

โซลาร์เซลล์ โครงสร้างเนื้อสารต่างชนิดกัน

Porous Silicon and P-Type Diamond Thin Film Heterojunction of Solar Cell



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 50312

วัน,เดือน,ปี. 29 เม.ย. 2547

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซลาร์เซลล์ โครงสร้างเนื้อสารต่างชนิดกัน

Porous Silicon and P-Type Diamond Thin Film Heterojunction of Solar Cell



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2545

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โซลาร์เซลล์ โครงสร้างเนื้อสารต่างชนิดกัน

ผู้จัดทำ

1. นายชญาณ์ทัต ทิพย์ทัศน์
2. นายสิทธิ อภินันทพร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซลาร์เซลล์ โครงสร้างเนื้อสารต่างชนิดกัน

Porous Silicon And P-Type Diamond Thin Film Heterojunction Of Solar Cell

นายชฎานันท์ ทิพย์ทัศน์ 43015206

นายสิทธิ อภินันทพร 43015236

โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โซลาร์เซลล์โครงสร้างเนื้อสารต่างชนิดกัน

นักศึกษา

นาย ชญานัท ทิพยทัศน์ 43015206

นาย สิทธิ อภินันทพร 43015236

สาขาวิชา

วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ปีการศึกษา

2545

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็น การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดของพอร์สซิลิกอนและฟิล์มเพชร

ในการศึกษานั้นเราได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเจือ โบรอน 1 ppm และ 10 ppm จะให้กระแสไฟฟ้าออกมา ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเจือ โบรอนที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า ความเข้มข้นสารเจือ โบรอนที่ 10 ppm จะให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ดีกว่าที่ 1 ppm ซึ่งสามารถให้ประสิทธิภาพ 13.23 %



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	X
ศัพท์เทคนิค.....	XII
คำนำ.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	1
1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	2
1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	2
1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน.....	2
1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	3
1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ.....	3
1.3 พอร์สซิลิกอน.....	5
1.4 สารกึ่งตัวนำเพชร.....	7
1.5 คุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	8
1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน.....	10
1.7 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	12
1.7.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy.....	12
1.7.2 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM).....	13
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	14
2.1 พอร์สซิลิกอน.....	14
2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน.....	14
2.1.2 ลักษณะของแถบพลังงานของซิลิกอน.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.3 กลไกการเกิดพอร์สซิลิกอน.....	18
2.2 ลักษณะของแถบพลังงาน.....	20
2.2.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า.....	22
2.2.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ.....	23
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์.....	25
2.3.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	25
2.3.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชั้นดีในเซลล์แสง อาทิตย์.....	28
2.3.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
2.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	32
2.3.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $I_L$ .....	32
2.3.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $I_D$ .....	33
2.3.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $V_{oc}$ .....	33
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	35
3.1 กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	35
3.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น( Initial Cleaning).....	35
3.1.2 การเคลือบโลหะอะลูมิเนียม.....	35
3.1.3 การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	36
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร.....	37
3.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD.....	37
3.2.2 กระบวนการทำความสะอาดฟิล์มเพชร.....	38
3.3 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร.....	40
3.3.1 การออกแบบลวดลายโลหะ.....	40
3.3.1.1 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อใช้ศึกษา คุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	40
3.3.1.2 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อใช้ศึกษา ผลของระยะห่างระหว่างลวดลาย.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร.....	41
3.3.3 กระบวนการสร้างขั้วโลหะทองคำเพื่อศึกษา คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	42
3.3.4 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์.....	43
3.4 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ.....	45
3.4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	45
3.5 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	45
3.5.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติ กระแสและแรงดัน.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	47
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	47
4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	49
4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์.....	50
4.3.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	50
4.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	51
4.4.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	51
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm.....	59
4.2 ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
1.2 แถบพลังงานและการเกิดสถานะจุดบกพร่องบริเวณขอบของเกรนในผลึกของซิลิกอน.....	3
1.3 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร.....	7
1.4 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	11
1.5 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	13
2.1 ภาพจำลองโครงสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน.....	14
2.2 ลักษณะของแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	15
2.3 แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน.....	16
2.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์ซซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน.....	17
2.5 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน.....	18
2.6 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิลิกอนขณะก่อนสัมผัส.....	20
2.7 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิลิกอนขณะสมดุลความร้อน.....	21
2.8 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 1 ขณะได้รับไบอัสตรง.....	22
2.9 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 2 ขณะได้รับไบอัสตรง.....	23
2.10 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V < V_R$ .....	24
2.11 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V > V_R$ .....	24
2.12 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น.....	25
2.13 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง.....	27
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บนกราฟแบบเซมิล็อก.....	29
2.15 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
2.16 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมีดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
2.17 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
2.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

3.1	เครื่องมือสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน.....	36
3.2	เครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD.....	47
3.3	ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ HFCVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	39
3.4	ลักษณะลวดลายโลหะที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	40
3.5	ลักษณะลวดลายโลหะที่ใช้ศึกษาระยะห่างระหว่างลวดลายที่มีผลต่อการไหล ของกระแสในฟิล์มเพชร.....	41
3.6	แผนภาพกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์.....	44
3.8	วงจรการวัดคุณสมบัติกระแสไฟฟ้าและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	46
4.1	ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	47
4.2	ลักษณะพื้นผิวระนาบ(111)ของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM.....	48
4.3	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	49
4.4	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า B:C.....	50
4.5	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm.....	52
4.6	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm.....	53

# สัญลักษณ์

## สัญลักษณ์

## ความหมาย

$E_c$	แถบความนำ
$E_{in}$	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
$E_g$	ช่องว่างแถบพลังงาน
$E_v$	แถบวาเลนซ์
$\bar{E}$	สนามไฟฟ้า
$\bar{E}_0$	แอมพลิจูดของ $\bar{E}$
$E$	ประจุไฟฟ้า
$FF$	ค่าฟิลด์แฟคเตอร์
$H$	ค่าคงที่ของแพลงค์
$I_b$	กระแสไฟฟ้ามืดในไดโอด
$I_L$	กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง
$I_m$	กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
$I_o$	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
$I_s$	กระแสไฟฟ้าย้อนกลับ
$I_{ph}$	กระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากแสง
$I_{sc}$	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร
$I'$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน $R_{sh}$
$M$	แอมป์แมสเอ็ม
$P_m$	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ
$P_o$	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ
$P$	ความหนาแน่นของจำนวนโฮล
$Q$	ประจุไฟฟ้า
$R_L$	ความต้านทานโหลด
$R_s$	ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์
$R_{sh}$	ความต้านทานขนัณฑ์
$V_a$	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด
$V_b$	แรงดันภายในของไดโอด
$V_D$	ศักย์ภายในที่เกิดขึ้นในรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

$V_m$

แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์

$V_o$

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

$V_R$

แรงดันขั้วเริ่มช่วง Reverse

$\bar{V}$

ความเร็วของประจุไฟฟ้าในวัตถุ

$V_{oc}$

แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

$\alpha$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$\chi_e$

อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี

$\epsilon$

ค่าคงที่ได้อิเล็กทริก

$\epsilon_0$

ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของสุญญากาศ

$\phi$

ค่าฟังก์ชันงาน

$\phi_m$

ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ

$\phi_s$

ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

$\lambda$

ความยาวคลื่นของแสง

$\sigma$

สภาพความนำไฟฟ้า

$\sigma_D$

สภาพนำไฟฟ้ามืด

$\sigma_{ph}$

สภาพนำไฟฟ้าทางแสง

$\nu$

ความถี่ของคลื่นแสง

# ศัพท์เทคนิค

กระแสการรวมตัว	Recombination
การนิวคลีเอชัน	Nucleation
ขอบของเกรน	Grain boundary
ความนำจำเพาะของแสง	Photo Conductivity
ความไวแสง	Photosensitivity
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice constant
ค่ายอดลำดับที่สอง	Second order peak
ค่ายอดลำดับที่หนึ่ง	First order peak
เครื่องสั่นความถี่สูง	Ultrasonic cleaning
จุดบกพร่อง	Defect state
ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง	Direct band gap
ชั้นแอร์แมสซีโร	Air Mass Zero, AM0
ชั้นแอร์แมสวัน	Air Mass One, AM1
ฐานรอง	Substrate
ไตรคลอโรเอธิลีน	Trichloroethylene
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden energy band
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized water
ปรากฏการณ์ทะลุผ่าน	Tunnelling effect
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	Photoelectric effect

## คำนำ

ฟิล์มเพชรเป็นสารตัวนำที่รู้จักกันมากในปัจจุบัน เนื่องด้วยคุณสมบัติเด่นหลายๆ ด้าน ซึ่งดีกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย ต้นทุนต่ำ ซึ่งๆ ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้าน โดยในปริญญานิพนธ์นี้ได้นำฟิล์มเพชรมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดของพอร์สซิลิกอนและฟิล์มเพชร โดยรายละเอียดมีดังนี้

บทที่ 1 จะเป็นการกล่าวถึงความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ พอร์สซิลิกอน ฟิล์มเพชรและคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มเพชร การสังเคราะห์และการตรวจสอบฟิล์มเพชร

บทที่ 2 จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของพอร์สซิลิกอน ลักษณะของแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนกับฟิล์มเพชรขณะสมดุลความร้อนและขณะได้รับการไบอัสต่างๆ ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 จะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร การออกแบบหลอดฉายโลหะ การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดของพอร์สซิลิกอนและฟิล์มเพชร

บทที่ 4 จะเป็นการกล่าวถึงผลการทดลอง โดยมีผลการทดลองคุณสมบัติของฟิล์มเพชรและของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5 จะเป็นการกล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการทดลองทั้งหมด  
สุดท้ายนี้หวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจทุกท่านไม่มากก็น้อย

# บทที่ 1

## บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดไฟให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงทันทีที่มีแสงมาตกกระทบ และกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นกระแสไฟฟ้าตรง เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่าสะอาด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมขณะใช้งาน เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานโดยใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งมีไม่จำกัดและในการติดตั้งแต่ละครั้งจะมีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี ประโยชน์ของเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆในยานอวกาศแล้วยังมีประโยชน์ต่อชุมชนเมือง และชนบทที่อยู่ห่างไกลที่จะติดต่อสื่อสารกับชุมชนเมือง รวมถึงเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องมือสื่อสารให้กับกลุ่มนักวิจัยที่ต้องเข้าไปทำงานในพื้นที่ทุรกันดารและพื้นที่ห่างไกลความเจริญต่างๆ

### 1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกมีมากมหาศาล ร้อยละ 99.98 ของพลังงานที่โลกได้รับล้วนมาจากแสงอาทิตย์ ที่เหลือร้อยละ 0.02 ได้มาจากพลังงานใต้พิภพ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่เดินทางมาสู่โลกเรามีมากถึง  $1.77 \times 10^{14}$  KW ซึ่งมีมากกว่าพลังงานที่มนุษย์ต้องการ  $8 \times 10^7$  KW ถึงกว่าล้านเท่า ดังนั้นถ้าเราใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราก็จะประหยัดพลังงานได้มาก รวมทั้งเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ดังนั้นถ้าเราพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่าไรเราก็จะได้รับประโยชน์จากแสงอาทิตย์มากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับประเทศไทย บนพื้นที่ 1 ตารางเมตร เราได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ 1000 W หรือเฉลี่ย 4-5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน (kWh/m<sup>2</sup>/day) ซึ่งหมายความว่า ในวันหนึ่งๆบนพื้นที่เฉลี่ย 1 ตารางเมตรนั้น เราได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ 1 kW เป็นเวลานานถึง 4-5 ชั่วโมงนั่นเอง ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเท่ากับ 15 % ก็แสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ 1 ตารางเมตร จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 150 W หรือเฉลี่ย 600-750 kWh/m<sup>2</sup>/day นั่นเอง

## 1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดโดยแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้คือ

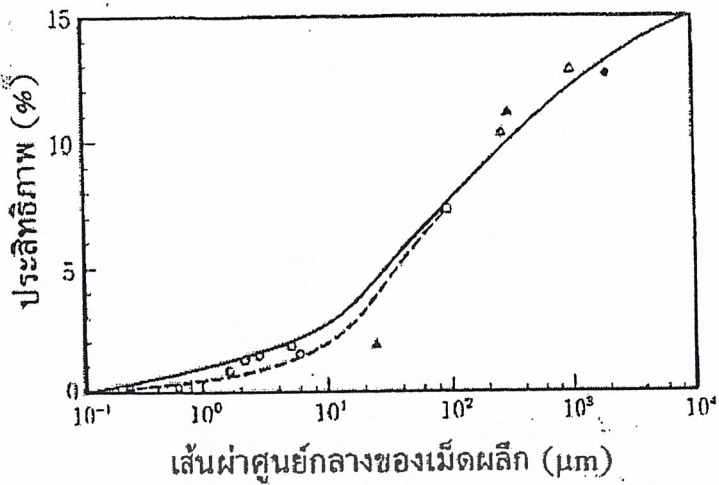
1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

### 1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ปัจจุบันมีการผลิตใช้งานกันมากที่สุด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนนั้นทำมาจากซิลิกอนที่มีระนาบเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ความหนาของแผ่นซิลิกอนนั้นมีค่าน้อย ทำให้น้ำหนักเบาและเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงเค้นแม้จะมีความหนาเพียง 50  $\mu\text{m}$  ก็ยังคงสภาพเป็นแผ่นได้ดี เซลล์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอนและแบบอะมอร์ฟัส โดยที่ลักษณะสมบัติการผลิตพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งาน น้อยมากอายุการใช้งานนานถึง 20 ปี ข้อเสียของเซลล์ชนิดจะมีบ้างก็คือ เนื่องจาก ผลึกซิลิกอนมีช่องว่างแถบพลังงานชนิดไม่ตรง(indirect band gap) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย การผลิตจึงต้องผลิตให้หนาพอสมควร ซึ่งความหนาจะอยู่ประมาณ 100  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป โดยที่การผลิตนั้นทำได้ง่าย ซึ่งใช้เทคโนโลยี VLSI ในการทำรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีความก้าวหน้าไปมากในปัจจุบัน โดยในทางทฤษฎีแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 44% แต่ในทางปฏิบัติจริงเซลล์ชนิดนี้จะมีการสูญเสียต่างๆเกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าต่ำลง

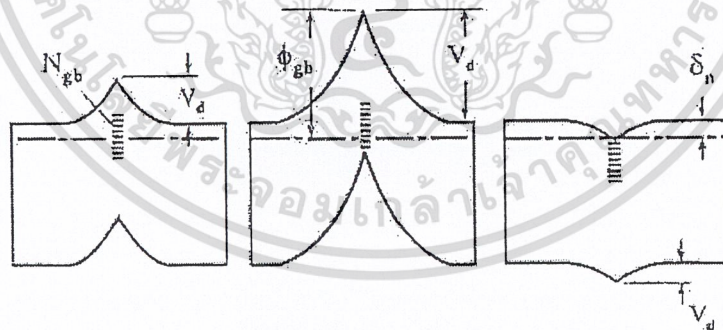
### 1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิกอนที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิดปนอยู่ในระนาบเดียวกัน เช่น (111),(211) และ (330) เป็นต้น เมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างของสีของสีของแต่ละระนาบอย่างชัดเจน อาณาเขตของผลึกเรียกว่า “เกรน” (grain) เทคโนโลยีปัจจุบันนี้สามารถโพลีซิลิกอนให้มีเกรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบล้านไมครอนถึงหลายพันไมครอน ถ้าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์พาหะไฟโตที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อพี-เอ็น ออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรูปที่ 1.1 แสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์[36]



รูปที่ 1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้ก็คือจะมีพันธะของซิลิกอนที่มีแขนขาอยู่มากซึ่งไม่มีซิลิกอนอะตอมอื่นมาเกาะพันธะด้วย ซึ่งพันธะแขนขานี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสถานะจุดบกพร่อง(defect state) ซึ่งสถานะจุดบกพร่องนี้จะเป็นตัวคอยจับพาหะข้างน้อยจากแสงไม่ให้เดินทางออกสู่วงจรรภายนอก และส่งผลทำให้เวลาอายุ(life time)ของพาหะข้างน้อยลดลง และที่ขอบของเกรนจะทำให้เกิดแถบพลังงานที่ขอบของเกรนเกิดขึ้นโค้งขึ้นดังรูปที่ [38]



(ก) ชั้นปลอดพาหะ (ข) ชั้นอินเวอร์ชัน (ค) ชั้นสะสมพาหะ

รูปที่ 1.2 แถบพลังงานและการเกิดสถานะจุดบกพร่องบริเวณขอบของเกรนในผลึกของซิลิกอน

### 1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิล์มบางซึ่งสร้างมาจากอะมอร์ฟัสซิลิกอนซึ่งเป็นซิลิกอนที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบหรือเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมแต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึก แต่ในขณะที่การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอมนี้จะทำให้มีคุณสมบัติต่างๆแปลกออกไปเช่น ค่าคงที่ต่างๆทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอนก็คือ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส โดยสามารถสร้างบนพื้นผิวฐานรองอะไรก็ได้ ราคาถูกและประหยัดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Carlson และ wronski ต่อมา Dr Hamakawa มหาวิทยาลัยโอซาก้า ได้ออกแบบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เป็นลักษณะของ (a-Si:H) p-i-n ซึ่งใช้กันอยู่ทุกวันนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ชนิดนี้มีค่าอยู่ประมาณสิบกว่าเปอร์เซ็นต์ และเซลล์ชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อย่างอื่นอีกเช่น ตัวตรวจจับแสงสีต่างๆ[5]

### 1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

เซลล์ชนิดนี้สร้างจากสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล III-V เช่น GaAs และ InP และสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล II-VI เช่น Cds, CdTe ซึ่งผลิตขายในเชิงอุตสาหกรรมแล้ว โดยมากเซลล์ที่สร้างจาก GaAs และ InP จะใช้กันมากในอวกาศ โดยเฉพาะ InP นั้นจะมีคุณสมบัติทนต่อรังสีได้ดี ข้อดีของเซลล์จำพวกนี้คือ เซลล์มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากสารที่นำมาทำเซลล์มีค่าช่องว่างพลังงานที่สูงประมาณ 1.4-1.5 eV และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเนื่องจากเป็นสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง(direct band gap) ซึ่งสามารถทำเป็นแบบฟิล์มบางได้ โดยถ้าเทียบเป็นประสิทธิภาพที่ 15% จะต้องใช้ซิลิกอนที่มีความหนาถึง 100 $\mu$ m ในขณะที่ใช้ GaAs จะใช้ความหนาเพียง 10 $\mu$ m เซลล์ชนิดนี้จะมีความทนทานต่อรังสีสูง และทำงานได้ดีในความเข้มสูงๆ คุณสมบัติเด่นอีกข้อหนึ่งก็คือสามารถสร้างเป็นหลายชั้นได้จะทำให้สามารถมีศักยภาพในการดูดกลืนคลื่นแสงในลักษณะสเปกตรัมที่กว้างได้ดี

โดยที่กล่าวยกตัวอย่างชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์มาทั้ง 4 ชนิดนั้นสารแต่ละชนิดที่นำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่ำคืออยู่ระหว่าง 0.4-3.4 eV ซึ่งช่องว่างแถบพลังงานนี้เองจะเป็นตัวกำหนด "แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร"  $V_{oc}$  ซึ่งถ้า  $E_g$  มีค่ามากกว่าค่าของ  $V_0$  ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย แต่ถ้า  $E_g$  มีค่าน้อยก็จะได้  $V_{oc}$  น้อยเช่นกัน

ตัวกำหนดค่าของ  $V_{oc}$  นอกจากจะเป็นค่า  $E_g$  แล้วยังมีอีกอย่างหนึ่งก็คือ "กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัวของไดโอด"  $I_0$  (saturated reverse current) ซึ่งค่าของ  $E_g$  มีค่าน้อยก็ทำให้ค่าของ  $V_{oc}$  มีค่ามากเพราะค่าของ  $I_0$  จะขึ้นอยู่กับค่าของ  $E_g$  โดยที่ค่าของ  $E_g$  มาก  $I_0$  จะมีค่าน้อย

ปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำลงก็คือ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมินี้จะผลอย่างมากกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารที่มีค่า  $E_g$  ต่ำๆ มาทำ เพราะว่าอุณหภูมิจะทำให้ "กระแสไฟฟาลัดวงจร" ( $I_{sc}$ ) สูงขึ้นแต่ไม่มากนัก แต่ค่าของ  $V_{oc}$  และค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (FF) จะมีค่าลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง

ซึ่งกล่าวโดยสรุปก็คือค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนนี้ก็คือ ค่าของ  $V_{oc}$  และ  $I_{sc}$  ต้องมีค่ามาก ส่วนค่าของ  $I_0$  จะต้องมีค่าน้อย โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงจนเกินไป ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงนั้นเราจะไปวิเคราะห์กันในบทต่อไป

แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองที่ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ โดยเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่า  $E_g = 5.5$  eV ซึ่งเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างมากถ้าเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ก็คือเพชร โดยสังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน ซึ่งเมื่อเรานำเพชรมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้ค่าของ  $V_{oc}$  มีค่าสูงขึ้นและค่าของ  $I_0$  มีค่าต่ำลงตามที่กล่าวมาแล้ว และสามารถใช้ในที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยเพชรยังสังเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

### 1.3 พอร์ซซลิคอน

พอร์ซซลิคอนคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมากมาย ซึ่งมีคุณสมบัติการลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยที่ถูกรับพบในระหว่างการขัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยไฟฟ้า (Electropolishing) ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก พอร์ซซลิคอนนั้นเป็นชั้นฟิล์มที่สามารถสร้างขึ้นได้บนแผ่นผลึกซิลิกอน โดยกระบวนการทาง Electrochemical anodization กับแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เนื่องจากว่ามันมีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งอุปกรณ์ในการสร้างพอร์ซซลิคอนนั้นมีราคาที่ไม่แพงมากนัก ทำให้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

ชั้นของพอร์ซซลิคอนที่สร้างขึ้นนี้ส่วนมากแล้วจะได้มาจากแผ่นซิลิกอนที่ได้ผ่านกระบวนการ Electrochemical anodization ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกซึ่งพอร์ซซลิคอนที่สร้างขึ้นนี้จะประกอบไปด้วยชั้นของโครงสร้างเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรอยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป โดยโครงสร้างของชั้นพอร์ซจะประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

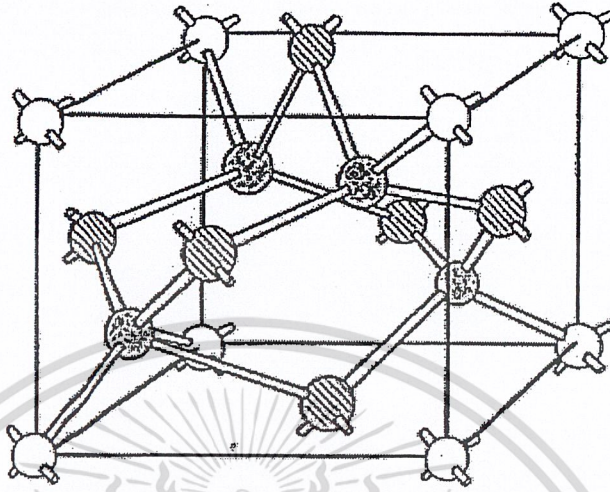
1. โครงสร้างชั้นไมโครพอร์สซิลิกอน ซึ่งจะเป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดโครงสร้างใหญ่กว่า 50 nm ขึ้นไป โดยจะเป็นชั้นที่อยู่ติดกับเนื้อของผลึกซิลิกอน
2. โครงสร้างชั้นไมโครพอร์สซิลิกอน ซึ่งจะเป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 10 nm ลงไป

โดยปกติแล้วนั้นผลึกซิลิกอนนั้นจะไม่ถูกกัดโดยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แต่เมื่อไรที่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้เข้าไปก็จะเกิดการกัดผิวด้านหน้าของผลึกซิลิกอน โดยเป็นผลมาจากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยไฮลจะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากในระหว่างการกัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนนี้จะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นหลุมลึกเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิกอน โดยที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนเหล่านี้จะมีปริมาณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่สูงมาก ดังนั้นไฮลในผลึกซิลิกอนจึงถูกดึงมาอยู่ที่บริเวณนี้จำนวนมาก ทำให้ที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนเหล่านี้ถูกกัดต่อไปอีกทำให้โครงสร้างภายในของพอร์สที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดของโครงสร้างเข้าสู่นาโนพอร์สซิลิกอนคือมีขนาดอยู่ประมาณ 5 นาโนเมตร ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดการโฟโตลูมิเนสเซนส์ขึ้น โดยการโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ทางแสงของสารกึ่งตัวนำ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิกอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในชั้น conduction band ได้ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้อยู่ในสภาวะไม่เสถียรจึงเกิดการรวมตัวใหม่ ( recombination ) กับไฮลในชั้น valance band โดยจะคายพลังงานออกมาในรูปโฟตอนหรือพลังงานแสง ซึ่งค่าพลังงานที่คายออกมานั้นขึ้นอยู่กับค่าช่องว่างแถบพลังงานของสาร โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงาน ( E ) กับความยาวคลื่นของแสง (  $\lambda$  ) เป็นไปตามสมการ

$$\lambda = 1240 / E \quad (1)$$

จากสมการจะเห็นว่า ผลึกซิลิกอนโดยทั่วไปซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำประเภท indirect band gap ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.1 eV นั้นไม่สามารถที่จะให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ แต่สำหรับพอร์สซิลิกอน สามารถให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ เนื่องจากผลของการเกิด quantum size effect หรือ quantum wire effect ภายในของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน ซึ่งมีโครงสร้างที่เล็ก ๆ มากมายนั้นส่งผลทำให้ช่องว่างแถบพลังงานมีความกว้างที่มากขึ้นกว่าเดิม

## 1.4 สารกึ่งตัวนำเพชร



รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร

เพชรนั้นจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนซึ่งอยู่ในหมู่ 4 โดยอะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า "Diamond structure" ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.3

จากรูปพบว่าภายในยูนิทเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง  $1/4$  เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิทเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ  $sp^3$  ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ  $\{111\}$  2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกัณฑ์หัว และอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 1.3 แสดงให้เห็นระนาบ  $\{111\}$  ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ  $\{111\}$  ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ  $\{111\}$  การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น  $3.567 \text{ \AA}$  และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $1.54 \text{ \AA}$  ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของเพชรมีค่า  $1332 \text{ cm}^{-1}$  และยอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่สอง (Second order peak) ของเพชรเท่ากับ  $2458 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่  $1284 \text{ cm}^{-1}$

## 1.5 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของเพชรได้เป็น 3 คุณสมบัติใหญ่ๆคือ คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

### 1.5.1 คุณสมบัติทางกล

โครงสร้างของเพชรจะประกอบด้วยพันธะทางเคมีที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเพชรจึงมีคุณสมบัติทางกลหลายๆอย่างที่พิเศษกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ตัวอย่างเช่น เพชรจะมีความแข็ง, Molar density และ Thermal conductivity สูง ตลอดจนยังมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนต่ำมาก คือมีค่าเพียง  $0.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  คุณสมบัติต่างๆทางกลของเพชรจะมีรายละเอียดดังนี้

- Thermal conductivity เพชรมีค่า Thermal conductivity สูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด คือมีค่าถึง  $20 \text{ watts/cm.K}$  ข้อมูลแสดงการเปรียบเทียบอยู่ในภาคผนวก

- Molar heat capacity ค่า Molar heat capacity หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา จากภาคผนวก ก แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity ระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ นั่นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีเท่ากับ Heat sink

- Thermal expansion คือค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆแพร่ไปถึงเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ  $0^\circ\text{C}$  ค่า Thermal expansion นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity

### 1.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพชรธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{12}$  ที่อุณหภูมิ  $140 \text{ K}$  ถึง  $10^{15}$  ที่อุณหภูมิลดลง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง  $1,800 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า  $2,000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  แต่ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง  $850 \text{ cm}^2/\text{V.s}$  ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเจอร์มาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมนไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนในวัสดุอื่นๆจะมีค่าความเร็วโฮลต่ำและ Dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้า  $10^4 \text{ V/cm}$  ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลเริ่มมีการอิมพัลส์สำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่

$10^7$  cm/s และในกรณีของอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าความเร็วสูงสุดที่  $2.0 \times 10^7$  cm/s ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง  $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวทั้งนี้เนื่องมาจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดพิษเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลงเกิด Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ 100 ppm หรือ  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ  $370 \times 10^{-3} \text{ eV}$  และสำหรับฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า  $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ  $2 \times 10^{-3} \text{ eV}$

### 1.5.3 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวนิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตาราง 2.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

ตาราง 1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์

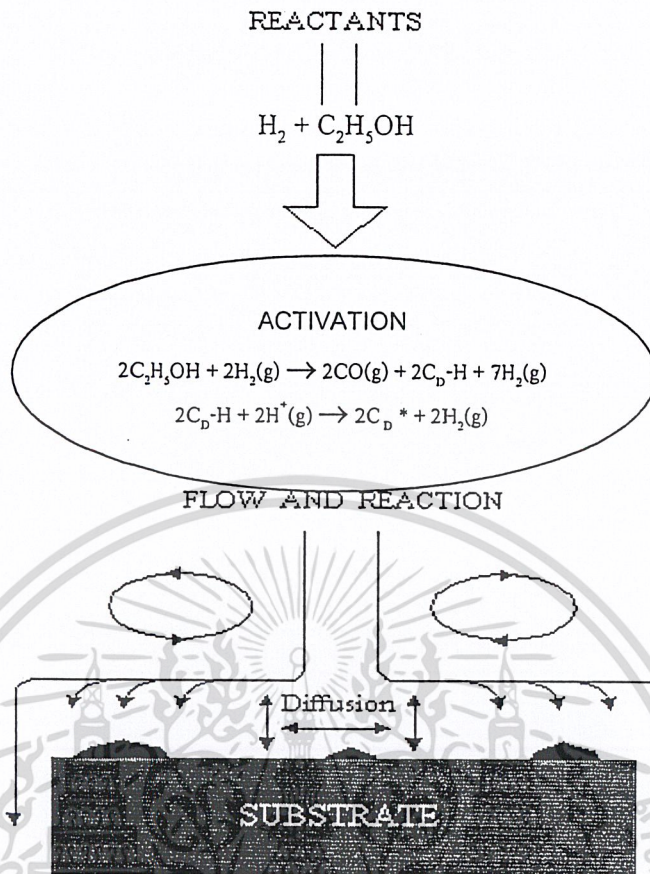
Materials	Diamond	Si	GaAs
Crystal Structure	Diamond	Diamond	Zinc blends
Energy gap (eV)	5.45	1.1	1.43
Electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	2000	1500	8500
Hole mobility ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	1800	600	400
Breakdown field (V/cm)	$10 \times 10^6$	$5 \times 10^6$	$6 \times 10^6$
Resistivity ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$10^{16}$	$10^3$	$10^9$
Saturated electron velocity (cm/s)	$2.7 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
Dielectric Constant ( $\epsilon$ )	5.7	11	12.5
Lattice constant ( $\text{\AA}$ )	3.567	5.431	5.653
Thermal conductivity (W/cm.K)	20	1.5	0.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์มากจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น (โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ
2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง
3. ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการโดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

### 1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน

การสร้างฟิล์มเพชรที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (Hot-Filament CVD) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ความดันต่ำหรือความดันบรรยากาศ และเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน และที่สำคัญคือ ต้นทุนในการสร้างต่ำ โดยจะมีหลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งในที่นี้มีเอทิล-แอลกอฮอล์ ( $C_2H_5OH$ ) เป็นไอระเหยที่มีอนุมูลของคาร์บอนเป็นตัวอย่าง



รูปที่ 1.4 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบ ความร้อน

หลักการพื้นฐานของระบบ CVD แบบความร้อนนั้นจะต้องมีกลไกพื้นฐานดังนี้

- ในระบบต้องมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

Angus et al. ได้เสนอถึงพฤติกรรมของอะตอมไฮโดรเจน เป็นส่วนสำคัญในการกำจัดและลดปริมาณกราฟไฟต์ ทำให้อะตอมคาร์บอนโครงสร้างเพชรยังคงมีพันธะแบบ  $sp^3$  อยู่ นอกจากนี้ยังคงช่วยให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้นด้วย เนื่องจากไฮโดรเจนจะช่วยเข้าไปก่อพันธะกับอะตอมคาร์บอนบริเวณพื้นผิวที่พันธะขาดอยู่ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะแบบ  $sp^3$  ของเพชรไปเป็นแบบ  $sp^2$  หรือ  $sp^1$  ได้

- ในระบบต้องกระตุ้นก๊าซอนุมูลคาร์บอน

ในบริเวณที่มีการกระตุ้น (Activation) ก๊าซทั้งสองชนิด สำหรับวิธี CVD แบบ hot-filament จะอาศัยความร้อนจากอุณหภูมิประมาณ 2000 องศาเซลเซียส ของขดลวดความร้อนทั้งสแตน เป็นผลให้โมเลกุลของก๊าซทั้งสองเกิดการแตกตัวเป็นคาร์บอนอะตอม และเอกซารีนเป็นเอกซารีนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนอะตอม ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่านจากบริเวณกระตุ้นไปยังฐานรอง โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงเป่าก๊าซเฟส

- ในระบบต้องมีอุณหภูมิของฐานรองเหมาะสม

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนี้ อุณหภูมิมีความสำคัญอย่างมากต่อการก่อตัวและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนให้อยู่ในโครงสร้างเพชร รวมทั้งระนาบของฟิล์มเพชรที่จะเกิดขึ้นด้วย Spitsyn et al. เสนอผลการทดลองไว้ว่า อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสมทำให้เกิดเป็นเพชรได้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 500 – 1200 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับวิธีการใช้

- ในระบบต้องมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแต่ละครั้งพบว่า การเลือกใช้ฐานรองที่จะนำมาสร้างมีส่วนสำคัญมากเช่นกัน เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวของฐานรองมีผลต่อลักษณะการก่อตัวของเพชรได้แก่ ความหนาแน่นและอัตราการนิวเคลียสเป็นต้น

## 1.7 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

หลังจากที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชรแล้ว จึงจำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มสังเคราะห์ที่ได้ เพื่อยืนยันว่า ฟิล์มที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไปนี้เป็นฟิล์มเพชรที่มีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยเราจะวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร 2 วิธี คือ วิธี Raman Spectroscopy และวิธี Scanning Electron Microscopy

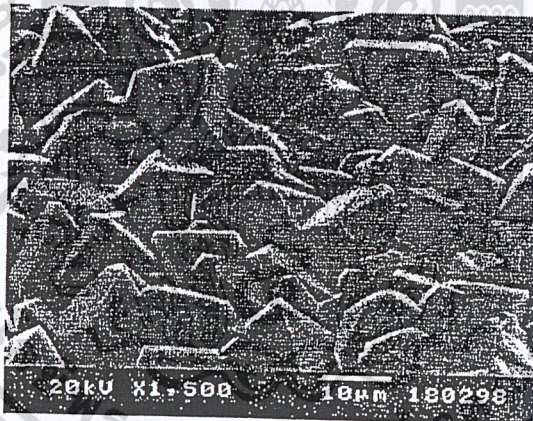
### 1.7.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสง โดยทำการวัดการลดลงของความเข้มลำแสงที่ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน (non-absorbing medium) ผลของ Raman นี้จะเป็นการกระเจิงในระดับโมเลกุล นั่นคือ การกระเจิงของแสงนี้เกิดขึ้นจากโฟตอนของลำแสงกับการสั่นภายในแลตทิซหรือโฟนอน ดังนั้น Raman spectroscopy จึงเป็นวิธีที่นิยมนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรเนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ Raman สูง ดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่าง ๆ ของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร กราไฟต์ และคาร์บอนอะมอร์ฟัส เป็นต้น โดยที่ค่าสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติมียอดอยู่ที่  $1332 \text{ cm}^{-1}$  ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรที่ใกล้เคียงธรรมชาติ และบริสุทธิ์มาก แต่ยังมีปริมาณกราฟไฟต์และคาร์บอนอะมอร์ฟัสปะปนอยู่บ้างข้อดีสำคัญที่สุดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วย Raman spectroscopy นี้ คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงานหรือฟิล์มเพชรที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อได้ เครื่อง Raman Spectroscope แสดงไว้ในภาคผนวก

### 1.7.2 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

ในการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ หรือแม้กระทั่งความหนาของฟิล์มเพชรก็ตาม เราสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธี SEM ดังแสดงรูปเครื่องมือในภาคผนวก ซึ่งยังสามารถบอกได้ถึงระนาบของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้อีกด้วย SEM สามารถตรวจสอบฟิล์มได้ถึงระดับที่เล็กกว่าไมครอน โดยทำการโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปยังพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ แล้วทำการตรวจจับอิเล็กตรอนอันดับที่สอง (secondary electron) ที่หลุดผ่านออกมาจากพื้นผิว โดยที่ความสว่างหรือความเข้มของการส่งผ่านอิเล็กตรอนอันดับสองออกมานั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวที่ทำการวัดนั้น ๆ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะถูกขยายไปแสดงภาพที่จอมอนิเตอร์ และความละเอียดของภาพที่ได้กำหนดได้โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งสามารถโฟกัสได้ละเอียดถึงเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 10-20 นาโนเมตรเท่านั้นดังแสดงเครื่องมือในภาคผนวก ก-3



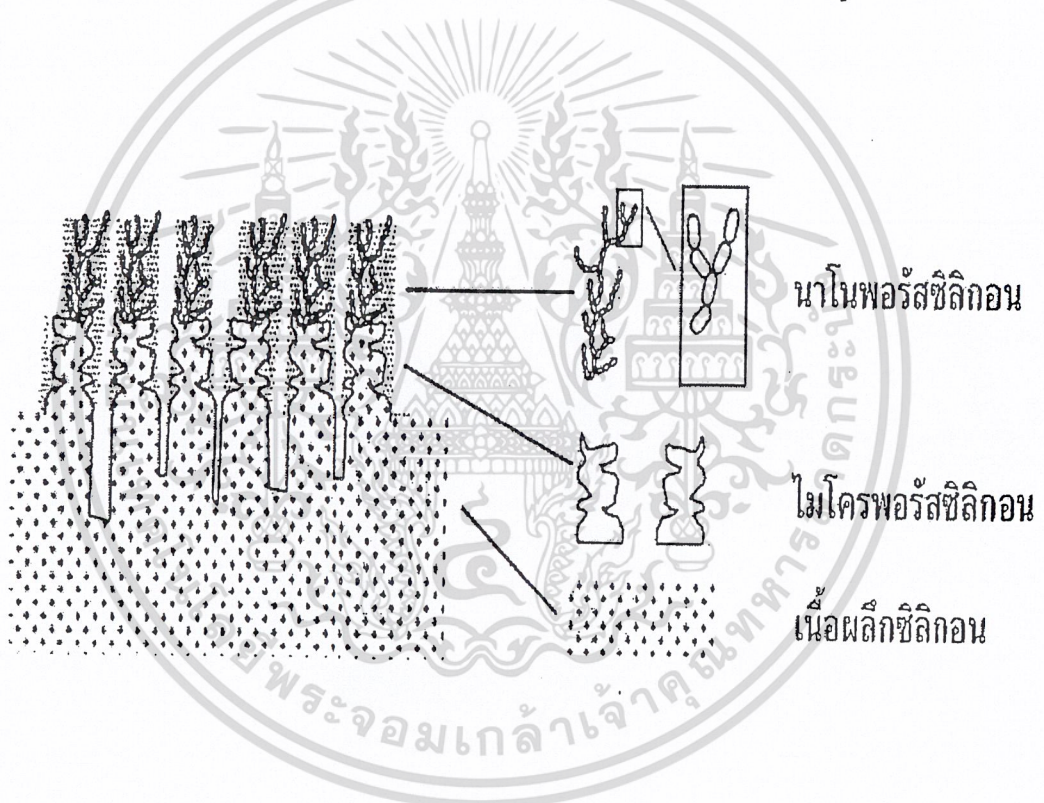
รูปที่ 1.5 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 พอร์สซิลิกอน [10]

#### 2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนนั้นคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนเล็กๆที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร อยู่ถึงสองชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.1



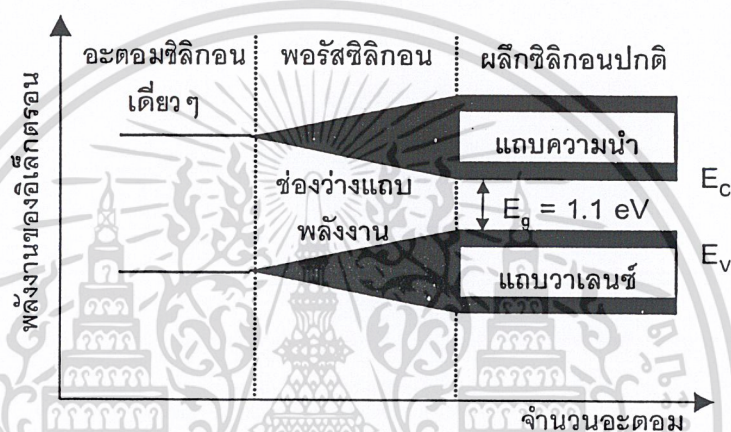
รูปที่ 2.1 ภาพจำลองโครงสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

จะเห็นว่าพอร์สซิลิกอนประกอบไปด้วย

1. โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่ติดอยู่กับเนื้อของผลึกซิลิกอน
2. โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 10 นาโนเมตร ลงไป

### 2.1.2 ลักษณะของแถบพลังงานของซิลิกอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการหลอมล้ากันของระดับพลังงานภายในอะตอม ทำให้เกิดการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน ซึ่งถ้าเราสามารถลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจะไม่มีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างแถบพลังงาน ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.2 ลักษณะของแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปจะเห็นว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลงจะมีผลทำให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกปรากฏการณ์ลักษณะเช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect ซึ่งค่าพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์นี้จะมีค่าเท่ากับ

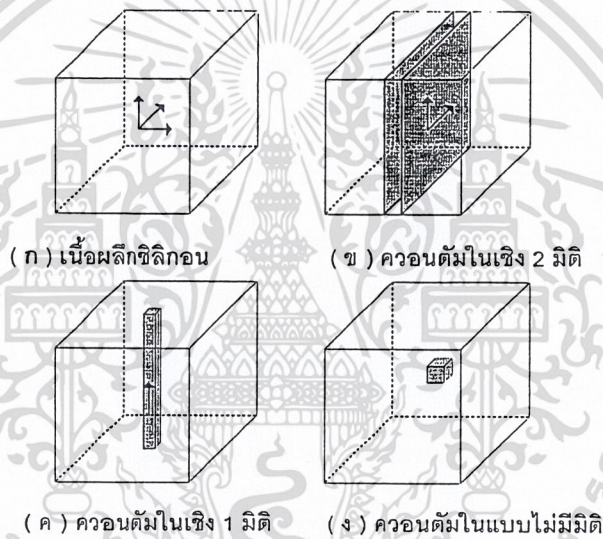
$$E_q = \Delta E_c + \Delta E_v \quad (2.1)$$

โดยที่  $E_q$  เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ Quantum confinement effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\Delta E_c$  เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำเดิมของผลึกซิลิกอน
- $\Delta E_v$  เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์เดิมของผลึกซิลิกอน

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างออกไปจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน

ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับด้วยลักษณะและขนาดโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ด้วยกันคือ

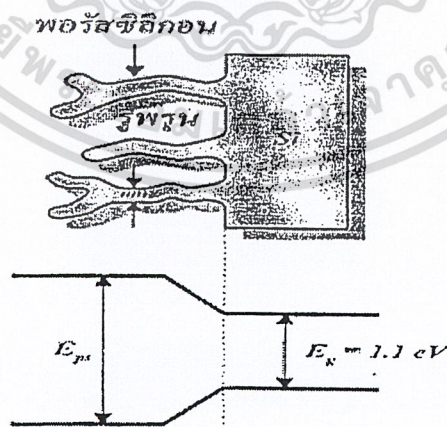
1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ ( Quantum well ) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความบางมากๆในระดับชั้นของโมเลกุล เช่น 30-50 ชั้นโมเลกุล ( < 100  $\text{\AA}$  ) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างแบบ 2 มิติ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (Quantum Wire) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร ( $< 10 \text{ nm}$ ) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ภายในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปในโครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของโครงสร้าง 1 มิติแบบนี้ จะมีขนาดที่กว้างกว่าช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างลักษณะแบบนี้จะมีขนาดที่เล็กกว่าในโครงสร้างแบบ 2 มิติ

3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (Quantum Dot) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมากๆ ( $< 1 \text{ nm}$ ) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะแบบนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ภายในโครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ง) อะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างจุดเล็กๆเหล่านี้จะมีจำนวนน้อยกว่าในโครงสร้างสองแบบแรก มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของโครงสร้างที่เป็นจุดนี้ จะมีความกว้างที่มากกว่าในโครงสร้างสองแบบแรกด้วย

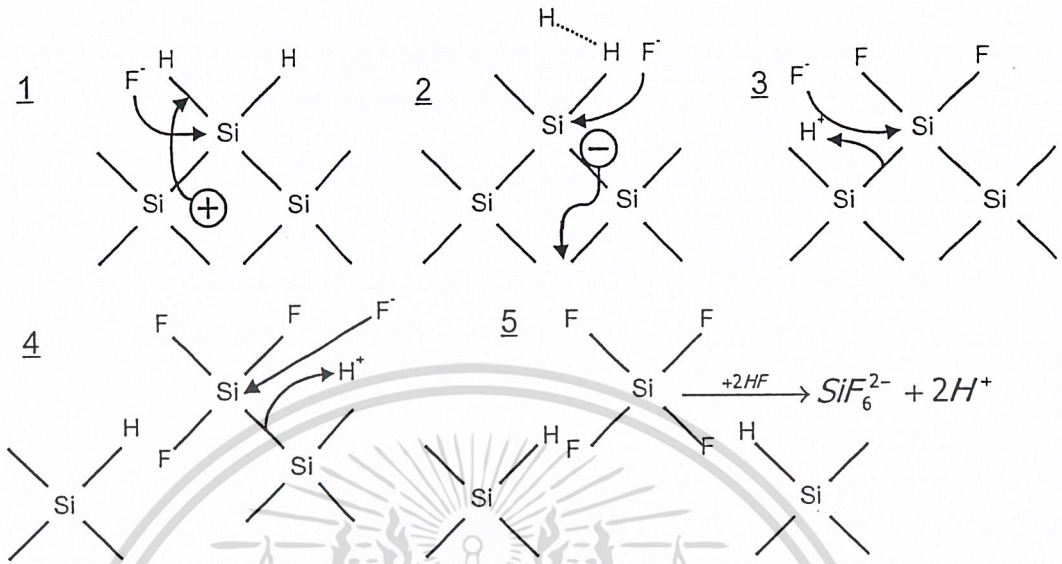
ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน จัดอยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum Wire นั่นเอง โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งความกว้างของช่องว่างพลังงาน ( $E_{ps}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดโครงสร้างนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอน



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

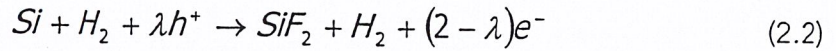
## 2.13 กลไกการเกิดพอร์สซิลิกอน



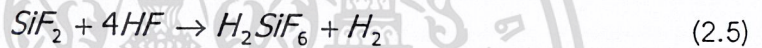
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงกลไกการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่ทำให้เกิดชั้นของพอร์สซิลิกอนโดยเริ่มจากเมื่อยังไม่มีกระแสไบอัสแบบ Anodic Bias ซึ่งเป็นกระบวนการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับซิลิคอน (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของซิลิกอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่ มีผลทำให้ไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) แต่เมื่อไรที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับซิลิคอน (Si) จนพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้โดยไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si-F) ขึ้นมาแทนดังแสดงไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกส่งผลให้ไอออนของฟลูออรีน ( $F^-$ ) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังซิลิคอน ดังแสดงในขั้นตอน 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาลเลนซ์อิเล็กตรอน (Polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si-F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนที่อยู่ถัดเข้ามา มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยไอออนของฟลูออรีนเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นว่าอะตอมของซิลิกอน จะถูกดึงให้หลุดออกมาที่ผิวหน้าของผลึกซิลิกอน พร้อมกับเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิกอนอะตอมที่อยู่ถัดมา ดังแสดงไว้ในขั้นตอนที่ 5 ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้ [2]



จากสมการที่ (3) และ (4) เขียนเป็นปฏิกิริยารวมได้เป็น

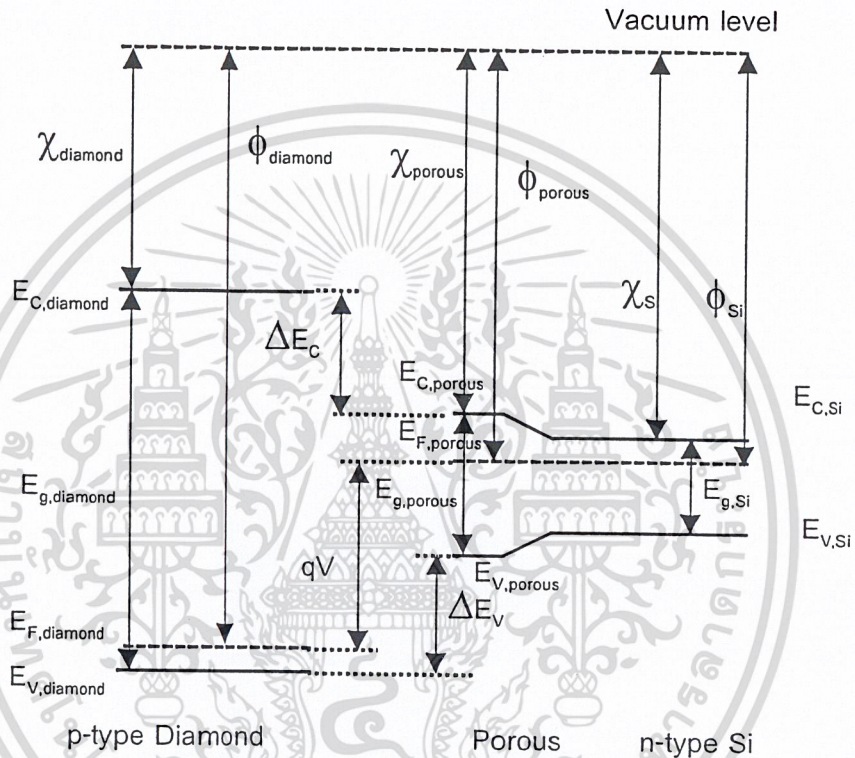


โดยที่  $\lambda$  คือจำนวนของประจุที่เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างกระบวนการ

จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสภาวะที่ (2) ที่มีผลึกซิลิกอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนั้นจำเป็นที่จะต้องอาศัยไฮลในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด  $SiF_2$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ (3) ได้ผลลัพธ์เป็น  $SiF_4$  หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิกอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สันเกตว่าจะได้ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $SiF_4$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้ายคือสารละลาย  $H_2SiF_6$  อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ (4)

## 2.2 ลักษณะของแถบพลังงาน

เพื่อที่จะศึกษาการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากพอร์ซซิลิกอนซึ่งสร้างมาจากแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี โดยลักษณะแถบพลังงานก่อนที่จะสัมผัสกันของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิลิกอนขณะก่อนสัมผัส

จากรูปที่ 2.6 จะได้ว่า

$$\Delta E_C = \chi_{Diamond} - \chi_{Porous} \quad (2.6)$$

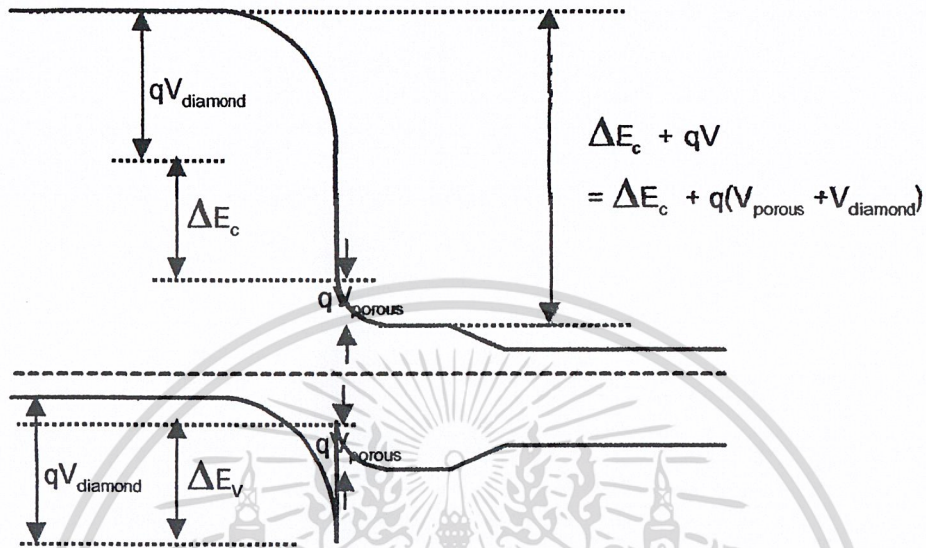
และ

$$\Delta E_V = (E_{g,Diamond} - E_{g,Porous}) - (\chi_{Diamond} - \chi_{Porous}) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta E_V = \Delta E_g - \Delta E_C \quad (2.8)$$

เมื่อสาร 2 ชนิดนี้ต่อกัน อิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดการแพร่ไปสู่ด้านพีและด้านเอ็นจนกระทั่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองมีระดับเท่ากัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิลิกอนขณะสมดุลความร้อน

จากรูปที่ 2.7 จะได้ว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อคือ

$$-qV_D = E_{F, Porous} - E_{F, Diamond} = -q(V_{D, Porous} - V_{D, Diamond}) \quad (2.9)$$

โดยที่  $V_{D, Porous}$  คือศักย์ไฟฟ้าภายในพอร์ซซิลิกอน

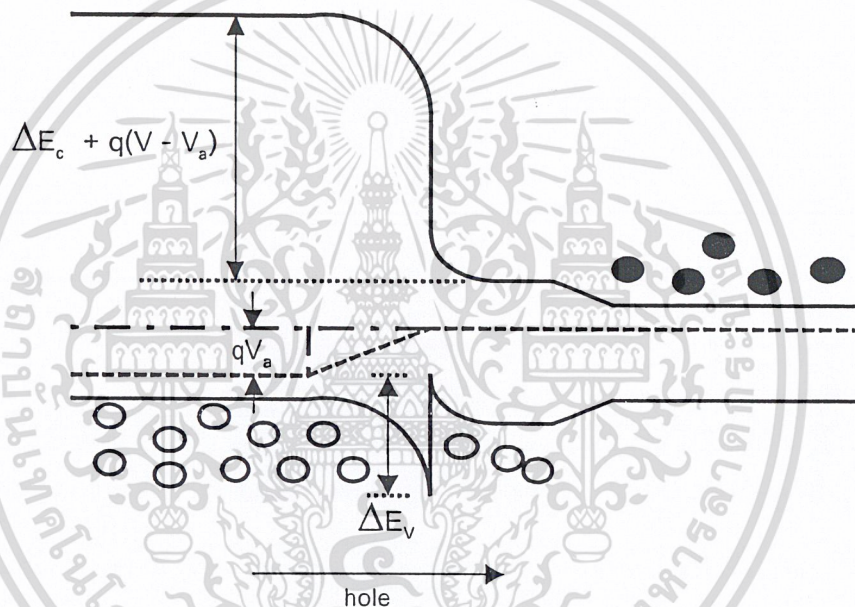
$V_{D, Diamond}$  คือศักย์ไฟฟ้าภายในของฟิล์มเพชร

โดยปกติแล้วในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือชนิดพีจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือประจุไฟฟ้าบวกจะเท่ากับประจุไฟฟ้าลบ หรือ ประจุไฟฟ้ารวมเท่ากับศูนย์ ในกรณีของรอยต่อพี-เอ็น จะเห็นได้ว่าที่บริเวณรอยต่อ อิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นแพร่ข้ามไปทางด้านพี และ โฮลทางด้านพีแพร่ข้ามไปทางด้านเอ็น ซึ่งให้เกิดไอออนบวกของอะตอมผู้ให้  $N_D^+$  ทางด้านเอ็น และ ไอออนของอะตอมผู้รับ  $N_A^-$  ทางด้านพี ในสภาวะสมดุลไอออนบวกจะปรากฏอยู่ในรอยต่อช่วง  $0 < x < x_n$  และ ไอออนลบจะปรากฏอยู่ในรอยต่อช่วง  $-x_p < x < 0$  นอกจากนี้แล้วโดยความเป็นจริง ภายในบริเวณปลอดพาหะจะมีพาหะอิเล็กตรอนและ โฮลปรากฏอยู่ จึงทำให้มีประจุบวกและลบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและ โฮลนี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของไอออนบวก และ ไอออนลบของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ เราจึงประมาณได้ว่าความหนาแน่นของประจุบริเวณปลอดพาหะเป็นความหนาแน่นของไอออนบวกและไอออนลบเท่านั้น และภายนอกบริเวณปลอดพาหะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือก็คือความหนาแน่นประจุเป็นศูนย์ การพิจารณาโดยการประมาณดังกล่าวนี้ ถูกเรียกว่า “ การประมาณย่านปลอดพาหะ” หรือ “

Depletion approximation” รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

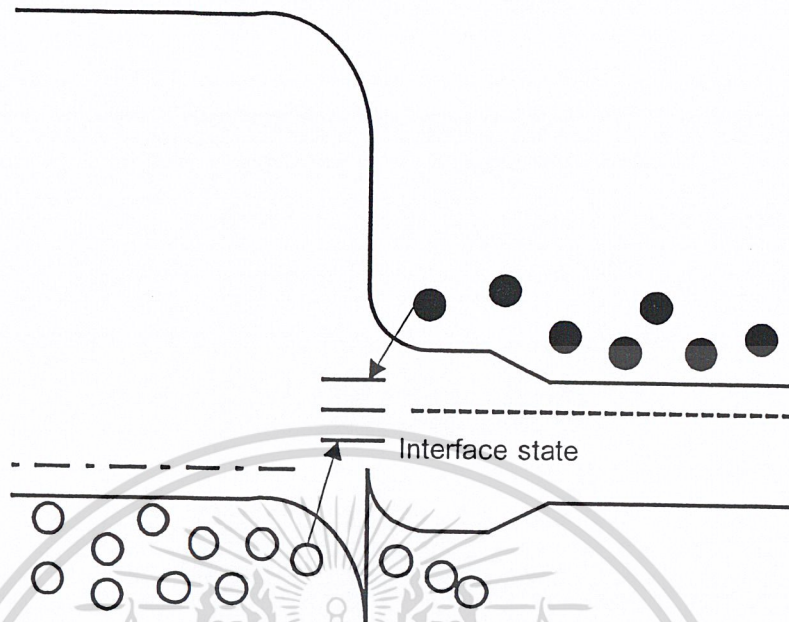
### 2.2.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า

ในสภาวะสมดุลความร้อนจะไม่มีกระแสเปลี่ยนแปลงอิเล็กตรอนและโฮลระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด แต่เมื่อเราให้ไบอัสไปข้างหน้ากับรอยต่อนี้ สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนี้จะมีค่าลดลงเมื่อเราสมมุติให้ระดับพลังงานด้านเอ็นคงที่ ดังนั้นระดับพลังงานด้านพีจะมีระดับพลังงานลดลงเท่ากับ  $qV_a$  การไหลของกระแสจะมี 2 ลักษณะโดยลักษณะแรงแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยโฮลจะไหลจากแถบวาเลนซ์ด้านเพชรชนิดพีไปยังแถบวาเลนซ์ด้านพอร์สซิลิกอน เมื่อให้การไบอัสน้อยกว่า  $V_f$  กระแสจะไหลได้น้อยเนื่องจากมีศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณ spike กั้นอยู่ แต่เมื่อให้ไบอัสมีค่าสูงกว่า  $V_f$  จะทำให้ความสูงของ spike มีค่าลดลงโฮลจึงสามารถไหลไปยังด้านพอร์สซิลิกอนได้



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 1 ขณะได้รับไบอัสตรง

ลักษณะที่สองจะเป็นการไหลของกระแสการรวมตัวใหม่ (Recombination current) คือ โฮลจากแถบวาเลนซ์ทางด้านฟิล์มเพชรและอิเล็กตรอนจากแถบนำด้านพอร์สซิลิกอนจะไหลไปยัง Interface state จะเกิดการรวมตัวใหม่ที่ Interface state ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยกระแสส่วนนี้จะมีค่าสำคัญเมื่อมีการไบอัสน้อยๆ



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 2 ขณะได้รับไบอัสตรง

### 2.2.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าน้อยๆซึ่งน้อยกว่าค่า  $V_R$  อิเล็กตรอนจากฟิล์มเพชรชนิดพีจะไหลมายังด้านพอร์สซิลิกอน โหลดทางด้านพอร์สซิลิกอนจะไหลมายังฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งกระแสจะยังคงไหลน้อยเนื่องจากเกิดจากการไหลของประจุพาหะจำนวนน้อย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับจนระดับพลังงานวาเลนซ์ด้านฟิล์มเพชรชนิดพีมีระดับสูงกว่าแถบความนำของพอร์สซิลิกอน จะเกิดการทะลุผ่าน (Tunneling) คืออิเล็กตรอนด้านฟิล์มเพชรจะสามารถทะลุไปยังแถบความนำด้านพอร์สซิลิกอนได้ และโฮลบริเวณแถบวาเลนซ์ด้านพอร์สซิลิกอนจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนบางส่วนซึ่งเคลื่อนที่ทะลุรอยต่อที่บริเวณ Depletion Region ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ  $V < V_R$  [5]

รูปที่ 2.11 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ  $V > V_R$  [5]

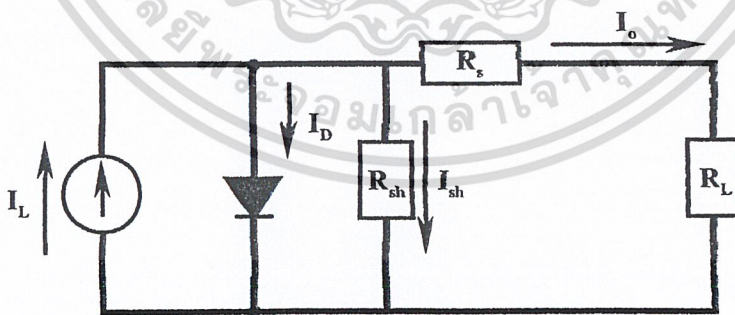
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเปรียบเสมือนกับแหล่งกำเนิดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ง่ายที่สุดคือเซลล์แบบรอยต่อพีเอ็น ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเช่นเดียวกับโฟโตไดโอดพีเอ็น แตกต่างกันที่กรณีของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีพื้นที่รับแสงใหญ่เพื่อให้สามารถรับแสงได้มากที่สุด โดยหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์คือในสภาวะสมดุลความร้อนที่รอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นบริเวณปลอดพาหะจะมีแรงดันไฟฟ้าภายในปรากฏอยู่ เมื่อเซลล์ได้รับแสง การดูดกลืนโฟตอนทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นที่บริเวณนี้และบริเวณใกล้เคียง อิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าพัดให้เคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น และโฮลเคลื่อนที่ไปยังด้านพี ทำให้มีกระแสแสง(Photo current) ไหลออกจากขั้วโลหะด้านพีผ่านโหลดและเข้าที่ขั้วโลหะด้านเอ็นครบวงจร

### 2.3.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นแบบง่าย ๆ จะมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant current source :  $I_L$ ) ต่อขนานอยู่กับรอยต่อพีเอ็น แสงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสคงที่ นั่นก็คือกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสง ( $I_L$ ) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ ( $R_s$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานชั้นดี ( $R_{sh}$ ) และ รอยต่อพี-เอ็นของไดโอด กระแส  $I_L$  ที่เกิดเนื่องจากแสงนี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอด และ  $R_s$  แล้วจึงไหลมายังโหลด ( $R_L$ ) กระแสที่ไหลผ่าน  $R_s$  และ  $R_L$  ให้มีค่าเป็น  $I_o$  จะได้ว่า

$$I_L = I_D + I_o \quad (2.10)$$

$$I_o = I_L - I_D \quad (2.11)$$

เมื่อ  $R_s = 0$  กระแส  $I_D$  มีค่าดังนี้

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_o}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

ค่า  $n$  (Ideality factor) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่ารอยต่อมีความสมบูรณ์มากน้อยเพียงใด ในทางอุดมคติถือว่า  $n = 1$  ดังนั้น

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.13)$$

$$I_o = I_L - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

ในกรณีที่ลัดวงจรทางโหลด เพื่อที่จะดูค่ากระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ จะได้ว่า  $V = 0$  ดังนั้น

$$I_o = I_L \quad (2.15)$$

ในกรณีนี้  $I_o$  ก็คือ  $I_{sc}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดมาจากแสง

ในกรณีที่เปิดวงจรทางโหลดเพื่อที่จะดูค่าแรงดันแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) จะได้ว่า  $I_o = 0$  ดังนั้นเราจะได้ว่า

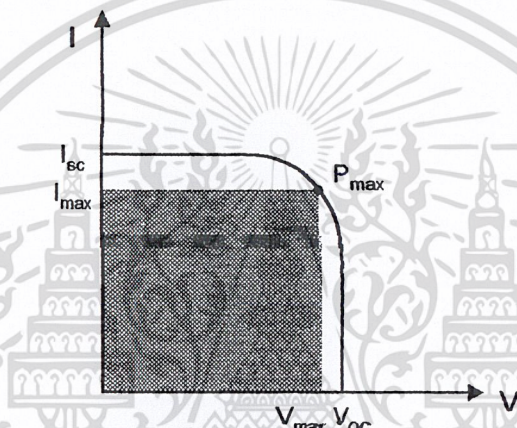
$$I_L = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

$$\ln \frac{I_L}{I_s} = \frac{qV}{kT} - 1 \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \left( \ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right) \quad (2.18)$$

กรณีที่โหลดมีค่า  $0 < R_L < \infty$  จะได้ว่าเซลล์จะจ่ายกระแส  $I$  และแรงดัน  $V$  ให้แก่โหลดค่าหนึ่งซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $0 < I < I_{sc}$  และ  $0 < V < V_{oc}$  ตามลำดับ กำลังงาน (Power) ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด  $R_L$  สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันที่โหลดได้รับ ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้ผลคูณของปริมาณทั้งสองมีค่าสูงสุด เรียกว่า กระแสสูงสุด ( $I_{max}$ ) และ แรงดันสูงสุด ( $V_{max}$ ) ตามลำดับ ซึ่งที่จุดนี้จะให้ กำลังงานสูงสุด (Maximum Power :  $P_{max}$ ) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง

ดังนั้นกำลังงานสูงสุดจึงถูกนิยามว่าค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์สามารถจ่ายให้แก่โหลด โดย  $P_{max} < I_{sc} \cdot V_{oc}$  ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟรูปที่ 2.13 คือถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้น เป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อ 2.3.2 จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าๆหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า "ฟิลแฟกเตอร์" (F.F. : Fill Factor) ของเซลล์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์จริงๆ ต่อพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ในทางอุดมคติ

$$F.F. = \frac{P_m}{P_0} = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าค่าฟิลแฟคเตอร์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ถ้าค่าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่า เซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับทางอุดมคติมาก พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงาน (Energy conversion efficiency) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Cells Efficiency) ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกำลังงานไฟฟ้าที่เซลล์สามารถจ่ายได้กับกำลังงานที่เซลล์ได้รับจากแสง ดังนั้นถ้าพิจารณาว่า เซลล์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดได้เป็นค่าสูงสุดจะได้ว่า

$$\text{ประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงาน } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (2.20)$$

หรือ

$$\eta = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in}} = \frac{F.F. \times I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.21)$$

หรือ

$$\eta = \frac{P_{max}(W)}{Area(m^2) \times P_{in}(W)} \times 100\% \quad (2.22)$$

### 2.3.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชั้นดีในเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ( $R_s$ ) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์มาก จากสมการที่ 2.23 ซึ่งคิดที่  $R_s = 0$  และได้  $I_o$  ออกมาดังนี้

$$I_o = I_L - I_s \left[ \exp(qV_o / kT) - 1 \right] \quad (2.23)$$

ซึ่งถ้า  $R_s \neq 0$  แล้ว แรงดัน  $V_o$  ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อและแรงดันที่ตกคร่อม  $R_s$  ซึ่งเท่ากับ  $I_o \cdot R_s$  ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริงๆ จะมีค่าดังนี้

$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ } (V) = V_o + I_o \cdot R_s$$

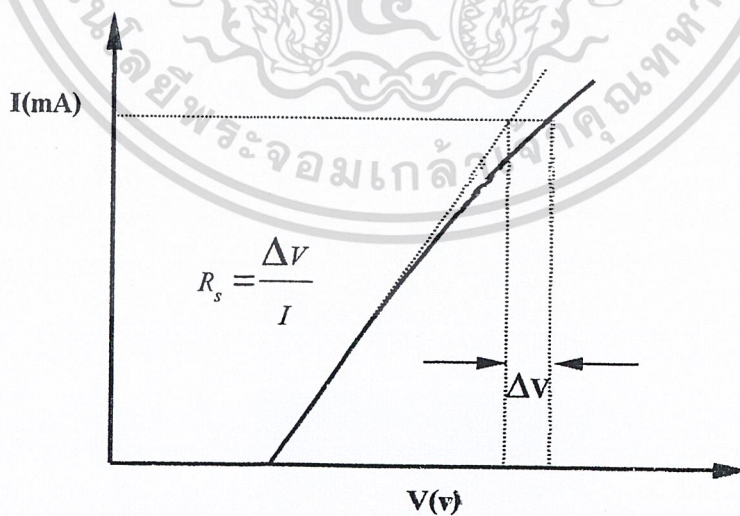
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_o = I_L - I_s \left[ \exp \left\{ \frac{q(V_o + I_o R_s)}{kT} \right\} - 1 \right] \quad (2.24)$$

ความต้านทานอนุกรมสามารถหาได้โดยวิธีการดังนี้เนื่องจากกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล เช่นเดียวกับกับไดโอด เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันนี้ไปเขียนลงในกราฟเซมิล็อก จะได้เป็นกราฟเส้นตรง แต่เนื่องจากผลของความต้านทานภายในเซลล์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานนี้ แรงดันส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กับกระแสในลักษณะเชิงเส้น เมื่อกระแสไหลผ่านเซลล์มากผลของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานอนุกรมนี้ จะทำให้ได้กราฟเส้นตรงที่ได้ในช่วงกระแสสูงๆ นี้เบี่ยงเบนออกจากแนวเดิม ค่าที่เบี่ยงเบนออกมานี้จะนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ได้

จากกราฟในรูปที่ 2.19 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ ที่ค่ากระแส  $I$  จะหาค่า  $R_s$  จากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน  $\Delta V$  ได้ดังนี้

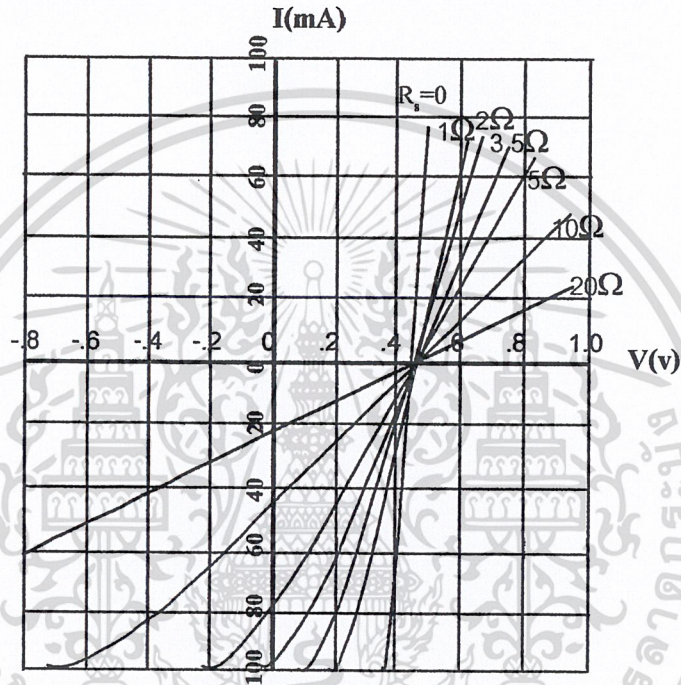
$$R_s = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บนกราฟแบบเซมิล็อก

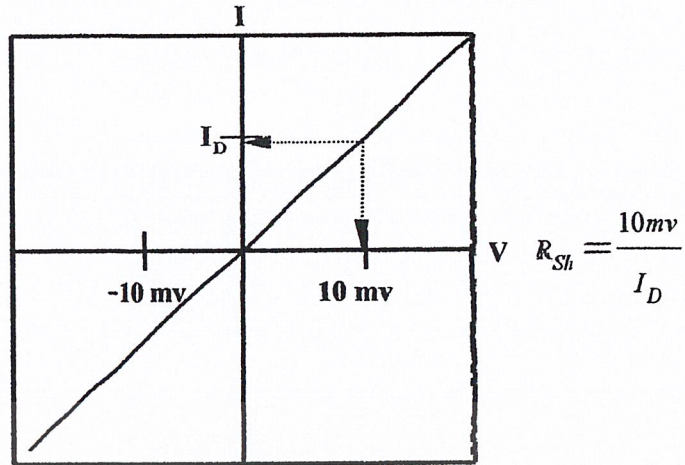
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ เพื่อแสดงผลของ  $R_s$  ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2.15 จากรูปจะเห็นได้ว่า เซลล์ที่มีค่า  $R_s$  สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อยลงและความชันของกราฟก็ลดลงด้วยเป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรหาทางลดค่า  $R_s$  ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.15 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

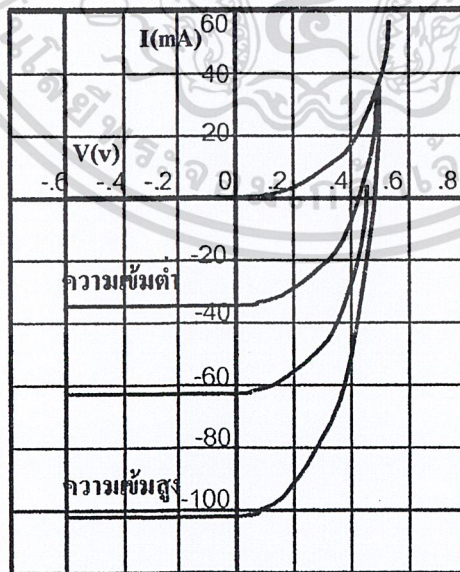
ส่วนความต้านทานชั้นต้นนั้นอาจจะเกิดจากกระแสรั่วที่บริเวณขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นความต้านทานชั้นต้นควรจะมีค่าสูง มากๆ แต่อาจจะมีค่าลดลงได้เนื่องมาจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น การหาค่าความต้านทานชั้นต้น นั้นสามารถทำได้โดยการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันในสภาพมืด โดยการไบแอสให้กับเซลล์ ในระดับแรงดันต่ำๆ ประมาณ 10-20 mv ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์ [11]

### 2.3.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [11]

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้แสงมากกระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีอิสระหลุดจากการยึดเหนี่ยวกับไฮโดรเจนในอะตอม ถ้าแสงที่ส่องมากระทบเซลล์มีความเข้มสูงมากขึ้นก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลให้กระแสที่ได้จากเซลล์มีค่าสูงขึ้น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงแตกต่างกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 ผลของอุณหภูมิต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริงๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเมื่อได้พิจารณาสมการของกระแส  $I_0$  ที่ไหลผ่านมายังโหลด  $R_L$  จะพบว่ากระแส  $I_0$  นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องมาจากแสง  $I_L$  และกระแส  $I_D$  ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อ  $I_L$  และ  $I_D$

#### 2.3.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อ $I_L$ [11]

กระแส  $I_L$  ที่เกิดขึ้นจากแสงนั้นมีสมการดังต่อไปนี้

$$I_L = qg(x)A(L_e + L_h) \quad (2.26)$$

เนื่องจาก  $I_L$  แปรผันตาม  $g(x)$  และ  $L$  จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อ  $g(x)$  และ  $L$  จากสมการ

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $D$  คือสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร (Diffusion coefficient) สำหรับอุณหภูมิต่ำๆ นั้น จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมน้อยมาก จากสมการของ  $L$  จึงเหลืออยู่แค่อายุของพาหะ  $\tau$  (Carrier lifetime) ที่ต้องพิจารณา ซึ่งก็พบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำๆ นั้น จะมีผลต่ออายุของพาหะน้อยมากเช่นกัน (สำหรับอายุของนี้ จะขึ้นอยู่กับระดับการแพร่ซึมและระดับแทรกเป็นส่วนใหญ่)

องค์ประกอบอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อ  $I_L$  ก็คือ  $g(x)$  โดยพบว่า  $g(x)$  จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานโฟตอนจากแสงสามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะได้มากขึ้นกว่าเดิม แต่ผลที่เกิดขึ้นนี้เมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานจริงๆ ที่อุณหภูมิต่ำๆ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย (ในช่วง 20-70 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า  $g(x)$  น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า  $I_L$  จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากกับอุณหภูมิ

### 2.3.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $I_D$

เมื่อพิจารณาค่าของ  $I_D$  ในสมการข้างล่าง

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.28)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า  $I_s$  จะมีผลต่อกระแส  $I_D$  มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิ ที่มีต่อ  $I_s$  โดยพิจารณาจากสมการของ  $I_s$  ดังนี้

$$I_s = Aq n_i^2 \left[ \frac{1}{N_a} \left( \frac{D_e}{\tau_e} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_d} \left( \frac{D_h}{\tau_h} \right)^{1/2} \right] \quad (2.29)$$

จากสมการของ  $I_s$  ในกรณีของซิลิกอน พบว่า  $n_i^2$  จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ตามสมการดังนี้คือ

$$n_i^2 = 15 \times 10^{32} \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (2.30)$$

จากสมการจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $n_i^2$  จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นแบบเอกโพเนนเชียล เป็นผลให้  $I_s$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จากผลอันนี้ แสดงว่า

### 2.3.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ $V_{oc}$

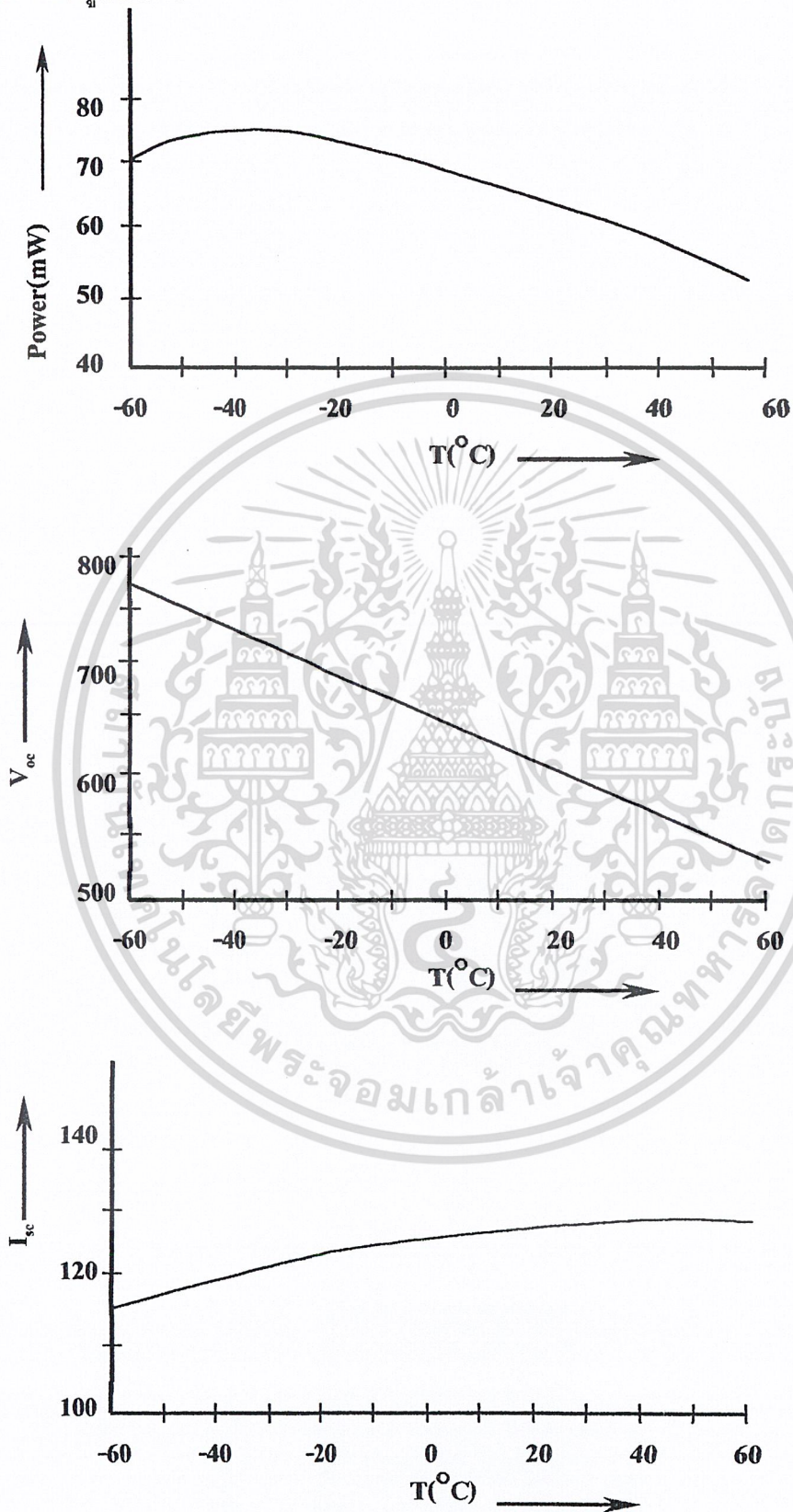
สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ตามสมการดังนี้

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right) \quad (2.31)$$

จากสมการนี้ค่าของ  $\frac{kT}{q}$  จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ  $V_{oc}$  เนื่องจากค่าของ  $\frac{kT}{q}$  มีค่าต่ำมาก ค่าที่มีผลต่อ  $V_{oc}$  คือค่าของ  $I_s$  ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลให้ค่าของ  $V_{oc}$  ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อ  $I_s$ ,  $V_{oc}$  และ  $P_o$  แสดงไว้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของพอร์ซซิลิกอนและฟิล์มเพชร ซึ่งมีกระบวนการสร้างหลายขั้นตอน

#### 3.1 กระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน

##### 3.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น( Initial Cleaning) มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) ในเครื่องลั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaning)
2. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
3. กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 15 วินาที
4. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
5. ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที
6. ต้มในน้ำบริสุทธิ์
7. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
8. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
9. ต้มในไตรโครเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 10 นาที
10. ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องลั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
11. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
12. จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 15 วินาที
13. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
14. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

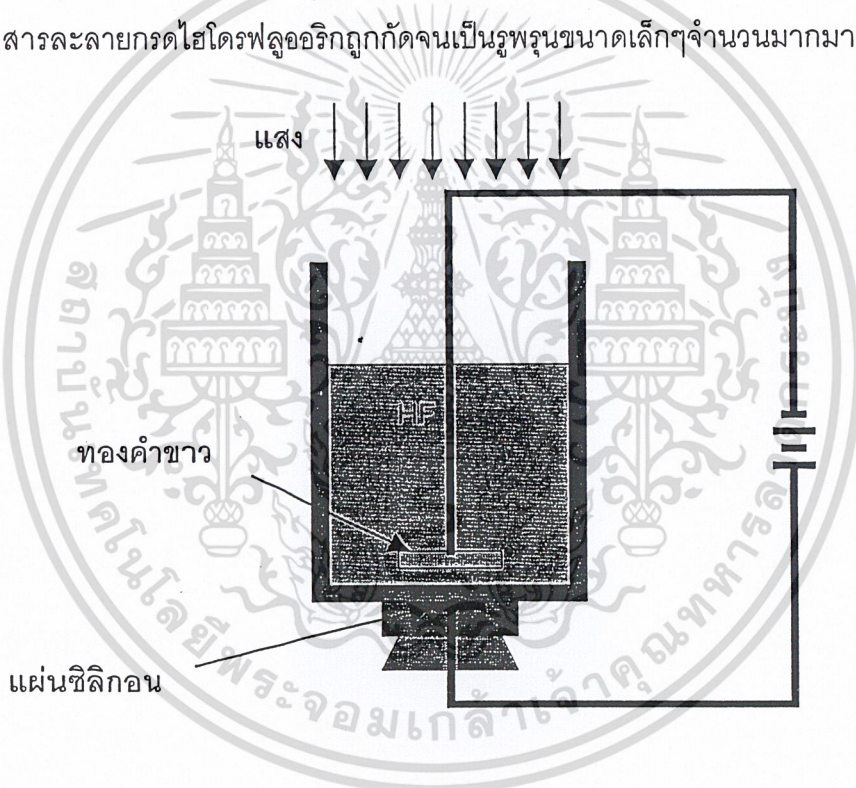
##### 3.1.2 การเคลือบโลหะอะลูมิเนียม

หลังจากการทำความสะอาดผิวของแผ่นซิลิกอนเบื้องต้นแล้ว จากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นซิลิกอน ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่อง Vacuum Evaporate หลังจากนั้นจะนำแผ่นซิลิกอนที่ทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นไปผ่านการขึ้นเตอรริงที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล  $1000\text{ cc/min}$  เพื่อให้ส่วนของโลหะอะลูมิเนียมกับเนื้อของแผ่นซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบโหม้มิดซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนเข้าไปในระหว่างกระบวนการ anodization มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ

### 3.1.3 การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

หลังจากทำการขึ้นเตอรริงแล้ว จะนำแผ่นซิลิกอนไปทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน โดยนำแผ่นซิลิกอนไปวางด้านล่างของชุดเครื่องมือจากนั้นจะเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างของแผ่นซิลิกอน และขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นทองคำขาวซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะมีการฉายแสงที่บริเวณแผ่นซิลิกอนด้วย ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดจนเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมากมาย



รูปที่ 3.1 เครื่องมือสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

หลังจากการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนเรียบร้อยแล้ว ก็จะต้องนำแผ่นซิลิกอนที่สร้างชั้นพอร์สซิลิกอนไปทำความสะอาด โดยมีขั้นตอนดังนี้

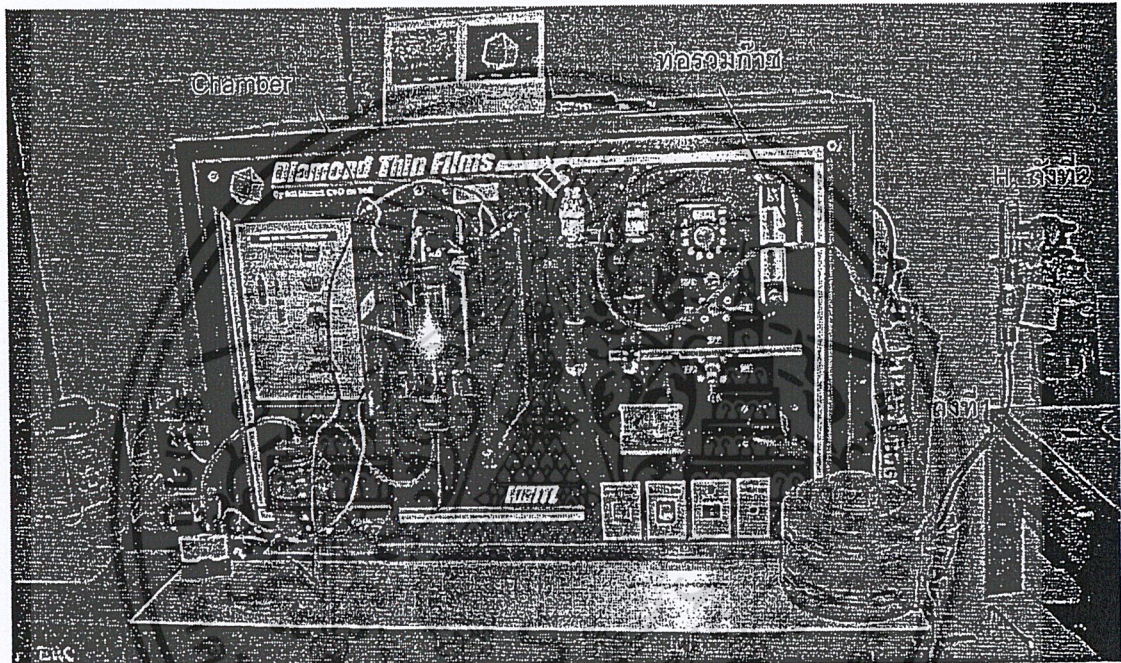
1. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
2. แช่แผ่นในแอลกอฮอล์เป็นเวลา 10 นาที เพื่อล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังค้างอยู่ในชั้นพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

### 3.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรในวิทยานิพนธ์นี้จะในวิธีการ CVD แบบ Hot-Filament ( HFCVD ) โดยจะเพิ่มแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปใน Chamber ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะทำให้สังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้พื้นที่ที่กว้างกว่าเทคนิคเดิม โดยจะมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

1. เปิดก๊าซไฮโดรเจนทั้ง 2 ถัง เข้าสู่ Chamber เป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อให้บรรยากาศใน Chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว

2. ปิดวาล์ว 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนถังที่ 1 ไหลผ่านแหล่งจ่ายเพื่อพาไอระเหยของแอลกอฮอล์เข้าสู่ Chamber โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter ขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนถังที่ 2 ยังคงจ่ายก๊าซไฮโดรเจนโดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter โดยไอระเหยของแอลกอฮอล์ จะรวมกับก๊าซไฮโดรเจนที่ท่อรวมก๊าซดังรูปที่

3. ค่อยๆเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับไส้หลอดทั้งสแตนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ  $2,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วจึงปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพอร์สซิลิกอนกับไส้หลอดทั้งสแตน ให้มีระยะห่างประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยสามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ

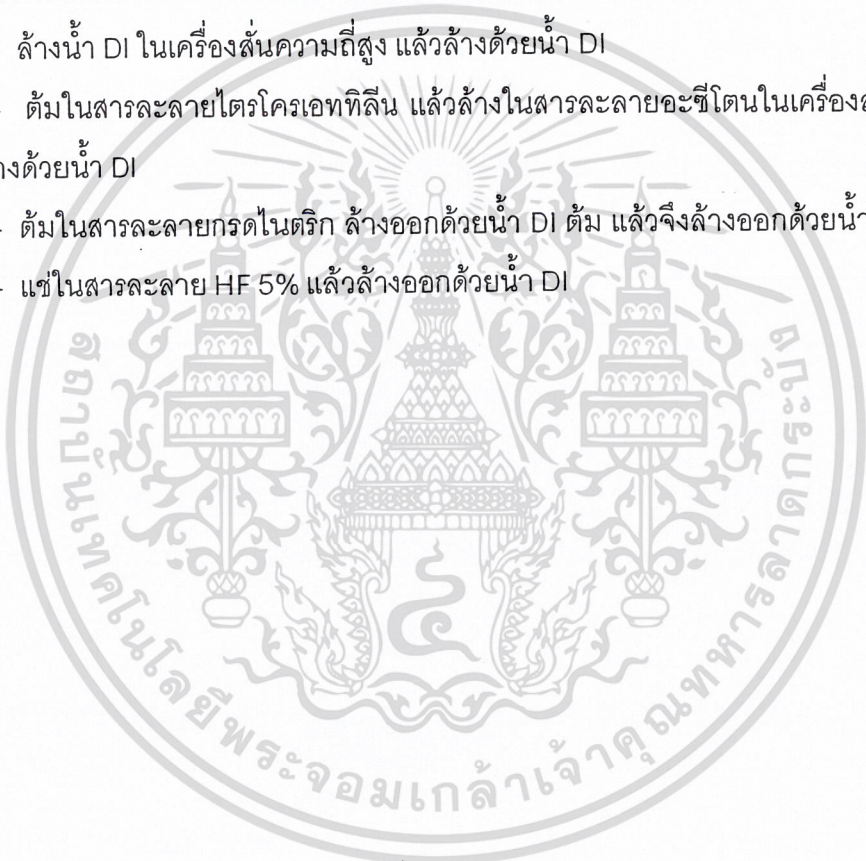
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

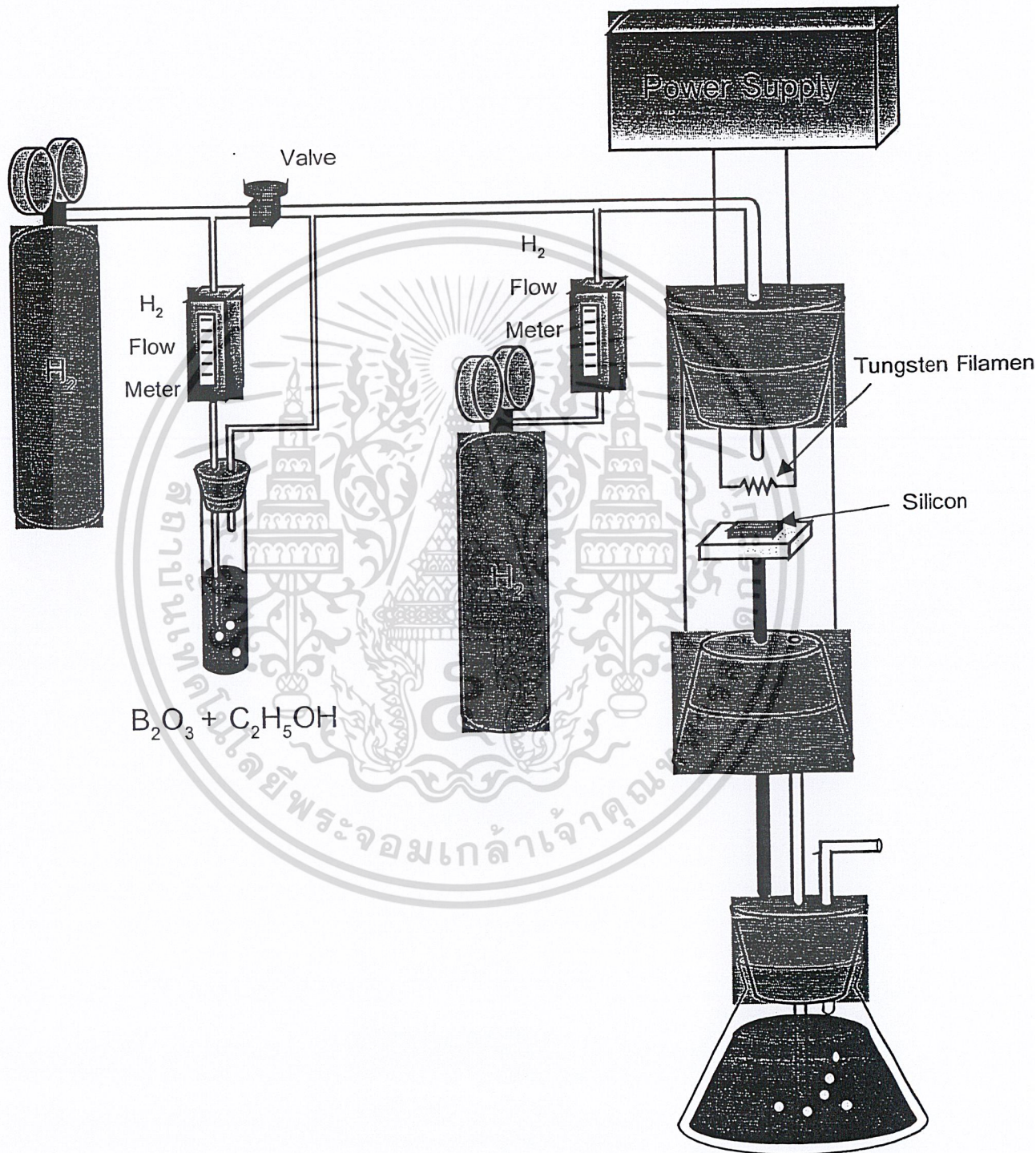
4. เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างฟิล์มเพชรแล้วค่อยๆลดระยะห่างระหว่างแผ่นพอร์ซิติคกับไส้หลอดทั้งสแตนประมาณ 3 เซนติเมตร จากนั้นค่อยๆลดกระแสไฟฟ้า แล้วจึงปิดแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรเจนทั้งสองถัง รอจนกระทั่งไม่มีก๊าซไฮโดรเจนค้างใน Chamber แล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปสู่กระบวนการถัดไป

### 3.2.2 กระบวนการทำความสะอาดฟิล์มเพชร

หลังจากที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเรียบร้อยแล้วฟิล์มเพชรที่ได้มีความสกปรกเนื่องจากเขม่าคาร์บอนหรือกราฟาइट์จากกระบวนการสร้าง ขั้นตอนการทำความสะอาดมีดังนี้

- ล้างน้ำ DI ในเครื่องสั่นความถี่สูง แล้วล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในสารละลายไตรโครเอทิลีน แล้วล้างในสารละลายอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง แล้วจึงล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในสารละลายกรดไนตริก ล้างออกด้วยน้ำ DI ต้ม แล้วจึงล้างออกด้วยน้ำ DI
- แช่ในสารละลาย HF 5% แล้วล้างออกด้วยน้ำ DI





รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ HFCVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

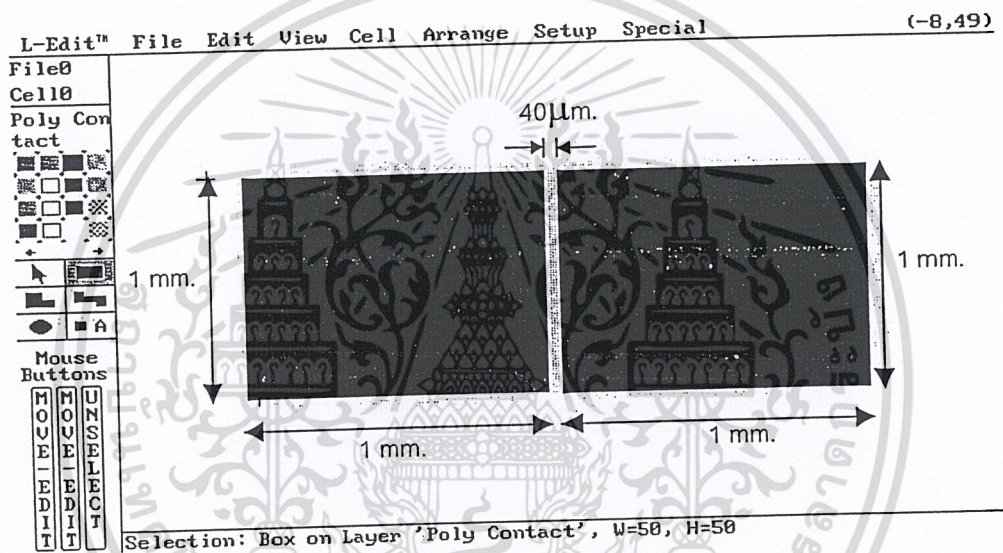
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

#### 3.3.1 การออกแบบลวดลายโลหะ

##### 3.3.1.1 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

การออกแบบลวดลายโลหะโดยจะใช้โปรแกรม LEDIT หลังจากนั้นจะนำไปพิมพ์ลงแผ่นใส แล้วนำไปติดบนกระจก พร้อมทั้งจะนำเป็นมาร์กต้นแบบ เพื่อนำไปใช้สร้างลวดลายโลหะเพื่อศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชรชนิดพี ลักษณะลวดลายโลหะที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 3. โดยระยะห่างระหว่างขั้วโลหะทั้ง 2 คือ  $40\ \mu\text{m}$ . ความกว้างและความยาวของขั้วโลหะมีค่าเท่ากันคือ  $1\ \text{mm}$ .

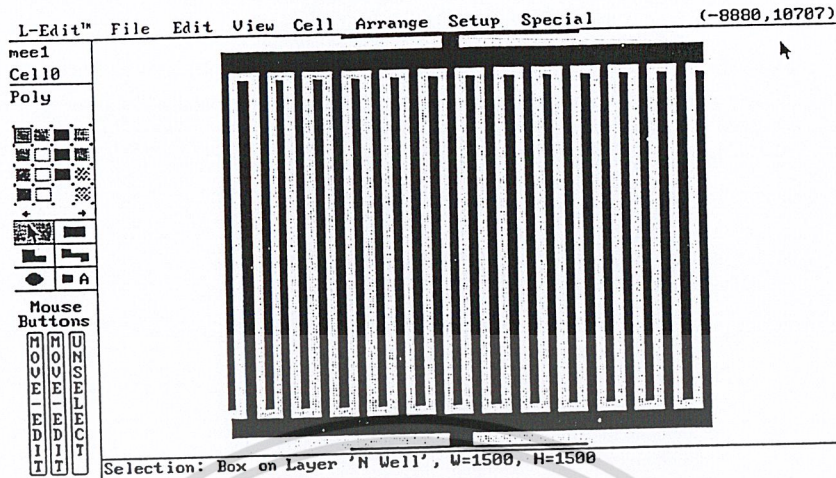


รูปที่ 3.4 ลักษณะลวดลายโลหะที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

##### 3.3.1.2 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อใช้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะที่มีผลต่อการไหลของกระแสในฟิล์มเพชร

เนื่องจากเพชรที่สร้างได้นั้นจะมีลักษณะเป็นโพลีคริสตัลไลน์ ซึ่งจะมีขอบของเกรนเกิดขึ้น ซึ่งขอบของเกรนนี้จะเป็นตัวกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนเดินทางได้สะดวก หรือจะทำตัวเป็นศูนย์กลางการแพร่ป้อนอิเล็กตรอน การแพร่ป้อนอิเล็กตรอน จะทำให้กระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงที่จะไหลออกสู่วงจรมานอกนั้นมีความน้อย ดังนั้นการทำลวดลายโลหะนั้นจำเป็นที่จะต้องทำให้มีขนาดระยะห่างแคบๆ เพื่อป้องกันการเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล ในการออกแบบลวดลายโลหะที่จะศึกษาในครั้งนี้ก็จะดูว่าขนาดของระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะที่เหมาะสมที่จะทำให้กระแสไหลในฟิล์มเพชรได้ดีนั้นจะมีขนาดเท่าไร ซึ่งลวดลายจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ลักษณะลวดลายโลหะที่ใช้ศึกษาระยะห่างระหว่างลวดลายที่มีผลต่อการไหลของกระแสในฟิล์มเพชร

โดยขนาดของลายโลหะจะมีขนาดคงที่คือ  $40 \mu\text{m}$  โดยมีพื้นที่รับแสงเท่ากันหมดคือ  $2.3 \text{ mm}^2$  โดยทำการออกแบบระยะห่างระหว่างลวดลายคือ  $40 \mu\text{m}$

### 3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

หลังจากที่ทำการสร้างฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอนแล้วต้องทำการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชรเพื่อนำมาศึกษาคุณสมบัติต่างๆ โดยจะใช้โลหะทองคำซึ่งรอยสัมผัสที่ได้จะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งวิธีการสร้างรอยสัมผัสทองคำมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ใช้วิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่อง Vacuum Evaporate
- จึงนำไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อสร้างลวดลายโลหะทองคำให้เหมาะสมกับการนำไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า
- ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด  $\text{HCl} + \text{HNO}_3$
- ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล  $1000 \text{ cc/min}$  เป็นเวลา 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 กระบวนการสร้างขั้วโลหะทองคำเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

ในหัวนี้จะเป็นกระบวนการสร้างขั้วโลหะทองคำเพื่อการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของฟิล์มเพชรเช่น ความต้านทาน สภาพนำไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

- นำแผ่นพอลิซิลิกอนที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.1 ไปทำการสังเคราะห์ชั้นของฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์ แล้วทำความสะอาดฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2.2

- ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.1

- ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด  $\text{HCl} + \text{HNO}_3$

- ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล  $1000\text{ cc/min}$  เป็นเวลา 15 นาที



### 3.3.4 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์มีขั้นตอนดังนี้

- นำแผ่นพอร์ซซิติกอนที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.1 ไปทำการสังเคราะห์ชั้นของฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์ แล้วทำความสะอาดฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2.2

- ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

- ทำการลอกทงส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด  $\text{HCl} + \text{HNO}_3$

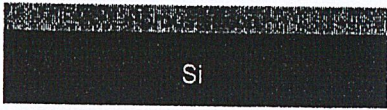
- ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล  $1000\text{ cc/min}$  เป็นเวลา 15 นาที

โดยแผนภาพกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.6

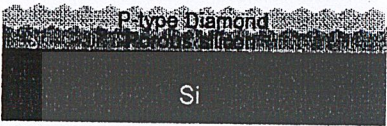




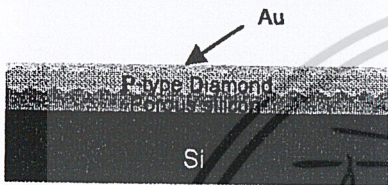
แผ่นซิลิกอนระนาบ 111 ที่ทำความสะอาดเบื้องต้น



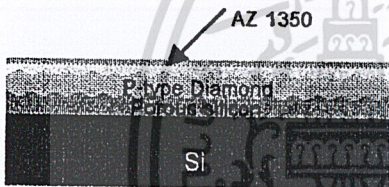
ทำการสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน



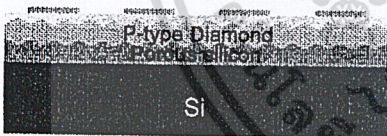
สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่ายเป็น สารละลาย  $C_2H_5OH + B_2O_3$



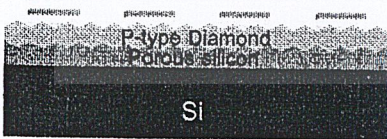
เคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporate



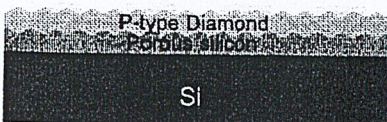
เคลือบน้ำยาไวแสง AZ1350 ด้วยเครื่อง Spinner



ใช้กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายโลหะที่ต้องการ



ลอกทองคำส่วนที่ไม่ต้องการด้วย  $HCl + HNO_3$



ลอก AZ1350 ส่วนที่เหลือด้วย Acetone

รูปที่ 3.6 แผนภาพกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ

#### 3.4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

เพื่อเป็นการหาค่าต่างๆ คือ ความต้านทาน สภาพความต้านทานไฟฟ้า จำนวนโฮล จำนวนอะตอมสารเจือโบรอน และค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชร โดยมีขั้นตอนดังนี้

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2.1 บนแผ่นซิลิกอน โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโบรอนต่อแอลกอฮอล์ (B:C) ที่ 1ppm, 10ppm แล้วทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2

-ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.1

-ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด  $\text{HCl} + \text{HNO}_3$

-ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล  $1000\text{ cc/min}$  เป็นเวลา 15 นาที

-ทำการวัดค่าคุณสมบัติกระแสและแรงดันแล้วคำนวณหาค่าความต้านทาน สภาพความต้านทานไฟฟ้า จำนวนโฮล จำนวนอะตอมสารเจือโบรอน และค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชร

### 3.5 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 3.5.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซซิลิกอน เป็นเวลา 40 นาที โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน B:C เป็น 1ppm, 10ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ

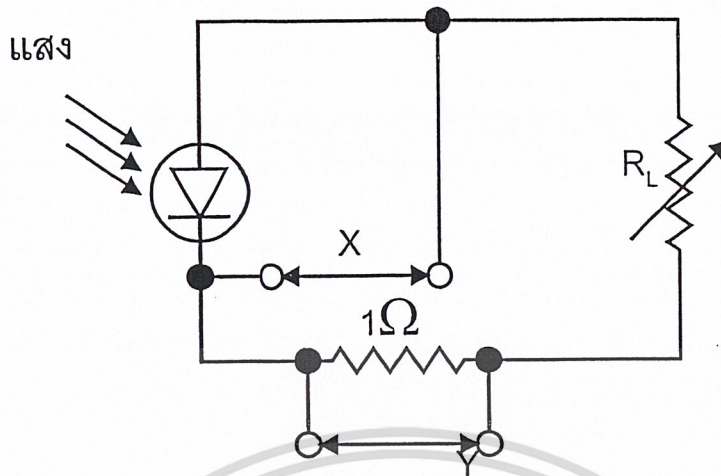
3.3.1.2

-ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด  $\text{HCl} + \text{HNO}_3$

-ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล  $1000\text{ cc/min}$  เป็นเวลา 15 นาที

-ทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เครื่อง Solar Simulator ที่ความเข้มแสง  $11000\text{ lux}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรการวัดคุณสมบัติกระแสไฟฟ้าและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

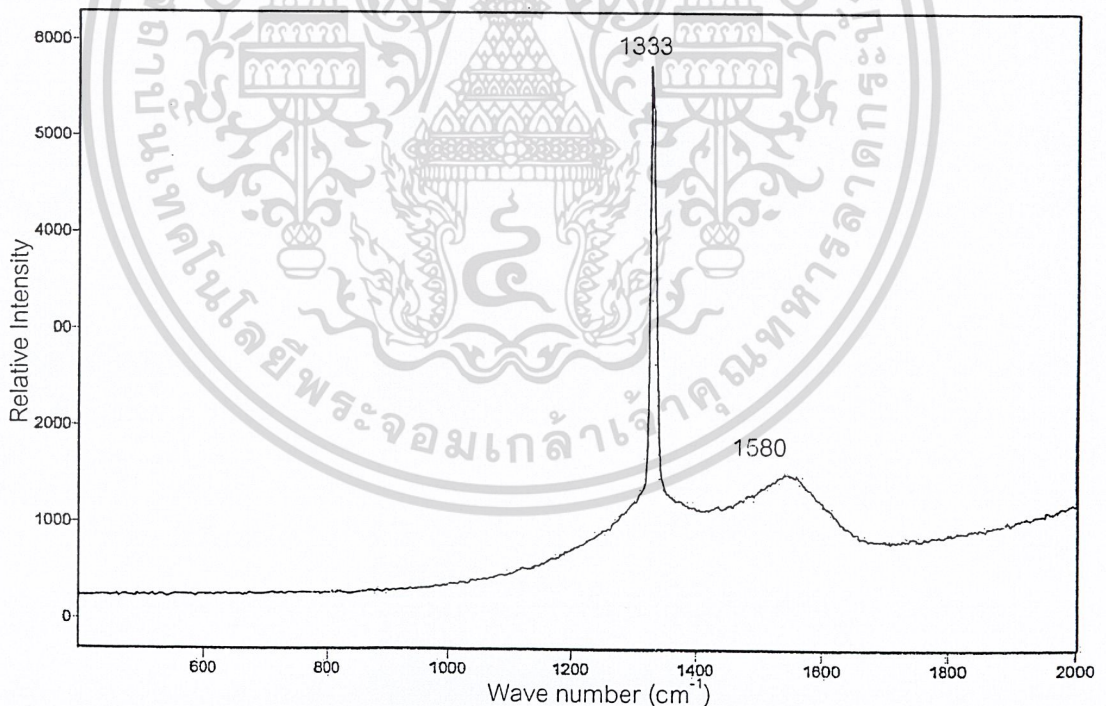
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างและการกำหนดเงื่อนไขการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ จากบทที่ 3 แล้ว ในบทนี้จะเป็นการเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ก่อนที่จะนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยอาศัยเทคนิค Scanning Electron Microscopy และ Raman Spectroscopy โดยผลการตรวจสอบ Raman Spectroscopy แสดงดังรูปที่ 4.1

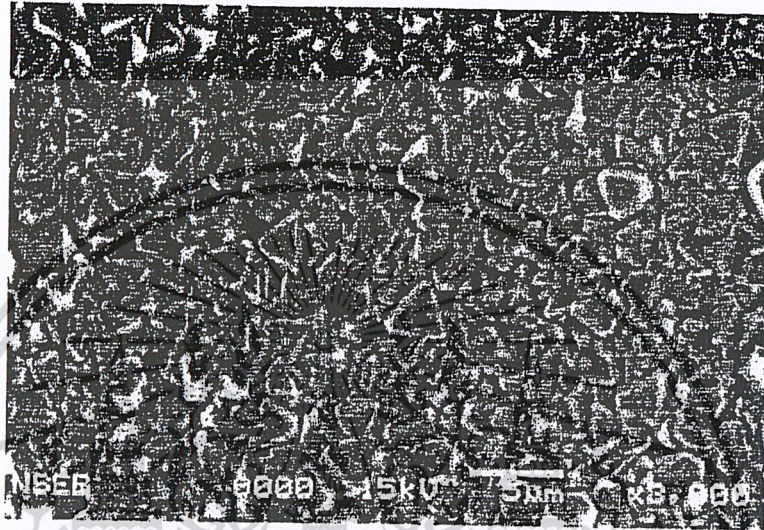


รูปที่ 4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรชนิดพี

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่ายอดคลื่นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 1333 cm<sup>-1</sup> ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งยอดคลื่นของเพชรธรรมชาติที่ 1332 cm<sup>-1</sup> ซึ่งถือได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงเพชรจริง ซึ่งจากกราฟยังจะเห็นว่า มียอดคลื่น  $1580\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของกราฟไฟต์ แต่มีความสูงต่ำแสดงว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีกราฟไฟต์ปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ

หลังจากนั้นก็จะนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการตรวจสอบด้วยวิธี Scanning Electron microscopy ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2

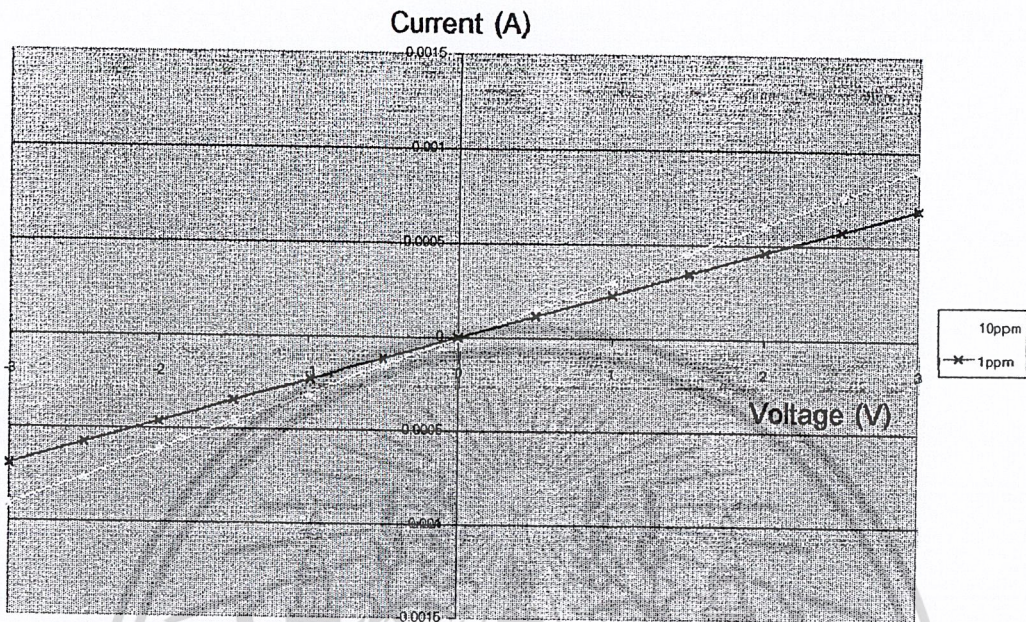


รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวระนาบ(111)ของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรตามวิธีการในหัวข้อ 3.4.1 ได้ผลดังรูปที่ 4.3



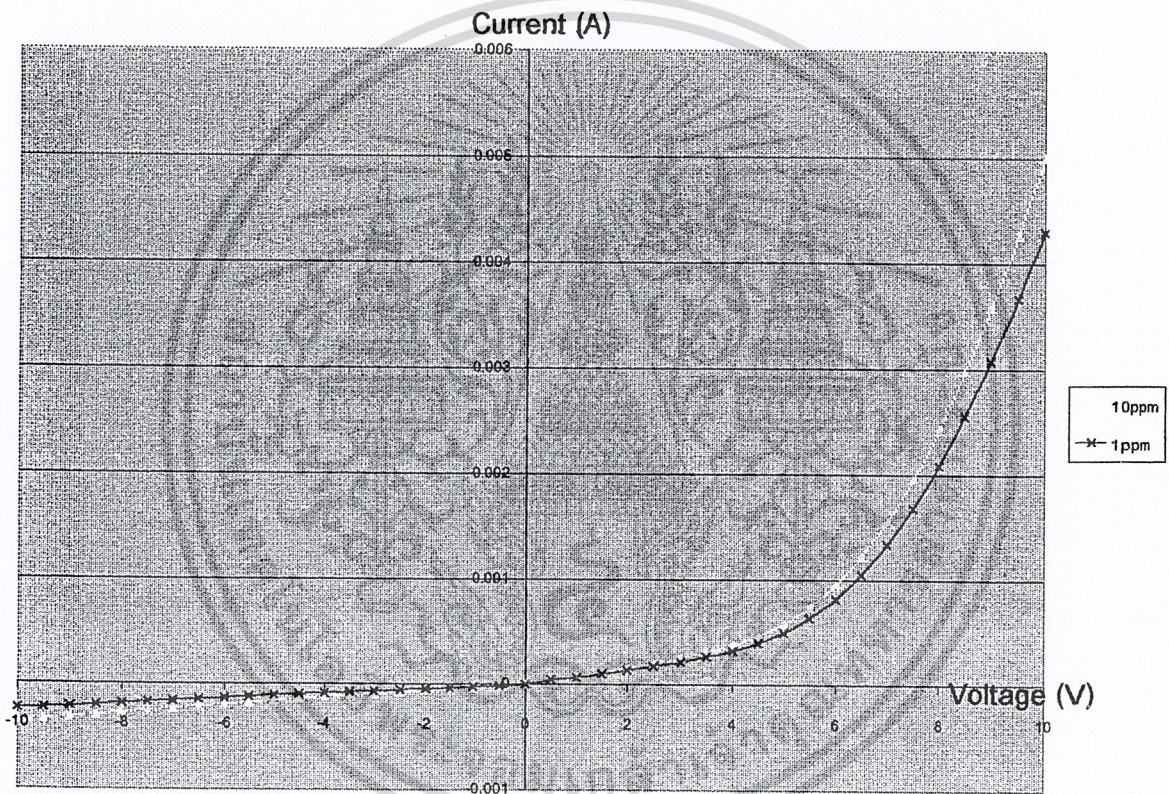
รูปที่ 4.3 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี

จะเห็นว่าฟิล์มเพชรชนิดพีจะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่ออัตราส่วน B:C มีค่าเพิ่มขึ้น จากกราฟที่ได้สามารถคำนวณค่าความต้านทาน(Resistance:R), ค่าพิกัดความต้านทาน (Resistivity: $\sigma$ ), ค่าความหนาแน่นประจุโฮล(Hole carrier density), ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับวาเลนซ์ ( $E_F-E_V$ ) และค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือโบรอน( $N_B$ )

### 4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์

#### 4.3.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

หัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของอะตอมสารเจือปนที่ผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-Dia/n-Psi โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือปนเป็น 1ppm, 10ppm โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า B:C

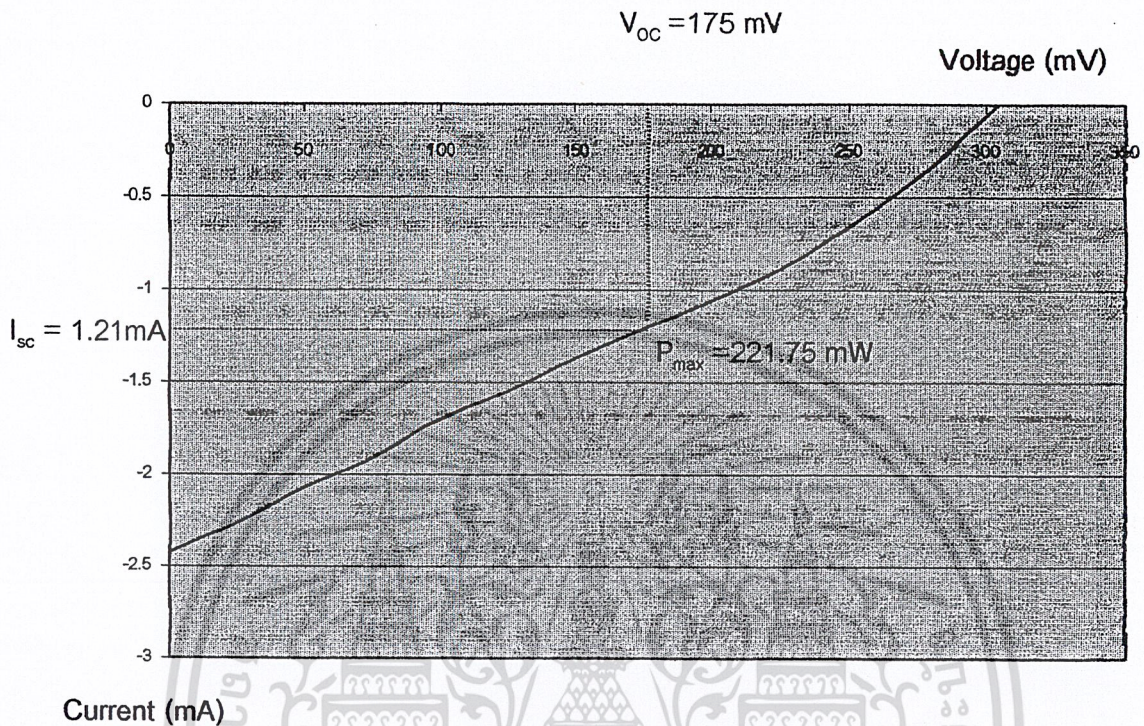
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อที่แล้วได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดกับเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่การใช้งาน ซึ่งโฟโตไดโอดนั้นจะใช้งานอยู่ในช่วงจตุภาคที่ 3 แต่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำงานอยู่ในจตุภาคที่ 4

##### 4.4.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมสารเจือเป็น 1ppm, 10ppm โดยมีความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 2  $\mu\text{m}$  โดยจะใช้แสงอาทิตย์เทียมจากเครื่อง Solarsimulator ที่มีความเข้มแสงประมาณ  $0.835 \text{ mW/m}^2$  หรือที่ AM1.5

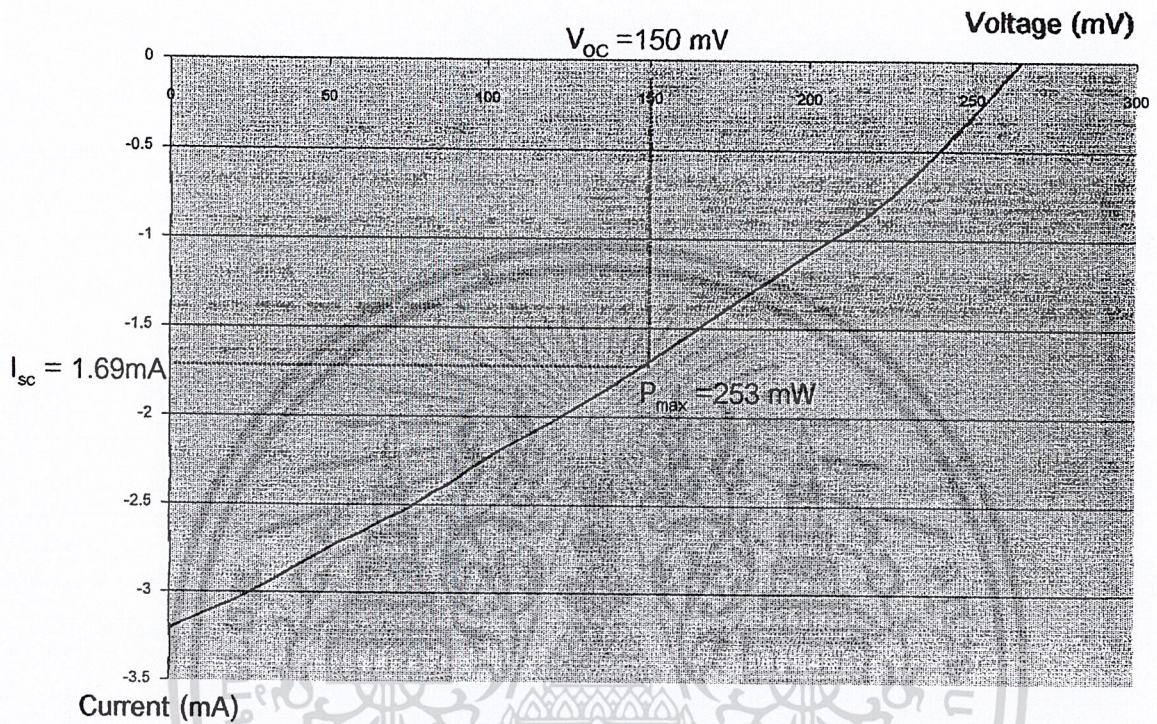


รูปที่ 4.5 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm

กระแสลัดวงจร $I_{sc}$ (mA)	2.42 mA
แรงดันเปิดวงจร $V_{oc}$ (mV)	304.5mV
พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\text{mm}^2$ )	$2.3 \text{ mm}^2$
พลังงานสูงสุด (mW)	221.75
ฟิลแฟคเตอร์ FF	0.287
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	11.02%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm

ตารางที่ 4.2 ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm

กระแสลัดวงจร $I_{sc}$ (mA)	1.69 mA
แรงดันเปิดวงจร $V_{oc}$ (mV)	265 mV
พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\text{mm}^2$ )	$2.3 \text{ mm}^2$
พลังงานสูงสุด (mW)	253
ฟิลแฟคเตอร์ FF	0.293
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	13.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดของพอร์สซิลิกอนและฟิล์มเพชร โดยได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอน พบว่าเมื่ออะตอมสารเจือมีค่าสูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นและมีผลทำให้ฟิล์มเพชเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และได้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพี จะเห็นว่าฟิล์มเพชรชนิดพี จะมีค่าความต้านทานลดลง เมื่ออัตราส่วน B:C มีค่าเพิ่มขึ้น จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี / พอร์สซิลิกอนนั้น ได้มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งกระบวนการสร้างง่าย ใช้ต้นทุนต่ำ เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นๆ ก็หวังอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ศึกษาและผู้สนใจจะพัฒนางานให้ดีขึ้นและสามารถใช้งานได้จริงในอนาคต



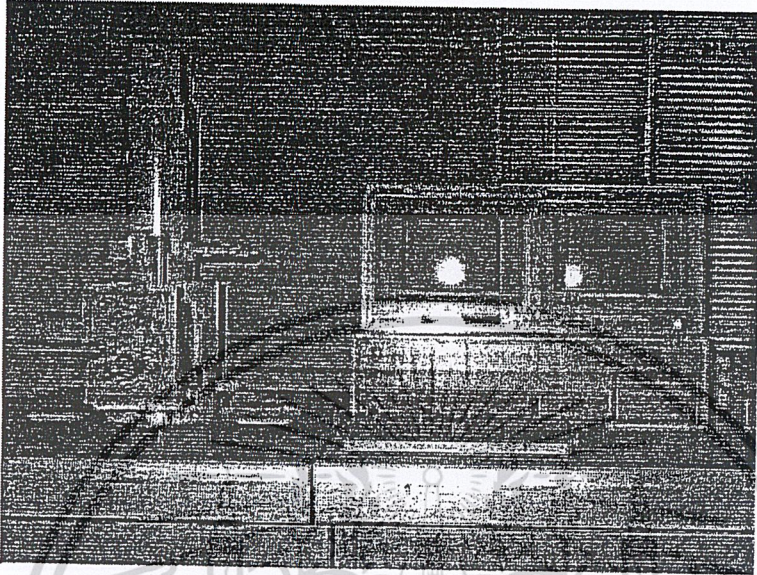
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

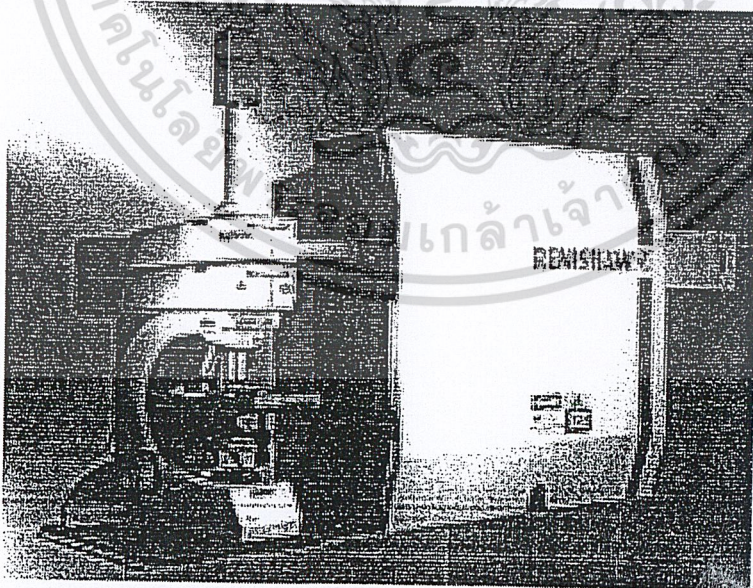
- [1] นิรุช ปิ่นเกตุ "การศึกษาและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544
- [2] Leigh Canham.1997. Properties of Porous Silicon. London . Inspec.
- [3] Matsuo Fukada. Optical Semiconductor Devices. United State of America : John-Wiley & Sons,INC.
- [4] Lawrence S. Pan , Don R.Kania. 1995. Diamond : Electronic Properties and Applications. Boston : Kluwer Academic Publishers.
- [5] Teompong Pheckul " Study on Electrical Characteristics of p-Type Diamond/n-Type Silicon Heterojunction Diodes," Dotoral Thesis.,Tokai University Kyushu Campus.
- [6] ดุสิต เครื่องงาม. "สิ่งประดิษฐ์อิเล็คทรอนิกส์ ฟิลิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งานต่าง เล่ม 1" สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [7] คนรัชต์ วรรณนา และคณะ. "การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอนชนิดเอ็น. " ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, พฤศจิกายน 2544. หน้า 939-944.
- [8] สมเกียรติ สุขเดช.2545. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์.พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ.
- [9] Kanaan Kano. Semiconductor Devices. :Prentice-Hall,International,Inc.
- [10] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง "การศึกษาคอนสมบัติลูมิเนสเซนส์ของชั้นพอร์ซซิลิกอน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542
- [11] สมชัย วงเมตตา "การสร้างและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์และซิลิกอน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2525

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

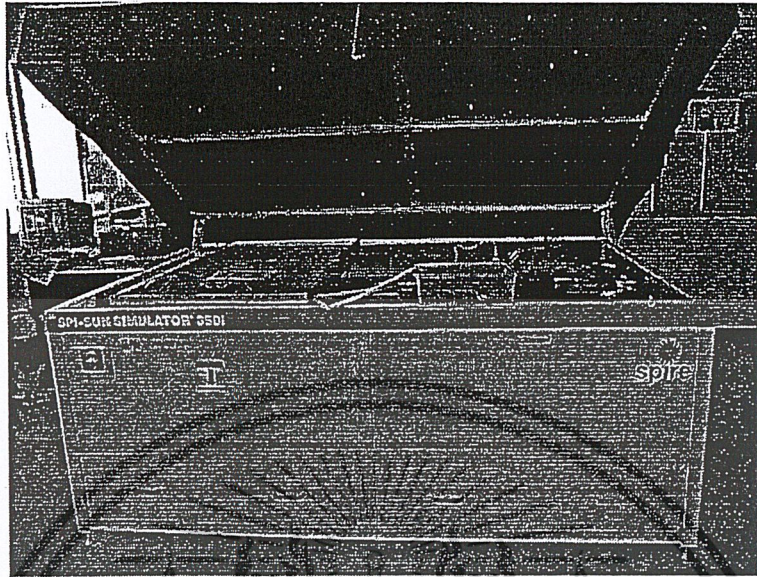


รูปที่ 1 เครื่อง Scanning Electron Microscope ของ JEOL รุ่น JCM-5410



รูปที่ 2 เครื่อง Raman Spectroscopy รุ่น System 2000 ของบริษัท Renishaw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 เครื่อง Spi-Sun Simulator 350i



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้