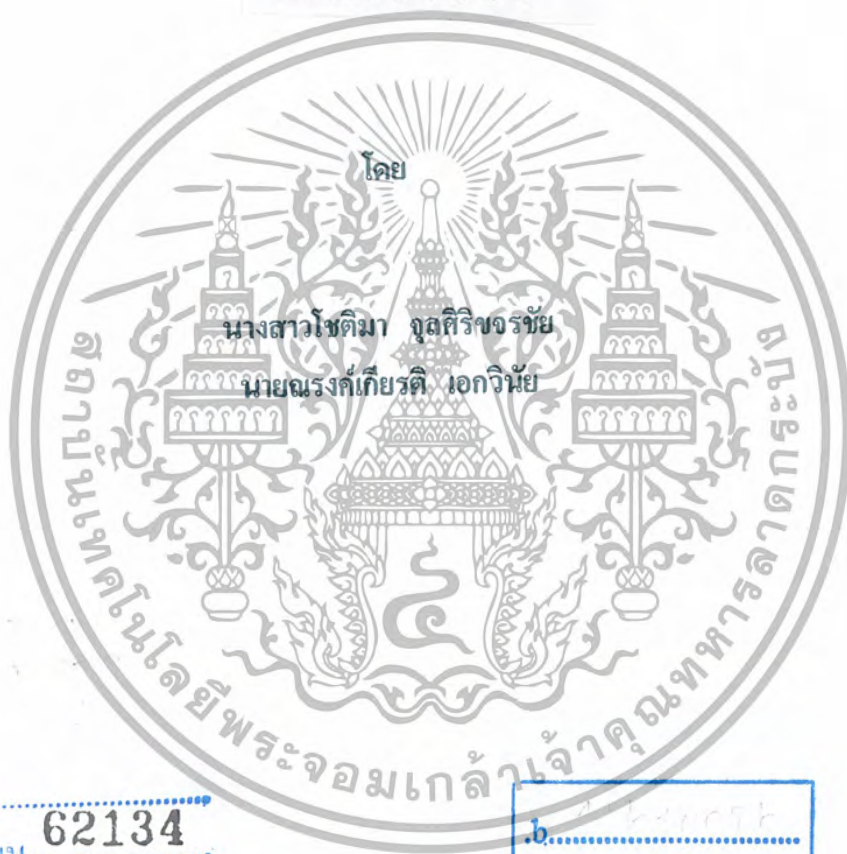
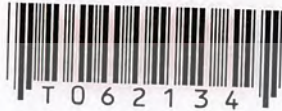


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของ
ฟิล์มบางเพชรและพอร์ซซิลิกอน

Studies and Fabrication of Diamond Thin Film and Porous Silicon
Heterojunction of Solar Cell



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**62134**
วัน,เดือน,ปี.....**31 ก.ค. 2549**

บ.....
เ.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของ
ฟิล์มบางเพชรและพอร์ซซิลิกอน

Studies and Fabrication of Diamond Thin Film and Porous Silicon
Heterojunction of Solar Cell



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานปีการศึกษา 2/2547

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพอร์
และพอร์สซิลิกอน

จัดทำโดย

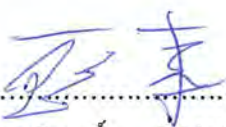
นางสาว โชติมา จุลศิริขจรชัย

รหัส 44010123

นาย ณรงค์เกียรติ เอกวินัย

รหัส 44010134




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชร
และพอร์ซซิลิกอน

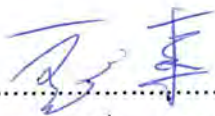
Studies and Fabrication of Diamond Thin Film and Porous Silicon
Heterojunction of Solar Cell

นางสาว โชติมา จุลศิริจรชัย 44010123

นาย ณรงค์เกียรติ เอกวินัย 44010134

โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมที่จะทำการสอบแล้ว




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน
ของฟิล์มบางเพชรและพอร์สซิลิกอน

นางสาวโชติมา จุลศิริจรชัย

นายณรงค์เกียรติ เอกวินัย

รศ.ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2/2547

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและพอร์สซิลิกอนชนิดพีในการศึกษาโฟโตไดโอดโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนเป็น 10000ppm, 30000ppm และ 50000ppm พบว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลออกมาเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง และยังพบว่าความเข้มขึ้นสารเจือฟอสฟอรัส 50000ppm จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลออกมามากที่สุด และจากการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า ค่าของ V_{oc} และ J_{sc} ที่มากที่สุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 0.39 V และ 1.382 mA/mm² ตามลำดับ โดยมีพื้นที่รับแสงเท่ากับ 3.4 mm² และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ค่าสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 13.94%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studies and Fabrication of Diamond Thin Film and Porous Silicon
Heterojunction of Solar Cell

Chotima Julsirikhajornchai

Narongkeat Eakvinai

Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang Advisor

2004

Abstract

In this thesis, the electrical properties of diamond thin film and porous silicon heterojunction of solar cell was studied. In photodiode electrical properties study, P/C ratio(10000ppm, 30000ppm and 50000ppm) were subsequently expedited, when intensity of light was increased the current was increased. The boron/carbon concentration ratio at 50000ppm made the highest current of photodiode. In solar cell electrical properties study, the maximum open-circuit voltage (V_{oc}) and the short-circuit current density (J_{sc}) of solar cell were 0.39V and 1.382mA/mm², respectively. Futhermore, the efficiency of this heterojunction solar cell was gained approximately 13.94%



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	1
1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	2
1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	2
1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน.....	2
1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	3
1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ.....	4
1.3 พอร์สซิลิกอน.....	5
1.4 สารกึ่งตัวนำเพชร.....	6
1.5 คุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	7
1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน.....	11
1.7 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	12
1.7.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy.....	13
1.7.2 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM).....	15

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 พอร์สซิลิกอน.....	16
2.1.1 โครงสร้างพอร์สซิลิกอน.....	16
2.1.2 ลักษณะของแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอน.....	17
2.2 กลไกการเกิดพอร์สซิลิกอน.....	20
2.3 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน.....	21
2.4 เทคนิคการสร้างพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี(anodization)	22
2.5 ลักษณะของแถบพลังงาน.....	23
2.5.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า.....	25
2.5.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ.....	27
2.6 โฟโตไดโอด.....	28
2.6.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด.....	29
2.6.2 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด.....	30
2.6.3 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	31
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์.....	32
2.7.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนั้ดในเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
2.7.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	39
2.7.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	39
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	43
3.1 กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	43
3.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น (Initia Cleaning).....	43
3.1.2 การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	44
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร.....	45
3.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD.....	45
3.2.2 กระบวนการทำความสะอาดฟิล์มเพชร.....	46
3.3 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์.....	48
3.4 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดรอยต่อแบบ n-Dia/p-Si.....	50
3.4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	50
3.4.2 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	50
3.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ P:C ต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อแบบ n-Dia/p-Si.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	52
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของพอร์สซิลิกอน.....	52
4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	53
4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	54
4.3.1 ผลของอัตราส่วนของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	54
4.3.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	58
4.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	61
4.4.1 ผลของความเข้มขึ้นของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์	3
รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร	6
รูปที่ 1.3 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD	11
รูปที่ 1.4 แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กัน	13
รูปที่ 1.5 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน	15
รูปที่ 2.1 แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์ซซิติกอน	16
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	17
รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองลักษณะ โครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆและทิศทางการเคลื่อนที่ ของพาหะภายใน	18
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์ซซิติกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน	19
รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกักเนื้อของผลึกซิลิกอน	20
รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน	22
รูปที่ 2.7 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ anodization	23
รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิติกอนขณะก่อนสัมผัส	24
รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิติกอนขณะสมดุลความร้อน	25
รูปที่ 2.10 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 1 ขณะได้รับไบอัสตรง	26
รูปที่ 2.11 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 2 ขณะได้รับไบอัสตรง	26
รูปที่ 2.12 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V < V_R$	27
รูปที่ 2.13 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V > V_R$	28
รูปที่ 2.14 ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด	28
รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดอิเล็กตรอนโฮลในแถบพลังงานของโฟโตไดโอด	29
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น	30
รูปที่ 2.17 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด	31
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้ม ของแสงอินฟราเรด และความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{oc} และความเข้มของ แสงอินฟราเรด	32
รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น	33
รูปที่ 2.20 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	37
รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
รูปที่ 2.23 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
รูปที่ 2.24 ผลของความความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	39
รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส,แรงดันและพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	42
รูปที่ 3.1 เครื่องมือสร้างชั้นพอร์ซลิคอน.....	44
รูปที่ 3.2 เครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD.....	45
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ HFCVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	47
รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์.....	49
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	51
รูปที่ 4.1 แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังการทดลอง โดยใช้ความหนาแน่นกระแส 15 mA/cm^2 ที่เวลาในการกัด 10 นาที.....	52
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบ %Reflection ระหว่างผลึกซิลิกอน และพอร์ซลิคอนหลังกัด ทางไฟฟ้าเคมี ความหนาแน่นกระแส 15 mA/cm^2 10 นาที ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ.....	53
รูปที่ 4.3 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น.....	53
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวระนาบ (111) ของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM.....	54
รูปที่ 4.5 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า P:C.....	55
รูปที่ 4.6 คุณลักษณะกึ่งต่อกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนค่า P:C.....	56
รูปที่ 4.7 วิธีการหาค่า R_s เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือโบรอน.....	57
รูปที่ 4.8 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอม สารเจือฟอสฟอรัสเป็น 10000ppm.....	58
รูปที่ 4.9 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอม สารเจือฟอสฟอรัสเป็น 30000ppm.....	59
รูปที่ 4.10 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอม สารเจือฟอสฟอรัสเป็น 5000ppm.....	59
รูปที่ 4.11 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน.....	60
รูปที่ 4.12 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 10000ppm.....	62
รูปที่ 4.13 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 30000ppm.....	63
รูปที่ 4.14 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 50000ppm.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดไฟให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงทันทีที่มีแสงมาตกกระทบ และกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นกระแสไฟฟ้าตรง เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่าสะอาด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมขณะใช้งาน เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานโดยใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งมีไม่จำกัดและในการติดตั้งแต่ละครั้งจะมีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี ประโยชน์ของเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ในยานอวกาศแล้วยังมีประโยชน์ต่อชุมชนเมือง และชนบทที่อยู่ห่างไกลที่จะติดต่อสื่อสารกับชุมชนเมือง รวมถึงเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องมือสื่อสารให้กับกลุ่มนักวิจัยที่ต้องเข้าไปทำงานในพื้นที่ทุรกันดารและพื้นที่ห่างไกลความเจริญต่างๆ

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกมีมากมายมหาศาล ร้อยละ 99.98 ของพลังงานที่โลกได้รับล้วนมาจากแสงอาทิตย์ ที่เหลือร้อยละ 0.02 ได้มาจากพลังงานใต้พิภพ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่เดินทางมาสู่โลกเรามีมากถึง 1.77×10^{11} KW ซึ่งมีมากกว่าพลังงานที่มนุษย์ต้องการ 8×10^7 KW ถึงกว่าล้านเท่า ดังนั้นถ้าเราใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราก็จะประหยัดพลังงานได้มาก รวมทั้งเป็นการรักษาสังแวดล้อมได้อีกด้วย ดังนั้นถ้าเราพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่าไร เราก็จะได้รับประโยชน์จากแสงอาทิตย์มากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับประเทศไทย บนพื้นที่ 1 ตารางเมตร เราได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ 1000 W หรือเฉลี่ย 4-5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน (kWh/m²/day) ซึ่งหมายความว่าในวันหนึ่งๆ บนพื้นที่เฉลี่ย 1 ตารางเมตรนั้น เราได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ 1 KW เป็นเวลานานถึง 4-5 ชั่วโมงนั่นเอง ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเท่ากับ 15% ก็แสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ 1 ตารางเมตร จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 150 W หรือเฉลี่ย 600-750 kWh/m²/day นั่นเอง

1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้คือ

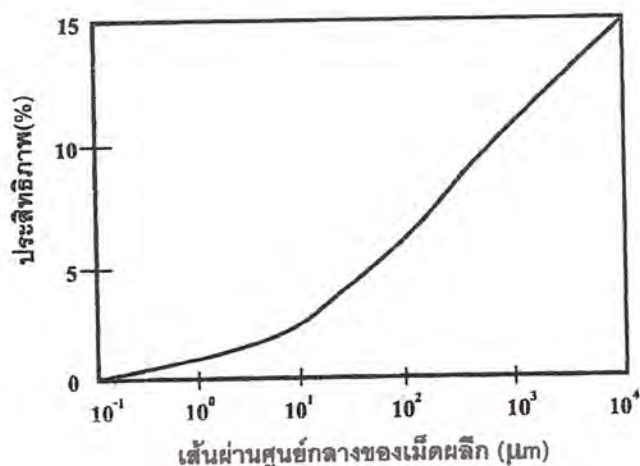
1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ปัจจุบันมีการผลิตใช้งานกันมากที่สุด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนนั้นทำมาจากซิลิกอนที่มีระนาบเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ความหนาของแผ่นซิลิกอนนั้นมีค่าน้อย ทำให้น้ำหนักเบาและเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงเค้น แม้จะมีความหนาเพียง $50\ \mu\text{m}$ ก็ยังคงสภาพเป็นแผ่นได้ดี เซลล์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอนและแบบอะมอร์ฟัส โดยที่ลักษณะสมบัติการผลิตพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานน้อยมาก อายุการใช้งานจนถึง 20 ปี ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้จะมีบ้างก็คือ เนื่องจากผลึกซิลิกอนมีช่องว่างแถบพลังงานชนิดไม่ตรง (indirect band gap) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย การผลิตจึงต้องผลิตให้หนาพอสมควร ซึ่งความหนาจะอยู่ประมาณ $100\ \mu\text{m}$ ขึ้นไป โดยที่การผลิตนั้นทำได้ง่าย ซึ่งใช้เทคโนโลยี VLSI ในการทำรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีความก้าวหน้าไปมากในปัจจุบัน โดยในทางทฤษฎีแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 44% แต่ในทางปฏิบัติจริงเซลล์ชนิดนี้จะมีการสูญเสียต่างๆ เกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าต่ำลง

1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิกอนที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิดปนอยู่ในระนาบเดียวกัน เช่น (111), (211) และ (330) เป็นต้น เมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างของสีของแต่ละระนาบอย่างชัดเจน อาณาเขตของผลึกเรียกว่า “เกรน” (grain) เทคโนโลยีปัจจุบันนี้สามารถโพลีซิลิกอนให้มีเกรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบไมครอนถึงหลายพันไมครอน ถ้าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์พาหะโฟโตที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อพี-เอ็น ออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรูปที่ 1.1 แสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้ก็คือจะมีพันธะของซิลิกอนที่มีแขนขาอยู่มาก ซึ่งไม่มีซิลิกอนอะตอมอื่นมาเกาะพันธะด้วย ซึ่งพันธะแขนขานี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสถานะจุดบกพร่อง (defect state) ซึ่งสถานะจุดบกพร่องนี้จะเป็นตัวคอยจับพาหะข้างน้อยจากแสงไม่ให้เดินทางออกสู่วงจรภายนอก และส่งผลทำให้เวลาอายุ (life time) ของพาหะข้างน้อยลดลง และที่ขอบของเกรนจะทำให้เกิดแถบพลังงานที่ขอบของเกรนเกิดขึ้นโค้งขึ้น

1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิล์มบาง ซึ่งสร้างมาจากอะมอร์ฟัสซิลิกอนซึ่งเป็นซิลิกอนที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบหรือเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมแต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึก แต่ในขณะที่การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอมนี้จะทำให้มีคุณสมบัติต่างๆ แปรผกออกไป เช่น ค่าคงที่ต่างๆ ทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอนก็คือ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200 - 300 องศาเซลเซียส โดยสามารถสร้างบนพื้นผิวฐานรองอะไรก็ได้ ราคาถูกและประหยัดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Carlson และ Wronski ต่อมา Dr.Hamakawa มหาวิทยาลัยโอซาก้า ได้ออกแบบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เป็นลักษณะของ (a-Si:H) p-i-n ซึ่งใช้กันอยู่ทุกวันนี้ ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ชนิดนี้มีค่าอยู่ประมาณสิบกว่าเปอร์เซ็นต์ 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 และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง เนื่องจากเป็นสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) ซึ่งสามารถทำเป็นแบบฟิล์มบางได้ โดยถ้าเทียบเป็นประสิทธิภาพที่ 15% จะต้องใช้ซิลิกอนที่มีความหนาถึง 100 μm ในขณะที่ใช้ GaAs จะใช้ความหนาเพียง 10 μm เซลล์ชนิดนี้จะมีต้นทุนต่อรังสีสูง และทำงานได้ดีในความเข้มสูงๆ คุณสมบัติเด่นอีกข้อหนึ่งก็คือสามารถสร้างเป็นหลายๆ ชั้นได้ จะทำให้สามารถมีศักยภาพในการดูดกลืนคลื่นแสงในลักษณะสเปกตรัมที่กว้างได้ดี

โดยที่กล่าวยกตัวอย่างชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์มาทั้ง 4 ชนิดนั้น สารแต่ละชนิดที่นำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่ำ คืออยู่ระหว่าง 0.4-3.4 eV ซึ่งช่องว่างแถบพลังงานนี้เองจะเป็นตัวกำหนด “แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร” V_{oc} ซึ่งถ้า E_g มีค่ามากกว่าค่าของ V_o ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย แต่ถ้า E_g มีค่าน้อยก็จะได้ V_{oc} น้อยเช่นกัน

ตัวกำหนดค่าของ V_{oc} นอกจากจะเป็นค่า E_g แล้วยังมีอีกอย่างหนึ่งก็คือ “กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอื่นตัวของไดโอด” 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 โดยที่อุณหภูมินี้จะมีผลอย่างมากกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารที่มีค่า E_g ต่ำๆ มาทำเพราะว่าอุณหภูมิจะทำให้ “กระแสไฟฟ้าลัดวงจร” (I_{sc}) สูงขึ้นแต่ไม่มากนัก แต่ค่าของ V_{oc} และค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (FF) จะมีค่าลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง

ซึ่งกล่าวโดยสรุปก็คือค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนนี้นี้คือ ค่าของ V_{oc} และ I_{sc} ต้องมีค่ามาก ส่วนค่าของ I_o จะต้องมิต่ำ น้อย โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงจนเกินไป ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงนั้นเราจะไปวิเคราะห์ในบทต่อไป

แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองที่ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ โดยเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่า $E_g = 5.5 \text{ eV}$ ซึ่งเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างมากถ้าเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ก็คือ เพชร โดยสังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน ซึ่งเมื่อเรานำเพชรมาสร้างเป็นเซลล์

แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้ค่าของ V_{oc} มีค่าสูงขึ้นและค่าของ I_0 มีค่าต่ำลงตามที่กล่าวมาแล้ว และสามารถใช้ในที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยเพชรยังสังเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

1.3 พอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนนั้นคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากผลึกซิลิกอนที่ถูกทำปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี (Electro-Chemical) กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จะทำให้นเนื้อผลึกซิลิกอนบางส่วนถูกละลายออกไป เหลือเนื้อซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ส่วนซิลิกอนที่อยู่ระหว่างรูพรุนจะมีลักษณะคล้ายแท่ง หรือเส้นซิลิกอน (Silicon wire) (ที่มีขนาดเล็กมาก เรามักเรียกผลึกซิลิกอนที่มีรูพรุนนี้ว่า “พอร์สซิลิกอน” (Porous silicon) แท่งเล็กๆในพอร์สซิลิกอนจะมีขนาดตั้งแต่ไม่กี่นาโนเมตร(3-5นาโนเมตร) จนถึงเกือบ 100 นาโนเมตร ซึ่งขึ้นกับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการสร้าง โดยทั่วไปแล้ว ส่วนมากการสร้างพอร์สซิลิกอน มักจะนิยมใช้กระบวนการที่ทำภายใต้การป้องกันกระแสแสงที่ในสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก (Anodization)

พอร์สซิลิกอนมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมากในปัจจุบัน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ได้รับการพัฒนาโดยมีพอร์สเป็นส่วนประกอบ ทำให้คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงดีขึ้น และ ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode : LED) ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วยคุณสมบัติของพอร์สซิลิกอน ที่สามารถเปล่งแสงได้แบบ Electroluminescence ดังนั้นการพัฒนาและศึกษากระบวนการสร้างพอร์สซิลิกอนจึงมีส่วนสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย

ชั้นของพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นนี้ ส่วนมากแล้วจะได้นมาจากแผ่นซิลิกอนที่ได้ผ่านกระบวนการ Electrochemical anodization ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นนี้จะประกอบไปด้วยชั้นของโครงสร้างเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรอยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สจะประกอบด้วย

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

โดยปกติแล้วนั้นผลึกซิลิกอนนั้นจะไม่ถูกกัดโดยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แต่เมื่อไรที่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้เข้าไปก็จะเกิดการกัดผิวด้านหน้าของผลึกซิลิกอน โดยเป็นผลมาจากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยไฮโดรจะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการกัด

ทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากในระหว่างกรัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนนี้จะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นที่

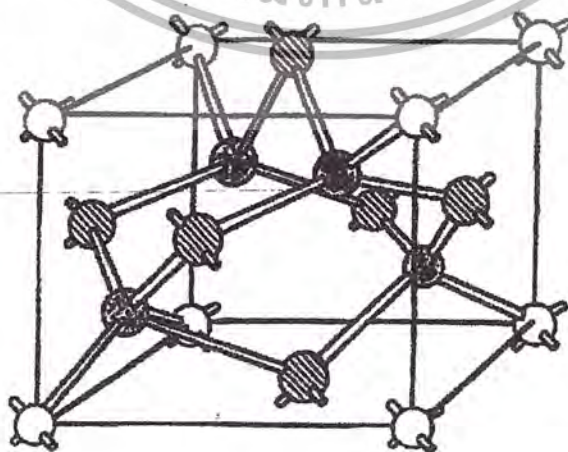
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นหลุมลึกเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิกอน โดยที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนเหล่านี้จะมีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงมาก ดังนั้นโฮลในผลึกซิลิกอนจึงถูกดึงมาอยู่ที่บริเวณนี้จำนวนมาก ทำให้ที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนเหล่านี้ถูกกักต้อไปอีกทำให้โครงสร้างภายในของพอร์สที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดของโครงสร้างเข้าสู่นาโนพอร์สซิลิกอนคือมีขนาดอยู่ประมาณ 5 นาโนเมตร ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการโฟโตลูมิเนสเซนส์ขึ้น โดยการโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ทางแสงของสารกึ่งตัวนำ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิกอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในชั้น conduction band ได้ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้อยู่ในสถานะไม่เสถียร จึงเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลในชั้น valance band โดยจะคายพลังงานออกมาในรูปโฟตอนหรือพลังงานแสง ซึ่งมีค่าพลังงานที่คายออกมานี้ขึ้นอยู่กับค่าช่องว่างแถบพลังงานของสาร โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงาน (E) กับความยาวคลื่นของแสง (λ) เป็นไปตามสมการ

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

จากสมการจะเห็นว่า ผลึกซิลิกอน โดยทั่วไปซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำประเภท indirect band gap ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.1 eV นั้นไม่สามารถที่จะให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ แต่สำหรับพอร์สซิลิกอน สามารถให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ เนื่องจากผลของการเกิด quantum size- effect หรือ quantum wire effect ภายในของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน ซึ่งมีโครงสร้างที่เล็กๆ มากมายนั้นมิผลทำให้ช่องว่างแถบพลังงานที่ความกว้างที่มากขึ้นกว่าเดิม

1.4 สารกึ่งตัวนำเพชร



รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพชรนั้นจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอน ซึ่งอยู่ในหมู่ 4 โดยอะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “Diamond structure” ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2

จากรูปพบว่าภายในยูนิตเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง $1/4$ เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิตเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆ ตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้ อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ $\{111\}$ 2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 1.3 แสดงให้เห็นระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นสายจุดและระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นสายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ $\{111\}$ การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพอร์มีค่าคงที่แลตทิซเป็น $3.567 \text{ \AA}$ และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ $1.54 \text{ \AA}$ 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}

1.5 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชร

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของเพชรได้เป็น 3 คุณสมบัติใหญ่ๆ คือ คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

1.5.1 คุณสมบัติทางกล

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

- **Thermal conductivity** เพชรมีค่า Thermal conductivity สูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมด คือมีค่าถึง $20 \text{ watts/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ ข้อมูลแสดงการเปรียบเทียบอยู่ใน ภาคผนวก(ตารางที่1)

- **Molar heat capacity** ค่า Molar heat capacity หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา จาก

ภาคผนวก(ตารางที่2) แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity ระหว่างเพชรกับวัสดุชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นๆ จะพบว่าค่าของเพอร์มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ นั้นหมายความว่า เพอร์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีเท่าๆ กับ Heat sink

- **Thermal expansion** คือค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ แพร่ไปถึงเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 0°C ค่า Thermal expansion นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity สำหรับของแข็งค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่ามากกว่าเชิงเส้นประมาณ 3 เท่า สำหรับค่า Thermal expansion ของเพอร์และวัสดุอื่นๆถูกเปรียบเทียบไว้ใน ภาคผนวก(ตารางที่ 3)

- **Hardness** เพอร์เป็นสารที่มีความแข็งสูงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหมดที่เรารู้จัก โดยจะมีค่าความแข็งสูงถึง $5,700\text{-}10,400\text{ kg/mm}^2$ อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามสร้างสารประกอบ C_3N_4 (Carbon Nitride) เชื่อกันว่าเป็นสารที่มีความแข็งมากกว่าเพอร์ สำหรับตารางการเปรียบเทียบค่าความแข็งของเพอร์กับวัสดุอื่นๆ จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก(ตารางที่4)

1.5.2 คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพอร์ส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาค่าดัชนีหักเหและการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ และความยาวคลื่นที่กำหนด

1.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพอร์ในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพอร์ธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^{15} ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800\text{ cm}^2/\text{V.s}$ ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่า $2,000\text{ cm}^2/\text{V.s}$ แต่ในเพอร์ที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ 500°C พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง $850\text{ cm}^2/\text{V.s}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเจอร์มาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนในวัสดุอื่นๆ จะมีค่าความเร็วโฮลอิมิต์และ Dielectric strength ค่า ที่ความแรงสนามไฟฟ้า 10^4 V/cm ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนและโฮลเริ่มมีการอิมิต์สำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่ 10^7 cm/s และในกรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ $2.0 \times 10^7\text{ cm/s}$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพอร์ในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16}\text{ }\Omega\text{.cm}$

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพอร์ให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวทั้งนี้เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดพิษเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลงเกิด Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ

100 ppm หรือ 10^{19} cm^{-3} พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ $370 \times 10^{-3}\text{ eV}$ และสำหรับฟิล์มเพอร์ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ $2 \times 10^{-3} \text{ eV}$

สำหรับกรณีของสารเจือผู้ให้ หากพิจารณาในโครเจนพบว่าไม่สามารถใช้อะตอมสารเจือผู้ให้ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นของโนโครเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำ คือมีค่าเพียง 1.57 eV เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow level ขึ้น อีกทั้งอะตอมของโนโครเจนยังทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอนการคำนวณจากทฤษฎีทำนายว่าฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ Okano et al. รายงานในปี ค.ศ. 1990 ว่าได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขึ้นมา โดยใช้ไอระเหยของสารละลาย P_2O_5 ในเมทานอลซึ่งถูกเจือจางด้วยอะซิโตน ค่าความหนาแน่นประจุพาหะวัดได้ 10^{15} cm^{-3} และความคล่องตัวของอิเล็กตรอน $50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ยัง ไม่มีความแน่นอน และอะตอมฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้วมีผลทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไปดังนั้นลิเทียมจึงเป็นสารที่ได้รับความนิยมและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพชรที่ทำการได้ปรีเตรียมด้วยวิธี Ion-implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มชนิดเอ็นแต่ในการได้รูปแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการเนื่องจากเกิดการชดเชยด้วยความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบสถานะต้องห้ามตลอดจนลิเทียมในเพชรมีการกระจายตัวสูงอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องซึ่งทำให้การได้ไป ไม่มีความแน่นอน

1.5.3 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวนิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตาราง 1.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

ตาราง 1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ

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

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า

1. เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนต์มาก จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆ ซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนต์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น (โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ
2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง
3. ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการโดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

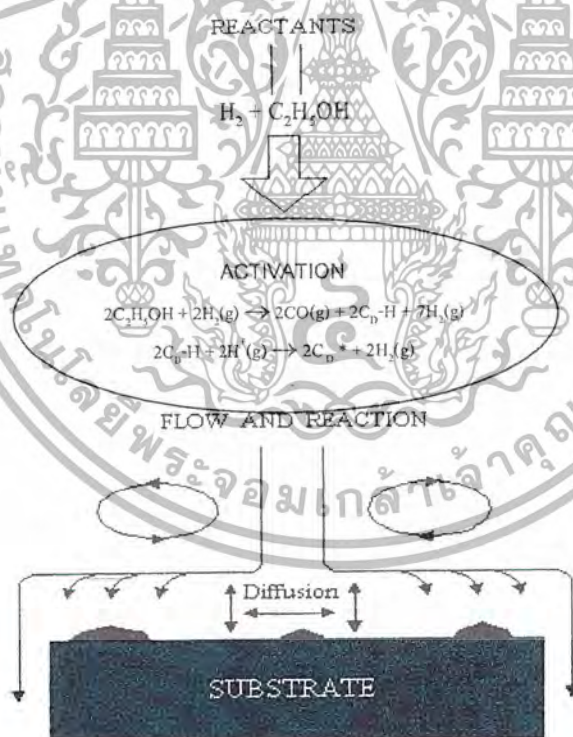
จากคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเพชรที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนต์ ดังนั้นในโครงการนี้จึงศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการ CVD แบบความร้อน (Thermal Chemical Vapor Deposition) โดยเทคนิค Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD)

1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน

ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้ดังนี้

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

การสร้างฟิล์มเพชรที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (Hot Filament CVD) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ความดันต่ำหรือความดันบรรยากาศ และเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน และที่สำคัญคือ ต้นทุนในการสร้างต่ำ โดยจะมีหลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งในที่นี้มีเอทิล-แอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เป็นไอระเหยที่มีอนุภาคของคาร์บอน



รูปที่ 1.3 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี HFCVD

หลักการพื้นฐานของระบบ CVD แบบความร้อนนั้นจะต้องมีกลไกพื้นฐานดังนี้

- ในระบบต้องมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

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

- ในระบบต้องกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคมูลฐานคาร์บอน

ในบริเวณที่มีการกระตุ้น (Activation) ก๊าซทั้งสองชนิด สำหรับวิธี CVD แบบ hot-filament จะอาศัยความร้อนจากอุณหภูมิประมาณ 2000 องศาเซลเซียส ของขดลวดความร้อนทั้งสแตน เป็นผลให้โมเลกุลของก๊าซทั้งสองเกิดการแตกตัวเป็นคาร์บอนอะตอม และไฮโดรเจนอะตอม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่านจากบริเวณกระตุ้นไปยังฐานรอง โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงเป่าก๊าซไหล

- ในระบบต้องมีอุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรนี้ อุณหภูมิมีความสำคัญอย่างมากต่อการก่อตัวและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนให้อยู่ในโครงสร้างเพชร รวมทั้งระนาบของฟิล์มเพชรที่จะเกิดขึ้นด้วย Spitsyn et al. เสนอผลการทดลองไว้ว่า อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสมทำให้เกิดเป็นเพชรได้ ในช่วงตั้งแต่ 500 - 1200 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับวิธีการใช้ และนอกจากนี้อุณหภูมิของฐานรองยังมีผลต่อการเกิดระนาบของฟิล์มเพชรด้วย

- ในระบบต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแต่ละครั้งพบว่า การเลือกใช้ฐานรองที่จะนำมาสร้างมีส่วนสำคัญมากเช่นกัน เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวของฐานรองมีผลต่อลักษณะการก่อตัวของเพชรได้แก่ ความหนาแน่นและอัตราการนิวเคลียสขึ้น เป็นต้น กระบวนการเตรียมพื้นผิวมีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังรวมไปถึงฐานรองที่ใช้

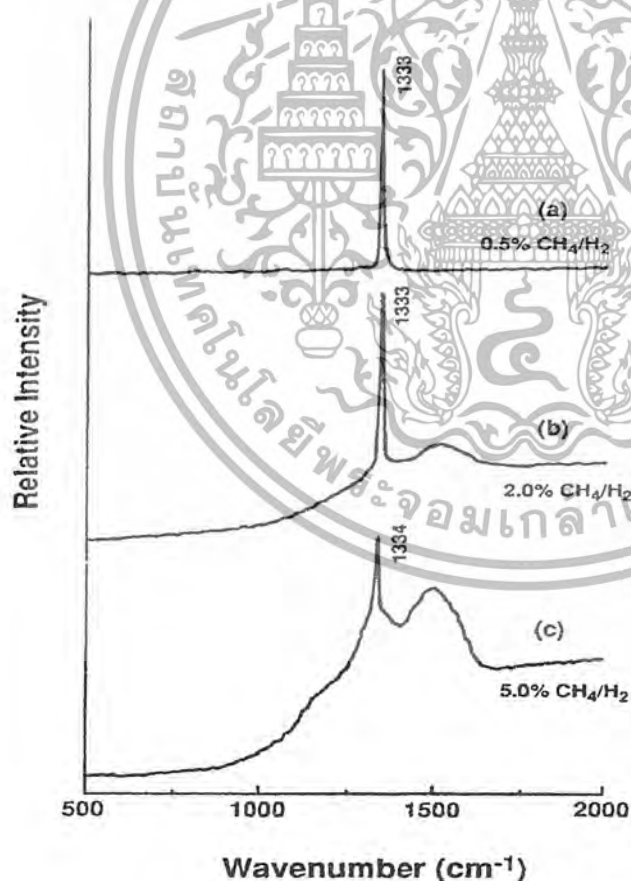
1.7 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

Raman Spectroscopy เป็นวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสง โดยทำการวัดการลดลงของความเข้มลำแสงที่ผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืน (non-absorbing medium) ผลของ Raman นี้จะเป็นการกระเจิงในระดับโมเลกุล นั่นคือการกระเจิงของแสงนี้เกิดขึ้นจากโฟตอนของลำแสงกับการสั่นภายในแลตทิซหรือโฟนอน ดังนั้น Raman Spectroscopy จึงเป็นวิธีที่นิยมนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ Raman สูง ดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่างๆ ของโครงสร้างคาร์บอนได้ เช่น เพชร กราไฟต์ และคาร์บอนอะมอร์ฟัส เป็นต้น โดยที่ค่าสเปกตรัมของเพชรธรรมชาติมีอยู่อยู่ที่ 1332 cm^{-1} ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นเพชรที่ใกล้เคียงธรรมชาติ และบริสุทธิ์มาก แต่ยังมีปริมาณกราไฟต์และคาร์บอนอะมอร์ฟัสปะปนอยู่บ้าง ข้อดีสำคัญที่สุดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วย Raman Spectroscopy นี้ คือ เป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงานหรือฟิล์มเพชรที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อไปได้



รูปที่ 1.4 แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างกัน

(a) 0.5% CH_4/H_2 (b) 2% CH_4/H_2 (c) 5% CH_4/H_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูป 1.7a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่นๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 1.4b พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ 1500 cm^{-1} อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่ สำหรับสเปกตรัมของรูป 1.4c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด

ตารางที่ 1.2 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน [4]

PEAK POSITION	TYPE OF CARBON	DESCRIPTION
$\sim 1140\text{ cm}^{-1}$	Small size ($< 0.1\text{ }\mu\text{m}$)cubic diamond	occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ($< 0.1\text{ }\mu\text{m}$)
$1315\text{-}1326\text{ cm}^{-1}$	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PEAK POSITION	TYPE OF CARBON	DESCRIPTION
2710 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	second order peak
3240 cm^{-1}	Graphite	second order peak

1.7.2 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

ในการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ หรือแม้กระทั่งความหนาของฟิล์มเพชรก็ตาม เราสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธี SEM ดังแสดงรูปเครื่องมือในภาคผนวก ซึ่งยังสามารถบอกได้ถึงระนาบของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้อีกด้วย SEM สามารถตรวจสอบฟิล์มได้ถึงระดับที่เล็กกว่าไมครอน โดยทำการ โฟกัสลำอิเล็กตรอนไปยังพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ แล้วทำการตรวจจับอิเล็กตรอนอันดับที่สอง (secondary electron) ที่หลุดผ่านออกมาจากพื้นผิว โดยที่ความสว่างหรือความเข้มของการส่งผ่านอิเล็กตรอนอันดับสองออกมานั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวที่ทำการวัดนั้นๆ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะถูกขยายไปแสดงภาพที่จอมอนิเตอร์ และความละเอียดของภาพที่ได้กำหนดได้โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งสามารถโฟกัสได้ละเอียดถึงเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 10 - 20 นาโนเมตรเท่านั้น



รูปที่ 1.5 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน

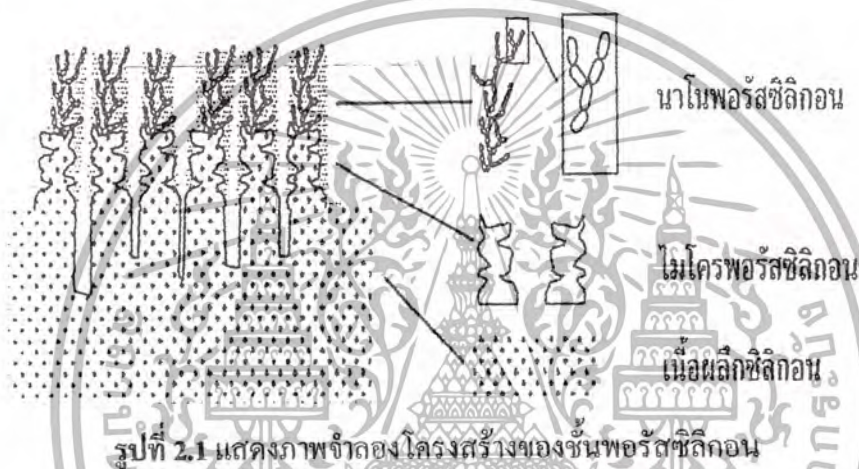
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 พอร์สซิลิกอน

2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนนั้นคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร อยู่ถึงสองชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะมีระดับของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1



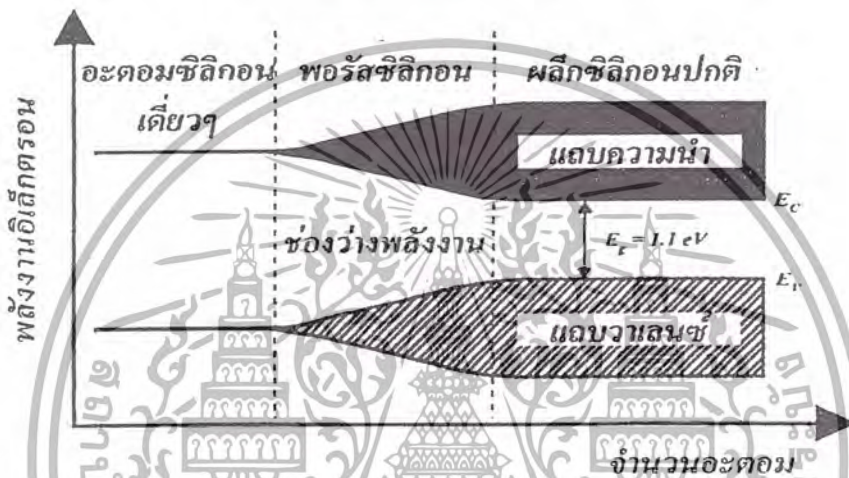
จากภาพจะเห็นได้ว่าชั้นของพอร์สซิลิกอนจะประกอบไปด้วย

1. โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่อยู่ติดกับเนื้อของผลึกซิลิกอน
2. โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้าง อยู่ในช่วงประมาณตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ลงไป

โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) ซึ่งได้ทำการอธิบายเอาไว้ ในหัวข้อกลไกในการเกิดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน โดยเฉพาะในส่วน of ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั้นประกอบไปด้วยพันธะของ ซิลิกอนไฮไดรด์(Si:H) หรือ ซิลิกอนออกไซด์ไฮไดรด์(Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิว โดยทั่วไปอีกด้วย

2.1.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานภายในอะตอม ทำให้เกิดการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอนเดิม (ซึ่งมีจำนวนซิลิกอนอยู่ภายในประมาณ 10^{22} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติ การลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดของโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกปรากฏการณ์ลักษณะเช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect ซึ่งค่าพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์นี้จะมีค่าเท่ากับ

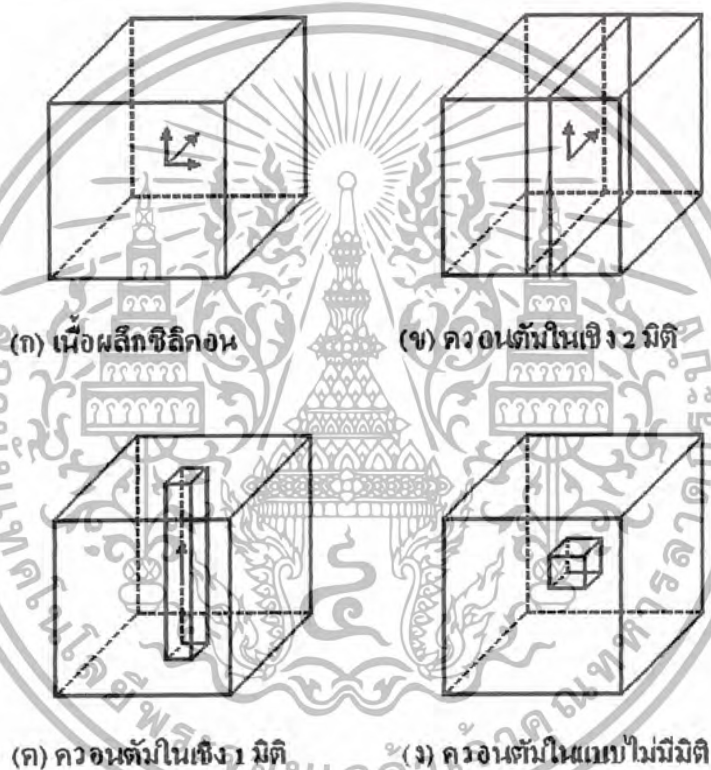
$$E_q = \Delta E_c + \Delta E_v \quad (2.1)$$

โดยที่ E_q เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ Quantum confinement effect

ΔE_c เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำเดิมของผลึกซิลิกอน

ΔE_v เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์เดิมของผลึกซิลิกอน

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ ดังรูปที่ 2.3(ก) มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างออกไปจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองลักษณะ โครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน

ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับด้วยลักษณะและขนาดของโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (Quantum well) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความบางมากในระดับชั้นของโมเลกุล เช่น 30-50 ชั้น โมเลกุล ($< 100 \text{ nm}$) พาหะ

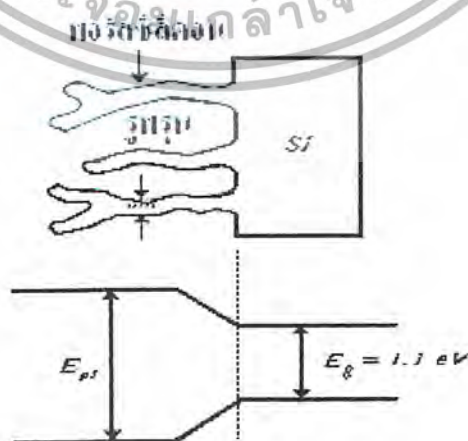
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำกระแสที่ถูกกักให้อยู่ในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างแบบ 2 มิติ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ข)

2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (Quantum wire) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นหรือเสาแคบๆที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร ($< 10 \text{ nm}$) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปในโครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของโครงสร้างที่เป็นเส้นหรือเสาเท่านั้นแสดงดังในรูปที่ 2.3(ค) ซึ่งลักษณะช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 1 มิติแบบนี้ จะมีขนาดที่กว้างกว่าช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในลักษณะแบบนี้จะมีขนาดที่เล็กกว่า และมีจำนวนอะตอมที่อยู่ภายในที่น้อยกว่าในโครงสร้างแบบ 2 มิติ นั่นเอง

3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (Quantum dot) เกิดจากการลดขนาด หรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ($< 1 \text{ nm}$) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะแบบนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ในโครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ง) อะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างจุดเล็ก ๆ เหล่านี้จะมีจำนวนที่น้อยกว่าในโครงสร้าง 2 แบบแรก มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของโครงสร้างที่เป็นจุดนี้จะมีค่ากว้างที่มากกว่าในโครงสร้าง 2 แบบแรกด้วย

เมื่อย้อนกลับมาพิจารณาถึง โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบ ๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรทำให้ ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน จึงจัดอยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งความกว้างของช่องว่างพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับขนาด โครงสร้างนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอน

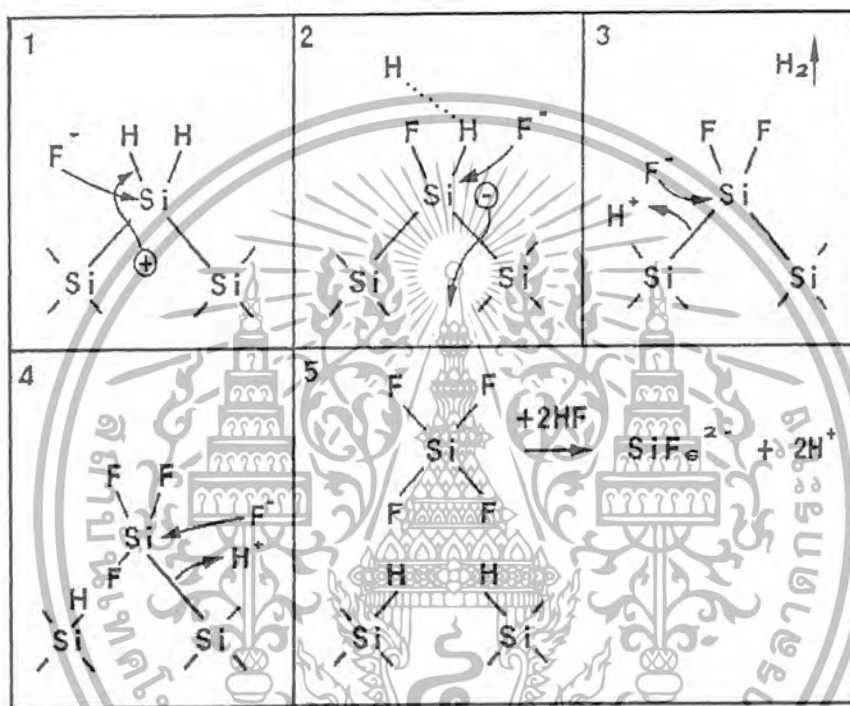


รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กลไกการเกิดพอร์ซซิลิกอน

การสร้างพอร์ซซิลิกอนโดยใช้สารเคมีภายใต้การไบอัสกระแสไฟฟ้าเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในสภาวะปกติ เมื่อจุ่มผลึกซิลิกอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัด แต่เมื่อผลึกซิลิกอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบ anodic bias ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุน เกิดเป็นชั้นของพอร์ซซิลิกอนขึ้นมาโดยแสดงปฏิกิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงกลไกการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่ทำให้เกิดชั้นของพอร์ซซิลิกอน โดยเริ่มจากเมื่อยังไม่มีกระแสไบอัสแบบ Anodic Bias ซึ่งเป็นกระบวนการป้อนศักย์ไฟฟ้า ขั้วบวกให้กับขั้วแอโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของซิลิกอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่ มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) แต่เมื่อไรที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ฝังสามารถถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si-F) ขึ้นมาแทนดังกล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลของการ polarizing ของพันธะ

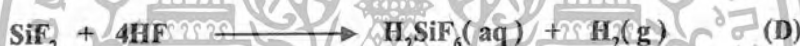
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลูออรีนที่เกิดขึ้นตอนแรกส่งผลให้อิออนของฟลูออรีน (F^-) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม ($Si-H$) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังข้าวอาโนด ดังแสดงในขั้นตอน 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็将会เกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอน (Polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิกอนกับฟลูออรีน ($Si-F$ groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนที่อยู่ถัดมาที่มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีนเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เอง เห็นได้ว่าอะตอมของซิลิกอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิกอนพร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิกอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา แสดงในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



จากสมการ (2.7) และ (2.8) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวมใหม่ได้เป็น



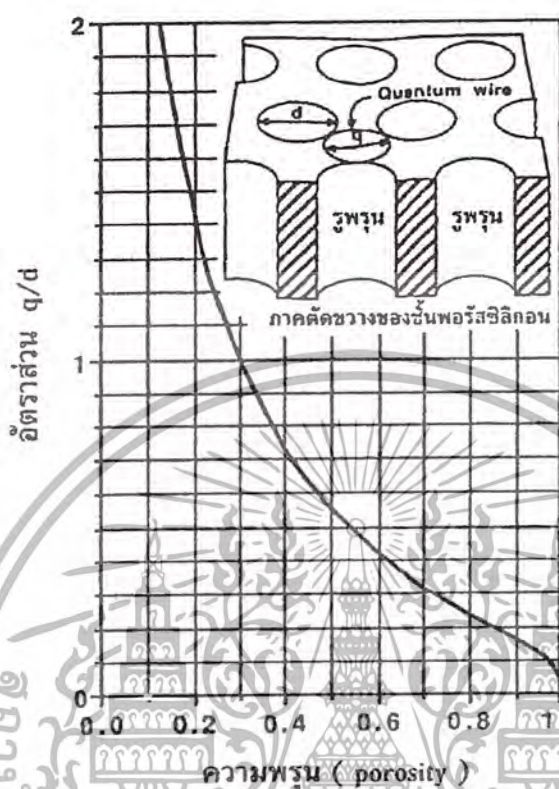
ในปฏิกิริยาเคมีจากสมการที่ (A) จำเป็นต้องอาศัยไฮไลต์ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งจะทำให้เกิด SiF_2 ที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอนจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (B) กับ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังสมการที่ (B) ได้ผลลัพธ์เป็น SiF_4 หลุดมาจากผิวของผลึกซิลิกอนในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เองสังเกตได้ว่า จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ได้ผลลัพธ์คือ สารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเองดังสมการที่ (C)

2.3 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน

โดยทั่วไปแล้ววัสดุใดๆก็ตามที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาด โครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่าง มวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุ กับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าพอร์สซิลิกอนก็คือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอนที่เล็กลงและขนาดของรูพรุนจะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum Size Effect ใน

ลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน

จากรูปข้างต้นจะหาได้ว่าทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) และ ขนาดของรูพรุน (d) จะมีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะทำให้ชั้นพอร์สซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม

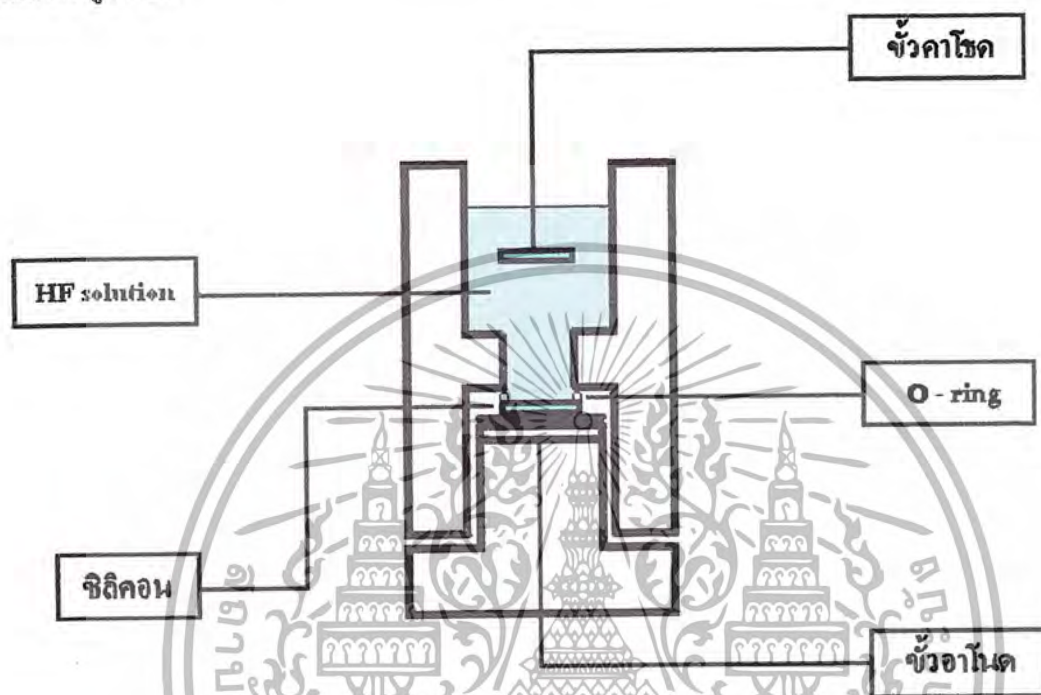
2.4 เทคนิคการสร้างพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี(anodization)

เทคนิคต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคในการปลูกผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ใน ระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆ เหล่านี้จะต้องอาศัยเทคนิคการสร้างและอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาที่สูงมาก แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรเช่นกัน ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) เนื่องจากมีกระบวนการในการสร้างที่ค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้สร้างชั้นของพอร์ซซิกอนก็มีราคาที่ไม่แพงอีกด้วย ซึ่งการสร้างพอร์ซซิกอนด้วยวิธีนี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พอร์ซซิกอนนั้นเป็นวัสดุที่สามารถสร้างชั้นบนแผ่นซิลิกอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่าการ anodization ซึ่งจะต้องใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.7



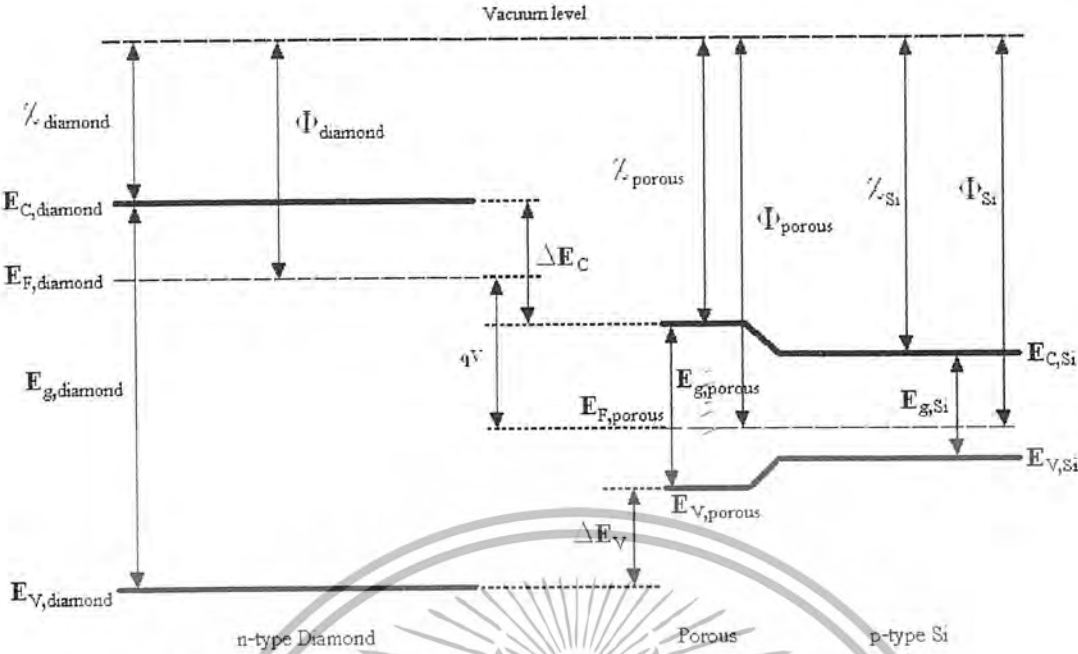
รูปที่ 2.7 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ anodization

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนนี้จะประกอบด้วย แผ่นผลึกซิลิกอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะใช้ทองเป็นขั้วอิเล็กโตรด โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งในที่นี้ได้แก่สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าแผ่นผลึกซิลิกอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยจะใช้ O-ring เข้ามามีส่วนช่วยป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซลล์

2.5 ลักษณะของแถบพลังงาน

เพื่อที่จะศึกษาการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากพอร์ซซิกอนซึ่งสร้างมาจากแผ่นซิลิกอนชนิดพีกับฟิล์มเพชรชนิดเอ็น โดยลักษณะแถบพลังงานก่อนที่จะสัมผัสกันของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิลิกอนขณะก่อนสัมผัส

จากรูปที่ 2.8 จะได้ว่า

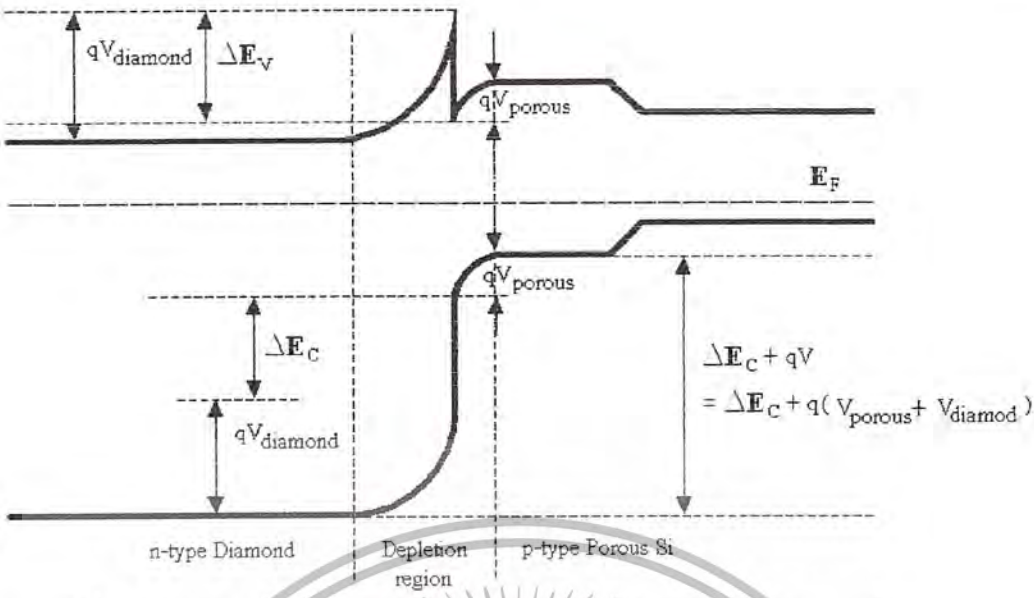
$$\Delta E_c = \chi_{Porous} - \chi_{Diamond} \tag{2.2}$$

และ

$$\Delta E_v = (E_{g,Diamond} - E_{g,Porous}) - (\chi_{Porous} - \chi_{Diamond})$$

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c \tag{2.3}$$

เมื่อสาร 2 ชนิดนี้ต่อกัน อิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดการแพร่ไปสู่ด้านพีและด้านเอ็น จนกระทั่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองมีระดับเท่ากัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์สซิลิคอนขณะสมดุลความร้อน

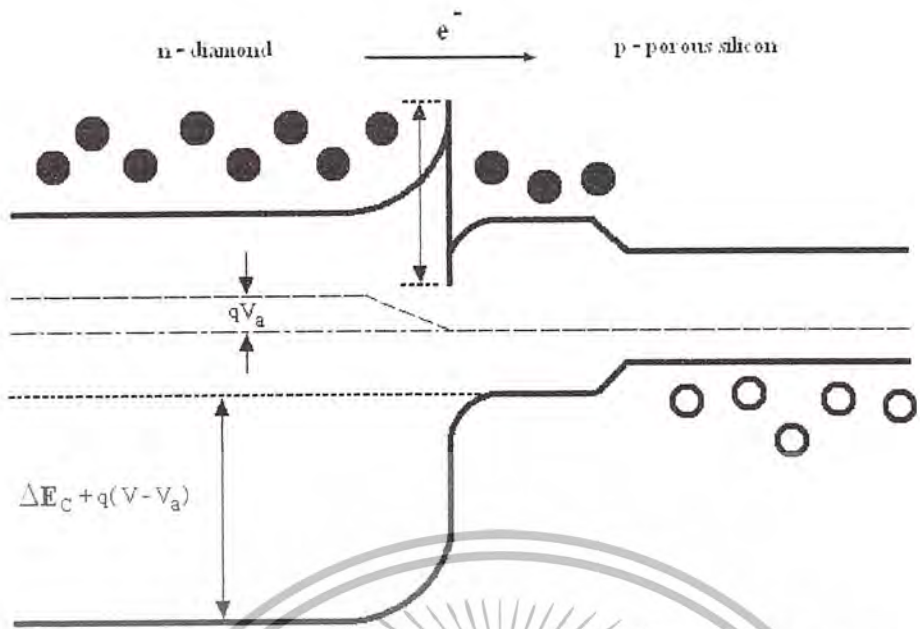
จากรูปที่ 2.9 จะได้ว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อคือ

$$-qV_d = E_{F,Diamond} - E_{F,Porous} = -q(V_{D,Porous} - V_{D,Diamond}) \tag{2.4}$$

โดยที่ $V_{D,porous}$ คือศักย์ไฟฟ้าภายในของพอร์สซิลิคอน
 $V_{D,Diamond}$ คือศักย์ไฟฟ้าภายในของฟิล์มเพชร

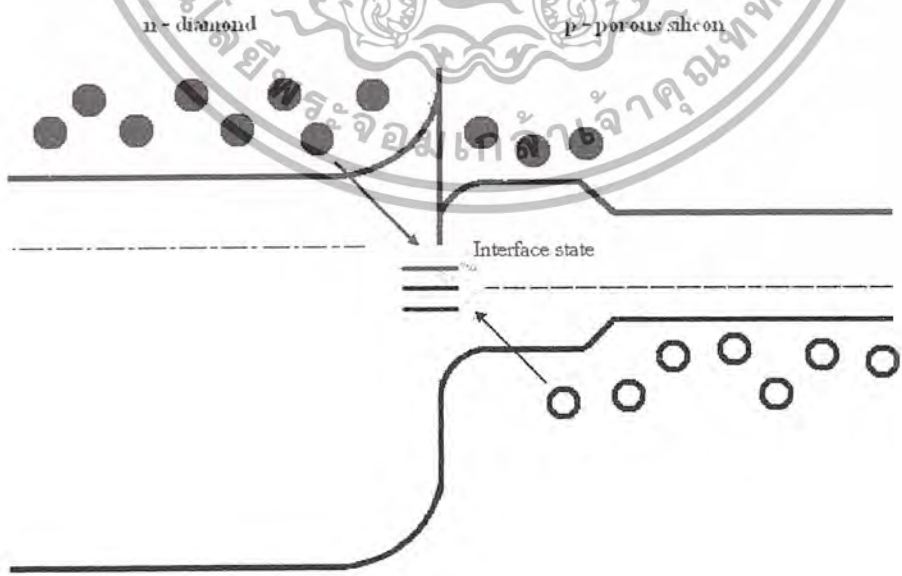
2.5.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า

ในสภาวะสมดุลความร้อนจะไม่มีกระแสการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิด แต่เมื่อเราให้ไบอัสไปข้างหน้ากับรอยต่อนี้ สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนี้จะมีค่าลดลง เมื่อเราสมมุติให้ระดับพลังงานด้านพีคงที่ ดังนั้นระดับพลังงานด้านเอ็นจะมีระดับพลังงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ qV_a การไหลของกระแสจะมี 2 ลักษณะโดยลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยอิเล็กตรอนจะไหลจากแถบความนำด้านเพชรชนิดเอ็นไปยังแถบความนำด้านพอร์สซิลิคอน เมื่อให้การไบอัสน้อยกว่าแรงดันขั้วเริ่มช่วง Forward (V_F) กระแสจะไหลได้น้อยเนื่องจากมีศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณ spike กันอยู่ แต่เมื่อให้ไบอัสมีค่าสูงกว่า V_F จะทำให้ความสูงของ spike มีค่าลดลง อิเล็กตรอนจึงสามารถไหลไปยังด้านพอร์สซิลิคอนได้



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 1 ขณะได้รับไบอัสตรง

ลักษณะที่สองจะเป็นการไหลของกระแสการรวมตัวใหม่ (Recombination current) คือโฮลจากแถบวาเลนซ์ทางด้านพอร์ซซิลิกอนและอิเล็กตรอนจากแถบนำด้านฟิล์มเพชรจะไหลไปยัง Interface state จะเกิดการรวมตัวใหม่ที่ Interface state ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยกระแสส่วนนี้ จะมีความสำคัญเมื่อมีการไบอัสน้อยๆ

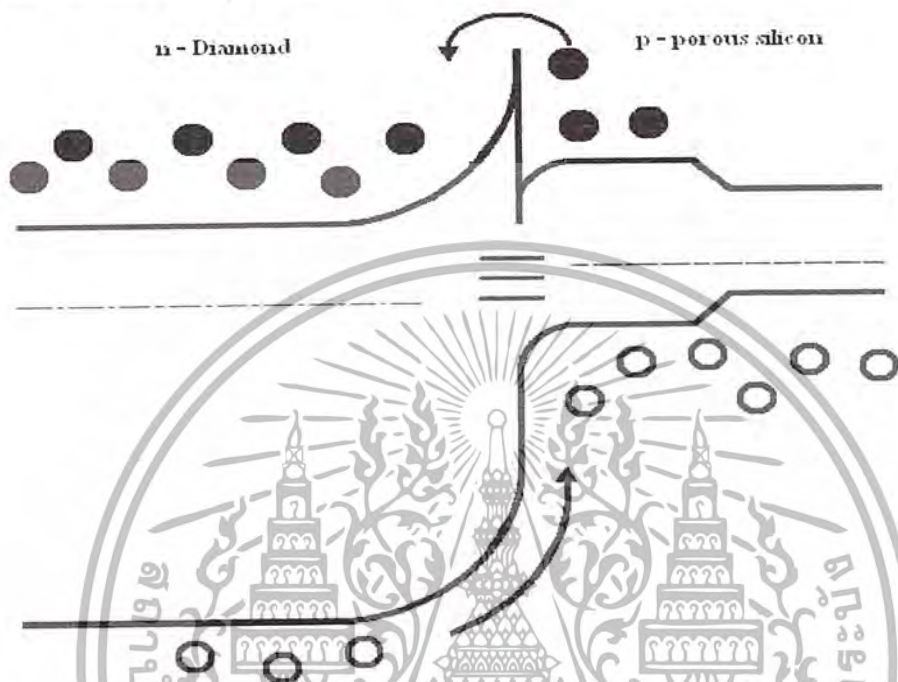


รูปที่ 2.11 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 2 ขณะได้รับไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

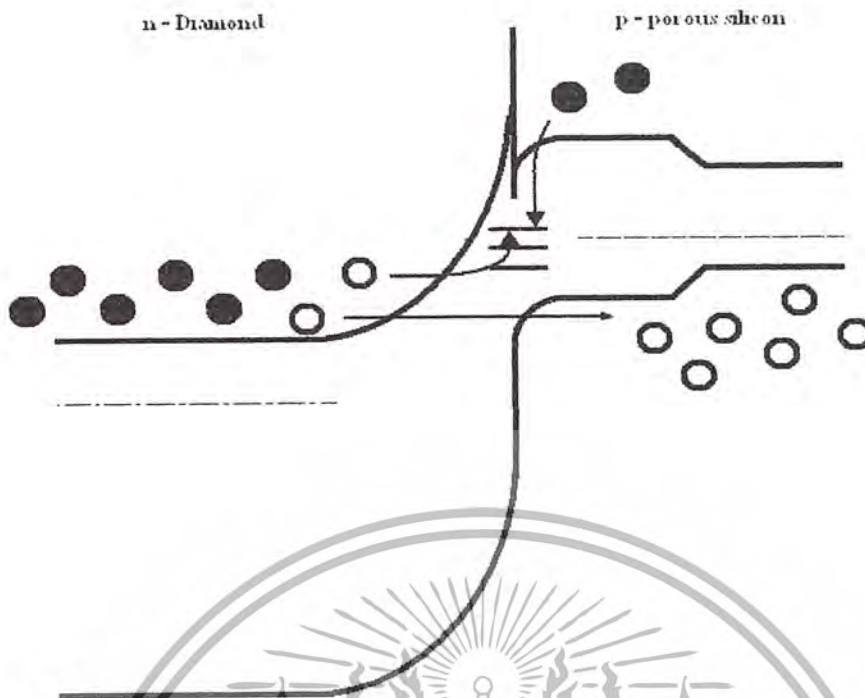
2.5.2 การไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าน้อยๆ ซึ่งน้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มช่วง Reverse (V_R) อิเล็กตรอนจากพอร์สซิลิกอนชนิดพีจะไหลมายังด้านฟิล์มเพชร และ โฮลจากด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็นจะไหลมายังพอร์สซิลิกอน ซึ่งกระแสนี้จะยังคงไหลน้อยเนื่องจากเกิดจากการไหลของประจุพาหะจำนวนน้อย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V < V_R$

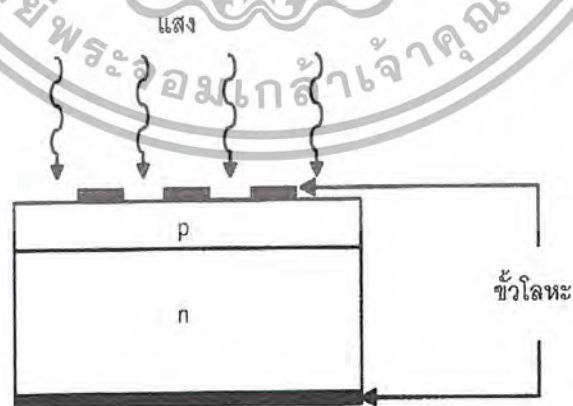
แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับจนระดับพลังงานวาเลนซ์ด้านพอร์สซิลิกอนชนิดพีมีระดับสูงกว่าแถบความนำของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น จะเกิดการทะลุผ่าน (Tunneling) คือโฮลด้านฟิล์มเพชรชนิดเอ็นจะสามารถทะลุไปยังแถบวาเลนซ์ด้านพอร์สซิลิกอนได้ และอิเล็กตรอนบริเวณแถบความนำด้านพอร์สซิลิกอนชนิดพีจะเกิดการรวมตัวกับโฮลบางส่วน ซึ่งเคลื่อนที่ทะลุรอยต่อที่บริเวณ Depletion Region ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V > V_R$

2.6 โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งที่ประดิษฐ์ตรวจรับแสง มีโครงสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพีเอ็น แต่เนื่องจากต้องทำงานเกี่ยวกับแสง จึงถูกออกแบบให้ชั้นที่มีความบางมากๆ เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่รอยต่อ p-n จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ อาจรวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าโดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจจับความเข้มของแสง

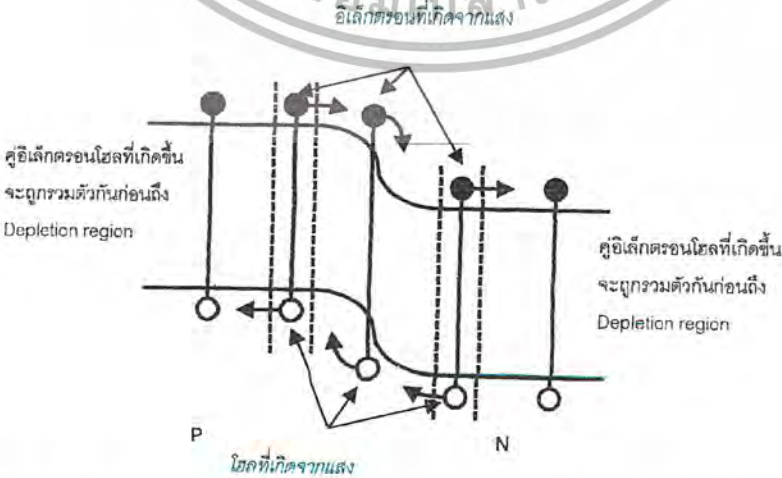


รูปที่ 2.14 ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด

โดยทั่วไปเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับแสง ซึ่งมีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ถ้ามีการให้สนามไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ ประจุพาหะบางส่วนจะเคลื่อนที่สู่ชั้นแถบความนำ ซึ่งจะนำไปสู่การลดลงของประจุพาหะ ทำให้เกิดการลดลงของความต้านทานไฟฟ้าภายในเนื้อสารซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Photoconduction แต่ถ้าเป็นรอยต่อพีเอ็น เมื่อมีแสงตกกระทบ จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนที่แยกออกจากกัน เนื่องจากสนามไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็น โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect)

2.6.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดเป็นไดโอดโครงสร้างพีเอ็น ดังรูปที่ 2.14 โดยจะมีช่องด้านบนเพื่อเป็นส่วนที่รับแสง โดยบริเวณรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งเมื่อแสงตกกระทบและถ้าแสงมีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน แสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำและที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่ จากรูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพีเอ็น การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้นพี ชั้นปลดพาหะและชั้นเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นพีจะแพร่ไปสู่ชั้นเอ็นและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบคอนดักชันในชั้นปลดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เคลื่อนที่ไปยังชั้นเอ็น ส่วนโฮลจะไหลไปยังชั้นพี จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้นอยู่กับจำนวนของโฟตอนของแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนจะถูกสะสมอยู่ในชั้นเอ็นและโฮลก็จะถูกสะสมอยู่ในชั้นพี เมื่อเราต่อโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรภายในอิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้นเอ็น ส่วนโฮลก็จะไหลออกจากชั้นพี



รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดอิเล็กตรอนโฮลในแถบพลังงานของโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

I_L คือ กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง

C_j คือ ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อพี-เอ็น

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม

I_D คือ กระแสไฟฟ้ามืดในไดโอด

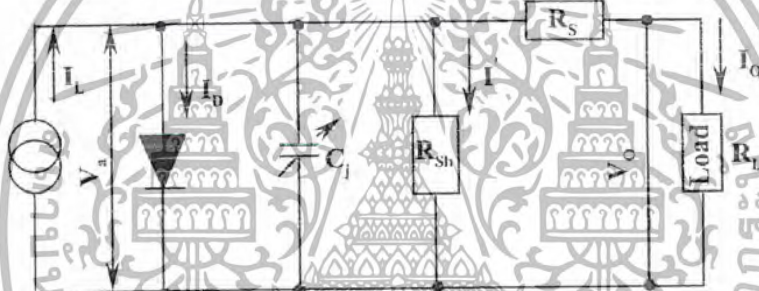
I' คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}

R_{sh} คือ ความต้านทานขนั้ด

V_a คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

I_o คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

จากวงจรนี้สามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_o) ได้จากสมการ

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_a}{kT} - 1 \right) - I' \quad (2.5)$$

I_s ในสมการนี้คือ กระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับอิมิต์ของไดโอด จากสมการนี้เราสามารถคำนวณหาตัวแรงดันเอาต์พุตเปิดวงจร (V_{oc}) ได้จากการให้ $I_o = 0$ นั่นคือ

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L - I'}{I_s} \right) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า I มีค่าน้อยมาก เราอาจไม่คิดค่า I ก็ได้ ส่วน I_s จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ ดังนั้น V_{oc} จะแปรผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น V_{oc} จะลดลง และ V_{oc} จะแปรผันตรงกับ I_L แบบ $\ln I_L$ แต่ถ้าแสงมีความเข้มน้อยมาก ความสัมพันธ์เหล่านี้จะไม่ชัดเจน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) คำนวณได้จากการให้ $R_L = 0$ และ $V_O = 0$ ดังนั้น ในสมการนี้ พจน์ทางขวาพจน์ที่ 2 และ 3 จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการเป็นเชิงเส้นของ I_{sc} ถ้า R_s มีค่าไม่เกิน 10Ω และถ้า R_{sh} มีค่าระหว่าง $10^7 \sim 10^{11} \Omega$ จะทำให้สามารถตัดพจน์ที่ 2 และ 3 ทางขวามือทิ้งได้

$$I_{sc} = I_L - I_s \left(\exp \frac{q(I_{sc} \cdot R_s)}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

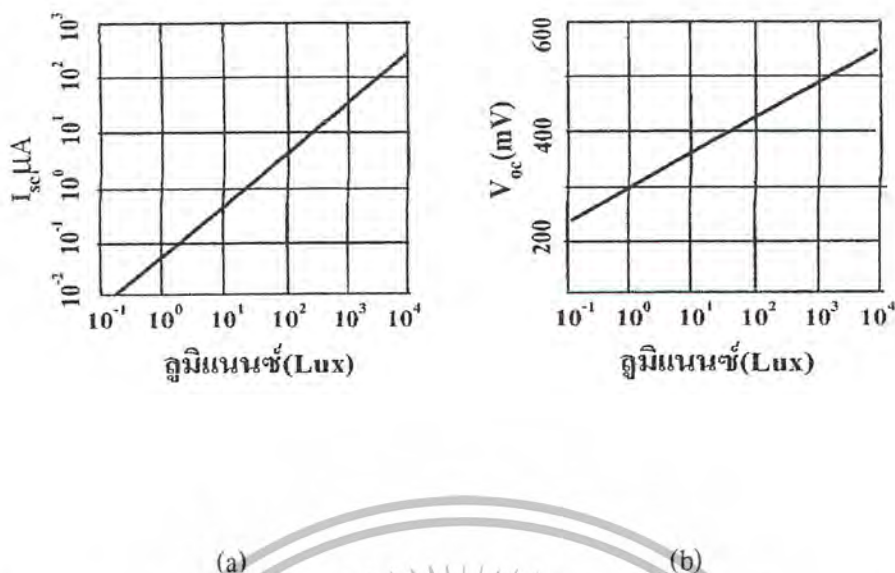
2.6.3 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า โฟโตไดโอดคืออุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็นเหมือนกับไดโอด ดังนั้นในขณะที่ยังไม่มีแสงส่องกระทบที่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้กันทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.17 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อมีแสงส่องเข้าที่โฟโตไดโอด จะทำให้เส้นระหว่างกระแส-แรงดันเลื่อนแบบขนานไปสู่เส้นหมายเลข 2 แต่ถ้าความเข้มแสงมากขึ้นก็จะเป็นเส้นกราฟแบบหมายเลข 3 ในขณะที่ส่องแสงอยู่ถ้าเราทำการวัดกระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอดจะได้ค่า I_{sc} หรือ I'_{sc} โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปแคโทด ถ้าเป็นวงจรเราจะได้แรงดันวงจรเปิด V_{oc} หรือ V'_{oc} และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มแสงเป็นลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมากดังแสดงในรูปที่ 2.18 (a)



รูปที่ 2.17 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



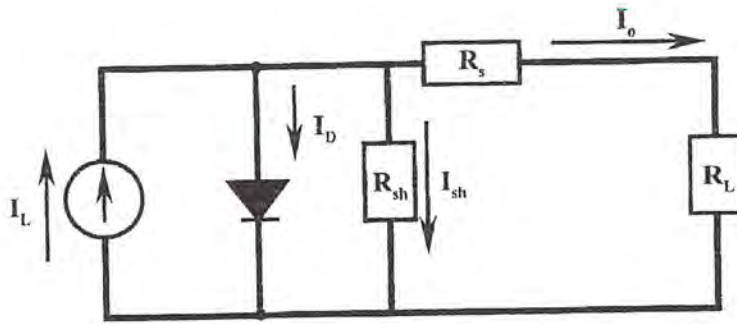
รูปที่ 2.18 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินพุต (b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{oc} และความเข้มของแสงอินพุต

2.7 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นถึงประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเปรียบเสมือนกับแหล่งกำเนิดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ง่ายที่สุดคือเซลล์แบบรอยต่อพีเอ็น ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเช่นเดียวกับโฟโตไดโอด-พีเอ็น แตกต่างกันที่กรณีของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีพื้นที่รับแสงใหญ่เพื่อให้สามารถรับแสงได้มากที่สุด โดยหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์คือ ในสภาวะสมดุลความร้อนที่รอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นบริเวณปลอดพาหะจะมีแรงดันไฟฟ้าภายในปรากฏอยู่ เมื่อเซลล์ได้รับแสง การดูดกลืนโฟตอนทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นที่บริเวณนี้และบริเวณใกล้เคียง อิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าพัดให้เคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น และโฮลเคลื่อนที่ไปยังด้านพี ทำให้มีกระแสแสง (Photo current) ไหลออกจากขั้วโลหะด้านพีผ่านโหลดและเข้าที่ขั้วโลหะด้านเอ็นครบวงจร

2.7.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นแบบง่ายๆ จะมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant current source : I_L) ต่อขนานอยู่กับรอยต่อพีเอ็นแสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสคงที่นั่นก็คือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสง (I_L) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) ความต้านทานขนัศ (R_{sh}) และรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด กระแส I_L ที่เกิดเนื่องจากแสงนี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอด และ R_{sh} แล้วจึงไหลมายังโหลด (R_L) กระแสที่ไหลผ่าน R_s และ R_L ให้มีค่าเป็น I_o จะได้ว่า

$$I_L = I_D + I_o \quad (2.8)$$

$$I_o = I_L - I_D \quad (2.9)$$

เมื่อ $R_s = 0$ กระแส I_D มีค่าดังนี้

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

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

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$I_o = I_L \tag{2.13}$$

ในกรณีนี้ I_o ก็คือ I_{sc} ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดขึ้นจากแสง

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

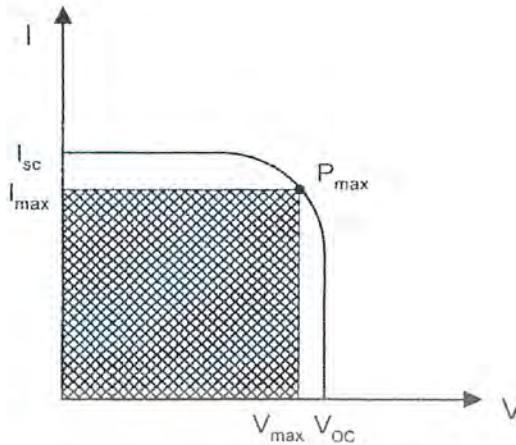
$$I_L = I_s \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \tag{2.14}$$

$$\ln \frac{I_L}{I_s} = \frac{qV}{kT} - 1 \tag{2.15}$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right) \tag{2.16}$$

กรณีที่โหลดมีค่า $0 < R_L < \infty$ จะได้ว่าเซลล์จะจ่ายกระแส I และแรงดัน V ให้แก่โหลดค่าหนึ่งซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $0 < I < I_{sc}$ และ $0 < V < V_{oc}$ ตามลำดับ กำลังงาน (Power) ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด R_L สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันที่โหลดได้รับ ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้ผลคูณของปริมาณทั้งสองมีค่าสูงสุด เรียกว่า กระแสสูงสุด (I_{max}) และแรงดันสูงสุด (V_{max}) ตามลำดับ ซึ่งที่จุดนี้จะให้กำลังงานสูงสุด (Maximum Power : P_{max}) แสดงดังรูปที่ 2.20





รูปที่ 2.20 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง

ดังนั้นกำลังงานสูงสุด จึงถูกนิยามว่าค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์สามารถจ่ายให้แก่โหลด โดย $P_{\max} < I_{sc} \cdot V_{oc}$ ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟรูปที่ 2.20 คือถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้น เป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อ 2.7.2 จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าๆ หนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า “ฟิลแฟกเตอร์” (F.F. : Fill Factor) ของเซลล์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์จริงๆ ต่อพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ในทางอุดมคติ

$$F.F. = \frac{P_m}{P_0} = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.17)$$

จะเห็นได้ว่าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ถ้าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่า เซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับทางอุดมคติมาก พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงาน (Energy conversion efficiency) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Cells Efficiency) ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกำลังงานไฟฟ้าที่เซลล์สามารถจ่ายได้กับกำลังงานที่เซลล์ได้รับจากแสง ดังนั้นถ้าพิจารณาว่าเซลล์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดได้เป็นค่าสูงสุดจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงาน } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (2.18)$$

หรือ

$$\eta = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in}} = \frac{F.F. \times I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.19)$$

หรือ

$$\eta = \frac{P_{max}(W)}{Area(m^2) \times P_{in}(W)} \times 100\% \quad (2.20)$$

2.7.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานในเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ (R_s) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์มาก จากสมการที่ 2.21 ซึ่งคิดที่ $R_s = 0$

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp(qV_o / kT) - 1 \right] \quad (2.21)$$

และได้ I_o ออกมาดังนี้

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

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

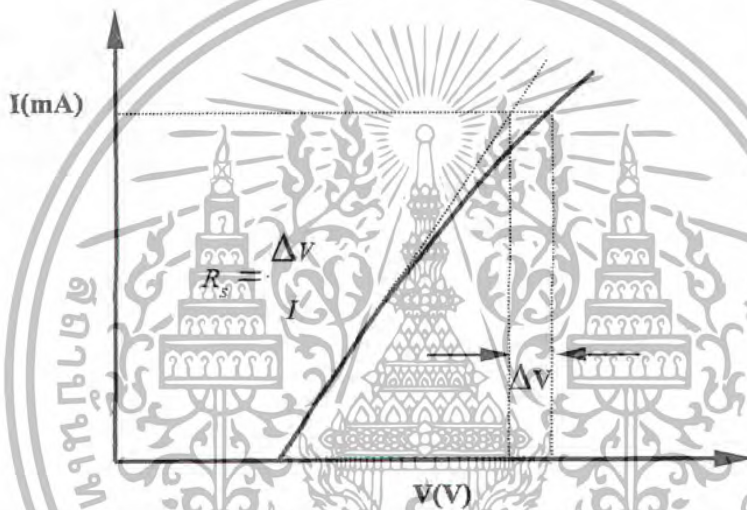
$$I_o = I_L - I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V_o + I_o \cdot R_s)}{kT} \right\} - 1 \right] \quad (2.22)$$

ความต้านทานอนุกรมสามารถหาค่าได้โดยวิธีการดังนี้ เนื่องจากกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล เช่นเดียวกันกับไดโอด เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันนี้ไปเขียนลงในกราฟเซมิล็อก จะได้เป็นกราฟเส้นตรง แต่เนื่องจากผลของความต้านทานภายในเซลล์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานนี้ แรงดันส่วนนี้จะมี ความสัมพันธ์กับกระแสในลักษณะเชิงเส้น เมื่อกระแสไหลผ่านเซลล์มาก ผลของแรงดันที่ตก

คร่อมความต้านทานอนุกรมนี้ จะทำให้ได้กราฟเส้นตรงที่ได้ในช่วงกระแสสูงๆ นี้เบี่ยงเบนออกจากแนวเดิม ค่าที่เบี่ยงเบนออกมานี้จะนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ได้

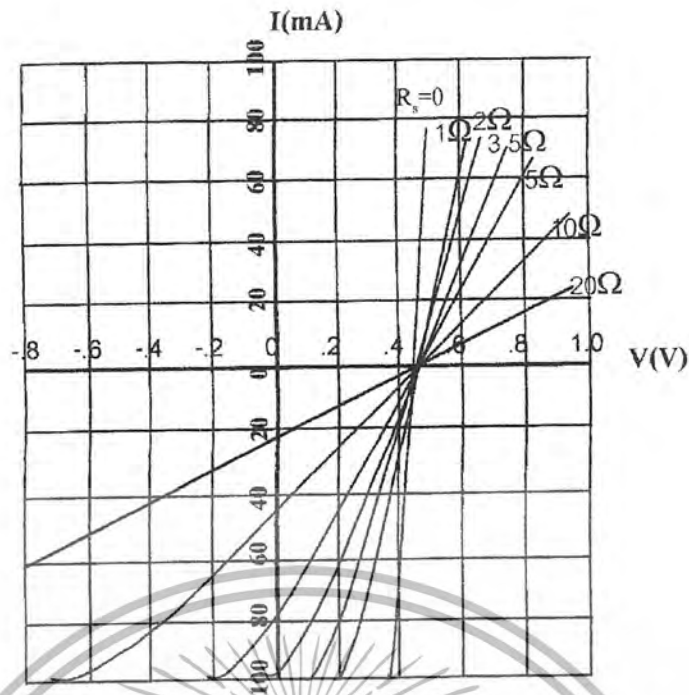
จากกราฟในรูปที่ 2.21 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ที่ค่ากระแส I จะหาค่า R_s จากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV ได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.23)$$



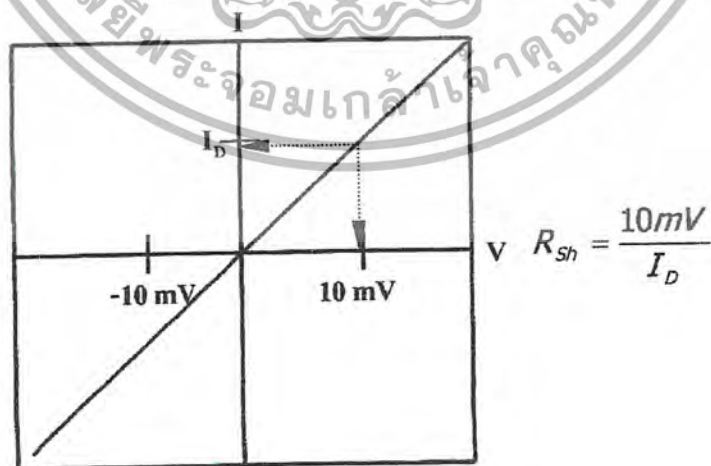
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บนกราฟแบบเซมิล็อก

จากสมการที่ 2.23 สามารถนำไปเขียนกราฟ เพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 2.22 จากรูปจะเห็นได้ว่าเซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อยลง และความชันของกราฟก็ลดลงด้วยเป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์จึงควรหาทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ส่วนความต้านทานชั้นต้นนั้น อาจเกิดจากกระแสรั่วที่บริเวณขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นความต้านทานชั้นต้นจะมีค่าสูง มากๆ แต่อาจจะมีค่าลดลงได้เนื่องมาจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น การหาค่าความต้านทานชั้นต้น สามารถทำได้โดยการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันในสภาวะมืด โดยการไบแอสให้กับเซลล์ใน ระดับแรงดันต่ำๆ ประมาณ 10 - 20 mV ดังรูปที่ 2.23

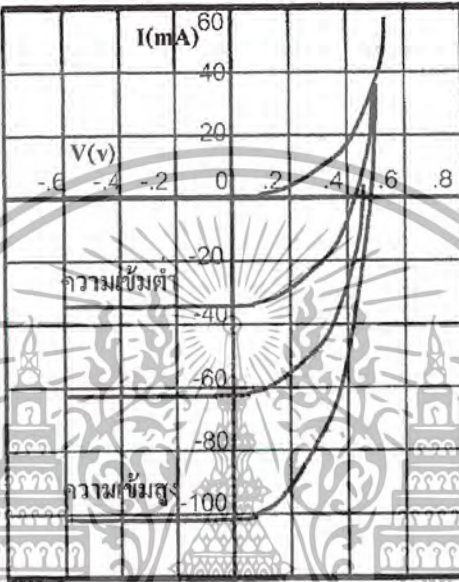


รูปที่ 2.23 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาวะมืดของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้แสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีอิสระหลุดจากการยึดเหนี่ยวกับไฮโดรเจนในอะตอม ถ้าแสงที่ส่องมากระทบเซลล์มีความเข้มสูงมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลให้กระแสที่ได้จากเซลล์มีค่าสูงขึ้น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงแตกต่างกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.7.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริงๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเมื่อได้พิจารณาสมการของกระแส I_L ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L จะพบว่ากระแส I_L นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องจากแสง I_L และกระแส I_D ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L และ I_D

2.7.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L [11]

กระแส I_L ที่เกิดขึ้นจากแสงนั้นมีสมการดังต่อไปนี้

$$I_L = qg(x)A(L_e + L_h) \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$L = \sqrt{D\tau} \tag{2.25}$$

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

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

2.7.4.2 ผลของอุณหภูมิต่อ I_D

เมื่อพิจารณาค่าของ I_D ในสมการข้างล่าง

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \tag{2.26}$$

$$I_s = Aq n_i^2 \left[\frac{1}{N_a} \left(\frac{D_e}{\tau_e} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_d} \left(\frac{D_h}{\tau_h} \right)^{1/2} \right] \tag{2.27}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า I_s จะมีผลต่อกระแส I_D มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อ I_s โดยพิจารณาจากสมการของ I_s ดังนี้

จากสมการของ I_s ในกรณีของซิลิกอน พบว่า n_i^2 จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ตามสมการดังนี้คือ

$$n_i^2 = 15 \times 10^{32} \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \tag{2.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านการคำนวณ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (2.28) ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นแบบเอกโพเนนเชียล เป็นผลให้ I_s มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จากผลอันนี้ แสดงว่า

2.7.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}

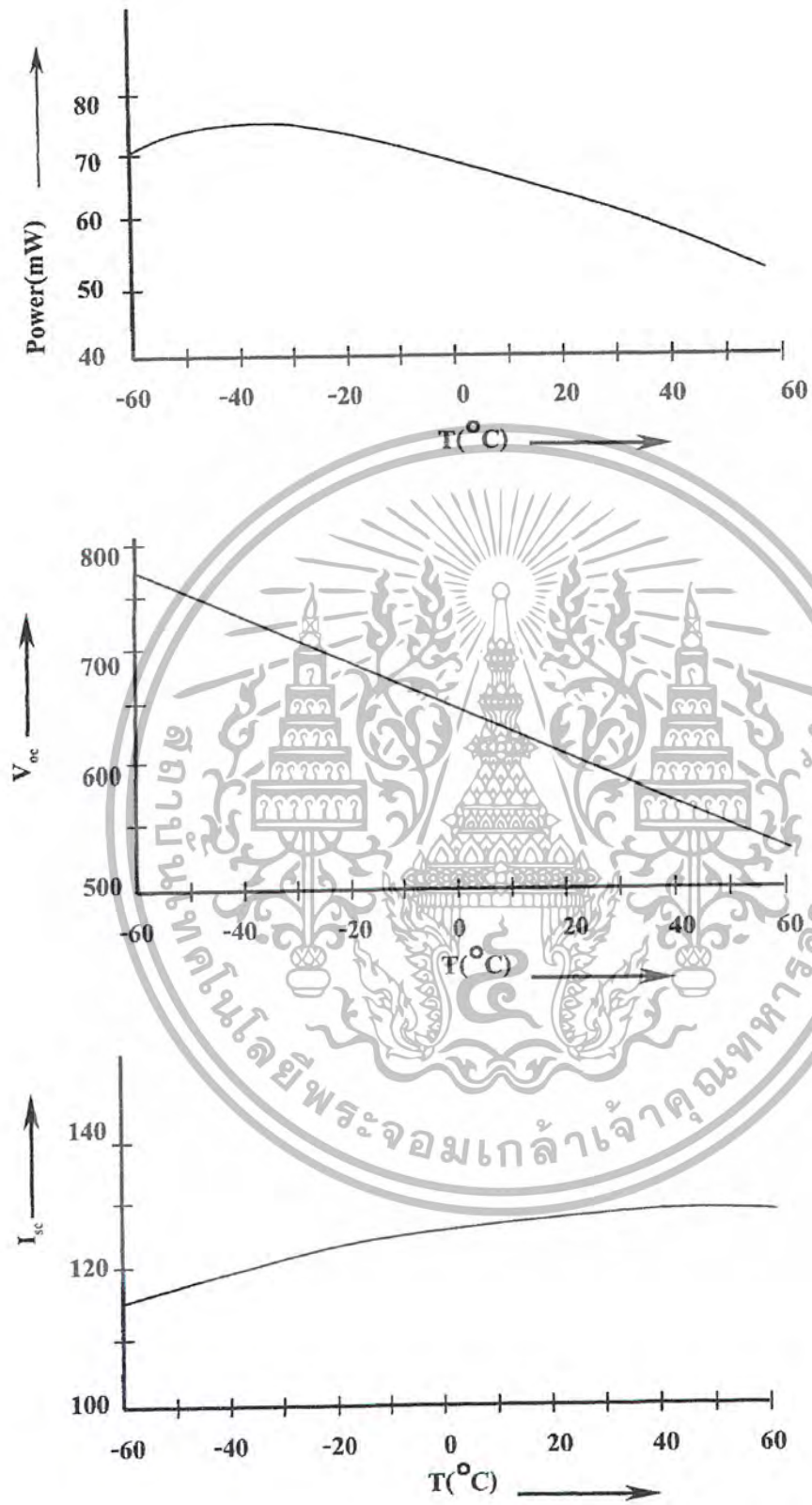
สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) ตามสมการดังนี้

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

(2.29)

จากสมการนี้ค่าของ $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่าของ $\frac{kT}{q}$ มีค่าต่ำมาก ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} คือค่าของ I_s ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้ค่าของ V_{oc} ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_s , V_{oc} และ P_o แสดงไว้ดังรูปที่ 2.25





รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส, แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของพอร์สซิลิกอนและฟิล์มเพชร ซึ่งมีกระบวนการสร้างหลายขั้นตอน

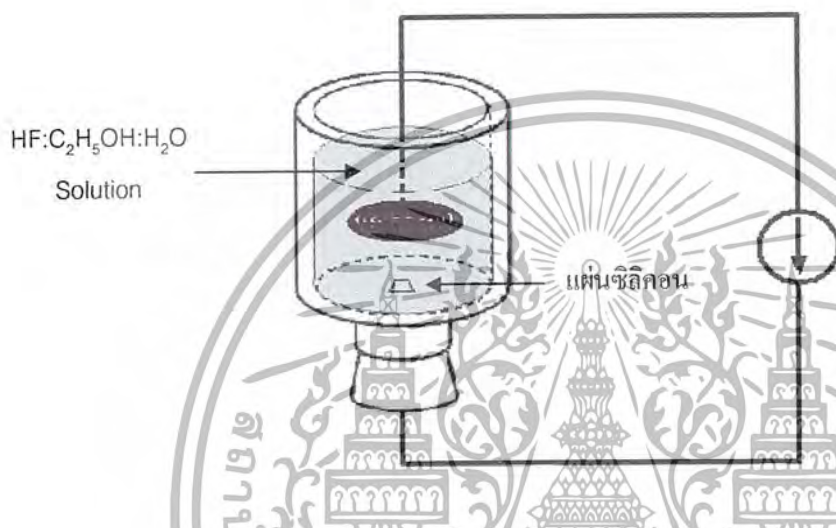
3.1 กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

3.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น (Initita Cleaning) มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดผิวน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaning)
2. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
3. กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 15 วินาที
4. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
5. ดับในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที
6. ดับในน้ำบริสุทธิ์
7. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
8. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
9. ดับในไตรโครเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 10 นาที
10. ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
11. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
12. จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 15 นาที
13. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
14. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.1.2 การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน โดยนำแผ่นซิลิกอนไปวางด้านล่างของชุดเครื่องมือ จากนั้นจะเทสารละลาย $\text{HF} : \text{H}_2\text{O} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1 : 1 : 2$ แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ $15\text{mA}/\text{cm}^2$ ให้แก่ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างของแผ่นซิลิกอน และขั้วอิเล็กตรอนที่เป็นทองแดงซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริก เป็นเวลา 10 นาที ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลาย ถูกกัดจนเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก



รูปที่ 3.1 เครื่องมือสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

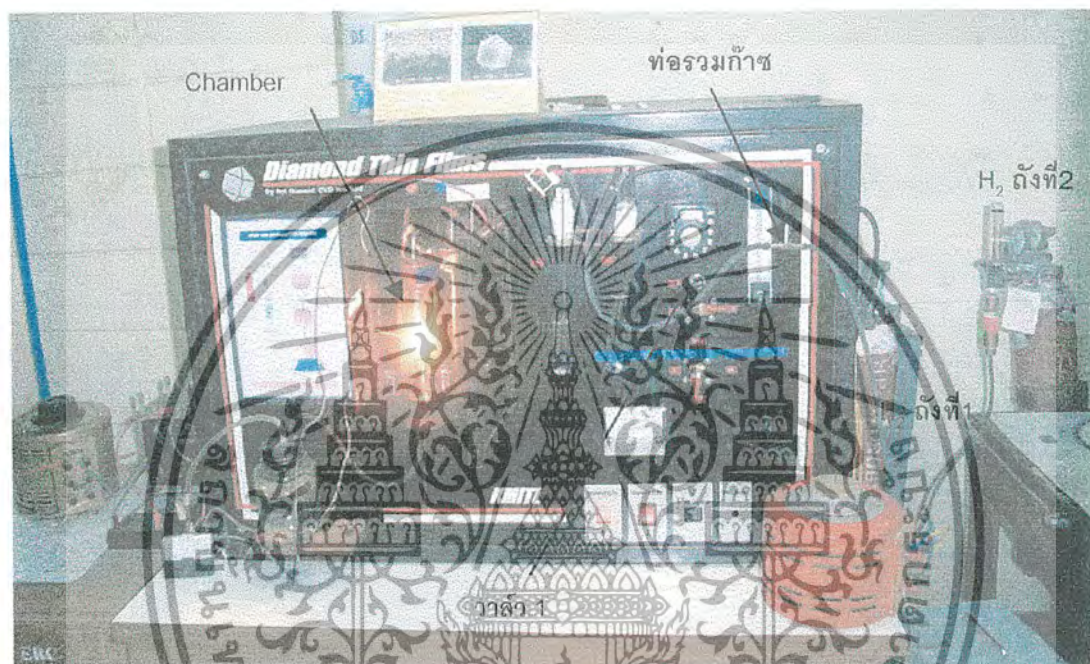
หลังจากการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนเรียบร้อยแล้ว ก็จะต้องนำแผ่นซิลิกอนที่สร้างชั้นพอร์สซิลิกอนไปทำความสะอาด โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
2. แช่แผ่นในแอลกอฮอล์เป็นเวลา 10 นาที เพื่อล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังค้างอยู่ในชั้นพอร์สซิลิกอน
3. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

3.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD

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



รูปที่ 3.2 เครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

1. เปิดก๊าซไฮโดรเจนทั้ง 2 ถัง เข้าสู่ Chamber เป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อให้บรรยากาศใน Chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว
2. ปิดวาล์ว 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนถังที่ 1 ไหลผ่านแหล่งจ่ายเพื่อพาไอระเหยของแอลกอฮอล์เข้า Chamber โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter ขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนถังที่ 2 ยังคงจ่ายก๊าซไฮโดรเจนโดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter โดยไอระเหยของแอลกอฮอล์จะรวมกับก๊าซไฮโดรเจนที่ท่อรวมก๊าซดังรูปที่ 3.2
3. ค่อยๆ เพิ่มกระแสไฟฟ้ากับไส้หลอดทั้งสแตนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ $2,000^{\circ}\text{C}$ แล้วจึงปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพอร์สซิลิกอนกับไส้หลอดทั้งสแตนให้มีระยะห่างประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยสามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

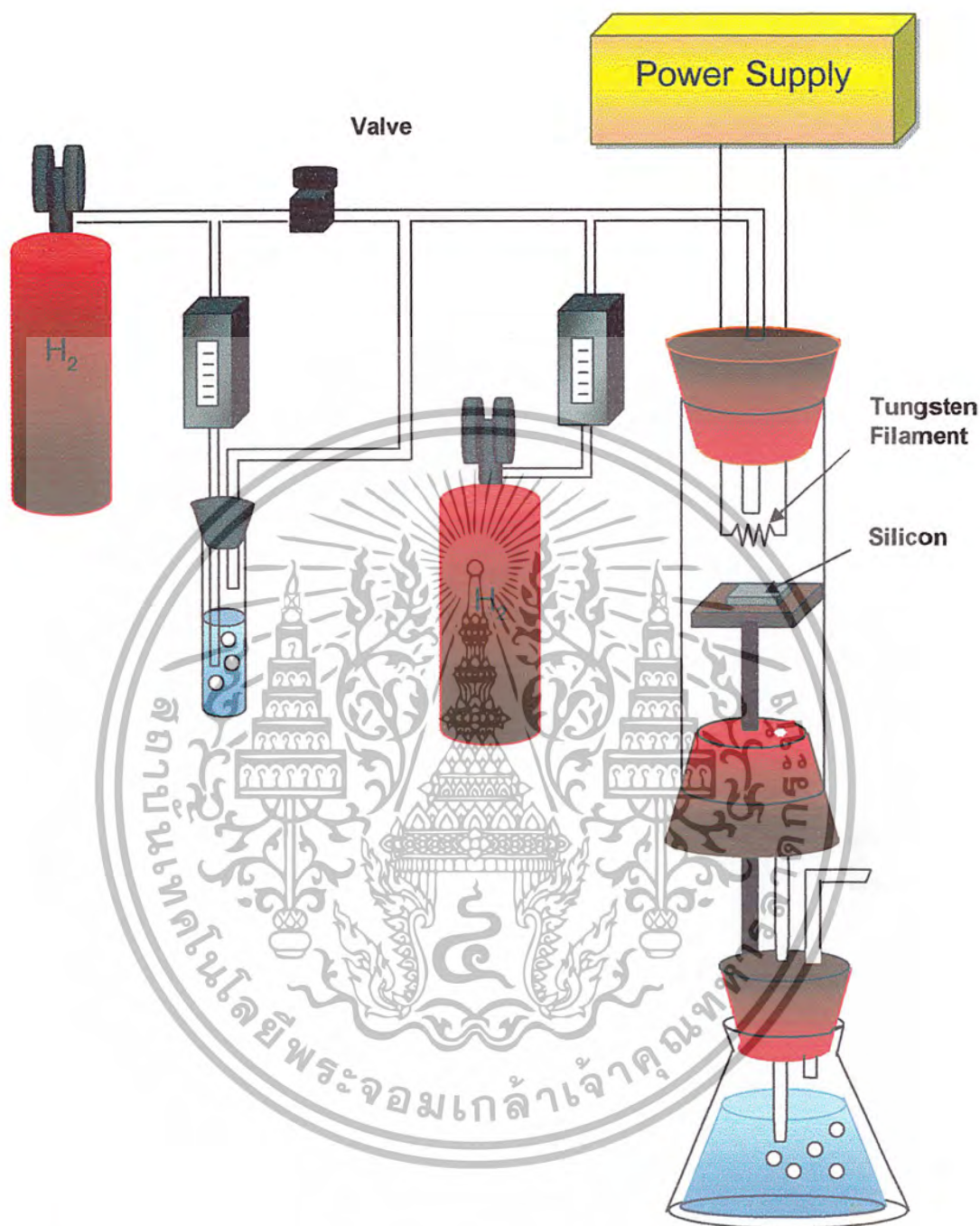
4. เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างฟิล์มเพชรแล้วค่อยๆ ลดระยะห่างระหว่างแผ่นพอร์สซิกอนกับไส้หลอดทั้งสแตนประมาณ 3 เซนติเมตร จากนั้นค่อยๆ ลดกระแสไฟฟ้า แล้วจึงปิดแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรเจนทั้งสองถึง รอจนกระทั่งไม่มีก๊าซไฮโดรเจนค้างใน Chamber แล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปสู่กระบวนการถัดไป

3.2.2 กระบวนการทำความสะอาดฟิล์มเพชร

หลังจากที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเรียบร้อยแล้วฟิล์มเพชรที่ได้มีความสกปรกเนื่องจากเขม่าคาร์บอนหรือกราฟิต์จากกระบวนการสร้าง ขั้นตอนการทำความสะอาดมีดังนี้

- ล้างน้ำ DI ในเครื่องสั่นความถี่สูง แล้วล้างด้วยน้ำ DI
- ดับในสารละลายไตรโครเอทพิลีน แล้วล้างในสารละลายอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง แล้วจึงล้างด้วยน้ำ DI
- ดับในสารละลายกรดไนตริก ล้างออกด้วยน้ำ DI ดับ แล้วจึงล้างออกด้วยน้ำ DI
- แช่ในสารละลาย HF 5% แล้วล้างออกด้วยน้ำ DI





รูปที่ 3.3 โคอะแกมอย่างง่ายของระบบ HFCVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

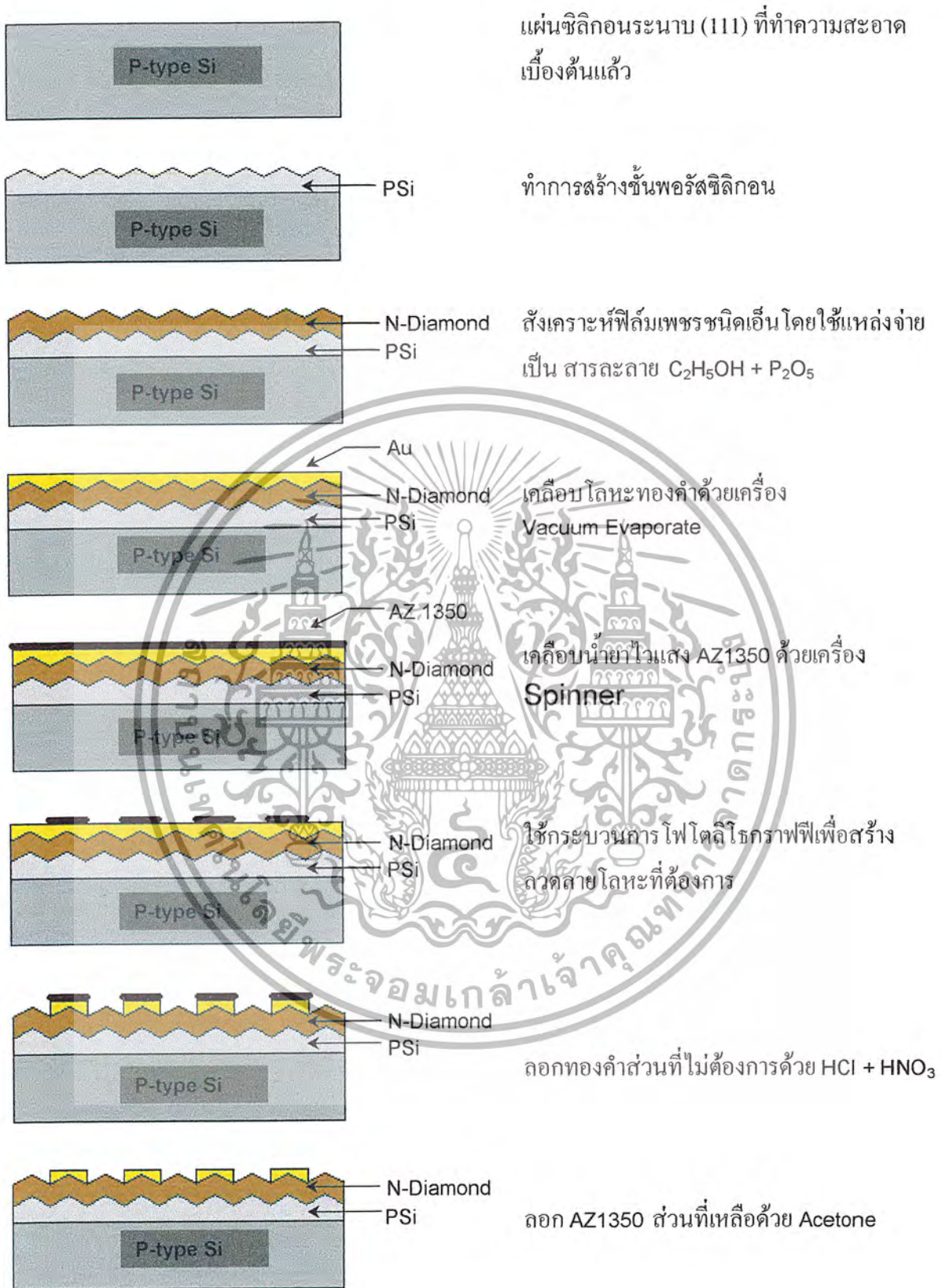
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์มีขั้นตอนดังนี้

- นำแผ่นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.1 ไปทำการสังเคราะห์ชั้นของฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมระหว่างแอลกอฮอล์(C_2H_5OH)กับฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์(P_2O_5) แล้วทำความสะอาดฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2
- ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
- ทำการลอกทองคำส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด $HCl+HNO_3$ โดยแผนภาพกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.4





รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดรอยต่อแบบ n-Dia/p-PSi

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติระหว่างรอยต่อของ n-Dia/p-PSi ว่ามีลักษณะกระแสและแรงดันเป็นเช่นไร เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ P:C และเมื่อมีแสงมาตกกระทบที่ค่าความเข้มแสงต่างกัน

3.4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดอย่างไร โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ทำการเตรียมแผ่นฐานรองรับฟอสซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2.1 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P:C) 10000 ppm, 30000 ppm และ 50000 ppm โดยใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชร 60 นาที
- นำแผ่นชิ้นงานที่สร้างได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อที่ 3.2.2
- นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
- ทำการเคลือบโลหะด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- จากนั้นทำการวัดผลของอัตราส่วนของ P:C ที่มีต่อกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

3.4.2 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

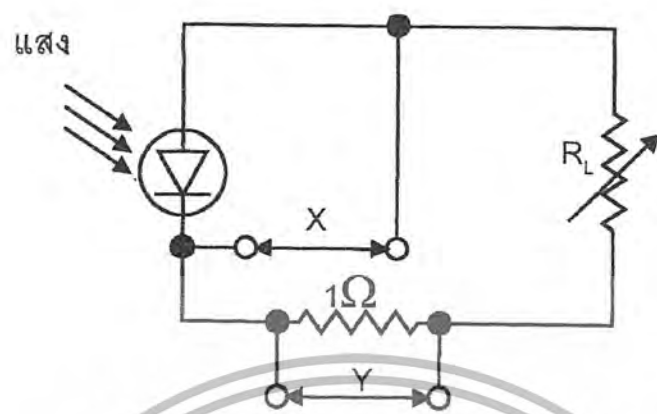
การศึกษาในหัวข้อนี้เพื่อจะดูว่าลักษณะของกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1 โดยให้ความเข้มแสงมากขึ้นเรื่อยๆ 3 ระดับ คือ $Lux3 > Lux2 > Lux1$

3.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ P:C ต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ n-Dia/p-PSi

การศึกษาในหัวข้อนี้จะใช้เงื่อนไขในการสร้างชิ้นงานเหมือนกับในหัวข้อที่ 3.4.1 ทุกอย่างคือใช้เวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร 60 นาที อัตราส่วน P:C เป็น 10000 ppm, 30000 ppm และ 50000 ppm ในการทดลองนี้จะทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ได้รับแสงโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเครื่อง Solar Simulator ที่มีความเข้มแสงประมาณ 0.835 mW/mm^2 หรือที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AM1.5 โดยใช้วงจรในการวัดข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งใช้ X-Y recorder เป็นตัวบันทึกผล จากนั้นคำนวณค่าต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์



บทที่ 4

ผลการทดลอง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างและการกำหนดเงื่อนไขการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ จากบทที่ 3 แล้ว ในบทนี้จะเป็นการเสนอผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองดังต่อไปนี้

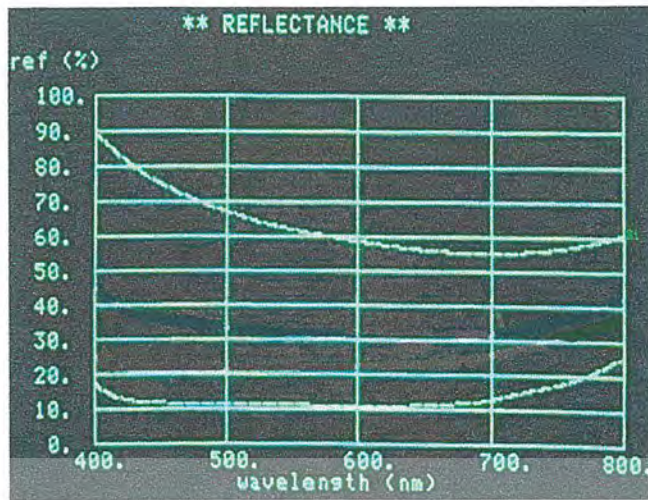
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของพอร์สซิลิกอน

จากการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนชนิดพี ระนาบ(111) ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลาย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ อัตราส่วนเท่ากับ 1:1:2 ใช้กระแส 15 mA/cm^2 และเวลาในการกัด 10 นาที พอร์สที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเท่ากับ 79% แสดงผลของพอร์สที่ได้ด้วยภาพถ่าย SEM ดังรูปที่ 4.1 และเมื่อทำการวัดเปอร์เซ็นต์รีเฟลกชันได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังการทดลอง

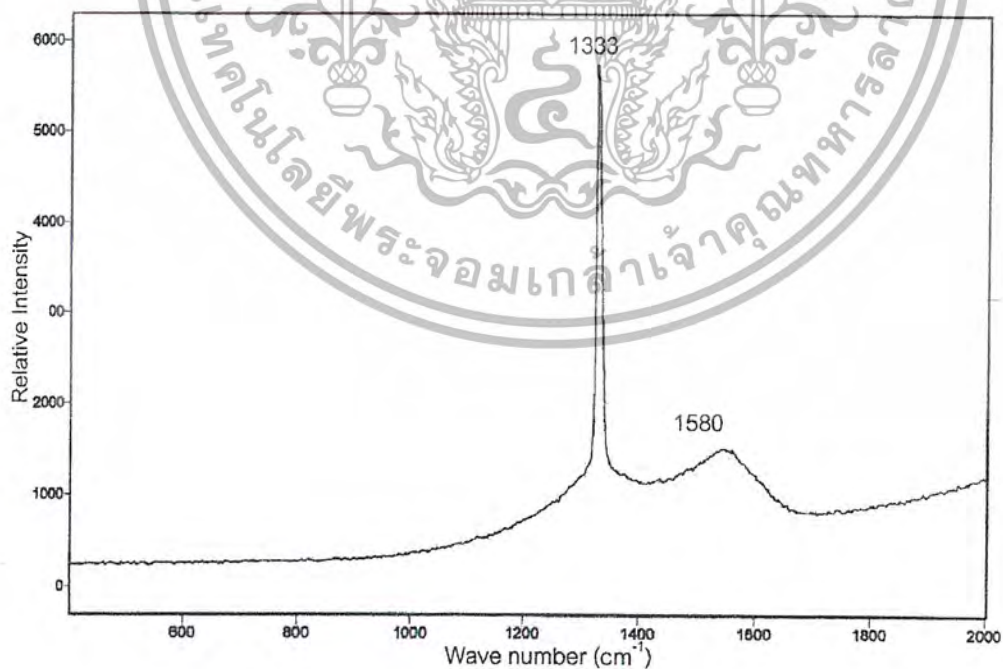
โดยใช้ความหนาแน่นกระแส 15 mA/cm^2 ที่เวลาในการกัด 10 นาที



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบ %Reflection ระหว่างผลึกซิลิกอน และพอลิซิลิกอนหลังกัดทางไฟฟ้าเคมี ความหนาแน่นกระแส 15 mA/cm^2 10 นาที ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ

4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ก่อนที่จะนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยอาศัยเทคนิค Scanning Electron Microscopy และ Raman Spectroscopy โดยผลการตรวจสอบ Raman Spectroscopy แสดงดังรูปที่ 4.3

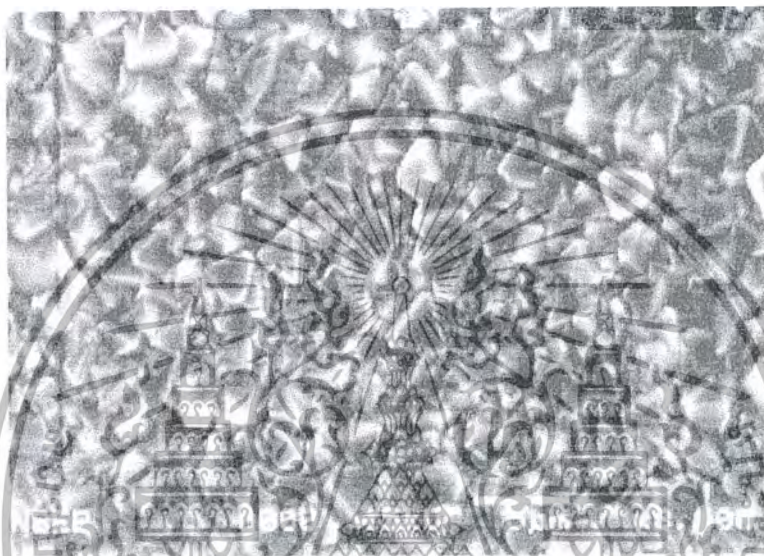


รูปที่ 4.3 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่ายอดคลื่นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 1333 cm^{-1} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งยอดคลื่นของเพชรธรรมชาติที่ 1332 cm^{-1} ซึ่งถือได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะใกล้เคียงเพชรจริง ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่า มียอดคลื่น 1580 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของกราฟไฟต์ แต่มีความสูงต่ำแสดงว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีกราฟไฟต์ปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ

หลังจากนั้นก็จะนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการตรวจสอบด้วยวิธี Scanning Electron microscopy ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโพลีไดโอด

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ

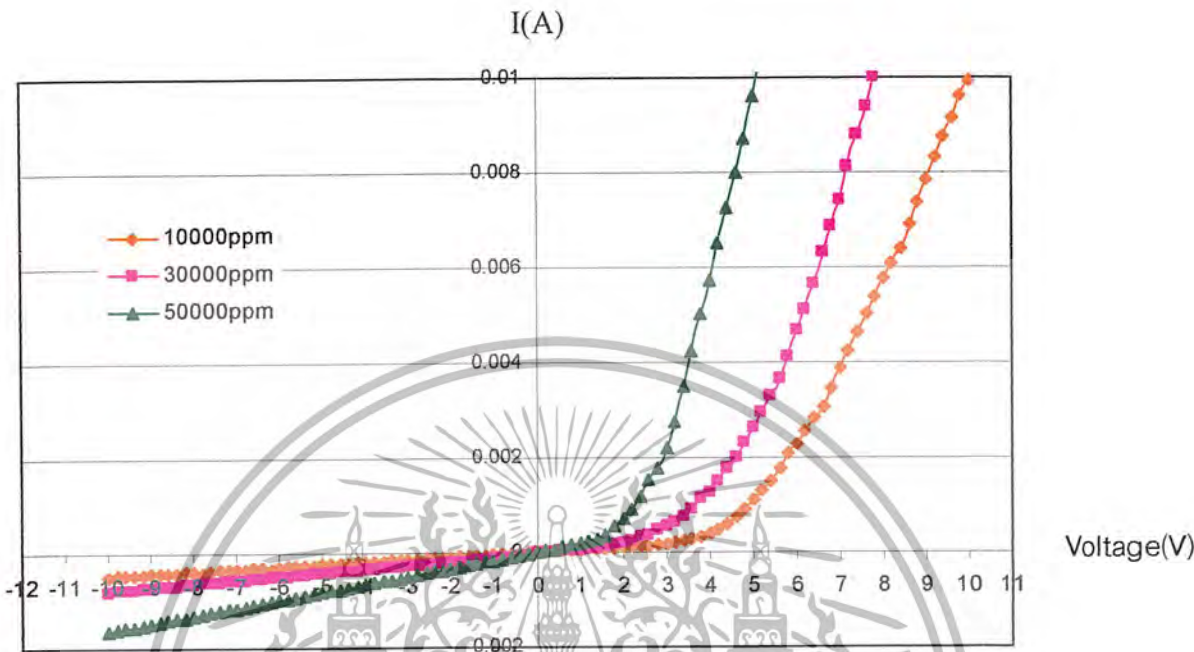
โพลี ไดโอด

หัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโพลีไดโอดโครงสร้าง n-Dia/p-Psi โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือเป็น 10000ppm, 30000ppm และ 50000ppm โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ P:C นั้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าทางด้านไบอัสตรงนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่แรงดันที่ 5V เท่ากันนั้น กระแสจะไหลได้ 1.1mA, 2.6mA และ 9.6mA ที่อัตราส่วน P:C

10000, 30000 และ 50000 ตามลำดับ และขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนั้น ที่อัตราส่วนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P:C เพิ่มขึ้นจะได้ว่า กระแสรั่วไหลย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย และจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าของ Threshold voltage ของไดโอดนั้นจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน P:C มีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.5 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า P:C

โดยจากการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอด เราสามารถใช้หาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของโฟโตไดโอดได้ โดย

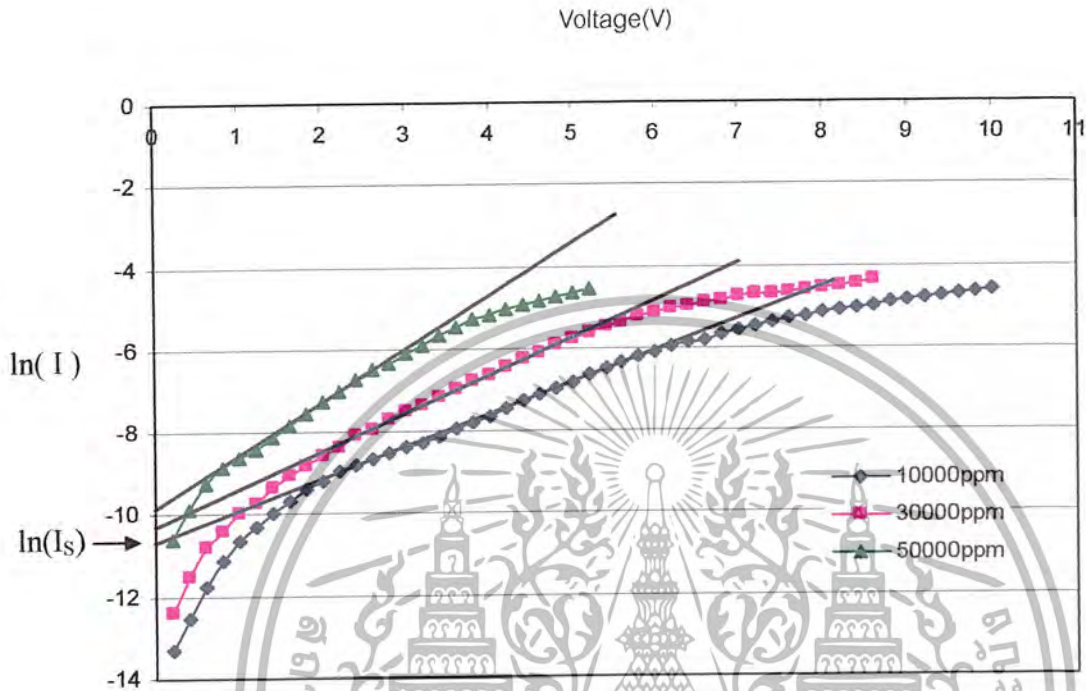
$$I = I_s \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) \tag{4.1}$$

$$\ln I = \ln I_s + \frac{qV_A}{kT} \tag{4.2}$$

เมื่อ $V_A = 0$ หรือสภาวะสมดุลความร้อนจะได้

$$\ln I = \ln I_s \tag{4.3}$$

จากสมการที่ (4.2) จะเห็นว่าถ้าหารแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับแรงดันไบอัสตรง (V) จะได้ลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งจะสามารถหาค่า I_s ได้ที่ $V_A = 0$ หรือที่สภาวะสมดุลความร้อน



รูปที่ 4.6 คุณลักษณะกึ่งล็อกกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนค่า P:C

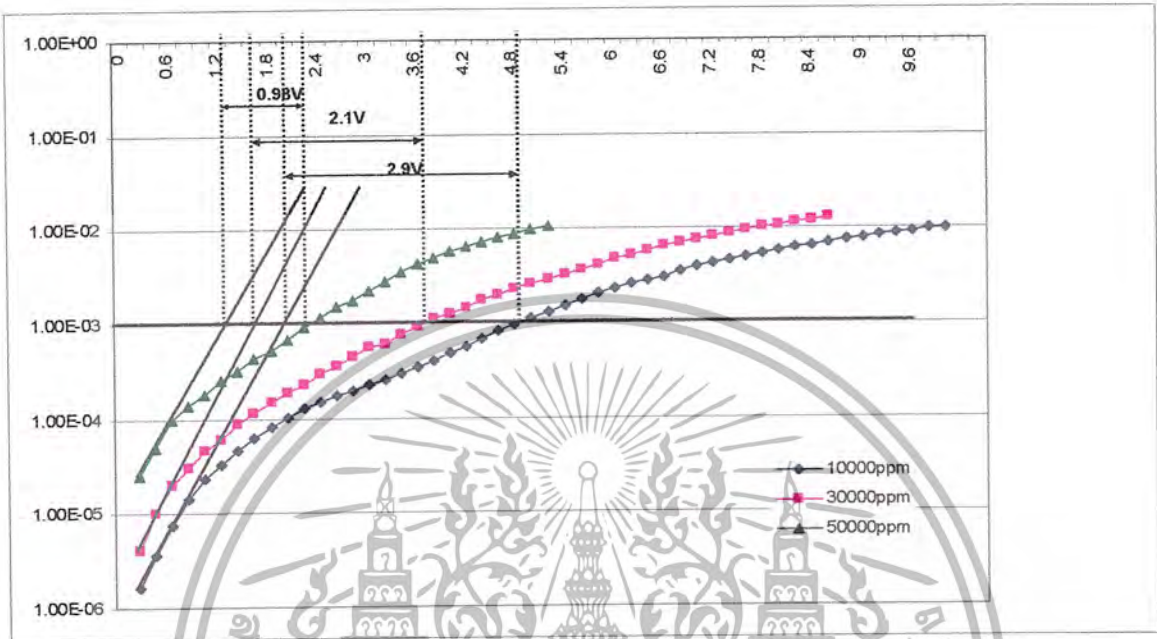
จากรูปที่ 4.6 เราสามารถหาค่า I_s ที่ค่าอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากตารางจะเห็นว่าค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอะตอมสารเจือมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ค่าของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่ค่าต่างๆ

P:C	I_s (μA)
10000ppm	21.4
30000ppm	32.6
50000ppm	51.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.7 สามารถหาค่า R_s ของไดโอด ซึ่งค่า R_s นี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีการหาค่า R_s นั้นได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่า R_s จากรูปที่ 4.7 โดยได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.7 วิธีการหาค่า R_s เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

ตารางที่ 4.2 ค่า R_s เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

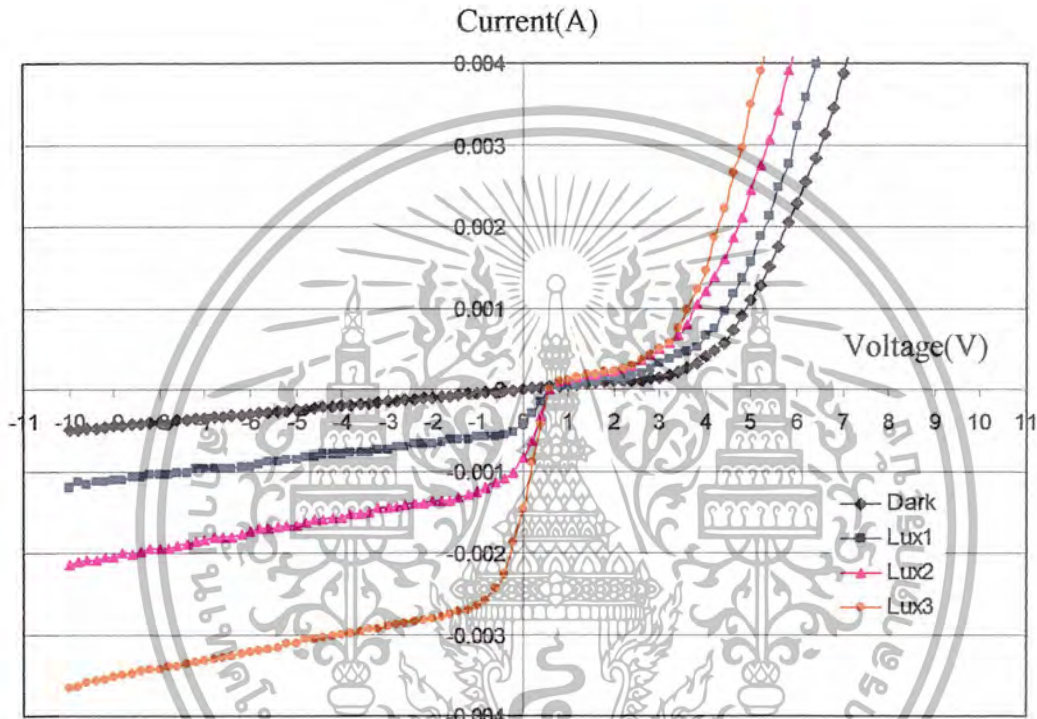
P:C	I(mA)	$\Delta V(V)$	$R_s (\Omega)$
10000ppm	1	2.9	2900
30000ppm	1	2.1	2100
50000ppm	1	0.98	980

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่า R_s จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสมีค่ามากขึ้น ดังนั้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นต้องคำนึงถึงค่า R_s ด้วย โดยสามารถทำการเปลี่ยนแปลงค่า R_s โดยการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ซึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นค่าของ R_s จะต้องมีค่าต่ำที่สุด ในอุดมคติแล้วค่าของ R_s ควรจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ทั้งนี้ต้องระวังด้วยการเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสมากๆ นั้นจะทำให้เกิดกระแสในตัวไหลย้อนกลับมากขึ้นก็จะส่งผลเสียให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน

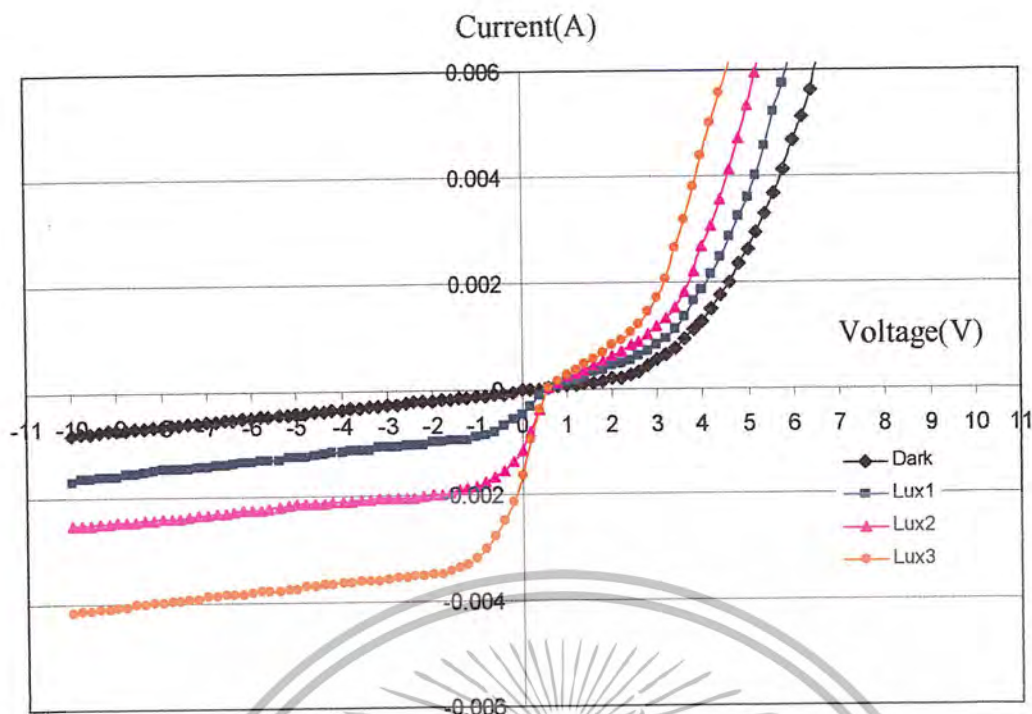
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

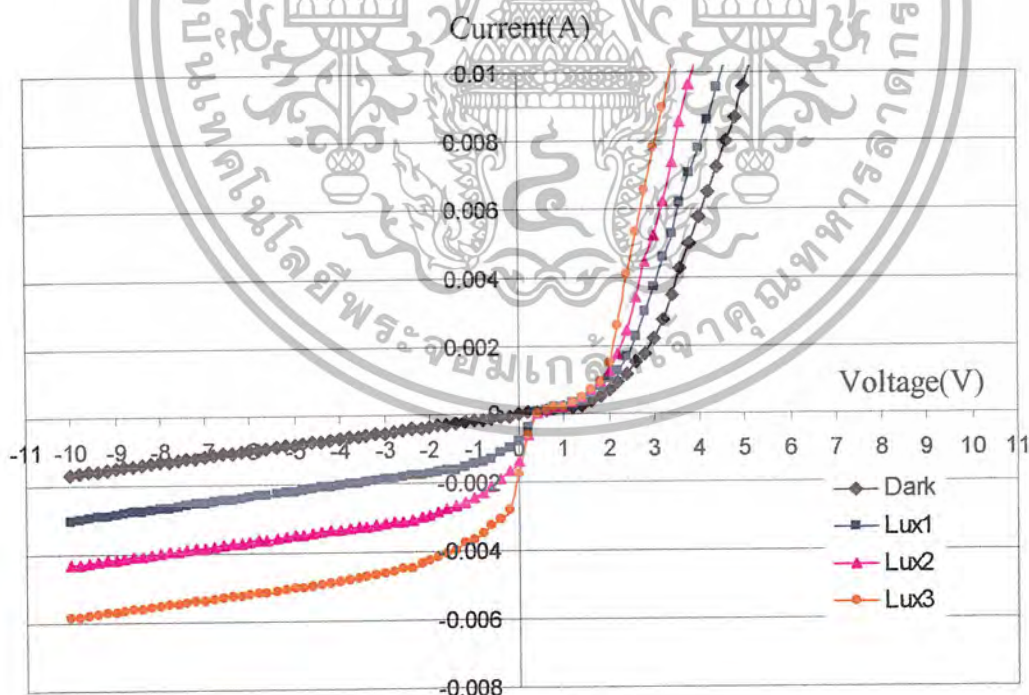
ในการศึกษาหัวข้อนี้ก็เพื่อที่จะศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด ซึ่งใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง 3 ระดับคือ Lux1, Lux2 และ Lux3 โดยที่ $Lux3 > Lux2 > Lux1$ โฟโตไดโอดที่ใช้ศึกษาจะมีอัตราส่วนของอะตอมสารเจือเป็น 10000ppm, 30000ppm และ 500000ppm ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 – 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเป็น 10000ppm



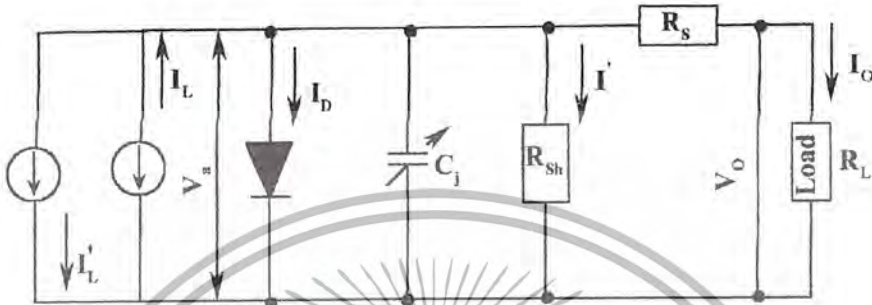
รูปที่ 4.9 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเป็น 30000ppm



รูปที่ 4.10 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเป็น 50000ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8-4.10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าของความเข้มแสงจากหลอดทั้งสแตน ปริมาณกระแสช่วงไบอัสย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในช่วงไบอัสตรงนั้นปริมาณกระแสก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่น้อยกว่าช่วงไบอัสย้อนกลับมาก ในการอธิบายผลการทดลองนั้นสามารถอธิบายได้โดยอาศัยวงจรสมมูลของรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน ซึ่งได้มีการนำเสนอวงจรสมมูลแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่ามีค่าของ I'_L ซึ่งคือค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะ โดยมีทิศทางตรงข้ามกับ I_L ดังนั้น

$$I_o = I_L - I_D - I' - I'_L = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_A}{kT} - 1 \right) - I' - I'_L \quad (4.4)$$

เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงบริเวณปลอดประจุพาหะ จะแคบลงและศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจะมีค่าลดลง ดังนั้นประจุพาหะที่เกิดจากแสงนอกช่วงปลอดประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้ประจุพาหะส่วนมากเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อมีการให้ไบอัสตรงและทำการฉายแสงจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุตไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้นสมการ (4.4) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$I_o = -I_s \left(\exp \frac{qV_A}{kT} - 1 \right) - I' - I'_L \quad (4.5)$$

สมการที่ (4.5) สามารถตัดค่าของ I'_L ได้เนื่องจากมีค่าน้อย ซึ่งเกิดจากการที่โฟโตไดโอดได้รับการไบอัสตรงนั้นจะทำให้บริเวณปลอดประจุพาหะมีค่าน้อยลงและสนามไฟฟ้าในบริเวณ

ปลอดประจุพาหะมีค่าน้อยลง โดยกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะส่วนมาก และการเคลื่อนที่ของประจุพาหะบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะ ดังนั้นเมื่อให้ การไบอัสตรงพร้อมกับฉายแสงที่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นทำให้ได้กระแสออกมาเพิ่มขึ้น

ในกรณีการไบอัสย้อนกลับพร้อมกับการฉายแสง กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการ

$$I_o = I_L - I_S - I' - I'_L \quad (4.6)$$

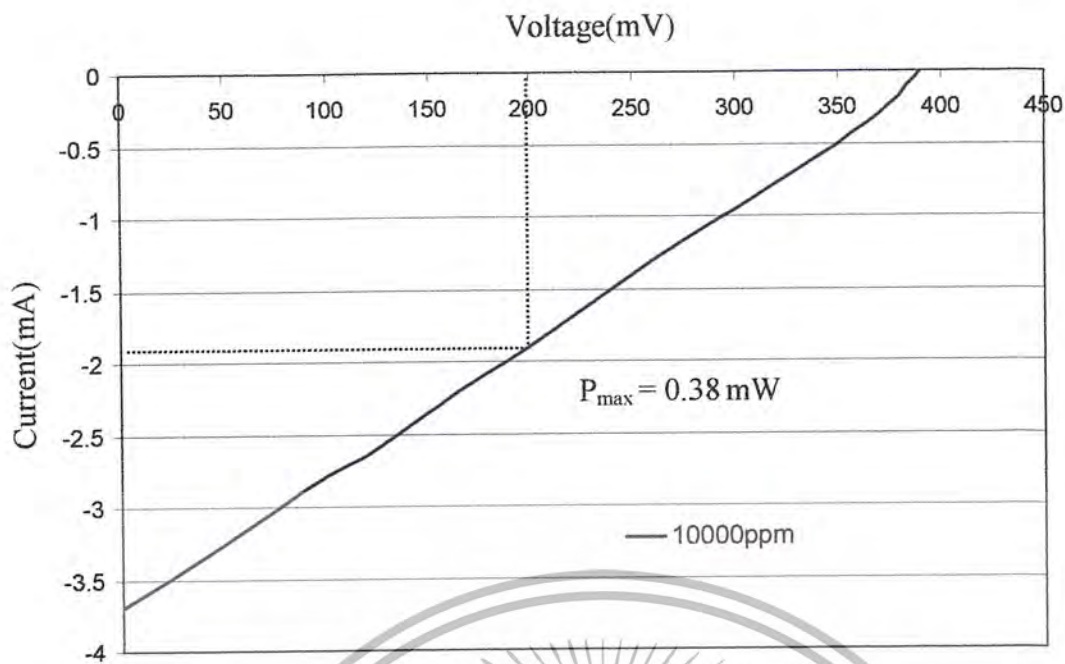
กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณช่วงปลอดประจุพาหะ ค่าของ I'_L จึงสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากประจุพาหะที่เกิดนอกบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ เนื่องจากกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ

4.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อที่แล้วได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดกับเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่การใช้งาน ซึ่งโฟโตไดโอดนั้นจะใช้งานในช่วงจตุภาคที่ 3 แต่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำงานอยู่ในจตุภาคที่ 4

4.4.1 ผลของความเข้มของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

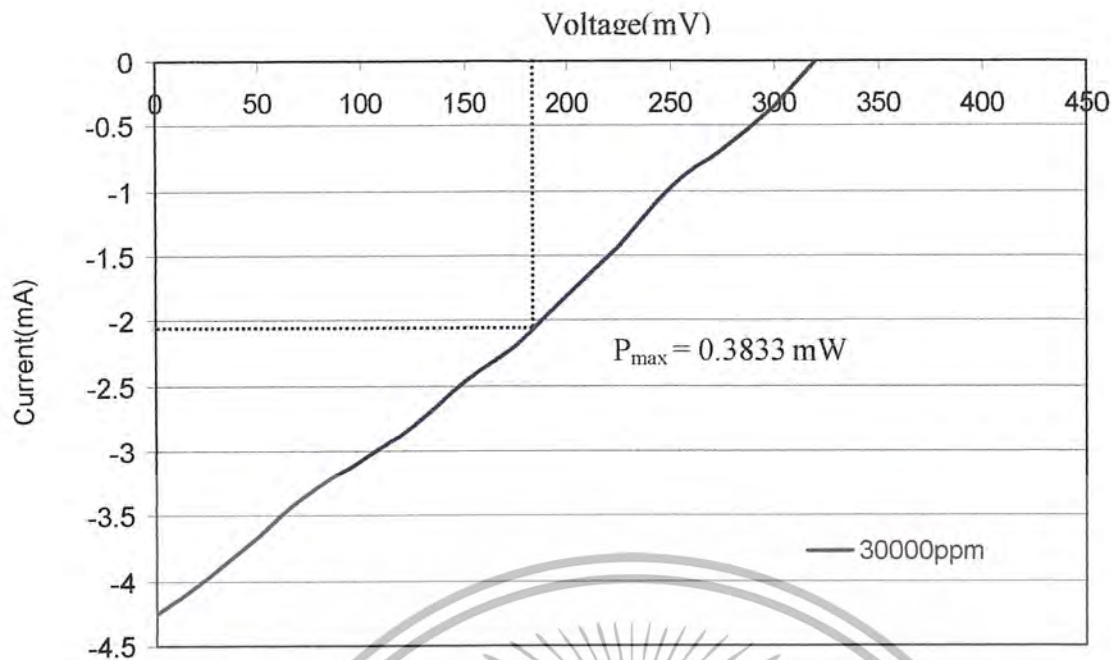
การศึกษาค่าความเข้มของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จะทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มของอะตอมสารเจือเป็น 10,000ppm, 30,000ppm และ 50,000ppm โดยจะใช้แสงอาทิตย์เทียมจากเครื่อง Solar simulator ที่มีความเข้มแสงประมาณ 0.835 mW/mm^2 หรือที่ AM1.5 โดยใช้วงจรการวัดเป็นดังรูปที่ 3.5 ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.12-4.14



รูปที่ 4.12 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 10000ppm

ตารางที่ 4.3 ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 10000ppm

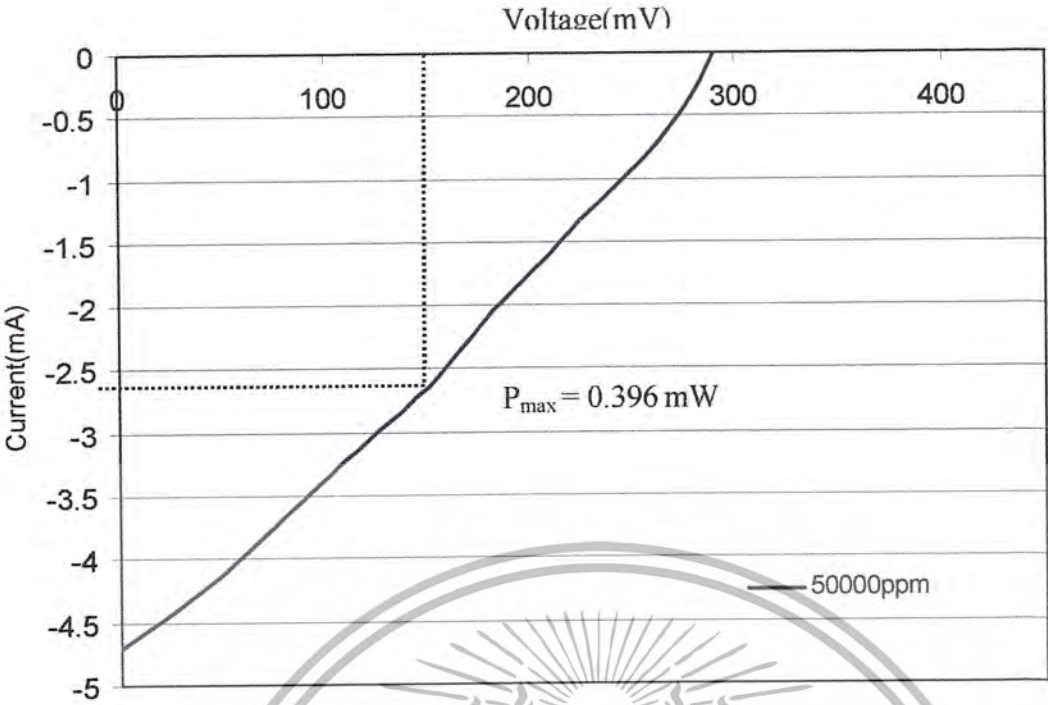
กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	3.7
แรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} (mV)	390
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (mm ²)	3.4
พลังงานสูงสุด = $I_{max} \times V_{max}$ (mW)	0.38
ฟิลแฟกเตอร์ $FF = \left[\frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \right]$	0.2633
ประสิทธิภาพ = $\frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{AM1.5}} \times 100\%$	13.38



รูปที่ 4.13 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 30000ppm

ตารางที่ 4.4 ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 30000ppm

กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	4.25
แรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} (mV)	320
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (mm ²)	3.4
พลังงานสูงสุด = $I_{max} \times V_{max}$ (mW)	0.3833
ฟิลล์แฟกเตอร์ $FF = \left[\frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \right]$	0.2818
ประสิทธิภาพ = $\frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{AM1.5}} \times 100\%$	13.5



รูปที่ 4.14 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 50000ppm

ตารางที่ 4.5 ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ P:C เป็น 50000ppm

กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	4.7
แรงดันขณะเปิดวงจร V_{oc} (mV)	290
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (mm^2)	3.4
พลังงานสูงสุด $= I_{max} \times V_{max}$ (mW)	0.396
ฟิลแฟกเตอร์ $FF = \left[\frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \right]$	0.29
ประสิทธิภาพ $= \frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{AM1.5}} \times 100\%$	13.94

จากการทดลองผลของอัตราส่วนของ P:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้น จะได้ว่าที่อัตราส่วนของ P:C 50000ppm นั้นจะให้ประสิทธิภาพของเซลล์มากที่สุดคือ 13.94% รองลงมาก็คือที่อัตราส่วนของ P:C 30000ppm และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10000ppm ซึ่งจะมีประสิทธิภาพ 13.5 %และ 13.38% ตามลำดับ ส่วนแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ที่อัตราส่วน P:C ที่ 10000ppm จะมีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.39 V และที่อัตราส่วนของ P:C ที่ 30000 และ 50000 ppm จะมีค่าแรงดันเปิดวงจรเท่ากับ 0.32 V และ 0.29 V ตามลำดับ ส่วนกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราส่วนของ P:C ที่ 50000ppm จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4.7mA ส่วนลดลงมากที่สุดคือ ที่อัตราส่วนของ P:C ที่ 30000 และ 10000ppm จะมีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 4.25mA และ 3.7mA ตามลำดับ

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกรณีที่มีอัตราส่วนของ P:C ที่ 10000 ppm มีค่ามากที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วน P:C ที่ 10000ppm นั้น มีกระแสรั่วไหลย้อนกลับน้อยที่สุดนั่นเอง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้ารั่วไหลย้อนกลับซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ด้วยสมการดังนี้ จากสมการที่ 4.4 กระแสเอทพุตของโฟโตไดโอดมีค่าเท่ากับ

$$I_0 = I_L - I_D - I' - I'_L = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_A}{kT} - 1 \right) - I' - I'_L$$

เมื่อให้ $I_0 = 0$ จะหาค่าของแรงดันเอทพุตเปิดวงจร V_{oc} ได้ดังสมการ ซึ่งจากสมการที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสรั่วไหลย้อนกลับมีค่ามากขึ้นนั้น ค่าของแรงดันเอทพุตเปิดวงจรจะมีค่าลดลง ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น กระแสรั่วไหลย้อนกลับของที่อัตราส่วนของ P:C ที่ 10000ppm นั้นมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น ค่าของแรงดันเอทพุตเปิดวงจร ของอัตราส่วนของ P:C ที่ 10000ppm จึงมีค่ามากที่สุด

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_L - I' - I'_L}{I_s} \right] \quad (4.7)$$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อของเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและพอร์ซซิติกอนชนิดพี ซึ่งการวิจัยสามารถสรุปผลการทดลองในหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

ในส่วนแรกนั้นจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติของพอร์ซซิติกอนที่เกิดจากการกัดด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลาย $\text{HF} : \text{H}_2\text{O} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ในอัตราส่วน 1 : 1 : 2 ความหนาแน่นกระแส 15 mA/cm^2 เวลาในการกัด 10 นาที จากผลการทดลองพบว่าพอร์ซซิติกอนที่ได้มีค่าความพรุน 79% และเปอร์เซ็นต์รีเฟลกชัน 11% แสดงให้เห็นว่าพอร์ซซิติกอนมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงที่ดี

จากการศึกษาคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดที่สร้างจากรอยต่อของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและพอร์ซซิติกอนชนิดพีนั้นพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของอะตอมสารเจือ (P:C) ให้มีค่ามากขึ้น จะทำให้ปริมาณการไหลของกระแสทั้งทางด้านไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ (P:C) แต่ในช่วงไบอัสตรงนั้นปริมาณกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าช่วงไบอัสย้อนกลับมาก ส่วนค่าความต้านทานอนุกรมภายในนั้นจะแปรผกผันกับอัตราส่วนของ (P:C) คือเมื่ออัตราส่วนของ (P:C) มีค่าน้อยๆ ค่าความต้านทานอนุกรมภายในจะมีค่ามาก และเมื่ออัตราส่วนของ (P:C) มีค่ามากๆ ค่าความต้านทานอนุกรมภายในจะมีค่าน้อย

จากการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและพอร์ซซิติกอนชนิดพี ให้เวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร 60 นาที ทำการศึกษาโดยใช้แสงอาทิตย์เทียมจากเครื่อง Solarsimulator ที่มีความเข้มแสงประมาณ $0.835 \text{ mW}/\text{mm}^2$ หรือที่ AM1.5 พบว่าแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราส่วน P:C เท่ากับ 10000ppm จะมีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.39 V ส่วนกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราส่วนของ P:C ที่ 50000ppm จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4.7mA และเมื่อคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า อัตราส่วนของ (P:C) ที่ 50000ppm นั้นจะให้ค่าพลังงานไฟฟ้าออกมามากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 0.396 mW และมีค่าประสิทธิภาพมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 13.94% ในพื้นที่รับแสง 3.4 mm^2

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบรอยต่อของเนื้อสารต่างชนิดกัน ของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและพอร์ซซิติกอนชนิดพี ใช้กระบวนการสร้างที่ง่าย ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นๆ และยังได้ค่าประสิทธิภาพที่สูง ผู้วิจัยจึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ศึกษาและสนใจจะพัฒนางานวิจัยในด้านนี้ให้ดีขึ้น และสามารถใช้งาน ได้จริงในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. นิรุช ปิ่นเกตุ “การศึกษาและการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544
2. Leigh Canham. 1997. **Properties of Porous Silicon**. London. Inspec.
3. Matsuo Fukada. **Optical Semiconductor Devices**. United State of America : John Wiley & Sons,INC.
4. สมเกียรติ สุกเดช.2545. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์.พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ
5. Kanaan Kano. **Semiconductor Devices**. : Prentice-Hall,International,Inc.
6. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง “การศึกษาคุณสมบัติอุณหภูมิต่ำของชั้นพอร์สซิลิกอน” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542
7. Lawrence S. Pan, Don R.Kania, 1995. **Diamond : Electronic Properties and Applications**. Boston : Kluwer Academic Publishers.
8. ดุสิต เรืองงาม. “สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งานต่างๆ เล่ม 1” สำนักพิมพ์แสงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง “การศึกษาคุณสมบัติอุณหภูมิต่ำของชั้นพอร์สซิลิกอน” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542
10. คณะรัชต์ วรรณ “การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของพอร์สซิลิกอนและฟิล์มเพชร” วิทยานิพนธ์ สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities

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

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบ Molar Heat capacity

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบ Thermal Expansion Coefficients

Material	Coefficient ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)
Silicon Dioxide	0.5
Diamond(300K)	0.8
Diamond(193K)	0.4
Diamond(400-1200K)	1.5
Silicon	2.6
Aluminum nitride	4.5
Tungsten (Polycrystal)	4.5
Sapphire	5.5
Germanium	5.7
Gallium Arsenide	5.9
Beryllium Oxide	5.9
YAG	7.8
Graphite (in plane)	8.8
Platinum (Polycrystal)	8.9
Gold (Polycrystal)	14.1

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบ Hardness

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้