

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

SYNTHESIS OF DIAMOND THIN FILMS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร  
SYNTHESIS OF DIAMOND THIN FILMS



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำนำ

นับตั้งแต่มีการค้นพบสารกึ่งตัวนำเพชรซึ่งอยู่ในรูปแบบหนึ่งของคาร์บอน สามารถนำมาทดแทนสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ ได้นั้นเนื่องจากว่าฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำทั้งสองหลายประการ เช่น มีช่องว่างพลังงานสูงถึง 5.5 อิเล็กตรอน โวลต์ นอกจากนี้ยังมีค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ค่าแรงดันพลังทลายและความนำความร้อนสูง ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำเพชรสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางเพชร เพื่อที่จะเป็นการศึกษาและพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

ผู้จัดทำ

1. นายเจษฎา ชัยย่อง
2. นางสาวจิตริรัตน์ ทองหมี่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

นาย เจษฎา ยิ้มย่อง รหัส 47015202  
นางสาว จุติรัตน์ ทองหมี่ รหัส 47015204  
รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีค่าช่องว่างพลังงานสูงถึง 5.5 eV และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 5.7 ทำให้อุปกรณ์ที่ทำจากฟิล์มบางเพชรสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูงเป็นต้น จึงได้ทำการศึกษาการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมระหว่างแอลกอฮอล์ กับ โบรอนไตรออกไซด์ ทำให้ค่าสภาพคล่องของโฮลในเพชรเป็น 1800 cm<sup>2</sup>/V.s อีกทั้งยังทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็น โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมระหว่าง แอลกอฮอล์ กับ ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ จากนั้นทำการตรวจสอบคุณสมบัติ ของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM และ Raman Spectroscopy รวมทั้งทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของฟิล์มเพชรเช่น ความต้านทาน สภาพต้านทานไฟฟ้า ความนำไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งาน เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับในการศึกษาและค้นคว้าในการทำโครงการงานชิ้นนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้นั้น ต้องขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน ที่ให้ความช่วยเหลือ และแนะนำแนวทางในการปฏิบัติงานและให้คำปรึกษา ต้องขอขอบคุณ พี่บาส และพี่ๆ ในห้อง Supperconductor ที่ช่วยแนะนำและให้คำสั่งสอนในการทดลองทั้งทฤษฎีและปฏิบัติ และช่วยให้กำลังใจในการทำงาน และเพื่อนๆ ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจ ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือให้รายงานนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณในทุกๆสิ่งที่คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยสนับสนุนเงินทุนและคอยให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด และสำหรับกำลังใจที่มีให้ไม่เคยขาด หากผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

นายเจษฎา ยิ้มข่อง

นางสาวฐิติรัตน์ ทองหมี่

## SYNTHESIS OF DIAMOND THIN FILMS

Mr. Jedsada Yimyong ID.47015202

Miss. Thitirat Tongmee ID.47015204

Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongrueng(Sepervisor,  
Educational Year 2006

### Abstract

This report is the study on synthesis of diamond thin film, a Silicon semiconductor that has several characteristic devices and many kind in use such as it has energy gap (5.5ev) and dielectric constant 5.7 .With silicon semiconductor made of diamond thin film can work good in high frequency. The (P-TYPE) use solution between alcohol and  $B_2O_3$  are supply, The (N-TYPE) use solution between alcohol and  $P_2O_5$  then, test by Scanning Electron Microscope (SEM) and Raman Spectroscopie instrument. After that, check the characteristic electrical of diamond thin film such as resistance resistivity and conductivity for useful many application is electronics devices.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
บทที่ 2 โครงสร้างและคุณสมบัติของเพชร	3
2.1 สารกึ่งตัวนำเพชร	3
2.1.1 Graphite	4
2.1.2 Micro Crystalline Carbon	5
2.1.3 Amorphus Carbon	5
2.2 คุณสมบัติทางกล	6
2.2.1 Thermal Conductivity	6
2.2.2 Molar Heat capacity	6
2.2.3 Hard Ness	6
2.2.4 Thermal expansion	6
2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	7
2.4 หลักการของวิธีการ CVD ( Chemical Vapor Deposition )	7
2.4.1 หลักการ CVD แบบความร้อน	8
2.5 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร	9
2.5.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy	9
2.5.2 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Spectroscopy (SEM)	9
2.5.3 วิธีการหาชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีวัดด้วยเข็มร้อน (Hot point probe Measurement)	10
2.6 ลักษณะของแถบพลังงาน	10
2.6.1 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี	10
2.6.1.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.6.1.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ	13
2.7 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	14
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง	20
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง	20
3.1.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิคอน	20
3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร	20
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	22
3.3 กระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อ p-n ที่สร้างจากฟิล์มเพชร	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง	25
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มเพชรด้วยวิธี SEM (Scanning Electron Spectroscopy)	25
4.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร ด้วยวิธี Raman Spectroscopy	26
4.3 การทดสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธีวัดด้วยเข็มร้อน (Hot point probe)	27
4.3.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น	28
4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร	30
4.4 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติรอยต่อระหว่างฐานรองซิลิคอนกับฟิล์มเพชร	31
4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ ไดโอด	33
4.6 ผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติต่างๆของ โฟโตไดโอด	34
4.6.1 ผลการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดในสภาวะมืด	34
4.6.2 ผลการวัดคุณสมบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด	35
4.7 โฟโตไดโอด โครงสร้าง n-diamond/p-diamond	36
4.8 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ โฟโตไดโอด	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	41
กิตติกรรมประกาศ	43
บรรณานุกรม	44

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร	3
รูปที่ 2.2 แสดง Miller index	4
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับแกรไฟต์	5
รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและฟิล์มเพชรชนิดพี ก่อนทำการสัมผัสกัน	11
รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขณะสมดุลความร้อน	11
รูปที่ 2.6 แถบพลังงานแสดง การไหลของกระแสขณะได้รับ โบอิ์ตรง	13
รูปที่ 2.7 แถบพลังงานขณะได้รับ โบอิ์ย้อนกลับ	14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างภาคตัดขวาง	15
รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์ของ โฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	15
รูปที่ 2.10 การเกิดไฟฟ้าแสงใน โฟโตไดโอด	
ก) การให้แรงดันโบอิ์แก่ไดโอด	16
ข) ลักษณะแถบพลังงานของ โฟโตไดโอด	17
รูปที่ 2.11 กราฟคุณสมบัติ I-V ของ โฟโตไดโอดขณะได้รับแรงดันโบอิ์ และ ดูฉายแสงที่ความเข้มค่าต่าง ๆ	18
รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสง ของ ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นที่ทำจาก ซิลิคอน โดยทุกความยาวคลื่นมีพลังงานเท่ากัน	19
รูปที่ 3.1 ผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ก่อนทำการขัดด้วยครีမ်เพชร	21
รูปที่ 3.2 ผิวหน้าฐานรองซิลิคอน หลังทำการขัดด้วยครีမ်เพชร	21
รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD	23
รูปที่ 3.4 ระบบอย่างง่ายของการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD	23
รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM	25
รูปที่ 4.2 Raman Spectroscopy ของฟิล์มเพชร	26
รูปที่ 4.3 แสดงการวัดด้วยวิธี Hot point probe	27
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของ B:C	29
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของ P:C	30
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรกับเวลาในการสร้าง	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของชั้นฟิล์มเพชรกับฐานรองซิลิคอน	32
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน ของไดโอด	33
รูปที่ 4.9 ผลการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ กระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในสภาวะมืด	34
รูปที่ 4.10 การวัดคุณสมบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด	35
รูปที่ 4.11 กราฟกระแสและแรงดันของ โฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 25°C	36
รูปที่ 4.12 กราฟกระแสและแรงดันของ โฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 50°C	37
รูปที่ 4.13 กราฟกระแสและแรงดันของ โฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 75°C	37
รูปที่ 4.14 กราฟกระแสและแรงดันของ โฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 90°C	38
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับอุณหภูมิใช้งานค่าต่างๆ ( $V = -9V$ )	38
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสมืด-อุณหภูมิ ของ โฟโตไดโอดที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ	39

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4.1	ตารางแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิด พี	28
ตารางที่ 4.2	ตารางแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิด เอ็น	29
ตารางที่ 4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร กับเวลาในการสร้าง	30



## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันนี้สารกึ่งตัวนำได้เข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก และสารกึ่งตัวนำก็ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเรียกกันว่า “ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ” การที่ใช้เพชรมาประยุกต์ในการใช้งานโดยใช้พื้นฐานทางด้านกลศาสตร์ควอนตัมเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ โดยสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันทั่วไป คือ ซิลิคอน (Si) แต่สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ยังมีข้อจำกัดทางการใช้งานอยู่บ้าง ยกตัวอย่างเช่น มีข้อจำกัดในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือที่ความถี่สูงทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้นั่นเอง ทำให้มีการศึกษาสารที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันคือในกลุ่ม 4 ในตารางธาตุ และ จากการศึกษาพบว่าคาร์บอนเป็นธาตุที่มีการเรียงตัวได้หลายรูปแบบ เพชรซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนจึงได้ถูกนำมาศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้แทนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ ที่คุณสมบัติทางกายภาพไม่สามารถทำได้เนื่องจากเพชรมีคุณสมบัติทางกายภาพดีกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็น ช่องว่างพลังงานต้องห้าม (Energy Band) ที่สูงถึง 5.5 eV (ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากที่สุดในบรรดาสารกึ่งตัวนำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน) ทำให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม สำหรับการนำมาใช้งาน นอกจากนั้น เพชรยังมีความคล่องตัวของประจุพาหะสูง, แรงดันพังทะลายและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ซึ่งทำให้ทำงานที่ความถี่สูงได้ดี

#### 1.1 ความเป็นมา

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

จนกระทั่งในปี ค.ศ.1797 Smitson Tennant ชาวอังกฤษได้ทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้ อีกต่อมา Sir William Henry Bragg ได้ทดลองใช้ X-ray ศึกษา ก็พบว่าเพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอน นับตั้งแต่นั้นก็ได้มีการศึกษาและสังเคราะห์เพชรจากคาร์บอนรูปแบบอื่นๆ 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  $\text{CCl}_4$  และ  $\text{CBr}_4$  แยกตัวเกิดเพชรบนผลึกเพชร

ค.ศ.1971 August et al. เสนอถึงการใช้อะตอมไฮโดรเจนที่เกิดจากการแตกตัวของไฮโดรเจนทั้งหมดในการกำจัดแกรไฟต์ที่เกิดขึ้นขณะทำการสังเคราะห์

ค.ศ.1973 Proferl et al. เสนอการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดนี้โดยการผสมก๊าซ  $\text{B}_2\text{H}_6$  เข้าไปในก๊าซ  $\text{CH}_4$  ระหว่างการสังเคราะห์

ค.ศ.1974 เริ่มมีการสังเคราะห์เพชรในญี่ปุ่น 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 การทำให้อะตอมไฮโดรเจนแตกตัวบริเวณพื้นผิวที่สร้างโดยฐานรองมีหลายชนิด เช่น Si, SiC, WC, TA,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นต้น

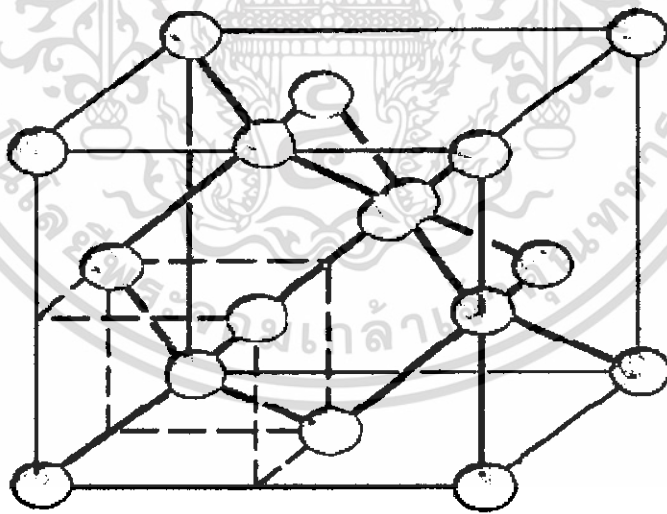
ฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้น เราสามารถตรวจสอบคุณสมบัติของเพชรและลักษณะของพื้นผิวของเพชรได้ด้วย Raman Spectroscopy และ Scanning Electron Microscopy ตามลำดับ มีการนำฟิล์มเพชรนี้มาประยุกต์ใช้งานในด้านอิเล็กทรอนิกส์ ยกตัวอย่างเช่น ซอตต์กิโอไดโอดที่สร้างจากฟิล์มบางเพชรซึ่งอาศัยคุณสมบัติการเรกติไฟเออร์ของรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับฟิล์มเพชรชนิดที่พบว่าในทางปฏิบัติมันจะเกิดปัญหาในส่วนของกระแสรั่วมีค่าสูง หรือ ค่าแรงดันพังทลายมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้ลดประสิทธิภาพของไดโอดนี้เป็นอย่างมากซึ่งจำเป็นต้องพัฒนาไดโอดนี้เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของฉนวนระหว่างซอตต์กิโอไดโอดนี้ จึงอาจเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหานี้ได้จึงเลือกสร้างชั้นฟิล์มเพชรชนิดอินทรินซิกเป็นฉนวนของไดโอดโครงสร้าง MIS นี้

## บทที่ 2

### โครงสร้างและคุณสมบัติของเพชร

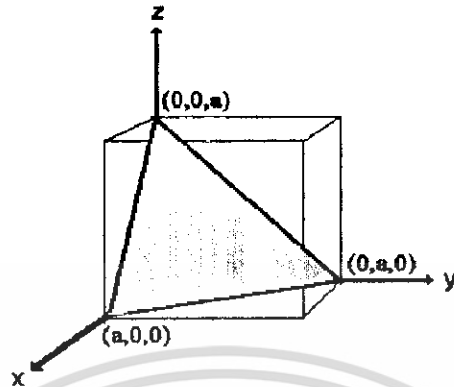
#### 2.1 สารกึ่งตัวนำเพชร

กรณีของเพชรธรรมชาติ อะตอมคาร์บอนจะจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Diamond Structure ภายในยูนิตเซลล์ จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวกันแบบ Face Center Cubic (fcc) และคาร์บอนอะตอมอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง  $\frac{1}{4}$  เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิตเซลล์ คาร์บอนอะตอมจับตัวกันแบบ Tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้ง 4 อะตอมที่อยู่รอบๆ ตัวมันเอง ด้วยพันธะ โคเวเลนต์แบบ  $sp^3$  ในที่สุดจะได้ว่าโครงสร้างนี้อะตอมคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะหกเหลี่ยม โดยที่อะตอมใกล้เคียงกันจะมีการเชื่อมในตำแหน่งสูงค่าสลับกันจากระนาบ หรือ อาจมองว่าวงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุด 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  $1284 \text{ cm}^{-1}$

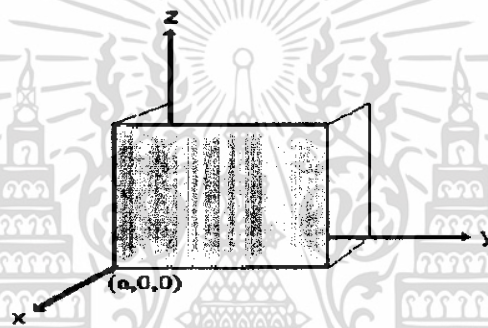


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระนาบ (111)

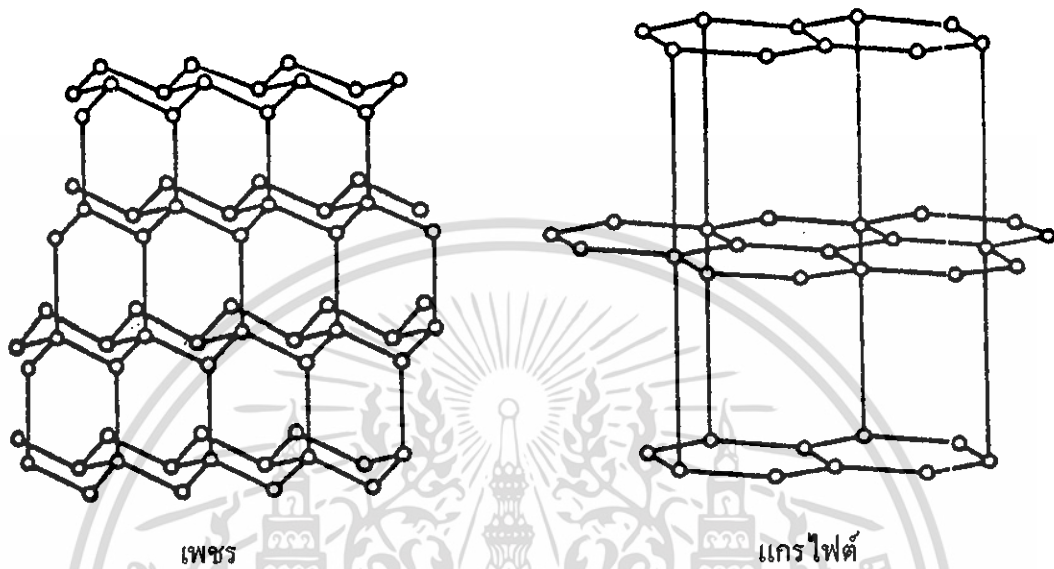


ระนาบ (100)

รูปที่ 2.2 แสดง Miller index

### 2.1.1 Graphite

กราไฟต์เป็นรูปแบบของคาร์บอนที่พบบ่อยมาก ซึ่งอะตอมทั้งหมดจะไม่จับตัว แบบเพชร แต่จะจับกันตามแนวอนบนระนาบ และจับกันด้วยพันธะ  $sp^2$  Hybrid Atomic Orbitals แต่ละระนาบเรียงตัวแบบ ABABAB... ซ้ำๆ กันไป แต่ละระนาบห่างกัน 1.42 อังสตรอม ในขณะที่ค่าคงที่แลตทิซคือ  $6.0707 \text{ \AA}$  การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy ได้  $1,580 \text{ cm}^{-1}$  และยอดลำดับที่สองอยู่ที่  $3,240 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับแกรไฟต์

### 2.1.2 Micro Crystalline Carbon

เป็นเพชรที่มีคุณภาพต่ำ ที่ได้จากการสังเคราะห์ จัดเรียงอะตอมด้วยพันธะ  $sp^2$  ในช่วงแรกแต่มีพันธะ  $sp^3$  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  $1,345\text{ cm}^{-1}$  ถึง ตำแหน่งที่  $1,550\text{ cm}^{-1}$  โดยยอดคลื่นจะเปลี่ยนจากค่า  $1,345\text{ cm}^{-1}$  เป็นค่า  $1,550\text{ cm}^{-1}$  เมื่อเนื้อสารเกิดการ Hydrogenated ที่ตำแหน่งยอดคลื่น  $1,550\text{ cm}^{-1}$  นี้สารจะถูกเรียกว่าเป็น “Diamond – like carbon” (DLCC) ส่วน Amorphus Carbon ที่มีพันธะเป็นแบบ จะมีตำแหน่งของยอดคลื่นประมาณ  $1,140\text{ cm}^{-1}$  มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Small size cubic diamond”

## 2.2 คุณสมบัติทางกล

เพชรจะมีโครงสร้าง ที่ประกอบด้วยพันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเพชรจึงมีคุณสมบัติทางกลหลายๆ อย่างที่พิเศษกว่าวัสดุอื่นๆ ตัวอย่างเช่น เพชรจะมีความแข็ง, Molar density และ Thermal conductivity สูง อีกทั้งเพชรยังมีค่าความยืดหยุ่นและ Bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น ตลอดจนมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสูงมาก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.2.1 Thermal Conductivity

เพชรมีค่า Thermal conductivity สูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด ซึ่งมีค่าสูงถึง 20 Watts/cm.K ค่าความนำความร้อนนี้จะมีค่าลดลงเมื่อมีโมโนโครเจนจำนวนมากและหากผลึกเป็นแบบผลึกรวม (Polycrystalline) ที่ได้จากการสร้างที่มีคุณภาพดี พบว่าค่าความนำความร้อนในทิศทางของการปลูกผลึก มีค่าเป็น 55% ของผลึกเดี่ยว ส่วนในระนาบของการปลูกผลึก ความนำความร้อนของผลึกเดี่ยวจะมีค่ามากกว่า 25% แต่ส่วนมากแล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก

### 2.2.2 Molar Heat capacity

หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำอุณหภูมิหน้าหนักของโมเลกุลของวัสดุ  $1\text{ cm}^3$  มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นพบว่าเพชรมีค่า Molar Heat Capacity น้อย นั่นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ ดีเท่ากับ Heat Sink

### 2.2.3 Hard Ness

เพชรเป็นสารที่มีความแข็งแรงที่สุด ในบรรดาทั้งหมดที่เรารู้จักโดยมีค่าความแข็งสูงถึง  $5,700 - 10,400 \text{ Kg/mm}^2$  อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามสร้างสารประกอบ  $\text{C}_3\text{N}_4$  (Carbon Nitride) เชื่อว่าเป็นสารที่มีความแข็งมากกว่าเพชร

### 2.2.4 Thermal expansion

เป็นค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ แพร่ไปถึงเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ  $0^\circ\text{C}$  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

## 2.3 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 ซึ่งวัสดุอื่นๆ จะมีความเร็วอิเล็กตรอนของ Hole ต่ำ

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

กรณีของฟอสฟอรัสจะมีขนาดของอะตอมที่ใหญ่กว่าคาร์บอน ดังนั้น เมื่อเป็นสารเจือในเพชรแล้วจะทำให้ลักษณะ โครงสร้างของผลึกผิดรูปไป และในการทดลองสังเคราะห์โดยใช้ฟอสฟอรัสจะมีปัญหาเกี่ยวกับการที่ไม่สามารถควบคุมความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ จึงยังไม่มี การนำเสนอเกี่ยวกับฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขึ้น

## 2.4 หลักการของวิธีการ CVD ( Chemical Vapor Deposition )

การสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำ มีเทคนิคเกิดขึ้นมากมายในการสร้างเพชรที่ความดันต่ำ สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักๆ เช่น

1. Thermal Enhanced CVD Methode
2. Plasma- Enhanced CVD Methode
3. Combustion Flame-Assisted CVD

โดยแต่ละวิธีของการสังเคราะห์ ก็มีจะค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันไป เช่นอุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง, อุณหภูมิของฐานรอง, อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร แต่เทคนิคการสร้างไม่ว่าจะทำด้วยวิธีใดทำยที่สุดแล้วฟิล์มเพชรที่สร้างจากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะของฟิล์ม และสเปกตรัมของ Raman มีลักษณะคล้ายกัน ก็เป็นสิ่งยืนยันได้ว่า แม้จะใช้เทคนิคต่างกันแต่ผลที่ได้ก็คือ ฟิล์มเพชรเหมือนกัน และในปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ขอกกล่าวถึงเฉพาะการสังเคราะห์แบบ Thermal Enhanced CVD Methods

### 2.4.1 หลักการ CVD แบบความร้อน

ในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรแม้ว่าแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตามจะมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

1. ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่ เนื่องจากการเกิดของเพชรจากอนุภาคคาร์บอน ในบรรยากาศที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเพชรจะมีความเสถียรภาพในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราฟไฟต์ สามารถอธิบายได้ดังนี้คือในโครงสร้างเพชรถ้าหากมีอะตอมคาร์บอนข้างเคียงสองอะตอมถูกแทนที่ด้วยอะตอมไฮโดรเจนจะพบว่าพันธะ  $sp^3$  ยังคงมีอยู่ อาจกล่าวโดยสรุปว่าอะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราฟไฟต์หรือลดการเกิดกราฟไฟต์ขึ้น

2. ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอนไม่ว่าจะกระตุ้นด้วยความร้อนพลาสมา หรือ Combustion เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมา โดยอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ ฐานรอง แรงที่ใช้ส่งอะตอมคาร์บอน จะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่บริเวณของก๊าซเฟสถูกกระตุ้นกับพื้นผิวฐานรอง หรืออาจใช้การเป่าก๊าซเฟสไปยังฐานรองรวมถึงการใช้สนามไฟฟ้าในการช่วยการส่งผ่าน

3. อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม เพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองที่มีอุณหภูมิตั้งแต่  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $12,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าหากอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงหรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจจะทำให้เกิดกราฟไฟต์หรือ Diamond-like carbon (DLC) ได้

4. ต้องทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวเคลียสขึ้น ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง ซึ่งกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่ใช้มีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังรวมถึงฐานรองที่ใช้ ซึ่งการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำนั้นมีอยู่หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งวิธีการ Assisted Thermal CVD เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่ามีความปลอดภัยสูง อุปกรณ์มีราคาถูก มีกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากมาก และฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดีมาก แต่ก็มีปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานของไส้หลอดทั้งสแตนเลสเนื่องจากการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดเป็นเวลานาน ทำให้ไส้หลอดเปราะและผิวดรูปได้ง่าย

## 2.5 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

หลังจากสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแล้ว จำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มสังเคราะห์ที่ได้เพื่อยืนยันว่า ฟิล์มที่จะนำไปใช้ต่อไปเป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมตามเงื่อนไข โดยจะวิเคราะห์ฟิล์มเพชรสองวิธี คือ Raman Spectroscopy และวิธี Scanning Electron Spectroscopy

### 2.5.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

เป็นวิธีการตรวจสอบทางเคมี และ ฟิสิกส์ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงโดยทำการวัดการลดลงของความเข้มลำแสงที่ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน (non-absorbing medium) ผลของ Raman นี้เป็นการกระเจิงในระดับโมเลกุล นั่นคือ การกระเจิงของแสงนี้เกิดขึ้นจากโฟตอนของลำแสงกับการสั่นภายในแลตทิซหรือโฟนอน ดังนั้น Raman Spectroscopy เป็นวิธีที่นิยมนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ Raman สูง ดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่างๆ ของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร แกรไฟต์ และคาร์บอน อะมอร์ฟัส เป็นต้น โดยค่าสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติมียอดอยู่ที่  $1332\text{cm}^{-1}$  ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรใกล้เคียงธรรมชาติ และบริสุทธิ์มาก แต่มีกราฟไฟต์และคาร์บอนอะมอร์ฟัสปะปนอยู่ และ ข้อดีของวิธีนี้คือ เป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง

### 2.5.2 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Spectroscopy (SEM)

ในการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ หรือแม้กระทั่งความหนาของฟิล์มเพชรก็ตาม เราสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธี SEM ซึ่งสามารถบอกได้ถึงระนาบของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ และสามารถตรวจสอบได้ถึงระดับที่เล็กกว่าไมครอน โดยทำการโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปยังพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบแล้วทำการตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (secondary electron) ที่หลุดผ่านออกมาจากพื้นผิว โดยที่ความสว่างหรือความเข้มของการส่งผ่านอิเล็กตรอนอันดับสองออกมานั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวที่ทำการวัดนั้นๆ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะถูกขยายไปแสดงภาพที่จอมอนิเตอร์ และความละเอียดของภาพที่ได้กำหนดได้โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งสามารถโฟกัสได้รายละเอียดถึงเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 10-20 นาโนเมตรเท่านั้น

### 2.5.3 วิธีการหาชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีวัดด้วยเข็มร้อน

#### (Hot point probe Measurement)

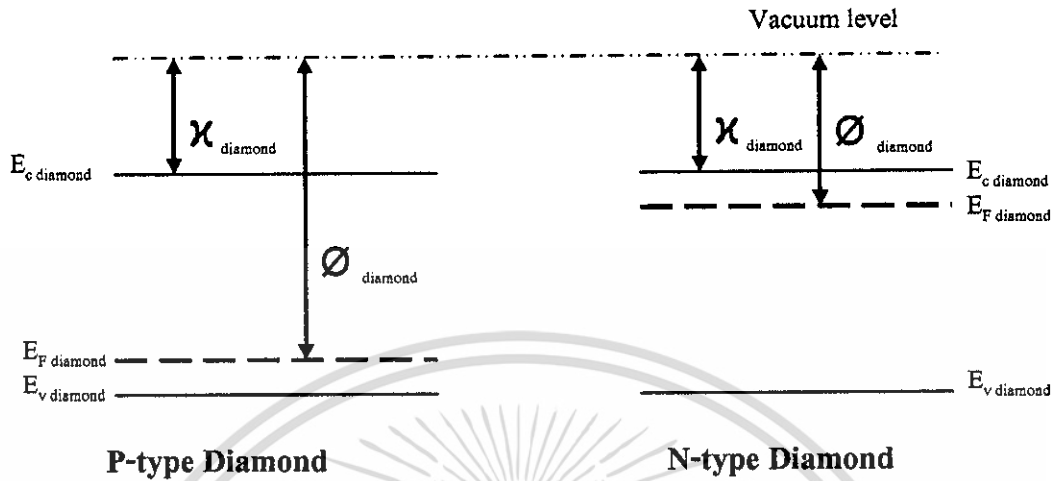
วิธีนี้เป็นวิธีที่ สะดวก และประหยัด อุปกรณ์นี้จะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ทำด้วย โลหะแล้วมีปลายแหลมซึ่งเรียกว่า โพรบ(probe) โดยเข็มด้านหนึ่งเป็นเข็มเย็น(cold probe) โดยมี อุณหภูมิที่เท่ากับอุณหภูมิห้อง และอีกด้านหนึ่งเป็นเข็มร้อน( hot probe) โดยจะทำให้ร้อนด้วย ขดลวดไฟฟ้า และ โพรบทั้งสองจะถูกต่อเข้ากับกัลวานอมิเตอร์ การวัดจะเริ่มจากการทำให้เข็มร้อน มีอุณหภูมิสูงกว่าอีกเข็มหนึ่งแล้วนำปลายของเข็มทั้งสองจี้ลงไปบนแผ่นผลึกตัวนำ โดยให้ปลายทั้งสองอยู่ห่างกันพอสมควรแล้วสังเกตดูการกระดิกของเข็มแสดงการไหลของกระแสในกัลวานอมิเตอร์ว่ากระดิกไปทางใด

ในกรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่ปลายเข็มร้อนจะทำให้เกิด โฮลอิสระขึ้นแล้วโฮลเหล่านี้ จะมีพลังงานสูงกว่าที่บริเวณเข็มเย็นทำให้มีการแพร่เกิดขึ้นจากเข็มร้อนไปยังเข็มเย็นทำให้บริเวณ เข็มร้อนมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนเข็มเย็นมีศักย์เป็นบวกดังนั้นกระแสสุทธิจึงไหลออกจากเข็มเย็น ผ่านมิเตอร์ไปยังเข็มร้อน เข็มของกัลวานอมิเตอร์จึงกระดิกไปทางเข็มร้อนสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็นจะส่งผลที่ตรงกันข้ามเพราะที่เข็มร้อนจะเกิดอิเล็กตรอนอิสระแพร่ไปยังเข็มเย็นจึงทำให้เกิด กระแสในทิศทางตรงกันข้ามและทำให้เข็มของกัลวานอมิเตอร์กระดิกไปทางเข็มเย็น

## 2.6 ลักษณะของแถบพลังงาน

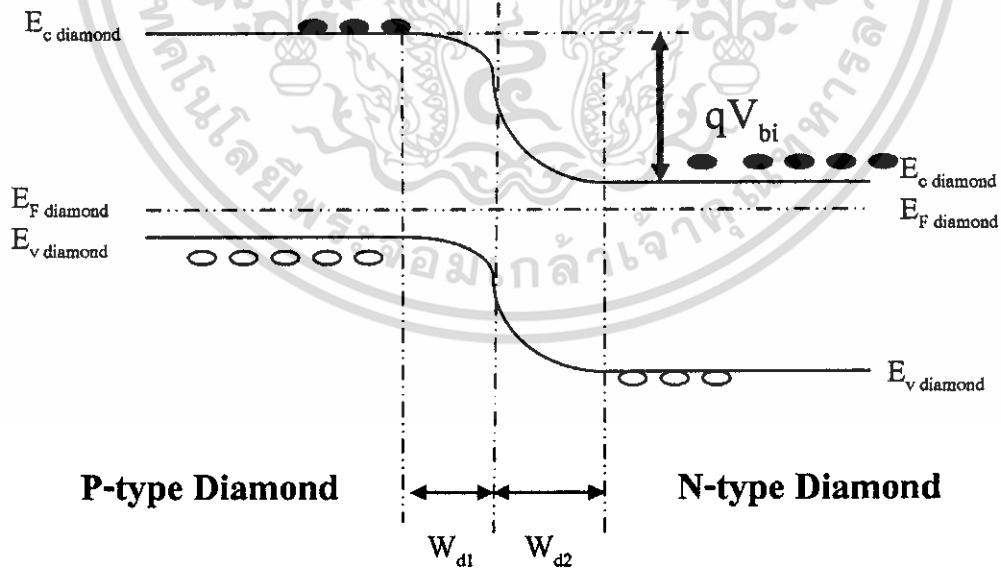
### 2.6.1 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี

จากการศึกษาการทำงานของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ ก็มีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึง ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาสร้างเป็นรอยสัมผัสสนั่น ซึ่งในรายงานจะสร้าง รอยสัมผัสจากฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและชนิดพี โดยลักษณะของแถบพลังงานก่อนที่จะสัมผัสกันจะมี ลักษณะแสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและฟิล์มเพชรชนิดพี ก่อนทำการสัมผัสกัน

เมื่อสาร 2 ชนิดนี้ต่อกัน อิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดการแพร่ไปสู่ด้านพีและด้านเอ็นจนกระทั่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองมีระดับเท่ากัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขณะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 สามารถรู้ว่า barrier height ค่ากำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจะมีค่าเท่ากับ  $V_{bi}$

โดยที่  $V_{bi} = V_{d1} + V_{d2}$

$V_{d1}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$V_{d2}$  คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

และค่าของ  $V_{d1}$  และ  $V_{d2}$  สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{d1} = 1/q(E_i - E_{F,p-side})$$

$$V_{d2} = 1/q(E_{F,n-side} - E_i)$$

และค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะ(depletion width) ของแต่ละด้านสารกึ่งตัวนำที่หาได้จากสมการ poisson มีค่าตามตารางดังนี้

$$w_p = w_{d1} = \sqrt{\frac{2\epsilon N_D V_{bi}}{q N_A (N_A + N_D)}}$$

$$w_p = w_{d2} = \sqrt{\frac{2\epsilon N_A V_{bi}}{q N_D (N_A + N_D)}}$$

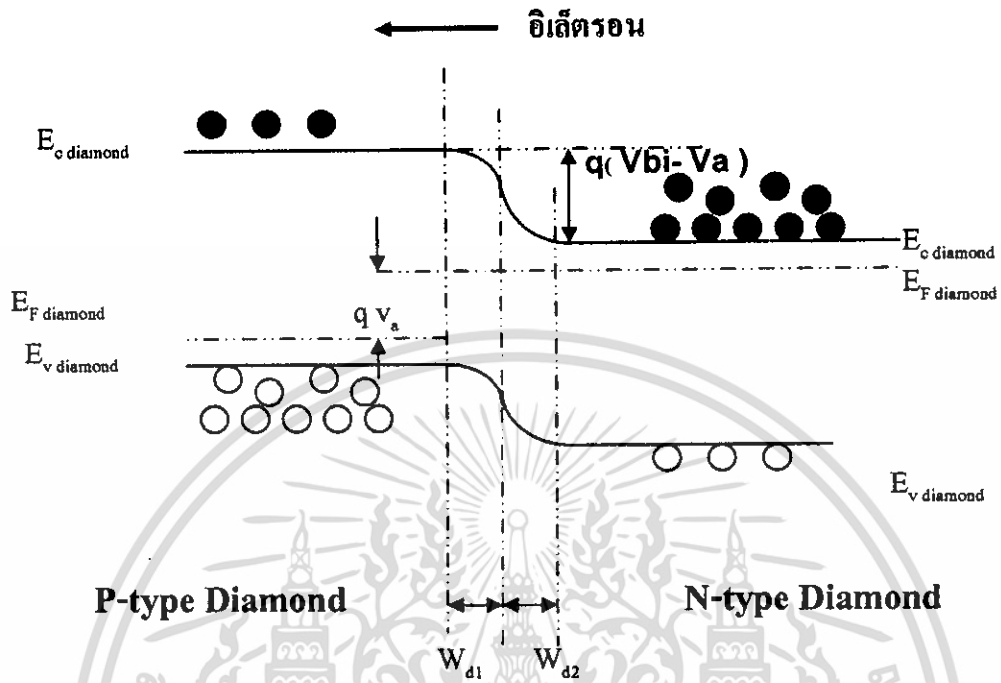
โดยที่ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(dielectric constant)ของสารกึ่งตัวนำเพชร

$N_A$  และ  $N_D$  คือความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็น

### 2.6.1.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า

ในสภาวะสมดุลความร้อนจะไม่มีกระแสเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด แต่เมื่อเราให้ไบอัสไปข้างหน้ากับรอยต่อนี้ สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนี้จะมีค่าลดลงเมื่อเราสมมุติให้ระดับพลังงานด้านเอ็นคงที่ดังนั้นระดับพลังงานด้านพีจะมีระดับพลังงานลดลงเท่ากับ  $qV_a$  การไหลของกระแสแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยโฮลจะไหลจากแถบวาเลนซ์ด้านฟิล์มเพชรชนิดพีไปยังแถบวาเลนซ์ด้านฟิล์มชนิดเอ็น เมื่อให้การไบอัสน้อยกว่าแรงดันขั้วเริ่มช่วง Forward ( $V_F$ ) กระแสจะไหลได้น้อยเนื่องจากมีศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะยังมีค่าสูงอยู่ แต่เมื่อให้ไบอัสมีค่าสูงกว่า  $V_F$  จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะมีค่าลดลง โฮลจึงสามารถไหลไปยังด้านเพชรชนิดเอ็นได้

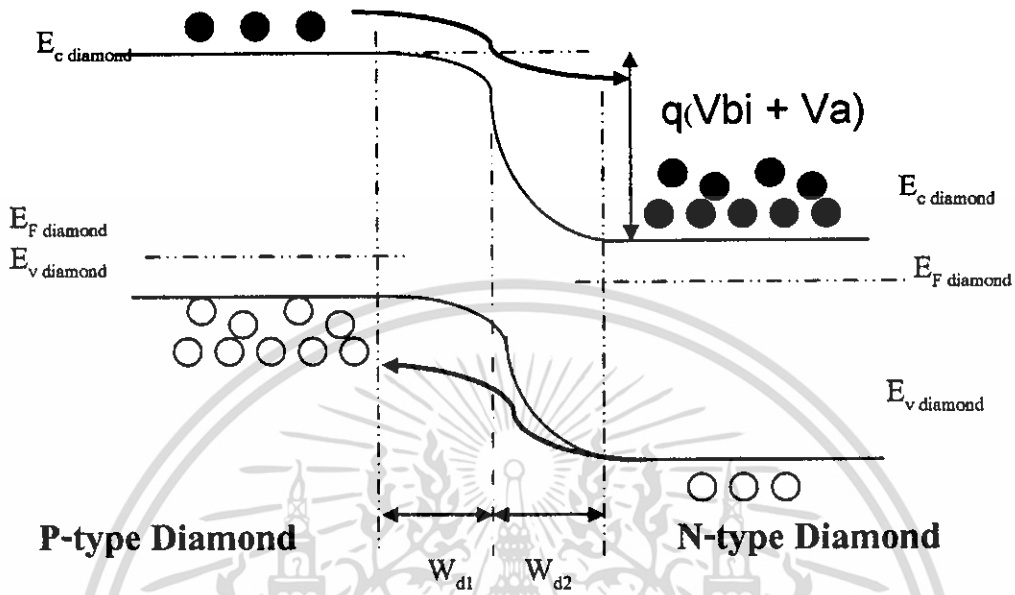
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแส ขณะได้รับไบอัสตรง

2.6.1.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าน้อยๆ ซึ่งน้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มช่วง Reverse ( $V_R$ ) อิเล็กตรอนจากฟิล์มเพชรชนิดพีจะไหลมายังด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็น โสไลต์จากด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็นจะไหลมายังฟิล์มเพชรชนิดพีซึ่งกระแสยังคงไหลน้อยเนื่องจากเกิดจากการไหลของประจุพาหะจำนวนน้อย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7



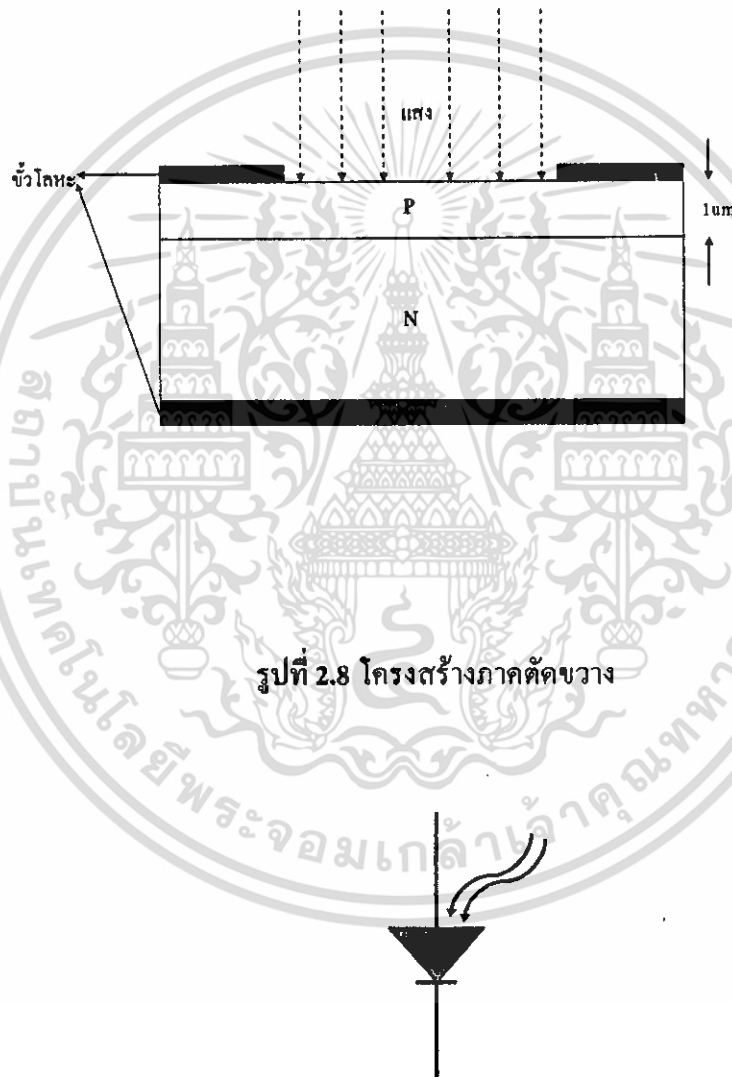
รูปที่ 2.7 แถบพลังงานขณะได้รับ โปสิชั่นกลับ

### 2.7 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

โฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น คือ ไดโอดรอยต่อพีเอ็นทั่ว ๆ ไป แต่จะต้องทำงานเกี่ยวกับแสง ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปชั้นพีที่มีขนาดบางมาก(1um) เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือเข้าไปในฐานรองซึ่งเป็นฐานรองชนิดเอ็น และ สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอดแสดงในรูป ในขณะที่ไดโอดถูกนำไปใช้งานจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยเมื่อยังไม่ได้รับการฉายแสงใดๆ จะมี กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Saturation reverse current :  $I_R$ ) ไหลผ่าน โฟโตไดโอดซึ่งกระแสที่ไหลในขณะนี้มีค่าน้อยมาก และเป็นค่ากระแสคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับค่าแรงดันไบอัส ดังนั้นจะได้ว่า ขณะที่โฟโตไดโอดไม่ได้รับแสง

$$I = I_{dark} = -I_R$$

ต่อมาเมื่อได้รับแสง โฟตอนในลำแสงหรือรังสี ( $E_{\text{photon}} = h\nu$ ) ที่มีพลังงานสูงกว่า ขนาดของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้มีการดูดกลืนโฟตอนในสารกึ่งตัวนำและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งถูกเรียกว่า อิเล็กตรอนแสง (Photo electron) และ โฟตอนแสง (Photo hole)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภาคตัดขวาง

รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์ของ โฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

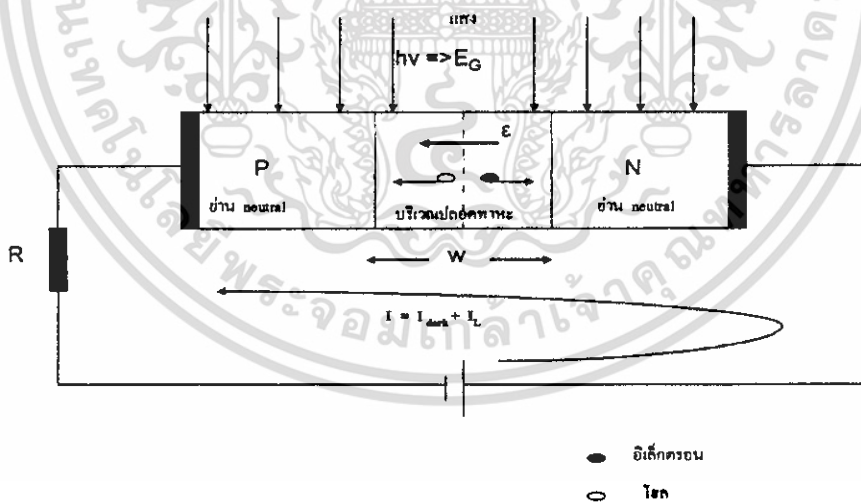
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากที่ย่านส่วนเนื้อสาร (Bulk) ของสารกึ่งตัวนำเป็นบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้า คู่อิเล็กตรอน-โฮลจึงเกิดการรวมตัวกันเอง (Recombination) โดยไม่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าใด ๆ แต่โฟตรอนในลำแสงที่กระทบเข้าไปในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นสนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะจะผลักให้อิเล็กตรอนและโฮล เครื่องที่ออกจากบริเวณนี้อย่างรวดเร็ว โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็นและโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังด้านพีแสดงดังในลักษณะดังรูปที่ 2.9 ดังนั้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแสง(Photo current : $I_L$ ) โหลดในวงจรเห็นได้ว่ากระแสแสงมีทิศทางเดียวกับกระแส  $I_{dark}$  แต่จะมีทิศตรงข้ามกับกระแสแรงดันไบอัสตรง ดังนั้นจะได้ว่าขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ได้รับแสง กระแสที่ไหลผ่านไดโอดคือ

$$I = I_{dark} + I_L \quad \dots(2)$$

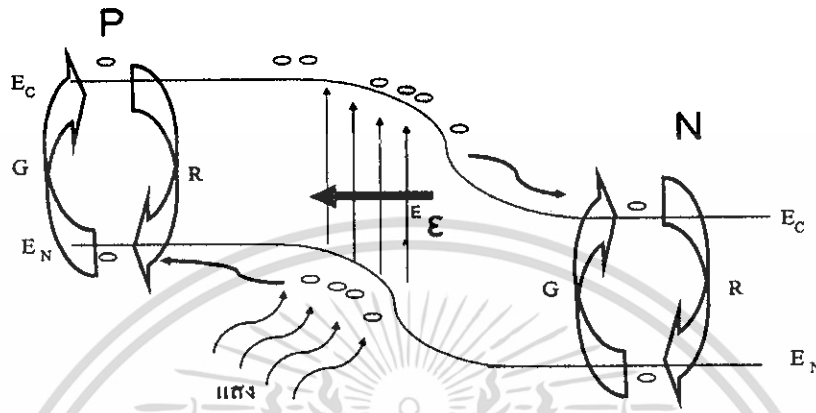
โดยที่  $I_{dark}$  คือ กระแสขณะมืด (ไม่ได้รับแสง)

$I_L$  คือ กระแสแสง



รูปที่ 2.10 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด (ก) การให้แรงดันไบอัสแก่ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด (ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอด

สมการกระแสแสงของไดโอดแสดงได้โดย

$$I_L = -q A (L_n + W + L_p) G_L \dots(3)$$

เครื่องหมายลบในสมการที่ 3 แสดงทิศทางของการไหลของกระแส

A คือ พื้นที่หน้าตัดของไดโอด

W คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

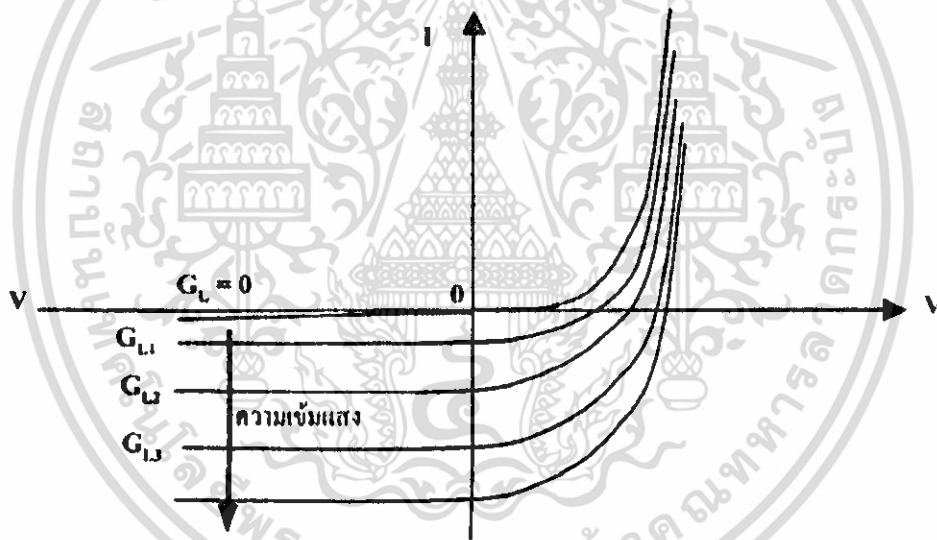
$L_n$  และ  $L_p$  คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล

$G_L$  คือ อัตราการเกิดพาหะเนื่องแสง  $= \frac{\delta n}{\tau} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$

อัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง ( $G_L$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น กระแสแสงจึงมีค่าเพิ่มขึ้นกับความเข้มแสงและมีค่าคงที่ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง ๆ โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับค่าแรงดันไบอัส

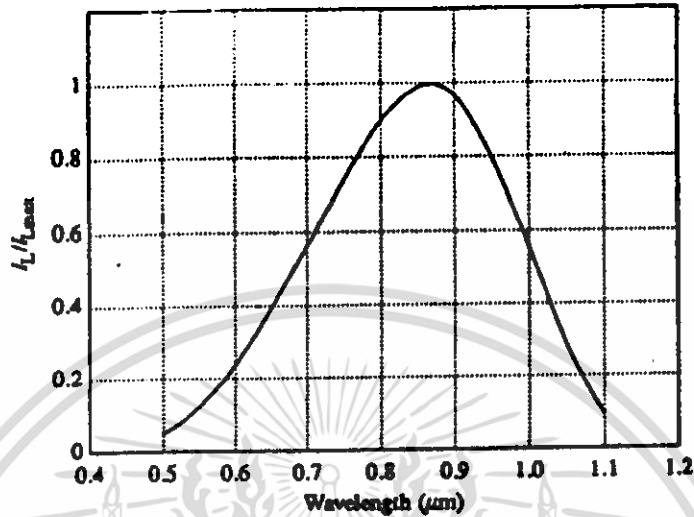
กรณีที่ไดโอดถูกฉายแสงขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงจะมีกระแสไบอัสตรงเกิดขึ้นและไหลในทิศตรงข้ามกับกระแสแสง ทำให้กระแสรวมมีค่าลดลงจากเดิม กราฟคุณสมบัติ กระแส และแรงดัน ของโฟโตไดโอด ขณะได้รับไบอัส และถูกฉายแสงที่ความเข้มค่า ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของโฟโตไดโอดก็คือ ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสง (Spectral response) หมายถึงคุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืนรังสีที่มีความถี่ต่าง ๆ ความถี่ที่ต่างกันของรังสีทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ความถี่ของรังสีค่าหนึ่ง ทำให้ได้กระแสแสงเป็นค่าสูงสุดคือ  $I_{L(max)}$  และที่ความถี่  $f$  หรือความยาวคลื่น  $\lambda$  ไค ๆ กระแสแสงคือ  $I_{L(\lambda)}$  ที่ความเข้มแสงที่เท่ากัน อัตราส่วนระหว่าง  $I_{L(\lambda)}$  กับ  $I_{L(max)}$  ถูกนิยามว่าเป็น “ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสง (Spectral response ของไดโอด)” ตัวอย่างของกราฟผลตอบสนองต่อความถี่ของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ที่สร้างจากซิลิคอน ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.11 กราฟคุณสมบัติ I-V ของโฟโตไดโอดขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและถูกฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

โฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุที่ต่างกัน จะมีลักษณะกราฟสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกัน แต่ต่างกันที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) เนื่องจาก  $\lambda_{max} = 1.24 / E_G$  ( $\mu m$ ) ในกรณีซิลิคอน  $E_G = 1.12$  eV ดังนั้นที่  $300 K$   $\lambda_{max} = 1.1 \mu m$  ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสง ของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นที่ทำจากซิลิคอน โดยทุกความยาวคลื่นมีพลังงานเท่ากัน

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งก็คือ อัตราเร็วในการทำงาน เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง หรือ เรียกว่า การตอบสนองของสัญญาณแสง ซึ่งคุณสมบัตินี้ของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นจะมีความสามารถที่จำกัด เนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสการแพร่ ดังนั้นความไวต่อการตอบสนองของสัญญาณแสงความถี่สูงจึงช้า เมื่อเทียบกับโฟโตไดโอดแบบอื่นๆ

### บทที่ 3

#### กระบวนการสร้างและการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อ p-n ที่สร้างจากฟิล์มเพชร โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ กระบวนการเตรียมฐานรอง และ กระบวนการสร้างไดโอดโครงสร้างแบบรอยต่อ p-n

#### 3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การทดลองนี้ เลือกใช้ซิลิคอน เป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ซิลิคอนชนิดพีระนาบ (111) ก่อนที่จะนำฐานรองซิลิคอนนี้ไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องทำความสะอาดเบื้องต้นและเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ดังนี้

##### 3.1.1 การทำความสะอาดเบื้องต้นผิวหน้าฐานรองซิลิคอน

1. กำจัดฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกบนผิวหน้าซิลิคอน ในน้ำ DI (Deionized Water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaning) แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง
2. กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene)
3. ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วย อะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

##### 3.1.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

หลังจากทำความสะอาดฐานรองซิลิคอนครบทุกขั้นตอนตามหัวข้อ 3.1.1 แล้วจะทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ก่อนนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เพื่อเป็นการกระตุ้นฐานรองให้มีความหนาแน่นของการนิวเคลียสเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรเร็วขึ้น [3-2-1] โดยในการทดลองนี้เลือกใช้การขัดด้วยครีมเพชรเป็นการเตรียมผิวหน้าฐานรอง ครีมเพชรที่ใช้ขัดมีขนาดของเม็ดผลึก 1 ไมครอน ใช้เวลาขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมงหลังจากนั้นทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนอีกครั้งเพื่อล้างครีมเพชรออกด้วยวิธีดังต่อไปนี้

1. กำจัดฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกบนผิวหน้าซิลิคอน ในน้ำ DI ( Deionized Water ) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง ( Ultrasonic Cleaning ) แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง
2. กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน ( Trichloroethylene )

3. ล้างสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนออกด้วย อะซีโตน ( Acetone ) ในเครื่องต้นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4. ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI และ เป่าแห้ง



รูปที่ 3.1 ผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ก่อนทำการขัดด้วยครีมเพชร

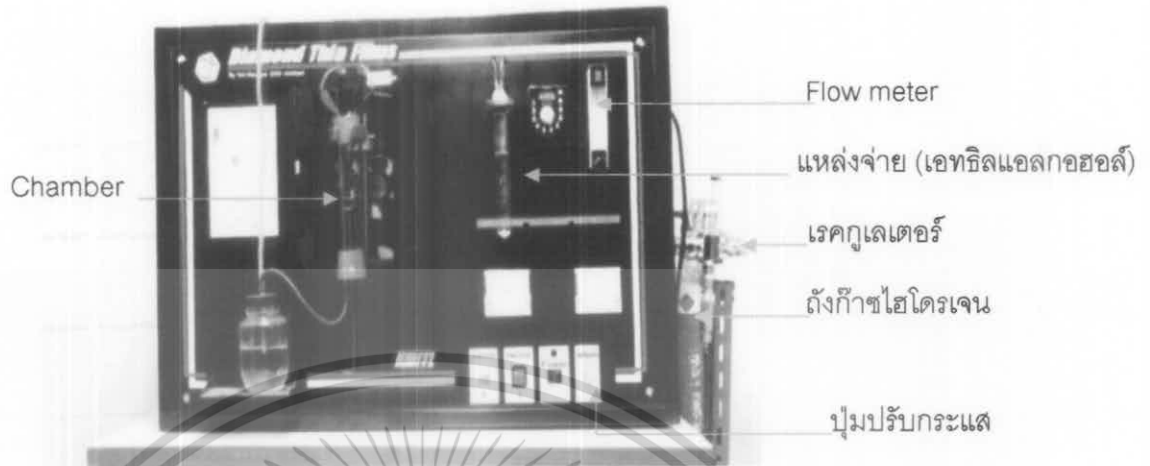
รูปที่ 3.2 ผิวหน้าฐานรองซิลิคอน หลังทำการขัดด้วยครีมเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

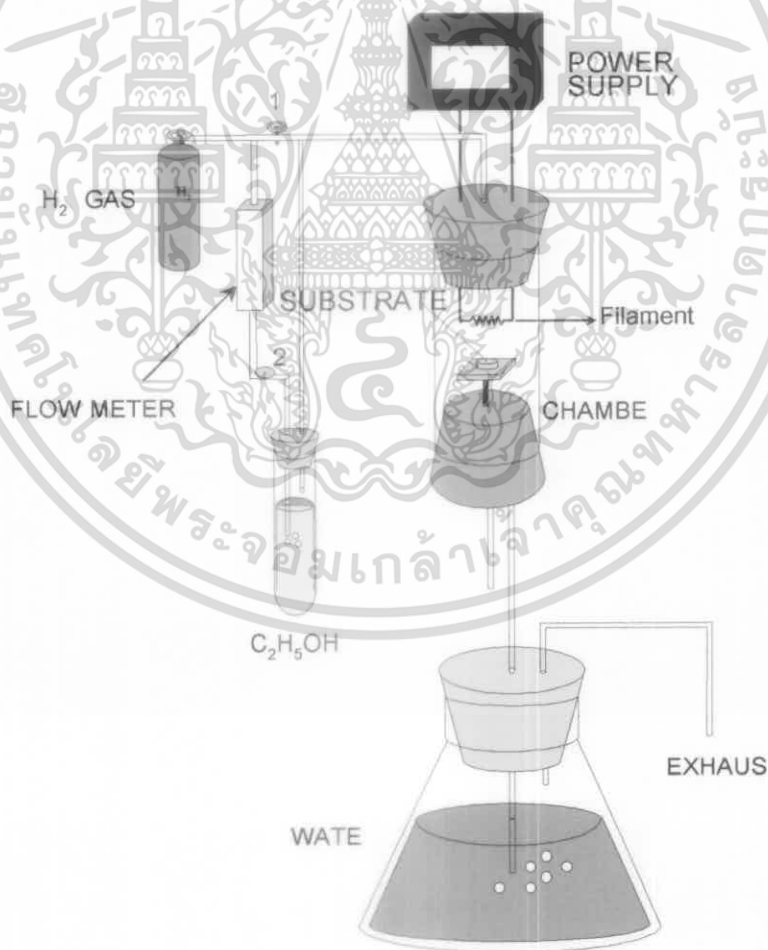
### 3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

จะใช้วิธี CVD แบบ Hot-Filament (HFCVD) ด้วยชุดเครื่องมือในรูปที่ 3.1 โดยจะมีไดอะแกรมของระบบ CVD ที่ใช้แบบคร่าวๆ ดังในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรดังต่อไปนี้

1. เปิดถังก๊าซแล้วปรับ Flow meter ไว้ที่ 50 sccm
2. เปิดวาล์ว 1 เพื่อทำการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนจากถังผ่านวาล์ว 1 เข้าไปใน Chamber เพื่อให้บรรยากาศภายใน Chamber เป็นไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว ใช้เวลาในการไล่บรรยากาศ 10 นาที
3. ปิดวาล์ว 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านแหล่งจ่ายเป็นตัวพาไอระเหยอัลกอกซอลล์เข้า Chamber ด้วยอัตราการไหลคงที่ควบคุม โดย Flow meter
4. ค่อยๆ ง่ายกระแสบ่อยๆ ให้กับไส้หลอดทั้งสแตนด์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ  $2000^{\circ}\text{C}$
5. แล้วทำการปรับระยะห่างระหว่างฐานรองซิลิคอนกับไส้หลอดทั้งสแตนด์ให้ได้ระยะที่เหมาะสม
6. ทำการสร้างฟิล์มเพชรตามเวลาที่ต้องการ
7. ขณะทำการสร้างควรดูชิ้นงานอยู่เสมอเพราะระยะห่างของฐานรองกับไส้หลอดที่ปรับไว้อาจจะโก่งเกินไปทำให้แผ่นซิลิคอนไหม้ได้
8. เมื่อครบเวลาที่ต้องการสร้างแล้ว ทำการดึงชิ้นงานลงให้ฐานรองซิลิคอนห่างจากไส้หลอดมากๆ และก็ลดกระแสลงเรื่อยๆ จนมีค่าเป็นศูนย์แอมป์
9. ปิดถังก๊าซไฮโดรเจน และ ทำการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออกจากระบบทั้งหมด
10. นำชิ้นงานออก แล้วนำไปสู่ขบวนการต่อไป



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD



รูปที่ 3.4 ระบบอย่างง่ายของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 กระบวนการสร้างไดโอดแบบรอยต่อ p-n ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

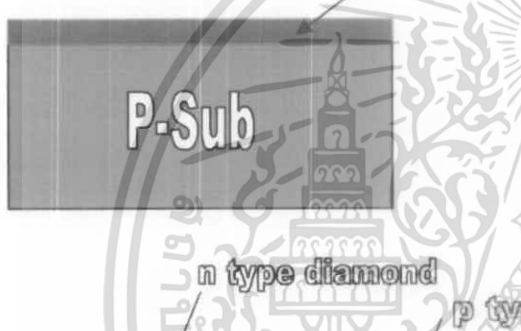
การทดลองนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดแบบรอยต่อ p-n มีลำดับขั้นตอนขบวนการสร้างดังนี้

1.



นำแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพีระนาบ (111) มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อ 3.1.1

2.



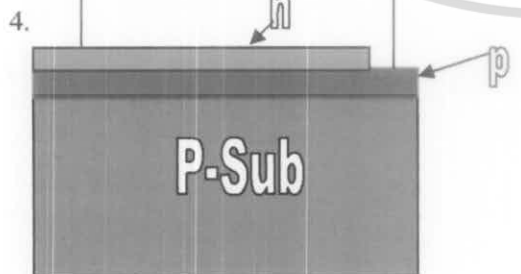
ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี ด้วยวิธีการตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอททิลอัลกอกออลด์กับ โบรอน ไตรออกไซด์ โดยอัตราส่วน B:C 1000 ppm

3.



ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นทับลงบนฟิล์มเพชรชนิดพีที่ถูกสร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ โดยวิธีการตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอททิลอัลกอกออลด์กับฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ โดยใช้ อัตราส่วน P:C 500 ppm

4.



ทำการสร้างขั้วโลหะ เพื่อ ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้กาวเงิน(Silver Paste)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรหลังจากการสังเคราะห์เพชรนั้น จะใช้เทคนิคในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชรมี 2 วิธีดังนี้

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

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

SEM เป็นการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ หรือ แม้กระทั่งความหนาของฟิล์มเพชรก็ตาม สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีนี้ และ ยังบอกขนาดของฟิล์มได้อีกด้วยโดย SEM สามารถตรวจสอบได้ถึงระดับที่เล็กกว่าไมครอน

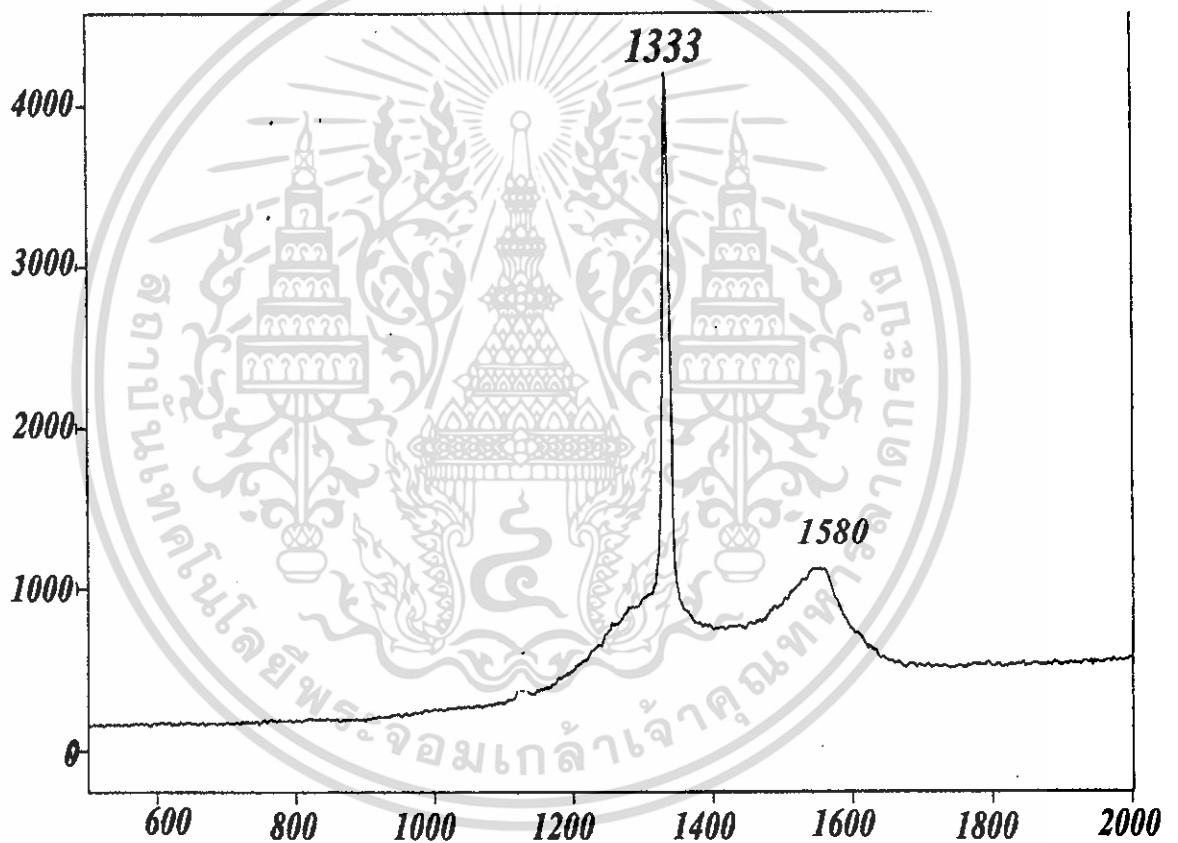


รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร ด้วยวิธี Raman Spectroscopy

เป็นวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และ ฟิสิกส์ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสง และ วิธีนี้ก็เป็นที่ยอมรับใช้ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ Raman สูง ดังนั้นจึงแยกประเภทต่างๆ ของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร กราไฟต์ เป็นต้น และ วิธีการนี้มีข้อดีตรงที่ไม่ทำให้ชิ้นงานหรือฟิล์มเพชรที่ตรวจสอบเสียหาย



รูปที่ 4.2 Raman Spectroscopy ของฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟสเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง  $1333\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งยอดคลื่นธรรมชาติที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งถือได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นนี้มีลักษณะใกล้เคียงเพชรจริงซึ่งจากกราฟยังมียอดคลื่น  $1580\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมันเป็นตำแหน่งของกราฟไฟต์แต่มันมีความสูงต่ำแสดงว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีกราฟไฟต์ปะปนอยู่แต่มีอยู่ในปริมาณน้อย ดังนั้นเราจึงยืนยันได้ว่าฟิล์มเพชรที่เราสร้างขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติมาก

#### 4.3 การทดสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วย วิธีวัดด้วยเข็มร้อน (Hot point probe)

วิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกง่ายและไม่สิ้นเปลือง โดยอุปกรณ์จะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วทำด้วยโลหะ และมีปลายแหลมเรียกว่า โพรบ (probe) โดยเข็มด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็น "เข็มเย็น" (cold probe) โดยมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง และ อีกเข็มหนึ่งทำหน้าที่เป็นเข็มร้อน (hot probe) ในการสร้างรอยสัมผัสของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพีนี้เราทำการสร้างที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ B:C 1000 ppm และ P:C 500 ppm



รูปที่ 4.3 แสดงการวัดด้วยวิธี Hot point probe

และจากการทดลองพบว่า การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นเมื่อทำการวัดจะเห็นว่าเข็มของกัลวานอมิเตอร์จะชี้ไปทางเข็มเย็น (cold probe) และ ในฟิล์มเพชรที่ใช้อะตอมสารเจือโบรอนในการสังเคราะห์เข็มของมิเตอร์จะชี้ไปทางเข็มร้อน (hot probe) ก็แสดงว่ามันเป็นฟิล์มเพชรชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีและชนิดเอ็น

โดยการนำฟิล์มเพชรชนิดพีและเอ็นที่ได้ไปทำการวัดค่าความต้านทานแล้วนำค่าความต้านทานที่ได้ไปคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$p = \frac{1}{q\mu_h\rho} = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$n = \frac{1}{q\mu_e\rho} = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิด พี

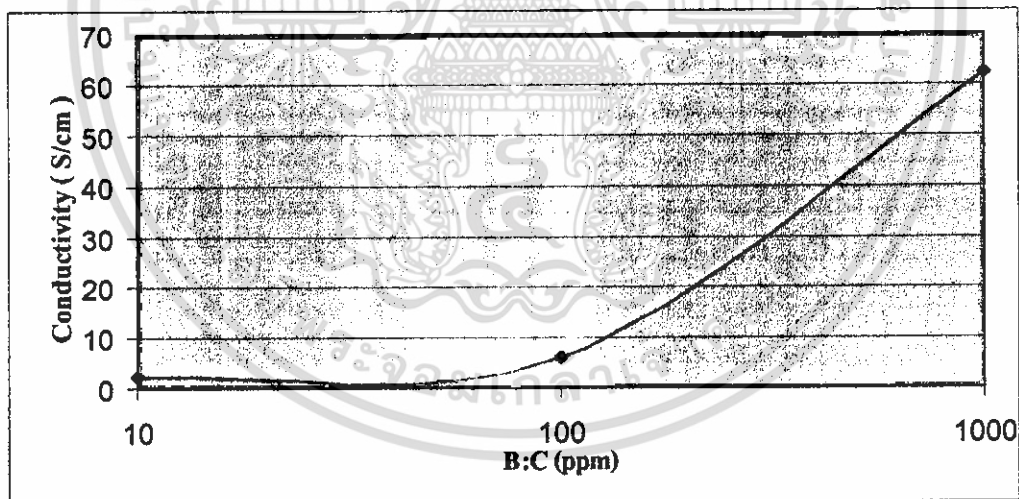
B:C (ppm)	10	100	1000
R ( $\Omega$ )	1000	400	40
$\rho$ ( $\Omega.cm$ )	0.4	0.16	0.016
$\sigma$ (S.cm)	2.5	6.25	62.5
P ( $cm^{-3}$ )	$8.669 \cdot 10^{15}$	$2.167 \cdot 10^{16}$	$2.167 \cdot 10^{17}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

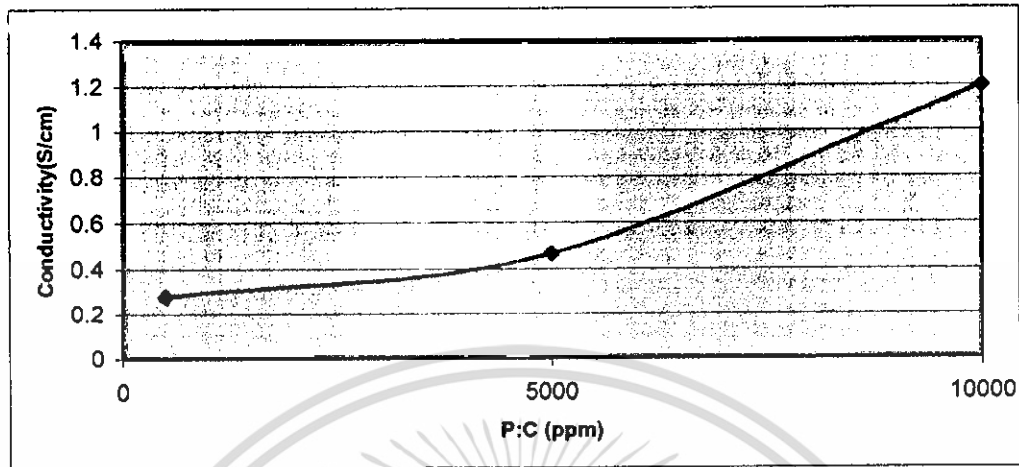
ตารางที่ 4.2. ตารางแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิด เอ็น

P:C (ppm)	500	5000	10000
R ( $\Omega$ )	8870	5340	2080
$\rho$ ( $\Omega.cm$ )	3.548	2.136	0.832
$\sigma$ (S.cm)	0.28	0.468	1.2
N ( $cm^{-3}$ )	$8.796 \cdot 10^{14}$	$1.46 \cdot 10^{15}$	$3.75 \cdot 10^{15}$

โดยนำค่าต่างๆจากตารางมาเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของความหนาแน่นอะตอมสารเทียบกับค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสง และอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าทางแสงกับสภาพนำไฟฟ้ามืด ของทั้งฟิล์มเพชรชนิด พีและเอ็น ได้ดังรูปที่ 4.4-4.5



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของ B:C



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของ P:C

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ามีดกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส ตามลำดับ พบว่าเมื่อ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานในเนื้อสารมีค่าลดลง โดยที่ B:C 1000 ppm มีค่าสภาพนำไฟฟ้า สูงสุด

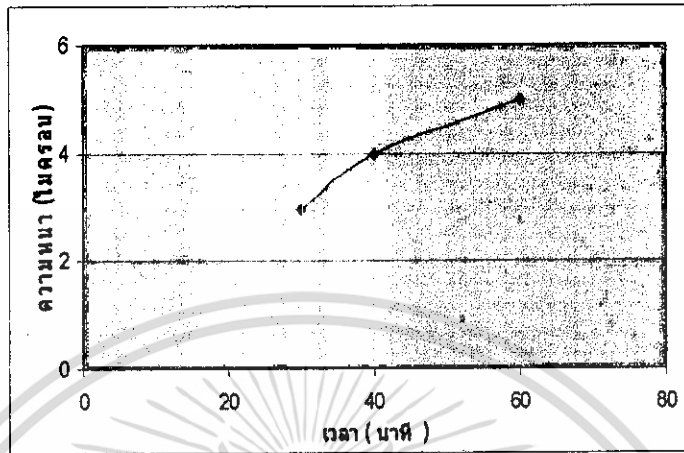
#### 4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร

จากตารางที่ 4.3 นั้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรกับเวลาในการสร้าง โดยเราจะนำฟิล์มเพชรที่สร้างได้ไปทำการวัดอัตราการเกิดเทียบกับเวลาโดยวัดจากวิธี SEM (Scanning Electron Spectroscopy) แล้วนำไปพล็อตกราฟเทียบกับเวลาเพื่อดูแนวโน้ม โดยจะสร้างฟิล์มเพชรที่เวลา 30 , 40 และ 50 นาที

เวลาในการสร้าง ( นาที )	ความหนาของฟิล์มเพชร ( $\mu\text{m}$ )
30	3
40	4
50	5

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรกับเวลาในการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



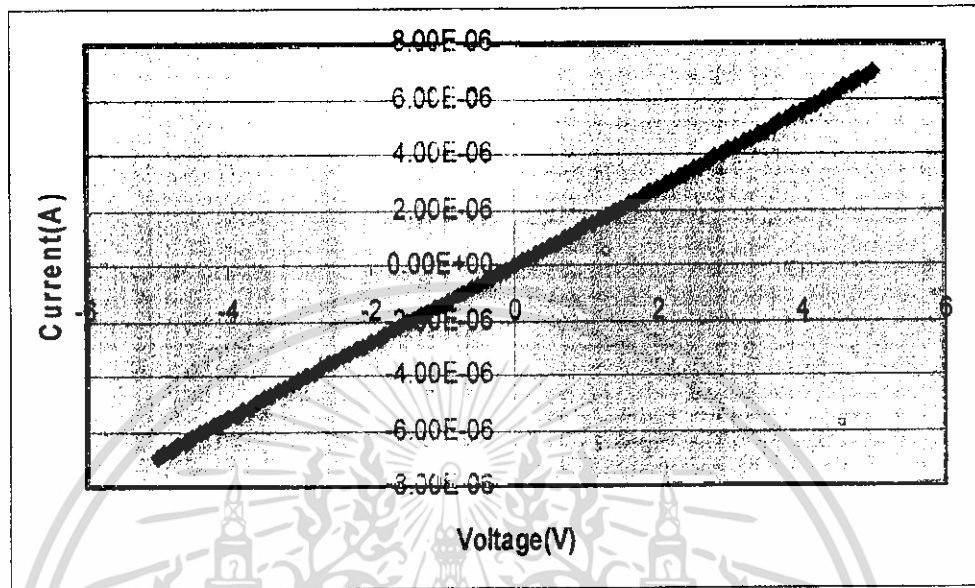
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรกับเวลาในการสร้าง

จากการทดลองศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร โดยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อนพบว่า ฟิล์มเพชรมีอัตราการเกิดประมาณ 1  $\mu\text{m}$  ต่อ 10 นาที

#### 4.4 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติรอยต่อระหว่างฐานรองซิลิคอนกับฟิล์มเพชร

ในการสร้างเมื่อทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี ลงบนฐานรองซิลิคอนชนิดพีแล้วก็จะนำไปทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็นซ้อนลงบนฟิล์มเพชรชนิดพี อีกครั้งและก็จะทำการสร้างขั้วโลหะขึ้น จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้วจะมีรอยต่อเกิดขึ้น 4 รอยสัมพันธ์คือ 1.รอยต่อระหว่างฐานรองซิลิคอนชนิดพีกับขั้วโลหะ 2. ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับขั้วโลหะ 3. ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี 4. ฟิล์มเพชรชนิดพี ลงบนฐานรองซิลิคอน และเป็นที่ยืนยันว่ารอยต่อที่เกิดจากการทำขั้วโลหะ นั้นต้องทำเป็นรอยสัมพันธ์แบบโอห์มมิกเนื่องจากเราใช้โลหะนำมาทำเป็นขั้ว

แต่เราสนใจรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพี กับ ฐานรองซิลิคอนชนิดพีโดยนำรอยต่อนี้ไปทำการวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเพื่อตรวจสอบที่จะตรวจสอบว่าเป็นรอยต่อแบบใด

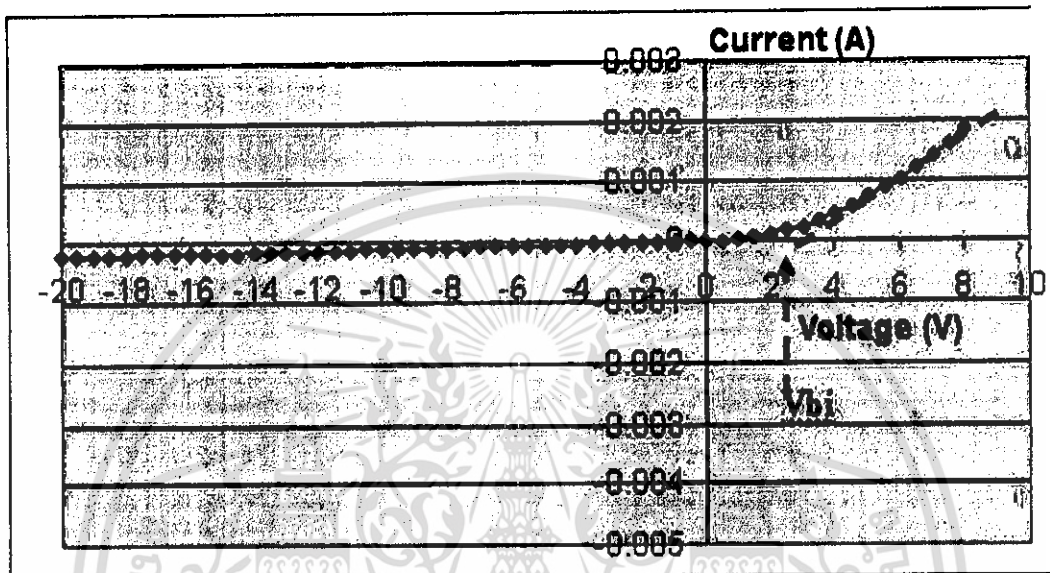


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของชั้นฟิล์มเพชรกับฐานรองซิลิคอน

และ จากการวัด ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส และ แรงดัน ของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี กับ ฐานรองซิลิคอนชนิดพี และ นำไปพล็อตกราฟ พบว่า รอยสัมผัสนี้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก

#### 4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของไดโอด

ทำการสร้างไดโอดจากฟิล์มเพชร ดังหัวข้อ 3.3 จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอด ได้ดังรูปที่ 4.8

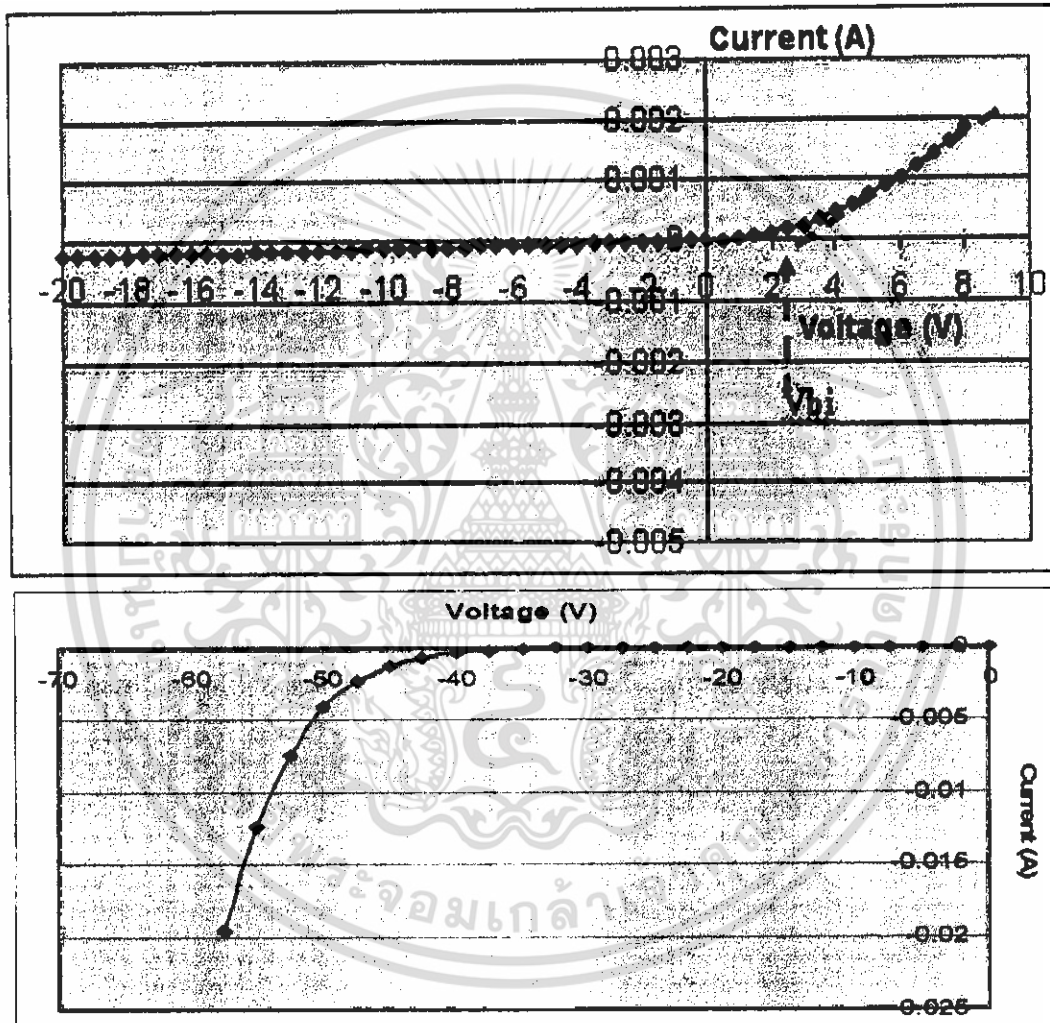


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน ของไดโอด

จากรูปที่ 4.8 แสดงกราฟกระแส-แรงดันของไดโอดฟิล์มเพชร โครงสร้างดังหัวข้อที่ 3.3 พบว่าไดโอดที่สร้าง มีคุณสมบัติในการ rectifier โดยมีแรงดันพังทลายมีค่าประมาณ มากกว่า 20 โวลต์ และมีแรงดันภายในอยู่ที่ 3 โวลต์

#### 4.6 ผลการทดลองศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอด

##### 4.6.1 ผลการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าของ โฟโตไดโอด ในสภาวะมืด

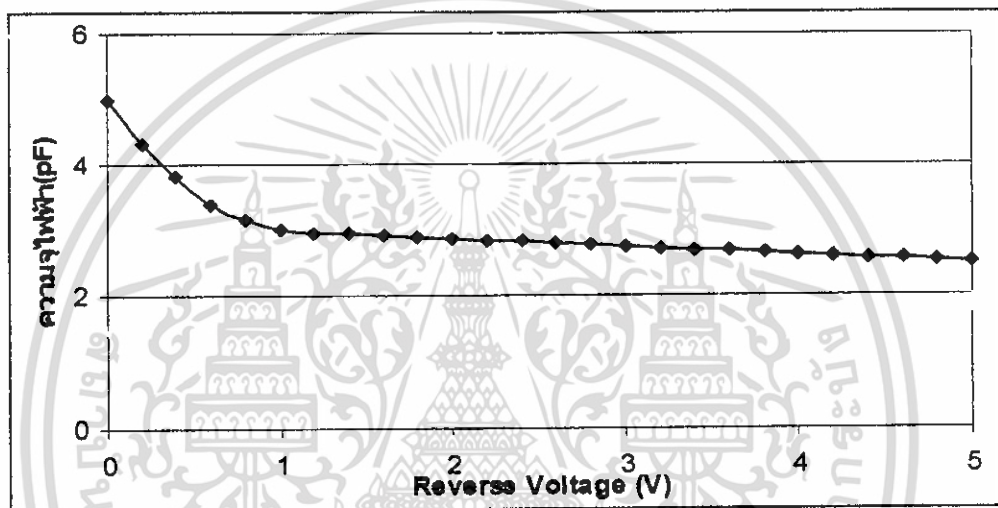


รูปที่ 4.9 ผลการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ กระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดในสภาวะมืด

จากกราฟกระแสของไดโอดในช่วงไบอัสตรงสังเกตได้ว่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่างช้ากับแรงดันไบอัสตรงแต่ในช่วงแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าของแรงดันพังทลายมีค่าอยู่ในช่วงที่มากกว่า 20 โวลท์ขึ้นไปและสังเกตได้ว่าช่วงไบอัสกลับนี้ค่ากระแสมีค่าน้อยและมันเป็นกระแสอิ่มตัวประมาณว่ามันคงที่ซึ่งคุณสมบัติของกราฟ I-V นี้มี คุณสมบัติเรกติไฟร์ และ จากการที่กระแส

มีค่าน้อยแม้ว่าจะเพิ่มแรงดันมากเท่าใดก็ตามก็สามารถนำคุณสมบัติย่านพักทลายนี้ไปใช้งานในการควบคุมแรงดันให้คงที่ได้

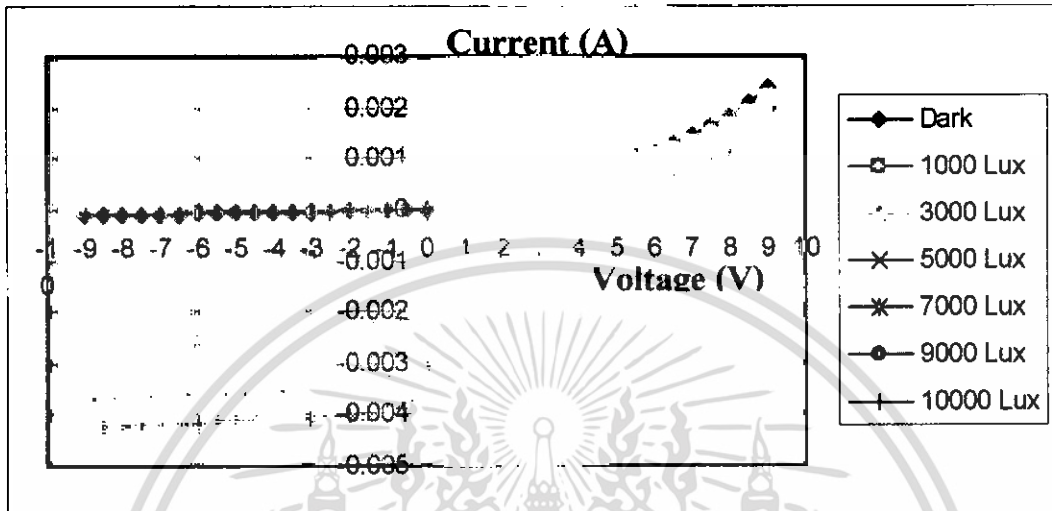
#### 4.6.2 ผลการวัดคุณสมบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด



รูปที่ 4.10 การวัดคุณสมบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด

ผลของคุณสมบัติ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้านี้ก็ทำการวัดจากตัวโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดเอ็น กับ ฟิล์มเพชรชนิดพีโดยสร้างที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ B:C ที่ 1000 ppm และ P:C ที่ 500 ppm จากกราฟนี้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับชนิดพีนี้สังเกตได้ว่า ที่แรงดัน 0-5 โวลต์ ค่าความจุไฟฟ้าค่อยๆลดลงเรื่อยๆ ซึ่งจากคุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติที่ดีที่จะนำตัวไดโอดชนิดนี้ไปใช้งานในย่านความถี่สูงได้ดี

#### 4.7 โฟโตไดโอดโครงสร้าง n-diamond/p-diamond

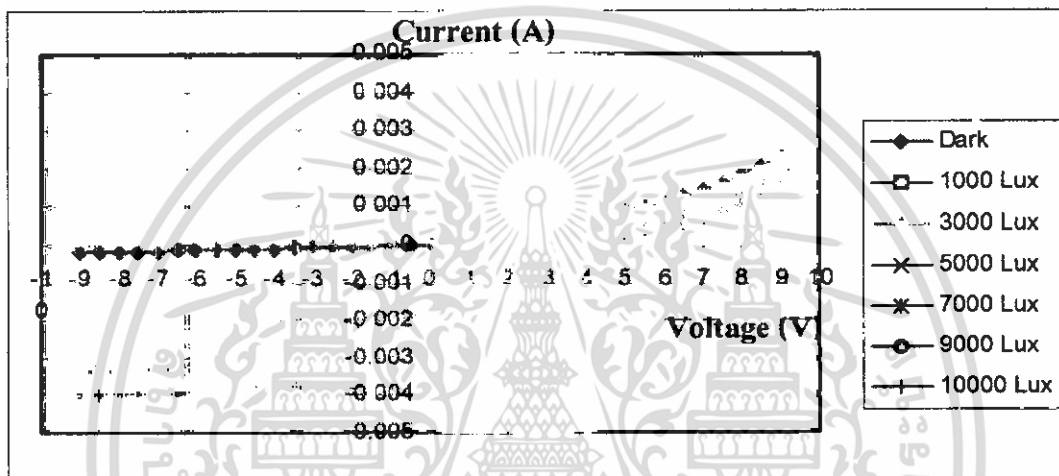


รูปที่ 4.11 กราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ โฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 25°C

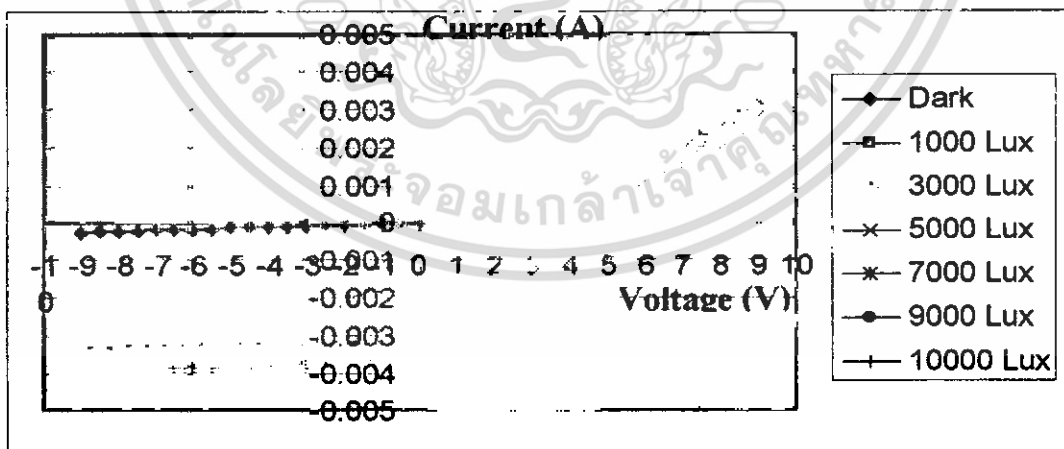
ในการศึกษาผลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี โดยสร้างที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ B:C ที่ 1000 ppm และ P:C ที่ 500 ppm และเมื่อดูจากกราฟเราจะสนใจค่ากระแสในช่วงไบอัสกลับเพราะการนำโฟโตไดโอดไปใช้งานนั้น ไดโอดจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับและเมื่อดูในกราฟช่วงขณะที่ยังไม่มีแสงใดๆจะมีกระแสในตัวย้อนกลับไหลผ่านตัวโฟโตไดโอดอยู่แต่น้อยมาก และจากกราฟสังเกตได้ว่าเมื่อความเข้มแสงมากขึ้นค่าของกระแสแสงก็มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยแต่ค่าของแรงดันแทบจะไม่มีผลต่อกระแสแสงเลย

#### 4.8 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

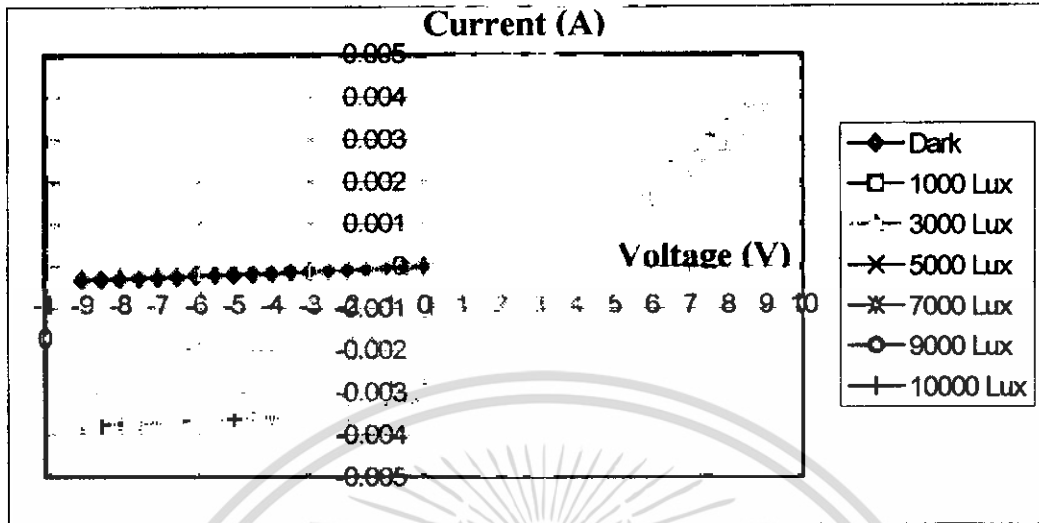
จากการนำโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพีนำไปวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่างๆ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิใช้งานให้กับโฟโตไดโอดตั้งแต่อุณหภูมิที่ 25, 50, 75 และ 90 C แล้วทำการฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ



รูปที่ 4.12 กราฟกระแสและแรงดันของ โฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 50°C

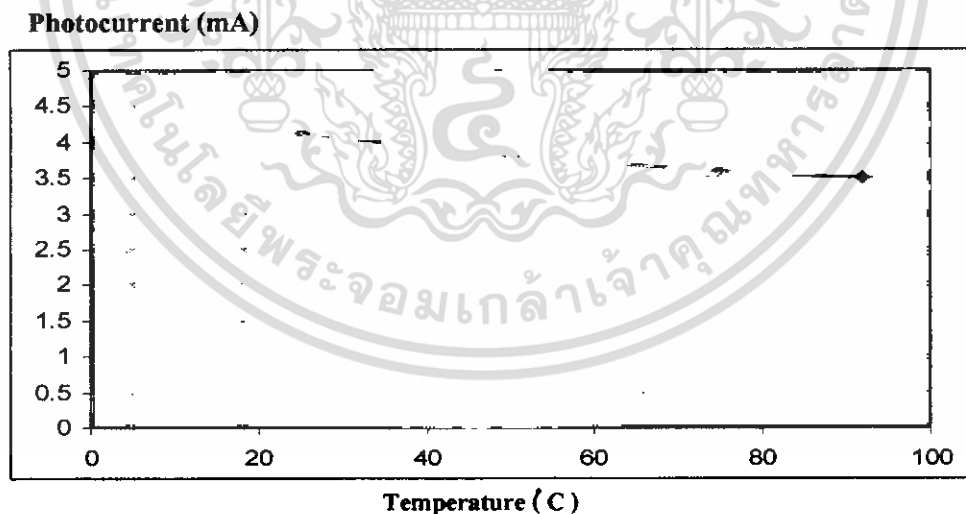


รูปที่ 4.13 กราฟกระแสและแรงดันของ โฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 75°C



รูปที่ 4.14 กราฟกระแสและแรงดันของ โฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 90°C

จากข้อมูลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 4.11-4.14 นำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสแสงกับอุณหภูมิใช้งานมาทำการสรุปได้ดังรูปต่อไปนี้

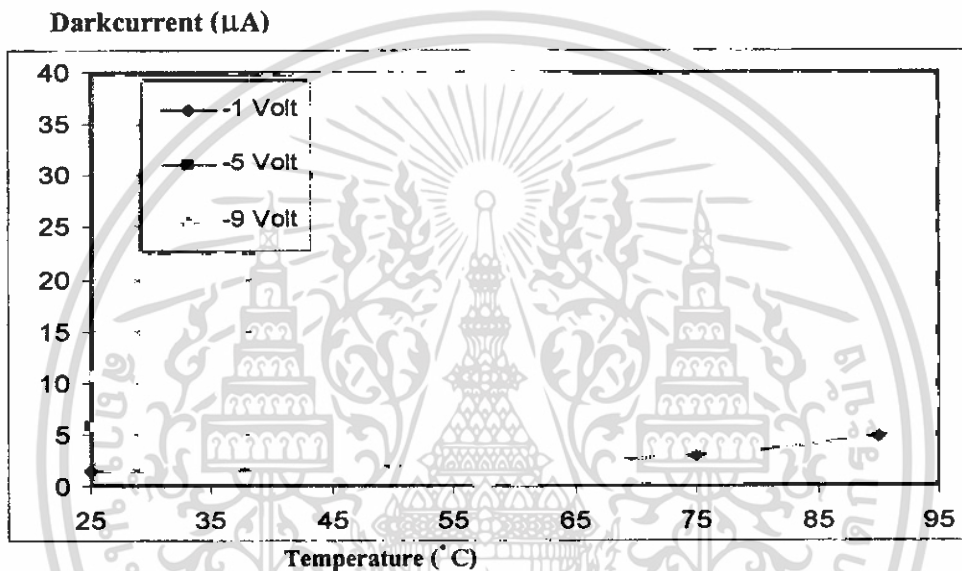


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับอุณหภูมิใช้งานค่าต่างๆ ( $V = -9V$ )

จากผลการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25°C ถึง 90°C โดยที่โฟโตไดโอดยังทำงานอยู่สังเกตได้ว่าค่าของกระแสในช่วงไบอัสตรงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าของระดับพลังงานเฟอร์มิเข้าใกล้ระดับ อินทรีนซิกมากขึ้น เมื่อรอยสัมผัสได้รับการไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นกระแสโวลต์ที่ไหลจากฟิล์มเพชรชนิดพีจะไหลไปยังฟิล์มเพชรชนิดเอ็นได้ในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากกำแพงศักย์ที่กั้นอยู่นั้น โวลต์มีค่าลดลงและอิเล็กตรอนที่ไหลจากทางด้านเอ็นจะเกิดการรวมตัวกับโวลต์ที่บริเวณ interface state ทำให้เกิดกระแสเนื่องจากการรวมตัวมากขึ้น จึงทำให้กระแสในช่วงไบอัสตรงมีค่ามากขึ้นแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเพราะว่าเพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงจึงทำให้กำแพงศักย์ที่ลดลงนั้นยังมีค่าสูงอยู่นั่นเอง ในกรณีการให้ไบอัสย้อนกลับนั้นกระแสจะไหลได้น้อยลง เพราะกำแพงศักย์นั้นจะมีค่าสูงขึ้นทำให้โวลต์ที่เกิดเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ได้น้อยลง



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสมืด-อุณหภูมิ ของโฟโตไดโอดที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าของกระแสมืดนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบอัส เช่น ขณะอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ที่แรงดัน -1 โวลต์ถึง -9 โวลต์ ค่ากระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $1.5 \mu\text{A}$  เป็น  $10.8 \mu\text{A}$  เป็นต้น นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาโดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะใช้งานของ โฟโตไดโอด โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง  $25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $90^{\circ}\text{C}$  พบว่าเมื่ออุณหภูมิมิค่าสูงขึ้น ค่ากระแสมืดจะมีค่ามากขึ้นในอัตรา 0.3 เท่าของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทุก  $10^{\circ}\text{C}$  เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โวลต์ ขึ้นบริเวณปลดพาหะ ซึ่งมีสนามไฟฟ้าอยู่ ทำให้คู่พาหะอิเล็กตรอน-โวลต์ เกิดการดริฟท์ ส่งผลให้เกิดกระแสซึ่งมีทิศทางเดียวกับกระแสอิมิตชันกลับ ทำให้ค่ากระแสมืดมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มของกระแสมืด ที่อุณหภูมิสูง(ในช่วง  $75-90^{\circ}\text{C}$ ) กับอุณหภูมิต่ำ( $25-75^{\circ}\text{C}$ ) พบว่าค่ากระแสมืดที่อุณหภูมิสูงมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตรา 0.73 เท่าและค่ากระแสมืดที่อุณหภูมิต่ำมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราเพียง 0.2 เท่า

นอกจากนั้นในขณะที่ โฟโตไดโอดจากฟิล์มเพชร ได้รับแสงพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง

นอกจากนี้อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสที่แรงดันไบอัสค่าสูง จะมีค่ามากกว่ากรณีแรงดันไบอัสค่าต่ำๆ หรือก็คือ ที่แรงดันไบอัสค่าสูง กระแสมีค่าจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีความไวต่ออุณหภูมิสูงกว่ากรณีแรงดันไบอัสค่าต่ำๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบ โฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรกับโฟโตไดโอดที่สร้างจากซิลิคอน พบว่า โฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ  $10^{\circ}\text{C}$  อัตราการเพิ่มของกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 0.3 เท่า ซึ่งน้อยกว่าโฟโตไดโอดจากซิลิคอนที่มีอัตราการเพิ่มของกระแสมีค่า ถึง 2 เท่า เนื่องจาก ฟิล์มเพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานกว้าง  $5.45\text{ eV}$  ซึ่งมากกว่าซิลิคอนประมาณ 5 เท่า ทำให้ โฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี

ดังนั้นในการนำ โฟโตไดโอดไปใช้งานจึงจำเป็นต้องควบคุมแรงดันไบอัสและควบคุมอุณหภูมิของในการใช้งานของโฟโตไดโอดให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อที่จะทำให้สามารถใช้งานโฟโตไดโอดได้อย่างมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ด้วยวิธีการ Hot-Filament CVD ซึ่งขั้นตอนในการสร้างนั้นเริ่มจากการสร้างฟิล์มเพชรชนิดฟิล์มบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของเอททิลอัลกอฮอล์กับ โบรอนไตรออกไซด์ด้วยอัตราส่วน B:C 1000 ppm ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรชนิดพี และนำฟิล์มเพชรชนิดพีที่สร้างขึ้นนี้ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร ด้วยวิธี SEM และ Raman โดยผลการทดสอบจากการ SEM เกิดชั้นฟิล์มเพชรขึ้นบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี และจากกราฟ Raman พบว่ามีค่ายอดสูงสุดอยู่ที่  $1333\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีความแตกต่างจากเพชรธรรมชาติที่มีตำแหน่งยอดคลื่นอยู่ที่  $1332\text{ cm}^{-1}$  เพียงเล็กน้อย แต่ฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นจะมีกราฟไฟต์ป็นอยู่เล็กน้อยซึ่งรู้ได้จาก กราฟ Raman ซึ่งกราฟไฟต์มียอดอยู่ที่  $1580\text{ cm}^{-1}$  เราสามารถกำจัดกราฟไฟต์ได้โดยวิธีการแอนนัลในบรรยากาศไฮโดรเจนที่  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 9 นาที กราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นก็จะหมดไป และเมื่อได้ฟิล์มเพชรชนิดพีแล้วก็จะนำฟิล์มเพชรที่ได้ไปตรวจสอบชนิดสารกึ่งตัวนำของฟิล์มเพชรว่าสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นมาเป็นชนิดพี จริงหรือไม่ด้วยวิธีการวัดด้วยเข็มร้อน โดยผลการวัดที่ได้เป็นฟิล์มเพชรชนิดพีจริงเนื่องมาจากพาหะส่วนมากเป็นโฮล และเข็มของมิเตอร์ชี้ไปทางเข็มร้อนหลังจากนั้นก็ทำการวัดคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับฐานรองซิลิคอนชนิดพีโดยใช้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันพบว่ามียอดนี้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิกซึ่ง รอยสัมผัส โอห์มมิกนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อของฟิล์มเพชรชนิดพี กับฟิล์มเพชรอื่นที่จะทำการสร้างขึ้นหลังจากทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดฟิล์มบนฐานรองซิลิคอนชนิดพีแล้วก็จะทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็นลงบนฟิล์มเพชรชนิดพีอีกครั้ง โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของเอททิลอัลกอฮอล์กับฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ด้วยอัตราส่วน P:C 500 ppm และนำไปตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรและชนิดของสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเดิม และจากผลการตรวจสอบพบว่าฟิล์มเพชรที่ได้เป็นฟิล์มเพชรชนิดเอ็นจริงจากนั้นก็ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ด้วยการใช้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน จากการทดสอบพบว่ารอยต่อนี้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบเรกติไฟต์

นอกจากนี้ยังทำการสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็นบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี และ ฟิล์มเพชรชนิดฟิล์มบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี เพื่อนำไปทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานจากฟิล์มเพชรแล้วนำค่าความต้านทานนี้ไปคำนวณหาค่า สภาพต้านทาน ความนำไฟฟ้าที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่าต่างๆ

พบว่าเมื่อ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความต้านทานในเนื้อสารมีค่าลดลง โดยที่ B:C 1000 ppm มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงสุด และทำการศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร โดยนำฟิล์มเพชร ที่สร้างไปทำการไปทำการวัดอัตราการเกิดเทียบกับเวลาและทำการวัดความหนาของชั้นฟิล์มด้วยวิธี SEM ทำให้ทราบได้ว่าอัตราการเกิดอยู่ที่ประมาณ 1um ต่อ 10 นาที และ จากการที่รอยต่อของฟิล์มเพชรชนิดพีกับฟิล์มเพชรชนิดเอ็นมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบเรกติไฟด์ ก็นำคุณสมบัตินี้ไปศึกษาผลของกระแสและแรงดันของไดโอด พบว่ามีค่าแรงดันภายในอยู่ที่ 3 V. และมีค่า Breakdown Voltage ประมาณ 50 V.

หลังจากนั้นนำฟิล์มเพชรชนิดพี กับฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ไปประยุกต์ใช้งานเป็น โฟโตไดโอด โดยทำการฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆและให้ทำงานที่อุณหภูมิค่าต่างๆด้วย โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดันและกระแสของตัว โฟโตไดโอด โฟโตไดโอดจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อแรงดันมีค่ามากและอุณหภูมิมาก ค่าของกระแสก็จะมีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้นในการนำ โฟโตไดโอดไปใช้งานจึงจำเป็นต้องควบคุมแรงดันไบอัส และควบคุมอุณหภูมิในการใช้งานของโฟโตไดโอดให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อที่จะทำให้สามารถใช้งานโฟโตไดโอดได้อย่างมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด และ จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะเห็นได้ว่าสามารถนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์ใช้งาน เป็นโฟโตไดโอดได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างได้ง่าย และ ผ่านขั้นตอนไม่มากนัก ซึ่งเป็นโครงการที่น่าจะได้รับการวิจัย และพัฒนาคุณภาพให้ดียิ่งขึ้นและใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

### บรรณานุกรม

- [1] นิรุช ปิ่นเกตุ “การศึกษาและสร้างเซตแสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิคอน” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์
- [2] สมเกียรติ ศุภเลข.2545.เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์.พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ
- [3] R.F. David. “Diamond Film and Coatings,” USA :Noyes Publications,1993.
- [4] คุณิต เครื่องงาม.” สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ ฟิล์มดี เทคโนโลยีใหม่และการทำงานต่าง ๆ เล่ม 1 ” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

