

การศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร

STUDIED ON CHARACTERISTICS OF MIS DIODE FROM  
SEMICONDUCTING DIAMOND



โดย

นายเกรียงไกร ไชยพล

นางสาวศิริวรรณ ศิริโก

46246  
2544

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 46246  
วัน, เดือน, ปี 1 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

61202517

การศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร

STUDIED ON CHARACTERISTICS OF MIS DIODE FROM  
SEMICONDUCTING DIAMOND

โดย

นายเกรียงไกร ไชยพล เลขประจำตัว 42015167

นางสาวศิริวรรณ ศิริโก เลขประจำตัว 42015196

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2544

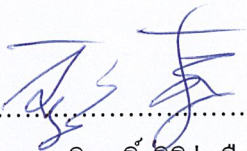
ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของไดโอด โครงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร

ผู้จัดทำ

- |                   |        |             |          |
|-------------------|--------|-------------|----------|
| 1. นายเกรียงไกร   | ไชยพล  | เลขประจำตัว | 42015167 |
| 2. นางสาวศิริวรรณ | ศิริโก | เลขประจำตัว | 42015196 |

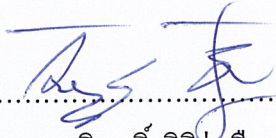
  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง)

การศึกษาคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS จากสารกึ่งตัวนำเพชร

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

- |                   |        |             |          |
|-------------------|--------|-------------|----------|
| 1. นายเกรียงไกร   | ไชยพล  | เลขประจำตัว | 42015167 |
| 2. นางสาวศิริวรรณ | ศิริโก | เลขประจำตัว | 42015196 |

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบ

  
.....  
(รศ.ดร.วิสุทธี จูติรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

## ไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

นายเกรียงไกร ไชยพล

นางสาวศิริวรรณ ศิริโก

รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยกระบวนการ CVD แบบความร้อน โดยมีแหล่งกำเนิดเป็นเอทิลอัลกอกซอลด์[1] เป็นไดโอดโครงสร้างระหว่างโลหะ (Metal) / ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก (i-type diamond semiconductor) / ฟิล์มเพชรชนิดพี (p-type diamond Semiconductor) โดยใช้ลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัสโลหะและโบรอนเป็นสารเจือชนิดพี ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของโบรอน หรืออัตราส่วน B:C และผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่มีต่อไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ พบว่า เมื่อความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีค่ามากขึ้น จะทำให้แรงดันพังทลายมีสูงขึ้นตามด้วย และในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณสารเจือโบรอนให้มากขึ้น จะทำให้กระแสไปข้างหน้าของไดโอดนี้มีค่าสูงขึ้นด้วย

## Structural MIS Diode Fabricated from Diamond Films

Mr.Kriengkrai Chaiyapon

Miss.Siriwan Sirigo

Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongrueng (Sepervisor)

YEARS,2001

### Abstract

Consequently semiconducting diamond film can be synthesized with ethylalcohol by thermal CVD method[1]. This paper presents the application of diamond films being diode with a metal / intrinsic diamond semiconductor / p-type diamond semiconductor structure (MIS diode). Aluminium and Boron are used as metal contact and p-type doped impurity respectively. Effect of Boron-doped concentration and the thickness of intrinsic film are investigated. It's found that the reverse breakdown voltage is increased if the thickness of intrinsic layer is increased. And the forward current is decreased if the boron-doped concentration is decreased.

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับในการศึกษาค้นคว้าและทำการทดลองจนสำเร็จลุล่วงได้นั้นต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา project และ พี่ชรัตน์ วรรณมา ผู้ที่คอยช่วยเหลือ ชี้แนะ ควบคุม สั่งงาน และวางแนวทางในการค้นคว้า ทดลองและยังช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาด ของการทำ project ครั้งนี้ ขอขอบคุณพี่ๆทุกคนในห้อง superconductor และเพื่อนๆที่ให้คำแนะนำและกำลังใจ ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือให้รายงานฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณในทุกๆสิ่งที คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยสนับสนุน และคอยช่วยเหลือในการศึกษามาโดยตลอด หากผิดพลาดประการใดขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายเกรียงไกร ไชยพล

นางสาวศิริวรรณ ศิริโก

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
คำนำ.....	X
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมา.....	2
<b>บทที่ 2 โครงสร้างและคุณสมบัติของเพชร.....</b>	<b>4</b>
2.1 โครงสร้างของเพชร.....	4
2.2 คุณสมบัติทางกล.....	6
2.3 คุณสมบัติทางแสง.....	7
2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	7
2.5 หลักการของวิธีการ CVD (Chemical Vapor Deposition).....	8
2.5.1 หลักการ CVD แบบความร้อน.....	9
2.5.2 ประโยชน์ของฟิล์มเพชรและการประยุกต์ใช้งาน.....	11
2.5.2.1 Wear Resistant Coating.....	11
2.5.2.2 Thermal Management.....	11
2.5.2.3 Electronic device.....	12
2.6 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรของวิธี CVD.....	12
2.6.1 กระบวนการของก๊าซเฟส.....	12
2.6.2 ปฏิริยาที่ไร้ผล.....	14
2.6.3 ผลของอุณหภูมิที่ฐานรอง.....	15
2.6.4 บทบาทของก๊าซไฮโดรเจน.....	15
2.6.5 บทบาทของออกซิเจน.....	15
2.7 ปรากฏการณ์นิวคลีเอชัน.....	15
2.8 แบบจำลองการเกิดฟิล์มเพชร.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
2.9 รอยสัมผัสระหว่าง โลหะกับฟิล์มเพชร.....	18
2.9.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก.....	18
2.9.2 รอยสัมผัสแบบชอตต์กี.....	19
2.10 ชอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	22
2.11 ไดโอดโครงสร้าง MIS (Metal-Insulator-Semiconductor Diode) .....	24
2.11.1 ภาวะสมมูลย์ทางความร้อน.....	25
2.11.2 ภาวะได้รับการไบอัสจากภายนอก.....	26
2.11.2.1 ภาวะการให้ไบอัสไปข้างหน้า(Forward bias).....	26
2.11.2.2 ภาวะการให้ไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias).....	27
<b>บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....</b>	<b>29</b>
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง.....	29
3.1.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอน.....	29
3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรอง โดยการขัดด้วยครีมเพชร.....	29
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	31
3.3 กระบวนการกำจัดชั้นฐานรองซิลิกอน.....	34
3.4 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร.....	34
3.5 กระบวนการสร้างชอตต์กีไดโอดจากฟิล์มเพชร.....	34
3.6 กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขต่าง.....	36
3.6.1 ศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก.....	36
3.6.2 ศึกษาผลของอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี.....	41
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	
<b>เทคนิคการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....</b>	<b>42</b>
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มเพชรด้วยวิธี SEM .....	42
4.2 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman Spectroscopy.....	45
4.3 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชอตต์กีไดโอด.....	47
4.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	51
4.4.1 ผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก.....	51

## สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

4.4.2 ผลของความเข้มข้นของโบรอนหรืออัตราส่วน B/C.....	56
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	60
หนังสืออ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	64

## สารบัญรูป

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร.....	4
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับแกรไฟต์.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพระบบ Hot-Filament Assisted Thermal.....	10
รูปที่ 2.4 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร.....	13
รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการเกิดกราฟไฟต์และเพชร ขณะสังเคราะห์เพชร.....	14
และแลกเปลี่ยนกลับไปกลับมาของพันธะแบบ $sp^2$ ไปสู่ $sp^3$	
รูปที่ 2.6 กลไกการนิวเคลียสและ การเกิดขึ้นของฟิล์มเพชร.....	16
รูปที่ 2.7 แผนภาพการเกิดฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD.....	17
รูปที่ 2.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก.....	18
ระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร	
รูปที่ 2.9 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบชอตต์กี.....	19
ระหว่างโลหะกับฟิล์ม	
รูปที่ 2.10 ลักษณะแถบพลังงานของ ไดโอด โครงสร้าง MIS [3].....	20
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของ ไดโอด โครงสร้าง MIS.....	21
รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมพลังงานของชอตต์กี ไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรเพชร.....	23
รูปที่ 2.13 ไดโอด โครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	24
รูปที่ 2.14 แบบจำลองแถบพลังงานของ ไดโอด โครงสร้าง MIS .....	25
ในอุดมคติภาวะสมดุลความร้อน	
รูปที่ 2.15 แถบพลังงานของ ไดโอด โครงสร้าง MIS .....	26
ในอุดมคติเมื่อได้รับไบอัสลบที่ชั้นโลหะ	
รูปที่ 2.16 ลักษณะแถบพลังงานของ ไดโอด โครงสร้าง MIS .....	27
ในอุดมคติในช่วงปลอดประจุ	
รูปที่ 2.17 ลักษณะแถบพลังงานของ ไดโอด โครงสร้าง MIS.....	28
ในอุดมคติในช่วงกลับประจุพาหะ	
รูปที่ 3.1 คริมเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิกอน.....	30
ขนาดเมสส์ผลึก 0.25 ไมครอน	
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	31
หลังจากขัดด้วยคริมเพชร ขนาดเมสส์ 0.25 ไมครอน	

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD.....	31
รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมระบบ CVD อย่างง่าย ๆ ที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	33
รูปที่ 3.5 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างขอตัก์โคไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร.....	35
รูปที่ 3.6 ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกที่สร้างทับฟิล์มเพชรชนิดพี.....	38
รูปที่ 3.7 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS.....	39
ที่สร้างจากฟิล์มเพชร	
รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ.....	43
รูปที่ 4.2 Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรในลักษณะต่าง ๆ กัน.....	46
รูปที่ 4.3 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของขอตัก์โคไดโอดกรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ.....	48
รูปที่ 4.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของขอตัก์โคไดโอดกรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 10ppm .....	52
กรณีความหนาชั้น i ต่างๆ	
รูปที่ 4.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 50ppm.....	53
กรณีความหนาชั้น i ต่างๆ	
รูปที่ 4.7 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 100ppm.....	53
กรณีความหนาชั้น i ต่างๆ	
รูปที่ 4.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 500ppm .....	54
กรณีความหนาชั้น i ต่างๆ	
รูปที่ 4.9 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 1000ppm .....	54
กรณีความหนาชั้น i ต่างๆ	
รูปที่ 4.10 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 1 $\mu$ m .....	57
กรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ....	
รูปที่ 4.11 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 2 $\mu$ m.....	57
กรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ	
รูปที่ 4.12 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 3 $\mu$ mกรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.13 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา 4 $\mu$ mกรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ.....	58

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 1	2
แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชร.....	
กับสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์	
ตารางที่ 3.1	37
เงื่อนไขความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ใช้ในการทดลอง.....	
ตารางที่ 3.2	41
เงื่อนไขอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีที่ใช้ในการทดลอง.....	
ตารางที่ 4.1	47
ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะ.....	
ชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน	
ตารางที่ 4.2	50
ค่ากระแสอิ่มตัวและความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส.....	
เมื่อมีอัตราส่วน B:C ต่างๆ	
ตารางที่ 4.3	55
ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ทำให้ไดโอดเรืองไฟต่างๆ.....	
มีกระแสรั่วเกิดขึ้น 0.2 ไมโครแอมป์แปร์	
ตารางที่ 4.4	55
ค่าแรงดันไบอัสไปข้างหน้าที่ทำให้ไดโอดเรืองไฟต่างๆ.....	
มีกระแสรั่วเกิดขึ้น- 0.2 ไมโครแอมป์แปร์	
ตารางที่ 4.5	59
ปริมาณกระแสไหลของไดโอดโครงสร้างMISที่มีชั้นอินทรีนซิก.....	
หนา 3 ไมครอนเมื่อพิจารณาการให้ไบอัสตรงและย้อนกลับขนาด3 โวลต์	

## คำนำ

นับตั้งแต่มีการค้นพบว่าเพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอน และสามารถนำมาสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่แทนซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ได้เนื่องจากฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติที่ดีกว่าหลายประการ เช่น มีช่องว่างพลังงานต้องห้ามสูงถึง 5.45 อิเล็กตรอนโวลต์ นอกจากนี้ยังมีค่าความคล่องตัวพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ค่าแรงดันพังทลายสูงและค่าความนำความร้อนสูงมาก ดังนั้นเพชรจึงเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทนความร้อน , กำลัง และ อุณหภูมิสูง

โครงการนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาไดโอด โครงสร้าง MIS ที่ใช้ฟิล์มเพชรเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการปรับปรุงโครงสร้างจากขอตักไดโอด ที่สร้างจากฟิล์มเพชรเช่นกัน เนื่องจากยังมีข้อเสียในเรื่องของกระแสรั่วไหลย้อนกลับและขีดจำกัดในการทำงานของขอตักไดโอด ซึ่งไม่ตรงกับจุดประสงค์หลักของคุณสมบัติของเพชร ซึ่งทำงานในที่ที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสารกึ่งตัวนำทั่วไป

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำหวังว่า ปริญญาธิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่าน ไม่นมากก็น้อย

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันนี้สารกึ่งตัวนำได้เข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก และ สารกึ่งตัวนำก็ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเรียกกันว่า “ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ” โดยใช้พื้นฐานทางด้านกลศาสตร์ควอนตัมเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ โดยสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันทั่วไป คือ ซิลิกอน(Si) และ แกลเลียมอาร์เซไนด์(GaAs) แต่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังมีข้อจำกัดทางการใช้งานอยู่บ้าง อาทิเช่น มีข้อจำกัดในด้านการใช้งานที่อุณหภูมิสูง หรือที่ความถี่สูง ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารทั้งสองชนิดนี้นั่นเอง ทำให้มีการศึกษาสารที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันคือในกลุ่ม 4 ในตารางธาตุ หลังจากที่ได้มีการค้นพบว่าคาร์บอนเป็นธาตุที่มีการเรียงตัวได้หลายรูปแบบ เพชรซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนจึงได้ถูกนำมาศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้แทนสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้ เพราะว่าเพชรมีคุณสมบัติที่ดีกว่า ไม่ว่าจะเป็น

ช่องว่างพลังงานต้องห้าม(Energy Band) ที่สูงถึง 5.5 eV(ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากที่สุด ในบรรดาสารกึ่งตัวนำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน) ทำให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม สำหรับการนำมาใช้งาน ที่อุณหภูมิ เพราะยังสามารถควบคุมประจุพาหะได้ โดยไม่มีผลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนั้น เพชรยังมีความคล่องตัวของประจุพาหะสูง, แรงดันพังทลายและค่าคงที่ไดโอดเล็กทรอนิกส์ต่ำ ซึ่งทำให้ทำงานซึ่งทำงานที่ความถี่สูงได้ดี ซึ่งเมื่อนำคุณสมบัติกายภาพของเพชร, ซิลิกอน, และแกลเลียมอาร์เซไนด์ มาเปรียบเทียบกับกันดังแสดงในตาราง ที่ 1

Materials	Diamond	Silicon	GaAs
Crystal Structure	Diamond	Diamond	Zinc Blend
Energy Gap (eV)	5.45	1.12	1.43
Electron Mobility (cm <sup>2</sup> /V.s)	2000	1500	8500
Hold Mobility (cm <sup>2</sup> /V.s)	1800	600	400
Breakdown Field (V/cm)	10x10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>6</sup>	6x10 <sup>6</sup>
Resistivity (Ω.cm)	10 <sup>10</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>9</sup>
Saturated Electron Velocity(cm/s)	2.7x10 <sup>7</sup>	1x10 <sup>7</sup>	1x10 <sup>7</sup>
DielectricConstant(ε)	5.7	11	12.5
Lattice Constant(Å)	3.567	5.431	5.653
Thermalconductivity (W/cm.K)	20	1.5	0.46
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.515	2.42	5.32

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชร กับสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์

## 1.1 ความเป็นมา

การเริ่มต้นสังเคราะห์เพชรนั้น เริ่มจากทราบว่าเพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอน โดยในปี ค.ศ.1772 โดย Antoine Lavoisier นักเคมีชาวฝรั่งเศสได้ทำการทดลองเผาเพชรในภาชนะปิดสนิทด้วยความร้อนจากเลนส์รวมแสงผลที่ได้คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และส่วนที่เหลือคือคาร์บอน (Carbon) หรือผงถ่าน แต่ทำงานชิ้นนี้ไม่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

จนกระทั่งในปี ค.ศ.1797 Smitson Tennant ชาวอังกฤษได้ทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้อีก ต่อมา Sir William Henry Bragg ได้ทดลองใช้ X-rayศึกษาก็พบว่าเพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอน นับตั้งแต่นั้นก็ได้มีการศึกษาและสังเคราะห์เพชรจากคาร์บอนรูปแบบอื่น ๆ มาตามลำดับดังต่อไปนี้

ในปี ค.ศ.1955 Bundy et al. ได้ทำการสังเคราะห์เพชรได้เป็นผลสำเร็จ ที่ General Electric Research laboratories(GE) ด้วยวิธี HPHT(High-Pressure High-temperature) ที่ General Electric Research laboratories(GE) โดยใช้ความร้อนและแรงอัดจนทำให้กราไฟต์เปลี่ยนรูปเป็นเพชร

ค.ศ.1949 W.G.Eversole et al.สังเคราะห์เพชรบนผลึกเพชรจากก๊าซไฮโดรคาร์บอนด้วยความดันต่ำได้สำเร็จที่ Union Carbide Corporation

ค.ศ.1956 Boris Spitsyn et al. เสนอการสร้างเพชรที่ความดันต่ำด้วยการทำให้ก๊าซ  $CCl_4$  และ  $CBr_4$  แตกตัวเกิดเพชรบนผลึกเพชร

ค.ศ.1971 Augus et al. เสนอถึงการใช้อะตอมไฮโดรเจนที่เกิดจากการแตกตัวของไฮโดรเจนที่สแตนในการกำจัดกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นขณะทำการสังเคราะห์

ค.ศ.1973 Proferl et al.เสนอการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดนี้โดยการผสมก๊าซ  $B_2H_6$  เข้าไปในก๊าซ  $CH_4$  ระหว่างการสังเคราะห์

ค.ศ.1974เริ่มมีการสังเคราะห์เพชรในญี่ปุ่น ที่ Japan's National Institute for research in Inorganic Materials (NIRIM) โดย Setaka et al. ด้วยวิธี HPHT และได้พัฒนามาเป็นวิธี CVD (Chemical Vapour Deposition) ซึ่งสามารถสังเคราะห์เพชรให้เป็นฟิล์ม และมีความหลากหลายมากกว่า ด้วยวิธี CVD ทำให้การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรพัฒนาไปอย่างมาก มีการเสนอเทคนิคการสังเคราะห์อย่างต่อเนื่อง

ค.ศ.1981 Matsumoto et al. ได้เสนอเทคนิค Hot-Filament CVD และ Microwave Plasma CVD (1982)

ค.ศ.1988 Hirose et al ได้เสนอเทคนิค Combustion ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ เริ่มทำกันอย่างจริงจังประมาณปี ค.ศ.1700 หลังจากนั้นก็เกิดเทคนิคเกิดขึ้นมากมายแต่ก็มีหลักการพื้นฐานเดียวกันคือ การทำให้อะตอมไฮโดรเจนแตกตัวบริเวณพื้นผิวที่สร้าง โดยฐานรองมีหลายชนิด เช่น Si, SiC, W, WC, TA,  $Al_2O_3$  เป็นต้น

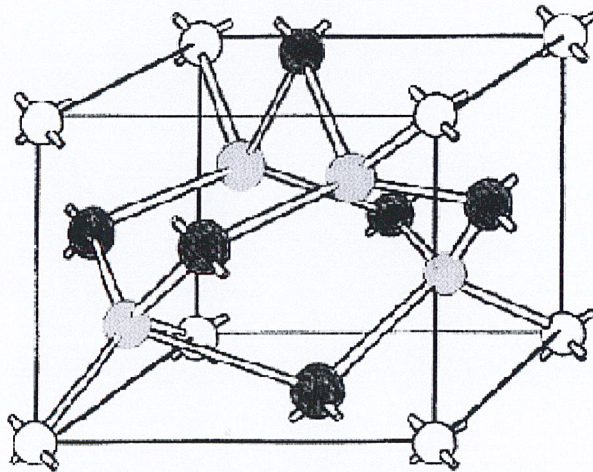
ฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้น เราสามารถตรวจสอบคุณสมบัติของเพชรและลักษณะของพื้นผิวของเพชรได้ด้วย Raman Spectroscopy และ Scanning Electron Microscopy ตามลำดับ มีการนำฟิล์มเพชรนี้มาประยุกต์ใช้งานในด้านอิเล็กทรอนิกส์ ยกตัวอย่างเช่น ซอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มบางเพชร [2] ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการเรกติไฟเออร์ของรอยต่อระหว่างอูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี พบว่า ในทางปฏิบัตินั้น จะเกิดปัญหาในส่วนของกระแสรั่วมีค่าสูง หรือค่าแรงดันพังทลายมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้ลดประสิทธิภาพของไดโอดนี้อย่างมากซึ่งจำเป็นต้องพัฒนาไดโอดนี้เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของฉนวนระหว่างซอตต์กีไดโอดนี้ จึงอาจเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหานี้ได้ จึงเลือกสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกเป็นฉนวนของไดโอดโครงสร้าง MIS นี้

## บทที่ 2

### โครงสร้างและคุณสมบัติของเพชร

#### 2.1 โครงสร้างของเพชร

กรณีของเพชรธรรมชาติ อะตอมคาร์บอนจะจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Diamond Structure ภายในยูนิทเซลล์ จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวกันแบบ Face Center Cubic และ คาร์บอนอะตอมอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง  $\frac{1}{4}$  เมื่อวัดตามแนวทะแยงมุมจากมุมของยูนิทเซลล์ คาร์บอนอะตอมจับตัวกันแบบ Tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้ง 4 อะตอมที่อยู่รอบ ๆ ตัวมันเอง ด้วยพันธะ โควาเลนต์แบบ  $sp^3$  ในที่สุดจะได้ว่าโครงสร้างนี้อะตอมคาร์บอนจะจับตัวกัน มีลักษณะหกเหลี่ยม โดยที่อะตอมใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงต่ำสลับกันจากระนาบ หรืออาจมองว่าวงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุด และระนาบ  $\{111\}$  2 อันวางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน การเรียงลำดับชั้นของอะตอมจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.65 Å ผลของการตรวจสอบด้วย Raman Spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง ( First Order Peak ) ของเพชรมีค่า  $1332 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับคาร์บอน 13 จะมีค่าเท่ากับ  $1284 \text{ cm}^{-1}$

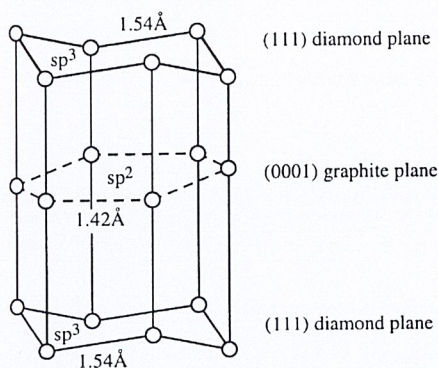
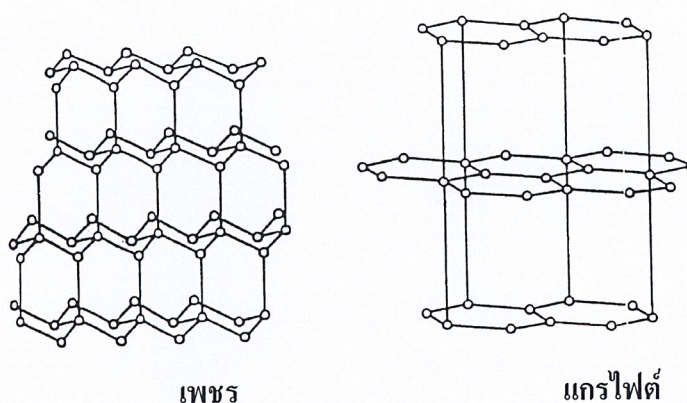


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร

#### 2.1.1 Graphite

กราไฟต์เป็นรูปแบบของคาร์บอนที่พบบ่อยมาก ซึ่งอะตอมทั้งหมดจะไม่จับตัว แบบ เพชรแต่จะจับกันตามแนวอนนบนระนาบ และจับกันด้วยพันธะ  $sp^2$  Hybrid Atomic Orbitals

แต่ละระนาบเรียงตัวแบบ ABABAB... ซ้ำ ๆ กันไป แต่ละระนาบห่างกัน 1.42 อังสตรอม ในขณะที่ค่าคงที่แลตทิซคือ 6.0707 °A การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ได้ 1,580  $\text{cm}^{-1}$  และยอดลำดับที่สองอยู่ที่ 3,240  $\text{cm}^{-1}$



ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในแกรไฟต์และเพชร

รูปที่ 2.2 แสดง โครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับแกรไฟต์

### 2.1.2 Micro Crystalline Carbon

เป็นเพชรที่มีคุณภาพต่ำ ที่ได้จากการสังเคราะห์ จัดเรียงอะตอมด้วยพันธะ  $\text{sp}^2$  ในช่วงแรกแต่มีพันธะ  $\text{sp}^3$  เกาะอยู่ที่ขอบเกรน เมื่อวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy ได้ 1,355  $\text{cm}^{-1}$  เมื่อขนาดของเกรนเล็กมากๆ และยอดคลื่นอันดับสองมีค่า 2,710  $\text{cm}^{-1}$

### 2.1.3 Amorphus Carbon

วิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy สำหรับการเรียงอะตอมแบบ  $sp^2$  ได้ และจะแสดงยอดคลื่นของ มีลักษณะเป็นแถบระหว่างตำแหน่งยอดที่  $1345\text{cm}^{-1}$  ถึง ตำแหน่งที่  $1550\text{cm}^{-1}$  โดยยอดคลื่นจะเปลี่ยนจากค่า  $1345\text{cm}^{-1}$  เป็นค่า  $1550\text{cm}^{-1}$  เมื่อเนื้อสารเกิดการ Hydrogenated ที่ตำแหน่งยอดคลื่น  $1550\text{cm}^{-1}$  นี้สารจะถูกเรียกว่าเป็น “Diamond-like carbon” (DLC) ส่วน Amorphus Carbon ที่มีพันธะเป็นแบบ จะมีตำแหน่งของยอดคลื่นประมาณ  $1,140\text{cm}^{-1}$  มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Small size cubic diomond”

## 2.2 คุณสมบัติทางกล

เพชรจะมีโครงสร้าง ที่ประกอบด้วยพันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเพชรจึงมีคุณสมบัติทางกลหลาย ๆ อย่างที่พิเศษกว่าวัสดุอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น เพชรจะมีความแข็ง, Molar density และ Thermal conductivity สูง อีกทั้งเพชรยังมีค่าความยืดหยุ่นและ Bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น ตลอดจนมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสูงมาก ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.2.1 Thermal Conductivity

เพชรมีค่า Thermal conductivity สูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด ซึ่งมีค่าสูงถึง  $20\text{ Watts/cm.K}$  ค่าความนำความร้อนนี้มีค่าลดลงเมื่อมีใน โตรเจนจำนวนมากและหากผลึกเป็นแบบผลึกรวม (Polycrystalline) ที่ได้จากการสร้างที่มีคุณภาพดี พบว่าค่าความนำความร้อนในทิศทางของการปลูกผลึก มีค่าเป็น  $55\%$  ของผลึกเดี่ยว ส่วนในระนาบของการปลูกผลึก ความนำความร้อนของผลึกเดี่ยวจะมีค่ามากกว่า  $25\%$  แต่ส่วนมากแล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก

### 2.2.2 Molar Heat capacity

หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำอุณหภูมิขึ้นหนึ่งองศาของโมเลกุลของวัสดุใด ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นพบว่าเพชรมีค่า Molar Heat Capacity น้อย นั่นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ ดีเท่า ๆ กับ Heat Sink

### 2.2.3 Hard Ness

เพชรเป็นสารที่มีความแข็งแรงที่สุด ในบรรดาทั้งหมดที่เรารู้จักโดยมีค่าความแข็งสูงถึง  $5,700 - 10,400\text{ kg/mm}^2$  อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามสร้างสารประกอบ  $C_3N_4$

(Carbon Nitride) เชื่อว่าเป็นสารที่มีความแข็งมากกว่าเพชร สำหรับตารางการเปรียบเทียบค่าความแข็งของเพชรกับวัสดุอื่นๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

#### 2.2.4 Thermal expansion

เป็นค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ แพร่ไปถึงเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ค่า Thermal expansion นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity สำหรับของแข็งค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่ามากกว่าเชิงเส้นประมาณ 3 เท่า สำหรับค่า Thermal expansion ของเพชรและวัสดุอื่นๆ ถูกเปรียบเทียบไว้ในภาคผนวก ก.

สำหรับคุณสมบัติทางกลอื่นๆ ของเพชรที่ไม่ได้ยกตัวอย่างในที่นี้ เช่นค่า Elastic wave, Young's modulus, Fracture toughness, Coefficient of friction และค่า Density จะแสดงไว้ในตารางของภาคผนวก ก ทั้งหมด

### 2.3 คุณสมบัติทางแสง

คุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่เราจะพิจารณาจากดัชนีการหักเหและการดูดกลืน ที่ความยาวคลื่น และ อุณหภูมิที่กำหนดในการเริ่มต้นใช้แสง เป็นตัวแบ่งคุณสมบัติของเพชรได้ 2 ชนิดคือ Type I และ Type II

**Type I :** จะประกอบด้วยไนโตรเจนจำนวนมาก

- ถ้าไนโตรเจนรวมกันดังเพชรธรรมชาติ เรียกว่า “ Type I<sub>a</sub> ”
- ถ้าไนโตรเจนกระจายออกดังเช่นเพชรที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น เรียกว่า “ Type I<sub>b</sub> ”

**Type II :** จะไม่มีไนโตรเจนปนอยู่

- ถ้ามีคุณสมบัติเป็นฉนวนและไม่พบโบรอน เรียกว่า “ Type II<sub>a</sub> ”
- ถ้ามีจำนวนโบรอนมากกว่าไนโตรเจนและเป็นชนิดที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า “ Type II<sub>b</sub> ”

### 2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในกรณีเพชรธรรมชาติมีค่าสัมประสิทธิ์ ของ Hall อยู่ในช่วง  $10^2$  ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ถึง  $10^5$  ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความคล่องตัวของ Hole และ Electron  $1800\text{ cm}^2/\text{Volt-sec}$  และ  $2000\text{ cm}^2/\text{Volt-sec}$  ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคล่องตัว Hole ของมีค่าสูงมาก ซึ่งวัสดุอื่น ๆ จะมีความเร็วอิมิตัวของ Hole ต่ำ

โบรอนเป็นสารที่นำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีโดยทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมที่เหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดพิษเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นจะขึ้นกับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอน ซึ่งความเข้มข้นมากพลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อย โดยทั่วไปจะเจือโบรอนประมาณ  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$

กรณีของฟอสฟอรัสจะมีขนาดของอะตอมที่ใหญ่กว่าคาร์บอน ดังนั้น เมื่อเป็นสารเจือในเพชรแล้วจะทำให้ลักษณะโครงสร้างของผลึกผิดรูปไป และในการทดลองสังเคราะห์โดยใช้ฟอสฟอรัสจะมีปัญหาเกี่ยวกับการที่ไม่สามารถควบคุมความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ จึงยังไม่มีคำแนะนำเกี่ยวกับฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขึ้น

## 2.5 หลักการของวิธีการ CVD (Chemical Vapor Deposition)

การสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ เริ่มทำกันอย่างจริงจังเมื่อประมาณปี ค.ศ.1970 หลังจากนั้นก็มีเทคนิคเกิดขึ้นมากมายในการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ เช่น

- Radio Frequency Chemical Vapor Deposition (RFCVD)
- Microwave Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition (MPECVD)
- Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD)

โดยเทคนิคทั้งหมดนี้อยู่บนพื้นฐานที่ทำให้ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) บริเวณพื้นผิวที่สร้างเพื่อกำจัด กราไฟต์ที่ความดันต่ำ วิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรมากที่สุด คือ วิธี CVD แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ใหญ่ ๆ คือ

1. Thermal Activate CVD
2. High Frequency Plasma Enhanced CVD
3. Direct Current Discharge Assisted CVD

โดยโครงการนี้ใช้วิธี Thermal Activated CVD (CVD แบบความร้อน) ดังนั้นจึงขออธิบายในส่วนนี้เท่านั้น

### การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธี HF-CVD

ข้อดีของ HF-CVD : เป็นวิธีการที่ง่าย ราคาไม่สูงมาก ฟิล์มเพชรที่สร้างได้คุณภาพดี รวมทั้งสามารถสร้างฟิล์มเพชรครอบคลุมฐานรองขนาดใหญ่ได้ และมีความปลอดภัยสูง

ข้อเสียของ HF-CVD : ใ้ส้หลอดเปราะและผิครุปร่างง่ายเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน และที่อุณหภูมิสูงเกิดการก่อตัวของคาร์ไบด์ที่ใ้ส้หลอด

### 2.5.1 หลักการ CVD แบบความร้อน

ในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรแม้ว่าแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตามจะมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

#### 1. ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เนื่องจากการเกิดของเพชรจากอนุภาคคาร์บอน ในบรรยากาศที่มีอะตอมของไฮโดรเจน เพชรจะมีความเสถียรภาพในสถานะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราฟไฟต์ สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ในโครงสร้างเพชรถ้าหากมีอะตอมคาร์บอนข้างเคียงสองอะตอมถูกแทนที่ด้วยอะตอมไฮโดรเจน จะพบว่าพันธะ sp<sup>3</sup> ยังคงมีอยู่ อาจกล่าวโดยสรุปว่าอะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราฟไฟต์หรือลดการเกิดกราฟไฟต์ขึ้น

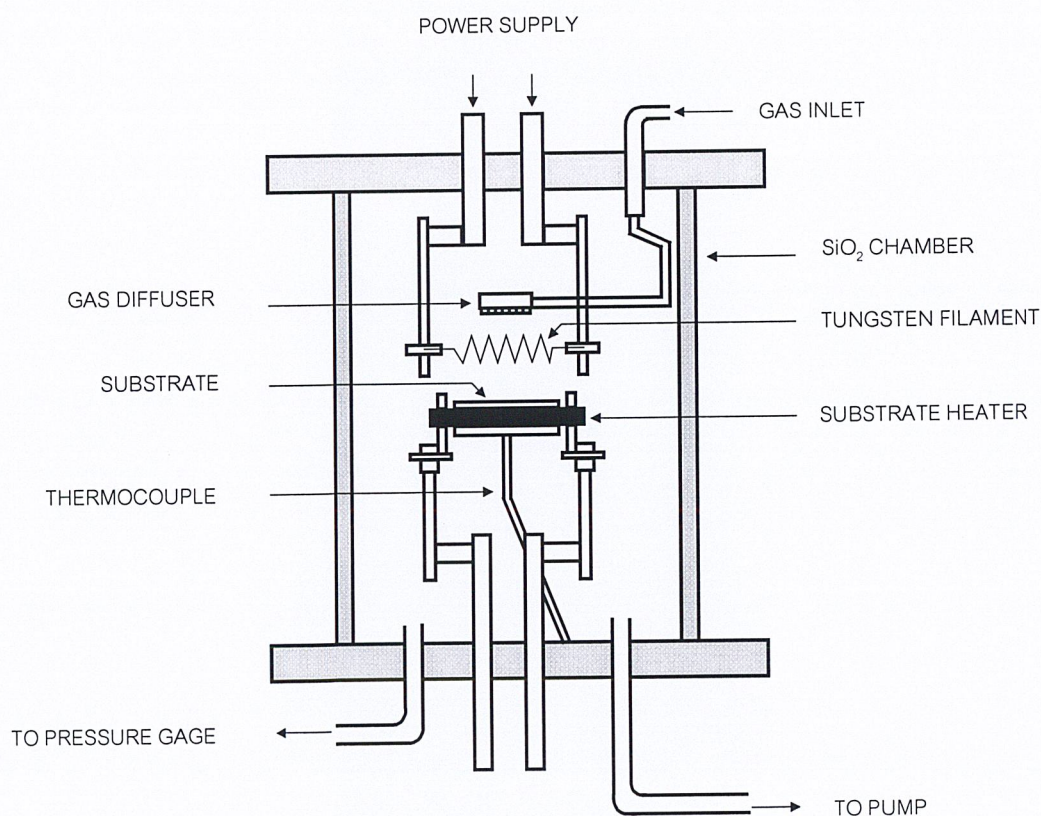
2. ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอนไม่ว่าจะกระตุ้นด้วยความร้อน พลาสมา หรือ Combustion เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมาโดยอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ฐานรอง แรงที่ใช้ส่งอะตอมคาร์บอน จะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่บริเวณของก๊าซเฟสถูกกระตุ้นกับพื้นผิวฐานรอง หรืออาจใช้การเป่าก๊าซเฟสไปยังฐานรองรวมไปถึงการใช้สนามไฟฟ้าในการช่วยการส่งผ่าน

3. อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม เพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C ถึง 12,00 °C แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าหากอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปอาจทำให้เกิดกราฟไฟต์หรือ Diamond-like carbon (DLC) ได้

4. ต้องทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวเคลียชัน ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง ซึ่งกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่ใช้มีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังรวมไปถึงฐานรองที่ใช้ ซึ่งการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำนั้นมีอยู่หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งวิธีการ Assisted Thermal CVD เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่ามีความปลอดภัยสูง อุปกรณ์มีราคาถูก มีกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากมาก และฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดีมาก แต่ก็มีปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานของใ้ส้หลอดทั้งสแตนเลสเนื่องจากการให้ความร้อนแก่ใ้ส้หลอดเป็นเวลานาน ทำให้ใ้ส้หลอดเปราะและผิครุปร่างได้ง่าย

### รายละเอียดของวิธีการ Filament Assisted Thermal CVD อธิบายได้ดังนี้คือ

วิธีการ Filament Assisted Thermal CVD ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ภายใน Chamber จะมีไส้หลอดที่เป็นขดลวดทังสเตน (หรือ แทนทาลัม, โมลิบดีนัม, เรเนียม) โดยไส้หลอดนี้จะถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง เพื่อให้คุณสมบัติของไส้หลอดทังสเตนมีค่าสูงถึง 2,000-2,300 องศาเซลเซียส โดยการปรับแหล่งจ่ายกระแสขึ้นเรื่อย ๆ ทุก ๆ 5 นาที ต่อ 0.5 A จนได้พลังงานไฟฟ้า ( $P = V.I$ ) มีค่าอยู่ที่ประมาณ 152-153 Watts ก็จะได้อุณหภูมิที่ไส้หลอดตามต้องการ (ประมาณ 2000 องศาเซลเซียส) ซึ่งจะวางฐานรองกับไส้หลอดไว้ห่างกันประมาณ 1-2 mm. เพื่อให้อุณหภูมิที่ผิวฐานรองมีค่าประมาณ 700-1,000 องศาเซลเซียส (โดยอุณหภูมิจะแปรผกผันกับระยะทาง)



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพระบบ Hot-Filament Assisted Thermal

จากนั้นทำการ Flow ก๊าซผสมระหว่างมีเทน และไฮโดรเจนเข้าไปในClamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตน จะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นอะตอมไฮโดรเจนและอะตอมคาร์บอน ซึ่งที่ฐานรองสามารถไบอัสศักคาไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวเคลิเอชั่น และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร(ที่อัตราส่วนระหว่างมีเทน 0.5% – 2% ต่อก๊าซไฮโดรเจนกระทำที่ความดัน 10-100 torr ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิด 1-10 um/hr.)

## 2.5.2 ประโยชน์ของฟิล์มเพชรและการประยุกต์ใช้งาน

เพชรเป็นวัสดุที่มีค่าความแข็งสูง ( $1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ ) ทำให้ทนต่อการสึกหรอ ดังนั้นเมื่อนำฟิล์มเพชรไปเคลือบบนอุปกรณ์ที่ใช้งานหนัก อาทิเช่น ใบเลื่อย หัวเจาะหรือ Gearboxes จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ และยืดอายุการใช้งานได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้เพชรยังมีสภาพการนำความร้อนสูงมาก (20 W/cm-kg) ทำให้ฟิล์มเพชรถูกนำไปประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูง เช่น นำมาเป็นตัวระบายความร้อน สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ปัจจุบันมีการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD ไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านเชิงกล, เชิงไฟฟ้า ตัวอย่างที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นเพียงบางส่วนเท่านั้น

### 2.5.2.1 Wear Resistant Coating

ฟิล์มเพชรที่สร้างขึ้นถูกนำไปใช้เคลือบอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมหนักประเภทใบเลื่อยหรือหัวเจาะต่าง ๆ แต่เดิมอุปกรณ์ดังกล่าวทำมาจาก คาร์ไบด์หรือ ทังสแตนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นสารที่แข็งแรงน้อยกว่าเพชรและจากการศึกษาพบว่าอุปกรณ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มเพชรจะมีประสิทธิภาพ อายุการใช้งานตลอดจนความเร็วในการขุดเจาะเพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนที่ใช้งานหนักได้ดีเป็นพิเศษ

### 2.5.2.2 Thermal Management

เนื่องจากเพชรธรรมชาติมีค่าความนำความร้อนสูงมากกว่าค่าสภาพนำความร้อนของทองแดงถึง 4 เท่า อีกทั้งยังมีความเป็นฉนวนสูงดังนั้นฟิล์มเพชรจึงถูกใช้เป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ อาทิเช่น เลเซอร์ไดโอด , วงจรรวมไมโครเวฟขนาดเล็ก โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะติดลงบนฟิล์มเพชร ก่อนที่จะนำไปบรรจุเพื่อใช้งานต่อไป ข้อดี คือ สามารถที่จะลดมวลและปริมาตรของการใช้เป็นตัวระบายความร้อนเมื่อเทียบกับแบบเดิมได้ 50% และในปัจจุบันได้เริ่มมีการใช้งานฟิล์มเพชรเป็นตัวระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมการบินบ้างแล้ว

### 2.5.2.3 Electronic device

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากฟิล์มเพอร์มิตีฟหลายชนิด ตัวอย่างเช่น ไดโอด, ตัวทานซิสเตอร์, ตัวเก็บประจุและจอภาพแบบแบน สำหรับตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพอร์ เมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุแบบโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นการใช้งาน ในอดีตพบว่าตัวเก็บประจุที่สร้างจากฟิล์มเพอร์มีขนาด น้ำหนัก และปริมาตรลดลงถึง 50% อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิม 5 เท่า ความสามารถในการประจุพลังงานสูงถึง 7 เท่า และยังทำงานที่ความถี่สูงได้ดี ส่วนจอภาพแบบแบน จะอาศัยคุณสมบัติการเกิด Negative Electron Affinity ของเพอร์ซึ่งเมื่อเทียบกับชนิดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือแบบ LCD (Liquid Crystal Displays) พบว่าจอภาพจอชนิดใหม่นี้จะให้ความสว่าง และ มุมมองเพิ่มจากเดิมตลอดจนสามารถขยายได้ถึงหน่วยตารางเมตร

## 2.6 กลไกการเกิดฟิล์มเพอร์ของวิธี CVD

### 2.6.1 กระบวนการของก๊าซเฟส

หลักการพื้นฐานของการสร้างด้วยวิธีการ CVD จะต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูงเพื่อทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิวและเพื่อแยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างความหนาแน่นของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน

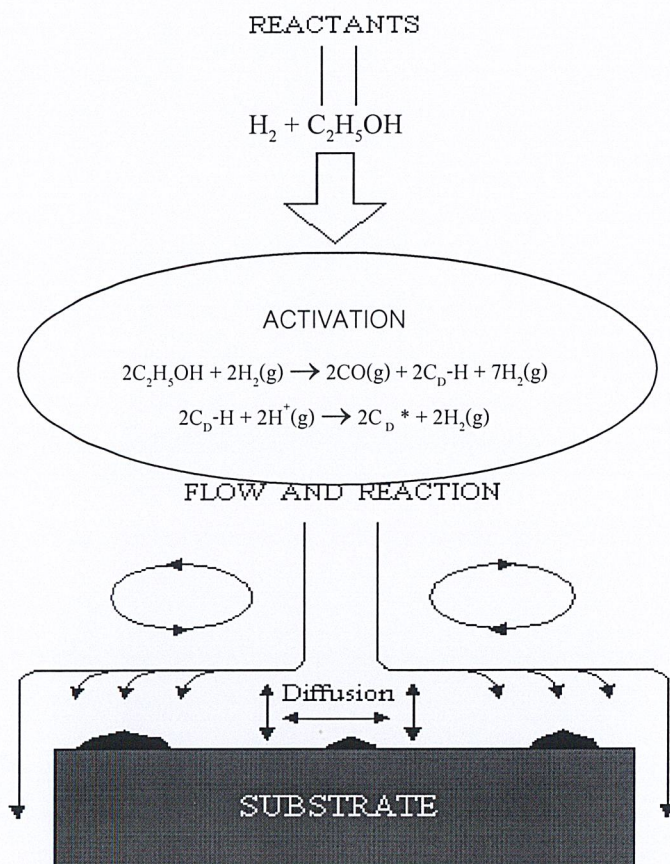
โดยทั่วไปแล้วรีแอกเตอร์ที่ใช้กระตุ้นมีอยู่ 4 วิธีที่นิยมคือ

1. Hot Filament reactors
2. Microwave Plasma Vectors
3. DC arcjet reactors
4. Combustion Synthesis reactors

ซึ่งการสร้างด้วยวิธี จะใช้พลังงานจำนวนโมเลกุลของไฮโดรเจนคาร์บอนแตกตัว และการสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำ(ประมาณ 10-100 torr) เพื่อป้องกันการรวมตัวของอะตอมไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุล อุณหภูมิของก๊าซเฟสมีค่าสูงกว่า 1,700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ฐานรองจะมีค่าประมาณ 925 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามกระบวนการส่งผ่านจะมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ในรีแอกเตอร์ทั้งสี่ชนิดรีแอกเตอร์ชนิด Hot filament และ Microwave plasma มีการแพร่เป็นส่วนสำคัญเหมือนกับว่าตรงนั้นไม่มีความร้อน, ความเร็วหรือความหนาแน่นของ Boundary layer ดังนั้นจึงมักจะพบความ

เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในอุณหภูมิ ความเร็วหรือความหนาแน่นของอนุโมลระหว่างบริเวณ กระตุ้น และพื้นผิวการเกิดในแต่ละรีแอกเตอร์ ส่วนรีแอกเตอร์ชนิด Arc jet และ Combustion CVD เป็นชนิดที่มีความเร็วสูง ดังนั้นจึงมีการพาเป็นส่วนสำคัญ ชั้นบางๆ ของ Boundary layer ในอุณหภูมิ , ความเร็วและความหนาแน่นจะเกิดขึ้น ใกล้ๆ กับพื้นผิวที่เกิด

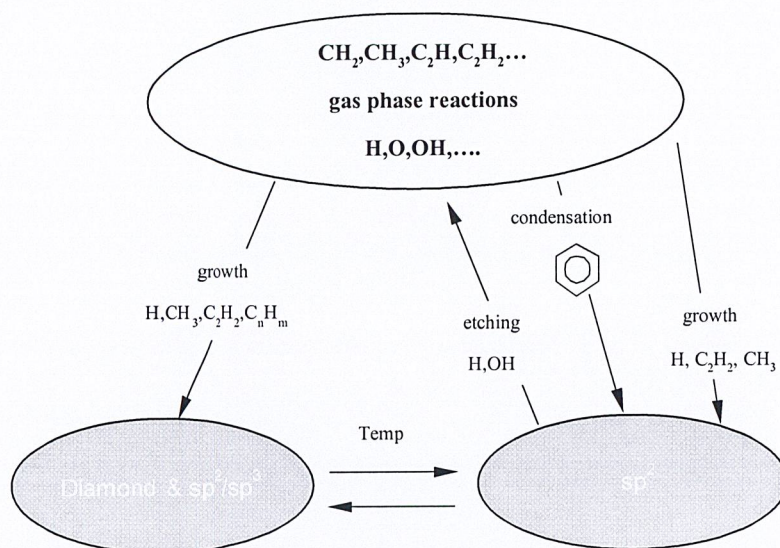


รูปที่ 2.4 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร

จากรูปที่ 2.5 เป็นการแสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD รีแอกเตนต์หรือก๊าซที่ไหลเข้าไปคือก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับรีแอกเตอร์แบบ Hot-filament และ Plasma ปฏิริยาเคมีเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัวออกออกตัวเป็นไฮโดรเจนอะตอม เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ  $10^{-9}$  sec และเกิดการชนกันของก๊าซในรีแอกเตอร์โดยใช้เวลา ตั้งแต่  $10^{-4}$  sec ถึง 10 sec จากนั้นปฏิริยาที่เกิดขึ้นต่าง ๆ จะถูกส่งผ่านโดยการไหล

การแพร่และการพาจากรีแอกเตอร์ ไปยังฐานรองที่บริเวณใกล้ฐานรอง การแพร่เข้าสู่บริเวณที่การไหลหยุดนิ่ง ซึ่งเรียกว่า “Boundary layer” พื้นผิวฐานรองจะเกิดการดูดกลืน การคาย การแพร่ที่พื้นผิวหรือเข้าไปในเนื้อสาร และเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นประโยชน์ต่อการสร้างเพชรและมีความสำคัญเกี่ยวกับกระบวนการต่าง ๆ เป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนของอุณหภูมิ โครงสร้างและองค์ประกอบของพื้นผิว

นอกจากนี้ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วย วิธี CVD คาร์บอนที่เกิดขึ้นสามารถจับตัวเป็นพันธะเคมีได้หลายรูปแล้วแต่ Hybridization ว่าเป็น  $sp^1$   $sp^2$  หรือ  $sp^3$  สามารถได้ทั้งเพชร ( $sp^3$ ) หรือ กราไฟต์ ( $sp^2$ ) ซึ่งค่าต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข การทดลองเช่น อุณหภูมิ ความดัน โหมดการกระตุ้น ความเข้มข้นของก๊าซที่ใช้หรือแม่ค่ารูปทรงของรีแอกเตอร์



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการเกิดกราไฟต์และเพชร ขณะสังเคราะห์เพชร และแลกเปลี่ยนกลับไปกลับมาของพันธะแบบ  $sp^2$  ไปสู่  $sp^3$

### 2.6.2 ปฏิกิริยาที่ไร้หลอด

Langmuir เป็นคนแรกที่ค้นพบการแตกตัวของไฮโดรเจนบนไส้หลอดทั้งสแตนที่มีอุณหภูมิสูงทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดอะตอมไฮโดรเจน ต่อมาได้มีการนำมาใช้ในการสร้างฟิล์มเพชรโดยทำให้เป็นรีแอกเตอร์ชนิด Hot-filament

อัตราการแตกตัวขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงของไส้หลอดและจากการวิเคราะห์อัตราการแตกตัวของอะตอมไฮโดรเจนที่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่น ๆ อีก ตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์การแพร่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด และค่าคงที่อัตราการแตกตัว

### 2.6.3 ผลของอุณหภูมิที่ฐานรอง

ในกระบวนการสร้างเพชรด้วยวิธี CVD อุณหภูมิของฐานรองจะส่งผลต่อการเกิดเพชรหลายอย่าง ซึ่งเพชรจะเกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิฐานรองมีค่าอยู่ระหว่าง 500-1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ้าสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จะเป็นกราฟไฟต์ และถ้าต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จะเป็น DLC (เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา Inspektor et al. รายงานถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่สร้างเพชรขึ้นได้ประมาณ 300 องศาเซลเซียส)

### 2.6.4 บทบาทของก๊าซไฮโดรเจน

ก๊าซไฮโดรเจนจะทำหน้าที่เป็นตัวกำจัดกราฟไฟต์ออกจากเพชร และช่วยทำให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้น ก็คือทำให้คุณภาพของฟิล์มเพชรได้มานั้นมีคุณภาพที่ดี เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเพชรอะตอมคาร์บอนจะมีพันธะแขวนขาด (Dangling Bond) อะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปจับตัวกับแขนที่ขาดของอะตอมคาร์บอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะของ  $sp^3$  ไปเป็น  $sp^2$  หรือ  $sp^1$

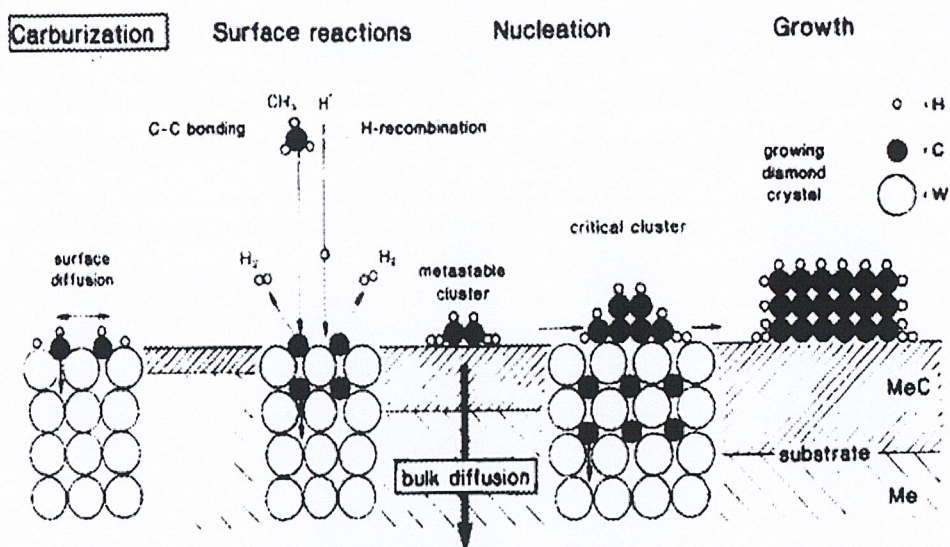
### 2.6.5 บทบาทของออกซิเจน

การเติมออกซิเจนเข้าไปผสมระหว่างไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนทำให้เพชรที่สร้างได้มีคุณสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิฐานรองต่ำ ช่วยให้อัตราการเกิดเพชรดีขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดกราฟไฟต์ และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น

Kawato et al. เสนอว่า ออกซิเจนมีคุณสมบัติที่จะลดความหนาแน่นของอะเซทิลีนซึ่งยังคงถูกสันนิษฐานว่า เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดกราฟไฟต์และอะตอมฟอสคาร์บอน Much et al. รายงานว่าออกซิเจนยังคงเป็นตัวเพิ่มความเข้มข้นให้ไฮโดรเจนด้วย

## 2.7 ปรากฏการณ์นิวคลีโอชัน

การนิวคลีโอชันเป็นปรากฏการณ์เริ่มต้นการก่อตัวของก๊าซเฟสเป็นผลึกเพชร ตามด้วยการเกิดโฮโมอิมิแทกเซียล ซึ่งเมื่ออนุภาคอิสระของก๊าซเฟสแพร่เข้าไปบนพื้นฐานรองจะก่อตัวกันด้วยพันธะ  $sp^2$  อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองจนถึงค่าหนึ่งซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบาง ๆ ที่เรียกว่า Intermediate Layer เมื่ออะตอมคาร์บอนเกาะตัวมากพอจะเกิดขึ้นตอนการเกิดเพชรพันธะ  $sp^2$  เปลี่ยนรูปเป็นพันธะ  $sp^3$  โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวช่วย กลไกการนิวคลีโอชัน และการเกิดขึ้น Intermediate Layer เมื่อ อะตอมคาร์บอนก่อตัวกันมากพอ กลไกการเกิดการนิวคลีโอชันและการเกิดขึ้น Intermediate Layer แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6



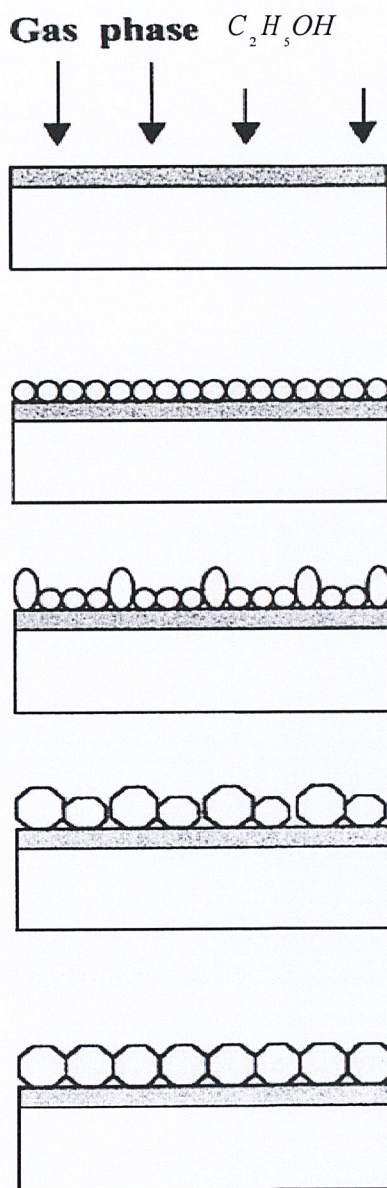
รูปที่ 2.6 กลไกการนิวคลีเอชันและการเกิดชั้นของฟิล์มเพชร

ในการนิวคลีเอชันจะมีทั้งแบบรอยต่อเนื้อสารเดียวกันและแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน ซึ่งส่วนมากแล้วจะให้ความสำคัญกับการศึกษานิวคลีเอชัน และการเกิดเพชรแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิด เนื่องจากการนิวคลีเอชันแบบรอยต่อเนื้อสารเดียวกันจะให้อัตราเกิดการนิวคลีเอชันที่ต่ำ และเพชรที่สร้างได้มักจะไม่ก่อตัวเป็นฟิล์ม

กระบวนการนิวคลีเอชัน จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเกิดขึ้นเมื่ออะตอมคาร์บอนจากก๊าซเฟสตกกระทบบนฐานรองและเกิดการแพร่เข้าไปในเนื้อของฐานรอง อัตราการแพร่ของคาร์บอนลงไปเนื้อสารจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อมีการฟอร์มตัวของคาร์ไบด์ จนกระทั่งการแพร่ของคาร์ไบด์ จนกระทั่งการแพร่ของคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และมีความเข้มข้นของคาร์บอนมากพอ บริเวณผิวของฐานรองซึ่งเป็นจุดสำคัญซึ่งทำให้เกิดขั้นตอนที่ สองขึ้นโดยที่สถานะนี้ นิวเคลียสเริ่มที่จะมีความเสถียร การนิวคลีเอชันในขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้หลายทิศทาง ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวที่เตรียมและเม็ดเพชร รอยขีดข่วนการนิวคลีเอชันจะเกิดขึ้นเมื่อมีการอิมพัลส์ของคาร์บอนที่พื้นผิว แต่ฐานรองที่ขีดข่วนด้วยเพชรคาร์บอนจะแพร่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของบริเวณนิวคลีเอชัน ซึ่งในการขัดที่พื้นผิวของ ซิลิกอน ด้วยฟิล์มเพชรจะทำให้มีพื้นระที่พร้อมสำหรับการก่อตัวและการนิวคลีเอชันที่เสถียร

## 2.8 แบบจำลองการเกิดฟิล์มเพชร

กระบวนการเกิดของฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD สามารถจำลองขั้นตอนการเกิดตั้งแต่แรกจนเป็นฟิล์มเพชรได้ดังรูปที่ 2.7



1. ช่วงแรกนี่เป็นการก่อตัวระยะแรกซึ่งจะเกิดการแพร่ของอะตอมคาร์บอนเข้าไปในฐานรองทำให้เกิดชั้น Intermediate Layer

2. เกิดการนิวเคลียสขึ้นเดี่ยว ๆ บนผิวฐานรอง

3. ผลึกเดี่ยวๆ มีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งจะเริ่มเกิดผลึกเดี่ยวแล้ว และการนิวเคลียสขึ้นของฐานรองก็จะสิ้นสุดลง

4. จากนั้นจะเกิดการเชื่อมต่อระหว่างผลึกเดี่ยวกับผลึกข้างเคียง

5. ในขั้นตอนสุดท้ายจะเกิดการจับตัวกันเป็นฟิล์มเพชรอย่างต่อเนื่อง

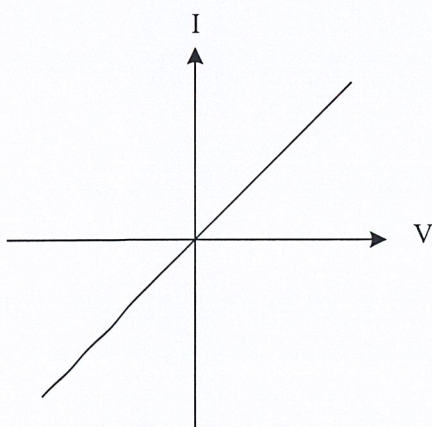
รูปที่ 2.7 แผนภาพการเกิดฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD

## 2.9 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร

ในการพัฒนาสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้แล้ว เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น จำเป็นต้องคำนึงโลหะที่จะนำไปใช้เป็นขั้วสัมผัสกับฟิล์มเพชรด้วยในหัวข้อนี้ จึงจะกล่าวถึงรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ประเภท คือ รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก และรอยสัมผัสแบบชอตต์กี

### 2.9.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

โดยทั่วไปการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกของโลหะ กับสารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นตัวผ่านการไหลของกระแสทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำ ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า สามารถสร้างขึ้นได้โดยการพิจารณาจากความแตกต่างของฟังก์ชันงานของทั้งสารกึ่งตัวนำ และโลหะที่จะนำมาใช้เป็นขั้วสัมผัสหรือการแพร่สารเจือมาๆ เป็นชั้นบางๆ ของสารกึ่งตัวนำก่อนทำขั้วสัมผัส หรือการทำลายพื้นผิวสารกึ่งตัวนำก่อนทำขั้วสัมผัสสำหรับการสร้างรอยสัมผัสของโลหะกับฟิล์มเพชร สามารถทำได้หลายวิธีการสร้างและการนำไปใช้งาน เช่น ขั้วสัมผัสโลหะอินเดียมกับฟิล์มเพชรเป็นแบบโอห์มมิกแต่ไม่เหมาะกับการใช้งาน ในอุณหภูมิสูงเนื่องจากอินเดียมมีจุดหลอมเหลวต่ำ[1]การใช้กาวเงินเป็นขั้วโลหะ หรือการทำให้ผิวฟิล์มเพชรเสียหาย แล้วใช้ทั้งสแตนเป็นขั้วโลหะ ก็เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก และยังสามารถลดความต้านทานของรอยสัมผัสได้ด้วยการให้ความร้อน เป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะกระแส-แรงดันแล้ว สามารถแสดงได้ดังรูป 2.8 โดยในการสร้างขั้วสัมผัสโอห์มมิกของการศึกษาในปริญญาโทฉบับนี้อาศัยกาวเงินเป็นขั้วโลหะ

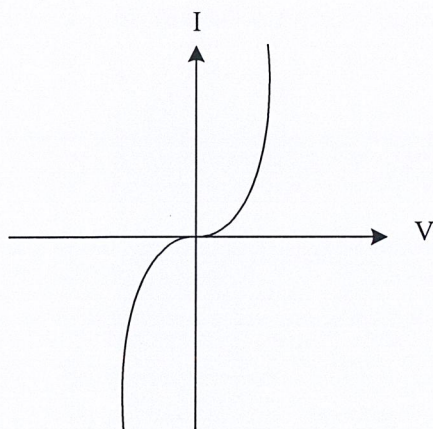


รูปที่ 2.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิกระหว่าง โลหะกับฟิล์มเพชร

### 2.9.2 รอยสัมผัสแบบชอตต์กี

รอยสัมผัสแบบเร็กติไฟร์หรือเรียกอีกอย่างว่า รอยสัมผัสแบบชอตต์กี ได้ถูกนำมาพัฒนาใช้ประโยชน์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากเพชร ซึ่งในการพิจารณารอยสัมผัสแบบชอตต์กีนี้ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก นั่นคือคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำเพชร เช่นค่าความสูงของกำแพงศักย์ ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของสารโลหะเพียงเล็กน้อย เช่น ค่าเวิร์คฟังก์ชัน และอิเล็กโตรเนกาติวิตี แต่อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยสัมผัส จะขึ้นอยู่กับเตรียมและธรรมชาติของพื้นผิวของเพชรอย่างมาก ซึ่งสังเกตได้ว่ายังไม่มีวิธีที่แน่นอนในการเตรียมเพชร ซึ่งต่างจากกรณีของสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น ซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์

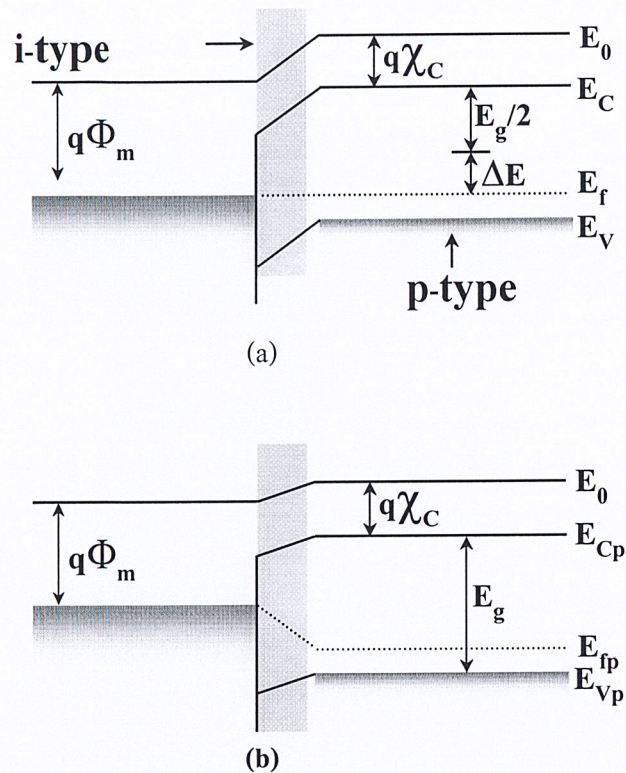
รอยสัมผัสแบบชอตต์กีนี้ สามารถเกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำชนิดเพชรได้ ทั้งในผลึกธรรมชาติ ผลึกสังเคราะห์ที่เติมสารเจือปนโบรอน และแบบไฮโมอิพิเทกเซียลที่สังเคราะห์ขึ้นโดย CVD และแบบฟิล์มโพลีคริสตัลไลน์ ในหลายลักษณะการใช้ ยกตัวอย่างเช่น การใช้พอยท์โพรบ (point probes) วิธีการเคลือบฟิล์มต่างๆ เช่น อลูมิเนียม ดังแสดงตัวอย่าง คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบชอตต์กีระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชร

และต่อมา Humphreys ได้พิสูจน์ว่า ฟิล์มนิเกิลบนสารกึ่งตัวนำเพชรผลึกเดียวจะแสดงคุณสมบัติรอยสัมผัสแบบเร็กติไฟร์ได้ดีเยี่ยม ทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 400 °C ส่วนในการพิจารณาถึงความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสโลหะกับเพชร เรายังสามารถวัดได้จากอีกหลายวิธีด้วย เช่น C-V curve ,I-V curve, Internal Photoemission Spectroscopy (IPS) และ Photoelectron Spectroscopy เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการที่จะทำความเข้าใจคุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบชอตต์กี

เมื่อพิจารณาไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร โดยมีอลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัส จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS [3] เมื่อให้

(a) แรงดันไบอัสเป็นศูนย์ (b) แรงดันไบอัสตรง

ในรูปที่ 2.10(a) แสดงให้เห็นว่า ไดโอดโครงสร้างนี้มีคุณสมบัติเรกติไฟร์ โดยพิจารณาได้จากสถานะสมดุล

$$q\Phi_{Al} < q\chi_c + \frac{E_g}{2} + \Delta E \quad (1)$$

โดยที่  $\Phi_{Al}$  = ค่า work function ของอลูมิเนียม

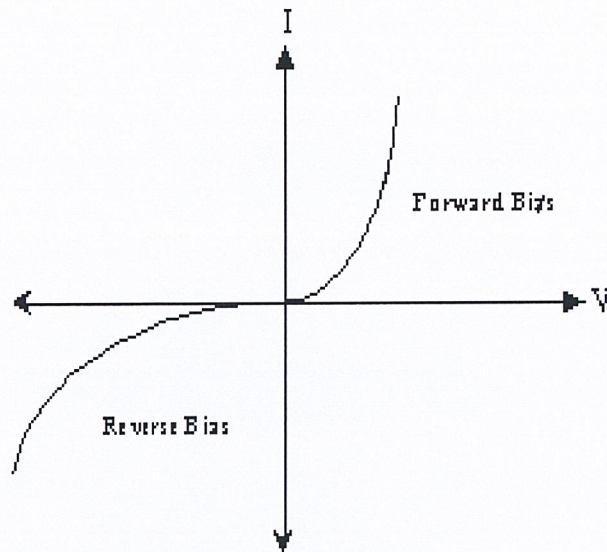
$\chi_c$  = ค่า electron affinity ของเพชร

$q$  = ค่าประจุอิเล็กตรอน

$E_g$  = ค่าแถบพลังงานช่องว่างของเพชร

$\Delta E$  = พลังงานภายในของฟิล์มเพชรชนิดพี

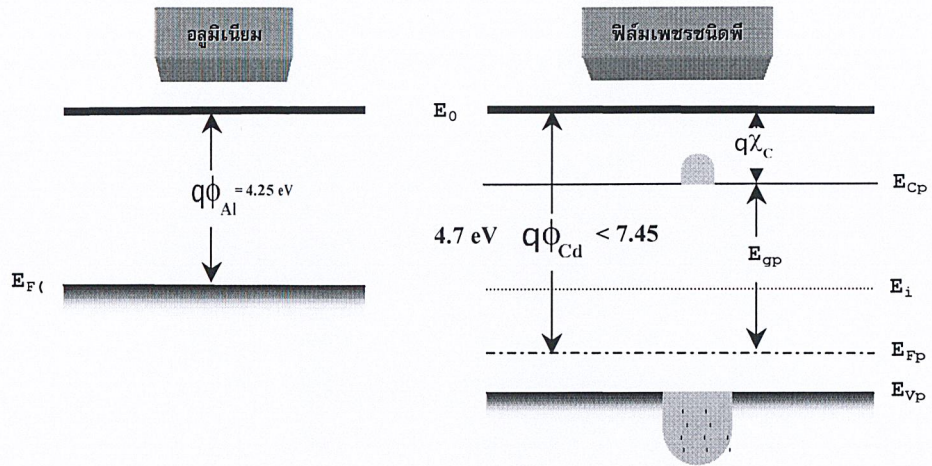
และเมื่อให้แรงดันไบอัสตรง ทำให้เกิดการสะสมปริมาณประจุโฮลที่บริเวณรอยต่อในฟิล์มเพชรชนิดพีมีค่ามากขึ้น ทำให้ระดับพลังงาน  $E_v$  มีค่ามากขึ้น จนกระทั่งแรงดันไบอัสตรงมีค่าสูงกว่าแรงดันจีดเริ่ม จะทำให้ประจุโฮลสามารถเคลื่อน ที่ผ่านชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกไปยังอลูมิเนียมได้ดังแสดงในรูปที่ 2.10(b) ในทางกลับกัน ถ้าให้แรงดันไบอัสย้อนกลับกับไดโอด ทำให้ค่ากำแพงศักย์ระหว่างโลหะกับฟิล์มเพชรชนิดพี มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ประจุโฮลในฟิล์มเพชรชนิดพีไม่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์นี้ไปยังโลหะได้ จนกระทั่งระดับพลังงานวาเลนซ์ของฟิล์มเพชรชนิดพีมีค่าสูงมากขึ้นจนทำให้เกิดปรากฏการณ์พังทลาย ทำให้มีกระแสไหล ดังแสดงคุณลักษณะของกระแส-แรงดันไว้ในรูปที่ 2.11



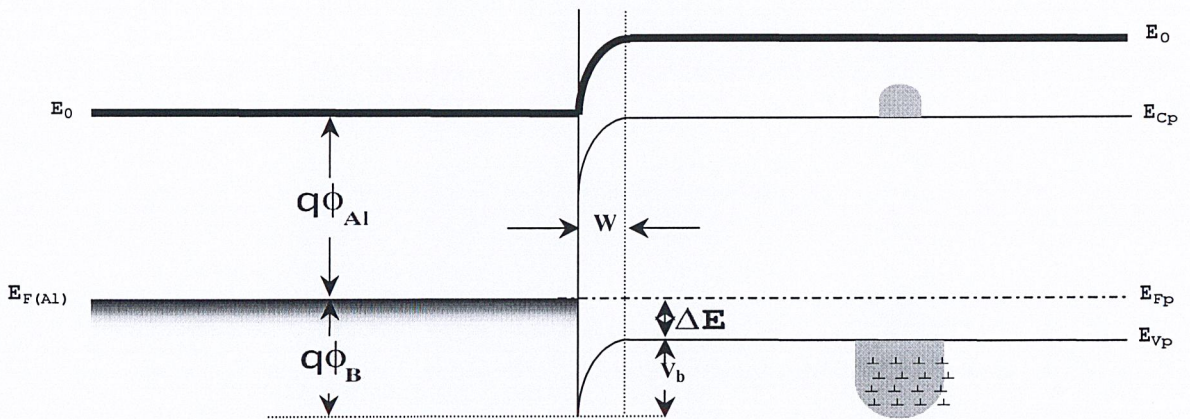
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของไดโอดโครงสร้าง MIS

## 2.10 ขอตักไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร

ขอตักไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรเป็นไดโอด ที่อาศัยคุณสมบัติการรอยสัมผัสแบบเรคติไฟร์ระหว่างฟิล์มเพชร กับโลหะ โดยในที่นี้จะพิจารณารอยสัมผัส ระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพี และโลหะอลูมิเนียมซึ่งแสดงแบบจำลองแถบพลังงานก่อนสัมผัสกันไว้ในรูปที่ 2.12(ก) เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ( $E_{fA}$ )และของฟิล์มเพชรชนิดพี ( $E_{fP}$ )กับระดับพลังงานสูญญากาศ( $E_0$ )ขณะยังไม่ได้สัมผัสกันนั้น จะเห็นว่ามีความน้อยกว่าซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของฟังก์ชันงาน(Work function) ของทั้งสองวัสดุ นั่นคือเมื่อมีการสัมผัสกันเกิดขึ้นดังในรูปที่ 2.12 (ข) จะทำให้เกิดการถ่ายเทหรือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานที่สูงกว่า (อิเล็กตรอนจากโลหะอลูมิเนียม) ข้ามรอยสัมผัสไปยังระดับพลังงานที่ต่ำกว่า (ฟิล์มเพชรชนิดพี) จนกระทั่งเข้าสู่สถานะสมดุลความร้อน (ระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองอยู่ในระดับเดียวกัน) เป็นผลให้เกิดการโค้งงอของระดับพลังงานอื่น ในส่วนของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี หรือนั่นคือทำให้เกิดกำแพงศักย์ (Barrier Height : $\phi_B$ ) ขึ้นบริเวณรอยสัมผัสของฟิล์มเพชรชนิดพีกับพื้นผิวของโลหะอลูมิเนียม และพบว่าขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไป ทำให้เกิดการรวมตัวกับประจุโฮลที่ระดับวาเลนซ์บริเวณพื้นผิวของฟิล์มเพชรชนิดพี ทำให้เกิดบริเวณปลดประจุ(Depletion region) ขึ้นในระยะ  $W_0$  หรือเกิดศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in voltage:  $V_{bi}$ ) ขึ้นจะเห็นว่า ค่ากำแพงศักย์เพิ่มขึ้นจากโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี ( $q\phi_B$ ) ในภาวะสมดุลความร้อน



(ก) ภาวะก่อนสัมผัส



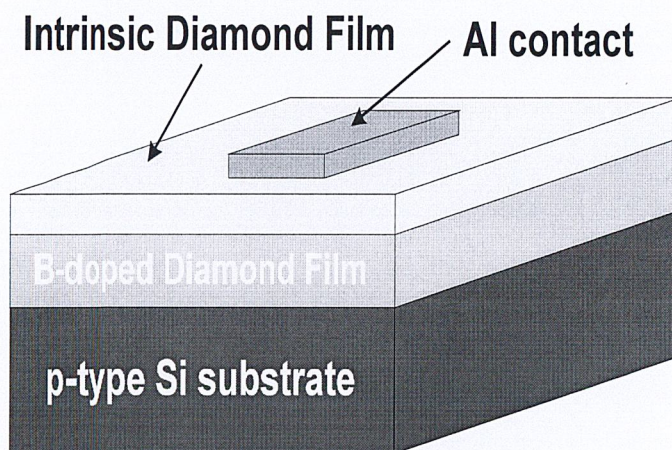
(ข) ภาวะสมดุลความร้อน

รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมพลังงานของขอตัก์ไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร

จากที่อธิบายข้างต้นจะเห็นว่า ซอตต์กีไดโอดมีคุณสมบัติของการเรกติไฟร์ได้เป็นอย่างดีแต่ก็พบว่า ในทางปฏิบัติจริงซอตต์กีไดโอด ที่สร้างจากฟิล์มเพชรนี้มีกระแสรั่วไหลย้อนกลับเกิดขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้า หรือนั่นคืออัตราการกรองการไหลของกระแสต่ำ (Low current rectification ratio) ซึ่งเป็นผล ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเป็นปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ต่อการประยุกต์ใช้งานบางประเภท ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะลดปัญหา ของการเกิดกระแสรั่วไหลย้อนกลับ ที่เกิดขึ้นกับรอยสัมผัสแบบนี้ นั่นคือทำการเพิ่มชั้นฉนวนขึ้นระหว่างรอยสัมผัสแบบซอตต์กีนี้ โดยในที่นี้จะทำการศึกษาการใช้ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก เป็นชั้นฉนวนขึ้น เพราะฉะนั้นจึงควรมาทำความเข้าใจทฤษฎี ที่น่าจะสอดคล้องกับแนวความคิดที่จะนำมาแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสร้างซอตต์กีไดโอดนี้ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงความเข้าใจการทำงานของไดโอด โครงสร้าง MIS ในอุดมคติดังต่อไปนี้

## 2.11 ไดโอดโครงสร้าง MIS (Metal-Insulator-Semiconductor Diode)

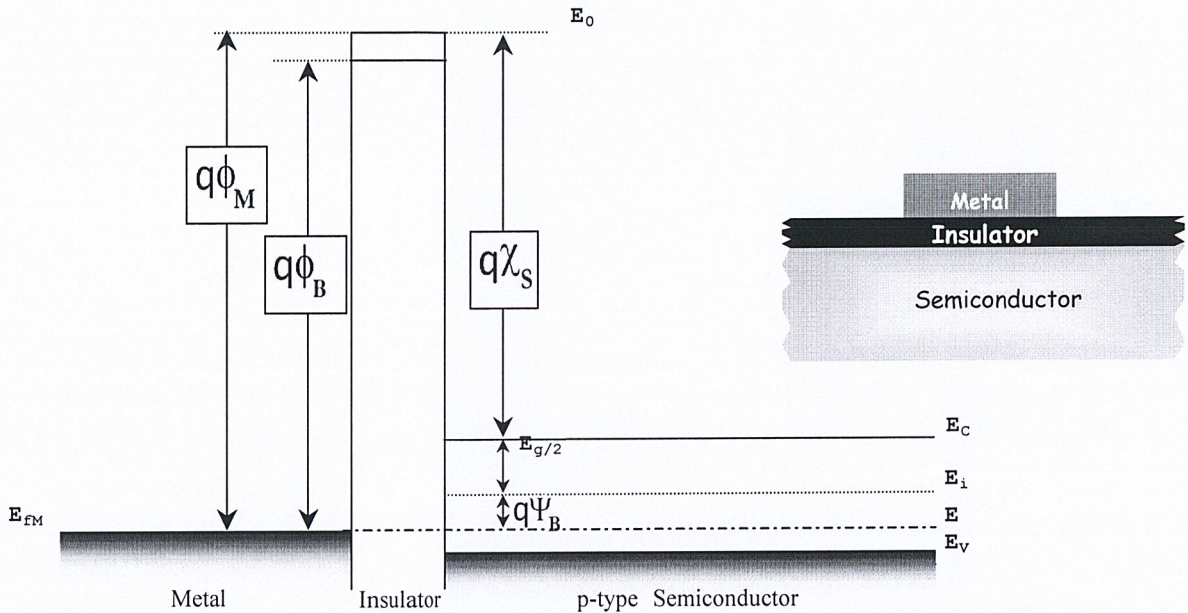
ไดโอดโครงสร้าง MIS คือโครงสร้างระหว่าง โลหะ(Metal) / ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก (i-type diamond semiconductor) / ฟิล์มเพชรชนิดพี(p-type diamond semiconductor)โดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัสโลหะ และใช้โบรอนเป็นสารเจือชนิดพี



รูปที่ 2.13 ไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

### 2.11.1 ภาวะสมดุลทางความร้อน

ในรูปที่ 2.14 แสดงถึงลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติขณะอยู่ในภาวะสมดุลความร้อนหรือไม่มีแรงดันไบอัสจากภายนอกมากระทำ ( $V=0$ )



รูปที่ 2.14 แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติภาวะสมดุลความร้อน

ซึ่งสามารถนิยามคุณสมบัติของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติได้ดังต่อไปนี้

1. ค่าความแตกต่างของ พลังงานฟังก์ชันงาน ระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนเป็นศูนย์ หรือนั่นคือ ช่วงระดับพลังงานแบนราบ (Flat-band condition)

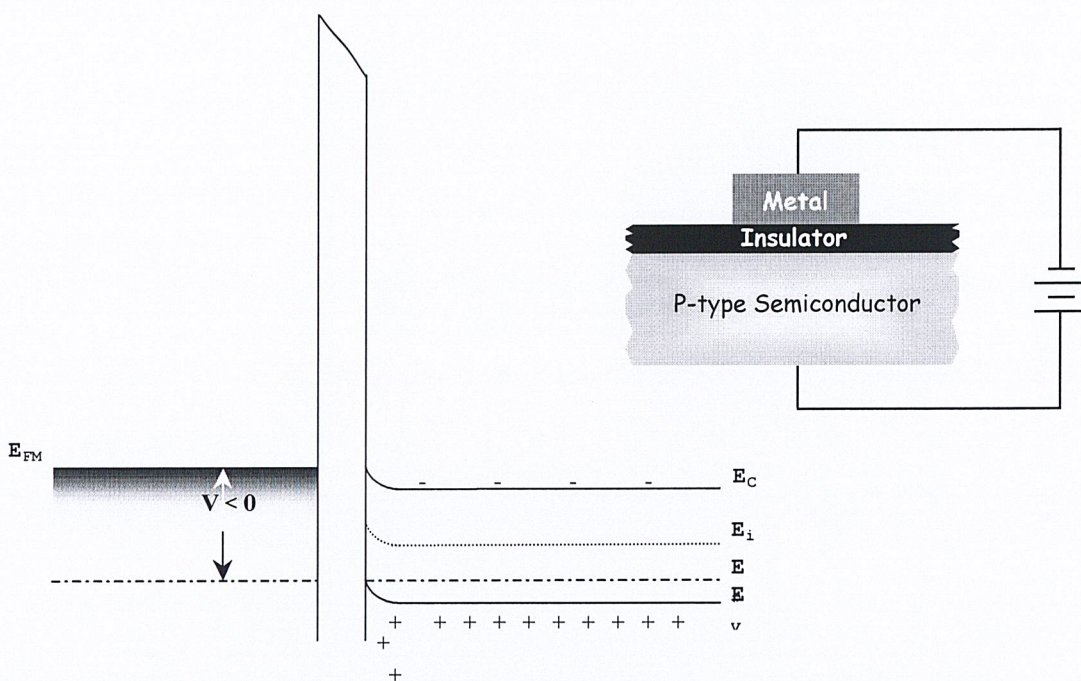
2. ประจุต่างๆ ไม่สามารถปรากฏอยู่ใน โครงสร้าง ได้ แม้ในกรณีที่มีการให้ไบอัส โดยประจุเหล่านี้จะปรากฏในสารกึ่งตัวนำในปริมาณเท่ากับ ในชั้นโลหะ แต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกันที่บริเวณพื้นที่ติดกับชั้นฉนวน

3. ประจุพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ ผ่านชั้นฉนวนภายใต้ กรณีการให้ไบอัส นั่นคือ พิกัดความต้านทานของฉนวนมีค่าเป็นอนันต์

## 2.11.2 ภาวะได้รับการไบอัสจากภายนอก

### 2.11.2.1 ภาวะ การให้ไบอัสไปข้างหน้า(Forward bias)

เมื่อให้ศักย์คาบที่ชั้นโลหะ และศักย์คาบวอกที่สารกึ่งตัวนำชนิดพี ของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติจะทำให้แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดในภาวะสมดุลจากรูปที่ 2.14 เปลี่ยนเป็นรูปที่ 2.15 นั่นคือประจุพาหะโฮล ในระดับพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ มีพลังงานสูงขึ้น และระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ( $E_{FM}$ ) อยู่ในระดับคงที่ เนื่องจากไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อของฉนวน



รูปที่ 2.15 แถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติเมื่อได้รับไบอัสลบที่ชั้นโลหะ

ภายในโครงสร้างดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงทำให้ระดับพลังงานวาเลนซ์ที่บริเวณรอยต่อกับฉนวนมีลักษณะโค้งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ความหนาแน่นของประจุพาหะโฮลที่บริเวณพื้นผิวสารกึ่งตัวนำมีปริมาณสูงขึ้นเกิดการสะสมของประจุพาหะส่วนมากโฮล(accumulation of hole majority carriers) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เนื่องจากในทางอุดมคติแล้วถือว่าการนำไฟฟ้าในชั้นฉนวนนี้มีค่าเป็นศูนย์แต่ในความเป็นจริงแล้วพบว่าฉนวนสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยสนามไฟฟ้าสูงๆ

### 2.11.2.2 ภาวะ การให้ไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias)

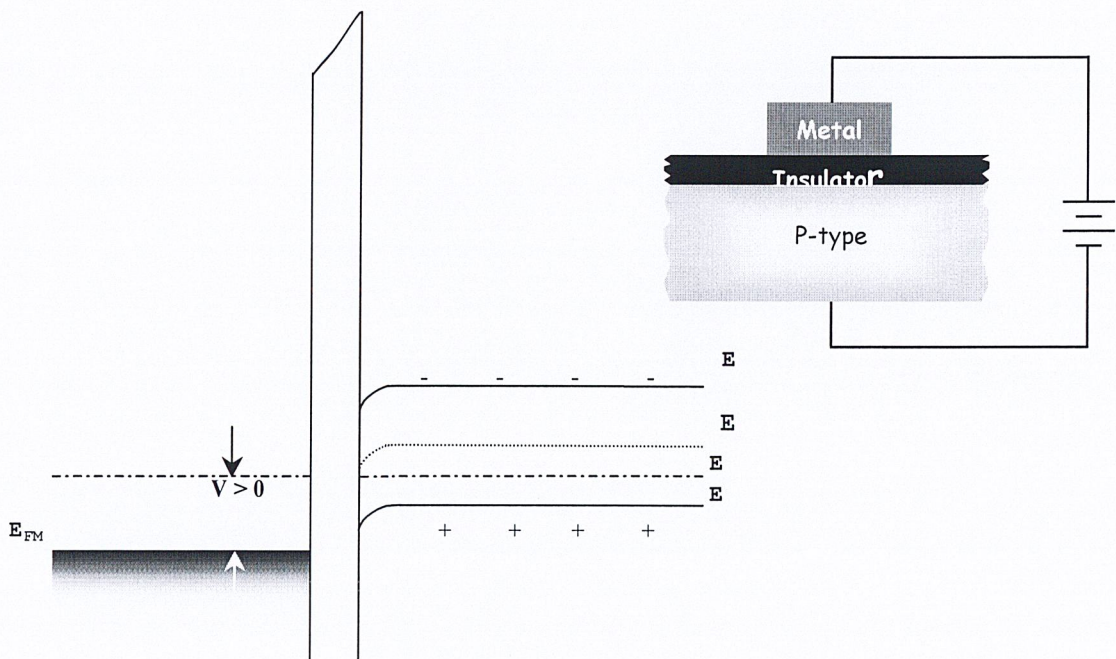
เพื่อให้ศักยาควที่ชั้นโลหะและศักยาควที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติจะทำให้แบบจำลองแถบพลังงานของไดโอดในภาวะสมดุลย์จากรูปที่ 2.3 เปลี่ยนเป็นรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17 โดยสามารถแยกพิจารณาได้ 2 ช่วงดังนี้

#### 1) ช่วงปลอดประจุ (Depletion of majority carrier)

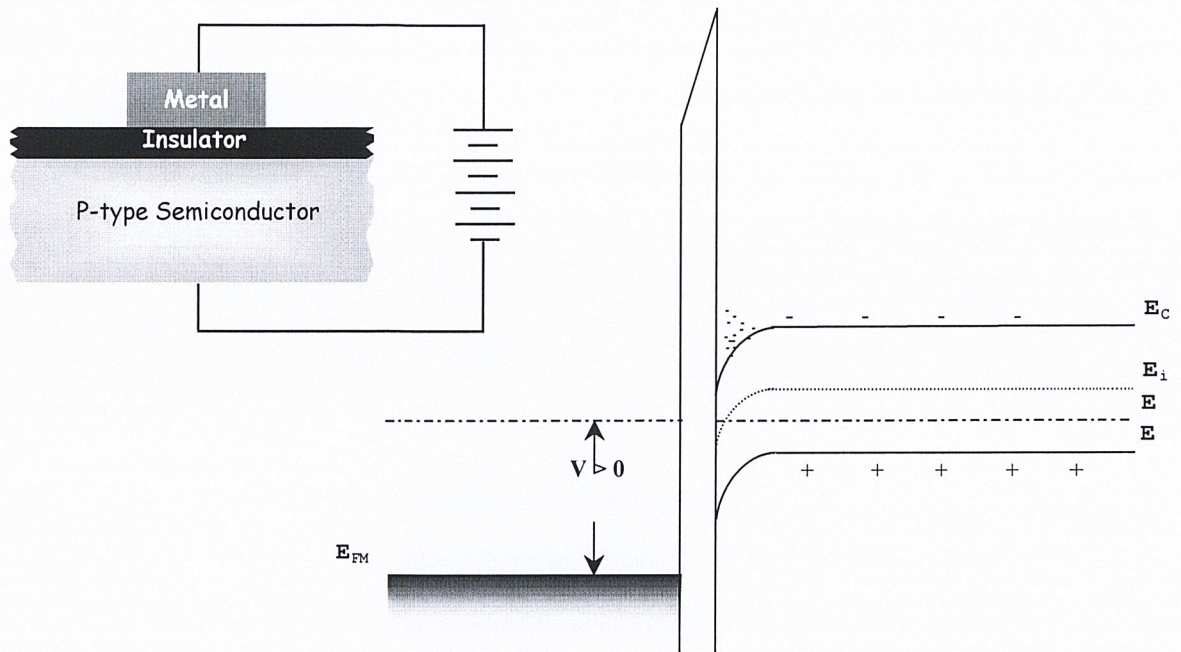
เป็นช่วงที่เริ่มให้ไบอัสบวกแก่ชั้นโลหะ ทำให้ประจุพาหะส่วนมากโฮลของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อกับฉนวนเกิดการรวมตัว (Recombination) กับประจุลบที่ถูกส่งผ่านมากเกิดเป็นช่วงปลอดประจุพาหะ ประจุโฮลที่ระดับพลังงานวาเลนซ์จึงมีพลังงานลดลง ทำให้แถบพลังงานวาเลนซ์มีลักษณะโค้งงอออกห่างจากระดับพลังงานเฟอร์มิดังแสดงในรูปที่ 2.15

#### 2) ช่วงส่วนกลับประจุพาหะ (Inversion)

เมื่อให้ศักยาควเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง จากช่วงปลอดประจุพาหะ ดังที่กล่าวข้างต้นจนกระทั่งพลังงานที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับค่าแพนศักย์ ของสารกึ่งตัวนำ จะเป็นช่วงที่ปริมาณประจุพาหะของทั้งอิเล็กตรอน และโฮลที่บริเวณพื้นผิวมีค่าเท่ากัน หรือเป็นช่วงที่ระดับพลังงานอินทรินซิกตัดกับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำนั่นเองดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงปลอดประจุ



รูปที่ 2.17 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดโครงสร้าง MIS ในอุดมคติในช่วงกลับประจุพาหะ

และถ้าไบอัสต่อจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำสูงกว่าค่ากำแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำปริมาณประจุพาหะส่วนน้อย อิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวจะมีมากกว่าประจุพาหะส่วนมากโฮล หรือเป็นช่วงที่ระดับพลังงานอินทรีนซิก ข้ามผ่านระดับพลังงานเฟอร์มิลงมา ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เช่นกันทำให้เกิดเป็น ช่วงส่วนกลับประจุพาหะขึ้น

## บทที่ 3

### กระบวนการสร้างและการทดลอง

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

#### 3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การทดลองนี้ เลือกใช้ซิลิกอน เป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ซิลิกอนชนิดพีระนาบ (100) มีความหนาประมาณ 400 ไมครอน ก่อนที่จะนำฐานรองซิลิกอน นี้ไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องทำความสะอาดเบื้องต้น และเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ดังนี้

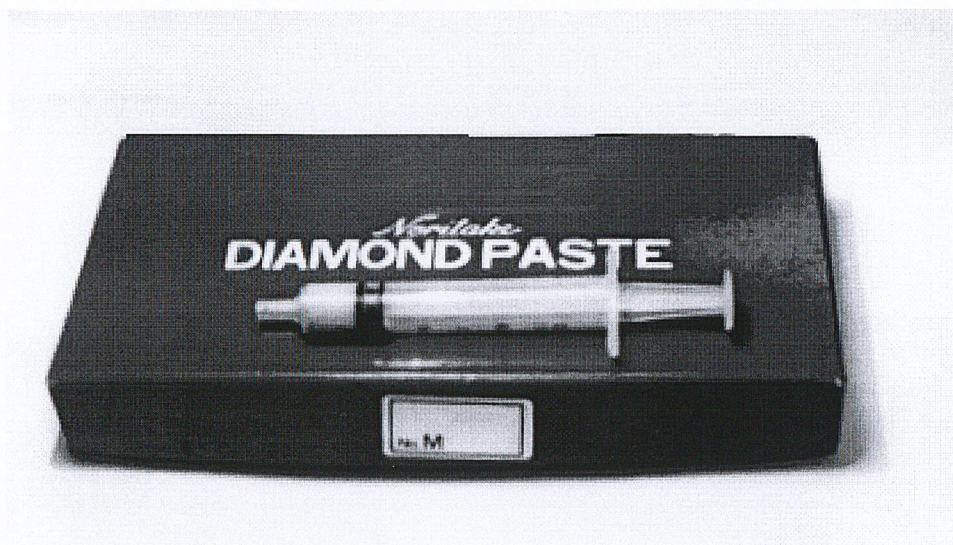
##### 3.1.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิกอน

- กำจัดเศษฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกบนผิวหน้าซิลิกอน ในน้ำ 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)
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วย อะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง

##### 3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

หลังจากทำความสะอาดเบื้องต้นกับฐานรองซิลิกอนครบทุกขั้นตอนตามหัวข้อ 3.1.1 แล้วจะทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ก่อนนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เพื่อเป็นการกระตุ้นฐานรองให้มีความหนาแน่นของการนิวคลีเอชันเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรเร็วขึ้น [3-2-1] โดยในการทดลองนี้ เลือกใช้การขัดด้วยครีมเพชรเป็นการเตรียมผิวหน้าฐานรอง ครีมเพชรที่ใช้ขัด

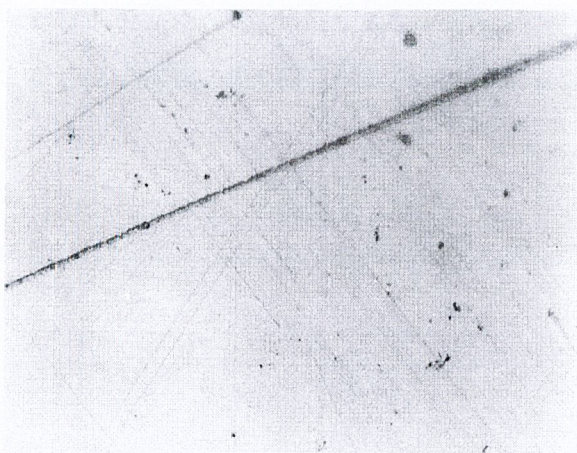
มีขนาดของเม็ล็ดผลึก 0.25 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนอีกครั้งเพื่อล้างครีมนเพชรออกด้วยวิธีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ครีมนเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิกอนขนาดเม็ล็ดผลึก 0.25 ไมครอน

- ต้มแผ่นซิลิกอนในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน เพื่อล้างครีมนเพชรออก
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซีโตนโดยสั่นในเครื่องสั่นความถี่สูง
- ล้าง อะซีโตนออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- กำจัดชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นอีกครั้งด้วยสารละลายกรด HF 5%
- ล้างกรด HF 5% ออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง

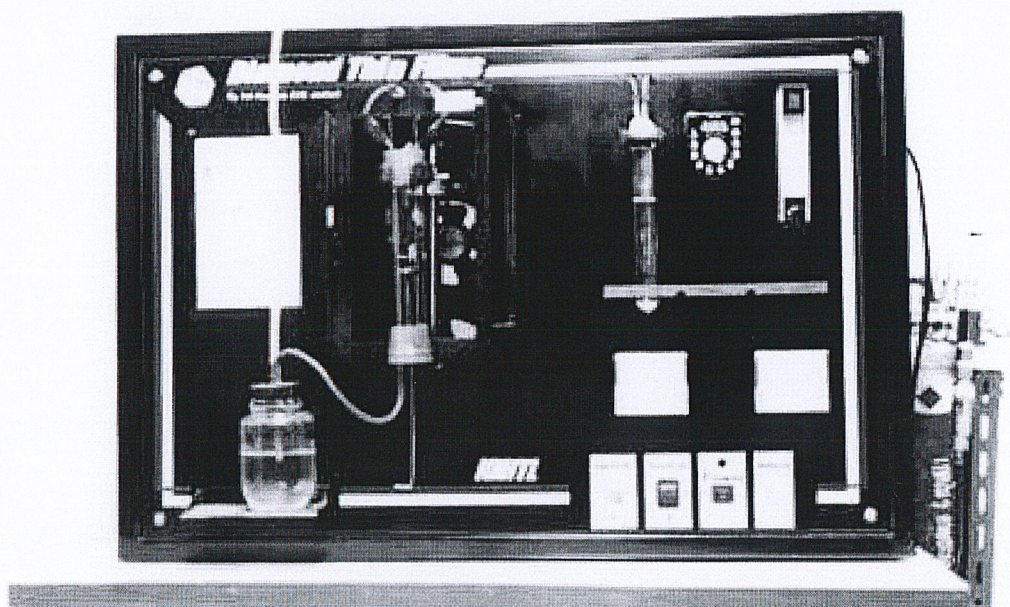
จากนั้น นำแผ่นซิลิกอน นี้ไปตรวจสอบรอยขีดที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะผิวหน้าที่ผ่านการขัดด้วยครีมนเพชรนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นฐานรองที่พร้อมจะนำไปสังเคราะห์ฟิล์มต่าง ๆ ได้ต่อไป



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังจากขัดด้วยครีมเพชร ขนาดเม็ด 0.25 ไมครอน

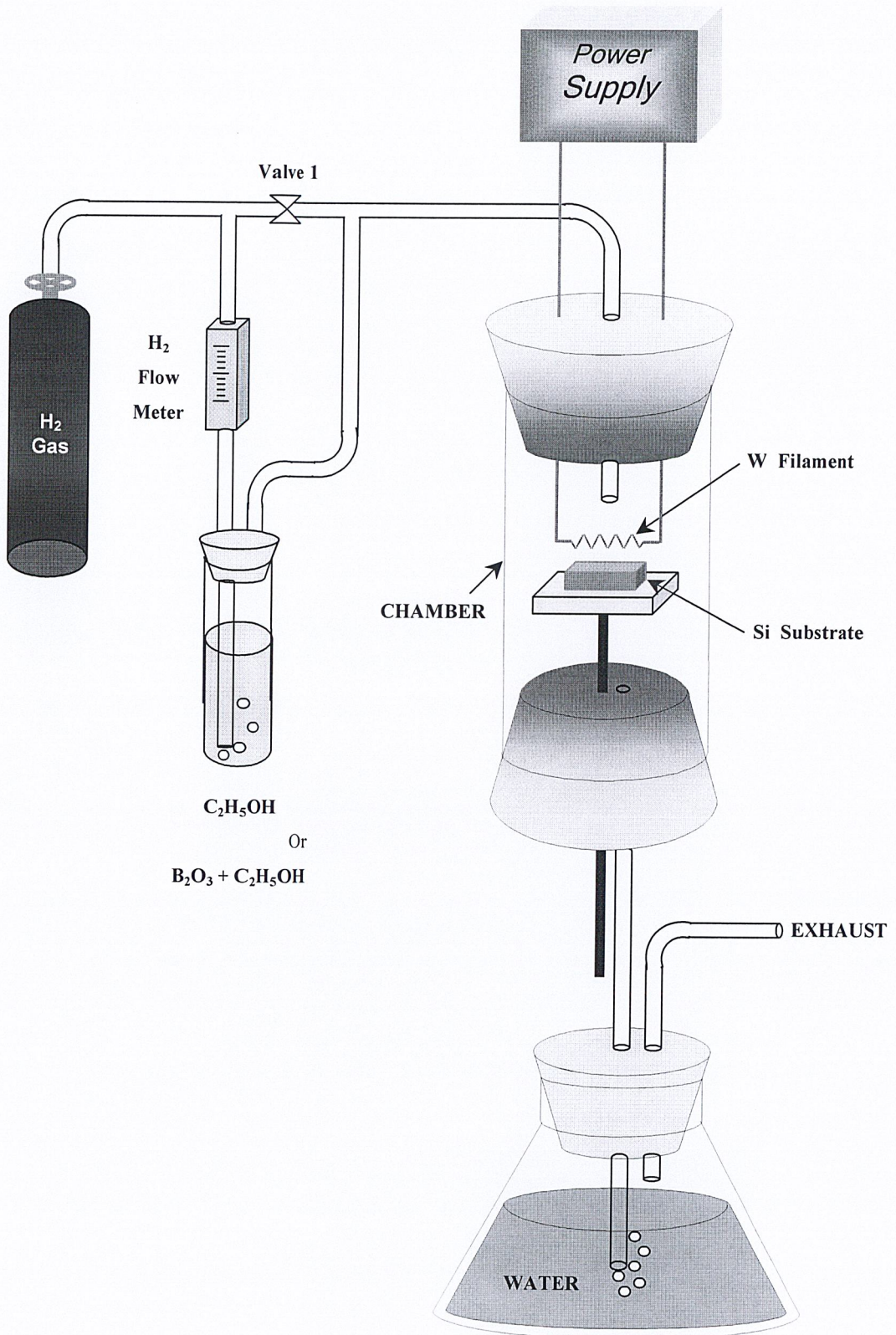
### 3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรทั้งชนิดพีและชนิดอินทรีนซิคในการวิจัยนี้ จะอาศัยวิธี CVD แบบ Hot-Filament (HFCVD) ด้วยชุดเครื่องมือในรูปที่ 3.3 โดยจะมี ไดอะแกรมของระบบ CVD ที่ใช้อย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

- ปล่อก๊าซไฮโดรเจนจากถังผ่านวาล์ว 1 เข้าไปใน Chamber ช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้ภายใน chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว
- ปิดวาล์ว 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านแหล่งจ่ายเป็นตัวพาไอระเหยอัลกอฮอล์เข้า chamber ด้วยอัตราการไหลคงที่ควบคุมโดย Flow meter
- ค่อยๆจ่ายกระแสอย่างช้า ๆ ให้กับไส้หลอดทั้งสแตนด์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ  $2000^{\circ}\text{C}$
- ปรับระยะห่างระหว่างฐานรองซิลิกอนกับไส้หลอดทั้งสแตนด์ให้ได้ระยะที่เหมาะสม
- สร้างฟิล์มเพชรตามระยะเวลาที่ต้องการ
- เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างแล้วจึงค่อย ๆ ลดระยะของฐานรองซิลิกอน ให้ต่ำลงจากไส้หลอดมาก ๆ พร้อมกับลดการจ่ายกระแสอย่างช้า ๆ
- ปิดถังก๊าซไฮโดรเจน และรอนจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนในระบบที่ยังค้างอยู่ออกจนหมด
- นำชิ้นงานที่ได้ไปใช้ในกระบวนการถัดไป หรือไปตรวจสอบต่อไป



รูปที่ 3.4 ปะดะแอมระบะบ CVD อย่งง่ำย ๆ ที่ใช้ตั้งเคราะห้ฟิล์มเพชระ

### 3.3 กระบวนการกำจัดชั้นฐานรองซิลิกอน

เป็นขั้นตอนการกำจัดหรือกัดฐานรองซิลิกอนออกให้หมดก่อนจะนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปทำการเคลือบชั้นโลหะ เพื่อลดผลของรอยต่อระหว่างฐานรองซิลิกอน กับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้วิธีการกัด (etching) ด้วยสารละลาย KOH ด้วยชุดกัดในภาคนวมก \* แล้วทำการล้างสารละลาย KOH ออกโดยการต้มในน้ำ DI และลอกชั้นออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้นด้วยสารละลาย HF 5% ล้างด้วยน้ำ DI และเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง

### 3.4 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

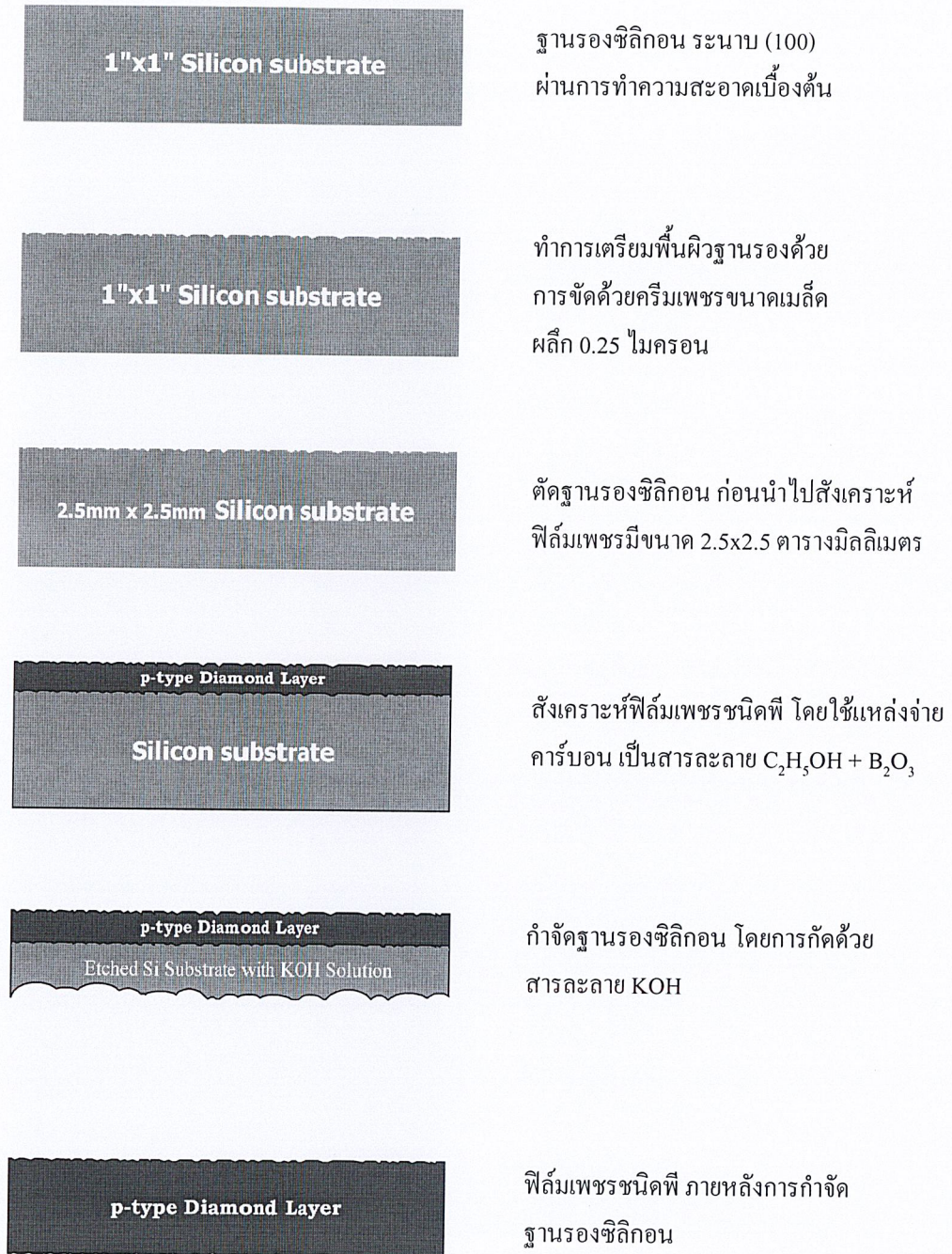
ในกระบวนการนี้จะมีการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร 2 ลักษณะ นั่นคือ การสร้างรอยสัมผัสแบบขอตต์กีโดยใช้โลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัสบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก และการสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกโดยใช้โลหะกาวเงินและทองคำเป็นขั้วสัมผัส ตามที่กล่าวเอาไว้ข้างต้นหัวข้อ 2.9

### 3.5 กระบวนการสร้างขอตต์กีไดโอดจากฟิล์มเพชร

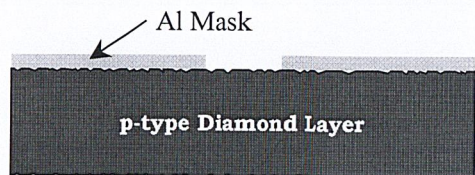
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอตต์กีไดโอด เพื่อเป็นแนวทางของการพิจารณาและเปรียบเทียบกับการลดจุดเสียของการนำขอตต์กีไดโอดนี้โดยพัฒนาเป็นไดโอดโครงสร้าง MIS โดยมีลำดับขั้นตอนการสร้างขอตต์กีไดโอดดังนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิกอน ชนิดพี ระบาย (100) มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของอัลกอกซอลกับโบรอนไตรออกไซด์ โดยในที่นี้ใช้อัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm
- กำจัดเขม่าคาร์บอนหรือ พวกราไฟต์ด้วยการต้มด้วยสารละลายของ  $H_2SO_4 + CrO_4$  แล้วล้างออกด้วยการต้มในสารละลายกรด  $HCl + HNO_3$  ต้มในน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy , X-ray Diffraction และ SEM
- ถ้าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เหมาะสม จึงทำการกำจัดฐานรองซิลิกอนออกตามหัวข้อที่ 3.3
- ทำการสร้างรอยสัมผัส ขอตต์กีด้วยโลหะอลูมิเนียม
- ทำการสร้างรอยสัมผัส โอห์มิกด้วยโลหะกาวเงิน

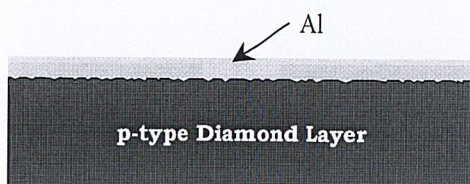
โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.6 โดยชอตต์กีไดโอดที่สร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป



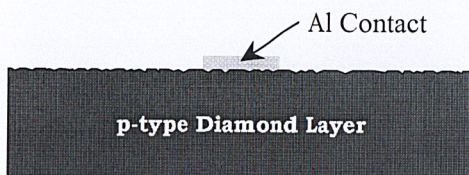
รูปที่ 3.5 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง ชอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร



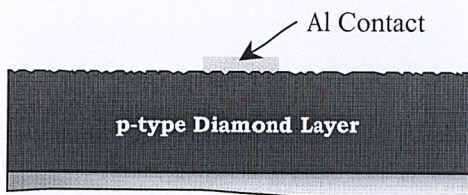
ทำการเตรียมหน้าฉากก่อนการเคลือบโลหะ  
อลูมิเนียมเพื่อทำขั้วสัมผัสวงกลมขนาด  
เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มม.



เคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วย Vacuum Evaporator



ลอกชั้นหน้าฉากออก



ทากาวเงินบริเวณด้านหลังของฟิล์มเพชรชนิดพี  
เพื่อทำขั้วสัมผัส โห้ห่มมิด

รูปที่ 3.5 (ต่อ) ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง ขอตต์กีไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร

### 3.6 กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขต่าง ๆ

#### 3.6.1 ศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เมื่อมีความหนาของชั้นฟิล์มเพชร ชนิดอินทรีนซิกต่าง ๆ กัน มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิกอน ชนิดพี ระบาย <100> มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1

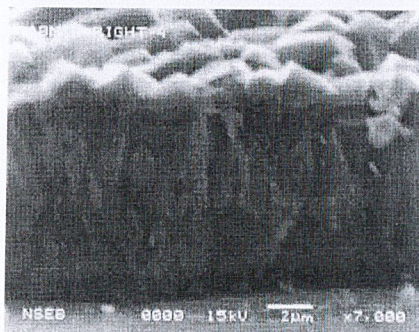
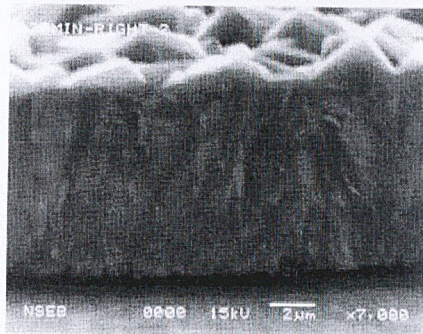
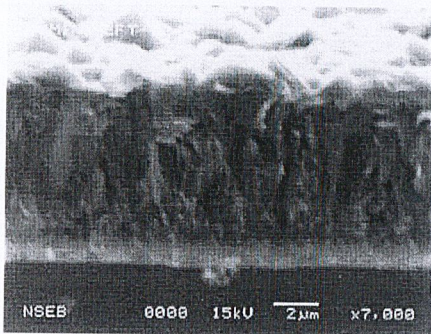
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของอัลกอฮอล์ กับ โบรอนไดรอกไซด์ โดยในที่นี่ใช้อัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm และ 500 ppm
- สร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกทับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ตามวิธีหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นอัลกอฮอล์ โดยแปรความหนาของชั้นอินทรีนซิกตามตารางที่ 3.1 และจะให้ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ใช้ในการทดลอง

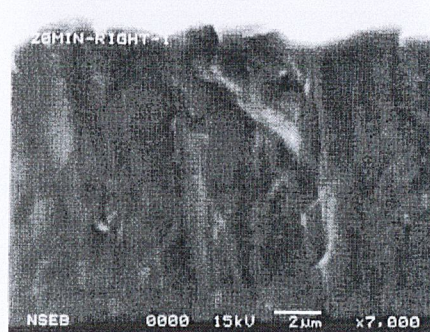
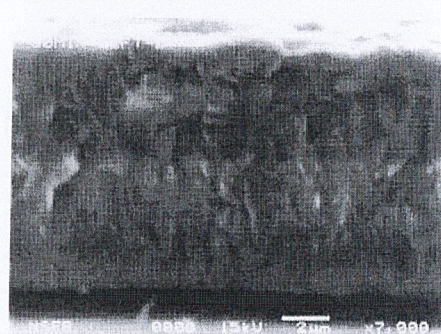
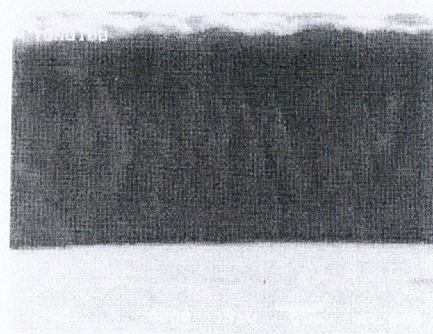
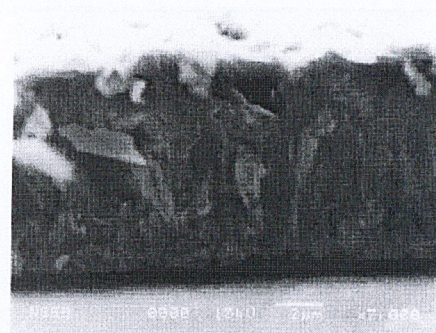
อัตราส่วน B:C (ppm)	ความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก (นาท)			
10	10	20	30	40
50	10	20	30	40
100	10	20	30	40
500	10	20	30	40

- กำจัดเขม่าคาร์บอนหรือพวกกราไฟต์ด้วยการต้มด้วยสารละลายของ  $H_2SO_4+CrO_4$  ล้างออกด้วยการต้มในสารละลายกรด  $HCl+HNO_3$  ต้มในน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ  $N_2$
- ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman spectroscopy , X-ray Diffraction และ SEM พร้อมกับตรวจสอบความหนาของฟิล์มเพชรชั้นอินทรีนซิก ที่สร้างได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะให้ความหนาเป็น 0  $\mu m$ , 1  $\mu m$ , 2  $\mu m$  และ 3  $\mu m$  เมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์นาน 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที และ 40 นาที ตามลำดับ
- ถ้าคุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่สร้างได้เหมาะสม จึงทำการกำจัดฐานรองซิลิกอนออกตามหัวข้อที่ 3.3

ก่อนสร้างชั้นอินทรีนซิก



หลังสร้างชั้นอินทรีนซิก



ก)

ข)

ค)

ง)

รูปที่ 3.6 ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่สร้างทับฟิล์มเพชรชนิดพี

ก) 10 นาทีได้ 1 ไมครอน

ข) 20 นาทีได้ 2 ไมครอน

ค) 30 นาทีได้ 3 ไมครอน

ง) 40 นาทีได้ 4 ไมครอน

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.7 โดยไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อ



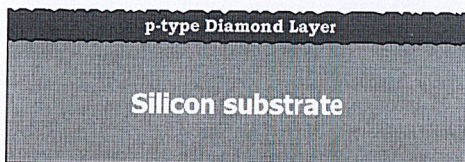
ฐานรองซิลิกอน ระบาย <100>  
ผ่านการทำความสะอาดเบื้องต้น



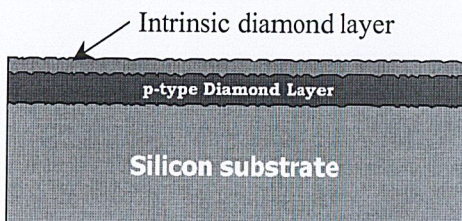
ทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วย  
การขัดด้วยครีมเพชรขนาดเม็ด  
ผลึก 0.25 ไมครอน



ตัดฐานรองซิลิกอนก่อนนำไปสังเคราะห์  
ฟิล์มเพชรมีขนาด 2.5x2.5 ตารางมิลลิเมตร

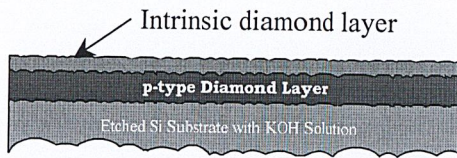


สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่าย  
คาร์บอน เป็นสารละลาย  $C_2H_5OH + B_2O_3$

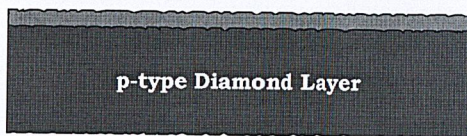


สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิก โดยใช้  
แหล่งจ่ายคาร์บอน เป็นสารละลาย  $C_2H_5OH$

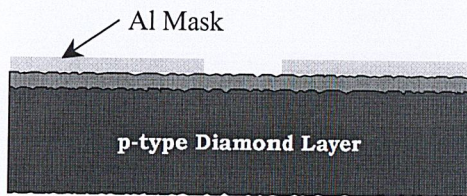
รูปที่ 3.7 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร



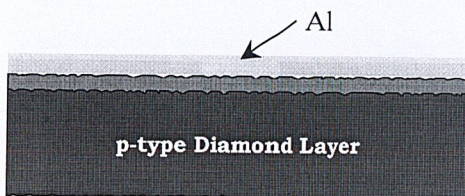
กำจัดฐานรองซิลิกอนโดยการกัดด้วยสารละลาย KOH



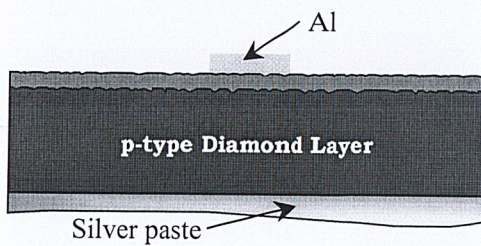
รอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและชนิดพี ภายหลังจากกำจัดฐานรองซิลิกอน



ทำการเตรียมหน้ากากก่อนการเคลือบโลหะอลูมิเนียมเพื่อทำขั้วสัมผัสวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มม.



เคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วย Vacuum Evaporator



ลอกหน้ากากออกและทาแวเงินบริเวณด้านหลังของฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อทำขั้วสัมผัสโอห์มิก

รูปที่ 3.7 (ต่อ) ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

### 3.6.2 ศึกษาผลของอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี

ในการทดลองนี้ เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของไดโอดโครงสร้าง 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 โดยมีแหล่งจ่ายเป็นอัลกอฮอลล์ ในที่นี้ใช้ความหนาแน่นที่เป็น 10 นาที่, 20 นาที่, 30 นาที่ และ 40 นาที่
- เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 5-8 ของหัวข้อ 3.6.1

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขอัตราส่วน B:C ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีที่ใช้ในการทดลอง

ความหนาของชั้นอินทรีนซิก ( $\mu\text{m}$ )	อัตราส่วน B:C (ppm)			
0	0	0	0	0
1	10	50	100	500
2	10	50	100	500
3	10	50	100	500

โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพเช่นเดียวกันกับรูปที่ 3.7 โดยไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างเสร็จตามเงื่อนไขดังกล่าว จะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### เทคนิคการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

การวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชรหลังจากการสังเคราะห์เพชรนั้น เทคนิคในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชรมี 2 วิธีดังนี้

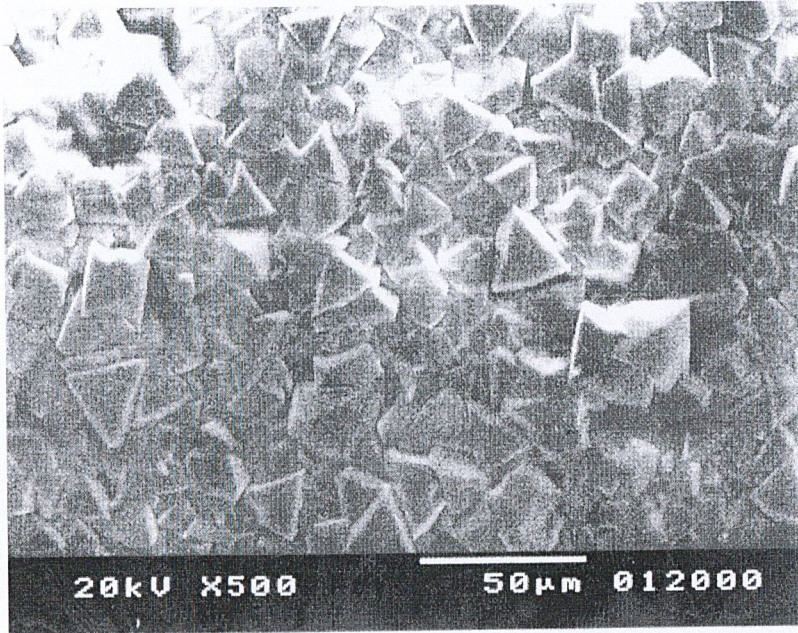
1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูปร่าง หรือความหนาของฟิล์มเพชร ด้วยวิธี SEM (Scanning Electron Microscopy)
2. การตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร ด้วยวิธี Raman Spectroscopy

#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มเพชรด้วยวิธี SEM (Scanning Electron Microscopy)

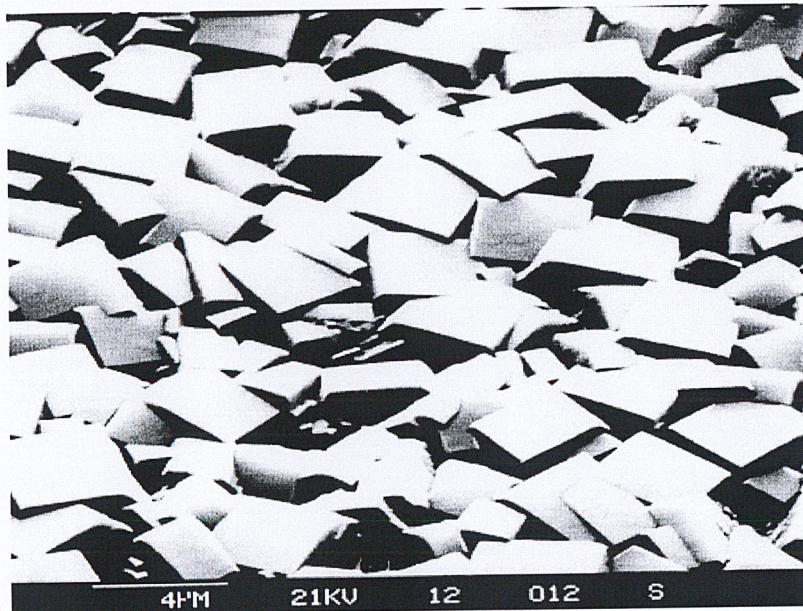
SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน โดยที่ SEM จะทำการกวาดโพกัสอิเล็กตรอนบนพื้นผิว และตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่ 2 ที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโพกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm ซึ่งลักษณะของอิเล็กตรอนลำดับที่ 2 จะขึ้นกับความแตกต่างทางเลขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-ray tube) และ SEM ยังมีข้อดีกว่า Optical Microscope ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็น 3 มิติสำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน

อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำ ๆ จะช่วยการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Raman Spectroscopy

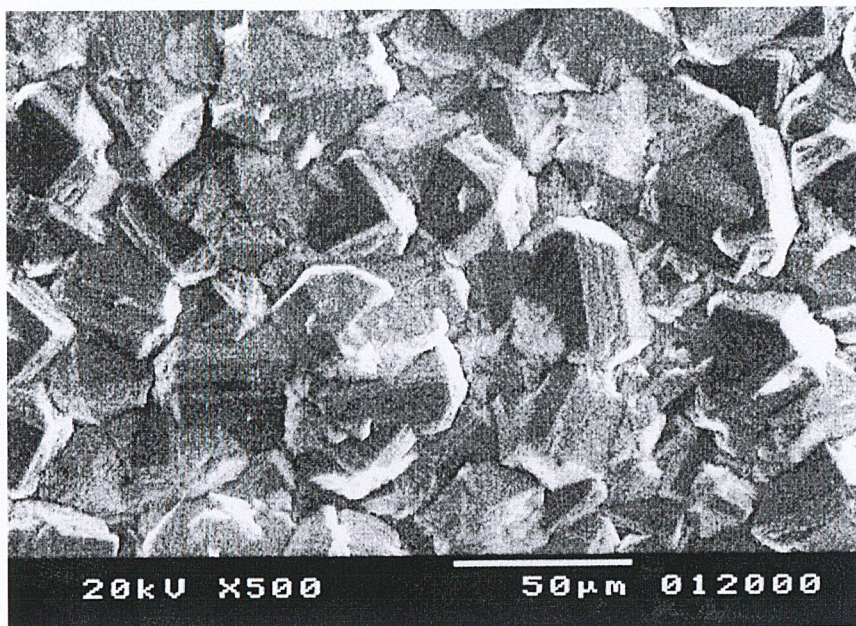
นอกจากนี้เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มเพชรที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้าง โดยทั่วไปฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรอง Si) จะมีผิวหน้าขรุขระ และรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่พบส่วนมากจะมีด้วยกัน 4 แบบ



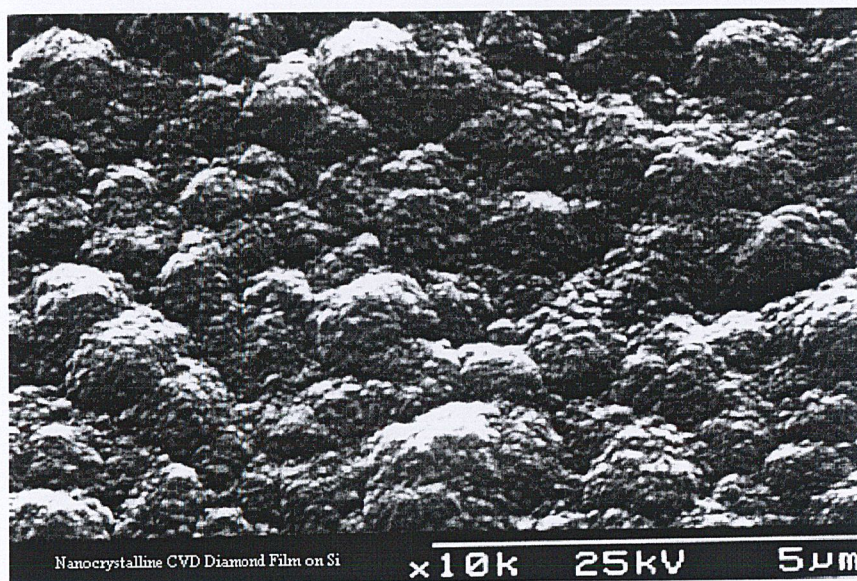
รูปที่ 4.1 (a) ระนาบ {111} Triangular Faces



รูปที่ 4.1 (b) ระนาบ {100} Square Faces



รูปที่ 4.1 (c) Polycrystalline Faces



รูปที่ 4.1 (d) Cauliflower-like or Microcrystalline

รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ

ภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM หากใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy จะช่วยให้การวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น Raman

Spectrum ที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่มีผิวหน้าแบบ Cauliflower-like จะมียอดกราฟลดลง และเกิดยอดของกราฟที่ขี้นมา เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากตรวจสอบพื้นผิวของเพชรรูปอื่น ๆ พบว่าฟิล์มเพชรที่มีลักษณะพื้นผิวแบบ Cauliflower-like แสดงคุณสมบัติของเพชรน้อยกว่าชนิดอื่น

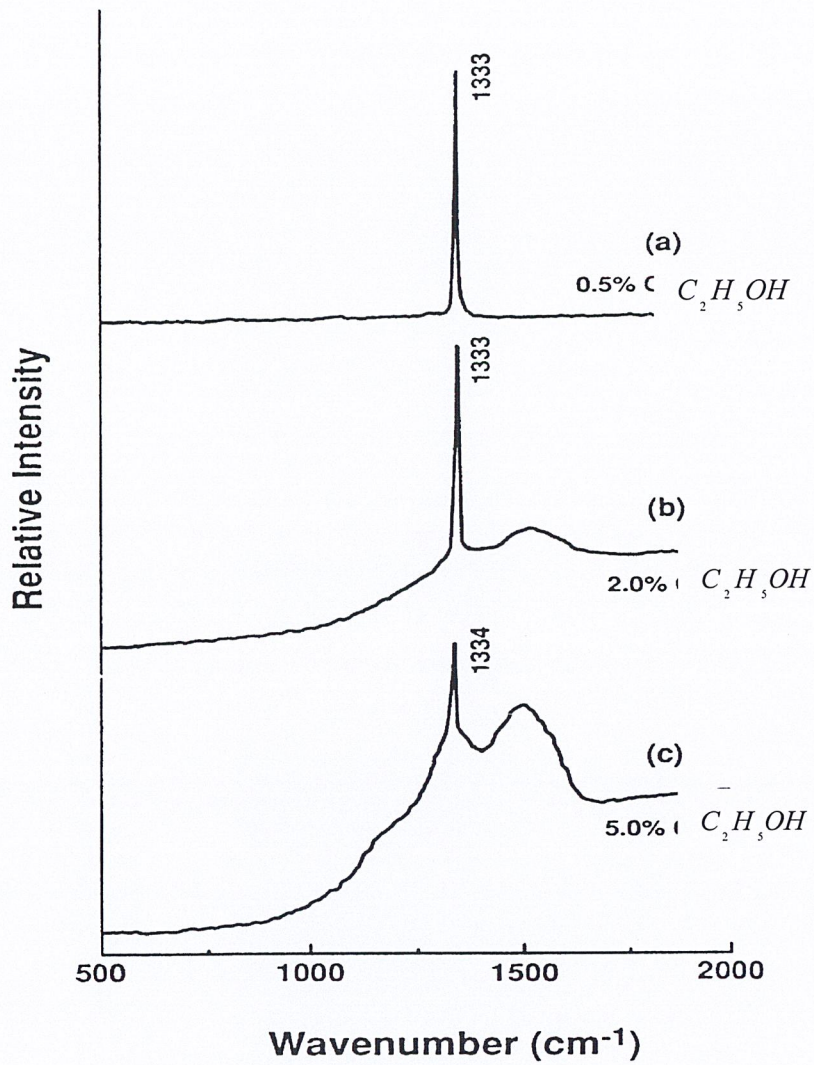
## 4.2 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Raman Spectroscopy

Raman Spectroscopy ใช้ศึกษาการสั่นของอะตอมภายใน โครงสร้างของเนื้อสารหรือบริเวณพื้นผิว จึงเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและกราฟไฟต์สูง ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman Spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่ตรวจสอบได้เป็น เพชร, กราไฟต์, อะมอร์ฟิสม์คาร์บอน และ Hydrogenated Carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman Spectrum และพันธะของคาร์บอนดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 นอกจากนี้สามารถใช้ Raman Spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่าง ๆ กัน

รูปที่ 4.2 (a) 0.5%  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เดียวกับตำแหน่ง  $1,332\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นค่ายอดเพชรธรรมชาติมากนอกจากนี้ยังไม่พบกราฟไฟต์ที่ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นแสดงว่าฟิล์มเพชรที่สร้างได้นี้มีคุณภาพดี

รูปที่ 4.2 (b) 2%  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  พบว่าสเปกตรัมของกราฟไฟต์ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ  $1,332\text{ cm}^{-1}$  เริ่มกว้างขึ้นและเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ  $1,500\text{ cm}^{-1}$  อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous Carbon หรือ Diamond-like Carbon แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous Carbon หรือ Diamond-like Carbon เจือปนอยู่

รูปที่ 4.2 (c) 5%  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ  $1,332\text{ cm}^{-1}$  ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่  $1,334\text{ cm}^{-1}$  ตลอดจนแถบความกว้างที่ตำแหน่งประมาณ  $1,500\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่าฟิล์มเพชรที่สร้างได้นี้มีความเป็นเพชรน้อยมากและมี Amorphous Carbon หรือ Diamond-like Carbon เจือปนอยู่มาก



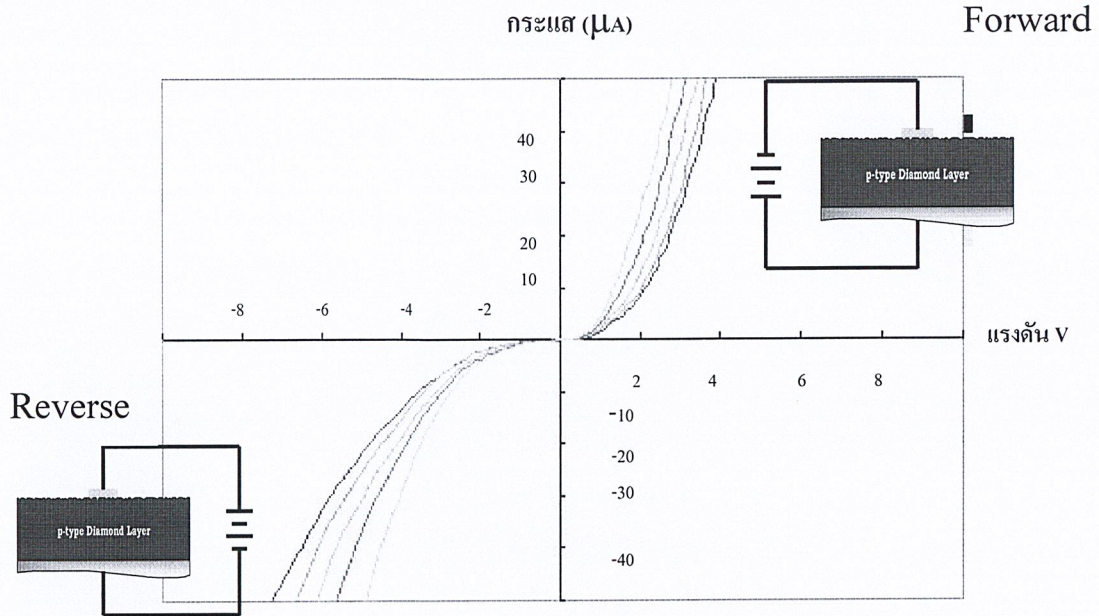
รูปที่ 4.2 Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรในลักษณะต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.1 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน

Peak Position	Type of Carbon	Description
~ 1140 cm	Small size (<0.1um) Cubic Diamond	Occasionally observed in diamond Film with very small grain sizes (< 0.1um)
1345 – 1326 cm	Hexagonal diamond	Broad band, observed in shock wave produced diamond
1332 cm	Cubic diamond	First order peak with FWHM of 1.9 cm for natural diamond
1345 cm	Amorphous carbon	Broad band. It becomes a shoulder of the 1550 cm band when the materials hydrogenated
1355 cm	Microcrystalline graphite	Observed in materials with small grain sizes
1550 cm	Amorphous or diamond-like carbon	Broad band
1580 cm	Graphite	First order peak
2458 cm	Cubic diamond	Second order peak
2710 cm	Microcrystalline graphite	Second order peak
3240 cm	Graphite	Second order peak

#### 4.3 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอตักไคโอด

เพื่อเป็นการศึกษาขอตักไคโอดหรือ รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีปริมาณความเข้มข้นสารเจือโบรอนต่าง ๆ นั้นคือ 10ppm, 50ppm, 100ppm, 500ppm และ 1000ppm โดยในส่วนนี้จะเป็นการตรวจสอบรอยสัมผัสจากคุณสมบัติของกระแส-แรงดันที่วัดได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของขอตักกีโดโอดกรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ

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

โดยถ้าพิจารณาในช่วง ไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) กับรอยต่อ นั้นคือการให้แรงดันไฟลนที่โลหะอลูมิเนียมและให้แรงดันไฟบวกที่ฟิล์มเพชรชนิดพี จะได้

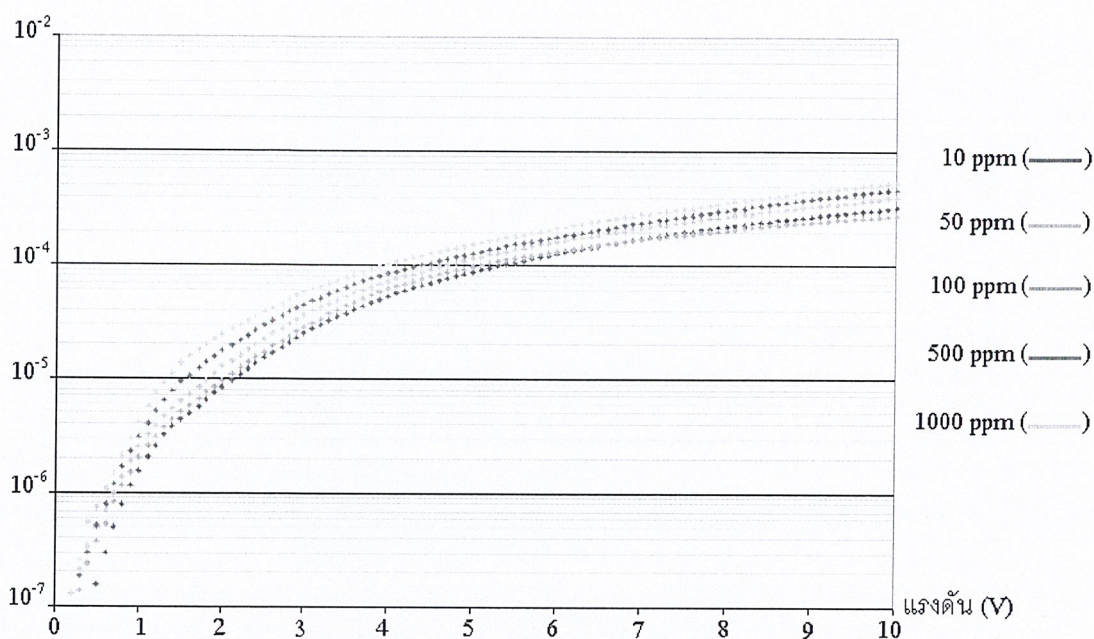
$$I = I_S \exp(qV_A / kT) \tag{สมการ 4.1}$$

$$\ln(I) = \ln(I_S) + \frac{qV_A}{kT} \tag{สมการ 4.2}$$

ถ้า  $V_A = 0$  จะได้  $\ln(I) = \ln(I_S)$  สมการ 4.3

นั่นคือ จากสมการที่ 4.2 จะเห็นว่าถ้าหากแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I)$  กับแรงดัน ไบอัสไปข้างหน้า ( $V_A$ ) จะได้ลักษณะกราฟเป็นเส้นตรงและจากสมการที่ 4.3 จะได้ว่าที่

สถานะสมดุลความร้อนหรือในกรณีที่ไม่ได้ไบอัสให้กับรอยสัมผัส ค่ากระแส  $I$  จะมีค่าเท่ากับค่ากระแส  $I_s$  หรือกระแสอิ่มตัวนั่นเอง ดังนั้นจึงทำการพล็อตกราฟ  $\ln(I) - V_A$  ในช่วงการให้ไบอัสไปข้างหน้าจะได้ดังในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของขอตัก์กีโดโอดกรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ

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

จะได้ค่ากระแสอิ่มตัวจากการประมาณจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 นี้ซึ่งเมื่อพิจารณากระแสอิ่มตัวนี้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad \text{สมการ 4.4}$$

$$A^* = \frac{4\sqrt{q}m_n^*k^2}{h^3} \quad \text{สมการ 4.5}$$

จะสามารถหาค่าความสูงกำแพงศักย์ได้จากค่ากระแสอิมิตัวตั้งในสมการที่ 4.6 โดยในที่นี้

$$q\phi_B = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_S}\right) \quad \text{สมการ 4.6}$$

$q\phi_B$  = ค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส

$T$  = อุณหภูมิห้อง 27° c หรือ 300 K

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

$m_h^*$  = Effective mass ของโฮลในเพชรแบบปลูกเชิงซ้อน =  $3.64 \times 10^{-31}$  kg

$A^*$  = ค่าคงที่ Richardson =  $4.798 \times 10^5$  A/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>

เมื่อแทนค่ากระแสอิมิตัวที่ประมาณได้จากกราฟของกรณีค่าปริมาณอัตราส่วน B:C ต่าง ๆ ลงในสมการที่ 4.6 แล้วจะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส ( $\phi_{BP}$ ) แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่วัดได้รูปที่ 4.3

**ตารางที่ 4.2** ค่ากระแสอิมิตัวและความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสเมื่อมีอัตราส่วน B:C ต่างๆ

อัตราส่วนB:C (ppm)	ค่ากระแสอิมิตัว: $I_S(\mu m)$	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 จากการประมาณค่ากระแสอิมิตัวในรูปที่ 4.6 นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงในรูปที่ 4.5 แสดงว่าการสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะออลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีนี้เป็นรอยสัมผัสที่มีคุณสมบัติรีกติไฟร์หรือรอยสัมผัสแบบชอตต์กีจริงและเมื่อพิจารณาช่วงขนาดของการให้ไบอัสย้อนกลับแก่ชอตต์กีใด

โอดเปรียบเทียบกับขนาดของการให้ไบอัสไปข้างหน้าจะเห็นได้ว่าจะทำให้เกิดกระแสไหลในปริมาณไม่ต่างกันมากหรือนั่นคือมีอัตราการกรอง (Rectification ratio) ของกระแสค่อนข้างต่ำและในทางปฏิบัติจริงบางครั้งความต่างของอัตราการกรองกระแสในคุณสมบัติเรกติไฟร์นี่เป็นสิ่งที่จำเป็นอีกทั้งจุดประสงค์หลักในการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรคือการใช้งานในอุณหภูมิที่สูงกว่าปกติ ดังนั้นจึงควรที่จะลดปริมาณของกระแสรั่วย้อนกลับให้น้อยลงเพื่อเพิ่มอัตราการกรองการไหลของกระแสในโครงสร้างนี้ซึ่งสามารถปรับปรุงสิ่งที่เกิดขึ้นนี้เพื่อสามารถนำคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำเพชรที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใช้งานได้ ในลักษณะกว้างมากขึ้น ดังนั้นแนวคิดการปรับปรุงขอตักไดโอดที่ได้เกริ่นไว้ข้างต้นนี้จึงได้ทำการทดลองและศึกษาคุณสมบัติและการเปลี่ยนแปลงได้ดังหัวข้อต่อไป

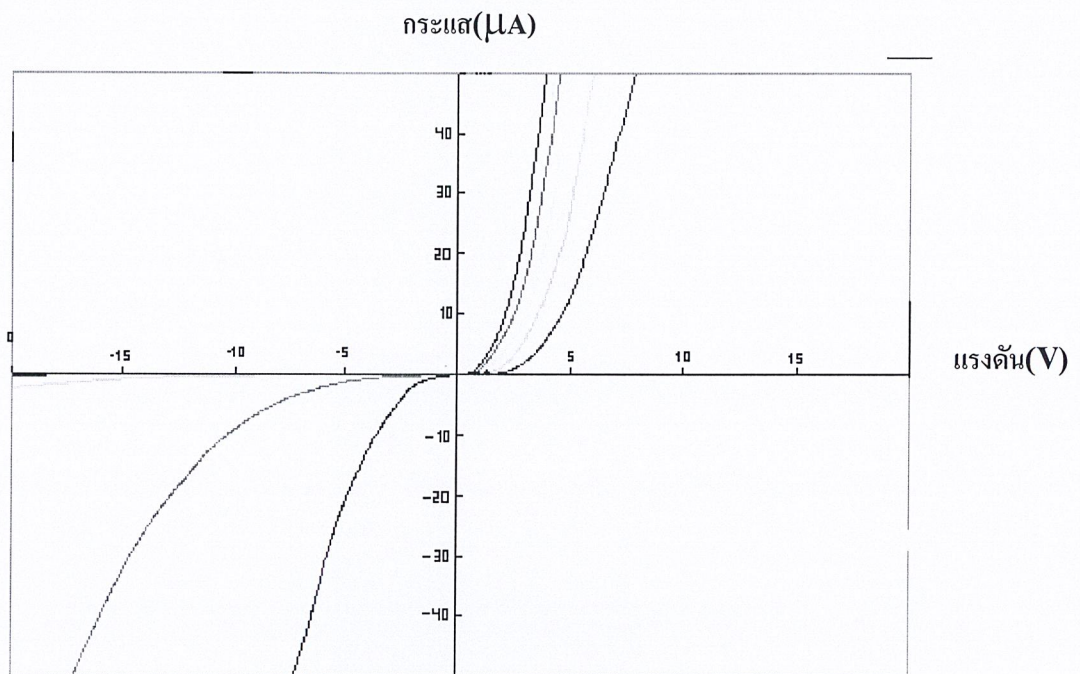
#### 4.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื่องจากขอตักไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรกับโลหะอลูมิเนียมนี้ เมื่อเปรียบเทียบการไหลของกระแสทั้งการให้ไบอัสย้อนกลับและไบอัสไปข้างหน้าจะมีอัตราการกรองการไหลของกระแสค่อนข้างต่ำ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือจะเกิดกระแสรั่วไหลกลับ (Leakage reverse current) ค่อนข้างสูงซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อบกพร่องหรือข้อเสียของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการนำไปใช้ในอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นจุดเด่นของการทำงานของสารกึ่งตัวนำเพชร ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดเพื่อที่จะลดกระแสรั่วที่เกิดขึ้นนี้ หรือเพิ่มอัตราการกรองการไหลของกระแสนั้นเอง โดยการสร้างชั้นฉนวนขึ้นระหว่างโลหะและฟิล์มเพชรชนิดพีขึ้น ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนิกเป็นชั้นฉนวนระหว่างชั้นของโลหะอลูมิเนียมและฟิล์มเพชรชนิดพีนี้ จึงศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อทำการทดลองตามแนวความคิดนี้ได้แก่ ศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนิกที่คั่นระหว่างรอยสัมผัสของโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี ศึกษาผลของปริมาณอัตราส่วน B:C ที่เจือให้กับฟิล์มเพชรชนิดพีเมื่อมีชั้นฉนวนในโครงสร้าง เมื่อทำการสร้างไดโอดโครงสร้าง MIS เพื่อที่จะศึกษาตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้เสร็จเรียบร้อยแล้วนี้

##### 4.4.1 ผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนิก

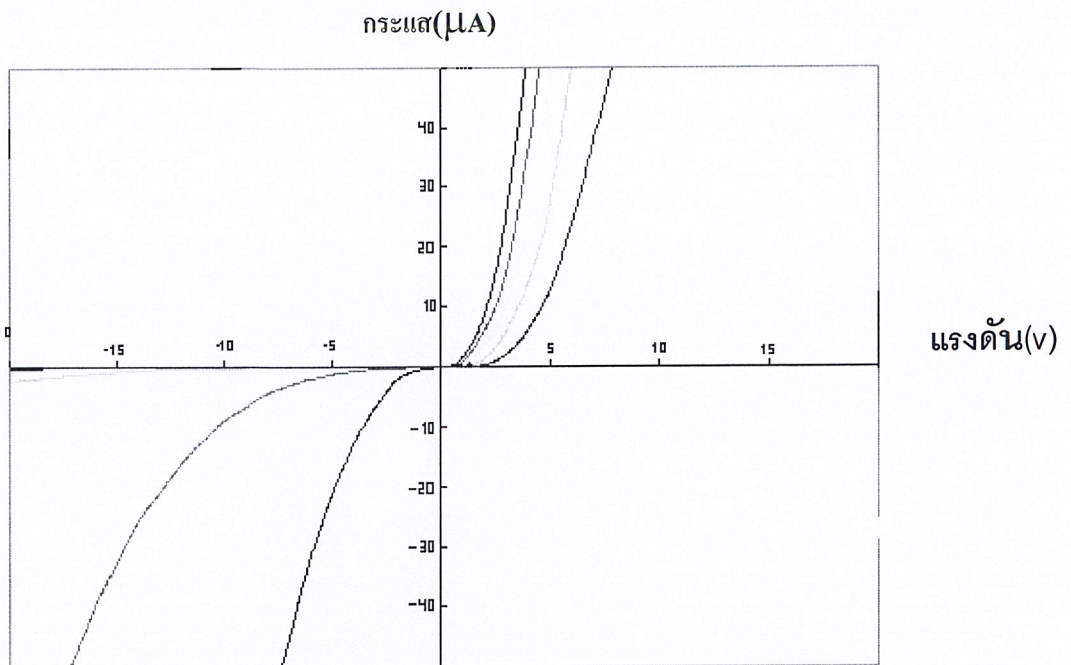
ในส่วนนี้เป็นการศึกษา ผลของความหนาของฟิล์มเพชร ชนิดอินทรีนิก โดยจะทำการสร้างที่ความหนาต่างๆ กันได้แก่  $0\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$ ,  $2\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m}$  และ  $4\mu\text{m}$  คั่นระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชร ที่มีอัตราส่วน B:C เป็น 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm ดังที่กล่าวไว้แล้ว ในกระบวนการทดลองบทที่ 3 ซึ่งหลังจากทำการสร้างเสร็จแล้ว จึงทำการศึกษา

คุณสมบัติกระแส กับแรงดันในอุณหภูมิห้อง ( $T=300\text{K}$ ) ด้วยเครื่องมือวัด Hewlett Packard 4061A (Semiconductor/component Test system) ดังแสดงในรูปที่ 4.5-4.9



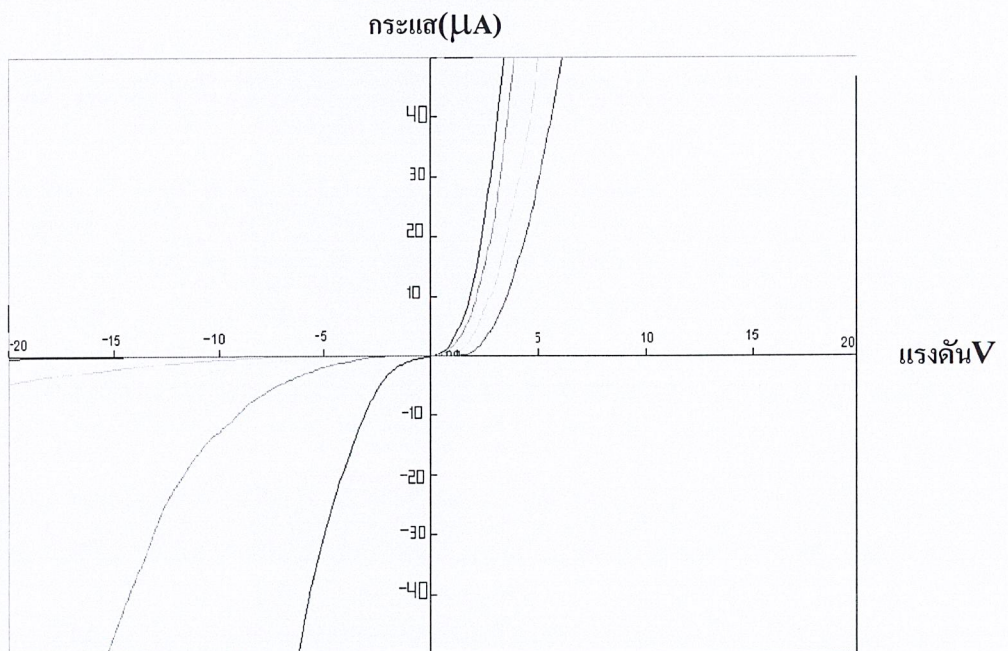
รูปที่ 4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 10ppm กรณีความหนาชั้น  $i$  ต่างๆ

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



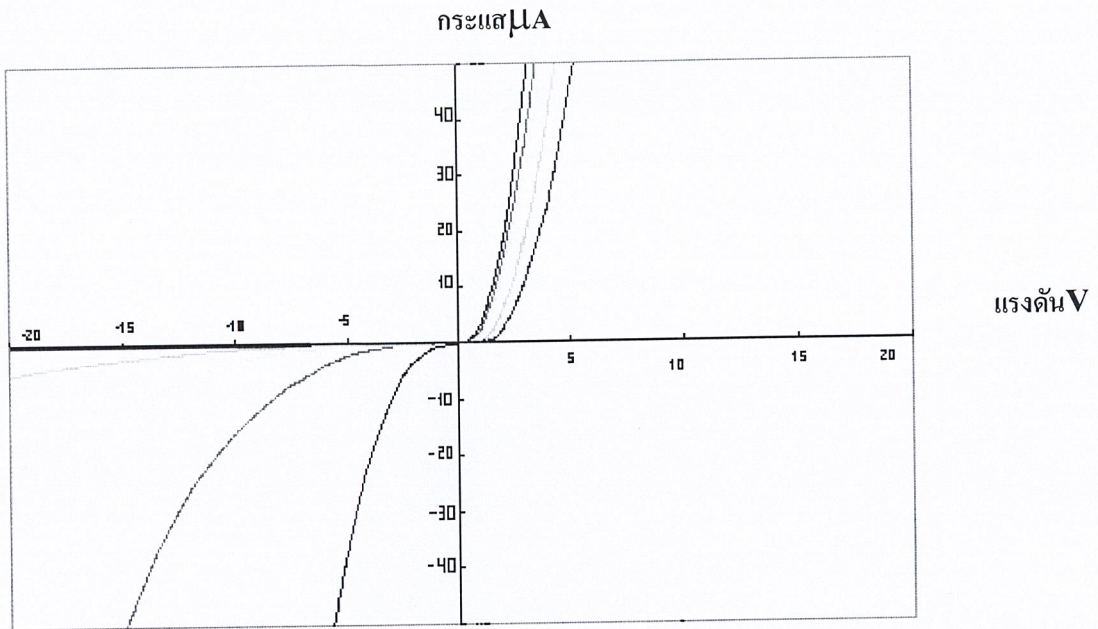
รูปที่ 4.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 50ppm กรณีความหนาแน่น  $i$  ต่างๆ

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



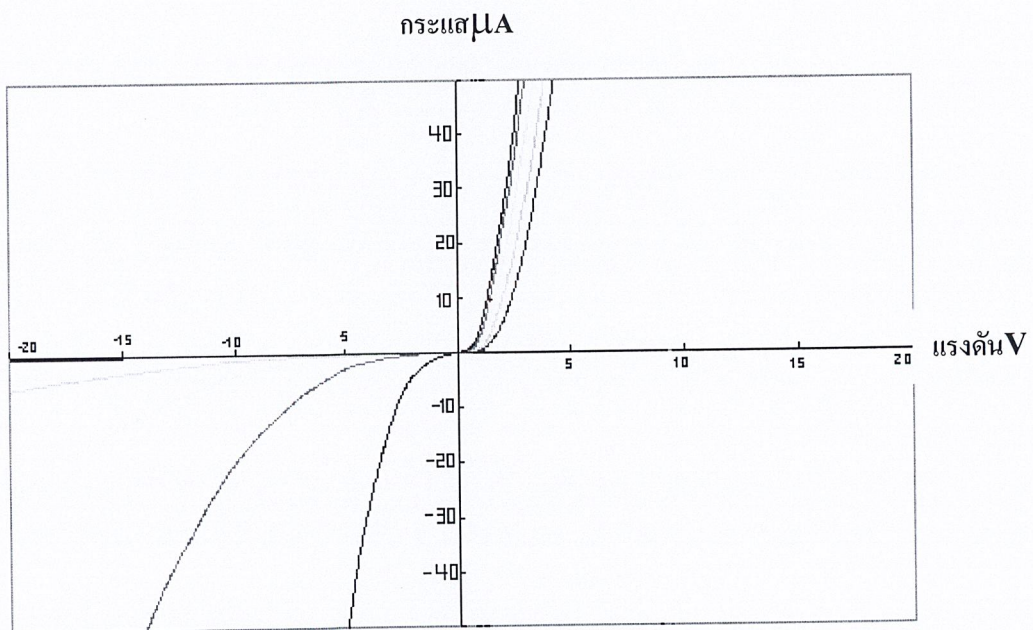
รูปที่ 4.7 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 100ppm กรณีความหนาแน่น  $i$  ต่างๆ

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



รูปที่ 4.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 500 ppm กรณีความหนาแน่น  $i$  ต่างๆ

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



รูปที่ 4.9 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่ออัตราส่วน B:C 1000 ppm กรณีความหนาแน่น  $i$  ต่างๆ

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

จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโครงสร้าง MIS จากฟิล์มบางเพชรตามเงื่อนไขฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่ความหนาชนิดต่างๆดังในรูป 4.7-4.11 ข้างบนนี้ถ้าหากพิจารณาค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับ 0.2 ไมโครแอมป์แปรขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะได้ค่าแรงดันไบอัสต่างๆตามตารางที่4.3และในส่วนระดับกระแสไหลไปข้างหน้า 0.2 ไมโครแอมป์แปรจะต้องได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้าต่างๆตามตารางที่4.4

ตารางที่4.3ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ทำให้ไดโอดเงื่อนไขต่างๆมีกระแสรั่วเกิดขึ้น 0.2 ไมโครแอมป์แปร

อัตราส่วน B:C (ppm)	ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ(V) เมื่อไดโอดมีความหนาชั้นอินทรีนซิก				
	0 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$
10	0.51	1.9	5.3	10.1	19.4
50	0.4	2.61	4.2	8.2	18.4
100	0.21	2.6	3.9	6.8	17.6
500	0.17	2.35	3.7	5.8	16.4
1000	0.152	1.72	3.61	4.7	15.5

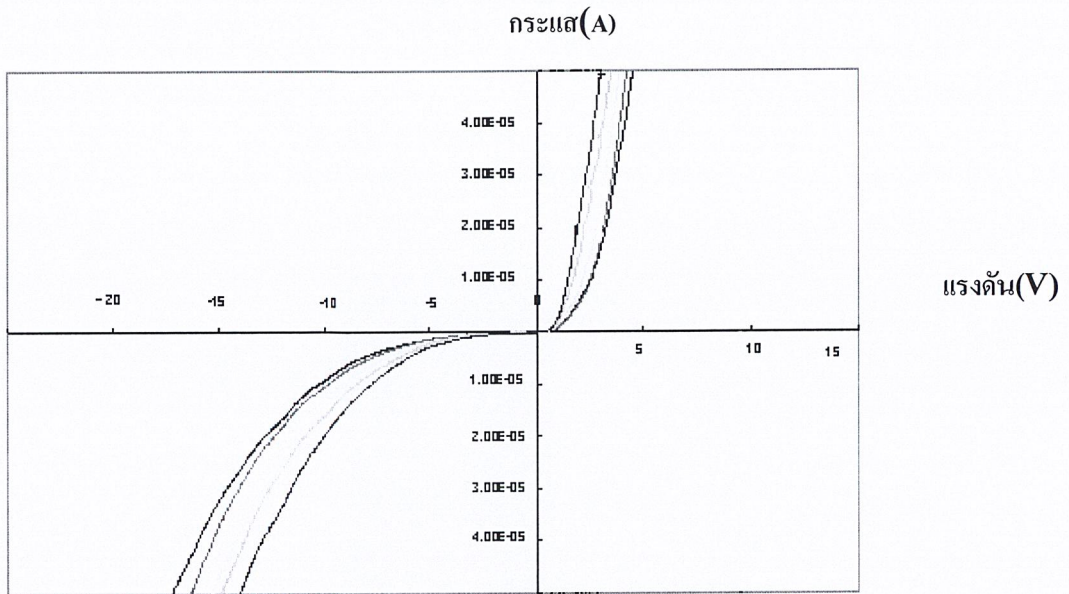
ตารางที่4.4ค่าแรงดันไบอัสไปข้างหน้าที่ทำให้ไดโอดเงื่อนไขต่างๆมีกระแสรั่วเกิดขึ้น- 0.2 ไมโครแอมป์แปร

อัตราส่วน B:C (ppm)	ค่าแรงดันไบอัสไปข้างหน้า(V) เมื่อไดโอดมีความหนาชั้นอินทรีนซิก				
	0 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$
10	-0.54	-0.82	-0.92	-1.35	-1.86
50	-0.35	-0.67	-0.88	-1.16	-1.74
100	-0.32	-0.48	-0.53	-0.98	-1.51
500	-0.31	-0.49	-0.54	-0.82	-1.15
1000	-0.26	-0.47	-0.64	-0.73	-0.85

สิ่งหนึ่งที่เห็นได้ชัดคือเมื่อไดโอดโครงสร้าง MIS มีชั้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกหนาขึ้น คุณสมบัติรีกติไฟร์ของไดโอดที่เป็นไปในทางที่ดีขึ้นมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างของขอตด์กีไดโอด(ไม่มีชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก)ซึ่งมีกระแสรั่วไหลย้อนกลับค่อนข้างสูงนั่นคือ เมื่อพิจารณากระแสไหลไปข้างหน้าขณะ 0.2ไมโครแอมแปร์ เช่นกันนี้ไดโอดที่มีความหนาของชั้นอินทรีนซิกมากขึ้นจะต้องรับแรงดันไบอัสไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในทางตรงกันข้ามกระแสไหลย้อนกลับขนาด 0.2ไมโครแอมแปร์ ไดโอดที่มีความหนาของชั้น อินทรีนซิกมากขึ้นจะต้องได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับสูงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหรืออีกในหนึ่งคือไดโอดโครงสร้าง MIS นี้จะมีค่าแรงดันพังทลายสูงขึ้นเมื่อชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีความหนาเพิ่มขึ้น

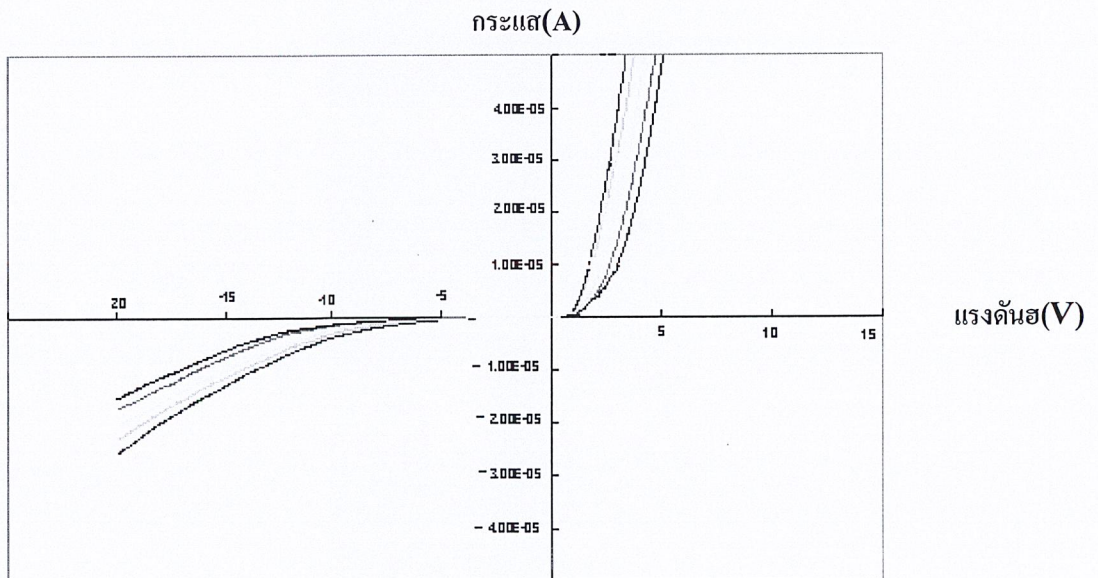
#### 4.4.2 ผลของความเข้มข้นของโบรอนในฟิล์มเพชรชนิดพี

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นของปริมาณสารเจือโบรอนหรืออัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน(B:C )สำหรับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีนั่นเองในการทดลองนี้จะทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีอัตราส่วน B:C ค่าต่างๆ ได้แก่ 10 ppm,50ppm,100ppm,500ppmและ 1000ppm โดยพิจารณาที่ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก คงที่ต่างๆกันคือ  $1\mu\text{m}$ ,  $2\mu\text{m}$ ,  $3\mu\text{m}$  และ  $4\mu\text{m}$  ดังที่กล่าวไว้แล้ว ในกระบวนการทดลองบทที่3 หลังจากทำการสร้างเสร็จแล้ว จึงทำการศึกษา คุณสมบัติกระแสกับแรงดันในอุณหภูมิห้อง ( $T=300\text{K}$ ) ด้วยเครื่องมือHewlett Packard 4061A (Semiconductor/component Test system) ดังรูปที่4.10-4.13



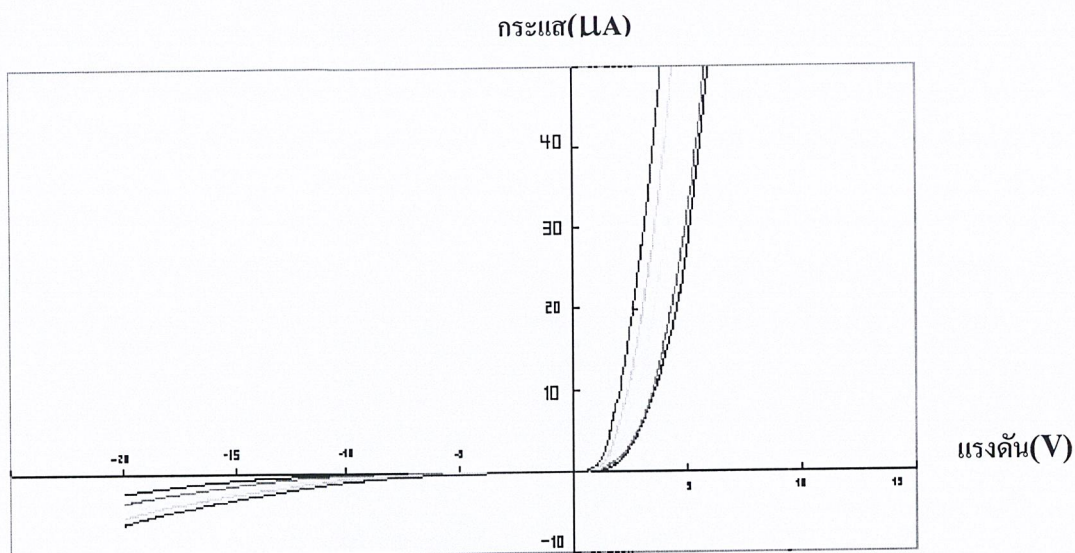
รูปที่ 4.10 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา  $1\mu\text{m}$  กรณีสัดส่วนส่วน B:C ต่างๆ

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

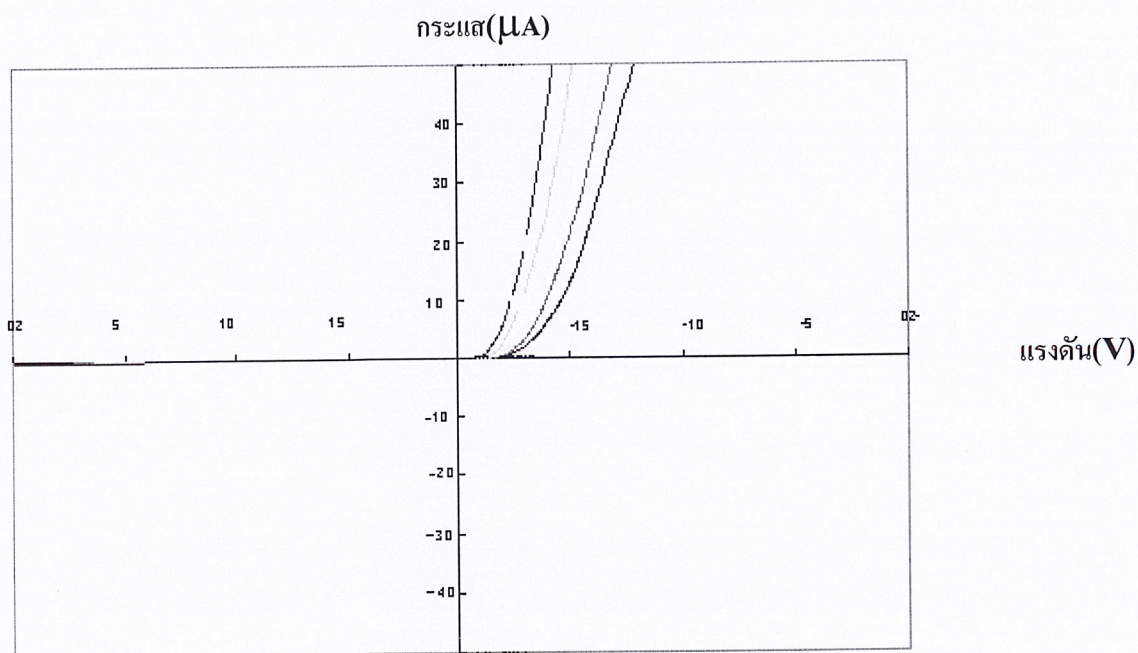


รูปที่ 4.11 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น i หนา  $2\mu\text{m}$  กรณีสัดส่วนส่วน B:C ต่างๆ

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



รูปที่ 4.12 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น  $i$  หนา  $3\mu\text{m}$  กรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ  
 ก) 10 ppm ( ) ข) 50 ppm ( ) ค) 100 ppm ( )  
 ง) 500 ppm ( ) จ) 1000 ppm ( )



รูปที่ 4.13 คุณลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อชั้น  $i$  หนา  $4\mu\text{m}$  กรณีอัตราส่วน B:C ต่างๆ  
 ก) 10 ppm ( ) ข) 50 ppm ( ) ค) 100 ppm ( )  
 ง) 500 ppm ( ) จ) 1000 ppm ( )

จากผลการทดลองข้างบนนี้เป็นการสนใจพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีค่าคงที่แต่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C ที่เจอให้กับชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งหลังจากตรวจสอบแล้ว สิ่งหนึ่งที่เห็นได้ก่อนข้างชัดเจนก็คือเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการไหลของกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า ยกตัวอย่างพิจารณาจากรูปที่4.13 พิจารณาที่ความหนาของชั้นอินทรีนซิกเป็น3ไมโครเมตร จะเห็นว่าถ้าหากให้แรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ 3 โวลต์กับไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ จะทำให้เกิดกระแสไหลไปข้างหน้าและกระแสไหลย้อนกลับมีค่าตามตารางที่4.5

**ตารางที่4.5**ปริมาณกระแสไหลของไดโอดโครงสร้างMIS ที่มีชั้นอินทรีนซิกหนา $3\mu\text{m}$ เมื่อพิจารณาการให้ไบอัสตรงและย้อนกลับขนาด 3 โวลต์

อัตราส่วน B:Cต่างๆ (ppm)	ปริมาณกระแสไหล ( $\mu\text{A}$ )เมื่อถูกไบอัสขนาด	
	ไบอัสตรง	ไบอัสย้อนกลับ
10	5.82	0.02
50	6.1	0.035
100	12	0.067
500	19.2	0.068
1000	27.7	0.103

ซึ่งจะเกิดความแตกต่างของปริมาณการไหลของกระแสทั้งสองทางอย่างชัดเจนนั่นคือเมื่อไดโอดโครงสร้าง MIS มีปริมาณอัตราส่วน B:C เพิ่มขึ้น กระแสไปข้างหน้าจะมีปริมาณการไหลเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่กระแสไหลย้อนกลับของไดโอดนี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับการไหลของกระแสไปข้างหน้าซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วน B:C ที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับเลย และจากความแตกต่างของปริมาณการไหลของกระแสนี้ทำให้เห็นอีกอย่างว่าไดโอดโครงสร้าง MIS นี้มีอัตราการกรองการไหลของกระแสสูงมาก

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาและพัฒนาไดโอดโครงสร้าง MIS ที่สร้างจากฟิล์มเพชร เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานสารกึ่งตัวนำเพชรเนื่องด้วยคุณสมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นและได้เปรียบในเรื่องของการสังเคราะห์ที่ง่ายและถูก ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอตัก์ไดโอด หรือรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดพี เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในส่วนหลังของงานวิจัย โดยทำการสร้างขอตัก์ไดโอดที่มีความเข้มข้นของปริมาณโบรอนในฟิล์มเพชรชนิดพีต่างกัน ได้แก่ 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่า ขอตัก์ไดโอดมีความสูงของกำแพงศักย์อยู่ในช่วง 0.514 eV - 0.526 eV แต่เมื่อเปรียบเทียบการให้แรงดันไบอัสขนาดเท่ากันทั้งสองทิศทาง จะได้ว่า กระแสรั่วไหลย้อนกลับมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับกระแสไหลไปข้างหน้า หรือนั่นคืออัตราขยายการไหลของกระแส (current rectification ratio) ของไดโอดค่อนข้างต่ำถึงแม้ว่าขอตัก์ไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเช่นเดียวกับการทำงาน แต่เนื่องจากในจุดประสงค์ของการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรนี้ค่อนข้างที่จะเน้นไปในการใช้งาน ที่มีอุณหภูมิสูง จึงเป็นเหตุผลให้ทำการศึกษาไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ เพื่อเป็นการปรับปรุงและพัฒนาขอตัก์ไดโอดให้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการทำงานสูงขึ้นและสามารถเลือกใช้งานตามเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยสร้างชั้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกขึ้นระหว่างชั้นของโลหะกับฟิล์มเพชรชนิดพี หรือเป็นไดโอดโครงสร้าง MIS นั้นเอง เพราะฉะนั้นจึงทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากแนวทางการแก้ปัญหานี้ โดยทำการศึกษาในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ พิจารณาผลของชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกที่มีความหนาเป็น 0  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$  และ 3  $\mu\text{m}$  ระหว่างชั้นของโลหะและฟิล์มเพชรชนิดพี ผลของอัตราส่วน B:C 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm และ 1000 ppm ที่เติมให้แก่ฟิล์มเพชรชนิดพี

จากการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก ในโครงสร้างระหว่างชั้นโลหะอลูมิเนียมและฟิล์มเพชรชนิดพีพบว่าเมื่อฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกมีความหนาเพิ่มขึ้นสามารถทำให้ปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับมีค่าลดลงอย่างมาก ในเวลาเดียวกันกระแสไหลไปข้างหน้าขณะได้รับการไบอัสตรง มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขณะที่ไดโอดถูกไบอัสย้อนกลับ ส่วนการศึกษาผลของอัตราส่วน B:C ขณะที่มีความหนาของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกคงที่ พบว่า เมื่อเติมปริมาณสารเจือโบรอนหรืออัตราส่วน B:C ในฟิล์มเพชรชนิดพีให้มากขึ้น ปริมาณกระแสไหลไปข้างหน้าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อไบอัสตรง แต่ในขณะที่ปริมาณ

กระแสรั่วไหลย้อนกลับมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังที่กล่าวทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก หรือไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ สามารถลดปริมาณกระแสรั่วไหลย้อนกลับได้ และการเพิ่มอัตราส่วน B:C หรือในที่นี้ก็คือการเพิ่มประจุพาหะส่วนมากนั้น สามารถเพิ่มปริมาณการไหลของกระแสไปข้างหน้าได้อย่างชัดเจน นั่นคือเพิ่มอัตราขยายการไหลของกระแส ขณะที่ได้รับการไบอัสขนาดเท่ากันในทั้งสองทิศทาง

จากการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไดโอดโครงสร้าง MIS นี้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้งานตามเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไปยกตัวอย่างเช่นด้วยคุณสมบัติที่มีกระแสไหลค่อนข้างต่ำ จึงสามารถเป็นแหล่งจ่ายกระแสให้กับอุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ หรือการประยุกต์ใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ประเภทผลของสนามไฟฟ้า หรือ MISFET หรือการประยุกต์ในลักษณะงานแบบดิจิทัล ที่ต้องใช้งานในสิ่งแวดล้อม ที่มีอุณหภูมิสูง หรือมีกัมมันตภาพรังสีสูงๆ โดยอาศัยคุณสมบัติการเรกติไฟร์ที่ดี ของโครงสร้าง MIS ผนวกกับคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำเพชรนี้เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Karl E.Spear , John P.Dismukes. **Synthetic Diamond : Emerging CVD Science and Technology**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [2] J.E.Field. **The Properties of Natural and Synthetic Diamond**. London : Harcourt Brace Janovich Publisher. 1992.
- [3] Lawrence S. Pan , Don R.Kania. **Diamond : Electronic Properties and Applications**. Boston : Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [4] Robert F.David. **Diamond Films and Coatings**. U.S.A. : Noyes Publications. 1993.
- [5] Kanaan Kano. **Semiconductor Devices**. New Jersey : Prentice-Hall. 1998.
- [6] Vainshtein , Boris K. **Fundamentals of Crystals**. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin : Springer-Verlag. 1994.
- [7] Eileen Wilks , John Wilks. **Properties and Applications of Diamond**. Oxford : Butterworth-Heinemann.1991.
- [8] J.E.Field. **The Properties of Diamond**. London : Academic Press, Inc. 1979.
- [9] David S. Dandy and Michael E. Coltrin. **Diamond Thin Films Handbook**. New York : Marcel Dekker, Inc. 1997.
- [10] Donald R. Askeland. **The Science and Engineering of Materials**. 3<sup>rd</sup> ed. Boston : PWS Publishing Company. 1989.
- [11] James F. Shackelford. **Introduction to Materials Science for Engineers**. 3<sup>rd</sup> ed. New York : Prentice Hall, Inc. 1992.
- [12] พรศักดิ์ อรรถวานิช. วัสดุศาสตร์. พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ.2536. 2536
- [13] John R. Ferraro, Kazuo Nakamoto. **Introductory Raman Spectroscopy**. London : Academic Press.Inc. 1994.
- [14] Donald A. Neaman. **Semiconductor Physics and Devices**. Illinois : IRWIN. 1992.
- [15] รุ่งนภา จิตภักดี, ลัดดาวัลย์ สุภาดี, ดร.อิทธิพล แจ่มชัด, รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง. “เทคนิคการลดการรบกวนจากผลึกข้างเคียงในการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD.” First National Symposium on GRAD-RESEARCH Chiang Mai University, June 2000. pp.322-327.

- [16] ลัดดาวัลย์ สุภาดี, รุ่งนภา จิตภักดี, อธิพิณ แจ่มชัด, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “การศึกษาการลดจุดบกพร่องของผลึกเพชรระหว่างการสังเคราะห์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น.” วารสารการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 สาขาวิศวกรรมศาสตร์. 2543. หน้า 382-388.
- [17] กชพงศ์ สุमानนท์, ลัดดาวัลย์ สุภาดี, รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “ผลจากระนาบของซิลิกอนต่อการสังเคราะห์ผลึกเพชรแบบ HFCVD ให้มีขนาดใหญ่.” วารสารการประชุมทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 1, กรกฎาคม 2543. หน้า 181-184.
- [18] Oliver J. McCarthy. **MOS Device and Circuit Design**. New York.: A Wiley-Interscience Publication. 1982.

## ภาคผนวก

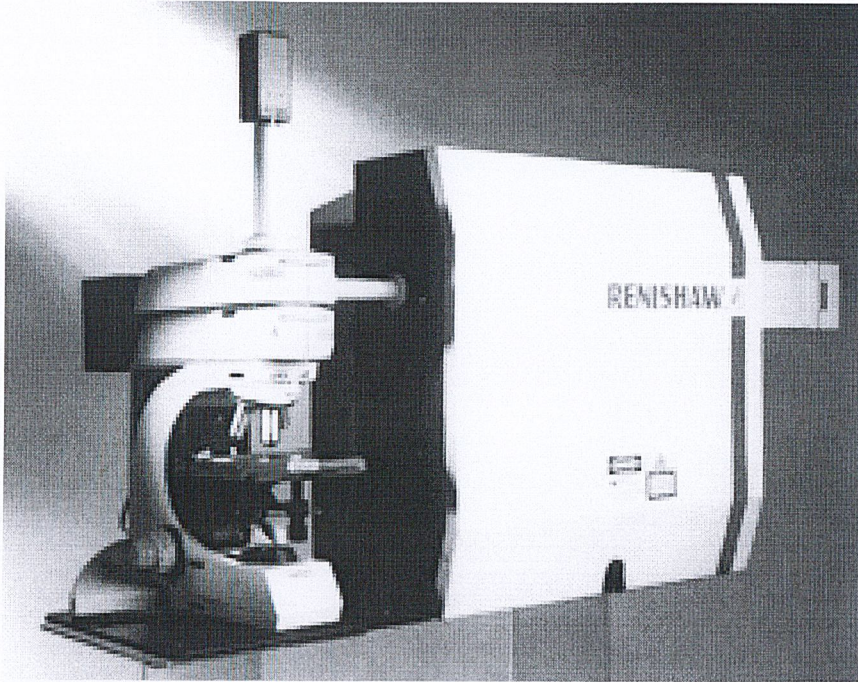
ภาคผนวก ก สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรองในการสังเคราะห์เพชร

วัสดุสาร	จุดหลอมเหลว (°C)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความนำความร้อน (W/cm deg)	สัมประสิทธิ์การกระจาย ความร้อน (10 <sup>-6</sup> )	พลังงานพื้นผิว (Jm <sup>-2</sup> )	ความต้านทาน (μΩcm)	ฟังก์ชันงาน (eV)
Si	1412	5.42	2.33	0.83	24	1.46(111)	3.5x10 <sup>11</sup>	4.1
Diamond (cubic) (hexagonal) a-axis c-axis	3057	3.567 2.52 1.42	3515 3520	6.59	0.8	5.3(111) 6.5(110) 9.2(100)	-	4.39
Graphite(hexagonal) a-axis c-axis	3797	2.46 6.71	2260	Negative 2.5	0.6-4.3	2.80(1010) 0.17(0001)	350-6300	-
Al	660	4.04	2.7	2.38	23.8	1.085/0.939	2.45	3.74
Cu	1083	3.61	8.96	4.16	16.8	2.08(100)	1.56	4.47
Pt	1769	3.92	21.45	0.699	9.0	2.691/2.055	9.81	5.29
W	3380	3.16	19.3	1.69	4.4	3.468/2.487	4.9	4.50
Mo	2615	3.14	10.22	1.38	5.1	2.877/2.116	5.2	4.27
Au	1063	4.07	19.3	3.11	14.2	1.626/1.345	2.04	4.58

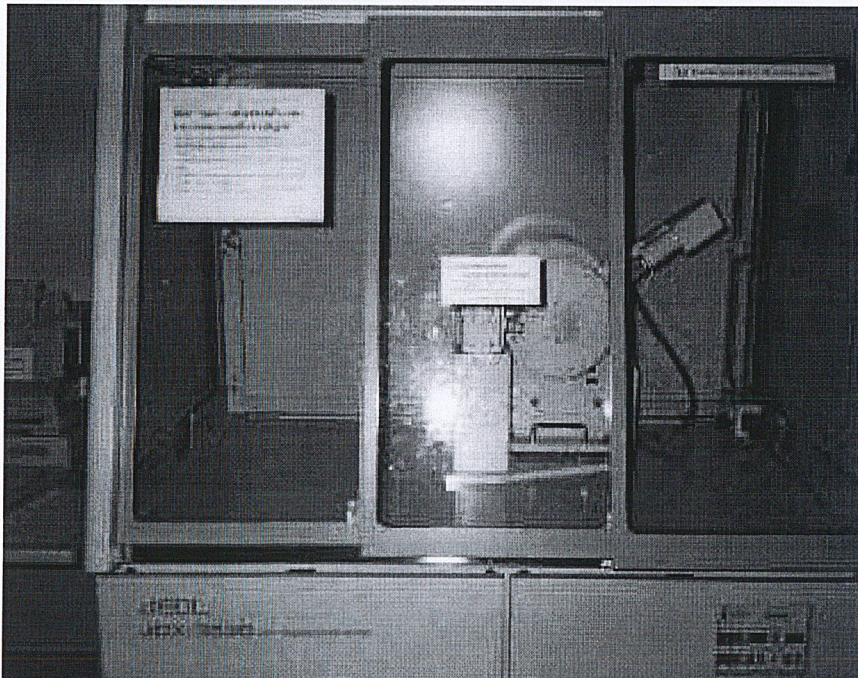
ภาคผนวก ข คุณสมบัติต่างๆ ของเพชรสังเคราะห์

Property	Value	Units
Hardness	10,000	kg mm <sup>-2</sup>
Strength, tensile	>1.2	Gpa
Strength, compressive	>110	Gpa
Sound velocity	18,000	m s <sup>-1</sup>
Density	3.52	g cm <sup>-3</sup>
Young's modulus	1.22	Gpa
Poisson's ratio	0.2	Dimensionless
Thermal expansion coefficient	0.0000011	K <sup>-1</sup>
Thermal conductivity	20.0	W cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Thermal shock parameter	30,000,000	W m <sup>-1</sup>
Debye temperature	2,200	K
Optical index of refraction (at 591 nm)	241	Dimensionless
Optical transmissivity (from nm to far IR)	225	Dimensionless
Loss tangent at 40 Hz	0.0006	Dimensionless
Dielectric constant	5.7	Dimensionless
Dielectric strength	10,000,000	V cm <sup>-1</sup>
Electron mobility	2,200	cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Hole mobility	1,600	cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Electron saturated velocity	27,000,000	cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Hole saturated velocity	10,000,000	cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
On [111] surface Bandgap	5.45	eV
Resistivity	10 <sup>13</sup> - 10 <sup>16</sup>	Ωcm

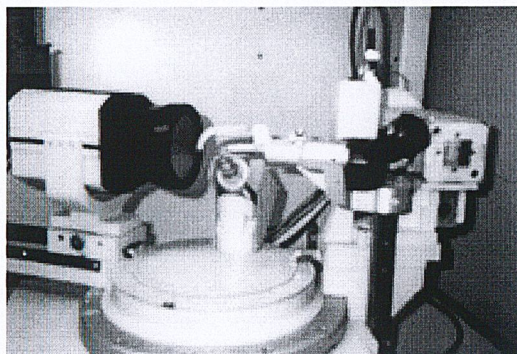
ภาคผนวก ง เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง



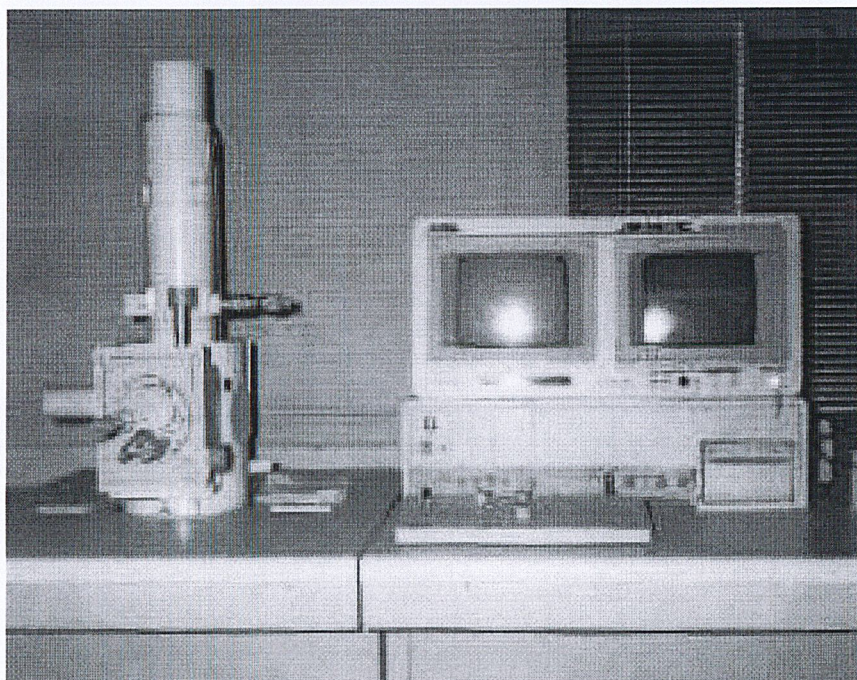
ภาคผนวก ง-1 Raman spectroscope รุ่น system 2000 ของบริษัท Renishaw



ภาคผนวก ง-2 Powder X-ray diffractometer



ภาพผนวก ง-3 Single Crystal X-ray Diffractometer



ภาพผนวก ง-4 เครื่อง Scanning electron microscope ของ JEOL รุ่น JSM-5410