

การสร้างและศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์
แบบรอยต่อ พี-ไดมอนด์/เอ็น-ซิลิกอน

STUDIES AND FABRICATION SOLAR CELL
HETEROJUNCTION P-DIAMOND/N-SILICON



จรัญธร สีเขียวแดง
ชูศักดิ์ พระสลัก

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...46207
วัน, เดือน, ปี 2 1 ส.ค. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงาน ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างและศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ แบบรอยต่อ พี-ไดมอนด์/เอ็น-ซิลิกอน

ผู้จัดทำ

1. นายจรูญธร สีเขียวแดง
2. นายชูศักดิ์ พระสลัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างและศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ แบบรอยต่อ พี-ไดมอนด์/เอ็น-ซิลิกอน
STUDIES AND FABRICATION SOLAR CELL HETEROJUNCTION
P-DIAMOND/N-SILICON

นายจรูญธร สีเขียวแดง

นายชูศักดิ์ พระสลัก

โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างและศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ พี-ไดมอนด์/เฮนซิลิกอน

นายจรูญธร สีเขียวแดง

นายชูศักดิ์ พระสลัก

รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการสร้างและศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อเนื้อสารแบบต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิกอนชนิดเอ็น โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธี CVD แบบ Hot Filament บนฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นโดยการศึกษาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน(1,10,100 และ1000 ppm.)โดยที่อัตราส่วนของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือที่ 1000 จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีค่าดีที่สุด จากนั้นศึกษาผลของความเข้มของแสง (1000,3000,5000,7000,9000 และ 11,000 ลักซ์) โดยที่ 11000 ลักซ์ ให้ประสิทธิภาพออกมาดีที่สุด ผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพี (1,2,3,4 และ 5 ไมครอน) โดยที่ความหนาที่ 2 ไมครอน ได้ประสิทธิภาพออกมาดีที่สุด จากนั้นผลของความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ (0,5,10,15,20,25,30และ35 โอห์ม) โดยที่ความต้านทานภายใน ที่ศูนย์ โอห์มให้ประสิทธิภาพดีที่สุด และผลของอุณหภูมิที่ผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ (27,50,100,150 และ200 องศาเซลเซียส)ซึ่งที่ 27 องศาเซลเซียสได้แรงดันเปิดวงจร(Voc) และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร(Isc)ออกมาดีที่สุดซึ่งมีผลทำให้ได้ประสิทธิภาพออกมามากที่สุด

Studied and Fabrication Solar cell Heterojunction P-Diamond/N-Silicon

Mr.Jarantorn Sikheawdeang

Mr.Choosak Phrasalak

Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang **Thesis Advisor**

Year 2001

ABSTRACT

In this thesis, the properties and the fabrication solar cell heterojunction p-diamond/n-silicon were studied. We synthesis p-diamond thin film by Hot Filament CVD on n-silicon substate for studied property current and voltage of p-diamond/n-silicon junction . The effect of B:C ratio were 1ppm.,10ppm.,100ppm. and 1,000ppm. to current and voltage of solar cell for B:C ratio at 1000ppm. gave the best efficiency and then we studied the effect of light (1000,3000,5000,7000,9000 and 11,000 lux) by 11000lux gave the most power.Afterthat, about the thickness of p-diamond of solar cell were 1 μ m, 2 μ m, 3 μ m, 4 μ m and 5 μ m by 2 μ m we got the most efficient . Otherwise ,we studied the effect of resistance of solar cell by zero ohm gave the most efficient and the effect of temperature were 27°C,50°C,100°C,150°C and 200 °C by 27 °C gave the most of open circuit voltage (Voc) and the most of short circuit current (Isc) then it's also gave the most power.

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จสมบูรณ์ของปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ เกิดขึ้นได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.วิสุทธ์ ฐิติรุ่งเรือง ในการให้ความรู้ แนวคิด รวมทั้งคำแนะนำต่างๆ ด้วยดีตลอดมาขอ ขอบคุณ พี่ พีระวุฒิ ชินวรรังสี ที่ช่วยควบคุมดูแลให้คำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆ ในการทดลอง ครั้งนี้มาด้วยดีตลอด ขอขอบคุณพี่ นิรุช ปิ่นเกตุ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการทดลองครั้งนี้ และพี่ๆ บัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ห้องวิจัยสารกึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานทุกท่าน และเพื่อนๆ ทุกคนที่ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

จรัญธร สีเขียวแดง
ชูศักดิ์ พระสลัก



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
คำนำ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	1
1.2 ชนิดของเซลล์แสง.....	2
1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	2
1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน.....	2
1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	3
1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ.....	4
1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร.....	5
1.3.1 Graphite.....	6
1.4 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชร.....	7
1.4.1 คุณสมบัติทางกล.....	8
1.4.2 คุณสมบัติทางแสง.....	8
1.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	9
1.4.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....	10
1.5 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่างๆ.....	10
1.5.1 Thermal Enhanced CVD Methods.....	11
1.5.1.1 Filament-Assisted Thermal CVD.....	11
1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน.....	12
1.7 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรของวิธี CVD.....	12

IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.7.1 กระบวนการของก๊าซเฟส.....	12
1.7.2 ปฏิกิริยาการฉีกตัวของฟิล์ม.....	13
1.8 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	14
1.8.1 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	19
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง.....	19
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง.....	19
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง.....	20
2.1.3 การเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง.....	21
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.2.2 พลังงานแสงที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์.....	22
2.2.3 ผลตอบสนองความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.3 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	24
2.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดกอนชนิดเอ็น.....	24
2.3.2 สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพี.....	25
2.4 ทฤษฎีรอยต่อ.....	25
2.4.1 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารชนิดเดียวกัน.....	25
2.4.2 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารต่างชนิดกัน.....	25
2.4.2.1 การไบแอสตรงให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si.....	30
2.4.2.2 การไบแอสย้อนกลับให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si.....	32
2.5 ปฏิกิริยาการโฟโตอิเล็กทริก.....	34
2.5.1 โฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive).....	34
2.5.2 โฟโตโวลทาอิก.....	36
2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells).....	36
2.6.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์.....	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (Homojunction solar cell).....	37
2.6.1.1.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
2.6.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction solar cell).....	41
2.6.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานในเซลล์ แสงอาทิตย์.....	44
2.6.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	46
2.6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
2.6.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L	47
2.6.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_D	48
2.6.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}	49
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	51
3.1 การเตรียมฐานรองซิลิกอน.....	51
3.1.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเบื้องต้น.....	51
3.1.2 การขัดแผ่นซิลิกอน.....	51
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	52
3.3 ลักษณะลวดลายรอยสัมผัส โลหะกับฟิล์มเพชร.....	55
3.3.1 แบบลวดลายโลหะ.....	55
3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร.....	57
3.4 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM และ เทคนิค Raman Spectroscopy.....	59
3.4.1 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM.....	59
3.4.2 การตรวจฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy.....	60
3.5 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อแบบ p-Dia/n-Si.....	60
3.5.1 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแส และแรง ดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 ผลของความเข้มข้นของอัตราส่วน B:C ต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	61
3.5.3 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์.....	61
3.5.4 การศึกษาผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	63
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	63
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์.....	64
4.2.1 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	64
4.2.2 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	65
4.2.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์.....	71
4.2.4 ผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	74
4.2.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์.....	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนด์.....	9
1.2 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน.....	18
2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่ 300K.....	29
4.1 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μ m.....	48
4.2 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 10 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μ m.....	49
4.3 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 100 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μ m.....	50
4.4 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μ m.....	51
4.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับซิลิกอน และเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นซิลิกอนเนื่องมาจาก อุณหภูมิ.....	60
4.6 ตารางฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น.....	61

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
1.2 โครงสร้างผลึกของเพชร.....	5
1.3 โครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราฟไฟต์และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในกราฟไฟต์ และเพชร.....	7
1.4 แผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD.....	11
1.5 กลไกการนิวเคลียชันและการเกิดชั้น intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง.....	14
1.6 ลักษณะรูปพื้นผิวด้านหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM.....	15
1.7 Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนของ CH_4 / H_2 มีค่าต่างกัน (a) 0.5 % CH_4 / H_2 (b) 2.0 % CH_4 / H_2 (c) 5.0 % CH_4 / H_2	16
2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	19
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	21
2.3 ผลตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน.....	24
2.4 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (ก) ซิลิกอนชนิดเอ็น (ข) ฟิล์มเพชรชนิดพี.....	24
2.5 ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่ยังไม่นำมาต่อกัน.....	26
2.6 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันที่สภาวะสมดุล.....	27
2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น.....	30
2.8 กราฟคุณสมบัติกระแสแรงดันของ p-Dia/n-Si.....	31
2.9 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสตรง.....	31
2.10 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับ ในขณะ $V < V_R$	33
2.13 ลักษณะการเกิดกระแสโฟโตในเซลล์แสงอาทิตย์.....	37
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
2.15 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	40
2.16 สเปกตรัมผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรโร.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ลักษณะของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโรที่ไม่มีรอยต่อแหลม.....	42
2.18 ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโร.....	43
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บน กราฟแบบเซมิล็อก.....	45
2.20 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	45
2.21 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	46
2.22 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
2.23 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์.....	50
3.1 รูปลักษณะรอยขีดที่เกิดจากการขัดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm	52
3.2 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD.....	53
3.3 โคอะแกรมระบบ CVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	54
3.4 รูปลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	55
3.5 รูปขยายของลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	56
3.6 ลักษณะของกระจกต้นแบบลวดลายโลหะของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์.....	56
3.7 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ.....	58
3.8 ความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างได้จากการใช้เวลาที่สร้างแตกต่างกัน.....	59
3.9 วงจรแสดงการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	60
3.10 วงจรการวัดผลของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์.....	62
4.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ(111)ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD.....	63
4.2 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD.....	64
4.3 ลักษณะ สมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรค่าต่างๆ....	77
4.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1 ppm ที่ความหนา ฟิล์มเพชร 2 μm	66
4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 10 ppm ที่ความหนา ฟิล์มเพชร 2 μm	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 100 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm	68
4.7 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm	69
4.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ B:C เป็น 1, 10, 100 และ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm	70
4.9 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm	71
4.10 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm	72
4.11 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 100 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm	72
4.12 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm	73
4.13 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
4.14 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์.....	74
4.15 ผลของความต้านทานที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	75
4.16 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อประสิทธิภาพที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	76
4.17 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1 ppm.....	77
4.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1000 ppm.....	77
4.19 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	78
4.20 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	78
4.21 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	79

คำนำ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาถึงการนำฟิล์มเพชรมาเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่แทนซิลิกอนเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าหลายประการ อาทิเช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำมาจากเพชรสามารถทำงานที่อุณหภูมิและที่ความถี่สูงได้ดีกว่าซิลิกอน และสามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นรอยต่อ P-Diamond/N-Silicon เพื่อทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณสมบัติที่ดี และกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี ก็สามารถทำได้ค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน โดยใช้วิธี CVD แบบ Hot Filament ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดี อุปกรณ์ราคาถูก สะดวก และมีความปลอดภัยสูง

โดยในรายงานฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบรอยต่อ P-Diamond/N-Silicon รายละเอียดของขั้นตอนการสร้างสามารถสรุปเป็นบทๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงเทคนิคต่างๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD และชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ รวมทั้งเทคนิคการตรวจสอบคุณสมบัติของเพชรด้วย Raman-Spectroscopy และเทคนิค SEM(Scanning Electromicroscopy)

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับแสง ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์ ทฤษฎีแถบพลังงานของ P-Diamond/N-Silicon รวมทั้งปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

บทที่ 3 เป็นการอธิบายถึงกระบวนการสร้างและทดลองเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 4 เป็นการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร รวมทั้งศึกษาผลของความเข้มข้นของอัตราส่วน โบรอนต่อคาร์บอนที่ 1,10,100 และ1000 ppm. ผลของความเข้มข้นของแสงที่1000,3000,5000,7000,9000และ11,000 ลักซ์ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ และผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

บทที่ 1

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกได้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1954 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจากการใช้งานในอวกาศในปี ค.ศ.1958 และเมื่อปี ค.ศ.1970 ได้เกิดปัญหาวิกฤตการณ์น้ำมันขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์จึงได้รับความสนใจอย่างจริงจังเพื่อใช้ในการเป็นแหล่งพลังงานสำรอง โดยในปัจจุบันนี้มีความต้องการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นทุกๆปี โดยในปี ค.ศ.1995 ปริมาณการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกรวมกันประมาณ 760 MW และมีปริมาณการผลิตทั่วโลกประมาณ 100 MW ต่อปี

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

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

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกมีมากมายมหาศาล ร้อยละ 99.98 ของพลังงานที่โลกได้รับล้วนมาจากแสงอาทิตย์ ที่เหลือร้อยละ 0.02 ได้มาจากพลังงานได้พิภพ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่เดินทางมาสู่โลกเรามีมากถึง 1.77×10^{14} KW ซึ่งมีมากกว่าพลังงานที่มนุษย์ต้องการ 8×10^7 KW ถึงกว่าล้านเท่า ดังนั้นถ้าเราใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราก็จะประหยัดพลังงานได้มากกว่ารวมทั้งเป็นการรักษาสังแวดล้อมได้อีกด้วย ดังนั้นถ้าเราพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่าไรเราก็จะได้รับประโยชน์จากแสงอาทิตย์มากขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้คือ

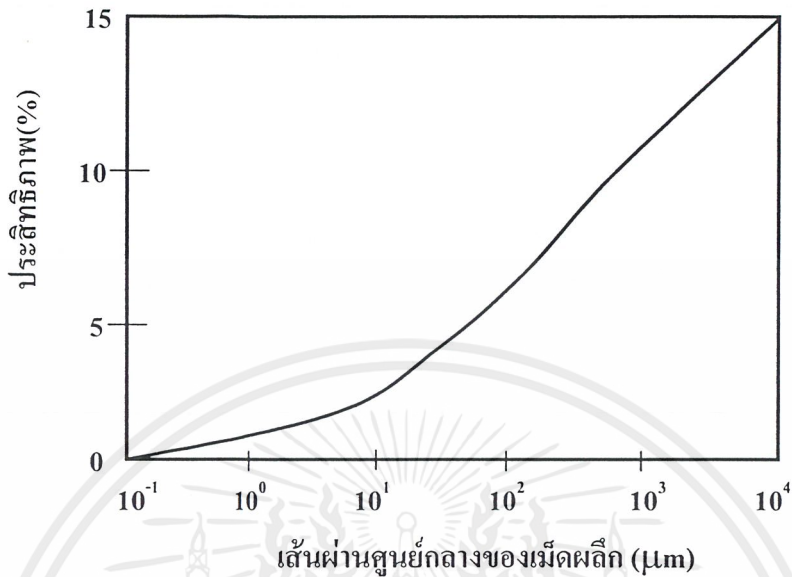
1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ปัจจุบันมีการผลิตใช้งานกันมากที่สุด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนนั้นทำมาจากซิลิกอนที่มีระนาบเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ความหนาของแผ่นซิลิกอนนั้นมีค่าน้อย ทำให้น้ำหนักเบาและเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงเค้นแม้จะมีความหนาเพียง 50 μm ก็ยังคงสภาพเป็นแผ่นได้ดี เซลล์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอนและแบบอะมอร์ฟัส โดยที่ลักษณะสมบัติการผลิตพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานน้อยมากอายุการใช้งานนานถึง 20ปี ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้จะมีบ้างก็คือ เนื่องจาก ผลึกซิลิกอนมีช่องว่างแถบพลังงานชนิดไม่ตรง (indirect band gap) ดังนั้นสมบัติการดูดกลืนแสงมีค่าน้อย การผลิตจึงต้องผลิตให้หนาพอสมควร ซึ่งความหนาจะอยู่ประมาณ 100 μm ขึ้นไป โดยที่การผลิตนั้นทำได้ง่าย ซึ่งใช้เทคโนโลยีการสร้าง IC ในการทำรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีความก้าวหน้าไปมากในปัจจุบัน โดยในทางทฤษฎีแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 44% แต่ในทางปฏิบัติจริงเซลล์ชนิดนี้จะมีการสูญเสียต่างๆเกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าต่ำลง

1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิกอน ที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิด ปนอยู่ในระนาบเดียวกัน เช่น (111),(211) และ (330) เป็นต้น เมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างของสีของแต่ละระนาบอย่างชัดเจน อาณาเขตของผลึกเรียกว่า “เกรน” (grain) เทคโนโลยีปัจจุบันนี้สามารถผลิตโพลีซิลิกอนให้มีเกรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบลไมครอนถึงหลายพันไมครอน ถ้าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์ พาหะโฟโตนิกที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อพี-เอ็น ออกสู่วงจรรายนอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรูปที่ 1.1 แสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้ คือจะมีพันธะของซิลิกอนที่มีแขนขาอยู่มาก ซึ่งไม่มีซิลิกอนอะตอมอื่นมาเกาะพันธะด้วย ซึ่งพันธะแขนขานี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสถานะจุดบกพร่อง (defect state) ซึ่งสถานะจุดบกพร่องนี้จะเป็นตัวคอยจับพาหะข้างน้อยจากแสงไม่ให้เดินทางออกสู่อากาศภายนอก และส่งผลทำให้เวลาอายุ (life time) ของพาหะข้างน้อยลดลง และที่ขอบของเกรนจะทำให้เกิดแถบพลังงานที่ขอบของเกรนเกิดเส้นโค้งขึ้น

1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิล์มบาง ซึ่งสร้างมาจากอะมอร์ฟัสซิลิกอนซึ่งเป็นซิลิกอนที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบ หรือ เป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมแต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึก แต่ในขณะที่การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอมนี้จะทำให้มีคุณสมบัติต่างๆ แปลกออกไปเช่น ค่าคงที่ต่างๆ ทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอน ก็คือ 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

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 μ m ในขณะที่ใช้ GaAs จะใช้ความหนาเพียง 10 μ m เซลล์ชนิดนี้จะมีความทนทางต่อรังสีสูง และทำงานได้ดีในความเข้มสูงๆ คุณสมบัติเด่นอีกข้อหนึ่งก็คือสามารถสร้างเป็นหลายๆ ชั้นได้จะทำให้สามารถมีศักยภาพในการดูดกลืนคลื่นแสงในลักษณะสเปกตรัมที่กว้าง ได้ดี

โดยที่กล่าวยกตัวอย่างชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์มาทั้ง 4 ชนิดนั้นสารแต่ละชนิดที่นำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่ำคืออยู่ระหว่าง 0.4-2.0 eV ซึ่งช่องว่างแถบพลังงานนี้เองจะเป็นตัวกำหนด “แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร” V_{oc} ซึ่งถ้า E_g มีค่ามากกว่าของ V_{oc} ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย แต่ถ้า E_g มีค่าน้อยก็จะได้ V_{oc} น้อยเช่นกัน

ตัวกำหนดค่าของ V_{oc} นอกจากจะเป็นค่า E_g แล้วยังมีอีกอย่างหนึ่งก็คือ “กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิ่มตัวของไดโอด” I_s (saturated reverse current) ซึ่งค่าของ I_s มีค่าน้อยก็ทำให้ค่าของ V_{oc} มีค่ามากเพราะค่าของ I_s จะขึ้นอยู่กับค่าของ E_g โดยที่ค่าของ E_g มาก I_s จะมีค่าน้อย

ปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำลงก็คือ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมินี้จะผลอย่างมากกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารที่มีค่า E_g ต่ำๆ มาทำ เพราะว่าอุณหภูมิจะทำให้ “กระแสไฟฟ้าลัดวงจร” (I_{sc}) สูงขึ้นแต่ไม่มากนัก แต่ค่าของ V_{oc} และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) จะมีค่าลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง

ซึ่งกล่าวโดยสรุปก็คือค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนนี้ก็คือ ค่าของ V_{oc} และ I_{sc} ต้องมีค่ามาก ส่วนค่าของ I_s จะต้องมิต่ำ โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงจนเกินไป ส่วนปัจจัยอื่นๆที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงนั้นเราจะไปวิเคราะห์ในบทต่อๆ ไป

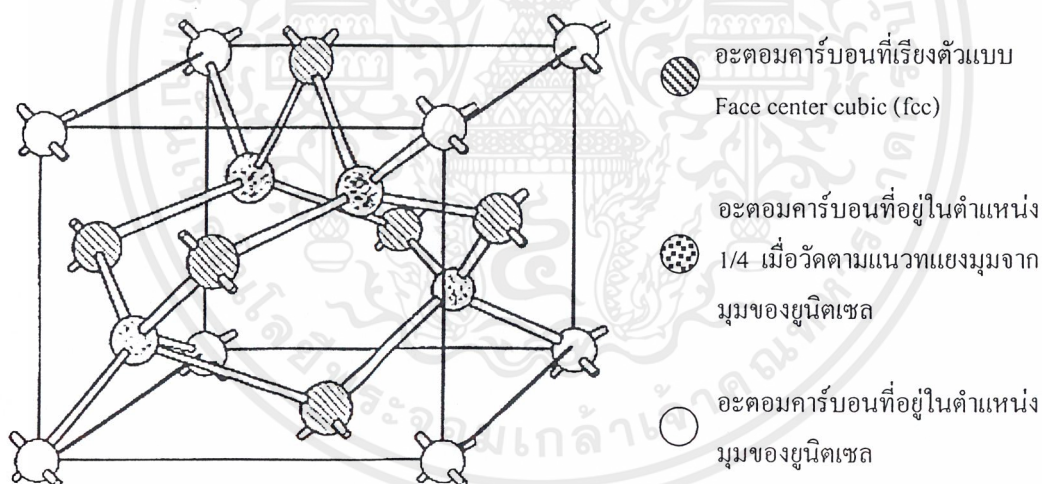
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองที่ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรได้ที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ โดยเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่า $E_g = 5.5$ eV ซึ่งเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างมากถ้าเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ก็คือ เพชร โดยสังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน ซึ่งเมื่อเรานำเพชรมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้ค่าของ V_{oc} มีค่าสูงขึ้นและค่าของ I_s มีค่าต่ำลงตามที่กล่าวมาแล้ว และสามารถใช้ในที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยเพชรยังสังเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร

ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เราสามารถนำเพชรมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน โดยเพชรที่จะนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเพชรดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยสังเคราะห์ขึ้นได้โดยวิธี CVD แบบความร้อนที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 1.2 โครงสร้างผลึกของเพชร

เพชรนั้นจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนซึ่งอยู่ในหมู่ 4 โดยอะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “Diamond structure” ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2

จากรูป 1.2 พบว่าภายในยูนิทเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง 1/4 เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิทเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้อะตอมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ $\{111\}$ 2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ $\{111\}$ การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567 \AA และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.54 \AA ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของเพชรมีค่า 1332 cm^{-1} และยอดลำดับที่สอง (Second order peak) ของเพชรเท่ากับ 2458 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่ 1284 cm^{-1}

1.3.1 Graphite

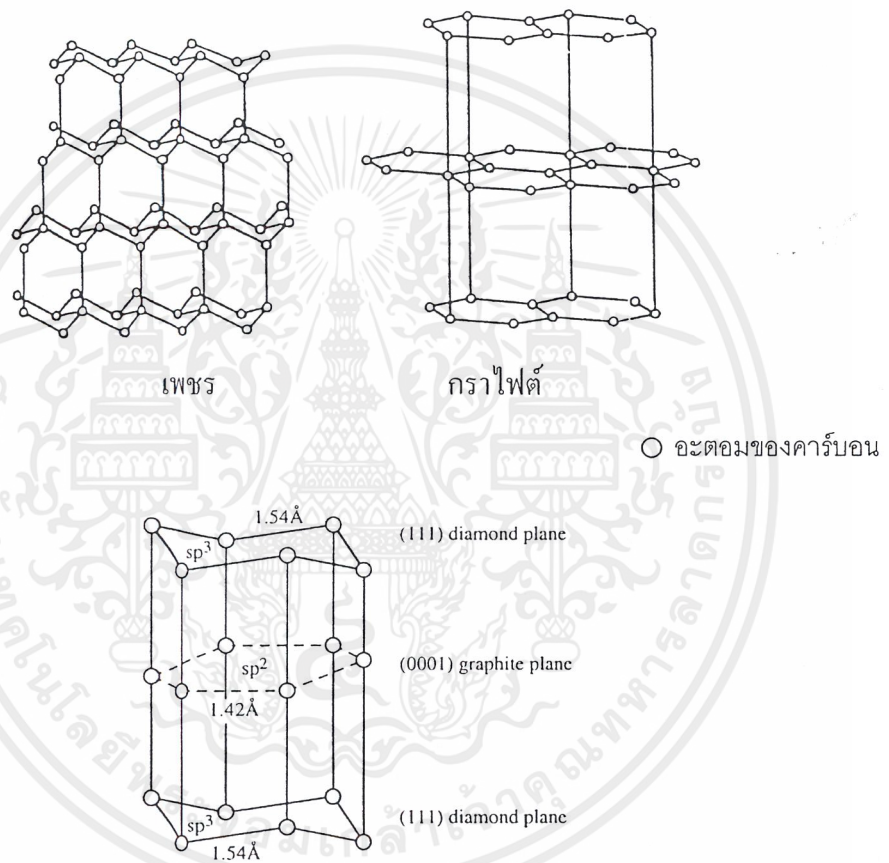
กราไฟต์เป็นรูปพื้นฐานของคาร์บอนที่พบได้มากที่สุด ลักษณะโครงสร้างภายในของมันแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 อะตอมคาร์บอนจะจับตัวที่ลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับเพชรแต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัดคืออะตอมคาร์บอนที่จับตัวเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมของกราไฟต์นั้นจะไม่มีการเหลื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้กันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร แต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบเสมอกัน อีกทั้งคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Trigonally กับอะตอมทั้งสามตัวที่อยู่ใกล้เคียงด้วยพันธะแบบ sp^2 การเรียงลำดับชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยมกราไฟต์จะเป็นแบบ AB AB AB... ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงเท่ากับ 1.42 \AA ในขณะที่ค่าคงที่แลตทิซคือ 6.707 \AA สำหรับกราไฟต์ ผลการวัดด้วย Raman spectroscopy จะแสดงตำแหน่งยอดลำดับที่หนึ่งที่มีค่า 1580 cm^{-1} และยอดลำดับที่สองอยู่ที่ 3240 cm^{-1} ตามลำดับ

นอกจากนี้แล้วยังมีรูปต่างๆ ของคาร์บอนที่พบได้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรอีก เช่น Amorphous carbon, Lonsdaleite และ Microcrystalline carbon ซึ่งก็จะมีค่าของยอดคลื่นที่แตกต่างกันออกไป

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นรูปต่างๆของคาร์บอนที่พบได้ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร อย่างไรก็ตามฟิล์มเพชรที่ได้จากการสังเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดๆ ค่ายอดคลื่นจาก Raman อาจจะไม่แสดงตำแหน่งตรงค่า 1332 cm^{-1} พอดี แต่จะแสดงตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับค่าดังกล่าว ตัวอย่างเช่น อาจจะมียอดคลื่นเป็น 1333 cm^{-1} เนื่องจากในการเกิดเพชรขึ้นตามธรรมชาติ กระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดตลอดจนปัจจัยรอบข้างต่างๆ มีผลทำให้เพชรธรรมชาติยังมีความแตกต่าง กับเพชรที่สังเคราะห์อยู่บ้าง แต่จากผลของการวิเคราะห์หาคุณสมบัติอื่นๆของฟิล์มเพชรพบว่ามีความใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่ได้จากเพชรธรรมชาติมาก จนยอมรับได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติเหมือนกับเพชรธรรมชาติ



รูปที่ 1.3 โครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราไฟต์ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในกราไฟต์ และเพชร

1.4 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของเพชรได้เป็น 3 คุณสมบัติใหญ่ๆคือ คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.1 คุณสมบัติทางกล

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

- **Thermal conductivity** เพชรมีค่า Thermal conductivity สูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด คือมีค่าถึง 20 watts/cm.K

- **Molar heat capacity** ค่า Molar heat capacity หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา จะพบว่าค่าของ Molar heat capacity ของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ก นั้นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อน โดยสามารถนำมาทำเป็น Heat sink ได้

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

1.4.2 คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาค่าดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ และความยาวคลื่นที่กำหนด ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของเพชรและวัสดุอื่นๆที่อุณหภูมิห้องจะแสดงในภาคผนวก ก

1.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพชรธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^{15} ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า $2,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ แต่ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ 500°C พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง $850 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเจอร์มาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมนไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูง ส่วนในวัสดุอื่นๆจะมีค่าความเร็วโฮลอิมิตัวและ Dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้า 10^4 V/cm ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลเริ่มมีการอิมิตัวสำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่ 10^7 cm/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 2.0×10^7 cm/s ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง 10^{16} Ω .cm

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

1.4.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวนิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตารางที่ 1.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์

MATERIALS	DIAMOND	Si	GaAs
Crystal Structure	Diamond	Diamond	Zinc blends
Energy gap (eV)	5.45	1.1	1.43
Electron mobility ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	2000 (5)	1500	8500
Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1800 (5)	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1(ต่อ)

MATERIALS	DIAMOND	Si	GaAs
Lattice constant (Å)	3.567	5.431	5.653
Thermal conductivity (W/cm.K)	20	1.5	0.46

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บหมายถึง Polycrystalline Diamond

1. เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนด์มากจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น (โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ

2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง

3. ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ โดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

1.5 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่างๆ

ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD นี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม หลักๆได้ตามเทคนิคที่ใช้คือ

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

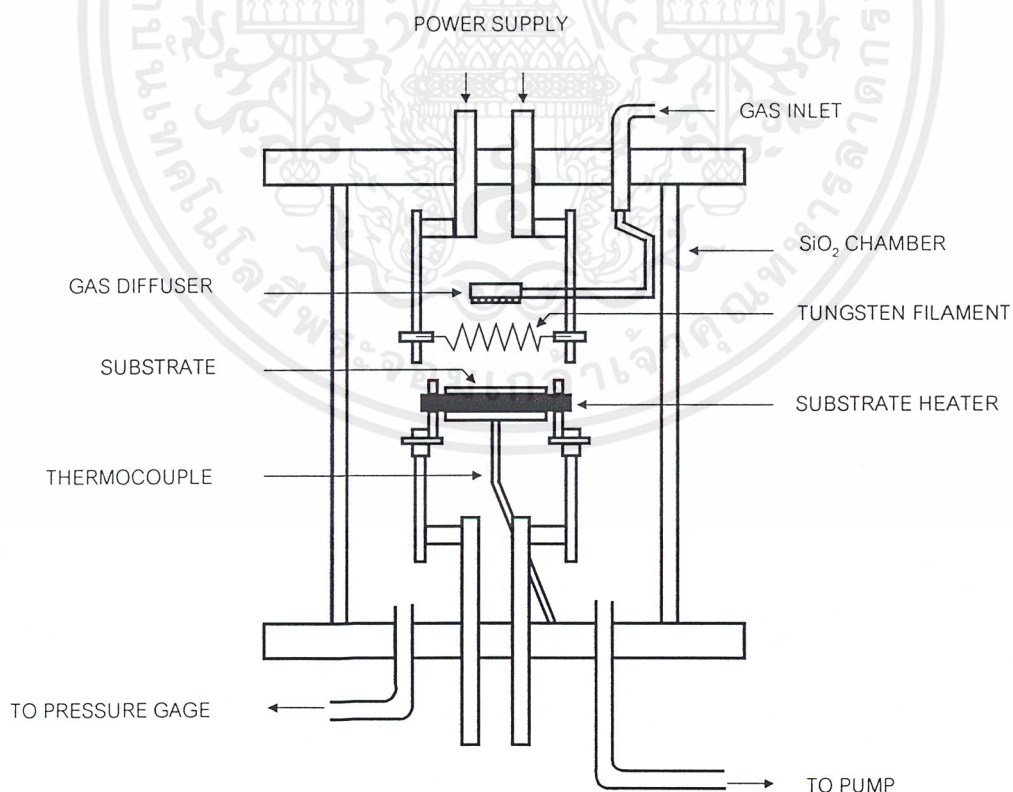
ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร อุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง อุณหภูมิของฐานรอง, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการต่างๆ จากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นที่ยืนยันได้ว่า แม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรต่างกันไปแล้วแต่ผลที่ได้ก็คือ ฟิล์มเพชรเหมือนกันนั่นเอง แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการสังเคราะห์แบบ Thermal Enhanced CVD Methods เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.1 Thermal Enhanced CVD Methods

1.5.1.1 Filament-Assisted Thermal CVD

วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Matsumoto et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธี Filament-Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 1.4 ภายใน Chamber มีไส้หลอดทั้งสแตนเลสที่ทำหน้าที่กำเนิดความร้อน อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนเลสมีค่าสูงถึง 2,000-2,300°C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดมีอุณหภูมิ 700-1,000°C เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนเลสจะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไปแอสไฟเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวเคลียชัน และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้าง และมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนเลส เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งสแตนเลสเป็นเวลานาน ทำให้ไส้หลอดเปราะและผิครูปได้ง่าย



รูปที่ 1.4 แผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน

หลักการพื้นฐานการสร้างฟิล์มเพชรนั้นไม่ว่าจะเป็นวิธีการใดๆตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.5 จะมีกลไกพื้นฐานดังนี้คือ

1. ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เพชรจะมีความเสถียรในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราไฟต์ อะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราไฟต์หรือลดการเกิดกราไฟต์ขึ้น

2. ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน

เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนที่จะก่อพันธะทำให้เกิดเป็น โครงสร้างของเพชรหรือคาร์บอนไฟต์ ออกมาจากสารตั้งต้นเช่น เอทิลแอลกอฮอล์ โดยใช้ความร้อน

3. อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม

วิธี CVD แบบความร้อนทั้งหมดที่กล่าวมา เพชรจะก่อตัวบนพื้นผิวของฐานรองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500°C ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ แล้วแต่กระบวนการที่ใช้ ถ้าหากอุณหภูมิของฐานรองมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป อาจจะทำให้เกิดกราไฟต์หรือ Diamond-like carbon (DLC) ได้

4. ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง และจะมีโอกาสเกิดเป็นฟิล์มมากขึ้น หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวเคลียชัน ซึ่งมีหลายวิธีในการเตรียมพื้นผิวเช่น การขัด, การกัดด้วยสารเคมี, การใช้แสงเลเซอร์

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นที่จะกล่าวถึงในข้อ 4 เท่านั้นเพราะการเตรียมพื้นผิวฐานรองจะมีผลมากต่อการเกิดนิวเคลียชัน ซึ่งฟิล์มเพชรจะเกิดขึ้นหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับ การเตรียมพื้นผิวฐานรอง ส่วนกระบวนการอื่นๆ นั้นมีผู้อื่น ได้นำเสนอมามากแล้ว

1.7 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรของวิธี CVD

1.7.1 กระบวนการของก๊าซเฟส

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐานคือต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่าง คือ

1. ทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยากับการก่อตัวที่พื้นผิวพร้อมที่จะก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรต่อไป

2. แยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอม

ไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุลซึ่งพร้อมจะเกิด ปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิวพร้อมที่จะก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรต่อไปนั้นต้องอาศัยปัจจัยหลายอย่างเช่น ปฏิกิริยาที่ไร้ผลอด อุณหภูมิที่เหมาะสม

นอกจากนี้ยังพบว่าบทบาทของไฮโดรเจน และออกซิเจนนั้นยังช่วยให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นอีกด้วยหน้าที่หลักอีกอย่างหนึ่งของไฮโดรเจนคือ ช่วยทำให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้น เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเพชรอะตอมคาร์บอนจะมีพันธะแขวนขาด (Dangling bond) อะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปจับตัวกับแขนที่ขาดของอะตอมคาร์บอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะของ sp^3 ไปเป็น sp^2 หรือ sp^1 และอะตอมไฮโดรเจนยังมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชร โดยจะเป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวเป็นพันธะ CdH กับอะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร อะตอมคาร์บอนในพันธะระหว่าง CdH เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนออกไปจะเป็น Cd^* ดังสมการ



เมื่อ Cd คืออะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร และ Cd^* คืออะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น

บทบาทหลักๆ ของออกซิเจนคือช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าหากเราผ่านอนุมูลของก๊าซออกซิเจน เช่น O , O_2 หรือ OH เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น อนุมูล OH สามารถกระตุ้นอะตอมบริเวณผิวหน้าดังสมการ

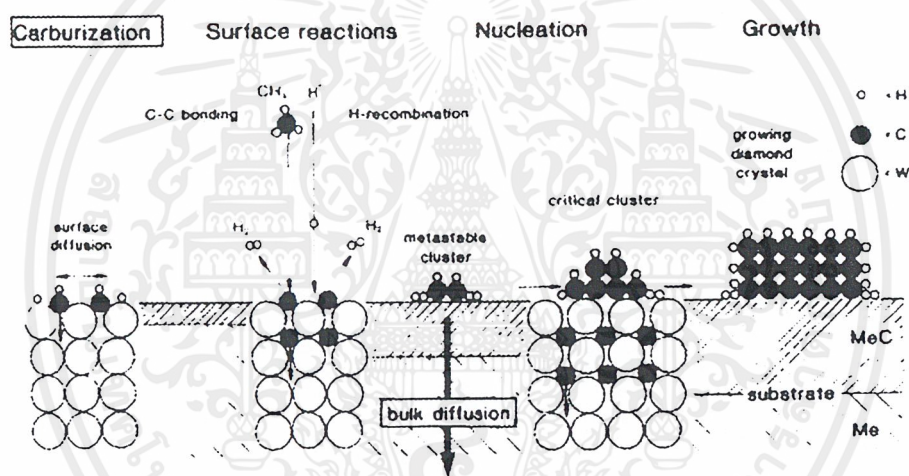


1.7.2 ปฏิกิริยาการนิวเคลียชัน

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.7.1 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นของก๊าซเฟส สำหรับปรากฏการณ์นิวเคลียชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อจากกระบวนการของก๊าซเฟส การนิวเคลียชันของเพชรสามารถเกิดได้ทั้งแบบ Homogeneous หรือ Heterogeneous ขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรองที่เลือกใช้ แต่ส่วนมากแล้วการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรเป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวาง

การนิวเคลียชันของเพชรเริ่มต้น ตรงที่มีการแพร่เข้าไปบนพื้นผิวฐานรองด้วยอนุมูลของก๊าซที่มีพันธะ sp^2 ดังเช่น Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้า

สู่ฐานรองจนถึงค่าค่าหนึ่ง ซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆที่เรียกว่า “Intermediate layer” ชั้น ชั้น Intermediate layer นี้เมื่อมีความเข้มข้นของอะตอมคาร์บอนมากพอจะทำให้เกิดชั้นตอนสำคัญของการเกิดเพชรคือเกิดการกำจัดอนุมูลที่มีพันธะ sp^2 ออกไปบนพื้นผิวของฐานรองโดยอะตอมไฮโดรเจนหรือจากนิวเคลียสที่เสถียรทำให้มีการเปลี่ยนพันธะจาก sp^2 ไปสู่ sp^3 เกิดเป็นเพชรขึ้นบนฐานรองแผนภาพแสดงกลไกของการนิวเคลียเอชันและการเกิดชั้น Intermediate layer แสดงได้ในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 กลไกการนิวเคลียเอชันและการเกิดชั้น intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง

1.8 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรมีหลายวิธีการ แต่ความเหมาะสมในการใช้งาน อาทิเช่น ถ้าต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) แต่หากต้องการวิเคราะห์ถึงพันธะของอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกัน เพื่อตรวจสอบว่าเป็นเพชร, กราไฟต์, อะมอร์ฟัส หรือ Diamond Like Carbon (DLC) นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy สำหรับในโรงงานนี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร 2 วิธีคือ

1. Scanning electron microscopy (SEM)

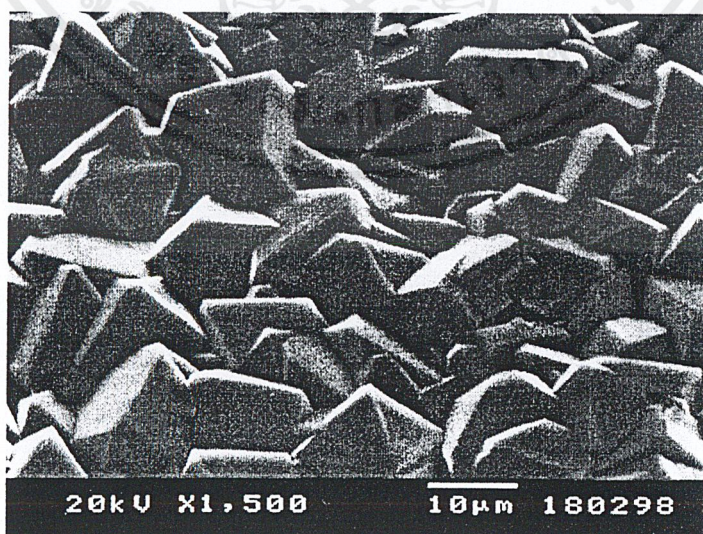
2. Raman spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8.1. การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโพกัสของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโพกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-ray tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่น ๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50 - 40,000X) ความคมชัดของภาพสูง (2.5-10 nm), ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า ภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และสามารถใสสารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้าสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่าน การเตรียมก่อนอย่างไรก็ตามในการใช้งานลำอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำ ๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรอง Si) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่ ดังแสดงในรูปที่ 1.6

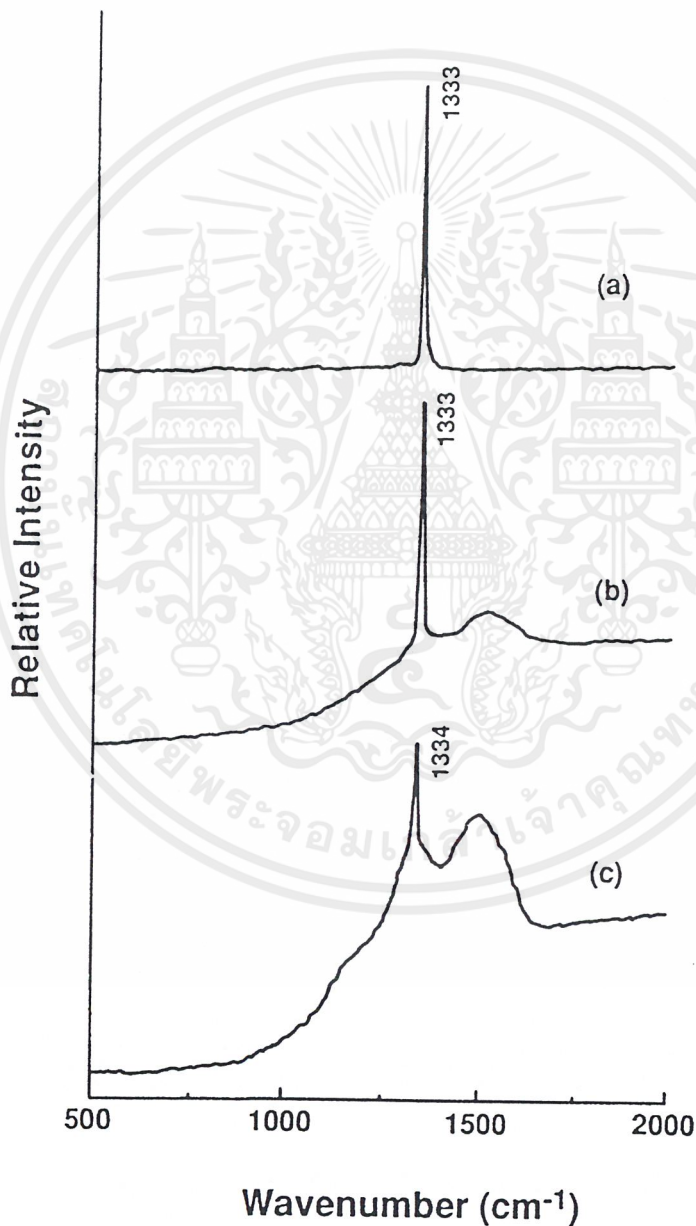


รูปที่ 1.6 ลักษณะรูปพื้นผิวด้านหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและกราไฟต์สูง ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้



รูปที่ 1.7 Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนของ CH_4 / H_2 มีค่าต่างกัน

(a) 0.5 % CH_4 / H_2 (b) 2.0 % CH_4 / H_2 (c) 5.0 % CH_4 / H_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร,กราฟไฟต์,อะมอร์ฟัสคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอน แสดงไว้ในตารางที่ 1.2 นอกจากนี้สามารถใช้ Raman spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่าง ๆ กันเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 1.7

ในรูปที่ 1.7 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชร ในรูป 1.7a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 1.4b พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} เริ่มกว้างขึ้นและเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ 1500 cm^{-1} อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่ สำหรับสเปกตรัมของรูป 1.4c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ 1334 cm^{-1} ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด

ตารางที่ 1.2 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน

PEAK POSITION	TYPE OF CARBON	DESCRIPTION
$\sim 1140 \text{ cm}^{-1}$	small size ($< 0.1 \mu\text{m}$) cubic diamond	occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ($< 0.1 \mu\text{m}$)
$1315\text{-}1326 \text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	broad band , observed in shock wave produced diamond
1332 cm^{-1}	Cubic diamond	first order peak with FWHM of 1.9 cm^{-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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น (wave) และ อนุภาค (particle) ปรากฏการณ์ที่เราเห็นอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อน(reflection) การแทรกสอด(interference) และการหักเหแสง (refraction) แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก(photoelectric effect)

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งถ้าให้ λ เป็นความยาวคลื่นแสง V คือความถี่ของคลื่นแสง และ c_o คือความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($c_o = 2.99792458 \times 10^8$ m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = \frac{c_o}{V} \quad (2.1)$$

ถ้าแสงเดินทางในวัตถุที่มีเนื้อเรียบตลอดและเป็นวัตถุไอโซโทโรปีแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง ที่ขอบของวัตถุทั้งสองนั้นแสงจะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ (n) จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าในสุญญากาศ กล่าวคือความเร็วแสง (c) ในวัตถุเท่ากับ

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

ค่าดัชนีหักเหแสงของวัตถุใดๆจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความถี่ของแสงด้วย และค่าดัชนีหักเหแสงนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ ของวัตถุ ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_o}} \quad (2.3)$$

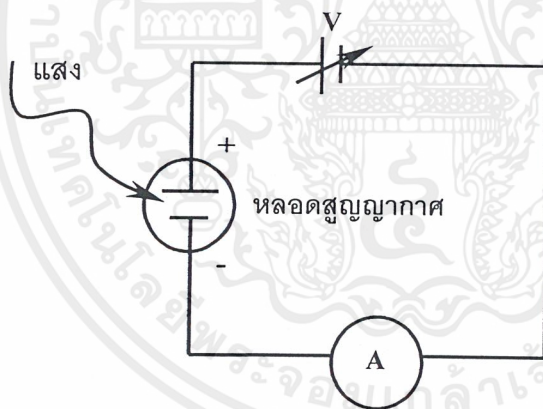
โดยที่ ϵ_o คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ $= 8.854182 \times 10^{-12}$ F/m
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

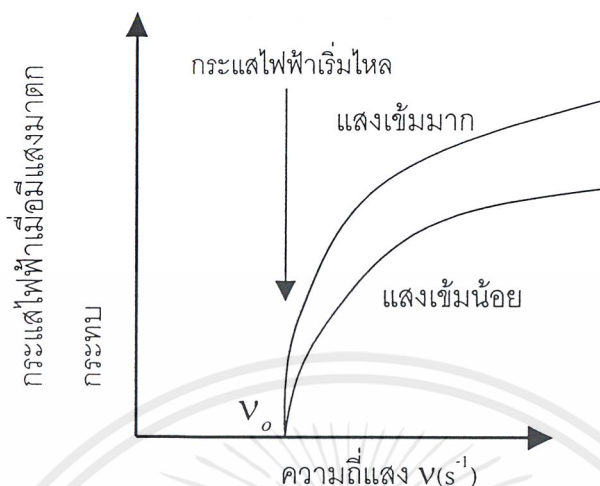
แสงนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคของแสงว่า โฟตอน(Photon) อนุภาคของแสงจะมีพลังงานอยู่ในตัวของมันและถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ ν อนุภาคของแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ eV โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.6261×10^{-34} j.s และแสงที่มีความยาวคลื่น λ ใดๆ จะมีพลังงานโฟตอนเป็น

$$\text{พลังงานโฟตอน} = h\nu = \frac{hc_0}{\lambda} \quad (2.4)$$

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งแสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศ แล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะหลุดออกจากโลหะ แสดงวิธีการทดลองดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์นี้ไอน์สไตน์ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อแสงที่มีความถี่ V เดินทางไปในปริภูมิ (space) แสงนั้นไม่ได้มีพลังงานเป็นค่าต่อเนื่อง แต่แสงจะเป็นอนุภาคที่มีพลังงานเท่ากับ hV ที่วิ่งไปในปริภูมินั้นไอน์สไตน์ได้ตั้งชื่ออนุภาคแสงนี้ว่า light quantum ต่อมาเรารู้จักกันในชื่อ โฟตอน

จากนั้นไอน์สไตน์ยังได้อธิบายรายละเอียดของปรากฏการณ์ในรูปที่ 2.2 ไว้ว่า พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ E มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวโลหะ hV ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก $q\phi$ และเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$E = hV - q\phi \quad (2.5)$$

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

2.1.3 การเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง

คลื่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง โดยที่แสงนั้นจัดเป็นคลื่นตามขวางและเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง (electromagnetic wave) ที่กล่าวว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะแสงประกอบไปด้วยคลื่นแม่เหล็ก \vec{H} และสนามไฟฟ้า \vec{E} และทั้ง \vec{H} และ \vec{E} นี้มีค่าเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์ (sine wave) ที่สั้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเดินทางของแสง

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์

หลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการค้นพบมาเมื่อประมาณ 180 ปีมาแล้วโดยในปี ค.ศ.1817 เบอริชเชิลีอุส (Berzelius) ได้ค้นพบธาตุซีลีเนียม และสามารถเตรียมธาตุซีลีกอนได้เป็นครั้งแรกจากผลนี้ทำให้มีการค้นพบลักษณะความนำจำเพาะทางแสง (Photoconductivity) ในซีลีเนียมโดยวิลลาจปี สมิท (Willoughby smith) ในปี ค.ศ.1873 จากนั้นได้มีการค้นพบผลของโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) โดย อัดัมและเดย์ (Adam and Day) ในปี ค.ศ.1876 หลังจากนั้นอีก 7 ปีต่อมาฟริทท์ (Fritts) จึงได้อธิบายผลของโฟโตโวลตาอิกเซลล์ที่ทำมาจากซีลีเนียมเป็นคนแรก และในปี ค.ศ.1904 ฮอลวอชต์ (Hallwachs) ก็ได้สังเกตพบความไวแสง (Photosensitivity) ในโครงสร้างของคอปเปอร์คิวปริสออกไซด์ (Copper Cuprous oxide)

จากความก้าวหน้าทางด้าน เทคโนโลยีในการสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบ โกรว์จังก์ชัน (Growth junction) ทำให้มีการเตรียมสร้างอุปกรณ์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ทำมาจากผลึกรูปเดี่ยวของซีลีกอนในปี ค.ศ.1941 จนกระทั่ง 12 ปีต่อมาจึงได้มีการพัฒนาการสร้างรอยต่อพี-เอ็นขึ้นด้วยวิธีการแพร่สารเจือ (Impurity diffusion method) ในปีแรกของการพัฒนาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีใหม่ ทำให้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานได้ 6% อีก 2 ปีต่อมามีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเป็น 14% ในปี ค.ศ.1958

นอกจากนี้ยังได้มีการสร้างเซลล์ด้วยสารประกอบอื่นๆ นอกเหนือไปจากซีลีกอนซึ่งเป็นธาตุแท้ โดยเริ่มจากคอปเปอร์คิวปริสออกไซด์ แต่พบว่ามันให้พลังงานออกมาน้อยกว่าที่สร้างจากซีลีกอน จึงได้มีการพัฒนาเซลล์ที่สร้างมาจากแกเลียมอาร์เซไนด์ แคลเดเมียมซัลไฟด์และแคลเดเมียมเทลลูไรด์ ปรากฏว่าเซลล์ที่สร้างจากแกเลียมอาร์เซไนด์ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่เนื่องจากแกเลียมอาร์เซไนด์มีราคาวัสดุที่สูงกว่าซีลีกอนมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับแคลเดเมียมซัลไฟด์ และแคลเดเมียมเทลลูไรด์ สามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยใช้เทคนิคทางด้านฟิล์มบางทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง แม้ในช่วงแรกจะมีประสิทธิภาพต่ำและเสถียรภาพในการทำงานยังไม่ดีนักแต่ก็คาดได้ว่าจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญต่อไปในอนาคต

2.2.2 พลังงานแสงที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกผ่านชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ (Atmosphere) จะมีพลังงานลดน้อยลง และมีผลตอบสนองทางความถี่แสงแตกต่างไปจากแสงอาทิตย์ที่อยู่บนชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากในชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ประกอบไปด้วยก๊าซ

หลายชนิด รวมทั้งไอน้ำและฝุ่นละอองต่างๆที่เป็นตัวดูดกลืนพลังงานแสงบางส่วนเอาไว้และทำให้แสงบางส่วนเปลี่ยนทิศทาง

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาความเข้ม และผลตอบสนองทางความถี่ของแสงอาทิตย์ จึงได้มีการกำหนดค่า แอร์แมสเอ็ม (Air Mass m) ขึ้น โดยที่แอร์แมสเอ็ม คืออัตราส่วนระหว่างระยะทางเดินของแสงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ ต่อระยะทางเดินของแสงเมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะ แสงได้โดยสมการ 2.6

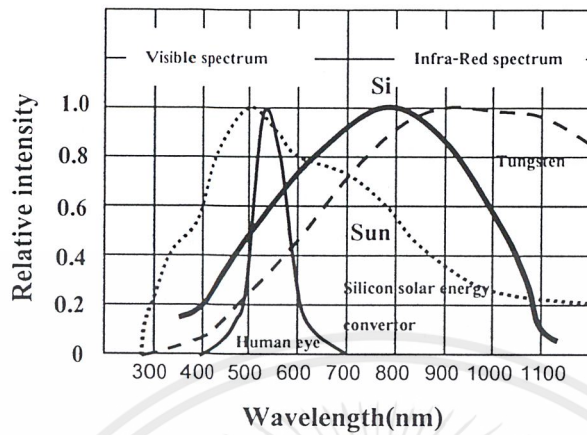
$$m = \sec(z) = 1/\cos(z) \quad (2.6)$$

โดยที่ z (Zenith angle) คือมุมระหว่างแนวของลำแสงที่ทำกับแนวตั้ง

แสงอาทิตย์ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์จะเรียกว่า ชั้นแอร์แมสซีโร (Air Mass-Zero, AM0) จะถือว่ามีค่าพลังงาน 138 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับแสงอาทิตย์ที่ผิวโลกที่ระดับน้ำทะเลในตอนเที่ยงวันอยู่เหนือศีรษะจะเรียกว่า ชั้นแอร์แมสวัน (Air Mass One, AM1) จะถือว่ามีค่าพลังงาน 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในปัจจุบันในการวัดเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นโลกจะใช้ค่า Air Mass อยู่ที่ AM 1.5 ซึ่งจะมีพลังงานอยู่ที่ 832 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณของพลังงานแสงนี้ ได้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งก็คือประสิทธิภาพของเซลล์นั่นเอง

2.2.3 ผลตอบสนองความถี่แสงของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแสงที่มีความถี่ต่างๆ มากมายรวมกันอยู่ตั้งแต่แสงที่มองไม่เห็นและมองเห็นด้วยตาเปล่า เส้นประในรูปที่ 2.3 เป็นผลตอบสนองความถี่ของแสงอาทิตย์ในชั้น AM1 เมื่อได้พิจารณาผลตอบสนองความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนที่มีความถี่ต่างๆ ดังแสดงเป็นเส้นทึบในรูปจะเห็นว่าจุดสูงสุดของกราฟทั้งสองมีความถี่ไม่ตรงกัน ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียพลังงานแสงในกรณีนี้ไปส่วนหนึ่ง โดยพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่นแสงที่ 5000 อังสตรอม ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์จะมีผลตอบสนองทางแสงมากที่สุด ความยาวคลื่นแสงที่ 8000 อังสตรอม

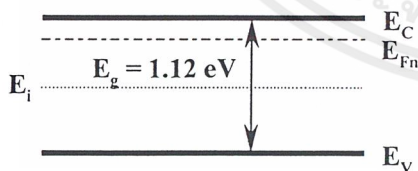


รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

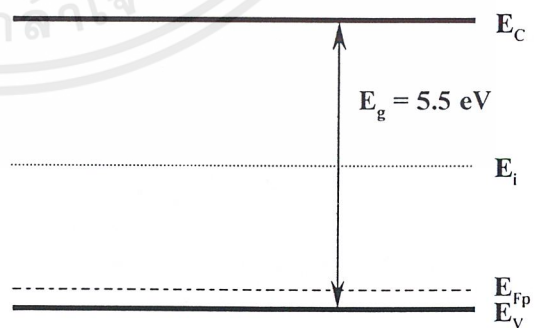
2.3 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

2.3.1 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ได้แก่สารกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมของธาตุ หมู่ที่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส (phosphorus) สารหนู (arsenic) และ พลวง (antimony) ลงไปใน ซิลิกอนบริสุทธิ์ จะทำให้ซิลิกอนมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ ระดับเฟอร์มิของซิลิกอนจะอยู่ใกล้กับแถบความนำ จะอยู่ใกล้มากน้อยแค่ไหนก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมอะตอมสารเจือ ลักษณะของแถบพลังงานของซิลิกอนชนิดเอ็นนี้จะแสดงได้ในรูปที่ 2.4 (ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (ก) ซิลิกอนชนิดเอ็น (ข) ฟอสฟอรัสชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพี

สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีนั้นมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 5.5 eV สร้างได้จากการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD ซึ่งในระหว่างขั้นตอนการสร้างนั้นต้องมีการเติมอะตอมสารเจือปนเข้าไปด้วย และค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชร นั้นจะมีลักษณะอยู่ใกล้กับแถบพลังงานวาเลนซ์ ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมอะตอมสารเจือปน ซึ่งได้มีผู้ทำการทดลองไว้แล้วว่า ถ้าเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือปนอยู่ระหว่าง 10 ppm ถึง 1000 ppm นั้น ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ประมาณ 0.14 ถึง 0.18 eV โดยรูปแถบพลังงานของฟิล์มเพชรจะแสดงได้ดังรูป 2.4(ข)

2.4 ทฤษฎีรอยต่อ

จากหัวข้อที่แล้วเราพูดถึงลักษณะของสารกึ่งตัวนำชนิดพีขึ้นมา ซึ่งไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้มากนัก แต่ถ้าเรานำสารกึ่งตัวนำสองชนิดไม่ว่าจะเป็น ชนิดเอ็นหรือชนิดพี มาต่อเข้าด้วยกัน ด้วยวิธีทางเคมีแล้ว เราจะสามารถนำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนี้มาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายขึ้น เช่น ทำเป็นไดโอด ทรานซิสเตอร์ โฟโตไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์และวงจรรวม (IC) ฯลฯ รอยต่อนี้มีได้หลายรูปแบบเช่น รอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (Homojunction) เช่น ซิลิกอนชนิดเอ็น กับ ซิลิกอนชนิดพี และรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction) เช่น ซิลิกอนกับเพชร และรอยต่อก็มีได้อีกหลายแบบเช่น รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ รอยต่อที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะมีลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ อีกทั้งยังเป็นพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษอื่นๆ ซึ่งมีรอยต่อมากกว่าหนึ่งรอยต่ออีกด้วย ส่วนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพูดถึงรอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกันเท่านั้นซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างซิลิกอนและฟิล์มเพชร

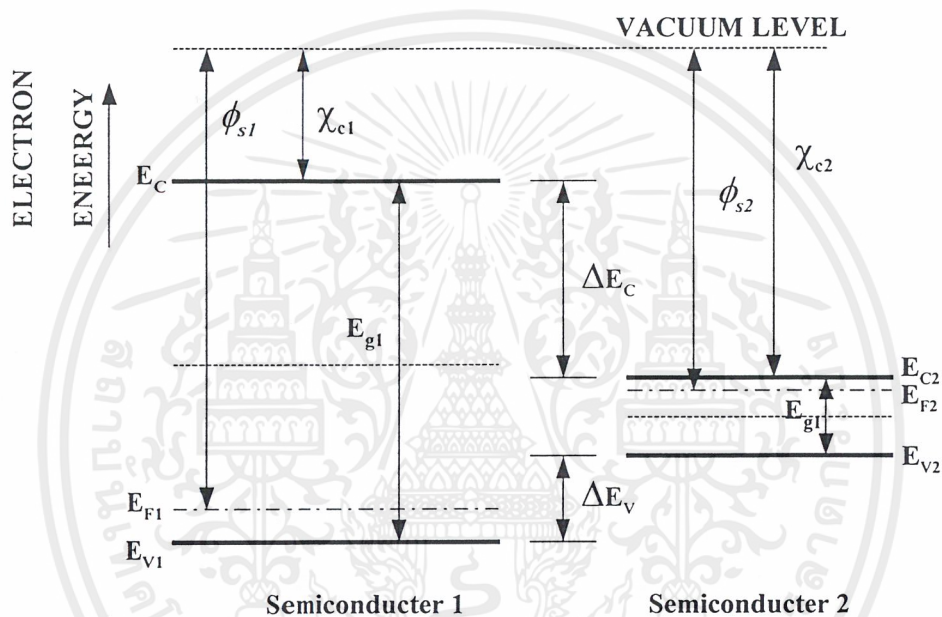
2.4.1 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารชนิดเดียวกัน

ได้แก่การนำเอาสารกึ่งตัวนำที่เป็นชนิดเดียวกันเช่น ซิลิกอนชนิดเอ็นและซิลิกอนชนิดพี มาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งจะสามารถประยุกต์การใช้งานต่างได้มากมายแต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่พูดถึงมากนัก

2.4.2 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารต่างชนิดกัน

รอยต่อพีเอ็นแบบเนื้อสารต่างชนิดกัน เป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่างกัน โดยมีความเข้ากันได้ดีของ ค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน เช่น รอยต่อระหว่างเพชรกับซิลิกอน แต่อย่างไรก็ตาม อาจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับว่าตีพิมพ์เผยแพร่ในวงกว้าง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่เสมอไป และอาจจะมีจุดบกพร่อง เช่น เกิดสถานะอินเทอร์เฟซ(interface) ที่พื้นที่ผิวของรอยต่อ สถานะนี้สามารถแสดงเป็นศูนย์กลางการกักเก็บ (trapping center) ซึ่งจะเป็นการจำกัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ แบบจำลองแถบพลังงานของรอยต่อที่มีเนื้อสารต่างชนิดกันแบบอุดมคติโดยปราศจากสถานะอินเทอร์เฟซ ถูกเสนอโดย Anderson โดยมีพื้นฐานของ Shockley เราจะพิจารณาแบบจำลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.5

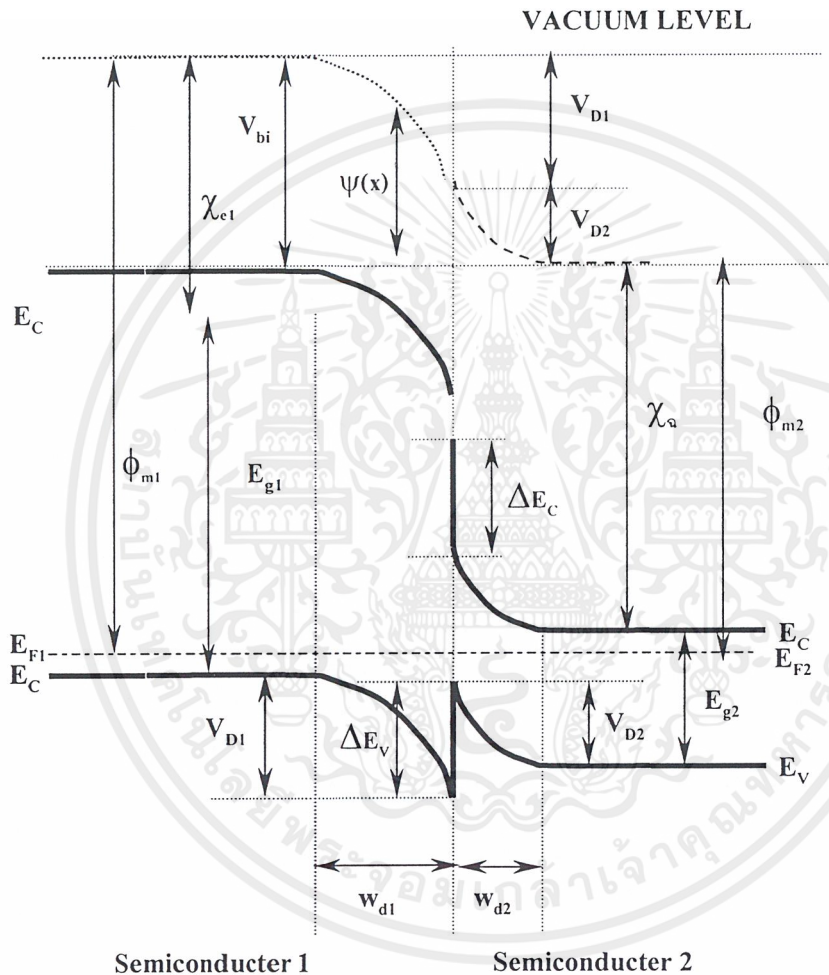


รูปที่ 2.5 ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่ยังไม่นำมาต่อกัน

จากรูปไปโต๊ะแกรมแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่มีความแตกต่างกันของ แถบพลังงานต้องห้าม (E_g) ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ) และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (χ) โดยค่าฟังก์ชันงานและค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี คือพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากระดับเฟอร์มิไปยังระดับสุญญากาศ และพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขอบล่างของแถบความนำไปยังระดับสุญญากาศ ตามลำดับ และความแตกต่างของแถบความนำและแถบวาเลนซ์ ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเป็น ΔE_c และ ΔE_v ตามลำดับ เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาต่อเข้าด้วยกัน แถบพลังงานที่แสดงสถานะสมดุลจะแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแถบพลังงานดังรูปจะใช้ในการศึกษาโครงสร้างของรอยต่อ p-type diamond /n-type silicon heterojunction diode โดยกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยค่าของ $E_{F1,2} - E_{v1}$ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นในการเติมอะตอมสารเจือ



รูปที่ 2.6 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันที่สภาวะสมดุล

สมการสำหรับความแตกต่างของแถบความนำ ΔE_c คือ

$$\Delta E_c = \chi_{e2} - \chi_{e1} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความแตกต่างของแถบวาเลนซ์แสดงได้จากสมการ

$$\Delta E_v = (E_{g1} - E_{g2}) - (\chi_{e2} - \chi_{e1}) \quad (2.8)$$

จากสมการ 2.10 และ 2.11 เราจะได้ว่า

$$\Delta E_c + \Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} \quad (2.9)$$

และ barrier height สำหรับโฮล คือ $qV_D - \Delta E_v$ มีค่าเท่ากับ

$$qV_D - \Delta E_v = E_{g2} - (E_{c2} - E_F) - (E_F - E_{v1}) \quad (2.10)$$

โดยที่

$$V_D = V_{D1} + V_{D2}$$

V_{D1} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 1

V_{D2} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 2

และค่าของ V_{D1} และ V_{D2} สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{D1} = \frac{\epsilon_2 N_2}{\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2} \quad (2.11)$$

$$V_{D2} = \frac{\epsilon_1 N_1}{\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2} \quad (2.12)$$

โดยที่ ϵ_1 และ ϵ_2 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

N_1 และ N_2 คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

และค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะ (depletion width) ของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำ ที่หาได้จากสมการ poisson มีค่าตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$w_{d1} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_1\epsilon_2N_2V_D}{qN_1(\epsilon_1N_1 + \epsilon_2N_2)}} \quad (2.13)$$

$$w_{d2} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_1\epsilon_2N_1V_D}{qN_2(\epsilon_1N_1 + \epsilon_2N_2)}} \quad (2.14)$$

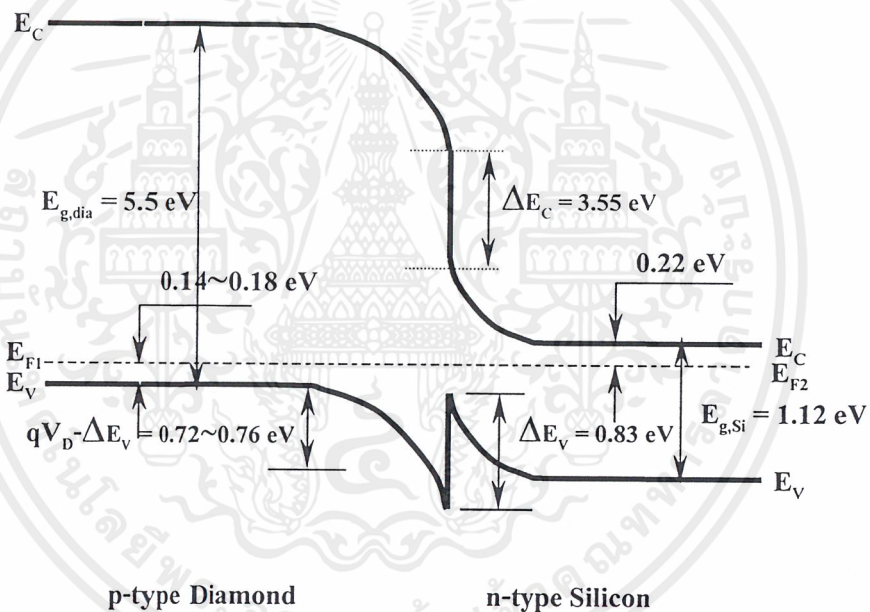
ในรายงานฉบับนี้ได้ทำการศึกษารอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นโดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงานที่อุณหภูมิ 300 K ได้มีผู้ทำการวิจัยไว้แล้ว แสดงได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่อุณหภูมิ 300K

Symbol	Meaning	Value (unit)
$E_{g, \text{dia}}$	Energy gap of diamond	5.5 eV
$E_{g, \text{Si}}$	Energy gap of silicon	1.12 eV
$\chi_{e, \text{dia}}$	Electron affinity of diamond	0.5 eV
$\chi_{e, \text{Si}}$	Electron affinity of silicon	4.05 eV
$E_c - E_v$	Energy difference between Fermi and valence level of Silicon	0.22 eV
$E_v - E_F$	Energy difference between Conduction and Fermi level of Diamond	0.14-0.18 eV
ΔE_c	Conduction band discontinuity	3.55 eV
ΔE_v	Valence band discontinuity	0.83 eV
$qV_D - \Delta E_v$	Barrier height for holes in p-type diamond	0.72~0.76 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

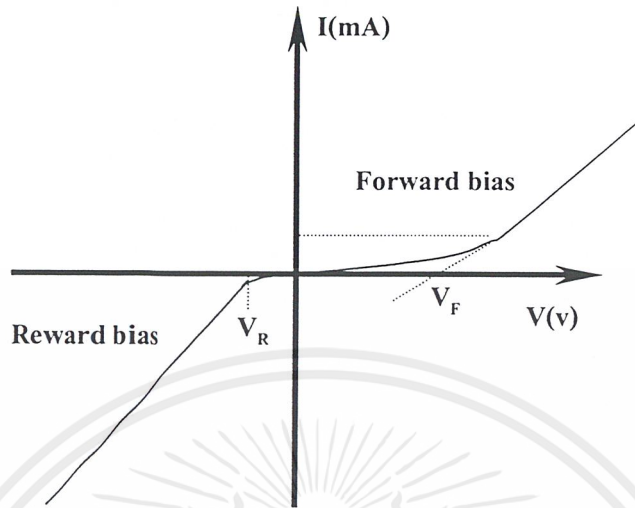
นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาเขียนลักษณะของแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเป็นลักษณะแถบพลังงานในอุดมคติจะสังเกตได้ว่าที่บริเวณรอยต่อนั้นจะไม่มี interface states เกิดขึ้นแต่ในความเป็นจริงแล้วก่อนการสร้างฟิล์มเพชรลงบนซิลิกอนนั้นจะต้องมีการขัดผิวหน้าซิลิกอนก่อน ที่รอยขัดที่ผิวหน้าซิลิกอนนี้เองจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด interface states ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการแพร่ประจุพาหะที่จะข้ามตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนี้แย่ง ดังนั้นในการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ของรอยต่อในขั้นตอนต่อไปนั้นจะต้องนำเอาผลของ interface states ที่เกิดขึ้นมาพิจารณาด้วย ต่อไปจะมาดูว่า เมื่อรอยต่อได้รับการ โบแอสนั้นจะมีคุณสมบัติอย่างไร



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น

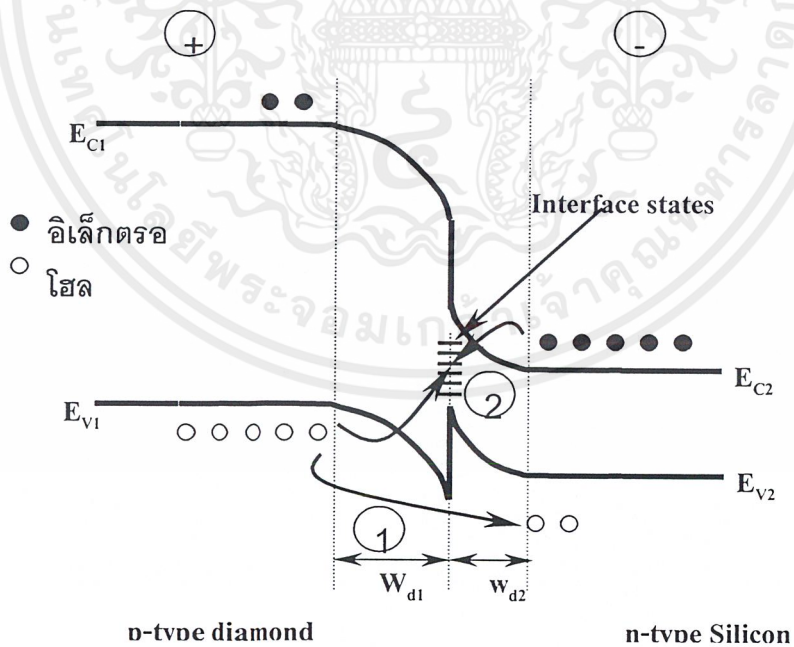
2.4.2.1 การไบแอสตรงให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si

จากการทดลองวัดคุณสมบัติกระแสแรงดันของ p-Dia/n-Si จะได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในขณะที่ทำการให้ไบแอสตรงในช่วงที่ต่ำกว่า V_F นั้น กระแสจะไหลได้น้อย และเมื่อให้ไบแอสเพิ่มขึ้นค่าหนึ่งซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ในกรณีนี้ให้เป็น V_F กระแสจะไหลได้มาก ผิดกับกรณีให้ไบแอสย้อนกลับถ้าให้แรงดันมากกว่า V_R ซึ่งมีค่าน้อยกับรอยต่อกระแสจะไหลได้ทันที



รูปที่ 2.8 กราฟคุณสมบัติกระแสแรงดันของ p-Dia/n-Si

ซึ่งสามารถใช้ทฤษฎีของแถบพลังงานอธิบายได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-dia/n-Si ในขณะที่ได้รับ โบแอสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ไบแอสตรงให้กับรอยต่อนั้น กระแสที่ไหลจะแบ่งได้เป็นสองกรณี

กรณีที่หนึ่ง แสดงโดยเลข 1 ในรูปที่ 2.9 โหลดจะไหลจากแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำเพชร ไปยังแถบวาเลนซ์ของซิลิกอน ซึ่งที่แถบวาเลนซ์ตรงบริเวณรอยต่อนั้นจะเกิด spike ขึ้น เมื่อให้การไบแอสน้อยๆซึ่งน้อยกว่า V_F นั้นกระแสจะไหลได้ปริมาณน้อยเนื่องจากบริเวณ spike นั้นจะมีพลังงานศักย์ค่าหนึ่งกัน โฮลอยู่ ซึ่งถ้าโฮลมีพลังงานต่ำๆ จะไม่สามารถไหลไปยังซิลิกอนได้ โดยสังเกตได้จากรูปที่ 2.8

แต่ถ้าให้ไบแอสที่มีค่าสูงกว่าค่า V_F จะทำให้ความสูงของ spike ลดลงและพลังงานศักย์ที่บริเวณ spike มีค่าลดลงก็จะทำให้โฮลสามารถไหลผ่านไปยังซิลิกอนได้ กระแสมีการไหลเพิ่มขึ้น

กรณีที่สอง คือลักษณะการไหลของกระแสการรวมตัว(Recombination current) กล่าวคือ โฮลจากแถบวาเลนซ์ของฟิล์มเพชรจะไหลไปยังที่ interface states พร้อมกับอิเล็กตรอนที่ไหลมาจากแถบความนำของซิลิกอน และจะเกิดการรวมตัวกันที่ interface states นี้ซึ่งแสดงโดยหมายเลข 2 ในรูปที่ 2.9 ซึ่งกระแสส่วนนี้จะมีความสำคัญเมื่อให้การไบแอสกับรอยต่อนี้มีค่าน้อยๆ

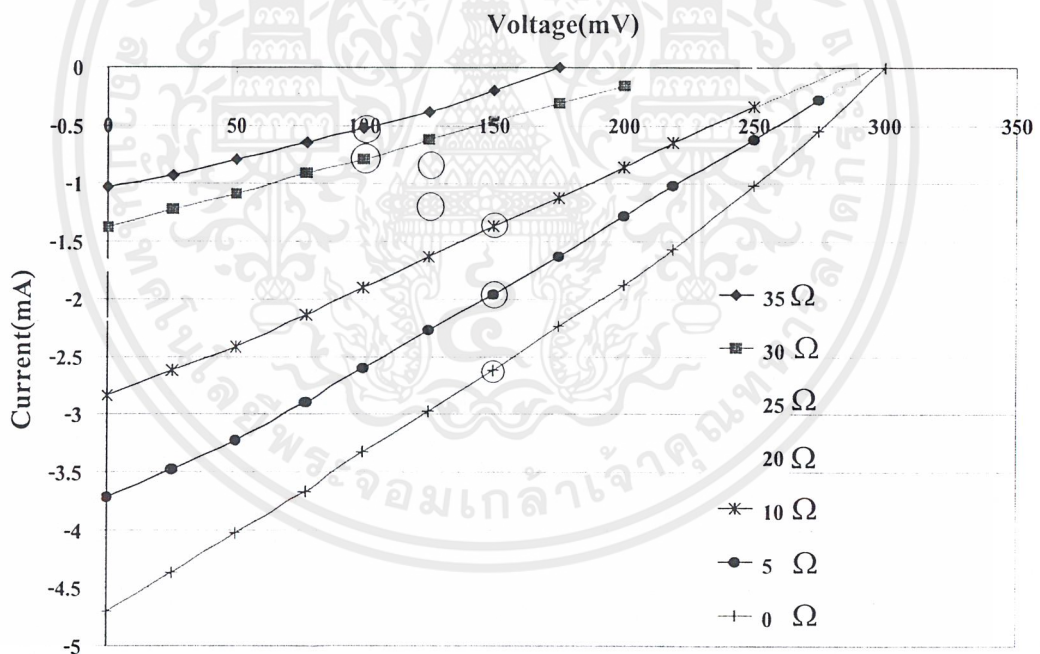
2.4.2.2 การไบแอสย้อนกลับให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si

ในกรณีการให้ไบแอสย้อนกลับแก่รอยต่อนั้น ในขณะที่แรงดันน้อยๆ ซึ่งน้อยกว่าค่า V_R ประจุพาหะส่วนน้อยจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้กระแสไหลในรอยต่อ ซึ่งอิเล็กตรอนจากฟิล์มเพชรชนิดพีจะไหลมายังซิลิกอนเอ็น ในขณะที่เดียวกันโฮลจากซิลิกอนชนิดเอ็นจะไหลมายังฟิล์มเพชรชนิดพี กระแสจะยังไหลปริมาณน้อยอยู่เพราะเกิดจากการไหลของประจุส่วนน้อย ลักษณะของแถบพลังงานในกรณีนี้แสดงได้โดยในรูปที่ 2.10 แต่ถ้าให้ไบแอสกลับเพิ่มขึ้น ลักษณะของแถบพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าระดับพลังงานวาเลนซ์ของฟิล์มเพชรจะอยู่สูงกว่าแถบความนำของซิลิกอน ในกรณีนี้จะเกิดปรากฏการณ์ทะลุผ่าน (tunnelling effect) ขึ้น คืออิเล็กตรอนในฟิล์มเพชรชนิดพีนั้นจะเคลื่อนที่ทะลุรอยต่อเข้าไปยังแถบความนำของซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งแสดงได้โดยเลข 1 ในรูปที่ 2.11 และโฮลในซิลิกอนจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ทะลุรอยต่อที่บริเวณแถบวาเลนซ์ของซิลิกอนในบริเวณ depletion region แสดงได้โดยเลข 2 ในรูปที่ 2.11

จากผลการทดลองที่ได้ในรูปนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นนั้นจะทำให้ค่าของกระแสตัวจวกรนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มแสงไม่มีผลต่อค่าของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมากนัก โดยค่าแรงดันเปิดวงจรนั้นจะเปลี่ยนตามความเข้มแสงในช่วงแรกเท่านั้น โดยเมื่อความเข้มแสงสูงกว่า 1000 lux แรงดันเปิดวงจรนั้นจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.33 จะสังเกตได้ว่าค่ากระแสตัวจวกรที่เพิ่มขึ้นนั้นจะมีลักษณะการเปลี่ยนเป็นเชิงเส้นต่อความเข้ม ส่วนแรงดันเปิดวงจรนั้นจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงเป็นลักษณะของเอ็กซ์โพเนนเชียล

4.2.4 ผลการศึกษาความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

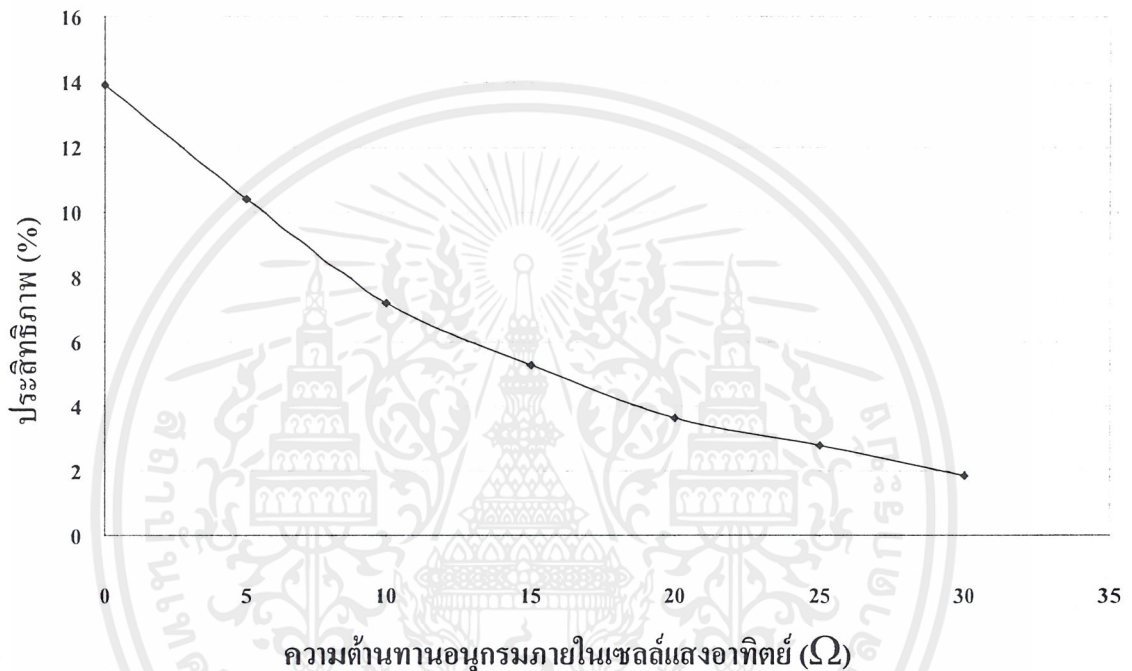
ในการทดลองนี้จะใช้เงื่อนไขของอัตราส่วน B:C คือ 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 2 μm โดยการทดลองจะต่อวงจร ตามรูปที่ 2.15 โดยผลการทดลองนั้นจะแสดงไว้ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลของความต้านทานที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.14 นั้นจะเห็นได้ว่าถ้าค่าของความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้นนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยลง และจากรูปนั้นนำค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มาเขียนกราฟเทียบกับค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์ แสดงได้ในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อค่าของความต้านทานอนุกรมภายในมีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้นนั้นจะทำให้พลังงานที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าลดลง ดังนั้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นควรจะทำให้ค่าของความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุด

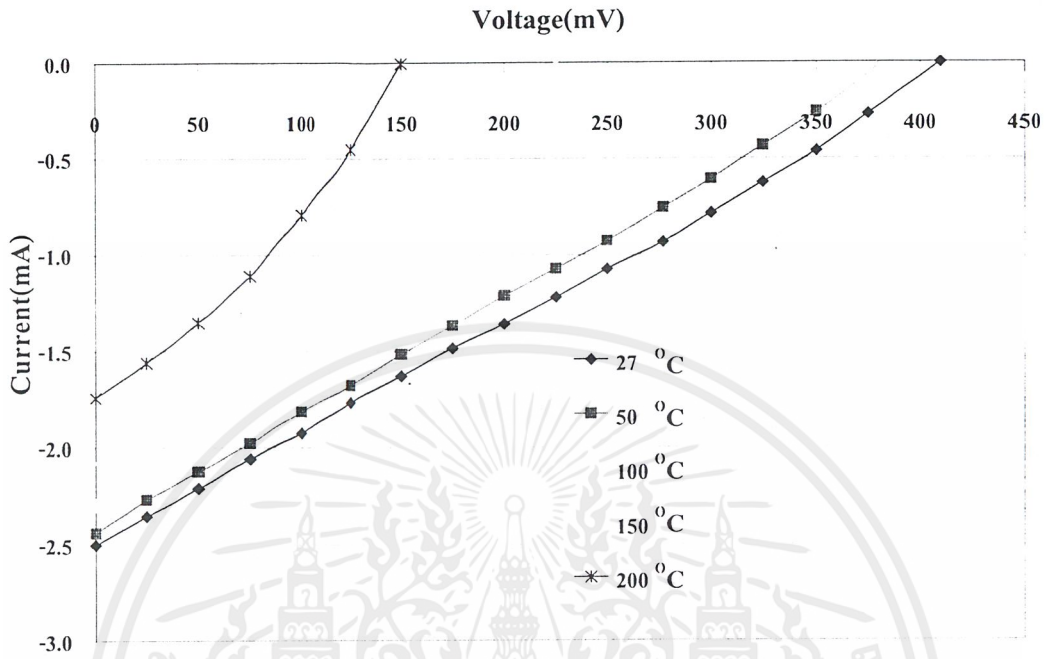


รูปที่ 4.15 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อประสิทธิภาพที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์

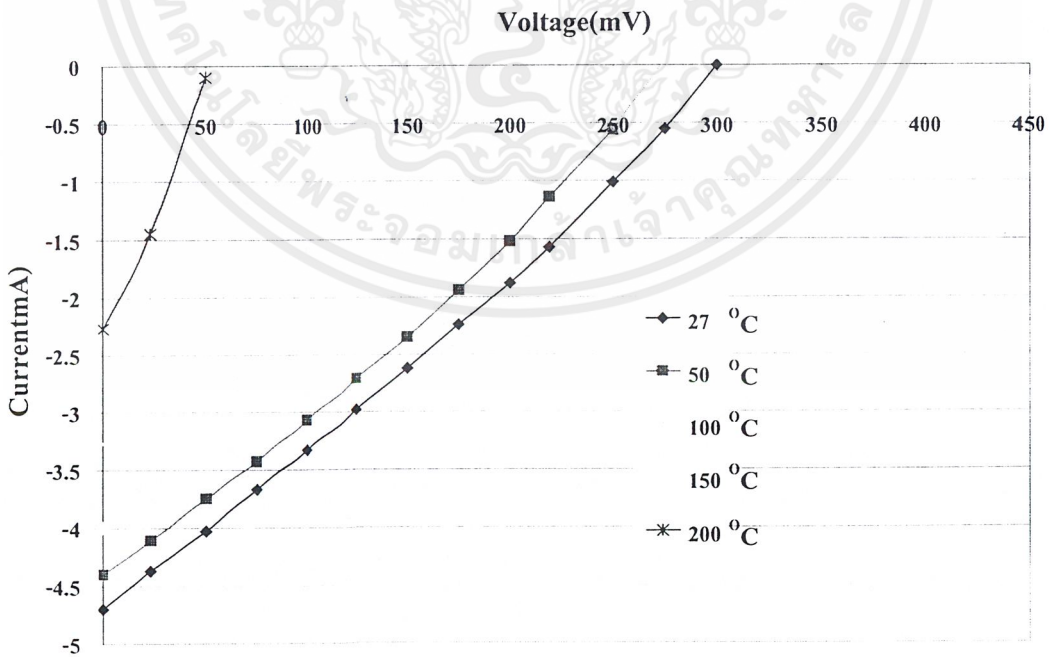
4.2.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์นี้จะใช้เงื่อนไขการสร้างเซลล์ดังนี้คืออัตราส่วนของ B:C เป็น 1 และ 1000 ppm โดยฟิล์มเพชรมีความหนาประมาณ $2 \mu\text{m}$ ซึ่งผลการทดลองในกรณี B:C เท่ากับ 1 ppm แสดงในรูปที่ 4.16 และ ในกรณี 1000 ppm แสดงได้ในรูปที่ 4.17 โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นนั้นจะทำให้ค่าของ แรงดันเปิดวงจร และ กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำลง ซึ่งโดยปกติแล้วในเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้แรงดันเปิดวงจรลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบฟิล์มเพชรกับซิลิคอน ซึ่งทั้งนี้อาจจะเกิดจากลักษณะของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



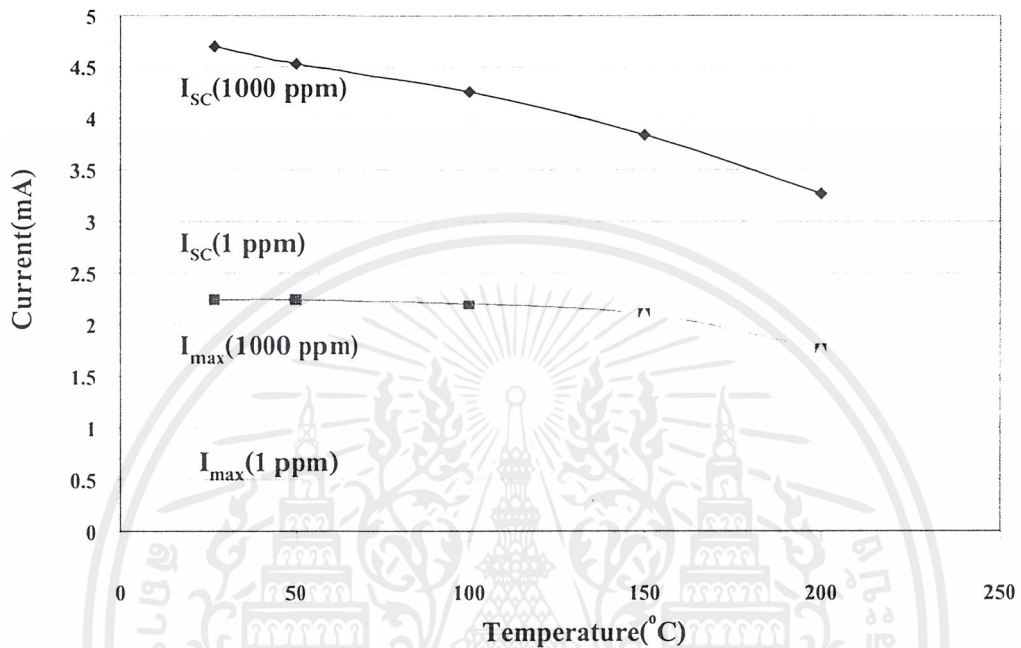
รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1 ppm



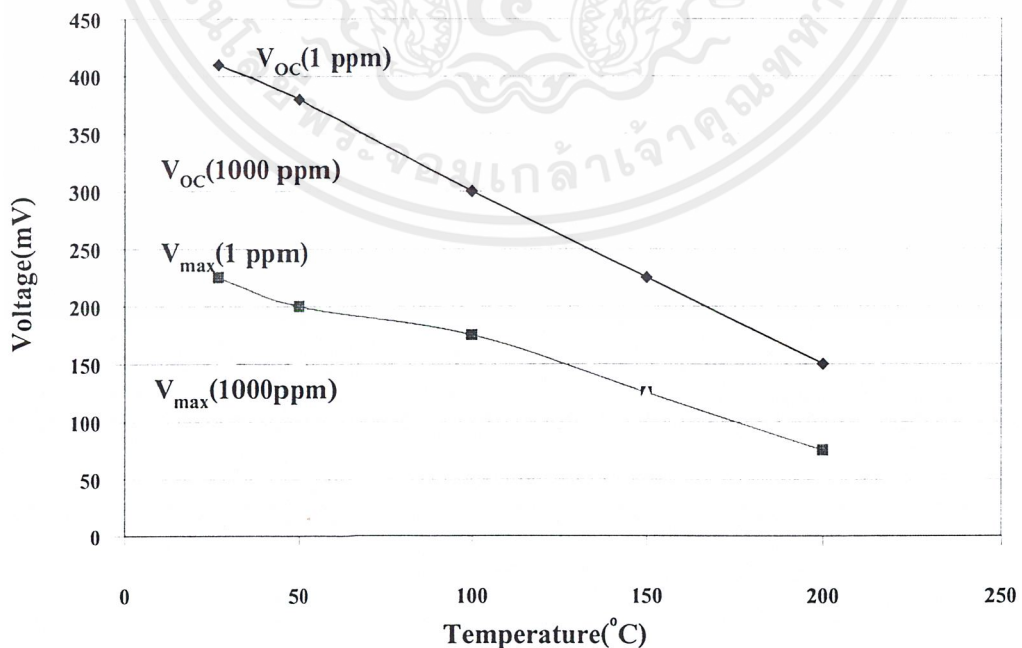
รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลที่ได้จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 มาเขียนกราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และ พลังงานที่ได้จากเซลล์ ได้จากรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 ได้ดังนี้

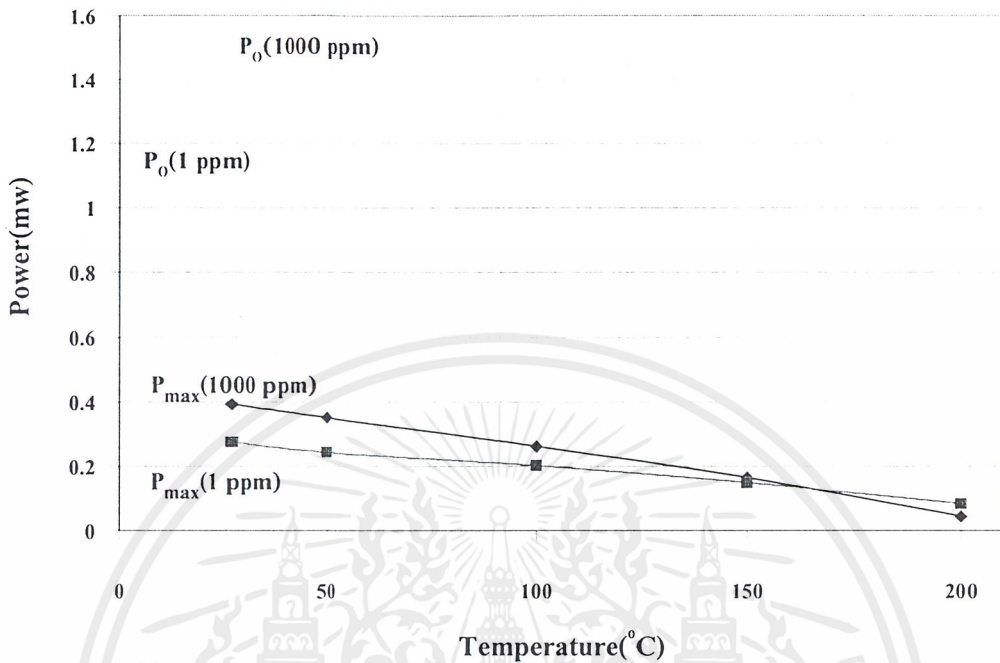


รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.18 ,4.19 และ รูปที่ 4.20 นั้น เมื่อนำผลการทดลองที่ได้นำมาเขียนค่าต่างๆที่เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิลงได้ตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับ ซิลิคอน และ เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ซิลิคอน เนื่องมาจากอุณหภูมิ

	อัตราการเปลี่ยนแปลงต่อ 1 °C		
	1 ppm	1000 ppm	p-n Si [1]
ΔI_{SC} (mA)	▼ 0.0043	▼ 0.0083	▲ 0.08
ΔI_{max} (mA)	▼ 0.00006	▼ 0.0028	▲ 0.06
ΔV_{OC} (mV)	▼ 1.5	▼ 1.44	▼ 2.05
ΔV_{max} (mV)	▼ 0.87	▼ 0.72	▼ 2.05
ΔP_O (mW)	▼ 0.0083	▼ 0.038	▼ 0.175
ΔP_{max} (mW)	▼ 0.002	▼ 0.001	▼ 0.172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอนที่มีผู้ทดลองไว้แล้ว พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่ออุณหภูมิที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพี กับ ซิลิคอนชนิดเอ็น นั้นจะเปลี่ยนต่ออุณหภูมิน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากพี-เอ็น ซิลิคอน แสดงให้เห็นว่าในขณะที่อุณหภูมิมียิ่งเพิ่มขึ้นนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนเอ็นจะทำงานได้ดีและ มีความเสถียรมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก พี-เอ็น ซิลิคอน

ตารางที่ 4.6 ตารางฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้น

อุณหภูมิ(°C)	Fill Factor (F.F.)	
	1 ppm	1000 ppm
27	0.268	0.28
50	0.268	0.28
100	0.293	0.307
150	0.315	0.343
200	0.316	0.167

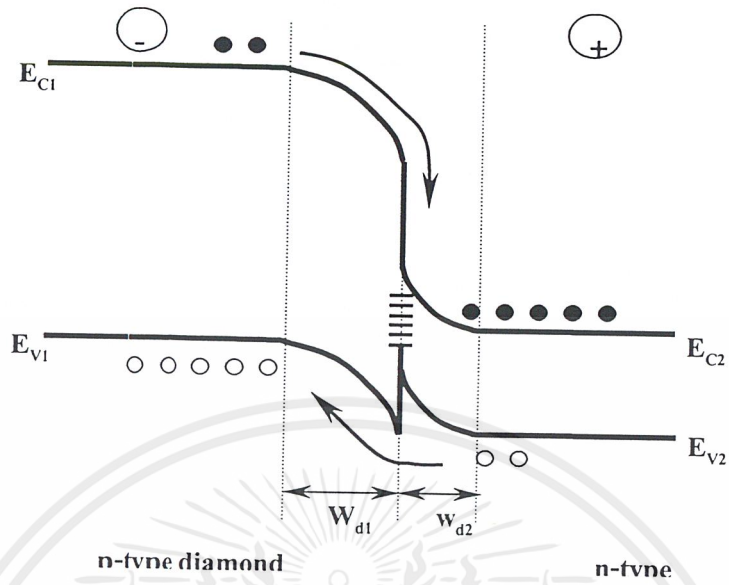
จากตารางค่าของฟิลแฟคเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.6 นั้นจะเห็นได้ว่าค่าของฟิลแฟคเตอร์ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งคือที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้นประมาณ 200 องศาเซลเซียส ค่าฟิลแฟคเตอร์จะลดลง แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิอาจจะมีส่วนช่วยให้ค่าของความต้านทานอนุกรมภายใน ที่มีค่ามากในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้นั้นมีค่าลดลงซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นรูปโค้งมากขึ้นเนื่องจากความร้อนนั้นจะทำให้ที่บริเวณที่เป็นฟิล์มเพชร นั้นมีค่าของความต้านทานลดลงเนื่องจากเกิดประจุพาหะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้นนั่นเอง ในขณะที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm นั้นเมื่ออุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้นค่าของ ฟิลแฟคเตอร์ก็จะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน และอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน

บทที่ 5

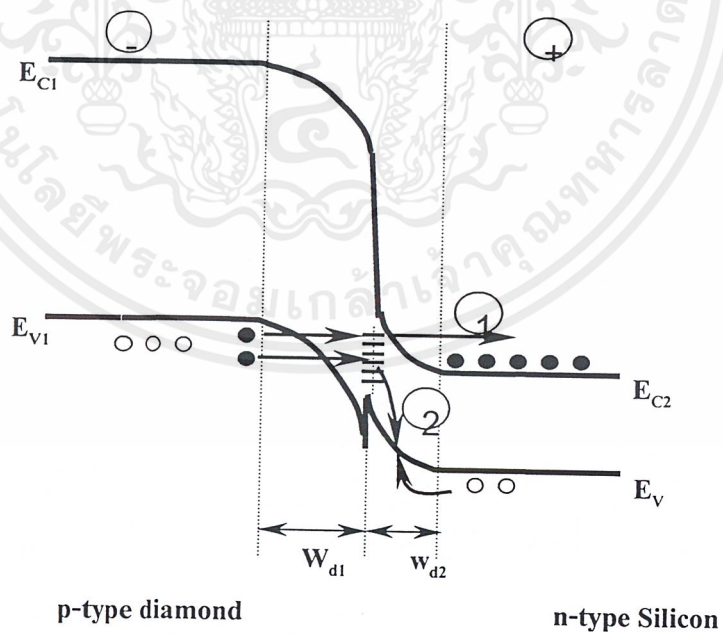
สรุปผลการทดลอง

ในรายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิกอนชนิดเอ็นซึ่งในการศึกษาส่วนแรกเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างฟิล์มเพชร ซึ่งการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีถูกสังเคราะห์บนฐานรองชนิดเอ็นระนาบ(111)ด้วยวิธีการทางเคมีหรือเรียกว่า CVD(Chemical Vapour Deposition) ซึ่งจากการศึกษาในส่วนนี้จะได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ ซึ่งในการตรวจสอบระนาบและความหนาของฟิล์มเพชรซึ่งจากการทดลองได้ฟิล์มเพชรซึ่งมีผิวของระนาบเป็น(111) จากการตรวจสอบโดยใช้ SEM(Scanning Electromicroscopy) ในเพชรธรรมชาติมีค่ายอดคลื่นสูงสุดของ Raman Spectrum อยู่ที่ 1332 cm^{-1} ซึ่งเพชรที่สังเคราะห์ได้มีค่ายอดคลื่นสูงสุดของ Raman Spectrum อยู่ที่ 1333 cm^{-1} แม้ว่าจะมียอดกราฟอยู่ที่ 1580 cm^{-1} รวมอยู่ด้วยแต่จะเห็นได้ว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเพชรที่ยืนยันได้ว่าเพชรที่สร้างได้นั้นเป็นเพชรจริง หลังจากนั้นเป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของความเข้มข้นของอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน B:C ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้ฟิล์มที่มีความหนา $2\text{ }\mu\text{m}$ และความเข้มข้นของสารเจือB:Cที่ 1, 10, 100 และ 1,000ppm. ซึ่งจากผลการศึกษาจะพบว่าที่ความเข้มข้นสารเจือสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแส (Isc)มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับแต่ในทางตรงกันข้ามค่าของแรงดัน(Voc) จะมีค่าลดลงตามค่าความเข้มข้นของสารเจือซึ่งจากการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์(Pmax) ที่ค่า B:C สูงขึ้นทำให้ได้ Pmax สูงขึ้น และสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าที่ค่าB:C ต่ำๆ นี้จะมีกระแสรั่วไหลย้อนกลับอิมิตัวน้อยซึ่งในที่นี้ B:C เท่ากับ 1 ppm. ทำให้มีกระแสรั่วไหลย้อนกลับอิมิตัวมีค่าน้อยที่สุดซึ่งทำให้ค่าของ Voc มีค่ามากที่สุด เพราะค่าของVoc ขึ้นกับค่าของกระแสอิมิตัวไหลย้อนกลับและผลของความเข้มแสงก็มีผลต่อค่าของ Voc และIscด้วยเช่นกันซึ่งที่ความเข้มแสงมากขึ้นทำให้ค่าของ Voc และ Iscมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะเห็นว่าค่าของIscจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น แต่แรงดันจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล กับค่าความเข้มแสงรวมทั้งความหนาของฟิล์มเพชรก็มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกันโดยที่ค่าความหนาของฟิล์มเพชรที่ $2\text{ }\mu\text{m}$ จะให้ประสิทธิภาพออกมาสูงสุด จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่ความหนา $1\text{ }\mu\text{m}$ จะมีลักษณะกราฟต่างไปจากตัวอื่นเนื่องมาจากผลของ Rsh มีค่าต่ำมากนั่นเอง เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีจะต้องมีค่า Rsh สูงๆ แต่ที่ความหนามากขึ้นค่าความต้านทานอนุกรมภายใน(Rs) มีค่าน้อยลงแต่กระแสที่เกิดขึ้นนั้นก็มิต้นน้อยเนื่องจากปริมาณแสงที่ตกกระทบบริเวณรอยต่อ มีค่าน้อยทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนาของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มเพชรหลายๆ นั้นมีประสิทธิภาพต่ำลง ส่วนผลของค่าความต้านทานภายในจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน คือ ค่าความต้านทานภายใน(R_s) ต่ำทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น และในทางกลับกัน ถ้า ค่า ความต้านทานภายใน(R_s) มีค่ามากจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพต่ำ และในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีรอยต่อ P-N ของสารชนิดเดียวกันคือ Silicon ที่ค่าอุณหภูมิสูงจะทำให้ Voc ลดลงแต่ Isc เพิ่มขึ้นแต่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ P-Diamond/N-Silicon แล้วจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่า Voc และ Isc ลดลงทั้งคู่ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนที่ลดลงจะมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพที่ลดลงของรอยต่อ P-N ของ Silicon ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ P-Diamond/N-Silicon จะทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด P-N Silicon ซึ่งจากการศึกษานี้จะได้ประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 13.8% ทั้งยังสามารถสร้างได้ง่ายและผ่านขั้นตอนไม่ยุ่งยาก จึงเหมาะต่อการนำไปพัฒนาต่อไปเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้ดีต่อไปในอนาคต



รูปที่ 2.10 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับในขณะ $V < V_R$



รูปที่ 2.11 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับในขณะ $V > V_R$

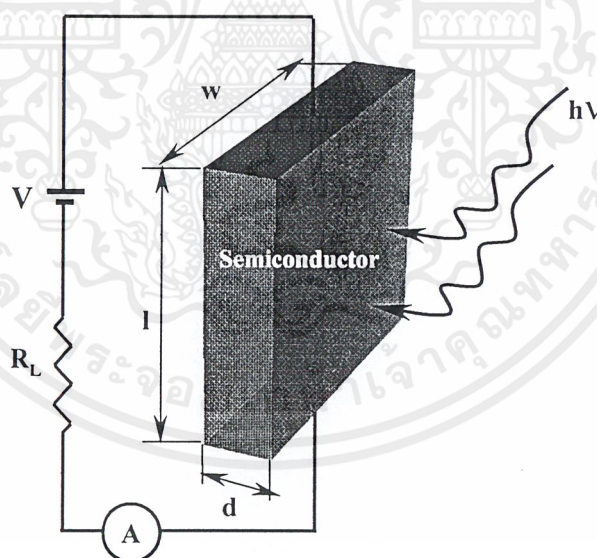
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่ส่องแสงเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ และเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุล ให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบความนำและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ โดยที่พลังงานของแสงนั้นจะต้องมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามหลักการดึงอิเล็กตรอนไปใช้งาน คือ โฟโตคอนดักทีฟและโฟโตโวลตาอิก

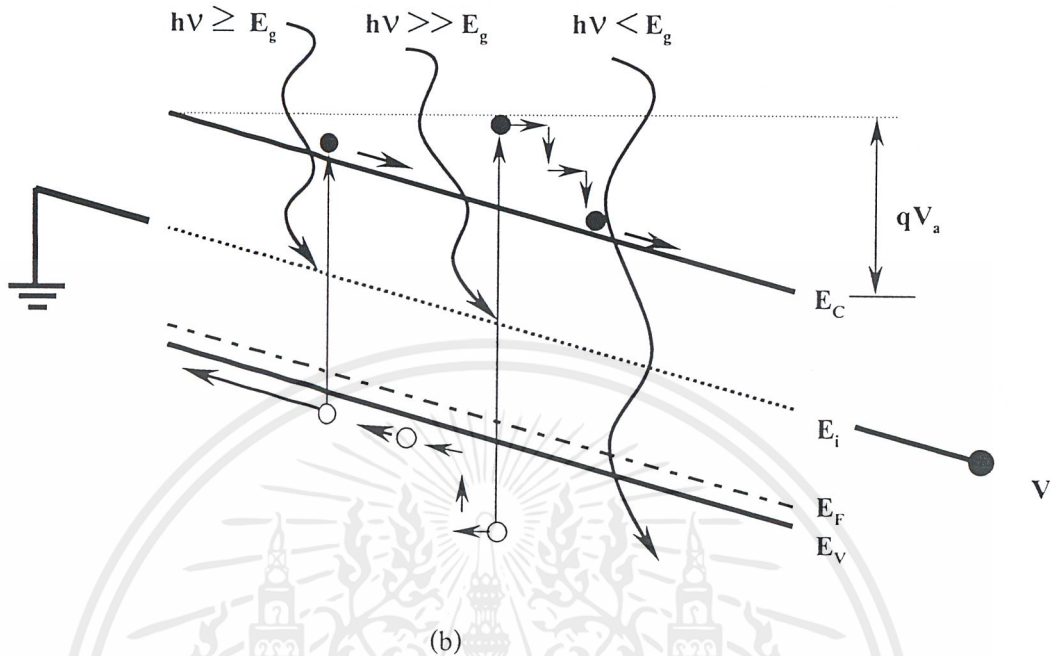
2.5.1 โฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive)

โฟโตคอนดักทีฟ ได้แก่ การป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกให้สารกึ่งตัวนำ เพื่อให้อิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำวิ่งออกสู่ภายนอก และ เกิดกระแสไฟฟ้าไหล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 ส่วนโวลต์ในแถบวาเลนซ์ก็ช่วยให้กระแสไหลได้เช่นกัน สิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานด้วยปรากฏการณ์นี้ได้แก่ โฟโตเซลล์



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 (a) ลักษณะโฟโตเซลล์ (b) ลักษณะของแถบพลังงานของ โฟโตเซลล์เมื่อได้รับแรงดัน พร้อมกับมีแสงตกกระทบ

เมื่อมีแสงมาตกกระทบบสารกึ่งตัวนำนั้น ถ้าแสงมีพลังงาน โฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้นไว้ และจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น แต่ถ้าแสงมีพลังงาน โฟตอนน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น แสงจะทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำโดยไม่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อีกกรณีหนึ่งถ้าแสงมีพลังงาน โฟตอนมากกว่าช่องว่างพลังงานมากๆ ก็จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นเช่นกัน แต่ อิเล็กตรอนและโฮลจะมีพลังงานสูงกว่าปกติ และจะเกิดการชนกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำจนลดระดับพลังงานมาอยู่ที่สภาวะปกติและจะเกิดความร้อนขึ้น เรียกว่าการผ่อนคลายพลังงานความร้อนของอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12(b)

เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับสารกึ่งตัวนำ และทำการฉายแสงดังรูปที่ 2.12(b) จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากแสง เนื่องจากคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่เปลี่ยนไปก็คือ สภาพความนำไฟฟ้า โดยสภาพความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนเนื่องจากแสงเรียกว่า สภาพความนำไฟฟ้าทางแสง (Photoconductivity) โดยเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าและมีการฉายแสงให้กับสารกึ่งตัวนำ สภาพความนำไฟฟ้ารวมที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมสารเจือ สภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าจะขึ้นอยู่กับค่าของจำนวนความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ และ ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ ในขณะที่ ค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสงจะขึ้นอยู่กับค่าของประจุพาหะส่วนน้อยที่เกิดเนื่องจากแสง

2.5.2 โฟโตโวลทาอิก

สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น เมื่อมีแสงที่มีพลังงานมากพอมาตกกระทบ พลังงานแสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนเอาไว้ ถ้าพลังงานส่วนนี้มีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะทำให้ อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดข้ามไปยังแถบความนำได้ และจะเหลือ โฮล ไว้ที่แถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนที่กระโดดข้ามไปยังแถบความนำนั้นจะเคลื่อนที่อย่างไม่ทิศทาง จนหมดพลังงานที่จะอยู่ในแถบความนำได้ ก็จะตกลงมาอยู่ที่แถบวาเลนซ์เหมือนเดิม อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากแสงนี้เองที่ทำให้สภาพความนำไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลง แม้จะไม่ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้น แต่ก็สามารถนำผลที่เกิดขึ้นนี้ไปสร้าง ไปสร้างอุปกรณ์ที่มีสภาพความนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามแสงได้อย่างเช่น โฟโตไดโอด

ในหัวข้อนี้เรากล่าวถึงผลของโฟโตโวลทาอิกว่าทำให้เกิดผลอย่างไรกับรอยต่อพี-เอ็น ต่อไปจะกล่าวถึงสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่อาศัยพื้นฐานของปรากฏการณ์นี้ เช่น โฟโตไดโอด และ เซลล์แสงอาทิตย์

2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)

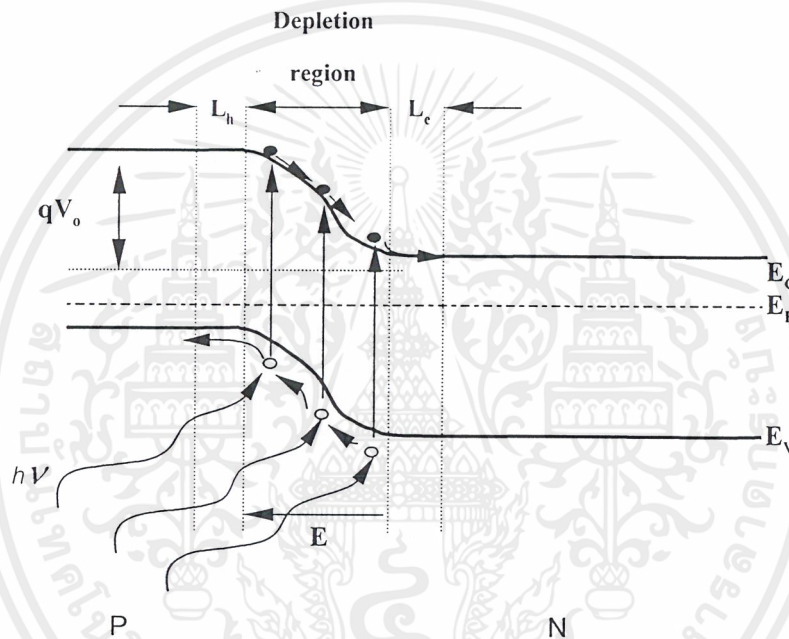
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับโฟโตไดโอด และใช้หลักการโฟโตโวลทาอิกเหมือนกัน โดยเมื่อมีแสงตกกระทบที่เซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์จะเหมือนกับไดโอดทั่วไปทุกประการ แตกต่างกันเพียงแต่ ชั้นของสารกึ่งตัวนำทางด้านที่รับแสง ต้องมีความบางมากๆ จนแสงส่องทะลุไปถึงรอยต่อและสารกึ่งตัวนำด้านที่เป็นฐานรองได้ เพราะฉะนั้นกราฟคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่ถูกแสงจะมีลักษณะเหมือนกันกับไดโอดทั่วไป แต่ถ้ามีแสงมาตกกระทบแล้วคุณลักษณะกระแสและแรงดันจะเปลี่ยนไป

หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่เซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าขึ้นภายในเซลล์ เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปที่ขั้วลบและโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก

2.6.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

2.6.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (homojunction solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน เช่น p-Si/n-Si นั้นหลักการการเกิดกระแสโฟโตนั่นก็จะเป็นลักษณะเช่นเดียวกับโฟโตไดโอด เพียงแต่ลักษณะการใช้งานนั้นไม่ต้องมีการป้อนแรงดันให้กับเซลล์ ซึ่งรูปทฤษฎีแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



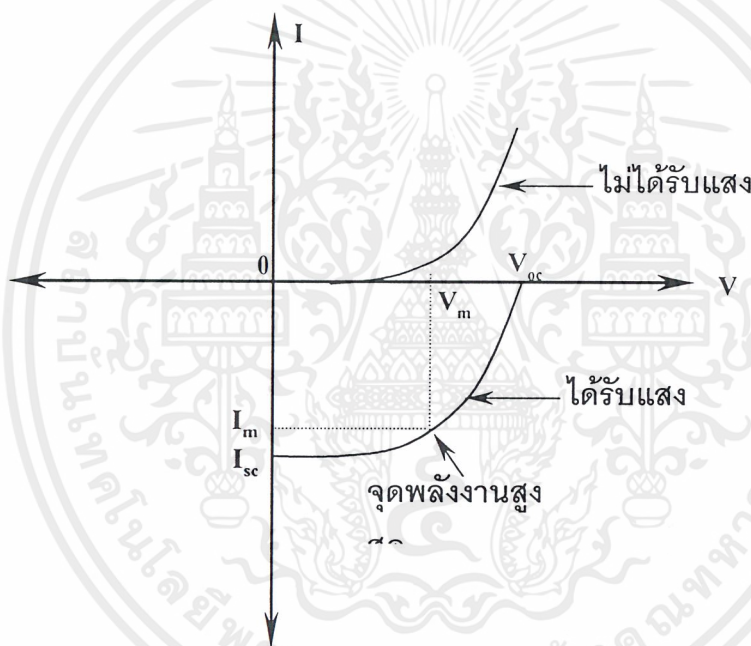
รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดกระแสโฟโตในเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีมาต่อเข้าด้วยกันนั้น จะได้ลักษณะของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.18 ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน สังเกตได้จากระดับของพลังงานเฟอร์มีมีค่าเท่ากัน โดยค่าของความต่างศักย์ภายในจะมีค่าเท่ากับ qV_0 เมื่อมีแสงมาตกกระทบบที่บริเวณปลอดพาหะนั้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้น ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับพลังงานแสงด้วยว่าจะเพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้หรือไม่ ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.5.1 ถ้าพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้และจะเหลือโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ ที่บริเวณปลอดพาหะนั้นจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ซึ่งมีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้านี้เองจะเป็นตัวทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงให้เคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น ในขณะที่โฮลก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.1.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เพียงรอยต่อเดียวเหมือนไดโอด ดังนั้นคุณสมบัติทางแสงของเซลล์ในขณะที่ยังไม่ได้รับแสงจึงเหมือนกับไดโอดทั่วไป เพียงแต่มีกระแสรั่วไหลที่รอยต่อมากกว่าเท่านั้น นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีพื้นที่รอยต่อมากกว่า ในขณะที่เซลล์ได้รับแสงทิศทางการไหลของกระแสที่ผ่านรอยต่อของเซลล์จะตรงกันข้ามกับขณะที่ยังไม่ได้รับแสง โดยที่แรงดันยังมีลักษณะเหมือนเดิม กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จึงตกมาอยู่ที่ควอดแรนต์ที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นว่า เซลล์จะจ่ายกระแสออกมามากที่สุดเมื่อเซลล์ถูกัดวงจรซึ่งให้มีค่าเป็น I_{sc} และ เซลล์จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจรออก ซึ่งให้มีค่าเป็น V_{oc} เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันแล้ว จะพบว่า กราฟคุณสมบัติของเซลล์ในขณะที่ได้รับแสงในรูปที่ 2.14 จะมีอยู่จุดหนึ่งที่ค่าผลคูณของกระแสและแรงดันมีค่าสูงสุด จุดนี้จะเรียกว่าจุดพลังงานสูงสุดของเซลล์ กระแสและแรงดันที่จุดนี้มีค่าเป็น I_m และ V_m ตามลำดับถ้าเรานำไปให้กับแหล่งรับพลังงานหรือโหลด ที่มีความต้านทานพอดีกับจุด

นี้ เซลล์จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดมีค่าสูงสุด ค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมนี้จะคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง V_m ต่อ I_m เพราะฉะนั้น ค่าความต้านทานโหลด $= \frac{V_m}{I_m}$

ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟรูปที่ 2.14 คือถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้น เป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อ 2.6.2 จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า “ฟิลแฟกเตอร์” ($F.F.$: Fill Factor) ของเซลล์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์จริงๆ ต่อพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ในทางอุดมคติ

$$F.F. = \frac{P_m}{P_0} = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.15)$$

เมื่อ $F.F.$ คือ ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

P_m คือ พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ

I_m คือ กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์

V_m คือ แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์

P_0 คือ พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ

I_{sc} คือ ค่ากระแสลัดวงจร

V_{oc} คือ แรงดันขณะวงจรเปิด

จะเห็นว่าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ถ้าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่า เซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติมาก

เพื่อที่จะเข้าใจคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะต้องพิจารณาจากวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสคงที่ นั่นก็คือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสง (I_L) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และ รอยต่อพี-เอ็นของไดโอด กระแส I_L ที่เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

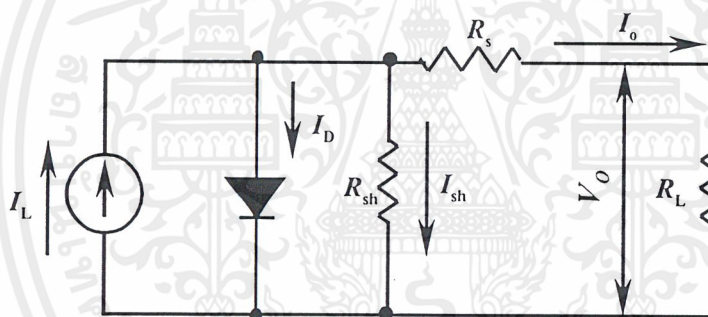
เนื่องจากแสงนี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอด และ R_s แล้วจึงไหลมายังโหลด (R_L) กระแสที่ไหลผ่าน R_s และ R_L ให้มีค่าเป็น I_o จะได้ว่า

$$I_L = I_D + I_o \quad (2.16)$$

$$I_o = I_L - I_D \quad (2.17)$$

เมื่อ $R_s = 0$ กระแส I_D มีค่าดังนี้

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

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

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.19)$$

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.20)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_o = I_L \quad (2.21)$$

ในกรณีนี้ I_o ก็คือ I_{sc} ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดมาจากแสง

ในกรณีที่เปิดวงจรทางโหลดเพื่อที่จะดูค่าแรงดันสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{oc}) จะได้ว่า

$I_o = 0$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$I_L = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

$$\ln \frac{I_L}{I_s} = \frac{qV}{kT} - 1$$

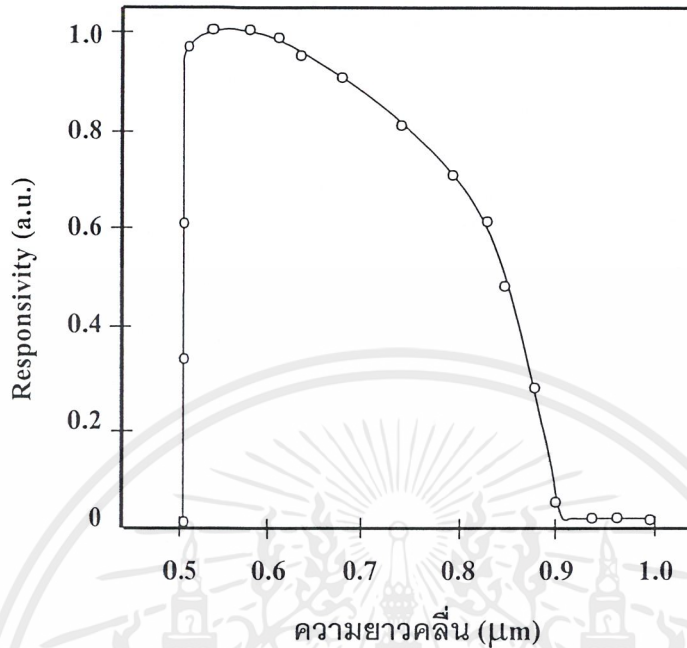
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right) \quad (2.23)$$

2.6.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction solar cell)

รอยต่อสารกึ่งตัวนำแบบเนื้อสารต่างชนิดกันนั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบ โดยรอยต่อที่เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันมาต่อกันนั้นเราเรียกว่า รอยต่อเฮเทอโรโร (heterojunction) และถ้าสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมีประจุพาหะชนิดเดียวกันเช่นรอยต่อ n/n และ p/p เรียกว่า รอยต่อชนิดไอโซ (isotype junction) ถ้าสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมีประจุพาหะต่างชนิดกันเช่นรอยต่อ p/n และ n/p เรียกว่ารอยต่อชนิดแอนไอโซ (anisotype junction) ในที่นี้จะพูดถึงเฉพาะรอยต่อแบบแอนไอโซเท่านั้น

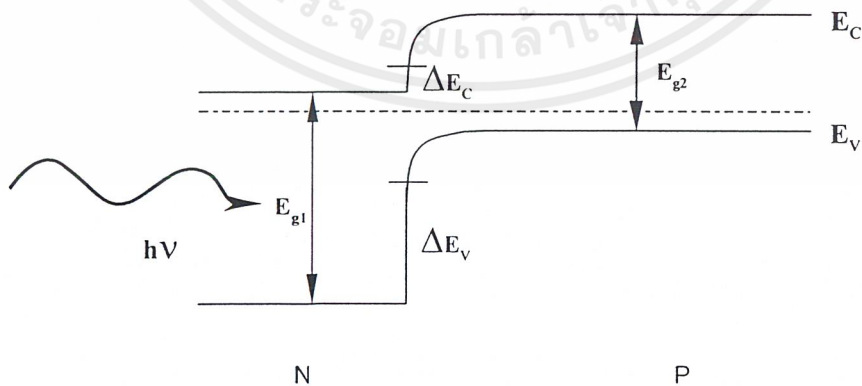
ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแอนไอโซนั้น แสงอาทิตย์จะสามารถทะลุผ่านชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานมาก (เรียกว่าชั้นหน้าต่าง) ได้โดยถูกดูดกลืนแสงน้อยมาก แสงที่เหลือลอดผ่านชั้นหน้าต่างไปได้นั้นจะถูกดูดกลืนในชั้นถัดไป ซึ่งคู่อิเล็กตรอนโฮลจะถูกผลิตขึ้นในชั้นนี้เอง ผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ในชั้นนี้ จะมีค่าสูงในช่วงพลังงานโฟตอนที่ครอบคลุมช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้ โดยชั้นหน้าต่างนี้ยังเป็นตัวช่วยกรองรังสีต่างๆ ได้อีกด้วย จึงนิยมนำไปใช้ในงานด้านอวกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 สเปกตรัมผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรโร

จากรูปที่ 2.17 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแอนไอโซเฮเทอโรโร โดยที่ Anderson ได้พบว่าความไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงาน (Band discontinuity) ของแถบความนำ (ΔE_C) และของแถบวาเลนซ์ (ΔE_V) เป็นไปตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ



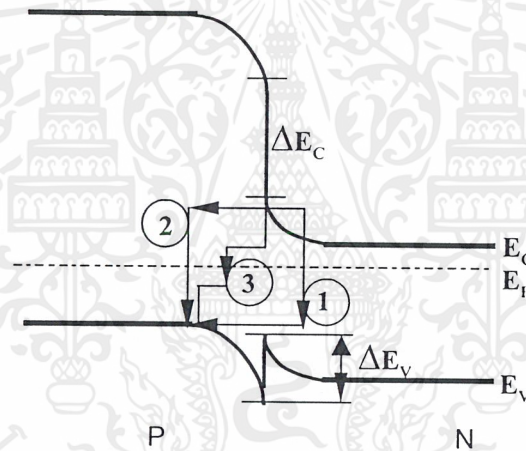
รูปที่ 2.17 ลักษณะของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโรที่ไม่มีรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.17 ΔE_c มีค่าเป็นบวก ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตในชั้นพี นั้นสามารถไหลสู่ชั้นเอ็นได้ เป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าโฟโตนิกได้ แต่ถ้า $\Delta E_c \leq kT$ จะเกิดยอดแหลม (spike) ขึ้นที่ชั้นรอยต่อของแถบความนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไม่ให้เคลื่อนที่ ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าโฟโตนิกมีค่าลดลง

ในทำนองเดียวกัน ในรอยต่อ p-n แบบเฮเทอโรโร ค่า $\Delta E_c \leq -kT$ ก็เกิดยอดแหลมขึ้นที่รอยต่อของแถบวาเลนซ์ ทำให้โฮลที่ถูกผลิตในชั้นที่สอง (n) ถูกกักไม่ให้เคลื่อนที่

อย่างไรก็ตามต้องระวังด้วยว่า ในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ n-p ค่า ΔE_c มีค่ามากกว่า kT มาก ๆ หรือเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n ถ้า ΔE_v มีค่ามากกว่า kT มาก จะทำให้แรงดันไฟฟ้าภายใน V_d ลดลง



รูปที่ 2.18 ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโร

ซึ่งคุณสมบัติของ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 2.18 พบว่าความชันของกราฟจะไม่ลดลงแม้อุณหภูมิจะสูงขึ้นค่าหนึ่ง โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มียอดแหลมนั้น มีด้วยกันหลายรูปแบบ คือ อิเล็กตรอนในแถบความนำของด้านเอ็น จะตกลงในแถบสแตต ซึ่งมีอยู่จำนวนมากที่รอยต่อเชื่อม ในแถบพลังงานต้องห้าม ต่อจากนั้นอิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์ (Tunnel) เข้าไปยังแถบวาเลนซ์ของด้านพี ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นทางที่ 1 ในกรณีเส้นทางที่ 2 นั้น เริ่มแรกอิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์เข้าไปในแถบพลังงานต้องห้าม แล้วถูกจับด้วยแถบสแตต ต่อจากนั้นอิเล็กตรอนจะตกลงไปในแถบวาเลนซ์และไปรวมตัวกับโฮล สำหรับกรณีเส้นทางที่ 3 นั้น อิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์ไปสู่แถบสแตตหลายครั้งเรียกว่า (Multiple tunneling) ก่อนที่จะรวมตัวกับโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานในเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ (R_s) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์มาก จากสมการที่ 2.24 ซึ่งคิดที่ $R_s = 0$ และได้ I_o ออกมาดังนี้

$$I_o = I_L - I_s [\exp(qV_o / kT) - 1] \quad (2.24)$$

ซึ่งถ้า $R_s \neq 0$ แล้ว แรงดัน V_o ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อและแรงดันที่ตกคร่อม R_s ซึ่งเท่ากับ $I_o \cdot R_s$ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริงๆ จะมีค่าดังนี้
แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ (V) = $V_o + I_o \cdot R_s$

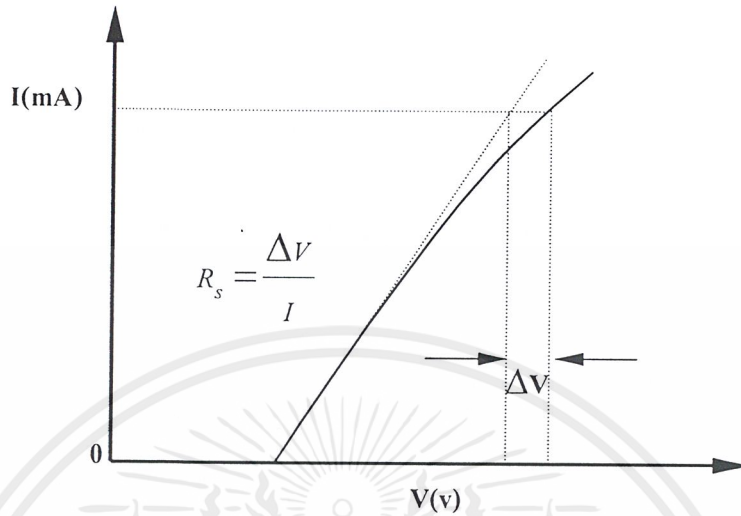
$$I_o = I_L - I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V_o + I_o \cdot R_s)}{kT} \right\} - 1 \right] \quad (2.25)$$

ความต้านทานอนุกรมสามารถหาได้โดยวิธีการดังนี้

เนื่องจากกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล เช่นเดียวกับไดโอด เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันนี้ไปเขียนลงในกราฟเซมิล็อก จะได้เป็นกราฟเส้นตรง แต่เนื่องจากผลของความต้านทานภายในเซลล์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานนี้ แรงดันส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กับกระแสในลักษณะเชิงเส้น เมื่อกระแสไหลผ่านเซลล์มากผลของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานอนุกรมนี้ จะทำให้ได้กราฟเส้นตรงที่ได้ในช่วงกระแสสูงๆ นี้ เบี่ยงเบนออกจากแนวเดิม ค่าที่เบี่ยงเบนออกมานี้จะนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ได้

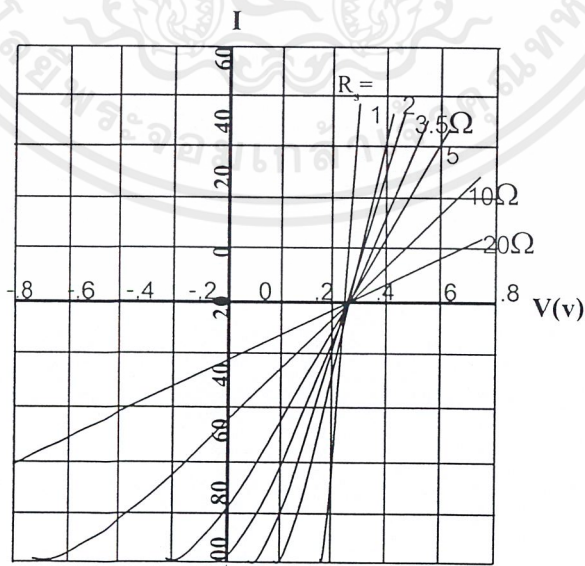
จากกราฟในรูปที่ 2.19 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ ที่ค่ากระแส I จะหาค่า R_s จากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV ได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บนกราฟแบบเซมิล็อก

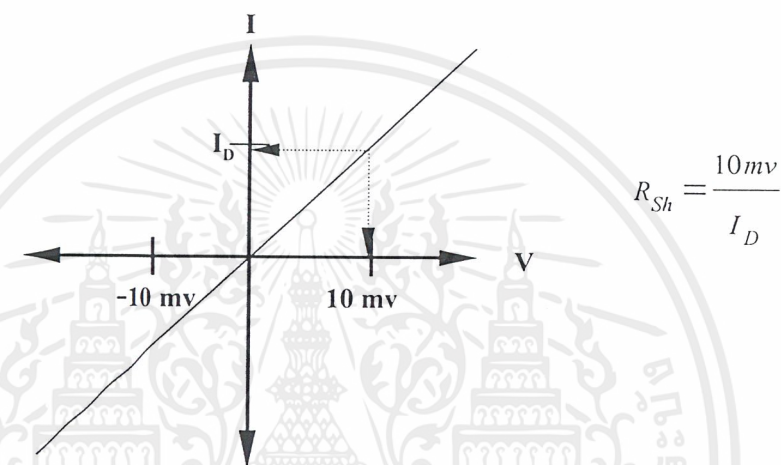
จากสมการที่ 2.25 สามารถนำไปเขียนกราฟ เพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 2.20 จากรูปจะเห็นได้ว่าเซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อยลง และความชันของกราฟก็ลดลงด้วยเป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรรหาทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.20 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

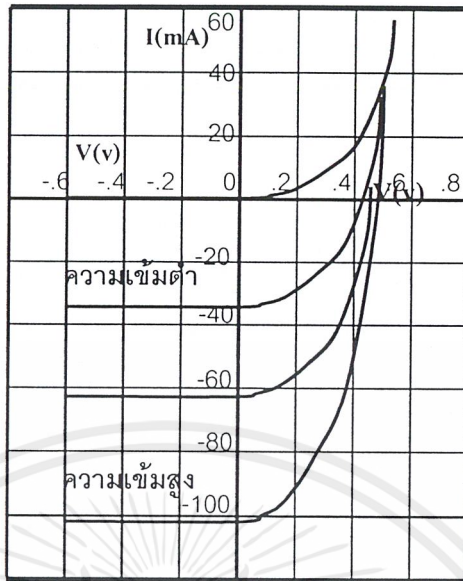
ส่วนความต้านทานขนานนั้นอาจจะเกิดจากกระแสรั่วที่บริเวณขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นความต้านทานขนานควรจะมีค่าสูง มากๆ แต่อาจจะมีค่าลดลงได้เนื่องมาจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น การหาค่าความต้านทานขนานนั้น สามารถทำได้โดยการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันในสภาพมืด โดยการไบแอสให้กับเซลล์ใน ระดับแรงดันต่ำๆ ประมาณ 10-20 mv ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์ [8]

2.6.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้แสงมากกระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีอิสระหลุดจากการยึดเหนี่ยวกับโฮลภายในอะตอม ถ้าแสงที่ส่องมากระทบเซลล์มีความเข้มสูงมากขึ้น ก็จะทำให้เกิด อิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลให้กระแสที่ได้จากเซลล์มีค่าสูงขึ้น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริงนั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเมื่อได้พิจารณาสมการของกระแส I_o ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L ในสมการที่ 2.26 จะพบว่า กระแส I_o นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องจากแสง I_L และกระแส I_D ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L และ I_D

2.6.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L

กระแส I_L ที่เกิดขึ้นจากแสงนั้นมีสมการดังต่อไปนี้

$$I_L = qg(x)A(L_e + L_h) \tag{2.27}$$

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

$$L = \sqrt{D\tau} \tag{2.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ D คือสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร(Diffusion coefficient) สำหรับอุณหภูมิต่ำๆ นั้น จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมน้อยมาก จากสมการของ L จึงเหลืออยู่แค่อายุของพาหะ τ (Carrier lifetime) ที่ต้องพิจารณา ซึ่งก็พบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำๆ นั้น จะมีผลต่ออายุของประจุพาหะน้อยมากเช่นกัน (สำหรับอายุของนี้จะขึ้นอยู่กับระดับการแพร่ซึมและระดับแตรบเป็นส่วนใหญ่)

องค์ประกอบอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อ 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

2.6.4.2 ผลของอุณหภูมิต่อ I_D

$$\text{เมื่อพิจารณาค่าของ } I_D \text{ ในสมการ } I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right]$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า I_s จะมีผลต่อกระแส I_D มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อ I_s โดยพิจารณาจากสมการของ I_s ดังนี้

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

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 I_D จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

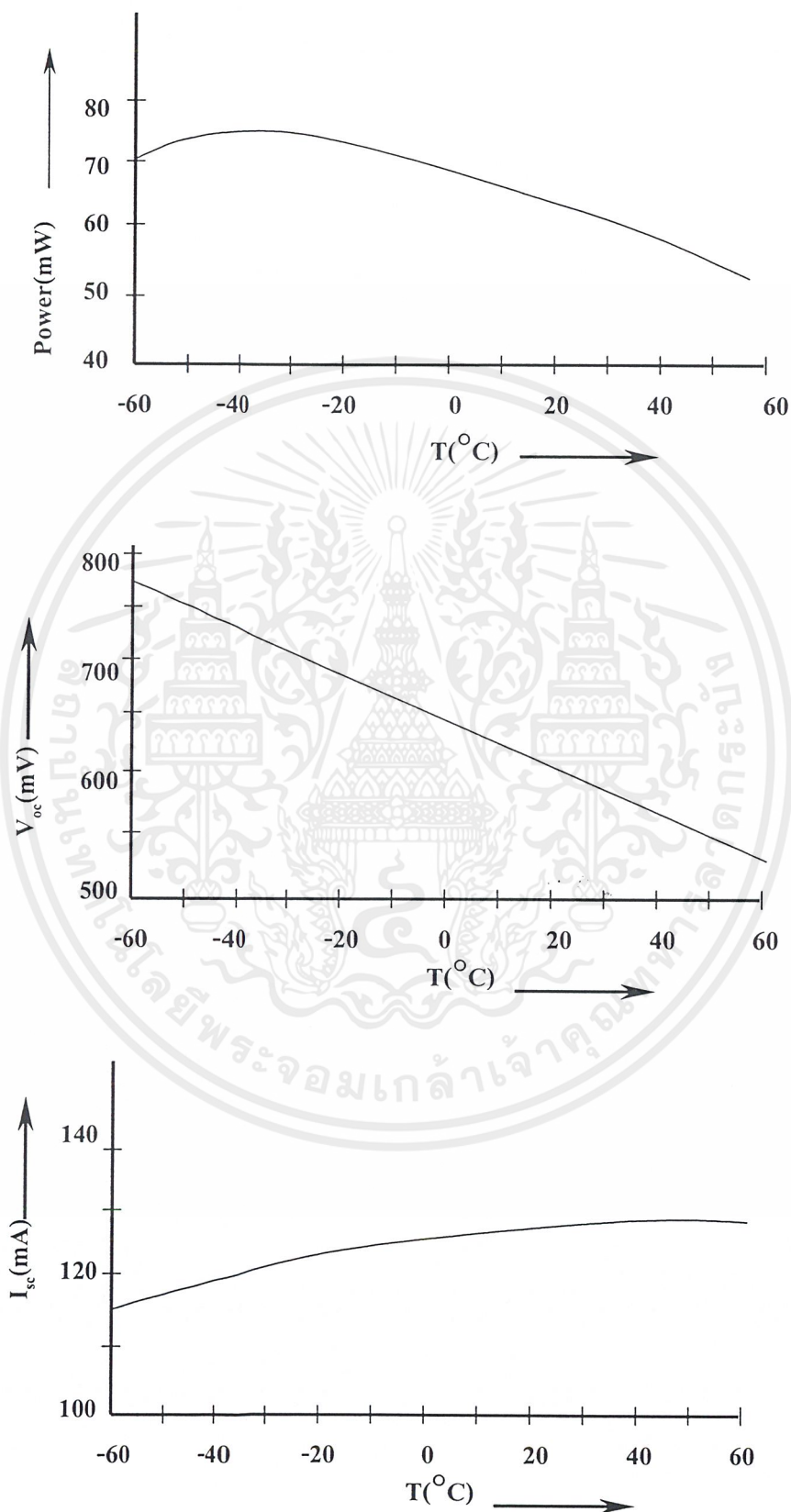
2.6.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ จะพิจารณาค่าแรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) ตามสมการ 2.31 ดังนี้

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

จากสมการนี้ค่าของ $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่าของ kT/q มีค่าต่ำมาก ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} คือค่าของ I_s ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลทำให้ค่าของ V_{oc} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ I_{sc} , V_{oc} และ P_o แสดงไว้ในรูปที่ 2.23





รูปที่ 2.23 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในรายงานฉบับนี้ได้เสนอการสร้าง และ การศึกษาเกี่ยวกับโฟโตโอดระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งจะต้องผ่านการเตรียมการอยู่หลายขั้นตอน เช่นการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น การขัดแผ่นซิลิคอน การสร้างฟิล์มเพชร การทำขั้วโลหะ รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่สร้างได้ ดังจะได้อธิบายรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

3.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน

3.1.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

- กำจัดเศษฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกบนผิวหน้าซิลิคอนในน้ำ DI (Deionized water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง
- ลอกชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าฐานรองด้วยสารละลายกรด HF 5% แล้วล้างออกด้วยน้ำ DI
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้าโดยการต้มด้วยกรดไนตริก (HNO_3 acid)
- ล้างกรด HNO_3 ด้วยการต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้า โดยการต้มด้วยสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene)
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงและล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

3.1.2 การขัดแผ่นซิลิคอน

ก่อนที่จะทำการสร้างฟิล์มเพชรนั้น จำเป็นที่จะต้องขัดแผ่นซิลิคอนเสียก่อนเพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการนิวเคลียเซชัน เพื่อที่จะทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรที่สมบูรณ์และเร็วขึ้น โดยในการขัดแผ่นซิลิคอนนั้นจะใช้ครีมเพชรขนาด 0.25 ไมโครเมตร ขัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการขัดนี้มาทำความสะอาดอีกครั้งหนึ่งตามกระบวนการดังนี้

- ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วย เอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อกำจัดครีมนเพชรที่ติดอยู่บนแผ่น

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการขัดมาต้มในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปเข้าเครื่องสันความถี่สูงทันที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดคริมเพชรที่ยังติดค้างอยู่ที่แผ่นซิลิคอน

- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซิโตนในเครื่องสันความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้าโดยการต้มด้วยกรดไนตริก (HNO_3 acid)

- ล้างกรด HNO_3 ด้วยการต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

- ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้ว เป่าแห้งเสร็จแล้วจะได้รูปลักษณะรอยขีดที่เกิดจากการขัดด้วยคริมเพชรขนาด $0.25 \mu m$ ดังแสดงในรูปที่

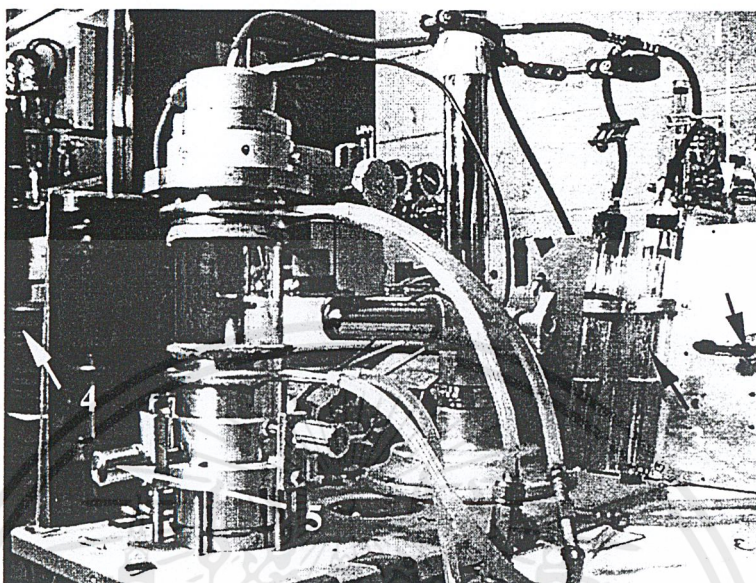
3.1



รูปที่ 3.1 รูปลักษณะรอยขีดที่เกิดจากการขัดด้วยคริมเพชรขนาด $0.25 \mu m$

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

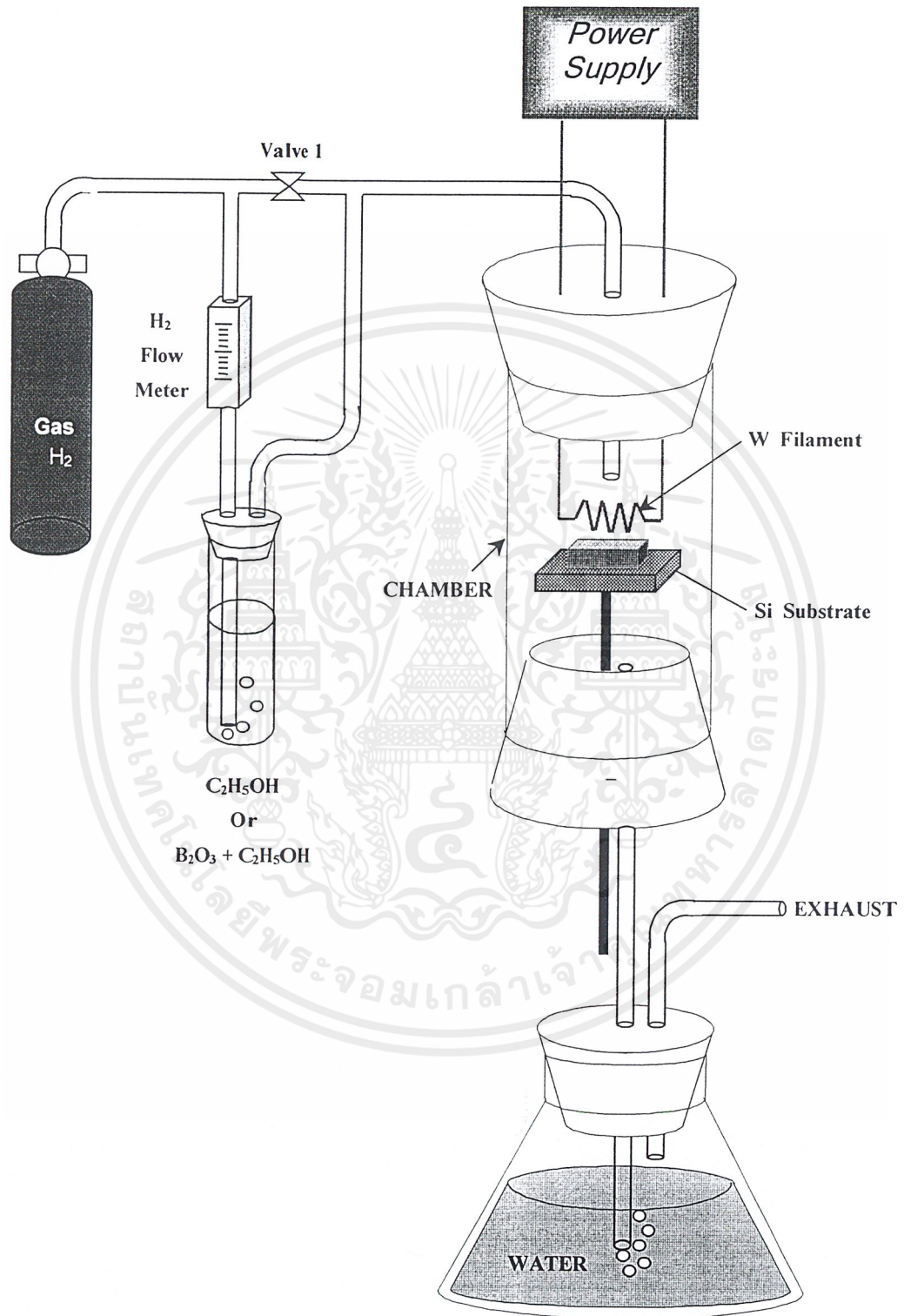
การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีในการศึกษาครั้งนี้ จะอาศัยวิธี CVD แบบ Hot-Filament (HFCVD) ด้วยชุดเครื่องมือในรูปที่ 3.2 โดยจะมีไดอะแกรมของระบบ CVD ที่ใช้อย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

- ปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนจากถังผ่าน (1) mainvalve(อยู่ข้างหลัง) เข้าไปใน Chamber ประมาณ 15นาที่ chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว
- ปิดวาล์ว (2) เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านแหล่งจ่ายเป็นตัวพาไอระเหยอัลกอกซอล (3) เข้า chamber ด้วยอัตราการไหลคงที่ที่ควบคุมโดย Flow meter
- จ่ายกระแส (4) อย่างช้า ๆ ให้กับไส้หลอดทั้งสแตนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอด จนมีอุณหภูมิประมาณ $2,000^{\circ}\text{C}$
- ปรับระยะห่างและตำแหน่งระหว่างฐานรองซิลิคอนกับ ไส้หลอดทั้งสแตนด้วยแกนปรับระยะ (5) ให้ได้ระยะที่เหมาะสมประมาณ 2 มิลลิเมตร
- สร้างฟิล์มเพชรตามระยะเวลาที่ต้องการ
- เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างแล้วจึงค่อย ๆ ลดระยะของฐานรองซิลิคอนให้ต่ำลงจากไส้หลอดประมาณ 2 เซนติเมตร พร้อมกับลดการจ่ายกระแสลงอย่างช้า ๆ
- ปิดถังก๊าซไฮโดรเจน และรอจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนในระบบที่ยังค้างอยู่ออกจนหมด
- นำชิ้นงานที่ได้ไปใช้ในกระบวนการถัดไป หรือไปตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



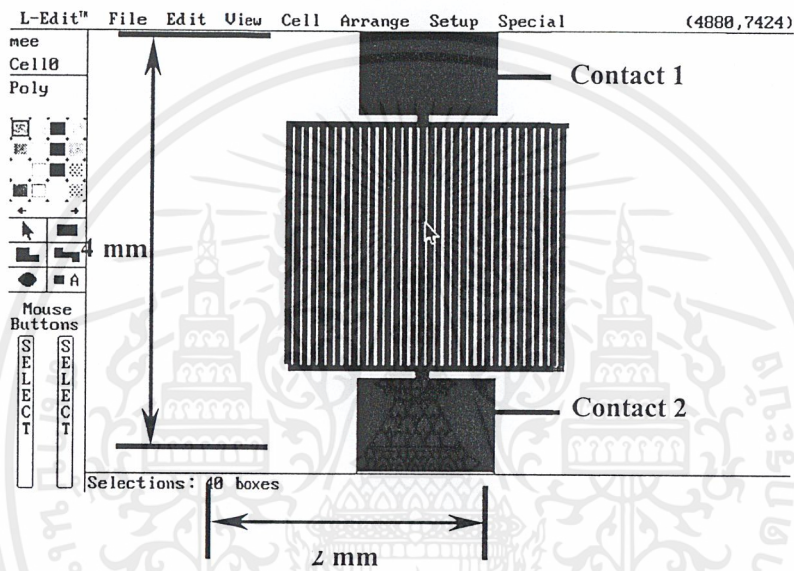
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมระบบ CVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ลักษณะลวดลายของรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

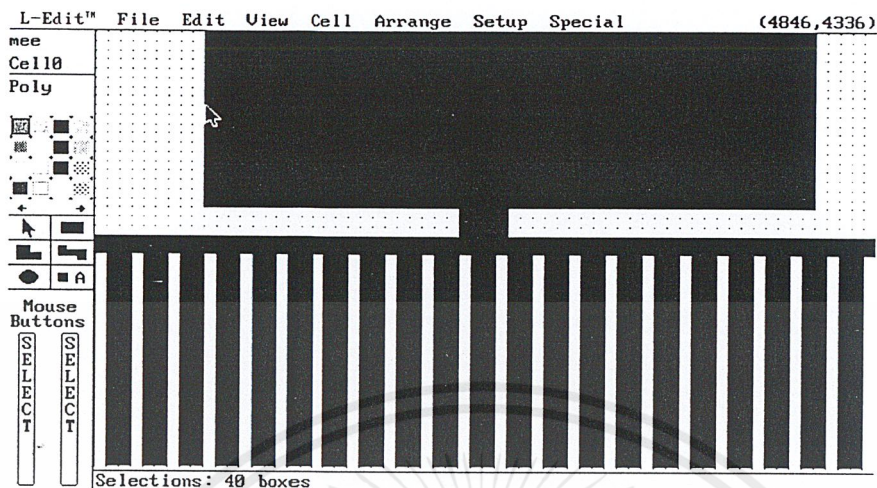
3.3.1 แบบลวดลายโลหะ

ในการทดลองนี้ได้ใช้ลักษณะของลวดลายของรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในกระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร จะใช้เครื่อง Vacuum Evaporator ในการเคลือบทองคำลงบนฟิล์มเพชร ซึ่งจะได้รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก(Ohmic)



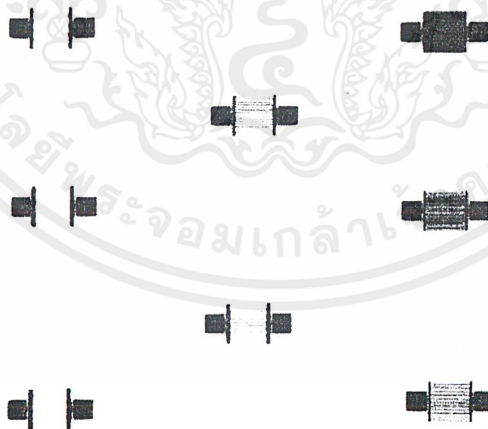
รูปที่ 3.4 รูปลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์

ซึ่งจากรูปถ่ายขยายให้ใหญ่กว่านี้จะเห็นได้ว่ามีลักษณะของลวดลาย contact 1 และ contact 2 จะแยกกันอย่างชัดเจน ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ลวดลายโลหะซึ่งมีขนาดของระยะห่างระหว่างลวดลาย 20 มิลลิเมตร และขนาดของเส้นลวดลายมีขนาด 40 มิลลิเมตร และมีพื้นที่รับแสงทั้งหมด 3.4 ตารางมิลลิเมตร โดยมีขนาดของขั้วโลหะทั้งสองเท่ากับ 1mm.x1mm. ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งถ้าขยายรูปดูก็จะเห็นลักษณะของลวดลายเป็นดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาพขยายของลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 3.6 เป็นรูปที่แสดงลักษณะของกระจกต้นแบบลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีพื้นที่รับแสงทั้งหมดประมาณ 3.4 ตารางมิลลิเมตร



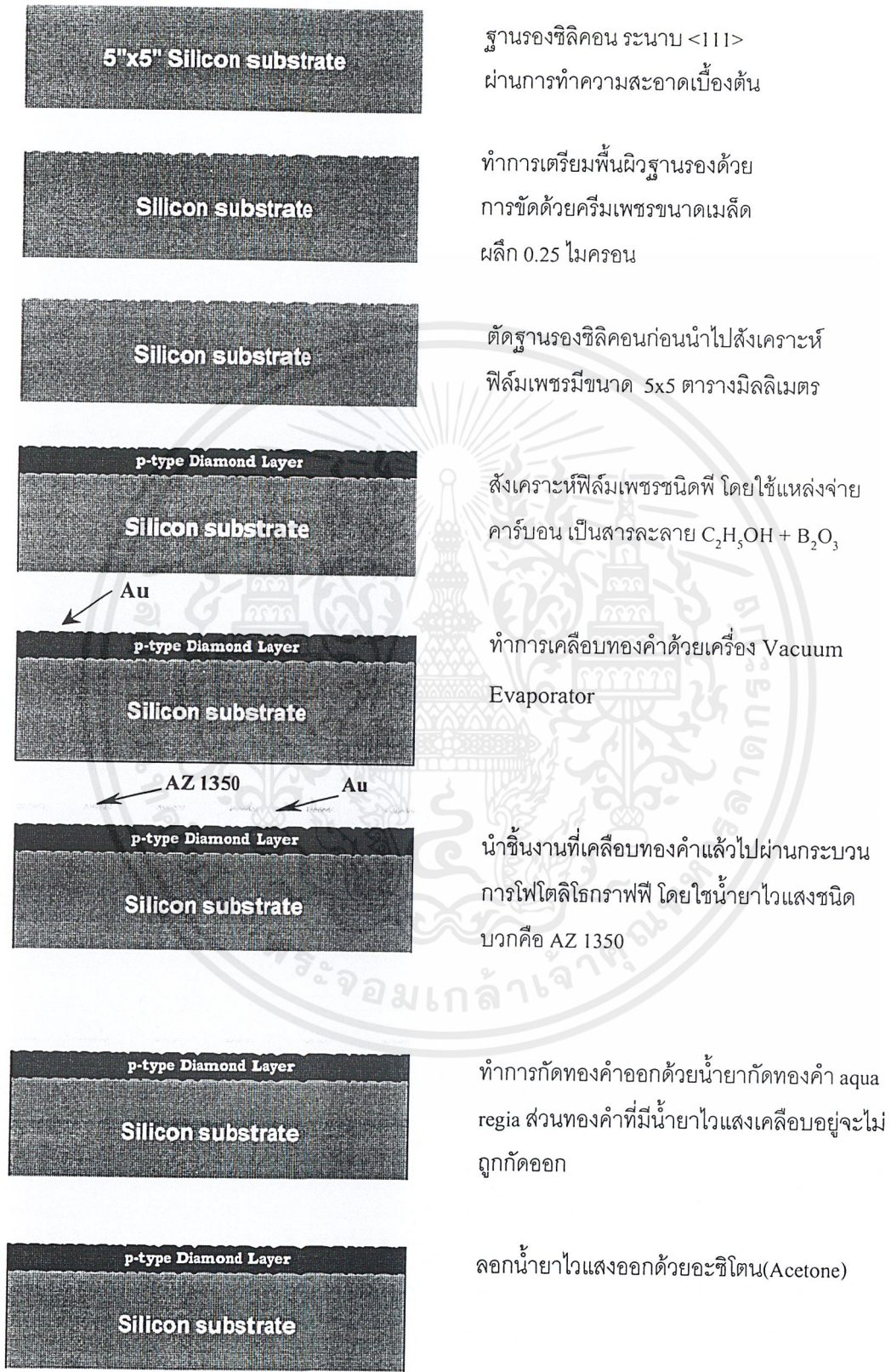
รูปที่ 3.6 ลักษณะของกระจกต้นแบบลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร

การสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกระหว่างทองคำกับฟิล์มเพชร มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
 - ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
 - ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์
 - นำแผ่นชิ้นงานที่สร้างได้มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1 อีกครั้ง
 - นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาผ่านขบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างลวดลายตามแบบที่ออกแบบไว้
 - ทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
 - ทำการ etching ทองคำด้วย Aqua regia คือ ส่วนผสมของกรด $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$
 - ทำการล้างฟิล์มกับแสงด้วยอะซิโตนจะได้ลวดลายของโลหะที่ได้ออกแบบไว้
 - ทำการ sintering ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซ N_2 เป็นเวลา 12 นาที
- โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.7

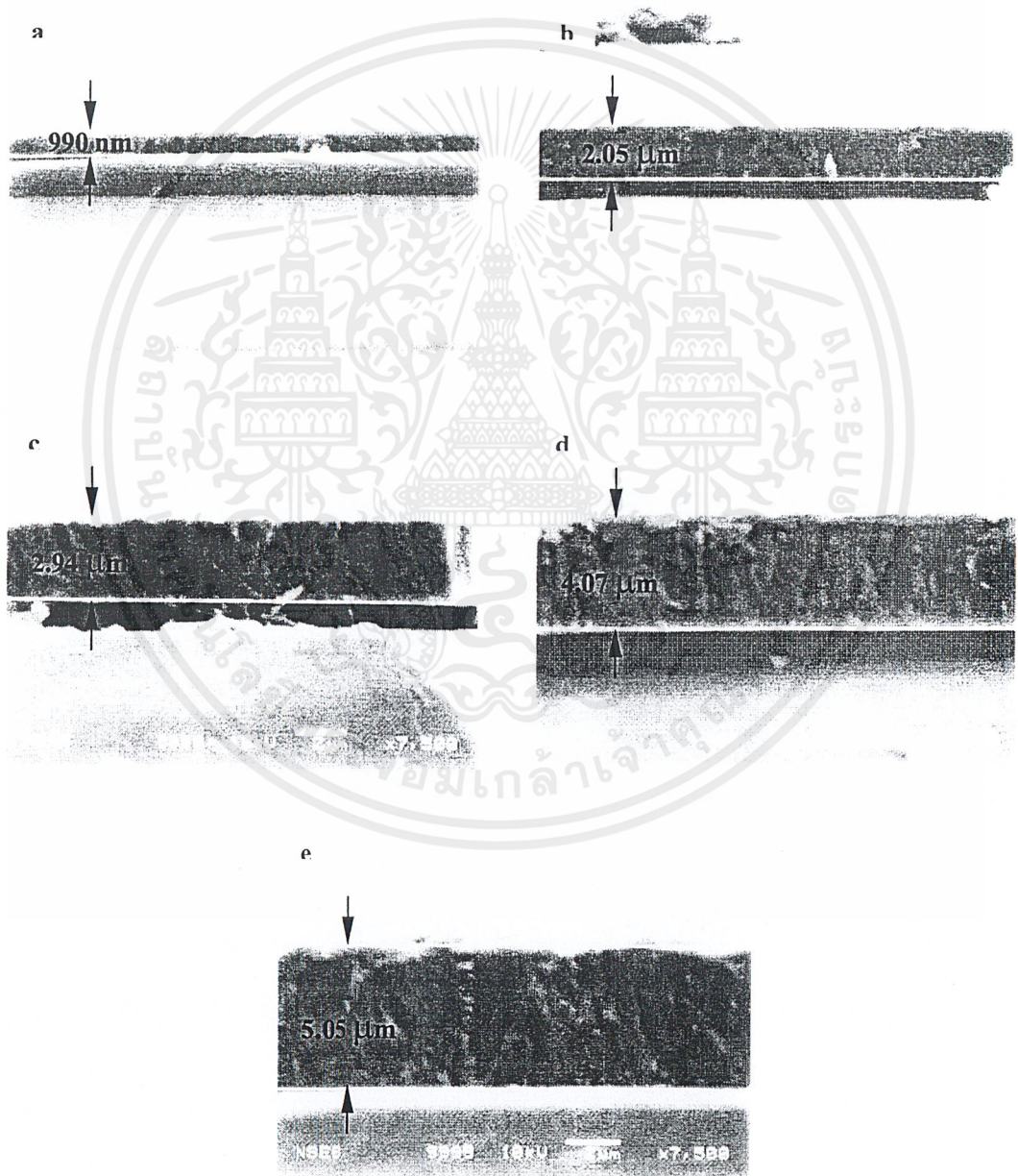


รูปที่ 3.7 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM และ เทคนิค Raman Spectroscope

3.4.1 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM

ทำการทดลอง สร้างฟิล์มเพชรที่มีความหนาแตกต่างกันออกไป โดยใช้เงื่อนไขของเวลาเป็นตัวกำหนด คือ 15 นาที 20 นาที 30 นาที 40 นาที และ 60 นาที แล้วนำไปถ่ายภาพ จากผลการทดลอง จะได้ความหนาของฟิล์มเพชรดังนี้ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 เครื่อง SEM แสดงไว้ในภาคผนวก ก-1



รูปที่ 3.8 ความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างได้จากการใช้เวลาที่สร้างแตกต่างกัน (a) 15 นาที (b) 20 นาที (c) 30 นาที (d) 40 นาที และ (e) 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การตรวจฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

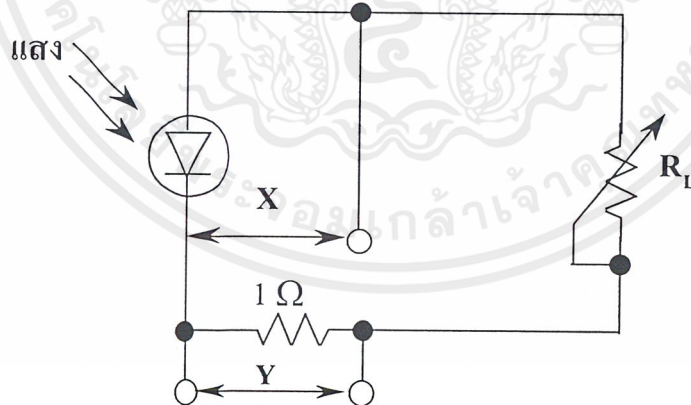
เทคนิคนี้จะเป็นการยืนยัน ว่าสิ่งที่สร้างได้นั้นเป็นเพชรจริง ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ และจะมีปริมาณของเพชรอยู่มากน้อยเพียงไรเมื่อเทียบกับปริมาณคาร์ไบด์ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเสมอ โดยเครื่อง Raman Spectroscop แสดงในภาคผนวก ก-2

3.5 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อแบบ p-Dia/n-Si

การทดลองนี้จะศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ผลของความเข้มของ B:C ความหนาของฟิล์มเพชร ผลตอบสนองทางแสง ผลของความเข้มแสง และ ผลของอุณหภูมิ เป็นต้น

3.5.1 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษเกี่ยวกับความหนาของฟิล์มเพชรที่มีต่อประสิทธิภาพของฟิล์มเพชรอย่างไร โดยใช้ชิ้นงานที่มีความหนาของฟิล์มเพชรเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 μm และอัตราส่วนของ B:C เท่ากัน 1000 ppm มาทำการทดลอง ซึ่งจะใช้การต่อวงจรดังรูปที่ 3.9 และความเข้มแสงที่ให้นั้นจะมีค่า 11000 lux



รูปที่ 3.9 วงจรแสดงการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

3.5.2 ผลของความเข้มข้นของอัตราส่วน B:C ต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้ จะใช้เงื่อนไขการสร้างชิ้นงานความหนาของฟิล์มเพชรเท่ากับ $2\mu\text{m}$ อัตราส่วน B:C เป็น 1,10,100 และ 1000 ppm แต่ในการวัดผลการทดลองนั้น จะทำการวัดข้อมูลสองส่วน

1.จะเป็นการวัดคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะที่ยังไม่ได้รับแสง โดยการวัดผลนั้น เป็นการวัดเหมือนคุณสมบัติของไดโอดธรรมดาคือใช้เครื่อง Hp4061A (Semiconductor/Component Test system) ซึ่งควบคุมการ วัดข้อมูลด้วยโปรแกรม HPVE ในการวัดส่วนนี้นั้นจะนำไปใช้ในการหาค่าของกระแสรั่วไหลย้อนกลับ และ ใช้ในการหาค่าของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้

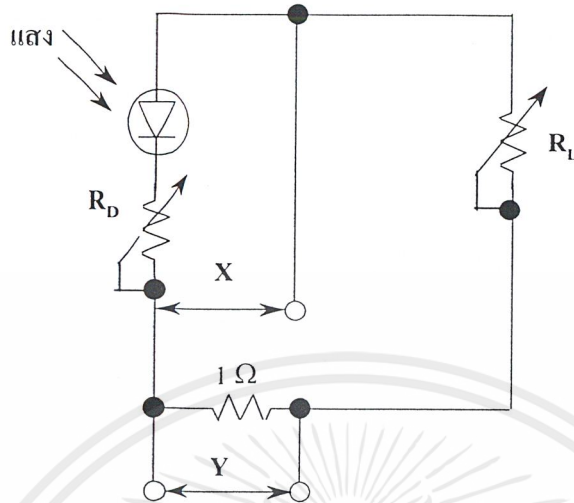
2.คือการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ได้รับแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากแสงอาทิตย์เทียม (Solar Simulator) ที่ความเข้มแสงที่ 11000 lux โดยเปลี่ยนวงจรในการวัดข้อมูลเป็นดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะใช้ X-Y recorder เป็นตัวบันทึกผล จากนั้นคำนวณหาค่าต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้

3.5.3 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาในหัวข้อนี้ จะทำการศึกษาว่าผลของความเข้มแสงนั้นจะมีผลต่อค่า กระแสลัดวงจร และ แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร รวมถึงค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะนำชิ้นงานจากการศึกษาในหัวข้อ 3.7.2 มาทำการศึกษา ซึ่งจะใช้การต่อวงจรดังรูปที่ 3.9 เช่นกัน และความเข้มแสงที่ใ้้นั้นจะมีค่าดังนี้คือ 1000,3000,5000,7000,9000 และ 11000 lux

3.5.4 การศึกษาผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยในการทดลองนี้ จะนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้มาต่อวงจรในการทดลองแบบใหม่ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 โดยสมมติว่าเซลล์ที่สร้างได้นั้นมีความต้านทานอนุกรมเป็นศูนย์โอห์ม และเพิ่มความต้านทานปรับค่าได้ (Decade Resistance Box : R_p) เข้าไปอีกหนึ่งตัวเพื่อเป็นตัวปรับค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่ามากขึ้น



รูปที่ 3.16 วงจรการวัดผลของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

3.5.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิว่ามีผลต่อค่าต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร เช่น กระแสลัดวงจร แรงดันเปิดวงจร ประสิทธิภาพของเซลล์ และ ค่าฟิล์กเตอร์ของเซลล์ โดยในการทดลองนั้นจะใช้ฟิล์มเพชรหนา $2 \mu\text{m}$ และอัตราส่วนของ B:C เท่ากับ 1 และ 1000 ppm โดยการทดลองนั้นจะทำการให้ความร้อนแก่ตัวเซลล์ด้วยฮีตเตอร์ การวัดอุณหภูมินั้นจะใช้ Heat Tracer ของบริษัท 3M รุ่น IR1600L3 ซึ่งในการทดลองนี้จะให้ความร้อนกับตัวเซลล์สี่ค่าคือ 50, 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งทำการฉายแสงที่มีความเข้ม 11000 lux จากไส้หลอดทั้งสแตนโดยวงจรที่ใช้ในการวัดนั้นคือวงจรในรูปที่ 2.15

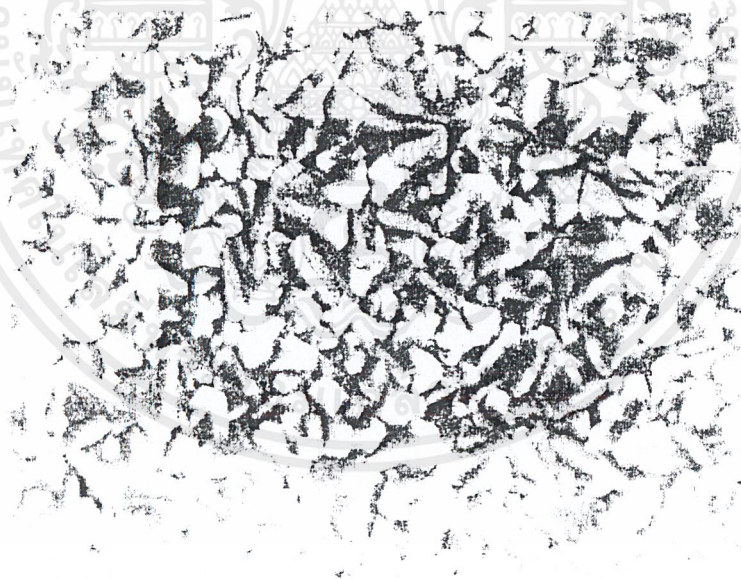
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากผ่านขั้นตอนต่างๆของการสร้างตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วนั้น ต่อไปจะเป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้ดังนี้

4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

การตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆที่สร้างได้นั้นจะใช้ SEM เพื่อแสดงพื้นผิวและระนาบของฟิล์มเพชร และ Raman Spectroscopy เพื่อแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นเพชร ที่สร้างขึ้นด้วยระบบ HFCVD ผลการตรวจสอบด้วย SEM นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้นมีระนาบ (111)

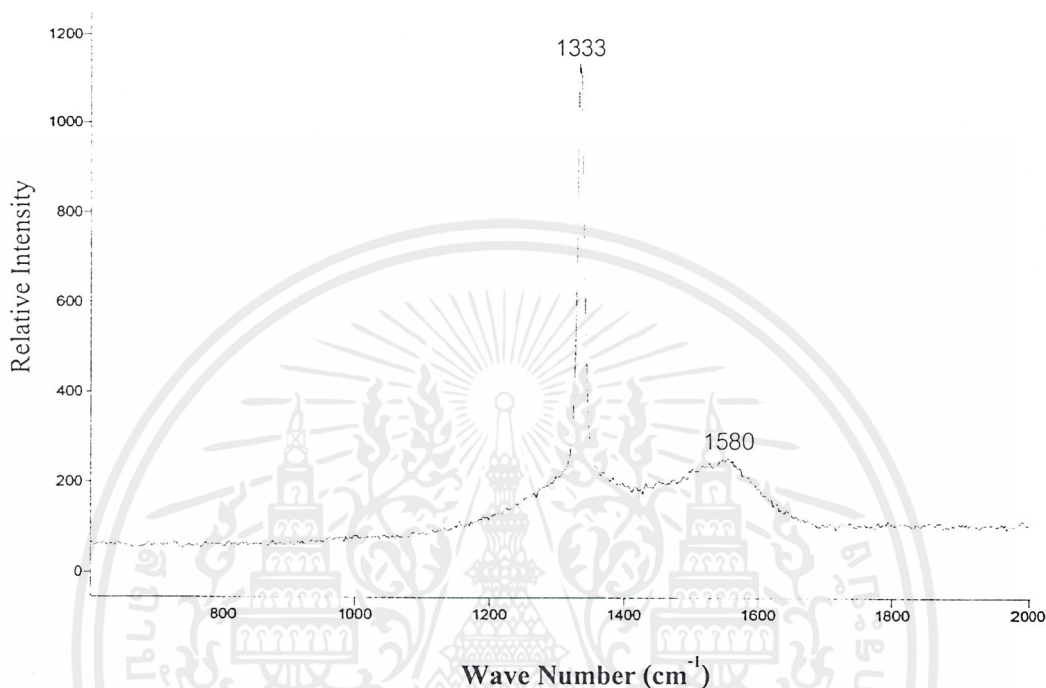


รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ(111)ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD

การตรวจสอบด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนค่ายอดสูงสุดของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างขึ้นนั้น จะมีค่าอยู่ที่ 1333 cm^{-1} ซึ่งมีค่ายอดสูงสุดใกล้เคียงกันเพชรในธรรมชาติมาก ซึ่งเพชรในธรรมชาติมีค่ายอดสูงสุดของ Raman spectrum อยู่ที่ 1332 cm^{-1} แม้ว่าจะมียอดของกราฟที่ 1580 cm^{-1} รวมอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียนไว้แล้ว มิฉะนั้นผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่จะเห็นได้ว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเพชร ดังนั้นจากการตรวจสอบทั้งหมดที่ได้นำเสนอมานี้เป็นเครื่องยืนยันได้อย่างชัดเจนว่าเพชรที่สร้างได้นั้นเป็นเพชรจริง



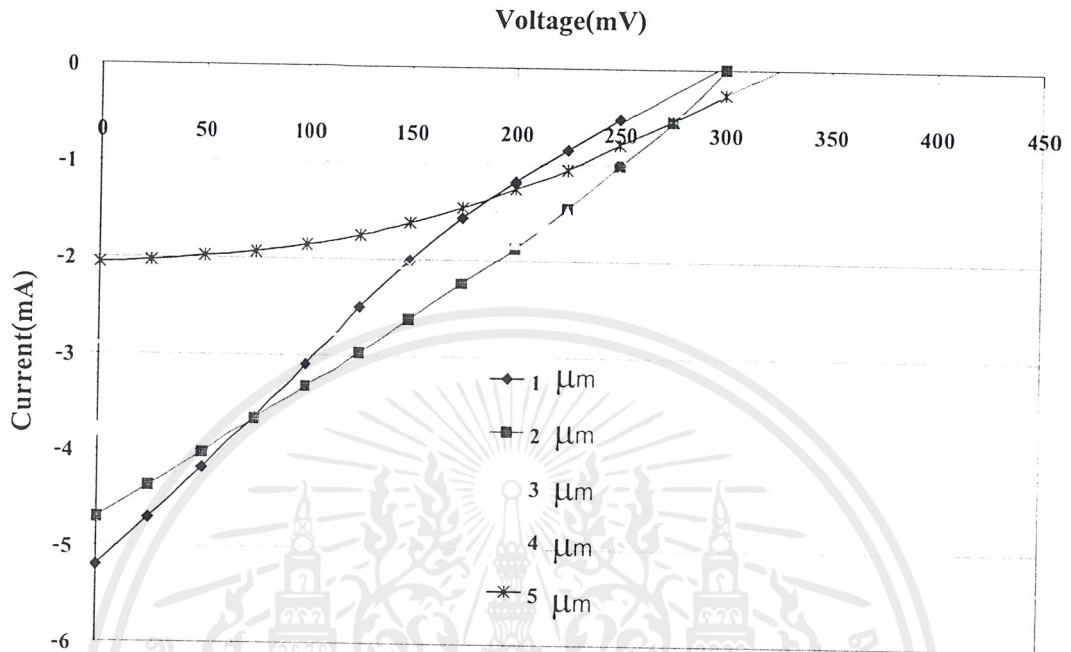
รูปที่ 4.2 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

4.2.1 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยในการทดลองนี้จะใช้อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm และเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 1 2 3 4 และ 5 μm และทำการทดลองโดยใช้ความเข้มแสง 11000 lux ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.3

จากการทดลอง พบว่าความหนาของฟิล์มเพชร ที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยที่มีอัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm เท่ากันนั้นจะอยู่ที่ 2 μm โดยลักษณะของคุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนา 1 μm นั้นจะมีลักษณะแตกต่างจากความหนาอื่นๆ นั้นเนื่องมาจากค่าของความต้านทานชั้น R_{Sh} นั้นมีค่าน้อย ซึ่งสาเหตุอาจจะเกิดจากการที่ใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชรน้อยซึ่งจะทำให้เกิดความบกพร่องของฟิล์มเพชรมีมาก

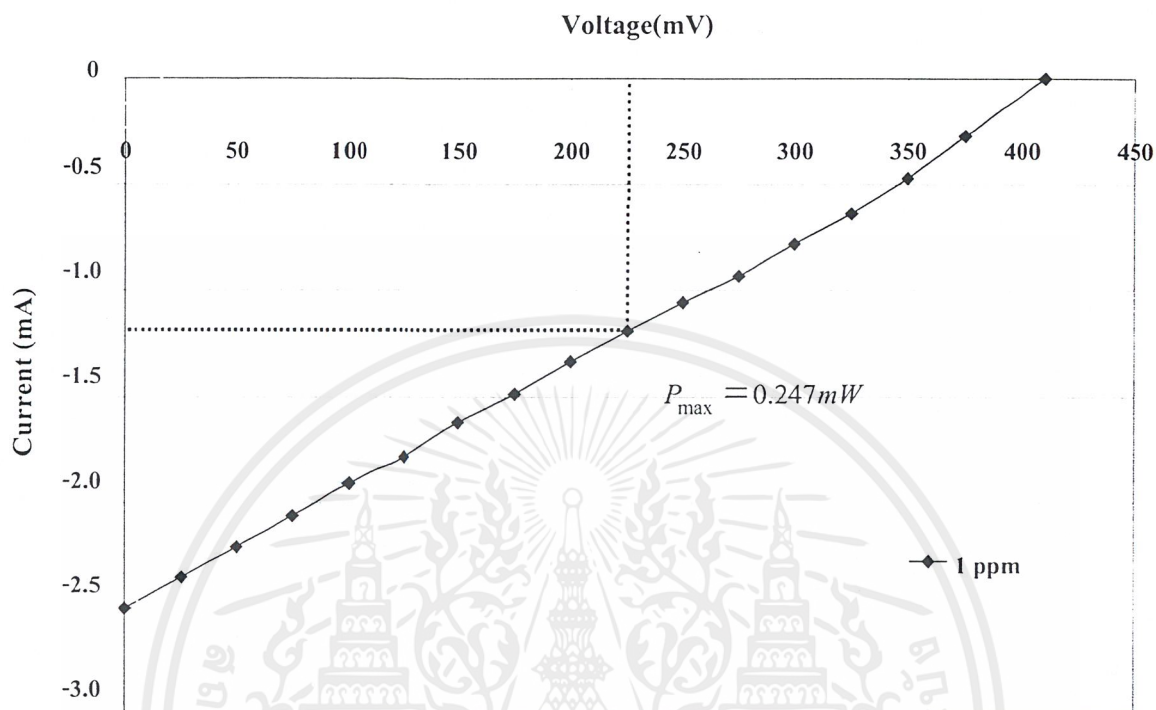


รูปที่ 4.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรค่าต่างๆ

ส่วนในกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่มีความหนา 3, 4 และ 5 μm นั้น ค่าของความต้านทานอนุกรมภายใน R_s มีค่าน้อยลง แต่กระแสที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยเนื่องจากปริมาณแสงที่ตกกระทบที่บริเวณรอยต่อมีค่าน้อยลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรหลายๆนั้นมีประสิทธิภาพต่ำลง

4.2.2 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการศึกษาในหัวข้อนี้ จะศึกษาว่าความเข้มข้นของอัตราส่วนของ B:C ว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไรบ้างรวมถึง แรงดันเปิดวงจร กระแสลัดวงจร และ ค่าฟิลแฟกเตอร์ ซึ่งผลการทดลองการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของ B:C ที่ 1, 10, 100 และ 1000 ppm โดยการทดลองนั้นจะใช้ฟิล์มเพชรที่มีความหนา 2 μm ส่วนแสงที่ใช้จะใช้แสงอาทิตย์เทียมจากเครื่อง solarsimulator ที่มีความเข้มแสงประมาณ 0.835 มิลลิวัตต์ต่อตารางมิลลิเมตรหรือที่ AM 1.5 โดยใช้วงจรการวัดเป็นดังรูปที่ 3.9 ซึ่งผลการทดลองนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.4-4.7

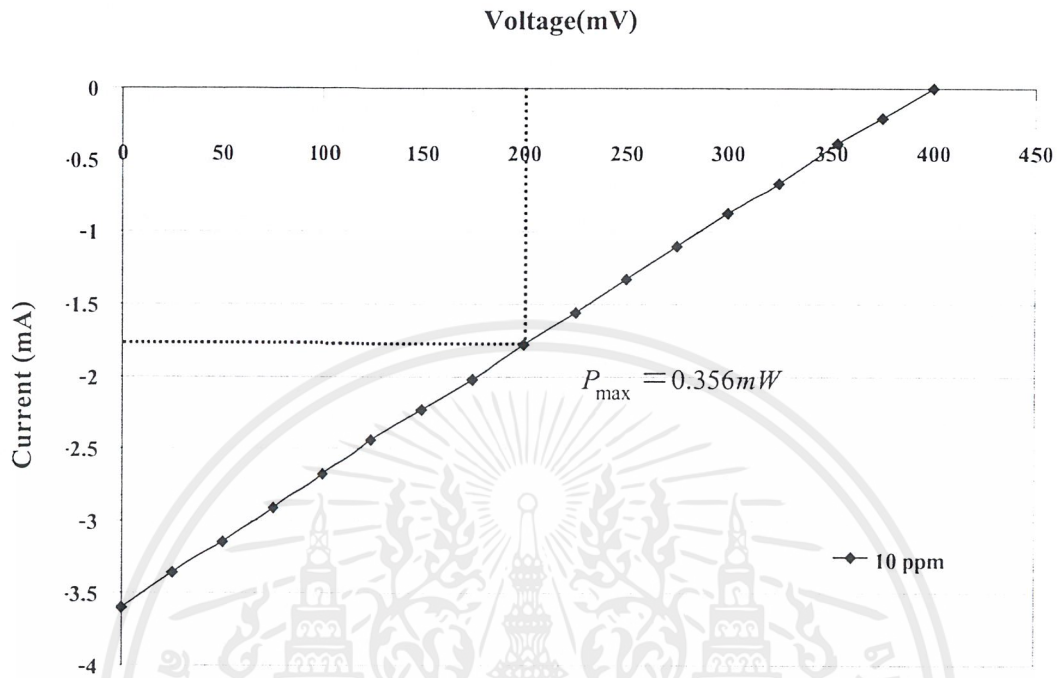


รูปที่ 4.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2 \mu\text{m}$

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2 \mu\text{m}$

กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	2.5
แรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} (mV)	410
พื้นที่รับแสงของเซลล์(mm^2)	3.4
พลังงานสูงสุด $= I_{\max} \times V_{\max}$ (mW)	0.24
ฟิลแฟกเตอร์ $FF = \left(\frac{I_{\max} \times V_{\max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \right)$	0.3
ประสิทธิภาพ $= \frac{I_{\max} \times V_{mac}}{P_{AM1.5}} \times 100$ (%)	8.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

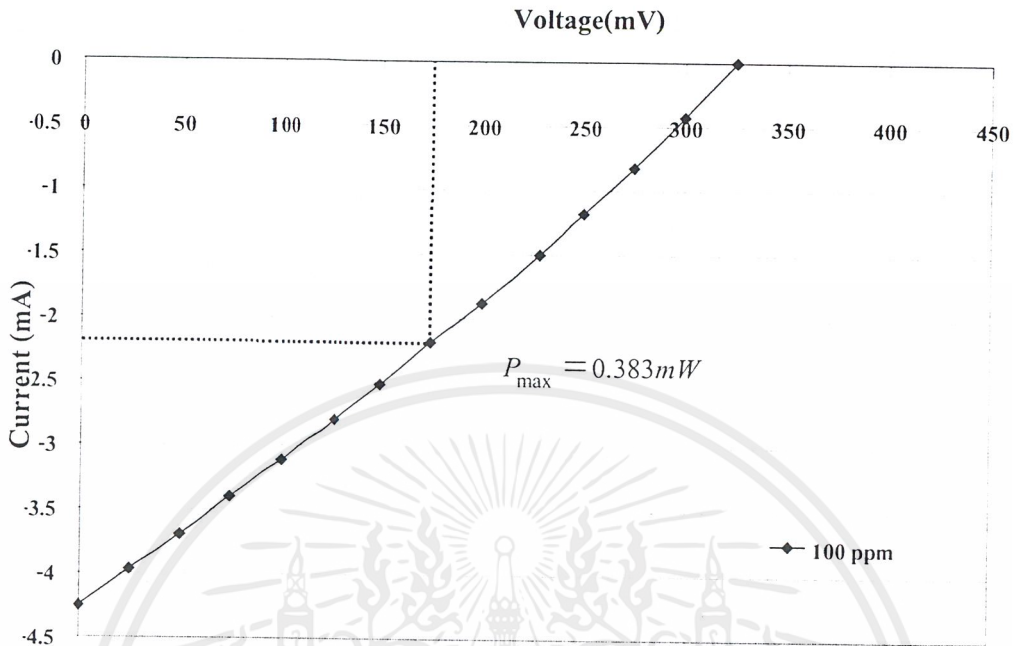


รูปที่ 4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 10 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 10 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	3.6
แรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} (mV)	400
พื้นที่รับแสงของเซลล์(mm^2)	3.4
พลังงานสูงสุด = $I_{max} \times V_{max}$ (mW)	0.33
ฟิลแฟคเตอร์ $FF = \left(\frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \right)$	0.285
ประสิทธิภาพ = $\frac{I_{max} \times V_{mac}}{P_{AM1.5}} \times 100 \%$	11.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

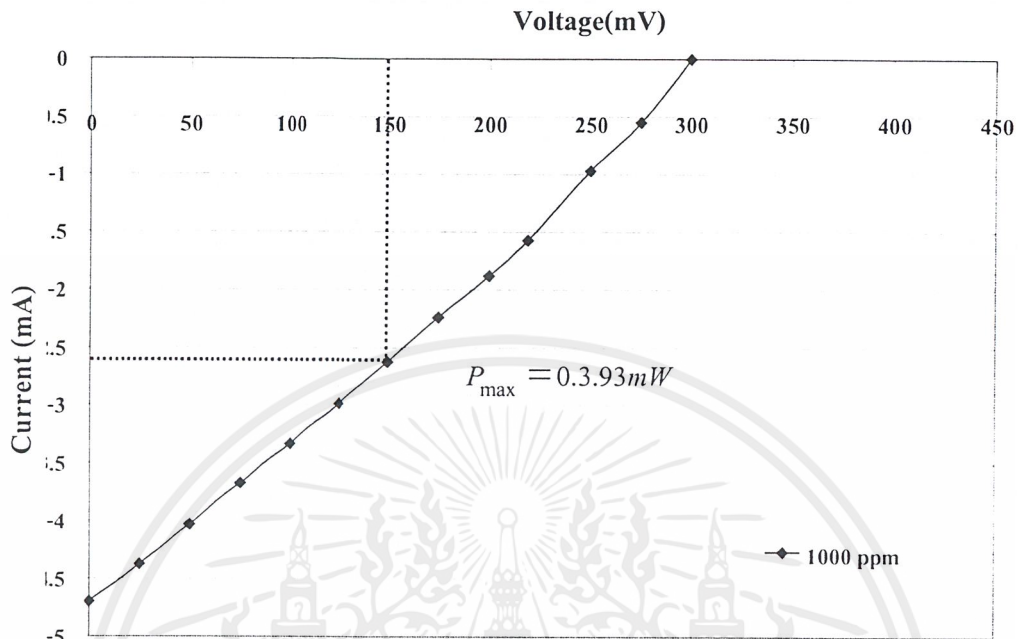


รูปที่ 4.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 100 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 100 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	4.25
แรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} (mV)	325
พื้นที่รับแสงของเซลล์(mm^2)	3.4
พลังงานสูงสุด $= I_{max} \times V_{max}$ (mW)	0.37
ฟิลแฟกเตอร์ $FF = \left(\frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \right)$	0.305
ประสิทธิภาพ $= \frac{I_{max} \times V_{mac}}{P_{AM1.5}} \times 100 \%$	13.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

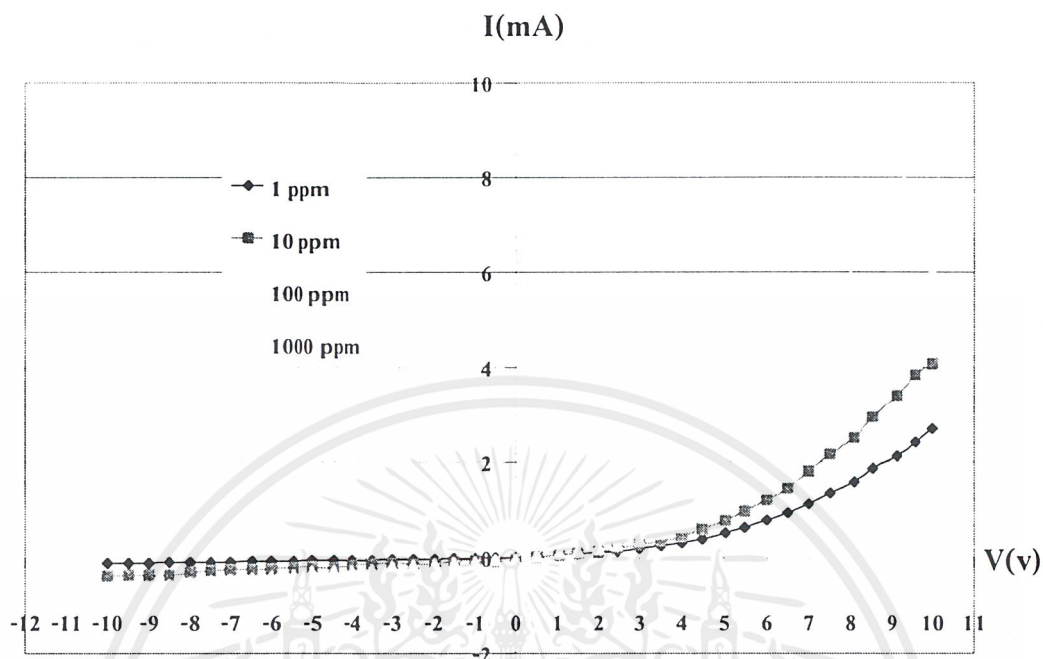


รูปที่ 4.7 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2 \mu m$

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2 \mu m$

กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	4.7
แรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} (mV)	300
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (mm^2)	3.4
พลังงานสูงสุด $= I_{max} \times V_{max}$ (mW)	0.393
ฟิลแฟคเตอร์ $FF = \left(\frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \right)$	0.278
ประสิทธิภาพ $= \frac{I_{max} \times V_{mac}}{P_{AM1.5}} \times 100 \%$	13.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ B:C เป็น 1, 10, 100 และ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

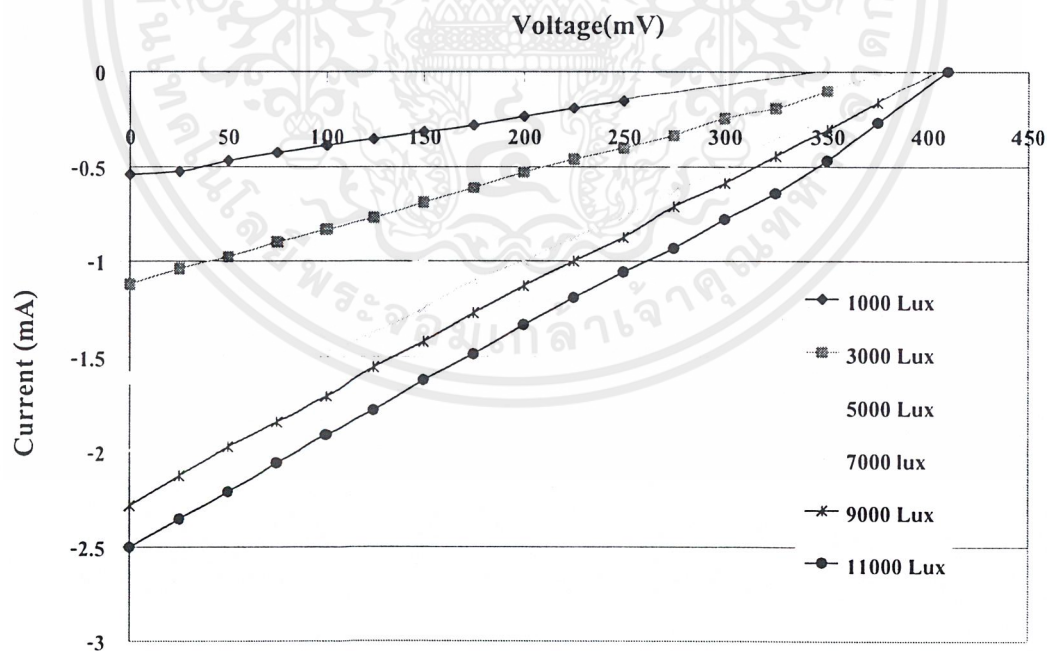
จากการทดลองผลของอัตราส่วนของ B:C ที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น จะได้ว่าที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm นั้นจะให้ประสิทธิภาพของเซลล์มากที่สุดคือที่ 13.8 % รองลงมาคือที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 100, 10 และ 1 ppm ซึ่งจะมีประสิทธิภาพ 13.03 % , 11.6% และ 8.7% ตามลำดับ ส่วนแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm จะมีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.41 V และที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 10, 100 และ 1000 จะมีค่าของแรงดันเปิดวงจรเท่ากับ 0.4, 0.325 และ 0.30 V ตามลำดับ ส่วนกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4.7 mA ส่วนรองลงมาคือ ที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 100, 10 และ 1 ppm ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.25, 3.6 และ 2.5 mA ตามลำดับ

ส่วนคุณสมบัติกระแสและแรงดันในสภาวะมีดั่งรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ B:C นั้น จะทำให้กระแสไฟฟ้าทางด้านไบแอสตรงนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่แรงดันที่ 10V เท่ากันนั้น กระแสจะไหลได้ 1.8mA, 3.5mA, 5.3mA และ 8.8 mA ที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1, 10, 100 และ 1000 ppm ตามลำดับ และในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับนั้น ที่อัตราส่วนของ B:C เพิ่มขึ้นนั้นจะได้ว่า กระแสรั่วไหลย้อนกลับก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

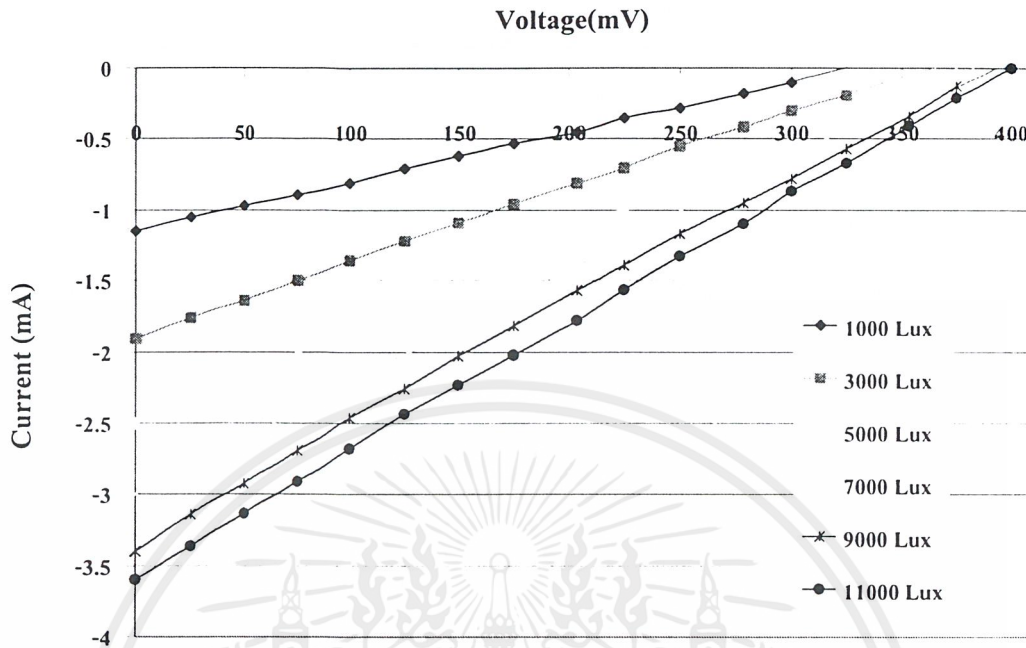
พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกรณีที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm มีค่ามากที่สุด เนื่องจากจากที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm นั้น มีกระแสรั่วไหลอิมตัวย้อนกลับน้อยที่สุดนั่นเอง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนั้น จะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้ารั่วไหลอิมตัวย้อนกลับ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสอิมตัวไหลย้อนกลับมีค่ามากขึ้นนั้น ค่าของแรงดันเอาต์พุตเปิดวงจรจะมีค่าลดลง กระแสอิมตัวไหลย้อนกลับของอัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm นั้น มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น ค่าของแรงดันเอาต์พุตเปิดวงจร ของอัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm จึงมีค่ามากที่สุด

4.2.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

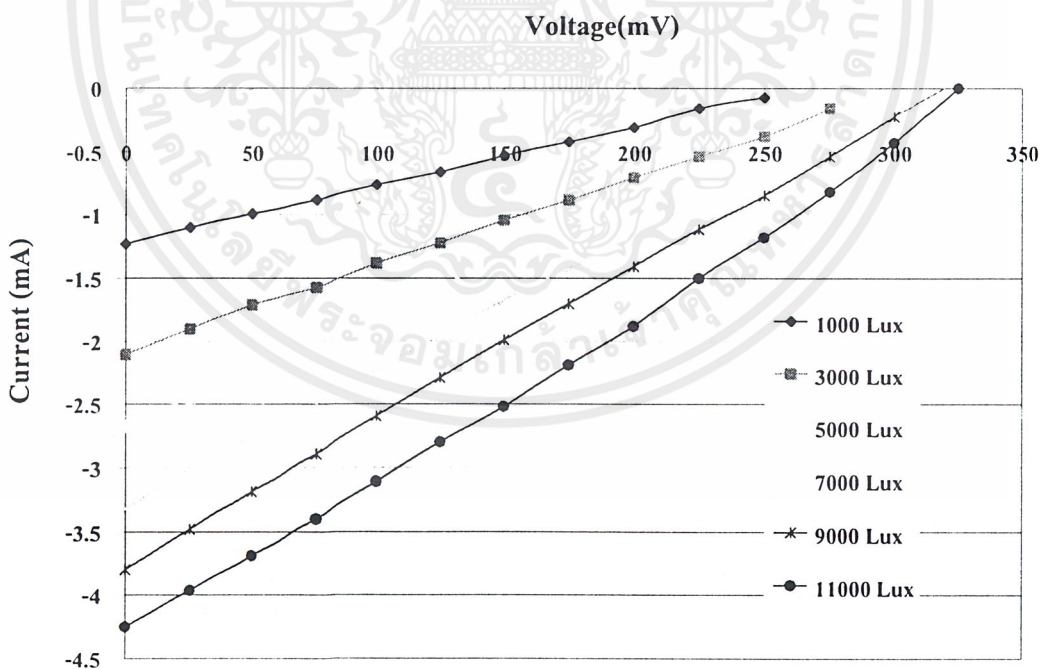
ในหัวข้อนี้ เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนของ B:C ว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อไปจะเป็นการศึกษาผลของความเข้มแสงว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้อัตราส่วนของ B:C ที่ 1, 10, 100 และ 1000 ppm โดยความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ $2 \mu\text{m}$ และแสงที่ใช้คือแสงอาทิตย์เทียม โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเป็น 1000, 3000, 5000, 7000, 9000 และ 11000 lux ผลการทดลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 - รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.9 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ $2 \mu\text{m}$

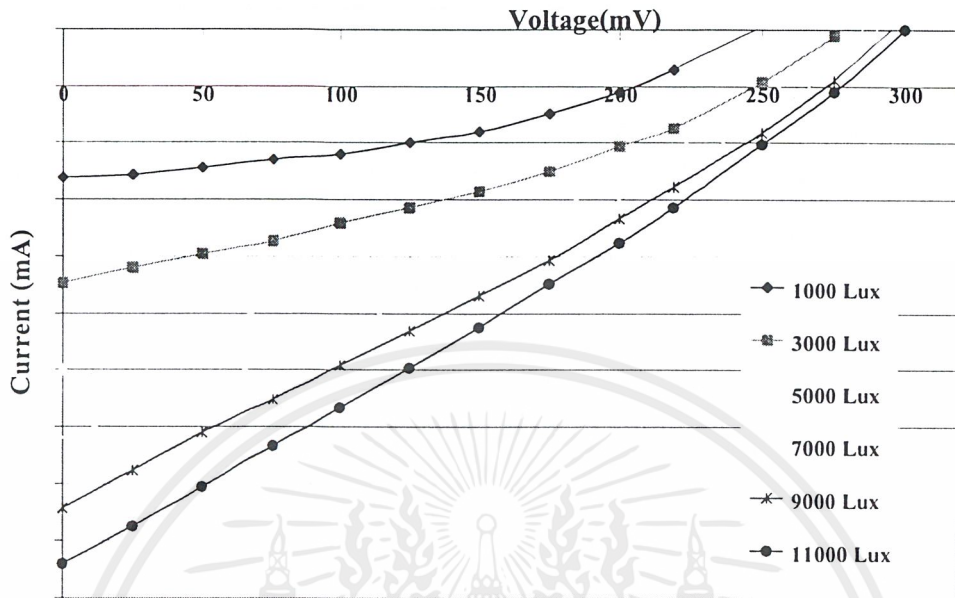


รูปที่ 4.10 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ $2 \mu\text{m}$

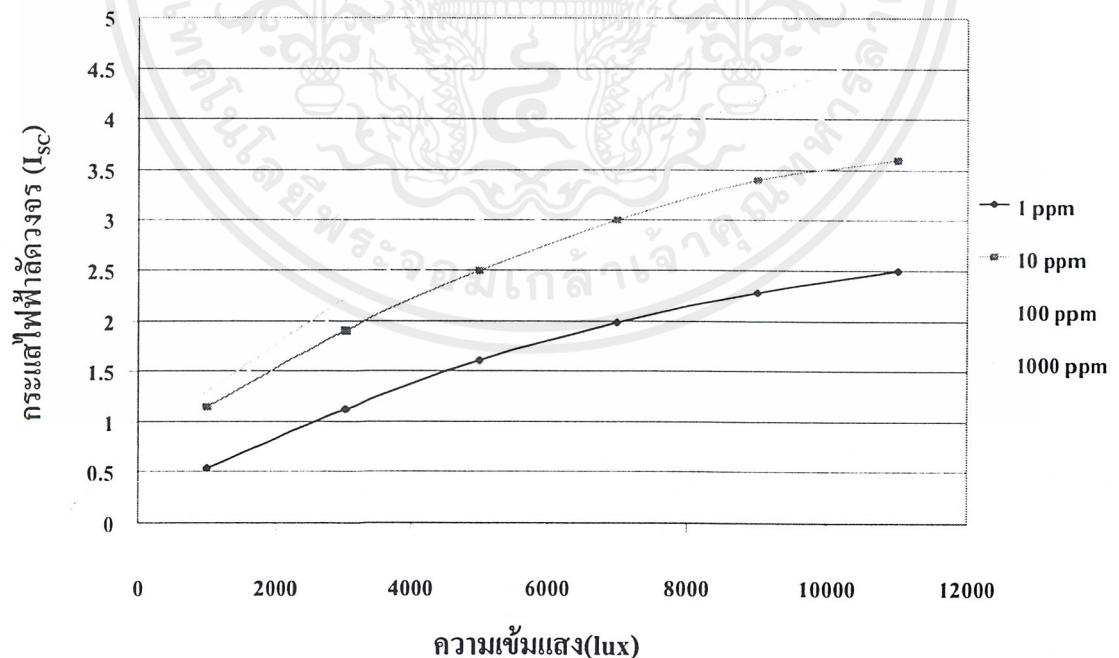


รูปที่ 4.11 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 100 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ $2 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

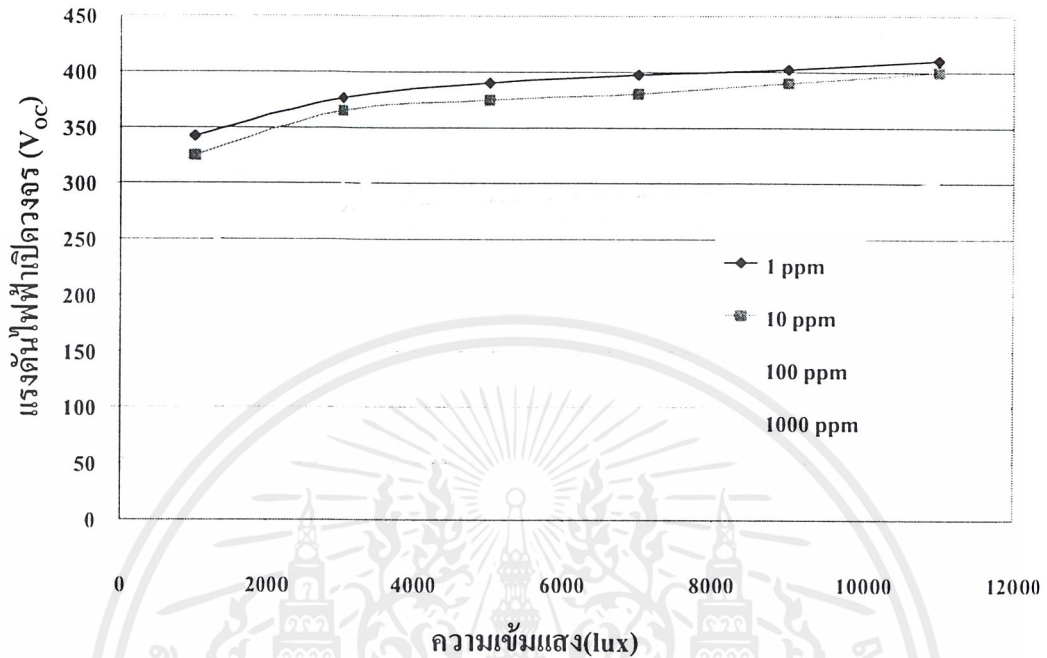


รูปที่ 4.12 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ $2 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.13 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

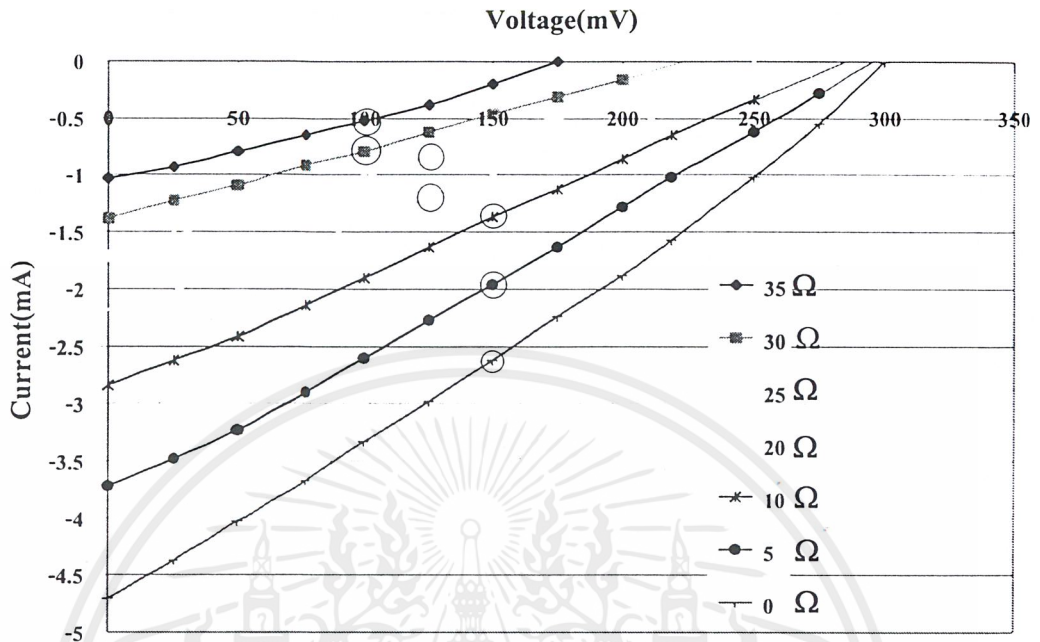


รูปที่ 4.14 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองที่ได้ในรูปนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นนั้นจะทำให้ค่าของกระแสลัดวงจรนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มแสงไม่มีผลต่อค่าของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมากนัก โดยค่าแรงดันเปิดวงจรนั้นจะเปลี่ยนตามความเข้มแสงในช่วงแรกเท่านั้น โดยเมื่อความเข้มแสงสูงกว่า 1000 lux แรงดันเปิดวงจรนั้นจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 จะสังเกตได้ว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นนั้นจะมีลักษณะการเปลี่ยนเป็นเชิงเส้นต่อความเข้ม ส่วนแรงดันเปิดวงจรนั้นจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงเป็นลักษณะของเอ็กซ์โพเนนเชียล

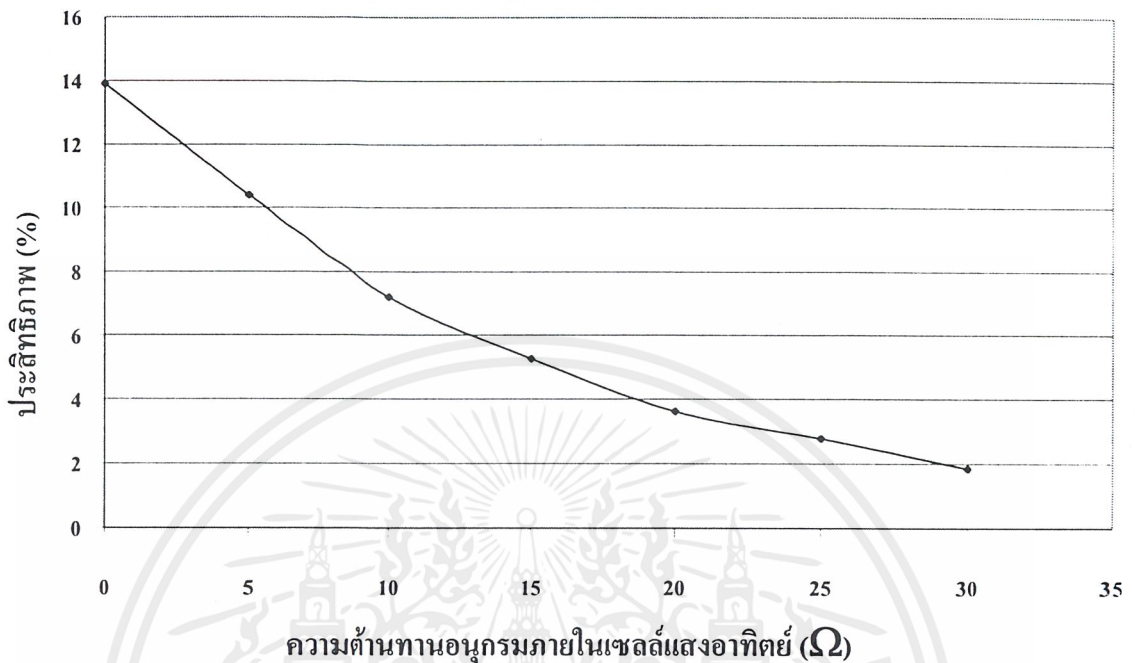
4.2.4 ผลการศึกษาความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้จะใช้เงื่อนไขของอัตราส่วน B:C คือ 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $2 \mu\text{m}$ โดยการทดลองจะต่อวงจร ตามรูปที่ 2.15 โดยผลการทดลองนั้นจะแสดงไว้ในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลของความต้านทานที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

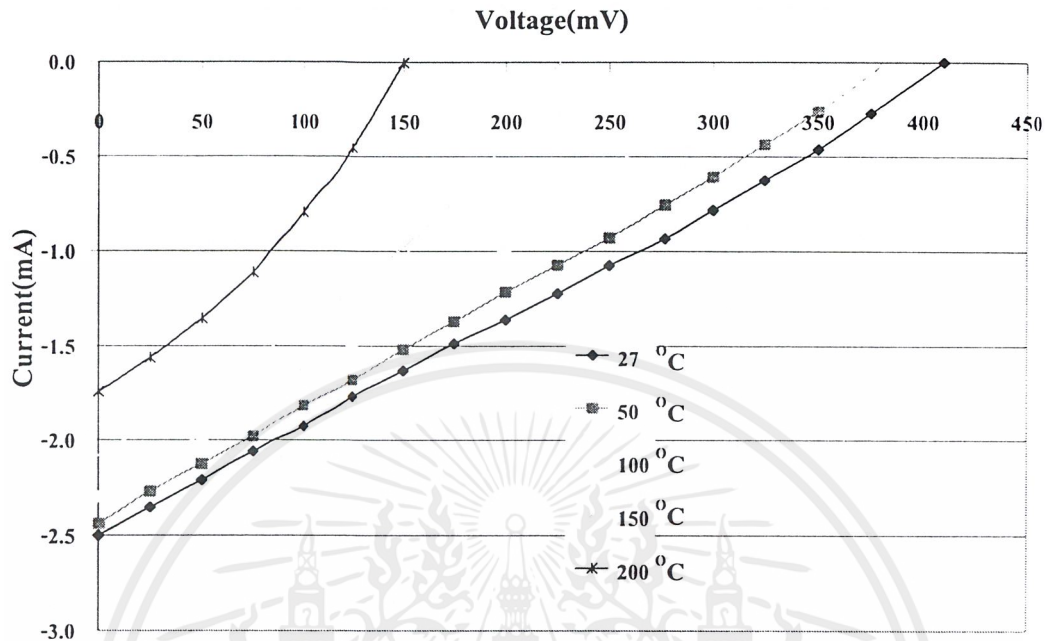
จากรูปที่ 4.15 นั้นจะเห็นได้ว่าถ้าค่าของความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้นนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยลง และจากรูปนั้นนำค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มาเขียนกราฟเทียบกับค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงได้ ในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อค่าของความต้านทานอนุกรมภายในมีค่ามากขึ้นนั้นจะทำให้พลังงานที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าลดลง ดังนั้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นควรจะทำให้ค่าของความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุด



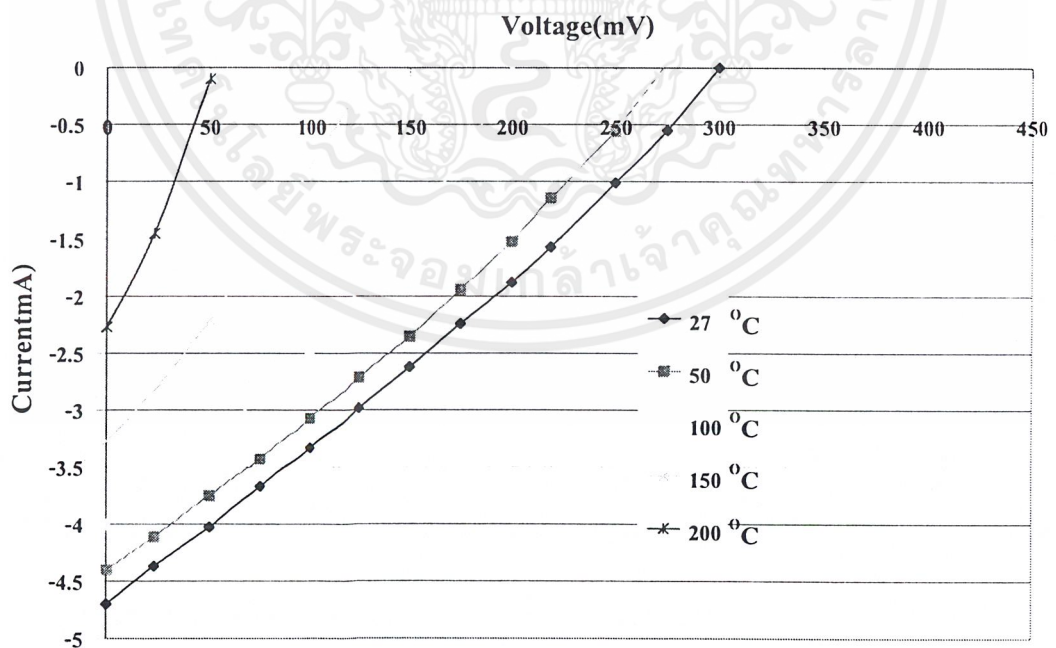
รูปที่ 4.16 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อประสิทธิภาพที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.2.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์นี้จะใช้เงื่อนไขการสร้างเซลล์ดังนี้คืออัตราส่วนของ B:C เป็น 1 และ 1000 ppm โดยฟิล์มเพชรมีความหนาประมาณ $2 \mu\text{m}$ ซึ่งผลการทดลองในกรณี B:C เท่ากับ 1 ppm แสดงในรูปที่ 4.16 และ ในกรณี 1000 ppm แสดงได้ในรูปที่ 4.18 โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นนั้นจะทำให้ค่าของ แรงดันเปิดวงจร และ กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำลง ซึ่งโดยปกติแล้วในเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้แรงดันเปิดวงจรลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบฟิล์มเพชรกับซิลิคอน ซึ่งทั้งนี้อาจจะเกิดจากลักษณะของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน



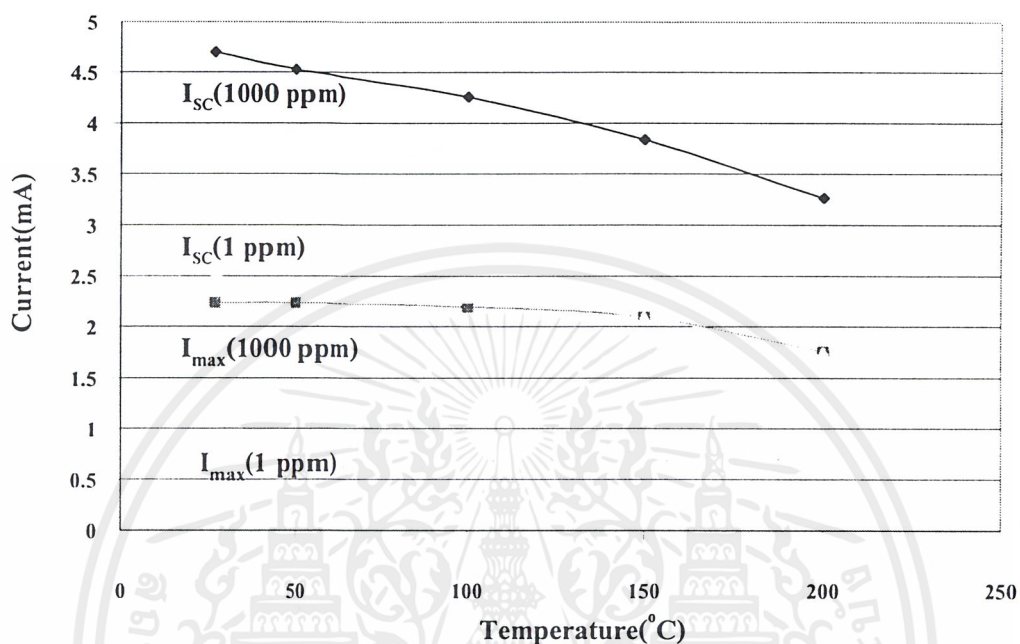
รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1 ppm



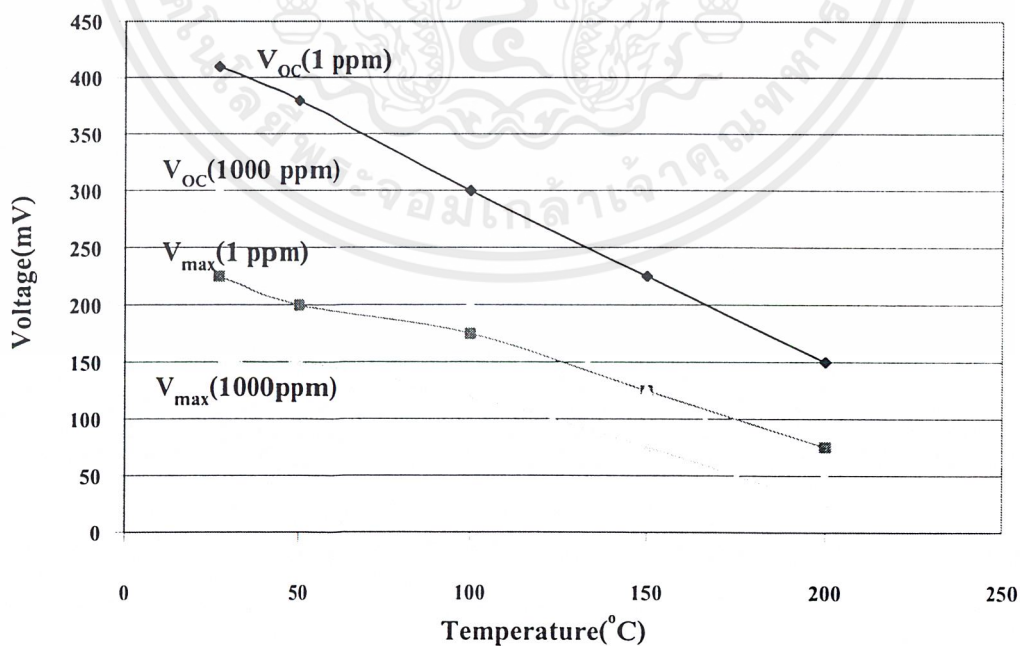
รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1000ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลที่ได้จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 มาเขียนกราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเปิดวงจร, กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และ พลังงานที่ได้จากเซลล์ได้ดังรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 ได้ดังนี้

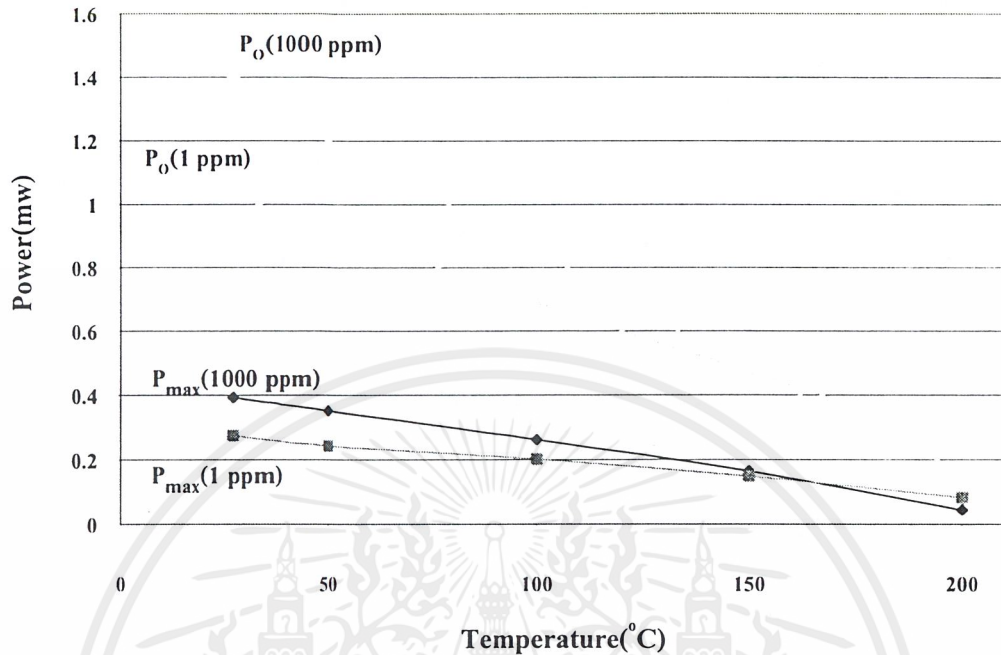


รูปที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.20 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.19, 4.20 และ รูปที่ 4.21 นั้น เมื่อนำผลการทดลองที่ได้นำมาเขียนค่าต่างๆที่เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิลง ได้ตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับซิลิคอน และ เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ซิลิคอน เนื่องมาจากอุณหภูมิ

	อัตราการเปลี่ยนแปลงต่อ 1 °C		
	1 ppm	1000 ppm	p-n Si [1]
ΔI_{SC} (mA)	▼ 0.0043	▼ 0.0083	▲ 0.08
ΔI_{max} (mA)	▼ 0.00006	▼ 0.0028	▲ 0.06
ΔV_{OC} (mV)	▼ 1.5	▼ 1.44	▼ 2.05
ΔV_{max} (mV)	▼ 0.87	▼ 0.72	▼ 2.05
ΔP_O (mW)	▼ 0.0083	▼ 0.038	▼ 0.175
ΔP_{max} (mW)	▼ 0.002	▼ 0.001	▼ 0.172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอนที่มีผู้ทดลองไว้แล้ว พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่ออุณหภูมิที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพี กับ ซิลิคอนชนิดเอ็น นั้นจะเปลี่ยนต่ออุณหภูมิน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากพี-เอ็น ซิลิคอน แสดงให้เห็นว่าในขณะที่อุณหภูมิมียิ่งเพิ่มขึ้นนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนเอ็นจะทำงานได้ดีและ มีความเสถียรมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก พี-เอ็น ซิลิคอน

ตารางที่ 4.6 ตารางฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้น

อุณหภูมิ(°C)	Fill Factor (F.F.)	
	1 ppm	1000 ppm
27	0.268	0.28
50	0.268	0.28
100	0.293	0.307
150	0.315	0.343
200	0.316	0.167

จากตารางค่าของฟิลแฟคเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.6 นั้นจะเห็นได้ว่าค่าของฟิลแฟคเตอร์ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมียิ่งขึ้นคือที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้นประมาณ 200 องศาเซลเซียส ค่าฟิลแฟคเตอร์จะลดลง แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิอาจจะมีส่วนช่วยให้ค่าของความต้านทานอนุกรมภายใน ที่มีค่ามากในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้นั้นมีค่าลดลงซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นรูปโค้งมากขึ้นเนื่องมาจากความร้อนนั้นจะทำให้ที่บริเวณที่เป็นฟิล์มเพชร นั้นมีค่าของความต้านทานลดลงเนื่องจากเกิดประจุพาหะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมียิ่งสูงขึ้นนั่นเอง ในขณะที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm นั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าของ ฟิลแฟคเตอร์ก็จะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน และอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในรายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์ม เพชรชนิดพีและซิลิกอนชนิดเอ็นซึ่งในการศึกษาส่วนแรกเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างฟิล์มเพชร ซึ่งการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพีถูกสังเคราะห์บนฐานรองชนิดเอ็นระนาบ(111)ด้วยวิธีการทางเคมีหรือ เรียกว่า CVD(Chemical Vapour Deposition) ซึ่งจากการศึกษาในส่วนนี้จะได้ว่าฟิล์มเพชรที่ สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ ซึ่งในการตรวจสอบระนาบและความหนาของ ฟิล์มเพชรซึ่งจากการทดลองได้ฟิล์มเพชรซึ่งมีผิวของระนาบเป็น(111) จากการตรวจสอบโดยใช้ SEM(Scanning Electromicroscopy) ในเพชรธรรมชาติมีค่ายอดคลื่นสูงสุดของ Raman Spectrum อยู่ ที่ 1332 cm^{-1} ซึ่งเพชรที่สังเคราะห์ได้มีค่ายอดคลื่นสูงสุดของ Raman Spectrum อยู่ที่ 1333 cm^{-1} แม้ว่าจะมียอดกราฟอยู่ที่ 1580 cm^{-1} รวมอยู่ด้วยแต่จะเห็นได้ว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเพชร ซึ่งยืนยันได้ว่าเพชรที่สร้างได้นั้นเป็นเพชรจริง หลังจากนั้นเป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของความเข้ม ชันของอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน B:C ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันของ เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้ฟิล์มที่มีความหนา $2\text{ }\mu\text{m}$ และความเข้มข้นของสารเจือB:Cที่ 1, 10, 100 และ 1,000ppm. ซึ่งจากผลการศึกษาจะพบว่าที่ความเข้มข้นสารเจือสูงขึ้นไปจะทำให้ปริมาณกระแส (Isc)มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับแต่ในทางตรงกันข้ามค่าของแรงดัน(Voc) จะมีค่าลดลงตามค่าความ เข้มของสารเจือซึ่งจากการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์(Pmax) ที่ค่า B:C สูงขึ้นไปทำให้ ได้ Pmax สูงขึ้น และสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าที่ค่าB:C ต่ำๆ นี้จะมีกระแสรั่วไหลย้อนกลับอ้อมตัว น้อยซึ่งในที่นี้ B:C เท่ากับ 1 ppm. ทำให้มีกระแสรั่วไหลย้อนกลับอ้อมตัวมีค่าน้อยที่สุดซึ่งทำให้ค่า ของ Voc มีค่ามากที่สุด เพราะค่าของVoc ขึ้นกับค่าของกระแสอ้อมตัวไหลย้อนกลับและผลของ ความเข้มแสงก็มีผลต่อค่าของ Voc และIscด้วยเช่นกันซึ่งที่ความเข้มแสงมากขึ้นทำให้ค่าของ Voc และ Iscมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะเห็นว่าค่าของIscจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น แต่แรงดันจะเพิ่มขึ้นแบบ เอ็กซ์โพเนนเชียล กับค่าความเข้มแสงรวมทั้งความหนาของฟิล์มเพชรก็มีผลต่อประสิทธิภาพของ เซลล์แสงอาทิตย์เช่นกันโดยที่ค่าความหนาของฟิล์มเพชรที่ $2\text{ }\mu\text{m}$ จะให้ประสิทธิภาพออกมาสูงสุด จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่ความหนา $1\text{ }\mu\text{m}$ จะมีลักษณะกราฟต่างไปจากตัวอื่นเนื่องมาจากผล ของ Rsh มีค่าต่ำมากนั่นเอง เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีจะต้องมีค่า Rsh สูงๆ แต่ที่ความหนามากขึ้นค่า ความต้านทานอนุกรมภายใน(Rs) มีค่าน้อยลงแต่กระแสที่เกิดขึ้นนั้นก็มิต่างกันเนื่องจากปริมาณ แสงที่ตกกระทบบริเวณรอยต่อ มีค่าน้อยทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มเพชรหลายๆ นั้นมีประสิทธิภาพต่ำลง ส่วนผลของค่าความต้านทานภายในจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน คือ ค่าความต้านทานภายใน(Rs) ต่ำทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น และในทางกลับกัน ถ้า ค่า ความต้านทานภายใน(Rs) มีค่ามากจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพต่ำ และในที่สุดท้ายเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีรอยต่อ P-N ของสารชนิดเดียวกันคือ Silicon ที่ค่าอุณหภูมิสูงจะทำให้ Voc ลดลงแต่ Isc เพิ่มขึ้นแต่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ P-Diamond/N-Silicon แล้วจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่า Voc และ Isc ลดลงทั้งคู่ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนที่ลดลงจะมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพที่ลดลงของรอยต่อ P-N ของ Silicon ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อ P-Diamon/N-Silicon จะทำงาน ได้ดีและมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด P-N Silicon ซึ่งจากการศึกษานี้จะได้ประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 13.8% ทั้งยังสามารถสร้างได้ง่ายและผ่านขั้นตอนไม่ยุ่งยาก จึงเหมาะต่อการนำไปพัฒนาต่อไปเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้ดีต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชัย วงเมตตา "การสร้างและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์และซิลิกอน" วิทยานิพนธ์สำหรับ
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2525
- [2] A.K. Ghosh, C. Fishman and T. Feng. "Theory of the Electrical and Photovoltaic Properties of
PolyCrysiline Silicon." ,J. Appl.Phy. 1980, pp. 407
- [3] Robert F.David. **Diamond Films and Coatings.** U.S.A. : Noyes Publications. 1993.
- [4] Lawrence S. Pan , Don R.Kania. **Diamond : Electronic Properties and Applications.**
Boston : Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [5] K.E. Spear, J.P. Dismuke. **Synthetic Diamond : Emering CVD Science and Technology.**
New York : ohn Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [6] "Diamond Films For Electric Packing", NASA, USA.
- [7] Teompong Pheukul " Study on Electrical Characteristics of p-Type Diamond/n-Type Silicon
Heterojunction Diodes," Dotoral Thesis.,Tokai University Kyushu Campus.
- [8] คูสิต เครื่องาม "สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และ การใช้งานต่าง เล่ม 1",
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] กอบศักดิ์ ศรีประภา "การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบความ
ร้อน" วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา2525
- [10] Alan L. Fehrenbruch , Richard H.Bube **Fundamentals of Solar cells.** Academic press 1983
pp. 333
- [11] คูสิต เครื่องาม "การงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกแบบ
ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน " ตุลาคม 2533
- [12] นิรุช ปิ่นเกตุ, สถาพร ปรัชเจริญนิษฐ์, ภควัต สรวายสุวรรณ, รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง "โฟโต
ไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิคอนชนิดเอ็น" การประ-
ชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39 วันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ 2544 หน้า 344