

การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน
ของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน

STUDIES AND FABRICATION OF DIAMOND THIN FILM AND SILICON
HETEROJUNCTION OF SOLAR CELL



T 0 4 0 6 2 9



นิรุท ปิ่นเกตู

NIRUT PINGATE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

๗๖

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

๗๖

บัณฑิตวิทยาลัย

๗๖

เลขหมู่.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขทะเบียน..... 40629

พ.ศ. 2544

วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2544

ISBN 974-648-389-7

b.11182015

i.....

**STUDIES AND FABRICATION OF DIAMOND THIN FILM AND SILICON
HETEROJUNCTION OF SOLAR CELL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2001
ISBN 974-648-389-7**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน

นักศึกษา

นายนิรุธ ปิ่นเกตุ

รหัสประจำตัว

40061056

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2544

อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อของเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิกอนชนิดเอ็น โดยขั้นตอนแรกนั้นได้ทำการศึกษาคูสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชรพบว่า อัตราส่วนสภาพนำไฟฟ้าทางแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด (σ_{ph}/σ_D) มีค่าที่ดีที่สุดที่อัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอนที่ 10 ppm ส่วนผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชรนั้นจะอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 225 nm ในขณะที่ผลตอบสนองทางแสงของซิลิกอนอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ 800 nm ต่อจากนั้นทำการศึกษาโฟโตไดโอดโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโบรอนต่อคาร์บอน 1, 10, 100 และ 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชร 1, 2, 3, 4 และ 5 μm พบว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.081 mA/1000 lux/mm² และจากการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 620 nm ซึ่งเป็นช่วงการตอบสนองของซิลิกอนคาร์บาย และค่าของ V_{oc} และ J_{sc} มากที่สุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 0.41 V และ 1.38 mA/mm² ตามลำดับ โดยมีพื้นที่รับแสงเท่ากับ 3.4 mm² ส่วนผลของอุณหภูมินั้นพบว่าอัตราการลดลงของ V_{oc} คือ 1.5mV/°C และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในเบื้องต้นมีประมาณ 13.8 %

Thesis Title	Studies and Fabrication of Diamond Thin Film and Silicon Heterojunction of Solar Cell
Student	Mr. Nirut Pingate
Student ID	40061056
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

In this thesis, the electrical properties of diamond thin film silicon heterojunction of solar cell was studied. Mainly, the light property of diamond, heterojunction photodiode and solar cell were studied. The investigation was demonstrated that the optimization ratio of photoconductivity and dark-conductivity (σ_{ph}/σ_D) was 10 ppm for boron/carbon (B/C) concentration ratio. The spectral response of diamond film and silicon was existed in wavelength range of 225 nm and 800 nm, respectively. Thickness of diamond film (1 μ m, 2 μ m, 3 μ m, 4 μ m and 5 μ m) and B/C ratio (1 ppm, 10 ppm, 100 ppm and 1000 ppm) were subsequently expedited for photodiode resulting maximum photo-current, 0.081 mA/1000 lux/mm², at 3.4 mm² optically active area. Latterly, the spectral response of solar cell was existed experimentally in wavelength range of 620 nm which was the spectral response of silicon carbine (SiC). The maximum open-circuit voltage (V_{OC}) and the short-circuit current density (J_{SC}) of solar cell were 0.41V and 1.38 mA/mm², respectively. For temperature concerned, the decrement rate of V_{OC} was verified at 1.5 mV/°C. Furthermore, the efficiency of this heterojunction solar cell was gained approximately 13.8%.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ ความรู้ และความเอาใจใส่ดูแลต่างๆ ที่ได้รับ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยดีมาตลอด ขอขอบพระคุณ Prof.Dr. Masamori Iida จาก Tokai University สำหรับคำแนะนำทางวิชาการที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ Assoc.Prof Yoichi Yasumura ที่ใช้คำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องมือวัด และคำแนะนำเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณ อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ (พี่หมุ) สำหรับความเป็นห่วงและดูแล พี่ภควัด สรวัย สุวรรณ พี่กอบศักดิ์ ศรีประภา พี่ภาณุพันธ์ โอฬารกิจไพบลีย์ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องวิจัยสารนำไฟฟ้า ยิ่งขวด ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงาน อู๋ จากบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณ คุณ ไพयर วิทยาขจรศาสตร์ และ คุณ ธรรมนิศ์ จากบริษัท NS Electronic ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Raman Spectroscopie ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีพลังงานและพลังงานสะอาด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องแสงอาทิตย์เทียม ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์ และการสื่อสาร ทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาด้วยดี

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณอุษารัตน์ นพคุณ และครอบครัวนพคุณ ที่ให้กำลังใจมาตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อ(ขอให้มีความสุขในสรวงสวรรค์) คุณแม่ และพี่ๆ ทั้งสอง พี่เขย ที่สนับสนุนและมอบสิ่งดีๆ ในชีวิต ที่มีค่าด้วยดีมาตลอด

นิรุช ปิ่นเกตุ

สารบัญ

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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.7.1 กระบวนการของก๊าซเฟส.....	12
1.7.2 ปฏิกิริยาการฉีกตัวลิเธียม.....	13
1.8 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	14
1.8.1 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM.....	14
1.8.2 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	18
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง.....	18
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง.....	18
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง.....	19
2.1.3 การเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง.....	20
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
2.2.2 พลังงานแสงที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์.....	22
2.2.3 ผลตอบสนองต่อความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.3 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....	23
2.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอนินทรีย์.....	23
2.3.2 สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพี.....	24
2.4 ทฤษฎีรอยต่อ.....	24
2.4.1 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารชนิดเดียวกัน.....	24
2.4.2 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารต่างชนิดกัน.....	24
2.4.2.1 การไบแอสตรงให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si.....	29
2.4.2.2 การไบแอสย้อนกลับให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si.....	31
2.5 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก.....	32
2.5.1 โฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive).....	32
2.5.2 โฟโตโวลตาอิก.....	32
2.6 โฟโตไดโอด(Photodiode).....	35
2.6.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **IV** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	38
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells).....	39
2.7.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์.....	40
2.7.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (Homojunction solar cell).....	40
2.7.1.1.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	41
2.7.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction solar cell).....	44
2.7.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชั้นดีในเซลล์ แสงอาทิตย์.....	49
2.7.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	52
2.7.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	52
2.7.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L	52
2.7.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_D	53
2.7.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}	54
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	56
3.1 การเตรียมฐานรองซิลิกอน.....	56
3.1.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเบื้องต้น.....	56
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	57
3.3 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร.....	60
3.3.1 การออกแบบลวดลายโลหะ.....	60
3.3.1.1 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	60
3.3.1.2 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อศึกษาระยะห่างของลวดลาย โลหะที่มีผลต่อปริมาณการไหลของกระแสในฟิล์มเพชร.....	61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1.3 การออกแบบลวดลายโลหะของโฟโตไดโอดและเซลล์ แสงอาทิตย์.....	62
3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร.....	64
3.4 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM และ เทคนิค Raman Spectroscope.....	66
3.4.1 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM.....	66
3.4.2 การตรวจฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy.....	67
3.5 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงของ ฟิล์มเพชร.....	67
3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	67
3.5.2 การศึกษาผลของลวดลายโลหะที่มีต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าใน ฟิล์มเพชร.....	67
3.5.3 การศึกษาสภาพความนำไฟฟ้าและผลตอบสนองทางแสงทางแสง ของฟิล์มเพชร.....	69
3.6 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดรอยต่อแบบ p-Dia/n-Si.....	69
3.6.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแส และแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	71
3.6.2 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและ แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	71
3.6.3 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแส และแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	72
3.6.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของโฟโตไดโอด.....	72
3.7 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อแบบ p-Dia/n-Si.....	72
3.7.1 ผลของความเข้มข้นของอัตราส่วน B:C ต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7.2 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
3.7.3 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
3.7.4 การศึกษาผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
3.7.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์.....	74
3.7.6 การศึกษาผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.....	74
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	75
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	75
4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	76
4.3 ผลการศึกษาผลของลวดลายโลหะที่มีต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในฟิล์มเพชร.....	78
4.4 ผลการศึกษาสภาพความนำไฟฟ้าทางแสง และ ผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชร.....	80
4.5 ผลการศึกษาคุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อแบบ p-Dia/n-Si.....	83
4.6 ผลการทดลองการศึกษาคูสมบัติต่างๆของ โฟโตไดโอด.....	88
4.6.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	88
4.6.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	91
4.6.3 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	97
4.6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	102
4.7 ผลการศึกษาคูสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์.....	106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	102
4.7.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์.....	114
4.7.3 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	117
4.7.4 ผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสง อาทิตย์.....	118
4.7.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสง อาทิตย์.....	120
4.7.6 ผลการตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.....	121
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	124
เอกสารอ้างอิง.....	126
ภาคผนวก.....	127
ภาคผนวก ก.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนต์.....	9
1.2 ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน.....	17
2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่ 300K.....	28
4.1 ค่าตัวแปรต่างๆของฟิล์มเพชรชนิดพีที่ได้จากการทดลอง.....	78
4.2 ผลการทดลองระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะ.....	79
4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสภาพความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C ค่าต่างๆ.....	80
4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากทฤษฎีรอยต่อของ Anderson.....	84
4.5 ค่าของกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับของโฟโตไดโอดในกรณีค่า B : C ต่างๆกัน.....	90
4.6 แสดงค่าของ R_s ของโฟโตไดโอดที่ความเข้มข้นของ B:C ที่แตกต่างกัน.....	91
4.7 ตารางเปรียบเทียบการคำนวณกระแสที่เพิ่ม (mA) ขึ้นต่อความเข้มแสง (1000lux) ต่อพื้นที่รับแสง (cm^2) ของโฟโตไดโอดที่อัตราส่วน B:C ค่าต่างๆ.....	97
4.8 ตารางค่าของ R_s ของโฟโตไดโอดที่คำนวณได้จากรูปที่ 4.20.....	99
4.9 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2\mu m$	107
4.10 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 10 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2\mu m$	108
4.11 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 100 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2\mu m$	109
4.12 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2\mu m$	110
4.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับซิลิกอนและเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นซิลิกอนเนื่องจาก อุณหภูมิ.....	120
4.14 ตารางฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น.....	121

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
1.2 โครงสร้างผลึกของเพชร.....	5
1.3 โครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราฟาไฟต์และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในกราฟาไฟต์ และเพชร.....	7
1.4 แผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD.....	11
1.5 กลไกการนิวเคลียชันและการเกิดชั้น intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง.....	14
1.6 ลักษณะรูปพื้นผิวด้านหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM.....	15
1.7 Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนของ CH_4 / H_2 มีค่าต่างกัน (a) 0.5 % CH_4 / H_2 (b) 2.0 % CH_4 / H_2 (c) 5.0 % CH_4 / H_2	16
2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	19
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	19
2.3 ผลตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน.....	23
2.4 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (ก) ซิลิกอนชนิดเอ็น (ข) ฟิล์มเพชรชนิดพี.....	23
2.5 ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่ยังไม่นำมาต่อกัน.....	25
2.6 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันที่สภาวะสมดุล.....	26
2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น.....	29
2.8 กราฟคุณสมบัติกระแสแรงดันของ p-Dia/n-Si.....	29
2.9 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสตรง.....	30
2.10 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับ ในขณะ $V < V_R$	31
2.14 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น.....	36
2.15 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น.....	37
2.16 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด.....	39
2.17 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินฟราเรด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{oc} และความเข้มของแสงอินฟราเรด.....	39
2.18 ลักษณะการเกิดกระแสโฟโตในเซลล์แสงอาทิตย์.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	41
2.20 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	43
2.21 สเปกตรัมผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรโร.....	46
2.22 ลักษณะของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโรที่ไม่มีขดแหลม.....	46
2.23 ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโร.....	48
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บน กราฟแบบเซมิล็อก.....	50
2.25 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	51
2.26 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	51
2.27 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	52
2.28 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์.....	55
3.1 รูปลักษณะรอยขีดที่เกิดจากการขีดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 μm	57
3.2 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD.....	58
3.3 ไดอะแกรมระบบ CVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	59
3.4 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	60
3.5 รูปลวดลายโลหะเพื่อศึกษาระยะห่างของลวดลายโลหะที่มีผลต่อปริมาณการไหลของ กระแสในฟิล์มเพชร.....	61
3.6 รูปขยายของลวดลายโลหะ.....	62
3.7 รูปลวดลายโลหะของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์.....	62
3.8 รูปขยายของลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์.....	63
3.9 ลักษณะของกระเจกต้นแบบลวดลายโลหะของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์.....	63
3.10 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ.....	65
3.11 ความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างได้จากการใช้เวลาที่สร้างแตกต่างกัน.....	66
3.12 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะที่เกิดจากแสงผ่านขอบของเกรนของสารกึ่ง ตัวนำ.....	68
3.13 ลักษณะของกระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อของ p-Dai/n-Si.....	70
3.14 ลักษณะของกระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อของ p-Dai/n-Si เมื่อมีแสงมา ตกกระทบ.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 วงจรแสดงการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
3.16 วงจรการวัดผลของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์.....	74
4.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ(111)ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD.....	75
4.2 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD.....	76
4.3 ลักษณะของกราฟคุณสมบัติกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	77
4.4 ลวดลายโลหะทองคำบนฟิล์มเพชร.....	78
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างลายลวดโลหะกับความแตกต่างของปริมาณกระแสที่เกิดเนื่องจากแสง.....	79
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของ B:C.....	81
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าทางแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืดกับอัตราส่วนของ B:C.....	81
4.8 แสดงผลการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของฟิล์มเพชร.....	83
4.9 ลักษณะของกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อแบบ p-Dia/n-Si.....	84
4.10 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น.....	85
4.11 ลักษณะของแถบพลังงานเมื่อได้รับแรงดันไบแอสตรง.....	86
4.12 ลักษณะของแถบพลังงานเมื่อได้รับการไบแอสย้อนกลับ.....	82
4.13 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ B:C เป็น 1, 10, 100 และ 1000 ppm.....	88
4.14 คุณลักษณะกึ่งลึอกกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C.....	89
4.15 แสดงวิธีการหาค่าของ R_s ของโฟโตไดโอด.....	90
4.16 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี B:C ที่ 1 ppm เมื่อได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	92
4.17 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี B:C ที่ 10 ppm เมื่อได้รับ.....	92
4.18 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี B:C ที่ 100 ppm เมื่อได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชร.....	98
4.22 คุณลักษณะกึ่งลือกกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 10 ppm โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชร เพื่อหาค่าของ R_S	98
4.23 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ 1 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	99
4.24 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ 2 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	100
4.25 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ 3 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	100
4.26 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ 4 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	101
4.27 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ 5 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	101
4.28 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 10 ppm ความหนา 2 μm ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	102
4.30 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 10 ppm ความหนา 2 μm ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	103
4.31 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 10 ppm ความหนา 2 μm ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 200 °C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....	104
4.32 ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นในขณะที่ได้รับการไบแอสตรงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น.....	104
4.33 ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นในขณะที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นและได้รับการฉายแสง.....	105
4.34 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 10 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm	108
4.36 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 100 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm	109
4.37 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm	110
4.38 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรที่มีค่าเท่ากับ 2 μm	112
4.39 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรที่มีค่าเท่ากับ 2 μm	112
4.40 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อัตราส่วนของ B:C ที่ 100 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรที่มีค่าเท่ากับ 2 μm	113
4.41 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรที่มีค่าเท่ากับ 2 μm	113
4.42 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์.....	114
4.43 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์.....	114
4.44 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรค่าต่างๆ.....	115
4.45 ผลของความต้านทานที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	116
4.46 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อประสิทธิภาพที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	117
4.47 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีอัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1 ppm.....	118
4.48 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีอัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1000 ppm.....	118
4.49 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	119
4.50 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	119
4.51 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.52 ผลการตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อ

แบบ p-type Dia / n-type Si.....122

4.53 สเปกตรัมตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ของ SiC,.....123



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
c	ความเร็วแสง
c_0	ความเร็วแสงที่เดินทางในสุญญากาศ
C_j	ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็น
D	สัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร
D_e	สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของอิเล็กตรอน
E	พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ
E_C	แถบความนำ
E_{fn}	ระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน
E_V	แถบวาเลนซ์
\bar{E}	สนามไฟฟ้า
\bar{E}_0	แอมพลิจูดของ \bar{E}
e	ประจุไฟฟ้า
$F.F.$	ค่าฟิลด์แฟกเตอร์
G	อัตราการเกิดอิเล็กตรอนและ โฮลเนื่องจากแสง
h	ค่าคงที่ของพลังค์
\bar{H}	คลื่นแม่เหล็ก
\bar{H}_0	แอมพลิจูดของ \bar{H}
I_D	กระแสไฟฟ้ามืดในไดโอด
I_L	กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง
I_m	กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
I_0	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
I_s	กระแสไฟฟ้าย้อนกลับ
I_{ph}	กระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากแสง
I_{sc}	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร
I'_L	กระแสไฟฟ้าที่เกิคนอกบริเวณปอดคพาหะ
I'	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
J_{sc}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร
\vec{k}	เวกเตอร์ของเลขคลื่น
L_c	ระยะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอน
L_h	ระยะการแพร่ซึมของโฮล
M	แอร์แมสเอี่ยม
N	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำ
n	ค่าดัชนีหักเหแสง
P_m	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ
P_o	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ
p	ความหนาแน่นของจำนวนโฮล
q	ประจุไฟฟ้า
R_L	ความต้านทานโหลด
R_s	ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์
R_{sh}	ความต้านทานขนั้ด
\vec{r}	เวกเตอร์ระยะทาง
V_a	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด
V_b	แรงดันภายในของไดโอด
V_D	ศักย์ภายในที่เกิดขึ้นในรอยต่อ
V_m	แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
V_o	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
V_R	แรงดันขั้วเริ่มช่วง Reverse
V_F	แรงดันขั้วเริ่มช่วง Forward
V_{oc}	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร
w_{d1}	ค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะที่เกิดในส่วนของฟิล์มเพชร
w_{d2}	ค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะที่เกิดในส่วนของซิลิกอน
x	ระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

z	มุมระหว่างแนวของลำแสงที่ทำกับแนวตั้ง
α	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
χ_e	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
δ	มุมเฟส
ε	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
ε_0	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ
ϕ	ค่าฟังก์ชันงาน
ϕ_m	ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_s	ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$\phi(x)$	โพตential
λ	ความยาวคลื่นของแสง
σ	สภาพความนำไฟฟ้า
σ_D	สภาพนำไฟฟ้ามีด
σ_{ph}	สภาพนำไฟฟ้าทางแสง
τ	อายุของพาหะ
τ_e	อายุของอิเล็กตรอน
ν	ความถี่ของคลื่นแสง
ω	ความถี่เชิงมุมหมุน
$\psi(x)$	Electrostatic potential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

กระแสดำรวมตัว	Recombination
การนิวเคลียชัน	Nucleation
การแทรกสอด	Interference
การสะท้อน	Reflection
การหักเหของแสง	Refraction
กาวเงิน	Silver Paste
ขอบของเกรน	Grain boundary
ความนำจำเพาะของแสง	Photo Conductivity
ความไม่ต่อเนื่องแถบพลังงาน	Band discontinuity
ความไวแสง	Photosensitivity
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice constant
ค่ายอดลำดับที่สอง	Second order peak
ค่ายอดลำดับที่หนึ่ง	First order peak
เครื่องต้นความถี่สูง	Ultrasonic cleaning
จุดบกพร่อง	Defect state
ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง	Direct band gap
ชั้นแอร์แมสซีโร	Air Mass Zero, AM0
ชั้นแอร์แมสวัน	Air Mass One, AM1
ฐานรอง	Substrate
ไตรคลอโรเอทิลีน	Trichloroethylene
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden energy band
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized water
ปรากฏการณ์ทะลุผ่าน	Tunnelling effect
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	Photoelectric effect
ปริภูมิ	Space

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

พันธะแวนขาด	Dangling bond
พลังงานกระตุ้น	Activation energy
รอยต่อแอนไอโซ	Anisotype junction
รอยต่อชนิดไอโซ	Isotype junction
รอยต่อเฮเทอเจอร์	Heterojunction
เวลาอายุ	Life time
ศูนย์กลางการเก็บ	Trapping center
แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม	Solar simulator
อิเล็กตรอน	Electron
อนุภาค	Particle



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันนี้ฟิล์มเพชรได้เป็นที่รู้จักกันมากขึ้น ด้วยคุณสมบัติที่ดีหลายด้านของฟิล์มเพชรที่ดีกว่าสารตัวที่ใช้กันปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย ไม่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นที่สนใจในหมู่นักวิจัยในเชิงวิศวกรรมและเชิงพาณิชย์ ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์หลายอย่าง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็เช่นเดียวกัน ได้ทำการศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรและซิลิกอนโดยรายละเอียดของการวิจัยและการสร้างมีดังนี้

ในบทที่ 1 จะกล่าวถึงความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์ และคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มเพชร ตลอดจนถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร เช่น วิเคราะห์พื้นผิวและลักษณะของระนาบและปริมาณฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์เพื่อบ่งบอกความเป็นไปได้ของการเป็นฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยระบบ CVD แบบความร้อน

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับการฉายแสงและกล่าวถึงปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก และทฤษฎีของโฟโตเซลล์ โฟโตไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งเป็นแบบเนื้อสารชนิดเดียวกันและเนื้อสารต่างชนิดกัน รวมทั้งกล่าวถึงประสิทธิภาพโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งลักษณะของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆเป็นต้น

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งต้องผ่านกระบวนการและเทคโนโลยีวงจรรวมต่างๆซึ่งนำมาประยุกต์ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งนี้

ในบทที่ 4 เป็นการเสนอผลการทดลอง เริ่มด้วยการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สร้างได้ และ ผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร, โฟโตเซลล์, โฟโตไดโอด และ เซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งจะกล่าวถึงผลของการแปรค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ความหนาของฟิล์มเพชร ปริมาณสารเจือโบรอน (B:C) ความเข้มแสง และ สดทำยจะเป็นผลอันเนื่องมาจากอุณหภูมิแวดล้อมที่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ทั้งหมดที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่ามีผลเป็นอย่างไร รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้โดยใช้ทฤษฎีในบทที่ 2 นำมาประกอบในการวิเคราะห์

ในบทที่ 5 เป็นส่วนของการสรุปผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายผู้ทำการวิจัยหวังว่า งานวิจัยครั้งนี้คงจะเป็นประโยชน์ไม่มากนักน้อยสำหรับผู้อ่านหรือ ผู้ที่จะต้องการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป

บทที่ 1

บทนำ

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

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

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

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกมีมากมหาศาล ร้อยละ 99.98 ของพลังงานที่โลกได้รับล้วนมาจากแสงอาทิตย์ ที่เหลือร้อยละ 0.02 ได้มาจากพลังงานใต้พิภพ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่เดินทางมาสู่โลกเรามีมากถึง 1.77×10^{14} KW ซึ่งมีมากกว่าพลังงานที่มนุษย์ต้องการ 8×10^7 KW ถึงกว่าล้านเท่า ดังนั้นถ้าเราใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราก็จะประหยัดพลังงานได้มากรวมทั้งเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ดังนั้นถ้าเราพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่าไรเราก็จะได้รับประโยชน์จากแสงอาทิตย์มากขึ้นตามไปด้วย

1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด โดยแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้คือ

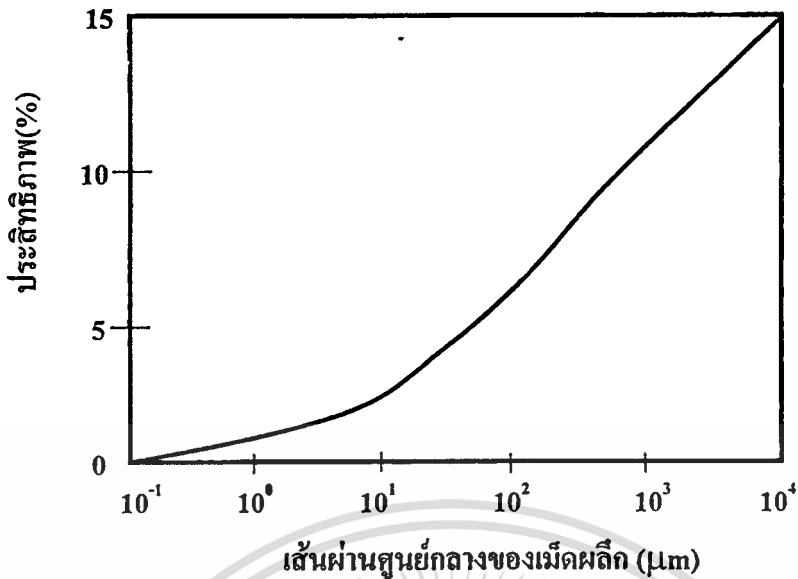
1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิส
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

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

1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิกอนที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิดปนอยู่ในระนาบเดียวกัน เช่น (111), (211) และ (330) เป็นต้น เมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างของสีของแต่ละระนาบอย่างชัดเจน อาณาเขตของผลึกเรียกว่า “เกรน” (grain) เทคโนโลยีปัจจุบันนี้สามารถผลิตโพลีซิลิกอนให้มีเกรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบล้านไมครอนถึงหลายพันไมครอน ถ้าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์ พาหะโฟโตนิกที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อพี-เอ็น ออกสู่วงจรรายนอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรูปที่ 1.1 แสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ [2]



รูปที่ 1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้ก็คือจะมีพันธะของซิลิกอนที่มีแขนขาอยู่มากซึ่งไม่มีซิลิกอนอะตอมอื่นมาเกาะพันธะด้วย ซึ่งพันธะแขนขานี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสถานะจุดบกพร่อง (defect state) ซึ่งสถานะจุดบกพร่องนี้จะเป็นตัวคอยจับพาหะข้างน้อยจากแสงไม่ให้เดินทางออกสู่วงจรภายนอก และส่งผลทำให้เวลาอายุ (life time) ของพาหะข้างน้อยลดลง และที่ขอบของเกรนจะทำให้เกิดแถบพลังงานที่ขอบของเกรนเกิดขึ้น โค้งขึ้น

1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิล์มบาง ซึ่งสร้างมาจากอะมอร์ฟัสซิลิกอนซึ่งเป็นซิลิกอนที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบหรือเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมแต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึก แต่ในขณะที่การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอมนี้จะทำให้มีคุณสมบัติต่างๆ แปลกออกไปเช่น ค่าคงที่ต่างๆ ทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอน ก็คือ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส โดยสามารถสร้างบนพื้นผิวฐานรองอะไรก็ได้ ราคาถูกและประหยัดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Carlson และ wronski ต่อมา Dr Hamakawa มหาวิทยาลัยโอซาก้า ได้ออกแบบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เป็นลักษณะของ (a-Si:H) p-i-n ซึ่งใช้กันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุกวันนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ชนิดนี้มีค่าอยู่ประมาณสิบกว่าเปอร์เซ็นต์ และเซลล์ชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อย่างอื่นอีกเช่น ตัวตรวจจับแสงสีต่างๆ

1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

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

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

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

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

ซึ่งกล่าวโดยสรุปก็คือค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนนี้ก็คือ ค่าของ V_{oc} และ I_{sc} ต้องมีค่ามาก ส่วนค่าของ I_s จะต้องมีค่าน้อย โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงจนเกินไป ส่วนปัจจัยอื่นๆที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงนั้นเราจะไปวิเคราะห์ในบทต่อไป

แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองที่ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรได้ที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ โดยเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่า $E_g = 5.5$ eV ซึ่งเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างมากถ้าเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ

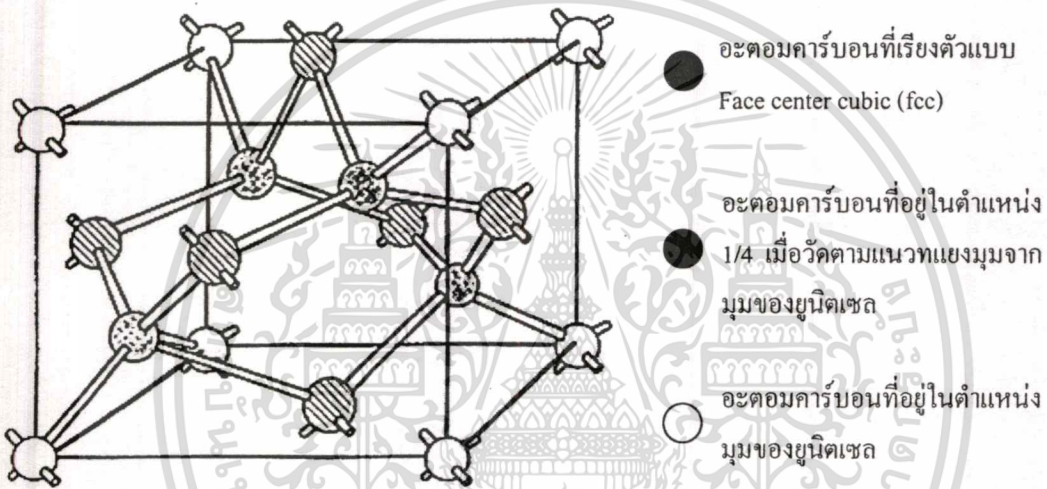
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร[3]

ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเราสามารถนำเพชรมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน โดยเพชรที่จะนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเพชรดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยสังเคราะห์ขึ้นได้โดยวิธี CVD แบบความร้อนที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 1.2 โครงสร้างผลึกของเพชร [3]

เพชรนั้นจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนซึ่งอยู่ในหมู่ 4 โดยอะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “Diamond structure” ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2

จากรูป 1.2 พบว่าภายในยูนิตเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง 1/4 เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิตเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโคเวเลนต์แบบ sp^3 ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ $\{111\}$ 2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

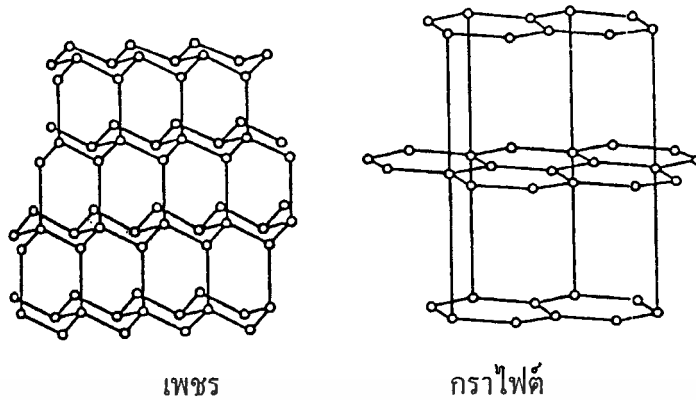
เป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยม โดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ {111} การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพอร์มิตีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567 Å และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.54 Å ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของเพอร์มิตีค่า 1332 cm^{-1} และยอดลำดับที่สอง (Second order peak) ของเพอร์มิตีค่าเท่ากับ 2458 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่ 1284 cm^{-1}

1.3.1 Graphite

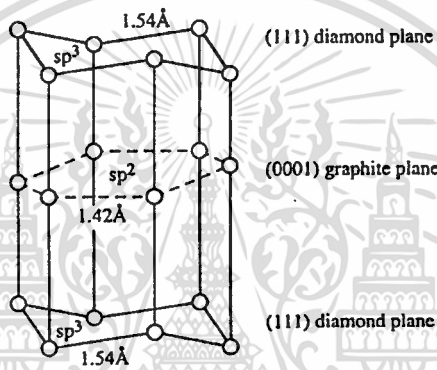
กราไฟต์เป็นรูปพื้นฐานของคาร์บอนที่พบได้มากที่สุด ลักษณะโครงสร้างภายในของมันแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 อะตอมคาร์บอนจะจับตัวที่ลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับเพชรแต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัดคืออะตอมคาร์บอนที่จับตัวเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมของกราไฟต์นั้นจะไม่มีการเชื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้กันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร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

นอกจากนี้แล้วยังมีรูปต่างๆ ของคาร์บอนที่พบได้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรอีก เช่น Amorphous carbon, Lonsdaleite และ Microcrystalline carbon ซึ่งก็จะมีค่าของยอดคลื่นที่แตกต่างกันออกไป

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



○ อะตอมของคาร์บอน



รูปที่ 1.3 โครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราไฟต์ [3] และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในกราไฟต์ และเพชร [4]

1.4 คุณสมบัติต่างๆของเพชร[4]

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของเพชรได้เป็น 3 คุณสมบัติใหญ่ๆคือ คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

1.4.1 คุณสมบัติทางกล

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1.4.2 คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาค่าดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ และความยาวคลื่นที่กำหนด ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของเพชรและวัสดุอื่นๆ ที่อุณหภูมิห้องจะแสดงในภาคผนวก ก

1.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพชรธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^{15} ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ในขณะที่ของอิเล็กทรอนิกส์มีค่า $2,000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ แต่ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ 500°C พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง $850 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเจอร์มาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมนไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูง ส่วนในวัสดุอื่นๆ จะมีค่าความเร็วโฮลอิมิตัวและ Dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้า 10^4 V/cm ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กทรอนิกส์และโฮลเริ่มมีการอิมิตัวสำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่ 10^7 cm/s และในกรณีของอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ $2.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16} \Omega\text{.cm}$

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกลำนำใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวทั้งนี้เนื่องมาจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยไม่ทำให้เกิดพิษเสีรูปร่าง ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่าน้อยลงเกิด Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่าประมาณ 100 ppm หรือ 10^{19} cm^{-3} พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ $370 \times 10^3 \text{ eV}$ และสำหรับฟิล์มเพชรชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า 10^{19} - 10^{20} cm^{-3}) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมีค่าต่ำคือประมาณ 2×10^{-3} eV

1.4.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวนิยมนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตารางที่ 1.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ [3]

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

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บหมายถึง Polycrystalline Diamond

1. เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์มากจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น (โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ

2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง

3. ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ โดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

1.5 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่างๆ [3]

ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD นี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม หลักๆ ได้ตามเทคนิคที่ใช้คือ

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

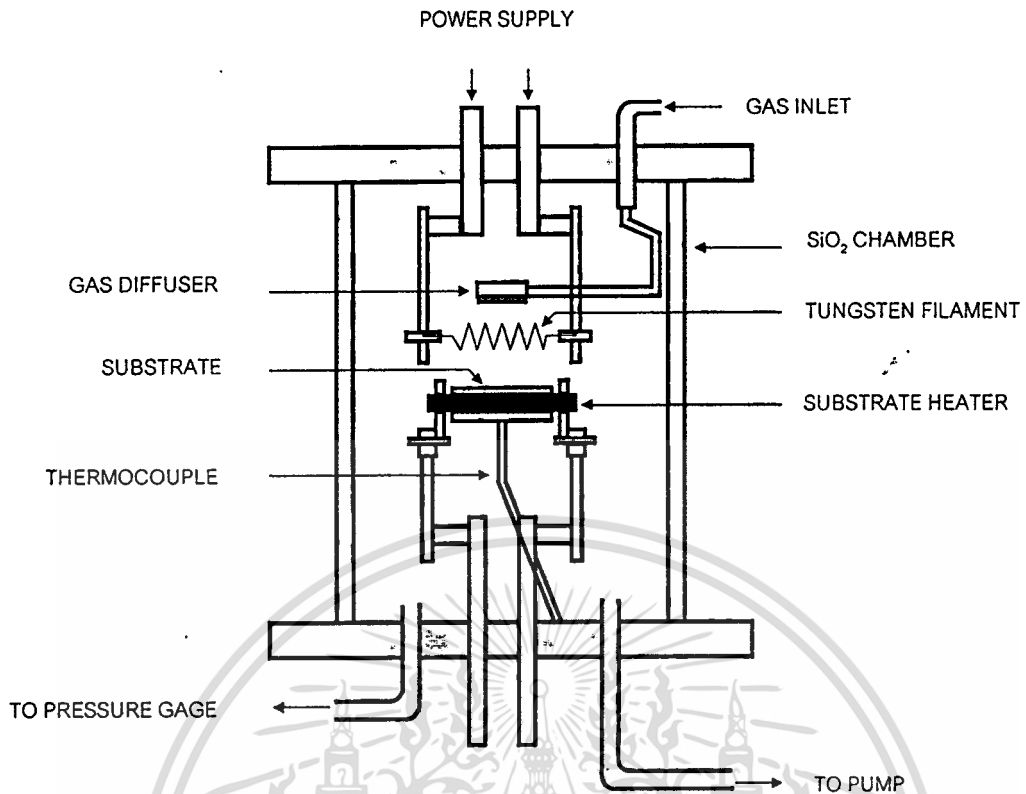
ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร อุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง อุณหภูมิของฐานรอง, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการต่างๆ จากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นที่ยืนยันได้ว่า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

1.5.1 Thermal Enhanced CVD Methods

1.5.1.1 Filament-Assisted Thermal CVD

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 แผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD [3]

1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน[3]

หลักการพื้นฐานการสร้างฟิล์มเพชรนั้น ไม่ว่าจะเป็นวิธีการใดๆตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.5 จะมีกลไกพื้นฐานดังนี้คือ

1. ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เพชรจะมีความเสถียรในสถานะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราฟิต อะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราฟิตหรือลดการเกิดกราฟิตขึ้น

2. ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน

เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนที่จะก่อพันธะทำให้เกิดเป็น โครงสร้างของเพชรหรือกราฟิต ออกจากสารตั้งต้นเช่น เอทิลแอลกอฮอล์ โดยใช้ความร้อน

3. อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม

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

4. ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิดสูง และจะมีโอกาสเกิดเป็นฟิล์มมากขึ้น หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อรองรับการนิวเคลียชัน ซึ่งมีหลายวิธีในการเตรียมพื้นผิวเช่น การขัด, การกัดด้วยสารเคมี, การใช้แสงเลเซอร์

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นที่จะกล่าวถึงในข้อ 4 เท่านั้นเพราะการเตรียมพื้นผิวฐานรองจะมีผลมากต่อการเกิดนิวเคลียชัน ซึ่งฟิล์มเพชรจะเกิดขึ้นหรือไม่ก็จะขึ้นอยู่กับการเตรียมพื้นผิวฐานรอง ส่วนกระบวนการอื่นๆ นั้นมีผู้อื่นได้นำเสนอมาแล้ว[4]

1.7 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรของวิธี CVD[5]

1.7.1 กระบวนการของก๊าซเฟส

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐานคือต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่าง คือ

1. ทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็น โมเลกุล ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิวพร้อมที่จะก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรต่อไป

2. แยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน

การทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็น โมเลกุลซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิวพร้อมที่จะก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรต่อไปนั้นต้องอาศัยปัจจัยหลายอย่างเช่น ปฏิกิริยาที่ไร้ผลอดอุณหภูมิที่เหมาะสม

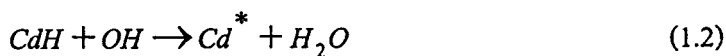
นอกจากนี้ยังพบว่าบทบาทของไฮโดรเจน และออกซิเจนนั้นยังช่วยให้เพชรมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นอีกด้วยหน้าที่หลักอีกอย่างหนึ่งของไฮโดรเจนคือ ช่วยทำให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้น [4] เนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเพชรอะตอมคาร์บอนจะมีพันธะแขวนขาด (Dangling bond) อะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปจับตัวกับแขนที่ขาดของอะตอมคาร์บอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงพันธะของ sp^3 ไปเป็น sp^2 หรือ sp^1 และอะตอมไฮโดรเจนยังมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชร โดยจะเป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวเป็นพันธะ CdH กับอะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร อะตอมคาร์บอนในพันธะระหว่าง CdH เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนออกไปจะเป็น Cd^* ดังสมการ



เมื่อ Cd คืออะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร และ Cd^* คืออะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทบาทหลักๆ ของออกซิเจนคือช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมาามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าหากเราผ่านอนุมูลของก๊าซออกซิเจน เช่น O , O_2 หรือ OH เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และยังป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น อนุมูล OH สามารถกระตุ้นอะตอมบริเวณผิวน้ำดังกล่าว

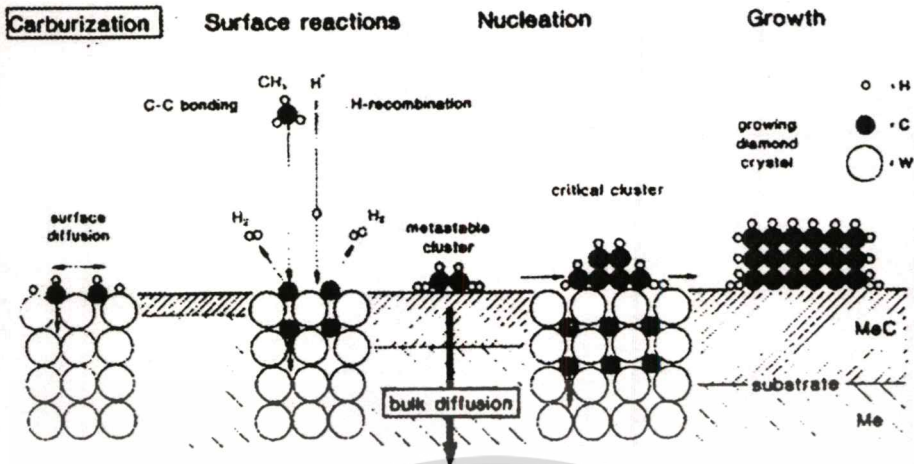


อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาจากสมการ (1.2) ยังไม่มีความสำคัญเท่ากับสมการ (1.1)

1.7.2 ปรากฏการณ์นิวเคลียชัน [5]

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.7.1 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นของก๊าซเฟส สำหรับปรากฏการณ์นิวเคลียชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นต่อจากกระบวนการของก๊าซเฟส การนิวเคลียชันของเพชรสามารถเกิดได้ทั้งแบบ Homogeneous หรือ Heterogeneous ขึ้นอยู่กับชนิดของฐานรองที่เลือกใช้ แต่ส่วนมากแล้วการสร้างฟิล์มเพชรบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรเป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง [10]

การนิวเคลียชันของเพชรเริ่มต้นตรงที่มีการแพร่เข้าไปบนพื้นผิวฐานรองด้วยอนุมูลของก๊าซที่มีพันธะ sp^2 ดังเช่น Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองจนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆ ที่เรียกว่า “Intermediate layer” ชั้น ชั้น Intermediate layer นี้เมื่อมีความเข้มข้นของอะตอมคาร์บอนมากพอจะทำให้เกิดขั้นตอนสำคัญของการเกิดเพชรคือเกิดการกำจัดอนุมูลที่มีพันธะ sp^2 ออกไปบนพื้นผิวของฐานรองโดยอะตอมไฮโดรเจนหรือจากนิวเคลียสที่เสถียรทำให้มีการเปลี่ยนพันธะจาก sp^2 ไปสู่ sp^3 เกิดเป็นเพชรขึ้นบนฐานรองแผนภาพแสดงกลไกของการนิวเคลียชันและการเกิดชั้น Intermediate layer แสดงได้ในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 กลไกการนิเวศลิเอชันและการเกิดขึ้น intermediate layer ของเพชรบนฐานรอง [6]

1.8 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรมีหลายวิธีการแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน อาทิเช่น ถ้าต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) แต่หากต้องการวิเคราะห์ถึงพันธะของอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกัน เพื่อตรวจสอบว่าเป็นเพชร, กราไฟต์, อะมอร์ฟัส หรือ Diamond Like Carbon (DLC) นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy สำหรับในโครงการนี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร 3 วิธีคือ

1. Scanning electron microscopy (SEM)
2. Raman spectroscopy

1.8.1. การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-ray tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่น ๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50 - 40,000X)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคมชัดของภาพสูง (2.5-10 nm), ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบกับ TEM (Transmission electron microscopy) ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมาก ๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำ ๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรอง Si) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่ ดังแสดงในรูปที่ 1.6 ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่อก๊าซไฮโดรเจน

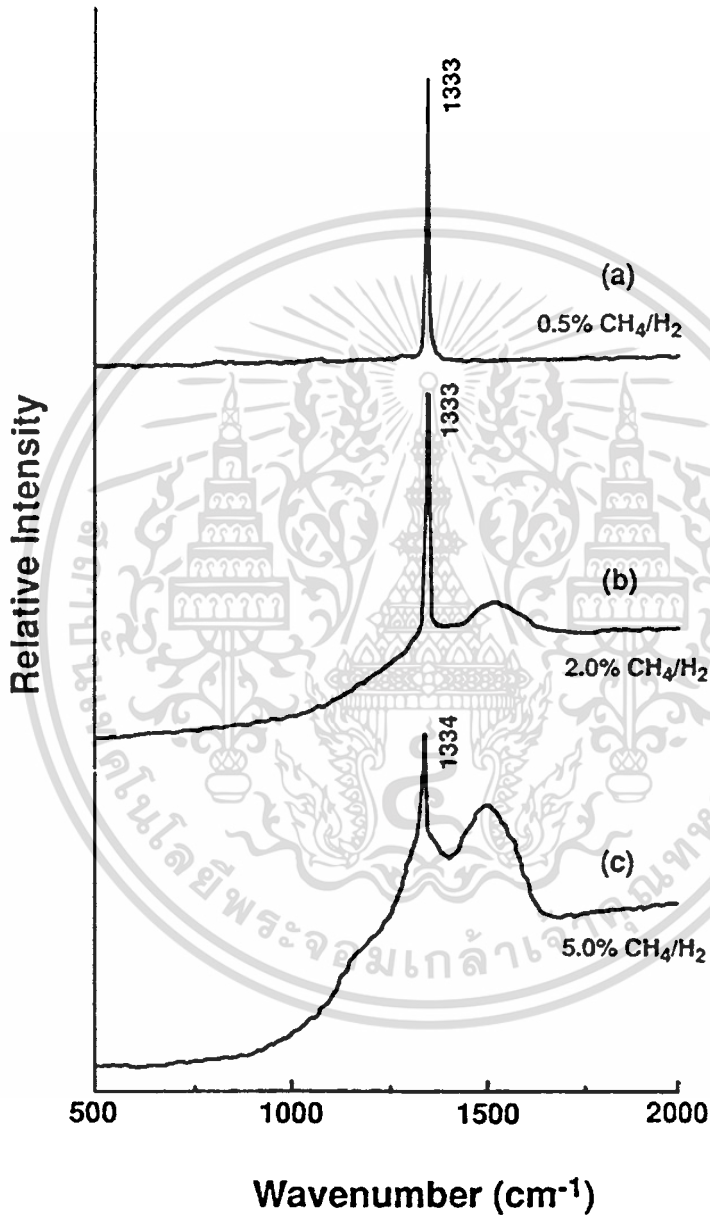


รูปที่ 1.6 ลักษณะรูปร่างพื้นผิวด้านหน้าของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

1.8.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและกราไฟต์สูง ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร,กราไฟต์,อะมอร์ฟิคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอน แสดงไว้ในตารางที่ 1.2 นอกจากนี้สามารถใช้ Raman spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่างๆ กันเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนของ CH_4 / H_2 มีค่าต่างกัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 1.7 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชร ในรูป 1.7a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและขอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่าขอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบขอดกราฟที่ตำแหน่งอื่น ๆ 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 ขอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ 1334 cm^{-1} ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} เริ่มมีขอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด

ตารางที่ 1.2 ค่าขอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน [4]

PEAK POSITION	TYPE OF CARBON	DESCRIPTION
$\sim 1140\text{ cm}^{-1}$	small size ($< 0.1\ \mu\text{m}$) cubic diamond	occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ($< 0.1\ \mu\text{m}$)
$1315\text{-}1326\text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	broad band, observed in shock wave produced diamond
1332 cm^{-1}	Cubic diamond	first order peak with FWHM of 1.9 cm^{-1} for natural diamond
1345 cm^{-1}	Amorphous carbon	broad band. It becomes a shoulder of the 1550 cm^{-1} band when the material is hydrogenated
1355 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	observed in materials with small grain sizes
1550 cm^{-1}	Amorphous or diamond-like carbon	broad band
1580 cm^{-1}	Graphite	first order peak
2458 cm^{-1}	Cubic diamond	second order peak
2710 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	second order peak
3240 cm^{-1}	Graphite	second order peak

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง

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

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

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

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

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

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

ค่าดัชนีหักเหแสงของวัตถุใดๆจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความถี่ของแสงด้วย และค่าดัชนีหักเหแสงนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ ของวัตถุ ดังนี้

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

โดยที่ ϵ_o คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ $= 8.854182 \times 10^{-12}$ F/m

2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

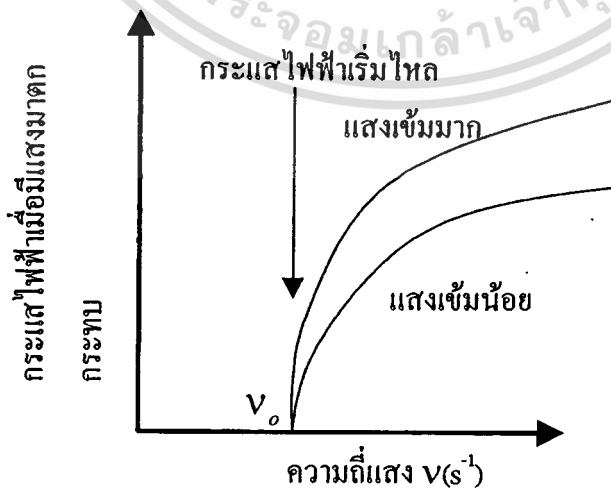
แสงนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคของแสงว่า โฟตอน(Photon) อนุภาคของแสงจะมีพลังงานอยู่ในตัวของมันและถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ ν อนุภาคของแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ eV โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.6261×10^{-34} j.s และแสงที่มีความยาวคลื่น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

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

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศ แล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะหลุดออกจากโลหะ แสดงวิธีการทดลองดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

2.1.3 การเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง

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

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp[-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta)] \quad (2.6)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \exp[-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta)] \quad (2.7)$$

โดยที่ \vec{E}_0 คือ แอมพลิจูดของ \vec{E}

\vec{H}_0 คือ แอมพลิจูดของ \vec{H}

ω คือ ความถี่เชิงมุมหมุน $= 2\pi f$

\vec{r} คือ เวกเตอร์ระยะทาง

\vec{k} คือ เวกเตอร์ของเลขคลื่น $= 2\pi/\lambda$

δ คือ เฟส (phase)

ถ้าแสงเดินทางเข้าสู่วัตถุ จะมีแรง F (Lorentz force) ที่เกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างแสงและประจุไฟฟ้า e ในวัตถุที่เป็นจุด และแรงมีค่าดังนี้

$$\vec{F} = e\vec{E} + \frac{e}{c}\vec{v} \times \vec{H} \quad (2.8)$$

โดยที่ v คือความเร็วของประจุไฟฟ้าในวัตถุ

เนื่องจากโดยทั่วไป แอมพลิจูดของ $|\vec{E}|=|\vec{H}|$ ดังนั้นสมการนี้ทำให้เราทราบว่าแรงกระทำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของแสงจึงมีค่าเพียงประมาณ $\frac{v}{c}$ เท่าของแรงกระทำที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของแสง และนอกจากนี้ความเร็ว v ของประจุไฟฟ้าในวัตถุมีค่าประมาณ 1/100 ของ c ดังนั้น $\frac{v}{c}$ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบของแสงนี้มีต่อวัตถุเราจึงอนุโลมพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าเป็นหลักก็ได้

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์

หลักการทํางานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการค้นพบมาเมื่อประมาณ 180 ปีมาแล้วโดยในปี ค.ศ.1817 เบอร์ซีเลียส (Berzelius) ได้ค้นพบธาตุซิลิเนียม และสามารถเตรียมธาตุซิลิกอนได้เป็นครั้งแรกจากผลนี้ทำให้มีการค้นพบลักษณะความนำจำเพาะทางแสง (Photoconductivity) ในซิลิเนียมโดยวิลลาจปี สมิท (Willoughby smith) ในปี ค.ศ.1873 จากนั้นได้มีการค้นพบผลของโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) โดย อัดัมและเดย์ (Adam and Day) ในปี ค.ศ.1876 หลังจากนั้นอีก 7 ปีต่อมาฟริทท์ (Fritts) จึงได้อธิบายผลของโฟโตโวลตาอิกเซลล์ที่ทำมาจากซิลิเนียมเป็นคนแรก และในปี ค.ศ.1904 ฮอลวอชต์ (Hallwachs) ก็ได้สังเกตเห็นความไวแสง (Photosensitivity) ในโครงสร้างของคอปเปอร์คิวปริสออกไซด์ (Copper Cuprous oxide)

จากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในการสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบโกรว์จังก์ชัน (Growth junction) ทำให้มีการเตรียมสร้างอุปกรณ์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ทำมาจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอนในปี ค.ศ.1941 จนกระทั่ง 12 ปีต่อมาจึงได้มีการพัฒนาการสร้างรอยต่อพี-เอ็นขึ้นด้วยวิธีการแพร่สารเจือ (Impurity diffusion method) ในปีแรกของการพัฒนาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีใหม่ ทำให้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานได้ 6% อีก 2 ปีต่อมา มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเป็น 14% ในปี ค.ศ.1958

นอกจากนี้ยังได้มีการสร้างเซลล์ด้วยสารประกอบอื่นๆนอกเหนือไปจากซิลิกอนซึ่งเป็นธาตุแท้ โดยเริ่มจากคอปเปอร์คิวปริสออกไซด์ แต่พบว่ามันให้พลังงานออกมาน้อยกว่าที่สร้างจากซิลิกอน จึงได้มีการพัฒนาเซลล์ที่สร้างมาจากแกเลียมอาร์เซไนด์ แคลเดเมียซัลไฟด์และแคลเดเมียเทลลูไรด์ ปรากฏว่าเซลล์ที่สร้างจากแกเลียมอาร์เซไนด์ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่เนื่องจาก

แกลเลียมอาร์เซไนต์มีราคาวัสดุที่สูงกว่าซิลิกอนมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมเทลลูไรด์สามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยใช้เทคนิคทางด้านฟิล์มบางทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง แม้ในช่วงแรกจะมีประสิทธิภาพต่ำและเสถียรภาพในการทำงานยังไม่ดีนักแต่ก็คาดได้ว่าจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญต่อไปในอนาคต

2.2.2 พลังงานแสงที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์ [1]

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกผ่านชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ (Atmosphere) จะมีพลังงานลดน้อยลง และมีผลตอบสนองทางความถี่แสงแตกต่างไปจากแสงอาทิตย์ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากในชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด รวมทั้งไอน้ำและฝุ่นละอองต่างๆที่เป็นตัวดูดกลืนพลังงานแสงบางส่วนเอาไว้และทำให้แสงบางส่วนเปลี่ยนทิศทาง

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาความเข้มและผลตอบสนองทางความถี่ของแสงอาทิตย์ จึงได้มีการกำหนดค่า แอร์แมสเอ็ม (Air Mass m) ขึ้น โดยที่แอร์แมสเอ็ม คืออัตราส่วนระหว่างระยะทางเดินของแสงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ ต่อระยะทางเดินของแสงเมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะ แสดงได้โดยสมการ 2.9

$$m = \sec(z) = 1/\cos(z) \quad (2.9)$$

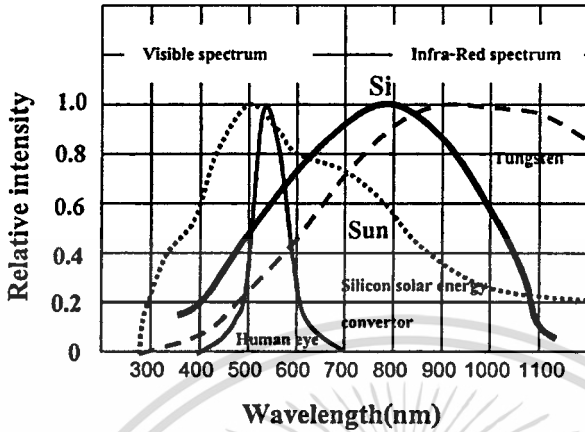
โดยที่ z (Zenith angle) คือมุมระหว่างแนวของลำแสงที่ทำกับแนวตั้ง

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

2.2.3 ผลตอบสนองความถี่แสงของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแสงที่มีความถี่ต่างๆ มากมายรวมกันอยู่ตั้งแต่แสงที่มองไม่เห็นและมองเห็นด้วยตาเปล่า เส้นประในรูปที่ 2.3 เป็นผลตอบสนองความถี่ของแสงอาทิตย์ในชั้น AM1 เมื่อได้พิจารณาผลตอบสนองความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนที่มีความถี่ต่างๆ ดังแสดงเป็นเส้นทึบในรูปจะเห็นได้ว่าจุดสูงสุดของกราฟทั้งสองมีความถี่ไม่ตรงกัน ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียพลังงานแสงในกรณีนี้ไปส่วนหนึ่ง โดยพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นแสงที่ 5000 อังสตรอม ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์จะมีผลตอบสนองทางแสงมากที่สุด ความยาวคลื่นแสงที่ 8000 อังสตรอม

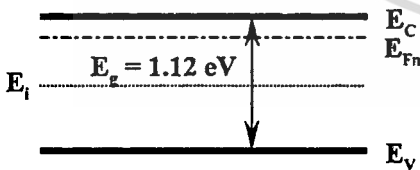


รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน [1]

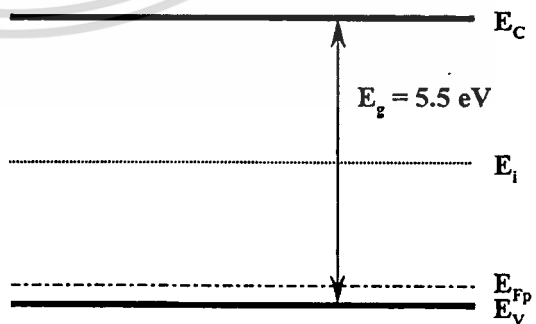
2.3 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

2.3.1 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น

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



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (ก) ซิลิกอนชนิดเอ็น (ข) ฟิล์มเพอร์ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพี

สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพีนั้นมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 5.5 eV สร้างได้จากการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD ซึ่งในระหว่างขั้นตอนการสร้างนั้นต้องมีการเติมอะตอมสารเจือโบรอนเข้าไปด้วย และค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชร นั้นจะมีลักษณะอยู่ใกล้กับแถบพลังงานวาเลนซ์ ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการเติมอะตอมสารเจือโบรอน ซึ่งได้มีผู้ทำการทดลองไว้แล้วว่า ถ้าเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือโบรอนอยู่ระหว่าง 10 ppm ถึง 1000 ppm นั้น ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ประมาณ 0.14 ถึง 0.18 eV [7] โดยรูปแถบพลังงานของฟิล์มเพชรจะแสดงได้ดังรูป 2.4(ข)

2.4 ทฤษฎีรอยต่อ

จากหัวข้อที่แล้วเรารู้ถึงลักษณะของสารกึ่งตัวนำชนิดพีแล้ว ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้มากนัก แต่ถ้าเรานำสารกึ่งตัวนำสองชนิดไม่ว่าจะเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี มาต่อเข้าด้วยกันด้วยวิธีทางเคมีแล้ว เราจะสามารถนำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนี้มาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายขึ้น เช่น ทำเป็นไดโอด ทรานซิสเตอร์ โฟโตไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์และวงจรรวม (IC) ฯลฯ รอยต่อนี้มีได้หลายรูปแบบเช่น รอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (Homojunction) เช่น ซิลิกอนชนิดเอ็น กับ ซิลิกอนชนิดพี และรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction) เช่น ซิลิกอนกับเพชร และรอยต่อก็มีได้อีกหลายแบบเช่น รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ รอยต่อที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะมีลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ อีกทั้งยังเป็นพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษอื่นๆ ซึ่งมีรอยต่อมากกว่าหนึ่งรอยต่ออีกด้วย ส่วนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพูดถึงรอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกันเท่านั้นซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างซิลิกอนและฟิล์มเพชร

2.4.1 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารชนิดเดียวกัน

ได้แก่การนำเอาสารกึ่งตัวนำที่เป็นชนิดเดียวกันเช่น ซิลิกอนชนิดเอ็นและซิลิกอนชนิดพี มาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งจะสามารถประยุกต์การใช้งานต่าง ได้มากมายแต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่พูดถึงมากนัก

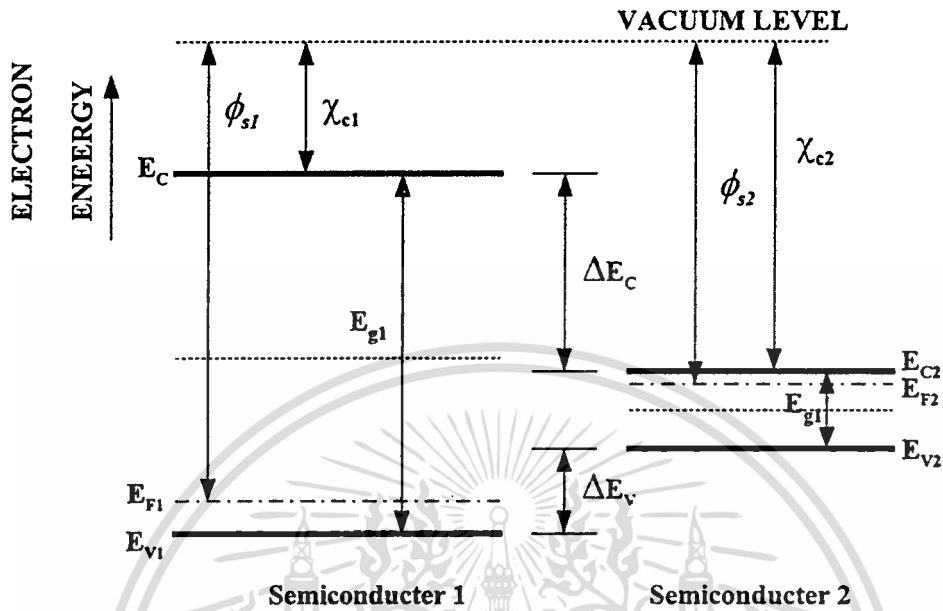
2.4.2 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารต่างชนิดกัน [7]

รอยต่อพีเอ็นแบบเนื้อสารต่างชนิดกันเป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่างกัน โดยมีความเข้ากันได้ดีของ ค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน เช่น รอยต่อระหว่างเพชรกับซิลิกอน แต่อย่างไรก็ตาม อาจจะไม่เสมอไป และอาจจะมีจุดบกพร่อง เช่น เกิดสภาวะอินเตอร์เฟซ(interface) ที่พื้นที่ผิวของรอยต่อ สภาวะนี้สามารถแสดงเป็นศูนย์กลางการแท้ป (trapping center) ซึ่งจะเป็นการจำกัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ แบบจำลองแถบพลังงานของรอยต่อที่มีเนื้อสารต่างชนิดกันแบบอุดมคติโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

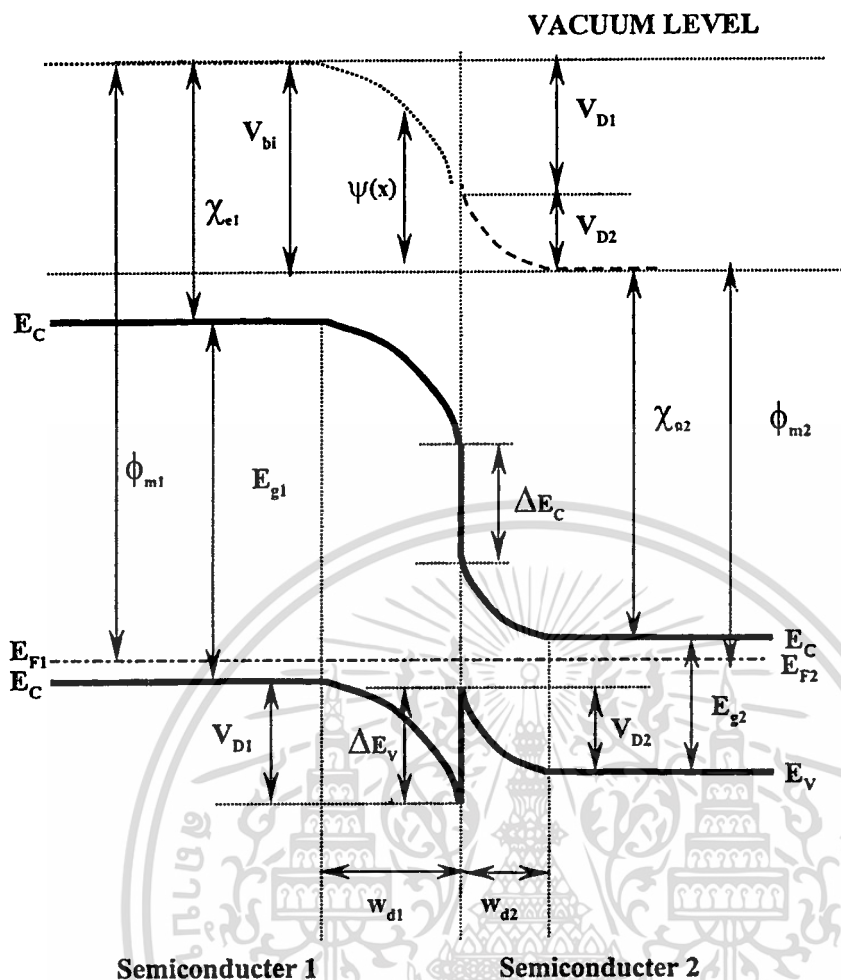
ปราศจากสภาวะอินเทอร์เฟซ ถูกเสนอโดย Anderson โดยมีพื้นฐานของ Shockley เราจะพิจารณาแบบจำลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่ยังไม่นำมาต่อกัน

จากรูปไดอะแกรมแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่มีความแตกต่างกันของ แถบพลังงานต้องห้าม (E_g) ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ) และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (χ) โดยค่าฟังก์ชันงาน และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี คือพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากระดับเฟอร์มิไปยังระดับสูญญากาศ และพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขอบล่างของแถบความนำไปยังระดับสูญญากาศ ตามลำดับ และความแตกต่างของแถบความนำและแถบวาเลนซ์ ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเป็น ΔE_c และ ΔE_v ตามลำดับ เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาต่อเข้าด้วยกัน แถบพลังงานที่แสดงสภาวะสมดุลจะแสดงในรูปที่ 2.6

โดยแถบพลังงานดังรูปจะใช้ในการศึกษาโครงสร้างของรอยต่อ p-type diamond /n-type silicon heterojunction diode โดยกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ โดยค่าของ $E_{F1,2} - E_{V1}$ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นในการเติมอะตอมสารเจือ



รูปที่ 2.6 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันที่สภาวะสมดุล

สมการสำหรับความแตกต่างของแถบความนำ ΔE_c คือ

$$\Delta E_c = \chi_{e2} - \chi_{e1} \quad (2.10)$$

และความแตกต่างของแถบวาเลนซ์แสดงได้จากสมการ

$$\Delta E_v = (E_{g1} - E_{g2}) - (\chi_{e2} - \chi_{e1}) \quad (2.11)$$

จากสมการ 2.10 และ 2.11 เราจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta E_c + \Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} \quad (2.12)$$

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

$$qV_D - \Delta E_v = E_{g2} - (E_{c2} - E_F) - (E_F - E_{v1}) \quad (2.13)$$

โดยที่ $V_D = V_{D1} + V_{D2}$

V_{D1} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 1

V_{D2} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 2

และค่าของ V_{D1} และ V_{D2} สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{D1} = \frac{\epsilon_2 N_2}{\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2} \quad (2.14)$$

$$V_{D2} = \frac{\epsilon_1 N_1}{\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2} \quad (2.15)$$

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

N_1 และ N_2 คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

และค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะ (depletion width) ของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำที่หาได้จากสมการ poisson มีค่าตามสมการดังนี้

$$w_{d1} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 N_2 V_D}{qN_1 (\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2)}} \quad (2.16)$$

$$w_{d2} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 N_1 V_D}{qN_2 (\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2)}} \quad (2.17)$$

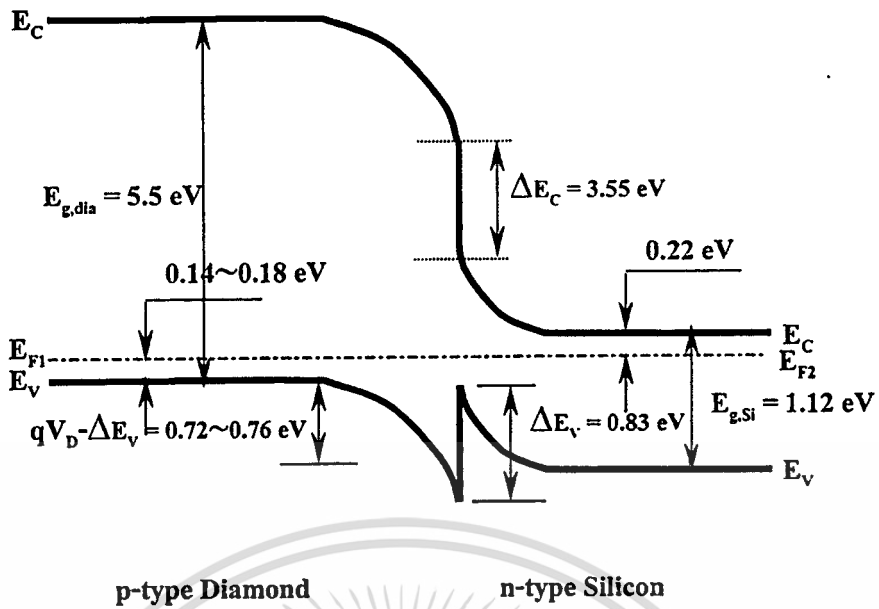
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษารายต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นโดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงานที่อุณหภูมิ 300 K ได้มีผู้ทำการวิจัยไว้แล้วแสดงได้ตามตารางที่ 2.2 [7]

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่อุณหภูมิ 300K

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

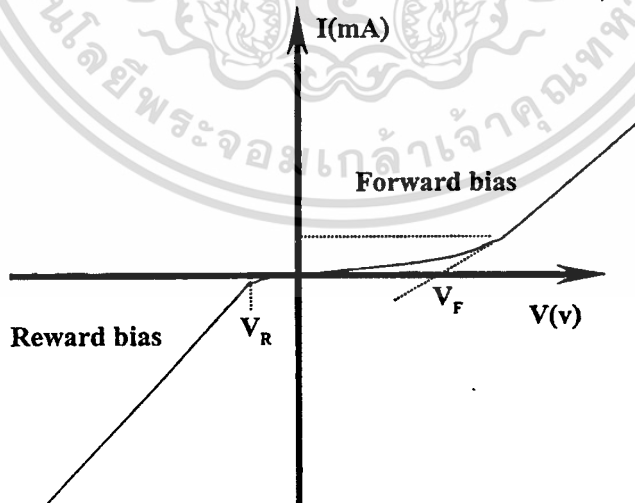
นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาเขียนลักษณะของแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 2.7 จากรูปที่ 2.7 จะเป็นลักษณะแถบพลังงานในอุดมคติจะสังเกตได้ว่าที่บริเวณรอยต่อนั้นจะไม่มี interface states เกิดขึ้นแต่ในความเป็นจริงแล้วก่อนการสร้างฟิล์มเพชรลงบนซิลิกอนนั้นจะต้องมีการขัดผิวหน้าซิลิกอนก่อน ที่รอยขัดที่ผิวหน้าซิลิกอนนี้เองจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด interface states ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการแพร่ประจุพาหะที่จะข้ามตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งจะให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนี้แย่ลง ดังนั้นในการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ของรอยต่อในขั้นตอนต่อไปนั้นจะต้องนำเอาผลของ interface states ที่เกิดขึ้นมาพิจารณาด้วย ต่อไปจะกล่าวถึงเมื่อรอยต่อได้รับการไปแอสนั้นจะมีคุณสมบัติอย่างไร



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น [7]

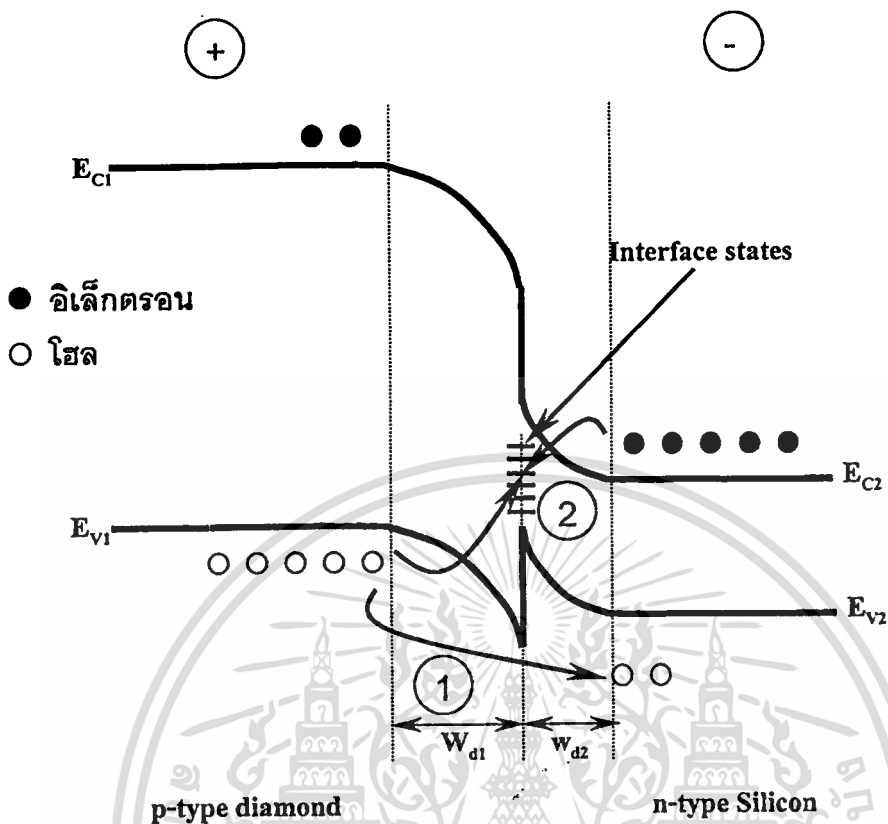
2.4.2.1 การไบแอสตรงให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si

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



รูปที่ 2.8 กราฟคุณสมบัติกระแสแรงดันของ p-Dia/n-Si [7]

ซึ่งสามารถใช้ทฤษฎีของแถบพลังงานอธิบายได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสตรง [7]

ในขณะที่ไบแอสตรงให้กับรอยต่อนั้น กระแสที่ไหลจะแบ่งได้เป็นสองกรณี

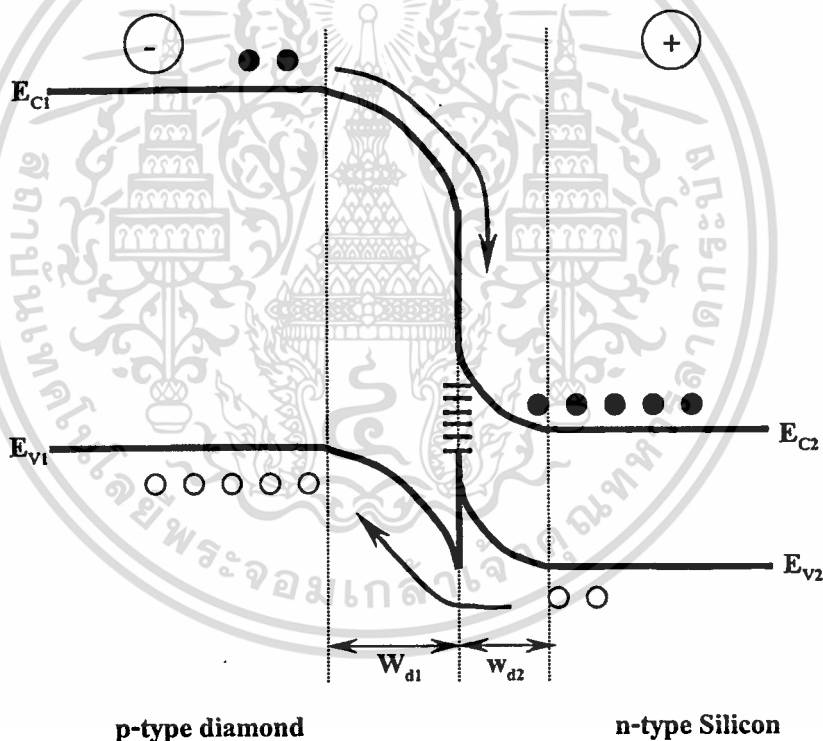
กรณีที่หนึ่ง แสดงโดยเลข 1 ในรูปที่ 2.9 โฮลจะไหลจากแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำเพชรไปยังแถบวาเลนซ์ของซิลิกอน ซึ่งที่แถบวาเลนซ์ตรงบริเวณรอยต่อนั้นจะเกิด spike ขึ้น เมื่อให้การไบแอสน้อยๆซึ่งน้อยกว่า V_F นั้นกระแสจะไหลได้ปริมาณน้อยเนื่องจากบริเวณ spike นั้นจะมีพลังงานศักย์ค่าหนึ่งกั้นโฮลอยู่ ซึ่งถ้าโฮลมีพลังงานต่ำๆ จะไม่สามารถไหลไปยังซิลิกอนได้ โดยสังเกตได้จากรูปที่ 2.8

แต่ถ้าให้ไบแอสที่มีค่าสูงกว่าค่า V_F จะทำให้ความสูงของ spike ลดลงและพลังงานศักย์ที่บริเวณ spike มีค่าลดลงก็จะทำให้โฮลสามารถไหลผ่านไปยังซิลิกอนได้ กระแสมีการไหลเพิ่มขึ้น

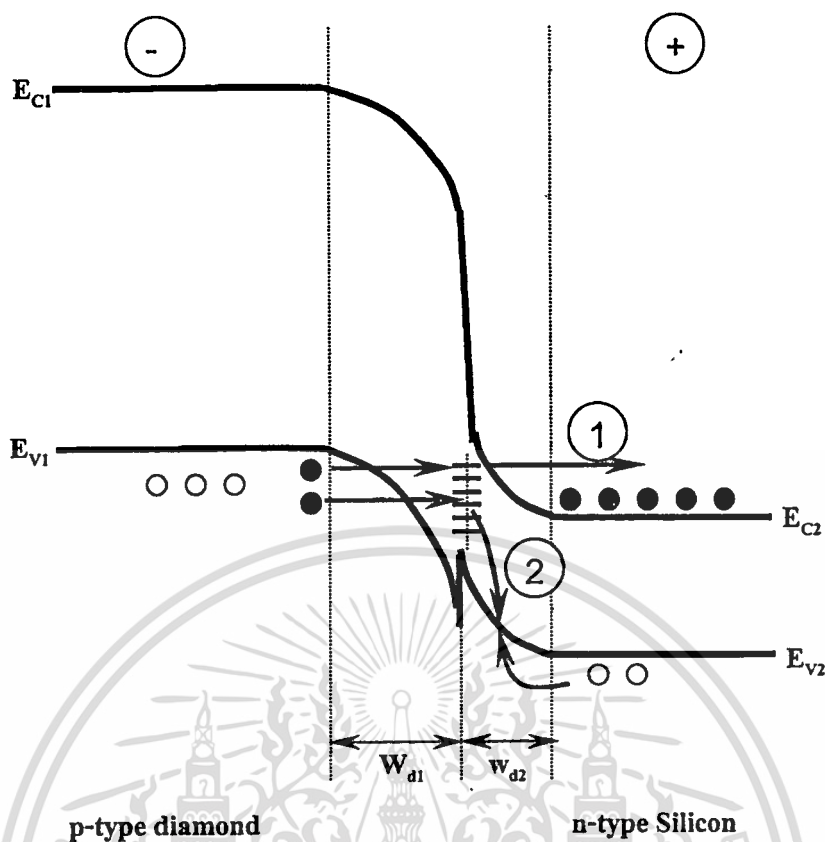
กรณีที่สอง คือลักษณะการไหลของกระแสการรวมตัว(Recombination current) กล่าวคือโฮลจากแถบวาเลนซ์ของฟิล์มเพชรจะไหลไปยังที่ interface states พร้อมกับอิเล็กตรอนที่ไหลมาจากแถบความนำของซิลิกอน และจะเกิดการรวมตัวกันที่ interface states นี้ซึ่งแสดงโดยหมายเลข 2 ในรูปที่ 2.9 ซึ่งกระแสส่วนนี้จะมีค่าสำคัญเมื่อให้การไบแอสกับรอยต่อนี้มีค่าน้อยๆ

2.4.2.2 การไบแอสย้อนกลับให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si

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



รูปที่ 2.10 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับในขณะที่ $V < V_R$ [7]



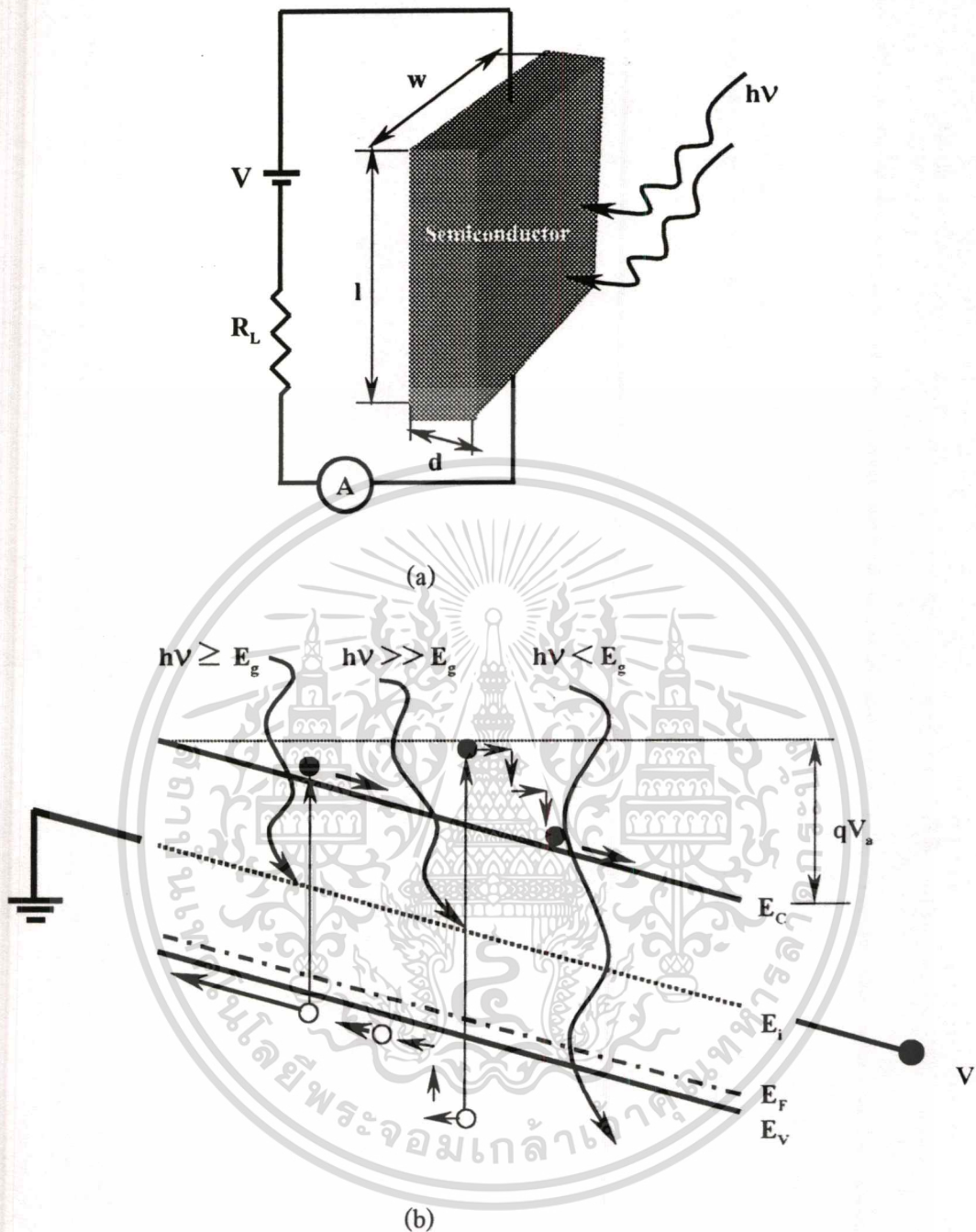
รูปที่ 2.11 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับใน
ขณะที่ $V > V_R$ [7]

2.5 ปปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเป็นปรากฏการณ์ที่ส่องแสงเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ และเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุล ให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบความนำและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ โดยที่พลังงานของแสงนั้นจะต้องมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามหลักการดึงอิเล็กตรอนไปใช้งาน คือ โฟโตคอนดักทีฟและโฟโตโวลตาอิก

2.5.1 โฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive)

โฟโตคอนดักทีฟ ได้แก่ การป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกให้สารกึ่งตัวนำ เพื่อให้อิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำวิ่งออกสู่ภายนอก และ เกิดกระแสไฟฟ้าไหล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 ส่วนโวลในแถวเลนซ์ก็ช่วยให้กระแสไหลได้เช่นกัน สิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานด้วยปรากฏการณ์นี้ได้แก่ โฟโตเซลล์



รูปที่ 2.12 (a) ลักษณะโฟโตเซลล์ (b) ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตเซลล์เมื่อได้รับแรงดัน พร้อมกับมีแสงตกกระทบ

เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำนั้น ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นไว้ และจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น แต่ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น แสงจะทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำโดยไม่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อีกกรณีหนึ่งถ้าแสงมีพลังงานเกินกว่าเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งาน โฟตอนมากกว่าช่องว่างพลังงานมากๆ ก็จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นเช่นกัน แต่ อิเล็กตรอนและโฮลจะมีพลังงานสูงกว่าปกติ และจะเกิดการชนกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำจนลดระดับพลังงานมาอยู่ที่สภาวะปกติและจะเกิดความร้อนขึ้น เรียกว่าการผ่อนคลายพลังงานความร้อนของอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12(b)

เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับสารกึ่งตัวนำและทำการฉายแสงดังรูปที่ 2.12(b) จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากแสงนั้นมีค่าดังสมการดังต่อไปนี้

$$I_{ph} = (qp\mu_p E)wd \quad (2.18)$$

โดยที่ E คือสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ V/l

เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับการฉายแสงนั้นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่เปลี่ยนไปก็คือ สภาพการนำไฟฟ้า โดยสภาพการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนเนื่องจากแสงเรียกว่า สภาพการนำไฟฟ้าทางแสง (Photoconductivity) โดยเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าและมีการฉายแสงให้กับสารกึ่งตัวนำ สภาพการนำไฟฟ้ารวมที่เปลี่ยนไปนั้นมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \sigma_D + \sigma_{ph} \quad (2.19)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \sigma_D &= e(p_0\mu_p + n_0\mu_n) \\ \sigma_{ph} &= e(\mu_p + \mu_n)G\tau \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

โดยที่ G คือ อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเนื่องมาจากแสง ในที่นี้สมมติให้อัตราการเกิดอิเล็กตรอนเท่ากับอัตราการเกิดโฮล

τ คือ อายุของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ในที่นี้สมมติให้อายุของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากัน

ในสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมสารเจือ สภาพนำไฟฟ้ามืดจะขึ้นอยู่กับค่าของจำนวนความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ และ ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ ในขณะที่ ค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสงจะขึ้นอยู่กับค่าของประจุพาหะส่วนน้อยที่เกิดเนื่องจากแสง

2.5.2 โฟโตโวลทาอิก

สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น เมื่อมีแสงที่มีพลังงานมากพอมาตกกระทบ พลังงานแสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนเอาไว้ ถ้าพลังงานส่วนนี้มีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะทำให้ อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดข้ามไปยังแถบความนำได้ และจะเหลือโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนที่กระโดดข้ามไปยังแถบความนำนั้นจะเคลื่อนที่อย่างไม่มีการทิศทาง จนหมดพลังงานที่จะ อยู่ในแถบความนำได้ ก็จะตกลงมาอยู่ที่แถบวาเลนซ์เหมือนเดิม อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากแสงนี้เองที่ทำให้สภาพความนำไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลง แม้จะไม่ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้น แต่ก็สามารถนำผลที่เกิดขึ้นนี้ไปสร้างไปสร้างอุปกรณ์ที่มีสภาพความนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามแสงได้อย่างเช่น โฟโตไดโอด

ในหัวข้อนี้เรากล่าวถึงผลของโฟโตโวลทาอิกที่ทำให้เกิดผลอย่างไรกับรอยต่อพี-เอ็น ต่อไปจะกล่าวถึงสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่อาศัยพื้นฐานของปรากฏการณ์นี้ เช่น โฟโตไดโอด และ เซลล์แสงอาทิตย์

2.6 โฟโตไดโอด(Photodiode)

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพี-เอ็น เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่รอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ อาจรวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วถ้ากล่าวถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่ง ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจจับความเข้มของแสง

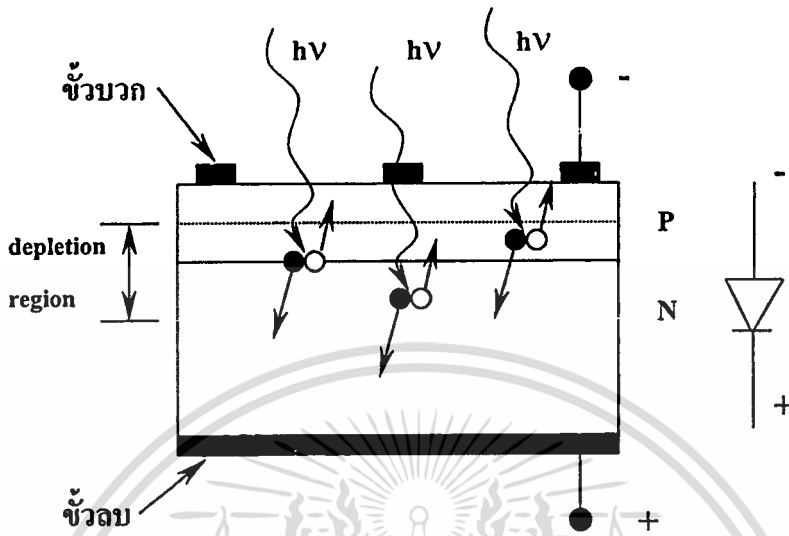
หลักการทำงานของโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็นที่เป็นแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด ทางด้านที่รับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่ต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่รอยต่อพี-เอ็นนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยขบวนการโฟโตโวลทาอิก เมื่อมีแสงมาตกกระทบโฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบความนำ และที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่

รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ที่ชั้นพี ที่ชั้นปลอดพาหะ และที่ชั้นเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบความนำในชั้นพี จะแพร่กระจายไปในชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบความนำในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในพัดพาให้วิ่งไปสู่ในชั้นเอ็น ส่วนในกรณีของโฮลก็จะไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจากแถบวาเลนซ์ในชั้นเอ็น หรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ในชั้นพี จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนของแสง

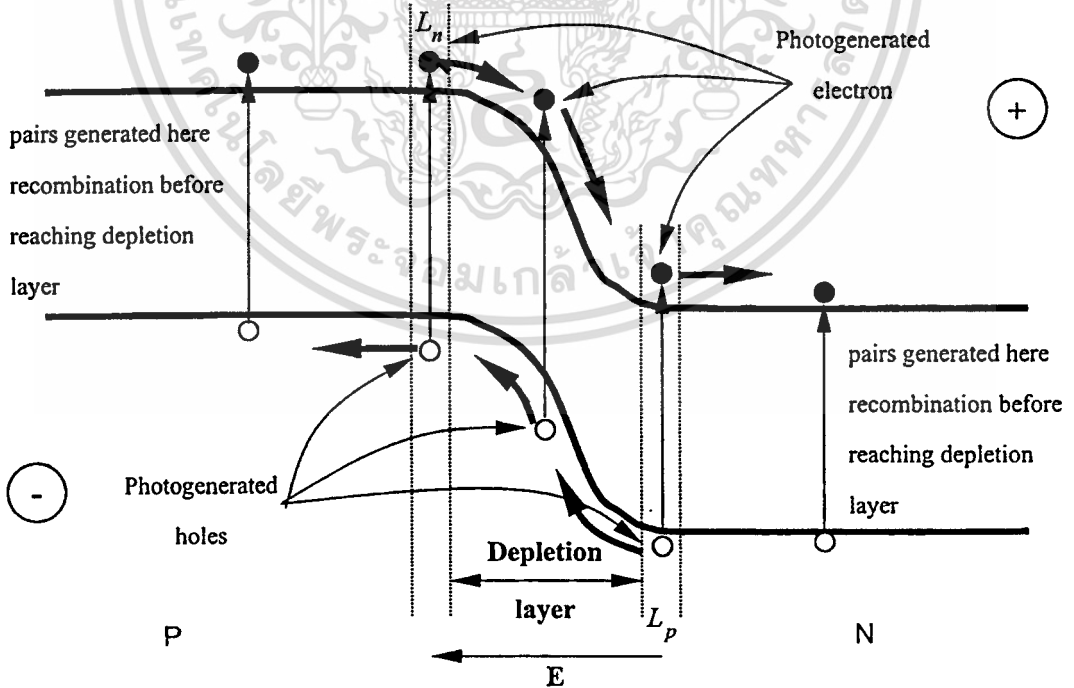
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมในชั้นเอ็น จะทำให้ชั้นเอ็นมีประจุเป็นลบ และโฮลที่สะสมในชั้นพี จะทำให้ชั้นพีมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก หลังจากนั้นถ้าเราต่อโฟโตไดโอดกับ วงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลจากชั้นเอ็น และ โฮลจะไหลจากชั้นพีไปสู่วงจรภายนอก



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างภาคตัดขวางแสดง โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การหาสมการในการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในโฟโตไดโอดนั้นจะต้องอาศัยวงจรสมมูลของโฟโตไดโอด ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ

I_L คือ กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง

C_j คือ ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อพี-เอ็น

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม

I_D คือ กระแสไฟฟ้ามืดในไดโอด

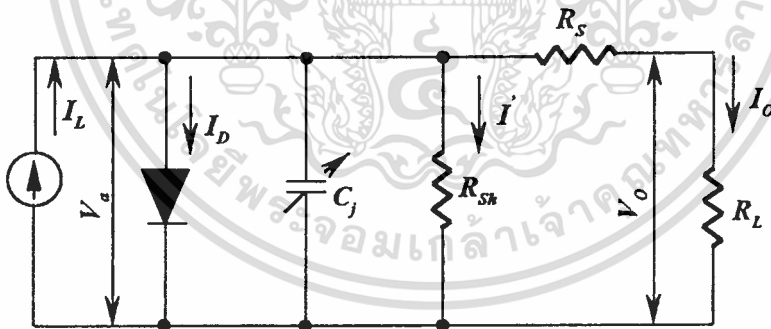
I' คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}

R_{sh} คือ ความต้านทานขนั้ด

V_a คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

I_o คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

จากวงจรนี้สามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_o) ได้จากสมการ

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_a}{kT} - 1 \right) - I' \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_s ในสมการนี้คือกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับอิมิตัวของไดโอด จากสมการนี้เราสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตเปิดวงจร (V_{oc}) ได้จากการให้ $I_o = 0$ นั่นคือ

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L - I'}{I_s} \right) \quad (2.22)$$

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

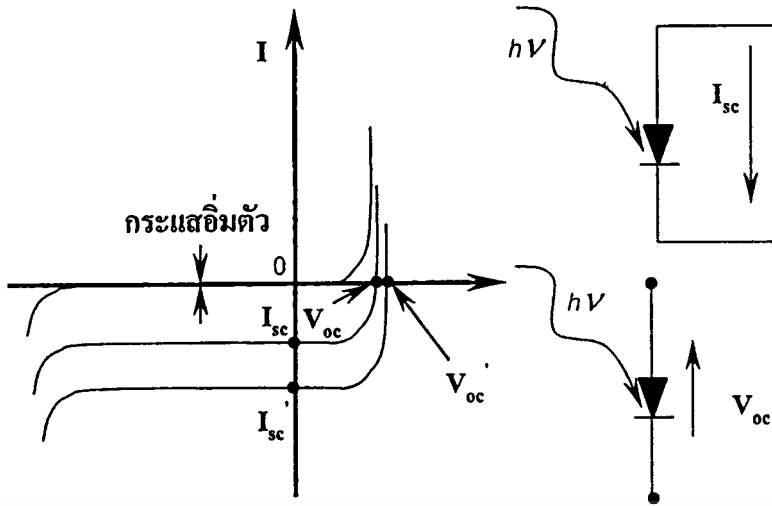
ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) สามารถได้จากการให้ $R_L = 0$ และ $V_o = 0$ ดังนั้น [1]

$$I_{sc} = I_L - I_s \left(\exp \frac{q(I_{sc} \cdot R_s)}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.23)$$

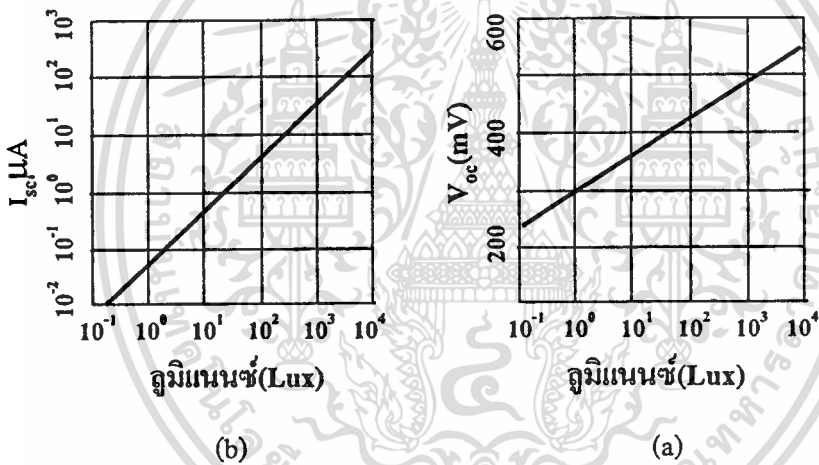
ในสมการนี้ พจน์ทางขวามือที่ 2 และ 3 จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการเป็นเชิงเส้นของ I_{sc} ถ้า R_s มีค่าไม่เกิน 10Ω และถ้า R_{sh} มีค่าระหว่าง $10^7 \sim 10^{11} \Omega$ จะทำให้สามารถตัดพจน์ที่ 2 และ 3 ทางขวามือทิ้งได้

2.6.2 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า โฟโตไดโอดก็คืออุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับไดโอด ดังนั้นในขณะที่ยังไม่มีแสงส่องกระทบที่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้กันทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.16 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อมีแสงส่องเข้าสู่โฟโตไดโอด จะทำให้เส้นระหว่างกระแส-แรงดันเลื่อนแบบขนานไปสู่เส้นหมายเลข 2 แต่ถ้าความเข้มแสงมากขึ้นก็จะเป็นเส้นกราฟแบบหมายเลข 3 ในขณะที่ส่องแสงอยู่ถ้าเราทำการวัดกระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอดจะได้ค่า I_{sc} หรือ I'_{sc} โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากเอโนดไปแคโทด ถ้าเป็นวงจรเราจะได้แรงดันวงจรเปิด V_{oc} หรือ V'_{oc} และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มแสงเป็นลักษณะเชิงเส้นตรงที่ตีมากดังแสดงในรูปที่ 2.17 (a) [8]



รูปที่ 2.16 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าใน โฟโตไดโอด



รูปที่ 2.17 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินฟราเรด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{oc} และความเข้มของแสงอินฟราเรด

2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับโฟโตไดโอด และใช้หลักการโฟโตโวลตาอิกเหมือนกัน โดยเมื่อมีแสงตกกระทบบนที่เซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์จะเหมือนกับไดโอดทั่วไปทุกประการ แตกต่างกันเพียงแต่ ชั้นของสารกึ่งตัวนำทางด้านที่รับแสง ต้องมีความบางมากๆ จนแสงส่องทะลุไปถึงรอยต่อและสารกึ่งตัวนำด้านที่เป็นฐานรองได้ เพราะฉะนั้นกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่ถูกแสงจะมีลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

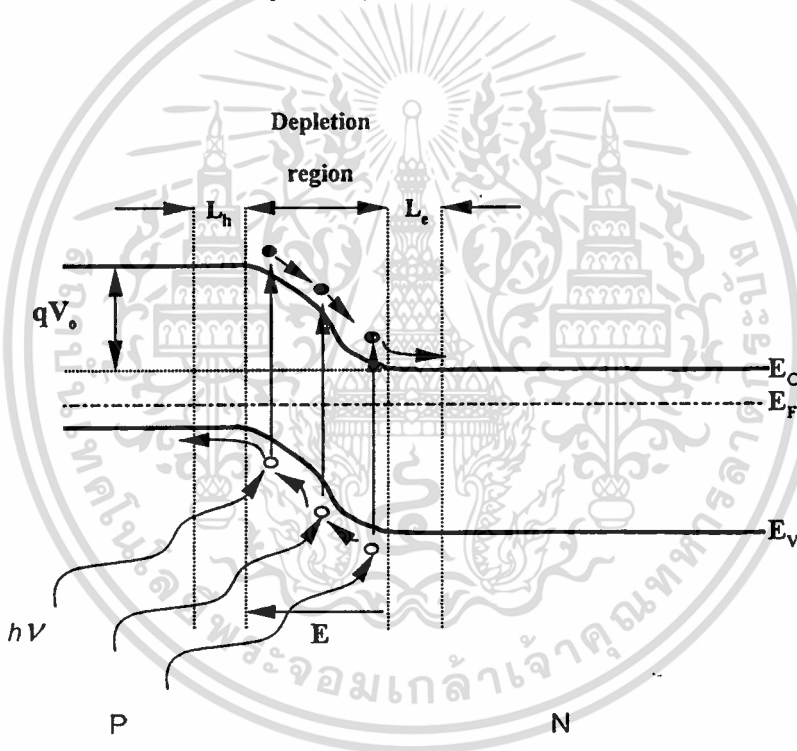
เหมือนกันกับไดโอดทั่วไป แต่ถ้ามีแสงมาตกกระทบแล้วคุณลักษณะกระแสและแรงดันจะเปลี่ยนไป

หลักการทํางานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่เซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าขึ้นภายในเซลล์ เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปที่ขั้วลบและโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก

2.7.1 หลักการทํางานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

2.7.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (homojunction solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน เช่น p-Si/n-Si นั้นหลักการการเกิดกระแสโฟโตนั่นก็จะเป็นลักษณะเช่นเดียวกับโฟโตไดโอด เพียงแต่ลักษณะการใช้งานนั้นไม่ต้องมีการป้อนแรงดันให้กับเซลล์ ซึ่งรูปทฤษฎีแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะการเกิดกระแสโฟโตในเซลล์แสงอาทิตย์

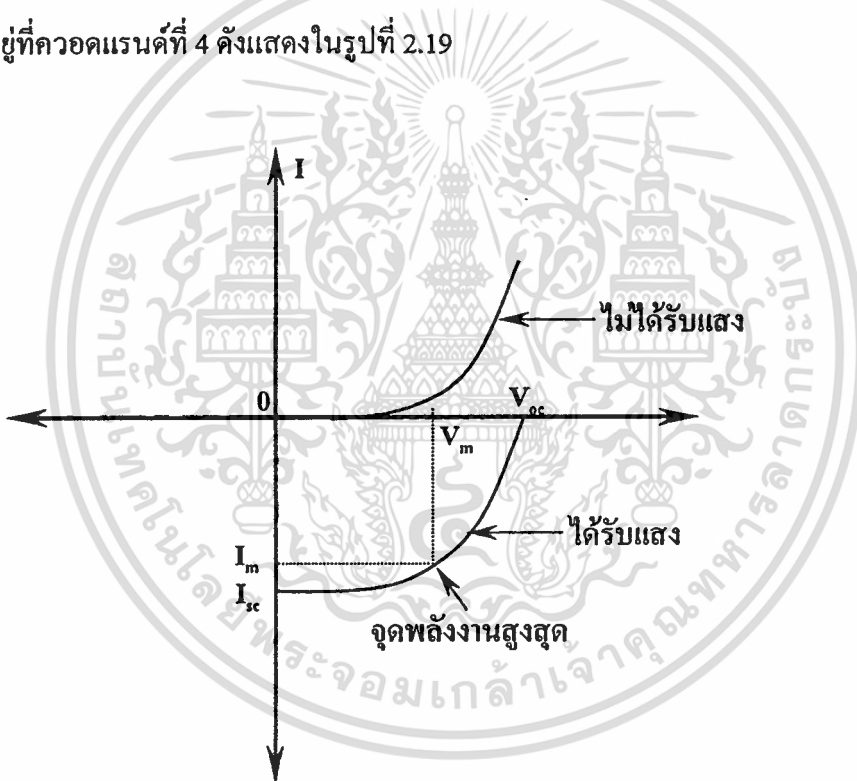
เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีมาต่อเข้าด้วยกันนั้น จะได้ลักษณะของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.18 ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน สังเกตได้จากระดับของพลังงานเฟอร์มีมีค่าเท่ากัน โดยค่าของความต่างศักย์ภายในจะมีค่าเท่ากับ qV_0 เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่บริเวณหลอดพาหะนั้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้น ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับพลังงานแสงด้วยว่าจะเพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้หรือไม่ ซึ่งได้อธิบายไว้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อ 2.5.1 ถ้าพลังงานมากพอก็จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้และจะเหลือโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ ที่บริเวณปลอดภัยนั้นจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ซึ่งมีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้านี้เองจะเป็นตัวทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงให้เคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น ในขณะที่เดียวกันโฮลก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านพี

2.7.1.1.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เพียงรอยต่อเดียวเหมือนไดโอด ดังนั้นคุณสมบัติทางแสงของเซลล์ในขณะที่ยังไม่ได้รับแสงจึงเหมือนกับไดโอดทั่วไป เพียงแต่มีกระแสรั่วไหลที่รอยต่อมากกว่าเท่านั้น นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีพื้นที่รอยต่อมากกว่า ในขณะที่เซลล์ได้รับแสงทิศทางการไหลของกระแสที่ผ่านรอยต่อของเซลล์จะตรงกันข้ามกับขณะที่ยังไม่ได้รับแสง โดยที่แรงดันยังมีลักษณะเหมือนเดิม กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จึงตกมาอยู่ที่ควอดแรนต์ที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นว่า เซลล์จะจ่ายกระแสออกมามากที่สุดเมื่อเซลล์ถูกัดวงจรซึ่งให้มีค่าเป็น I_{sc} และ เซลล์จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจรออก ซึ่งให้มีค่าเป็น V_{oc} เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันแล้ว จะพบว่ากราฟคุณสมบัติของเซลล์ในขณะที่ได้รับแสงในรูปที่ 2.19 จะมีอยู่จุดหนึ่งที่ค่าผลคูณของกระแสและแรงดันมีค่าสูงสุด จุดนี้จะเรียกว่าจุดพลังงานสูงสุดของเซลล์ กระแสและแรงดันที่จุดนี้มีค่าเป็น

I_m และ V_m ตามลำดับถ้าเรานำไปให้กับแหล่งรับพลังงานหรือโหลด ที่มีความต้านทานพอดีกับจุดนี้ เซลล์จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดมีค่าสูงสุด ค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมนี้จะคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง V_m ต่อ I_m เพราะฉะนั้น ค่าความต้านทานโหลด $= \frac{V_m}{I_m}$

ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟรูปที่ 2.19 คือถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้น เป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อ 2.7.2 จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าๆหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า “ฟิลแฟกเตอร์” ($F.F.$: Fill Factor) ของเซลล์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์จริงๆ ต่อพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ในทางอุดมคติ

$$F.F. = \frac{P_m}{P_0} = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.24)$$

เมื่อ $F.F.$ คือ ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

P_m คือ พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ

I_m คือ กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์

V_m คือ แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์

P_0 คือ พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ

I_{sc} คือ ค่ากระแสัดวงจร

V_{oc} คือ แรงดันขณะวงจรเปิด

จะเห็นได้ว่าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ถ้าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่า เซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติมาก

เพื่อที่จะเข้าใจคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะต้องพิจารณาจากวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสคงที่ นั่นก็คือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสง (I_L) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และ รอยต่อพี-เอ็นของไดโอด กระแส I_L ที่เกิดเนื่องจากแสงนี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอด และ R_s แล้วจึงไหลมายังโหลด (R_L) กระแสที่ไหลผ่าน R_s และ R_L ให้มีค่าเป็น I_o จะได้ว่า

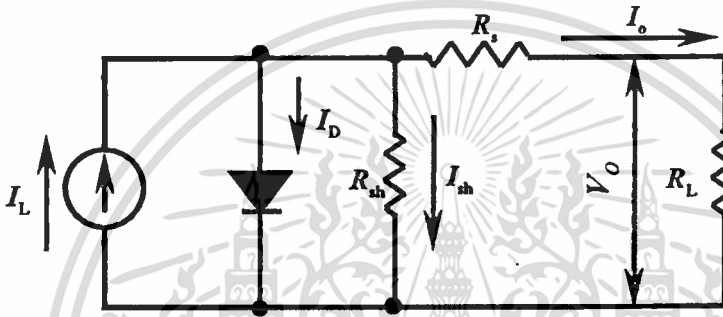
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_L = I_D + I_o \quad (2.25)$$

$$I_o = I_L - I_D \quad (2.26)$$

เมื่อ $R_s = 0$ กระแส I_D มีค่าดังนี้

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

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

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

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.29)$$

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

$$I_o = I_L \quad (2.30)$$

ในกรณีนี้ I_o ก็คือ I_{sc} ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดมาจากแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$I_L = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.31)$$

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

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right) \quad (2.32)$$

2.7.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction solar cell)

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

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

ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ สิ่งที่สำคัญสิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือ การเลือกขนาดของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองให้มีผลตอบสนองทางแสงให้มีค่าใกล้เคียงกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ให้มากที่สุด

โดยในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแอนไอโซเฮเทอโรโร (anisotype heterojunction) นั้น โฟตอนฟลักซ์ (photon flux : $\Phi(x)$) ต่อหน่วยเวลาต่อพื้นที่ในสารกึ่งตัวนำชั้นที่สอง ณ จุดที่มีระยะห่างจากรอยต่อเชื่อมเฮเทอโรโร (heterointerface) เท่ากับ x มีค่าเท่ากับ

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha_2 x) \exp(-\alpha_1 x_j) \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Φ_0 คือ โฟตอนฟลักซ์ที่ตกกระทบผิวเซลล์แสงอาทิตย์

α_1, α_2 คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ณ ความยาวคลื่น (λ) ของสารกึ่งตัวนำชั้นที่หนึ่ง และชั้นที่สอง

x_j คือ ความหนาของสารกึ่งตัวนำชั้นหน้าต่าง

ถ้าสมมติให้ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency) ในการผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากับ 1 จำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกผลิต ณ ตำแหน่ง x จะมีค่าเท่ากับ

$$G(x) = -\frac{d\Phi}{dx} \quad (2.34)$$

ดังนั้น กระแสโฟโวลต์จึงจะได้ว่า

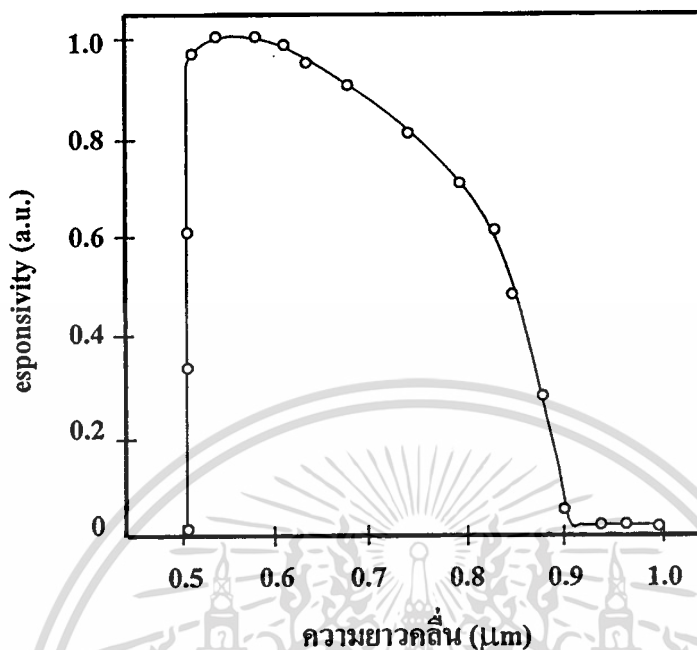
$$\begin{aligned} I &= Aq \int_0^{\infty} G \exp\left(-\frac{x}{L}\right) dx \\ &= \frac{Aq\Phi_0\alpha_2 L \exp(-\alpha_1 x_j)}{1 + \alpha_2 L} \end{aligned} \quad (2.35)$$

โดยที่ L คือ ระยะทางแพร่ซึม (Diffusion length) ของพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำชั้นที่สอง

ในการคำนวณข้างต้น สมมติว่า กระแสไฟฟ้าโฟโตไม่ได้ผลิตในชั้นหน้าต่าง จากรูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์เฮเทอโรจังก์ชัน n-CdS/P-InP ในช่วงโฟตอนที่มีค่าระหว่าง E_{g1} และ E_{g2} ผลตอบสนองลดน้อยลงเมื่อความยาวคลื่นแสงยาวขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อความยาวคลื่นแสงยาวขึ้น ค่า α_2 จะลดลง และเมื่อ α_2 มีค่าลดลงจากสมการที่ 3 ค่า I จะมีค่าลดลงด้วย แต่สำหรับกรณีรอยต่อ P-n ชนิดโฮโม สเปกตรัมช่วงความยาวคลื่นแสงยาว ผลตอบสนองจะเพิ่มขึ้น ดังนั้น ผลตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นสั้นของรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันจึงดีกว่ากรณีรอยต่อโฮโม [8]

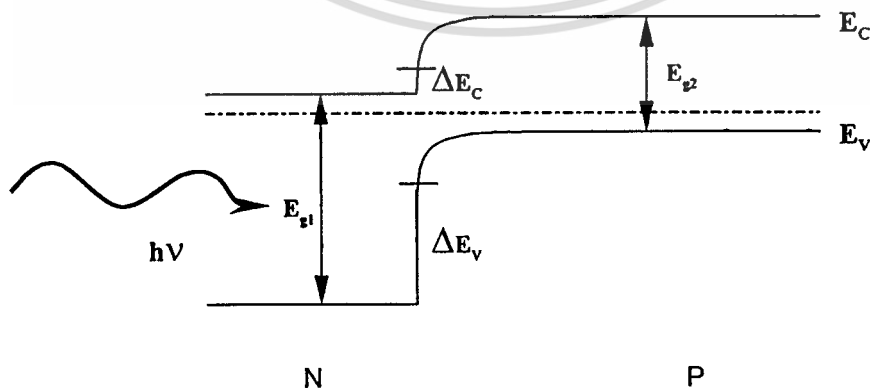
ในการพิจารณาข้างต้นทั้งหมด เราได้สมมติว่า สารกึ่งตัวนำชั้นที่ 2 มีความหนาเป็นอนันต์ และความหนาของชั้นปลอดพาหะมีค่าน้อยกว่าระยะทางแพร่ซึมของพาหะข้างน้อย ข้อสมมตินี้ไม่

สามารถใช้ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีหรืออะมอร์ฟัสได้ ซึ่งมีค่าระยะทางแพร่ซึมของพาหะสั้นมาก



รูปที่ 2.21 สเปกตรัมผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรโร

จากรูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแอนไอโซเฮเทอโรโร โดยที่ Anderson ได้พบว่าความไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงาน (Band discontinuity) ของแถบความนำ (ΔE_c) และของแถบวาเลนซ์ (ΔE_v) เป็นไปดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 ลักษณะของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโรที่ไม่มีขดแหลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.22 ΔE_c มีค่าเป็นบวก ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตในชั้นพี นั้นสามารถไหลสู่ชั้นเอ็นได้ เป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าโฟโตนิกได้ แต่ถ้า $\Delta E_c \leq kT$ จะเกิดยอดแหลม (spike) ขึ้นที่ชั้นรอยต่อของแถบความนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไม่ให้เคลื่อนที่ ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าโฟโตนิกค่าลดลง

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

อย่างไรก็ตามต้องระวังด้วยว่า ในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ n-p ค่า ΔE_c มีค่ามากกว่า kT มาก ๆ หรือเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n ถ้า ΔE_v มีค่ามากกว่า kT มาก จะทำให้แรงดันไฟฟ้าภายใน V_d ลดลงตามสูตรดังนี้ [8]

$$V_D = -\Delta E_c + E_{g2} - \delta_1 - \delta_2 \quad \text{กรณีรอยต่อ n-p} \quad (2.36)$$

$$V_D = -\Delta E_v + E_{g2} - \delta_1 - \delta_2 \quad \text{กรณีรอยต่อ p-n} \quad (2.37)$$

ในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อแบบเฮเทอโรโรแบบไม่มียอดแหลมดังแสดงในรูปที่ 2.22 นั้น อิเล็กตรอนจะเป็นพาหะส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทั้งนี้เพราะว่าค่าแ่งศักย์ของอิเล็กตรอนนั้นต่ำกว่าโฮลมาก ถ้ากระแสรวมตัว (Recombination current) ในย่านปลอดพาหะนั้นมีค่าน้อย กระแสไฟฟ้ามีคจะแสดงได้ว่า

$$I_D = AqXN_{d1} \sqrt{\frac{D_{e2}}{\tau_{e2}}} \exp\left[-\frac{q(E_{g2} - \delta_1 - \delta_2)}{kT}\right] \times \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \quad (2.38)$$

โดยที่ X คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านรอยต่อของอิเล็กตรอน

N_{d1} คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิด n (ชั้นที่ 1)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

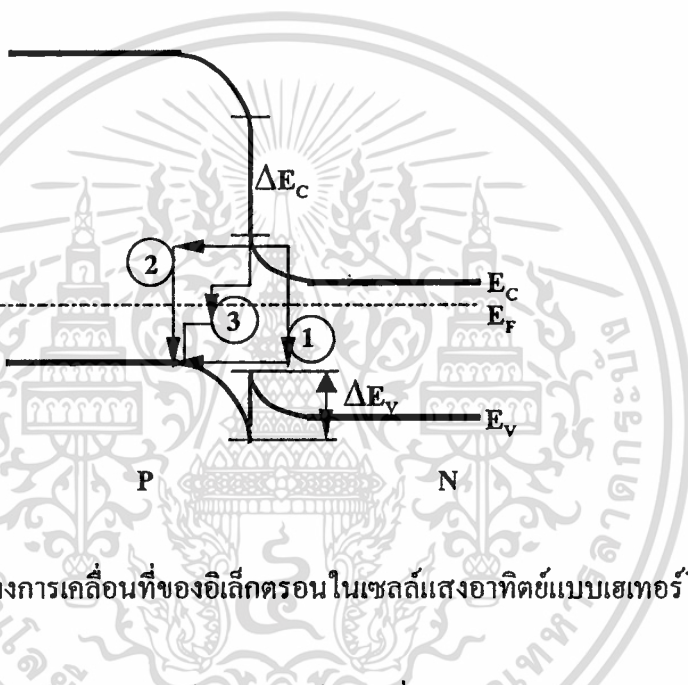
D_{e2}, τ_{e2} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมและอายุของอิเล็กตรอนตามลำดับในสารกึ่งตัวนำชนิด p (ชั้นที่ 2)

แต่ถ้ากระแสรวมตัวของประจุพาหะในชั้นปลอดพาหะมีค่ามาก เช่น รอยต่อระหว่างเพชรกับซิลิกอน ความสัมพันธ์ของ I-V จะมีรูปเหมือนในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n แบบโฮโม คือ

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.39)$$

I_s คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิ่มตัวซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น และ จำนวนแถบสแตต (Gap state) ในชั้นปลดพาหะมีค่ามากขึ้น
 n มีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ 2 (แต่ถ้าเป็นรอยต่อระหว่างเพชรและซิลิกอน n จะมีค่ามากกว่านี้)

สมการที่ 2.39 ใช้ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่แถบพลังงานไม่มีขดแหลมเท่านั้น ไม่สามารถใช้ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีขดแหลมดังรูปที่ 2.23 ได้



รูปที่ 2.23 ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโร

ซึ่งคุณสมบัติของ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 2.23 พบว่าความชันของกราฟจะไม่ลดลงแม้อุณหภูมิจะสูงขึ้นค่าหนึ่ง ซึ่งขัดแย้งกับสมการที่ 2.39 โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีขดแหลมนั้น มีด้วยกันหลายรูปแบบ คือ อิเล็กตรอนในแถบความนำของด้านเอ็น จะตกลงในแถบสแตต ซึ่งมีอยู่จำนวนมากที่รอยต่อเชื่อม ในแถบพลังงานต้องห้าม ต่อจากนั้นอิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์ (Tunnel) เข้าไปยังแถบวาเลนซ์ของด้านพี ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นทางที่ 1 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเช่นนี้ทำให้คุณสมบัติ I-V มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = AB \exp[-\alpha(V_D - V)] \quad (2.40)$$

โดยที่ B คือ ค่าคงตัว
 V_D คือ ศักย์ภายในที่เกิดขึ้นในรอยต่อและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{4}{3\hbar} \left(\frac{m^* \mathcal{E}_1}{N_A} \right)^{\frac{1}{2}}$$

โดยที่ m^* คือ effective mass ของอิเล็กตรอน

N_A คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในชั้น p

\mathcal{E}_1 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารชั้น p

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอาจเป็นไปได้ในลักษณะเส้นทางที่ 2 และ 3 ในรูป 2.23 ก็ได้ซึ่งจะได้ผลเหมือนสมการที่ 2.40 ในกรณีเส้นทางที่ 2 นั้น เริ่มแรกอิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์เข้าไปในแถบพลังงานต้องห้าม แล้วถูกจับด้วยแถบสแตต ต่อจากนั้นอิเล็กตรอนจะตกลงไปในแถบวาเลนซ์และไปรวมตัวกับโฮล สำหรับกรณีเส้นทางที่ 3 นั้น อิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์ไปสู่แถบสแตตหลายครั้งเรียกว่า (Multiple tunneling) ก่อนที่จะรวมตัวกับโฮล

2.7.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานในเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ (R_s) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์มาก จากสมการที่ 2.41 ซึ่งคิดที่ $R_s = 0$ และได้ I_o ออกมาดังนี้

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp(qV_o / kT) - 1 \right] \quad (2.41)$$

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

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

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V_o + I_o \cdot R_s)}{kT} \right\} - 1 \right] \quad (2.42)$$

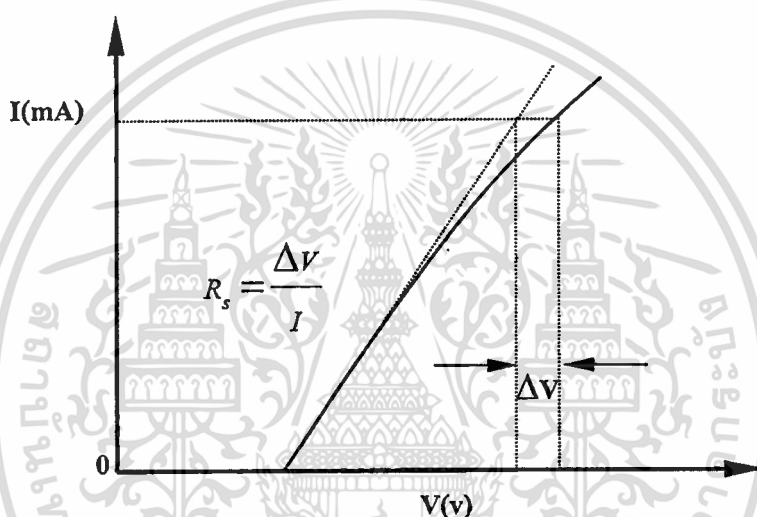
ความต้านทานอนุกรมสามารถหาได้โดยวิธีการดังนี้

เนื่องจากกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล เช่นเดียวกันกับไดโอด เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันนี้ไปเขียนลงในกราฟเซมิล็อก จะได้เป็นกราฟเส้นตรง แต่เนื่องจากผลของความต้านทานภายในเซลล์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานนี้ แรงดันส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กับกระแสในลักษณะเชิงเส้น เมื่อกระแสไหลผ่านเซลล์มากผลของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานอนุกรมนี้ จะทำให้ได้กราฟเส้นตรงที่ได้ในช่วงกระแสสูงๆ นี้เบี่ยงเบนออกจากแนวเดิม ค่าที่เบี่ยงเบนออกมานี้จะนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ได้

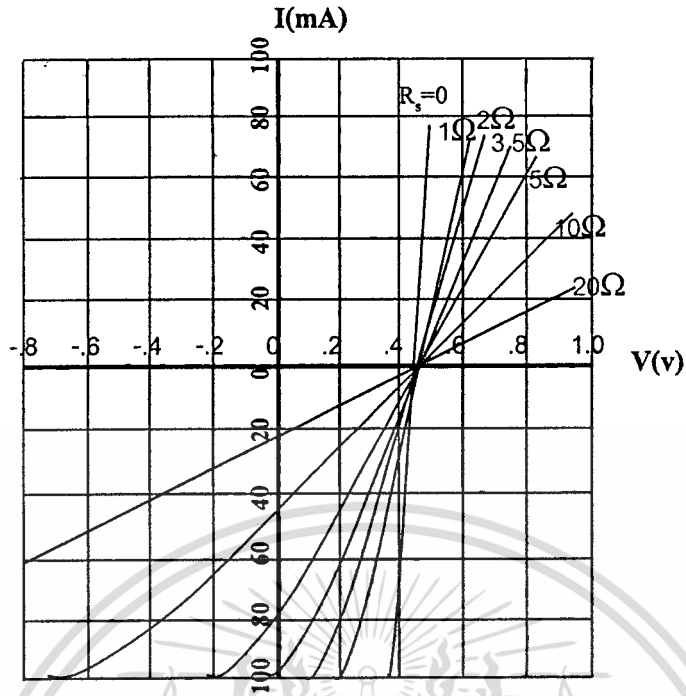
จากกราฟในรูปที่ 2.24 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ ที่ค่ากระแส I จะหาค่า R_s จากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV ได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.43)$$



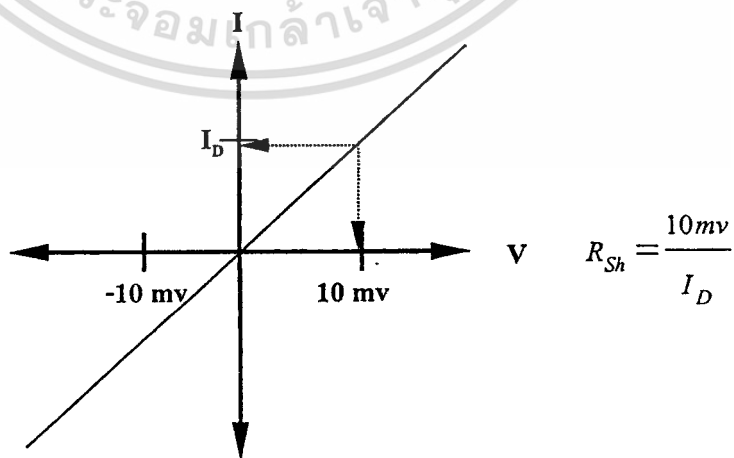
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บนกราฟแบบเซมิล็อก

จากสมการที่ 2.42 สามารถนำไปเขียนกราฟเพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 2.25 [1] จากรูปจะเห็นได้ว่าเซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อยลงและความชันของกราฟก็ลดลงด้วยเป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ลดน้อยลงไปตาม ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรรหาทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.25 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ส่วนความต้านทานขนานนั้นอาจจะเกิดจากกระแสรั่วที่บริเวณขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นความต้านทานขนานควรมีค่าสูงมากๆ แต่อาจจะมีค่าลดลงได้เนื่องมาจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น การหาค่าความต้านทานขนานนั้นสามารถทำได้โดยการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันในสภาพมืด โดยการไบแอสให้กับเซลล์ใน ระดับแรงดันต่ำๆ ประมาณ 10-20 mv ดังรูปที่ 2.24 [8]



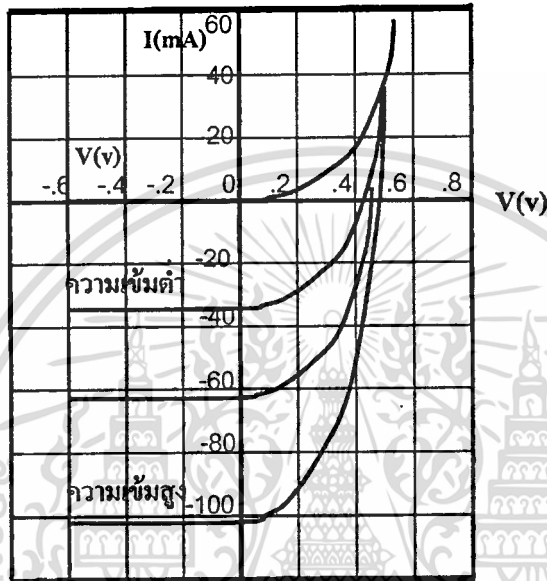
รูปที่ 2.24 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้แสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีอิสระหลุดจากการยึดเหนี่ยวกับโฮลภายในอะตอม ถ้าแสงที่ส่องมากระทบเซลล์มีความเข้มสูงมากขึ้นก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลให้กระแสที่ได้จากเซลล์มีค่าสูงขึ้น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน ได้แสดงไว้ในรูปที่

2.27



รูปที่ 2.27 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.7.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริง ๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็จะมีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย เมื่อได้พิจารณาสมการของกระแส I_0 ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L ในสมการที่ 2.26 จะพบว่า กระแส I_0 นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องจากแสง I_L และกระแส I_D ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L และ I_D

2.7.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L [1]

กระแส I_L ที่เกิดขึ้นจากแสงนั้นมีสมการดังต่อไปนี้

$$I_L = qg(x)A(L_e + L_h) \quad (2.44)$$

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

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.45)$$

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

องค์ประกอบอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อ I_L ก็คือ $g(x)$ โดยพบว่า $g(x)$ จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิต่ำๆ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำๆ เพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานโฟตอนจากแสงสามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะได้มากขึ้นกว่าเดิม แต่ผลที่เกิดขึ้นนี้เมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานจริงๆ ที่อุณหภูมิต่ำๆ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำๆ เพียงเล็กน้อย (ในช่วง 20-70 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า $g(x)$ น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า I_L จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากกับอุณหภูมิ

2.7.4.2 ผลของอุณหภูมิต่อ I_D

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

จากสมการจะเห็นได้ว่า I_s จะมีผลต่อกระแส I_D มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อ I_s โดยพิจารณาจากสมการของ I_s ดังนี้

$$I_s = Aqn_i^2 \left[\frac{1}{N_a} \left(\frac{D_e}{\tau_e} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_d} \left(\frac{D_h}{\tau_h} \right)^{1/2} \right] \quad (2.46)$$

จากสมการของ I_s ในกรณีของซิลิกอน พบว่า n_i^2 จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ตามสมการดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_i^2 = 15 \times 10^{32} \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (2.47)$$

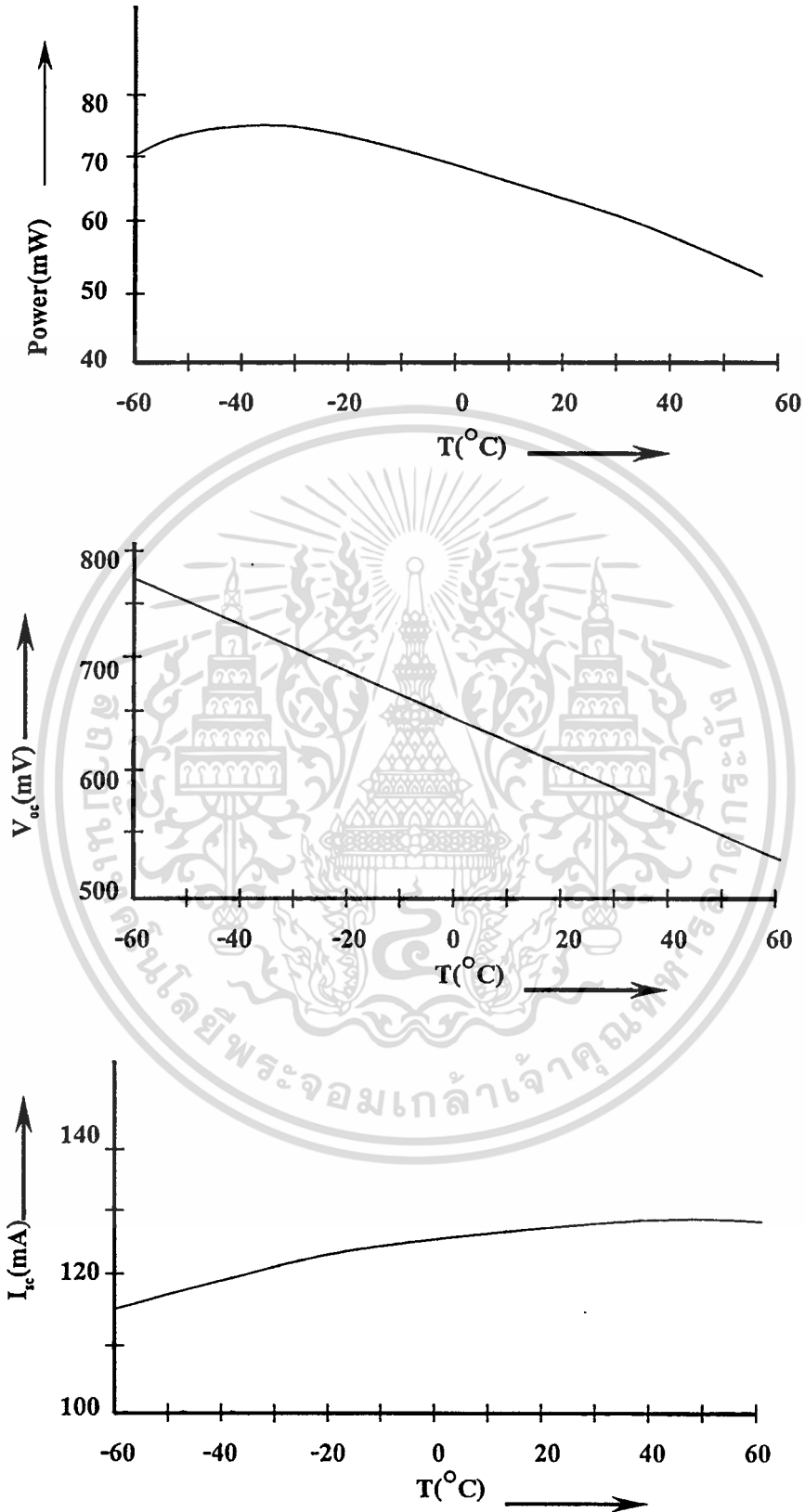
จากสมการจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นแบบเอกโพเนนเชียล เป็นผลให้ I_s มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จากผลอันนี้ แสดงว่า I_D จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.7.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ จะพิจารณาค่าแรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) ตามสมการ 2.32 ดังนี้

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

จากสมการนี้ค่าของ $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่าของ kT/q มีค่าต่ำมาก ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} คือค่าของ I_s ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลทำให้ค่าของ V_{oc} มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ I_s , V_{oc} และ P_o แสดงไว้ในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการสร้างและการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งจะต้องผ่านการเตรียมการอยู่หลายขั้นตอน เช่น การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น การขัดแผ่นซิลิคอน การสร้างฟิล์มเพชร การทำขั้วโลหะ รวมไปถึงการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่สร้างได้ ดังจะได้อธิบายรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

3.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน

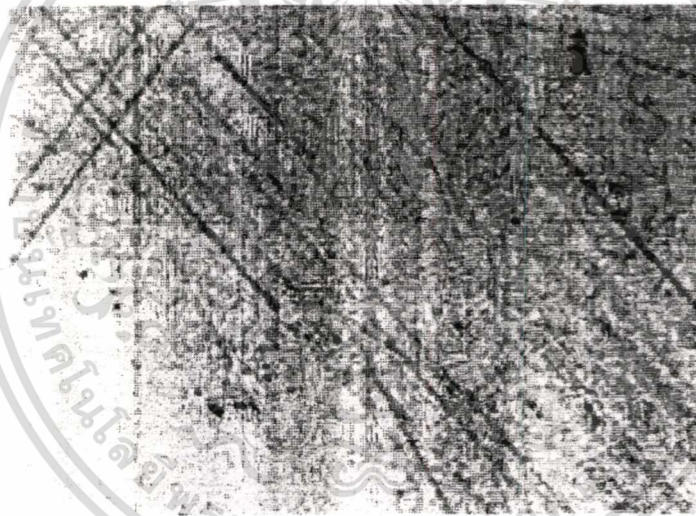
3.1.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

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

3.1.2 การขัดแผ่นซิลิคอน

ก่อนที่จะทำการสร้างฟิล์มเพชรนั้นจำเป็นที่จะต้องขัดแผ่นซิลิคอนเสียก่อนเพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการนิวเคลียส [9] เพื่อที่จะทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรที่สมบูรณ์และเร็วขึ้น โดยในการขัดแผ่นซิลิคอนนั้นจะใช้ครีมเพชรขนาด 0.25 ไมโครเมตร ขัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการขัดนี้มาทำความสะอาดอีกครั้งหนึ่งตามกระบวนการดังนี้

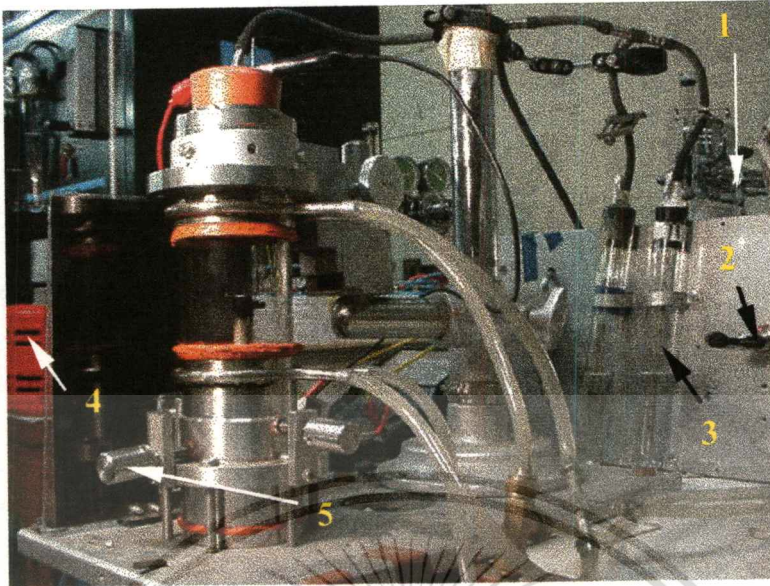
- ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วย เอทิลแอลกอฮอล์ เพื่อกำจัดครีมีเพอร์ที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอนให้หมดไป
- นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการขัดมาต้มในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปเข้าเครื่องสั่นความถี่สูงทันที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดครีมีเพอร์ที่ยังติดค้างอยู่ที่แผ่นซิลิคอน
- ล้างสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนออกด้วยอะซีโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง และล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้าโดยการต้มด้วยกรดไนตริก (HNO_3 acid)
- ล้างกรด HNO_3 ด้วยการต้มในน้ำ DI และล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- ลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรด HF 5% และล้างออกด้วยน้ำ DI แล้ว เป่าแห้งเสร็จแล้วจะได้รูปลักษณะรอยขีดที่เกิดจากการขัดด้วยครีมีเพอร์ขนาด $0.25 \mu m$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปลักษณะรอยขีดที่เกิดจากการขัดด้วยครีมีเพอร์ขนาด $0.25 \mu m$

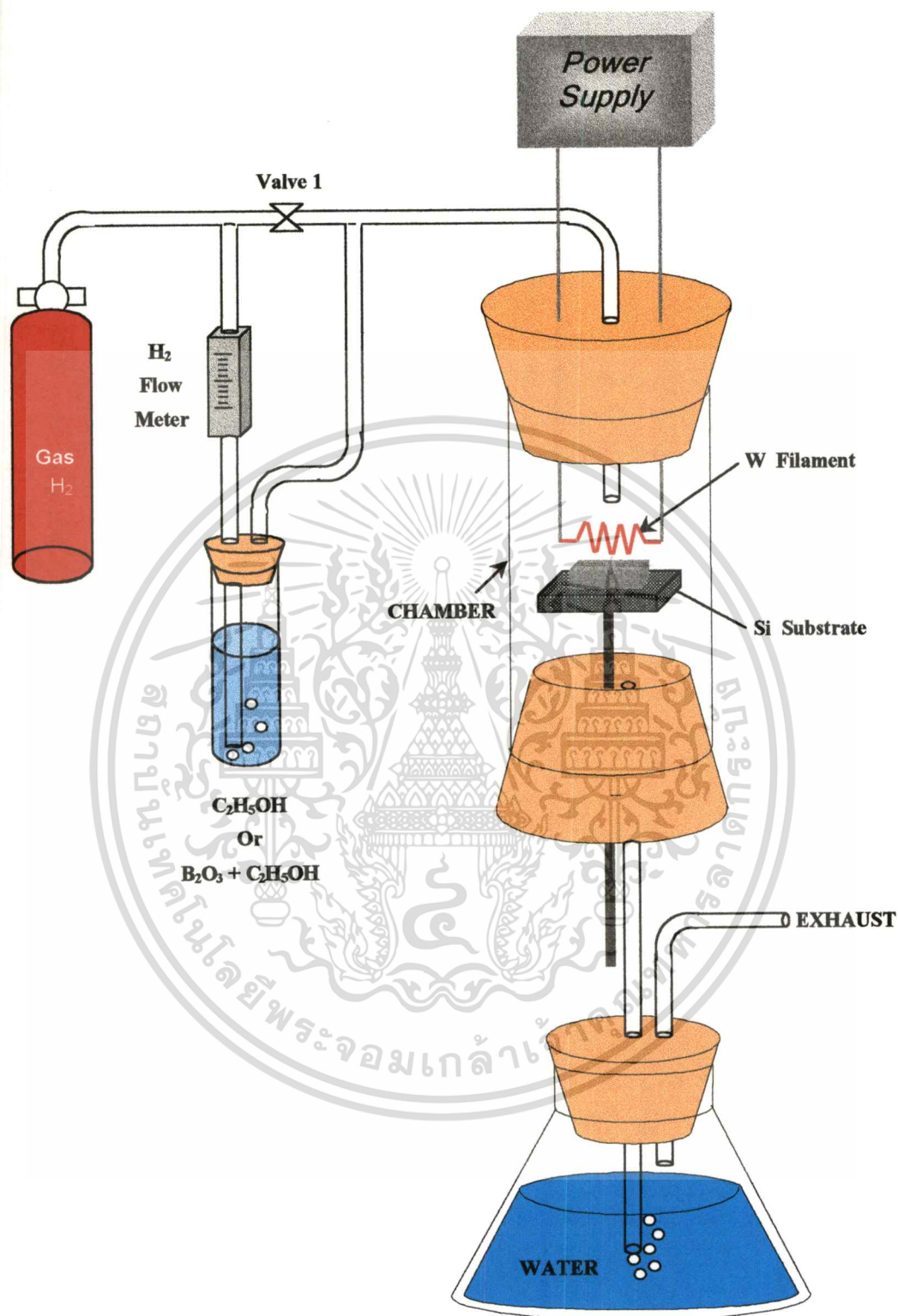
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพอร์

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



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

- ปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนจากถังผ่าน (1) mainvalve(อยู่ข้างหลัง) เข้าไปใน Chamber ประมาณ 10 นาที chamber เป็นบรรยากาศของ ไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว
- ปิดวาล์ว (2) เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจน ไหลผ่านแหล่งจ่ายเป็นคิวพาไอระเหยอัลกอกซอลด์ (3) เข้า chamber ด้วยอัตราการไหลคงที่ควบคุมโดย Flow meter
- จ่ายกระแส (4) อย่างช้า ๆ ให้กับ ไส้หลอดทั้งสแตนด์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของ ไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ $2,000^{\circ}\text{C}$
- ปรับระยะห่างและตำแหน่งระหว่างฐานรองซิลิคอนกับ ไส้หลอดทั้งสแตนด์ด้วยแกนปรับระยะ (5) ให้ได้ระยะที่เหมาะสมประมาณ 2 มิลลิเมตร
- สร้างฟิล์มเพชรตามระยะเวลาที่ต้องการ
- เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างแล้วจึงค่อย ๆ ลดระยะของฐานรองซิลิคอนให้ต่ำลงจาก ไส้หลอดประมาณ 2 เซนติเมตร พร้อมกับลดการจ่ายกระแสลงอย่างช้า ๆ
- ปิดถังก๊าซไฮโดรเจน และรอจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนในระบบที่ยังค้างอยู่ออกจนหมด
- นำชิ้นงานที่ได้ไปใช้ในกระบวนการถัดไป หรือไปตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ



รูปที่ 3.3 ไคอะแกรมระบบ CVD อย่างง่ายที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

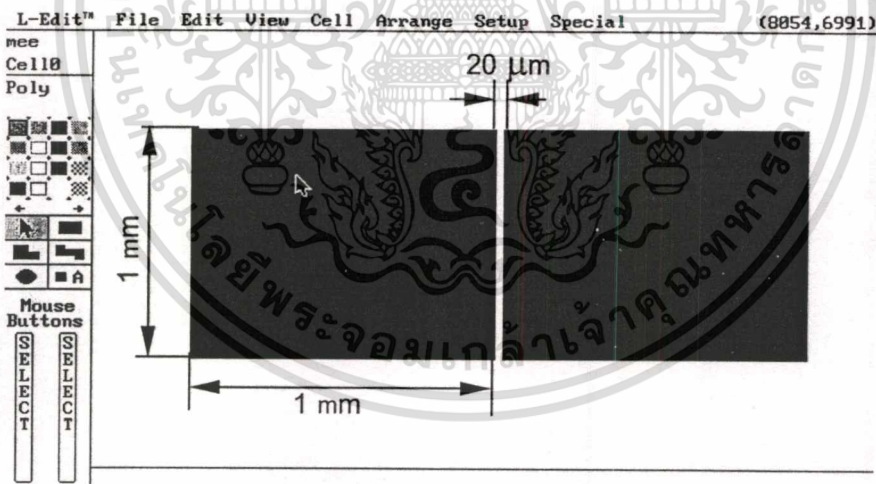
3.3 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

ในงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการสร้างรอยสัมผัสโลหะที่เป็นแบบรอยสัมผัสแบบ โอห์มิก (ohmic) ซึ่งจะให้โลหะเป็นทองคำ เป็นตัวเคลือบบนฟิล์มเพชรโดยเครื่อง Vacuum Evaporator ซึ่งก่อนจะทำการเคลือบนั้น จะต้องผ่านกระบวนการต่างๆอีกมาก เช่นการออกแบบลวดลายวงจรที่จะเคลือบ กระสร้างกระจกต้นแบบ และกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยจะได้อธิบายทีละส่วนดังต่อไปนี้

3.3.1 การออกแบบลวดลายโลหะ

ในการวิจัยครั้งนี้การออกแบบลวดลายในครั้งนี้จะใช้โปรแกรม Ledit เป็นโปรแกรมในการออกแบบ เมื่อออกแบบเสร็จแล้วก็จะไปทำการพิมพ์ลวดลายของวงจรลงบนแผ่นใส แล้วจึงทำการติดแผ่นใสลงไปในกระจกอีกทีหนึ่งพร้อมที่จะนำไปเป็นมาร์กต้นแบบได้ ลวดลายที่จะแบ่งออกเป็นสามส่วน คือ การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อศึกษาระยะห่างของลวดลายโลหะที่มีผลต่อปริมาณการไหลของกระแสในฟิล์มเพชร ส่วนของโฟโตไดโอด และ ส่วนของโซลาร์เซลล์ ดังนี้

3.3.1.1 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพี



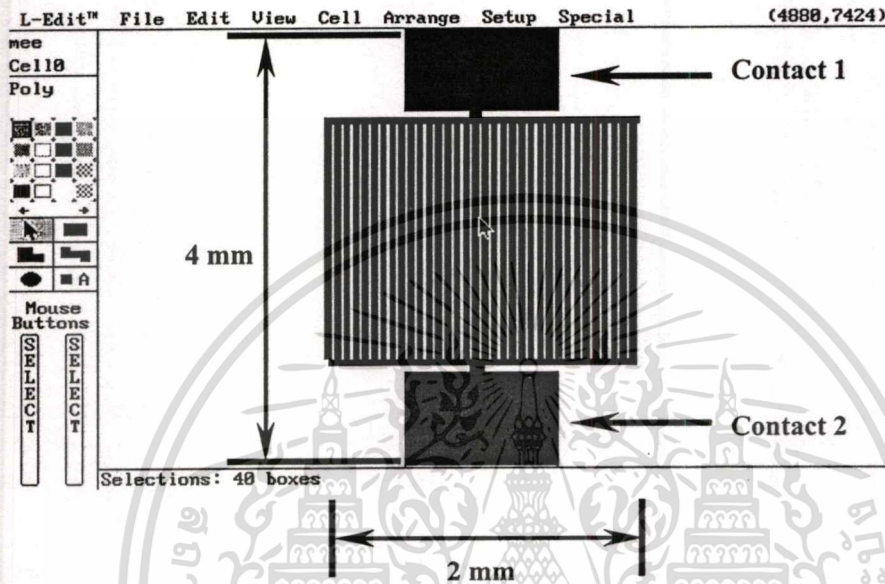
รูปที่ 3.4 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพี

ในหัวข้อแรกนี้จะศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพี โดยออกแบบขั้วโลหะสองขั้วให้มีขนาด 1mm*1mm ระยะห่างระหว่างมีขนาด 20 μm

3.3.1.2 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อศึกษาระยะห่างของลวดลายโลหะที่มีผลต่อปริมาณ

การไหลของกระแสในฟิล์มเพชร

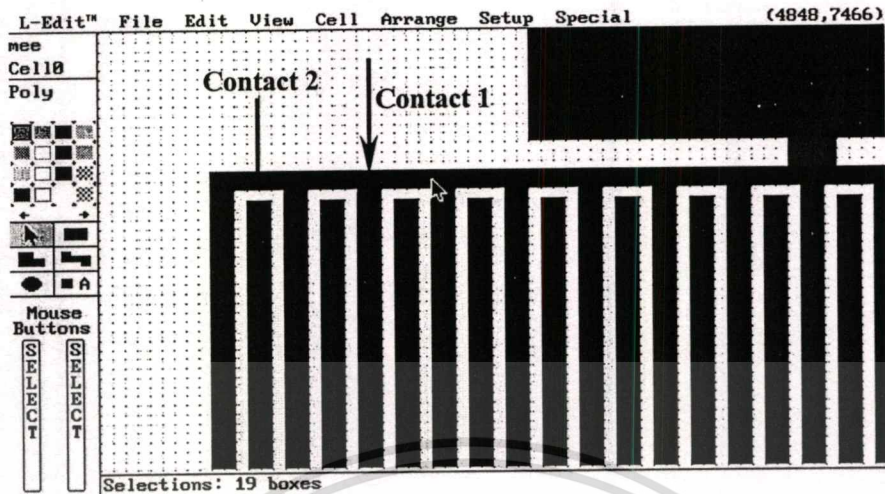
เนื่องจากเพชรที่สร้างได้นั้นจะมีลักษณะเป็น โพลีคริสตัล ซึ่งจะมีขอบของเกรนเกิดขึ้น ซึ่งขอบของเกรนนี้จะเป็นตัวกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนเดินทางได้สะดวก หรือจะทำตัวเป็นศูนย์กลางการแพร่ป้อนอิเล็กตรอน



รูปที่ 3.5 รูปลวดลายโลหะเพื่อศึกษาระยะห่างของลวดลายโลหะที่มีผลต่อปริมาณการไหลของกระแสในฟิล์มเพชร

การแพร่ป้อนอิเล็กตรอน จะทำให้กระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงที่จะไหลออกสู่บรรยากาศนอกนั้นมีค่าน้อย ดังนั้นการทำลวดลายโลหะนั้นจำเป็นที่จะต้องทำให้มีขนาดระยะห่างแคบๆ เพื่อป้องกันการเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล ในการออกแบบลวดลายโลหะที่จะศึกษาในครั้งนี้ก็เพื่อจะดูว่าขนาดของระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะที่เหมาะสมที่จะทำให้กระแสไหลในฟิล์มเพชรได้ดีนั้นจะมีขนาดเท่าไร โดยในการออกแบบในครั้งนี้จะกำหนดระยะห่างระหว่างโลหะให้ค่าดังนี้คือ $20\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$, $80\ \mu\text{m}$, $120\ \mu\text{m}$, และ $180\ \mu\text{m}$, ซึ่งลวดลายจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 โดยขนาดของลายโลหะจะมีขนาดคงที่คือ $40\ \mu\text{m}$

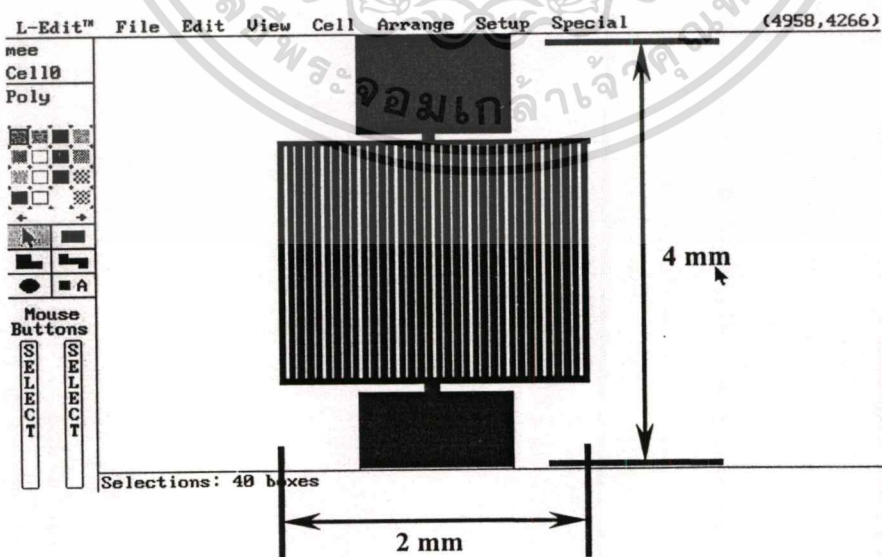
ซึ่งจากรูปถ้าขยายให้ใหญ่กว่านี้จะเห็นว่ามีความถี่ของลวดลาย contact 1 และ contact 2 จะแยกกันอย่างชัดเจนดังรูปที่ 3.6 ในการออกแบบครั้งนี้จะกำหนดให้พื้นที่ที่รับแสงเท่ากันทั้งหมดของชุดการออกแบบ คือประมาณ 2.3 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 รูปขยายของสวดลายโลหะ

3.3.1.3 การออกแบบสวดลายโลหะของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

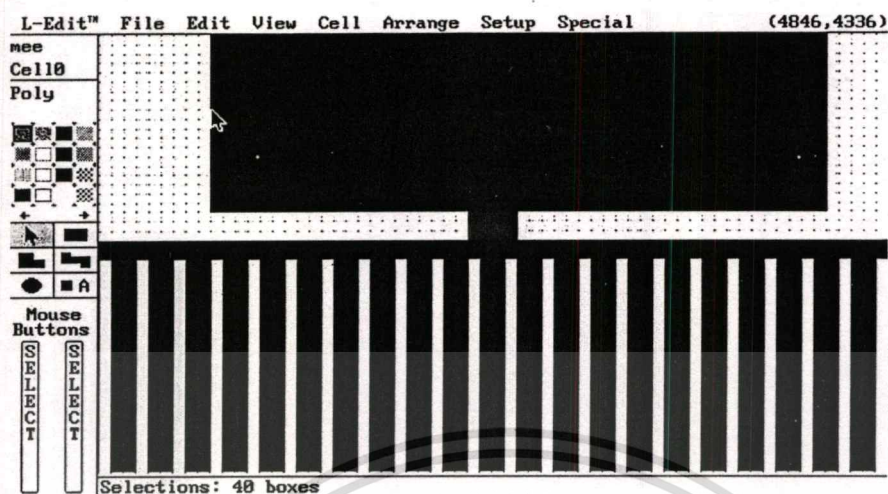
การออกแบบสวดลายของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะออกแบบให้มีสวดลายเป็นลักษณะดังรูปที่ 3.7 ซึ่งในการออกแบบสวดลายโลหะนั้น จะกำหนดให้ขนาดของเส้นโลหะซึ่งในรูปจะเป็นสี่ด้านนั้นมีขนาดคงที่ที่ $40 \mu\text{m}$ โดยจะแปลค่าของระยะห่างระหว่างสวดลายนั้นมีค่าต่าง ๆ กันคือ $20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$, $120 \mu\text{m}$, และ $180 \mu\text{m}$, ซึ่งลักษณะสวดลายจะเป็นดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 รูปสวดลายโลหะของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

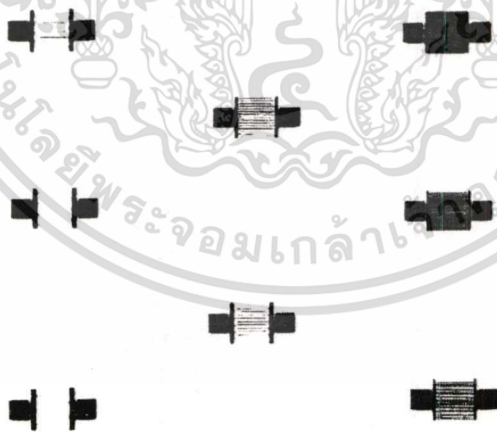
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถ้าขยายรูปดูก็จะเห็นลักษณะของลวดลายเป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ภาพขยายของลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยมีพื้นที่รับแสงทั้งหมดประมาณ 3.4 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งเมื่อออกแบบเสร็จแล้วนำไป
ถ่ายลงบนฟิล์มแล้วจะได้ลักษณะดังรูปที่ 3.9



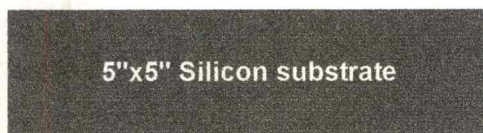
รูปที่ 3.9 ลักษณะของกระจกต้นแบบลวดลายโลหะของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร

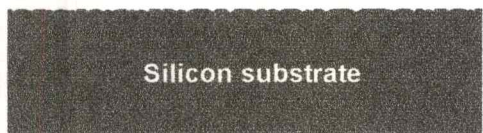
ในขั้นตอนนี้ใช้โลหะทองคำสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิก เพื่อใช้วัดข้อมูลต่างๆ ต้องผ่านขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

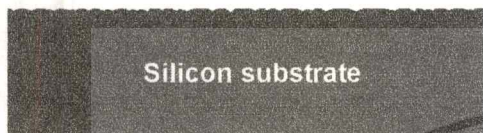
โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.10



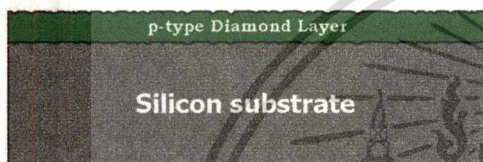
ฐานรองซิลิคอน ระบาย <111>
ผ่านการทำความสะอาดเบื้องต้น



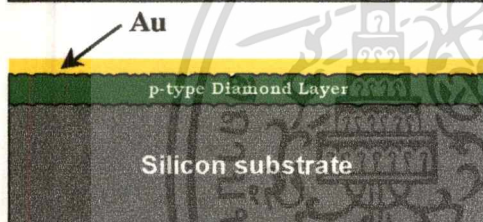
ทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วย
การขัดด้วยครีมเพชรขนาดเม็ดเล็ก
ผลึก 0.25 ไมครอน



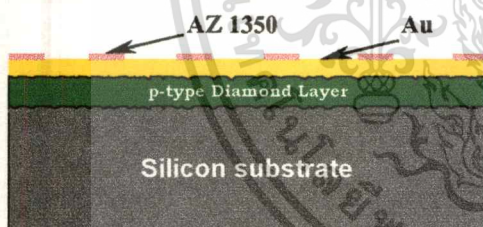
ตัดฐานรองซิลิคอนก่อนนำไปสังเคราะห์
ฟิล์มเพชรมีขนาด 5x5 ตารางมิลลิเมตร



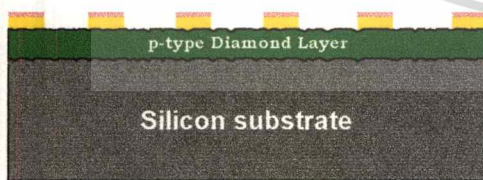
สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่าย
คาร์บอน เป็นสารละลาย $C_2H_5OH + B_2O_3$



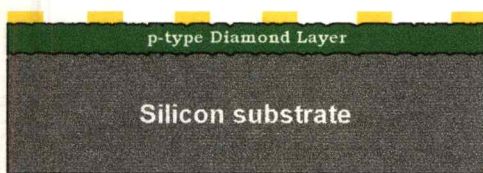
ทำการเคลือบทองคำด้วยเครื่อง Vacuum
Evaporator



นำชิ้นงานที่เคลือบทองคำแล้วไปผ่านกระบวนการ
โฟโตลิโธกราฟี โดยใช้น้ำยาไวแสงชนิด
บวกคือ AZ 1350



ทำการกัดทองคำออกด้วยน้ำยาคัดทองคำ aqua
regia ส่วนทองคำที่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่จะไม่
ถูกกัดออก



ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยอะซิโตน(Acetone)

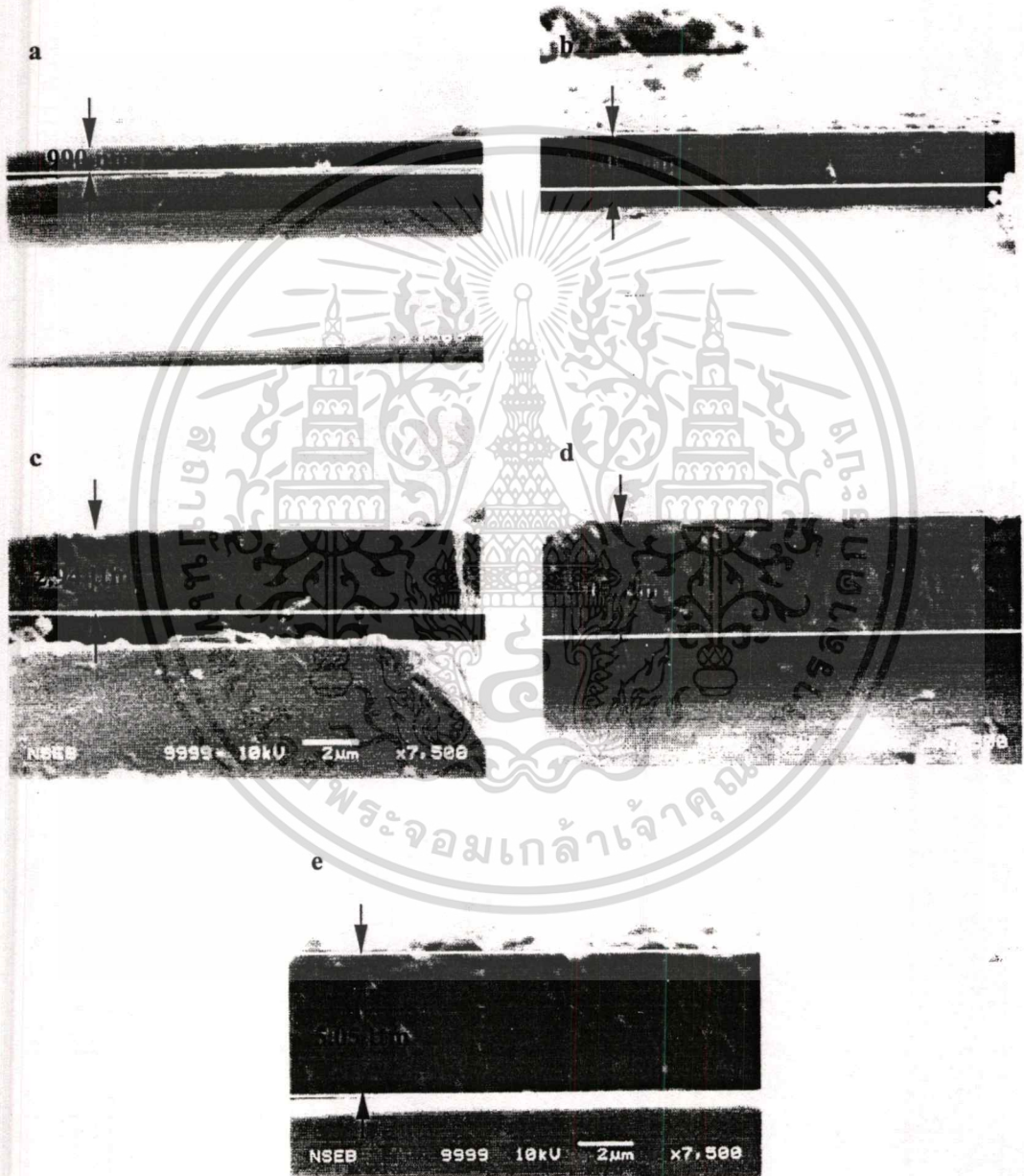
รูปที่ 3.10 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM และ เทคนิค Raman Spectroscope

3.4.1 การตรวจสอบฟิล์มเพชรด้วยภาพถ่าย SEM

ในงานวิจัยครั้งนี้มีเงื่อนไขที่ต้องตรวจสอบที่ความหนาและพื้นผิวหน้าของฟิล์มเพชรที่สร้างได้ โดยทำการทดลองให้ฟิล์มเพชรมีความหนาแตกต่างกันออกไปโดยใช้เงื่อนไขของเวลาเป็นตัวกำหนด คือ 15 นาที 20 นาที 30 นาที 40 นาที และ 60 นาที แล้วนำไปถ่ายภาพ จากผลการทดลอง จะได้ความหนาของฟิล์มเพชรดังนี้ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 เครื่อง SEM แสดงไว้ในภาคผนวก ก-1



รูปที่ 3.11 ความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างได้จากการใช้เวลาที่สร้างแตกต่างกัน (a) 15 นาที (b) 20 นาที (c) 30 นาที (d) 40 นาที และ (e) 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การตรวจฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

เทคนิคนี้จะเป็นการยืนยันว่าสิ่งที่สร้างได้นั้นเป็นเพชรจริงซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ และจะมีปริมาณของเพชรอยู่มากน้อยเพียงไรเมื่อเทียบกับปริมาณคาร์ไฟด์ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเสมอ โดยเครื่อง Raman Spectroscop แสดงในภาคผนวก ก-2

3.5 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มเพชร

ในการสร้างและศึกษาเกี่ยวกับโฟโตไดโอด และ เซลล์แสงอาทิตย์นั้น ก่อนอื่นจำเป็นที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติต่างของฟิล์มเพชรเสียก่อน เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง เช่นผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชรว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร

3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

ในการศึกษานี้จะทำเพื่อศึกษาหาปริมาณสิ่งต่างๆเช่น ความต้านทาน(R) สภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ) จำนวนโฮล(p) จำนวนอะตอมสารเจือโบรอน และ ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชรชนิดพี ที่ได้จากการสร้างฟิล์มเพชรที่มีเงื่อนไขของการสร้างที่แตกต่างกันของปริมาณความเข้มข้นของอะตอมสารเจือซึ่งจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างโบรอนต่อคาร์บอน (B:C) โดยมีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิกอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิกอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์ ที่ 1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm
- นำแผ่นชิ้นงานที่สร้างได้มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1 อีกครั้ง หนึ่ง
- นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาผ่านขบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี โดยใช้ลวดลายโลหะเป็นดังรูปที่ 3.4
- ทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- ทำการ sintering ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซ N_2 เป็นเวลา 12 นาที

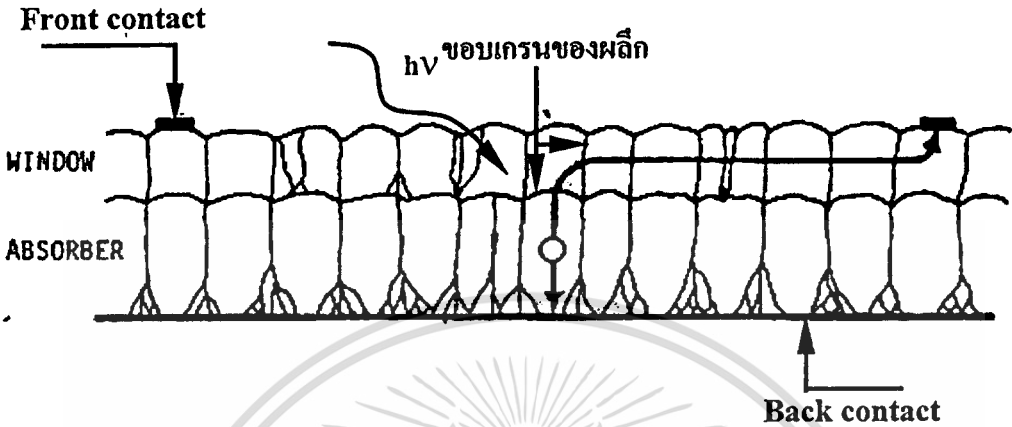
จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน (I-V) แล้วทำการหาค่าความต้านทานของฟิล์มเพชรจากนั้นก็คำนวณหาค่าปริมาณต่างๆต่อไป

3.5.2 การศึกษาผลของลวดลายโลหะที่มีต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในฟิล์มเพชร

การศึกษาในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลของลวดลายโลหะที่มีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า

ในฟิล์มเพชร เนื่องจากฟิล์มเพชรที่เราสร้างได้นั้นเป็นโพลีคริสตัลไลน์ (polycrystalline) ซึ่งจะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบของเกรน (grain boundary) อยู่เป็นจำนวนมาก มีผลทำให้อายุเวลาของอิเล็กตรอนและโฮลนั้นสั้นมากเนื่องมาจากขอบของเกรนนี้เอง และการไหลอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกกักไว้บริเวณขอบของเกรนทำให้กระแสที่เกิดจากแสงนั้น เกิดการรวมตัวกันก่อนที่จะเดินทางไปถึงขั้วโลหะ จึงทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลออกมาภายนอกนั้นน้อยกว่าปกติซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะที่เกิดจากแสงผ่านขอบของเกรนของสารกึ่งตัวนำ[10]

วิธีการแก้แบบหนึ่งก็คือการทำขั้วโลหะให้มีระยะห่างน้อยเหมาะสมค่าหนึ่งที่จะทำให้เกิดกระแสที่ไหลออกมามีค่ามากที่สุด ทั้งนี้ต้องระวังด้วยว่าลวดลายโลหะที่ถี่มากนั้นจะทำให้เกิดการบังเงามากขึ้นตามไปด้วย โดยในการทดลองนี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์ (B:C) ที่ 1000ppm โดยใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชร 40 นาที
- นำแผ่นชิ้นงานที่สร้างได้มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1 อีกครั้ง หนึ่ง
- นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาผ่านขบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้ลวดลายโลหะเป็นดังรูปที่ 3.5 ในหัวข้อ 3.3.1.1
- ทำการเคลือบโลหะด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- ทำการ sintering ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 12 นาที
- ทำการวัดข้อมูลโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฟิล์มเพชรที่ขั้วโลหะทั้งสอง 10 V วัดปริมาณกระแสที่ไหลเมื่อไม่ได้รับแสง เปรียบเทียบกับปริมาณกระแสที่ไหลเมื่อมีการฉายแสงจากไส้หลอดทั้งสแตนด์มีช่วงของความยาวคลื่นเท่ากับ 300 - 3000 nm และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสง UV ที่มีความยาวคลื่น 200-354 nm ให้กับชิ้นงาน โดยใช้ความเข้มแสงที่ 1000 lux
- จากนั้นทำการกัดทองคำออกแล้วใช้ชิ้นงานเดิมนำมาทำขั้วโลหะตามขั้นตอนเหมือนเดิมทุกอย่างเพียงแต่เปลี่ยนขนาดระยะห่างของลวดลายโลหะให้มีขนาด 20 μm , 40 μm , 60 μm , 80 μm , 120 μm , และ 180 μm , ให้ครบตามที่ใช้ในการศึกษา

3.5.3 การศึกษาสภาพความนำไฟฟ้าและผลตอบสนองทางแสงทางแสงของฟิล์มเพชร

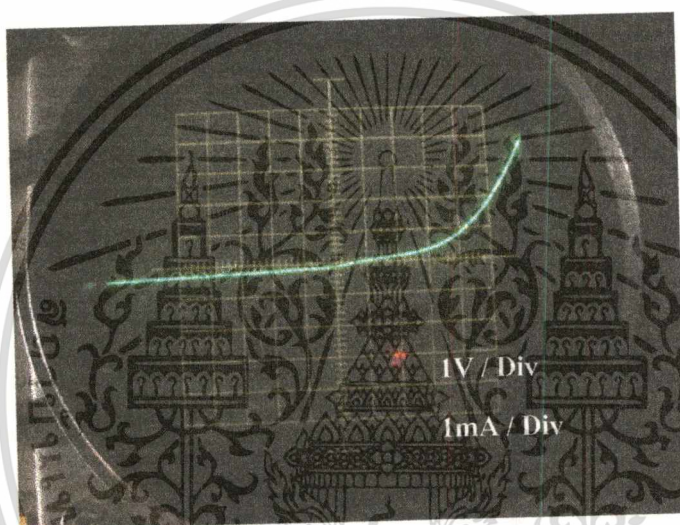
การศึกษาในหัวข้อนี้จะศึกษาว่าสภาพความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรเมื่อได้รับการฉายแสงแล้วนั้นจะเป็นอย่างไร เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนให้มีค่าต่างๆ กันไป โดยขั้นตอนการสร้างมีทั้งหมดดังนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับโบรอน ไตรออกไซด์ (B:C) ที่ 0 ppm(I-type), 1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm โดยใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชร 40 นาที
- นำแผ่นชิ้นงานที่สร้างได้มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1 อีกครั้ง หนึ่ง
- นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาผ่านขบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้ลวดลายโลหะเป็นดังรูปที่ 3.5 ในหัวข้อ 3.3.1.1 (นำผลของการในหัวข้อ 3.5.2 นำมาใช้)
- ทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- ทำการ sintering ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซ N_2 เป็นเวลา 12 นาที
- ทำการวัดข้อมูลโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฟิล์มเพชรที่ขั้วโลหะทั้งสอง 10 V วัดปริมาณกระแสที่ไหล เปรียบเทียบกับปริมาณกระแสที่ไหลเมื่อมีการฉายแสงจากไส้หลอดทั้งสแตนด์มีมีช่วงของความยาวคลื่นเท่ากับ 300nm – 3000nm และแสง UV ที่มีช่วงของความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ 200 nm – 350 nm ให้กับชิ้นงาน แล้วคำนวณค่าสภาพความนำไฟฟ้า ผ่ามิดกับ สภาพความนำไฟฟ้าทางแสง

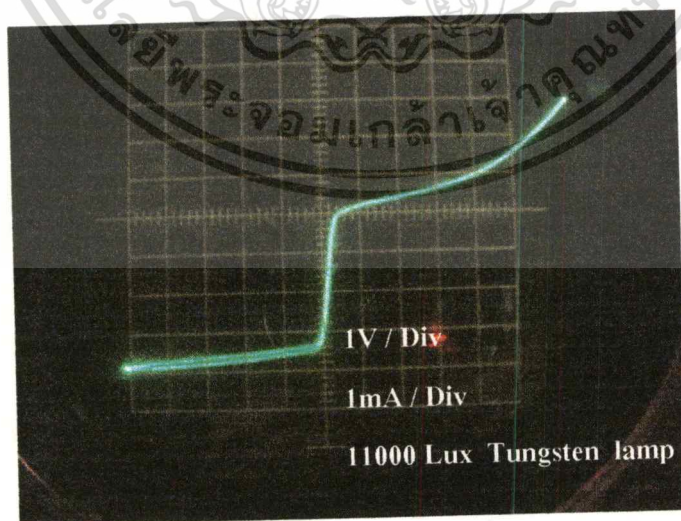
ส่วนการวัดผลตอบสนองความยาวคลื่นแสงของฟิล์มเพชรนั้น จะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 10 V ให้กับฟิล์มเพชรแล้วทำการฉายแสงด้วยเครื่อง monocromater โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นแสง 150 nm-1000 nm แล้วคำนวณหากระแสที่เพิ่มขึ้นแล้วทำการ normalize นำมาเขียนกราฟดูการตอบสนองความยาวคลื่นแสงของฟิล์มเพชร

3.6 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดรอยต่อแบบ p-Di/n-Si [12]

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาคงสมบัติระหว่างรอยต่อของ p-Dai/n-Si ว่ามีลักษณะเป็น ไดโอดชนิดใด มีลักษณะคุณสมบัติกระแสและแรงดันเป็นเช่นไร เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ อะตอมสารเจือ (B:C) และ ความหนาของฟิล์มเพชร โดยการทดลองเริ่มต้นนั้นเป็นการทดลองคว่ำ ไดโอดที่สร้างได้นั้นมีคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเป็นอย่างไรซึ่งจากการทดลอง โดยใช้เวลา ในการสร้างฟิล์มเพชร 20 นาที และใช้อัตราส่วน B:C คือ 10 ppm โดยมีพื้นที่รับแสงทั้งหมด ประมาณ 3.4 ตารางมิลลิเมตร โดยการใช้เครื่อง Curve tracer นั้นจะได้ดังรูปที่ 3.13 และเมื่อมีแสงมา ตกกระทบบลักษณะของกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดจะเปลี่ยนแปลงไปคือที่ช่วงการไบแอส ซ้อยกลับนั้นจะมีกระแสไหลเพิ่มขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 ลักษณะของกระแสและแรงดันของ ไดโอดแบบรอยต่อของ p-Dai/n-Si



รูปที่ 3.14 ลักษณะของกระแสและแรงดันของ ไดโอดแบบรอยต่อของ p-Dai/n-Si เมื่อมีแสงมาตกกระทบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงว่าไดโอดที่สร้างได้นั้นมีลักษณะโฟโตไดโอดดังนั้นจึงทำการทดลองหาเงื่อนไขของการทดลองที่เหมาะสมต่อไป

3.6.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ โฟโตไดโอด

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนโบรอน โดยให้ความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าคงที่ที่ $2 \mu\text{m}$ ว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดอย่างไร เช่น ปริมาณกระแสที่ไหล กระแสรั่วไหลย้อนกลับ ค่าของความต้านทานต่างๆ โดยการศึกษทั้งหมดมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ <111> สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่า $3.5 \Omega\cdot\text{cm}$ มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมของแอลกอฮอล์กับ โบรอน ไตรออกไซด์ (B:C) 1 ppm, 10 ppm, 100 ppm และ 1000 ppm โดยใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชร 40 นาที
- นำแผ่นชิ้นงานที่สร้างได้มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1 อีกครั้ง หนึ่ง
- นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาผ่านขบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้ลวดลายโลหะเป็นดังรูปที่ 3.5 ในหัวข้อ 3.3.1.1 (นำผลของการทดลองในหัวข้อ 3.5.2 นำมาใช้)
- ทำการเคลือบโลหะด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- ทำการ sintering ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 12 นาที
- จากนั้นทำการวัดผลของความเข้มข้น B:C ที่มีต่อกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด โดยการใช้เครื่อง Hp 4061A (Semiconductor/Component Test system) ซึ่งควบคุมการวัดข้อมูลด้วยโปรแกรม HPVE

3.6.2 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

การศึกษาในหัวข้อนี้เพื่อจะดูว่าลักษณะของกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.1 โดยให้ความเข้มแสง 1000, 3000, 5000, 7000, 9000 และ 11000 Lux จากหลอดทั้งสแตนด์

3.6.3 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

ในการทดลองนี้จะทำการหาค่าความหนาของฟิล์มเพชรว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดอย่างไร โดยให้อัตราส่วน B:C มีค่าคงที่ที่ 10 ppm โดยขั้นตอนทั้งหมดจะเหมือนกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.6.1 เพียงแต่ใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชรที่แตกต่างกันออกไป คือ 15 , 20, 30 และ 40 นาที แล้วทำการวัดข้อมูล

3.6.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการเพิ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมให้กับโฟโตไดโอด มีค่าดังนี้คือ 30, 50, 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส โดยจะดูผลของค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเพียงใด และ เมื่อฉายแสงจากหลอดทั้งสแตนด์ให้กับโฟโตไดโอดขณะอุณหภูมิสูงๆ นั้น กระแสที่เกิดขึ้นหรือลดลงมากน้อยเพียงใด

3.7 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อแบบ p-Dia/n-Si

ในหัวข้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติของโฟโตไดโอด ต่อไปจะศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ผลของความเข้มข้นของ B:C ความหนาของฟิล์มเพชร ผลตอบสนองทางแสง ผลของความเข้มแสง และ ผลของอุณหภูมิเป็นต้น

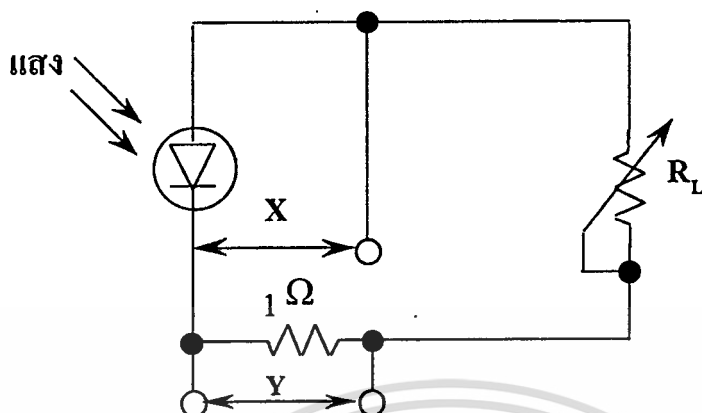
3.7.1 ผลของความเข้มข้นของอัตราส่วน B:C ต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้จะใช้เงื่อนไขการสร้างชิ้นงานเหมือนกับในหัวข้อที่ 3.6.1 ทุกอย่างคือความหนาของฟิล์มเพชรเท่ากับ $2\mu\text{m}$ อัตราส่วน B:C เป็น 1,10,100 และ 1000 ppm แต่ในการวัดผลการทดลองนั้น จะทำการวัดข้อมูลสองส่วน

1.จะเป็นการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ยังไม่ได้รับแสง โดยการวัดผลนั้นเป็นการวัดเหมือนคุณสมบัติของไดโอดธรรมดาคือใช้เครื่อง Hp 4061A (Semiconductor/Component Test system) ซึ่งควบคุมการ วัดข้อมูลด้วยโปรแกรม HPVEในการวัดส่วนนี้นั้นจะนำไปใช้ในการหาค่าของกระแสรั่วไหลย้อนกลับ และ ใช้ในการหาค่าของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้

2.คือการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ได้รับแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากแสงอาทิตย์เทียม (Solar Simulator) ที่ความเข้มแสงที่ 11000 lux โดยเปลี่ยนวงจรในการวัดข้อมูล

เป็นดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจะใช้ X-Y recorder เป็นตัวบันทึกผล จากนั้นคำนวณหาค่าต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้



รูปที่ 3.15 วงจรแสดงการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

3.7.2 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาว่าผลของความเข้มแสงนั้นจะมีผลต่อค่า กระแสลัดวงจร และ แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร รวมถึงค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะนำชิ้นงานจากการศึกษาในหัวข้อ 3.7.1 มาทำการศึกษา ซึ่งจะใช้การต่อวงจรดังรูปที่ 3.14 เช่นกัน และความเข้มแสงที่ให้นั้นจะมีค่าดังนี้คือ 1000,3000,5000,7000,9000 และ 11000 lux

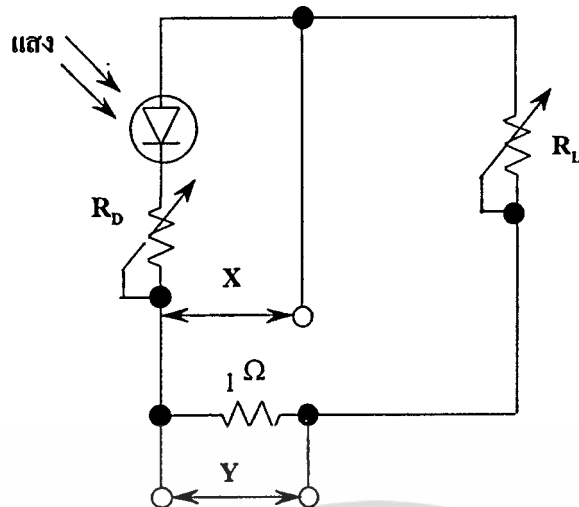
3.7.3 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับความหนาของฟิล์มเพชรที่มีต่อประสิทธิภาพของฟิล์มเพชรอย่างไร โดยใช้ชิ้นงานที่มีความหนาของฟิล์มเพชรเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 μm และอัตราส่วนของ B:C เท่ากัน 1000 ppm มาทำการทดลอง และใช้ขั้นตอนการทดลองเหมือนกับในหัวข้อ 3.7.2

3.7.4 การศึกษาผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยในการทดลองนี้จะนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้มาต่อวงจรในการทดลองแบบใหม่ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 โดยสมมติว่าเซลล์ที่สร้างได้นั้นมีความต้านทานอนุกรมเป็นศูนย์โอห์ม และเพิ่มความต้านทานปรับค่าได้ (Decade Resistance Box : R_p) เข้าไปอีกหนึ่งตัวเพื่อเป็นตัวปรับค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจรการวัดผลของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

3.7.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

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

3.7.6 การศึกษาผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยในการทดลองนี้จะทำการทดลองว่าการตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้นั้นจะมีผลตอบสนองทางคลื่นแสงอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่นที่เท่าไร โดยจะทำการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจาก monochromator แล้วทำการวัดกระแสที่ได้จากเซลล์ว่าช่วงความยาวคลื่นที่เท่าไรจะให้กระแสไฟฟ้าออกมามากที่สุด

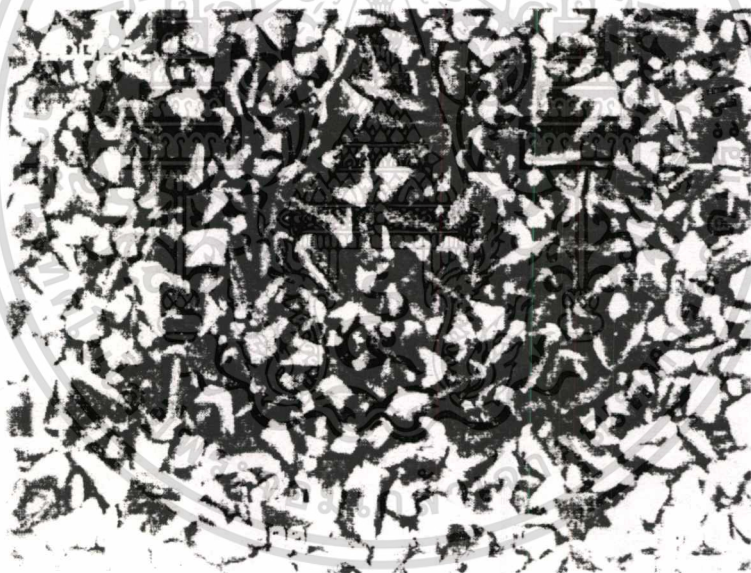
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากผ่านขั้นตอนต่างๆของการสร้างตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วนั้น ต่อไปจะเป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้ดังนี้

4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

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

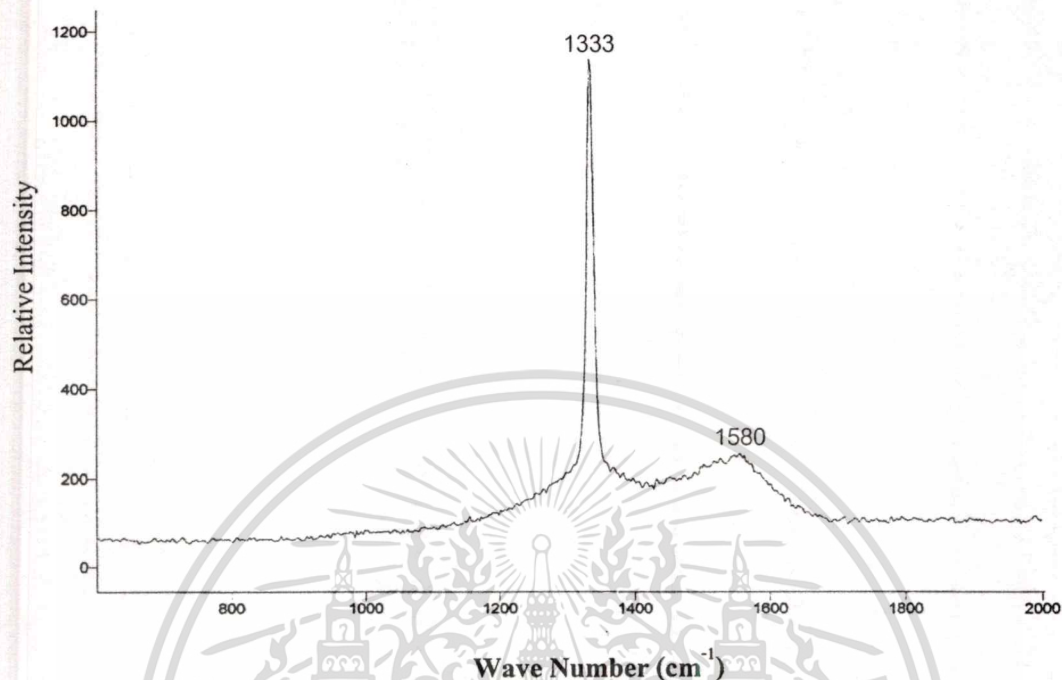


รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ(111)ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD

ส่วนความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้นได้นำเสนอไปแล้วในรูปที่ 3.11 ในบทที่ 3 ส่วนการตรวจสอบด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนค่ายอดสูงสุดของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างขึ้นนั้น จะมีค่าอยู่ที่ 1333 cm^{-1} ซึ่งมีค่ายอดสูงสุดใกล้เคียงกันเพชรในธรรมชาติมาก ซึ่งเพชรในธรรมชาติมีค่ายอดสูงสุดของ Raman spectrum อยู่ที่ 1332 cm^{-1} แม้ว่าจะมียอดของกราฟที่ 1580 cm^{-1} รวมอยู่ด้วยแต่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้ว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเพชร ดังนั้นจากการตรวจสอบทั้งหมดที่ได้นำเสนอนั้น เป็นเครื่องยืนยันได้อย่างชัดเจนว่าเพชรที่สร้างได้นั้นเป็นเพชรจริง

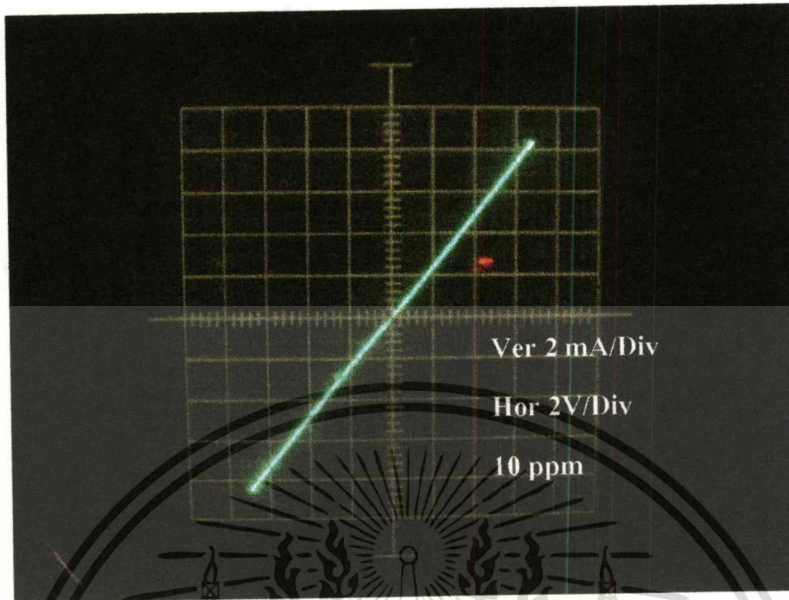


รูปที่ 4.2 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD

4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

หลังจากการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเพชรแล้วว่ามีคุณสมบัติเป็นเพชร ซึ่งต่อมาจะทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ทำการสร้างได้ โดยใช้เงื่อนไขที่จะใช้ในการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้านั้นคือ การสร้างฟิล์มเพชรให้มีความหนาประมาณ 4 μm โดยใช้เวลาในการสร้าง 30 นาที และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C เป็น 1, 10, 100 และ 1000 ppm หลังจากนั้นนำไปผ่านขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.3.3 โดยในการทดลองนี้ระยะห่างระหว่างขั้วมีค่าเท่ากับ 20 μm แล้วทำการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ซึ่งจะได้กราฟเป็นลักษณะของรอยต่อแบบโอห์มมิก แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นตัวอย่างของ B:C ที่ 10 ppm ซึ่งจากการวัดข้อมูลที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน B:C นั้นจะได้ว่าค่าของความต้านทานซึ่งดูได้จากความชันของกราฟ จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ B:C โดยค่าความต้านทานที่ได้นั้นจะนำมาคำนวณหาค่าต่างๆทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร ได้แก่ ค่าพิกต์ความต้านทาน (resistivity : ρ) ค่าสภาพนำไฟฟ้า (conductivity: σ) ค่าความหนาแน่นประจุโฮล (hole carrier density : p) ระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับวาเลนซ์ ($E_F - E_V$) และค่าของความหนา

แน่นของอะตอมสารเจือโบรอน (N_D) ซึ่งสมการที่ใช้ได้แก่สมการที่ 4.1-4.3 และค่าต่างๆ ที่คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 ลักษณะของกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.1)$$

$$p = \frac{1}{q\mu_p} = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \quad (4.2)$$

$$N_A = p \left[1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right) \right] \quad (4.3)$$

โดยที่

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi T m_h^*}{h^2} \right)^{3/2}$$

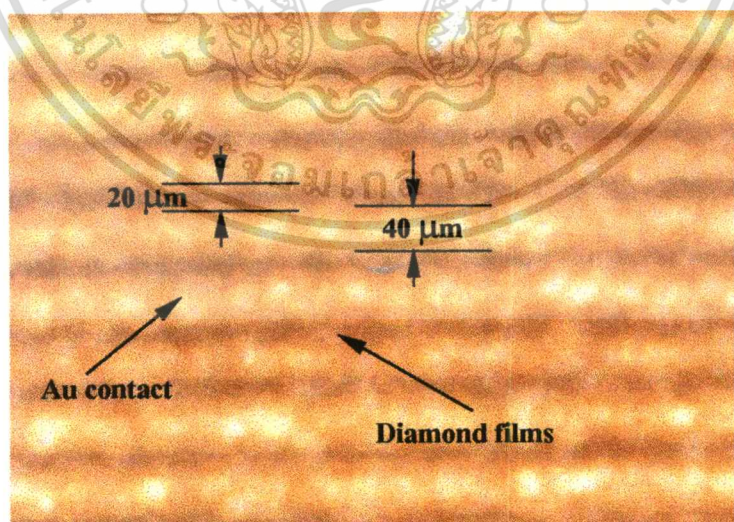
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรต่างๆของฟิล์มเพชรชนิดพีที่ได้จากการทดลอง

B:C (ppm)	1	10	100	1000
Symbol				
$R (\Omega)$	2000	1000	400	40
$\rho (\Omega \cdot \text{cm})$	80	40	16	1.56
$\sigma (\text{S/cm})$	0.0125	0.025	0.0625	0.64
$P (\text{cm}^{-3})$	1.56×10^{16}	3.13×10^{16}	7.81×10^{16}	8×10^{17}
$E_F - E_V (\text{eV})$	0.154	0.136	0.113	0.053
$N_V (\text{cm}^{-3})$	2.1×10^{19}	8.5×10^{19}	5.17×10^{20}	6.1×10^{22}

4.3 ผลการศึกษาผลของลวดลายโลหะที่มีต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในฟิล์มเพชร

หลังจากศึกษาหาค่าปริมาณต่างๆ ทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรแล้วต่อมาจะเป็นการหาว่าระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะที่ได้ออกแบบไว้นั้นมีผลต่อปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือไม่ เนื่องจากว่าฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้นเป็นลักษณะของโพลีคริสตอล ดังนั้นจะเกิดเกรนขึ้นอย่างมาก โดยประเวณขอบของเกรนนั่นเองจะเป็นตัวการทำให้อายุประจุพาหะมีค่าลดลงเนื่องจากการรวมตัวที่ขอบของเกรน ส่งผลทำให้การไหลของปริมาณกระแสไฟฟ้าลดลงไปด้วย โดยรูปลักษณะของลวดลายโลหะหลังจากผ่านขั้นตอนการสร้างทั้งหมดแล้วจะเป็นลักษณะดังรูปที่ 4.4



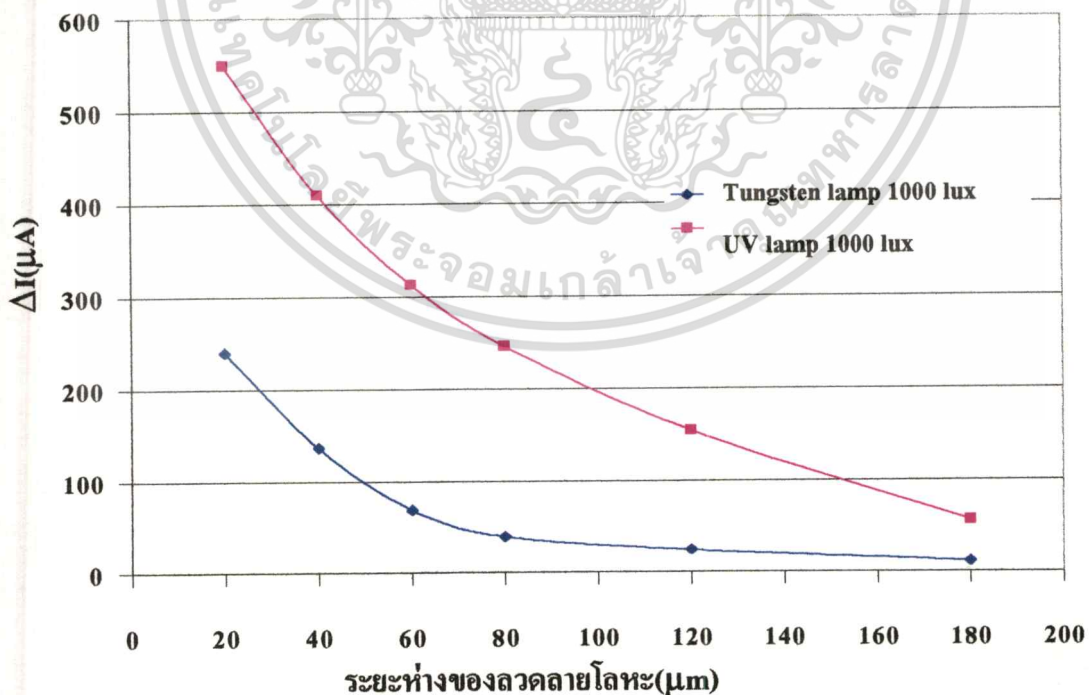
รูปที่ 4.4 ลวดลายโลหะทองคำบนฟิล์มเพชร

โดยการทดลองในหัวข้อนี้จะใช้แสงจากไส้หลอดทั้งสแตนเลส และ หลอดอัลตราไวโอเล็ต ที่มี ความเข้มแสงเท่ากันคือประมาณ 1000 lux และแรงดันที่ป้อนให้กับชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 10 V ซึ่งผล การทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะ

ระยะห่าง(μm)	I(mA) (Dark)	I(mA) (Tu lamp)	I(mA) (UV lamp)	$\Delta I(\mu\text{A})$ (Tu-Dark)	$\Delta I(\mu\text{A})$ (UV-Dark)
20	9.950	10.19	10.5	240	550
40	4.93	5.07	5.34	137	410
60	3.48	3.55	3.793	69	313
80	2.6	2.64	2.895	40	246
120	1.65	1.675	1.804	25	154
180	1.2	1.212	1.256	12	56

นำผลที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4.2 มาเขียนกราฟระหว่างระยะห่างระหว่างลายโลหะ กับความแตกต่างระหว่างกระแสเมื่อฟิล์มเพชร ได้รับแสงกับ ไม่ได้รับแสงจะได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะกับความแตกต่างของ ปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นได้ว่าถ้าระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะที่ $20\mu\text{m}$ นั้นจะทำให้ปริมาณกระแสที่เกิดเนื่องมาจากแสงนั้นมีมากที่สุด เนื่องมาจากเมื่อแสงตกกระทบที่บริเวณสารกึ่งตัวนำจะเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้น ถ้าบริเวณสารกึ่งตัวนำไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมประจุพาหะที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่อย่างอิสระก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกันหมด แต่ถ้ามีสนามไฟฟ้าตกคร่อมอยู่ประจุพาหะก็จะเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและจะเกิดการรวมตัวเกิดขึ้นเหมือนกัน แต่การรวมตัวนี้จะน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างโลหะมีค่าน้อยๆ กล่าวคือประจุพาหะจะเคลื่อนที่เข้าสู่โลหะก่อนที่จะเกิดการรวมตัว ซึ่งจะเป็นผลทำให้ปริมาณกระแสที่เกิดเนื่องมาจากแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

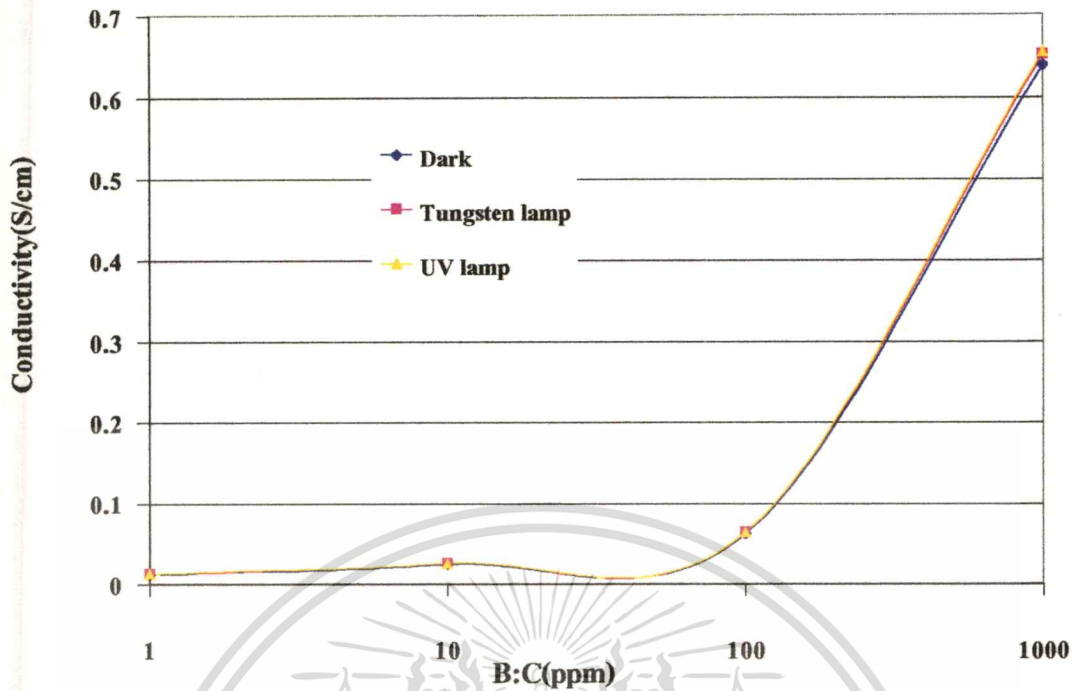
4.4 ผลการศึกษาสภาพความนำไฟฟ้าทางแสง และ ผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชร

จากหัวข้อที่แล้วกล่าวถึงการศึกษาระยะห่างระหว่างโลหะว่ามีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าของฟิล์มเพชรอย่างไรเมื่อได้รับการฉายแสง โดยรู้วาระยะห่างที่ $20\mu\text{m}$ กระแสไฟฟ้าจะไหลได้ดีที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงออกแบบการทดลองที่มีระยะห่างระหว่างโลหะอยู่ที่ $20\mu\text{m}$ เพื่อที่จะศึกษาถึงสภาพความนำไฟฟ้าและผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชร โดยจะใช้ความหนาของฟิล์มเพชรอยู่ที่ $4\mu\text{m}$ และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C เป็น 1, 10, 100 และ 1000 ppm ผลการทดลองแสดงได้ในตารางที่ 4.3

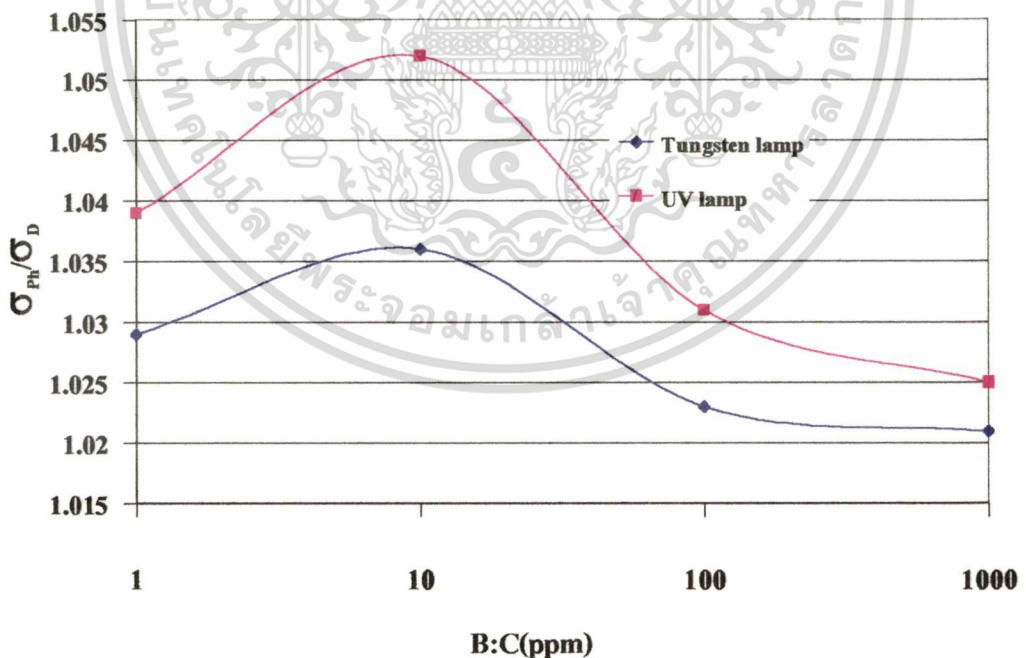
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสภาพความนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C ค่าต่างๆ

Symbol B:C(ppm)	ρ ($\Omega\cdot\text{cm}$)	σ_D (S/cm)	σ_{Ph} (S/cm)		$\sigma_{Ph,Tu}/\sigma_D$	$\sigma_{Ph,UV}/\sigma_D$
			Tungsten (Tu)	UV		
1	80	0.0125	0.0129	0.0130	1.029	1.039
10	40	0.025	0.0259	0.0263	1.036	1.052
100	16	0.0625	0.0639	0.0644	1.023	1.031
1000	1.56	0.64	0.653	0.656	1.021	1.025

โดยนำค่าต่างๆจากตารางมาเขียนกราฟระหว่างอัตราส่วนของ B:C กับค่าสภาพความนำไฟฟ้าทางแสง และ อัตราส่วนของสภาพความนำไฟฟ้าทางแสงกับสภาพความนำไฟฟ้ามืดแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของ B:C



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าทางแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืดกับอัตราส่วนของ B:C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อไม่มีแสงให้กับฟิล์มเพชรชนิดพี ค่าสภาพนำไฟฟ้ามืด (σ_D) ของฟิล์มเพชรจะมีค่าต่ำ แต่เมื่อให้แสงจากไส้หลอดทั้งสเดน หรือ แสงอัลตราไวโอเลต จะทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสง (σ_{ph}) ของฟิล์มเพชรมีค่าสูงขึ้น โดยที่ค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสงของฟิล์มเพชรที่ได้จากการฉายแสงอัลตราไวโอเลตจะมีค่ามากกว่า เมื่อได้รับการฉายแสงจากไส้หลอดทั้งสเดน ทั้งนี้เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเลตมีค่าพลังงานมากกว่า แสงที่ได้จากไส้หลอดทั้งสเดนนั่นเอง ซึ่งจะมีผลทำให้อิเล็กตรอนหลุดมาจากคู่อิเล็กตรอนโฮล นั้นมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ง่ายขึ้น เป็นผลทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรที่ค่าสูงขึ้น จากกราฟในรูปที่ 4.6 นั้นอาจจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสงไม่ชัดเจนมากนักเนื่องจากความเข้มแสงที่ใช้มีค่าเพียงแค่ 1000 lux เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบค่าสภาพนำไฟฟ้าที่เกิดจากแสงจากไส้หลอดทั้งสเดนและหลอดอัลตราไวโอเลตด้วยความเข้มแสงที่เท่ากัน ซึ่งความเข้มของแสงหลอดอัลตราไวโอเลตมีค่าความเข้มที่ประมาณ 1000 lux เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความเข้มได้

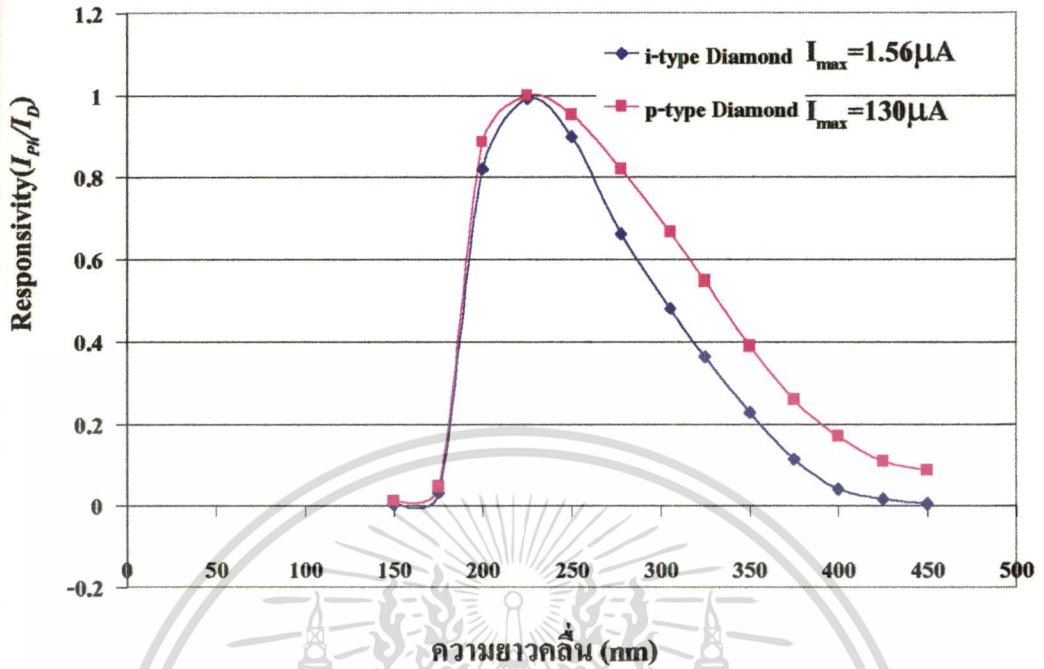
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าทางแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืดกับอัตราส่วนของ B:C ที่แสดงในรูปที่ 4.7 นั้น จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm นั้นจะให้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด ไม่ว่าจะเป็นแสงจากไส้หลอดทั้งสเดน หรือ แสง อัลตราไวโอเลต

ส่วนผลการทดลองการวัดผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชรนั้น จะทำการป้อนคลื่นแสงให้กับฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง monochromater โคน ใช้แหล่งกำเนิดแสงสองชนิดคือ จากหลอด Halogen ซึ่งมีความยาวคลื่นแสงอยู่ในช่วง 300 nm - 3000 nm และ หลอด UV มีความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ 200 nm - 354 nm ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 10V ให้กับฟิล์มเพชร ผลการทดลองการตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชรทั้งกรณี i-type และ กรณี p-type แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความยาวคลื่นแสงของฟิล์มเพชรนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 225 nm ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า การที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำให้หลุดเป็นอิสระได้นั้นค่าของค่าของพลังงานโฟตอนนั้นจะต้องมีค่าพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของของสารกึ่งตัวนำนั้นถ้า ความยาวคลื่นแสงน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะไม่เกิดการดูดกลืนแสง ดังนั้นความยาวคลื่นแสงที่จะถูกดูดกลืนได้จะต้องมีค่าดังนี้

$$\lambda = \frac{1240}{E_g} (nm)$$

ซึ่งในรูปที่นำเสนอเป็นการวัดผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชรสองชนิดคือ i-type และ p-type ซึ่งลักษณะการตอบสนองที่ได้จะเป็นลักษณะเดียวกัน ต่างกันเพียงแต่ว่า กระแสที่เกิดขึ้นในกรณีฟิล์มเพชร p-type นั้นจะมีมากกว่า i-type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

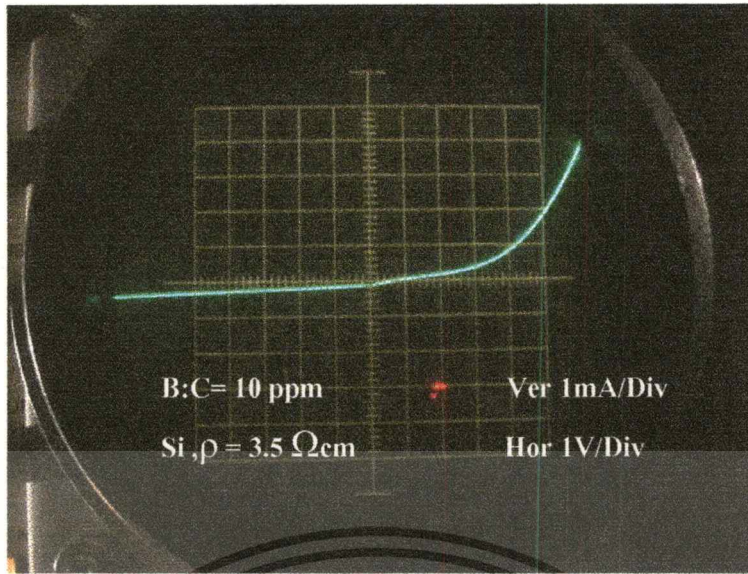


รูปที่ 4.8 แสดงผลการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของฟิล์มเพชร

4.5 ผลการศึกษาคุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อแบบ p-Dia/n-Si

การศึกษาในหัวข้อนี้เพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติและลักษณะของรอยต่อระหว่าง p-Dia/n-Si ว่ามีลักษณะรอยต่อเป็นรอยต่อประเภทใด ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ลักษณะของรอยต่อได้จากคุณลักษณะกระแส-แรงดันของรอยต่อนั้นๆ รวมถึงการใช้วิธีการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ โดยใช้ทฤษฎีแถบพลังงานของรอยต่อประกอบในการวิเคราะห์ โดยในการทดลองนี้ฟิล์มเพชรที่ใช้จะมีความหนาประมาณ $2 \mu\text{m}$ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ B:C เป็น 1, 10, 100 และ 1000 ppm จากการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันจะได้ดังรูปที่ 4.9

จากรูปที่ 4.9 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อแบบ p-Dia/n-Si นั้นจะมีลักษณะเหมือนกับไดโอดทั่วไป เพียงแต่มีกระแสรั่วไหลมากกว่า และมีแรงดันพังทลายมากกว่า ซึ่งในรูปไม่ได้แสดงให้เห็น และจากรูปนั้นสามารถใช้ทฤษฎีแถบพลังงานแบบรอยต่อนี้สื่อสารต่างชนิดกันอธิบายและคำนวณค่าต่างๆซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ดังนี้



รูปที่ 4.9 ลักษณะของกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อแบบ p-Dia/n-Si

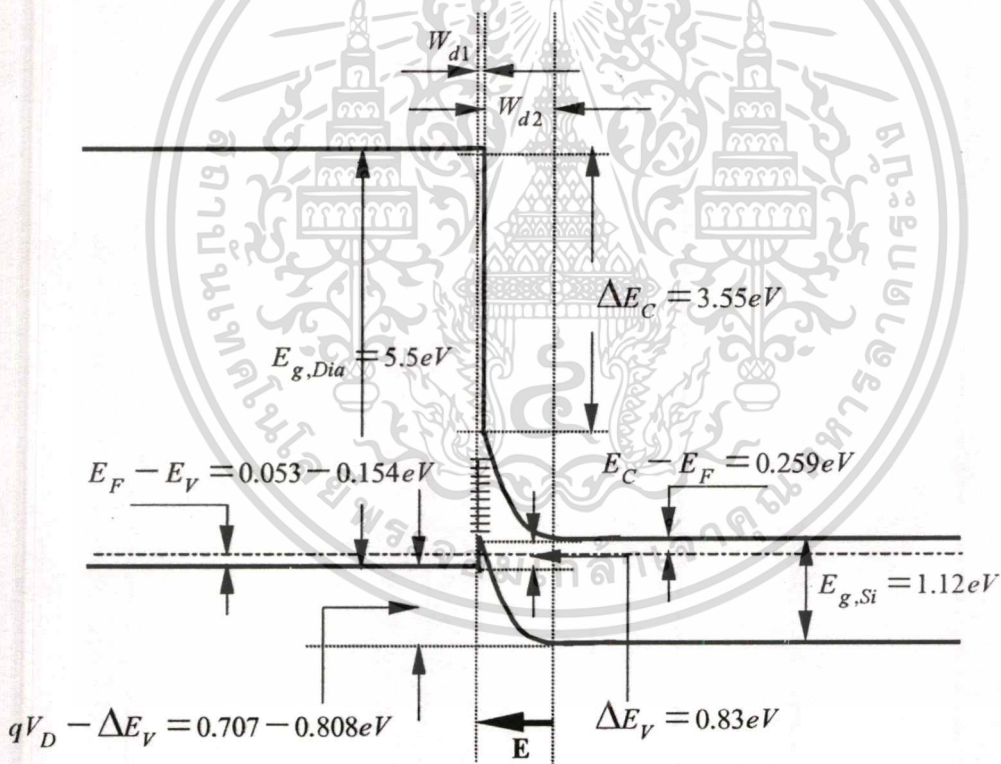
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากทฤษฎีรอยต่อของ Anderson

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	B:C (ppm)			
		1	10	100	1000
ΔE_C (eV)	ความแตกต่างของแถบความนำระหว่างฟิล์มเพชรและซิลิคอน	3.55			
ΔE_V (eV)	ความแตกต่างของแถบวาเลนซ์ระหว่างฟิล์มเพชรและซิลิคอน	0.83			
V_D (V)	แรงดันภายในที่ตกคร่อมไดโอดชนิด p-Dia/n-Si	1.53	1.55	1.57	1.67
V_{D1} (V)	แรงดันภายในที่ตกคร่อมในส่วนของฟิล์มเพชร	1.7×10^{-4}	4.2×10^{-5}	7×10^{-6}	6×10^{-8}
V_{D2} (V)	แรงดันภายในที่ตกคร่อมในส่วนของซิลิคอน	1.529	1.549	1.57	1.67

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

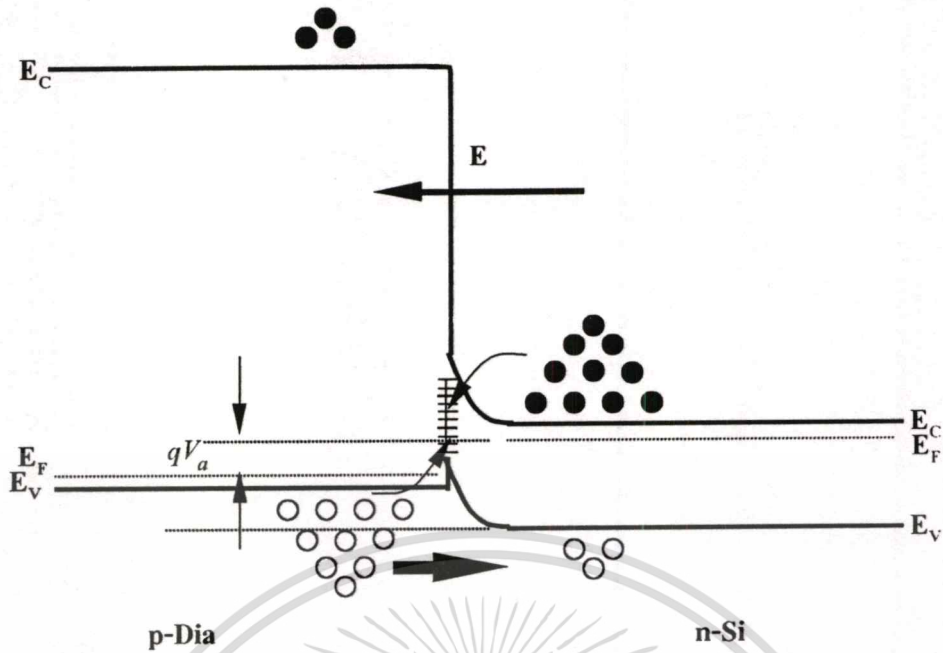
สัญลักษณ์	คำอธิบาย	B:C(ppm)			
		1	10	100	1000
W_{d1} (nm)	Depletion region ในส่วนของฟิล์มเพชร	0.072	0.018	2.9×10^{-3}	2.6×10^{-5}
W_{d2} (nm)	Depletion region ในส่วนของซิลิคอน	1245	1253	1261	1301

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ นั้นได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4.2 จากค่าในตารางนำมาเขียนลักษณะของแถบพลังงานรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนที่อยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดเอ็น

จากลักษณะของแถบพลังงานในรูปที่ 4.10 เมื่อทำการป้อนแรงดันไบแอสตรงให้กับไดโอดนั้นลักษณะของแถบพลังงานจะเป็นดังรูปที่ 4.11

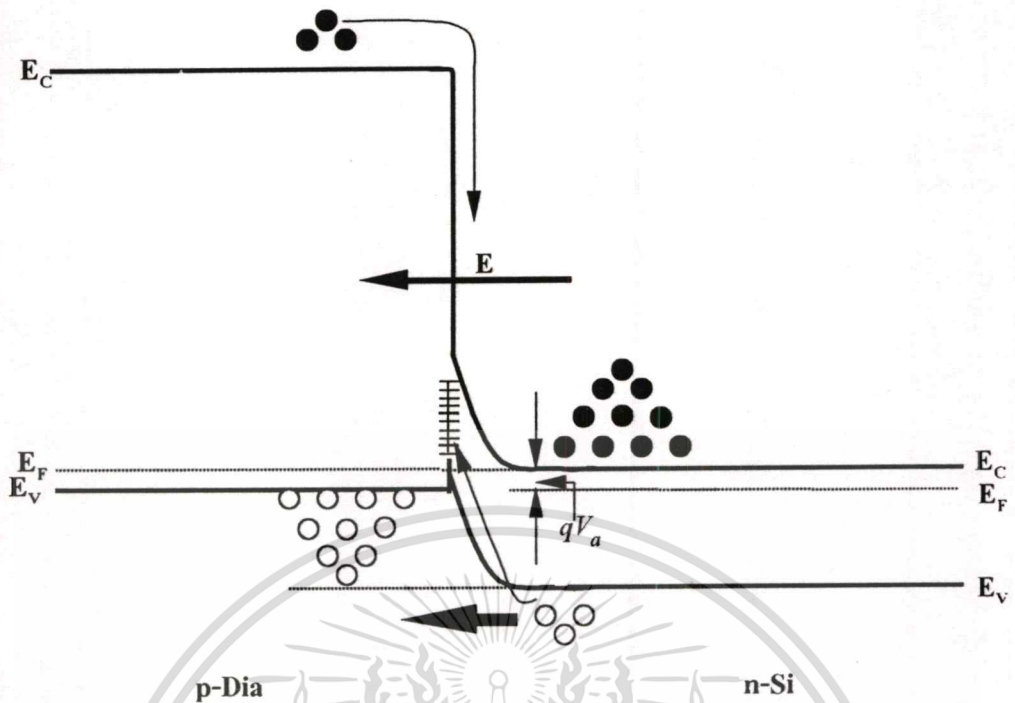


รูปที่ 4.11 ลักษณะของแถบพลังงานเมื่อได้รับแรงดัน โปแอสดตรง

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าโฮลสามารถเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ของฟิล์มเพชรข้ามรอยต่อไปยังแถบวาเลนซ์ของซิลิคอนได้ และส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่เข้าไปใน interface state ในขณะที่อิเล็กตรอนจากแถบความนำในซิลิคอนชนิดเอ็นั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบความนำของฟิล์มเพชรได้เนื่องจากมีกำแพงศักย์ที่มีพลังงานสูงกั้นอยู่ ดังนั้นอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ทะลุผ่าน (tunneling) จากแถบความนำของซิลิคอนเข้าไปในบริเวณ interface state แล้วเกิดการรวมตัวกับโฮล ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจะมีอยู่สองส่วนคือกระแสเนื่องมาจากโฮลในฟิล์มเพชรชนิดพีที่เคลื่อนที่ (ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการนำกระแสของไดโอด) และกระแสอีกส่วนหนึ่งคือกระแสเนื่องจากการรวมตัว (recombination current)

ส่วนในกรณีเมื่อให้แรงดัน โปแอสนอกกลับให้แก่รอยต่อซึ่งจะได้ลักษณะของแถบพลังงานดังรูปที่ 4.12

จากแถบพลังงานดังรูปเมื่อได้รับการ โปแอสนอกกลับนั้นแถบพลังงานของซิลิคอนเอ็นั้นจะกดต่ำลงมีผลทำให้โฮลที่อยู่ในฟิล์มเพชรชนิดพีไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์มายังซิลิคอนได้ แต่โฮลที่อยู่ในซิลิคอนชนิดเอ็นั้นสามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังฟิล์มเพชรชนิดพีได้ เนื่องจากไม่มีกำแพงศักย์กั้น และอีกส่วนหนึ่งก็จะไหลเข้าสู่ interface state ส่วนอิเล็กตรอนในฟิล์มเพชรชนิดพีนั้นก็จะไหลมายังซิลิคอนชนิดเอ็ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลนั้นเกิดจากประจุพาหะส่วนน้อยคือโฮลในซิลิคอนชนิดเอ็และอิเล็กตรอนในฟิล์มเพชรชนิดพี ดังนั้นกระแสที่ไหลนั้นจึงมีค่าน้อยเมื่อได้รับการ โปแอสนอกกลับ



รูปที่ 4.12 ลักษณะของแถบพลังงานเมื่อได้รับการไบแอสย้อนกลับ

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าทั้งหมดที่กล่าวมานั้นจะมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดที่แสดงให้ดูในรูปที่ 4.9 โดยคุณสมบัติของกระแส-แรงดันของไดโอดที่เป็นแบบเนื้อสารต่างชนิดกันนั้น ถ้าบริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองนั้นเกิด interface state มากๆ กระแสรวมตัวของประจุพาหะในชั้นปลอดพาหะมีค่ามากนั้น จะทำให้คุณลักษณะกระแส-แรงดันจะมีลักษณะเหมือนคุณลักษณะกระแส-แรงดันเหมือนกับไดโอดที่เป็นโครงสร้างแบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน [] โดยความสัมพันธ์จะเป็นไปในลักษณะสมการดังนี้

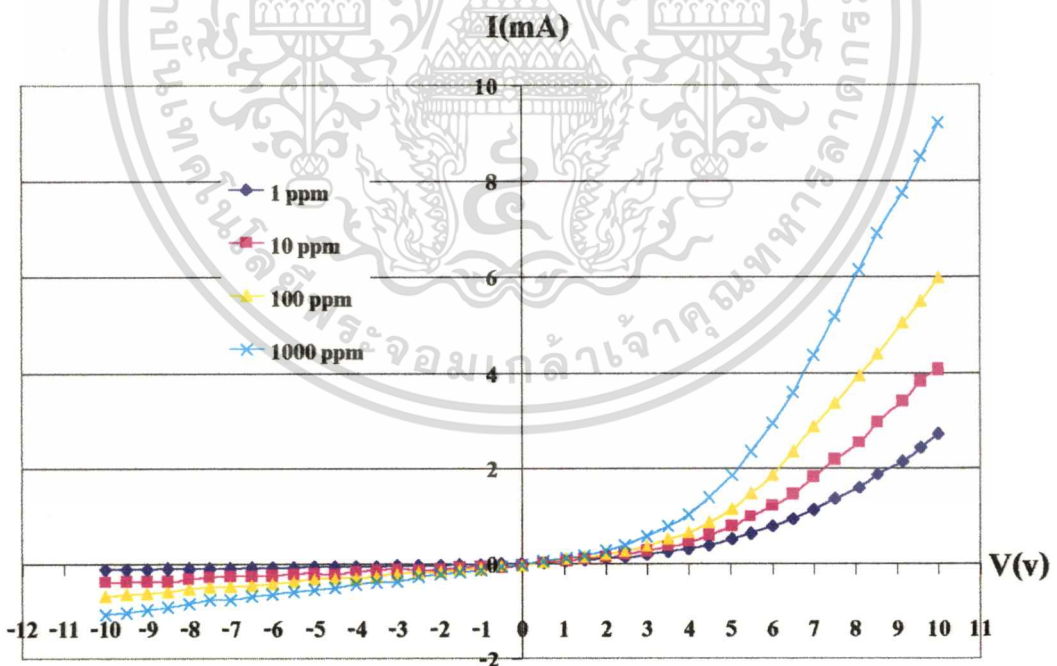
$$I = I_s \exp\left(\frac{qV_o}{kT} - 1\right) \quad (4.1)$$

I_s คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิ่มตัวซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น และ จำนวนเก็บสแตต (Gab state) ในชั้นปลอดพาหะมีค่ามากขึ้น

4.6 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอด

4.6.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

การทดลองนี้เพื่อศึกษาว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ B:C นั้นจะมีผลต่อไดโอดอย่างไร โดยความเข้มข้นที่ใช้คือ B:C ที่ 1, 10, 100 และ 1000 ppm ความหนาของฟิล์มเพชรประมาณ 2 μm ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ B:C นั้น จะทำให้กระแสไฟฟ้าทางค่านไบแอสตรงนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่แรงดันที่ 10V เท่ากันนั้น กระแสจะไหลได้ 1.8mA, 3.5mA, 5.3mA และ 8.8 mA ที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1, 10, 100 และ 1000 ppm ตามลำดับ และในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับนั้น ที่อัตราส่วนของ B:C เพิ่มขึ้นนั้น จะได้ว่า กระแสรั่วไหลย้อนกลับก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย และสิ่งที่ได้จากการทดลองอีกอย่างหนึ่งก็คือ ค่าของ Threshold voltage ของไดโอดนั้นจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ B:C นั้นมีค่ามากขึ้น โดยจากการคำนวณนั้น ค่าของ Threshold voltage ที่ B:C ที่ 1,10,100 และ 1000 ppm จากตารางที่ 4.4 นั้นมีค่าเท่ากับ 1.53 V, 1.55V, 1.57V และ 1.67V ตามลำดับ แต่ในรูปที่ 4.13 ที่ได้จากการทดลองนั้นจะเห็นได้ว่า ค่าของ Threshold voltage นั้นจะมีค่ามากกว่าปกติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของค่าความต้านทานในฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.13 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของ ไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ B:C เป็น 1, 10, 100 และ 1000 ppm

โดยการพิจารณาในสมการที่ 4.1 นั้นสามารถหาค่าของกระแสไฟฟ้าไหลอิมตัวย้อนกลับของโฟโตไดโอดได้ โดยในช่วงที่ไบแอสตรงให้กับไดโอดนั้นจากสมการที่ 1 จะได้

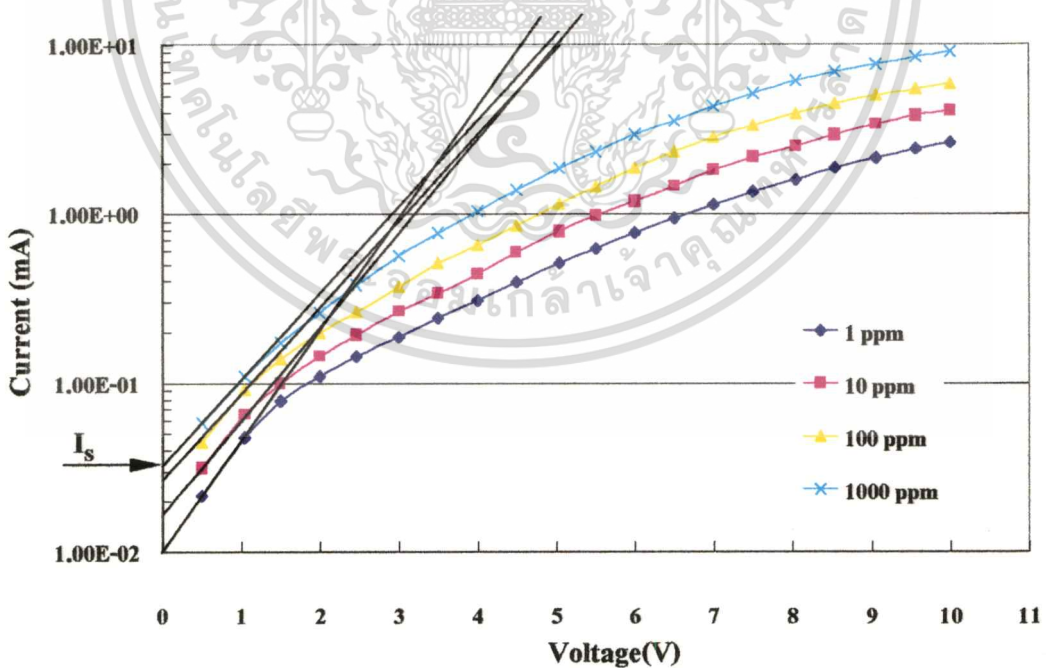
$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (4.2)$$

$$\ln(I) = \ln(I_s) + \frac{qV}{kT} \quad (4.3)$$

ถ้า ($V = 0$) หรือสภาวะสมดุลความร้อนจะได้

$$\ln(I) = \ln(I_s) \quad (4.4)$$

นั่นคือในสมการที่ 4.3 จะเห็นว่าถ้าหากแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I)$ กับแรงดันไบแอสตรง (V) จะได้ลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรง และจากสมการที่ 4 จะมามีค่าเท่ากับกระแส I_s หรือกระแสย้อนกลับอิมตัวนั่นเอง ดังนั้นทำการพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(I) - V$ ในช่วงของการไบแอสตรงเพื่อหาค่าของ I_s จะได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 คุณลักษณะกึ่งไดโอดกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C

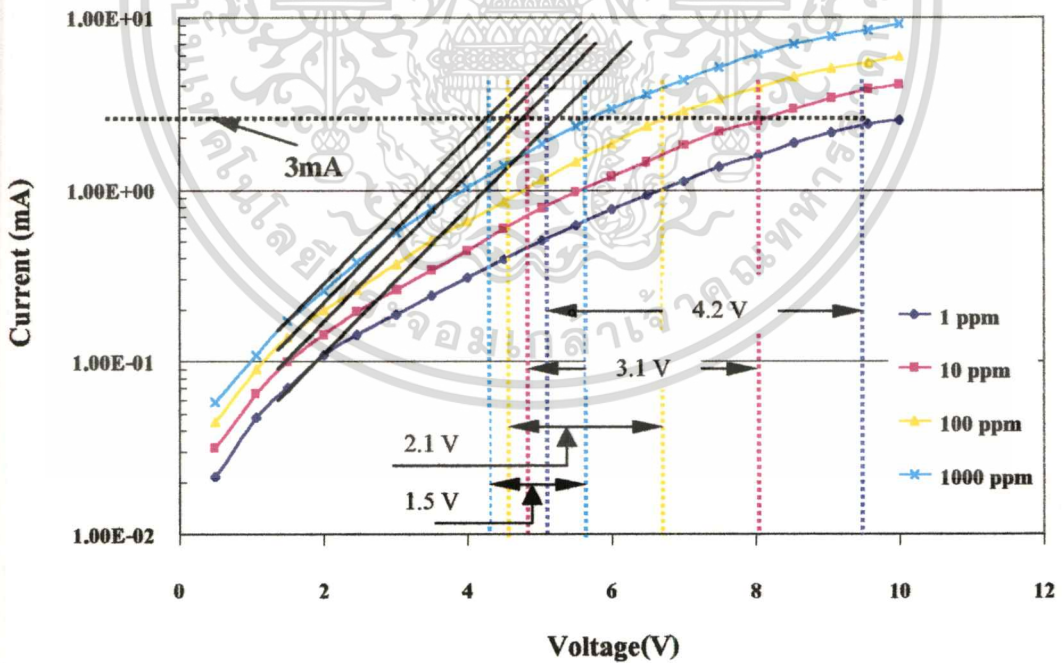
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ B:C เพิ่มขึ้นนั้นปริมาณกระแสในตัวไหลย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากกราฟสามารถวัดค่าได้โดยตรงแสดงได้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าของกระแสในตัวไหลย้อนกลับของโฟโตไดโอดในกรณีค่า B:C ต่างๆกัน

อัตราส่วน B:C (ppm)	I_s (μA)
1	~10
10	~18
100	~28
1000	~32

จากกราฟในรูปที่ 4.16 นั้นสามารถหาค่าของ R_s ของไดโอดได้ ซึ่งค่าของ R_s นี้จะเป็นมีผลอย่างในต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวิธีการหาค่านั้นได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 ดังนั้นสามารถหาค่า R_s ได้จากรูปที่ 4.15 ซึ่งจะแสดงให้เห็นดูในกรณีของอัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm เท่านั้นซึ่งในกรณีความเข้มข้นอื่นก็สามารถหาได้โดยวิธีเดียวกัน



รูปที่ 4.15 แสดงวิธีการหาค่าของ R_s ของโฟโตไดโอด

จากรูปที่ 4.17 ในกรณีของ อัตราส่วน B:C ที่ 1000 ppm R_S จะมีค่าเท่ากับ $\frac{I}{\Delta V}$

ดังนั้น

$$R_S = \frac{1.5V}{3 \times 10^{-3} A} = 500 \Omega$$

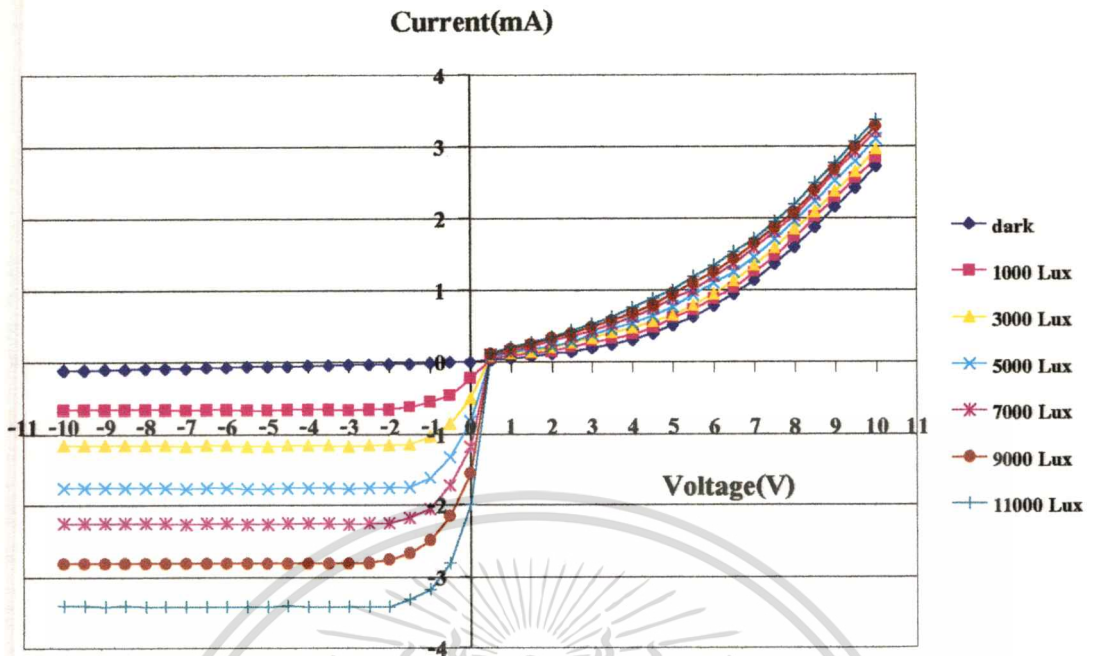
ซึ่งค่าของ R_S ที่คำนวณได้ในกรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ค่าอื่นๆ นั้นจะแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อทำการเติมอะตอมสารเจือโบรอนที่มีค่าน้อยๆ นั้นค่า R_S จะมีค่าสูง ดังนั้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นต้องคำนึงถึงค่า R_S ด้วย โดยสามารถทำการเปลี่ยนแปลงค่า R_S โดยการเติมอะตอมสารเจือโบรอน ซึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นค่าของ R_S จะต้องมีความต่ำที่สุด ในอุดมคติ นั้นค่าของ R_S ควรจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ทั้งนี้ต้องระวังด้วยการเติมอะตอมสารเจือโบรอนมากเกินไปจะทำให้เกิดกระแสในตัวไหลย้อนกลับมากขึ้นก็จะส่งผลเสียให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าของ R_S ของโฟโตไดโอดที่ความเข้มข้นของ B:C ที่แตกต่างกัน

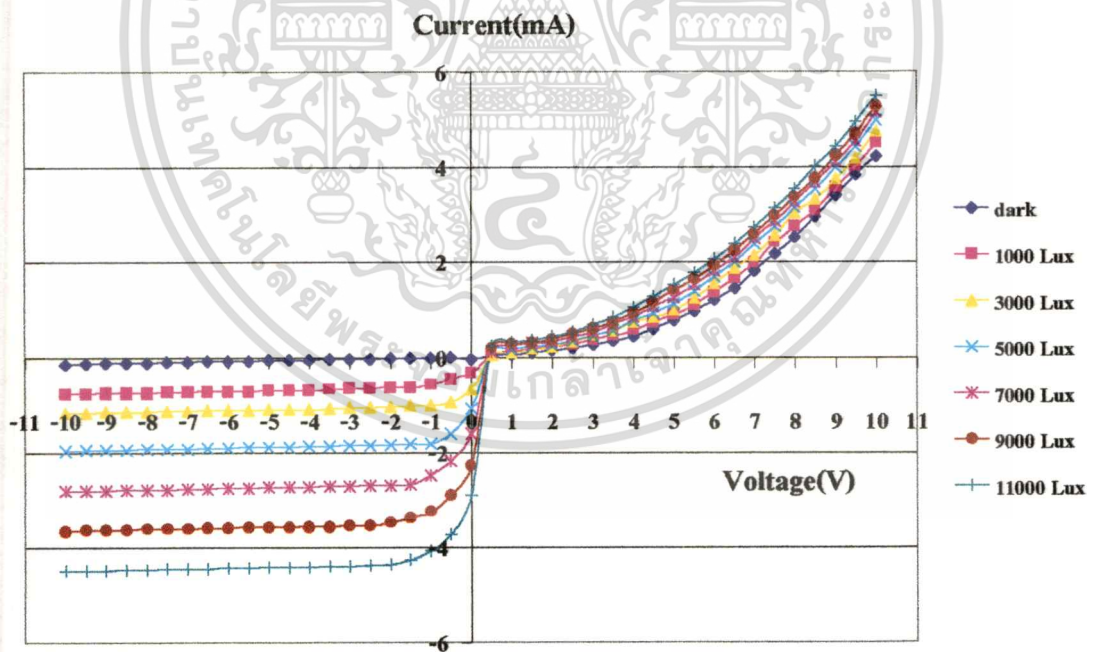
B:C(ppm)	I (mA)	ΔV (V)	R_S (Ω)
1	1	~4.2	~1400
10	1	~3.1	~1033
100	3	~2.1	~700
1000	3	~1.5	~500

4.6.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

การศึกษาในหัวข้อนี้ก็เพื่อที่จะศึกษาว่าความเข้มแสงมีผลต่อกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอดอย่างไร โดยความเข้มแสงที่ใช้มีค่าอยู่ที่ 1000, 3000, 5000, 7000, 9000 และ 11000 lux จากโถงหลอดทั้งสแตน โดยฟิล์มเพชรมีความหนาประมาณ 2 μm และอัตราส่วนของ B:C คือ 1, 10, 100 และ 1000 ppm จากการทดลองวัดข้อมูลนั้นจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.16-4.19

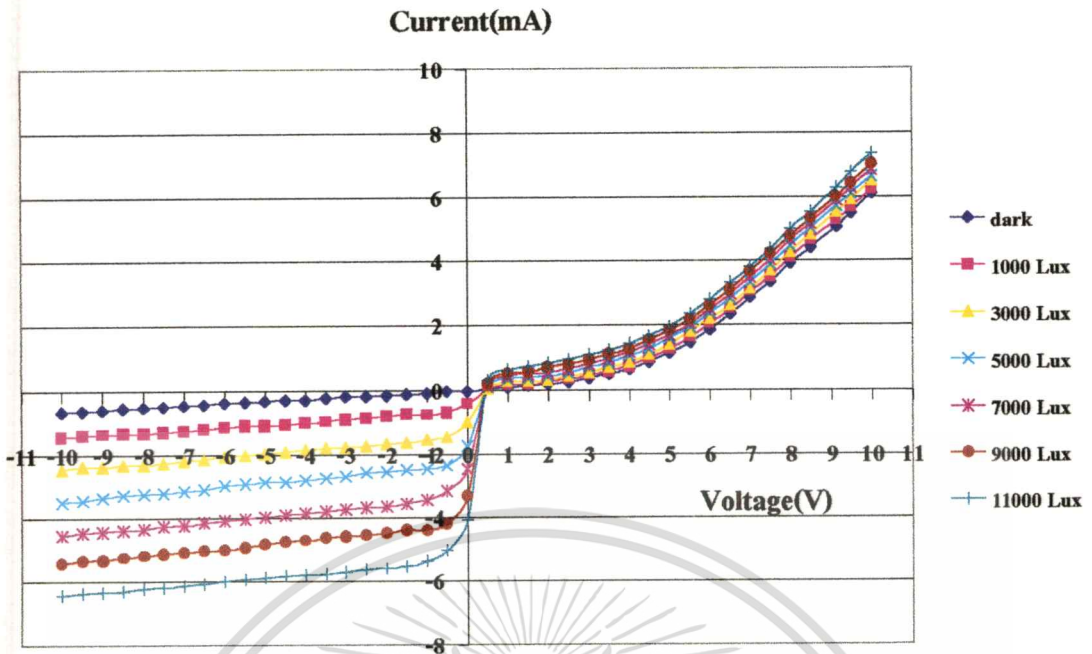


รูปที่ 4.16 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี B:C ที่ 1 ppm เมื่อได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ

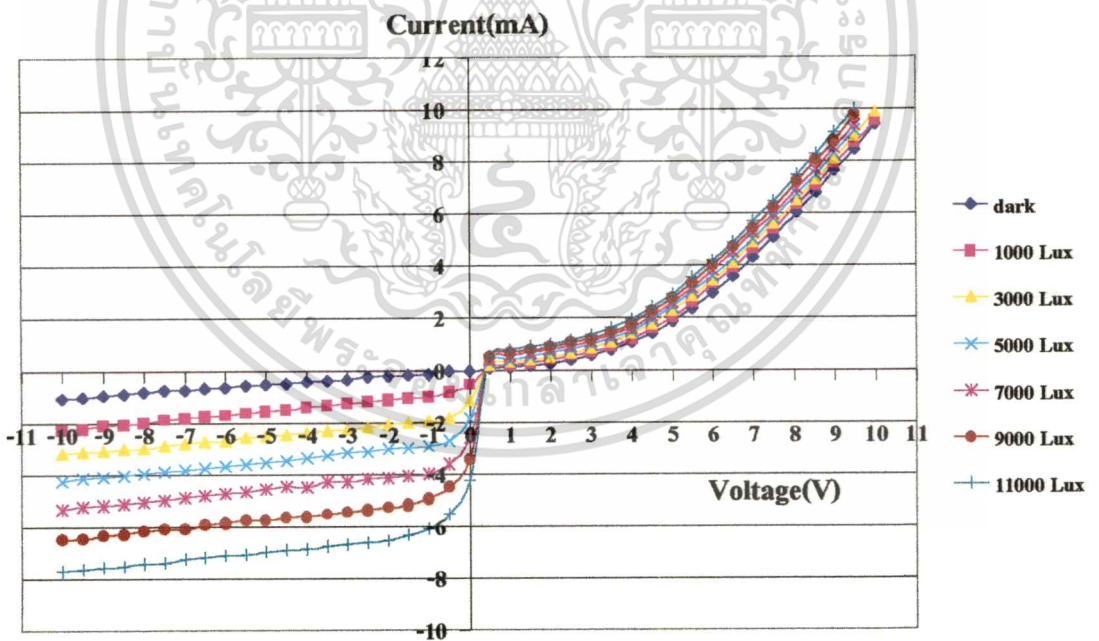


รูปที่ 4.17 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี B:C ที่ 10 ppm เมื่อได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี B:C ที่ 100 ppm เมื่อได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ



รูปที่ 4.19 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในกรณี B:C ที่ 1000 ppm เมื่อได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองที่นำเสนอในรูปที่ 4.16-4.19 นั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นนั้นปริมาณกระแสในช่วงของการไบแอสย้อนกลับนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในช่วงของการไบแอสตรงนั้นกระแสก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่ปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นจะน้อยกว่าช่วงของการไบแอสย้อนกลับมาก ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งจะมีลักษณะแตกต่างกับโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน กล่าวคือโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันนั้น เมื่อฉายแสงให้กับโฟโตไดโอดนั้น ในช่วงของการไบแอสย้อนกลับจะมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตไหลมากขึ้น แต่ในขณะที่ได้รับการไบแอสตรงนั้นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อได้รับการฉายแสง ซึ่งอธิบายลักษณะการเกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจากโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันได้จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.15 จะได้สมการกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตดังสมการ

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

โดยที่ I_o คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ของโฟโตไดโอด

I_L คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง

I_D คือ กระแสไฟฟ้าที่มีคของไดโอด

I' คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_s

จากสมการที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าถ้าให้ไบแอสย้อนกลับ ($-V_a$) กับโฟโตไดโอดนั้น จากสมการที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเทอมของเอ็กโปเนนเชียลมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s (-1) - I'$$

หรือ

$$I_o = I_L - I_D - I' = (I_L + I_s) - I' \quad (4.6)$$

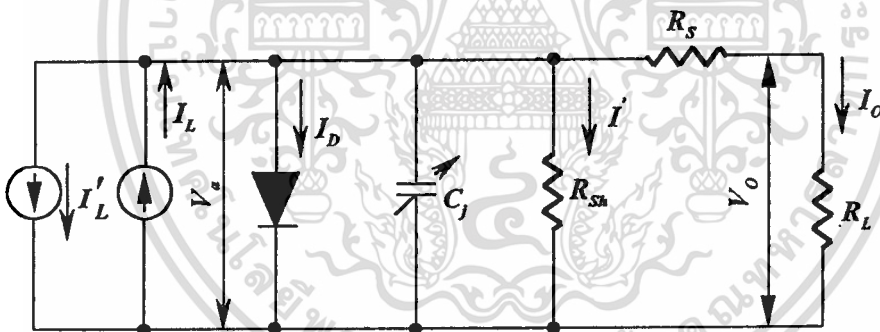
จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของโฟโตไดโอดนั้นจะเกิดการรวมกันของกระแสไฟฟ้า 2 ส่วน ระหว่างกระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิมิตัว (I_o) กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (I_L)

ในกรณีของการไบแอสตรง (V_a) ให้กับโฟโตไดโอด นั้นจากสมการที่ 4.5 จะได้ดังนี้

$$I_o = I_L - I_D - I' = \left[I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_a}{kT} \right) \right] - I' \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของโฟโตไดโอดนั้นจะเกิดการหักล้างกันของกระแส 2 ส่วน คือกระแสที่เกิดจากแสงลบด้วยกระแสมืดของไดโอด ดังนั้นในการใช้งานโฟโตไดโอดทำเป็นตัวเซ็นเซอร์ความเข้มแสงโดยทั่วไปแล้วจะต้องทำการไบแอสย้อนกลับให้กับโฟโตไดโอด

อย่างที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน โดยจะมีความแตกต่างกับโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน โดยเมื่อให้การไบแอสตรงกับโฟโตไดโอดพร้อมกับการฉายแสงนั้น โฟโตไดโอดที่มีรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันนั้นจะมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อยดังได้อธิบายไว้แล้ว แต่โฟโตไดโอดที่สร้างจากรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดเอ็นนั้นจะมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้น ดังที่ได้แสดงไว้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.16-4.19 ดังนั้นในการอธิบายผลการทดลองของโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดเอ็นนั้น ได้มีการเสนอวงจรสมมูลขึ้นมาใหม่โดยอาศัยวงจรสมมูลของโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดเอ็น

โดยในรูปวงจรสมมูลในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่ามีค่าของ I'_L คือค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่บริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะซึ่งมีทิศตรงกันข้ามกับ I_L ดังนั้นสมการที่ 4.5 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_o = I_L - I_D - I' - I'_L = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_a}{kT} - 1 \right) - I' - I'_L \quad (4.8)$$

ในกรณีไบแอสย้อนกลับให้กับโฟโตไดโอดพร้อมกับการฉายแสงนั้นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะเกิดขึ้นตามสมการที่ 4.9 ดังนี้

$$I_o = I_L - I_s - I' - I'_L \quad (4.9)$$

ซึ่งกระแสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณช่วงปลอดประจุพาหะ ดังนั้นค่าของ I'_L จึงสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงในบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากมีกำแพงศักย์ที่มีค่ามากเนื่องจากการไบแอสย้อนกลับนั้นกันอยู่ ดังนั้นสมการที่ 4.9 จะมีค่าดังสมการที่ 4.10

$$I_o = I_L - I_s - I' \quad (4.10)$$

โดยในกรณีทำการไบแอสตรงให้กับโฟโตไดโอดนั้น ช่วงปลอดประจุพาหะนั้นจะแคบลง และ ศักย์ไฟฟ้าที่กั้นประจุพาหะส่วนมากนั้นจะมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นประจุพาหะที่เกิดจากแสงในบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะนั้นจะเพิ่มขึ้นจึงทำให้ประจุพาหะส่วนมากเพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณียังไม่ได้รับการฉายแสงดังได้นำเสนอไปแล้วในผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.4 ดังนั้นในช่วงของการไบแอสตรงให้กับโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตทางด้านไบแอสตรงนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นสมการที่ 4.8 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 4.11

$$I_o = -I_s \left(\exp \frac{qV_a}{kT} - 1 \right) - I' - I'_L \quad (4.11)$$

จากสมการที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าสามารถตัดค่าของ I'_L ทิ้งได้เนื่องจากมีค่าน้อย วึ่งเกิดจากการที่เมื่อโฟโตไดโอดได้รับการไบแอสตรงนั้นบริเวณปลอดประจุพาหะจะมีค่าน้อยลง และ สนามไฟฟ้าที่เป็นตัวเร่งการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่เกิดจากแสงในบริเวณปลอดประจุพาหะมีค่าลดลง โดยกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการเคลื่อนที่โดยการแพร่ของประจุพาหะส่วนมาก และ กระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากแสงที่เกิดขึ้นบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะ ดังนั้นเมื่อให้ไบแอสตรงกับโฟโตไดโอดพร้อมกับการฉายแสงที่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นนั้นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

และจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.16-4.19 ได้แสดงให้เห็นว่าถ้าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นกระแสเอาต์พุตของโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากว่ามีจำนวน โฟตอนตกกระทบบที่โฟโตไดโอด

โคมมากขึ้นทำให้คู่อิเล็กตรอนโฮลเกิดมากขึ้นนั่นเอง โดยการคำนวณกระแสที่เพิ่มขึ้นต่อความเข้มแสง (1000lux) ต่อพื้นที่รับแสง (mm^2) นั้นแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

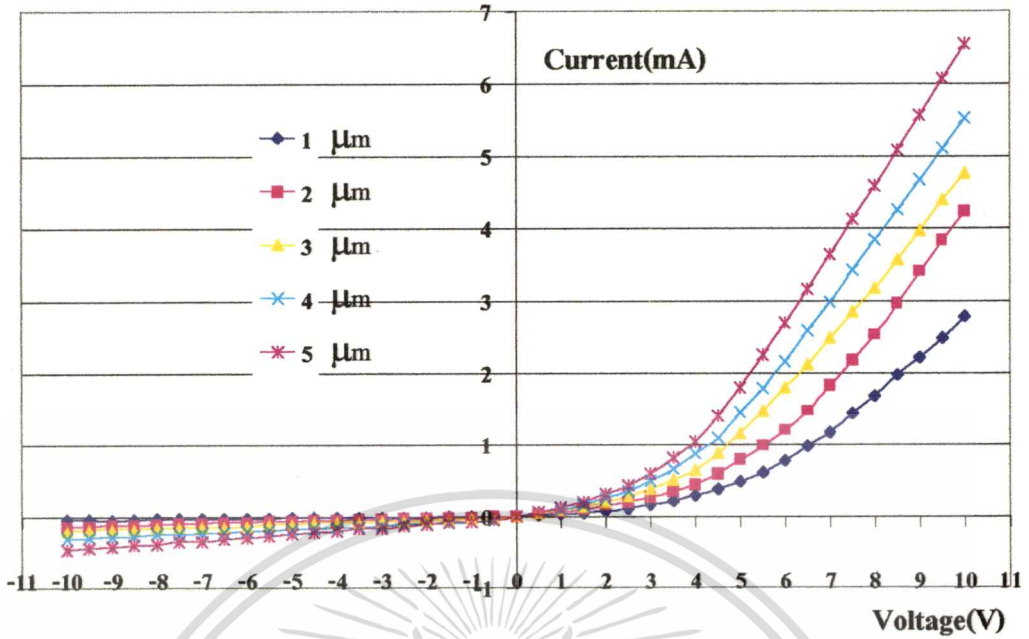
ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบการคำนวณกระแสที่เพิ่ม (mA) ขึ้นต่อความเข้มแสง (1000lux) ต่อพื้นที่รับแสง (cm^2) ของโฟโตไดโอดที่อัตราส่วน B:C ค่าต่างๆ

B:C(ppm)	กระแสต่อความเข้มแสงต่อพื้นที่รับแสง $\text{mA}/1000 \text{ lux}/\text{mm}^2$
1	0.081
10	0.091
100	0.095
1000	0.107

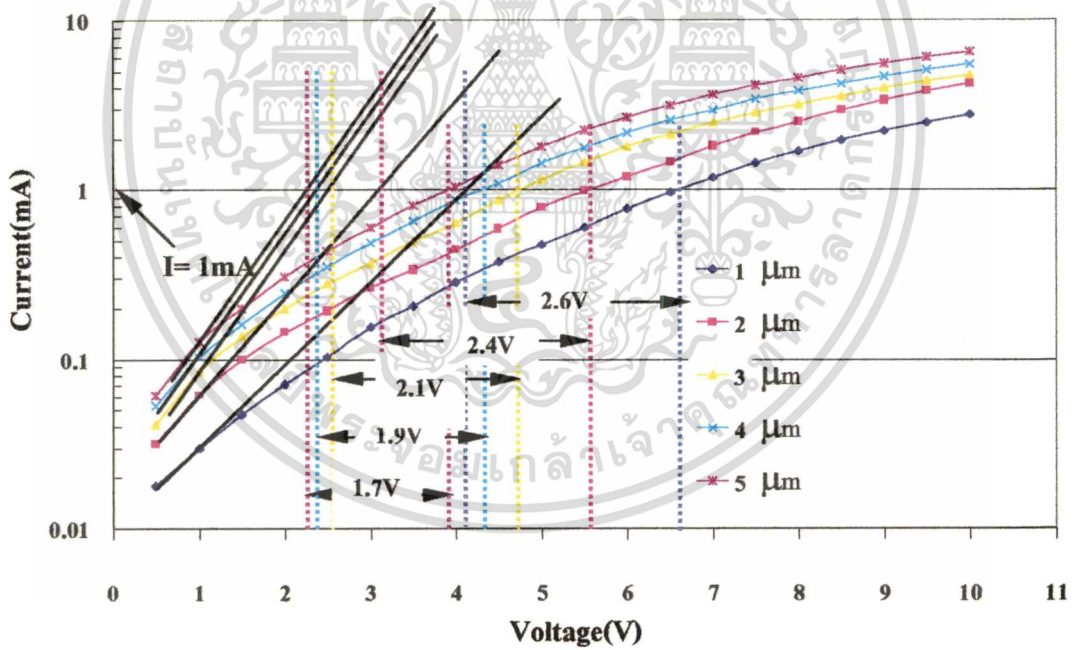
4.6.3 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โดยจากผลการทดลองที่ 4.5.1 นั้นจะเห็นได้ว่าความหนาของฟิล์มเพชร ที่ $2 \mu\text{m}$ และอัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm นั้น จะได้ค่าของ R_S ที่สูงมาก ดังนั้นในการทดลองนี้จะศึกษาว่าผลของความหนาของฟิล์มเพชรนั้นมีผลต่อค่า R_S หรือไม่ ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.21 จากผลการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่า R_S มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มเพชร ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 จากนั้นทำการฉายแสงเพื่อจะดูว่าความเข้มแสงมีผลต่อกระแสของโฟโตไดโอดอย่างไรเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าสูงขึ้น โดยจะทำการสร้างฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 1, 2, 3, 4 และ $5 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 4.21 นำมาพร้อมกราฟก็งี้คือระหว่างกระแสและแรงดันในช่วงการไบแอสตรงเพื่อหาค่าของ R_S จะได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.22 คุณลักษณะกึ่งล็อกกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 10 ppm โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชร เพื่อหาค่าของ R_S

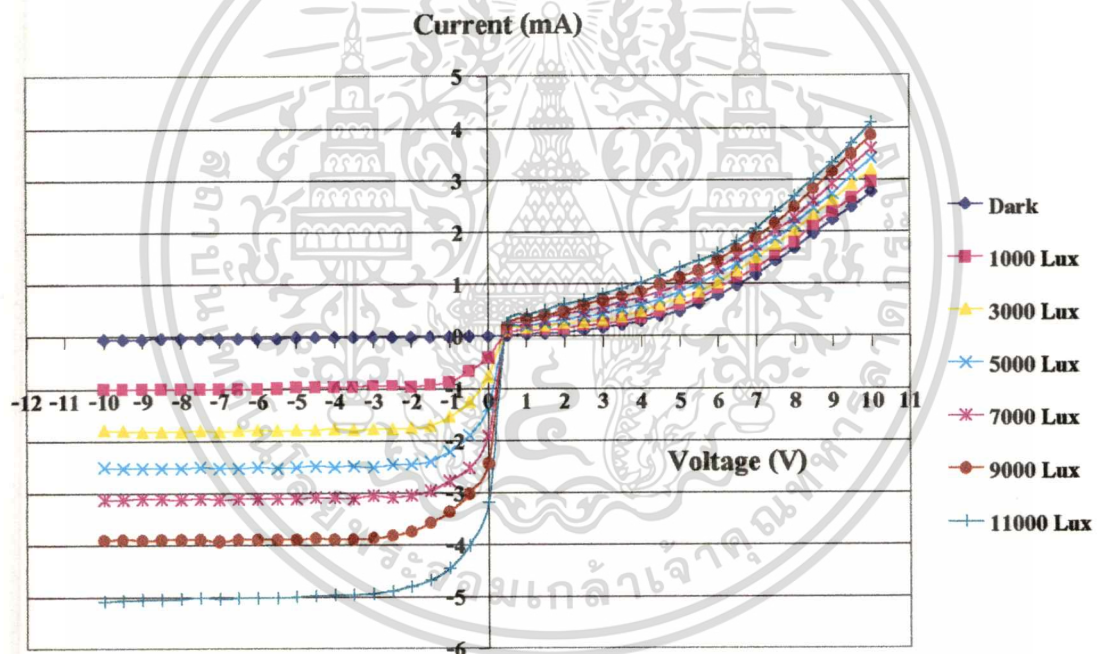
จากนั้นทำการคำนวณหาค่าของ R_S ของโฟโตไดโอด ในรูปที่ 4.22 ซึ่งค่าที่ได้แสดงไว้ในตารางดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

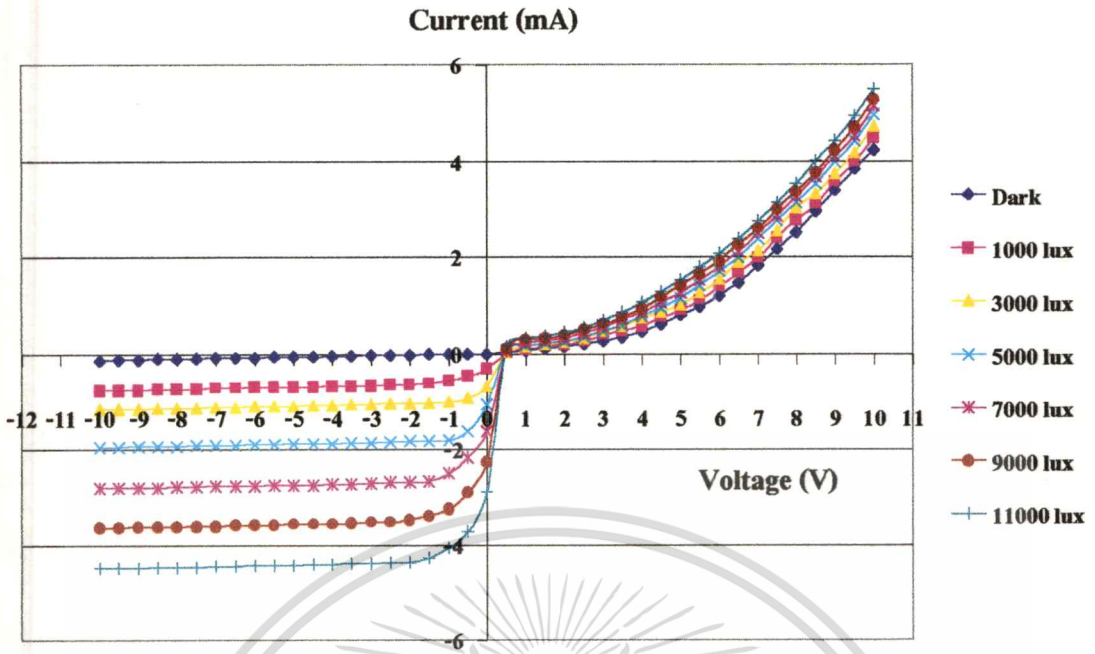
ตารางที่ 4.8 ตารางค่าของ R_S ของโฟโตไดโอดที่คำนวณได้จากรูปที่ 4.20

ความหนาของฟิล์มเพชร(μm)	R_S (Ω)
1	2600
2	2400
3	2100
4	1900
5	1700

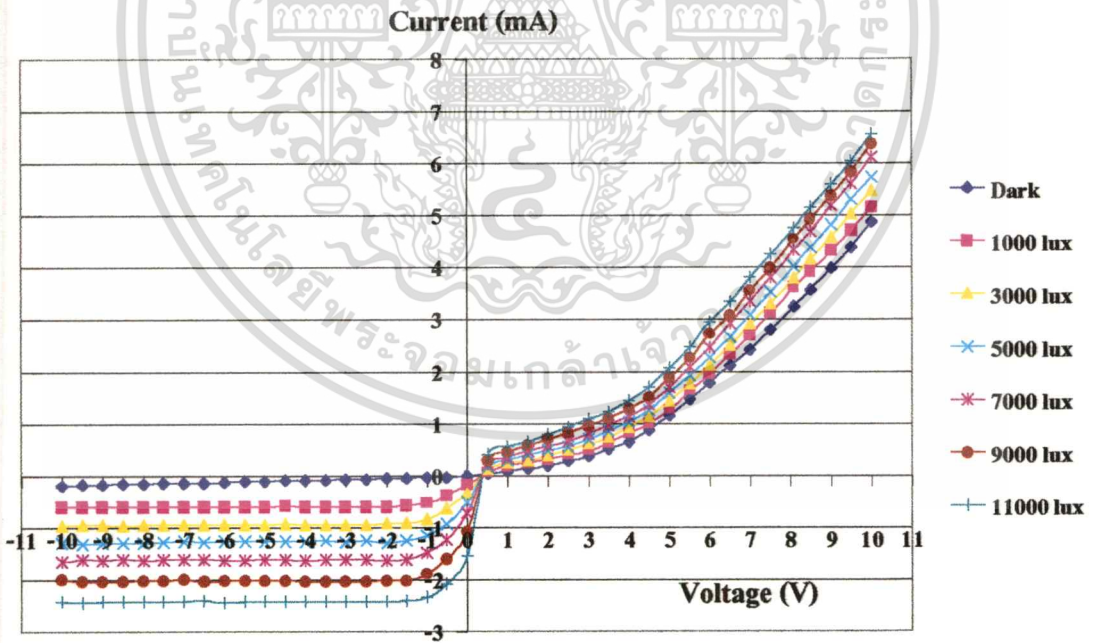
จากนั้นทำการฉายแสงจากหลอดดทั้งสแตนที่ค่าความเข้มต่างๆ นั้นจะได้ดังรูปที่ 4.23-4.27



รูปที่ 4.23 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ $1\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

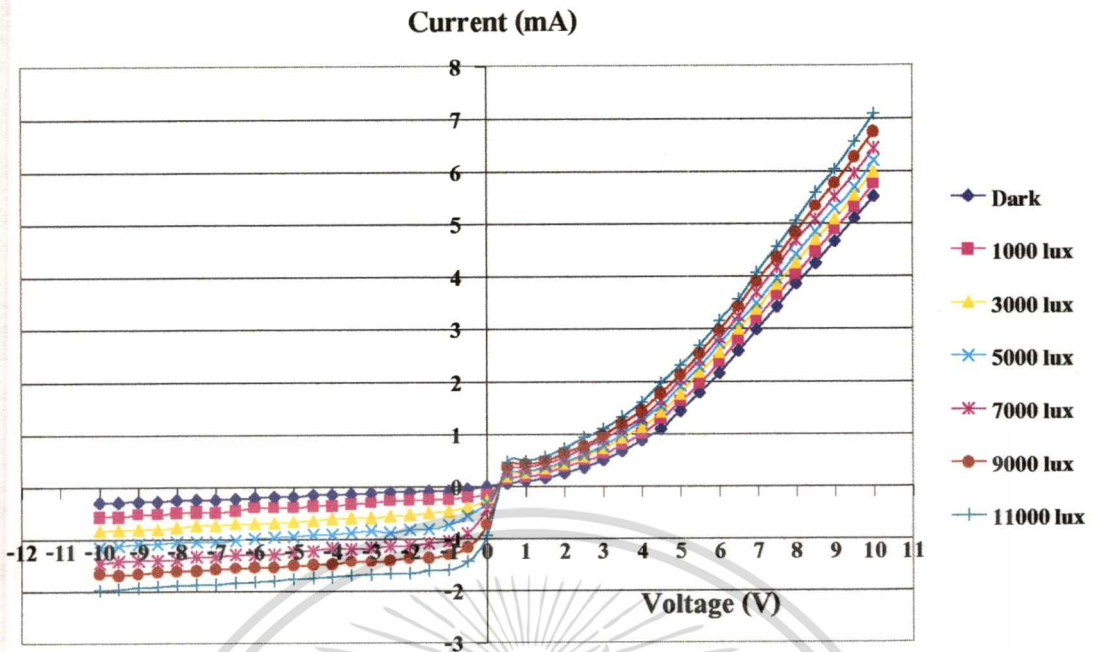


รูปที่ 4.24 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ 2 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

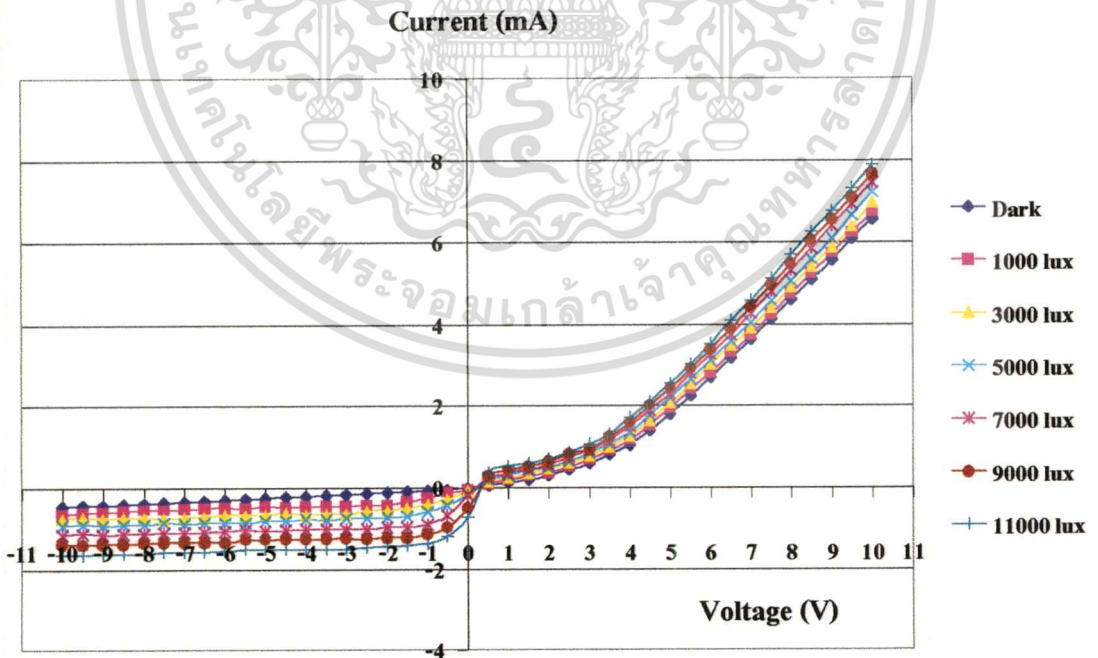


รูปที่ 4.25 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ 3 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่ 4 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 4.27 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่

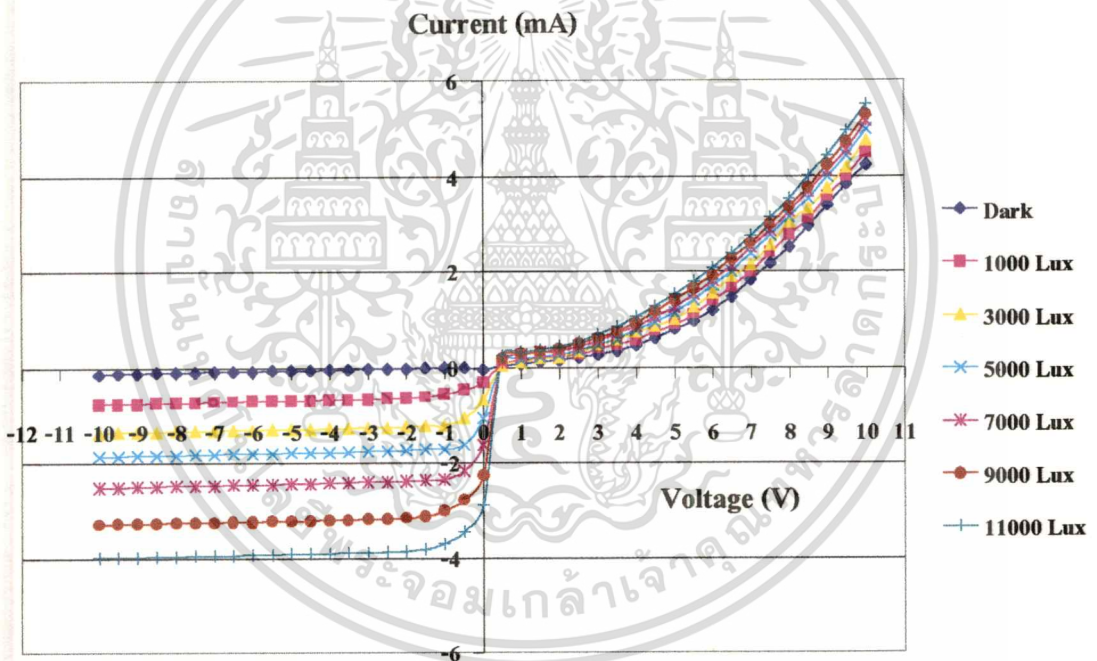
5 μm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

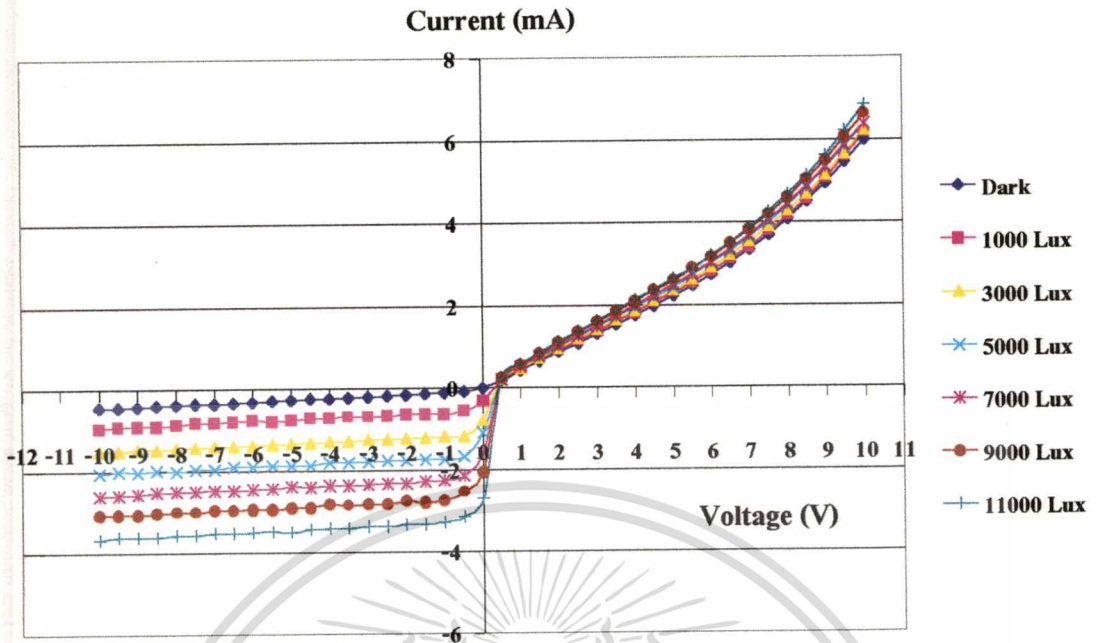
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อฟิล์มเพชรมีความหนาเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าของ R_S มีค่าน้อยลง ซึ่งค่าของ R_S นั้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมากซึ่งจะแสดงให้เห็นในผลการทดลองในหัวข้อต่อไป ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่ายิ่งฟิล์มเพชรที่มีความหนาเท่าไรนั้นกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากฟิล์มเพชรที่มีความบางมากๆ นั้น แสงจะส่องทะลุผ่านเข้าไปที่บริเวณรอยต่อได้มากขึ้น เป็นผลทำให้ที่บริเวณรอยต่อนั้นผลิตประจุพาหะได้มากขึ้นนั่นเอง

4.6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

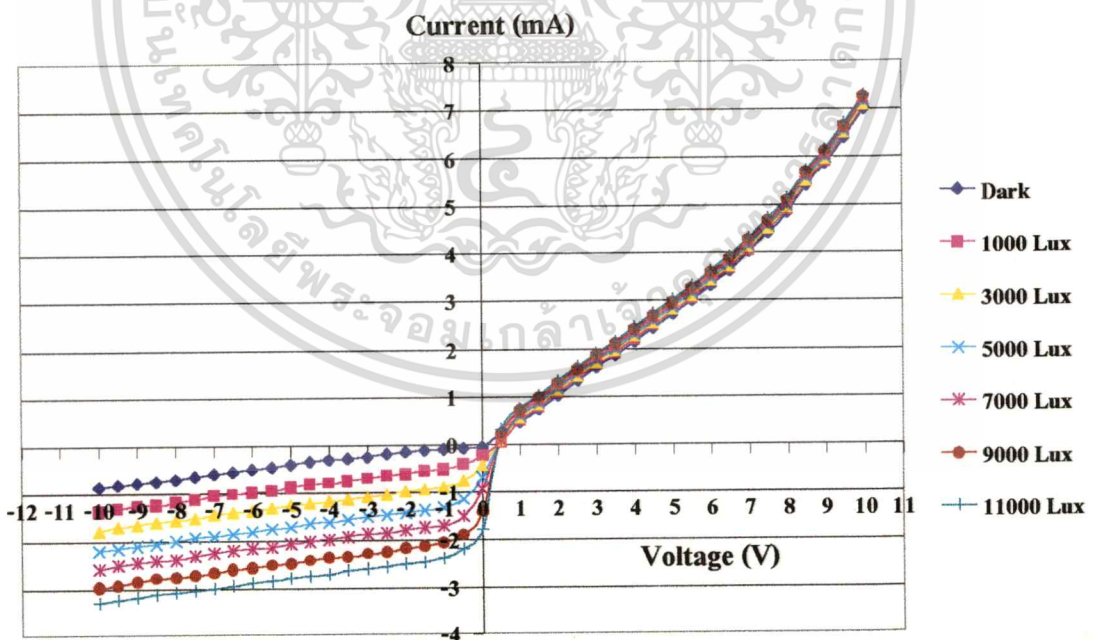
ในการทดลองนี้จะทำการทดลองโดยใช้ฟิล์มเพชรที่มีความหนา $2 \mu\text{m}$ และอัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm ทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ตัวโฟโตไดโอดตั้งแต่อุณหภูมิที่ 50, 100, 150 และ 200°C แล้วทำการฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.28-4.31



รูปที่ 4.28 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 10 ppm ความหนา $2 \mu\text{m}$ ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

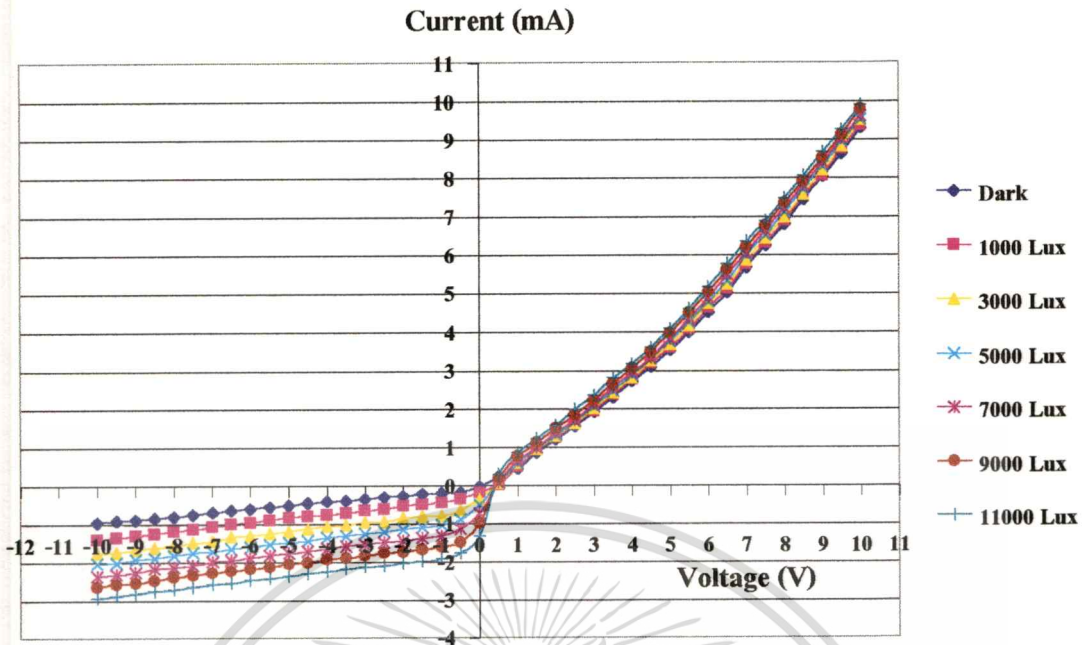


รูปที่ 4.29 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 10 ppm ความหนา 2 μm ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 4.30 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 10 ppm ความหนา 2 μm ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด B:C ที่ 10 ppm ความหนา $2 \mu\text{m}$ ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ

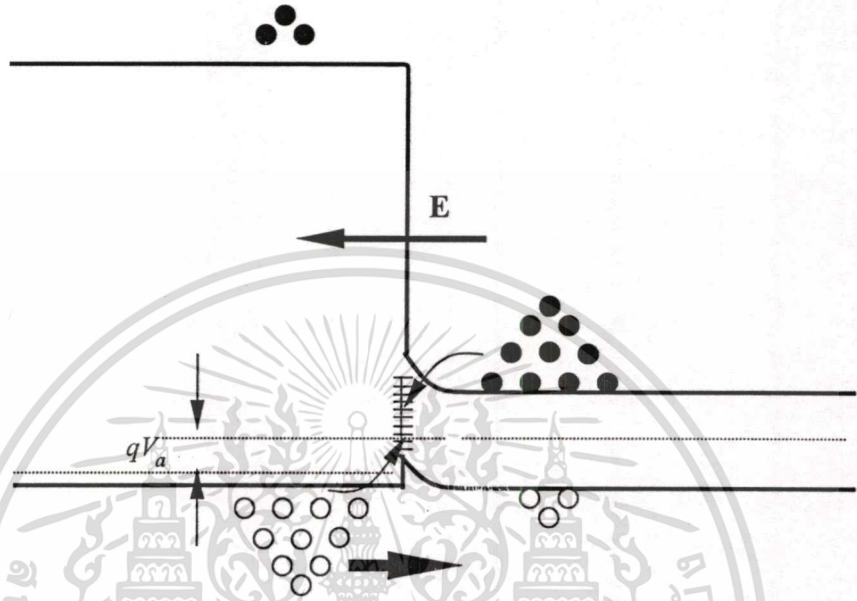
จากรูปผลการทดลองนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และยังไม่มีการฉายแสงให้กับโฟโตไดโอดนั้น กระแสไฟฟ้าทางด้านไบแอสตรงนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ในทางกลับกันถ้าพิจารณากระแสไฟฟ้าในช่วงของการไบแอสย้อนกลับจะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นน้อยมาก ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยแถบพลังงานของรอยต่อของเพชรและซิลิคอนได้ดังนี้คือจากรูปที่ 4.31 เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนนั้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลจำนวนมาก โดยถ้าพิจารณาว่าผลของอุณหภูมิมีผลต่อซิลิคอนมากกว่าฟิล์มเพชรแล้วนั้นจะได้ว่า ที่ซิลิคอนนั้นจะเกิดโฮลและอิเล็กตรอนจำนวนมาก จะทำให้ค่าของระดับพลังงานเฟอร์มิชยับเข้าใกล้ระดับอินทรินซิกมากขึ้น ดังนั้น เมื่อรอยต่อได้รับการไบแอสตรงนั้นกระแสโฮลที่ไหลจากฟิล์มเพชรนั้นจะไหลไปยังซิลิคอนได้มากขึ้นเนื่องจากกำแพงศักย์ที่กั้นโฮลนั้นมีค่าน้อยลง และ อิเล็กตรอนที่ไหลจากซิลิคอนและเกิดการรวมตัวกับโฮลที่ interface state ทำให้เกิดกระแสเนื่องจากการรวมตัวนั้นมีค่ามากขึ้น ดังนั้นผลรวมของกระแสทางด้านการไบแอสตรงนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

ในกรณีที่ไดโอดได้รับการฉายแสงในขณะที่ได้รับความร้อนนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในช่วงของการไบแอสย้อนกลับกระแสจะไหลได้น้อยลงทั้งนี้อธิบายได้ด้วยลักษณะของทฤษฎีแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่า จะเกิดกำแพงศักย์ที่กั้นโฮลไม่ให้เคลื่อนที่ไปยังฟิล์มเพชรชนิดพีมากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการฉายแสงให้กับรอยต่อนั้นแสงจะทะลุผ่านไปยังซิลิคอนทำให้เกิดประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นซึ่งอิเล็กตรอนนั้นจะไหลไปยังด้านซิลิคอนและโฮลนั้นจะ

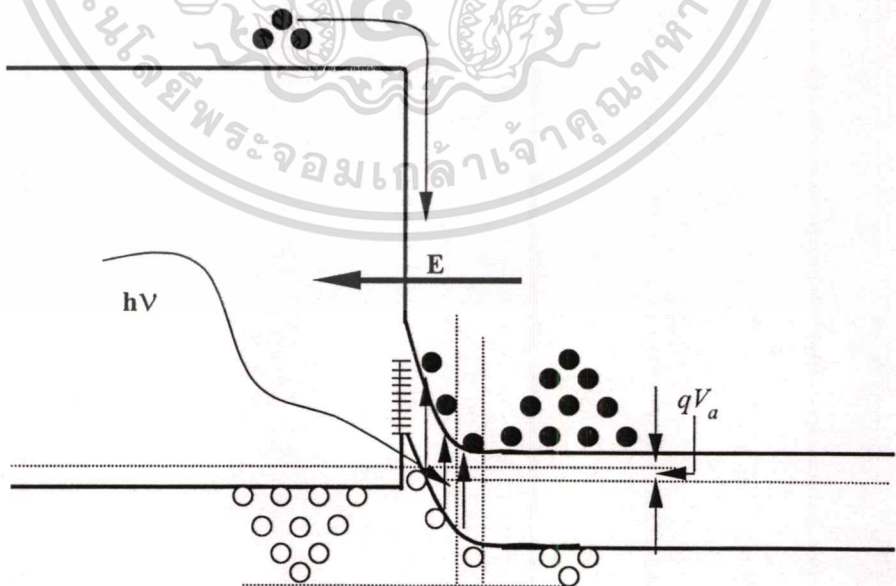
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลไปยังด้านฟิล์มเพชรนิคที โดยที่กำแพงศักย์ที่มากขึ้นเนื่องมาจากความร้อนนั้นจะเป็นตัวกั้นไม่ให้โฮลที่เกิดจากแสงนั้นเคลื่อนที่ไปยังฟิล์มเพชรนิคที ดังนั้นโฟโตไดโอดที่มีอุณหภูมิสูงๆ และได้รับการฉายแสงนั้นจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสทางด้านการไบแอสย้อนกลับมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสทางด้านการไบแอสย้อนกลับเมื่อมีอุณหภูมิต่ำๆ



รูปที่ 4.32 ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรนิคทีกับซิลิคอนชนิดเอ็นในขณะที่ได้รับการไบแอสตรงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.33 ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรนิคทีกับซิลิคอน

ชนิดเอ็นในขณะที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นและได้รับการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

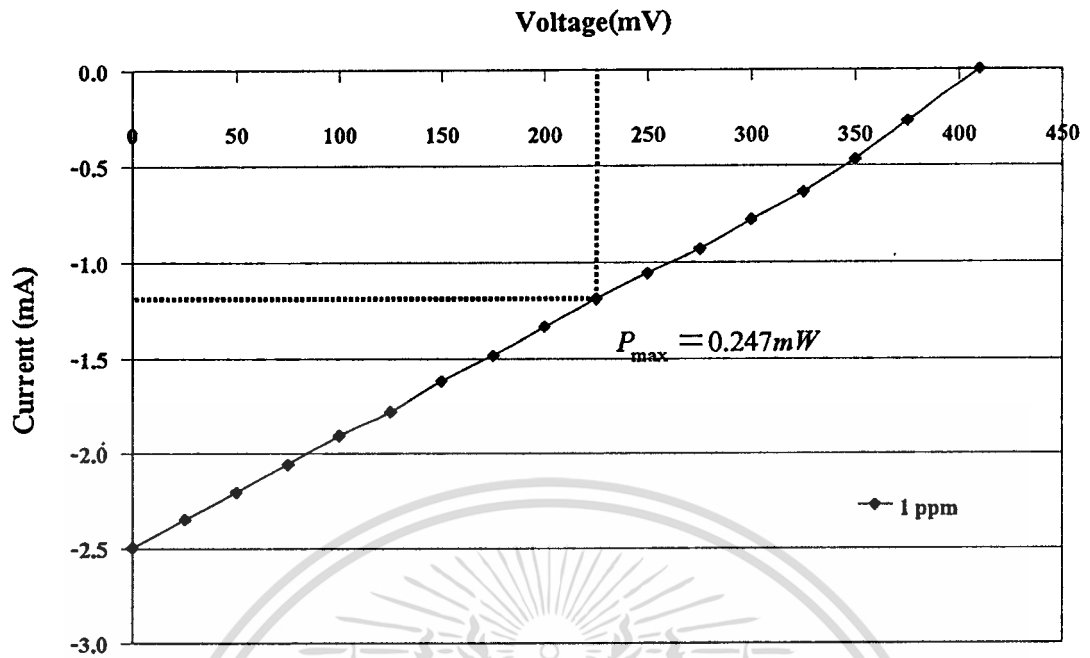
จากที่นำเสนอผลการทดลองเกี่ยวกับโฟโตไดโอดโดยได้ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เช่น ค่าของกระแสไหลอิมตัวย้อนกลับ I_s ค่าความต้านทานอนุกรมของโฟโตไดโอด R_s ดังที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้นก็เพื่อที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้ ว่าค่าของ I_s มีผลต่อแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร และค่าของ R_s จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มากน้อยอย่างไร

4.7 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อที่แล้วนั้นได้กล่าวถึงการศึกษาค่าคุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอด ต่อไปจะกล่าวถึงผลการทดลองเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งโฟโตไดโอดโดยทั่วไปนั้นจะใช้งานอยู่ในช่วงจตุภาคที่ 3 ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้งานอยู่ในช่วงจตุภาคที่ 4 ซึ่งก็คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นเอง โดยทั่วไปก็ทราบกันดีอยู่แล้วว่าคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดกับเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีคุณสมบัติเหมือนกันดังนั้นการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็เหมือนการศึกษาโฟโตไดโอด แต่จะแตกต่างกันคือจะเป็นการศึกษาในจตุภาคที่ 4 แทน

4.7.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

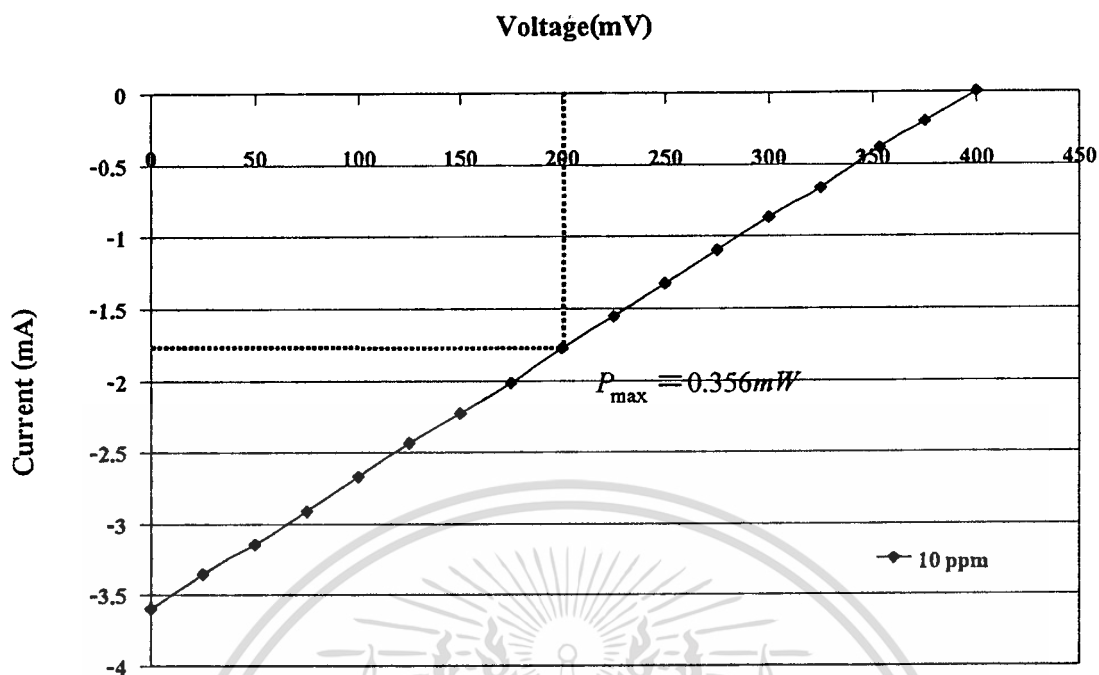
ในการศึกษาในหัวข้อนี้เราจะศึกษาว่าความเข้มข้นของอัตราส่วนของ B:C ว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไรบ้างรวมถึง แรงดันเปิดวงจร กระแสลัดวงจร และ ค่าฟิลแฟกเตอร์ ซึ่งผลการทดลองการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของ B:C ที่ 1, 10, 100 และ 1000 ppm โดยการทดลองนั้นจะใช้ฟิล์มเพชรที่มีความหนา 2 μm ส่วนแสงที่ใช้นั้นจะใช้แสงอาทิตย์เทียมจากเครื่อง solarsimulator ที่มีความเข้มแสงประมาณ 0.835 มิลลิวัตต์ต่อตารางมิลลิเมตรหรือที่ AM 1.5 โดยใช้วงจรการวัดเป็นดังรูปที่ 3.15 ซึ่งผลการทดลองนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.34-4.37



รูปที่ 4.34 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2 \mu m$

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร $2 \mu m$

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

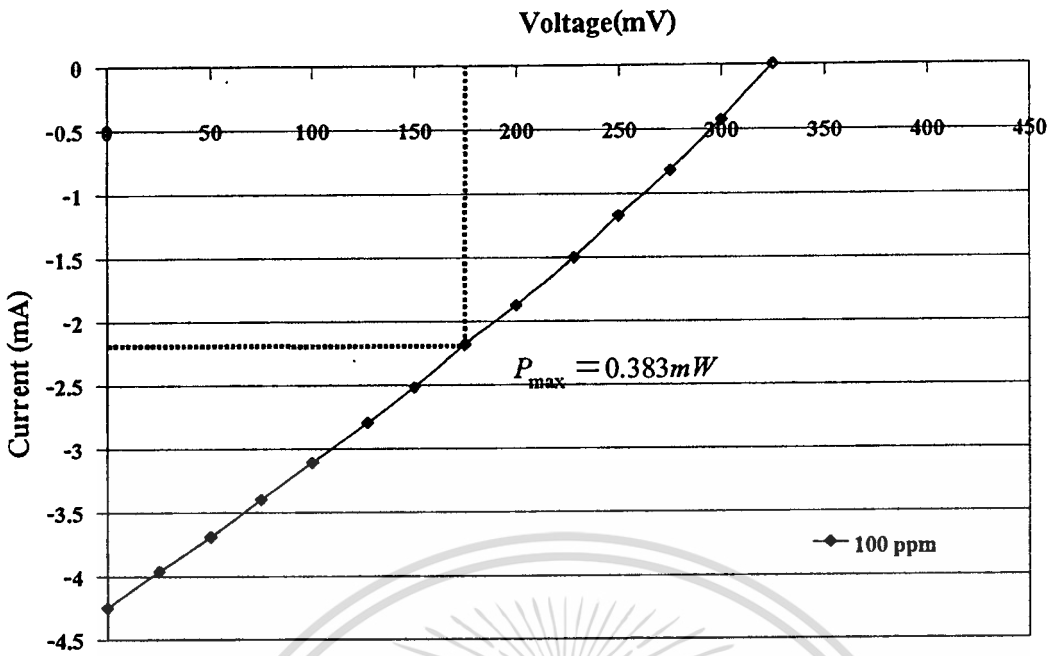


รูปที่ 4.35 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 10 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 10 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

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

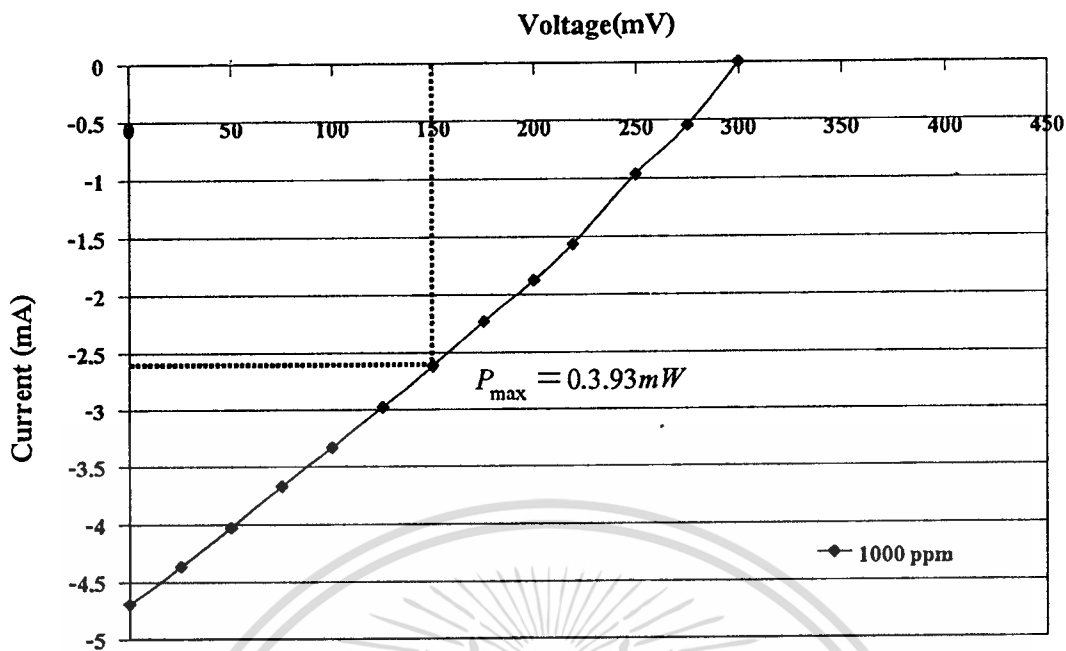
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรีนี B:C ที่ 100 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรีนี B:C ที่ 100 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

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



รูปที่ 4.37 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์กรณี B:C ที่ 1000 ppm ที่ความหนาฟิล์มเพชร 2 μm

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

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

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกรณีที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm มีค่ามากที่สุด เนื่องจากจากที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm นั้น มีกระแสรั่วไหลอิมิต์วย้อนกลับน้อยที่สุดนั่นเอง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟรั่วไหลอิมิต์วย้อนกลับซึ่งมีความสัมพันธ์อธิบายด้วยสมการดังนี้ จากสมการที่ 4.8 กระแสเอาต์พุตของโฟโตโวลโตะมีค่าเท่ากับ

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

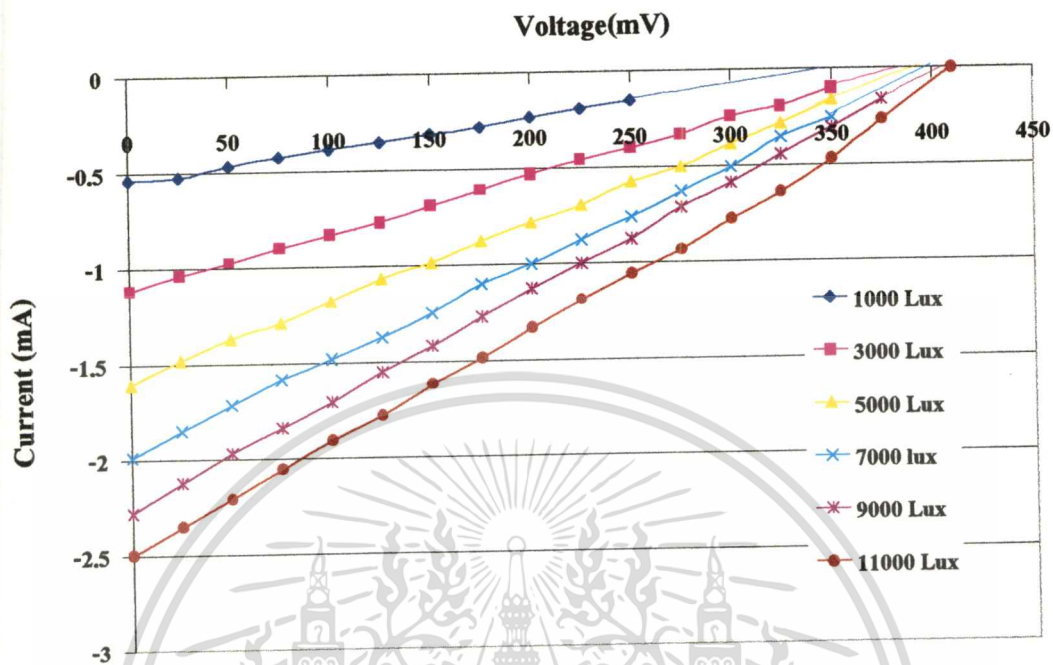
เมื่อให้ $I_o = 0$ จะหาค่าของแรงดันเอาต์พุตเปิดวงจร V_{oc} ได้ดังสมการ ซึ่งจากสมการที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากระแสอิมิต์วไหลย้อนกลับมีค่ามากขึ้นนั้น ค่าของแรงดันเอาต์พุตเปิดวงจร จะมีค่าลดลง ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น กระแสอิมิต์วไหลย้อนกลับของอัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm นั้น มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น ค่าของแรงดันเอาต์พุตเปิดวงจร ของอัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm จึงมีค่ามากที่สุด

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L - I' - I'_L}{I_s} \right) \quad (4.12)$$

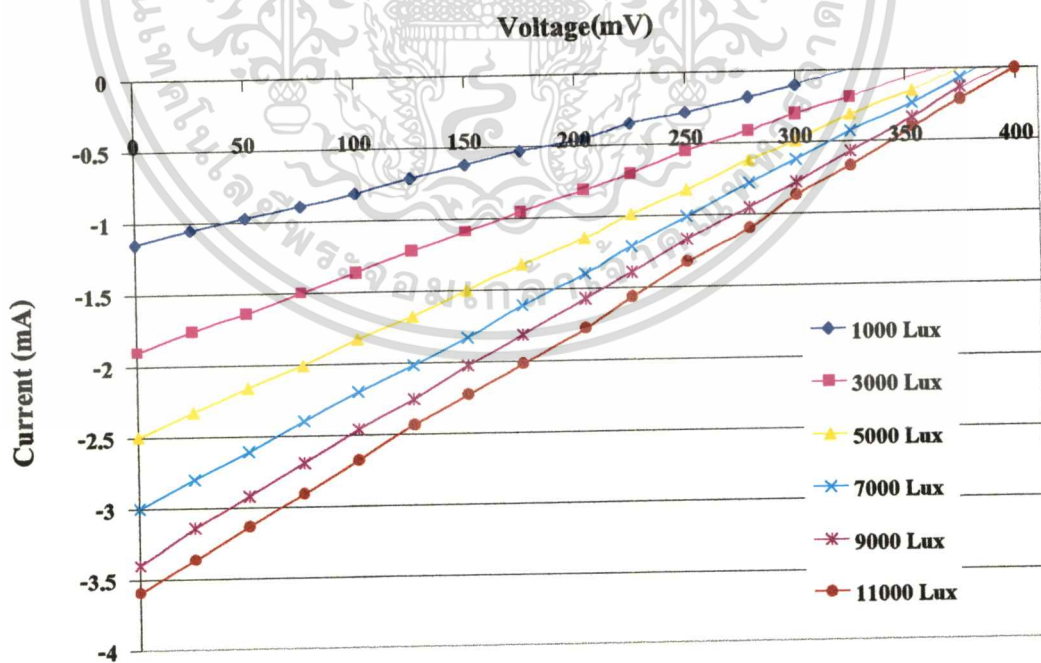
4.7.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อที่ 4.7.1 เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนของ B:C ว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อไปจะเป็นการศึกษาผลของความเข้มแสงว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้อัตราส่วนของ B:C ที่ 1, 10, 100 และ 1000 ppm โดยความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm และแสงที่ใช้คือแสงอาทิตย์เทียม โดยเปลี่ยนแปลง

ความเข้มแสงเป็น 1000, 3000, 5000, 7000, 9000 และ 11000 lux ผลการทดลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.38- รูปที่ 4.41

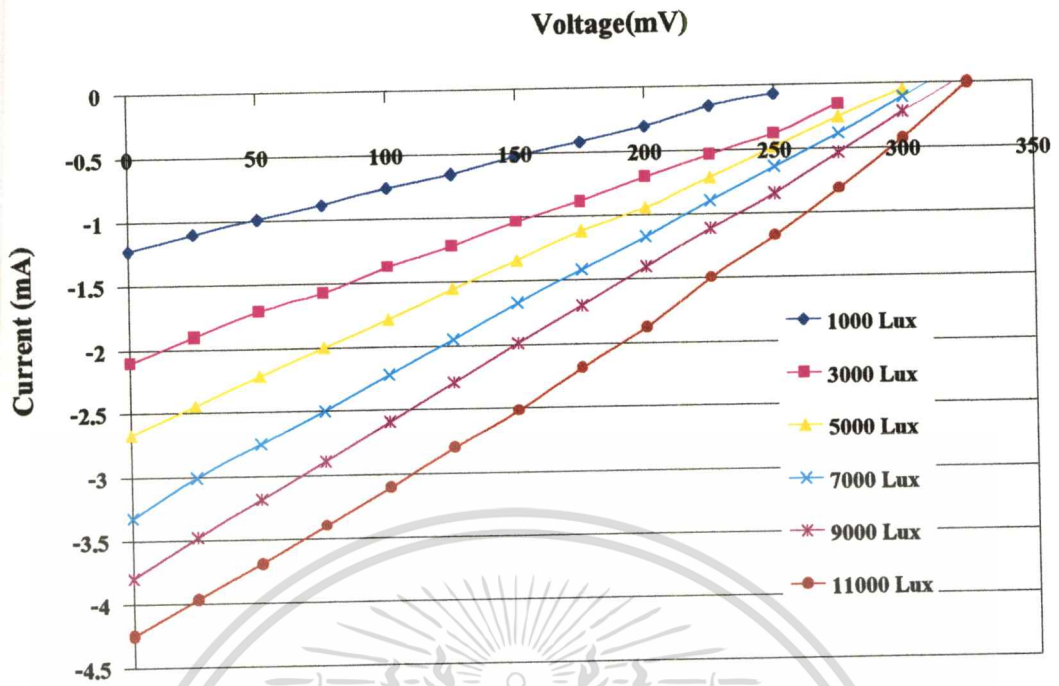


รูปที่ 4.38 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm

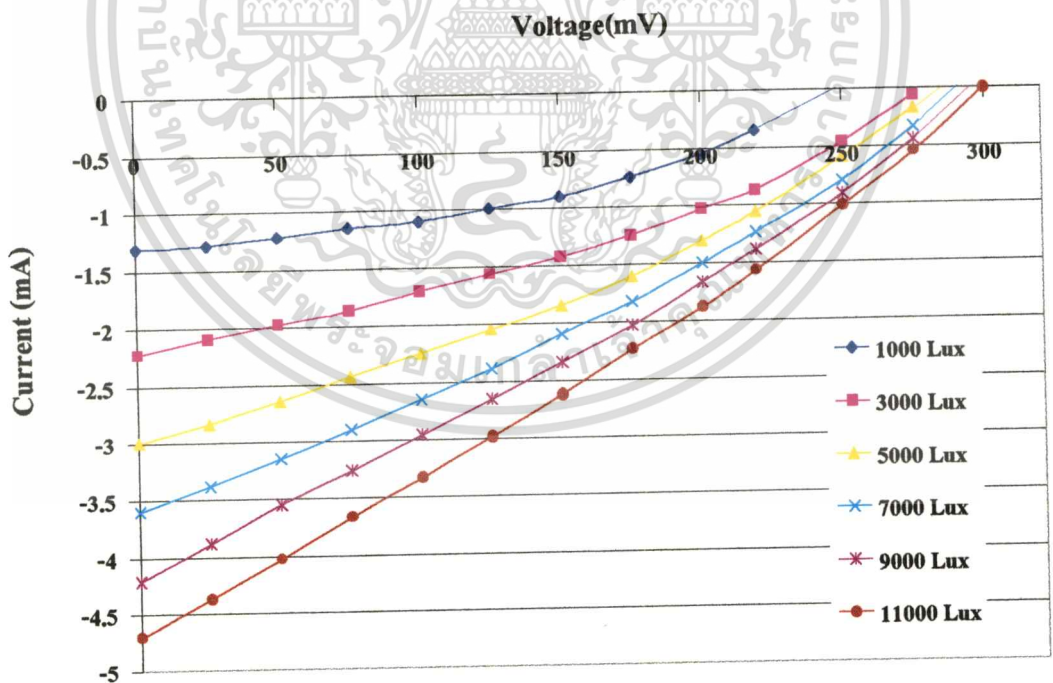


รูปที่ 4.39 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

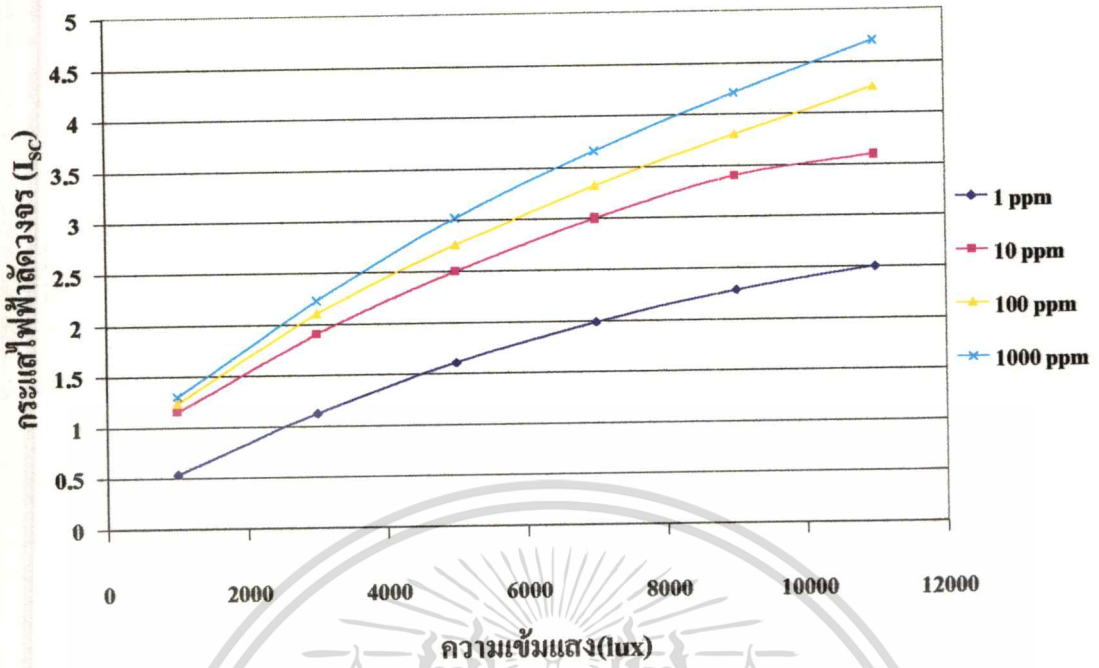


รูปที่ 4.40 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 100 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm

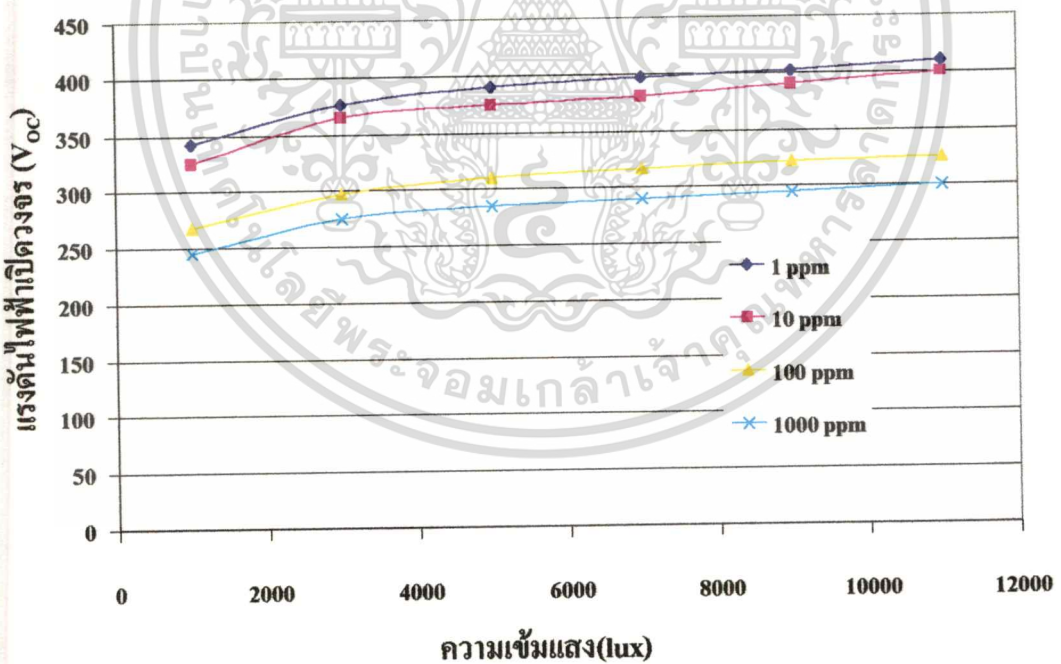


รูปที่ 4.41 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีอัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเท่ากับ 2 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.43 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

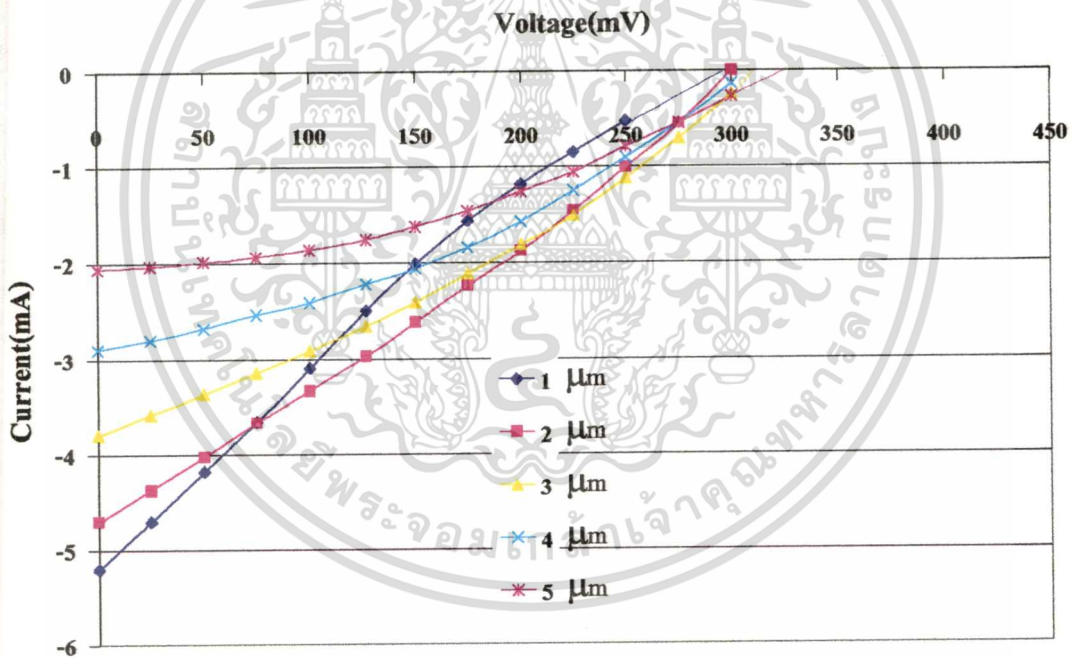
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ได้ในรูปนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นนั้นจะทำให้ค่าของกระแสลัดวงจรนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มแสงไม่มีผลต่อค่าของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมากนัก โดยค่าแรงดันเปิดวงจรนั้นจะเปลี่ยนตามความเข้มแสงในช่วงแรกเท่านั้น โดยเมื่อความเข้มแสงสูงกว่า 1000 lux แรงดันเปิดวงจรนั้นจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากรูปที่ 4.42 และ รูปที่ 4.43 จะสังเกตได้ว่าค่ากระแสลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นนั้นจะมีลักษณะการเปลี่ยนเป็นเชิงเส้นต่อความเข้ม ส่วนแรงดันเปิดวงจรนั้นจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงเป็นลักษณะของเอ็กซ์โพเนนเชียล

4.7.3 ผลขอความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ

เซลล์แสงอาทิตย์

โดยในการทดลองนี้จะใช้อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm และเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 1 2 3 4 และ 5 μm และทำการทดลองโดยใช้ความเข้มแสง 11000 lux ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปแบบที่ 4.44



รูปที่ 4.44 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรค่าต่างๆ

จากการทดลองพบว่าความหนาของฟิล์มเพชรที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยที่มีอัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm เท่ากันนั้นจะอยู่ที่ 2 μm โดยลักษณะของคุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนา 1 μm นั้นจะมีลักษณะแตกต่างจากความหนาอื่นๆ นั้นเนื่องมาจากค่าของความต้านทานชั้นดี R_{sh} นั้นมีค่าน้อย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเซลล์แสง

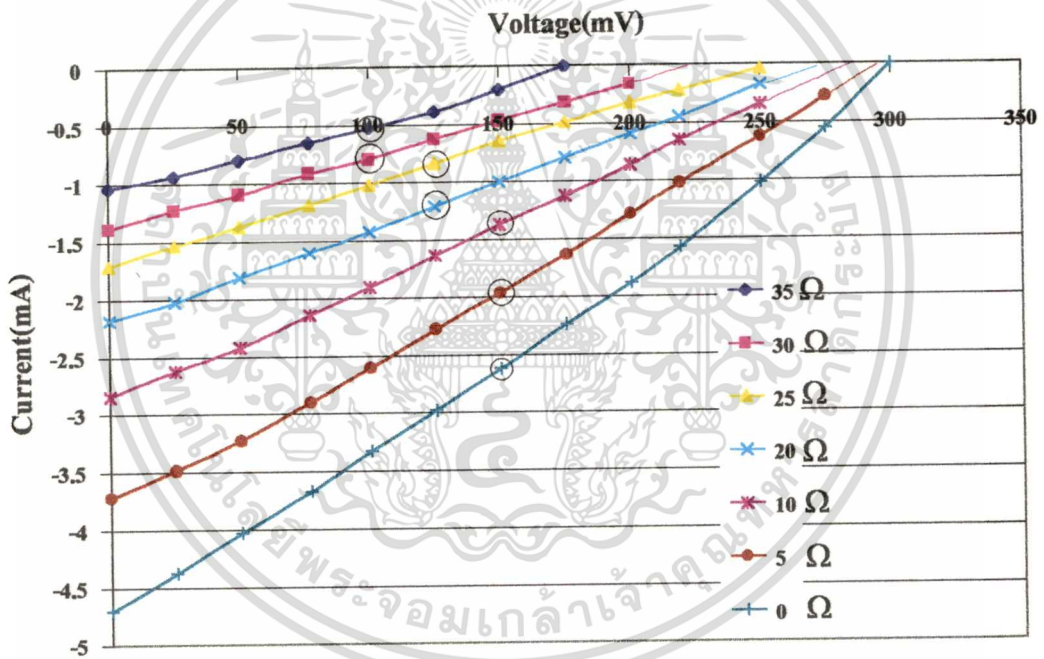
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาทิตย์ที่คืนนั้นจะต้องมีค่าของความต้านทานชั้นดีมากๆ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานชั้นดีมีค่าน้อยนั้นอาจจะเกิดจากการที่ใช้เวลาในการสร้างฟิล์มเพชรน้อยซึ่งจะทำให้เกิดความบกพร่องของฟิล์มเพชรที่มีมาก ส่วนในกรณีความหนาของฟิล์มเพชรที่มีความหนา 3, 4 และ 5 μm นั้น ค่าของความต้านทานอนุกรมภายใน R_S มีค่าน้อยลง แต่กระแสที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยเนื่องจากปริมาณแสงที่ตกกระทบที่บริเวณรอยต่อมีค่าน้อยลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรหลายๆนั้นมีประสิทธิภาพต่ำลง

4.7.4 ผลการศึกษาความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้จะใช้เงื่อนไขของอัตราส่วน B:C คือ 1000 ppm และความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 2 μm โดยการทดลองจะต่อวงจรตามรูปที่ 2.15 โดยผลการทดลองนั้นจะแสดงไว้ในรูปที่

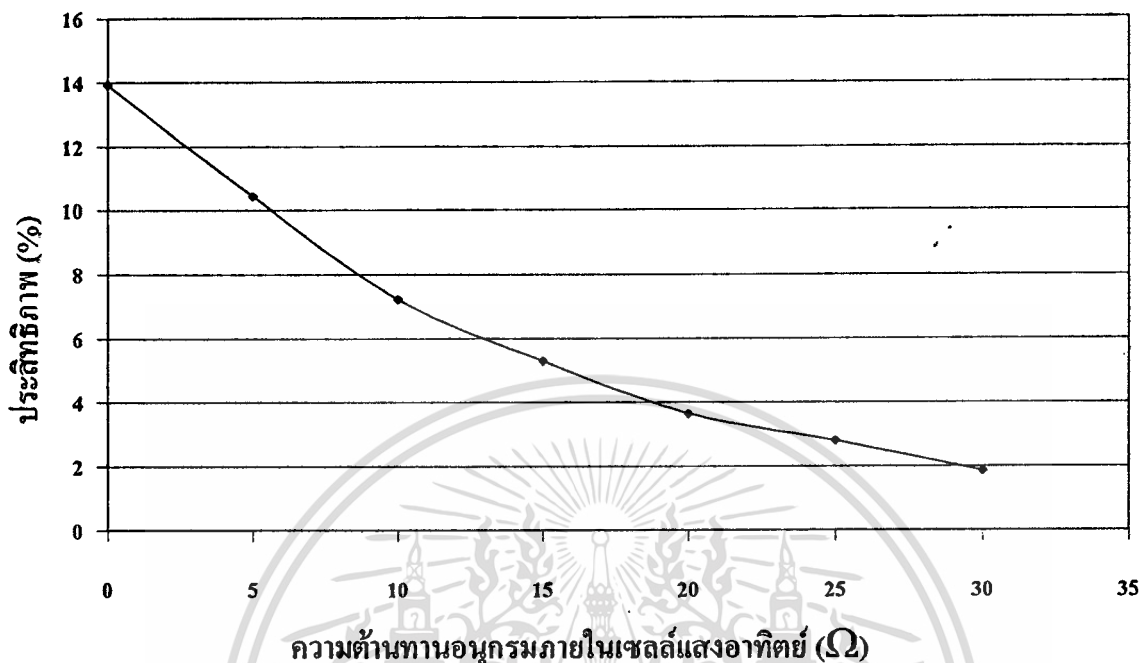
4.45



รูปที่ 4.45 ผลของความต้านทานที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.45 นั้นจะเห็นได้ว่าถ้าค่าของความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้นนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยลง และจากรูปนั้นนำค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มาเขียนกราฟเทียบกับค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์ แสดงได้ในรูปที่ 4.45 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อค่าของความต้านทานอนุกรมภายในมีค่ามากขึ้นนั้นจะทำให้พลังงานที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าลดลง ดังนั้นในการสร้างเซลล์แสง

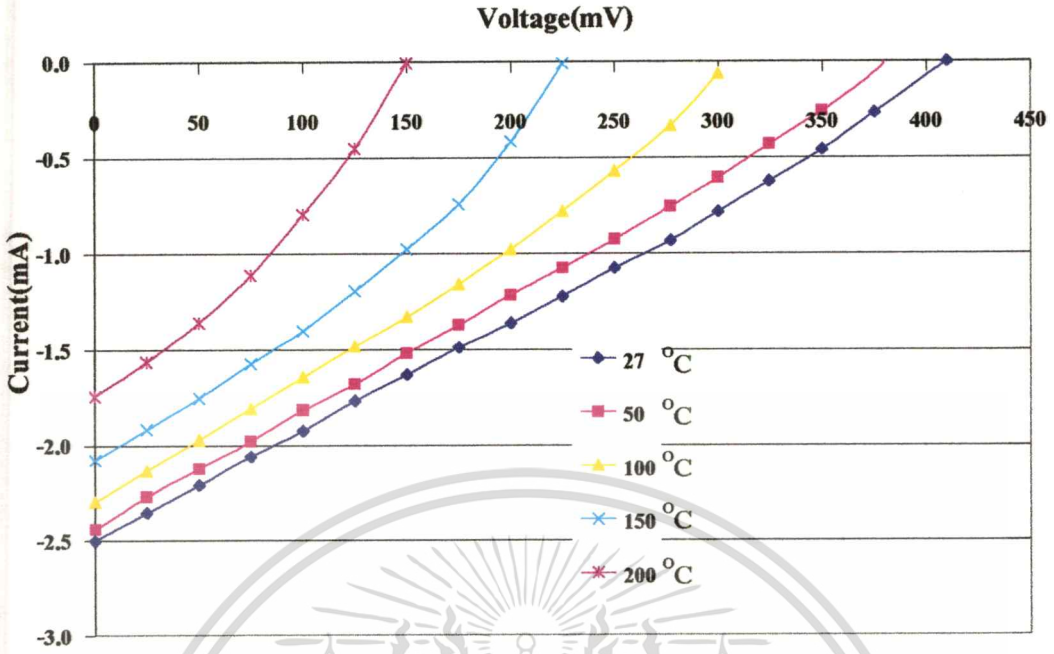
อาทิตย์นั้นควรจะทำให้ค่าของความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุด



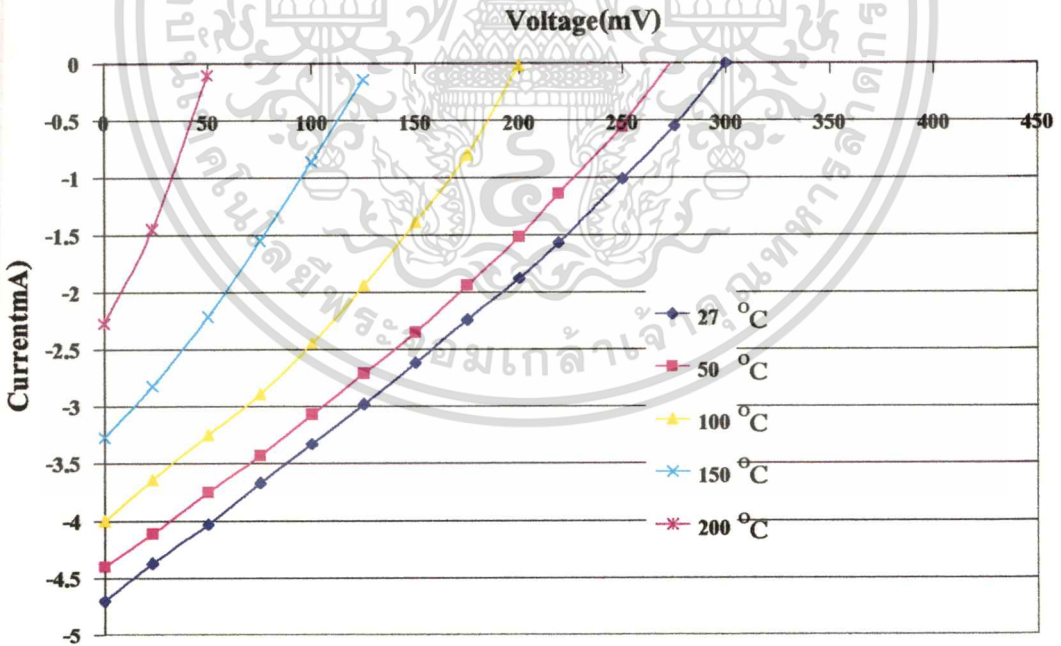
รูปที่ 4.46 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อประสิทธิภาพที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์

4.7.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์นี้จะใช้เงื่อนไขการสร้างเซลล์ดังนี้คืออัตราส่วนของ B:C เป็น 1 และ 1000 ppm โดยฟิล์มเพชรมีความหนาประมาณ $2 \mu\text{m}$ ซึ่งผลการทดลองในกรณี B:C เท่ากับ 1 ppm แสดงในรูปที่ 4.47 และ ในกรณี 1000 ppm แสดงได้ในรูปที่ 4.48 โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นนั้นจะทำให้ค่าของ แรงดันเปิดวงจร และ กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำลง ซึ่งโดยปกติแล้วในเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้แรงดันเปิดวงจรลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแต่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบฟิล์มเพชรกับซิลิคอน ซึ่งทั้งนี้อาจจะเกิดจากลักษณะของแถบพลังงานที่แตกต่างกันซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในกรณีของการศึกษาเรื่องโฟโตโวลตาอิก



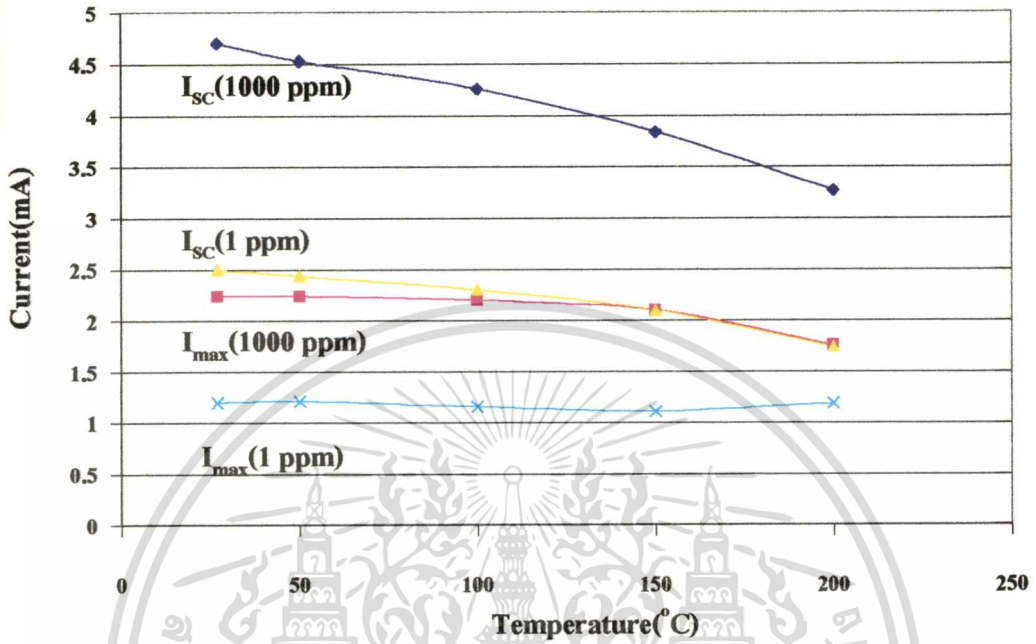
รูปที่ 4.47 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1 ppm



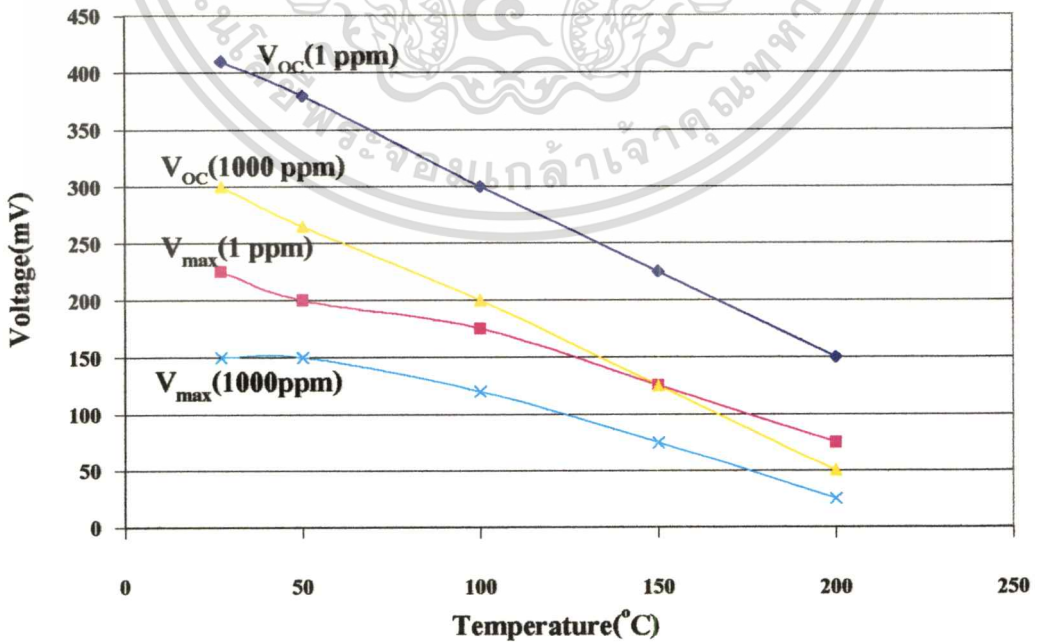
รูปที่ 4.48 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่อัตราส่วนของ B:C มีค่าเท่ากับ 1000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลที่ได้จากรูปที่ 4.47 และ 4.48 มาเขียนกราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเปิดวงจร , กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และ พลังงานที่ได้จากเซลล์ได้ดังรูปที่ 4.49 , 4.50 และ รูปที่ 4.51 ได้ดังนี้

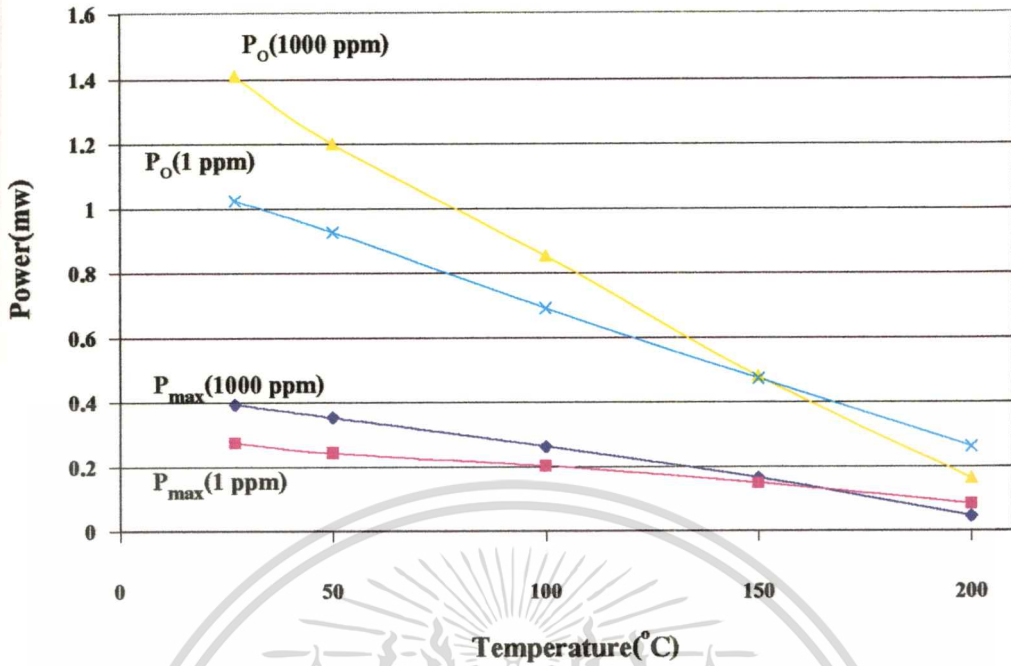


รูปที่ 4.49 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.50 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.49 ,4.50 และ รูปที่ 4.51 นั้น เมื่อนำผลการทดลองที่ได้นำมาเขียนค่าต่างๆที่เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิลงได้ตารางที่ 4.13 ดังนี้

ตารางที่ 4.13 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับซิลิคอน และ เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ซิลิคอน เนื่องมาจากอุณหภูมิ

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

และจากการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอนที่มีผู้ทดลองไว้แล้ว[1] พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่ออุณหภูมิที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนเอ็นนั้นจะเปลี่ยนต่ออุณหภูมิน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากพี-เอ็นซิลิคอน แสดงให้เห็นว่าในขณะที่อุณหภูมิมียค่าเพิ่มขึ้นนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนเอ็นจะทำงานได้ดีและมีความเสถียรมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากพี-เอ็นซิลิคอน

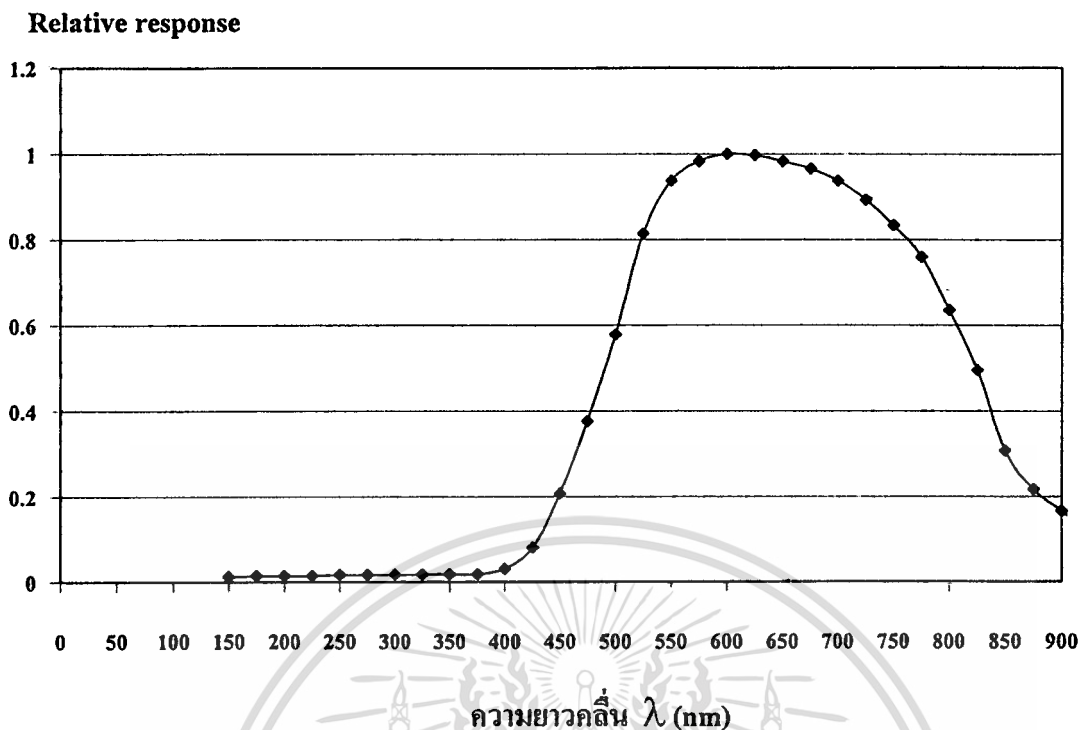
ตารางที่ 4.14 ตารางฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิมียค่าสูงขึ้น

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

จากตารางค่าของฟิลแฟคเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.14 นั้นจะเห็นได้ว่าค่าของฟิลแฟคเตอร์ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งคือที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิมียค่าประมาณ 200 องศาเซลเซียส ค่าฟิลแฟคเตอร์จะลดลง แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิอาจจะมีส่วนช่วยทำให้ค่าของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีค่ามากในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้นั้นมีค่าลดลงซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.47 และ 4.48 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นรูปโค้งมากขึ้นเนื่องมาจากความร้อนนั้นจะทำให้ที่บริเวณที่เป็นฟิล์มเพชรนั้นมีค่าของความต้านทานลดลงเนื่องจากเกิดประจุพาหะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมียค่าสูงขึ้นนั่นเอง ในขณะที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 1 ppm นั้นเมื่ออุณหภูมิมียค่าสูงขึ้นค่าของฟิลแฟคเตอร์ก็จะมีค่าสูงขึ้นเช่นกันและอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน

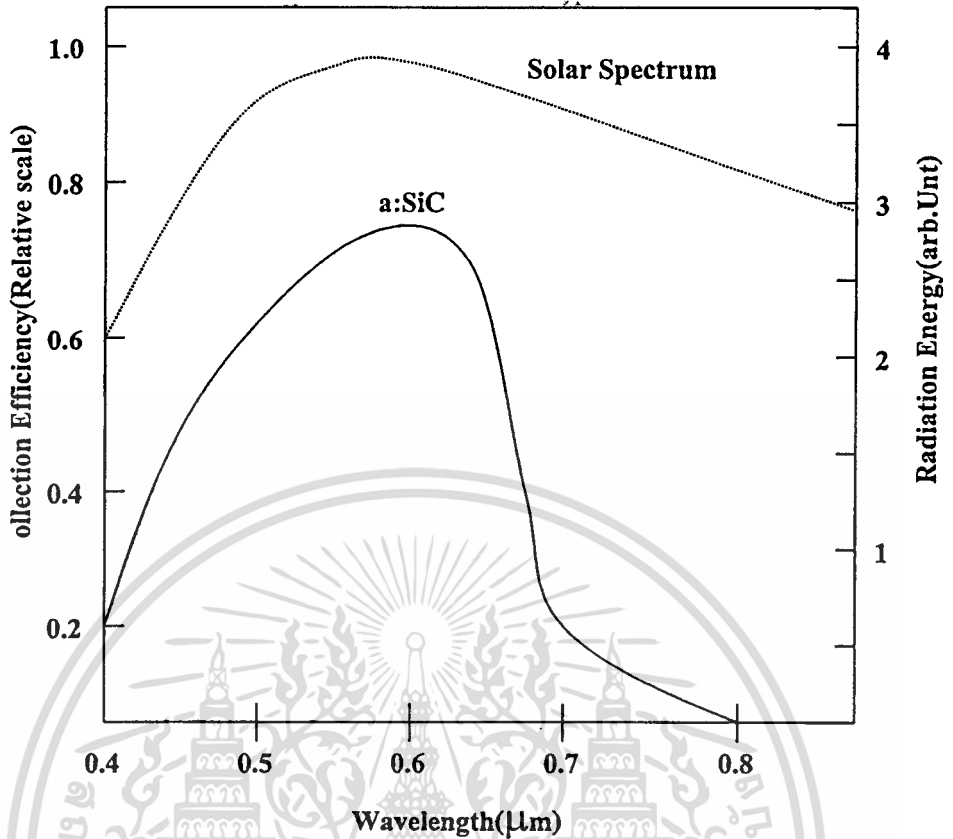
4.7.6 ผลการตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการทดลองในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลการตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรและซิลิคอน ว่ามีผลการตอบสนองทางแสงที่ความยาวคลื่นเท่าไร จากผลการทดลองพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้นั้น จะมีผลตอบสนองความยาวคลื่นแสงที่ 620 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ผลการตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบ p-type Dia / n-type Si

จะเห็นได้ว่าลักษณะการตอบสนองทางความยาวคลื่นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบ p-type Dia / n-type Si นี้จะมีช่วงการตอบสนองที่กว้าง ซึ่งเป็นจุดเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อที่เป็นเนื้อสารต่างชนิดกัน โดยที่ค่าความยาวคลื่นที่ตอบสนองที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ 620 nm ซึ่งจะตรงกับช่วงการตอบสนองทางความยาวคลื่นของ อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (a:SiC) ซึ่งได้มีผู้ได้ทำการวิจัยและนำเสนอไว้แล้ว [11] ดังรูปที่ 4.53 ซึ่ง จะสังเกตได้ว่า ช่องว่างแถบพลังงานของ SiC นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 2 eV ซึ่งความยาวคลื่นแสงที่ a:SiC จะดูดกลืน ได้ดีที่สุด จะอยู่ที่ประมาณ 600 nm โดยการเปรียบเทียบกันการทดลองในหัวข้อนี้ ซึ่งเป็นการสร้างฟิล์มเพชรซึ่งเป็นรูปหนึ่งของคาร์บอนลงไปบนซิลิคอนซึ่งจะเกิด SiC บางๆอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรกับซิลิคอน และจากการสังเกตจากสเปกตรัมของแสงอาทิตย์นั้นจะเห็นได้ว่าสเปกตรัมของแสงอาทิตย์นั้นจะมีความเข้มหรือปริมาณพลังงานมากที่สุดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ 500-600 nm ดังนั้นผลการตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้าง ได้นั้นจึงตอบสนองมากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นแสงนี้



รูปที่ 4.53 สเปกตรัมตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ของ SiC [11]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อของเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งในส่วนวิจัยในส่วนแรกนั้นจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มเพชร โดยการสร้างฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ (B:C) ที่แตกต่างกันได้แก่ 1 10 100 และ 1000 ppm โดยจะได้ว่าสภาพนำไฟฟ้ามืด (σ_D) ของฟิล์มเพชรที่อัตราส่วน B:C ที่ 1000 ppm จะมีความนำไฟฟ้ามากที่สุด ส่วนอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าทางแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืดนั้น (σ/σ_D) ที่อัตราส่วนของ B:C ที่ 10 ppm เท่านั้นจะมีอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และจากการศึกษาผลตอบสนองทางความยาวคลื่นของฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและชนิดพีนั้นพบว่าผลตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงที่ดีที่สุดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ 225 nm ทั้งชนิดอินทรีนซิกและชนิดพีแตกต่างกันเพียงปริมาณกระแสที่ไหลนั้น ในฟิล์มเพชรชนิดพีจะมีปริมาณมากกว่าฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิก และจากการศึกษาคุณสมบัติของไดโอดที่มีรอยต่อของฟิล์มเพชรกับซิลิกอนนั้นพบว่าคุณลักษณะกระแสแรงดันของไดโอดนั้นจะเหมือนไดโอดธรรมดา ที่อัตราส่วนของ (B:C) มากขึ้นนั้นปริมาณการไหลของกระแสทั้งทางด้านไบอัสกระแสตรงและไบอัสย้อนกลับจะมากขึ้นด้วยตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ (B:C) ส่วนค่าความต้านทานอนุกรมภายในนั้น ที่อัตราส่วนของ (B:C) น้อยๆนั้นจะมีค่าของความต้านทานอนุกรมภายในที่สูงและจะลดลงตามอัตราส่วนของ (B:C) ที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาโฟโตไดโอด โดยการสร้างฟิล์มเพชรที่มีความหนาและอัตราส่วนของ (B:C) ที่แตกต่างกันออกไปนั้น พบว่า ถ้าฟิล์มเพชรมีความบางมากเท่าไรและอัตราส่วนของ (B:C) ที่สูงๆนั้นพบว่าปริมาณการไหลของกระแสที่เกิดจากแสงนั้นจะมีค่ามากขึ้นด้วย ส่วนผลของอุณหภูมินั้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิของโฟโตไดโอดสูงขึ้นนั้นจะทำให้ปริมาณการไหลของกระแสที่เกิดจากแสงนั้นมีค่าลดลงตามความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สุดท้ายจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อของเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรกับซิลิกอนนั้นพบว่า ที่ความหนาของฟิล์มเพชรที่ 2 μm และอัตราส่วนของ (B:C) ที่ 1000 ppm นั้นจะให้พลังงานไฟฟ้าออกมามากที่สุดโดยมีประสิทธิภาพสูง 13.8% ในพื้นที่ 3.4 mm^2 และกระแสไฟฟ้ลัดวงจรนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นที่ตีมากกับความเข้มแสง ส่วนค่าของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาท์พุทเปิดวงจรนั้น พบว่าจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะเอ็กโปเนนเชียลกับความเข้มแสง ส่วนผลของความหนาของฟิล์มเพชรนั้นจะได้ว่า ถ้าฟิล์มเพชรที่มีความหนามากเกินไปนั้น จะทำให้ปริมาณการไหลของกระแสลัดวงจรนั้นจะมีค่าลดลง ส่วนค่าของความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มเพชรมากขึ้นนี้จะมีค่าน้อยลงเช่นเดียวกับโฟโตไดโอด ส่วนผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นพบว่าทั้งกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรนั้นจะมีค่าลดลง แต่ค่าฟิลแคะเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงค่าหนึ่งประมาณ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างในลักษณะนี้จะยังคงทำงานได้ดีอยู่แม้อุณหภูมิจะสูงขึ้น และปริมาณการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้จะมีค่าลดลงน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากรอยต่อ พี-เอ็น ซิลิกอนมาก ส่วนผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มเพชรกับซิลิกอนนั้นจะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 620 nm ซึ่งเป็นลักษณะการตอบสนองทางแสงของ SiC ซึ่งเกิดเป็นชั้นบางๆระหว่างฟิล์มเพชรกับซิลิกอน

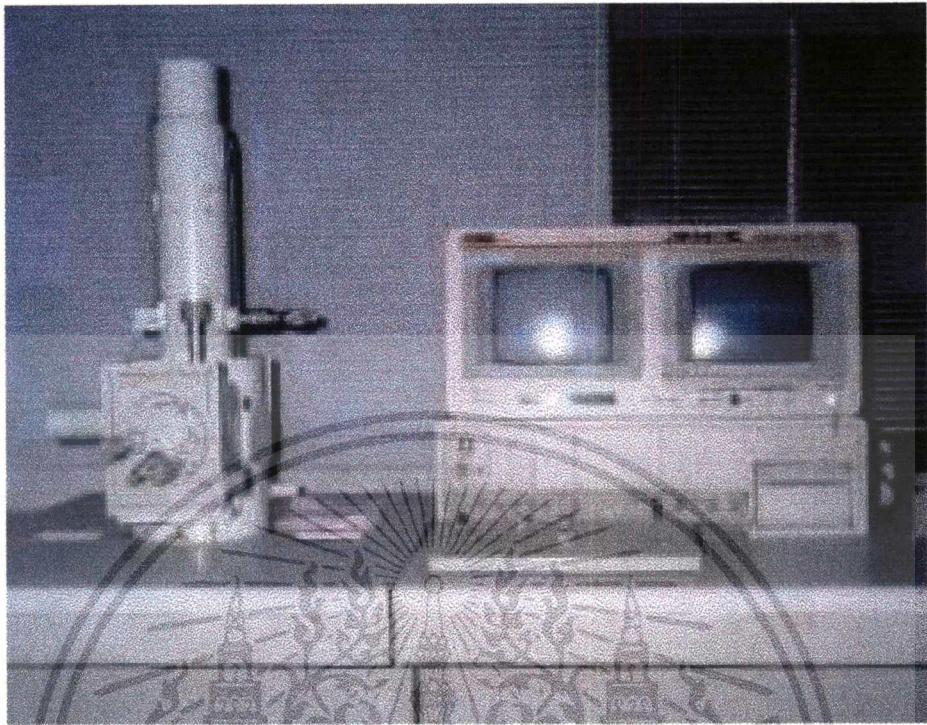
จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น จะเห็นได้ว่าสามารถที่จะนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์ใช้งานทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้เมื่อสร้างอยู่บนซิลิกอน โดยมีประสิทธิภาพเบื้องต้นนั้นประมาณ 13.8 % อีกทั้งยังสามารถสร้างได้ง่าย และ ผ่านขั้นตอนไม่มากนัก ซึ่งเป็นงานวิจัยชิ้นหนึ่งที่น่าจะได้รับการวิจัยและพัฒนาคุณภาพให้ดีขึ้นและใช้งานได้จริงในอนาคต



เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชัย วงเมตตา “การสร้างและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์และซิลิกอน” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2525
- [2] A.K. Ghosh, C. Fishman and T. Feng. “Theory of the Electrical and Photovoltaic Properties of Polycrystalline Silicon.” ,J. Appl.Phy. 1980, pp. 407
- [3] Robert F.David. **Diamond Films and Coatings.** U.S.A. : Noyes Publications. 1993.
- [4] Lawrence S. Pan , Don R.Kania. **Diamond : Electronic Properties and Applications.** Boston : Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [5] K.E. Spear, J.P. Dismuke. **Synthetic Diamond : Emerging CVD Science and Technology.** New York : John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [6] “Diamond Films For Electric Packing”, NASA, USA.
- [7] Teompong Pheukul “ Study on Electrical Characteristics of p-Type Diamond/n-Type Silicon Heterojunction Diodes,” Dotoral Thesis, Tokai University Kyushu Campus.
- [8] คุณิต เครื่องงาม “สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ พลาสติก เทคโนโลยี และ การใช้งานต่าง เล่ม 1” สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] กอบศักดิ์ ศรีประภา “การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะพื้นที่ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2525
- [10] Alan L. Fehrenbruch , Richard H.Bube **Fundamentals of Solar cells.** Academic press 1983 pp. 333
- [11] คุณิต เครื่องงาม “การงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน ” ตุลาคม 2533
- [12] นิรุช ปิ่นเกตุ, สถาพร ปรัชเจริญนิษย์, กวัด สรวยสุวรรณ, รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูดิรุ่งเรือง “โฟโตนิกไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิคอนชนิดเอ็น” การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39 วันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ 2544 หน้า 344

ภาคผนวก ก



รูปที่ ก-1 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของ JEOL รุ่น JCM-5410



รูปที่ ก-2 Raman spectroscope รุ่น System 2000 ของบริษัท Renishaw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

นายนิรุท ปิ่นเกตุ

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2516

สถานที่เกิด

จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์)

สถานที่สำเร็จการศึกษา

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้