - n_p)$  (2.11)

กำหนดให้  $\rho(x)$  = ความหนาแน่นของ space charge ทั้งหมด  
 $\epsilon_s$  = ค่า permittivity ของสารกึ่งตัวนำ  
 $N_D^+$  = ความหนาแน่นของไอออนสารเจือผู้ให้  
 $N_A^-$  = ความหนาแน่นของไอออนสารเจือผู้รับ

ถ้าพิจารณาที่ภายในเนื้อสารนอกเหนือบริเวณพื้นผิว จะพบสภาพเป็นกลางของประจุไฟฟ้า นั่นคือ

จะได้  $\rho(x) = 0 \quad \longrightarrow \quad \psi = 0$  (2.12)

ดังนั้น สมการ Poisson จะได้  $N_D^+ - N_A^- = n_{p0} - p_{p0}$  (2.13)

อินทิเกรตสมการ (2.13) ตั้งแต่เนื้อสารจนถึงพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[ p_{p0} (e^{-\beta\psi} - 1) - n_{p0} (e^{\beta\psi} - 1) \right] \quad (2.14)$$

อินทิเกรตสมการ (2.13) ตั้งแต่เนื้อสารจนถึงพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ

$$\int_0^x \frac{\partial \psi}{\partial x} \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) dx = -\frac{q}{\epsilon_s} \int_0^x \left[ p_{p0} (e^{-\beta\psi} - 1) - n_{p0} (e^{\beta\psi} - 1) \right] dx \quad (2.15)$$

กำหนดให้ ค่าสนามไฟฟ้า;  $E = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$  เพราะฉะนั้นจะได้

$$E^2 = \left( \frac{2kT}{q} \right)^2 \left( \frac{q p_{p0} \beta}{2\epsilon_s} \right) \left[ (e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} (e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1) \right] \quad (2.16)$$

และกำหนดให้  $L_D$  (the extrinsic Debye length) สำหรับโฮล และค่า  $F\left(\beta\psi, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_D \equiv \sqrt{\frac{2kT\epsilon_s}{p_{po}q^2}} \equiv \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qp_{po}\beta}} \quad (2.17)$$

และ

$$F\left(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \equiv \left[ \left( e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1 \right) + \frac{n_{po}}{p_{po}} \left( e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1 \right) \right]^{1/2} \geq 0 \quad (2.18)$$

ดังนั้นจะได้ค่าสนามไฟฟ้าเป็น

$$E = -\frac{\partial\psi}{\partial x} = \pm \frac{2kT}{qL_D} F\left(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \quad (2.19)$$

จะมีค่าเป็นบวกเมื่อ  $\psi > 0$  และมีค่าเป็นลบเมื่อ  $\psi < 0$  และสำหรับค่าสนามไฟฟ้าที่พื้นผิว ( $E_s$ ) จะมีค่าดังสมการที่ 2.20 เมื่อให้ค่า  $\psi = \psi_s$

$$E_s = \pm \frac{2kT}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \quad (2.20)$$

และจากกฎของเกาส์ จะได้ค่า space charge ดังนี้

$$Q_s = \epsilon_s E_s = \mp \frac{2\epsilon_s kT}{qL_D} F\left(\beta\psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \quad (2.21)$$

ในการหาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฮล ;  $\Delta p$  และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ;  $\Delta n$  ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อค่าศักดา  $\psi$  ที่พื้นผิวเปลี่ยนตั้งแต่ศูนย์ถึงค่า  $\psi_s$  จะต้องคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

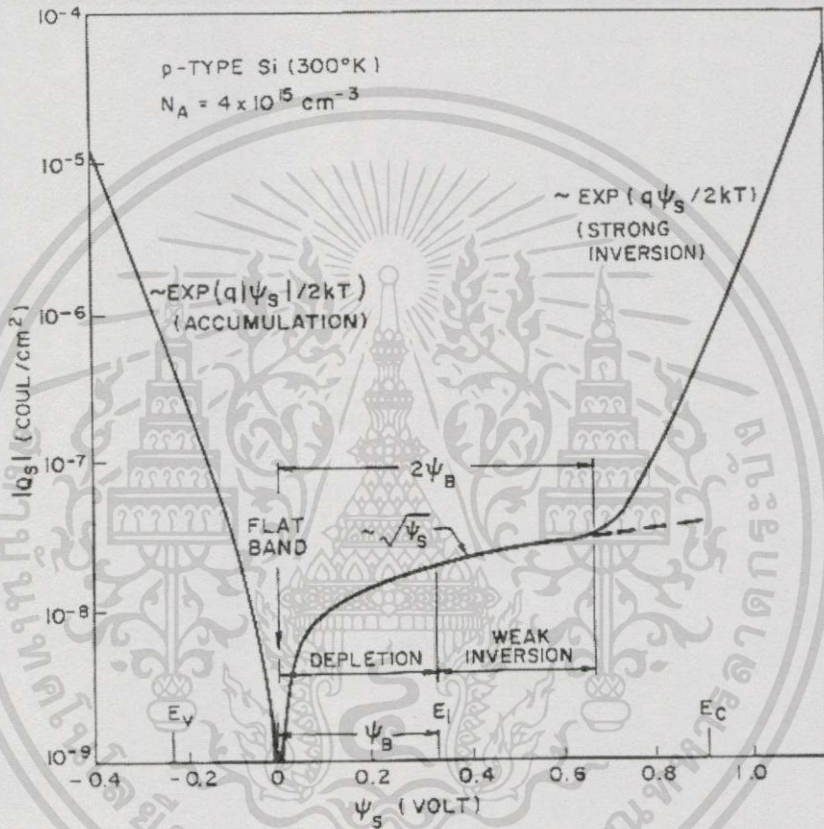
$$\begin{aligned} \Delta p &= p_{po} \int_0^\infty (e^{-\beta\psi} - 1) dx \\ &= \frac{qp_{po}L_D}{2kT} \int_{\psi_s}^0 \frac{(e^{-\beta\psi} - 1)}{F\left(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)} d\psi \quad \text{cm}^{-2} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\Delta n = n_{po} \int_0^\infty (e^{\beta\psi} - 1) dx$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{q n_{po} L_D}{2kT} \int_{\psi_s}^0 \frac{(e^{\beta\psi} - 1)}{F\left(\beta\psi, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)} d\psi \quad \text{cm}^{-2} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.18 และ 2.21 จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ space charge :  $Q_s$  อยู่ในฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ :  $\psi_s$  ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.8 ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีสามารถแยกพิจารณาได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น space charge เทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิว โดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี  $N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ที่อุณหภูมิห้อง

1. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า  $\psi_s$  เป็นลบแล้ว ความหนาแน่นของ space charge จะเป็นบวก หรือ  $Q_s \approx \exp(q|\psi_s|/2kT)$  ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณสะสมประจุ (Accumulation region) นั้นเอง
2. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า  $\psi_s = 0$  แล้ว ค่า  $Q_s = 0$  ด้วย หรืออยู่ในช่วงระดับพลังงานแบนราบ
3. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า  $0 < \psi_s < \psi_B$  แล้ว ค่า  $Q_s$  เป็นลบ หรือ  $Q_s \approx \sqrt{\psi_s}$  นั่นคือกรณีช่วงปลดออกประจุพาหะ
4. เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า  $\psi_s > \psi_B$  แล้ว ค่า  $Q_s \approx -\exp(q\psi_s/2kT)$  เป็นกรณีช่วงส่วนกลับของประจุพาหะ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟข้างต้น จะได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\psi_s(\text{inv}) \simeq 2\psi_B = \frac{2kT}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \quad (2.24)$$

ส่วนค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณ space-charge ของสารกึ่งตัวนำสามารถหาได้จาก

$$C_D \equiv \frac{\partial Q_s}{\partial \psi_s} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} \frac{[1 - e^{-\beta\psi_s} + (n_{p0}/p_{p0})(e^{\beta\psi_s} - 1)]}{F(\beta\psi_s, n_{p0}/p_{p0})} \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.25)$$

ถ้าพิจารณาในช่วงระดับพลังงานแบนราบ ( $\psi_s = 0$ ) ค่า  $C_D$  จะมีค่า

$$C_D(\text{flat-band}) = \epsilon_s / L_D \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.26)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด เป็นเพียงการพิจารณาที่สารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับชั้นฉนวนเท่านั้น แต่ถ้าพิจารณาโดยรวมทั้งโครงสร้าง MIS ในอุดมคติจากรูปที่ 2.9(ก) แล้ว จะเห็นว่า ศักดาไฟฟ้า ( $v$ ) ที่ให้ตกคร่อมไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคตินี้ ทำให้เกิดความแตกต่างของฟังก์ชันงานขึ้นเนื่องจากเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมภายในโครงสร้างนี้ 2 ส่วนย่อยได้แก่ ศักดาตกคร่อมชั้นฉนวน ( $v_i$ ) และศักดาตกคร่อมที่พื้นผิวสัมผัสของชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ( $\psi_s$ ) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.27

$$v = v_i + \psi_s \quad (2.27)$$

โดยที่

$$v_i = \frac{Q_s d}{\epsilon_i} \left( \equiv \frac{Q_s}{C_i} \right) \quad (2.28)$$

และค่า  $Q_s$  ในที่นี้สามารถหาค่าจากการกระจายของประจุด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประจุกับระยะดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9(ข) โดยมีความหนาแน่นของประจุในระบบดังสมการที่ 2.29

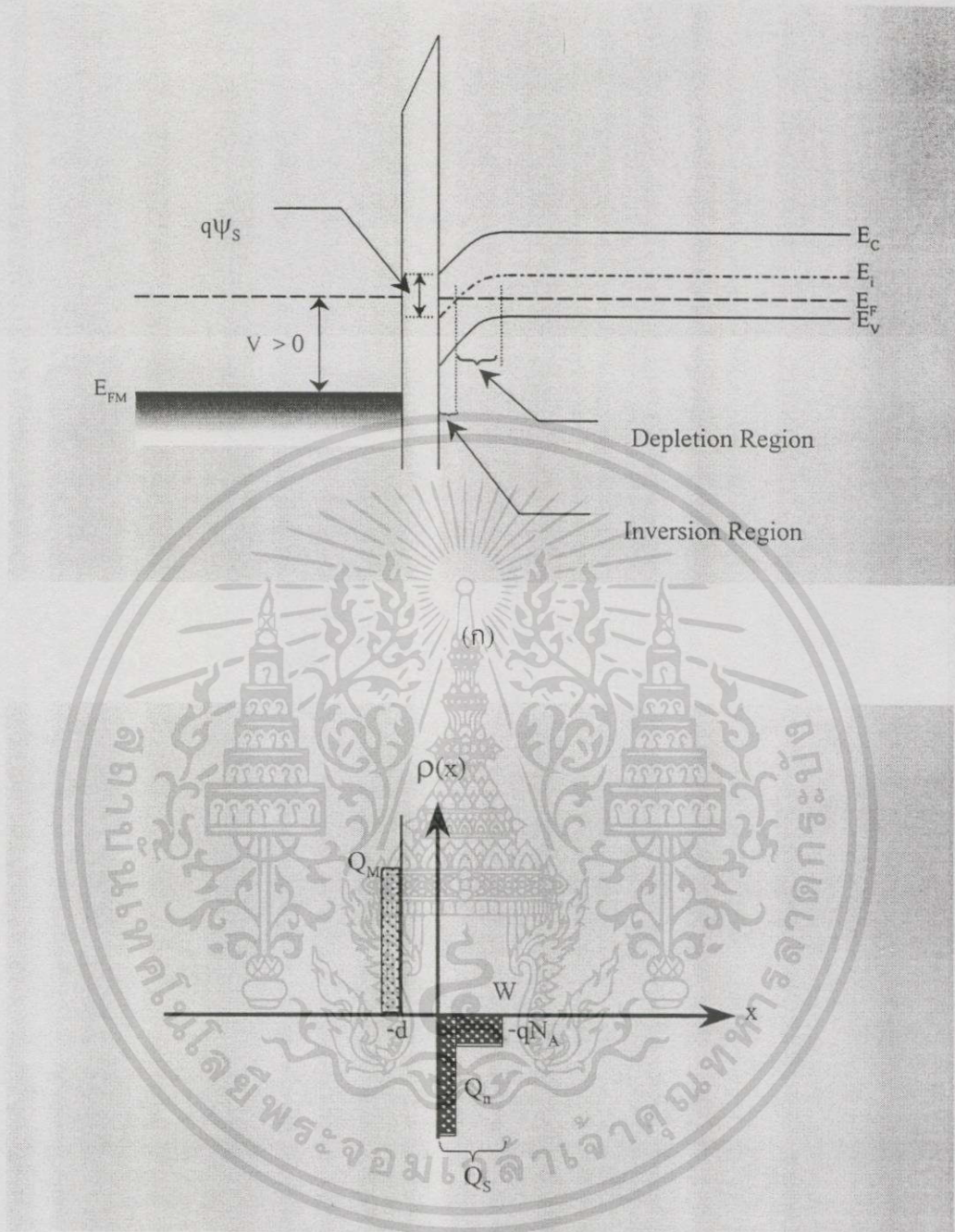
$$Q_M = Q_n + qN_A W = Q_s \quad (2.29)$$

โดยที่  $Q_M$  = ความหนาแน่นประจุที่ชั้นโลหะ

$Q_n$  = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณส่วนกลับประจุ

$qN_A W$  = ความหนาแน่นของไอออนผู้รับในบริเวณ space-charge ความกว้าง  $w$

$Q_s$  = ความหนาแน่นของประจุที่รอยสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำทั้งหมด



(ข)

รูปที่ 2.9 (ก) แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ  
(ข) การกระจายของประจุภาวะส่วนกลับประจุของไดโอด

นอกจากนั้นจะเห็นได้อีกว่า ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมด ( $C$ ) ของไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าที่ชั้นฉนวน ( $C_i$ ) อนุกรมอยู่กับความจุไฟฟ้าบริเวณ space-charge ที่ชั้นสารกึ่งตัวนำ ( $C_p$ ) ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.30)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.29 จะได้ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ระดับพลังงานแบนราบ (flat-band condition) หรือที่  $\psi_s = 0$  ดังนี้

$$C_{\text{FB}}(\psi_s = 0) = \frac{\epsilon_i}{d + \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\epsilon_i}{\epsilon_s} \right) L_D} = \frac{\epsilon_i}{d + \left( \frac{\epsilon_i}{\epsilon_s} \right) \sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{p_p q^2}}} \quad (2.31)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร โดยจะแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ นั่นคือ กระบวนการเตรียมฐานรอง และกระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ ดังจะกล่าวต่อไปนี้

#### 3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การทดลองนี้ เลือกใช้ซิลิกอนเป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) มีความหนาประมาณ 400 ไมครอน ก่อนที่จะนำฐานรองซิลิกอนนี้ไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องทำความสะอาดเบื้องต้น และเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอนดังนี้

##### 3.1.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอน

- กำจัดเศษฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกบนผิวหน้าซิลิกอนในน้ำ DI (Deionized water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง
- ลอกชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าฐานรองด้วยสารละลายกรด HF 5% แล้วล้างออกด้วยน้ำ DI
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้าโดยการต้มด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$  acid)
- ล้างกรด  $\text{HNO}_3$  ด้วยการต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene)
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง

##### 3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยคริมเพชร

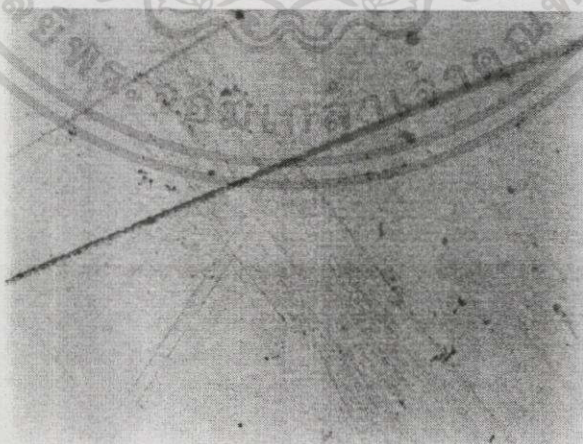
หลังจากทำความสะอาดเบื้องต้นกับฐานรองซิลิกอนครบทุกขั้นตอนตามหัวข้อ 3.1.1 แล้วจะทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอนก่อนนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เพื่อเป็นการกระตุ้นฐานรองให้มีความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรเร็วขึ้น [15] โดยในการทดลองนี้ เลือกใช้การขัดด้วยคริมเพชรเป็นการเตรียมผิวหน้าฐานรอง คริมเพชรที่ใช้ขัดมีขนาดของเมสต์ผลึก 0.25 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนอีกครั้งเพื่อล้างคริมเพชรออกด้วยวิธีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ครีมเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิกอนขนาดเมล็ดผลึก 0.25 ไมครอน

- ต้มแผ่นซิลิกอนในสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนเพื่อล้างครีมเพชรออก
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนออกด้วยอะซีโตนโดยสั่นในเครื่องสั่นความถี่สูง
- ล้างอะซีโตนออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- กำจัดชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นอีกครั้งด้วยสารละลายกรด HF 5%
- ล้างกรด HF 5% ออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง

จากนั้น นำแผ่นซิลิกอนนี้ไปตรวจสอบรอยขีดที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะผิวหน้าที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชรนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นฐานรองที่พร้อมจะนำไปสังเคราะห์ฟิล์มต่าง ๆ ได้ต่อไป



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังจากขัดด้วยครีมเพชรขนาดเมล็ด 0.25 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

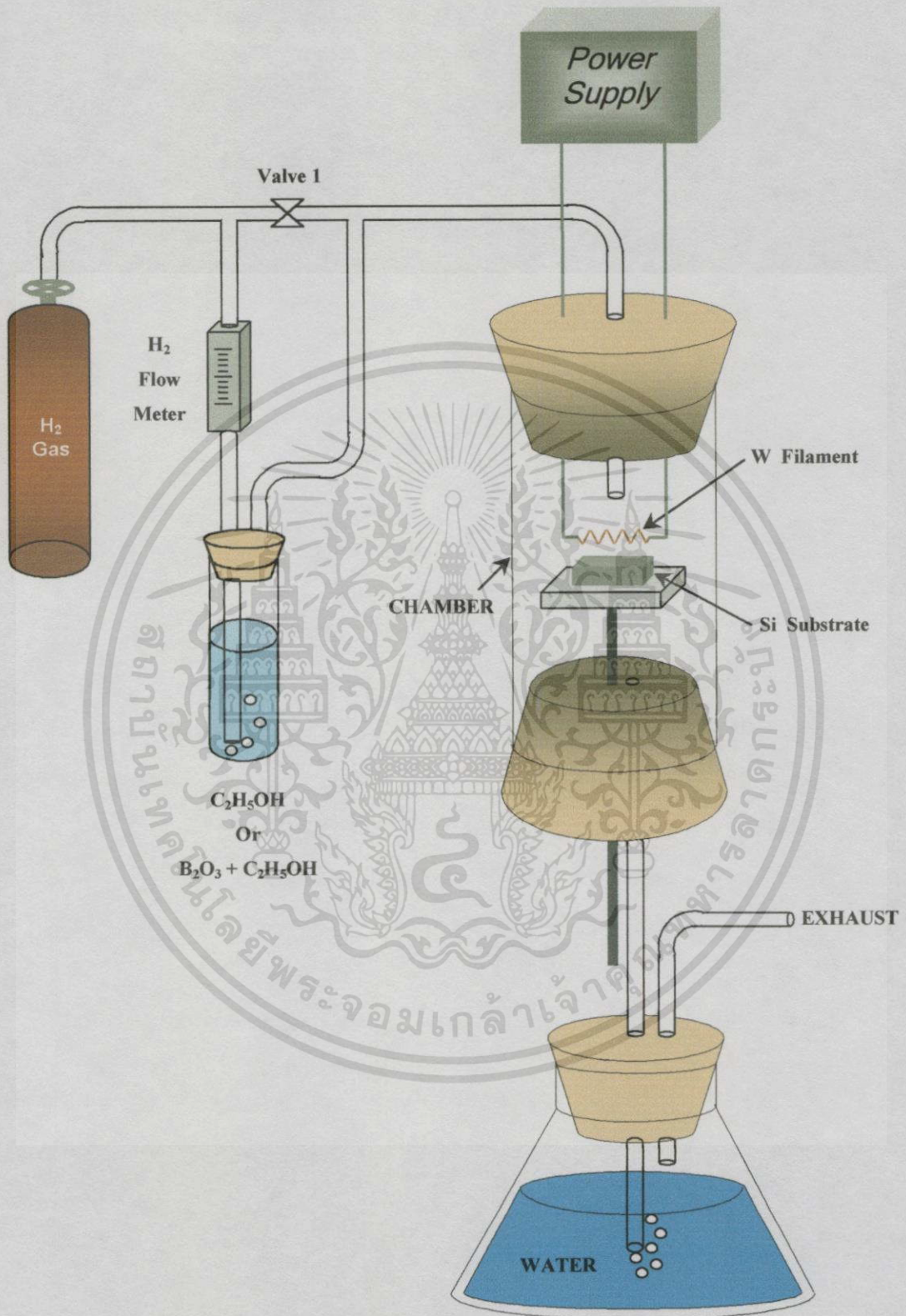
การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรทั้งชนิดพีและชนิดอินทรินซิกในการวิจัยนี้ จะอาศัยวิธี CVD แบบ Hot-Filament (HFCVD) ด้วยชุดเครื่องมือในรูปที่ 3.3 โดยจะมีไดอะแกรมของระบบ CVD ที่ใช้อย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

- ปล่องก๊าซไฮโดรเจนจากถังผ่านวาล์ว 1 เข้าไปใน Chamber ชั่วเวลาหนึ่งเพื่อให้ภายใน chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว
- ปิดวาล์ว 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านแหล่งจ่ายเป็นตัวพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้า chamber ด้วยอัตราการไหลคงที่ควบคุมโดย Flow meter
- ค่อยจ่ายกระแสอย่างช้า ๆ ให้กับไส้หลอดทั้งสแตนด์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ 2000°C
- ปรับระยะห่างระหว่างฐานรองซิลิกอนกับไส้หลอดทั้งสแตนด์ให้ได้ระยะที่เหมาะสม
- สร้างฟิล์มเพชรตามระยะเวลาที่ต้องการ
- เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างแล้วจึงค่อย ๆ ลดระยะของฐานรองซิลิกอนให้ต่ำลงจากไส้หลอดมาก ๆ พร้อมกับลดการจ่ายกระแสอย่างช้า ๆ
- ปิดถังก๊าซไฮโดรเจน และรอนจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนในระบบที่ยังค้างอยู่ออกจนหมด
- นำชิ้นงานที่ได้ไปใช้ในกระบวนการถัดไป หรือไปตรวจสอบต่อได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โคอะเกอร์ระบบ CVD อย่างง่าย ๆ ที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 กระบวนการกำจัดชั้นฐานรองซิลิกอน

เป็นขั้นตอนการกำจัดหรือกัดฐานรองซิลิกอนออกให้หมดก่อนจะนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปทำการเคลือบชั้นโลหะ เพื่อลดผลของรอยต่อระหว่างฐานรองซิลิกอนกับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้วิธีการกัด (etching) ด้วยสารละลาย KOH ด้วยชุดกัด แล้วทำการล้างสารละลาย KOH ออกโดยการต้มในน้ำ DI และลอกชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นด้วยสารละลาย HF 5% ล้างด้วยน้ำ DI และเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง

### 3.4 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

ในกระบวนการนี้จะมีการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร 2 ลักษณะ นั่นคือ การสร้างรอยสัมผัสแบบขอตต์กีโดยใช้โลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัสบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค และการสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกโดยใช้โลหะทังสเตนและทองคำเป็นขั้วสัมผัส ตามที่กล่าวเอาไว้ข้างต้นหัวข้อ 1.4 โดยจะมีขั้นตอนการสร้างดังจะกล่าวต่อไปนี้

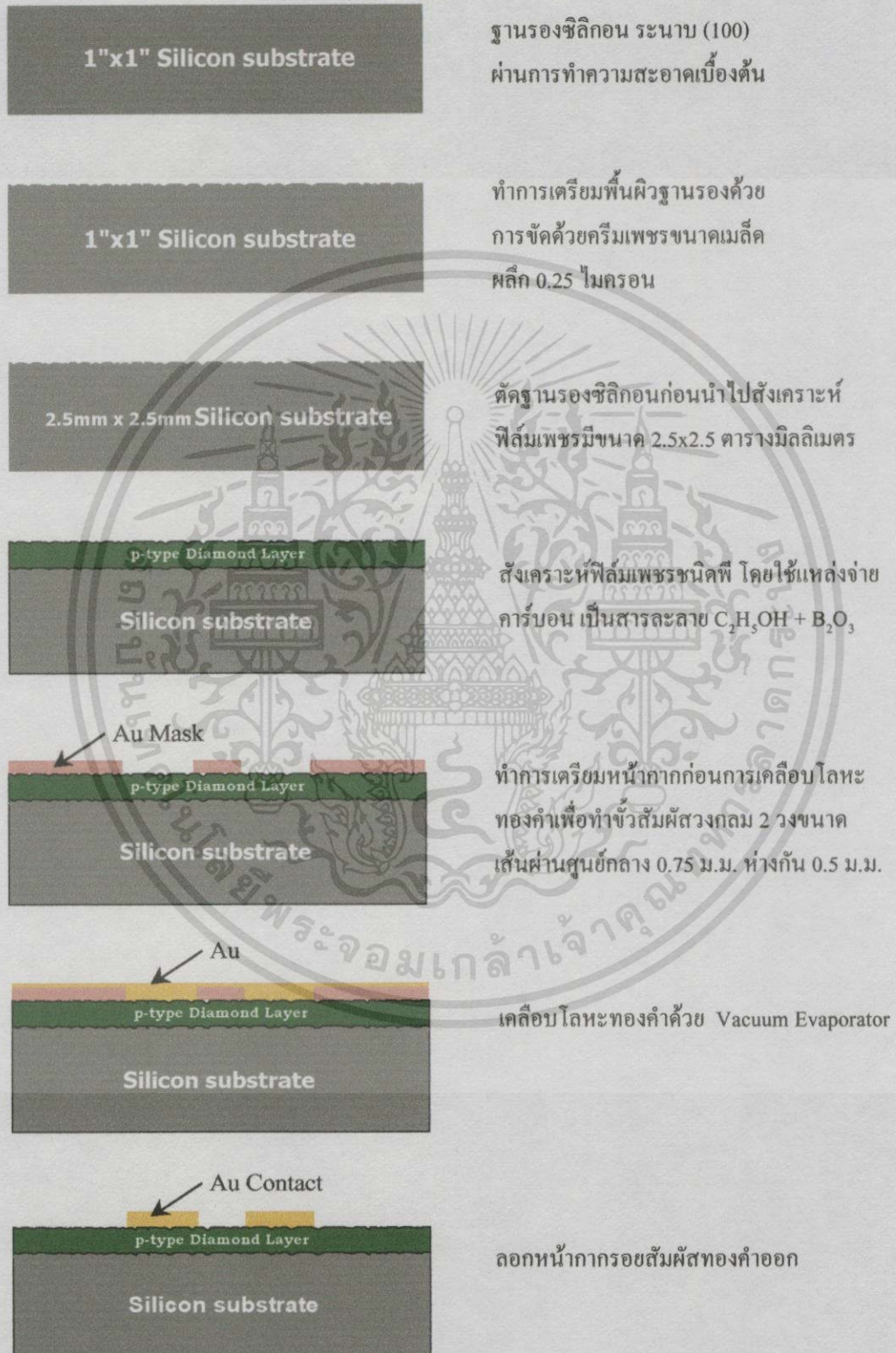
#### 3.4.1 การสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิก

##### 3.4.1.1 การสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกด้วยโลหะทองคำ

ในขั้นตอนนี้ใช้โลหะทองคำสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิก เพื่อทำการตรวจสอบหาค่าความหนาแน่นของโพลีที่ทำการเติมสารเจือขณะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีขึ้น โดยที่รอยสัมผัสของทองคำนี้มีลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร 2 ขั้วห่างกันระยะ 0.5 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิกอนชนิดพี ระบาย (100) มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับโบรอนไดรอกไซด์ โดยในที่นี้ใช้อัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm ดังแสดงวิธีการหาคำนวณหาอัตราส่วน B:C ในภาคผนวก ค
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy, SEM และ X-ray Diffraction ดังแสดงในภาคผนวก ก
- ถ้าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เหมาะสม จึงทำการเคลือบโลหะทองคำเพื่อทำขั้วสัมผัสรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มม. 2 ขั้วห่างกัน 0.5 มม. ด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator ดังแสดงในภาคผนวก ง-1

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.5 รอยสัมผัสที่สร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีต่อไป ด้วยเครื่อง Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test System) ดังแสดงในภาคผนวก ง-2



**รูปที่ 3.5** ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.2 การสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกด้วยโลหะเงิน

โดยจะใช้โลหะกาวเงินเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกกับฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อเป็นขั้วโลหะที่จะใช้ในการนำอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าในแนวเนื้อสาร (Bulk) วิธีการสร้างรอยสัมผัสนี้สามารถทำได้โดยง่าย ๆ ด้วยการทาโลหะเงินลงบนฟิล์มเพชรชนิดพี แล้วปล่อยให้แห้ง

### 3.4.2 การสร้างรอยสัมผัสแบบขอตัก

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า ในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้โลหะอลูมิเนียมเป็นรอยสัมผัสแบบขอตักกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก และฟิล์มเพชรชนิดพี โดยขนาดของขั้วสัมผัสมีลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.75 มิลลิเมตร โดยมีวิธีการสร้างรอยต่อดังนี้

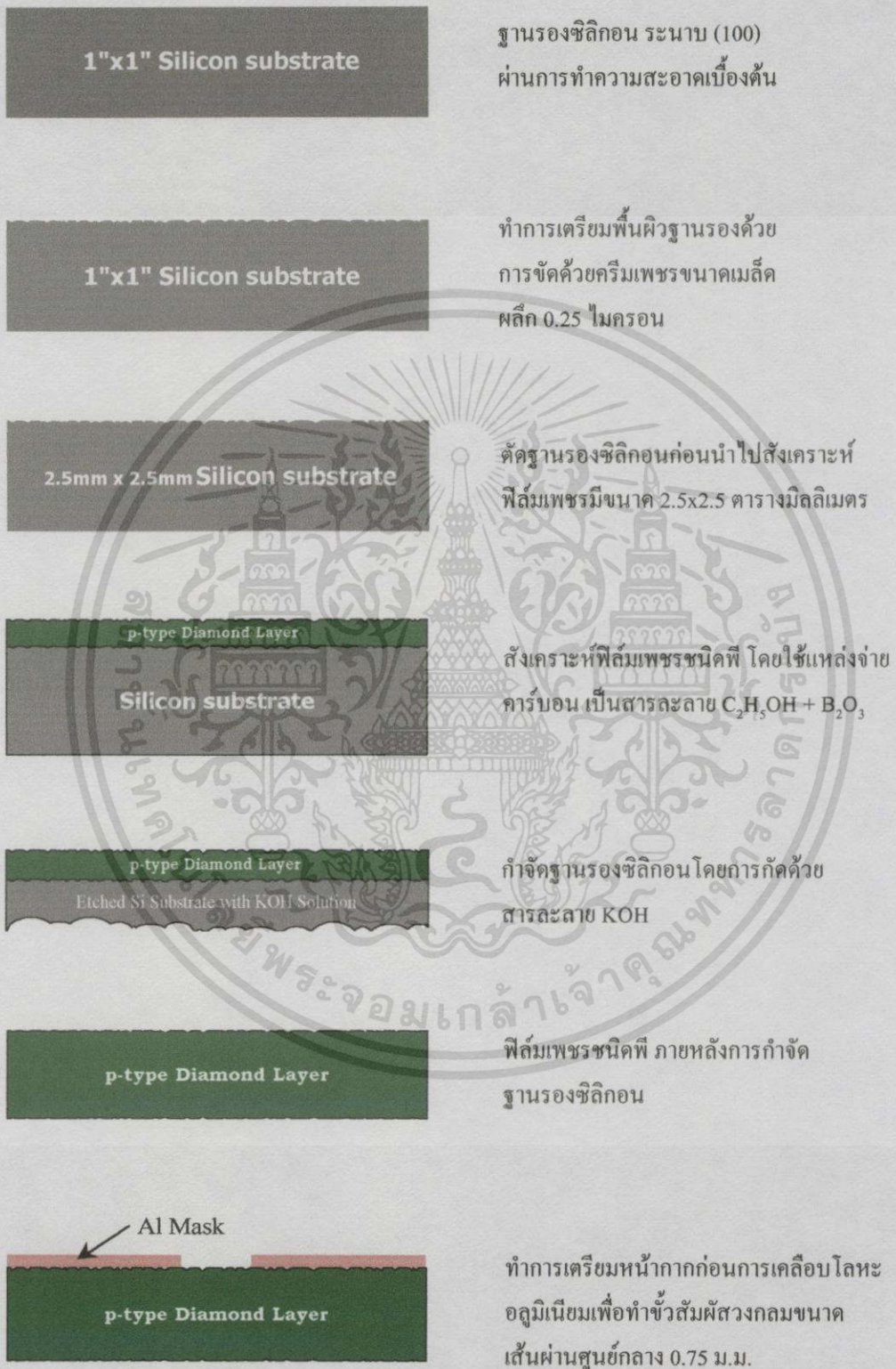
- ทำการเตรียมชั้นหน้าการปูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร
- ทำความสะอาดและลอกออกไซด์ของสวดอลูมิเนียมก่อนนำไปใช้งาน
- เคลือบชั้น โลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator

## 3.5 กระบวนการสร้างขอตักโคโอดจากฟิล์มเพชร

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอตักโคโอด เพื่อเป็นแนวทางของการพิจารณาและเปรียบเทียบกับผลการทดลองของการนำขอตักโคโอดนี้โดยพัฒนาเป็นโคโอดโครงสร้าง MIS โดยมีลำดับขั้นตอนการสร้างขอตักโคโอดดังนี้

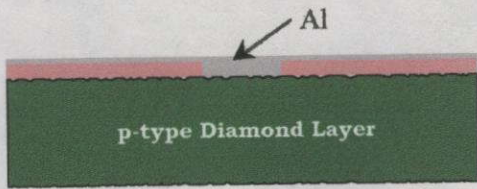
- นำแผ่นฐานรองซิลิกอนชนิดพี ระบาย (100) มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอตลอกฮอลล์กับ โบรอน ไตรออกไซด์ โดยในที่นี้ใช้อัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm
- กำจัดเขม่าคาร์บอนหรือพวกกราไฟต์ด้วยการต้มด้วยสารละลายของ  $H_2SO_4 + CrO_4$  แล้วล้างออกด้วยการต้มในสารละลายกรด  $HCl + HNO_3$  ต้มในน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy , X-ray Diffraction และ SEM
- ถ้าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เหมาะสม จึงทำการกำจัดฐานรองซิลิกอนออกตามหัวข้อที่ 3.3
- ทำการสร้างรอยสัมผัสขอตักด้วยโลหะอลูมิเนียม ตามหัวข้อที่ 3.4.2
- ทำการสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกด้วยโลหะกาวเงิน ตามหัวข้อที่ 3.4.1.2

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.6 โดยชอตต์กีไดโอดที่สร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

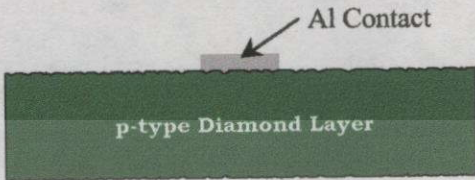


**รูปที่ 3.6** ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างชอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร

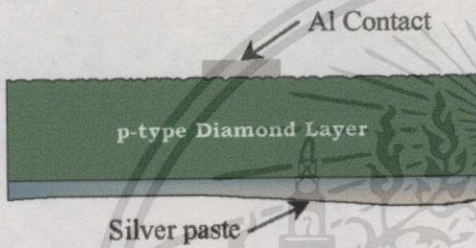
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วย Vacuum Evaporator



ลอกชั้นหน้ากากออก



ทากาวเงินบริเวณด้านหลังของฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อทำขั้วสัมผัสโอห์มิก

รูปที่ 3.6 (ต่อ)

### 3.6 กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขต่าง ๆ

#### 3.6.1 ศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เมื่อมีความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกต่าง ๆ กัน มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิกอนชนิดพี ระบาย <100> มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์ โดยในที่นี้ใช้อัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm
- สร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกทับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ตามวิธีหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นแอลกอฮอล์ โดยแปรความหนาของชั้นอินทรีนซิกตามตารางที่ 3.1 และจะได้ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7

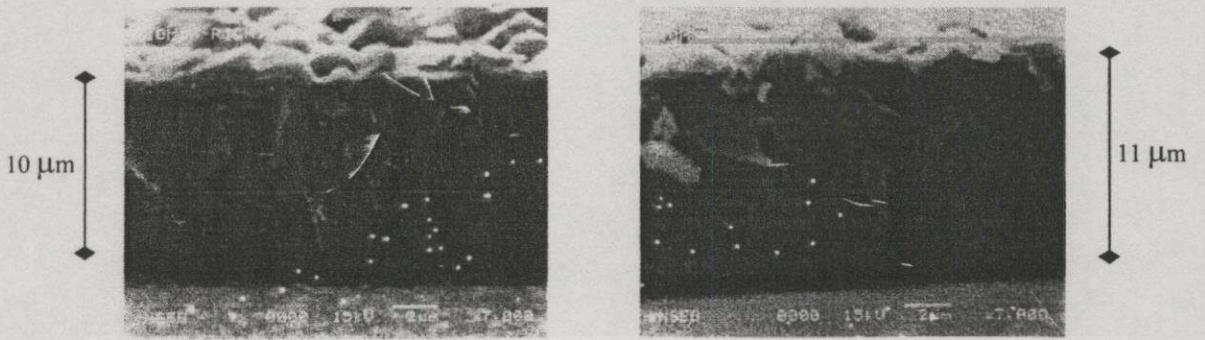
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ใช้ในการทดลอง

อัตราส่วน B:C (ppm)	ความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก (นาท)			
10	10	20	30	40
50	10	20	30	40
100	10	20	30	40
500	10	20	30	40
1000	10	20	30	40

- กำจัดเขม่าคาร์บอนหรือพวกกราไฟต์ด้วยการต้มด้วยสารละลายของ  $H_2SO_4 + CrO_4$  ล้างออกด้วยการต้มในสารละลายกรด  $HCl + HNO_3$  ต้มในน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy , X-ray Diffraction และ SEM พร้อมกับตรวจสอบความหนาของฟิล์มเพชรชั้นอินทรีนซิกที่สร้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะได้ความหนาเป็น  $1 \mu m$ ,  $2 \mu m$ ,  $3 \mu m$  และ  $4 \mu m$  เมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์นาน 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที และ 40 นาที ตามลำดับ
- ถ้าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เหมาะสม จึงทำการกำจัดฐานรองซิลิกอนออกตามหัวข้อที่ 3.3
- ทำการสร้างรอยสัมผัสขอดีด้วย โลหะอะลูมิเนียม ตามหัวข้อที่ 3.4.2
- ทำการสร้างรอยสัมผัสไอหมีคด้วย โลหะกาวเงิน ตามหัวข้อที่ 3.4.1.2

ก่อนสร้างชั้นอินทรีนซิก

หลังสร้างชั้นอินทรีนซิก



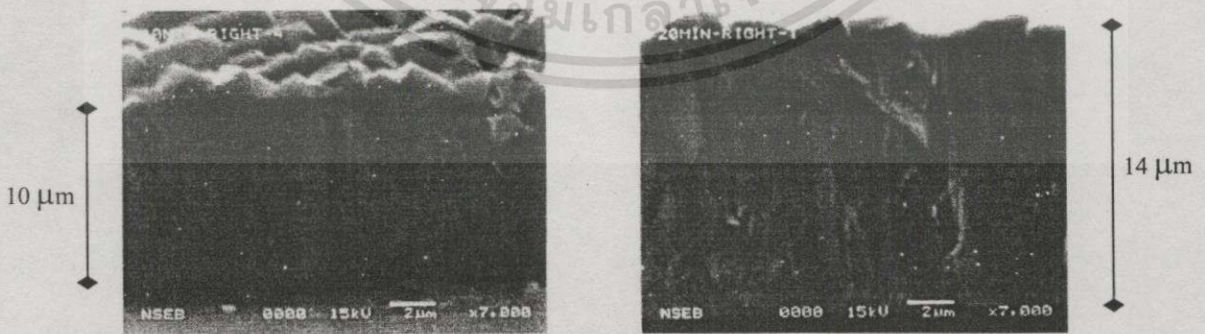
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 3.7 ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สร้างทับฟิล์มเพชรชนิดพี

ก) 10 นาที ได้ 1 ไมครอน

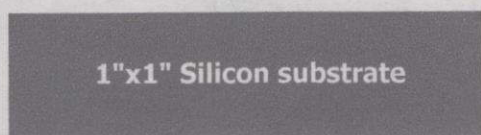
ข) 20 นาที ได้ 2 ไมครอน

ค) 30 นาที ได้ 3 ไมครอน

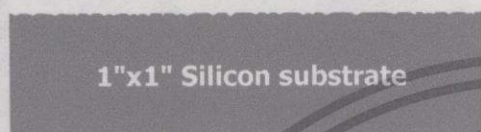
ง) 40 นาที ได้ 4 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.8 โดยไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อ



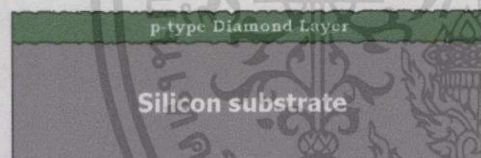
ฐานรองซิลิกอน ระบาย (100)  
ผ่านการทำความสะอาดเบื้องต้น



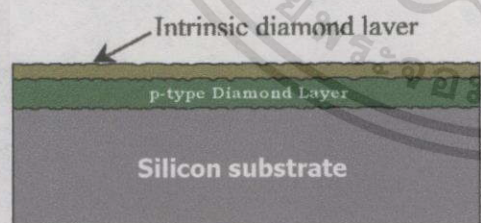
ทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วย  
การขัดด้วยครีมเพชรขนาดเม็ดเล็ก  
ผลึก 0.25 ไมครอน



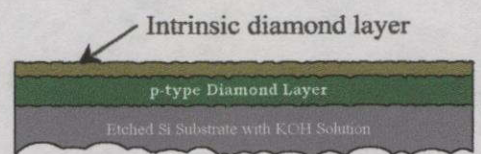
ตัดฐานรองซิลิกอนก่อนนำไปสังเคราะห์  
ฟิล์มเพชรมีขนาด 2.5x2.5 ตารางมิลลิเมตร



สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่าย  
คาร์บอน เป็นสารละลาย  $C_2H_5OH + B_2O_3$



สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก โดยใช้  
แหล่งจ่ายคาร์บอน เป็นสารละลาย  $C_2H_5OH$



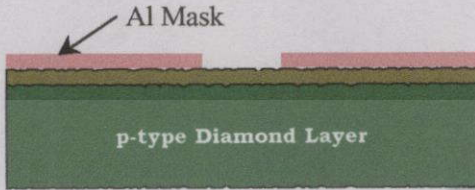
กำจัดฐานรองซิลิกอนโดยการกัดด้วย  
สารละลาย KOH

รูปที่ 3.8 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไดโอด โครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

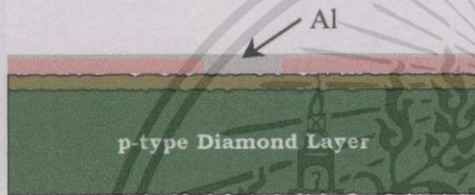
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



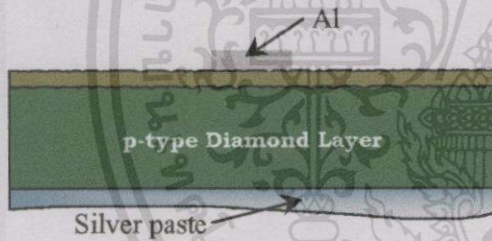
รอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และชนิดพี ภายหลังจากการจัดฐานรองซิลิกอน



ทำการเตรียมหน้ากากก่อนการเคลือบโลหะ อลูมิเนียมเพื่อทำขั้วสัมผัสวงกลมขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มม.



เคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วย Vacuum Evaporator



ลอกหน้ากากออกและทากาวเงินบริเวณด้านหลัง ของฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อทำขั้วสัมผัสโอห์มิก

รูปที่ 3.8 (ต่อ)

3.6.2 ศึกษาผลของอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด โครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เมื่อมีค่าอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีต่าง ๆ กัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

- เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 และ 2 ของหัวข้อ 3.6.1
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี ตามหัวข้อที่ 3.2
- สร้างชั้นฟิล์มชนิดอินทรีนซิกทับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยมีแหล่งจ่าย เป็นแอลกอฮอล์ ในที่นี้ใช้ความหนาคงที่เป็น 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที และ 40 นาที
- เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 5-8 ของหัวข้อ 3.6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีที่ใช้ในการทดลอง

ความหนาของชั้นอินทรีนซิค ( $\mu\text{m}$ )	อัตราส่วน B:C (ppm)				
1	10	50	100	500	1000
2	10	50	100	500	1000
3	10	50	100	500	1000
4	10	50	100	500	1000

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพเช่นเดียวกันกับรูปที่ 3.8 โดยไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างเสร็จตามเงื่อนไขดังกล่าว จะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

### 3.6.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เมื่อทำงานในที่อุณหภูมิสูง ๆ โดยมีขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.6.1 โดยเลือกใช้อัตราส่วน B:C 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค 40 นาที่เป็นเงื่อนไขคงที่ แล้วนำไดโอดที่สร้างเสร็จไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อไดโอดอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 27°C (อุณหภูมิห้อง), 100°C, 150°C, 200°C และ 250°C

### 3.6.4 ศึกษาค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS

ในส่วนนี้เป็นการตรวจสอบค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS เมื่อมีเงื่อนไขการสร้างต่าง ๆ กัน โดยจะพิจารณาไดโอดที่มีอัตราส่วน B:C เป็น 100 ppm และ 500 ppm เมื่อมีความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคต่างกันเป็น 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  และ 4  $\mu\text{m}$

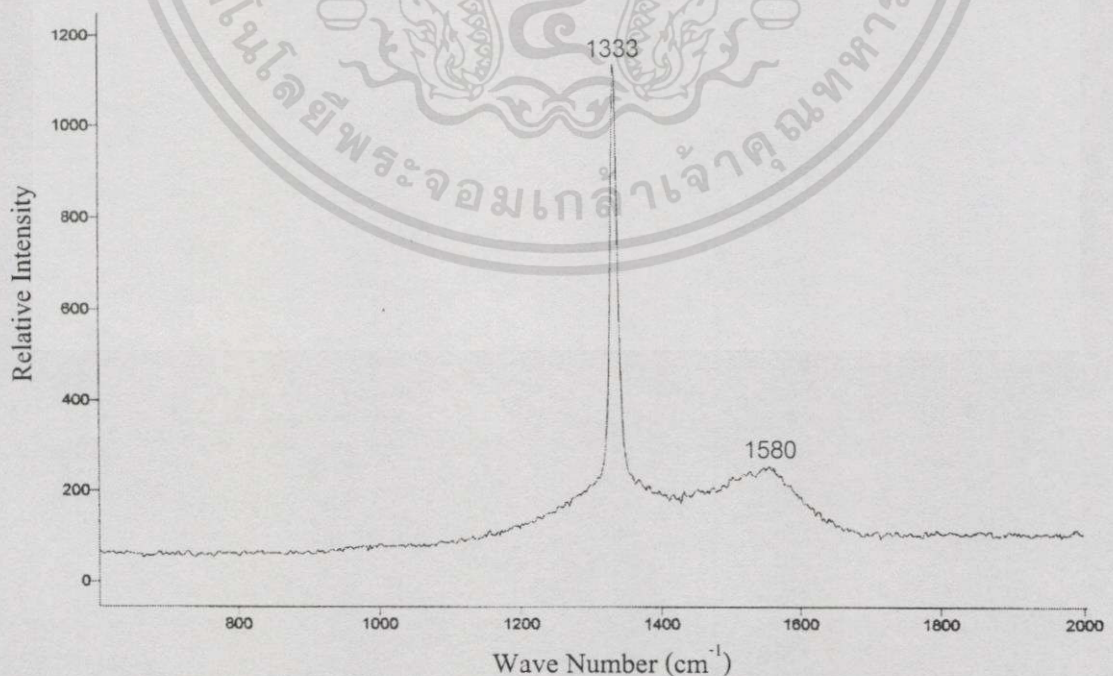
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างตามลำดับขั้นตอน และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดไว้เพื่อทดลองและตรวจสอบในวิทยานิพนธ์นี้ไว้แล้วในบทที่ 3 ในบทนี้จึงจะเสนอถึงผลการทดลองพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

สำหรับในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ก่อนนำไปสร้างต่อไปเป็นไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขอื่น ๆ อีกต่อไป โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรนี้จะอาศัย Raman Spectroscopy, Scanning Electron Microscopy และ X-Ray Diffraction เพื่อตรวจสอบความเป็นเพชร ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร และระนาบของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี HFCVD ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1-4.3 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ค่ายอดของ Raman spectrum ที่วัดได้จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์นี้มีค่าอยู่ที่  $1333\text{ cm}^{-1}$  อย่างชัดเจน ซึ่งถือได้ว่าฟิล์มเพชรนี้มีค่าใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ (ค่ายอด Raman spectrum เท่ากับ  $1332\text{ cm}^{-1}$  จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 1) แม้ว่าจะมียอดของกราฟไฟต์ ( $1580\text{ cm}^{-1}$ ) รวมอยู่ด้วย แต่ความสูงยอดกราฟไฟต์ต่ำกว่ามาก นั่นคือฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรและมีปริมาณกราฟไฟต์ต่ำมาก



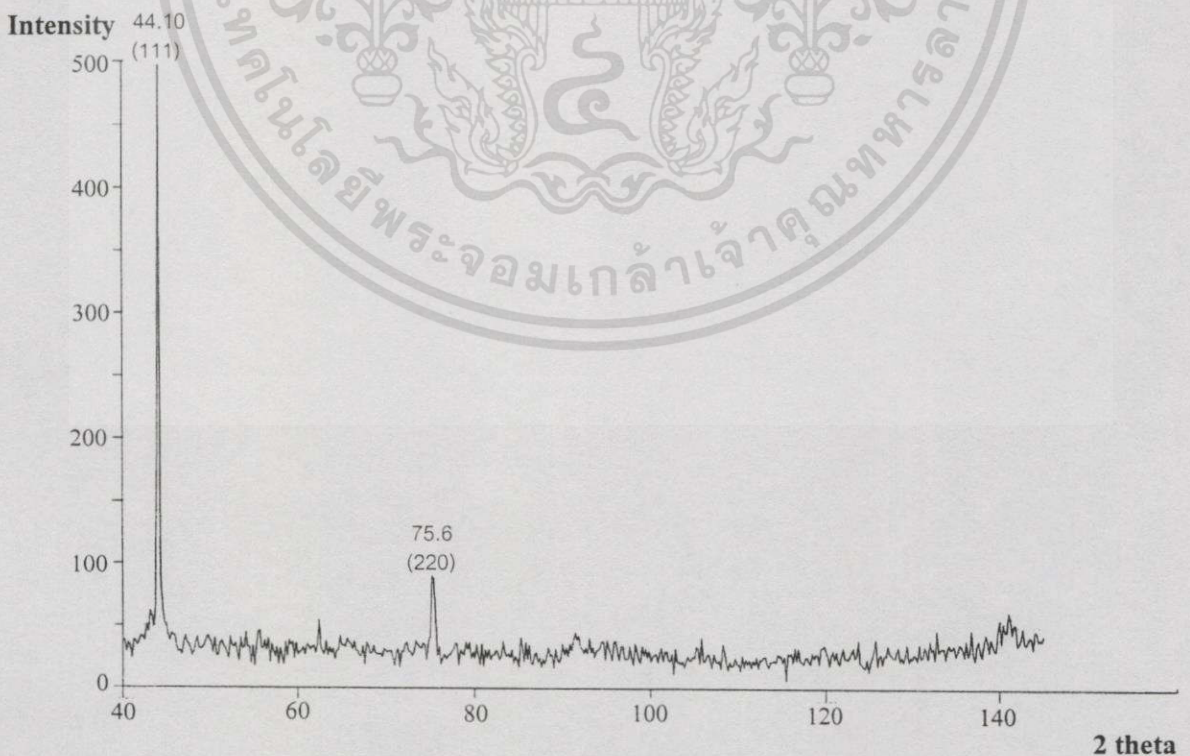
รูปที่ 4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ (111) ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD

นอกจากนั้น เมื่อทำการตรวจสอบด้วยวิธี SEM จะได้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างหนึ่งของฟิล์มเพชรทั้งชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดมีลักษณะเดียวกับฟิล์มเพชรระนาบ (111) ของรูปที่ 1.5 ข จากบทที่ 1 และหลังจากตรวจสอบระนาบของฟิล์มเพชรเหล่านี้ด้วยวิธี X-ray diffraction จะได้กราฟดังรูปที่ 4.3 ซึ่งยิ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ฟิล์มเพชรนี้มีคุณสมบัติเป็นผลึก เพราะฉะนั้นจากการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรทั้งหมดนี้ สามารถสรุปได้ว่า เป็นฟิล์มเพชรที่คุณสมบัติเหมาะสมเพียงพอกับการนำไปสร้างเป็นไดโอดโครงสร้าง MIS ต่อไปเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังที่กล่าวข้างต้นในบทที่ 3 แล้ว



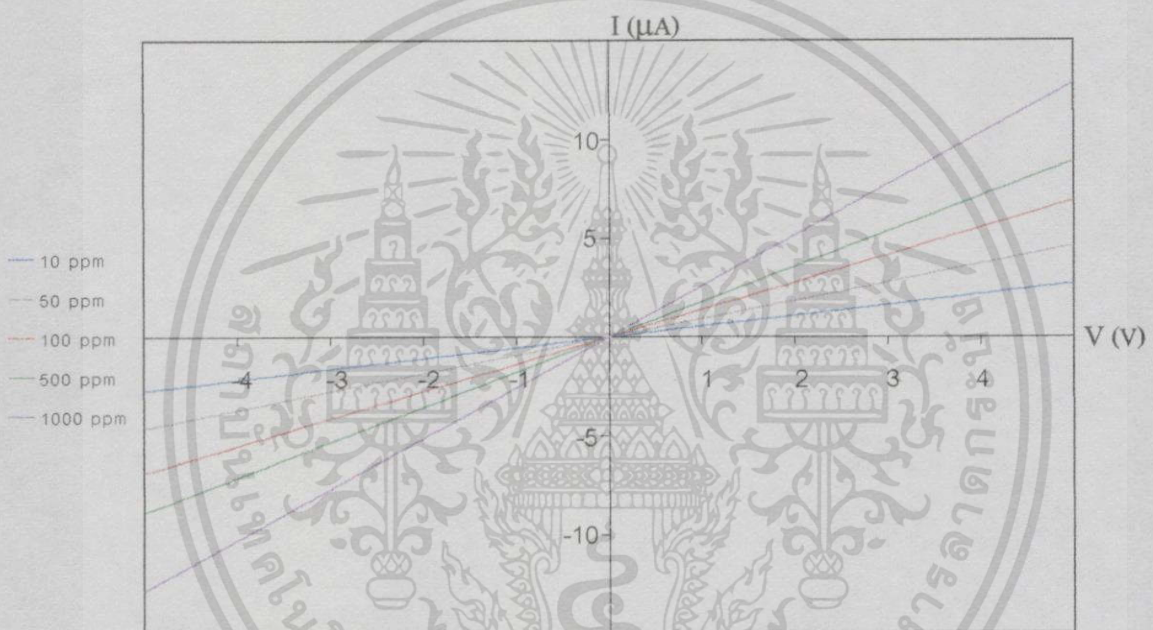
รูปที่ 4.3 ลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการตรวจสอบขอตักไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร

### 4.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ได้

หลังจากทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีจากการเติมสารเจือ โบรอนด้วยอัตราส่วน B:C 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm แล้วทดสอบฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี Seebeck effect พบว่า เจ็มของกัลวานอ์มีเตอร์มีการตอบสนองเบนเข็มไปในทิศทางบวก แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเพชรนี้เป็นฟิล์มเพชรชนิดพี หลังจากนั้นจึงทำขั้วสัมผัส โอห์มิกกับฟิล์มเพชรชนิดพีนี้ ด้วยโลหะทองคำเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพีนี้ โดยเมื่อให้แรงดันไบอัสกับทองคำแล้วจะได้คุณสมบัติดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี

จะเห็นได้ว่า ฟิล์มเพชรชนิดพีจะมีความต้านทานลดลงเป็นลำดับเมื่อเติมปริมาณสารเจือในฟิล์มเพชรเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานจากกราฟในรูปที่ 4.4 จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าพื้นฐานของฟิล์มเพชร ได้แก่ ค่าพิคคความต้านทาน (resistivity :  $\rho$ ) ค่าความหนาแน่นประจุโฮล (hole carrier density :  $p$ ) ระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ ( $E_F - E_V$ ) และค่าความหนาแน่นของโบรอนในสภาวะอุณหภูมิห้อง ( $27^\circ\text{C}$  หรือ  $300\text{ K}$ ) ได้จากสมการที่ 4.1 – สมการที่ 4.3 ซึ่งค่าทั้งหมดได้แสดงในตารางที่ 4.1 โดยจากการทดลองนี้ ขั้วสัมผัสทองคำมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.75 มิลลิเมตร ห่างกันระยะ 1 มิลลิเมตร และฟิล์มเพชรชนิดพีมีความหนา 10 ไมครอน

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.1)$$

$$p = \frac{1}{q\mu_h\rho} = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \quad (4.2)$$

$$N_A = p \left[ 1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right) \right] \quad (4.3)$$

โดยที่ 
$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi kT m_h^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรพื้นฐานต่าง ๆ ของฟิล์มเพชรชนิดพีจากการทดลอง

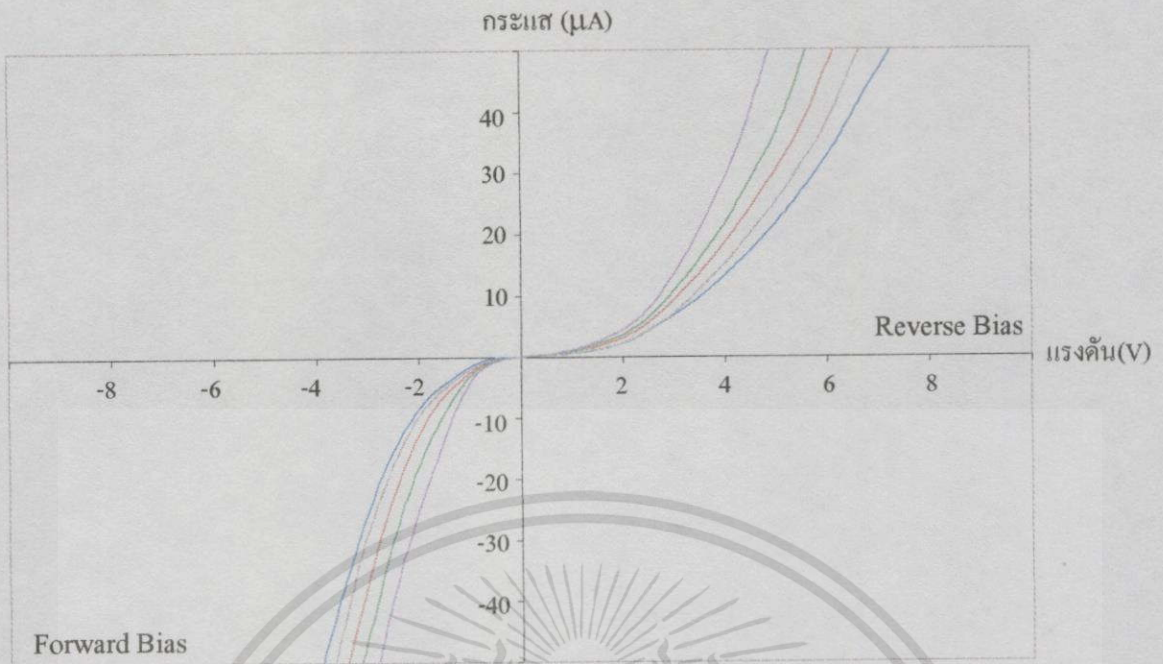
B:C (ppm)	10	50	100	500	1000
ค่าต่าง ๆ					
R ( $\Omega$ )	$1.833 \times 10^6$	$1.083 \times 10^6$	$7.235 \times 10^5$	$5.617 \times 10^5$	$3.889 \times 10^5$
$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	215.96	127.57	85.24	66.17	45.82
p ( $\text{cm}^{-3}$ )	$5.788 \times 10^{15}$	$9.799 \times 10^{15}$	$1.466 \times 10^{16}$	$1.889 \times 10^{16}$	$2.728 \times 10^{16}$
$E_F - E_V$ (eV)	0.181	0.168	0.158	0.151	0.142
$N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.626 \times 10^{18}$	$7.325 \times 10^{18}$	$1.609 \times 10^{19}$	$2.713 \times 10^{19}$	$5.538 \times 10^{19}$

#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชอตต์กีไดโอด

จากหัวข้อ 4.2.1 หลังจากทราบคุณสมบัติไฟฟ้าพื้นฐานต่าง ๆ ของฟิล์มเพชรชนิดพีจากการทดลองเพื่อที่จะนำมาศึกษาต่อเป็นชอตต์กีไดโอด หรือ รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารเจือโบรอนต่าง ๆ นั่นคือ 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm โดยในส่วนนี้จะเป็นการตรวจสอบรอยสัมผัสจากคุณสมบัติของกระแส-แรงดันที่วัดได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อยืนยันว่า รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีที่สร้างขึ้นนี้เป็นรอยสัมผัสแบบชอตต์กี โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สมการที่ 2.3 ดังนี้

$$I = I_S [\exp(qV_A / kT) - 1] \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของขดตัวไดโอด กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ

- ก) 10 ppm (—)      ข) 50 ppm (—)      ค) 100 ppm (—)  
 ง) 500 ppm (—)      จ) 1000 ppm (—)

โดยถ้าพิจารณาที่ช่วงไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) ก็บทย่อ นั่นคือ การให้แรงดันโพลบที่โลหะออลูมิเนียม และให้แรงดันไฟบวกที่ฟิล์มเพชรชนิดพี จากสมการที่ 4.5 จะได้

$$I = I_S \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) \quad (4.6)$$

หรือ

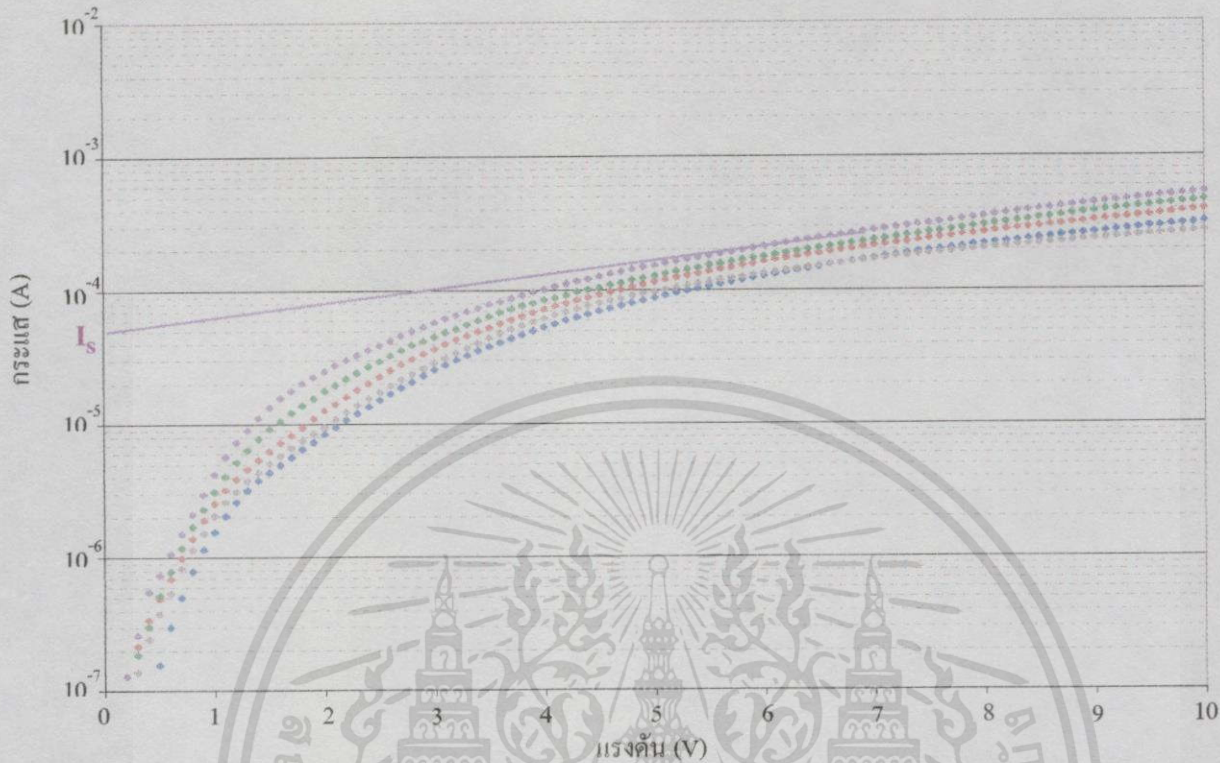
$$\ln(I) = \ln(I_S) + \frac{qV_A}{kT} \quad (4.7)$$

ถ้า  $V_A = 0$  หรือสถานะสมดุลความร้อน จะได้

$$\ln(I) = \ln(I_S) \quad (4.8)$$

นั่นคือ จากสมการที่ 4.7 จะเห็นว่าถ้าหากแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I)$  กับ แรงดันไบอัสไปข้างหน้า ( $V_A$ ) จะได้ลักษณะกราฟเป็นเส้นตรงและจากสมการที่ 4.8 จะได้ว่า ที่สถานะสมดุลความร้อนหรือในขณะที่ไม่ได้ไบอัสให้กับรอยสัมผัส ค่ากระแส  $I$  จะมีค่าเท่ากับกระแส  $I_S$  หรือ

กระแสอิ่มตัวนั่นเอง ดังนั้นจึงทำการพล็อตกราฟ  $\ln(I) - V_A$  ในช่วงการให้ไบอัสไปข้างหน้าจะได้ดังในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 คุณลักษณะกึ่งไดโอดกระแส-แรงดันของขอตัก์ไดโอด กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ  
 ก) 10 ppm (—)      ข) 50 ppm (—)      ค) 100 ppm (—)  
 ง) 500 ppm (—)      จ) 1000 ppm (—)

จะได้ค่ากระแสอิ่มตัวจากการประมาณจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 นี้ซึ่งเมื่อพิจารณากระแสอิ่มตัวนี้จากบทที่ 2 สมการที่ 2.3 ดังนี้

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \tag{4.9}$$

$$A^* = \frac{4\pi q m_h^* k^2}{h^3} \tag{4.10}$$

จะสามารถหาค่าความสูงกำแพงศักย์ได้จากค่ากระแสอิ่มตัว  $I_s$  ดังในสมการที่ 4.11

$$q\phi_B = kT \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_s}\right) \tag{4.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในที่นี้

$\phi_B$  = ค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส

$T$  = อุณหภูมิห้อง  $27^\circ\text{C}$  หรือ  $300\text{ K}$

$A$  = พื้นที่รอยสัมผัส  $4.418 \times 10^{-7}$  เมตร

$m_n^*$  = Effective mass ของโฮลในเพชรแบบผลึกเชิงซ้อน  $= 3.64 \times 10^{-31}$  kg

$A^*$  = ค่าคงที่ Richardson  $= 4.798 \times 10^5$   $\text{A/m}^2\text{-K}^2$

เมื่อแทนค่ากระแสอิ่มตัวที่ประมาณได้จากกราฟของกรณีค่าปริมาณอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ ลงในสมการที่ 4.11 แล้วจะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส ( $\phi_{BP}$ ) แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่วัดได้ในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสอิ่มตัวและความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสเมื่อมีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ

อัตราส่วน B : C (ppm)	ค่ากระแสอิ่มตัว : $I_S$ ( $\mu\text{A}$ )	ความสูงกำแพงศักย์ : $\phi_{BP}$ (V)
10	31	0.526
50	34	0.524
100	42	0.518
500	44	0.517
1000	50	0.514

จะเห็นได้ว่าค่าความสูงกำแพงศักย์ที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.2 จากการประมาณค่ากระแสอิ่มตัวในรูปที่ 4.6 นั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงในรูปที่ 4.5 แสดงว่า การสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะอูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีนี้ เป็นรอยสัมผัสที่มีคุณสมบัติเรกติไฟร์ หรือรอยสัมผัสแบบชอตต์กีจริง และเมื่อพิจารณาช่วงขนาดของการให้ไบอัสย้อนกลับแก่ชอตต์กีไดโอดเปรียบเทียบกับขนาดของการให้ไบอัสไปข้างหน้า จะเห็นได้ว่า จะทำให้เกิดกระแสไหลในปริมาณไม่ต่างกันมาก หรือนั่นคือมีอัตราการกรอง (Rectification ratio) ของกระแสค่อนข้างต่ำ และในทางปฏิบัติจริงบางครั้งความต่างของอัตราการกรองกระแสในคุณสมบัติเรกติไฟร์นี้เป็นสิ่งที่จำเป็น อีกทั้งจุดประสงค์หลักในการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรคือการใช้งานในอุณหภูมิที่สูงกว่าปกติ ดังนั้นจึงควรที่จะลดปริมาณของกระแสรั่วย้อนกลับให้น้อยลงเพื่อเพิ่มอัตราการกรองการไหลของกระแสในโครงสร้างนี้ ซึ่งสามารถปรับปรุงสิ่งที่เกิดขึ้นนี้เพื่อสามารถนำคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำเพชรที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

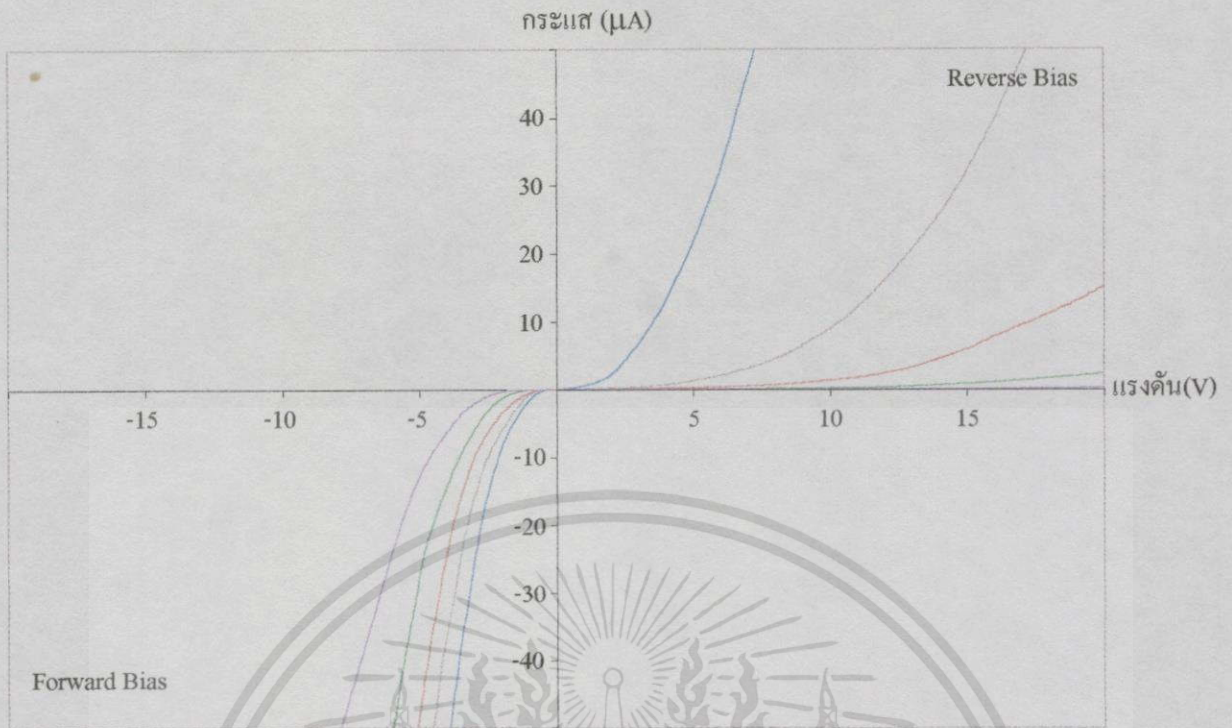
อิเล็กทรอนิกส์ใช้งานได้ในลักษณะกว้างมากขึ้น ดังนั้นแนวคิดการปรับปรุงขอตักโคโดที่ได้ เกริ่นไว้ข้างต้นนี้จึงได้ทำการทดลองและศึกษาคุณสมบัติและการเปลี่ยนแปลงได้ดังหัวข้อต่อไป

### 4.3 ผลการตรวจสอบโคโดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

จากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ขอตักโคโดที่สร้างจากฟิล์มเพชรกับโลหะ อลูมิเนียมนี้ เมื่อเปรียบเทียบการไหลของกระแสทั้งการให้ไบอัสย้อนกลับและไบอัสไปข้างหน้า จะมีอัตราการกรองการไหลของกระแสค่อนข้างต่ำ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือจะเกิดกระแสรั่วไหลกลับ (Leakage reverse current) ค่อนข้างสูงซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อบกพร่องหรือข้อเสียของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการนำไปใช้ในอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นจุดเด่นของทำงาน ของสารกึ่งตัวนำเพชร ดังนั้นจึงมีได้แนวคิดเพื่อที่จะลดกระแสรั่วที่เกิดขึ้นนี้ หรือเพิ่มอัตราการ กรองการไหลของกระแสตนเอง โดยการสร้างชั้นฉนวนขึ้นระหว่างโลหะและฟิล์มเพชรชนิดพีขึ้น ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกเป็นชั้นฉนวนระหว่างชั้นของโลหะอลูมิเนียมและ ฟิล์มเพชรชนิดพีนี้ จึงศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดลองตามแนวความคิดนี้ ได้แก่ ศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่คั่นระหว่างรอยสัมผัสของโลหะ อลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี ศึกษาผลของปริมาณอัตราส่วน B:C ที่เจอให้กับฟิล์มเพชรชนิดพีเมื่อ มีชั้นฉนวนใน โครงสร้าง และศึกษาผลของอุณหภูมิสูงที่มีต่อการทำงานของโคโดโครงสร้าง MIS นี้ รวมถึงยังสนใจถึงค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของโคโดนี้และตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่าง ง่าย อีกด้วยดังจะแสดงไว้ในลำดับต่อไป

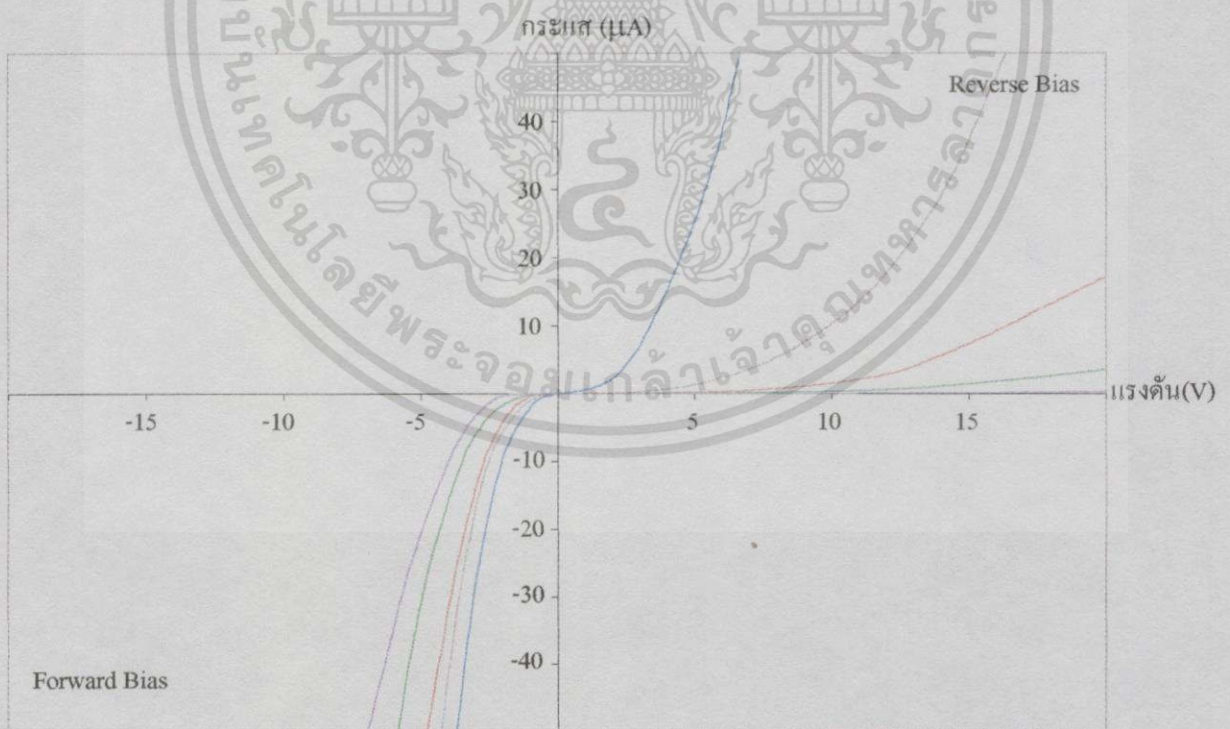
#### 4.3.1 ผลความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก โดยจะทำการ สร้างที่ความหนาต่าง ๆ กันได้แก่  $0 \mu\text{m}$ ,  $1 \mu\text{m}$ ,  $2 \mu\text{m}$ ,  $3 \mu\text{m}$  และ  $4 \mu\text{m}$  คั่นระหว่างโลหะอลูมิเนียม กับฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีอัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm ดังที่กล่าวไว้แล้วในกระบวนการทดลองบทที่ 3 หัวข้อ 3.6.1 ซึ่งหลังจาก ทำการสร้างเสร็จแล้วจึงทำการศึกษาคุณสมบัติกระแสกับแรงดันในอุณหภูมิห้อง ( $T = 300 \text{ K}$ ) ด้วยเครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test system) ดังแสดง ในรูปที่ 4.7-4.11



รูปที่ 4.7 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 10 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ

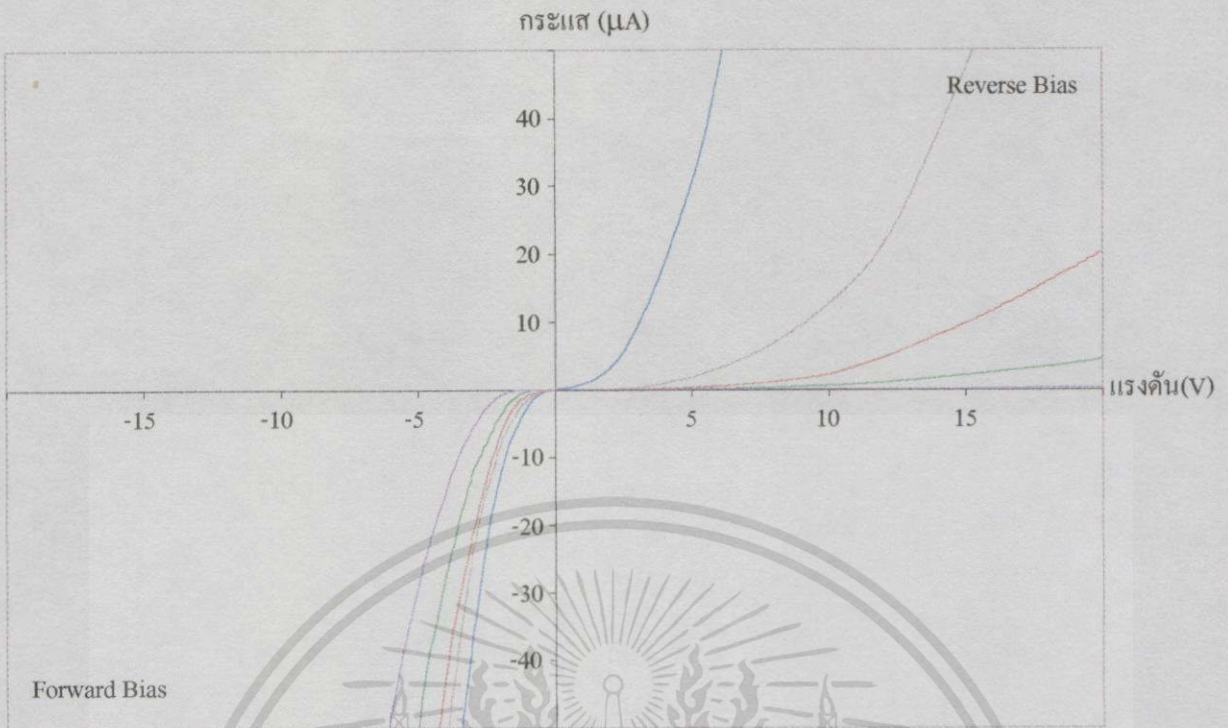
- ก) 0 ไมครอน ( — )    ข) 1 ไมครอน ( — )    ค) 2 ไมครอน ( — )
- ง) 3 ไมครอน ( — )    จ) 4 ไมครอน ( — )



รูปที่ 4.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 50 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ

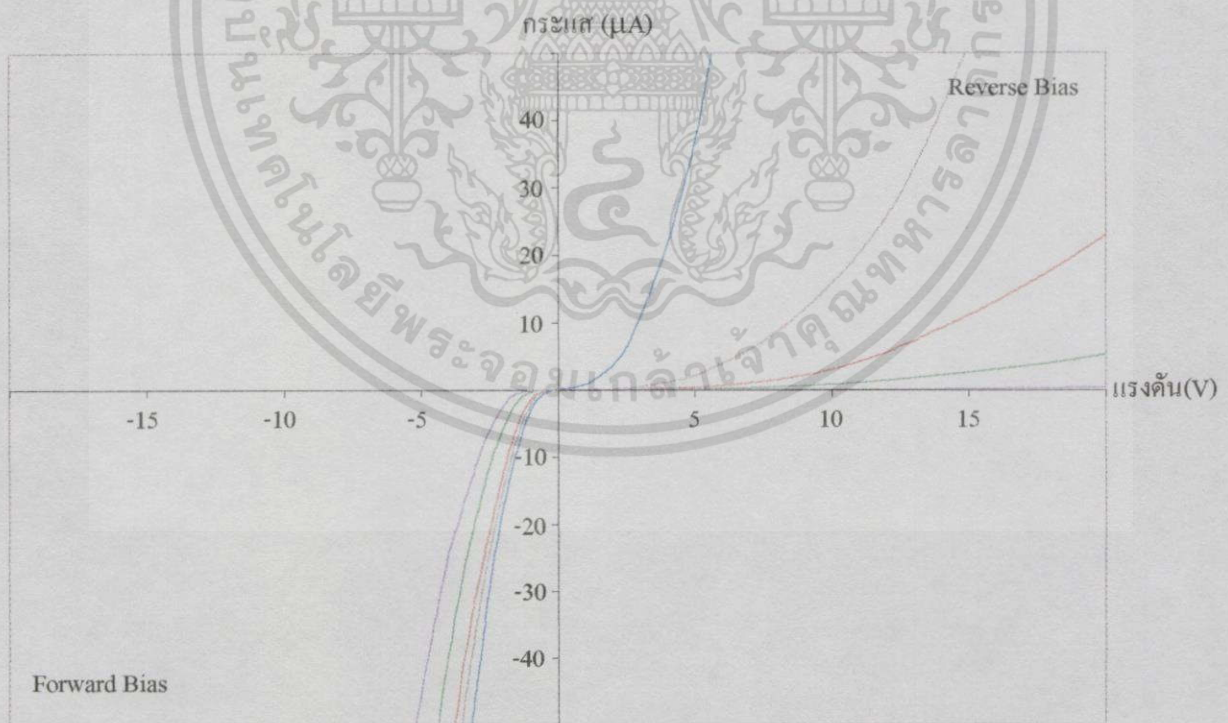
- ก) 0 ไมครอน ( — )    ข) 1 ไมครอน ( — )    ค) 2 ไมครอน ( — )
- ง) 3 ไมครอน ( — )    จ) 4 ไมครอน ( — )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 100 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ

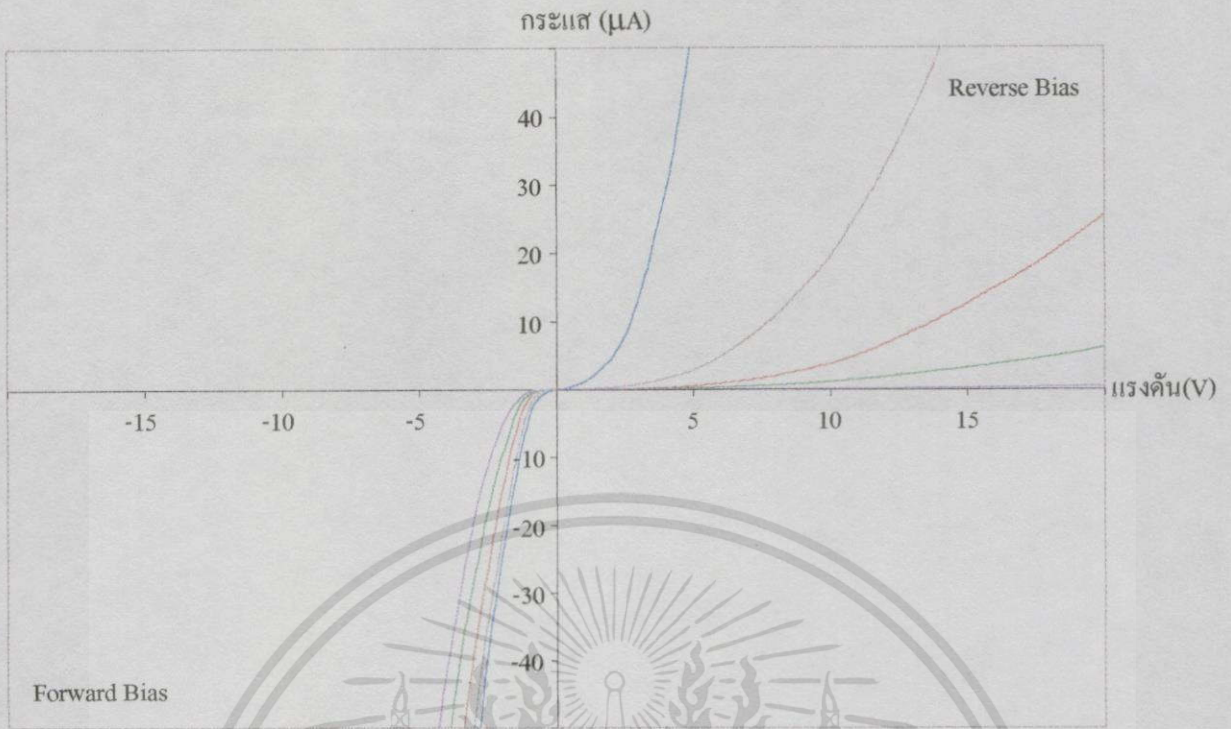
- ก) 0 ไมครอน ( — )      ข) 1 ไมครอน ( — )      ค) 2 ไมครอน ( — )
- ง) 3 ไมครอน ( — )      จ) 4 ไมครอน ( — )



รูปที่ 4.10 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 500 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ

- ก) 0 ไมครอน ( — )      ข) 1 ไมครอน ( — )      ค) 2 ไมครอน ( — )
- ง) 3 ไมครอน ( — )      จ) 4 ไมครอน ( — )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 1000 ppm กรณีความหนาชั้น i ต่าง ๆ

- ก) 0 ไมครอน (—)      ข) 1 ไมครอน (—)
- ค) 2 ไมครอน (—)
- ง) 3 ไมครอน (—)      จ) 4 ไมครอน (—)

จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS จากฟิล์มบางเพชรตามเงื่อนไขฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่มีความหนาต่าง ๆ แล้วดังรูปที่ 4.7-4.11 ข้างบนนี้ ถ้าหากพิจารณาค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ 0.2 ไมโครแอมแปร์ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะได้ค่าแรงดันไบอัสต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.3 และส่วนในระดับกระแสไหลไปข้างหน้า 0.2  $\mu\text{A}$  จะต้องได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้าต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ทำให้ไดโอดเงื่อนไขต่าง ๆ มีกระแสรั่วเกิดขึ้น 0.2  $\mu\text{A}$

อัตราส่วน B:C (ppm)	ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (V) เมื่อไดโอดมีค่าหนาชั้นอินทรีนซิก				
	0 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$
10	0.5	1.9	5.3	10.1	19.2
50	0.4	2.6	4.0	8.2	18.4
100	0.2	2.6	3.9	6.7	17.6
500	0.17	2.35	3.7	5.8	16.4
1000	0.15	1.7	3.6	4.6	15.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันไบอัสไปข้างหน้าที่ทำให้ไดโอดเงื่อนไขต่าง ๆ มีกระแสไหล  $-0.2 \mu\text{A}$

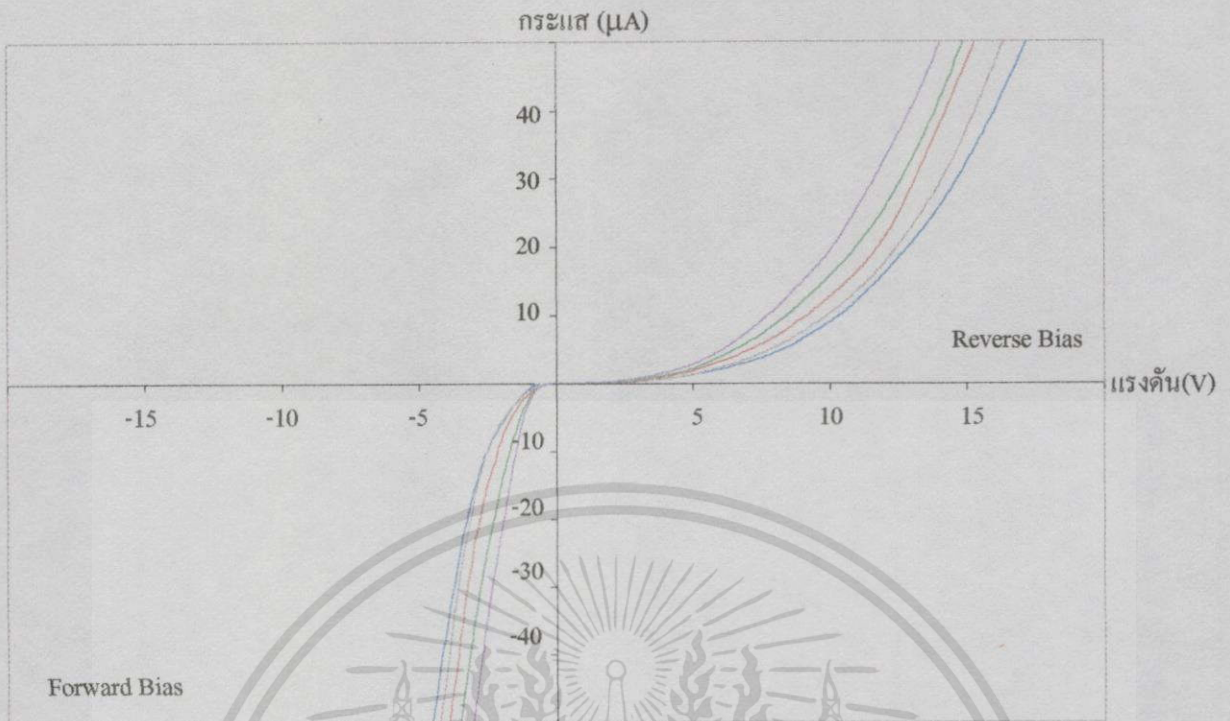
อัตราส่วน B:C (ppm)	ค่าแรงดันไบอัสไปข้างหน้า (V) เมื่อไดโอดมีค่าหน้าชั้นอินทรีนซิค				
	0 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$
10	-0.53	-0.8	-0.9	-1.35	-1.86
50	-0.36	-0.67	-0.88	-1.15	-1.75
100	-0.32	-0.48	-0.5	-0.98	-1.51
500	-0.3	-0.48	-0.54	-0.82	-1.17
1000	-0.25	-0.47	-0.64	-0.7	-0.85

สิ่งหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดคือ เมื่อไดโอดโครงสร้าง MIS มีชั้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคหน้าชั้น คุณสมบัติเรกติไฟร์ของไดโอดที่เป็นไปในทางที่ดีขึ้นมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างของชอตต์กีไดโอด (ไม่มีชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค) ซึ่งมีกระแสรั่วไหลย้อนกลับค่อนข้างสูง นั่นคือเมื่อพิจารณากระแสไหลไปข้างหน้าขนาด  $0.2 \mu\text{A}$  เช่นกันนี้ ไดโอดที่มีความหนาของชั้นอินทรีนซิคมากขึ้น จะต้องรับแรงดันไบอัสไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในทางตรงกันข้าม กระแสไหลย้อนกลับขนาด  $0.2 \mu\text{A}$  ไดโอดที่มีความหนาของชั้นอินทรีนซิคมากขึ้น จะต้องได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับสูงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหรืออีกนัยหนึ่งคือ ไดโอดโครงสร้าง MIS นี้จะมีค่าแรงดันพังทลายสูงขึ้นเมื่อชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคมีความหนาเพิ่มขึ้น

เพราะฉะนั้น จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ไดโอดโครงสร้าง MIS สามารถลดปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นในชอตต์กีไดโอดได้ด้วยการเพิ่มความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค (พิจารณาที่อัตราส่วน B:C เดียวกัน) นั้น และในเวลาเดียวกัน ยังมีผลน้อยมากหรือถือได้ว่าไม่มีผลต่อปริมาณการไหลของกระแสไปข้างหน้าอีกด้วย

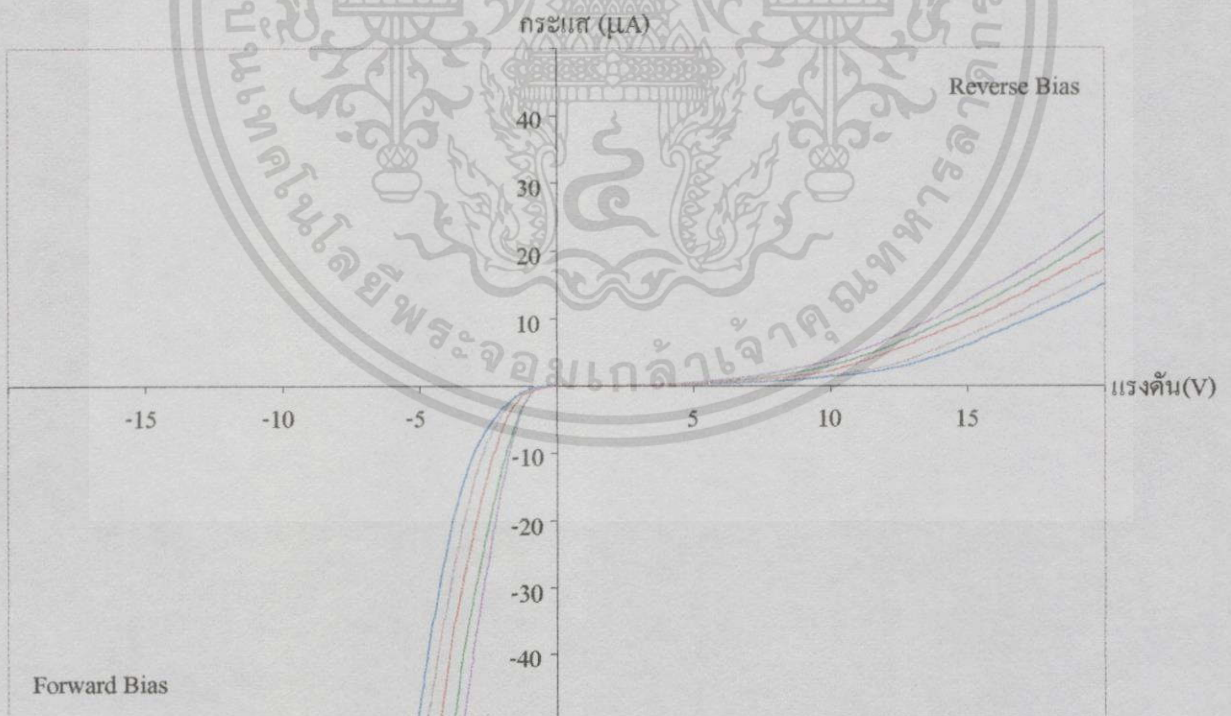
#### 4.3.2 ผลของความเข้มข้นของโบรอนในฟิล์มเพชรชนิดพี

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของปริมาณสารเจือโบรอน หรืออัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B:C) สำหรับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีนั่นเอง ในการทดลองนี้จะทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีอัตราส่วน B:C ค่าต่าง ๆ ได้แก่ 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm โดยพิจารณาที่ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคคงที่ต่าง ๆ กันคือ 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  และ 4  $\mu\text{m}$  ดังที่กล่าวไว้แล้วในกระบวนการทดลองบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.6.2 หลังจากทำการสร้างเสร็จแล้ว จึงทำการศึกษาคูสมบัตินักกระแสกับแรงดันในอุณหภูมิห้อง ( $T = 300 \text{ K}$ ) ด้วยเครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test System) ดังแสดงผลไว้ในรูปที่ 4.12-4.15



รูปที่ 4.12 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อขึ้น  $i$  หนา  $1 \mu\text{m}$  กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ

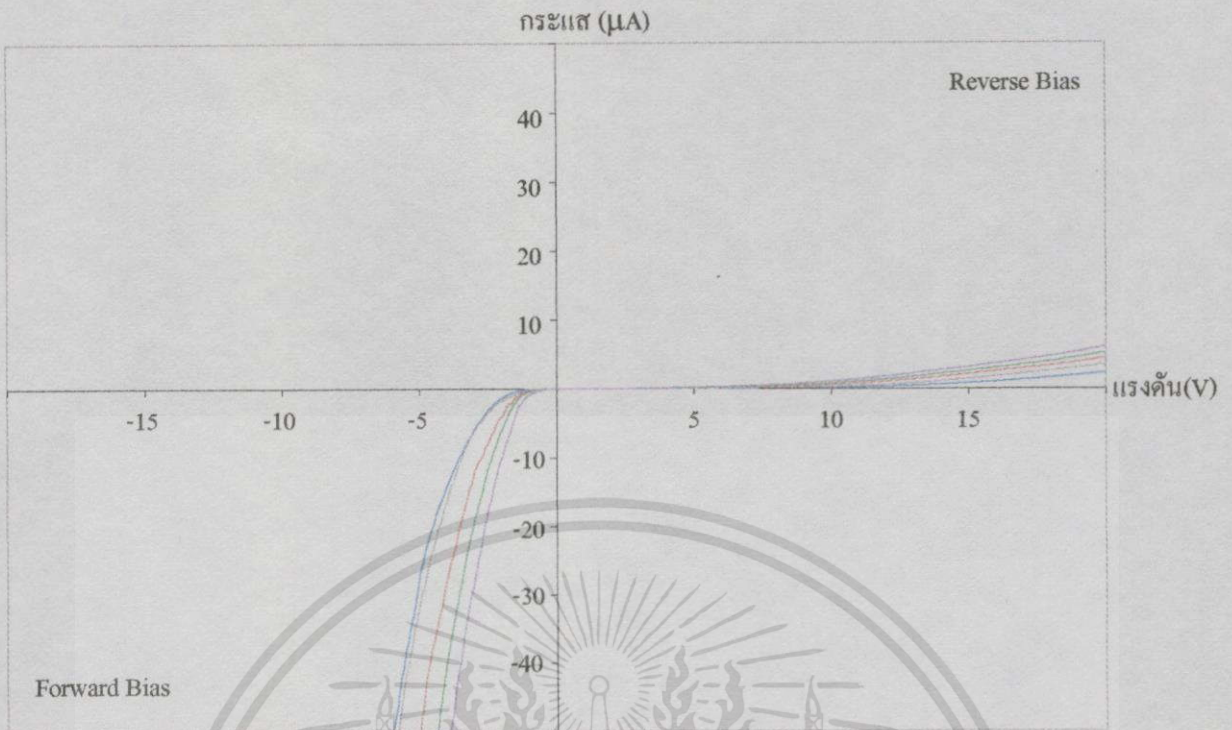
- ก) 10 ppm ( — )    ข) 50 ppm ( — )    ค) 100 ppm ( — )  
 ง) 500 ppm ( — )    จ) 1000 ppm ( — )



รูปที่ 4.13 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อขึ้น  $i$  หนา  $2 \mu\text{m}$  กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ

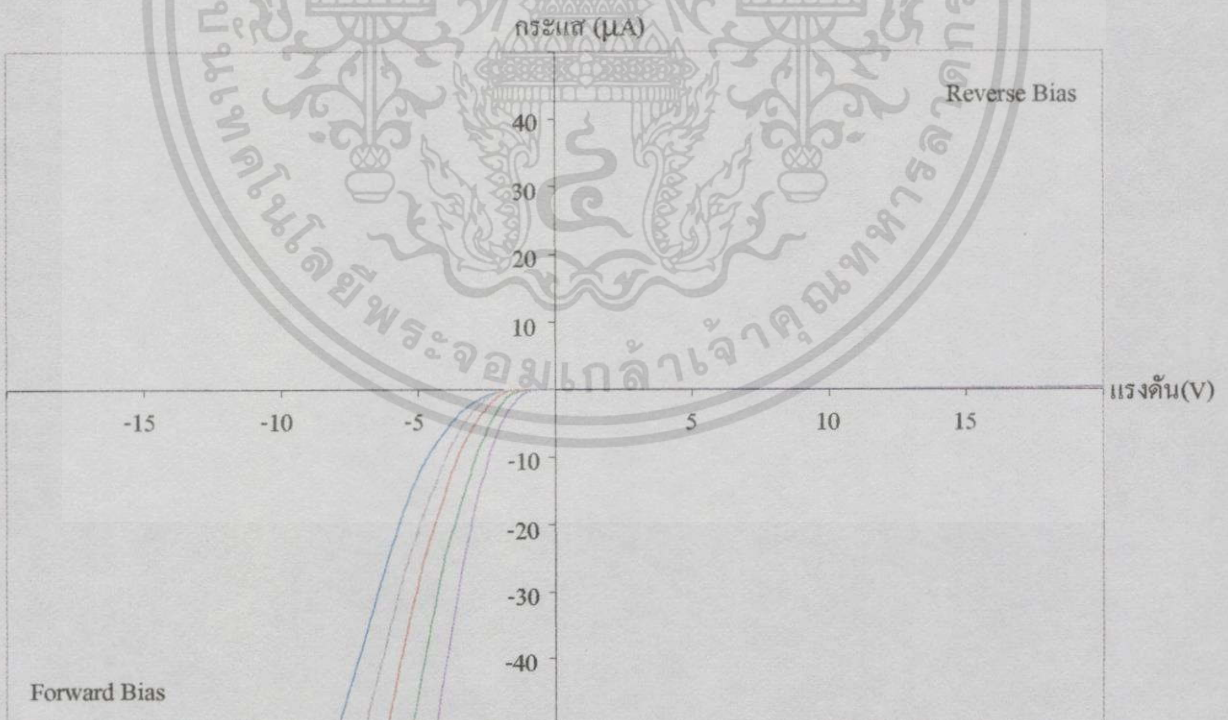
- ก) 10 ppm ( — )    ข) 50 ppm ( — )    ค) 100 ppm ( — )  
 ง) 500 ppm ( — )    จ) 1000 ppm ( — )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อขึ้น  $i$  หน้า  $3 \mu\text{m}$  กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ

- ก) 10 ppm ( — )    ข) 50 ppm ( — )    ค) 100 ppm ( — )  
 ง) 500 ppm ( — )    จ) 1000 ppm ( — )



รูปที่ 4.15 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อขึ้น  $i$  หน้า  $4 \mu\text{m}$  กรณีอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ

- ก) 10 ppm ( — )    ข) 50 ppm ( — )    ค) 100 ppm ( — )  
 ง) 500 ppm ( — )    จ) 1000 ppm ( — )

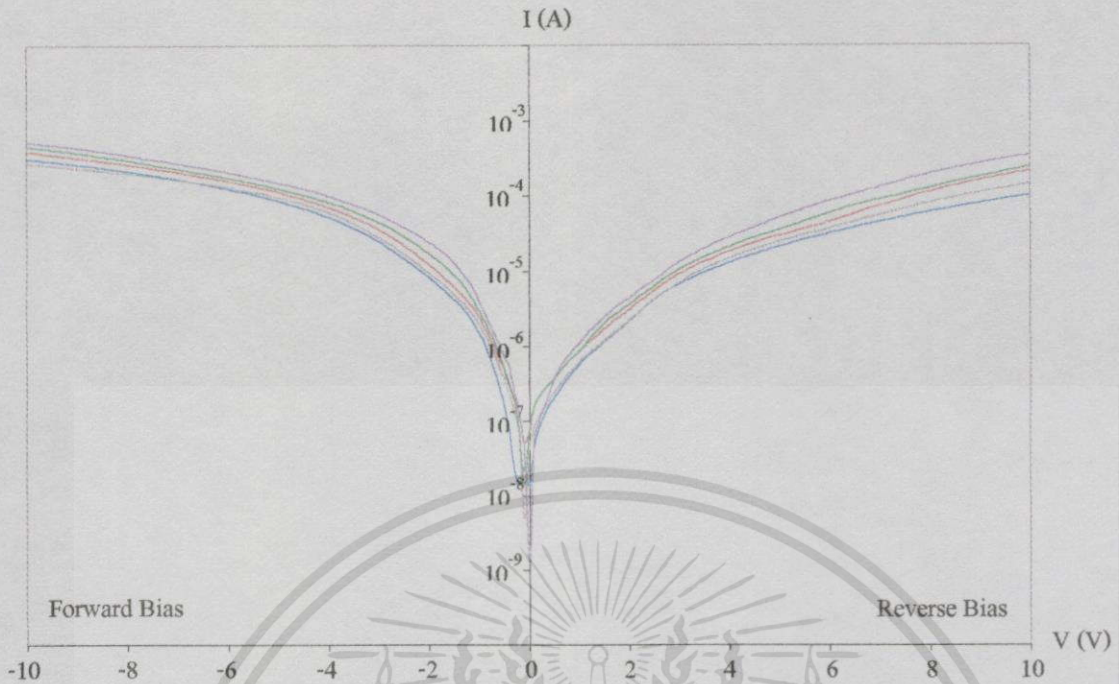
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองข้างบนนี้ เป็นการสนใจพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีค่าคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C ที่เจอให้กับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งหลังจากตรวจสอบแล้ว สิ่งหนึ่งที่เห็นได้ค่อนข้างชัดเจนก็คือเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหลของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า ยกตัวอย่างพิจารณาจากรูปที่ 4.14 พิจารณาที่ความหนาของชั้นอินทรีนซิกเป็น  $3 \mu\text{m}$  จะเห็นว่า ถ้าหากให้แรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $3 \text{ V}$  กับไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ จะทำให้เกิดกระแสไหลไปข้างหน้าและกระแสไหลย้อนกลับมีค่าตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณกระแสไหลของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่มีชั้นอินทรีนซิกหนา  $3 \mu\text{m}$  เมื่อพิจารณาการให้ไบอัสตรงและย้อนกลับขนาด  $3 \text{ V}$

อัตราส่วน B:C ต่าง ๆ (ppm)	ปริมาณกระแสไหล ( $\mu\text{A}$ ) เมื่อถูกไบอัสขนาด $3 \text{ V}$	
	ไบอัสตรง	ไบอัสย้อนกลับ
10	5.80	0.019
50	6.09	0.038
100	11.9	0.064
500	19.0	0.068
1000	27.7	0.101

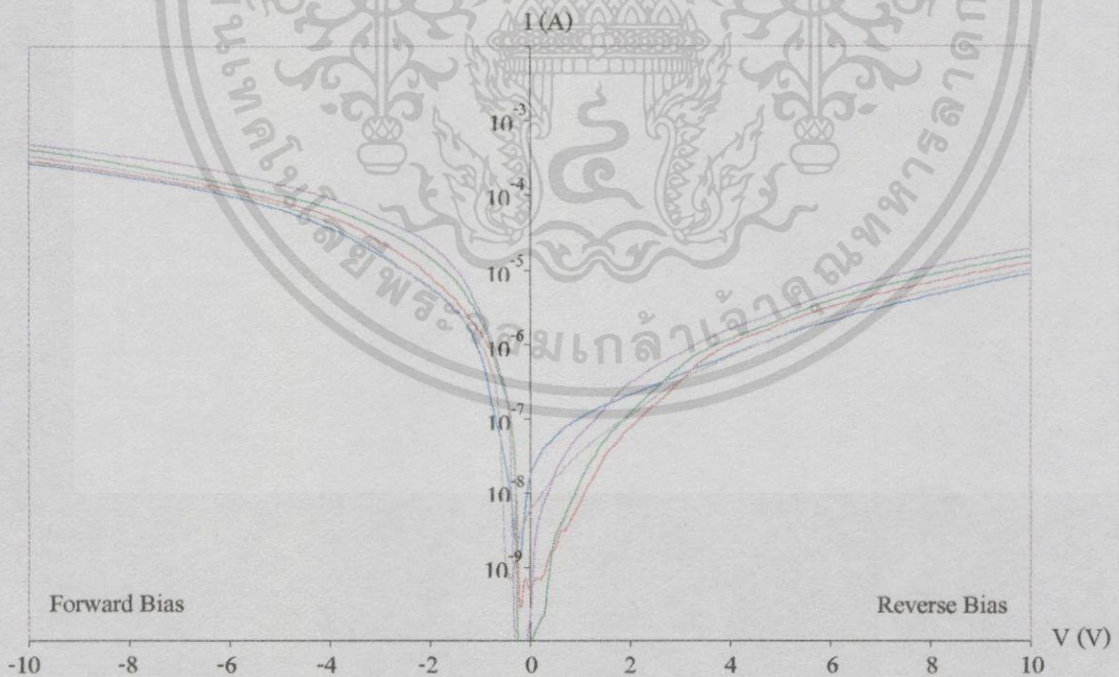
ซึ่งจะเกิดความแตกต่างของปริมาณการไหลของกระแสทั้งสองทางอย่างชัดเจน นั่นคือเมื่อไดโอดโครงสร้าง MIS มีปริมาณอัตราส่วน B:C เพิ่มขึ้น กระแสไปข้างหน้าจะมีปริมาณการไหลเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่กระแสไหลย้อนกลับของไดโอดนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับการไหลของกระแสไปข้างหน้า ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วน B:C ที่เพิ่มขึ้นนี้ ไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสไหลย้อนกลับเลย และจากความแตกต่างของปริมาณการไหลของกระแสนี้ ทำให้เห็นอีกอย่างว่า ไดโอดโครงสร้าง MIS นี้มีอัตรากรองการไหลของกระแสสูงมาก โดยสามารถพิจารณาได้ด้วยการแสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันใหม่ด้วยการพล็อตกราฟกึ่งล็อกของ I-V ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.16 – 4.20 โดยพิจารณาช่วงการให้ไบอัสไดโอดตั้งแต่  $-10 \text{ V}$  ถึง  $10 \text{ V}$



รูปที่ 4.16 คุณลักษณะกึ่งไดโอดกระแส-แรงดันเมื่อชั้น  $i$  หนา  $0 \mu\text{m}$  กรณี B:C ต่าง ๆ

ก) 10 ppm (—) ข) 50 ppm (—) ค) 100 ppm (—)

ง) 500 ppm (—) จ) 1000 ppm (—)

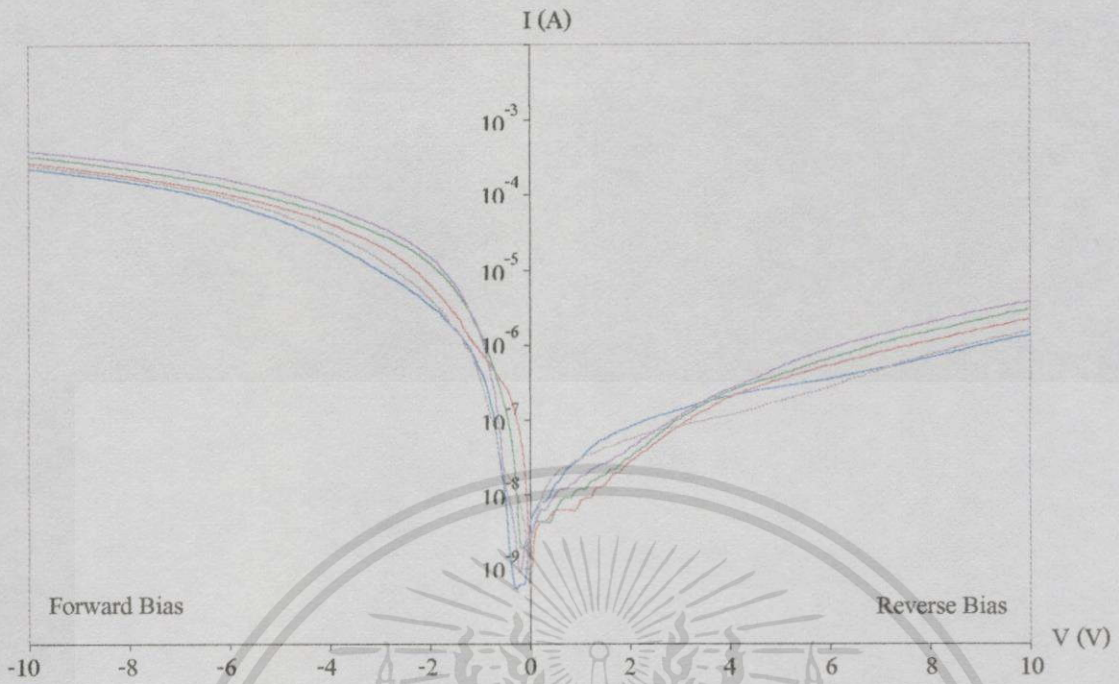


รูปที่ 4.17 คุณลักษณะกึ่งไดโอดกระแส-แรงดันเมื่อชั้น  $i$  หนา  $1 \mu\text{m}$  กรณี B:C ต่าง ๆ

ก) 10 ppm (—) ข) 50 ppm (—) ค) 100 ppm (—)

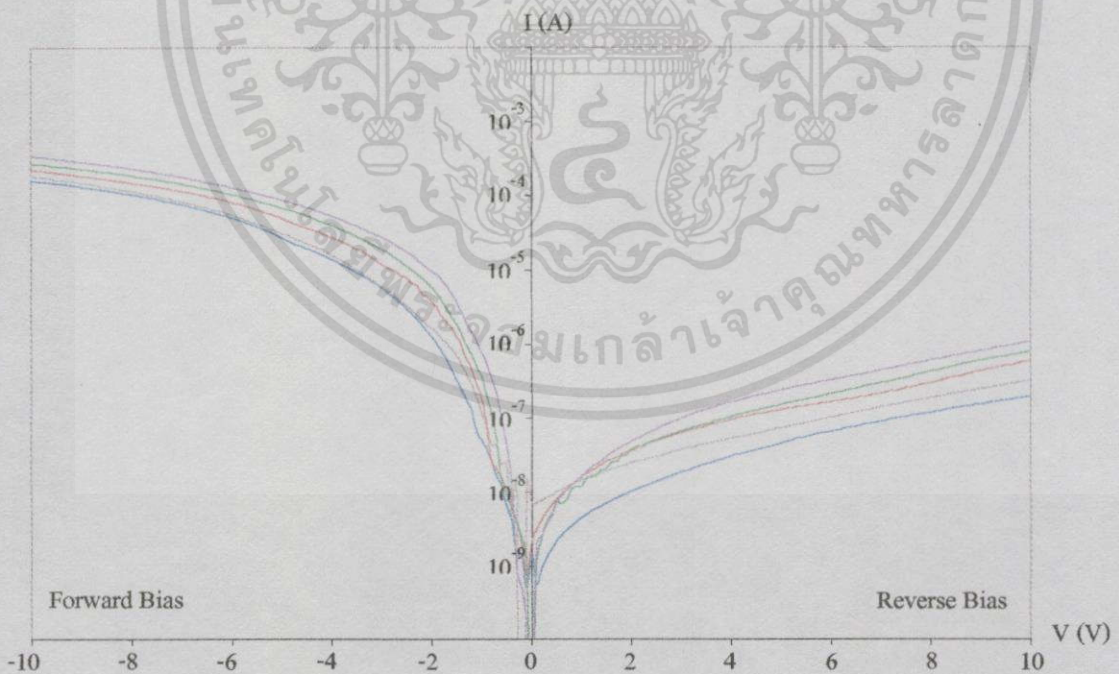
ง) 500 ppm (—) จ) 1000 ppm (—)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 คุณสมบัติของกิ่งต่อกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา  $2 \mu\text{m}$  กรณี B:C ต่างๆ

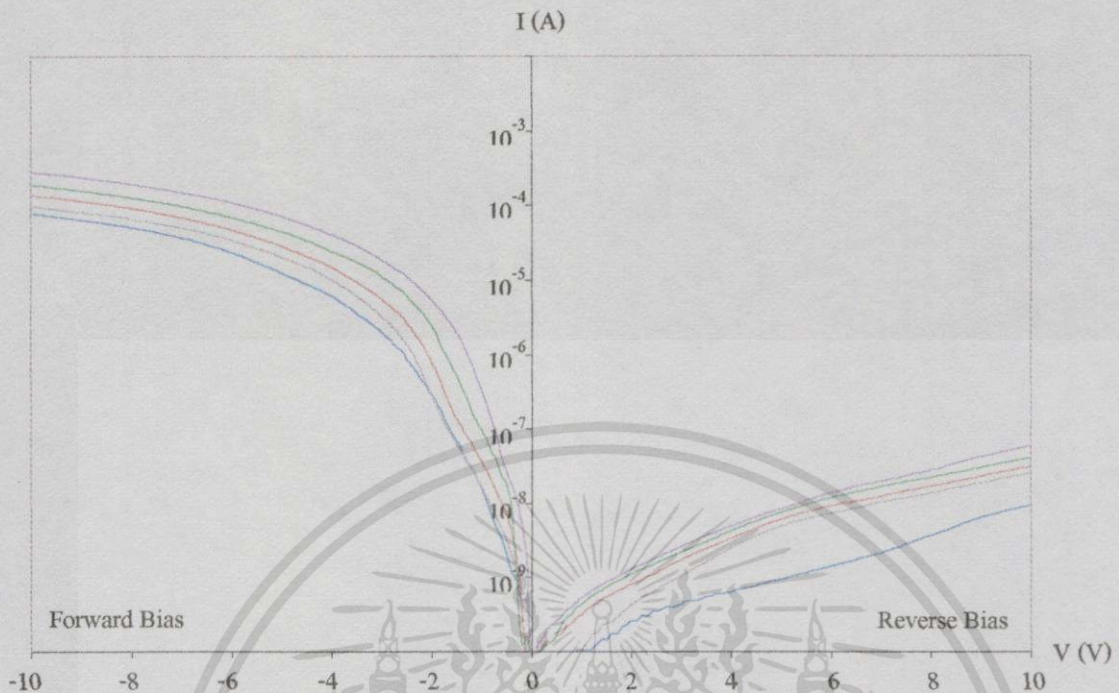
- ก) 10 ppm ( — )   ข) 50 ppm ( — )   ค) 100 ppm ( — )  
 ง) 500 ppm ( — )   จ) 1000 ppm ( — )



รูปที่ 4.19 คุณสมบัติของกิ่งต่อกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา  $3 \mu\text{m}$  กรณี B:C ต่างๆ

- ก) 10 ppm ( — )   ข) 50 ppm ( — )   ค) 100 ppm ( — )  
 ง) 500 ppm ( — )   จ) 1000 ppm ( — )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



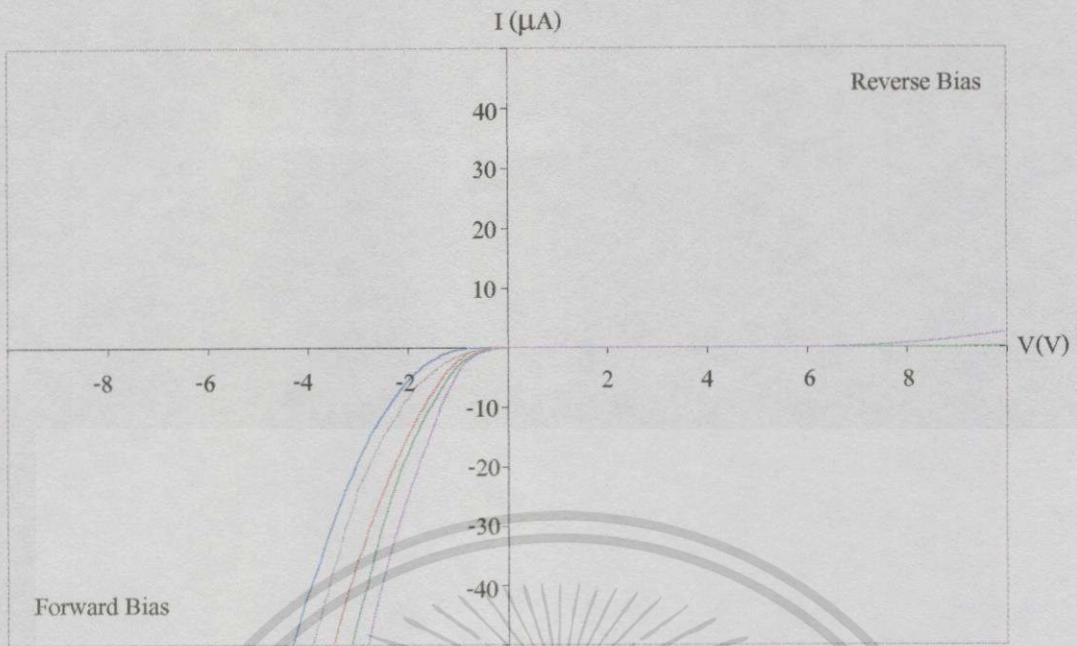
รูปที่ 4.20 คุณลักษณะกึ่งล็อกกระแส-แรงดันเมื่อชั้น gate 4  $\mu\text{m}$  กรณี B:C ต่าง ๆ

- ก) 10 ppm (—)    ข) 50 ppm (—)    ค) 100 ppm (—)  
 ง) 500 ppm (—)    จ) 1000 ppm (—)

จะพบว่า เมื่อชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีความหนาเพิ่มขึ้น อัตราการกรองการไหลของกระแสมีค่าสูงขึ้น ได้แก่ ความหนาเป็น 0  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  และ 4  $\mu\text{m}$  จะมีอัตราการกรองการไหลของกระแสสูงโดยเฉลี่ยประมาณ 2 เท่า, 35 เท่า, 200 เท่า, 600 เท่า และ 7000 เท่า ตามลำดับ

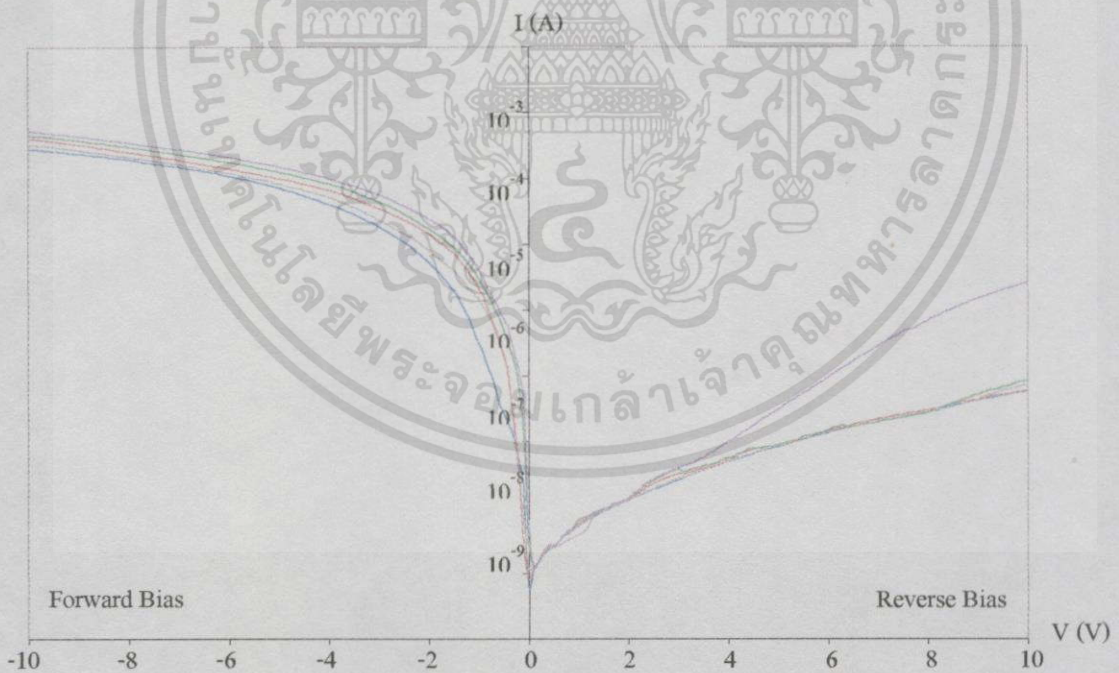
#### 4.3.3 ผลการทำงานในอุณหภูมิสูงของไดโอดโครงสร้าง MIS

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ในที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยในการทดลองนี้จะทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีอัตราส่วน B:C เป็น 1000 ppm และชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกหนา 4  $\mu\text{m}$  เมื่ออยู่ในสภาพบรรยากาศเปิดที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 27°C 100°C 150°C 200°C และ 250°C ด้วยเครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test system) ดังแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงไว้ในรูปที่ 4.21 และส่วนในรูปที่ 4.22 กราฟแสดงคุณลักษณะกึ่งล็อกของกระแสกับแรงดัน เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการกรองการไหลของกระแสเมื่อทำงานในสถานะอุณหภูมิต่าง ๆ ข้างต้น



รูปที่ 4.21 คุณลักษณะกระแส-แรงดันกรณีอัตราส่วน B:C 1000 ppm และชั้น i หนา 4  $\mu\text{m}$  ขณะทำงานในอุณหภูมิต่าง ๆ

- ก) 27 °C ( — )    ข) 100 °C ( — )    ค) 150 °C ( — )  
 ง) 200 °C ( — )    จ) 250 °C ( — )



รูปที่ 4.22 คุณลักษณะกึ่งล็อกกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 1000 ppm และชั้น i หนา 4  $\mu\text{m}$  ขณะทำงานในอุณหภูมิต่าง ๆ

- ก) 27 °C ( — )    ข) 100 °C ( — )    ค) 150 °C ( — )  
 ง) 200 °C ( — )    จ) 250 °C ( — )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณการไหลของกระแสขึ้นทั้งสองทาง นั่นคือ เมื่อสถานะอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูงมากขึ้น จะทำให้กระแสไหลไปข้างหน้ามีปริมาณเพิ่มมากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าแรงดันไบอัสไปข้างหน้าลดลงเพื่อที่จะให้ไดโอดนำกระแสได้ ในทางตรงกันข้ามกับปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับแม้ว่าจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมาก ๆ จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  จึงเห็นปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่า ขณะที่อุณหภูมิสูงถึง  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ยังมีอัตราของการไหลของกระแสที่แรงดันไบอัส  $10\text{ V}$  ถึง  $212\text{ เท่า}$  นั้น แสดงให้เห็นว่า ไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้ยังสามารถแสดงคุณลักษณะของกระแส-แรงดันได้คงเดิม หรือมีความเสถียรภาพของการทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึงประมาณ  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$

#### 4.3.4 ค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS สร้างจากฟิล์มเพชร

หลังจากทำการทดลองเพื่อผลการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างของขอตักไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรด้วยการเพิ่มขึ้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคชั้นระหว่างชั้นโลหะกับฟิล์มเพชรชนิดพี หรือไดโอดโครงสร้าง MIS นั้นเองด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ไปแล้ว ดังแสดงในหัวข้อข้างต้น ในส่วนนี้จึงทำการพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้างภายใต้การให้ความถี่คงที่เท่ากับ  $1\text{ MHz}$

ในรูปที่ 4.23 และ รูปที่ 4.24 เป็นตัวอย่างผลการตรวจสอบค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS ซึ่งมีอัตราส่วน B:C เป็น  $100\text{ ppm}$  และ  $500\text{ ppm}$  ความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคเป็น  $1\text{ }\mu\text{m}$ ,  $2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $3\text{ }\mu\text{m}$  และ  $4\text{ }\mu\text{m}$  โดยแสดงในคุณลักษณะความจุไฟฟ้ากับแรงดัน จะเห็นได้ว่า เมื่อความหนาของชั้นอินทรีนซิคมีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมมีค่าลดน้อยลง ในทำนองเดียวกัน เมื่ออัตราส่วนของ B:C มีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งถือว่าสอดคล้องกับทฤษฎีพื้นฐานที่กล่าวไว้ข้างต้นในบทที่ 2 นั่นคือ ไดโอดโครงสร้าง MIS เสมือนมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกันอยู่ ได้แก่ ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากชั้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค ( $C_i$ ) และความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่บริเวณปอดประจุพาหะ ( $C_d$ ) เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่ไดโอด และจากสมการที่ 2.24 และ 2.27 ทั้งค่า  $C_i$  และ  $C_d$  เป็นฟังก์ชันของ  $Q_s$  ทั้งคู่ ซึ่งค่า  $Q_s$  ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณประจุพาหะ โฮล หรืออัตราส่วน B:C นั้นเอง

ในส่วนของลักษณะกราฟที่วัดได้ ขณะที่ไดโอดโครงสร้าง MIS ได้รับการไบอัสตรง ทำให้เกิดการสะสมของประจุโฮลที่ผิวสัมผัสของฟิล์มเพชรชนิดพีกับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค ทำให้ความจุไฟฟ้า  $C_i$  แต่เมื่อให้ไบอัสย้อนกลับแล้วก็จะเกิดบริเวณปอดประจุพาหะที่ผิวสัมผัส เกิดเป็นความจุไฟฟ้า  $C_d$  อนุกรมกับค่า  $C_i$  เสมือนต่ออนุกรมกัน จากสมการที่ 2.29 จะเห็นว่าทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าลดลง ดังช่วงกราฟมีค่าลดลงในรูปที่ 4.23 และ 4.24



#### 4.3.5 การตรวจสอบกระบวนการไหลของกระแสในไดโอดโครงสร้าง MIS

จากทฤษฎีในบทที่ 2 เกี่ยวกับการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS โดยทั่วไปจะเห็นว่าจะมีลักษณะการนำไฟฟ้าผ่านชั้นของฉนวน (Basic conduction processes in insulator) ได้หลายรูปแบบดังตารางที่ 2.1 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงกระบวนการทำงานการไหลของกระแส (forward bias) ในไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร และในหัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบรูปแบบการไหลของกระแสผ่านโครงสร้างของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่มีความหนา 3  $\mu\text{m}$  และ 4  $\mu\text{m}$  และชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีที่อัตราส่วน B:C ต่าง ๆ ได้แก่ 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm ดังแสดงต่อไปนี้

##### 4.3.5.1 การตรวจสอบการไหลของกระแสแบบ Schottky Emission

จากตารางที่ 2.1 สมการความสัมพันธ์กระแส – แรงดันสำหรับการไหลของกระแสแบบ Schottky จะได้ว่า

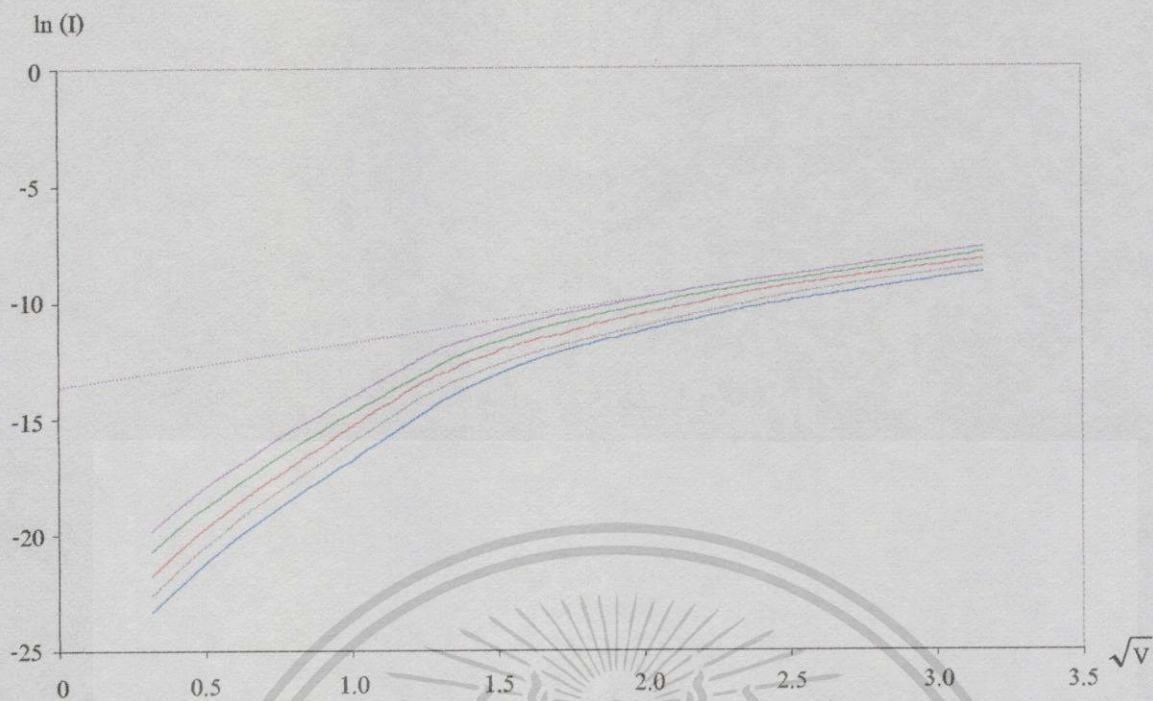
$$I = \eta_1 \cdot \left( \frac{4\pi q m_h^* k^2}{h^3} \right) \cdot AT^2 \exp \left[ \frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/4\pi\epsilon_i d})}{kT} \right] \quad (4.12)$$

โดยในที่นี้กำหนดให้  $\eta_1 =$  the collection factor  
ใส่ ln ทั้งสองข้างจะได้

$$\ln(I) \equiv \ln \left( \frac{4\pi q m_h^* AT^2 k^2}{h^3} \cdot \eta_1 \right) + \left[ \frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/4\pi\epsilon_i d})}{kT} \right] \quad (4.13)$$

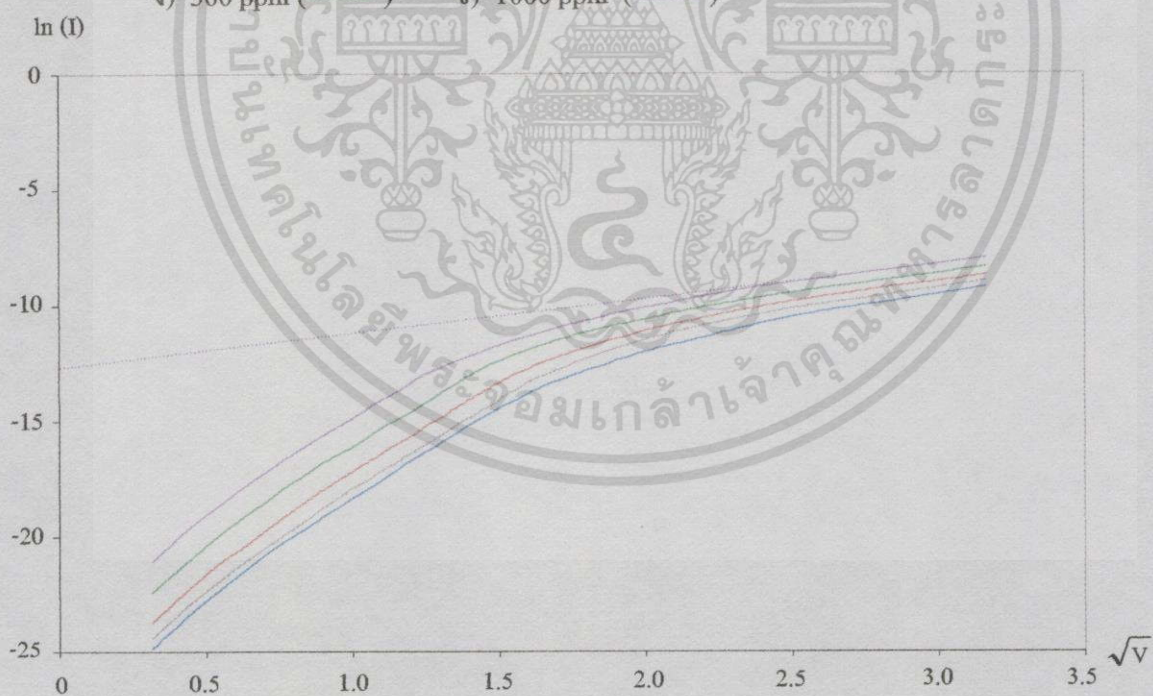
$$\ln(I) = \frac{q}{kT} \sqrt{\frac{q}{4\pi\epsilon_i d}} \cdot \sqrt{V} + \left[ \ln \left( \frac{4\pi q m_h^* AT^2 k^2}{h^3} \cdot \eta_1 \right) - \frac{q\phi_B}{kT} \right] \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.14 จะได้ความสัมพันธ์ของ  $\ln(I) \propto \sqrt{V}$  ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรงมีความชันเป็นบวก และเมื่อทดสอบนำข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองตามเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ข้างบนนี้ของไดโอดโครงสร้าง MIS คือ กรณีชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีอัตรา B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm โดยที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกเป็น 3  $\mu\text{m}$  และ 4  $\mu\text{m}$  มาแสดงไว้ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I) \propto \sqrt{V}$  ดังรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสรูปแบบ Schottky ของไดโอดโครงสร้าง MIS  
กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิค  $3 \mu\text{m}$  โดยที่

- ก) 10 ppm (—)    ข) 50 ppm (—)    ค) 100 ppm (—)  
ง) 500 ppm (—)    จ) 1000 ppm (—)



รูปที่ 4.26 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสรูปแบบ Schottky ของไดโอดโครงสร้าง MIS  
กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิค  $4 \mu\text{m}$  โดยที่

- ก) 10 ppm (—)    ข) 50 ppm (—)    ค) 100 ppm (—)  
ง) 500 ppm (—)    จ) 1000 ppm (—)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างการตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสแบบ Schottky ผ่านโครงสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกของไดโอดโครงสร้าง MIS ดังแสดงลักษณะกราฟในรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงประมาณ  $1.8 < \sqrt{V} < 3.1$  ซึ่งถือว่าสอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I) \propto \sqrt{V}$  (นั่นคือ ช่วงให้ไบอัสตรงประมาณ 3.2 V ถึง 10 V) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นถ้าหากพิจารณาช่วงที่เป็นเส้นตรงเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.18 ถ้า  $\sqrt{V} = 0$  จะได้ค่า  $\ln(I)$  และ  $\eta_1$  จากสมการที่ 4.23

$$\eta_1 = \frac{h^3}{4\pi q m_n^* A k^2 T^2} \exp \left[ \frac{q\phi_B}{kT} + \ln(I) \right] \quad (4.15)$$

ซึ่งถ้าพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณกระแสที่ไหลจากการทดลองกับการคำนวณในสมการที่ 4.12 โดยกรณีตัวอย่างของไดโอดโครงสร้าง MIS อัตราส่วน B:C เป็น 1000 ppm กับความหนาชั้นอินทรีนซิก  $4 \mu\text{m}$  เมื่อถูกไบอัสตรง 6 V พบว่า

$$\begin{aligned} \text{จากการทดลองมีกระแสไหลประมาณ} & \quad 111 \mu\text{A} \\ \text{จากการคำนวณมีกระแสไหลเท่ากับ} & \quad 105.9 \times \eta_1 = 105.9 \times 1.07 \\ & \quad = 113.3 \mu\text{A} \end{aligned}$$

จะเห็นว่า ปริมาณกระแสจากการทดลองและคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะการไหลของกระแสในช่วงไบอัสตรงนี้ (ประมาณ 3.2 V ถึง 10.0 V) สามารถอธิบายได้ด้วย Schottky Emission

#### 4.3.5.2 การตรวจสอบการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole Emission

จากตารางที่ 2.1 สมการความสัมพันธ์กระแส - แรงดันสำหรับการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole จะได้

$$I \approx \frac{AV}{d} \exp \left[ \frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/\pi\epsilon_1 d})}{kT} \right] \quad (4.16)$$

หรือ

$$I = \eta_2 \frac{AV}{d} \exp \left[ \frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/\pi\epsilon_1 d})}{kT} \right] \quad (4.17)$$

โดยในที่นี้กำหนดให้  $\eta_2 =$  ค่าคงที่จากสมการ หน่วย  $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$

ใส่  $\ln$  ทั้งสองข้างและจัดรูปใหม่จะได้

$$\ln\left(\frac{I}{V}\right) = \ln\left(\frac{A\eta_2}{d}\right) + \left[ \frac{-q(\phi_B - \sqrt{qV/\pi\epsilon_i d})}{kT} \right] \quad (4.18)$$

$$\ln\left(\frac{I}{V}\right) = \frac{q}{kT} \sqrt{\frac{q}{\pi\epsilon_i d}} \cdot \sqrt{V} + \left[ \ln\left(\frac{A\eta_2}{d}\right) - \frac{q\phi_B}{kT} \right] \quad (4.19)$$

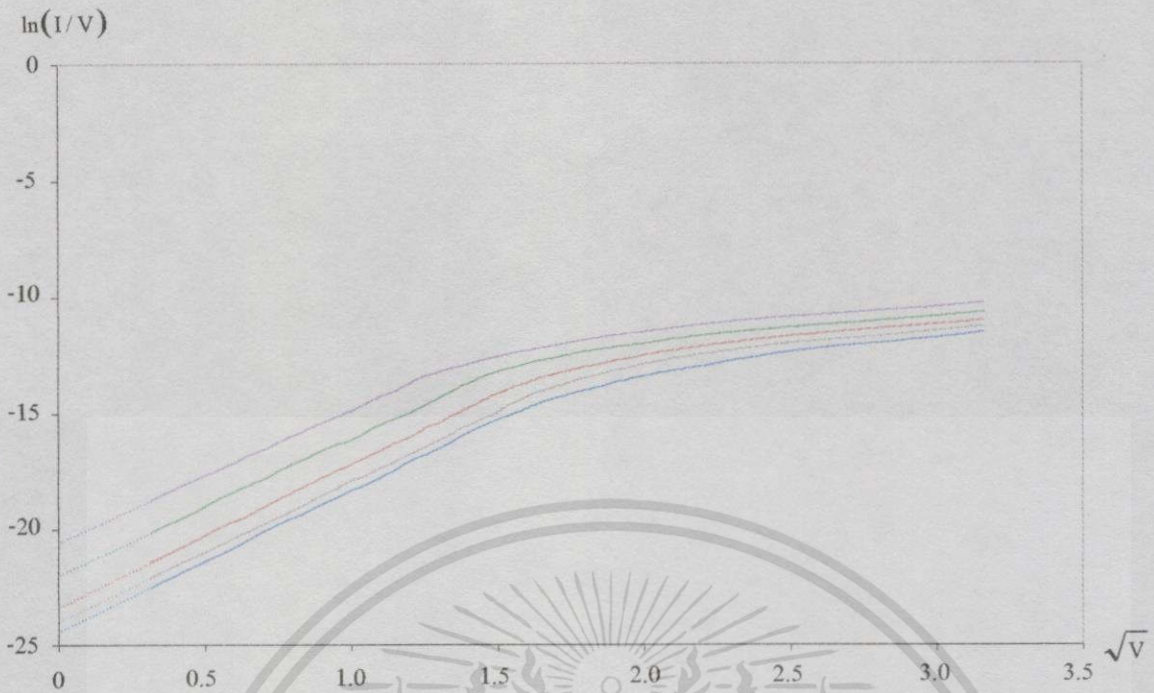
จากสมการที่ 4.19 จะได้ความสัมพันธ์ของ  $\ln(I/V) \propto \sqrt{V}$  ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรง มีความชันเป็นบวก และเมื่อทดสอบนำข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองตามเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ข้างบนนี้ของไดโอดโครงสร้าง MIS คือ ฟิล์มชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีอัตรา B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm โดยมีความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกเป็น  $3 \mu\text{m}$  และ  $4 \mu\text{m}$  มาแสดงไว้ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I/V) \propto \sqrt{V}$  ดังรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสรูปแบบ Frenkel-Poole ของไดโอดโครงสร้าง MIS

กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิก  $3 \mu\text{m}$  โดยที่

- ก) 10 ppm ( — )      ข) 50 ppm ( — )      ค) 100 ppm ( — )  
 ง) 500 ppm ( — )      จ) 1000 ppm ( — )



รูปที่ 4.28 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสรูปแบบ Frenkel-Poole ของไดโอดโครงสร้าง MIS ฟิล์มมีความหนาชั้นอินทรีนซิก  $4 \mu\text{m}$  โดยที่  
 ก) 10 ppm (—) ข) 50 ppm (—) ค) 100 ppm (—)  
 ง) 500 ppm (—) จ) 1000 ppm (—)

จากตัวอย่างการตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole ผ่านโครงสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกของไดโอดโครงสร้าง MIS ดังแสดงลักษณะกราฟในรูปที่ 4.27 และ รูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงประมาณ  $0.3 < \sqrt{V} < 1.5$  ซึ่งถือว่าสอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I/V) \propto \sqrt{V}$  (นั่นคือ ช่วงให้ไบอัสตรงประมาณ 0 V ถึง 2.25 V) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นถ้าหากพิจารณาช่วงที่เป็นเส้นตรงเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.18 ถ้า  $\sqrt{V} = 0$  จะได้ค่า  $\ln(I/V)$  และ  $\eta_2$  จากสมการที่ 4.20 และในตารางที่ 4.6

$$\eta_2 = \frac{d}{A} \exp \left[ \frac{q\phi_B}{kT} + \ln \frac{I}{V} \right] \quad (4.20)$$

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างการหาค่า  $\eta_2$  สำหรับการไหลแบบ Frenkel-Poole จากการทดลอง

อัตราส่วน B:C (ppm)	ความหนาชั้นอินทรีนซิก เมื่อพิจารณา $\sqrt{V} = 0$			
	3 $\mu\text{m}$		4 $\mu\text{m}$	
	ln (I/V)	$\eta_2$	ln (I/V)	$\eta_2$
10	-23.1	0.385	-24.5	0.127
50	-22.3	0.794	-24.0	0.193
100	-21.4	1.550	-23.3	0.309
500	-20.3	4.480	-21.9	1.207
1000	-19.1	13.257	-20.6	3.944

ซึ่งถ้าพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณกระแสที่ไหลจากการทดลองกับการคำนวณในสมการที่ 4.17 โดยกรณีตัวอย่างของไดโอดโครงสร้าง MIS อัตราส่วน B:C เป็น 500 ppm กับความหนาชั้นอินทรีนซิก 3  $\mu\text{m}$  เมื่อถูกไบอัสตรง 0.1 V พบว่า

จากการทดลองมีกระแสไหลเท่ากับ 1.02 nA

จากการคำนวณมีกระแสไหลเท่ากับ  $0.26 \times \eta_2 = 0.26 \times 4.48$   
 $= 1.16 \text{ nA}$

จะเห็นว่า ปริมาณกระแสจากการทดลองและคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะการไหลของกระแสในช่วง ไบอัสตรงนี้ (ประมาณ 0 V ถึง 2.25 V) สามารถอธิบายได้ด้วย Frenkel-Poole Emission

#### 4.3.5.3 การตรวจสอบการไหลของกระแสแบบ Tunnel or Field Emission

จากตารางที่ 2.1 สมการความสัมพันธ์กระแส - แรงดันสำหรับการไหลของกระแสแบบ Tunnel จะได้ว่า

$$I \approx \frac{AV^2}{d^2} \exp \left[ -\frac{4d\sqrt{(2m_h^*)} \cdot (q\phi_B)^{3/2}}{3qhV} \right] \quad (4.21)$$

หรือเท่ากับ

$$I = \eta_3 \frac{AV^2}{d^2} \exp \left[ -\frac{4d\sqrt{(2m_h^*)} \cdot (q\phi_B)^{3/2}}{3qhV} \right] \quad (4.22)$$

ใส่ ln ทั้งสองข้างจะได้

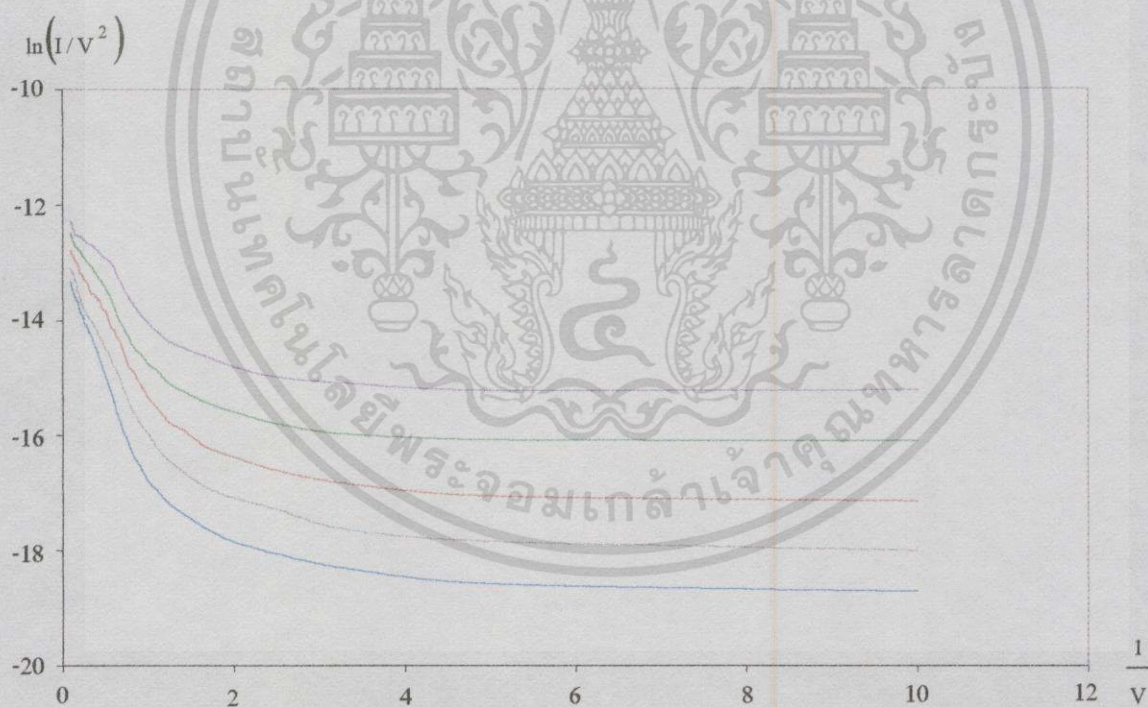
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) = \ln\left(\frac{A\eta_3}{d^2}\right) + \left[ -\frac{4d\sqrt{(2m_h^*)}(q\phi_B)^{3/2}}{3qhV} \right] \quad (4.23)$$

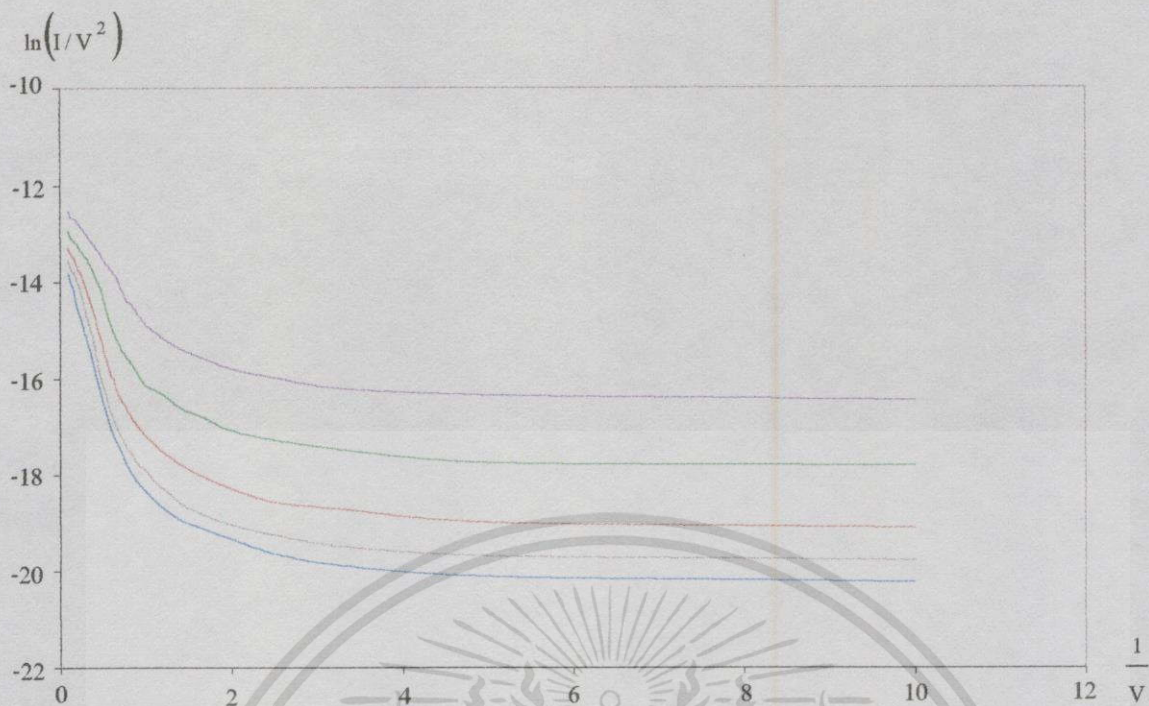
จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) = -\left(\frac{4d\sqrt{(2m_h^*)}(q\phi_B)^{3/2}}{3qh}\right) \cdot \frac{1}{V} + \ln\left(\frac{A\eta_3}{d^2}\right) \quad (4.24)$$

จากสมการที่ 4.24 จะได้ความสัมพันธ์ของ  $\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) \propto -\left(\frac{1}{V}\right)$  ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรงมีความชันเป็นลบ และเมื่อทดสอบนำข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองตามเงื่อนไขต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ข้างบนนี้ของไดโอดโครงสร้าง MIS คือ กรณีชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีอัตรา B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm โดยที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกเป็น 3  $\mu\text{m}$  และ 4  $\mu\text{m}$  มาแสดงไว้ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) \propto -\left(\frac{1}{V}\right)$  ดังรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสรูปแบบ Tunnel ของไดโอดโครงสร้าง MIS กรณีมีความหนาชั้นอินทรีนซิก 3  $\mu\text{m}$  โดยที่  
 ก) 10 ppm ( — )    ข) 50 ppm ( — )    ค) 100 ppm ( — )  
 ง) 500 ppm ( — )    จ) 1000 ppm ( — )



รูปที่ 4.30 ตัวอย่างการตรวจสอบการนำกระแสรูปแบบ Tunnel ของไดโอดโครงสร้าง MIS กระจกมีความหนาชั้นอินทรีนซิค 4  $\mu\text{m}$  โดยที่  
 ก) 10 ppm (—) ข) 50 ppm (—) ค) 100 ppm (—)  
 ง) 500 ppm (—) จ) 1000 ppm (—)

จากตัวอย่างการตรวจสอบลักษณะการไหลของกระแสแบบ Tunnel ผ่านโครงสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคของไดโอดโครงสร้าง MIS ดังแสดงลักษณะกราฟในรูปที่ 4.29 และ รูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่า ลักษณะกราฟเป็นเส้นโค้ง ซึ่งแสดงว่า รูปแบบการนำไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้ไม่มีลักษณะการไหลของกระแสแบบ Tunnel เลย

จากการตรวจสอบข้างบนนี้ทั้งหมดจะสามารถบอกได้ว่า ไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำเพชรที่ทำการศึกษานี้มีรูปแบบการนำไฟฟ้าหรือลักษณะการไหลของกระแสผ่านโครงสร้างของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคอยู่ 2 ลักษณะ นั่นคือ

1. ลักษณะการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole Emission ขณะให้แรงดันไบอัสตรงก่อนนำกระแส ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.17 นั่นคือ จากการทดลองและการตรวจสอบแล้ว ปริมาณการไหลของกระแสไหลไปข้างหน้าสามารถควบคุมได้ด้วยเงื่อนไขหลักคือ ความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค นอกจากนั้นยังมีเงื่อนไขรองได้แก่ อุณหภูมิ และ ปริมาณอะตอมสารเจือโบรอนในชั้นฟิล์มเพชรชนิดนี้

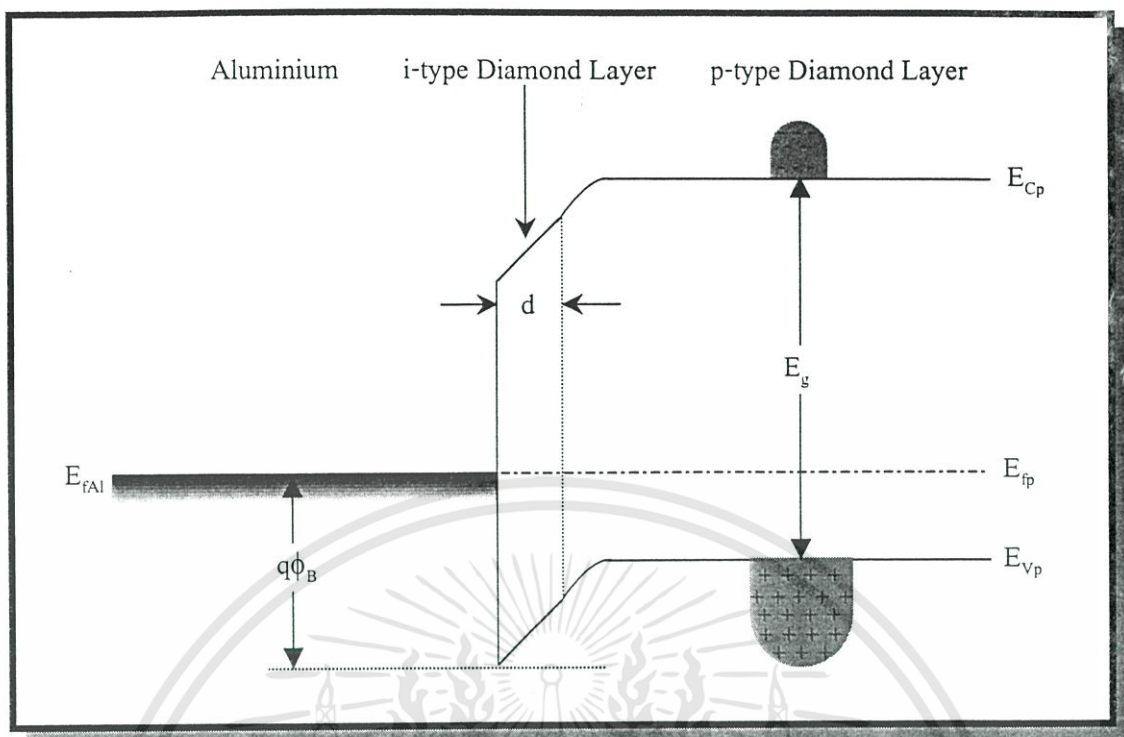
2. ลักษณะการไหลของกระแสแบบ Schottky Emission ขณะให้แรงดันไบอัสตรงในช่วงนำกระแสแล้ว ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.12 นั่นคือ จากการทดลองและการตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

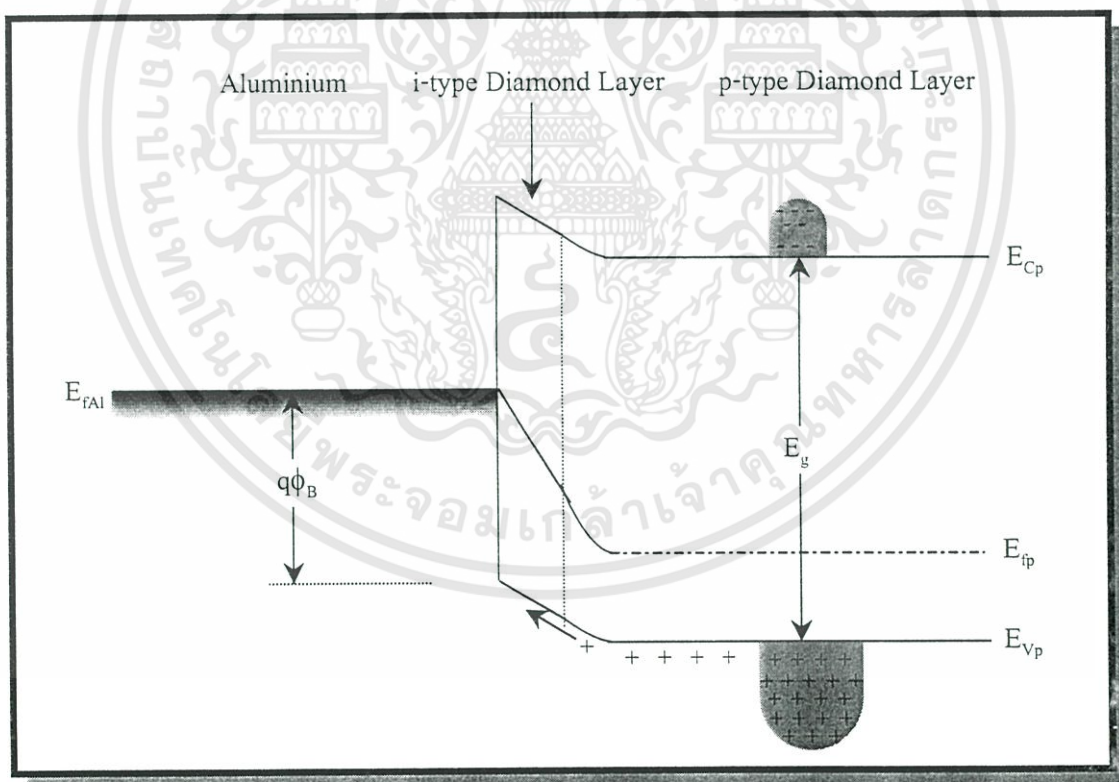
สอบแล้ว ปริมาณการไหลของกระแสไหลไปข้างหน้าสามารถควบคุมได้ด้วยเงื่อนไขหลักคือ ปริมาณอะตอมสารเจือโบรอนในชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี นอกจากนี้ยังมีเงื่อนไขรองได้แก่ อุณหภูมิ และ ความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

จากการตรวจสอบการนำไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อให้แรงดันไบอัสไปข้างหน้าแก่ไดโอดนี้ ในช่วงก่อนการนำกระแส ปริมาณประจุพาหะโฮลในฟิล์มเพชรชนิดพีจะได้รับพลังงานสูงมากขึ้น ทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะโฮลขึ้นจากบริเวณพื้นผิวสัมผัสของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีไปยังฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกขึ้น ทำให้ประจุพาหะโฮลถูกแตริปด้วยระดับพลังงานว่างภายในชั้นอินทรีนซิก เป็นผลให้ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกเพิ่มมากขึ้นเพียงพอที่จะทำให้ระดับพลังงานของโฮลมากกว่าค่าแพงศักย์ของไดโอดจึงทำให้เกิดการนำไฟฟ้าของไดโอดขึ้น นั่นคือจากค่าของ  $\eta_2$  สามารถยืนยันได้ว่า ปริมาณกระแสที่ไหลได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบจากการคำนวณ ถ้าไดโอดมีค่าพิคัดความต้านทานน้อยลงหรือมีปริมาณของประจุพาหะส่วนมากโฮลมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันแบบ Frenkel-Poole emission และเนื่องมาจากเงื่อนไขของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้อยู่ในลักษณะของ Polycrystalline diamond ซึ่งเป็นลักษณะของความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ และเมื่อระดับพลังงานของโฮลมีค่าสูงกว่าค่าแพงศักย์ของไดโอดแล้ว จึงเกิดการนำกระแสซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะการไหลของกระแสแบบ Schottky emission เป็นเงื่อนไขที่ขึ้นกับค่าความสูงของค่าแพงศักย์เพียงและอุณหภูมิ จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถเขียนลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้าได้ดังแสดงในรูปที่ 4.31

และในส่วนรูปแบบการไหลของกระแสขณะได้รับการไบอัสย้อนกลับ จากการทดลองด้วยการพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS จะเห็นได้ว่า ปริมาณของกระแสที่ไหลได้นี้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก จึงสามารถคาดการณ์เบื้องต้นได้ว่า กระแสไหลย้อนกลับอาจจะมีลักษณะการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole emission ซึ่งสามารถทำการศึกษาและตรวจสอบอย่างละเอียดต่อไป



(ก) ภาวะสมดุลย์ความร้อน



(ข) ภาวะการให้ไบอัสไปข้างหน้า

รูปที่ 4.31 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากเพชร ขณะที่อยู่

ก) ภาวะสมดุลย์ความร้อน ( $V = 0$ )

ข) ภาวะการให้ไบอัสไปข้างหน้า ( $V_{\text{เพชรชนิดที่}} > 0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาและพัฒนาไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานสารกึ่งตัวนำเพชรเนื่องด้วยคุณสมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นและได้เปรียบในเรื่องของการสังเคราะห์ที่ง่ายและถูก ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอตักไดโอด หรือรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในส่วนหลังของงานวิจัย โดยทำการสร้างขอตักไดโอดที่มีความเข้มข้นของปริมาณโบรอนในฟิล์มเพชรชนิดพีต่างกัน ได้แก่ 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่า ขอตักไดโอดมีความสูงของกำแพงศักย์อยู่ในช่วง 0.514 eV - 0.526 eV แต่เมื่อเปรียบเทียบการให้แรงดันไบอัสขนาดเท่ากันทั้งสองทิศทาง จะได้ว่า กระแสรั่วไหลย้อนกลับมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับกระแสไหลไปข้างหน้า หรือนั่นคืออัตราขยายการไหลของกระแส (current rectification ratio) ของไดโอดค่อนข้างต่ำถึงแม้ว่าขอตักไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเช่นเดียวกับการทำงาน แต่เนื่องจากในจุดประสงค์ของการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรนี้ค่อนข้างที่จะเน้นไปในการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูง จึงเป็นเหตุผลให้ทำการศึกษาไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ เพื่อเป็นการปรับปรุงและพัฒนาขอตักไดโอดให้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการทำงานสูงขึ้นและสามารถเลือกใช้งานตามเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยสร้างชั้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกขึ้นระหว่างชั้นของโลหะกับฟิล์มเพชรชนิดพี หรือเป็นไดโอดโครงสร้าง MIS นั้นเอง เพราะฉะนั้นจึงทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากแนวทางการแก้ปัญหานี้ โดยทำการศึกษาในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ พิจารณาผลของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่มีความหนาเป็น 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  และ 4  $\mu\text{m}$  ระหว่างชั้นของโลหะและฟิล์มเพชรชนิดพี ผลของอัตราส่วน B:C 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm ที่เติมให้แก่ฟิล์มเพชรชนิดพี และการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิห้อง (27°C) เป็น 100°C, 150°C, 200°C และ 250°C นอกจากนี้ยังพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีความหนาของฟิล์มเพชรอินทรีนซิกและอัตราส่วน B:C เปลี่ยนแปลงอีกด้วย

จากการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกในโครงสร้างระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมและฟิล์มเพชรชนิดพี พบว่า เมื่อฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีความหนาเพิ่มขึ้นสามารถทำให้ปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับมีค่าลดลงอย่างมาก ในเวลาเดียวกันกระแสไหลไปข้างหน้าจะได้รับการไบอัสตรงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขณะที่ไดโอดถูกไบอัสย้อนกลับ ส่วนการศึกษาผลของอัตราส่วน B:C ขณะที่มีความหนาของฟิล์มเพชรชนิด

อินทรีนซิคคองที่ พบว่า เมื่อเติมปริมาณสารเจือโบรอนหรืออัตราส่วน B:C ในฟิล์มเพชรชนิดพีให้มากขึ้น ปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อไบอัสตรง แต่ในขณะที่ปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังที่กล่าวทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค หรือไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ สามารถลดปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับได้ และการเพิ่มอัตราส่วน B:C หรือในที่นี้ก็คือการเพิ่มประจุพาหะส่วนมากนั้น สามารถเพิ่มปริมาณการไหลของกระแสไปข้างหน้าได้อย่างชัดเจน นั่นคือเพิ่มอัตราขยายการไหลของกระแส ขณะที่ได้รับการไบอัสขนาดเท่ากันในทั้งสองทิศทาง จากการทดลอง ขณะที่ไบอัสขนาด 10 V จะได้อัตราขยายการไหลของกระแสกว่า 7000 เท่า ถ้าฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคหนา 4  $\mu\text{m}$  และอัตราส่วน B:C เป็น 1000 ppm

นอกจากนั้นตรวจสอบได้ว่า การปรับปรุงโครงสร้างของขอตักไดโอดเห็นเป็นไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการนำไฟฟ้าหรือการไหลของกระแส นั่นคือการนำไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้เกิดขึ้น 2 รูปแบบนั่นคือ ลักษณะการไหลของกระแสก่อนการนำไฟฟ้า และการไหลของกระแสขณะนำไฟฟ้าแล้ว โดยในช่วงก่อนการนำไฟฟ้ามีลักษณะการไหลของกระแสแบบ Frenkel-Poole emission เนื่องจากประจุพาหะโฮลที่ถูกฉีดผ่านรอยสัมผัสเข้าไปในชั้นความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิคจะถูกแตรปจากระดับพลังงานว่างในชั้นอินทรีนซิคนี้ จึงต้องได้รับพลังงานจากภายนอก หรือแรงดันไบอัสตรงมากขึ้นจนกระทั่งประจุโฮลสามารถไหลผ่านความหนาของชั้นอินทรีนซิคได้ จึงเข้าสู่ในช่วงนำกระแสซึ่งจะมีลักษณะการไหลของกระแสแบบ Schottky emission โดยจะมีกระบวนการไหลที่ขึ้นอยู่กับความสูงของกำแพงศักย์เพียงอย่างเดียว ณ อุณหภูมิคงที่ และจะมีปริมาณกระแสไหลมากยิ่งขึ้นได้ ถ้าหากมีปริมาณประจุพาหะโฮลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการทดสอบการทำงานในอุณหภูมิสูงของไดโอดโครงสร้าง MIS ยังพบว่า ไดโอดโครงสร้าง MIS สร้างจากฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการ HFCVD ในห้องวิจัยจากศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์นี้ สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 250  $^{\circ}\text{C}$  ค่ากระแสที่วัดได้แม้ว่าจะเป็นไปตามทฤษฎีก็จริง แต่ก็คลาดเคลื่อนจากการคำนวณจำนวนหนึ่ง ซึ่งน่าจะเป็นผลสืบเนื่องมาจากค่าของ  $\eta_{22}$  ในช่วงก่อนการนำกระแส เพราะว่า ฟิล์มเพชรที่เราทำการศึกษาเป็นฟิล์มเพชรประเภทโครงผลึกเชิงซ้อน (Polycrystalline diamond) ซึ่งจากสมการอธิบายการไหลของกระแสต่าง ๆ นี้ เป็นการไหลของกระแสในสารกึ่งตัวนำโครงผลึกเดี่ยว (Single-crystalline semiconductor) รวมไปถึงส่วนของสถานะพื้นผิว (surface state) ที่เกิดขึ้นอีกด้วย

จากการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้งานตามเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไป ยกตัวอย่างเช่น ด้วยคุณสมบัติที่มีกระแสไหลค่อนข้างต่ำ จึงสามารถใช้งานเป็นแหล่งจ่ายกระแสให้กับอุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ หรือการประยุกต์ใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้า หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MISFET หรือการประยุกต์ใช้ในลักษณะงานแบบดิจิทัลที่ต้องใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง หรือมีกัมมันตภาพรังสีสูง ๆ โดยอาศัยคุณสมบัติการเรคตีไฟร์ที่ดีของ โครงสร้าง MIS ผนวกกับคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำเพชรนี้ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert F. Davis. **Diamond Films and Coatings**. New Jersey : Noyes Publication. 1993.
- [2] J. E. Field. **The Properties of Natural and Synthetic Diamond**. London : Harcourt Brace Janovich Publisher. 1992.
- [3] J.E.Field. **The Properties of Diamond**. London : Academic Press, Inc. 1979.
- [4] Iida M., Maekawa H., Kimura H., Akiba Y., Hirose Y., Kurosu T. and Matsumae Y. "Electrical Conduction Mechanism in Polycrystalline p-Type Diamond Films." 2nd International Conference on the Applications of Diamond Films and Related Materials. 1993, pp. 367-370.
- [5] Lawrence S. Pan, Don R. Kania. **Diamond : Electronic Properties and Applications**. Massachusetts : Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [6] K. E. Spear, J. P. Dismukes. **Synthetic Diamond : Emerging CVD Science and Technology**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [7] John R. Ferraro, Kazuo Nakamoto. **Introductory Raman Spectroscopy**. London : Academic Press, Inc. 1994.
- [8] กอบศักดิ์ ศรีประภา. "การศึกษากาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [9] พรศักดิ์ อรรถวานิช. วัสดุศาสตร์. พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ.2536. 2536. (sem)
- [10] Mauro Zambuto. **Semiconductor Devices**. Singapore : McGraw-Hill. 1989.
- [11] M. S. Tyagi. **Introduction to Semiconductor Materials and Devices**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [12] Yannis P. Tsvividis. **Operation and Modeling of The MOS Transistor**. New York : McGraw-Hill. 1988.
- [13] ภาณุพันธ์ โอฟาร์กิจไพบูลย์ และคณะ. "ไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร." ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22, พฤศจิกายน 2542. หน้า 307-310.
- [14] S. M. Sze. **Physics of Semiconductor Devices**. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 1969.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] กอบศักดิ์ ศรีประภา และคณะ. "ผลของการเตรียมพื้นผิวฐานรองที่มีต่อการนิเวศลิเธียมของฟิล์มเพชร." ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, พฤศจิกายน 2541. หน้า 688-691.



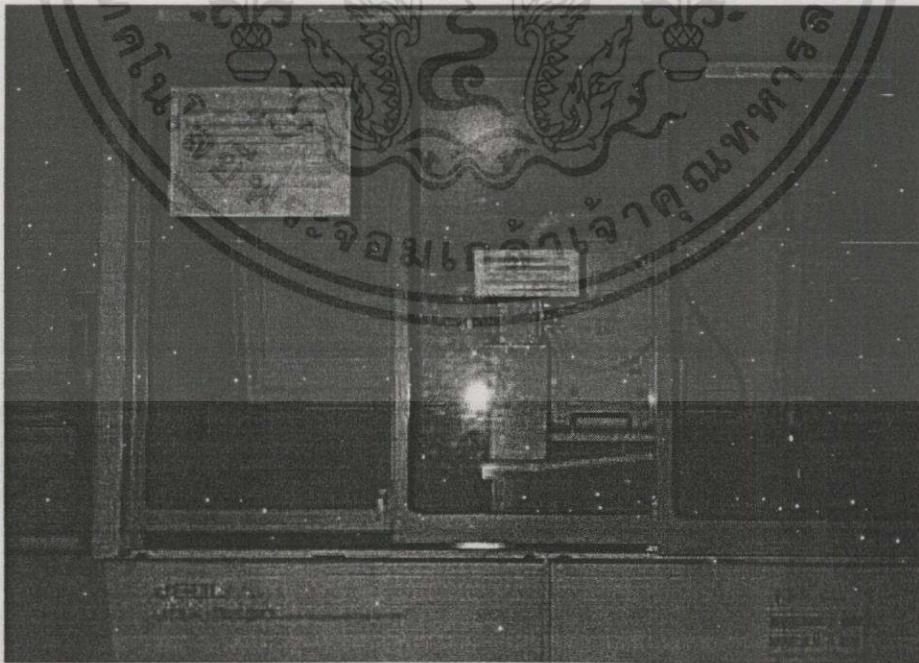
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ชุดเครื่องมือตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

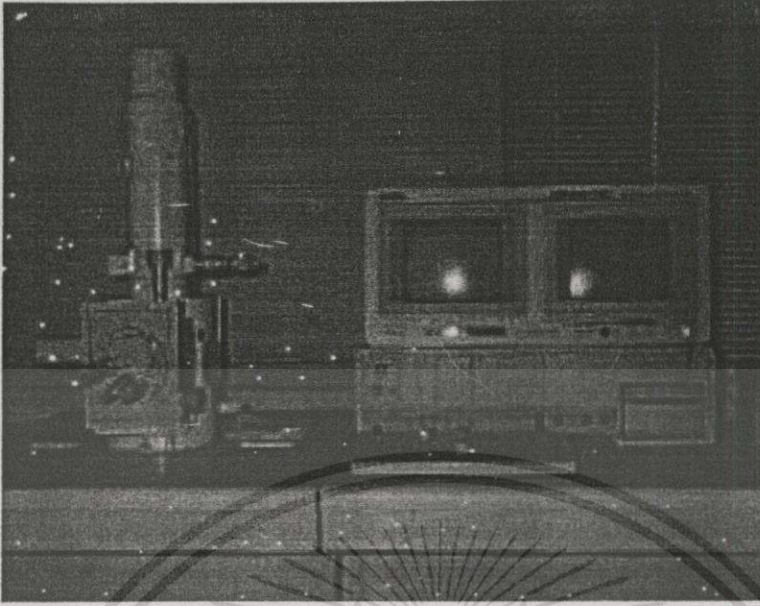


รูปที่ ก-1 Raman Spectroscope รุ่น system 2000 ของบริษัท Renishaw



รูปที่ ก-2 Single Crystal X-ray Diffractometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 เครื่อง Scanning electron microscope ของ JEOL รุ่น JSM-5410



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 ยอดความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สัมพัทธ์จากระนาบของฟิล์มเพชร

หมายเลข	Interplanar spacing (Å)	2-theta	ความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	hkl
1	2.0619	43.87	100	111
2	1.2610	75.30	25	220
3	1.0753	91.51	16	311
4	0.8913	119.60	8	400
5	0.8183	140.54	16	331

ตารางที่ ข-2 แสดงค่า Inter-planar spacing มาตรฐานของเพชร (ASTM 6-675)

Inter-planar spacing	hkl
2.06	111
1.261	220
1.0754	311
-	222
0.8916	400
0.8182	331
0.7280	422
0.6864	511, 333
0.6305	440
0.6029	531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณหาอัตราส่วน B:C ที่ใช้ในการทดลอง

ยกตัวอย่าง ต้องการ อัตราส่วน B : C = 1 ppm ในสารละลาย 50 cm<sup>3</sup>

เนื่องจาก C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 1 cm<sup>3</sup>หนัก 0.796 กรัม

C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 50 cm<sup>3</sup>หนัก 0.796 x 50 = 39.80 กรัม

ส่วนมวลโมเลกุลของ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH = 2(12.01115) + 6(1.00797) + 1(15.9994) = 46.0695 กรัม/โมล

ดังนั้น C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 1 โมล จะมี C =  $\frac{2(12.01115)}{46.0695} = 24.023$  กรัม

เพราะฉะนั้น C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 50 cm<sup>3</sup> มีปริมาณ  $\frac{39.80}{46.0695 \text{ g/mole}} = 0.8639$  โมล

ดังนั้น C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 0.8639 โมล มี C = 0.8639 x 24.023 = 20.7535 กรัม

ส่วนมวลโมเลกุลของ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2(10.811) + 3(15.9994) = 69.6202 กรัม

ดังนั้น B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 โมล จะมี B =  $\frac{2(10.811)}{69.6202} = 21.622$  กรัม

ดังนั้น B : C = 1 ppm =  $\frac{1}{1 \times 10^6}$

นั่นคือ C 10<sup>6</sup> กรัม จะมี B อยู่ 1 กรัม

ถ้ามี C 20.7535 กรัมจะมี B อยู่เท่ากับ 20.7535 x 10<sup>-5</sup> กรัม

เพราะฉะนั้น B 21.622 กรัม จะมีอยู่ใน B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 โมล

ดังนั้น B 20.7535 x 10<sup>-5</sup> กรัม จะมีอยู่ใน B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับ 9.5983 x 10<sup>-7</sup> โมล

เพราะฉะนั้น จะต้องใช้ B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> น้่านหนักเท่ากับ (9.5983 x 10<sup>-7</sup>) (69.6202) = 6.6824 x 10<sup>-5</sup> กรัม

สำหรับ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 50 cm<sup>3</sup> :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B : C = 10 ppm	ต้องใช้	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> หนัก	6.6824 x 10 <sup>-4</sup> กรัม
B : C = 50 ppm	ต้องใช้	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> หนัก	3.3412 x 10 <sup>-3</sup> กรัม
B : C = 100 ppm	ต้องใช้	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> หนัก	6.6824 x 10 <sup>-3</sup> กรัม
B : C = 500 ppm	ต้องใช้	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> หนัก	3.3412 x 10 <sup>-2</sup> กรัม
B : C = 1000 ppm	ต้องใช้	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> หนัก	6.6824 x 10 <sup>-2</sup> กรัม
B : C = 5000 ppm	ต้องใช้	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> หนัก	3.3412 x 10 <sup>-1</sup> กรัม
B : C = 10000 ppm	ต้องใช้	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> หนัก	6.6824 x 10 <sup>-1</sup> กรัม

#### มวลอะตอม และ มวลโมเลกุล

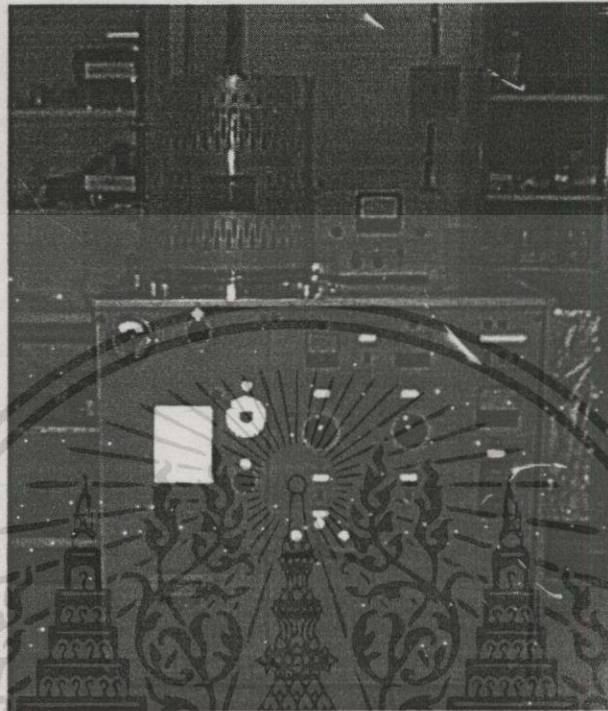
C	=	12.01115
B	=	10.811
O	=	15.9994
H	=	1.00797
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	=	46.0695
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	69.6202

#### ความหนาแน่นของสารละลาย

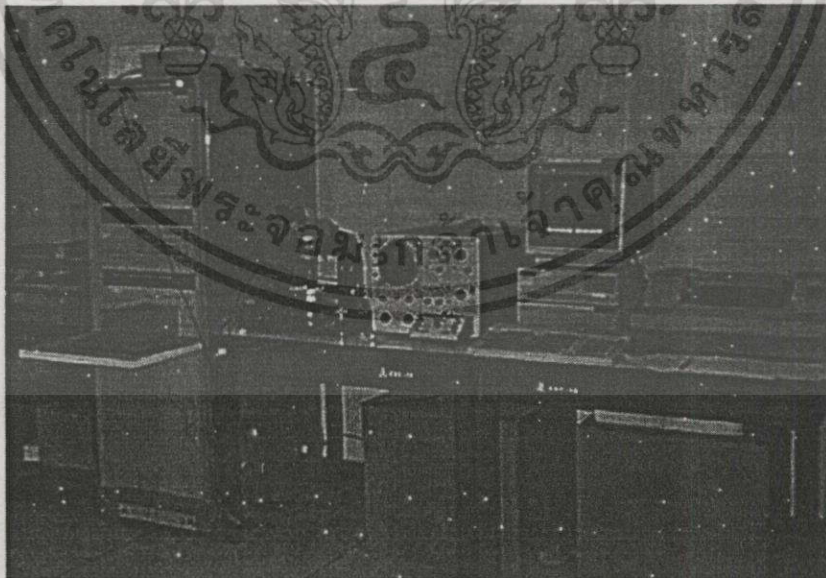
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1 cm <sup>3</sup> หนัก	0.796	กรัม
----------------------------------	------------------------	-------	------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง



รูปที่ ง-1 เครื่อง Vacuum Evaporator

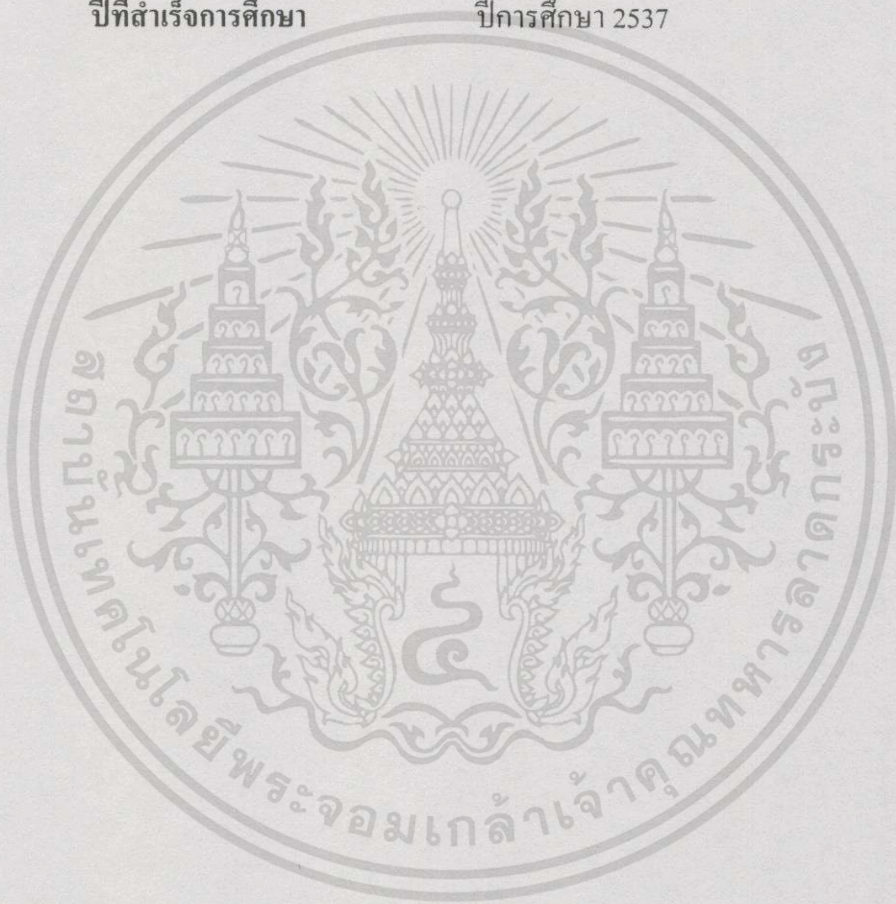


รูปที่ ง-2 เครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/Component Test System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายภาณุพันธ์ โอพารกิจไพบูลย์
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 6 มีนาคม พ.ศ.2517
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้