สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

SYNTHESIS OF DIAMOND THIN FILM

โดย

นาย วิษณุ คำมี

นาย สสินะ ประคองเกื้อ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....72621
วัน,เดือน,ปี.....21 มิ.ย. 2550

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

SYNTHESIS OF DIAMOND THIN FILM

โดย

นาย วิษณุ คำมี 47015881

นาย สสินะ ประคองเกื้อ 47015884

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานเรื่อง การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

Synthesis Of Diamond Thin Film

จัดทำโดย นาย วิษณุ คำมี 47015881

นาย สสินะ ประคองเกื้อ 47015884

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธ์ ฐิติรุ่งเรือง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ ..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

นาย วิษณุ คำมี รหัส 47015881
นาย สสินะ ประคองเกื้อ รหัส 47015884
รศ. ดร. วิสุทธ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรและศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น และฟิล์มเพชรชนิดพีซึ่งเพชรเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ที่จะนำมาใช้แทนซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ในอนาคต เนื่องมาจากคุณสมบัติที่ดีหลายประการของเพชร เช่น เพชรมีค่าช่องว่างพลังงานสูงถึง 5.45eV ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี เป็นต้น เมื่อทำการสร้างฟิล์มเพชรแล้วนำฟิล์มเพชรที่ได้มาทำการ วัดสภาพนำไฟฟ้ามืด สภาพนำไฟฟ้าแสง สภาพนำไฟฟ้ามืดต่อสภาพนำไฟฟ้าแสง เป็นต้นเพื่อนำข้อมูลที่ได้เป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรทางด้านแสงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF DIAMOND THIN FILM

Mr. Witsanu Kummee ID.47015881

Mr. Sasina Prakongkue ID.47015884

Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang Advisor

Education Year 2006

Abstract

This report present the synthesis of diamond thin film and the light property of the diamond thin n-type and p-type semiconductor, which will be replace silicon and Galiumasenide in the future, diamond is the best material to use because good property of a diamond is high voltage of energy gap 5.45 eV so an equipment that made form diamond film have a well usable at high temperature . When we already have make diamond thin film , bring it to measurement performance of dark conductivity and light conductivity of diamond thin film , Data from measurement is base to design and apply to make diamond thin film in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับการทำรายงานเรื่องการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรให้สำเร็จลุล่วงได้นั้น คณะผู้จัดทำต้องขอกราบขอขอบคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ให้ความรู้และสั่งสอน ขอบคุณ พี่บาส ที่ช่วยแนะนำและสั่งสอนในการทำการทดลองทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ ที่วางแนวทาง ตลอดจนชี้แนะข้อผิดพลาดต่างๆขอขอบพระคุณพี่ๆทุกคนในห้อง Superconductor ที่ช่วยให้กำลังใจในการทำงานและมีส่วนช่วยเหลือในด้านต่างๆ และขอขอบคุณทุกคนที่มีส่วนช่วยให้รายงานนี้สำหรับลุล่วงลงได้

สุดท้ายขอกราบของพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและผู้มีพระคุณทุกท่านที่สนับสนุนทางด้านการเรียน กำลังใจและการเงินมาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ

วิษณุ คำมี

สสินะ ประคองเกื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
ศัพท์เทคนิค	IX
คำนำ	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 โครงสร้างเพชร	2
1.2 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชร	3
1.3 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชร	3
1.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร	3
1.3.2 คุณสมบัติทางกลของเพชร	5
1.3.3 คุณสมบัติทางแสง	6
1.4 ลักษณะของโครงสร้างของผลึก	6
1.5 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน	7
1.5.1.ในระบอบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่	7
1.5.2 ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุมูลของคาร์บอน	8
1.5.3 อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม	9
1.5.4 ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง	10
1.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร	10
1.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy	10
1.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)	12
1.6.3 วิธีการหาชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีวัดด้วยเข็มร้อน	14
บทที่ 2 ทฤษฎี	15
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง	15
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง	15
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง	15
2.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.1 โฟโตคอนดักทีฟ(Photoconductive)	17
2.2.2 โฟโตโวลทาอิก	20
2.3 โฟโตไดโอด(Photodiode)	20
2.3.1 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด	22
2.4 ลักษณะของแถบพลังงาน	23
2.4.1 แถบลังงานของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี	23
2.4.1.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า	25
2.4.1.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ	26
2.5 ทฤษฎีรอยต่อ	27
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง	28
3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง	28
3.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร	28
3.3 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร	30
3.4 การ ตรวจสอบฟิล์มด้วยภาพถ่าย SEM และเทคนิค Raman Spectroscope	31
3.4.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรชนิดพี	31
3.4.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น	31
3.5 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มเพชร	32
3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า	32
3.5.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง	32
3.5.3 การศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร	32
3.6 การศึกษาผลของความเข้มข้น P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสของโฟโตไดโอด	32
3.7 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสของโฟโตไดโอด	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง	34
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร	34
4.1.1 การตรวจสอบคุณสมบัติโดยอาศัยเทคนิควิธี SEM	34
4.1.2 การตรวจสอบคุณสมบัติโดยอาศัยเทคนิควิธี Raman Spectroscopy	34
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของโฟโตไดโอด	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.1 ผลของอัตราส่วน P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า 35

4.2.2 ผลของความเข้มแสง ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแส และแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 37

4.3 สรุปผลการทดลอง 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 โครงสร้างผนึกของเพชร 3

1.2 แผนภาพแสดงแลตทิซของผลึก (a) อสัณฐาน (b) ผลึกรูปเดี่ยว (c) ผลึกหลายรูป 7

1.3 แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆกัน 11

1.4 ลักษณะรูปพื้นผิวด้านหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายเครื่อง SEM 13

1.5 ภาพไดอะแกรมการวัดหาชนิดของสารกึ่งตัวนำของฟิล์มเพชรด้วยวิธีเข็มร้อน (Hot point probe) 14

2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก 16

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก 16

2.3(a) ลักษณะ โฟโตเซลล์

(b) ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตเซลล์เมื่อ ได้รับแรงดันพร้อมกับมีแสงตกกระทบ 18

2.4 ตัวอย่างภาคตัดขวางแสดงโครงสร้างของโฟโต ไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น 21

2.5 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น 21

2.6 ลักษณะสมบัติของกระแสละแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด 22

2.7(a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินพุต

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{oc} และความเข้มของสงอินพุต 23

2.8แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขณะก่อนสัมผัส 24

2.9 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขณะสมดุลความร้อน 24

2.10 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแส ขณะได้รับไบอัสตรง 26

2.11 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 27

3.1 ครีมเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิคอนขนาดเมล็ดผลึก 1μm 29

3.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์หลัก จากขัดด้วยครีมเพชรขนาดเมล็ด 1μm 29

3.3 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD 30

3.4 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด 33

4.1 ผลการตรวจสอบด้วย SEM 34

4.2 ลักษณะของ Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD 35

4.3 แสดงลักษณะกระแส-แรงดัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ P:C 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.4 คุณลักษณะของกระแสและแรงดัน ของโฟโตไดโอดในกรณี P:C 500 ppm ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ	37
4.5 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี P:C 5000 ppm ที่ความเข้มแสงต่างๆ	38
4.6 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของ โฟโตไดโอดในกรณี P:C 10000 ppm ที่ความเข้มแสงต่างๆ	38
4.7 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสไฟฟ้า	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ 2

1.2 แสดงยอดกราฟหลักๆ จากการวัดเพชรด้วยเครื่อง Raman Spectroscope 12

4.1 ผลของอัตราส่วน P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด 35

4.2 ค่าของกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับ ของโฟโตไดโอด กรณี P:C ต่างๆกัน 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

กระแสการรวมตัว	Recombination
การนิวคลีเอชัน	Nucleation
กระตุ้น	Activation
กระเจิง	Scattering
กราไฟต์	Graphite
การปลูกผลึก	Growth
การแพร่	Diffusion
ก๊าซเฟส	Gas phase
เกรน	Grain
ขอบของเกรน	Grain boundary
ความนำจำเพาะของแสง	Photo Conductivity
ความไวแสง	Photosensivity
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
ครีมเพชร	Diamond paste
ความหนาแน่นการนิวคลีเอชั่น	Nuclation density
ความคล่องตัว	Mobility
ค่าคงที่แลททิซ	Lattice constant
จุดบกพร่อง	Defect state
ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง	Dirrct band gap
ไตรคลอโรเอธิลีน	Trichlorothylene
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden energy band
สารเจือ	Dope
ฐานรอง	Substrate
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized water
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริค	Photoelectric effect
พันธะแขนขาด	Damging bond
พลังงานกระตุ้น	Activation junction
เวลาอายุ	Lift time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

ศูนย์กลางการแท็ป	Trapping center
ผลึกเพชร	Diamond crystal
แลททิซ	Lattice
อนุภาค	Particle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งสารกึ่งตัวนำที่กล่าวมาก็มีข้อดีหลายประการแต่มีข้อจำกัดที่อุณหภูมิจึงได้มีผู้นำเอาฟิล์มบางเพชรมาใช้งาน เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีกว่าในด้านต่างๆ อาทิเช่น ช่องว่างแถบพลังงานกว้างทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี การสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันต่ำจึงเข้ามามีบทบาทต่อการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรที่ความดันต่ำด้วยเทคนิค Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) เป็นเทคนิคที่สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรได้อย่างมีคุณภาพ แล้วนำฟิล์มบางเพชรที่ได้ไปวัดคุณสมบัติทางแสงต่อไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้งานส่วนมาก ได้แก่ ซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่กล่าวมามีข้อดีหลายประการแต่มีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่มากและเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้รองรับกับความต้องการในการใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น สารกึ่งตัวนำเพชรจึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ที่น่าสนใจยิ่งเนื่องจากคุณสมบัติที่ดีกว่าในด้านต่างๆ อาทิเช่น เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม (Eg) สูงถึง5.5 eV มากที่สุดในบรรดาสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน ทำให้เหมาสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูงและความถี่สูงได้ดี การสังเคราะห์ผนึกเพชรจึงเข้ามามีบทบาทต่อการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ต่อมาเพชรจึงได้ถูกนำไปศึกษา เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำทางอิเล็กทรอนิกส์และเมื่อเทียบกับซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ เพราะฉะนั้นเพชรจึงมีข้อดีหลายอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ ต่อไป คือ

1.เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์มาก จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆ ซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น (โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ

2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง

3.ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการโดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวนิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตาราง 1.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

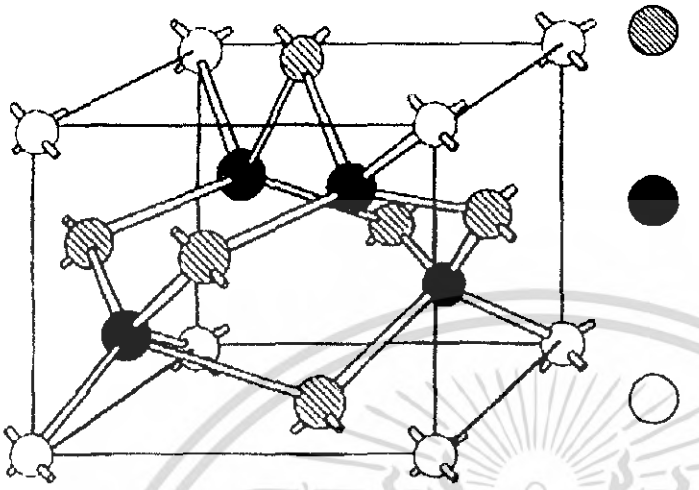
ตาราง1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์

Materials	**Diamond**	**Si**	**GaAs**
Crystal Structure	Diamond	Diamond	Zinc blends
Energy gap (eV)	5.45	1.1	1.43
Electron mobility (cm2/V.s)	2000	1500	8500
Hole mobility (cm2/V.s)	1800	600	400
Breakdown field (V/cm)	10×10^6	5×10^6	6×10^6
Resistivity (Ω.cm)	10^{16}	10^3	10^9
Saturated electron velocity (cm/s)	2.7×10^7	1×10^7	1×10^7
Dielectric Constant (ε)	5.7	11	12.5
Lattice constant (Å)	3.567	5.431	5.653
Thermal conductivity (W/cm.K)	20	1.5	0.46

1.1 โครงสร้างเพชร

เพชรมีโครงสร้างเป็นแบบโครงข่ายทรงเหลี่ยมสี่เหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral network) ของอะตอมคาร์บอนอย่างสม่ำเสมอด้วยระยะระหว่างอะตอม 1.545Å โดยคาร์บอนแต่ละอะตอมนั้นจะเกาะกับอะตอมคาร์บอนอื่น 4 อะตอม เป็นโครงสร้างผนึกแบบลูกบาศก์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนซ์ชนิดซิกมาและมีวงจรโคจรอิเล็กตรอนเป็นแบบ sp^3 ที่แข็งแรงมาก การจัดเรียงตัวของยูนิทเซล 1 ยูนิทเซล ประกอบไปด้วยคาร์บอน 8 อะตอม โดย 1/8 ของอะตอมอยู่ที่มุมทั้งแปด 1/2 อะตอมอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิทเซลและสุดท้ายมี 4 อะตอมฝังตัวอยู่ในยูนิทเซล ดังรูปที่ 1.2 ทำให้ผนึกเพชรมีลักษณะต่างๆ ที่พิเศษกว่าธาตุอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ I.1 โครงสร้างผนึกของเพชร

1.2 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชร

การศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรได้มีการแบ่งชนิดเพชรที่มีอยู่ในธรรมชาติโดยพิจารณาชนิดและปริมาณของสารเจือปนที่พบในเพชรเป็นเกณฑ์กำหนดซึ่งสารารณแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1.Type-Ia พบมากที่สุดในธรรมชาติประกอบด้วยไนโตรเจนจำนวนมาก (ตั้งแต่0.3%โดยอะตอม) โดยไนเจนมารวมกันเป็นกลุ่มเป็นลักษณะเพชรในธรรมชาติ

2.Type-Ib พบได้น้อยมากในธรรมชาติประมาณ 0.1% ส่วนมากพบในเพชรที่ได้มีการสังเคราะห์ขึ้นและมีความเข้มของสารเจือไนโตรเจนน้อยมากและมีการกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ

3.Type-IIa พบได้น้อยมากในธรรมชาติเช่นกัน ดังนั้นจึงมีความเข้มสารเจือน้อยเช่นกันประกอบกับไม่มีโบรอนเจือปนจึงมีสมบัติเป็นฉนวน

4.Type-IIb พบได้ยากสุดในธรรมชาติ มีจำนวนไนโตรเจนเจือปนมากกว่าจะมีจำนวนโบรอนมากกว่าไนโตรเจน ดังนั้นเพชรชนิดนี้จึงมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ

1.3 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เพชรมีคุณสมบัติอีกหลายประการที่น่าสนใจ อาทิเช่น คุณสมบัติทางกล, คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติแต่ละชนิดจะแสดงรายละเอียดดังนี้

1.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเพชร

พิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำเพชร ในทางธรรมชาติมีค่าสัมประสิทธิ์ของHall อยู่ในช่วง 1012 ที่อุณหภูมิ 140 องศาเคลวิน ถึง 1015 ที่อุณหภูมิห้อง ค่าความคล่องตัวHall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเพชรในทางธรรมชาติมีค่า 1800 cm^2/volt-sec ในขณะที่อิเล็กตรอนมีค่า 2000 cm^2/volt-sec สำหรับค่าความคล่องตัวของโฮล ที่ได้จากการสร้างเพชรที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส วัดได้ 50 cm/volt-sec สารกึ่งตัวนำที่มีใช้ในปัจจุบันมีเพียงเยอร์มันเนียม และอินเดียมแอนติโมไนด์ เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนวัสดุอื่นจะมีความเร็วอิ่มตัวของโฮลต่ำ และ dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้ามีค่า 10cm/sec ความเร็วดริฟได้สูงสุด 10 cm/sec และในกรณีของอิเล็กตรอนมรความเร็วสูงสุด คือ 2.0 X 10^7 cm/sec สำหรับอิเล็กตรอนสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติมีค่าสูงถึง 10^{16} ohm-cm

โบรอนเป็นสารที่ถูกนำมาใช้ในการเจือลงในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชร ให้มีคุณสมบัติเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวทั้งนี้เนื่องมาจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอน จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมโบรอน ในกรณีที่ความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่ค่ามากๆ ทำให้พลังงานกระตุ้นทีค่าน้อยมากเกิด Shallow Level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้ว ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือที่มีค่าประมาณ 10cm มีพลังงานกระตุ้น 370 meV และสำหรับฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า 10^{19} - 10^{20} cm^{-3}) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ $2x10^{-3}$ eV

สำหรับกรณีของสารเจือผู้ให้ พิจารณาถึงไนโตรเจนพบว่าไม่สามารถใช้อะตอมสารเจือผู้ให้ได้ แต่เนื่องจากระดับพลังงานกระตุ้นของไนโตรเจนมีค่าน้อยกว่าแถบความนำ 1.57 eV ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow level ขึ้น อีกทั้งอะตอมของไนโตรเจนยังทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอนการคำนวณจากทฤษฎีทำนายว่าฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ Okano et al. รายงานในปี ค.ศ. 1990 ว่าได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขึ้นมา โดยใช้ไอระเหยของสารละลาย P_2O_5 ในเมทานอล ซึ่งถูกเจือจางด้วยอะซิโตน ค่าความหนาแน่นประจุพาหะวัดได้ 10^{15} cm^{-3} และความคล่องตัวของอิเล็กตรอน 50 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มีความแน่นอน และอะตอมฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่ เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้วมีผลทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ดังนั้นลิเธียมจึงเป็นสารที่ได้รับการสนใจและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพชรที่ทำการโด๊ปลิเธียมด้วยวิธี Ion-implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มชนิดเอ็น แต่ในการโด๊ปแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการเนื่องจากเกิดการชดเชยด้วยความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบสถานะต้องห้ามตลอดจนลิเธียมในเพชรมีการกระจายตัวสูงอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องซึ่งทำให้การโด๊ปไม่มีความแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 คุณสมบัติทางกลของเพชร

โครงสร้างของเพชรเกิดจากพันธะโควาเลนซ์จึงมีความแข็งแรงมาก เป็นผลให้เพชรมีคุณสมบัติทางกลที่พิเศษหลายอย่าง โดยเฉพาะจะมีความแข็ง molar density และ thermal conductivity มากกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ในขณะเดียวกันเพชรก็มีความยืดหยุ่นและ bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น อีกทั้งยังมีสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนที่ต่ำมากๆ สำหรับรายละเอียดของคุณสมบัติต่างๆ มีดังนี้

-ความแข็ง

วัสดุทั้งหมดในธรรมชาติ เพชรเป็นวัสดุที่แข็งที่สุด โดยความแข็งนี้จะพิจารณาจากแรงกดลงบนพื้นผิววัสดุต่อพื้นที่ซึ่งเพชรมีค่าสูงถึง 5700-10400 Kg/mm^2

-Thermal conductivity

เพชรมีค่าการนำความร้อนสูงสุดในบรรดาวัสดุทั้งหมดโดยมีค่า 20 Watt/cm.k ข้อมูลแสดงการเปรียบเทียบอยู่ในภาคผนวก (ตารางที่1) ค่าความนำความร้อนนี้จะมีค่าลดลงเมื่อมีไนโตรเจนจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ในเพชร type I_a จะมีค่าความนำความร้อนลดลง 30-50% จากค่าสูงสุด หากฟิล์มเพชรที่เป็นผนึกรวม (Polycrystalline) ที่ได้จากการสร้างที่มีคุณภาพดี ความนำความร้อนในทิศทางการปลูกผนึกของฟิล์มมีค่าเป็น55%ของผนึกเดี่ยว ในระนาบของการปลูกผนึก ความนำความร้อนของผนึกเดี่ยวมีค่ามากกว่า 25% แต่ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับขนาดของผนึก

-Young Modulus

บริเวณทั้งหมดที่เกิดจากการผิดรูปไปเนื่องจากมีแรงมากระทำ และสามารถกลับสู่ภาวะเริ่มต้นได้ บริเวณนี้เรียกว่า บริเวณยืดหยุ่น (Elastic region) จากกฎของ Hook กล่าวว่าอัตราส่วนของความเค้น (stress) ต่อความเครียดจะมีค่าประมาณคงที่ที่บริเวณดังกล่าว โดยอัตราส่วนของความเค้นที่เกิดจากการดึงต่อความเครียดในเชิงเส้นถูกเรียกว่า "Young's Modulus"

- **Molar heat capacity** ค่า Molar heat capacity หมายความถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา จากภาคผนวก (ตารางที่2) แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity ระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ นั่นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีเท่าๆ กับ Heat sink

- **Thermal expansion** คือค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ แพร่ไปถึงเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 0°C ค่า Thermal expansion นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity สำหรับของแข็งค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายความร้อนเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรจะมีค่ามากกว่าเชิงเส้นประมาณ 3 เท่า สำหรับค่า Thermal expansion ของเพชรและวัสดุอื่นๆ ถูกเปรียบเทียบไว้ในภาคผนวก (ตารางที่3)

- **Hardness** เพชรเป็นสารที่มีความแข็งสูงสุดในบรรดาวัสดุทั้งหมดที่เรารู้จัก โดยจะมีค่าความแข็งสูงถึง 5,700-10,400 kg/mm^2 อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามสร้างสารประกอบ C_3N_4 (Carbon Nitride) เชื่อกันว่าเป็นสารที่มีความแข็งมากกว่าเพชร สำหรับตารางการเปรียบเทียบค่าความแข็งของเพชรกับวัสดุอื่นๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก (ตารางที่4)

1.3.3 คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาค่าดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ และความยาวคลื่นที่กำหนด ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของเพชรและวัสดุอื่นๆ ที่อุณหภูมิห้องจะแสดงในภาคผนวก(ตารางที่ 5)

1.4 ลักษณะของโครงสร้างของผลึก

สารกึ่งตัวนำ คือ กลุ่มของสารที่มีความนำอยู่ระหว่างโลหะและฉนวน วัสดุสารกึ่งตัวนำที่เป็นธาตุจะประกอบด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียวกัน เช่น ซิลิคอนและเยอรมันเนียม ซิลิคอนเป็นธาตุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในวงจรรวมและมีความสำคัญมาก ส่วนสารประกอบเช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบที่นิยมที่สุด มีคุณสมบัติทางแสงที่ดีถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นอุปกรณ์ทางแสง

โครงสร้างของวัสดุสารของแข็งเกิดขึ้นได้ โดยการเกาะกันระหว่างอะตอมจำนวนมากของธาตุ แต่ละอะตอมจะเกาะเกี่ยวกันอย่างแข็งแรง ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในของแข็งและรูปแบบการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอม จะมีผลไปถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารของแข็งนั้นๆ ด้วย เราอาจพิจารณาจัดแบ่งลักษณะโครงสร้างของวัสดุสารของแข็ง ตามลักษณะการเกาะเกี่ยวและเรียงตัวของอะตอมได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. โครงสร้างแบบไม่เป็นผลึก (Noncrystalline) หรืออสัณฐานหรืออมอร์ฟัส (Amorphous)

2. ผลึกรูปเดี่ยว(Single crystal)

3. ผลึกหลายรูป(Polycrystal)

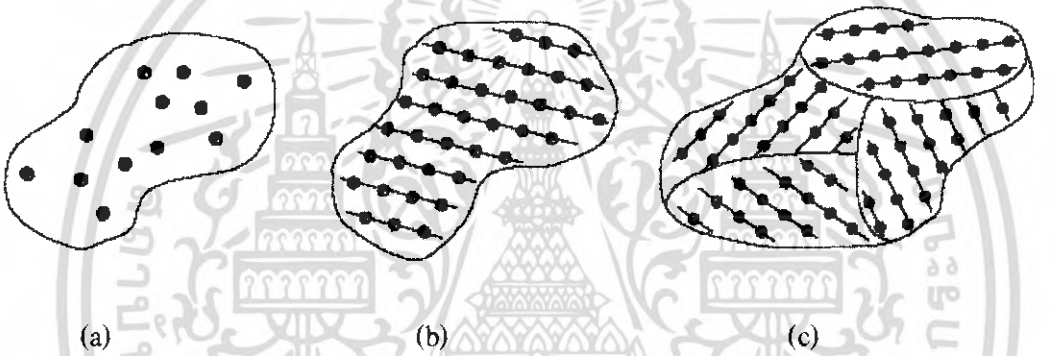
อสัณฐาน หรือ อมอร์ฟัส หมายถึง ลักษณะโครงสร้างของสารของแข็งซึ่งมีการจัดเรียงของอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบ อะตอมต่างๆจะเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายไร้รูปแบบ และไม่มีตำแหน่งที่แน่นอน จึงทำให้วัสดุที่มีโครงสร้างเช่นนี้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่แน่นอนเปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ จึงไม่เหมาะสมจึงต้องการการพัฒนาเพื่อให้สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เพราะวัสดุประเภทนี้ใช้ต้นทุนในการสร้างที่ต่ำ ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์จากอสัณฐาน ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบางของอสัณฐานซิลิคอน เป็นต้น

ผลึกรูปเดี่ยว จะมีความเป็นระเบียบของการจัดเรียงอะตอมสูง มีข้อดีคือมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหนือกว่าสารที่ไม่เป็นผลึกรูปเดี่ยว เนื่องจากขอบเขตเกรนมีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารลดลง

ผลึกหลายรูป คือ ผลึกที่อะตอมมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหลายๆขนาด หรือมีลักษณะของผลึกที่ไม่ต่อเนื่อง หรือมีความเป็นระเบียบน้อย แสดงดังรูปที่ 2.1



(a) (b) (c)

รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงแลตทิซของผลึก (a) อสัณฐาน (b) ผลึกรูปเดี่ยว (c) ผลึกหลายรูป

1.5 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสังเคราะห์ด้วยพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อนด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีต่างๆ แม้ว่าแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามจะมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

1.5.1 ในระบอบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD เป็นการใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนเป็นแหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอนและก๊าซไฮโดรอะตอมคาร์บอนและอนุมูลคาร์บอนจะเป็นปัจจัยในการเกิดฟิล์มเพชร ส่วนก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นส่วนสำคัญในการกำจัดแกรไฟต์ ทั้งนี้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและอนุมูลคาร์บอนจะต้องมีความเหมาะสม จึงจะทำให้การเกิดของเพชรที่มีคุณภาพที่ดีไม่ปนเปื้อนจากแกรไฟต์ ก๊าซไฮโดรเจนคาร์บอนในการสังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น มีเทน อะซีโตน อีเธน-อะเซทิลีน และแอลกอฮอล์ เป็นต้น ซึ่งก๊าซบางชนิดมีจำนวนก๊าซไฮโดรเจนน้อยจึงต้องผสมก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนเพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาบทบาทของการผสมก๊าซที่ใช้มี 2 ชนิดคือ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน

บทบาทของก๊าซไฮโดรเจน นับตั้งแต่ Angus et al. เสนอว่าอะตอมไฮโดรเจนสามารถกำจัดแกรไฟต์ออกจากเพชรได้เป็นอย่างดี อีกทั้งได้รับการนำเสนอในทำนองเดียวกันจากกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียว่า "สมดุลความหนาแน่นสูงของอะตอมไฮโดรเจนที่พื้นผิวการเกิดมีคุณสมบัติในการกำจัดแกรไฟต์" หน้าที่หลักอีกอย่างหนึ่งของไฮโดรเจนคือ ช่วยทำให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้น เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเพชรอะตอมคาร์บอน จะมีพันธะแขนขาด (Danging bond) อะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปจับตัวกับแขนที่ขาดของอะตอมคาร์บอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะหรือ Machlinet al. กล่าวว่าอะตอมไฮโดรเจนช่วยในการกำจัดออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง

บทบาทของก๊าซออกซิเจน เติมออกซิเจนเข้าไปในก๊าซผสมระหว่างไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนได้รับการรับรองจากผู้ศึกษาการสังเคราะห์เพชรหลายกลุ่ม (Kawato et al) กล่าวว่าทำให้เพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีที่อุณหภูมิฐานรองต่ำ และยังช่วยให้อัตราการเกิดดีขึ้น

บทบาทหลักๆของออกซิเจน คือ ช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าเมื่อผ่านอนุมูลของก๊าซออกซิเจน เช่น O^*,O_2 หรือ OH^* เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชรจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น

อย่างไรก็ตามออกซิเจนมีความสำคัญในการช่วยกำจัดแกรไฟต์ ส่วนหน้าที่อื่นๆของออกซิเจนที่มีผู้ศึกษาไว้ได้แก่ Kawato et al เสนอว่าออกซิเจนมีคุณสมบัติที่จะช่วยลดความหนาแน่นของอะเซทิลีน ซึ่งถูกสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดแกรไฟต์และคาร์บอนอสัณฐาน Much et al. รายงานว่า ออกซิเจนยังเป็นตัวช่วยเพิ่มความเข้มข้นของอะตอมไฮโดรเจน

1.5.2 ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุมูลของคาร์บอน

เมื่ออัตราระหว่างอะตอมไฮโดรเจนและคาร์บอนมีอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้ว จะต้องมีการกระตุ้นให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมาด้วยความร้อน พลาสมา การเหนี่ยวนำหรือ Combustion ทำให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมา โดยอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ฐานรองซึ่งส่วนมากแล้วในกระบวนการ CVD Driving force ที่ใช้ส่งอะตอมคาร์บอนจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างบริเวณที่ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นกับพื้นผิวฐานรอง หรืออาจใช้การเป่าก๊าซเฟสไปยังฐานรองรวมไปถึงการใช้สนามไฟฟ้าในการช่วยการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD แบบความร้อนมีหลักการพื้นฐานคือต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์สองประการ คือ ประการแรกทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมที่จะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิว และประการที่สอง แยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน โดยทั่วไปแล้วรีแอคเตอร์ ที่ใช้กระตุ้นคือ Hot filament reactors

แม้ว่าแต่ละระบบการสร้างมีความแตกต่างกันในแง่ของรูปแบบทางวิศวกรรม แต่ทั้งหมดจะมีลักษณะสำคัญพื้นฐานเหมือนกัน คือทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีออกมา พลังงานจำนวนมากที่ใช้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า หรือความร้อน ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจน และไฮโดรคาร์บอนแตกตัว การสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำเพื่อป้องกันการรวมตัวของอะตอมของไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุลอุณหภูมิของก๊าซเฟสมีค่าสูงกว่า 1, 700 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นที่บริเวณ Activation zone การระบายความร้อนทั้งแบบแอคทีฟหรือพาสทีฟเป็นตัวรักษาระดับอุณหภูมิของฐานรองให้มีค่าประมาณ 925 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามกระบวนการส่งผ่านจะมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ในรีแอคเตอร์ทั้งสี่ชนิด รีแอคเตอร์ชนิด Hot filament และ Microwave phasina มีการแพร่เป็นส่วนสำคัญ ความเร็วหรือความหนาแน่นของ " Boundary layer " จึงมักจะพบการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของอุณหภูมิ ความเร็ว หรือความหนาแน่นของอนุมูลระหว่างบริเวณกระตุ้น (Hot filament หรือ Plasma ball) และพื้นผิวการเกิดในแต่ละรีแอคเตอร์ ส่วนรีแอคเตอร์ชนิด Arc jet และ Combustion เป็นชนิดที่มีความเร็วของ Boundary layer สูง (ตัวอย่างเช่น อาจสูงเกินกว่า 10 cm/s) จึงมีการพาเป็นส่วนสำคัญ ความเร็วและความหนาแน่นจะเกิดขึ้นใกล้ๆ กับพื้นที่ผิวที่เกิด

1.5.3 อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม

วิธี CVD แบบความร้อนทั้งหมดที่กล่าวมา เพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 องศาเซลเซียส ถึง 1,200 องศาเซลเซียส แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าหากอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูง หรือต่ำเกินไปจากนี้ อาจทำให้เกิดแกรไฟต์หรือ DLC ได้ การควบคุมอุณหภูมิฐานรองทำได้หลายกรณี เช่น การระบายความร้อนด้วยน้ำ การให้ความร้อนด้วยเครื่องกำเนิดความร้อนในกรณีที่อุณหภูมิของฐานรองมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จุดประสงค์เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมและคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.4 ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับการเตรียมพื้นผิวฐานรอง ซึ่งการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถทำบนฐานรองได้หลายชนิด เช่น Si, SiC, Cu, WC เป็นต้น แต่สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงฐานรองชนิดซิลิคอนเพียงอย่างเดียว การเตรียมผิวฐานรองเป็นการทำเพื่อให้เกิดนิวคลีเอชันของเพชรให้เร็วขึ้น เช่น การขัดฐานรองด้วยครีมเพชร ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

1.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร

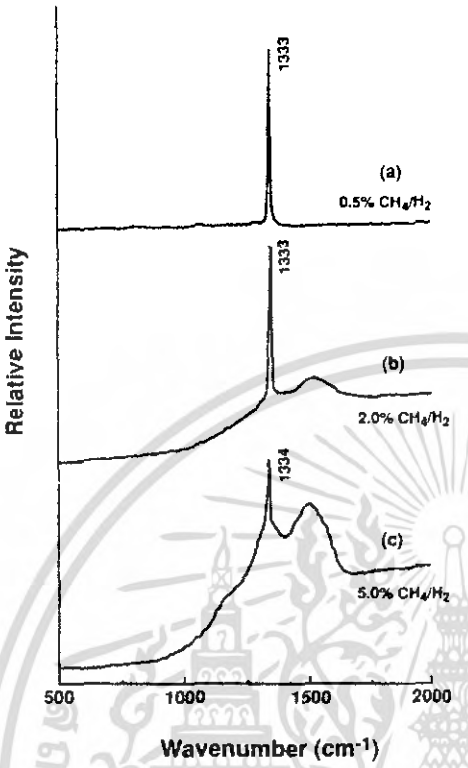
1.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

การทำงานของ Raman Spectroscopy จะอาศัยปรากฏการณ์การกระเจิงของแสงเข้าช่วย คือ การวัดการลดลงของความเข้มของแสงที่ผ่านไปในตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน ผลของ Ramanขึ้นอยู่กับ Raman Spectroscopyใช้ในการศึกษาการสั่นของอะตอมภายในโครงสร้างของเนื้อสารหรือบริเวณปรากฏการณ์การกระเจิงของโมเลกุล ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า การกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการชนกันระหว่างโฟตอนกับการสั่นของแลททิสหรือโฟนอน การกระเจิงของRaman อาศัยความยาวของเลเซอร์ที่มีความยาวในการกระตุ้น ทำให้เกิดคู่โฟนอนกับโฟตอนสนามไฟฟ้าของความเข้มแสงบังคับแสงให้มีคลื่นไปทางเดียวในผลึกเมื่อผลึก ได้รับพลังงานจากลำแสงทำให้เกิดการสั่นของแลททิสขึ้นโหมดการสั่นจะขึ้นอยู่กับพันธะของอะตอมในของแข็ง ดังนั่นจึงสามารถใช้ Raman Spectrum ในการวิเคราะห์โครงสร้างของ ของแข็งได้

การกระเจิงของ Raman มีประโยชน์ในการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของคาร์บอน โดยเฉพาะฟิล์มเพชรที่สร้างจาก วิธีการ CVD ซึ่งจะมีความไวต่อธรรมชาติของพันธะคาร์บอนตัวนั้น ซึ่งจะสามารถแยกชนิดของคาร์บอนออกเป็นเพชร กราไฟต์ อะมอร์ฟัสคาร์บอน และไฮโดรจิเนตคาร์บอน

ข้อดีสำคัญที่สุดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy นี้ คือ เป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงาน หรือฟิล์มเพชรที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3
แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆกัน
(a) 0.5% CH_4/H_2
(b) 2%CH_4/H_2
(c) 5%CH_4/H_2

ในรูปที่ 1.3 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชร ในรูป 1.3a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่นๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 1.3b พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ 1500 cm^{-1} อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่ สำหรับสเปกตรัมของรูป 1.3c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อยและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แสดงยอดกราฟหลักๆ จากการวัดเพชรด้วยเครื่อง Raman Spectroscope

Peak position	**Type of carbon**	**Description**
~1140 cm^{-1}	small size (<0.1 μm) cubic diamond	Occasionally observed in diamond film with very small grain size (<0.1 μm)
1315-1326 cm^{-1}	hexagonal diamond	Broad band, observed in shock wave produced diamond
1332 cm^{-1}	Cubic diamond	First order peak with FWHM of 1.9cm^{-1} for natural diamond
1345 cm^{-1}	Amorphous carbon	Broad band. It becomes a shoulder of the 1550 cm^{-1} band when the material is hydrogenated
1355 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	Observed in materials with small grain sizes
1550 cm^{-1}	Amorphous or diamond-like carbon	Broad band
1580 cm^{-1}	Graphite	First order peak
2458 cm^{-1}	Cubic diamond	Second order peak
2710 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	Second order peak
3240 cm^{-1}	graphite	Second order peak

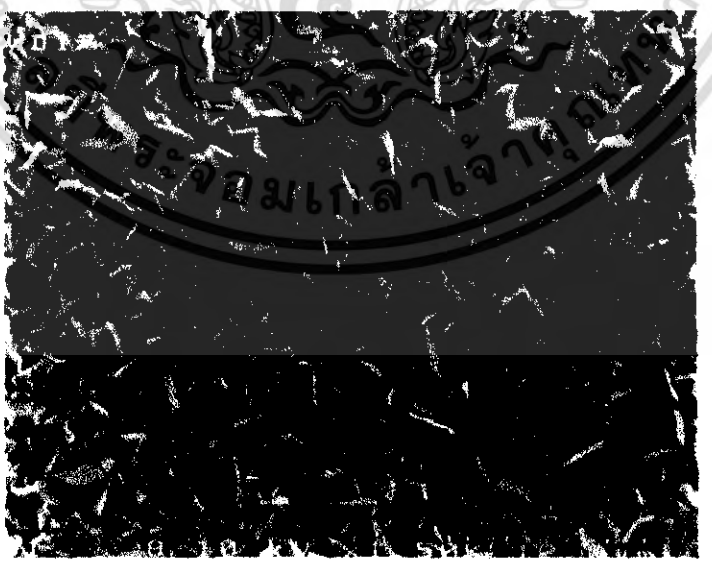
1.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน หลักการพื้นฐานของ SEM คือ การกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนจะสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10^{-20}nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่นๆ คือ มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50-40,000X) ความคมชัดของภาพสูง (2.5^{-10} nm) ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเทียบกับ TEM (Transmission Electron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Microscopy) ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมากๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้าสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านการเตรียมก่อน แต่หากสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้าก่อนการใช้งานต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อน (นิยมใช้ทองคำหรือคาร์บอน) เช่น ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวัดด้วย SEM ได้เลย ในขณะที่ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง SiO2 ต้องทำการเคลือบทองคำก่อนไปวัดด้วย SEM อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันแบะกระแสต่ำๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่างๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรองซิลิกอน Si) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่ได้ทำการสร้างฟิล์มบางเพชรขึ้น ดังในรูปที่ 1.4 ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับพาลามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองและความความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่อก๊าซไฮโดรเจน ยกตัวอย่าง รูปที่ 1.4 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEMใช้ Si บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวเป็นระนาบ {111} ซึ่งหากใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy จะช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่1.4 ลักษณะรูปพื้นผิวด้านหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.3 วิธีการหาชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีวัดด้วยเข็มร้อน

(Hot point probe measurement)

วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย อุปกรณ์นี้จะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ทำด้วยโลหะและมีปลายแหลมซึ่งเรียกว่า โพรบ(probe) โดยเข็มหนึ่งจะทำหน้าที่เป็น"เข็มเย็น"(cold probe) โดยมีอุณหภูมิที่เท่ากับอุณหภูมิห้อง และอีกเข็มหนึ่งทำหน้าที่เป็นเข็มร้อน(hot probe) โดยจะทำให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า และโพรบทั้งสองจะถูกต่อเข้ากับกัลวานอมิเตอร์ การวัดจะเริ่มจากการทำให้เข็มร้อนมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอีกเข็มหนึ่ง แล้วนำปลายของเข็มทั้งสองจิ้ลงไปบนแผ่นผลึกตัวนำโดยให้ปลายทั้งสองอยู่ห่างกันพอสมควร แล้วสังเกตดูการกระดิกของเข็มแสดงการไหลของกระแสในกัลวานอมิเตอร์ว่ากระดิกไปทางใด

ในกรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่ปลายเข็มร้อนจะทำให้เกิดโฮลอิสระขึ้น แล้วโฮลเหล่านี้จะมีพลังงานสูงกว่าที่บริเวณเข็มเย็น ทำให้มีการแพร่เกิดขึ้นจากเข็มร้อนไปยังเข็มเย็นทำให้บริเวณเข็มร้อนมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนเข็มเย็นมีศักย์เป็นบวก ดังนั้นกระแสสุทธิจึงไหลออกจากเข็มเย็นผ่านมิเตอร์ไปยังเข็มร้อน เข็มของกัลวานอมิเตอร์จึงกระดิกไปทางเข็มร้อน สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะให้ผลที่ตรงกันข้ามเพราะที่เข็มร้อนจะเกิดอิเล็กตรอนอิสระแพร่ไปยังเข็มเย็น จึงทำให้เกิดกระแสในทิศทางตรงกันข้ามและทำให้เข็มของกัลวานอมิเตอร์กระดิกไปทางเข็มเย็น

รูปที่ 1.5 ภาพไดอะแกรมการวัดหาชนิดของสารกึ่งตัวนำของฟิล์มเพชรด้วยวิธีเข็มร้อน (Hot point probe)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น (wave) และ อนุภาค (particle) ปรากฏการณ์ที่เราเห็นอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อน การแทรกสอด และการหักเหแสง แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาค ได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect)

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งถ้าให้ λ เป็นความยาวคลื่นแสง v คือความถี่ของคลื่นแสง และ c_o คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ (3×10^8 m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = \frac{c_o}{\nu} \qquad (2.1)$$

ถ้าแสงเดินทางในวัตถุที่มีเนื้อเรียบตลอด และเป็นวัตถุไอโซโทรปีแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง ที่ขอบของวัตถุทั้งสองนี้แสงจะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ (n) จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าในสุญญากาศ กล่าวคือความเร็วแสง (c) ในวัตถุเท่ากับ

$$c = \frac{c_o}{n} \qquad (2.2)$$

ค่าดัชนีหักเหแสงของวัตถุใดๆจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความถี่ของแสงด้วย และค่าดัชนีหักเหแสงนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ε ของวัตถุ ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} \qquad (2.3)$$

โดยที่ ε_o คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ = 8.854×10-12 F/m

2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

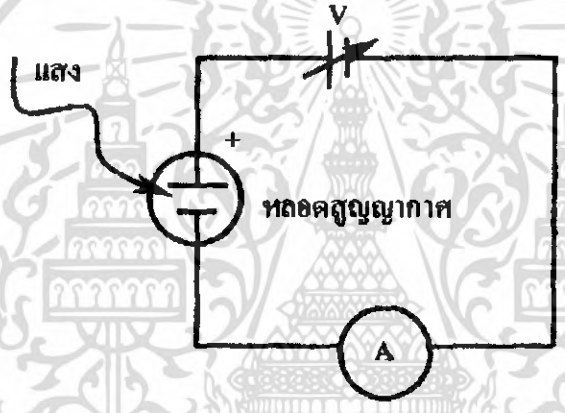
แสงนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคของแสงว่า โฟตอน(Photon) อนุภาคของแสงจะมีพลังงานอยู่ภายในตัวของมันและถ้าแสงมีความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

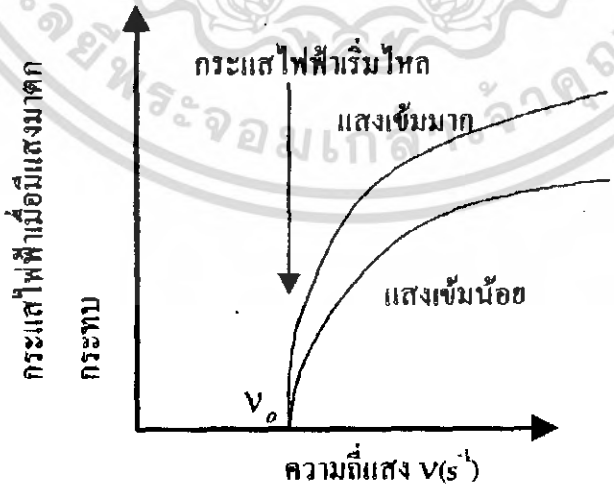
เท่ากับ V อนุภาคของแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ hVeV โดยที่ h คือค่าคงที่ของแพลงค์ มีค่า 6.6261×10^{-34} j.s และแสงที่มีความยาวคลื่น λ ใดๆจะมีพลังงานโฟตอนเป็น

$$\text{พลังงานโฟตอน} = h\nu = \frac{hc_o}{\lambda} \qquad (2.4)$$

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศ แล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะหลุดออกจากโลหะ แสดงวิธีการทดลองดังรูปที่ 2.1



รูปที่2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปรากฏการณ์นี้ไอน์สไตน์ได้อธิบายว่า เมื่อแสงที่มีความถี่ ν เดินทางไปในปริภูมิ (space) แสงนั้นไม่ได้มีพลังงานเป็นค่าต่อเนื่อง แต่แสงจะเป็นอนุภาคที่มีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ ที่วิ่งไปในปริภูมินั้นไอน์สไตน์ได้ตั้งชื่ออนุภาคแสงนี้ว่า light quantum ต่อมาเรารู้จักกันในชื่อ โฟตอน

จากนั้นไอน์สไตน์ยังได้อธิบายรายละเอียดของปรากฏการณ์ในรูปที่2.2 ไว้ว่า พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ E มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวโลหะ $h\nu$ ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก $q\phi$ และเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$E = h\nu - q\phi \qquad (2.5)$$

โดยที่ ϕ คือ เวิร์กฟังก์ชัน (Work function) และ $q\phi$ มีหน่วยเป็น eV

2.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก

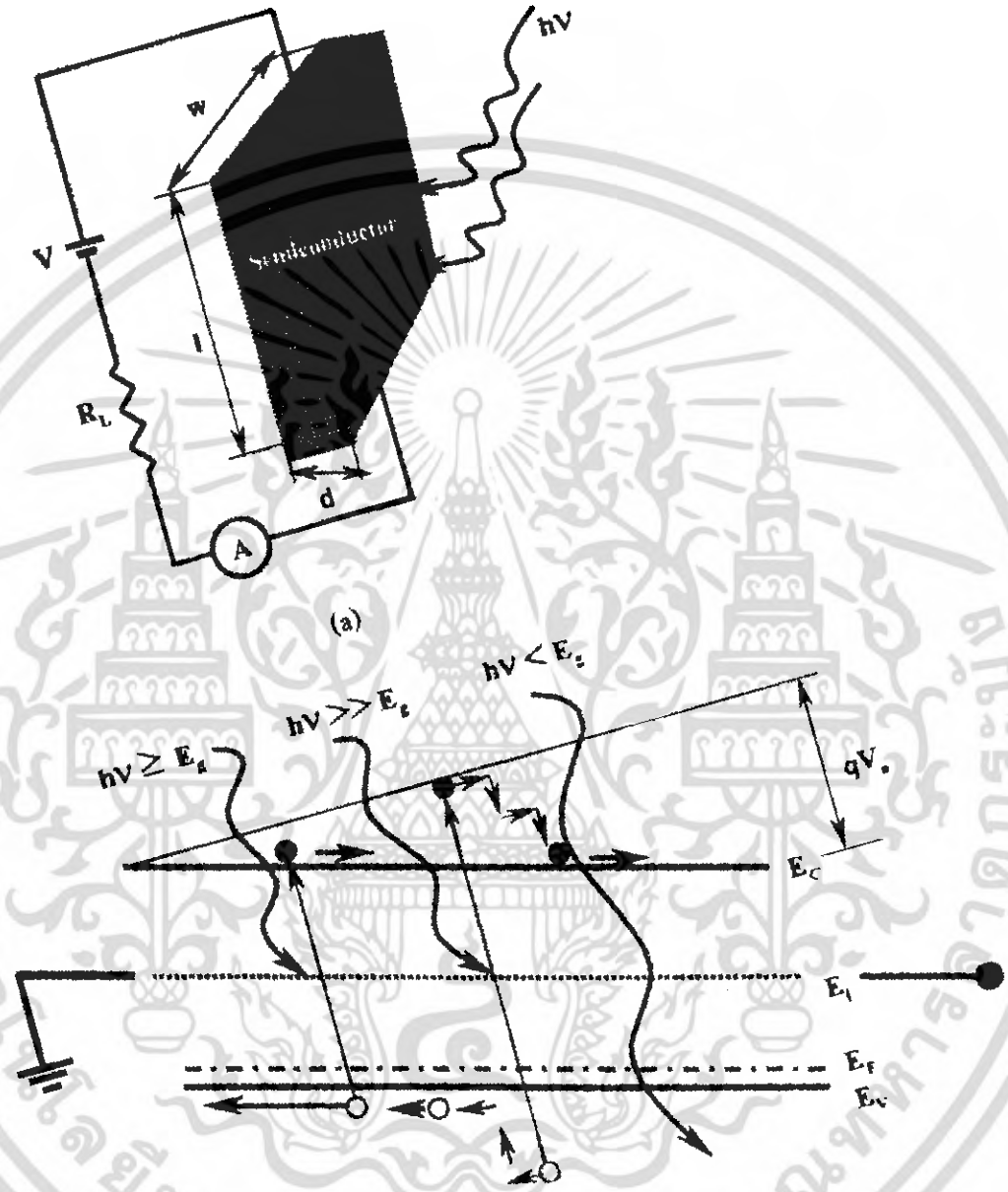
เป็นปรากฏการณ์ที่ส่องแสงเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ และเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุล ให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบความนำและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ โดยที่พลังงานของแสงนั่นจะต้องมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกนี้สามารถแบ่งออกได้ เป็นสองประเภทตามหลักการดึงอิเล็กตรอนไปใช้งาน คือโฟโตคอนดักทีฟและโตโวทาอิก

2.2.1 โฟโตคอนดักทีฟ(Photoconductive)

โฟโตคอนดักทีฟ ได้แก่ การป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกให้สารกึ่งตัวนำ เพื่อให้อิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำวิ่งออกสู่ภายนอก และ เกิดกระแสไฟฟ้าไหล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 ส่วนโฮลในแถบวาเลนซ์ก็ช่วยให้กระแสไหลได้เช่นกัน สิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานด้วยปรากฏการณ์นี้ได้แก่โฟโตเซลล์

72621

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3
(a) ลักษณะโฟโตเซลล์
(b) ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตเซลล์เมื่อได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำนั้น ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นไว้และจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น แต่ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น แสงจะทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำโดยไม่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อีกกรณีหนึ่งถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างพลังงานมากๆ ก็จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นเช่นกัน แต่อิเล็กตรอนและโฮลจะมีพลังงานสูงกว่าปกติ และจะเกิดการชนกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำจนลดระดับพลังงานมาอยู่ที่สภาวะปกติและจะเกิดความร้อนขึ้น เรียกว่าการผ่อนคลายพลังงานความร้อนของอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งแสดงได้ดังรูปที่2.3(b)

เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับสารกึ่งตัวนำและทำการฉายแสงดังรูปที่ 2.3(b) จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากแสงนั้นมีค่าดังสมการดังต่อไปนี้

$$I_{ph} = (qp_p E)\, wd \qquad (2.6)$$

โดยที่ E คือสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ V/l

เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับการฉายแสงนั้นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่เปลี่ยนไปก็คือ สภาพความนำไฟฟ้า โดยสภาพความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนเนื่องจากแสงเรียกว่า **สภาพความนำไฟฟ้าทางแสง (Photoconductivity)** โดยเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าและมีการฉายแสงให้กับสารกึ่งตัวนำ สภาพความนำไฟฟ้ารวมที่เปลี่ยนไปนั้นมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \sigma_D + \sigma_{ph} \qquad (2.7)$$

โดยที่ σ_D คือ สภาพนำไฟฟ้ามืด (dark conductivity) และ σ_{ph} คือ สภาพนำไฟฟ้าทางแสง โดยที่

$$\left.\begin{aligned} \sigma_D &= e(p_o\mu_p + n_o\mu_n) \\ \sigma_{ph} &= e(\mu_p + \mu_n)G\tau \end{aligned}\right\} \qquad (2.8)$$

โดยที่ G คือ อัตราการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องมาจากแสง ในที่นี้สมมติให้อัตราการเกิดอิเล็กตรอนเท่ากับอัตราการเกิดโฮล

τ คือ อายุของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ในที่นี้สมมติให้อายุของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมสารเจือ สภาพนำไฟฟ้ามืดจะขึ้นอยู่กับค่าของจำนวนความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ และค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ ในขณะที่ ค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสงจะขึ้นอยู่กับค่าของประจุพาหะส่วนน้อยที่เกิดเนื่องจากแสง

2.2.2 โฟโตโวลทาอิก

สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น เมื่อมีแสงที่มีพลังงานมากพอมาตกกระทบ พลังงานแสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนเอาไว้ ถ้าพลังงานส่วนนี้มีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดข้ามไปยังแถบความนำได้ และจะเหลือโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนที่กระโดดข้ามไปยังแถบความนำนั้น จะเคลื่อนที่อย่างไม่มีทิศทาง จนหมดพลังงานที่จะอยู่ในแถบความนำได้ ก็จะตกลงมาอยู่ที่แถบวาเลนซ์เหมือนเดิม อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากแสงนี้เองที่ทำให้สภาพความนำไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลง แม้จะไม่ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นแต่ก็สามารถนำผลที่เกิดขึ้นนี้ไปสร้างอุปกรณ์ที่มีสภาพความนำไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงตามแสงได้ อย่างเช่น โฟโตไดโอด

2.3 โฟโตไดโอด(Photodiode)

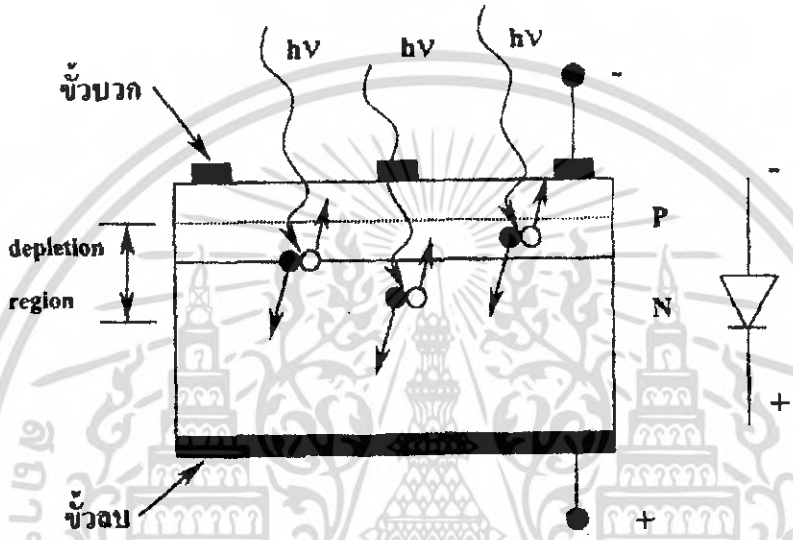
โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพี-เอ็น เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่รอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ อาจรวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วถ้ากล่าวถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่ง ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจจับความเข้มแสง

หลักการทำงานของโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็นที่เป็นแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดทางด้านที่รับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่ต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่รอยต่อพี- เอ็นนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยขบวนการโฟโตโวลทาอิก เมื่อมีแสงมาตกกระทบโฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบความนำ และที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่

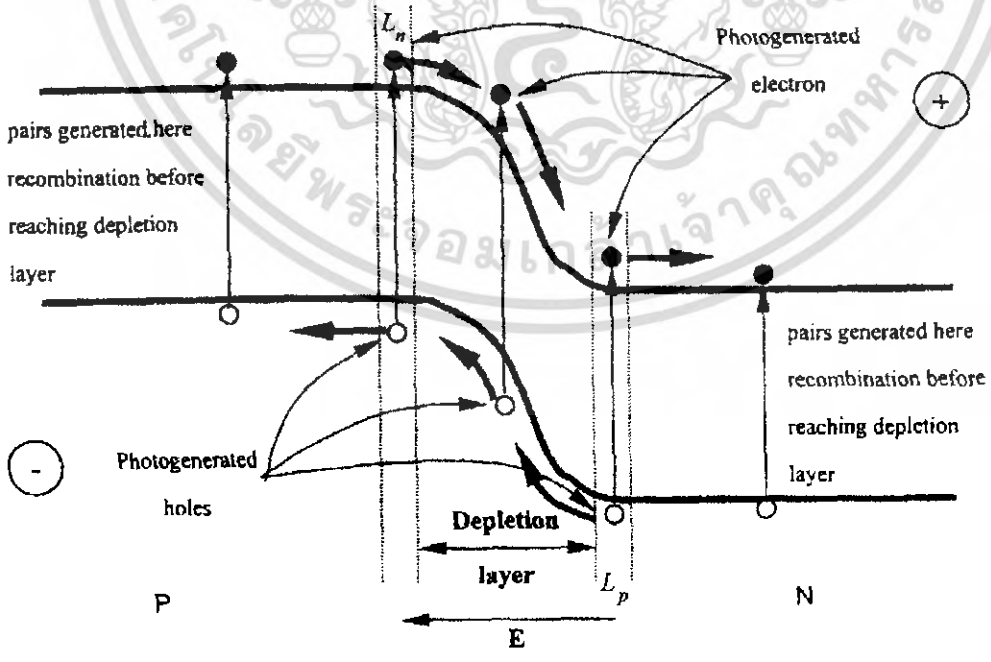
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ที่ชั้นพี ที่ชั้นปลอดพาหะ และที่ชั้นเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบความนำในชั้นพี จะแพร่กระจายไปในชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบความนำในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในพัดพาให้วิ่งไปสู่ในชั้นเอ็น ส่วนในกรณีของโฮลก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจากแถบวาเลนซ์ในชั้นเอ็น หรือชั้นปลอด พาหะไปสู่ในชั้นพี จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนของแสง (Photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมในชั้นเอ็น จะทำให้ชั้นเอ็นมีประจุเป็นลบ และโฮลที่สะสมในชั้นพี จะทำให้ชั้นพีมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก หลังจากนั้นถ้าเราต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลจากชั้นเอ็น และโฮลจะไหลจากชั้นพีไปสู่วงจรภายนอก



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างภาคตัดขวางแสดงโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

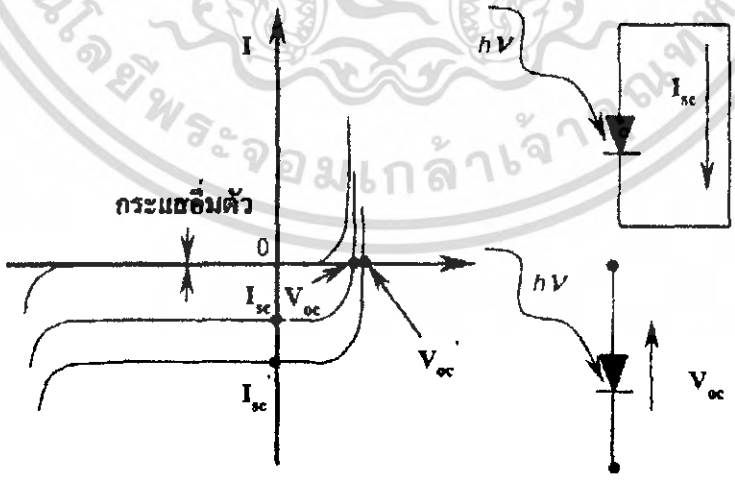
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นที่บริเวณชั้นพีและชั้นเอ็นซึ่งอยู่ห่างจาก depletion region นั้น จะเกิดการรวมตัวก่อนที่จะเดินทางไปถึง depletion region เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าเป็นตัวเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ คู่อิเล็กตรอน-โฮลในส่วนนี้จะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าเอาท์พุตน้อยมาก

การหาสมการในการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในโฟโตไดโอดนั้นจะต้องอาศัยวงจรสมมูลของโฟโตไดโอด ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

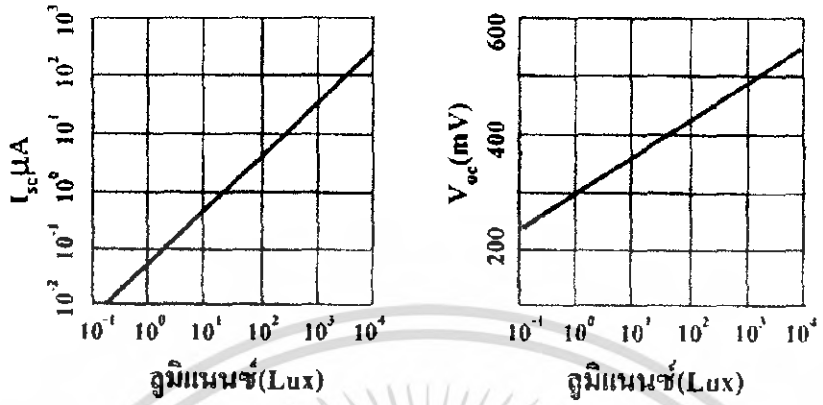
2.3.1 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า โฟโตไดโอดก็คือ อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับไดโอด ดังนั้นในขณะที่ยังไม่มีแสงส่องกระทบที่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้กันทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.6 (เส้นหมายเลขหนึ่ง) เมื่อมีแสงส่องเข้าสู่โฟโตไดโอด จะทำให้เส้นระหว่างกระแส-แรงดันเลื่อนแบบขนานไปสู่เส้นหมายเลข 2 แต่ถ้าความเข้มแสงมากขึ้นก็จะเป็นเส้นกราฟแบบหมายเลข3 ในขณะที่ส่องแสงอยู่ถ้าเราทำการวัดกระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอดจะได้ค่า I_{sc} หรือ I_{sc} โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปแคโทด ถ้าเป็นวงจรเราจะได้แรงดันวงจรเปิด V_{oc} หรือ V_{oc} และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มแสงเป็นลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.7(a)



รูปที่2.6 ลักษณะสมบัติของกระแสละแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่2.7

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินพุต

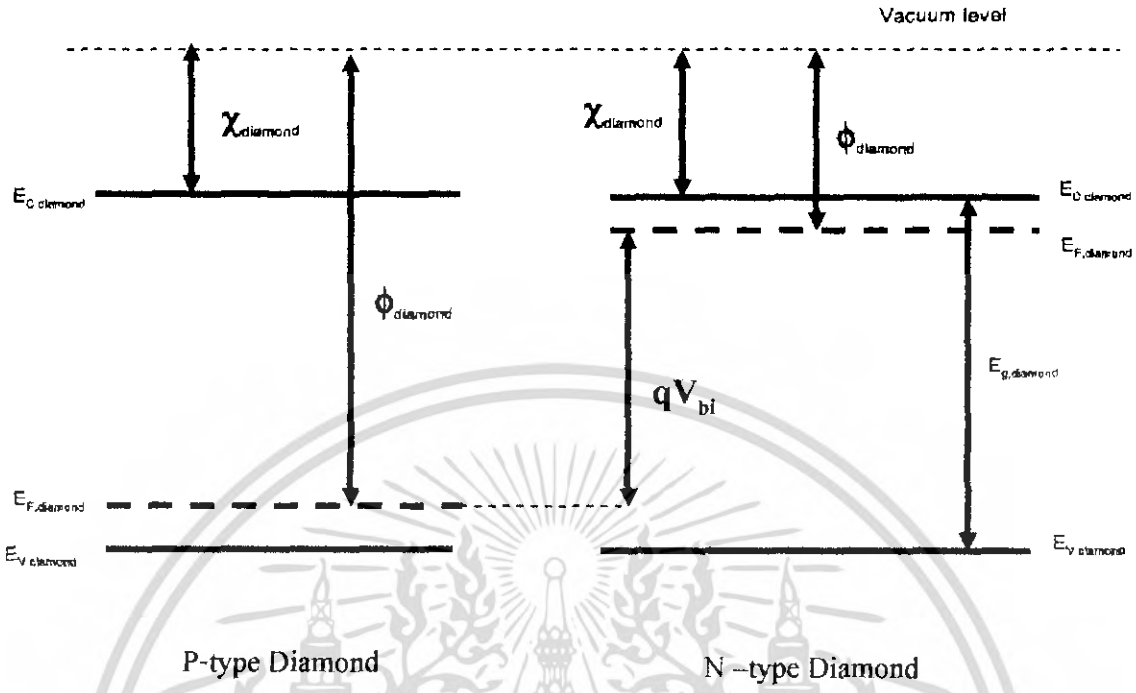
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{oc} และความเข้มของสงอินพุต

2.4 ลักษณะของแถบพลังงาน

2.4.1 แถบลังงานของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี

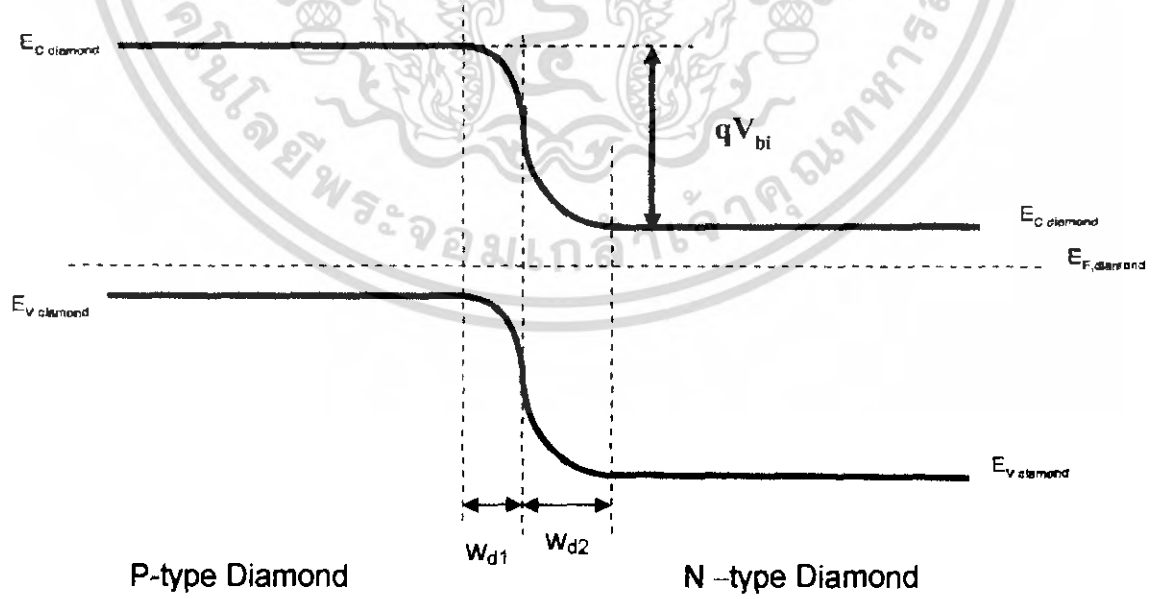
เพื่อที่จะศึกษาการทำงานของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นรอยสัมผัสนั้น ซึ่งในรายงานฉบับนี้สร้างรอยสัมผัสจากฟิล์มเพชรชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี โดยลักษณะแถบพลังงานก่อนที่จะสัมผัสกันของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขณะก่อนสัมผัส

เมื่อสาร 2 ชนิดนี้ต่อกัน อิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดการแพร่ไปสู่ด้านพี และด้านเอ็น จนกระทั่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองมีระดับเท่ากัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรชนิดพีและฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขณะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 และรูปที่2.9 จะได้ว่า barrier height ค่ากำแพงศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจะมีค่าเท่ากับ Vbi

โดยที่ $V_{bi} = Vd1+Vd2$

V_{d1} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

V_{d2} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

และค่าของ Vd1 และ Vd2 สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{d1} = 1/q(E_i-E_F)_{p\text{-}side}$$

$$V_{d2} = 1/q(E_F-E_i)_{n\text{-}side}$$

และค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะ(depletion width) ของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำ ที่หาได้จากสมการ Poisson มีค่าตามสมการดังนี้

$$W_p = W_{d1} = \sqrt{\frac{2\varepsilon N_D Vbi}{qN_A(N_A+N_D)}}$$

$$W_n = W_{d2} = \sqrt{\frac{2\varepsilon N_A Vbi}{qN_D(N_A+N_D)}}$$

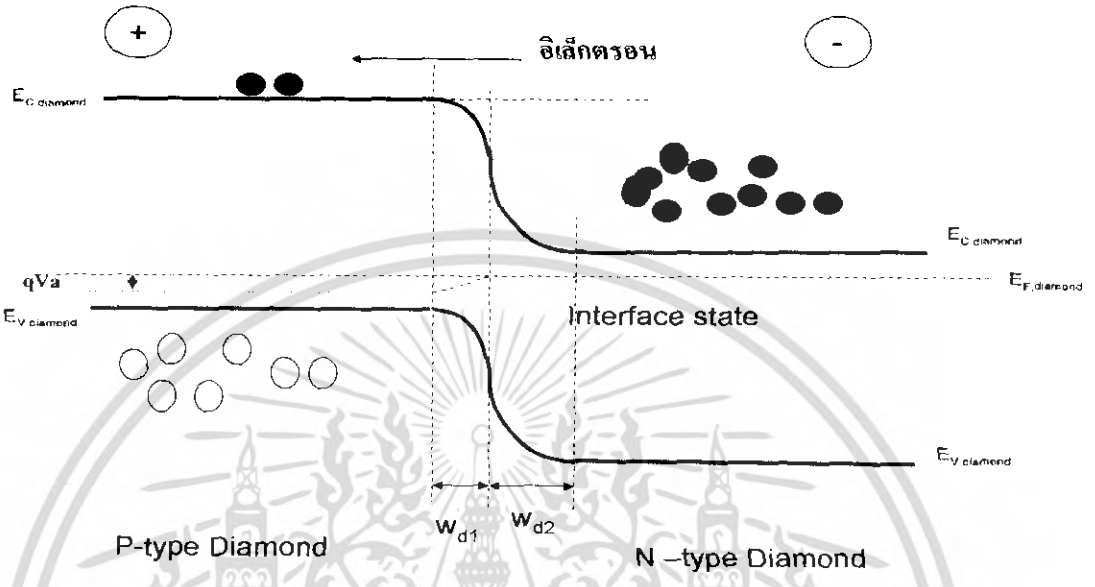
โดยที่ ε คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(dielectric constant)ของสารกึ่งตัวนำเพชร

N_AและN_D คือความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นตามลำดับ

2.4.1.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า

ในสภาวะสมดุลความร้อนจะไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน และโฮลระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด แต่เมื่อเราให้ไบอัสไปข้างหน้ากับรอยต่อนี้ สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนี้จะมีค่าลดลง เมื่อเราสมมุติให้ระดับพลังงานด้านเอ็นคงที่ ดังนั้นระดับพลังงานด้านพีจะมีระดับพลังงานลดลงเท่ากับ qV_a การไหลของกระแสจะมี 2 ลักษณะโดยลักษณะแรงแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยโฮลจะไหลจากแถบวาเลนซ์ด้านฟิล์มเพชรชนิดพีไปยังแถบวาเลนซ์ด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็น เมื่อให้การไบอัสน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่มช่วง Forward (V_F) กระแสจะไหลได้น้อยเนื่องจากมีศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะยังมีค่าสูงอยู่ แต่เมื่อให้ไบอัสมีค่าสูงกว่า V_F จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะมีค่าลดลงโฮลจึงสามารถไหลไปยังด้านเพชรชนิดเอ็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

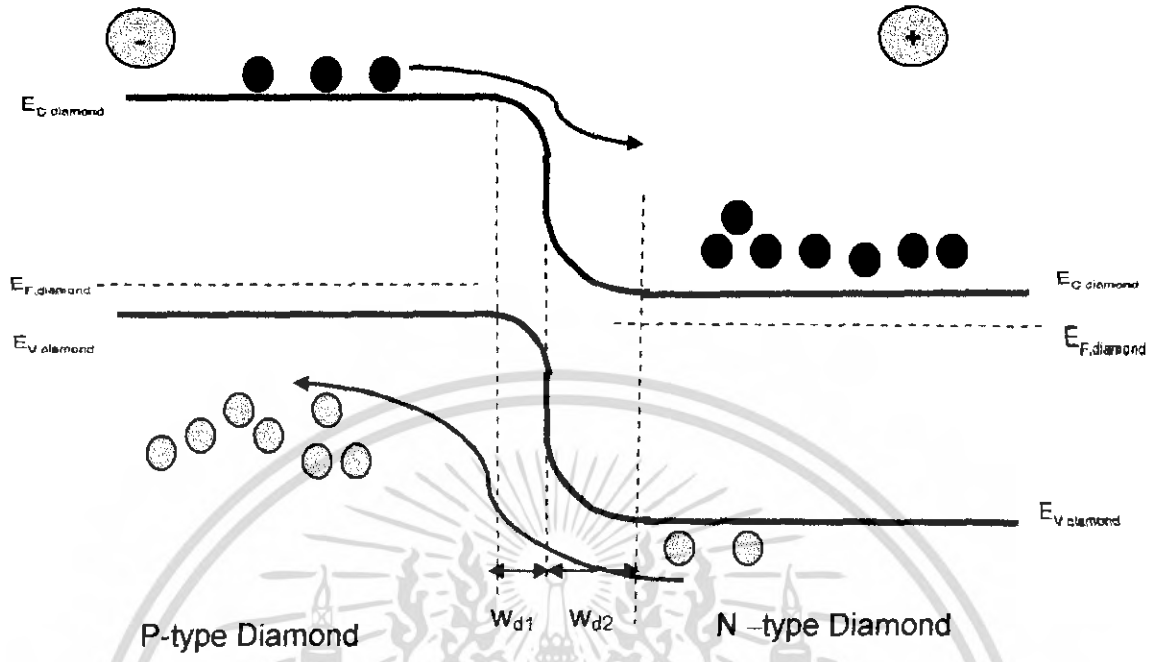


รูปที่ 2.10 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแส ขณะได้รับไบอัสตรง

2.4.1.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าน้อยๆ ซึ่งน้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มช่วง Reverse (V_R) อิเล็กตรอนจากฟิล์มเพชรชนิดพีจะไหลมายังด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็น โฮลจากด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็นจะไหลมายังฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งกระแสจะยังคงไหลน้อยเนื่องจากเกิดจากการไหลของประจุพาหะจำนวนน้อย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับจนระดับพลังงานวาเลนซ์ด้านฟิล์มเพชรชนิดพี มีระดับสูงกว่าแถบความนำของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น จะเกิดการทะลุผ่าน (Tunneling) คืออิเล็กตรอน ด้านฟิล์มเพชรชนิดพีจะสามารถทะลุไปยังแถบความนำด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ได้ และโฮลบริเวณแถบวาเลนซ์ด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็น จะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนบางส่วน ซึ่งเคลื่อนที่ทะลุรอยต่อที่บริเวณ Depletion Region

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

2.5 ทฤษฎีรอยต่อ

ในโครงงานนี้เราจะทำการทดลองสร้างรอยต่อของฟิล์มเพชรชนิดพี กับฟิล์มเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อนซึ่งในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีนี้เราจะต้องมีฐานรองในการสร้างฟิล์มเพชร ซึ่งเราจะใช้ซิลิคอนชนิดเอ็นเป็นฐานรองในการสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็นแล้วจึงนำไปสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีทับลงบนฟิล์มเพชรชนิดเอ็นอีกครั้ง ทำให้อุปกรณ์ที่เราสร้างจะมีรอยต่อที่นอกเหนือจากรอยสัมผัสพีเอ็นอยู่ 3 รอยสัมผัส คือ รอยต่อระหว่างฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นกับขั้วโลหะ รอยสัมผัสระหว่างฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดเอ็น และรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับขั้วโลหะ ซึ่งสำหรับรอยต่อระหว่างฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นกับขั้วโลหะ และรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับขั้วโลหะ นั้นเป็นที่รู้กันดีแล้วว่าต้องทำให้เป็นรอยต่อแบบโอห์มมิคซึ่งจะขึ้นอยู่กับโลหะที่นำมาทำขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3
กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร โดยจะแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ นั่นคือ กระบวนการเตรียมฐานรอง และกระบวนการสร้างไดโอด ดังจะกล่าวต่อไปนี้

3.1 กระบวนการเตรียมฐานรอง

การทดลองนี้ เลือกใช้ซิลิคอน เป็นฐานรองในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยใช้ซิลิคอนชนิดพีระนาบ (111) ก่อนที่จะนำฐานรองซิลิคอน นี้ไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร จำเป็นต้องทำความสะอาดเบื้องต้น และเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ดังนี้

การเตรียมฐานรองซิลิกอนจะใช้ซิลิคอนขัดมันซึ่งมีลักษณะเรียบและมันเป็นกระจกเงา โดยเริ่มจากการทำความสะอาดเริ่มต้นตามกระบวนการดังนี้

1.กำจัดฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกผิวหน้าซิลิคอน ในน้ำ DI (Deionizer water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)

2.กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene)

3.ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วย อะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.2 การเตรียมผิวหน้าฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

หลังจากทำความสะอาดเบื้องต้นกับฐานรองซิลิคอนแล้ว จะทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ก่อนนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชร โดยการเตรียมพื้นผิวฐานวิธีนี้จะใช้ครีมเพชรขนาด 1 μm ขัดที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ซึ่งมีลักษณะเรียบและขัดมันเป็นกระจกเงา (Mirror polished) ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง ผลจากการขัดด้วยครีมเพชรจะทำให้เกิดรอยขีดเล็ก ๆ ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเพื่อเพิ่มอัตราการเกิด ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรเร็วขึ้น ภายหลังจากขัดแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้วต้องนำแผ่นซิลิคอนไปทำการตัดเพื่อทำเป็นฐานรอง แล้วล้างซิลิคอนอีกครั้งตามขบวนการดังนี้

1. กำจัดฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกผิวหน้าซิลิคอน ในน้ำ DI (Deionizer water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

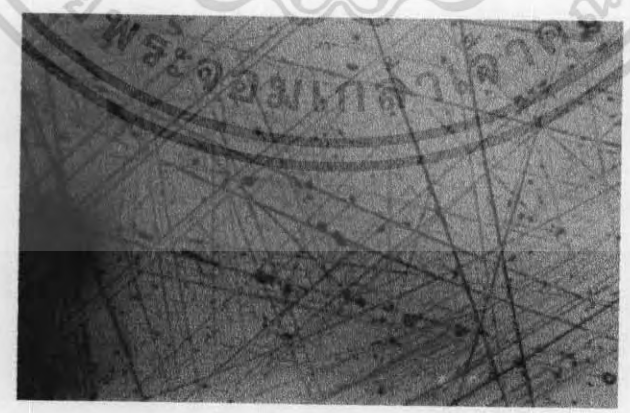
2. กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene)

3. ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วย อะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4. ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนอีกครั้ง

รูปที่ 3.1 ครีมเพชรที่ใช้ในการขัดผิวหน้าฐานรองซิลิคอนขนาดเมล็ดผลึก 1μm

จากนั้น นำแผ่นซิลิคอน นี้ไปตรวจสอบรอยขัดที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งลักษณะผิวหน้าที่ผ่านการขัดด้วยครีมเพชรนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นฐานรองที่พร้อมจะนำไปสังเคราะห์ฟิล์มต่างๆ ได้ต่อไป

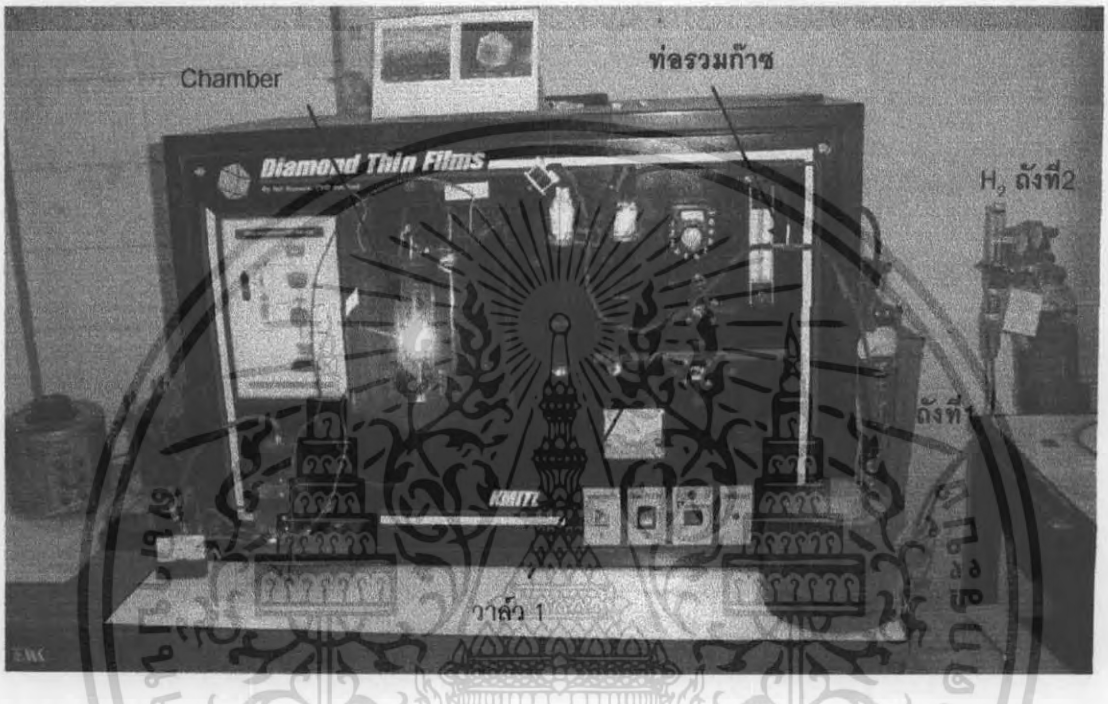


รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าฐานรองซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์หลักจากขัดด้วยครีมเพชรขนาดเมล็ด 1μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรทั้งชนิดพีและชนิดอินทรินซิดในการวิจัยนี้ จากอาศัยกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค HFCVD สามารถแสดงระบบที่ประกอบขึ้นเองซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถแสดงได้ จากแผนภาพในรูปที่ 3.3 โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1.เปิดสวิตซ์ Power และเปิดสวิตซ์พัดลมระบายความร้อน

2.ตรวจสอบวาล์ว1 ให้อยู่ตำแหน่งเปิดออก และปุ่มปรับกระแสของPower supply ให้อยู่ตำแหน่งซ้ายสุด

3.เปิดก๊าซไฮโดเจนทั้ง 2 ถึง เข้าสู่ Chamber เป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อทำให้บรรยากาศใน Chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว

4.ปิดวาล์ว 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนถึงที่ 1 ไหลผ่านแหล่งจ่ายเพื่อพาไอระเหยของแอลกอฮอล์เข้า Chamber โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter ขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนถึงที่ 2 ยังคงจ่ายก๊าซไฮโดรเจนโดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow -meter โดยไอระเหยของแอลกอฮอล์จะรวมกับก๊าซไฮโดรเจนที่ท่อรวมก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.ค่อยๆ ปรับปุ่มจ่ายกระแสไปทางขวาอย่างช้าๆ ซึ่งในขณะนี้กระแสจะถูกจ่ายให้กับไส้หลอดทังสเตน ทำการจ่ายกระแสไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเราได้อุณหภูมิที่ไส้หลอดที่ต้องการ

6.ปรับระยะห่างระหว่างไส้หลอดทังสเตนกับฐานรองซิลิกอนให้ได้ระยะที่เหมาะสม

7.สร้างฟิล์มเพชรตามระยะเวลาที่ต้องการ

8.เมื่อครบเวลาสร้างฟิล์มเพชรที่กำหนดแล้วค่อยๆปรับปุ่มจ่ายกระแสไปทางซ้ายมืออย่างช้าๆ พร้อมทั้งปิดถังก๊าซไฮโดรเจนปิดสวิตซ์ Power

9.ปิดถังแก๊ซไฮโดรเจนทั้ง 2 ถัง แล้วปรับวาล์วเพื่อไล่ก๊าซไฮโดรเจน แล้วทำการเปิดวาล์วตัวที่1 แล้วปิดวาล์วตัวที่ 2 ควบคุมอัตราการไหล Flow meter รอจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนที่ค้างอยู่ไหลออกหมด โดยสังเกตจากฟองน้ำในขวดรูปชมพู่

3.4 การ ตรวจสอบฟิล์มด้วยภาพถ่าย SEM และเทคนิค Raman Spectroscope

3.4.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรชนิดพี

เพื่อตรวจสอบสภาพของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ว่าเป็นฟิล์มเพชรจริงหรือไม่ และมีชนิดของสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดใด

- สังเคราะห์ฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.3 บนแผ่นซิลิกอนฐานรองชนิดพีโดยใช้อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน(B:C) ที่ 1000 ppm เป็นเวลา 30 นาที สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี แล้วทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2

- นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการวัดด้วยเทคนิคRaman Spectroscope และนำเอาไปถ่ายภาพ SEMของฟิล์มเพชร

-นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการวัดหาชนิดของสารกึ่งตัวนำว่า เป็นชนิดใดโดยวิธีการเข็มร้อน(Hot point probe) เพื่อตรวจสอบการคงสภาพของฟิล์มเพชรว่าเป็น P- type

3.4.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น

เพื่อตรวจสอบสภาพของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ว่าเป็นฟิล์มเพชรจริงหรือไม่ และมีชนิดของสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดใด

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.3 บนฟิล์มเพชรชนิดเอ็น โดยใช้อัตราส่วนของฟอสฟอรัสต่อคาร์บอน(P:C) ที่ 500 ppm เป็นเวลา 30 นาที สำหรับการสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็น แล้วทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2

- นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการวัดด้วยเทคนิคRaman Spectroscope และนำเอาไปถ่ายภาพ SEMของฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการวัดหาชนิดของสารถึ่งตัวนำว่า เป็นชนิดใดโดยวิธีการเข็มร้อน(Hot point probe) เพื่อตรวจสอบการคงสภาพของฟิล์มเพชรว่าเป็น N- typeหรือไม่

3.5 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มเพชร

การศึกษาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง เพื่อทำการวัดหาค่ากระแส และแรงดันทางไฟฟ้า และเมื่อฉายความเข้มแสงลงบนฟิล์มเพชรที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมามีผลทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร

3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

- สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีบนแผ่นซิลิกอนชนิดพี โดยใช้อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน(B:C) ที่ 1000 ppm เป็นเวลา 30 นาทีแล้วสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นทับ โดยใช้อัตราส่วนของฟอสฟอรัสต่อคาร์บอน(P:C) ที่ 500 ppm 5000 ppm 10000 ppm เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2
- เมื่อทำกระบวนการสร้างตามหัวข้อที่ 3.3 เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นมาแล้วต่อไปก็ทำการบอร์นจุดขึ้นมาเพื่อทำการวัดหาค่าแรงดัน และกระแส ต่อไป

3.5.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาว่าเมื่อถูกฉายความเข้มแสงลงบนของฟิล์มเพชร ในความเข้มแสงที่แตกต่างกัน คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรจะเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มแสงที่ฉายลงบนฟิล์มเพชร โดยให้ความเข้มแสงที่ 1000, 3000, 5000, 7000, 9000, 10000 Lux ที่ทำการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

3.5.3 การศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร

ในหัวข้อนี้จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรลงบนฐานรองซิลิคอน โดยทำการสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ กัน คือ 30, 40 และ 50 นาที โดยหลังจากสังเคราะห์นำฟิล์มเพชร ที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM เพื่อดู ความหนาของฟิล์มเพชร

3.6 การศึกษาผลของความเข้มข้น P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสของโฟโตไดโอด

ในหัวข้อนี้เพื่อทำการตรวจสอบว่าเมื่อใช้ผลของอัตราส่วน P:C โดยใช้อัตราส่วนของฟอสฟอรัสต่อคาร์บอน(P:C) ที่ 500 ppm 5000 ppm 10000 ppm เป็นเวลา 30 นาที และใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน(B:C) ที่ 1000 ppm เป็นเวลา 30 นาที ว่าผลของอะตอมสารเจือที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาทำการทดลองตามค่าต่างๆ โดยเทียบอัตราส่วนของ P:C ที่ 500 ppm 5000 ppm 10000 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับ B:C ที่ 1000 ppm ว่าเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของอะตอมสารเจือของชนิดเอ็นที่ 500 ppm 5000 ppm 10000 ppm จะมีการเปลี่ยนแปลงต่อคุณสมบัติต่อกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเป็นอย่างไร โดยสร้างโฟโตไดโอด ตามกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด

3.7 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสของโฟโตไดโอด

เพื่อทำการตรวจสอบว่าเมื่อโฟโตไดโอดจากที่มีอัตราส่วน P:C ต่างค่าต่างๆ ที่ 500 ppm 5000 ppm 10000 ppm โดยใช้เวลาในการสร้างเป็นเวลา 30 นาที และใช้อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน(B:C) ที่ 1000 ppm เป็นเวลา 30 นาที ที่ความเข้มแสงตามค่าต่างๆมีผลต่อคุณสมบัติต่อกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเป็นอย่างไร โดยให้ค่าความเข้มแสงต่างๆคือ 1000, 3000, 5000, 7000, 9000, 10000 Lux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่4

ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้าง และการกำหนดเงื่อนไขการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆจากบทที่ 3 แล้ว ในบทนี้จะเป็นการเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy(SEM) และเทคนิค Raman Spectroscopy นอกจากนี้ยังได้ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดด้วย

4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

4.1.1 การตรวจสอบคุณสมบัติโดยอาศัยเทคนิควิธี Scanning Electron microscopy (SEM)

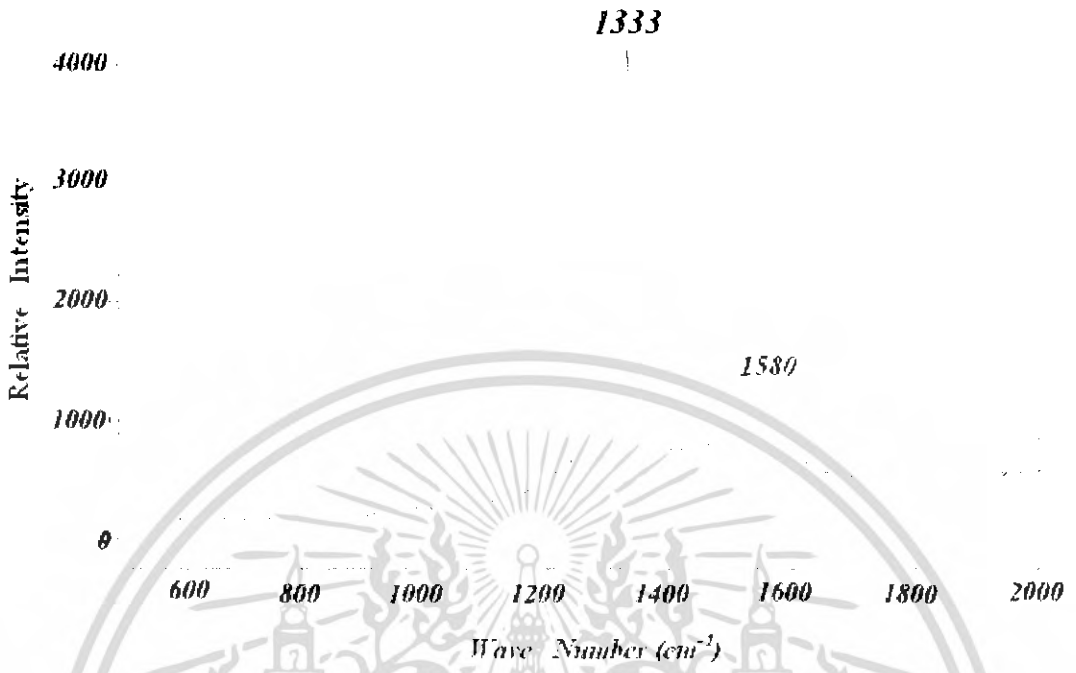
การตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆที่สร้างได้นั้นจะใช้ SEM เพื่อแสดงพื้นผิวและระนาบของฟิล์มเพชร และ Raman Spectroscopy เพื่อแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นเพชร ที่สร้างขึ้นด้วยระบบ HFCVD ผลการตรวจสอบด้วย SEM นั้นแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้นมีระนาบ <111>

รูปที่ 4.1 ผลการตรวจสอบด้วย SEM

4.1.2 การตรวจสอบคุณสมบัติโดยอาศัยเทคนิควิธี Raman Spectroscopy

ส่วนการตรวจสอบด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy นั้นแสดงดังรูปที่ 4.2 จากรูปจะเห็นว่าค่ายอดสูงสุดนั้น จะมีค่าอยู่ที่ 1333 cm^{-1} ซึ่งมีค่ายอดสูงสุดใกล้เคียงกับเพชรในธรรมชาติมาก ซึ่งเพชรในธรรมชาติมีค่ายอดสูงสุดที่ 1332 cm^{-1} ซึ่งถือได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะใกล้เคียงเพชรจริง ซึ่งจากกราฟยังจะเห็นว่า มียอดคลื่น 1580 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของกราไฟต์ แต่มีความสูงต่ำแสดงว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีกราไฟต์ปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.2 ลักษณะของ Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของโฟโตไดโอด

โดยในการทดลองนี้จะศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของโฟโตไดโอดที่ความเข้มข้นของสารฟอสฟอรัสต่อคาร์บอน (P:C) ของความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (ppm) ในแบบต่างๆ ว่ามีผลต่อต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตโอด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารฟอสฟอรัสต่อคาร์บอน (P:C) อย่างไร

4.2.1 ผลของอัตราส่วน P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า

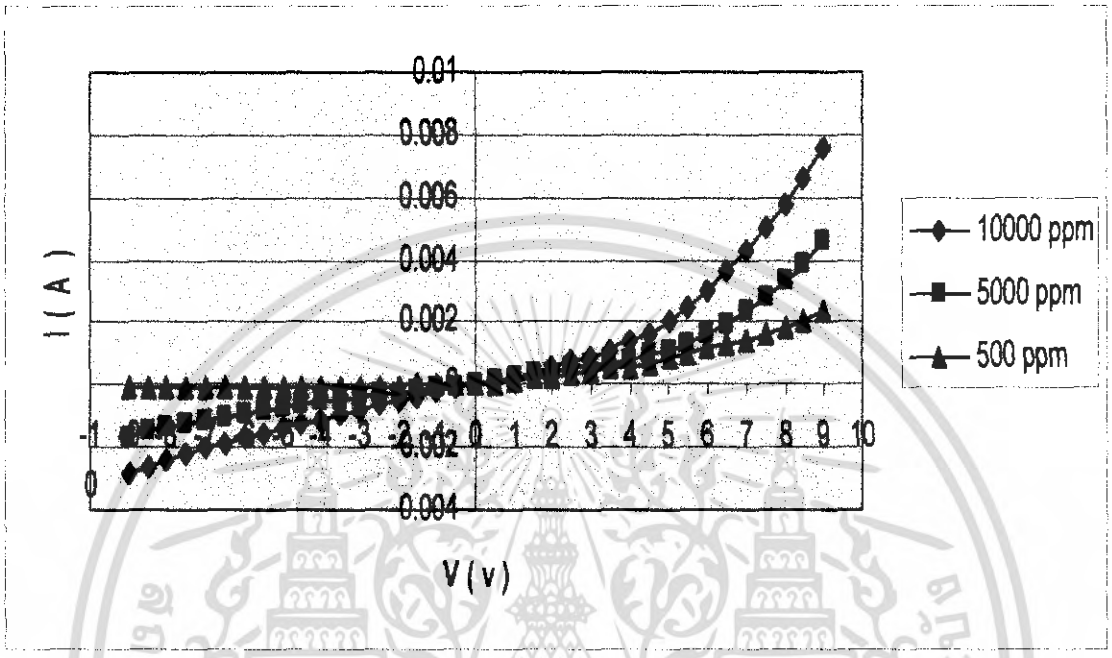
ในหัวข้อนี้จะศึกษาว่าผลของอัตราส่วน P:C มีผลต่อคุณสมบัติต่อกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด โดยใช้ B:C 1000 ppm นาน 30 นาที โดยความหนาของฟิล์มเพชร 3 μm

ตารางที่4.1 ผลของอัตราส่วน P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด

	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (ppm)	**ความหนาของฟิล์มเพชร (μm)**
P/C	**500**	**3**
	5000	**3**
	10000	**3**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ P:C กระแสและแรงดันจะเปลี่ยนแปลงได้ดังในรูปที่ 4.3 ที่ได้แสดงผลการทดลองไว้



รูปที่4.3 แสดงลักษณะกระแส-แรงดัน เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ P:C

จากในรูปที่4.3 จะแสดงให้เห็นว่าถ้าความเข้มข้นของ P:C มีค่ามากขึ้น กระแสและแรงดันจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากนั้นค่าความเข้มข้นของ P:C ต่างๆ กันก็จะมีกระแสที่อิ่มตัวไหลย้อนกลับของโฟโตไดโอดดังในตารางที่ 4.2

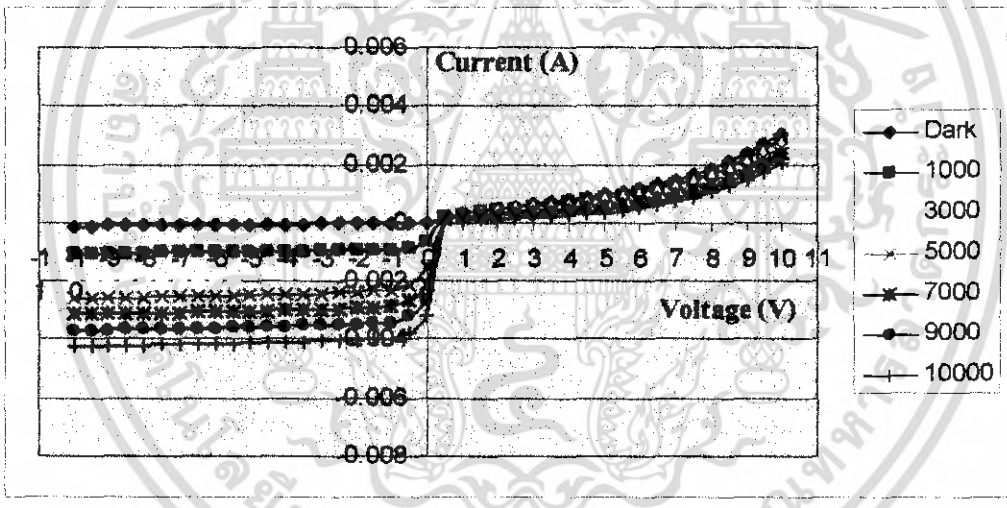
ตารางที่ 4.2 ค่าของกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับ ของโฟโตไดโอด กรณี P:C ต่างๆกัน

อัตราส่วน P:C (ppm)	IS (uA)
500	10
5000	16.7
10000	36.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลของความเข้มแสง ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด

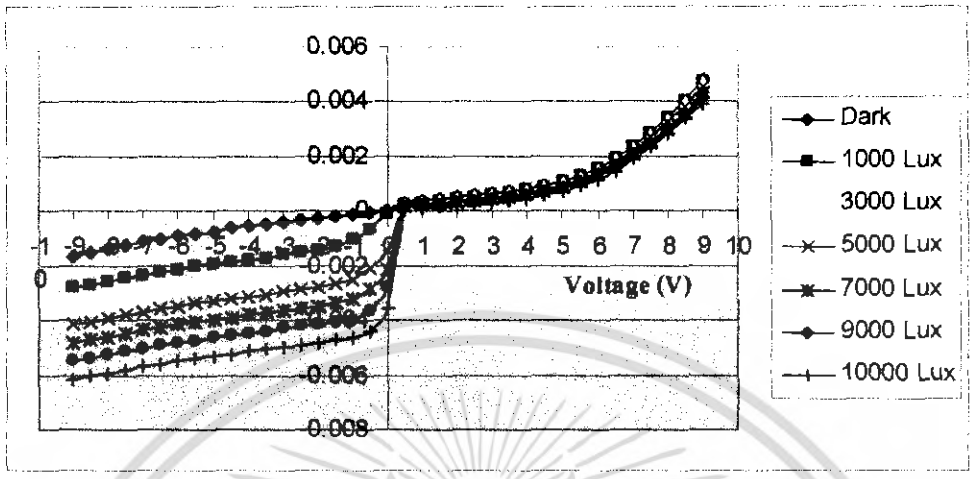
ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาของความเข้มแสง ที่มีผลทำให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในอัตราความเข้มข้น P:C ที่ 500 ppm โดยในรูปที่ 4.4 จะแสดงให้เห็นด้าน Forward Biased นั้นกระแสเอาท์พุทที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดจากการหักล้างกันระหว่างกระแสที่เกิดจากแสงลบด้วยกระแสของไดโอด ถึงแม้เราจะให้ความเข้มแสงที่มากขึ้นแต่เมื่อเราไบอัสตรงมากขึ้นกระแสที่มาหักล้างกับกระแสที่มาจากแสงก็มีค่ามากขึ้นด้วยกระแสเอาท์พุทจึงมีค่าลดลง ส่วนด้าน Reverse Biased นั้นกระแสเอาท์พุท จะเกิดจากการรวมตัวกันของกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ(I_S)กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง(I_L)จึงทำให้เมื่อเราฉายแสงที่มีความเข้มแสงสูงขึ้นกระแสที่มาจากแสงก็จะมีค่าสูงขึ้น ยิ่งความเข้มแสงมากก็จะมีกระแสและแรงดันมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มแสง 10000 Lux ที่แรงดัน -9V จะได้กระแสที่ 4 mA ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของ โฟโตไดโอดในกรณี P:C 500 ppm ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

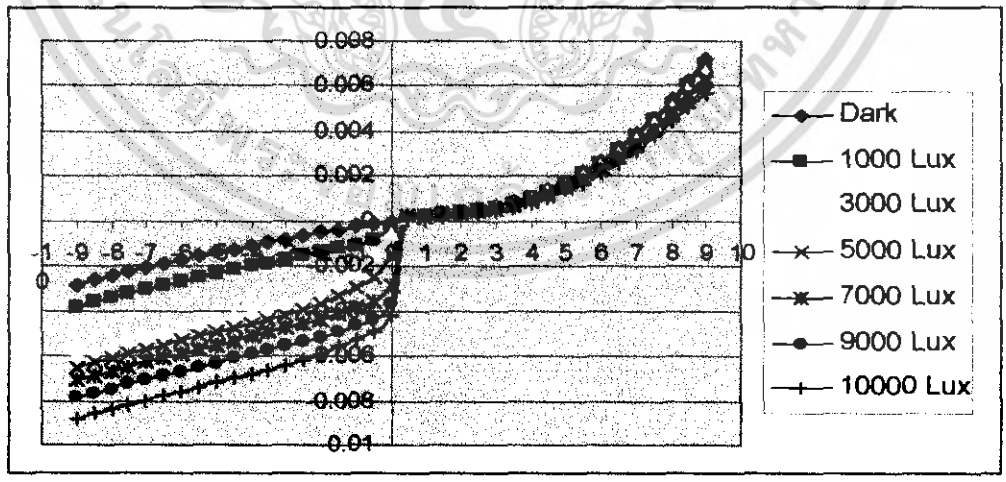
ส่วนในรูปที่ 4.5 ที่อัตราการเจือสาร P:C ที่ 5000 ppm ที่ด้าน Reverse Biased จะเห็นว่าเมื่ออะตอมสารเจือมีค่ามากขึ้น กระแสและแรงดันก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของอะตอมสารเจือ ซึ่งที่ความเข้มแสง 10000 Lux ที่ แรงดัน-9V จะได้กระแสด้าน Reverse เท่ากับ 6 mA ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี P:C 5000 ppm ที่ความเข้มแสงต่างๆ

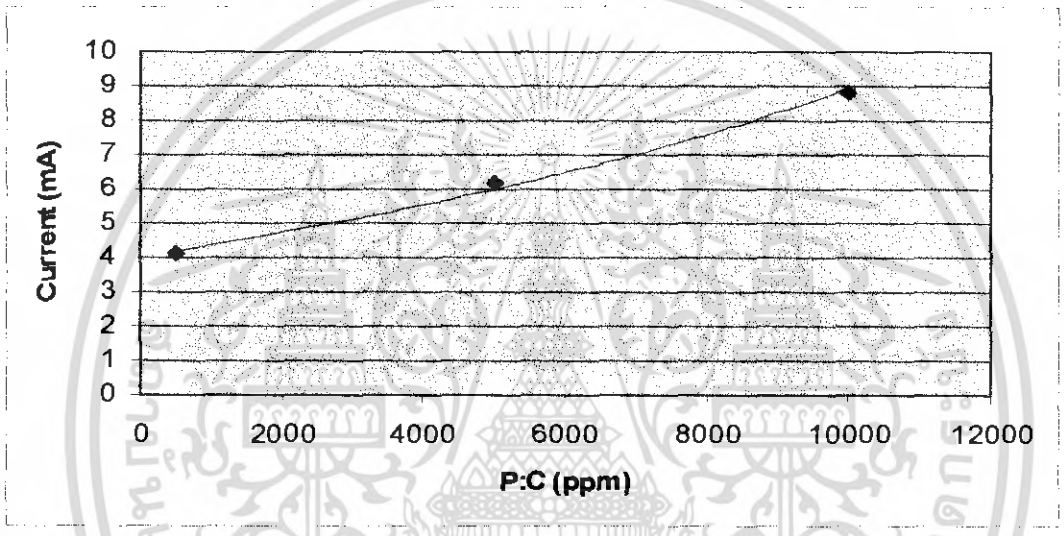
ส่วนในรูปที่ 4.6 ทำการทดลองที่อะตอมสารเจือ P:C ที่ 10000 ppm ที่ด้าน Reverse Biased จะเห็นได้ชัดว่ากระแสและแรงดันมีแนวโน้มเพิ่มสูงมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะตอมสารเจือที่ใช้ในการทดลองมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบความเข้มข้นอะตอมสารเจือในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีค่ากระแสและแรงดันเพิ่มมากขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.6 ที่ความเข้มแสง 10000 Lux ที่แรงดัน -9V จะได้กระแสด้าน Reverse เท่ากับ 9 mA



รูปที่ 4.6 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของ โฟโตไดโอดในกรณี P:C 10000 ppm ที่ความเข้มแสงต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองต่อไปของความเข้มแสงของโพโตไดโอด ที่ความเข้มข้น P:C ที่ 500 ppm 5000ppm และ 10000ppm ผลของความเข้มแสงขณะกระแสลัดวงจรในรูปที่4.5 จะแสดงให้เห็นว่ายิ่งมีความเข้มแสงมากกระแสจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพลังงานแสงจะไปกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮล แพร่ที่บริเวณรอยต่อและภายในเนื้อสาร ซึ่งจำนวนอิเล็กตรอน-โฮลแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงทำให้เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นทำให้มีอิเล็กตรอน-โฮลแพร่เพิ่มขึ้นกระแสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสต่อความหนาแน่นอะตอมสารเจือค่าต่างๆ

4.3 สรุปผลการทดลอง

ในรายงานนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์จากฟิล์มเพชร และศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ซึ่งในขั้นตอนการสร้างนั้นเราจะเริ่มต้นด้วยการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีลงบนฐานรองซิลิกอนชนิดพีโดยการใช้อะตอมสารเจือโบรอนผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเหล่งจ่ายในการทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรที่ทำการสังเคราะห์ได้

จากการทดลองเมื่อเรานำไปทำการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร จะเห็นได้ว่าการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรจะเห็นได้ว่าฟิล์มเพชรที่เราสร้างได้นั้นเป็นฟิล์มเพชรจริงแต่จะมีกราไฟท์ปนอยู่บ้างเล็กน้อย โดยในวิธี SEM นั้นจะเห็นได้ว่าเนื้อฟิล์มที่แสดงพื้นผิวในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติความเป็นเพชร โดยลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มที่สร้างได้นั้นมีระนาบ(111) และส่วนในวิธี Raman Spectroscopy ดังรูปที่ 4.2 จากรูปจะเห็นว่าค่ายอดสูงสุดนั้น จะมีค่าอยู่ที่ 1333 cm^{-1} ซึ่งมีค่ายอดสูงสุดใกล้เคียงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ได้มีลักษณะใกล้เคียงเพชรจริง ซึ่งจากกราฟยังจะเห็นว่า มียอดคลื่น 1580 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของกราไฟต์ แต่มีความสูงต่ำแสดงว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีกราไฟต์ปะปนอยู่ในปริมาณที่ต่ำ

จากการทดลองความหนาแน่นของอะตอมของฟอสฟอรัสต่อคาร์บอน (P : C) ได้แสดงให้เห็นว่ายิ่งค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ P:C มีค่าความหนาแน่นของอะตอมสูงเท่าไรก็ยิ่งทำให้ได้ค่ากระแสและค่าแรงดันสูงขึ้นตามไปด้วยดังในรูปที่4.3 แต่ในทางกลับกันยิ่งมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ P : C มีค่าน้อยเท่าไรก็ยิ่งทำให้มีกระแสรั่วไหลออกมาน้อยเท่านั้น ดังในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่ค่าความหนาแน่น P:C ที่ 10000 ppm มีค่ากระแสรั่วไหลถึง 36.77 uA แต่ถ้าค่าความหนาแน่น P:C ที่ 500 ppm มีค่ากระแส่รั่วไหลแค่ 10 uA จะเห็นได้ว่าแตกต่างกันเกือบ 4 เท่าเลยที่เดียว

จากการทดลองเราได้ทำการทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดัน โดยให้ผลของความเข้มแสงของโพโตไดโอดตามค่าต่างๆ จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 4.5 รูปที่4.6 และในรูปที่ 4.7 ที่อัตราความเข้มข้น P:C ที่ 500 ppm 5000ppm และ 10000ppm ตามลำดับ โดยเราได้ทำการฉายแสงเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนมากขึ้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าของระดับพลังงานเฟอร์มิเข้าใกล้ระดับอินทรินซิกมากขึ้น เมื่อรอยสัมผัสได้รับการForward Biasedนั้นกระแสโฮลที่ไหลจากฟิล์มเพชรชนิดพีจะไหลไปยังฟิล์มเพชรชนิดเอ็นได้มากขึ้นเนื่องจากกำแพงศักย์ที่กั้นโฮลมีค่าลดลงและอิเล็กตรอนที่ไหลจากทางด้านเอ็นจะเกิดการรวมตัวกับโฮลที่บริเวณ interface state ทำให้เกิดกระแสเนื่องจากการรวมตัวมากขึ้น ทำให้กระแสด้านForward Biasedมีค่ามากขึ้นแต่มีค่าเพียงเล็กน้อยเพราะว่าเพชรมีค่าช่องว่างแถบลังงานสูงจึงทำให้กำแพงศักย์ที่ลดลงนั้นยังมีค่าสูงอยู่นั้นเอง ในกรณีการให้ Reverse Biased นั้นกระแสจะไหลได้น้อยลงเพราะกำแพงศักย์นั้นจะมีค่าสูงขึ้นทำให้โฮลที่เกิดเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ได้น้อยลง และเมื่อเราทำการเพิ่มความเข้มแสงที่ฉายตามค่าต่างๆ มากขึ้นนั้น ปริมาณกระแสในช่วงของการ Reverse Biased นั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในช่วงของการForward Biased นั้นกระแสก็มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อเราให้การ Reverse Biased นั้นกระแสเอาท์พุท จะเกิดจากการรวมตัวกันของกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ(I_S)กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง(I_L)จึงทำให้เมื่อเราฉายแสงที่มีความเข้มแสงสูงขึ้นกระแสที่มาจากแสงก็จะมีค่าสูงขึ้น ขณะที่กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ(I_S)มีค่าคงที่ทำให้กระแสด้านการ Reverse Biased นั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และยิ่งมีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือเพิ่มมากขึ้นก็ยิ่งทำให้กระแสและแรงดันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และส่วนผลความเข้มแสงของกระแส ในรูปที่4.7 จะแสดงให้เห็นว่ายิ่งมีความเข้มแสงมากกระแสจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพลังงานแสงจะไปกระตุ้นให้เกิด e^- โฮลแพร่ที่บริเวณรอยต่อ และภายในเนื้อสาร ซึ่งจำนวน e^- โฮลแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน-โฮลแพร่ที่บริเวณรอยต่อ และภายในเนื้อสารซึ่งจำนวน อิเล็กตรอน-โฮลแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงทำให้เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นทำให้มี อิเล็กตรอน-โฮลแพร่เพิ่มขึ้น กระแสจึงมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนในการไบอัสตรงนั้นกระแสเอาท์พุทที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดจากการหักล้างกันระหว่างกระแสที่เกิดจาก แสงลบด้วยกระแสของไดโอดเมื่อวัดในที่มืดจึงทำให้ ถึงแม้เราจะให้ความเข้มแสงที่มากขึ้นแต่เมื่อเราไบอัสตรงมากขึ้นกระแสที่มาหักล้าง กับกระแสที่มาจากแสงก็มีค่ามากขึ้นด้วยกระแสเอาท์พุทจึงมีค่าลดลง

จากผลการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร เราจะเห็นได้ว่าฟิล์มเพชรสามารถทำงานได้ดีในอุณหภูมิสูง และสามารถนำไปใช้เป็นโฟโตไดโอดได้ ซึ่งเราจะต้องทำการศึกษาคุณสมบัติอื่นๆของฟิล์มเพชร เพื่อนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. กอบศักดิ์ ศรีประภา "การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะที่ ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541

2. คณรัชน์ วรรณา "การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของพอรัสซิลิกอนกับฟิล์มเพชร" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2546

3. นิรุธ ปิ่นเกตุ "การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544

4. ลัดดาวัลย์ สุภาดี "การปลูกผลึกเพชรด้วยเทคนิค HFCVD " วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544

5. สมเกียรติ ศุภเดช.2545. "เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์" .พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ.

6. K.E.Spear,J.P. Dismukes, "synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology" ,John Wiley and son, Inc. Newyork,1994

7. R.F. Davis, "Diamond Films and Coating" Noyes Publication, Park Ridge, New Jersey,1993

8. Lawrence S. Pan , Don R.Kania. 1995. Diamond : Electronic Properties and Applications. Boston : Kluwer Academic Publishers.

9. Teompong Pheckul "Study on Electrical Characteristics of p-Type Diamond/n-Type Silicon Heterojunction Diodes," Dotoral Thesis.,Tokai University Kyushu Campus.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities

Material	Conductivity(W/cm.°c)
Diamond(Type II)	20.00
Boron Nitride(Theory)	13.00
Silicon Carbide	4.90
Copper	3.80
Gold	3.11
Tungsten	1.70
Silicon	1.50
Graphite	0.80-2.50
Gallium Arsenide	0.46
Germanium	0.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบ Molar Heat Capacity

Material	Capacity (J/Mole.°c)
Silver	25.50
Gold	25.41
Copper	24.50
Aluminium	24.37
Silicon	19.85
Graphite	8.54
Diamond	6.19
Water	4.22
BeO 0.74 Cal/cc Sapphire 0.69 Cal/cc Si 0.42 Cal/cc	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบ Thermal Expansion Coefficients

Material	Coefficient (x10 $^{-6}$/°c)
Silicon Dioxide	0.5
Diamond(300K)	0.8
Diamond(193K)	0.4
Diamond(400-1200K)	1.5
Silicon	2.6
Aluminum nitride	4.5
Tungsten (Polycrystal)	4.5
Sapphire	5.5
Germanium	5.7
Gallium Arsenide	5.9
Beryllium Oxide	5.9
YAG	7.8
Graphite (in plane)	8.8
Platinum(Polycrystal)	8.9
Gold(Polycrystal)	14.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบ Hardness

Material	Knoop Hardness(kg/mm^2) (298K)
Diamond	5700-10400
Cubic BN	4500
Boron Carbide	2250
Tungsten Carbide	2190
Titanium Oxide	2000
Silicon Carbide	1875-3980
Titanium Nitride	1800
High Carbon Steel	400
Copper	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบ Optical properties

Material	Refractive Index
Germanium	4.00-4.10
Silicon	3.42-3.50
Gallium Arsenide	3.34-2.12
Diamond	2.41-2.44
Sapphire	1.58-1.83
Fused Silica	1.40-1.48
Lithium Fluoride	1.11-1.45
Magnesium Oxide	1.62-1.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้