

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน
ระหว่างพอร์ซซิลิกอนและฟิล์มเพชร

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



คณรัชต์ วรรณ
KANARACH WANNA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 47649
วัน, เดือน, ปี 2.1 ส.ค. 2546

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-653-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันระหว่างพอร์ซซิลิกอนและฟิล์มเพชร
นักศึกษา	นายคนรัชต์ วรรณา
รหัสประจำตัว	41061134
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันระหว่างพอร์ซซิลิกอนและฟิล์มเพชร ในการศึกษาโฟโตไดโอด เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าออกมาเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง และยังพบว่าความเข้มข้นสารเจือโบรอน 1000 ppm จะให้กระแสไฟฟ้าออกมามากที่สุด อีกทั้งโฟโตไดโอดยังสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 200 °C ในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์นั้นพบว่า การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเจือโบรอนที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าความเข้มข้นสารเจือโบรอนที่ 1000 ppm จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีที่สุด การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีผลต่อเซลล์นั้นพบว่าที่ความหนา 2 μm ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีที่สุด ดังนั้นที่อัตราส่วนสารเจือโบรอน 1000 ppm ความหนาของฟิล์มเพชร 2 μm โดยมีพื้นที่รับแสง 2.3 mm^2 ซึ่งสามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 14.73% มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดของซิลิกอนและฟิล์มเพชรซึ่งมีประสิทธิภาพ 13.8% โดยใช้เงื่อนไขการสร้างแบบเดียวกัน อีกทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างยังคงทำงานได้ในอุณหภูมิสูงถึง 200°C

Thesis Title	Studies and Fabrication of Porous Silicon-Diamond Thin Film Heterojunction of Solar Cell
Student	Mr.Kanarach Wanna
Student ID	41061134
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Adviser	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

In this Thesis, the electrical properties of porous silicon-diamond thin film heterojunction of photodiode and solar cell was studied. In photodiode electrical properties study, when intensity of light was increased the current was increased. And the boron/carbon concentration ratio at 1000ppm made the highest current of photodiode. Also this photodiode can be operated in high temperature (200°C). In solar cell electrical properties study, the p-type diamond thickness at 2 μm and the boron/carbon concentration ratio at 1000 ppm can make the highest electrical properties, so in this condition can made the cells efficiency 14.78% at 2.3 mm^2 optically active area more than the silicon and diamond thin film heterojunction of solar cell that made the cells efficiency 13.8%. And this solar cell could operate at high temperature.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ รุติรุ่งเรือง เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณ ผศ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณจริยา นามเสนาะ ที่คอยเป็นห่วงและดูแลตลอดมา ขอขอบคุณ คุณภานุพันธ์ โอฬารกิจไพบูลย์ ที่คอยให้คำปรึกษาต่างๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องวิจัยสารกึ่งตัวนำที่คอยช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณ นางสาวปาริฉัตร เย็นวนิช และ นางสาวอรุณี ผลโพธิ์ จากบัณฑิตศึกษา ที่คอยช่วยเหลือการทำงาน

ขอขอบคุณ คุณนิรุช ปันเกตุ แห่งศูนย์เทคโนโลยีพลังงานและพลังงานสะอาด ที่ช่วยให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องแสงอาทิตย์เทียม ขอขอบพระคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และสื่อสาร ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัย

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาว อย่างยิ่งที่คอยเป็นห่วง ช่วยเหลือ รอคอย และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

คุณรัชต์ วรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
สัญลักษณ์.....	XIV
ศัพท์เทคนิค.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	1
1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	2
1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	2
1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน.....	2
1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	3
1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ.....	4
1.3 พอร์ซซิลิกอน.....	5
1.4 สารกึ่งตัวนำเพชร.....	6
1.5 คุณสมบัติต่างๆของเพชร.....	7
1.5.1 คุณสมบัติทางกล.....	7
1.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	8
1.5.3 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....	8
1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน.....	9
1.7 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	11
1.7.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy.....	11
1.7.2 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM).....	14
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1 พอร์สซิลิกอน.....	15
2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน.....	15
2.1.2 ลักษณะของแถบพลังงานของซิลิกอน.....	16
2.1.3 กลไกการเกิดพอร์สซิลิกอน.....	19
2.2 ลักษณะของแถบพลังงาน.....	21
2.2.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า.....	23
2.2.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ.....	24
2.3 โฟโตไดโอด.....	26
2.3.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด.....	26
2.3.2 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด.....	27
2.3.3 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	29
2.4 เซลล์แสงอาทิตย์.....	30
2.4.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
2.4.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขั้วในเซลล์แสง อาทิตย์.....	34
2.4.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	37
2.4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	37
2.4.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L	37
2.4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_D	38
2.4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}	39
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	41
3.1 กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	41
3.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น(Initial Cleaning).....	41
3.1.2 การเคลือบโลหะอะลูมิเนียม.....	41
3.1.3 การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	42
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร.....	43
3.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 กระบวนการทำความสะอาดฟิล์มเพชร.....	44
3.3 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร.....	46
3.3.1 การออกแบบลวดลายโลหะ.....	46
3.3.1.1 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อใช้ศึกษา คุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	46
3.3.1.2 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อใช้ศึกษา ผลของระยะห่างระหว่างลวดลาย.....	46
3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร.....	47
3.3.3 กระบวนการสร้างขั้วโลหะทองคำเพื่อศึกษา คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	48
3.3.4 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์.....	50
3.4 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ.....	52
3.4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	52
3.4.2 การศึกษาระยะห่างลวดลายโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	52
3.5 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....	53
3.5.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติ กระแสและแรงดัน.....	53
3.5.2 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อ คุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	53
3.5.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแส และแรงดัน.....	54
3.5.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	54
3.6 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	55
3.6.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติ กระแสและแรงดัน.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.6.2 ผลของความความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อ คุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	55
3.6.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติ กระแสและแรงดัน.....	56
3.6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	56
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	58
4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	58
4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	59
4.2.1 ผลการศึกษาระยะห่างลดลายโลหะที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	61
4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไฟโตไดโอด.....	61
4.3.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	61
4.3.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	65
4.3.3 ผลของความความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อ คุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	68
4.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไฟโตไดโอด.....	72
4.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	75
4.4.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	75
4.4.2 ผลของความความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติ กระแสและแรงดัน.....	79
4.4.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	81
4.4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน.....	84
4.4.5 ผลการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/ พอร์ซซิลิกอนกับโครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/ซิลิกอน.....	85
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและ แกลเลียมอาร์เซไนด์.....9
1.2	ค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน.....13
4.1	ค่าตัวแปรพื้นฐานต่างๆของฟิล์มเพชรชนิดพีที่ได้จากการทดลอง.....60
4.2	ผลการศึกษาระยะระหว่างข้อโลหะ.....61
4.3	ค่าของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือโบรอนที่ค่าต่างๆ.....63
4.4	ค่า R_s เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือโบรอน.....64
4.5	ตารางค่าของ R_s ของโฟโตไดโอดที่คำนวณจากรูปที่ 4.13.....70
4.6	ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm.....76
4.7	ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm.....77
4.8	ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 100ppm.....78
4.9	ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1000ppm.....79
4.10	ค่าการเปลี่ยนแปลง I_{sc} และ V_{oc} เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเพชร.....80
4.11	ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....84
4.12	ค่าเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ p-Dia/Psi กับแบบ p-Dia/Psi.....85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
1.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร.....	6
1.3 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	10
1.4 Raman spectrum ของฟิล์มเพชร.....	12
1.5 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน.....	14
2.1 ภาพจำลองโครงสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน.....	15
2.2 ลักษณะของแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	16
2.3 แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน.....	17
2.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์ซซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน.....	18
2.5 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน.....	19
2.6 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิลิกอนขณะก่อนสัมผัส.....	21
2.7 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิลิกอนขณะสมดุลความร้อน.....	22
2.8 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 1 ขณะได้รับไบอัสตรง.....	23
2.9 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 2 ขณะได้รับไบอัสตรง.....	24
2.10 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V < V_R$	25
2.11 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V > V_R$	25
2.12 ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด.....	26
2.13 ลักษณะการเกิดอิเล็กตรอนโฮลในแถบพลังงานของโฟโตไดโอด.....	27
2.14 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น.....	28
2.15 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด.....	29
2.16 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินพุต (b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{oc} และความเข้มของแสงอินพุต.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน (31) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง.....	32
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บนกราฟแบบเซมิล็อก.....	35
2.20 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
2.21 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
2.22 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	37
2.23 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์.....	40
3.1 เครื่องมือสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน.....	42
3.2 เครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD.....	43
3.3 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ HFCVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....	45
3.4 ลักษณะลวดลายโลหะที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร.....	46
3.5 ลักษณะลวดลายโลหะที่ใช้ศึกษาระยะห่างระหว่างลวดลายที่มีผลต่อการไหลของกระแสในฟิล์มเพชร.....	47
3.6 กระบวนการสร้างขั้วโลหะทองคำเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร.....	49
3.7 แผนภาพกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์.....	51
3.8 วงจรการวัดคุณสมบัติกระแสไฟฟ้าและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	57
4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	58
4.2 ลักษณะพื้นผิวระนาบ(111)ของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM.....	59
4.3 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	59
4.4 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า B:C.....	62
4.5 คุณลักษณะกึ่งล็อกกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า B:C.....	63
4.6 วิธีการหาค่า R_s เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือโบรอน.....	64
4.7 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนเป็น 1ppm.....	65
4.8 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนเป็น 10PPM.....	66
4.9 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนเป็น 100PPM.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนเป็น 1000PPM.....67
4.11	วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน.....67
4.12	คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชร.....69
4.13	คุณลักษณะกึ่งลือกกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 100 ppm เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเพชรเพื่อหาค่า R_g69
4.14	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $2\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....70
4.15	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $3\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....71
4.16	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $4\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....71
4.17	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $5\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....72
4.18	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 50°C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....73
4.19	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....73
4.20	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....74
4.21	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 200°C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ.....74
4.22	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm.....76
4.23	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm.....77
4.24	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 100ppm.....78
4.25	คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1000ppm.....79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพี.....	80
4.27 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อB:C เป็น1ppm.....	81
4.28 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อB:C เป็น10ppm.....	81
4.29 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อB:C เป็น100ppm.....	82
4.30 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อB:C เป็น1000ppm.....	82
4.31 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์.....	83
4.32 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์.....	83
4.33 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม.....	84

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

E_c	แถบความนำ
E_{in}	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน
E_v	แถบวาเลนซ์
E	ประจุไฟฟ้า
FF	ค่าฟิลด์แฟคเตอร์
H	ค่าคงที่ของพลังค์
I_D	กระแสไฟฟ้ามีดในไดโอด
I_L	กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง
I_m	กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
I_o	กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
I_s	กระแสไฟฟ้าย้อนกลับ
I_{ph}	กระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากแสง
I_{sc}	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร
I'	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}
M	แอมป์แมสเอิม
P_m	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ
P_o	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ
P	ความหนาแน่นของจำนวนโฮล
Q	ประจุไฟฟ้า
R_L	ความต้านทานโหลด
R_s	ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์
R_{sh}	ความต้านทานขนั้ด
V_a	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด
V_b	แรงดันภายในของไดโอด
V_D	ศักย์ภายในที่เกิดขึ้นในรอยต่อ
V_m	แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
V_o	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

V_R

แรงดันขีดเริ่มช่วง Reverse

\bar{V}

ความเร็วของประจุไฟฟ้าในวัสดุ

V_{oc}

แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

α

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

χ_e

อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้

ε

ค่าคงที่ได้อิเล็กทริก

ε_0

ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของสุญญากาศ

ϕ

ค่าฟังก์ชันงาน

ϕ_m

ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ

ϕ_s

ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

λ

ความยาวคลื่นของแสง

σ

สภาพความนำไฟฟ้า

σ_D

สภาพนำไฟฟ้ามืด

σ_{ph}

สภาพนำไฟฟ้าทางแสง

ν

ความถี่ของคลื่นแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

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

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

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

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

1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดโดยแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้คือ

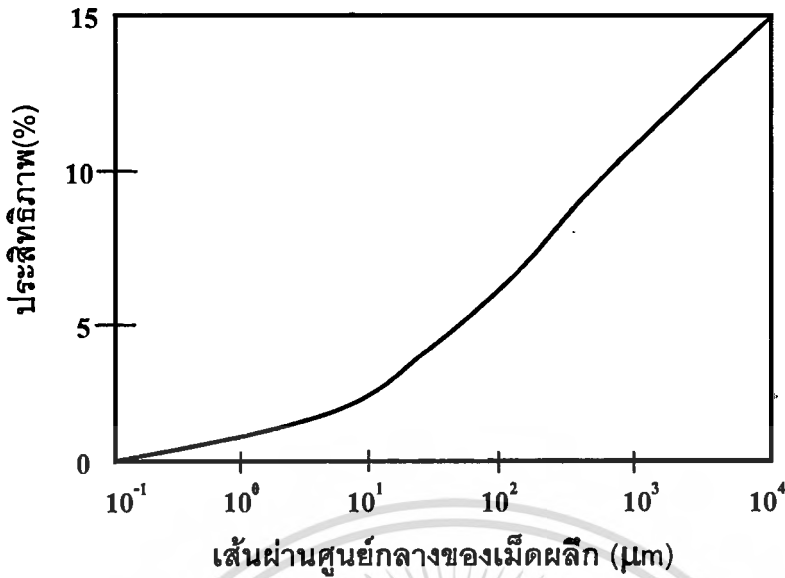
1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

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

1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิกอนที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิดปนอยู่ในระนาบเดียวกัน เช่น (111),(211) และ (330) เป็นต้น เมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างของสีของแต่ละระนาบอย่างชัดเจน อาณาเขตของผลึกเรียกว่า "เกรน" (grain) เทคโนโลยีปัจจุบันนี้สามารถโพลีซิลิกอนให้มีเกรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบลไมครอนถึงหลายพันไมครอน ถ้าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์ พหุโพโตที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อพี-เอ็น ออกสู่จรรยาภายนอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรูปที่ 1.1 แสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้ก็คือจะมีพันธะของซิลิกอนที่มีแขนขาดอยู่มากซึ่งไม่มีซิลิกอนอะตอมอื่นมาเกาะพันธะด้วย ซึ่งพันธะแขนขาดนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสถานะจุดบกพร่อง(defect state) ซึ่งสถานะจุดบกพร่องนี้จะเป็นตัวคอยจับพาหะข้างน้อยจากแสงไม่ให้เกิดทางออกสู่วงจรรายนอก และส่งผลทำให้เวลาอายุ(life time)ของพาหะข้างน้อยลดลง และที่ขอบของเกรนจะทำให้เกิดแถบพลังงานที่ขอบของเกรนเกิดเส้นโค้งขึ้น

1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิล์มบางซึ่งสร้างมาจากอะมอร์ฟัสซิลิกอนซึ่งเป็นซิลิกอนที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบหรือเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมแต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึก แต่ในขณะที่การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอมนี้จะทำให้มีคุณสมบัติต่างๆแปลกออกไปเช่น ค่าคงที่ต่างๆทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอนก็คือ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส โดยสามารถสร้างบนพื้นผิวฐานรองอะไรก็ได้ ราคาถูกและประหยัดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Carlson และ wronski ต่อมา Dr Hamakawa มหาวิทยาลัยโอซาก้า ได้ออกแบบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เป็นลักษณะของ (a-Si:H) p-i-n ซึ่งใช้กันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ทุกวันนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ชนิดนี้มีค่าอยู่ประมาณสิบกว่าเปอร์เซ็นต์ และเซลล์ชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อย่างอื่นอีกเช่น ตัวตรวจจับแสงสีต่างๆ[5]

1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

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

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

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

ปัจจัยอื่นๆที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำลงก็คือ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมินี้จะผลอย่างมากกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารที่มีค่า E_g ต่ำๆมาทำเพราะว่าอุณหภูมิจะทำให้ “กระแสไฟฟ้าย้อนกลับ” (I_{sc}) สูงขึ้นแต่ไม่มากนัก แต่ค่าของ V_{oc} และค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (FF) จะมีค่าลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง

ซึ่งกล่าวโดยสรุปก็คือค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นตัวกำหนดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนนี้นี้ก็คือ ค่าของ V_{oc} และ I_{sc} ต้องมีค่ามาก ส่วนค่าของ I_o จะต้องมีค่าน้อย โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงจนเกินไป ส่วนปัจจัยอื่นๆที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงนั้นเราจะไปวิเคราะห์ในบทต่อไป

แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองที่ประสบผลสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ โดยเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่า $E_g = 5.5$ eV ซึ่งเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างมากถ้า

เทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ก็คือ เพชร โดยสังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน ซึ่งเมื่อเรานำเพชรมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้ค่าของ V_{oc} มีค่าสูงขึ้นและค่าของ I_0 มีค่าต่ำลงตามที่กล่าวมาแล้ว และสามารถใช้ในที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยเพชรยังสังเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

1.3 พอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมากมาย ซึ่งมีคุณสมบัติการลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยที่ถูกล้างในระหว่างการขัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยไฟฟ้า (Electropolishing) ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก พอร์สซิลิกอนนั้นเป็นชั้นฟิล์มที่สามารถสร้างขึ้นได้บนแผ่นผลึกซิลิกอน โดยกระบวนการทาง Electrochemical anodization กับแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เนื่องจากว่ามันมีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งอุปกรณ์ในการสร้างพอร์สซิลิกอนนั้นมีราคาที่ไม่แพงมากนัก ทำให้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

ชั้นของพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นนี้ส่วนมากแล้วจะได้มาจากแผ่นซิลิกอนที่ได้ผ่านกระบวนการ Electrochemical anodization ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกซึ่งพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นนี้จะประกอบไปด้วยชั้นของโครงสร้างเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรอยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สจะประกอบด้วย

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

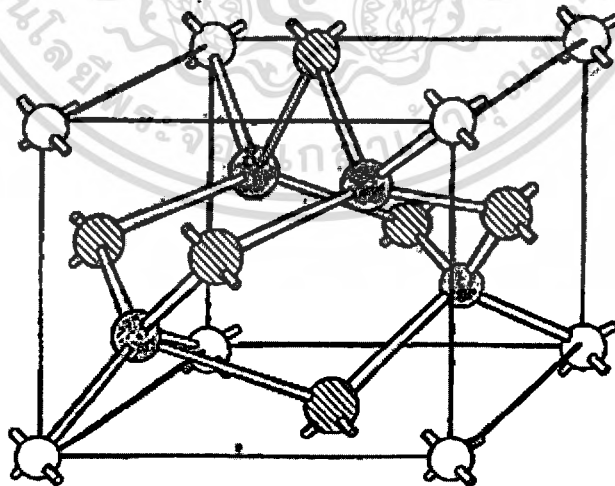
โดยปกติแล้วนั้นผลึกซิลิกอนนั้นจะไม่ถูกกัดโดยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แต่เมื่อไรที่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้เข้าไปก็จะเกิดการกัดผิวด้านหน้าของผลึกซิลิกอน โดยเป็นผลมาจากกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยไฮลจะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากในระหว่างการกัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนนี้จะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นหลุมลึกเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิกอน โดยที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนเหล่านี้จะมีปริมาณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่สูงมาก ดังนั้นไฮลในผลึกซิลิกอนจึงถูกดึงมาอยู่ที่บริเวณนี้จำนวนมาก ทำให้ที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนเหล่านี้ถูกกัดต่อไปอีกทำให้โครงสร้างภายในของพอร์สที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดของโครงสร้างเข้าสู่นาโนพอร์สซิลิกอนคือมีขนาดอยู่ประมาณ 5 นาโนเมตร ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดการโฟโตลูมิเนส

เซนต์ขึ้น โดยการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ทางแสงของสารกึ่งตัวนำ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิกอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในชั้น conduction band ได้ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้อยู่ในสภาวะไม่เสถียรจึงเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลในชั้น valance band โดยจะคายพลังงานออกมาในรูปโฟตอนหรือพลังงานแสง ซึ่งค่าพลังงานที่คายออกมานี้ขึ้นอยู่กับค่าช่องว่างแถบพลังงานของสาร โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงาน (E) กับความยาวคลื่นของแสง (λ) เป็นไปตามสมการ

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

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

1.4 สารกึ่งตัวนำเพชร



รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างผลึกของเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพชรนั้นจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนซึ่งอยู่ในหมู่ 4 โดยอะตอมของคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า "Diamond structure" ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2

จากรูปพบว่าภายในยูนิทเซลล์จะมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมเรียงตัวแบบ Face center cubic (fcc) และอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง $1/4$ เมื่อวัดตามแนวทแยงมุมจากมุมของยูนิทเซลล์ คาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ tetrahedral กับอะตอมคาร์บอนทั้งสี่ตัวที่อยู่รอบๆตัวมันเองด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 ในที่สุดจะได้ว่าใน Diamond structure นี้อะตอมของคาร์บอนจะจับตัวกันมีลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม โดยอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการเหลื่อมในตำแหน่งสูงและต่ำสลับกันจากระนาบหรืออาจมองอีกอย่างหนึ่งว่า วงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกันเป็นระนาบ $\{111\}$ 2 อัน วางซ้อนทับกันอยู่ในลักษณะกลับหัวและอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะไม่อยู่ในระดับเดียวกัน รูปที่ 1.3 แสดงให้เห็นระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายจุดและระนาบ $\{111\}$ ของอะตอมคาร์บอนที่เป็นลายขวางวางซ้อนกันอยู่เป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม ความยาวแลตทิซอาจถูกมองว่าเป็นการเรียงกันเป็นชั้นๆของวงแหวนหกเหลี่ยมโดยที่แต่ละวงมีตำแหน่งตรงกัน ในทิศทางของระนาบ $\{111\}$ การเรียงลำดับชั้นจะเป็นแบบ ABC ABC ABC ... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าคงที่แลตทิซเป็น 3.567 \AA และความยาวพันธะหรือระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.54 \AA ผลของการตรวจสอบด้วย Raman spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (First order peak) ของเพชรมีค่า 1332 cm^{-1} และยอดลำดับที่สอง (Second order peak) ของเพชรเท่ากับ 2458 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีของคาร์บอน 13 จะมีค่ายอดลำดับที่หนึ่งอยู่ที่ 1284 cm^{-1}

1.5 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของเพชรได้เป็น 3 คุณสมบัติใหญ่ๆคือ คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

1.5.1 คุณสมบัติทางกล

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

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

- Molar heat capacity ค่า Molar heat capacity หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศา จากภาคผนวก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity ระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าของ เพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ นั้นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ด้านการกระจายความร้อนได้ดีเท่ากับ Heat sink

- Thermal expansion คือค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ แพร่ไป ถึงเทียบกับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 0°C ค่า Thermal expansion นี้จะเป็น สัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity

1.5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall ในเพชรธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^{15} ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่า ความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ในขณะที่ของอิเล็กทรอนิกส์มีค่า $2,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ แต่ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ 500°C พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง $850 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเจอร์มาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติ โมไนต์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนในวัสดุอื่นๆจะมีค่า ความเร็วโฮลอิมิตัวและ Dielectric strength ต่ำ ที่ความแรงสนามไฟฟ้า 10^4 V/cm ความเร็ว ลอยเลื่อนของอิเล็กทรอนิกส์และโฮลเริ่มมีการอิมิตัวสำหรับโฮลมีค่าความเร็วลอยเลื่อนสูงสุดที่ 10^7 cm/s และในกรณีของอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ $2.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงถึง $10^{16} \Omega\cdot\text{cm}$

โบรอนเป็นสารเจือที่ถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนสภาพฟิล์มเพชรให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่ง ตัวนำชนิดพี โดยอาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลวทั้งนี้เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุอยู่ในหมู่ 3 ทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้รับ อีกทั้งยังมีขนาดอะตอมเหมาะสมสามารถจับตัวกับอะตอม คาร์บอนโดยไม่ทำให้แลตทิซเสียรูป ค่าพลังงานกระตุ้นของโบรอนขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของ อะตอมโบรอนที่เจือลงไป ถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่ามาก พลังงานกระตุ้นจะมีค่า น้อยลงเกิด Shallow level มากขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าความเข้มข้นของอะตอมโบรอนมีค่า ประมาณ 100 ppm หรือ 10^{19} cm^{-3} พลังงานกระตุ้นจะมีค่าประมาณ $370 \times 10^{-3} \text{ eV}$ และสำหรับ ฟิล์มเพชรชนิด Highly doped (อะตอมสารเจือมากกว่า $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) ค่าพลังงานกระตุ้นจะมี ค่าต่ำคือประมาณ $2 \times 10^{-3} \text{ eV}$

1.5.3 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับ ซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดดังกล่าวนิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการ ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลจากตาราง 1.1 สามารถสรุปข้อดีของเพชรที่เหมาะสมในการใช้ งานเป็นสารกึ่งตัวนำดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและ
แกเลียมอาร์เซไนด์

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

1. เพชรมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงกว่าซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์มากจึงเหมาะสำหรับใช้งานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงๆซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์จะมีประจุพาหะอิสระเกิดขึ้น (โฮลและอิเล็กตรอน) จำนวนมากข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามทำให้ไม่สามารถควบคุมจำนวนประจุพาหะได้ตามต้องการ

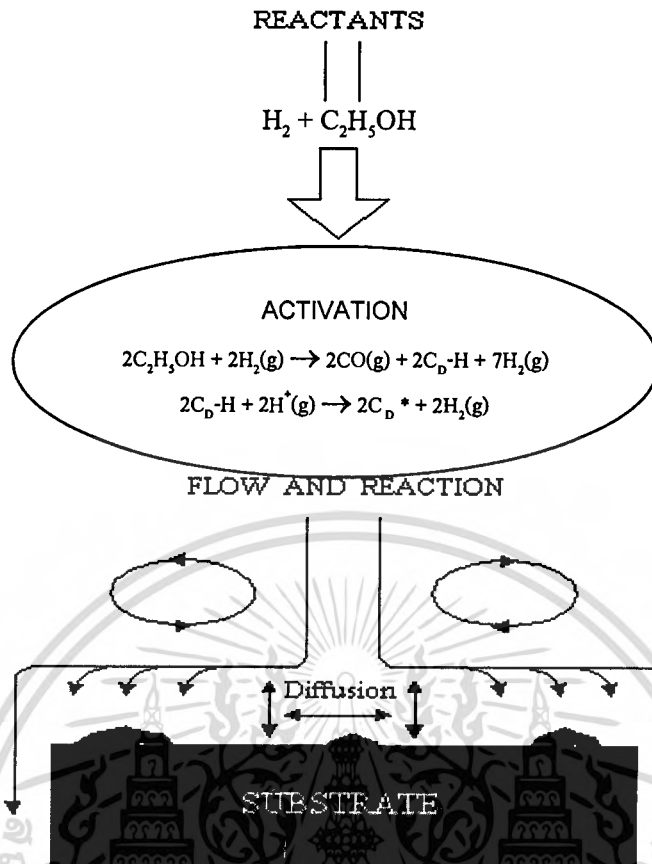
2. เพชรมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ทำให้สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สูง

3. ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเพชรธรรมชาติมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าสภาพความต้านทานทางไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการโดยเติมอะตอมสารเจือลงไป

1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน

การสร้างฟิล์มเพชรที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (Hot-Filament CVD) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ความดันต่ำหรือความดันบรรยากาศ และเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน และที่สำคัญคือ ต้นทุนในการสร้างต่ำ โดยจะมีหลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งในที่นี้มีเอทิล-แอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) เป็นไอระเหยที่มีอนุภาคของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แผนภาพกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์เพชรด้วยวิธี CVD แบบ ความร้อน

หลักการพื้นฐานของระบบ CVD แบบความร้อนนั้นจะต้องมีกลไกพื้นฐานดังนี้

- ในระบบต้องมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

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

- ในระบบต้องกระตุ้นก๊าซอนุมูลคาร์บอน

ในบริเวณที่มีการกระตุ้น (Activation) ก๊าซทั้งสองชนิด สำหรับวิธี CVD แบบ hot-filament จะอาศัยความร้อนจากอุณหภูมิประมาณ 2000 องศาเซลเซียส ของขดลวดความร้อนทั้งสแตน เป็นผลให้โมเลกุลของก๊าซทั้งสองเกิดการแตกตัวเป็นคาร์บอนอะตอม และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนอะตอม ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่านจากบริเวณกระตุ้นไปยังฐานรอง โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงเป่าก๊าซเฟส

- ในระบบต้องมีอุณหภูมิของฐานรองเหมาะสม

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

- ในระบบต้องมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแต่ละครั้งพบว่า การเลือกใช้ฐานรองที่จะนำมาสร้างมีส่วนสำคัญมากเช่นกัน เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวของฐานรองมีผลต่อลักษณะการก่อตัวของเพชรได้แก่ ความหนาแน่นและอัตราการนิวเคลียสขึ้น เป็นต้น

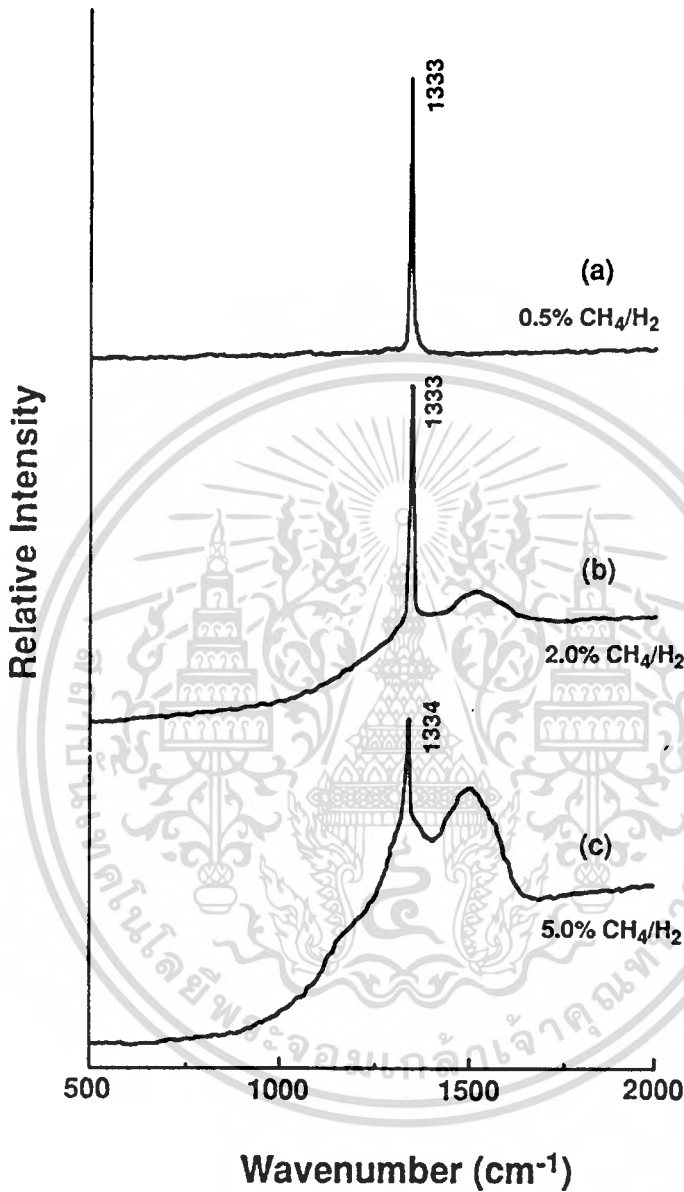
1.7 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

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

1.7.1 การวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy

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

เป็นวิธีที่ไม่ทำให้ชิ้นงานหรือฟิล์มเพชรที่ตรวจสอบเสียหาย หรือทำลายโครงสร้าง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อได้ เครื่อง Raman Spectroscope แสดงไว้ในภาคผนวก



รูปที่ 1.4 Raman spectrum ของฟิล์มเพชร

ในรูปที่ 1.7 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชร ในรูป 1.7a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 1.4b พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ 1500 cm^{-1} เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่สำหรับสเปกตรัมของรูป 1.4c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ 1334 cm^{-1} ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อยและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด

ตารางที่ 1.2 ค่ายอดของ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7.2 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

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



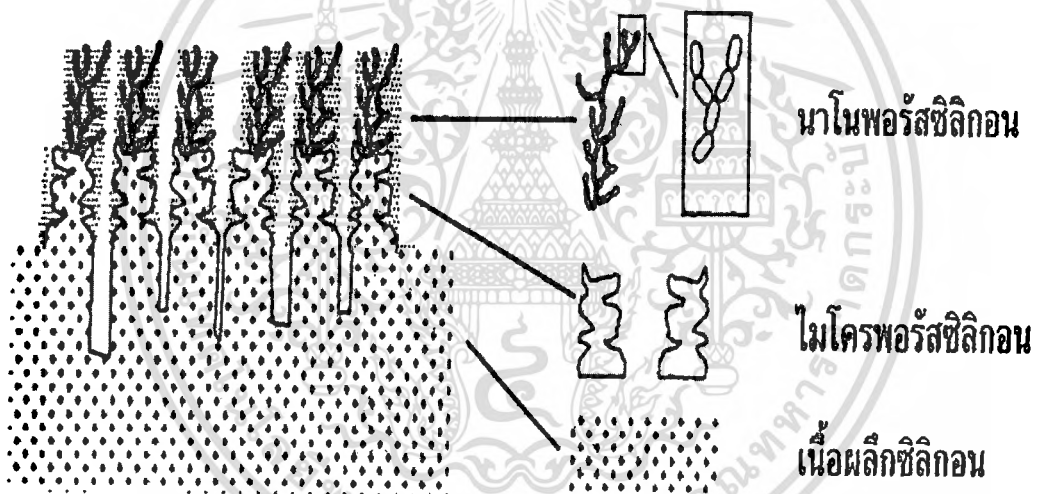
รูปที่ 1.5 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่างลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 พอร์สซิลิกอน [10]

2.1.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนนั้นคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนเล็กๆที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร อยู่ถึงสองชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.1



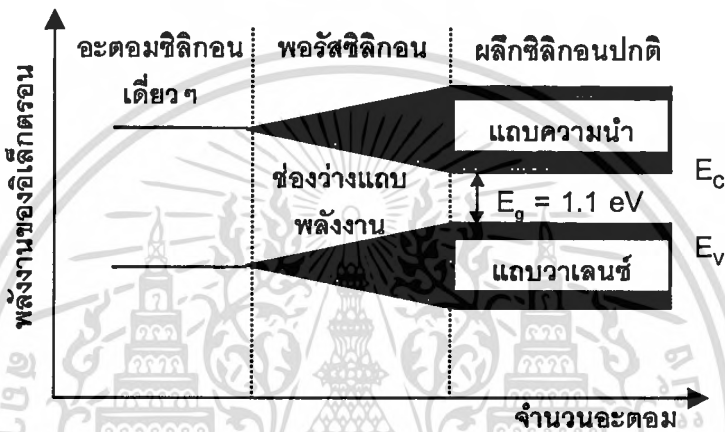
รูปที่ 2.1 ภาพจำลองโครงสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

จะเห็นว่าพอร์สซิลิกอนประกอบไปด้วย

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

2.1.2 ลักษณะของแถบพลังงานของซิลิกอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานภายในอะตอม ทำให้เกิดการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน ซึ่งถ้าเราสามารถลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจะไม่มีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนของช่องว่างแถบพลังงาน ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.2 ลักษณะของแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

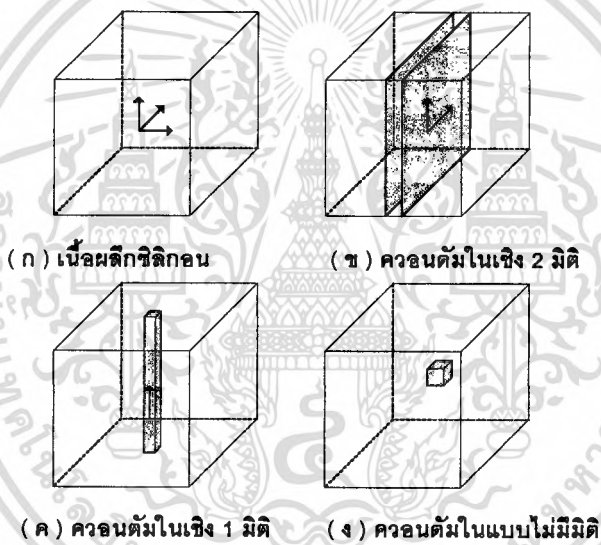
จากรูปจะเห็นว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลงจะมีผลทำให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอน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

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

โดยที่ E_q เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ Quantum confinement effect

- ΔE_c เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำเดิมของผลึกซิลิกอน
- ΔE_v เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์เดิมของผลึกซิลิกอน

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างออกไปจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน

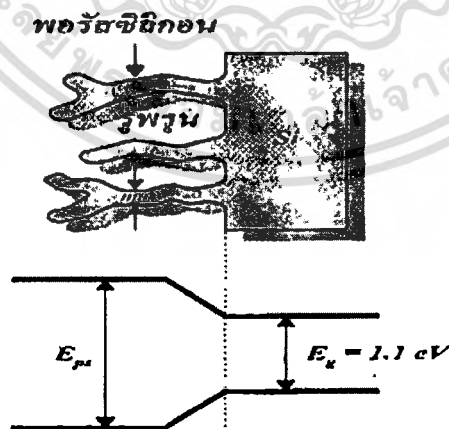
ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับด้วยลักษณะและขนาดโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ด้วยกันคือ

1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (Quantum well) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความบางมากๆในระดับชั้นของโมเลกุล เช่น 30-50 ชั้นโมเลกุล (< 100 nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างแบบ 2 มิติ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)

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

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

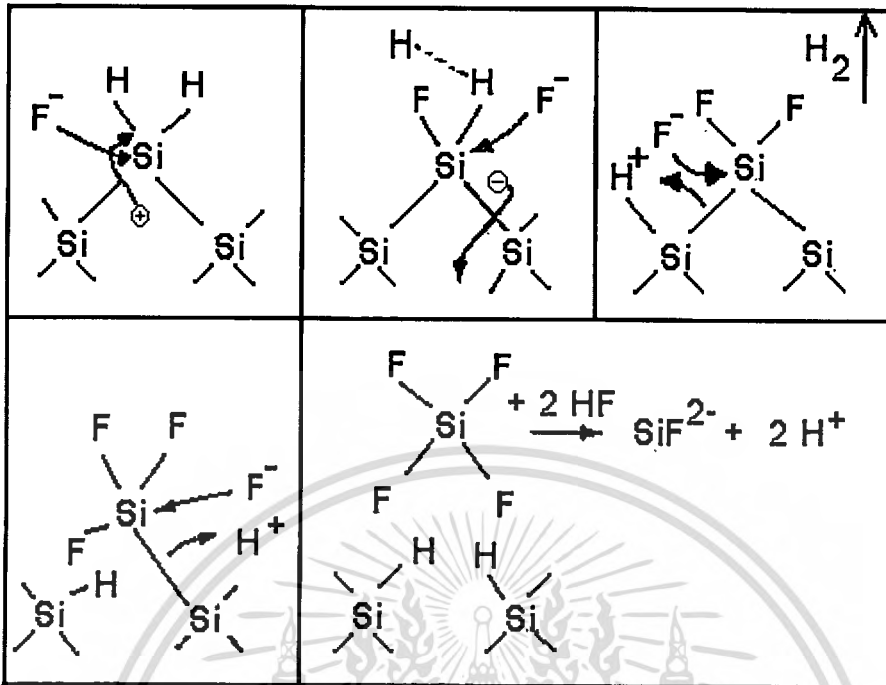
ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน จัดอยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum Wire นั่นเอง โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งความกว้างของช่องว่างพลังงาน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



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 กลไกการเกิดพอร์ซซิลิกอน

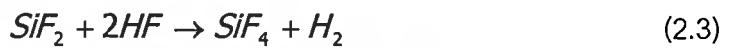
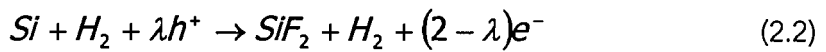


รูปที่ 2.5 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน

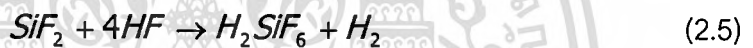
จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงกลไกการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่ทำให้เกิดขึ้นของพอร์ซซิลิกอนโดยเริ่มจากเมื่อยังไม่มีกรไบอัสแบบ Anodic Bias ซึ่งเป็นกระบวนการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับซิลิคอน (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของซิลิกอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่ มีผลทำให้ไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) แต่เมื่อไรที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกให้กับซิลิคอน (Si) จนพาหะไฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้โดยไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si-F) ขึ้นมาแทนดังแสดงไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกส่งผลให้ไอออนของฟลูออรีน (F⁻) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังซิลิคอน ดังแสดงในขั้นตอน 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอน (Polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si-F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนที่อยู่ถัดเข้ามามีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีนเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นว่าอะตอมของซิลิกอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาที่ผิวหน้าของผลึกซิลิกอน พร้อมกับเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิกอนอะตอมที่อยู่ถัดมา ดังแสดงไว้ในขั้นตอนที่ 5 ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้ [2]



จากสมการที่ (3) และ (4) เขียนเป็นปฏิกิริยารวมได้เป็น

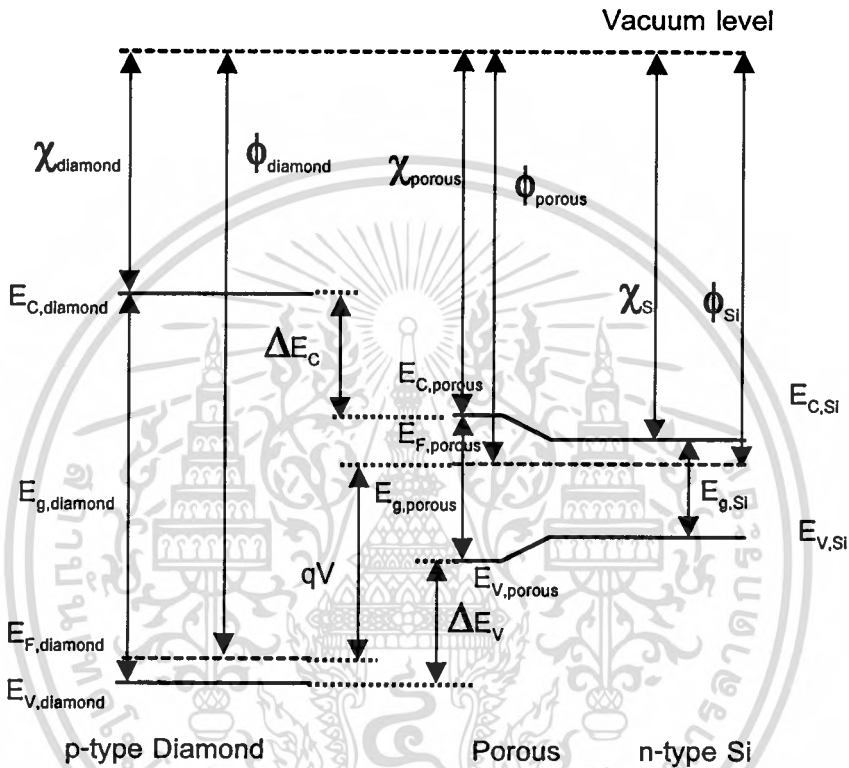


โดยที่ λ คือจำนวนของประจุที่เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างกระบวนการ

จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ (2) ที่มีผลึกซิลิกอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนั้นจำเป็นที่จะต้องอาศัยไฮไลในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF_2 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ (3) ได้ผลลัพธ์เป็น SiF_4 หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิกอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สังเกตว่าจะได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้ายคือสารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ (4)

2.2 ลักษณะของแถบพลังงาน

เพื่อที่จะศึกษาการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากพอร์สซิลิกอนซึ่งสร้างมาจากแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นกับฟิล์มเพชรชนิดพี โดยลักษณะแถบพลังงานก่อนที่จะสัมผัสกันของสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์สซิลิกอนขณะก่อนสัมผัส

จากรูปที่ 2.6 จะได้ว่า

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

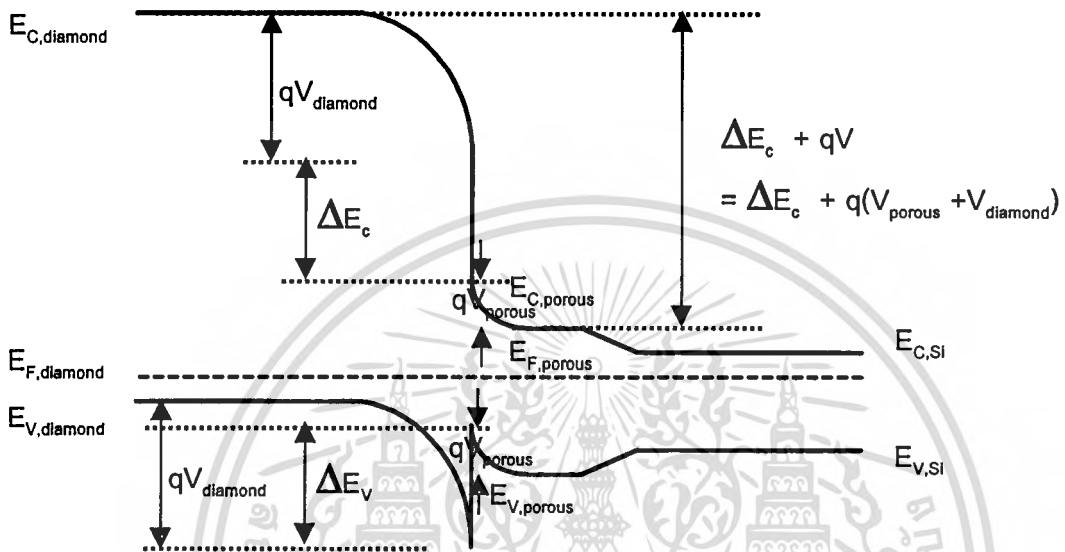
และ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อสาร 2 ชนิดนี้ต่อกัน อิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดการแพร่ไปสู่ด้านพีและด้านเอ็นจนกระทั่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองมีระดับเท่ากัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของฟิล์มเพชรและพอร์ซซิลิกอนขณะสมดุลความร้อน

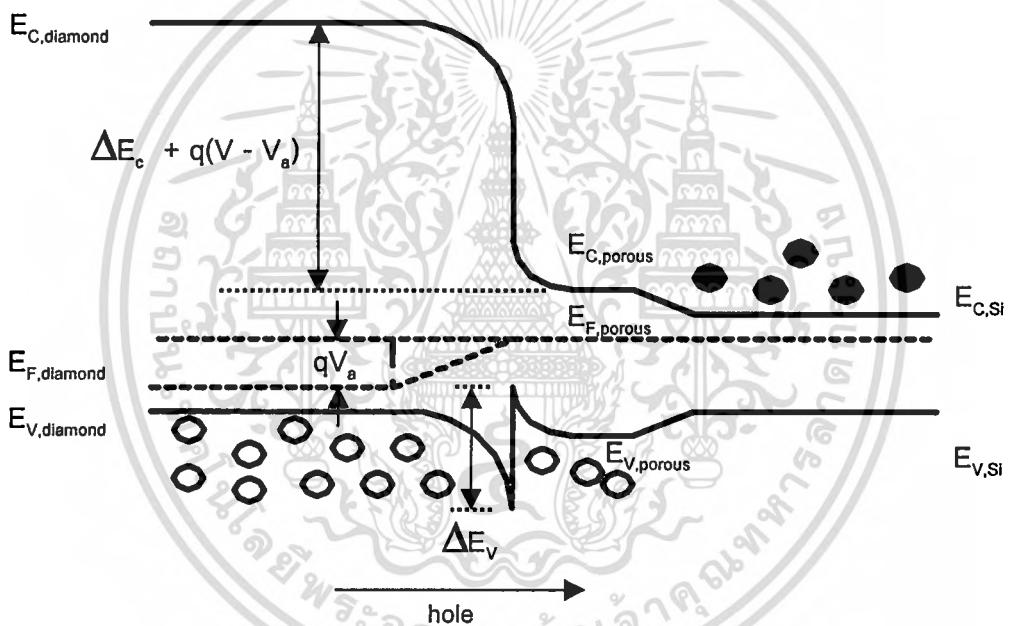
จากรูปที่ 2.7 จะได้ว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อคือ

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

โดยที่ $V_{D, Porous}$ คือศักย์ไฟฟ้าภายในพอร์ซซิลิกอน
 $V_{D, Diamond}$ คือศักย์ไฟฟ้าภายในของฟิล์มเพชร

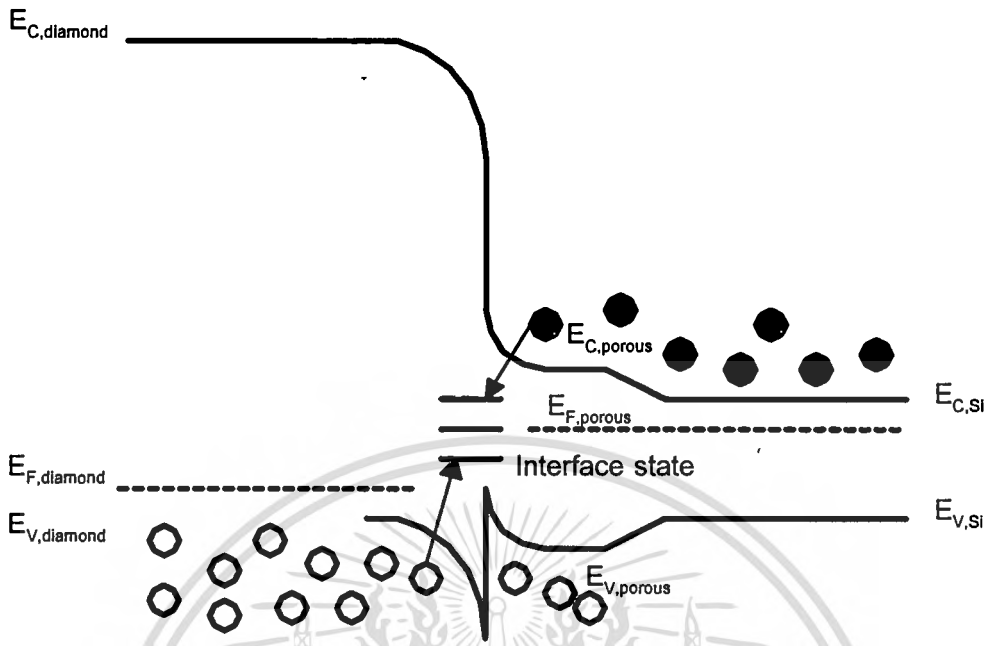
2.2.1 การให้ไบอัสไปข้างหน้า

ในสภาวะสมดุลความร้อนจะไม่มี การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนและโฮลระหว่างสารกึ่งตัวนำ ทั้ง 2 ชนิด แต่เมื่อเราให้ไบอัสไปข้างหน้ากับรอยต่อนี้ สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนี้จะมีค่าลดลง เมื่อเราสมมุติให้ระดับพลังงานด้านเอ็นดงที่ ดังนั้นระดับพลังงานด้านพีจะมีระดับพลังงานลดลง เท่ากับ qV_a การไหลของกระแสจะมี 2 ลักษณะโดยลักษณะแรงแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยโฮลจะไหล จากแถบวาเลนซ์ด้านเพชรชนิดพีไปยังแถบวาเลนซ์ด้านพอร์ซซิลิกอน เมื่อให้การไบอัสน้อยกว่า แรงดันขีดเริ่มช่วง Forward (V_f) กระแสจะไหลได้น้อยเนื่องจากมีศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณ spike กั้นอยู่ แต่เมื่อให้ไบอัสมีค่าสูงกว่า V_f จะทำให้ความสูงของ spike มีค่าลดลงโฮลจึงสามารถไหลไปยัง ด้านพอร์ซซิลิกอนได้



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 1 ขณะได้รับไบอัสตรง

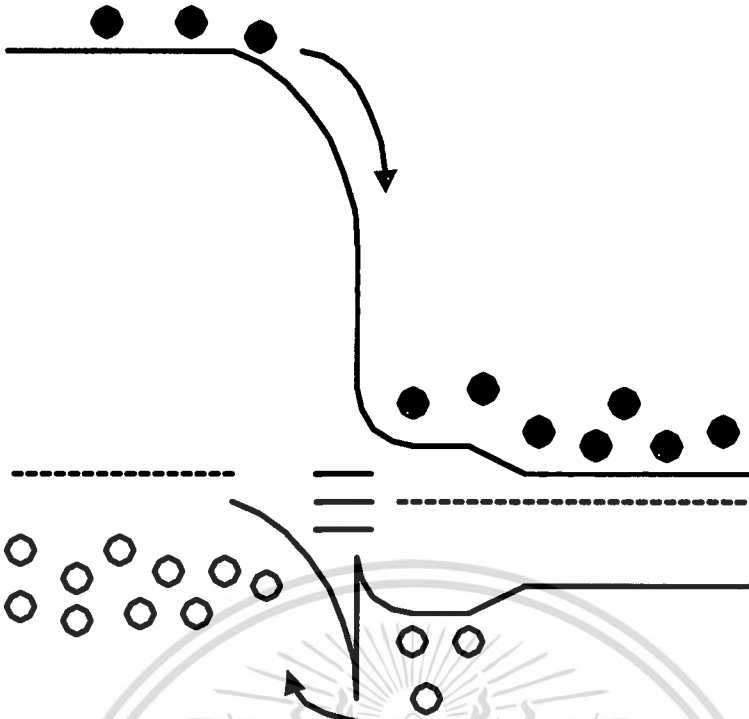
ลักษณะที่สองจะเป็นการไหลของกระแสการรวมตัวใหม่ (Recombination current) คือ โฮลจากแถบวาเลนซ์ทางด้านฟิล์มเพชรและอิเล็กตรอนจากแถบนำด้านพอร์ซซิลิกอนจะไหลไปยัง Interface state จะเกิดการรวมตัวใหม่ที่ Interface state ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยกระแสส่วนนี้ จะมีความสำคัญเมื่อมีการไบอัสน้อยๆ



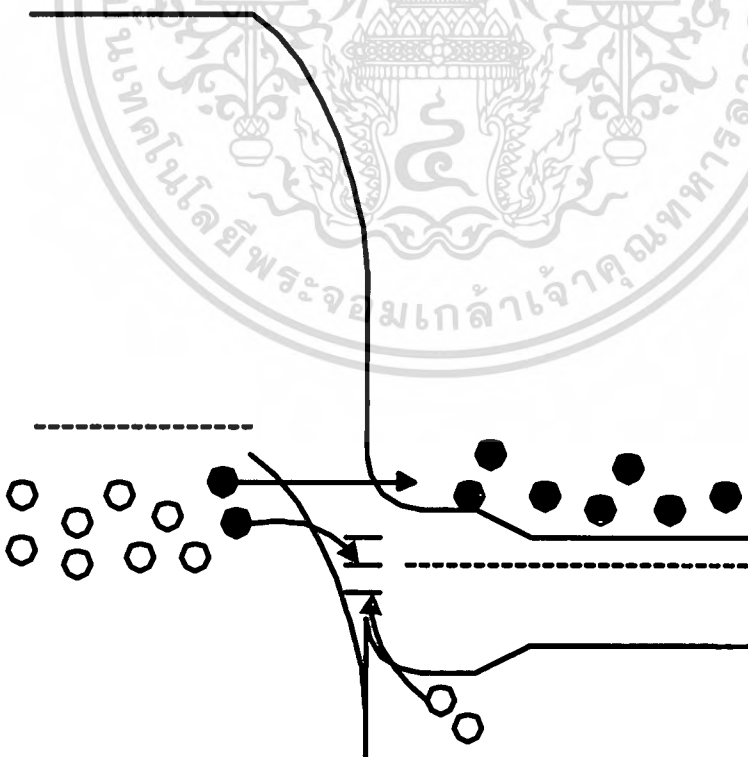
รูปที่ 2.9 แถบพลังงานแสดงการไหลของกระแสลักษณะที่ 2 ขณะได้รับไบอัสตรง

2.2.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าน้อยๆซึ่งน้อยกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มช่วง Reverse (V_R) อิเล็กตรอนจากฟิล์มเพชรชนิดพีจะไหลมายังด้านพอร์สซิลิกอน โสไลจากด้านพอร์สซิลิกอนจะไหลมายังฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งกระแสจะยังคงไหลน้อยเนื่องจากเกิดจากการไหลของประจุพาหะจำนวนน้อย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับจนกระดပ်พลังงานวาเลนซ์ด้านฟิล์มเพชรชนิดพีมีระดับสูงกว่าแถบความนำของพอร์สซิลิกอน จะเกิดการทะลุผ่าน (Tunneling) คืออิเล็กตรอนด้านฟิล์มเพชรจะสามารถทะลุไปยังแถบความนำด้านพอร์สซิลิกอนได้ และโวลทริเจนแถบวาเลนซ์ด้านพอร์สซิลิกอนจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนบางส่วนซึ่งเคลื่อนที่ทะลุรอยต่อที่บริเวณ Depletion Region ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V < V_R$ [5]



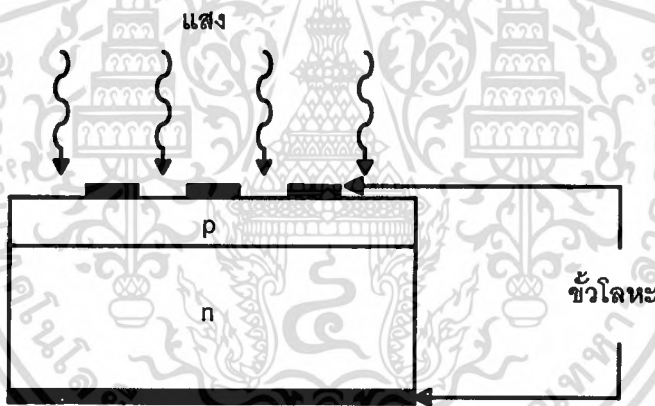
รูปที่ 2.11 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับเมื่อ $V > V_R$ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ตรวจรับแสง มีโครงสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพีเอ็น แต่เนื่องจากต้องทำงานเกี่ยวกับแสง จึงถูกออกแบบให้ชั้นพีมีความบางมากๆ เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่รอยต่อ p-n จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆอาจรวมถึง เซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าโดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจจับความเข้มของแสง

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



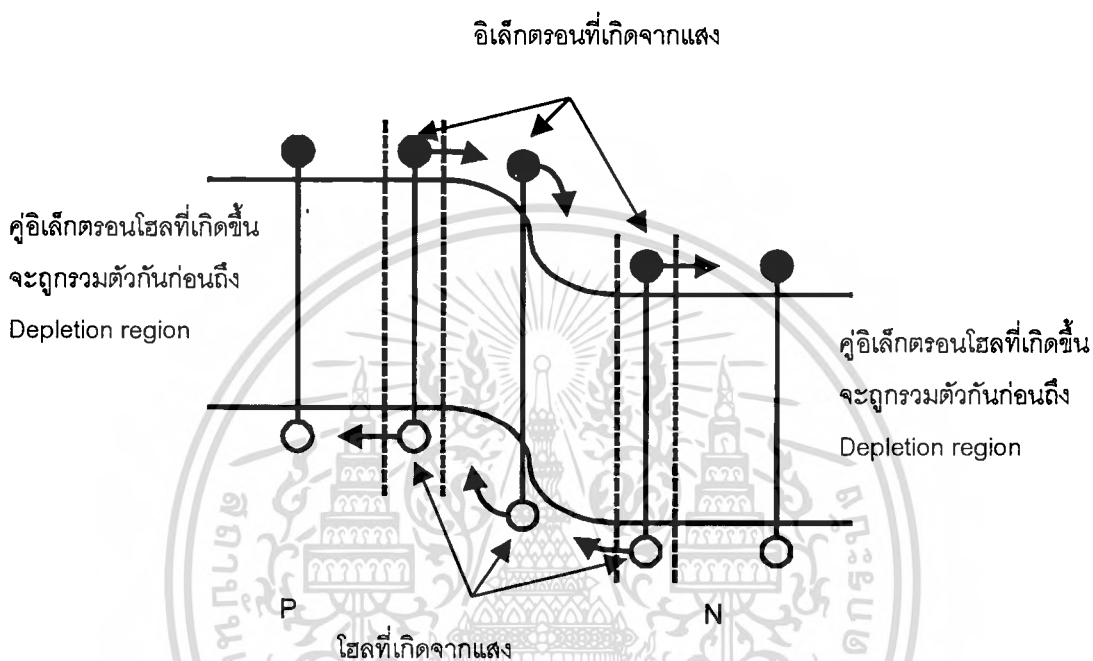
รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด

2.3.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดเป็นไดโอดโครงสร้างพีเอ็น ดังรูปที่ 2.12 โดยจะมีช่องด้านบนเพื่อเป็นส่วนที่รับแสง โดยบริเวณรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งเมื่อแสงตกกระทบและถ้าแสงมีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน แสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำและที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่ จากรูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพีเอ็น การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้นพี ชั้นปลดพาหะและชั้นเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นพีจะแพร่ไปสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการยินยอมของเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นเอ็นและอีเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบคอนดักชันในชั้นปลดพาจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เคลื่อนที่ไปยังชั้นเอ็น ส่วนโฮลจะไหลไปยังชั้นพี จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้นอยู่กับจำนวนของโฟตอนของแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนจะถูกสะสมอยู่ในชั้นเอ็นและโฮลก็จะถูกสะสมอยู่ในชั้นพี เมื่อเราต่อโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรภายนอกก็อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้นเอ็น ส่วนโฮลก็จะไหลออกจากชั้นพี



รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดอิเล็กตรอนโฮลในแถบพลังงานของโฟโตไดโอด

2.3.2 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

I_L คือ กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง

C_j คือ ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็น

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม

I_D คือ กระแสไฟฟ้ามืดไดโอด

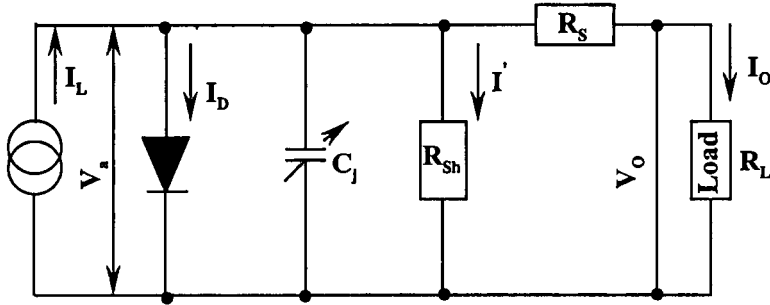
I' คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}

R_{sh} คือ ความต้านทานชัณฑ์

V_a คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด

V_o คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

I_o คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

จากวงจรนี้สามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_o) ได้จากสมการ

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_a}{kT} - 1 \right) - I' \quad (2.10)$$

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

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L - I'}{I_s} \right) \quad (2.11)$$

ถ้า I' มีค่าน้อยมาก เราอาจไม่คิดค่า I' ก็ได้ ส่วน I_s จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ ดังนั้น V_{oc} จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น V_{oc} จะลดลง และ V_{oc} จะแปรผันตรงกับ I_L แบบ $\ln I_L$ แต่ถ้าแสงมีความเข้มน้อยมาก ความสัมพันธ์เหล่านี้จะไม่ชัดเจน

ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) คำนวณได้จากการให้ $R_L = 0$ และ $V_o = 0$ ดังนั้น [11]

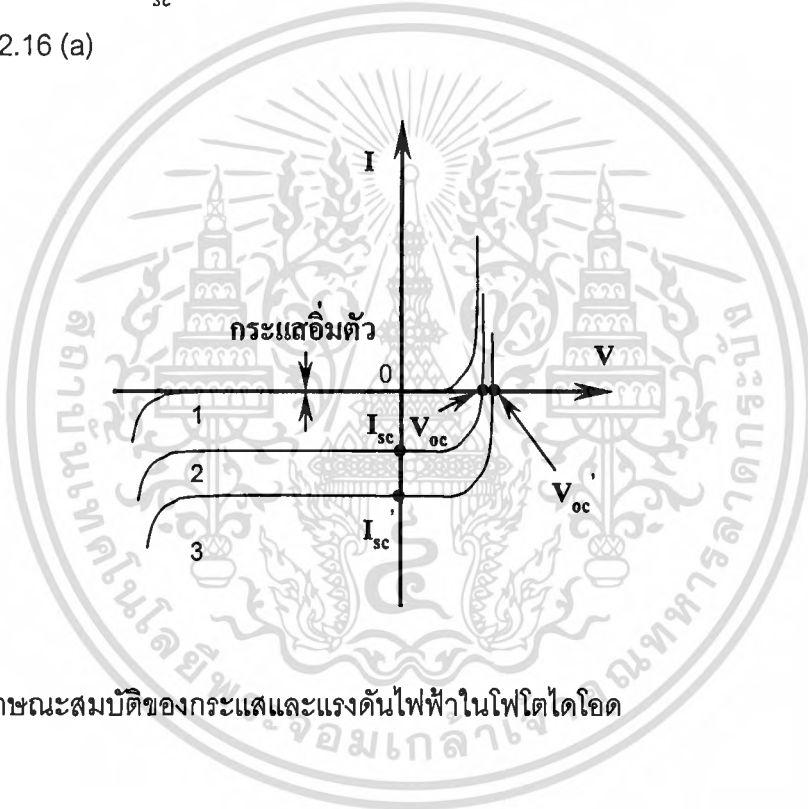
$$I_{sc} = I_L - I_s \left(\exp \frac{q(I_{sc} \cdot R_s)}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{sc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.12)$$

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

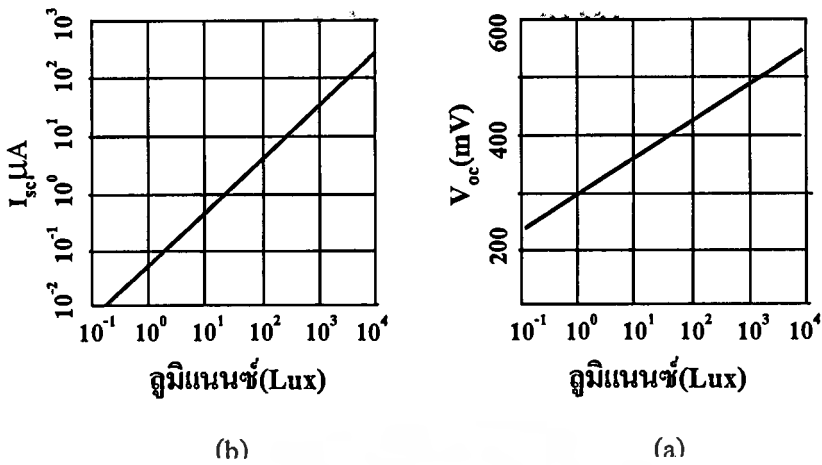
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า โฟโตไดโอดก็คืออุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับไดโอด ดังนั้นในขณะที่ยังไม่มีแสงส่องกระทบที่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้กันทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.15 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อมีแสงส่องเข้าสู่โฟโตไดโอด จะทำให้เส้นระหว่างกระแส-แรงดัน เลื่อนแบบขนานไปสู่เส้นหมายเลข 2 แต่ถ้าความเข้มแสงมากขึ้นก็จะเป็นเส้นกราฟแบบหมายเลข 3 ในขณะที่ส่องแสงอยู่ถ้าเราทำการวัดกระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอดจะได้ค่า I_{sc} หรือ I'_{sc} โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอนโอดไปแคโทด ถ้าเป็นวงจรเราจะได้แรงดันวงจรเปิด V_{oc} หรือ V'_{oc} และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มแสงเป็นลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมากดังแสดงในรูปที่ 2.16 (a)



รูปที่ 2.15 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด



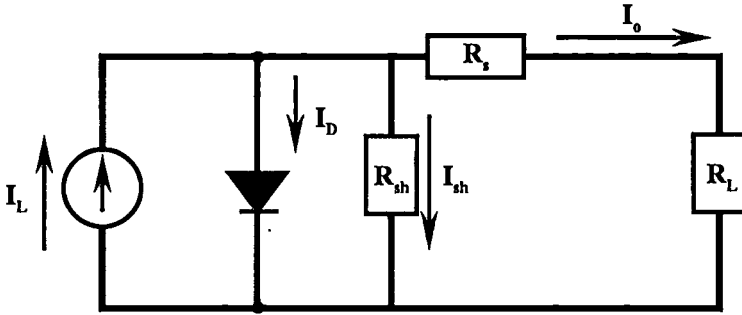
รูปที่ 2.16 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินฟราเรด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{oc} และความเข้มของแสงอินฟราเรด

2.4 เซลล์แสงอาทิตย์

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

2.4.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นแบบง่าย ๆ จะมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant current source : I_L) ต่อขนานอยู่กับรอยต่อพีเอ็นแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสคงที่นั่นก็คือกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสง (I_L) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) ความต้านทานขนัณฑ์ (R_{sh}) และ รอยต่อพี-เอ็นของไดโอด กระแส I_L ที่เกิดเนื่องจากแสงนี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอด และ R_{sh} แล้วจึงไหลมายังโหลด (R_L) กระแสที่ไหลผ่าน R_s และ R_L ให้มีค่าเป็น I_o จะได้ว่า

$$I_L = I_D + I_o \quad (2.13)$$

$$I_o = I_L - I_D \quad (2.14)$$

เมื่อ $R_s = 0$ กระแส I_D มีค่าดังนี้

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

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

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

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

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

$$I_o = I_L \quad (2.18)$$

ในกรณีนี้ I_o ก็คือ I_{sc} ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดมาจากแสง

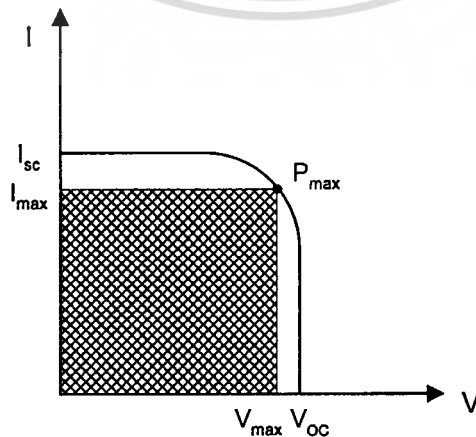
ในกรณีที่เปิดวงจรทางโหลดเพื่อที่จะดูค่าแรงดันแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) จะได้ว่า $I_o = 0$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

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

$$\ln \frac{I_L}{I_s} = \frac{qV}{kT} - 1 \quad (2.20)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right) \quad (2.21)$$

กรณีที่โหลดมีค่า $0 < R_L < \infty$ จะได้ว่าเซลล์จะจ่ายกระแส I และแรงดัน V ให้แก่โหลดค่าหนึ่งซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $0 < I < I_{sc}$ และ $0 < V < V_{oc}$ ตามลำดับ กำลังงาน (Power) ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด R_L สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันที่โหลดได้รับ ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้ผลคูณของปริมาณทั้งสองมีค่าสูงสุด เรียกว่า กระแสสูงสุด (I_{max}) และ แรงดันสูงสุด (V_{max}) ตามลำดับ ซึ่งที่จุดนี้จะให้ กำลังงานสูงสุด (Maximum Power : P_{max}) แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นกำลังงานสูงสุดจึงถูกนิยามว่าค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์สามารถจ่ายให้แก่โหลด โดย $P_{\max} < I_{sc} \cdot V_{oc}$ ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟรูปที่ 2.18 คือถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้น เป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อ 2.4.2 จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าๆหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า "ฟิลแฟกเตอร์" (F.F. : Fill Factor) ของเซลล์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์จริงๆ ต่อพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ในทางอุดมคติ

$$F.F. = \frac{P_m}{P_0} = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.22)$$

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

$$\text{ประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงาน } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \quad (2.23)$$

หรือ

$$\eta = \frac{I_{\max} V_{\max}}{P_{in}} = \frac{F.F. \times I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.24)$$

หรือ

$$\eta = \frac{P_{\max}(W)}{\text{Area}(m^2) \times P_{in}(W)} \times 100\% \quad (2.25)$$

2.4.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชั้นดีในเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ (R_s) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์มาก จากสมการที่ 2.26 ซึ่งคิดที่ $R_s = 0$ และได้ I_o ออกมาดังนี้

$$I_o = I_L - I_s [\exp(qV_o / kT) - 1] \quad (2.26)$$

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

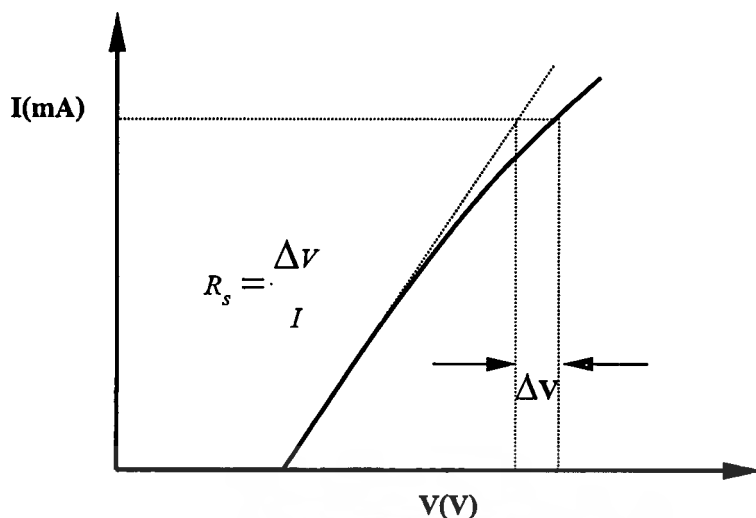
$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ } (V) = V_o + I_o \cdot R_s$$

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V_o + I_o \cdot R_s)}{kT} \right\} - 1 \right] \quad (2.27)$$

ความต้านทานอนุกรมสามารถหาได้โดยวิธีการดังนี้เนื่องจากกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล เช่นเดียวกับไดโอด เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันนี้ไปเขียนลงในกราฟเซมิล็อก จะได้เป็นกราฟเส้นตรง แต่เนื่องจากผลของความต้านทานภายในเซลล์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานนี้ แรงดันส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กับกระแสในลักษณะเชิงเส้น เมื่อกระแสไหลผ่านเซลล์มากผลของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานอนุกรมนี้ จะทำให้ได้กราฟเส้นตรงที่ได้ในช่วงกระแสสูงๆ นี้เบี่ยงเบนออกจากแนวเดิม ค่าที่เบี่ยงเบนออกมานี้จะนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ได้

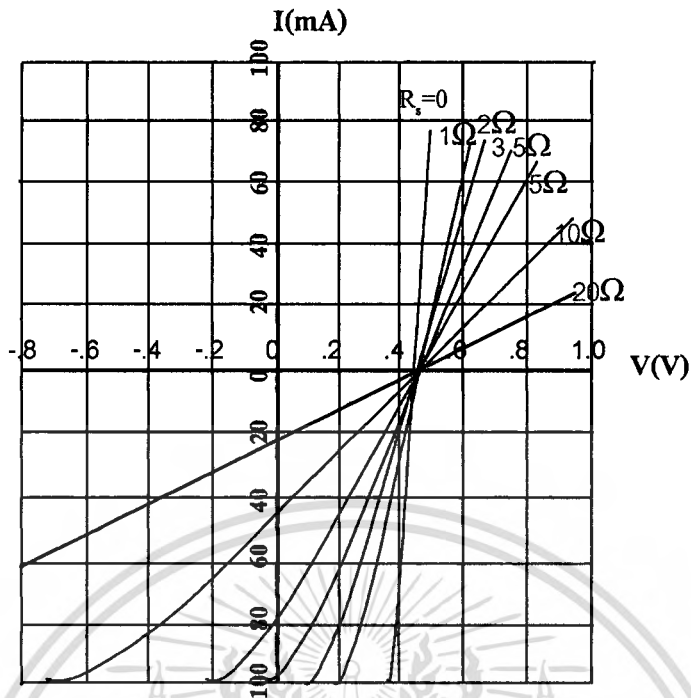
จากกราฟในรูปที่ 2.19 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ ที่ค่ากระแส I จะหาค่า R_s จากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV ได้ดังนี้

$$R_s = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.28)$$



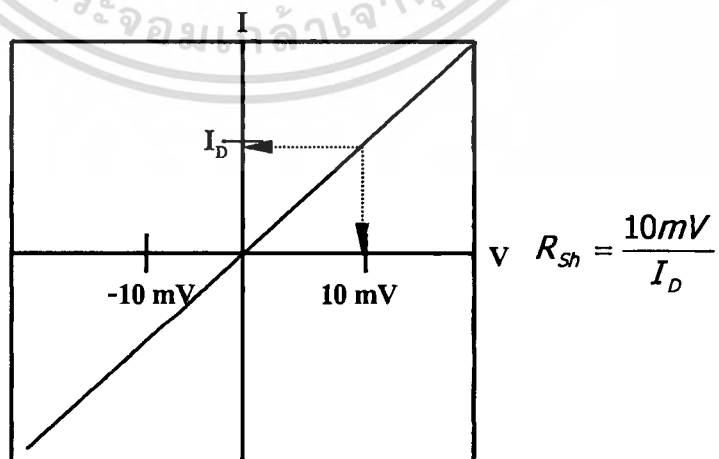
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บนกราฟแบบเซมิล็อก

จากสมการที่ 2.15 สามารถนำไปเขียนกราฟเพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2.20 จากรูปจะเห็นว่าเซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อยลงและความชันของกราฟก็ลดลงด้วยเป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรวางทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.20 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ส่วนความต้านทานชั้นนั้นอาจเกิดจากกระแสรั่วที่บริเวณขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นความต้านทานชั้นไม่ควรจะมีค่าสูง มากๆ แต่อาจจะมีค่าลดลงได้เนื่องมาจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น การหาค่าความต้านทานชั้น นั้นสามารถทำได้โดยการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันในสภาพมืด โดยการไบแอสให้กับเซลล์ ในระดับแรงดันต่ำๆ ประมาณ 10-20 mV ดังรูปที่ 2.21

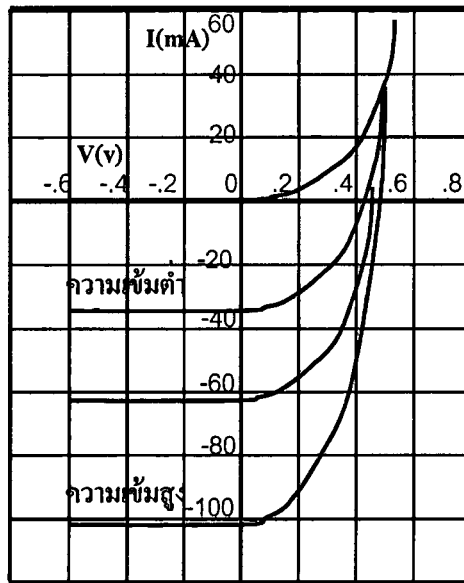


รูปที่ 2.21 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [11]

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้แสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีอิสระหลุดจากการยึดเหนี่ยวกับไฮโดรเจนในอะตอม ถ้าแสงที่ส่องมากระทบเซลล์มีความเข้มสูงมากขึ้นก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลให้กระแสที่ได้จากเซลล์มีค่าสูงขึ้น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงแตกต่างกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริงนั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย เมื่อได้พิจารณาสมการของกระแส I_0 ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L จะพบว่ากระแส I_0 นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องมาจากแสง I_L และกระแส I_D ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L และ I_D

2.4.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L [11]

กระแส I_L ที่เกิดขึ้นจากแสงนั้นมีสมการดังต่อไปนี้

$$I_L = qg(x)A(L_e + L_h) \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.30)$$

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

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

2.4.4.2 ผลของอุณหภูมิต่อ I_D

เมื่อพิจารณาค่าของ I_D ในสมการข้างล่าง

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

จากสมการจะเห็นได้ว่า I_s จะมีผลต่อกระแส I_D มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิ ที่มีต่อ I_s โดยพิจารณาจากสมการของ I_s ดังนี้

$$I_s = Aqn_i^2 \left[\frac{1}{N_a} \left(\frac{D_e}{\tau_e} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_d} \left(\frac{D_h}{\tau_h} \right)^{1/2} \right] \quad (2.32)$$

จากสมการของ I_s ในกรณีของซิลิกอน พบว่า n_i^2 จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ตามสมการดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_i^2 = 15 \times 10^{32} \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (2.33)$$

จากสมการจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นแบบเอกโพเนนเชียล เป็นผลให้ I_s มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จากผลอันนี้ แสดงว่า

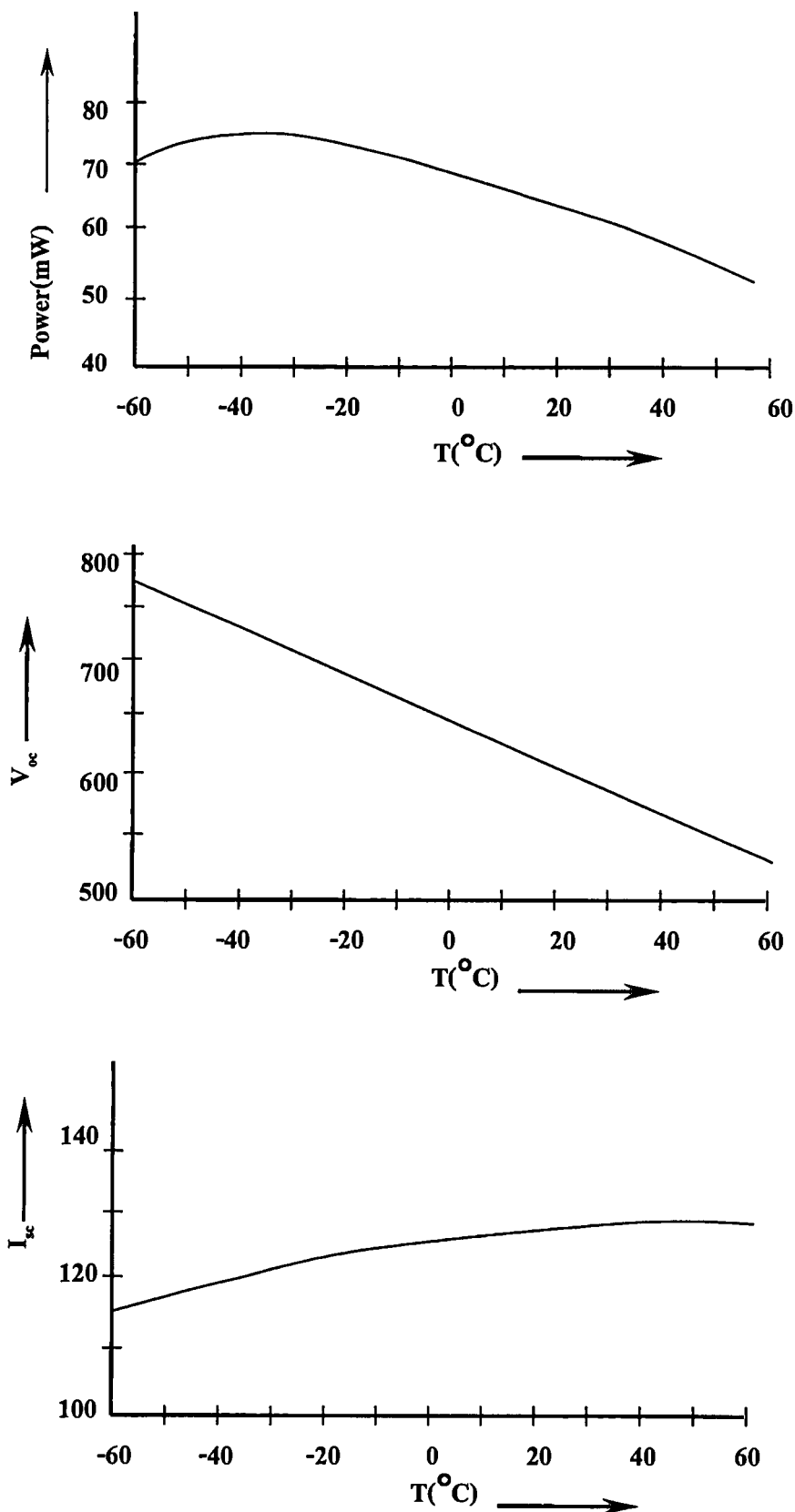
2.4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ V_{oc}

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) ตามสมการดังนี้

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right) \quad (2.34)$$

จากสมการนี้ค่าของ $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc}

เนื่องจากค่าของ $\frac{kT}{q}$ มีค่าต่ำมาก ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} คือค่าของ I_s ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้ค่าของ V_{oc} ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_s , V_{oc} และ P_o แสดงไว้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแส, แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของพอร์ซซิลิกอนและฟิล์มเพชร ซึ่งมีกระบวนการสร้างหลายขั้นตอน

3.1 กระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน

3.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น (Initial Cleaning) มีขั้นตอนดังนี้

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

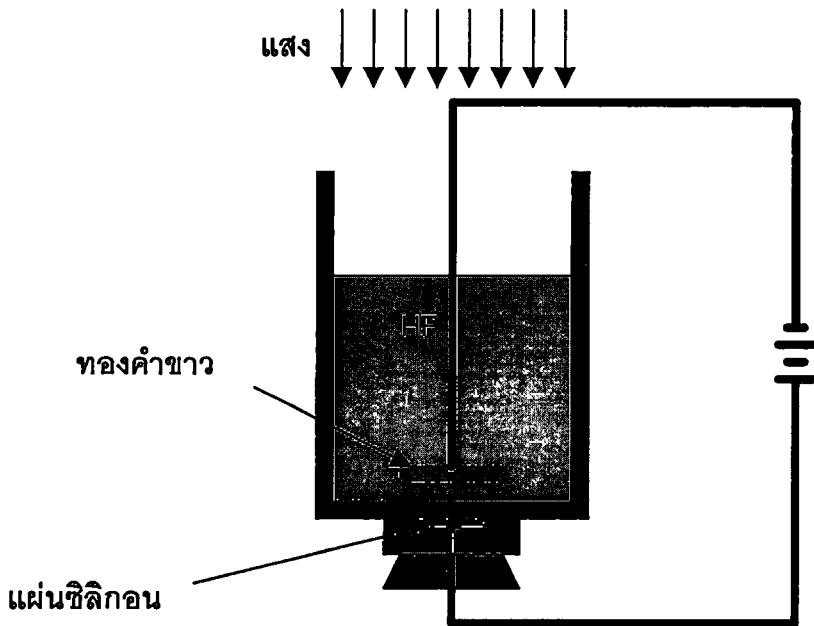
3.1.2 การเคลือบโลหะอะลูมิเนียม

หลังจากการทำความสะอาดผิวของแผ่นซิลิกอนเบื้องต้นแล้ว จากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นซิลิกอน ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่อง Vacuum Evaporator หลังจากนั้นจะนำแผ่นซิลิกอนที่ทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นไปผ่านการขึ้นเตอรจริงที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 cc/min เพื่อให้ส่วนของโลหะอะลูมิเนียมกับเนื้อของแผ่นซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสกันอย่างแน่นหนา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบไอหม่มมิดซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนเข้าไปในระหว่างกระบวนการ anodization มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ

3.1.3 การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

หลังจากทำการซินเตอร์ริงแล้ว จะนำแผ่นซิลิกอนไปทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน โดยนำแผ่นซิลิกอนไปวางด้านล่างของชุดเครื่องมือจากนั้นจะเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างของแผ่นซิลิกอน และขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นทองคำขาวซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะมีการฉายแสงที่บริเวณแผ่นซิลิกอนด้วย ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดจนเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมากมาย



รูปที่ 3.1 เครื่องมือสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

หลังจากการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนเรียบร้อยแล้ว ก็จะต้องนำแผ่นซิลิกอนที่สร้างชั้นพอร์สซิลิกอนไปทำความสะอาด โดยมีขั้นตอนดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

3.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD

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



รูปที่ 3.2 เครื่องมือสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

1. เปิดก๊าซไฮโดรเจนถัง 2 ถัง เข้าสู่ Chamber เป็นเวลาประมาณ 15 นาที เพื่อให้บรรยากาศใน Chamber เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว
2. ปิดวาล์ว 1 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนถังที่ 1 ไหลผ่านแหล่งจ่ายเพื่อพาไอระเหยของแอลกอฮอล์เข้าสู่ Chamber โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter ขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนถังที่ 2 ยังคงจ่ายก๊าซไฮโดรเจนโดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Flow meter โดยไอระเหยของแอลกอฮอล์จะรวมกับก๊าซไฮโดรเจนที่ท่อรวมก๊าซดังรูปที่ 3.2
3. ค่อยๆเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับไส้หลอดทั้งสแตนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของไส้หลอดจนมีอุณหภูมิประมาณ $2,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วจึงปรับระยะห่างระหว่างแผ่นพอร์ซเซิลิกอนกับไส้หลอดทั้งสแตนให้มีระยะห่างประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยสามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ตามระยะเวลาที่ต้องการ

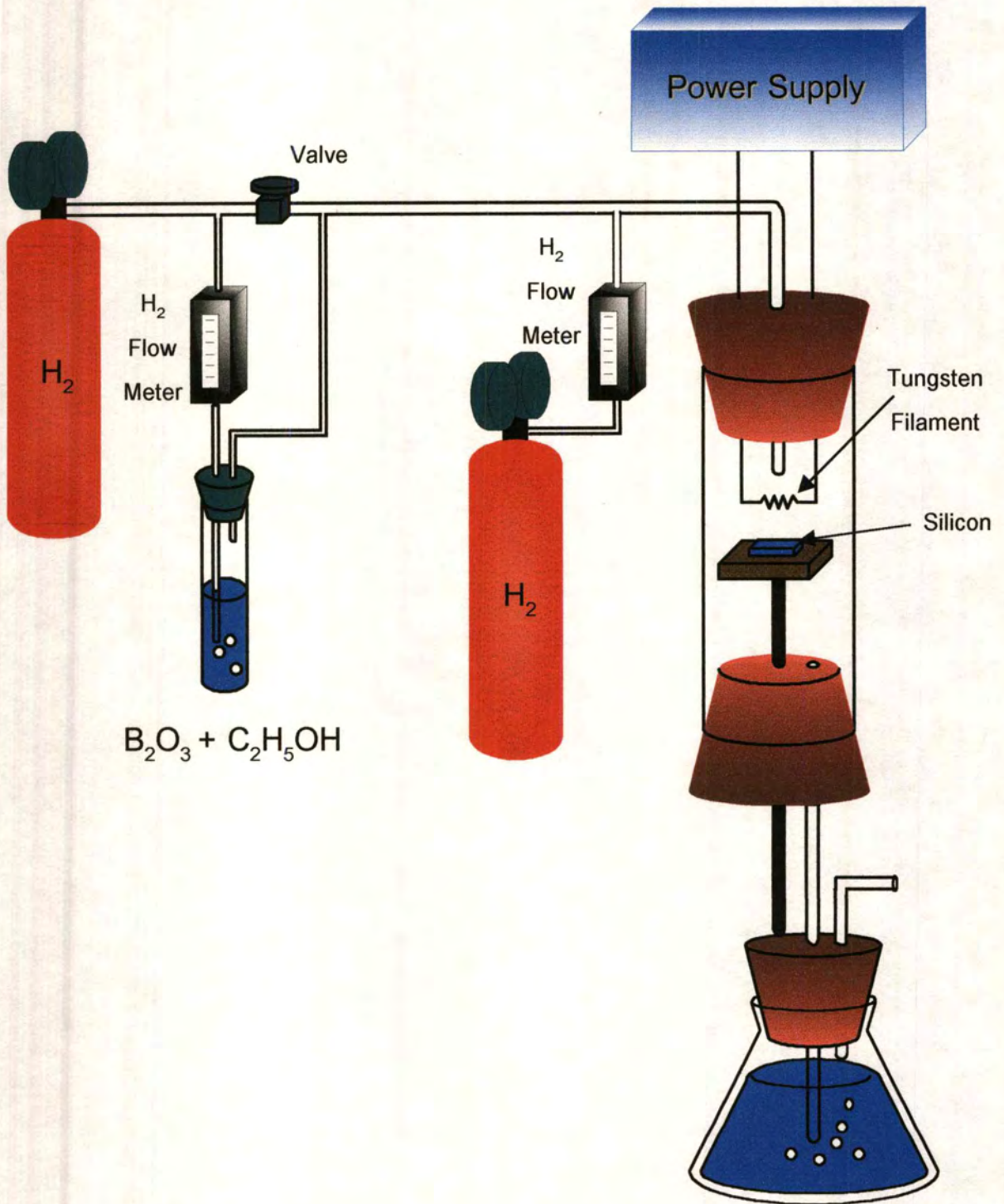
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อครบระยะเวลาที่ต้องการสร้างฟิล์มเพชรแล้วค่อยๆลดระยะห่างระหว่างแผ่นพอร์ซซีลิกอนกับไส้หลอดทั้งสองประมาณ 3 เซนติเมตร จากนั้นค่อยๆลดกระแสไฟฟ้า แล้วจึงปิดแหล่งจ่ายก๊าซไฮโดรเจนทั้งสองถึง รอจนกระทั่งไม่มีก๊าซไฮโดรเจนค้างใน Chamber แล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปสู่กระบวนการถัดไป

3.2.2 กระบวนการทำความสะอาดฟิล์มเพชร

หลังจากที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเรียบร้อยแล้วฟิล์มเพชรที่ได้มีความสกปรกเนื่องจากเขม่าคาร์บอนหรือกราไฟต์จากกระบวนการสร้าง ขั้นตอนการทำความสะอาดมีดังนี้

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



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบ HFCVD ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

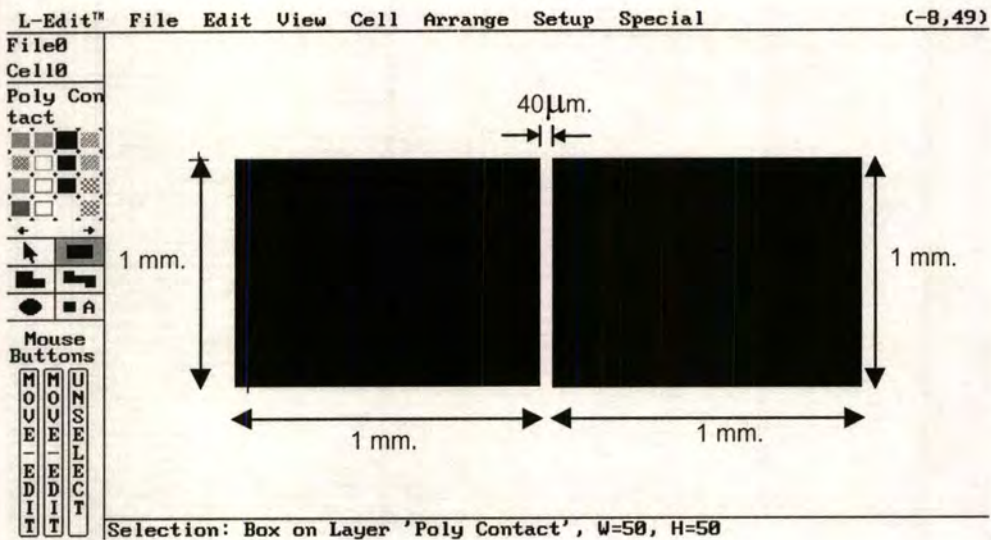
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

3.3.1 การออกแบบลวดลายโลหะ

3.3.1.1 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

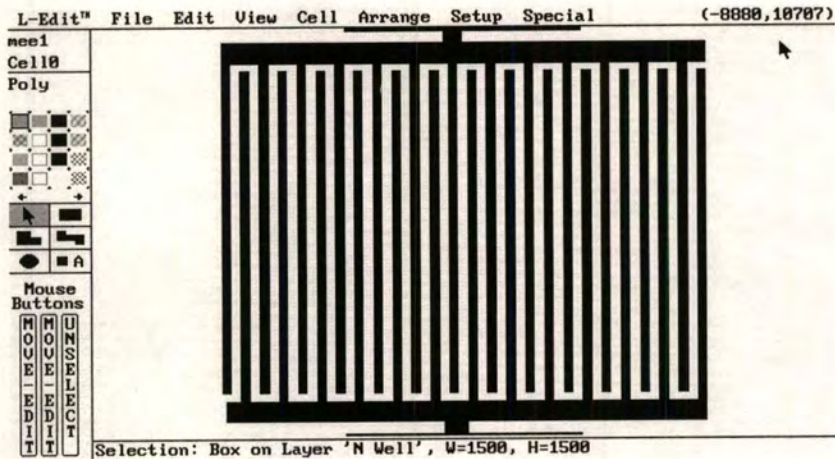
การออกแบบลวดลายโลหะโดยจะใช้โปรแกรม LEDIT หลังจากนั้นจะนำไปพิมพ์ลงแผ่นใส แล้วนำไปติดบนกระจก พร้อมทั้งจะนำเป็นมาร์กต้นแบบ เพื่อนำไปใช้สร้างลวดลายโลหะเพื่อศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชรชนิดพี ลักษณะลวดลายโลหะที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 3. โดยระยะห่างระหว่างขั้วโลหะทั้ง 2 คือ $40\ \mu\text{m}$. ความกว้างและความยาวของขั้วโลหะมีค่าเท่ากันคือ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



รูปที่ 3.4 ลักษณะลวดลายโลหะที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

3.3.1.2 การออกแบบลวดลายโลหะเพื่อใช้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะที่มีผลต่อการไหลของกระแสในฟิล์มเพชร

เนื่องจากเพชรที่สร้างได้นั้นจะมีลักษณะเป็นโพสิคริสตรอล ซึ่งจะมีขอบของเกรนเกิดขึ้น ซึ่งขอบของเกรนนี้จะเป็นตัวกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนเดินทางได้สะดวก หรือจะทำตัวเป็นศูนย์กลางการแพร่ของอิเล็กตรอน การแพร่ของอิเล็กตรอน จะทำให้กระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงที่จะไหลออกสู่วงจรรายนอกนั้นมีความน้อย ดังนั้นการทำลวดลายโลหะนั้นจำเป็นต้องทำให้มีขนาดระยะห่างแคบๆ เพื่อป้องกันการเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล ในการออกแบบลวดลายโลหะที่จะศึกษาในครั้งนี้ก็เพื่อจะดูว่าขนาดของระยะห่างระหว่างลวดลายโลหะที่เหมาะสมที่จะทำให้กระแสไหลในฟิล์มเพชรได้ดีนั้นจะมีขนาดเท่าไร ซึ่งลวดลายจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะลวดลายโลหะที่ใช้ศึกษาระยะห่างระหว่างลวดลายที่มีผลต่อการไหลของกระแสในฟิล์มเพชร

โดยขนาดของลายโลหะจะมีขนาดคงที่คือ $40\ \mu\text{m}$ โดยมีพื้นที่รับแสงเท่ากันหมดคือ $2.3\ \text{mm}^2$ โดยทำการออกแบบระยะห่างระหว่างลวดลายคือ $40\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$, $80\ \mu\text{m}$ และ $100\ \mu\text{m}$

3.3.2 การสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

หลังจากที่ทำการสร้างฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซลิคอนแล้วต้องทำการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชรเพื่อนำมาศึกษาคุณสมบัติต่างๆ โดยจะใช้โลหะทองคำซึ่งรอยสัมผัสที่ได้จะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งวิธีการสร้างรอยสัมผัสทองคำมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

3.3.3 กระบวนการสร้างขั้วโลหะทองคำเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม

เพชร

กระบวนการสร้างขั้วโลหะทองคำเพื่อการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆของฟิล์มเพชรเช่น ความต้านทาน สภาพนำไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

- นำแผ่นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.1 ไปทำการสังเคราะห์ชั้นของฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์ แล้วทำความสะอาดฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2.2

- ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.1

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

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

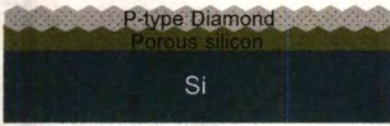
โดยแผนภาพกระบวนการสร้างแสดงดังรูปที่ 3.6



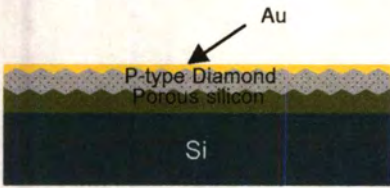
แผ่นซิลิกอนระนาบ 111 ที่ทำความสะอาดเบื้องต้น



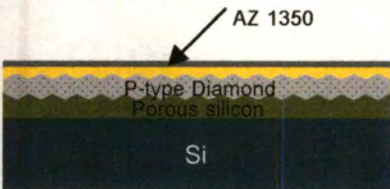
ทำการสร้างชั้นพอร์ซิลิกอน



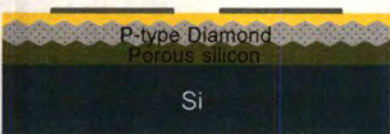
สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่ายเป็น สารละลาย $C_2H_5OH + B_2O_3$



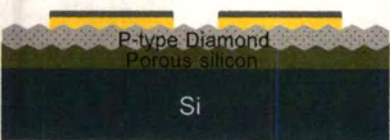
เคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporate



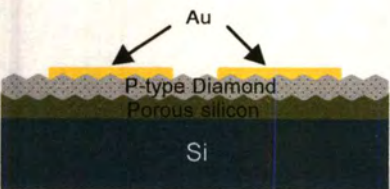
เคลือบน้ำยาไวแสง AZ1350 ด้วยเครื่อง Spinner



ใช้กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายโลหะที่ต้องการ



ลอกทองคำส่วนที่ไม่ต้องการด้วย $HCl + HNO_3$



ลอก AZ1350 ส่วนที่เหลือด้วย Acetone จะได้ลวดลายโลหะทองคำที่ต้องการ

รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างขั้วโลหะทองคำเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์มีขั้นตอนดังนี้

- นำแผ่นพอลิซิลิกอนที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.1 ไปทำการสังเคราะห์ชั้นของฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสารละลายผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์ แล้วทำความสะอาดฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2.2

- ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

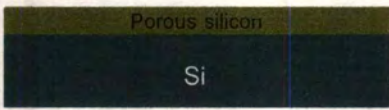
- ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด $\text{HCl} + \text{HNO}_3$

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

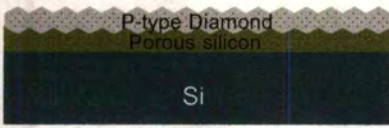
โดยแผนภาพกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.7



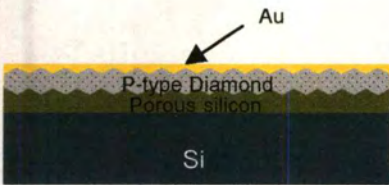
แผ่นซิลิกอนระนาบ 111 ที่ทำความสะอาดเบื้องต้น



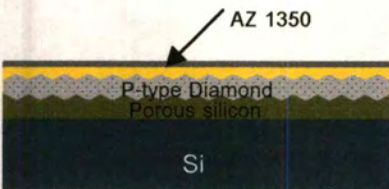
ทำการสร้างชั้นพอร์ซิลิกอน



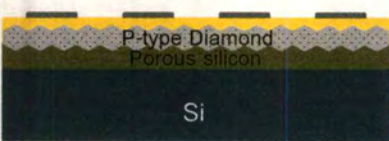
สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่ายเป็น สารละลาย $C_2H_5OH + B_2O_3$



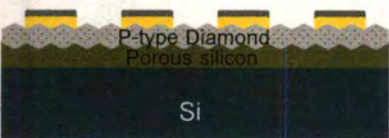
เคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporate



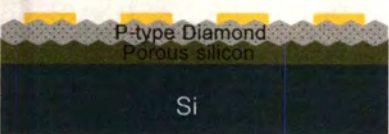
เคลือบน้ำยาไวแสง AZ1350 ด้วยเครื่อง Spinner



ใช้กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายโลหะที่ต้องการ



ลอกทองคำส่วนที่ไม่ต้องการด้วย $HCl+HNO_3$



ลอก AZ1350 ส่วนที่เหลือด้วย Acetone

รูปที่ 3.7 แผนภาพกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่าง ๆ

3.4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

เพื่อเป็นการหาค่าต่างๆ คือ ความต้านทาน สภาพความต้านทานไฟฟ้า จำนวนโฮล จำนวนอะตอมสารเจือปน และค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชร โดยมีขั้นตอนดังนี้

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2.1 บนแผ่นซิลิกอน โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโบรอนต่อแอลกอฮอล์ (B:C) ที่ 1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm แล้วทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2

-ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.1

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

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

-ทำการวัดค่าคุณสมบัติกระแสและแรงดันแล้วคำนวณหาค่าความต้านทาน สภาพความต้านทานไฟฟ้า จำนวนโฮล จำนวนอะตอมสารเจือปน และค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชร

3.4.2 การศึกษาระยะห่างรอยละลายโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าผลของขอบเกรนมีผลทำให้อายุเวลาของอิเล็กตรอนและโฮลสั้นลง และการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกกักไว้บริเวณขอบของเกรนทำให้เกิดกระแสที่เกิดจากแสงเกิดการรวมตัวกันก่อนที่จะถึงขั้วโลหะ จึงทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลออกมาน้อยกว่าปกติ จึงจำเป็นต้องสร้างรอยละลายโลหะให้มีระยะห่างน้อย แต่ต้องคำนึงถึงด้วยว่ารอยละลายโลหะที่ถี่มากขึ้นก็จะเป็นการลดพื้นที่รับแสงไปในตัว โดยการทดลองเป็นดังนี้

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรตามหัวข้อ 3.2.1 บนแผ่นซิลิกอน โดยใช้อัตราส่วนของโบรอนต่อแอลกอฮอล์ (B:C) 1000ppm แล้วทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2

-ทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

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

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

-ทำการวัดข้อมูลโดยใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนด์และหลอดUV ที่ความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1000 lux

-ลอกโลหะทองคำจากชิ้นงานเดิมออกแล้วทำตามขั้นตอนเดิมทุกอย่างเพียงแต่เปลี่ยนค่าระยะห่างของลวดลายโลหะเป็น 60 μm , 80 μm และ 100 μm

3.5 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

3.5.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โดยมีขั้นตอนดังนี้

-ล้างคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอน เป็นเวลา 40 นาที โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน B:C เป็น 1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

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

-ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 cc/min เป็นเวลา 15 นาที

-ทำการวัดข้อมูลโดยใช้เครื่อง HP 4061(Semiconductor/Component Test System) ซึ่งควบคุมการวัดด้วยโปรแกรมHPVEE

3.5.2 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

-ล้างคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอน เป็นเวลา 40,50,60และ70นาที เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 2 μm , 3 μm , 4 μm และ 5 μm โดยใช้ค่าอัตราส่วน B:C ที่ 1000 ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

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

-ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 cc/min เป็นเวลา 15 นาที

-ทำการวัดข้อมูลโดยใช้เครื่อง HP 4061(Semiconductor/Component Test System) ซึ่งควบคุมการวัดด้วยโปรแกรมHPVEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

System) ซึ่งควบคุมการวัดด้วยโปรแกรมHPVEE

3.5.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอน เป็นเวลา 40 โดยใช้ค่าอัตราส่วน B:C ที่ 1000 ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

-ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด HCl+HNO₃

-ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 cc/min เป็นเวลา 15 นาที

-ทำการวัดข้อมูลโดยใช้เครื่อง HP 4061(Semiconductor/Component Test System)ซึ่งควบคุมการวัดด้วยโปรแกรมHPVEE โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง เป็น 1000lux, 3000lux, 5000lux, 7000lux, 9000lux และ 11000lux โดยใช้แสงจากหลอดทั้งสแตน

3.5.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอน เป็นเวลา 40 โดยใช้ค่าอัตราส่วน B:C ที่ 1000 ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

-ทำการลอกทองส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้ส่วนผสมของกรด HCl+HNO₃

-ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 cc/min เป็นเวลา 15 นาที

-ทำการวัดข้อมูลโดยใช้เครื่อง HP 4061(Semiconductor/Component Test System)ซึ่งควบคุมการวัดด้วยโปรแกรมHPVEE โดยเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เป็น 50°C ,100°C, 150°C และ200°C

3.6 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

3.6.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอน เป็นเวลา 40 นาที โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน B:C เป็น 1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ

3.3.1.2

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

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

-ทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เครื่อง Solar Simulator ที่ความเข้มแสง 11000 lux

3.6.2 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอน เป็นเวลา 40, 50, 60 และ 70 นาที โดยใช้อัตราส่วน B:C เป็น 100ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ

3.3.1.2

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

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

-ทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เครื่อง Solar Simulator โดยให้ความเข้มแสงเป็น 1000 lux

3.6.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอน เป็นเวลา 40 นาที โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน B:C เป็น 1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

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

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

-ทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง เป็น 1000, 3000, 5000, 7000, 9000 และ 11000 lux

3.6.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

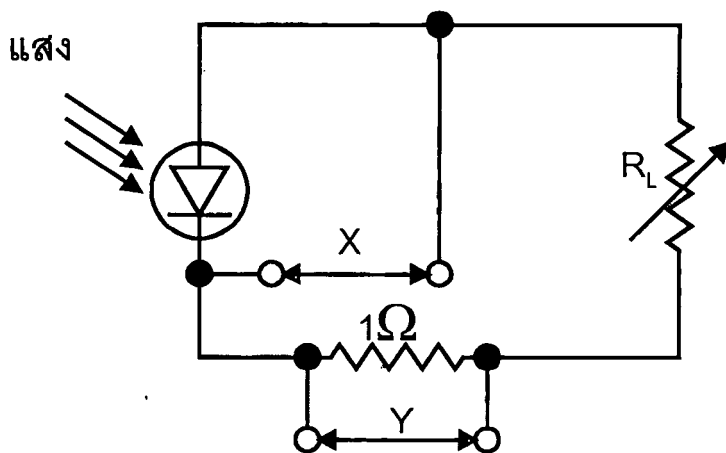
-สังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นพอร์ซเซิลิกอน เป็นเวลา 40 นาที โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วน B:C เป็น 1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm

-นำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดตามหัวข้อ 3.2.2 แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำในสุญญากาศ แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้กระจกต้นแบบที่สร้างได้จากหัวข้อ 3.3.1.2

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

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

-ทำการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ความเข้ม 11000 lux โดยต่อวงจรการวัดเป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรการวัดคุณสมบัติกระแสไฟฟ้าและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

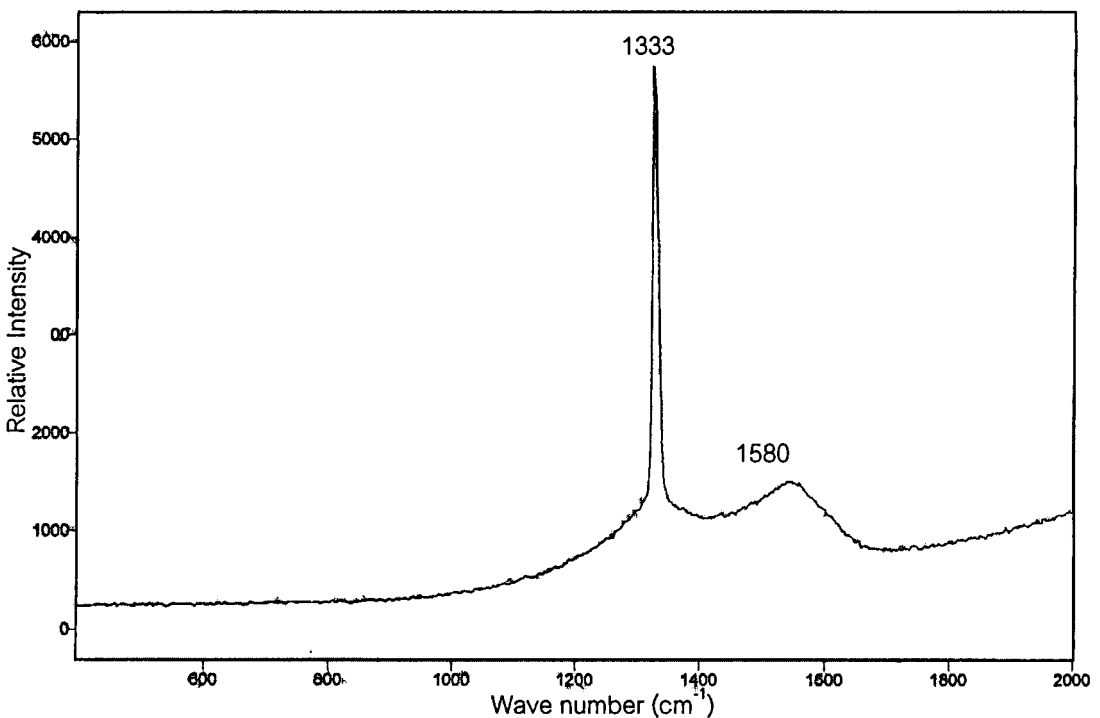
บทที่ 4

ผลการทดลอง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างและการกำหนดเงื่อนไขการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ จากบทที่ 3 แล้ว ในบทนี้จะเป็นการเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

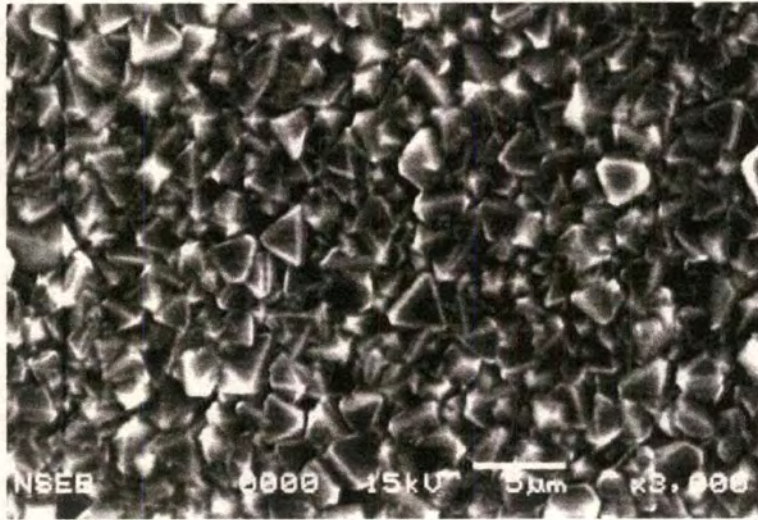
ก่อนที่จะนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยอาศัยเทคนิค Scanning Electron Microscopy และ Raman Spectroscopy โดยผลการตรวจสอบ Raman Spectroscopy แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรชนิดพี

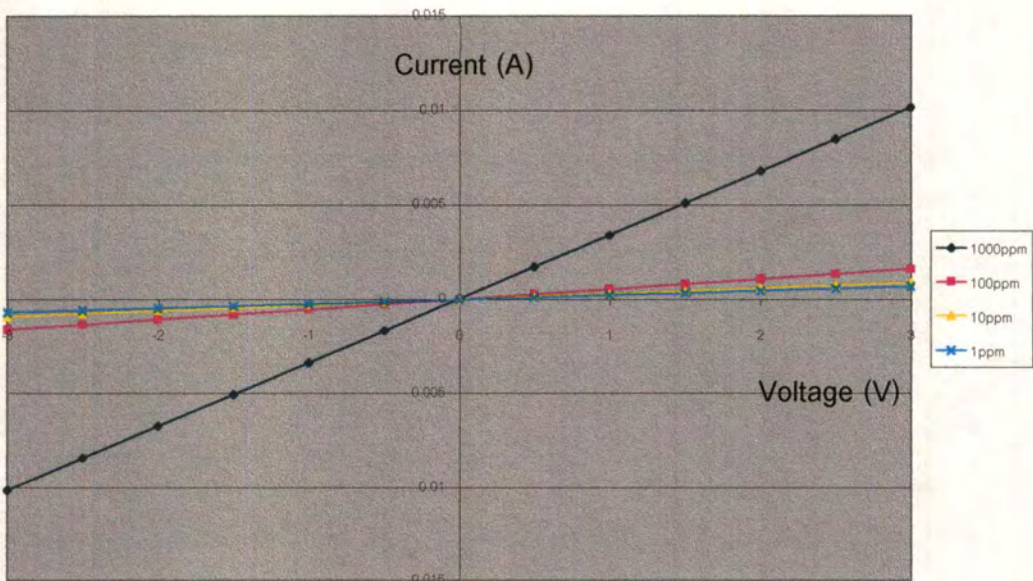
จากรูปที่ 4.111 จะเห็นว่ายอดคลื่นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 1333 cm^{-1} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งยอดคลื่นของเพชรธรรมชาติที่ 1332 cm^{-1} ซึ่งถือได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะใกล้เคียงเพชรจริง ซึ่งจากกราฟยังจะเห็นว่า มียอดคลื่น 1580 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของกราฟาไฟต์ แต่มีความสูงต่ำแสดงว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีกราฟาไฟต์ปะปนอยู่ในปริมาณต่ำใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นก็ให้นำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปทำการตรวจสอบด้วยวิธี Scanning Electron microscopy ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวระนาบ(111)ของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

4.2 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.3 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรตามวิธีการในหัวข้อ 3.4.1 ได้ผลดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าฟิล์มเพชรชนิดพีจะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่ออัตราส่วน B:C มีค่าเพิ่มขึ้น จากกราฟที่ได้สามารถคำนวณค่าความต้านทาน(Resistance:R), ค่าพิกัดความต้านทาน (Resistivity:σ),ค่าความหนาแน่นประจุโฮล(Hole carrier density), ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิเทียบกับระดับวาเลนซ์ (E_F-E_V)และค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือโบรอน(N_A) โดยฟิล์มเพชรมีความหนา 2 μm และระยะระหว่างขั้วโลหะคือ 40 μm

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{1}{q\mu_h p} = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) \quad (2)$$

$$N_A = p \left[1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{kT}\right) \right] \quad (3)$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi kT m_h^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรพื้นฐานต่างๆของฟิล์มเพชรชนิดพีที่ได้จากการทดลอง

	1ppm	10ppm	100ppm	1000ppm
R(Ω)	4335	3296	1875	294
ρ(Ω.cm)	98	74	42	6.68
p(cm ⁻³)	1.27×10 ¹⁶	1.69×10 ¹⁶	2.98×10 ¹⁶	1.89×10 ¹⁷
$E_F - E_V$ (eV)	0.159	0.151	0.137	0.089
N_A (cm ⁻³)	1.38×10 ¹⁹	2.50×10 ¹⁹	7.56×10 ¹⁹	3.06×10 ²¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการศึกษาระยะห่างลวดลายโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร

เมื่อทำการศึกษาค่าตัวแปรพื้นฐานต่างๆของฟิล์มเพชรชนิดพีแล้ว ต่อไปจะเป็นการศึกษาผลของระยะห่างลวดลายโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชร จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นโพลีคริสตอล ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างมากโดยบริเวณของขอบเกรนนี้จะเป็นตัวการทำให้อายุพหามีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณการไหลของกระแสมีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องศึกษาระยะระหว่างขั้วโลหะที่เหมาะสมที่ทำให้กระแสไหลได้มากที่สุด โดยการทดลองจะใช้แสงจากหลอดทังสเตนที่มีความเข้มแสง 1000 lux โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชิ้นงาน 3V ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาระยะระหว่างขั้วโลหะ

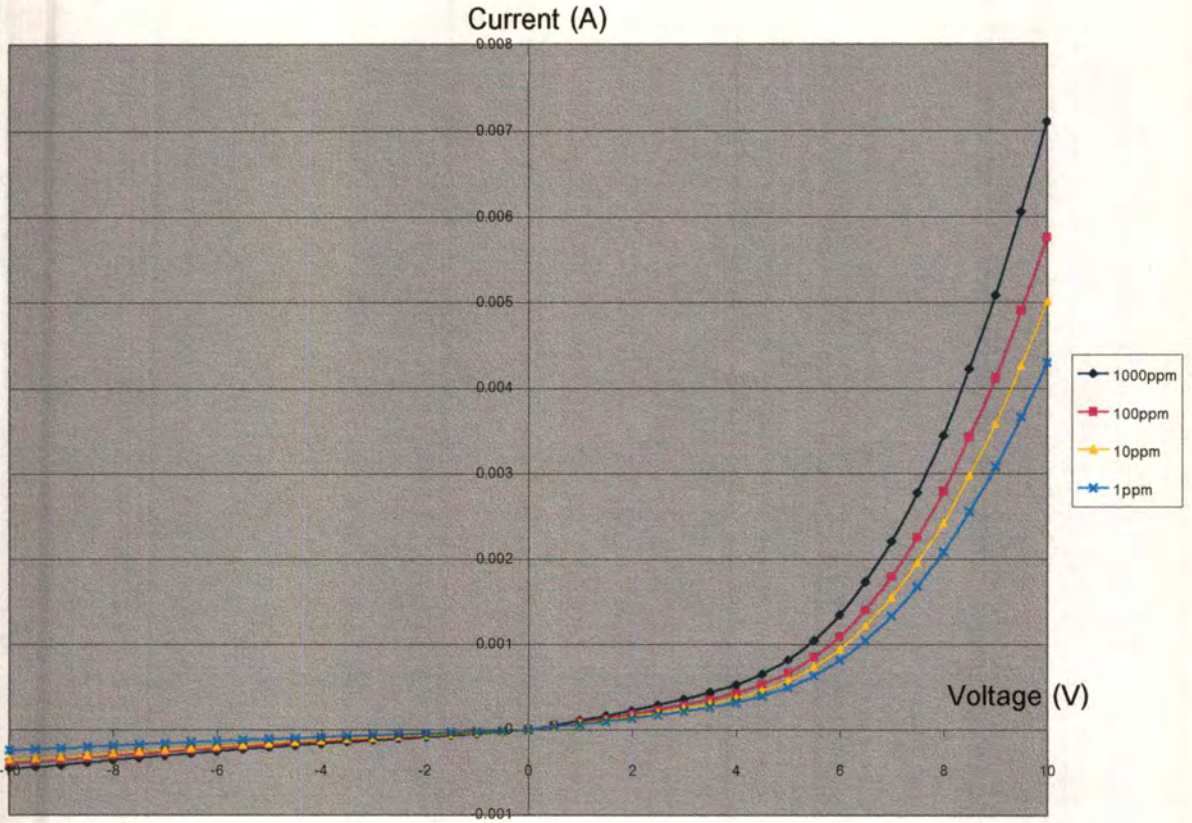
ระยะห่าง (μm)	I_{Dark} (mA)	I_{Tungstan} (mA)
40	9.11	9.23
60	5.31	5.47
80	3.47	3.51
100	2.13	2.18

จากผลการทดลองจะเห็นว่าระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสโลหะที่ 40 μm จะได้กระแสที่เกิดจากแสงที่มากที่สุด เนื่องจากเมื่อแสงตกกระทบฟิล์มเพชรจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างอิสระก่อนที่จะรวมตัวกับโฮล แต่ถ้ามีสนามไฟฟ้ามากระทำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยผลของสนามไฟฟ้าแล้วจึงรวมตัวกับโฮลเหมือนกัน การรวมตัวนี้จะมีน้อยลงเมื่อระยะระหว่างขั้วโลหะมีค่าน้อย

4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

หัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของอะตอมสารเจือโบรอนที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้างระหว่างพอร์สซิลิกอนและฟิล์มเพชร โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือเป็น 1ppm, 10ppm, 100ppm และ1000ppmโดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพอร์ซนิตพีเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า B:C

โดยจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอด เราสามารถหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของโฟโตไดโอดได้ โดย

$$I = I_S \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) \quad (5)$$

หรือ

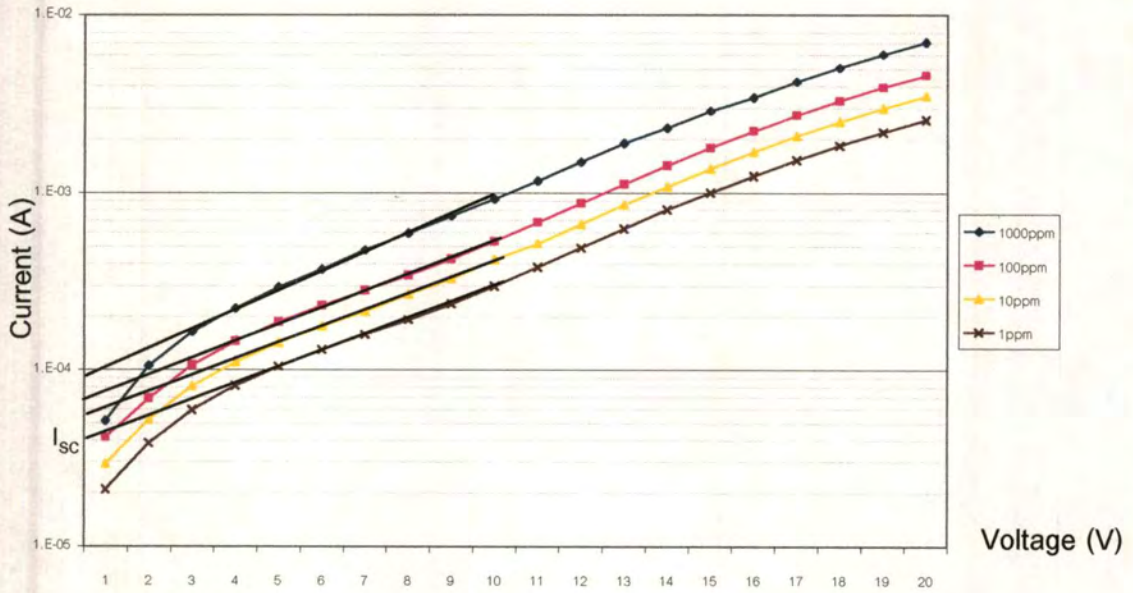
$$\ln I = \ln I_S + \frac{qV_A}{kT} \quad (6)$$

เมื่อ $V_A=0$ หรือสภาวะสมดุลความร้อนจะได้

$$\ln I = \ln I_S \quad (7)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ($\ln I$) กับแรงดันไบอัสตรง (V_A) ดังรูปที่ 4. จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งจะสามารถหาค่า I_S โดยเมื่อ $V_A = 0$ หรือสภาวะสมดุลความร้อนจะได้ค่ากระแสมีค่าเท่ากับ I_S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



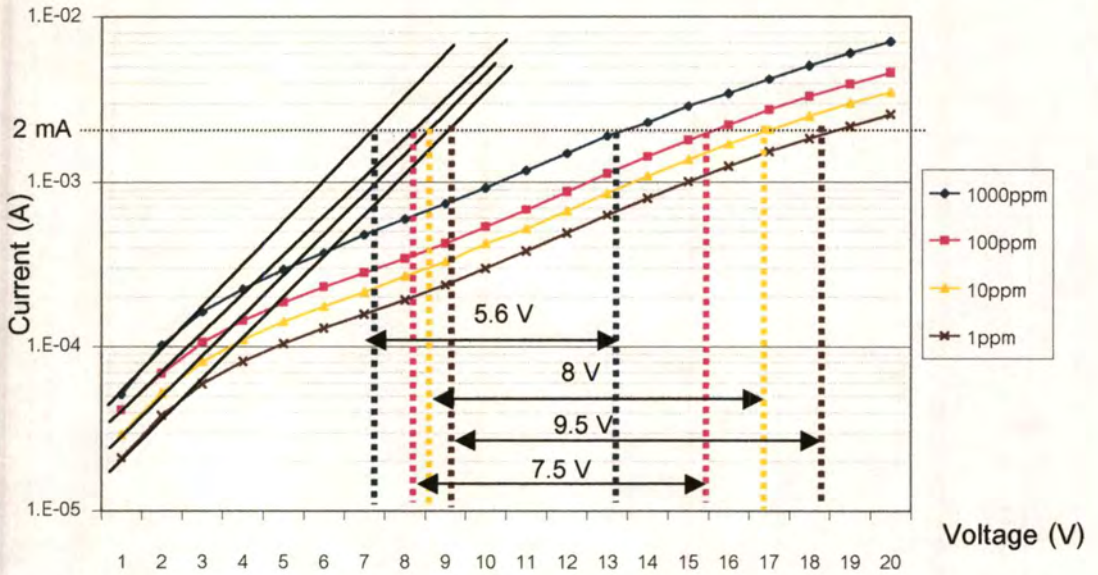
รูปที่ 4.5 คุณลักษณะกึ่งล็อกกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนค่า B:C

จากรูปที่ 4.5 เราสามารถหาค่า I_s เมื่อค่าอะตอมสารเจือปนที่ค่าต่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งจากตารางจะเห็นว่าค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอะตอมสารเจือมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่าของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือปนที่ค่าต่างๆ

B:C	I_s (μA)
1ppm	40
10ppm	50
100ppm	70
1000ppm	100

จากรูปที่ 4.4 สามารถหาค่า R_s ของไดโอด ซึ่งค่า R_s นี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีการหาค่า R_s แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยค่า R_s ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.6 วิธีการหาค่า R_S เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือปน

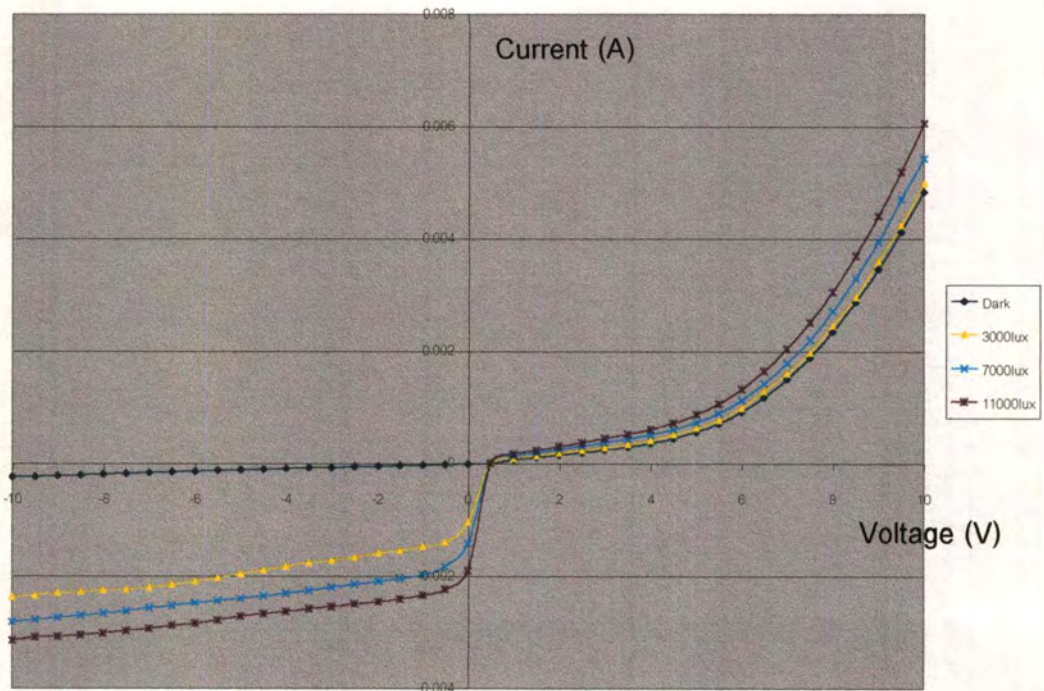
ตารางที่ 4.4 ค่า R_S เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือปน

B:C	I(mA)	$\Delta V(V)$	$R_S(\Omega)$
1ppm	2	9.5	4750
10ppm	2	8	4000
100ppm	2	7.5	3750
1000ppm	2	5.6	2850

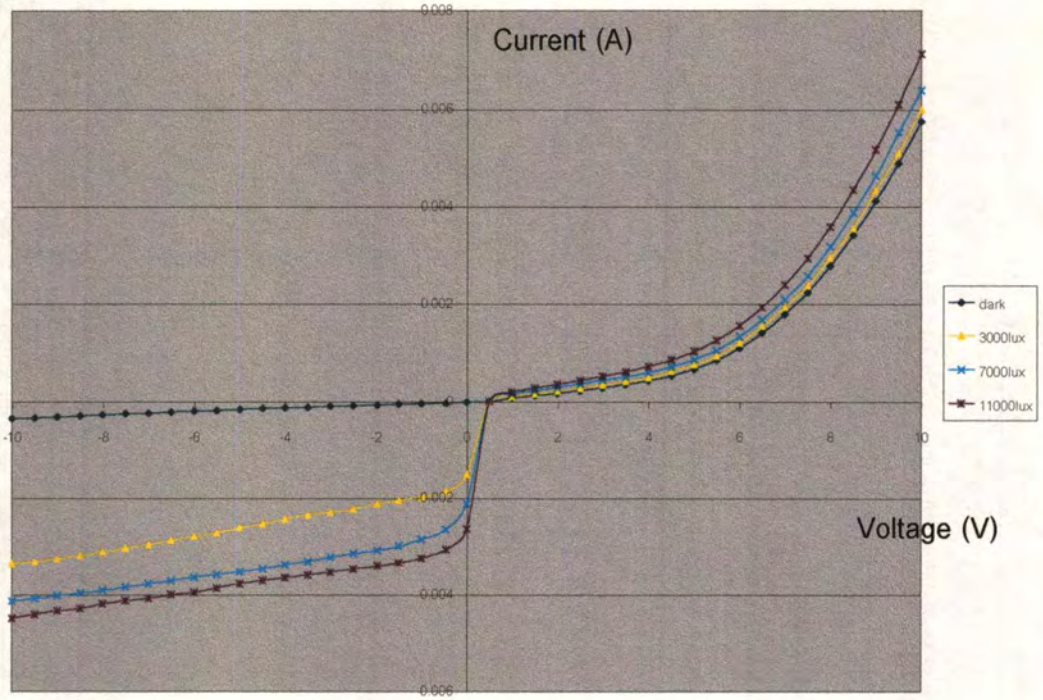
จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าค่า R_S จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเติมอะตอมสารเจือปน มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นต้องคำนึงถึงค่า R_S ด้วย โดยสามารถทำการเปลี่ยนแปลงค่า R_S โดยการเติมอะตอมสารเจือปน ซึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นค่าของ R_S จะต้องมิต่ำที่สุด ในอุดมคตินั้นค่าของ R_S ควรจะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ทั้งนี้ต้องระวังด้วยการเติมอะตอมสารเจือปนมากๆ นั้นจะทำให้เกิดกระแสในตัวไหลย้อนกลับมากขึ้นก็จะส่งผลเสียให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน

4.3.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

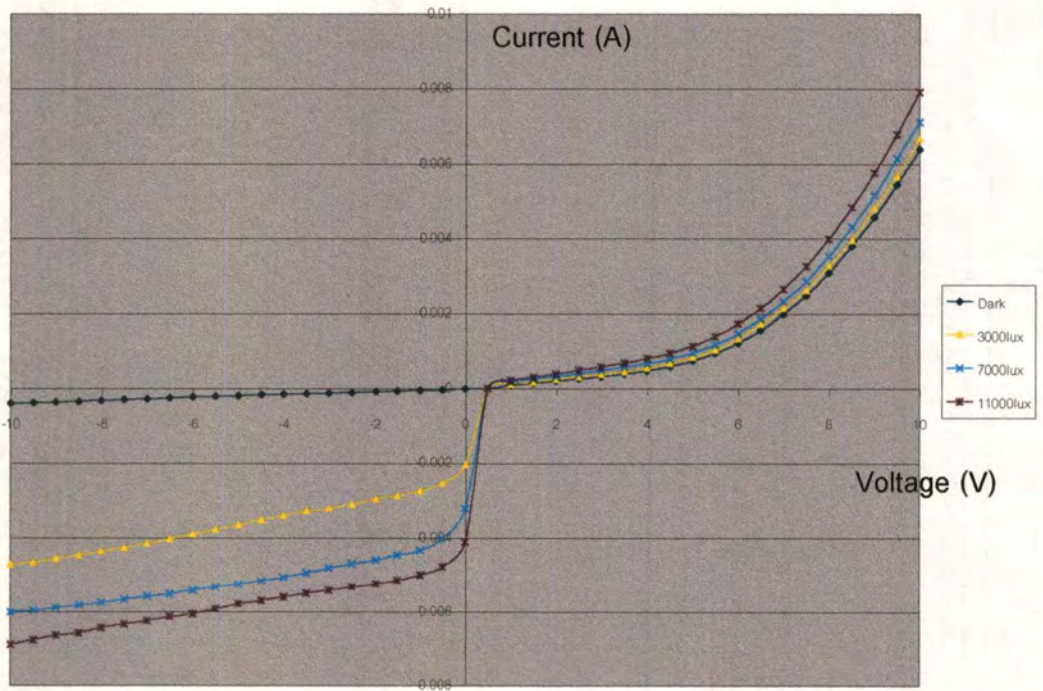
หัวข้อนี้เป็นผลการศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด ซึ่งใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงเป็น 3000lux, 7000lux และ 11000lux โฟโตไดโอดที่ใช้ศึกษาจะมีความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีเป็น $2\mu\text{m}$ และเปลี่ยนแปลงค่าอะตอมสารเจือเป็น 1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm ซึ่งแสดงตามรูปที่ 4.7-4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มของอะตอมสารเจือโบรอนเป็น 1ppm

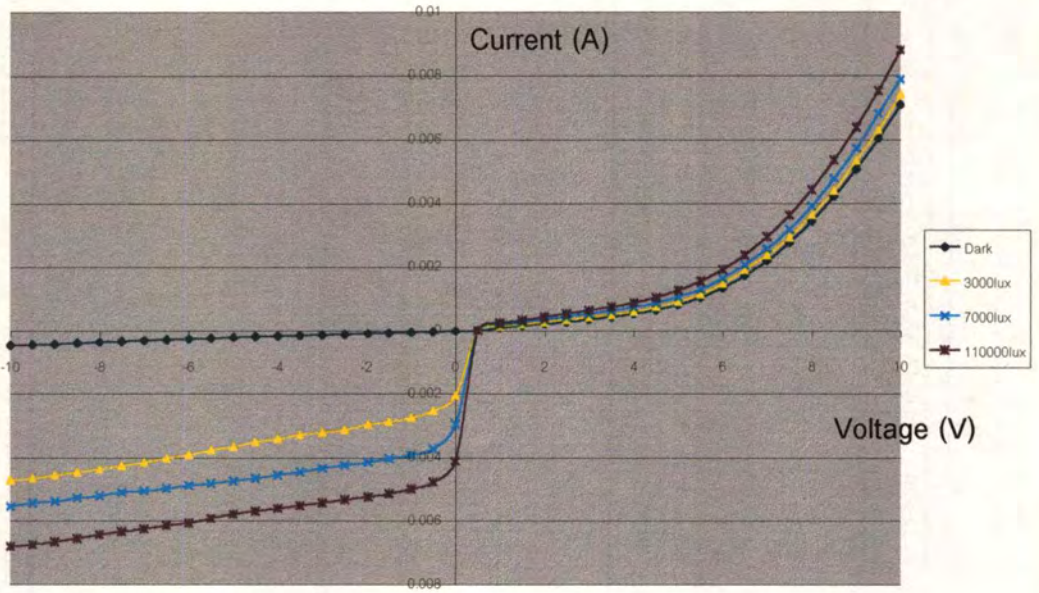


รูปที่ 4.8 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไอโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ
โบรอนเป็น 10PPM



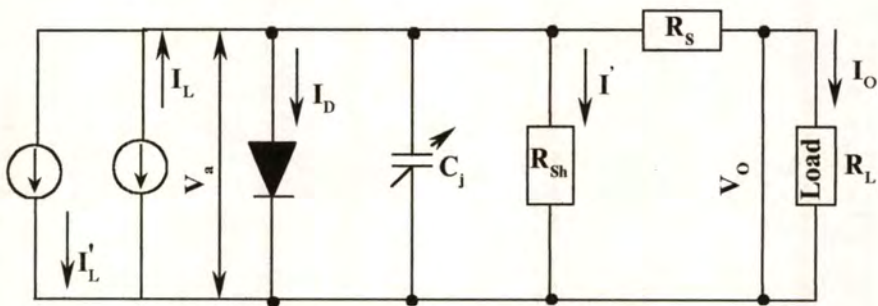
รูปที่ 4.9 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไอโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ
โบรอนเป็น 100PPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนเป็น 1000PPM

จากรูปที่ 4.7-4.10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าของความเข้มแสงจากหลอดทั้งสแตน ปริมาณกระแสช่วงไบอัสย้อนกลับมีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในช่วงไบอัสตรงนั้นปริมาณกระแสก็มีค่าเพิ่มขึ้นแต่น้อยกว่าช่วงไบอัสย้อนกลับ ในการอธิบายผลการทดลองนั้นสามารถอธิบายได้โดยอาศัยวงจรสมมูลของรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน ซึ่งได้มีการนำเสนอวงจรสมมูลแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน แสดงดังรูปที่4.



รูปที่ 4.11 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่ามีค่าของ I'_L ซึ่งเป็นค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะโดยมีทิศทางตรงข้ามกับ I_L ดังนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_0 = I_L - I_D - I' - I'_L = I_L - I_S \left(\exp \frac{qV_A}{kT} - 1 \right) - I' - I'_L \quad (8)$$

เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงบริเวณปลอดประจุพาหะจะแคบลงและศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจะมีค่าลดลง ดังนั้นประจุพาหะที่เกิดจากแสงนอกช่วงปลอดประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้ประจุพาหะส่วนมากเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อมีการให้ไบอัสตรงและทำการฉายแสงจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเออร์ทพุตไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้นสมการ (8) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$I_0 = -I_S \left(\exp \frac{qV_A}{kT} - 1 \right) - I' - I'_L \quad (9)$$

สมการที่ 9 สามารถตัดค่าของ I_L ได้เนื่องจากมีค่าน้อยซึ่งเกิดจากการที่โฟโตไดโอดได้รับการไบอัสตรงนั้นจะทำให้บริเวณปลอดประจุพาหะมีค่าน้อยลงและสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดประจุพาหะมีค่าน้อยลง โดยกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมากและการเคลื่อนที่ของประจุพาหะบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะ ดังนั้นเมื่อให้การไบอัสตรงพร้อมกับฉายแสงที่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นทำให้ได้กระแสออกมาเพิ่มขึ้น

ในกรณีการไบอัสย้อนกลับพร้อมกับการฉายแสง กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการ

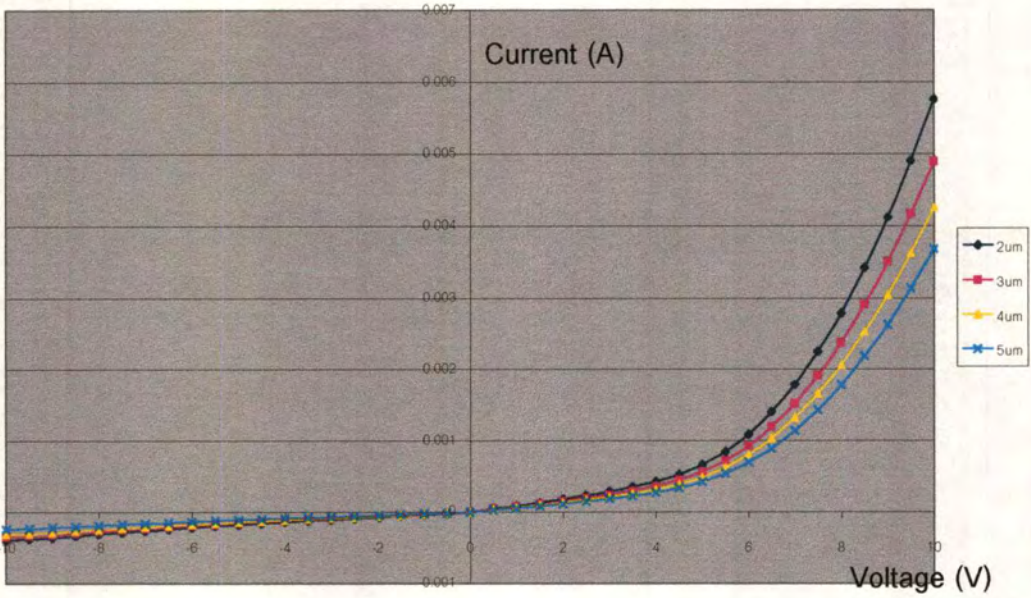
$$I_0 = I_L - I_S - I' - I'_L \quad (10)$$

กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณช่วงปลอดประจุพาหะ ค่าของ I'_L จึงสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากประจุพาหะที่เกิดนอกบริเวณนอกช่วงปลอดประจุพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ เนื่องจากกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ

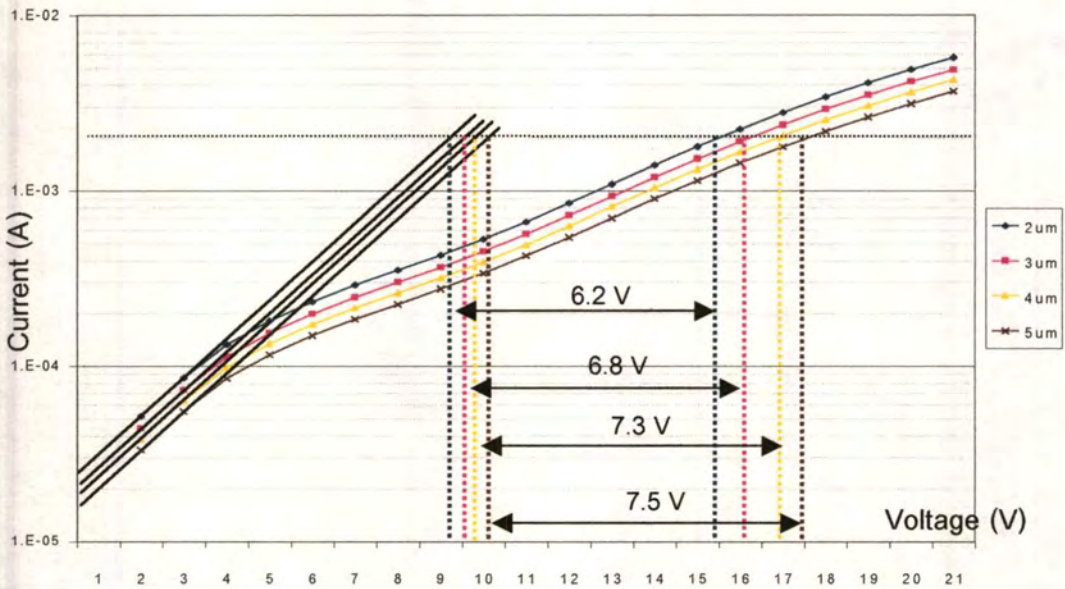
4.3.3 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด โดยการทดลองจะใช้โฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือโบรอนเป็น 100 ppm โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาเป็น $2\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ และ $5\mu\text{m}$ ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูป ที่ 4.12 -4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเพชร



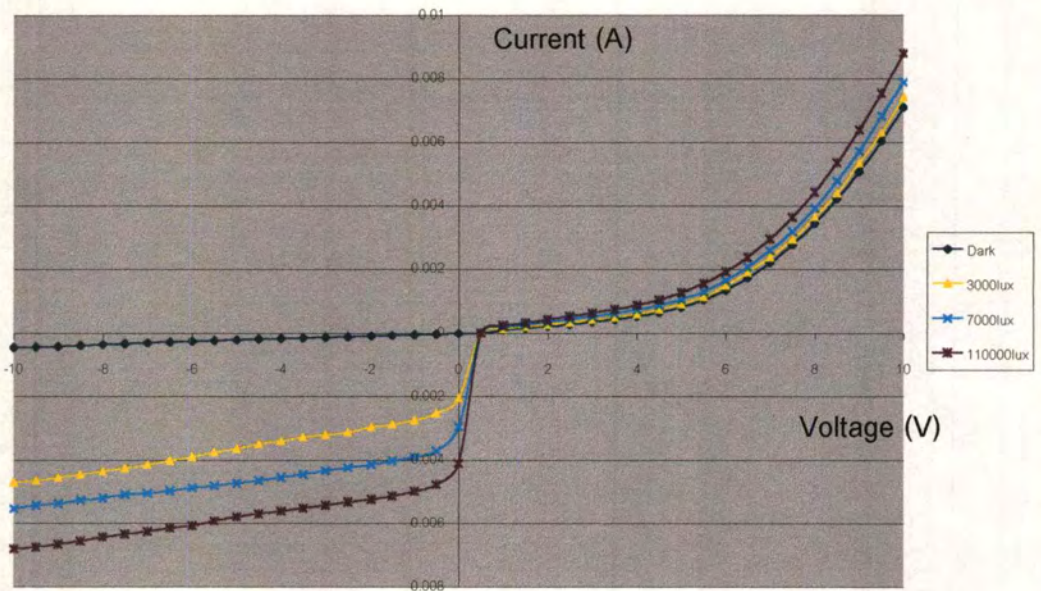
รูปที่ 4.13 คุณลักษณะกึ่งล็อกกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดกรณี B:C ที่ 100 ppm เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเพชรเพื่อหาค่า R_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

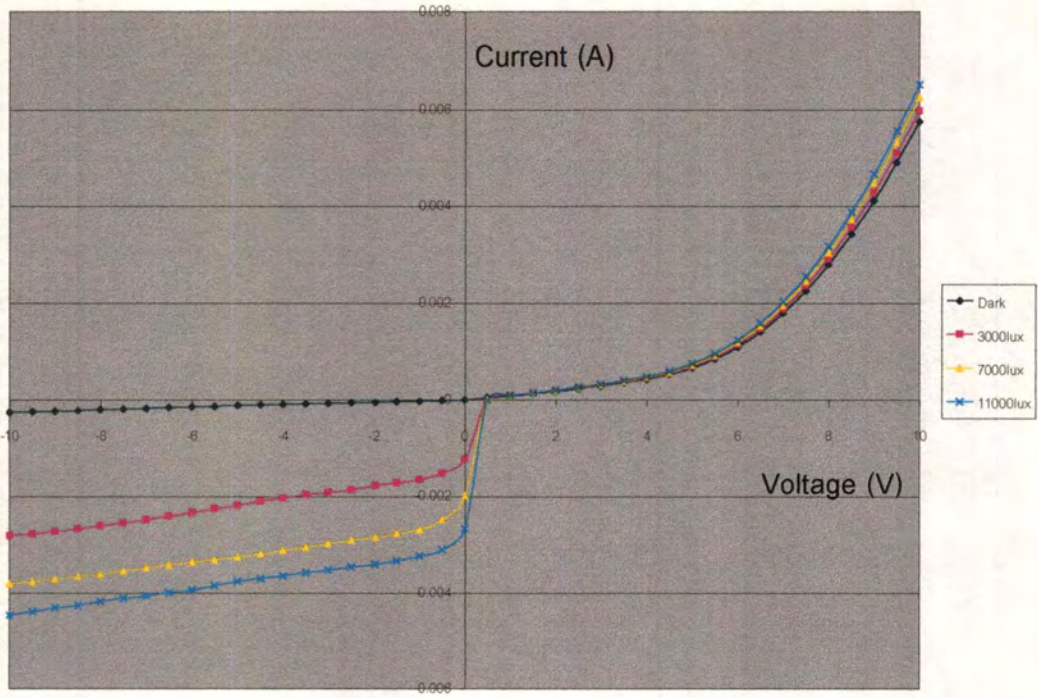
ตารางที่ 4.5 ตารางค่าของ R_s ของโฟโตไดโอดที่คำนวณจากรูปที่ 4.13

ความหนาของฟิล์มเพชร (μm)	R_s (Ω)
2	3100
3	3400
4	3650
5	3750

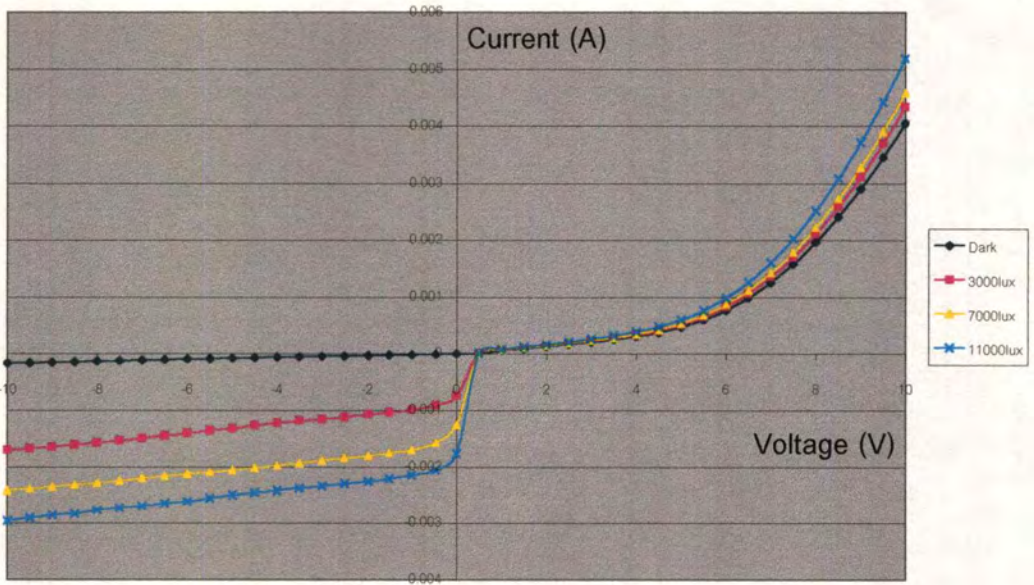
จากนั้นทำการฉายแสงจากหลอดทั้งสแตนโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเป็น 3000lux, 7000lux และ 11000lux ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14 –4.17



รูปที่ 4.14 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $2\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

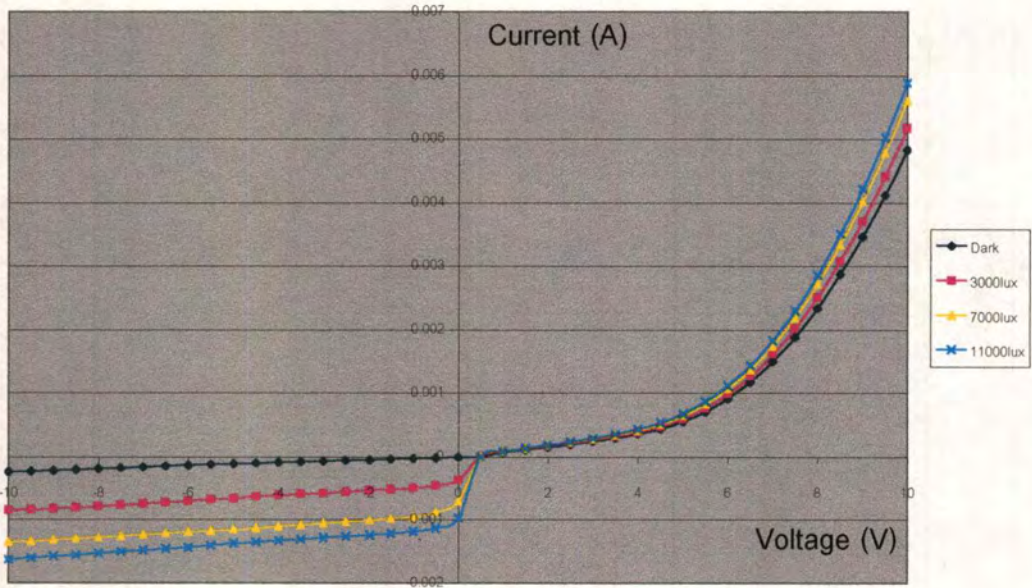


รูปที่ 4.15 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 3µm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 4.16 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรเป็น 4µm ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

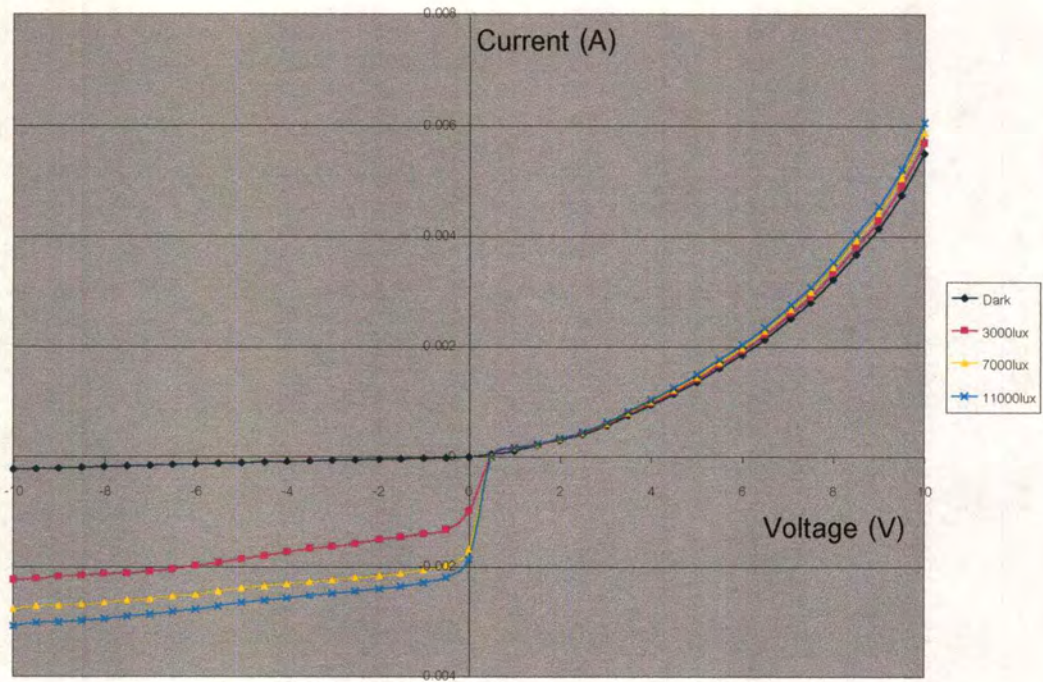


รูปที่ 4.17 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $5\mu\text{m}$ ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

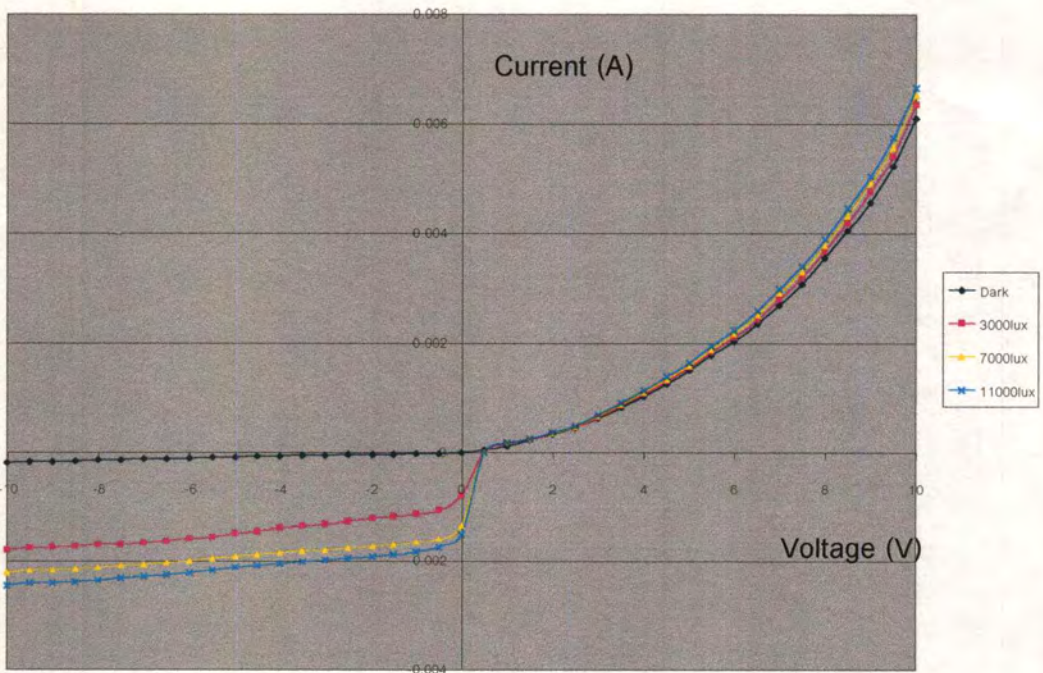
จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเมื่อฟิล์มเพชรชนิดที่มีค่าเพิ่มขึ้นค่า R_s จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าลดลง ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงจะมีค่าลดลง เนื่องจากฟิล์มเพชรที่มีความหนามากจะทำให้แสงทะลุถึงรอนต่อได้น้อยลงทำให้การเกิดประจุพาหะบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงกระแสไฟฟ้าที่ได้จึงน้อยลง

4.3.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด

ในหัวข้อนี้ใช้ฟิล์มเพชรที่มีความหนา $2\mu\text{m}$ โดยใช้อัตราส่วนของอะตอมสารเจือเป็น 1ppm โดยจะเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิเป็น 50°C , 100°C , 150°C และ 200°C แล้วทำการฉายแสงที่ความเข้มเป็น 3000lux, 7000lux และ 11000lux ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.18-4.21

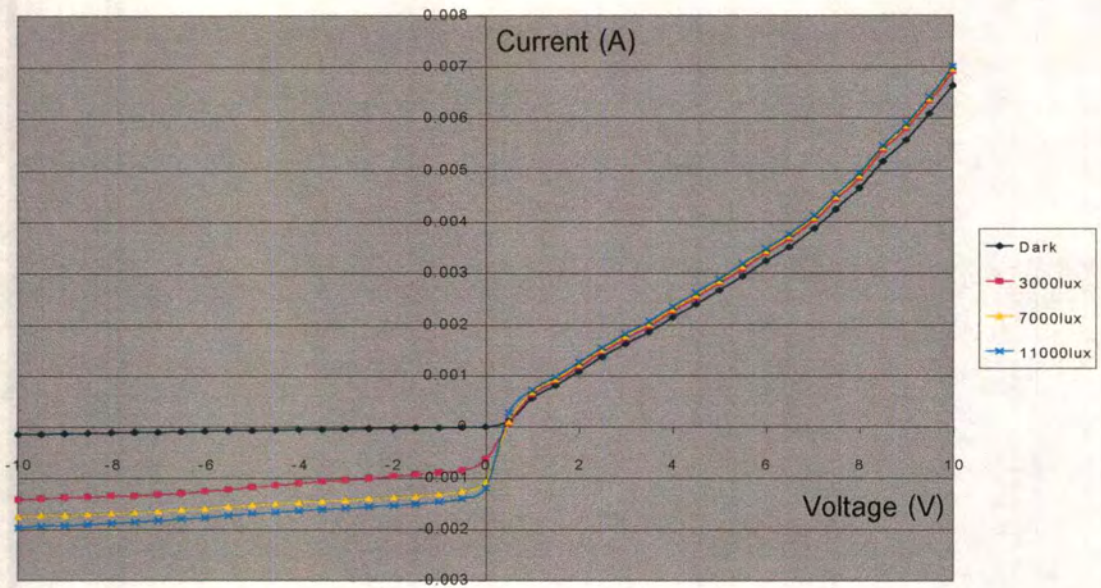


รูปที่ 4.18 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่ได้รับแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ

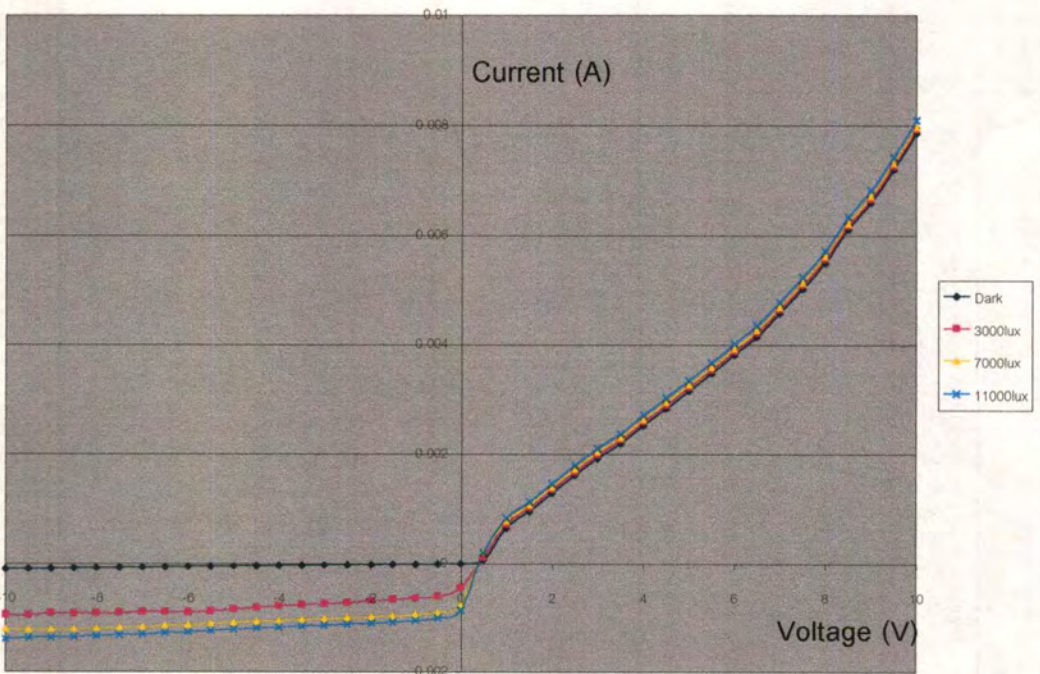


รูปที่ 4.19 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใน

ขณะที่ได้รับแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ นั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 4.21 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 200°C ในขณะที่ได้รับการฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อให้ไบอัสตรงกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นมาก สามารถอธิบายได้ด้วยแถบพลังงานของรอยต่อของเพชรและพอร์สซิลิกอนคือสารกึ่งตัวนำได้รับความร้อนนั้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลจำนวนมาก โดยพิจารณาว่าผลของอุณหภูมิมีผลต่อพอร์สซิลิกอนมากกว่าฟิล์มเพชรแล้วนั้นจะได้ว่า ที่พอร์สซิลิกอนนั้นจะเกิดโฮลและอิเล็กตรอนจำนวนมาก จะทำให้ค่าของระดับพลังงานเฟอร์มิชยับเข้าใกล้ระดับอินทรินซิกมากขึ้น ดังนั้น เมื่อยรอยต่อได้รับการไบอัสตรงนั้นกระแสโฮลที่ไหลจากฟิล์มเพชรนั้นจะไหลไปยังพอร์สซิลิกอนได้มากขึ้นเนื่องจากกำแพงศักย์ที่กั้นโฮลนั้นมีค่าน้อยลง และ อิเล็กตรอนที่ไหลจากพอร์สซิลิกอนและเกิดการรวมตัวกับโฮลที่ Interface state ทำให้เกิดกระแสเนื่องจากการรวมตัวนั้นมีค่ามากขึ้น ดังนั้นผลรวมของกระแสทางด้านกรไบอัสตรงนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

ขณะเมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับนั้นเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสที่ได้จะมีค่าน้อยลงนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะของทฤษฎีแถบพลังงานคือจะเกิดกำแพงศักย์ที่กั้นโฮลไม่ให้เคลื่อนที่ไปยังฟิล์มเพชรชนิดพีมากขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการฉายแสงให้กับรอยต่อนั้นแสงจะทะลุผ่านไปยังพอร์สซิลิกอนทำให้เกิดประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นซึ่งอิเล็กตรอนนั้นจะไหลไปยังด้านพอร์สซิลิกอนและโฮลนั้นจะไหลไปยังด้านฟิล์มเพชรชนิดพี โดยที่กำแพงศักย์ที่มากขึ้นเนื่องมาจากความร้อนนั้นจะเป็นตัวกั้นไม่ให้โฮลที่เกิดจากแสงนั้นเคลื่อนที่ไปยังฟิล์มเพชรชนิดพี ดังนั้นโฟโตไดโอดที่มีอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมสูงๆและได้รับการฉายแสงนั้นจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสทางด้านกรไบอัสย้อนกลับมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสทางด้านกรไบอัสย้อนกลับเมื่อมีอุณหภูมิต่ำๆ

4.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

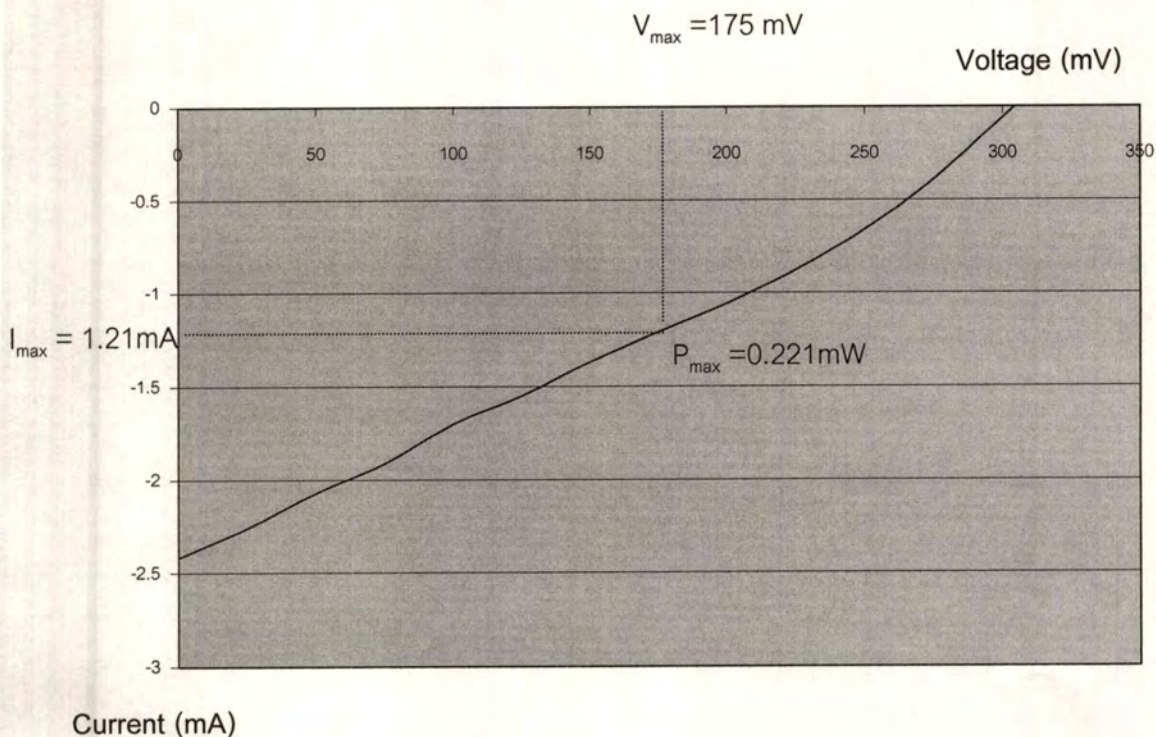
ในหัวข้อที่แล้วได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดกับเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกันแต่แตกต่างกันที่การใช้งาน ซึ่งโฟโตไดโอดนั้นจะใช้งานอยู่ในช่วงจตุภาคที่ 3 แต่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำงานอยู่ในจตุภาคที่ 4

4.4.1 ผลของความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การศึกษาความเข้มข้นของ B:C ที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมสารเจือเป็น

1ppm, 10ppm, 100ppm และ 1000ppm โดยมีความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $2 \mu\text{m}$ โดยจะใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

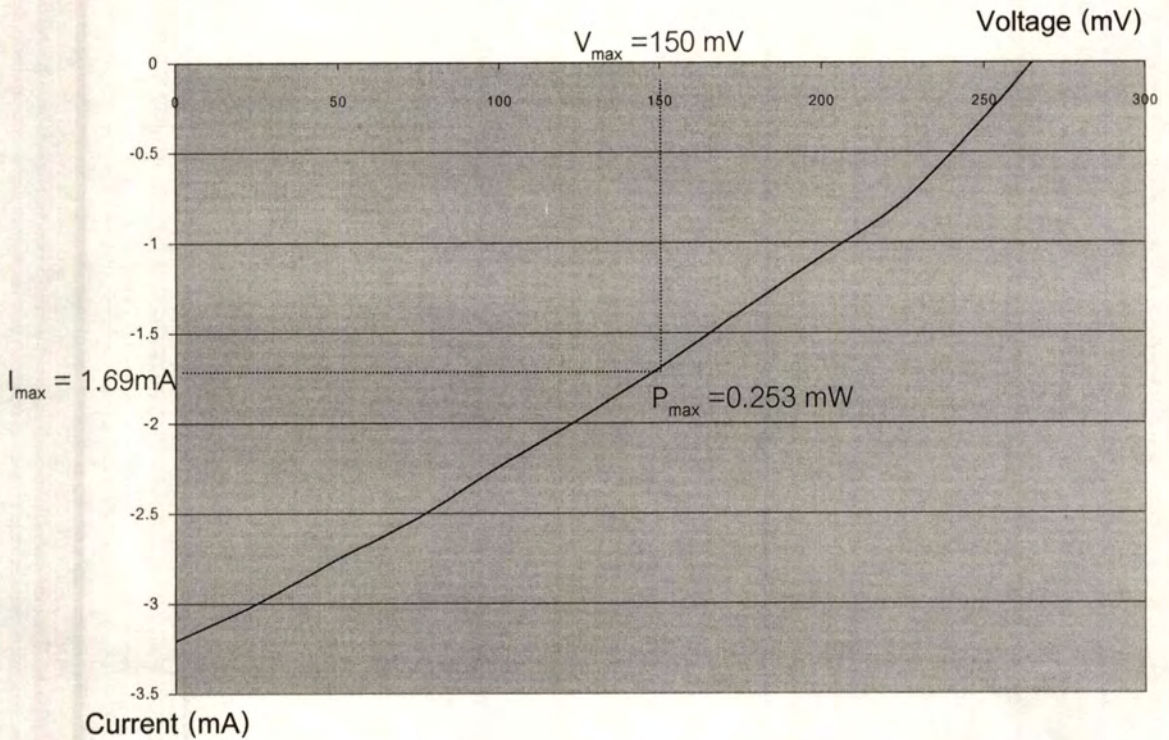
แสงอาทิตย์เทียมจากเครื่อง Solarsimulator ที่มีความเข้มแสงประมาณ 0.835 mW/m^2 หรือที่ AM1.5 โดยใช้วงจรการวัดเป็นดังรูปที่ ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.22-4.25



รูปที่ 4.22 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm

ตารางที่ 4.6 ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm

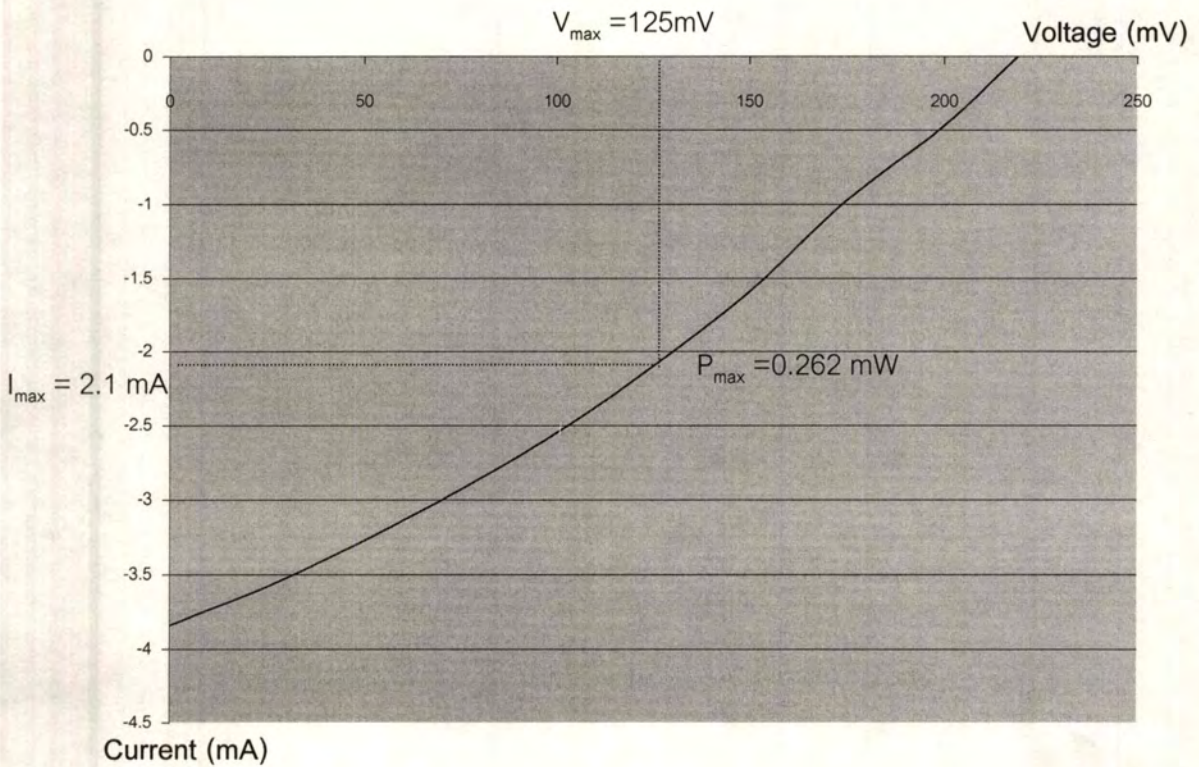
กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	2.42 mA
แรงดันเปิดวงจร V_{oc} (mV)	304.5mV
พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (mm^2)	2.3 mm^2
พลังงานสูงสุด (mW)	0.221
ฟิลแฟคเตอร์ FF	0.287
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	11.02%



รูปที่ 4.23 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm

ตารางที่ 4.7 ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm

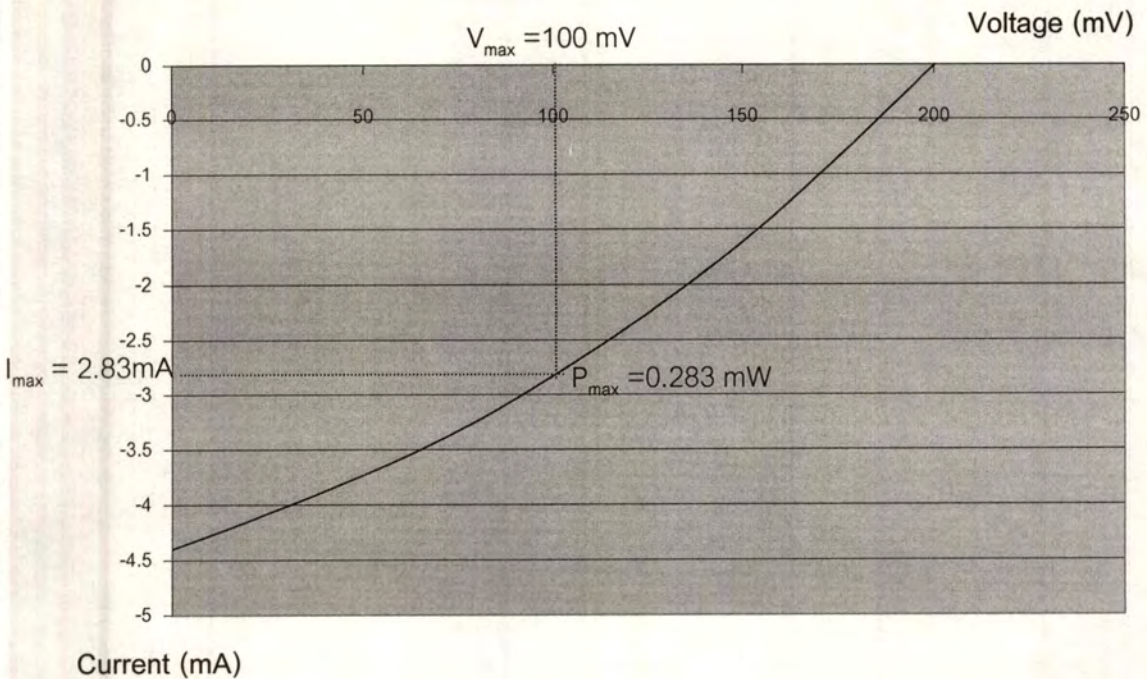
กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	3.2 mA
แรงดันเปิดวงจร V_{oc} (mV)	265 mV
พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (mm^2)	2.3 mm^2
พลังงานสูงสุด (mW)	0.253
ฟิลแฟคเตอร์ FF	0.293
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	13.23



รูปที่ 4.24 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 100ppm

ตารางที่ 4.8 ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 100ppm

กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	3.84 mA
แรงดันเปิดวงจร V_{oc} (mV)	219 mV
พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (mm^2)	$2.3 mm^2$
พลังงานสูงสุด (mW)	0.262 mW
ฟิลแฟคเตอร์ FF	0.312
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	13.66 %



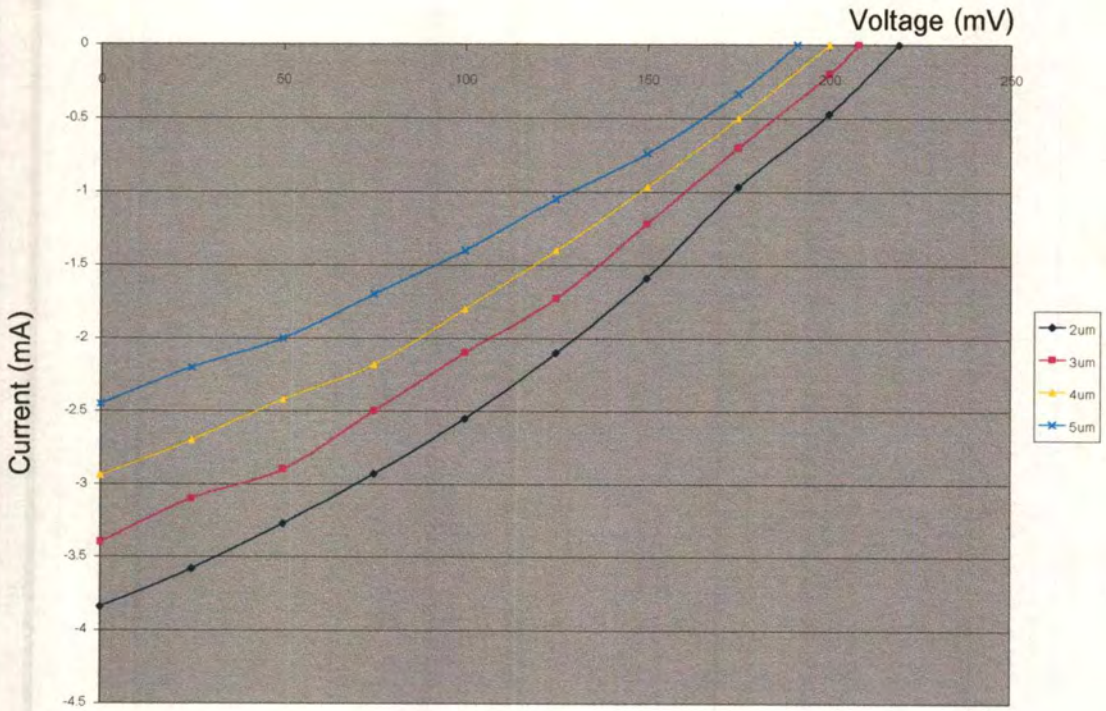
รูปที่ 4.25 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1000ppm

ตารางที่ 4.9 ค่าคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1000ppm

กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	4.4 mA
แรงดันเปิดวงจร V_{oc} (mV)	200.2 mV
พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (mm^2)	$2.3 mm^2$
พลังงานสูงสุด (mW)	0.283 mW
ฟิลแฟคเตอร์ FF	0.321
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	14.73 %

4.4.2 ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

หัวข้อนี้จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดยใช้อะตอมสารเจือมีค่าเป็น 100ppm โดยเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $2\mu m$, $3\mu m$, $4\mu m$ และ $5\mu m$ โดยใช้แสงอาทิตย์เทียมที่มีความเข้มแสงเป็น 11000lux ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพี

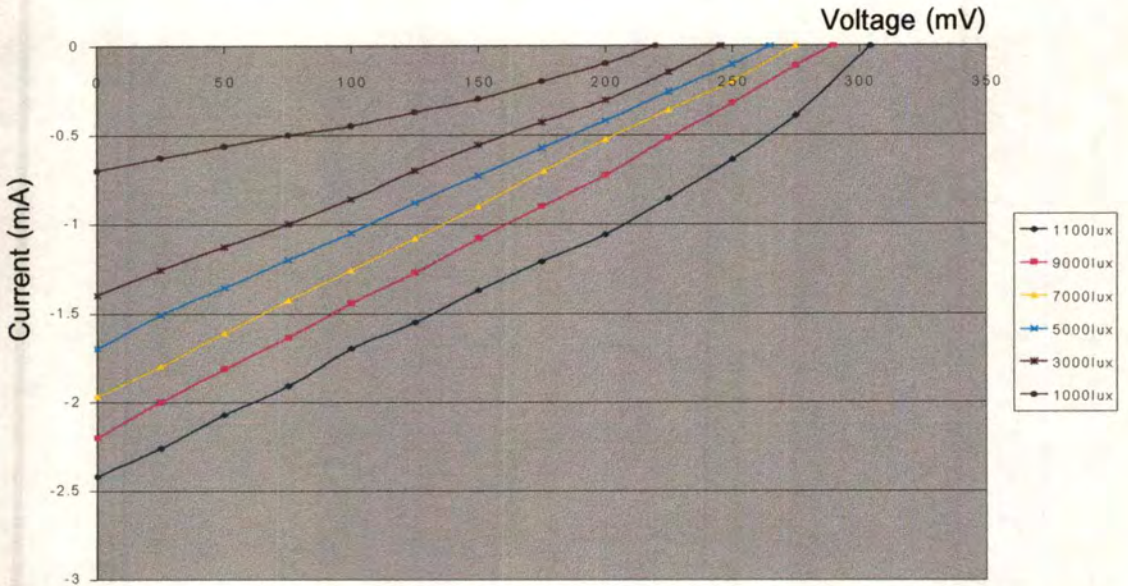
ตารางที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลง I_{sc} และ V_{oc} เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเพชร

ความหนา	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	ΔI_{sc}	% I_{sc}	ΔV_{oc}	% V_{oc}
2 μm	3.84	219	0	0	0	0
3 μm	3.4	208	0.44	11.2	11	5.0
4 μm	2.94	200	0.9	23.4	19	8.7
5 μm	2.45	191	1.39	36.2	28	12.8

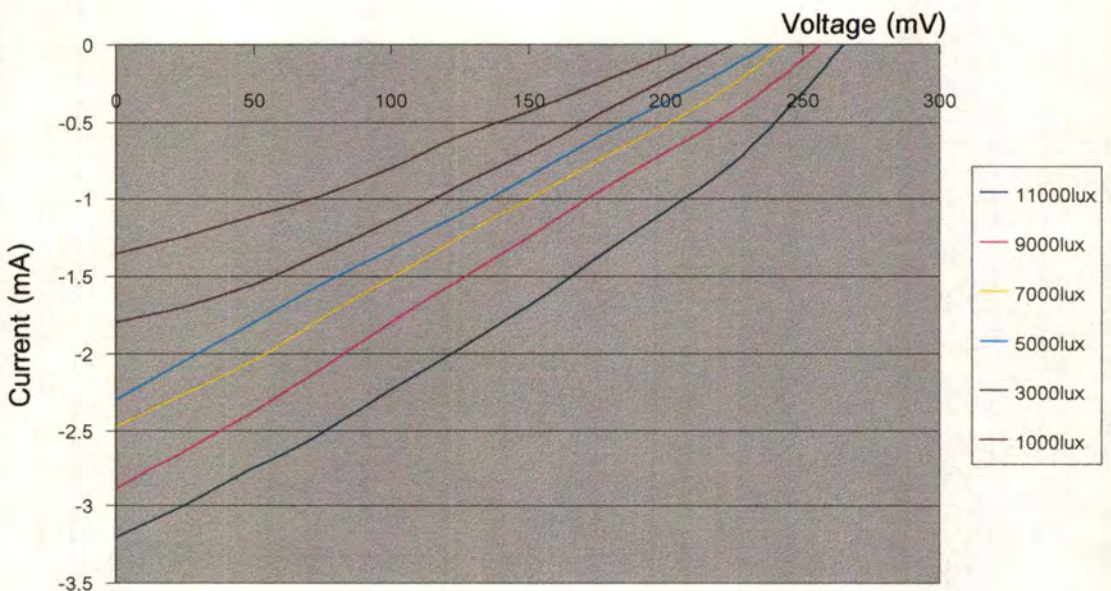
จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเพิ่มขึ้นค่า I_{sc} และ V_{oc} จะมีค่าลดลงเนื่องจากฟิล์มเพชรที่มีความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีมากจะทำให้แสงตกกระทบบที่รอยต่อมีค่าน้อยจึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่าค่า I_{sc} มีเปอร์เซ็นต์การลดลงที่สูงกว่าค่า V_{oc}

4.4.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

โดยการศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันต่อเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเปลี่ยนความเข้มแสงเป็น 1000lux, 3000lux, 5000lux, 7000lux, 9000lux และ 11000lux โดยใช้ความหนาของฟิล์มเพชรเป็น $2\mu\text{m}$ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.27-4.30

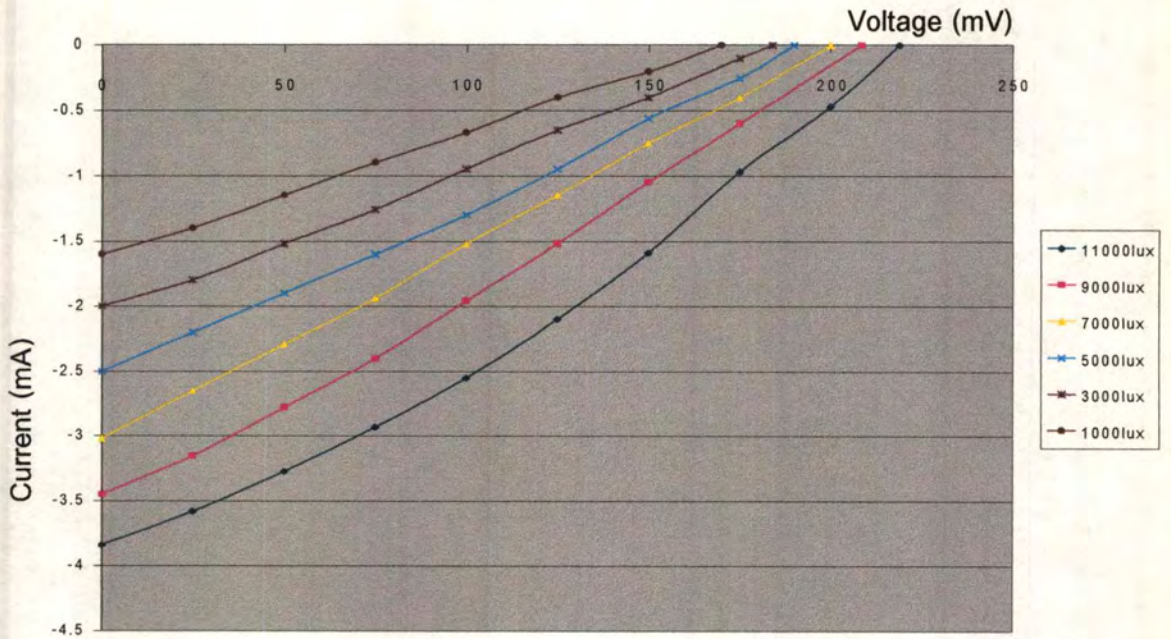


รูปที่ 4.27 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 1ppm

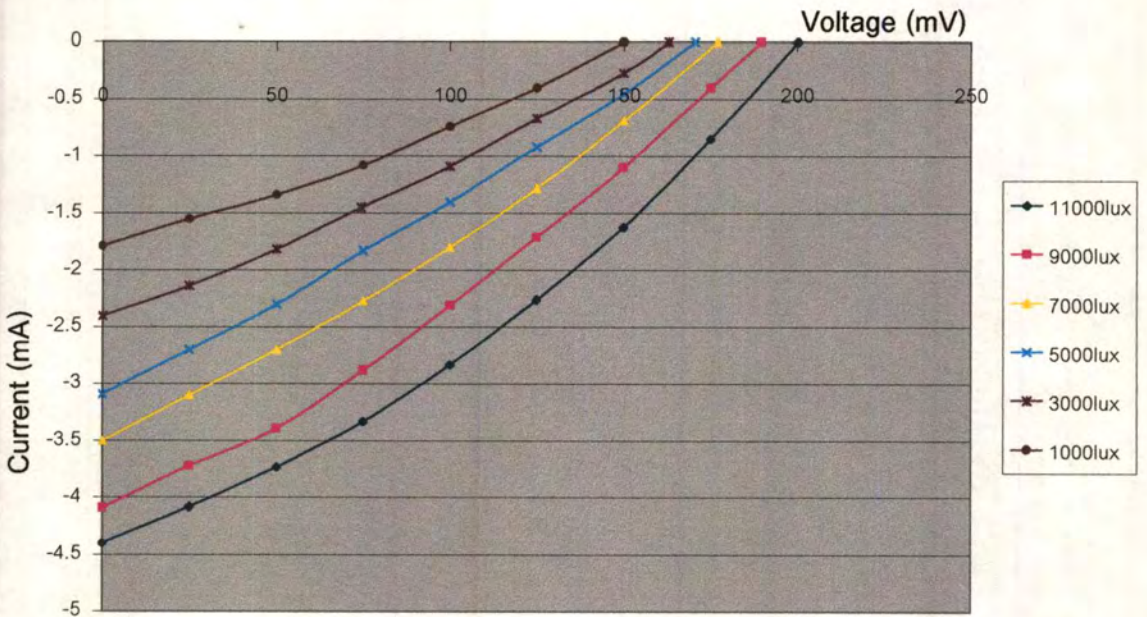


รูปที่ 4.28 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ B:C เป็น 10ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

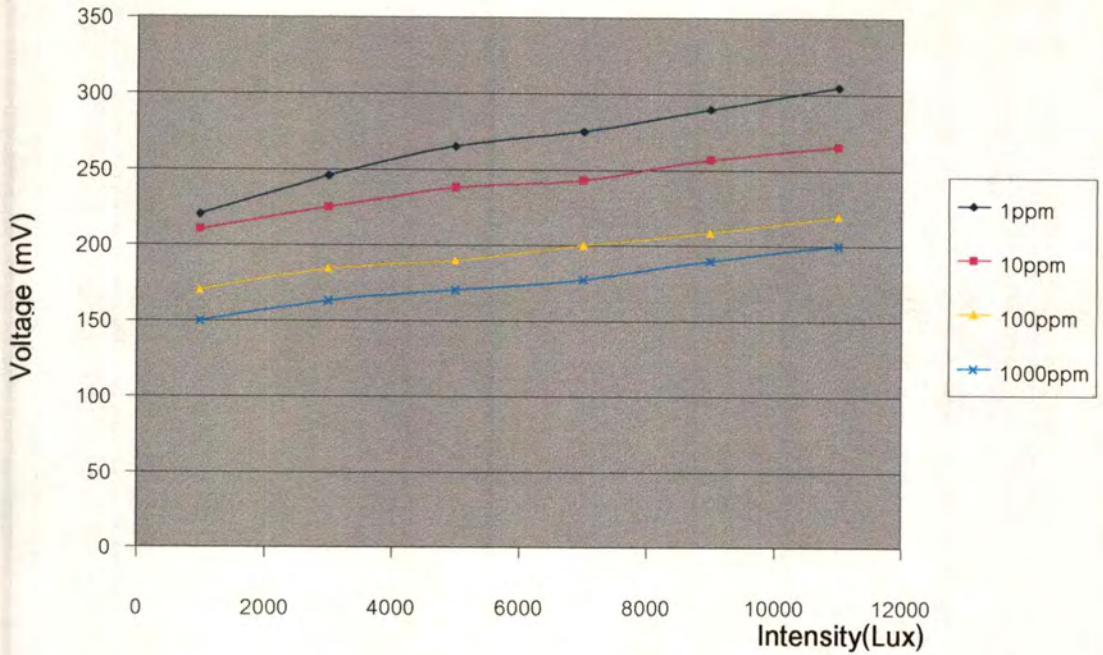


รูปที่ 4.29 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อB:C เป็น100ppm

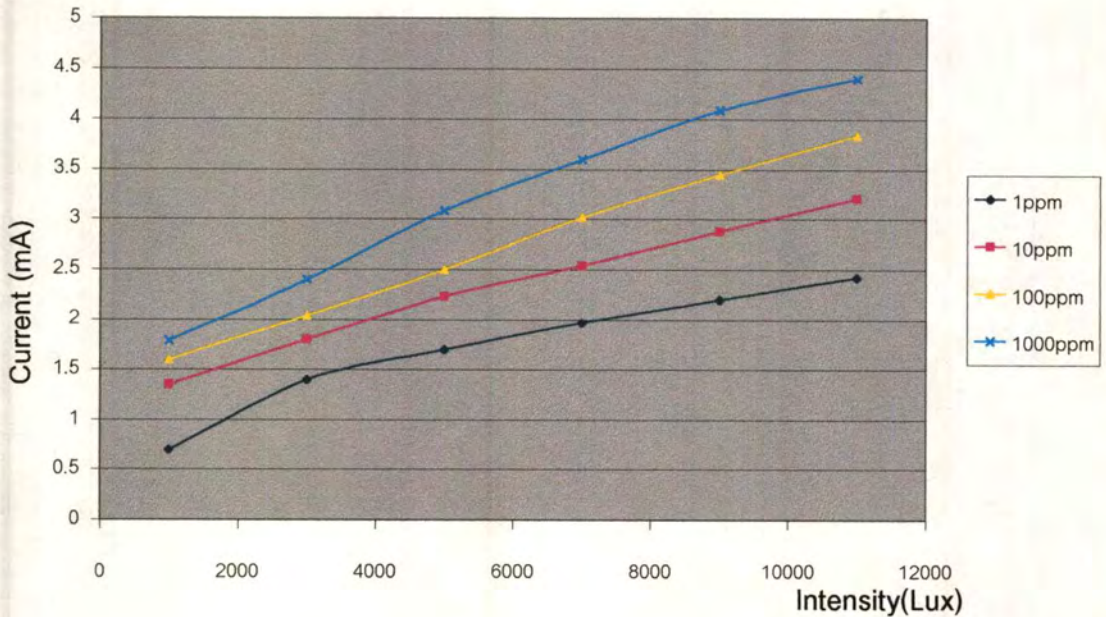


รูปที่ 4.30 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อB:C เป็น 1000ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

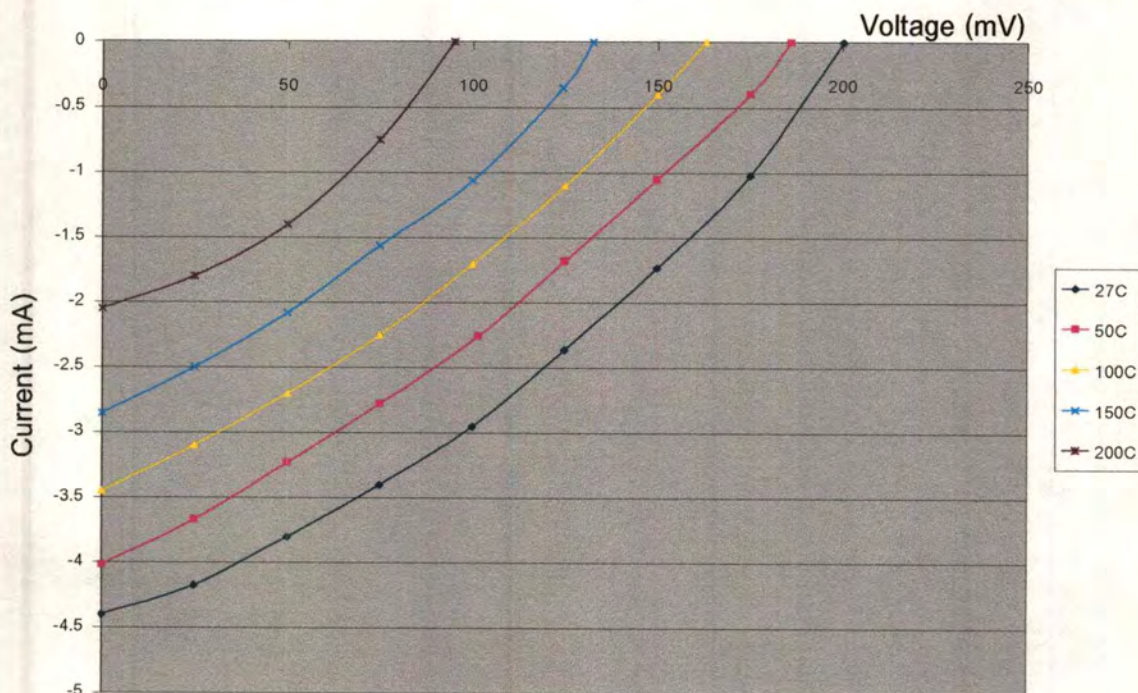


รูปที่ 4.32 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากแต่จะมีผลน้อยมากต่อแรงดันเปิดวงจร เนื่องจากความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีจำนวนจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น เป็นผลให้กระแสที่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

การทดลองในหัวข้อนี้จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีเป็น $2\ \mu\text{m}$ โดยใช้อัตราส่วนอะตอมสารเจือโบรอนเป็น 1000ppm โดยใช้ความเข้มแสงเป็น 11000lux โดยทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 50°C , 100°C , 150°C และ 200°C โดยผลการทดลองแสงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 27°C ถึง 200°C

ตารางที่ 4.11 ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ฟิลแฟคเตอร์
27	0.321
50	0.308
100	0.302
150	0.311
200	0.359

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าฟิลแฟคเตอร์มีค่าสูงขึ้น ดังตารางที่ 4.11 เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานอนุกรมภายในมีค่าสูงขึ้น สังเกตจากกราฟที่มีลักษณะโค้งมากขึ้น

4.4.5 ผลการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/พอร์สซิลิกอนกับโครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/ซิลิกอน [1]

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/พอร์สซิลิกอน(p-Dia/PS) กับโครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/ซิลิกอน(p-Dia/Si) โดยทั้ง 2 โครงสร้างนั้นจะทำการสร้างโดยใช้อะตอมสารเจือโบรอน 1000 ppm ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีคือ 2 μm โดยจะใช้แสงอาทิตย์เทียมจากเครื่อง Solarsimulator ที่มีความเข้มแสงประมาณ 0.835 mW/m^2 หรือที่ AM1.5 ผลการทดลองแสงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ p-Dia/PS กับแบบ p-Dia/Si

	p-Dia/PS	p-Dia/Si
กระแสลัดวงจร I_{sc} (mA)	4.4	4.7
แรงดันเปิดวงจร V_{oc} (mV)	200.2	300
พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (mm^2)	2.3	3.4
พลังงานสูงสุด (mW)	0.283	0.393
ฟิลแฟคเตอร์ FF	0.321	0.278
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	14.73	13.8

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ p-Dia/PS นั้นจะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่า คือ 14.73 % แต่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ p-Dia/Si นั้นประสิทธิภาพ 13.8% เนื่องจากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ p-Dia/PS นั้นสร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีกับพอร์สซิลิกอน ซึ่งโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนมีลักษณะเป็นรูพรุนเมื่อทำการสร้างฟิล์มเพชรบนพอร์สซิลิกอนจะทำให้ได้พื้นที่ของรอยต่อระหว่าง p-Dia กับ PS มากกว่าแบบ p-Dia/Si จึงทำให้มีพื้นที่ของรอยต่อที่สามารถรับแสงได้มากกว่าแบบ p-Dia/Si

สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยเรื่องการศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดของพอร์ซซีลิกอนและฟิล์มเพชร โดยในส่วนแรกจะทำการวิจัยโฟโตไดโอดที่สร้างจากของพอร์ซซีลิกอนและฟิล์มเพชรชนิดพีโดยทำการศึกษาค่าผลของอะตอมสารเจือปนของสารเจือปนของพอร์ซซีลิกอนมีค่าสูงขึ้นไปจะทำให้ความต้านทานอนุกรมภายในมีค่าลดลงเป็นผลให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากนั้นก็ทำการศึกษาค่าผลของความเข้มแสงพบว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ต่อมาได้ทำการศึกษาค่าผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพี พบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานอนุกรมภายในมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น และได้ทำการศึกษาค่าผลของอุณหภูมิพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าในช่วงไบอัสย้อนกลับมาค่าลดลง แต่กระแสไฟฟ้าจะไหลได้มากขึ้นในช่วงไบอัสตรง และส่วนสุดท้ายที่ทำการศึกษาคือ การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดของพอร์ซซีลิกอนและฟิล์มเพชร โดยได้ทำการศึกษาค่าผลของความเข้มของอะตอมสารเจือปนของพอร์ซซีลิกอนพบว่ามีค่าสูงขึ้นไปจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นไป โดยที่ความเข้มของอะตอมสารเจือปนของพอร์ซซีลิกอน 1000 ppmซึ่งมีความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีเป็น $2 \mu\text{m}$ จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 14.73%โดยมีพื้นที่รับแสง 2.3 mm^2 จากนั้นได้ทำการศึกษาค่าผลของความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีมีค่าสูงขึ้นไปจะทำให้กระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลง โดยกระแสลัดวงจรจะลดลงมากกว่าแรงดันเปิดวงจร จากนั้นก็ได้ทำการศึกษาค่าผลของความเข้มแสง โดยความเข้มแสงที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นไปตามความเข้มแสง โดยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้า ต่อมาได้ทำการศึกษาค่าผลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง แต่จะทำให้ค่าฟิลแฟคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และส่วนสุดท้ายได้ทำการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/พอร์ซซีลิกอนกับโครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/พอร์ซซีลิกอนที่สร้างจากเงื่อนไขเหมือนกันทุกประการ ซึ่งพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/พอร์ซซีลิกอน จะได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/พอร์ซซีลิกอน โดยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/พอร์ซซีลิกอนคือ 14.73% ขณะที่ว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพชรชนิดพี/พอร์ซซีลิกอนได้ประสิทธิภาพ 13.8%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

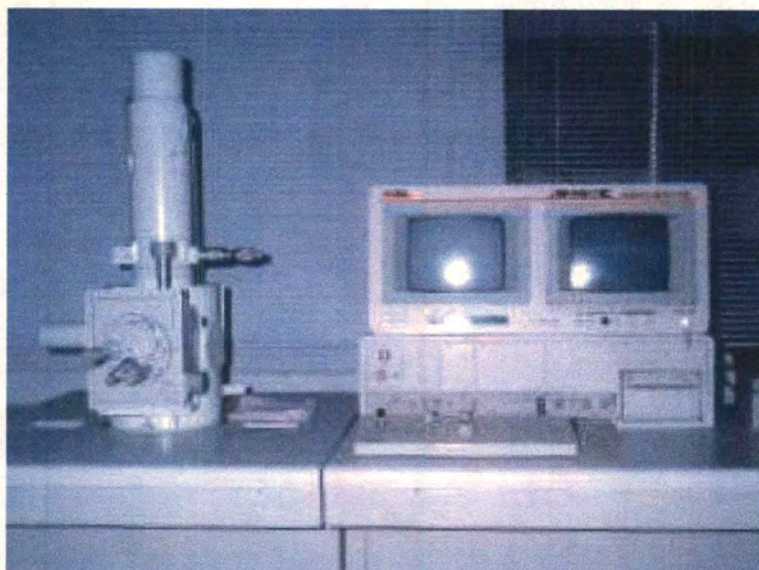
จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบฟิล์มเพอร์ชนิดพี/พอร์สซิลิกอนนั้นได้ประสิทธิภาพสูง อีกทั้งกระบวนการสร้างง่าย ใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นๆ ผู้วิจัยก็หวังอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้ศึกษาและผู้สนใจจะพัฒนา งานวิจัยนี้ให้ดีขึ้นและสามารถใช้งานได้จริงในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

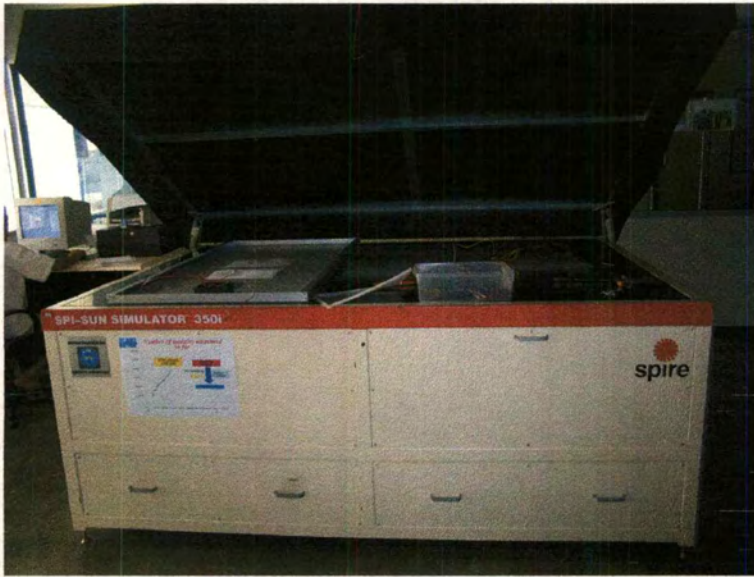


รูปที่ 1 เครื่อง Scanning Electron Microscope ของ JEOL รุ่น JCM-5410



รูปที่ 2 เครื่อง Raman Spectroscope รุ่น System 2000 ของบริษัท Renishaw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 เครื่อง Spi-Sun Simulator 350i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายคณรัชต์ วรธนา
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2518
สถานที่เกิด	จังหวัดกาญจนบุรี
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2539