

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและ
ซิลิกอน

FABRICATION OF DIAMOND THIN FILM AND SILICON
HETEROJUNCTION OF SOLAR CELLS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....55787.....
วันเดือนปี.....25 พ.ค. 2548.....

111 10755
5
.....

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและ
ซิลิกอน

FABRICATION OF DIAMOND THIN FILM AND SILICON
HETEROJUNCTION OF SOLAR CELLS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

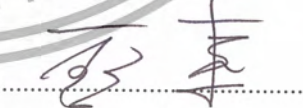
เรื่อง การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน

Fabrication of Diamond thin film and Silicon Heterojunction of Solar Cells

ผู้จัดทำ

1. นาย เฉลิมพล งามลักขมีเข รหัส 44015232
2. นาย อนุชิต ศิริโชติ รหัส 44015263




(รศ.ดร. วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการเรื่อง การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบาง เพชรและซิลิกอน
Fabrication of Diamond thin film and Silicon Heterojunction of Solar Cells

จัดทำโดย 1. นาย เฉลิมพล งามลักษณ์มีแซ 44015232
2. นาย อนุชิต ศิริโชค 44015263

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

รายงานฉบับนี้ได้รับการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน

เฉลิมพล งามลักษณ์มีแข

อนุชิต ศิริโชติ

รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน ระหว่างซิลิกอนกับฟิล์มเพชร P-Dia/N-Si และได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน P-Si/N-Si เพื่อที่จะนำมาเปรียบคุณลักษณะข้อดีและข้อด้อยของโซลาร์เซลล์ทั้งสองชนิด ในการเปรียบเทียบกันนั้น จะใช้ฟิล์มเพชรที่มีความหนา 2nm โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่ 40 นาที (p-Dia/n-Si) เทียบกับ ซิลิกอนชนิด n-type แพร่สารเคือโบรอนด้วยระยะเวลาในการ Drive in 1 ชั่วโมงเพื่อให้มีระยะการแพร่ประมาณ 1-2 μm (p-Si/n-Si) เช่นกัน กำหนดความคลายกริดให้มีระยะห่างและขนาดความคลายมีค่าเท่ากันที่ 40 μm จากนั้น นำเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างลวดลายโลหะที่ใช้สำหรับรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองวัดค่าต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ค่าความเข้มแสง ,ค่าอุณหภูมิ ,ผลของความต้านทานอนุกรมภายใน ผลที่ได้คือ เมื่อค่าความเข้มแสงมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังงานสูงขึ้น คือที่ความเข้มแสง 3000lux ของชนิดรอยต่อ P-Dia/N-Si จะมีค่า 0.21mW เมื่อทำการเพิ่มความเข้มแสงเป็น 11000 lux ค่ากำลังงานจะเพิ่มเป็น 0.39mW ในกรณีของเซลล์ ชนิดรอยต่อ P-Si/N-Si ก็จะเพิ่มเช่นกัน คือจาก 0.33mW เป็น 0.735mW ในส่วนของค่าอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และค่าของความต้านทานอนุกรมภายในเมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเช่นกัน จึงควรจะทำให้มีค่าน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fabrication of Diamond thin film and Silicon Heterojunction of Solar Cell

Chalurmpol Ngamluksameekea

Anuchit Sirichot

Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

Education Year 2003

Abstract

This report present the fabrication of solar cell from the different semiconductor between silicon and diamond thin film(p-Dia/n-Si). Besides, the solar cell homojunction was created for a comparison properties, advantages and disadvantages of both type. To using diamond thin film which have a thickness 2 μm and spend for a synthesise at a 40 minutes (p-Dia/n-Si) compaed with silicon (n-type) that was spreadrd substance mix boron and drive in at 1 hour for a period of same spread around 1-2 μm (p-Si/n-Si). The diamond thin film and the silicon were fixed a stripe grid at distance and size 40 μm equally. Then, the photolithography process is a creation metal stripe for getting a light of solar cell.

Conclusion, the dark light, temperature, and series resistance(R_s) were a value that can measure from an experiment and effected to the electric properties of solar cell. The increase of dark light effected to rise of power; for example, A type of junction p-Dia/n-Si had a dark light 3,000 lux, the value of power was 0.21 mW. When the dark light increased 11,000 lux, the power will increase 0.39 mW. A type of junction p-Si/n-Si will same increase; for instance, the old power was changed from 0.33 mW toward 0.735 mW. In the part of temperature, the increase of R_s effect to reduce efficiency of solar cell too. So R_s should be the least value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XII
ศัพท์เทคนิค	XIII
คำนำ	XV
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 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบสารกึ่งตัวนำ	4
1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร	5
1.3.1 Diamond	5
1.3.2 Graphite	6
1.4 คุณสมบัติต่างๆของเพชร	7
1.4.1 คุณสมบัติทางกล	7
1.4.2 คุณสมบัติทางแสง	8
1.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	8
1.4.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ	10
1.5 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่างๆ	11
1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน	12
1.6.1 ในระบบต้องมีอะตอมไฮโดรเจนปรากฏอยู่	12
1.6.2 ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน	13
1.6.3 อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม	13
1.6.4 ต้องมีการเตรียมพื้นผิวฐานรอง	13
1.7 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรวิธี CVD	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
1.8 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร	16
1.8.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM	16
1.8.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy	17
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น	20
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง	20
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง	20
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง	20
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์	22
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์	22
2.2.2 พลังงานแสงที่โลกได้รับจากแสงอาทิตย์	23
2.2.3 ผลตอบรับของความถี่แสงของเซลล์แสงอาทิตย์	23
2.3 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	24
2.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดกอนชนิดอื่น	24
2.3.2 สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพี	25
2.4 ทฤษฎีรอยต่อ	25
2.4.1 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารชนิดเดียวกัน	25
2.4.2 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารต่างชนิดกัน	25
2.4.2.1 การ โบแอสตรงให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si	30
2.4.2.2 การ โบแอสย้อนกลับให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si	32
2.5 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก	33
2.5.1 โฟโตคอนดักทีฟ(Photoconductive)	33
2.5.2 โฟโตโวลทาทิก	36
2.6 โฟโตไดโอด	36
2.6.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด	38
2.6.2 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด	39
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์(Solar cell)	40
2.7.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์	40
2.7.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (Homojunction solar cell)	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction solar cell)	44
2.7.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและ ความต้านทานขนานในเซลล์แสงอาทิตย์	49
2.7.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์	52
2.7.4 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	52
2.7.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	52
2.7.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ I_p	53
2.7.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อ V_{oc}	54
2.8 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	55
2.8.1 กระบวนการออกซิเดชัน	56
2.8.2 กระบวนการแพร่สารเจือ	59
บทที่ 3 กระบวนการทดลอง	60
3.1 การสร้าง โซลาร์เซลล์จากฟิล์มบางเพชร	60
3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง	60
3.1.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเบื้องต้น	60
3.1.1.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรอง โดยการขัดครีမ်เพชร	61
3.1.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร	62
3.1.3 กระบวนการทดลอง การสร้าง โซลาร์เซลล์จากฟิล์มบางเพชร	64
3.1.4 กระบวนการสร้างรอยสัมผัส โลหะกับฟิล์มเพชร	64
3.1.4.1 แบบของลวดลายโลหะ	64
3.1.4.2 สร้างรอยสัมผัสระหว่าง โลหะทองคำกับฟิล์มเพชร	65
3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการแพร่	67
3.3 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-Dia/n-Si	69
3.3.1 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติ กระแสและแรงดัน ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์	69
3.3.2 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อ คุณสมบัติกระแสและแรงดัน ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3.3 การศึกษาผลของความต้านทานภายในที่มีต่อ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	69
3.3.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์	69
3.4 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-Si/n-Si	69
3.4.1 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติ กระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์	69
3.4.2 การศึกษาผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์	70
3.4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	70
4.1 ผลการทดลองส่วนของโซลาร์เซลล์รอยต่อ p-Dia/n-Si	70
4.1.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร	71
4.1.2 ผลของคุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชร ที่มีความหนาเป็น 2 μ m	72
4.1.3 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์	73
4.1.4 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์	74
4.1.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์	75
4.2 ผลการทดลองส่วนของโซลาร์เซลล์รอยต่อ p-Si/n-Si	77
4.2.1 ผลของคุณสมบัติกระแส-แรงดันและกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-Si/n-Si	77
4.2.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติ กระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์	78
4.2.3 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์	81
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	83
5.1 ผลการทดลองส่วนของโซลาร์เซลล์รอยต่อ p-Dia/n-Si	83
5.1.1 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	83
5.1.2 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	83
5.1.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	83
5.2 ผลการทดลองส่วนของโซลาร์เซลล์รอยต่อ p-Si/n-Si	84
5.2.1 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	84
5.2.2 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	85
5.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	85
ภาคผนวก	87
กิตติกรรมประกาศ	94
บรรณานุกรม	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	3
1.2 โครงสร้างผลึกเพชร	5
1.3 โครงสร้างผลึกของเพชรเทียบกับกราฟาไฟต์และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในกราฟาไฟต์และเพชร	7
1.4 แผนภาพระบบ Hot-Assisted Thermal CVD	12
1.5 กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอกเตอร์ CVD ของเพชร	15
1.6 ลักษณะของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์บนซิลิกอน ระบุ <111>	17
1.7 แสดง Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กัน	18
2.1 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	21
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	21
2.3 ผลตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน	24
2.4 ลักษณะแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำ (a) ซิลิกอนอิน (b) ซิลิกอนพี	24
2.5 ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่ยังไม่นำมาต่อกัน	26
2.6 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันที่สภาวะสมดุล	27
2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น	30
2.8 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของ P-Dia/n-Si	30
2.9 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสตรง	31
2.10 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับในขณะ $V < V_R$	32
2.11 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ P-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับในขณะ $V > V_R$	33
2.12 (a) ลักษณะโฟโตเซลล์ (b) ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตเซลล์เมื่อได้รับแรงดันพร้อมกับมีแสงตกกระทบ	34
2.13 ภาพตัดขวางโครงสร้างโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
2.14 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น	37
2.15 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น	38
2.16 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด	39
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟัลด์วงจร Isc ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสง	40
2.18 ลักษณะการเกิดกระแสโฟโตในเซลล์แสงอาทิตย์	41
2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	42
2.20 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์	43
2.21 สเปกตรัมผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรโร	46
2.22 ลักษณะของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโรที่ไม่มีขดแหลม	47
2.23 ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโร	48
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เขียนอยู่บนกราฟแบบเซมิล็อก	50
2.25 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อแสงอาทิตย์	51
2.26 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์	51
2.27 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	52
2.28 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกระแสแรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์	55
2.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาในการสร้างออกไซด์ อุณหภูมิต่าง ๆ แบบ Dry Oxidation	56
2.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาในการสร้าง ออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	58
2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุด	58
2.32 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสโดยใช้ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ	59
3.1 (a) ครีမ်เพชรที่ใช้ในการขัดแผ่นซิลิกอน (b) ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดด้วยครีမ်เพชร	61
3.2 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองในการสร้างฟิล์มเพชร	62
3.3 แผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร	63
3.4 แสดงตัวอย่างลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.5 แสดงภาพขยายลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์	65
3.6 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ	66
3.7 ลำดับขั้นตอนในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์และการสร้างขั้วสัมผัสโลหะ	68
3.8 แสดงการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	70
3.9 วงจรการวัดผลของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์	70
4.1 ผลการตรวจสอบด้วย SEM	71
4.2 ลักษณะของ Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD	71
4.3 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรค่าต่างๆกัน	72
4.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความเข้มแสง 3000 lux	73
4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความเข้มแสง 11000 lux	73
4.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความเข้มแสง 100000 lux	74
4.7 ผลของความต้านทานที่ 0 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si	74
4.8 ผลของความต้านทานที่ 10 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si	75
4.9 ผลของความต้านทานที่ 20 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si	75
4.10 ผลของอุณหภูมิที่ 27°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si	76
4.11 ผลของอุณหภูมิที่ 50°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si	76
4.12 ผลของอุณหภูมิที่ 100°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si	77
4.13 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.14 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความเข้มแสง 3000 lux	78
4.15 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความเข้มแสง 11000 lux	78
4.16 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความเข้มแสง 100000 lux	79
4.17 ผลของความต้านทานที่ 0 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si	79
4.18 ผลของความต้านทานที่ 10 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si	80
4.19 ผลของความต้านทานที่ 20 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si	80
4.20 ผลของอุณหภูมิที่ 27°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si	81
4.21 ผลของอุณหภูมิที่ 50°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si	81
4.22 ผลของอุณหภูมิที่ 100°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ	10
1.2 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน	19
2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้แบบจำลองแถบพลังงาน ที่อุณหภูมิ	29
5.1 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความเข้มแสง 3000 lux , 11000 lux และ 100000 lux	83
5.2 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความต้านทาน 0 โอห์ม, 10 โอห์ม และ 20 โอห์ม	83
5.3 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่อุณหภูมิ 27 °C, 50 °C และ 100 °C	84
5.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความเข้มแสง 3000 lux , 11000 lux และ 100000 lux	84
5.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความต้านทาน 0 โอห์ม, 10 โอห์ม และ 20 โอห์ม	85
5.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่อุณหภูมิ 27 °C, 50 °C และ 100 °C	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

กระแสดำรวมตัว	Recombination
การนิวเคลียเอชัน	Nucleation
กระตุ้น	Activation
กระเจิง	Scattering
กราไฟต์	Graphite
การปลูกผลึก	Growth
การแพร่	Diffusion
ก๊าซเฟส	Gas phase
เกรน	Grain
ขอบของเกรน	Grain boundary
ความนำจำเพาะของแสง	Photo Conductivity
ความไวแสง	Photosensitivity
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
ครีမ်เพชร	Diamond paste
ความหนาแน่นการนิวเคลียเอชัน	Nucleation density
ความคล่องตัว	Mobility
ค่าคงที่แลตทิซ	Lattice constant
จุดบกพร่อง	Defect state
ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง	Direct band gap
ไตรคลอโรเอธิลีน	Trichloroethylene
แถบพลังงานต้องห้าม	Forbidden energy band
สารเจือ	Dope
ฐานรอง	Substrate
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized water
ปรากฏการณ์อุโมงค์	Tunnelling effect
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	Photoelectric effect
พันธะแฉกขาด	Dangling bond
พลังงานกระตุ้น	Activation junction
เวลาอายุ	Life time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

ศูนย์กลางการแท็ป	Trapping center
แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม	Solar simulator
ผลึกเพชร	Diamond crystal
แลตทิซ	Lattice
อนุภาค	Particle



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ปัจจุบันมีการศึกษาถึงการนำสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่เพื่อใช้งานแทนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และแกลเดียมอาร์เซไนด์เนื่องจากมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่มากและเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้รองรับกับความต้องการในการใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้นสารกึ่งตัวนำเพชรจึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ที่น่าสนใจมากเนื่องจากคุณสมบัติที่ดีกว่าในด้านต่างๆ เช่น เพชร มีค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม (Eg) สูงถึง 5.5 eV มากที่สุดในบรรดาสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน ทำให้เหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ แรงดันพังทลายและความนำความร้อน ดังนั้นเพชรจึงมีข้อดีหลายอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ

โครงการนี้จะนำเสนอการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน โดยจะสร้างฟิล์มบางเพชรชนิดพี โดยการเจือโบรอน และทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันของ $p\text{-Si}/n\text{-Si}$ จากนั้นก็นำมาผ่านขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อสร้างแขนเพื่อจับอิเล็กตรอน โสเดแพทที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ต่อมาจะทำการศึกษาหาคุณสมบัติผลการตอบสนองของกระแสและแรงดันที่เกิดขึ้น โดยจะทำการเทียบผลที่ได้จากการทดลองของเซลล์ทั้ง 2 ชนิด และทำการตรวจสอบคุณสมบัติและสรุปผลการทดลอง หากรายงานฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกได้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1954 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจากการใช้งานในอวกาศในปี ค.ศ.1958 และเมื่อปี ค.ศ.1970 ได้เกิดปัญหาวิกฤตการณ์น้ำมันขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์จึงได้รับความสนใจอย่างจริงจังเพื่อใช้ในการเป็นแหล่งพลังงานสำรองโดยในปัจจุบันนี้มีความต้องการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นทุกๆปี โดยในปี ค.ศ. 1995 ปริมาณการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกรวมกันประมาณ 760 MW และมีปริมาณการผลิตทั่วโลกประมาณการ 100 MW ต่อปี

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงทันทีที่มีแสงมาตกกระทบและกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นกระแสไฟฟ้าตรง เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานชนิดหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่าสะอาด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมขณะใช้งาน เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานโดยใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งมีไม่จำกัดและในการติดตั้งแต่ละครั้งจะมีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี ประโยชน์ของเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆแล้วยังมีประโยชน์ต่อชุมชนเมือง และชนบทที่อยู่ห่างไกลที่จะติดต่อสื่อสารกับชุมชนเมือง รวมถึงเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องมือสื่อสารให้กับกลุ่มนักวิจัยที่ต้องเข้าไปทำงานในพื้นที่ห่างไกลความเจริญต่างๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจาก ธาตุ silicon ซึ่ง เป็นธาตุที่มีมาก เป็นอันดับสองบน โลก รองจากออกซิเจน ทรายตามชายหาด ท้องทะเล หินต่างๆ ที่ เห็นรอบตัวเรา ก็มีซิลิคอน เป็นส่วนประกอบหลักๆ นั่นคือ เป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ (แต่การ นำมาทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องมี เทคนิคและใช้พลังงาน นั่นคือต้องมีค่าใช้จ่าย) ซิลิคอนเป็น วัสดุคิบัติที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน โดยแทบจะเรียกได้ว่าเป็นเมล็ด ข้าวสาร ของอุตสาหกรรมนี้เลยก็ว่าได้ ทรานซิสเตอร์, IC และ LSI ทั้งหลายแทบทั้งหมด สร้างโดยใช้ ซิลิคอนนี่เอง นั่นก็คือ การจะนำซิลิคอน มาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในแง่ของวัสดุกิบัติ อุตสาหกรรมรองรับมีอยู่แล้ว

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดโดยการแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้คือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิคอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

ในภาคผนวกตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า เซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่า มีบางประเภท ที่ทำจาก สารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบ ซึ่งไม่ใช่ซิลิคอน แต่โดยรวมแล้วยังไม่เป็นที่ แพร่หลาย ด้วยเหตุผลทางด้านราคาและความยุ่งยากในการผลิต

1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน

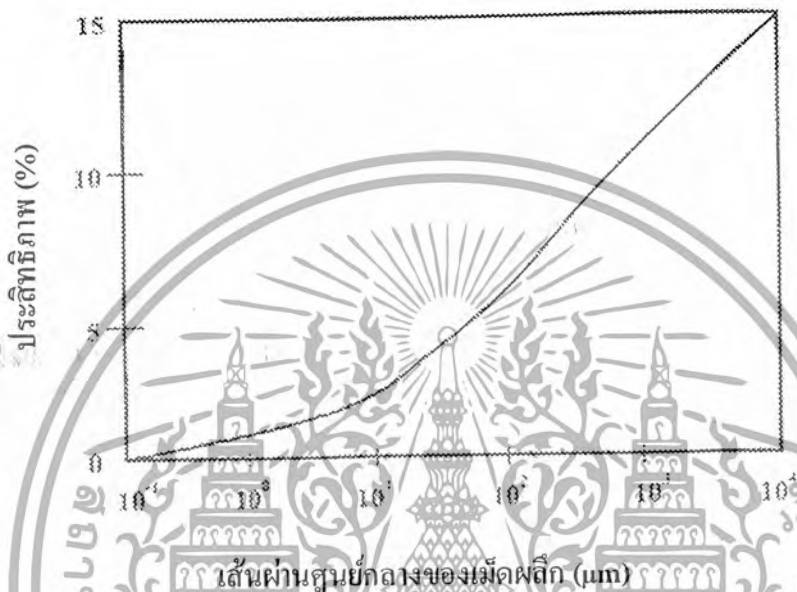
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ปัจจุบันนี้มีการผลิตใช้งานมากที่สุด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ผลึกเดี่ยวซิลิคอนนั้นทำมาจากซิลิคอนที่มีระนาบเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ความหนาของแผ่น ซิลิคอนนั้นมีค่าน้อย ทำให้น้ำหนักเบาและเป็นวัสดุที่ทนต่อรังสีแกมมาแม้จะมีความหนาเพียง 50 μm ก็ ยังคงสภาพเป็นแผ่นได้ดี เซลล์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ชนิดผลึกโพลีซิลิคอนและ แบบอะมอร์ฟัส โดยที่ลักษณะสมบัติการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานน้อย มากอายุการใช้งานนานถึง 20 ปี ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้จะมีบ้างก็คือ เนื่องจาก ผลึกซิลิคอนมี ช่องว่างแถบพลังงานชนิดไม่ตรง (indirect band gap) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย การผลิตจึงต้องผลิตให้หนาพอสมควร ซึ่งความหนาจะอยู่ประมาณ 100 μm ขึ้นไป โดยที่การผลิต นั้นทำได้ง่าย ซึ่งใช้เทคโนโลยีการสร้าง IC ในการทำรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีความก้าวหน้าไปมากใน ปัจจุบันโดยในทางทฤษฎีแล้วเซลล์แสงอาทิตย์นี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 44% แต่ในทางปฏิบัติจริง เซลล์ชนิดนี้จะมีการสูญเสียต่างๆเกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าต่ำลง

1.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิคอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิคอนที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิดปนอยู่ใน

ระนาบเดียวกัน เช่น (111), (211) และ (330) เป็นต้นเมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างของสี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแต่ละระนาบอย่างชัดเจน อาณาเขตของผลึกเรียกว่า “เกรน” (grain) เทคโนโลยีในปัจจุบันนี้สามารถผลิตโพลีซิลิกอนให้มีเกรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบล้านไมครอน ถ้าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์ พาหะโฟโตที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อพี-เอ็นออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรูปที่ 1.1 แสดงผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1.1 การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศูนย์กลางของเกรนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือจะมีพื้นระของซิลิกอนที่มีแขนงอยู่มากซึ่งไม่มีซิลิกอนอะตอมอื่นมาเกาะพันระด้วย ซึ่งพื้นระแขนงเหล่านี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสถานะจุดบกพร่อง (defect state) ซึ่งสถานะจุดบกพร่องนี้จะเป็นตัวคอยจับพาหะข้างน้อยจากแสงไม่ให้เดินทางออกสู่วงจรภายนอก และส่งผลทำให้เวลาอายุ (life time) ของพาหะข้างน้อยลดลง และที่ขอบของเกรนจะทำให้เกิดแถบพลังงานที่ขอบของเกรนเกิดขึ้น โค้งขึ้น

1.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิล์มบาง ซึ่งสร้างมาจากอะมอร์ฟัสซิลิกอนซึ่งเป็นซิลิกอนที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมแต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึก แต่ในขณะที่การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอมนี้จะทำให้มีคุณสมบัติต่างๆ แปรกออกไปเช่น ค่าคงที่ต่างๆ ทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอน ก็คือ มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิค่าประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส โดยสามารถสร้างบนพื้นผิวฐานรองอะไรก็ได้ ราคาถูกและประหยัดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Carlson และ Wronski ต่อมา Dr Hamakawa มหาวิทยาลัยโอซาก้า ได้ออกแบบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เป็นลักษณะของ (a-Si:H) p-i-n ซึ่งใช้กันอยู่ทุกวันนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ชนิดนี้มีค่าอยู่ประมาณสิบกว่าเปอร์เซ็นต์ และเซลล์ชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อย่างอื่นอีกเช่น ตัวตรวจจับแสงสีต่างๆ

1.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบสารกึ่งตัวนำ

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

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

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

ปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำลงก็คือ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิจะมีผลอย่างมากกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารที่มีค่า E_g ต่ำๆ มาทำ เพราะอุณหภูมิจะทำให้ “กระแสไฟฟ้าลัดวงจร” (I_{sc}) สูงแต่ไม่มากนัก แต่ค่าของ V_{oc} และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) จะมีค่าลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นต่ำลง

ซึ่งกล่าวโดยสรุปก็คือค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนนี้ก็คือ ค่าของ V_{oc} และ I_{sc} ต้องมีค่ามาก ส่วนค่าของ I_s จะต้องมิต้านน้อย โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงเกินไป ส่วนปัจจัยอื่นๆที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงนั้นเราจะไปวิเคราะห์ในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองที่ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรได้ที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ โดยเพชรที่สังเคราะห์ได้นี้มีค่า $E_g = 5.5 \text{ eV}$ ซึ่งเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างมากถ้าเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ

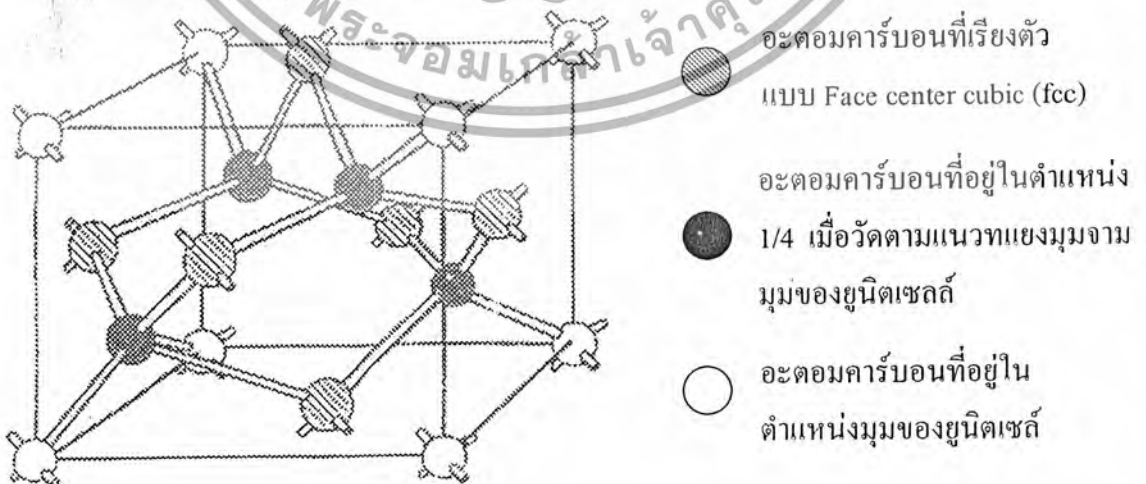
ดังนั้นในรายงานฉบับนี้จึงได้นำเสนอสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ก็คือ เพชร โดยสังเคราะห์ได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน ซึ่งเมื่อเรานำเพชรมาสร้างเป็นโซลาร์เซลล์แล้วจะทำให้ค่าของ V_{oc} มีค่าสูงขึ้นและค่าของ I_s มีค่าต่ำลงตามที่กล่าวมาแล้ว และสามารถใช้ในการที่อุณหภูมิสูงได้ดีโดยเพชรยังสังเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

1.3 สารกึ่งตัวนำเพชร

1.3.1 Diamond

ตามที่กล่าวมาแล้วว่าเราสามารถสังเคราะห์เพชรเพื่อนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน โดยเพชรที่นำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง เพชรมีโครงสร้างของผลึกดังแสดงในรูปที่ 1.2 สังเคราะห์ขึ้นได้ด้วยวิธี CVD แบบความร้อนที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเพชรในหนึ่งยูนิตเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งเกิดจากการจับตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นแบบ face center cubic (fcc) อยู่ 6 อะตอมและอะตอมคาร์บอนอีก 4 อะตอมอยู่ในตำแหน่ง $1/4$ ตามแนวทะแยงมุมของยูนิตเซลล์ ซึ่งแต่ละอะตอมจะจับกับอะตอมคาร์บอนรอบ ๆ ข้างอีก 4 อะตอมแบบ tetrahedral ด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^3 ซึ่งสุดท้ายก็จะจับตัวกันในลักษณะของวงแหวนหกเหลี่ยม โดยที่อะตอมที่ใกล้เคียงกันจะมีการเชื่อมในตำแหน่งสูงต่ำสลับกันจากระนาบ หรืออาจมองว่าวงแหวนหกเหลี่ยมเกิดจากอะตอมคาร์บอนที่เป็นรายจุดและระนาบ $\{111\}$ 2 อันวางซ้อนทับกันอยู่ใกล้เคียงกันจะ ไม่อยู่ในระดับเดียวกัน



รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างผลึกเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

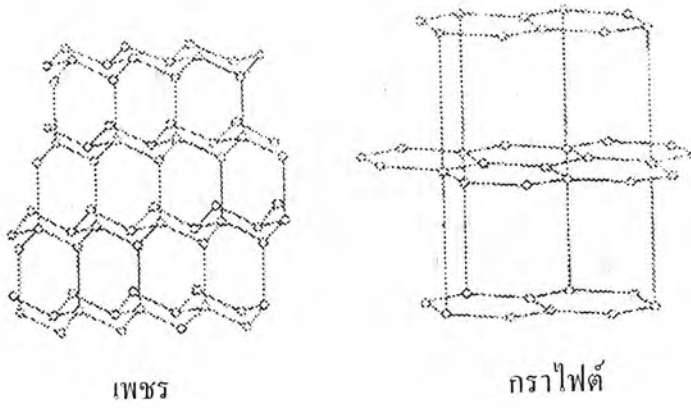
การเรียงลำดับชั้นของอะตอมเป็นแบบ ABC ABC ABC..... ซึ่งทำให้เพชรมีค่าที่แลตทิซเป็น 3.56 ผลของการตรวจสอบด้วย Raman Spectroscopy พบว่าค่ายอดลำดับที่หนึ่ง (first order peak) ของเพชรมีค่า 1332 cm^{-1} สำหรับคาร์บอน 12 และในกรณีคาร์บอน 13 จะมีค่าเท่ากับ 1284 cm^{-1}

1.3.2 Graphite

กราไฟต์เป็นพื้นฐานของคาร์บอนที่พบได้มากที่สุด ลักษณะโครงสร้างภายในของมันแสดงได้ดังรูปที่ 1.3 อะตอมคาร์บอนจะจับตัวที่ลักษณะเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมเช่นเดียวกับเพชรแต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้เด่นชัดคืออะตอมคาร์บอนที่จับตัวเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมของกราไฟต์นั้นจะไม่มี การเชื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้กันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร แต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นราบเสมอกัน อีกทั้งคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Trigonally กับอะตอมทั้งสามตัวใกล้เคียงกันด้วยพันธะแบบ sp^2 การเรียงลำดับชั้นของวงแหวนหกเหลี่ยมกราไฟต์จะเป็นแบบ AB AB AB..... ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงเท่ากับ 1.42 \AA ในขณะที่ค่าคงที่แลตทิซคือ 6.707 \AA สำหรับกราไฟต์ ผลการวัดด้วย Raman spectroscopy จะแสดงยอดลำดับที่หนึ่งที่ค่า 1580 cm^{-1} และยอดลำดับที่สองอยู่ที่ 3240 cm^{-1} ตามลำดับ

นอกจากนี้แล้วยังมีรูปต่างๆ ของคาร์บอนที่พบได้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรอีก เช่น Amorphous carbon, Lonsdaleite และ Microcrystalline carbon ซึ่งก็จะมีค่าของยอดคลื่นที่แตกต่างกันออกไป

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นรูปต่างๆของคาร์บอนที่พบได้ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์นี้ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดๆ ค่ายอดคลื่นจาก Raman อาจจะไม่ได้แสดงตำแหน่งตรงค่า 1332 cm^{-1} พอดี แต่จะแสดงตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับค่าดังกล่าว ดังตัวอย่างเช่น อาจจะมียอดคลื่นเป็น 1333 cm^{-1} เนื่องจากในการเกิดเพชรขึ้นตามธรรมชาติ กระบวนการเกิดตลอดจนปัจจัยรอบข้างต่างๆมีผลทำให้เพชรธรรมชาติยังมีความแตกต่างกับเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นอยู่บ้าง แต่จากผลการวิเคราะห์หาคคุณสมบัติอื่นๆของฟิล์มเพชรพบว่ามีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่ได้จากเพชรธรรมชาติมาก จนยอมรับได้ว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติเหมือนกับเพชรธรรมชาติ



○ ละตอมของคาร์บอน

รูปที่ 1.3 โครงสร้างหลักของเพชรเทียบกับกราไฟต์ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในกราไฟต์ และเพชร

1.4 คุณสมบัติต่างๆของเพชร

เพชรมีคุณสมบัติอีกหลายประการที่น่าสนใจ อาทิเช่น คุณสมบัติทางกล, คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติแต่ละชนิดจะแสดงรายละเอียดดังนี้

1.4.1 คุณสมบัติทางกล

โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำเพชรจะประกอบพื้นระทางเคมีที่มีความแข็งแรงดังนั้นเพชรจึงมีคุณสมบัติทางกลหลายอย่างทีพิเศษกว่าวัสดุอื่นๆเช่น เพชรจะมีความแข็ง, Molar density และ Thermal conductivity สูงอีกทั้งเพชรมีค่าความยืดหยุ่นและ Bulk modulus ต่ำกว่าวัสดุอื่นๆ คุณสมบัติทางกลของเพชรจะมีรายละเอียดดังนี้

- **Thermal conductivity** เพชรมีค่า Thermal conductivity สูงสุดในบรรดาวัสดุทั้งหมดคือมีค่าถึง 20 watts/cm.^oC ข้อมูลแสดงการเปรียบเทียบอยู่ในภาคผนวก (ตารางที่2) ค่าความนำความร้อนนี้จะมีค่าลดลงเมื่อมีในโตรเจนจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ในเพชร type I_u จะมีความนำความร้อนลดลง 30-50% จากค่าสูงสุด หากฟิล์มเพชรเป็นแบบผลึกรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Polycrystalline) ที่ได้จากการสร้างที่มีคุณภาพที่ดี พบว่าความนำความร้อนในทิศทางของการปลูกผลึก มีค่าเป็น 55% ของผลึกเดี่ยว ส่วนในระนาบของการปลูกผลึก ความนำความร้อนของผลึกเดี่ยวจะมีค่ามากกว่า 25% แต่ส่วนมากแล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก

- **Molar heat capacity** ค่า Molar heat capacity หมายความว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิของหนึ่งน้ำหนักโมลของวัสดุใดๆ มีค่าเพิ่มขึ้น 1 องศาจากภาคผนวก (ตารางที่ 3) แสดงการเปรียบเทียบค่า Molar heat capacity ระหว่างเพชรกับวัสดุชนิดอื่นๆ จะพบว่าค่าของเพชรมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ นั้นหมายความว่า เพชรมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานด้านการกระจายความร้อนได้ดีเท่ากับ Heat sink

- **Thermal expansion** คือค่าอัตราส่วนของระยะทางที่ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ แพร่ไปถึง เทียบ กับระยะทางที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 0°C ค่า Thermal expansion นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Molar heat capacity สำหรับของแข็งค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายความร้อนเชิงปริมาตรจะมีค่ามากกว่าหนึ่งประมาณ 3 เท่า สำหรับค่า Thermal expansion ของเพชรและวัสดุอื่นๆ ถูกเปรียบเทียบไว้ในภาคผนวก (ตารางที่ 4)

- **Hardness** เพชรเป็นสารที่มีความแข็งสูงสุดในบรรดาวัสดุทั้งหมดที่เรารู้จัก โดยจะมีค่าความแข็งสูงถึง $5,700-10,400 \text{ kg/mm}^2$ อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ได้พยายามสังเคราะห์สารประกอบ C_3N_4 (Carbon Nitride) เชื่อมั่นว่าเป็นสารที่มีความแข็งมากกว่าเพชร สำหรับตารางการเปรียบเทียบค่าความแข็งของเพชรกับวัสดุอื่นๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก (ตารางที่ 5)

1.4.2 คุณสมบัติทางแสง

การพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของเพชรส่วนใหญ่แล้ว จะพิจารณาค่าดัชนีหักเห และการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ และความยาวคลื่นที่กั้นเขต ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของเพชรและวัสดุอื่นๆ ที่อุณหภูมิห้องจะแสดงในภาคผนวก (ตารางที่ 6)

1.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

หากพิจารณาคุณสมบัติของเพชรในแง่ของสารกึ่งตัวนำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ในธรรมชาติมีค่าในช่วง 10^{12} ที่อุณหภูมิ 140 K ถึง 10^{15} ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลสูงถึง $1,800 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$ ในขณะที่อิเล็กตรอนมีค่า $2,000 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$ แต่ในเพชรที่ได้จากการสร้างที่อุณหภูมิ 500°C พบว่ามีค่าความคล่องตัว Hall ของโฮลเพียง $850 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$ ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในปัจจุบันมีเพียงเจอร์มาเนียม (Germanium) และอินเดียมแอนติโมไนด์ (Indium antimonide) เท่านั้นที่มีค่าความคล่องตัวของโฮลสูงๆ ส่วนวัสดุอื่นๆ จะมีค่าความเร็วโฮลอิมพัลส์และ Dielectric strength ต่ำที่ความแรงสนามไฟฟ้า 10^4 volt/cm ความเร็ว ดริฟท์ของอิเล็กตรอนและโฮลเริ่มมีการอิมพัลส์สำหรับโฮลมีค่าความเร็วดริฟท์สูงสุดที่ 10^7 cm/sec และในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีของอิเล็กตรอนจะมีค่าความเร็วสูงสุดที่ 2.0×10^7 cm/sec ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของเพชรในธรรมชาติจะสูงที่สุดถึง 10^{16} ohm.cm

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

สำหรับกรณีของสารเจือผู้ให้ หากพิจารณาในโดรเจนพบว่าไม่สามารถใช้อะตอมสารเจือผู้ให้ได้ เนื่องจากค่าพลังงานกระตุ้นของ โนโดรเจนมีค่าต่ำกว่าแถบความนำ คือมีค่าเพียง 1.57 eV เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่เกิด Shallow level ขึ้น อีกทั้งอะตอมของ โนโดรเจนยังทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสซึ่งมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าคาร์บอนการคำนวณจากทฤษฎีทำนายว่าฟอสฟอรัสสามารถใช้เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ Okano et al. รายงานในปี ค.ศ. 1990 ว่าได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นขึ้นมา โดยใช้ไอระเหยของสารละลาย P_2O_5 ในเมทานอล ซึ่งถูกเจือจางด้วยอะซิโตน ค่าความหนาแน่นประจุพาหะวัดได้ 4×10^{15} cm⁻³ และความคล่องตัวของอิเล็กตรอน 50 cm²V⁻¹s⁻¹ แต่ปัญหาที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรได้ อีกทั้งกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มีค่านั่น และอะตอมฟอสฟอรัสมีขนาดใหญ่เมื่อสร้างพันธะกับอะตอมคาร์บอนแล้วมีผลทำให้โครงสร้างของเพชรเสียรูปไป ดังนั้นดิเรียมจึงเป็นสารที่ได้รับการสนใจและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์มเพชรที่ทำการได้ปรีดิซึมด้วยวิธี Ion-implantation แสดงคุณสมบัติเป็นฟิล์มชนิดเอ็น แต่ในการได้ปรีดิซึมแบบ In-situ และ In-diffusion จะไม่เกิดผลตามต้องการเนื่องจากเกิดการชดเชยด้วยความหนาแน่นสูงของสถานะผู้รับที่กระจายอยู่ในแถบสถานะต้องห้ามตลอดจนดิเรียมในเพชรมีการกระจายตัวสูงอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้องซึ่งทำให้การได้ปรีดิซึมไม่มีความแน่นอน

1.4.4 คุณสมบัติของเพชรเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

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

ตารางที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ

จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่า

1. สารกึ่งตัวนำเพชรมีค่าความนำความร้อน (Thermal Conductivity) สูงกว่าซิลิกอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ ดังนั้นจึงสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า
2. เพชรมีค่าความคล่องตัวของโฮลสูง และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ ซึ่งทำให้ทำงานที่ความถี่สูงได้ดี
3. เพชร มีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) สูงถึง 5.5 eV ซึ่งเมื่อเทียบกับซิลิกอนและ แกลเลียมอาร์เซไนด์แล้ว มีค่าสูงกว่ากันมาก ดังนั้นจึงเหมาะที่จะทำงานที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากสามารถที่จะควบคุมประจุพาหะได้โดยไม่มีผลของอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบต่างๆ

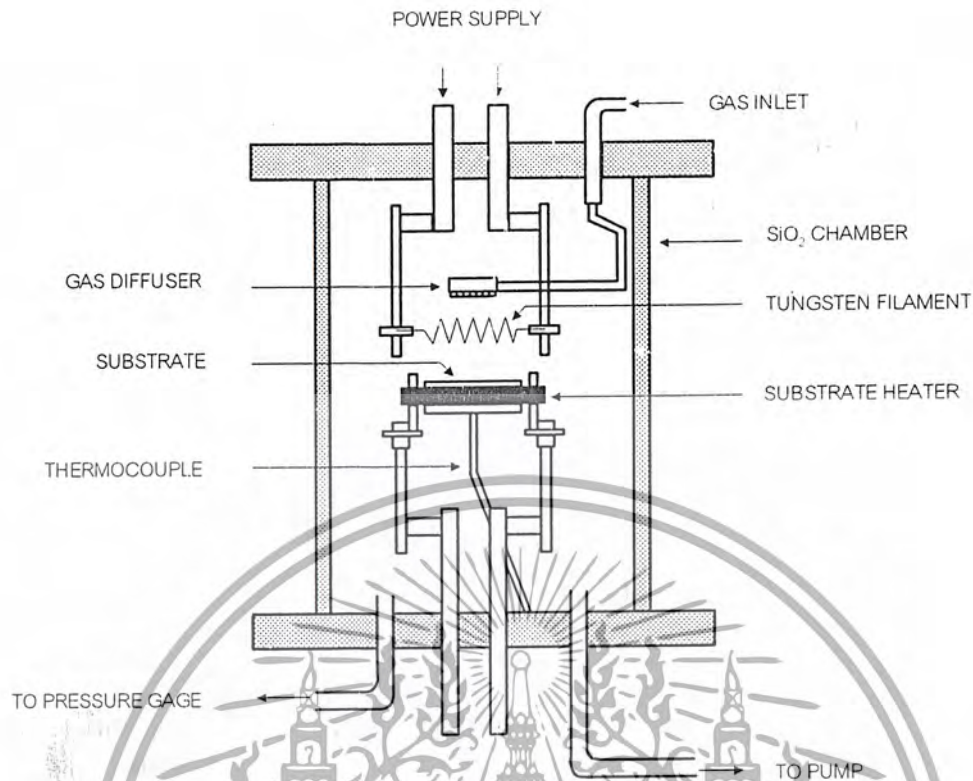
ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD สามารถแบ่งเป็น 3 . กลุ่ม ได้ดังนี้

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

ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ เช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชรอุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง อุณหภูมิของฐานรอง พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้แต่สุดท้ายฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการต่างๆจากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกัน เป็นสิ่งยืนยันได้ว่าแม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรต่างกัน แต่ผลที่ได้คือ ฟิล์มเพชรเหมือนกันนั่นเอง ซึ่งในโครงการนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการสังเคราะห์แบบ Hot-Filament-Assisted Thermal Enhanced CVD เท่านั้น

วิธี Hot-Filament-Assisted Thermal CVD

วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรก โดย Matsumoto et al จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธี Filament-Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 2.2 ภายใน Chamber มีไส้หลอดทั้งสแตนเลสที่ทำหน้าที่กำเนิดความร้อน อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนเลสมีค่าสูงถึง 2,000 - 2,300°C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดมีอุณหภูมิ 700 - 1,000 °C เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนเลสจะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไปอัดไฟเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการนิวเคลียส และอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชร ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซมีเทน (0.5-2%) ต่อก๊าซไฮโดรเจน กระทำที่ความดัน 10-100 ทอร์ ฟิล์มเพชรจะมีอัตราการเกิด 1-10 $\mu\text{m/hr}$ วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนักฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้าง และมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนเลสจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็น $\alpha\text{-W}_2\text{C}$ ทำให้ไส้หลอดเปราะและผิกรูปได้ง่าย



รูปที่ 1.4 แสดงแผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD

1.6 หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แบบความร้อน

กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีต่างๆ แม้ว่าแต่ละวิธีความแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามจะมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

1.6.1 ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่

เนื่องจากการเกิดของเพชรจากอนุภาคคาร์บอนในบรรยากาศที่มีอะตอมของไฮโดรเจนเป็นเครื่องยืนยันให้เห็นว่า เพชรจะมีความเสถียรในสภาวะที่มีอะตอมไฮโดรเจนมากกว่ากราฟิต์สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ในโครงสร้างเพชรถ้าหากมีอะตอมคาร์บอนข้างเคียงสองอะตอมถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจน จะพบว่าพันธะ sp^3 ยังคงอยู่ ซึ่งในกรณีเดียวกันนี้ กราฟิต์จะมีการเปลี่ยนแปลงในวงแหวนกราฟิต์ทั้งหมด นั่นคือ ในการเกิดเพชรจากอนุภาคคาร์บอน ซึ่งถูกเจือจางด้วยไฮโดรเจน จะนำไปสู่สองกระบวนการคือ หนึ่งคาร์บอนเริ่มก่อตัวในรูปของกราฟิต์ โดยมีเพชรอยู่บ้างเล็กน้อย และสองเกิดการเลือกกำจัดกราฟิต์ออกด้วยอะตอมไฮโดรเจน อาจกล่าวโดยสรุปว่าอะตอมไฮโดรเจนเป็นตัวสำคัญในการกำจัดกราฟิต์หรือลดการเกิดกราฟิต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.2 ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน

ไม่ว่าจะกระตุ้นด้วยความร้อน พลาสมา หรือ Combustion เพื่อให้ได้อะตอมคาร์บอนออกมา โดยอัตราการก่อตัวของฟิล์มเพชรขึ้นอยู่กับความสามารถในการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่ฐานรอง ซึ่งส่วนมากแล้วในกระบวนการ CVD แรงที่ใช้ส่งอะตอมคาร์บอนจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างบริเวณที่ก๊าซเฟสถูกกระตุ้นกับพื้นผิวฐานรอง หรืออาจใช้การเป่าก๊าซเฟสไปยังฐานรองรวมไปถึงการใช้สนามไฟฟ้าในการช่วยส่งผ่าน

1.6.3 อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม

จากการทดลองสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อนพบว่าอุณหภูมิของฐานรองเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มเพชร กล่าวคือมีอุณหภูมิฐานรองช่วงหนึ่งเท่านั้นที่อะตอมคาร์บอนเกิดการจับตัวกันเป็นโครงสร้างเพชร(ประมาณ 950°C) โดยหากอุณหภูมิฐานรองมีค่าต่ำหรือสูงกว่านั้นอะตอมคาร์บอนจะจับตัวเป็นโครงสร้างอื่นที่ไม่ใช่เพชร (เช่น อมอร์ฟัสคาร์บอน หรือ กราไฟต์) นอกจากนี้อุณหภูมิฐานรองยังมีผลต่อการเกิดระนาบของฟิล์มเพชรด้วย

1.6.4 ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฟิล์มเพชรมีอัตราการเกิดสูง หากมีการเตรียมพื้นผิวฐานรองรับการนิวเคลียชัน ซึ่งกระบวนการเตรียมพื้นผิวที่ใช้มีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีจะให้อัตราการเกิดฟิล์มเพชรไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังรวมถึงฐานรองที่ใช้ บริเวณพื้นผิวต้องไม่มีตัวเร่งต่างๆที่ทำให้เกิดกราฟไฟต์ และต้องมีข้อจำกัดในการแพร่ของอะตอมคาร์บอนลงไปในพื้นที่ของฐานรองที่อุณหภูมิการสร้าง

ในกระบวนการสร้างนั้น ต้องใช้หลักการทั้งสี่ข้อนี้ร่วมกันเพื่อผลออกมาจะได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดี อัตราการเกิดฟิล์มเพชรมีค่าสูง หากขาดข้อหนึ่งไป ผลที่ออกมาจะไม่ใช่เพชรคืออาจเป็นกราฟไฟต์, อมอร์ฟัสคาร์บอน หรือ DLC ก็ได้โดยวิธีการที่ใช้ในนครควบคุมเงื่อนไขทั้งสี่ข้อนี้สามารถใช้เทคนิคหลายอย่างควบคุมตามความเหมาะสม

ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร ส่วนมากนิยมใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (เช่น CH_4 , C_2H_4) ผสมกับก๊าซไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่น เจ็อนไฮการสร้างอาจใช้อัตราส่วนของก๊าซ CH_4 ต่อไฮโดรเจนน้อยกว่า 1% อัตราการไหลของก๊าซ 100 sccm. ความดันที่ใช้ น้อยกว่า 100 ทอร์ อุณหภูมิฐานรองประมาณ 800°C และอุณหภูมิของไส้หลอดอยู่ระหว่าง $2000-2200^{\circ}\text{C}$ ฐานรองที่ใช้อาจเป็น Si หรือ Mo จากเจ็อนไฮนี้ฟิล์มเพชรที่ได้มีอัตราการก่อตัวประมาณ $1\mu\text{m/hr}$ (สามารถเพิ่มให้มากขึ้นได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของมีเทน, อุณหภูมิไส้หลอด, อัตราการไหลของก๊าซหรือลดระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง ซึ่งทำให้อุณหภูมิฐานรองมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นการนิวเคลียชันและอัตราการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิฐานรองอยู่ระหว่าง 950°C หลังจากนั้นทั้งค่าความหนาแน่นการนิวเคลียชันและการก่อตัวเริ่มลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าวิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้จะได้เพชรที่มีคุณภาพดีและอัตราการก่อตัวสูงพอสมควร อีกทั้งสิ่งเจือปนที่เกิดจากไส้หลอดมีน้อยมากจนยอมรับให้ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้จนเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสร้างฟิล์มเพชร

1.7 กลไกการเกิดฟิล์มเพชรของวิธี CVD

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐานคือต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่างคือ

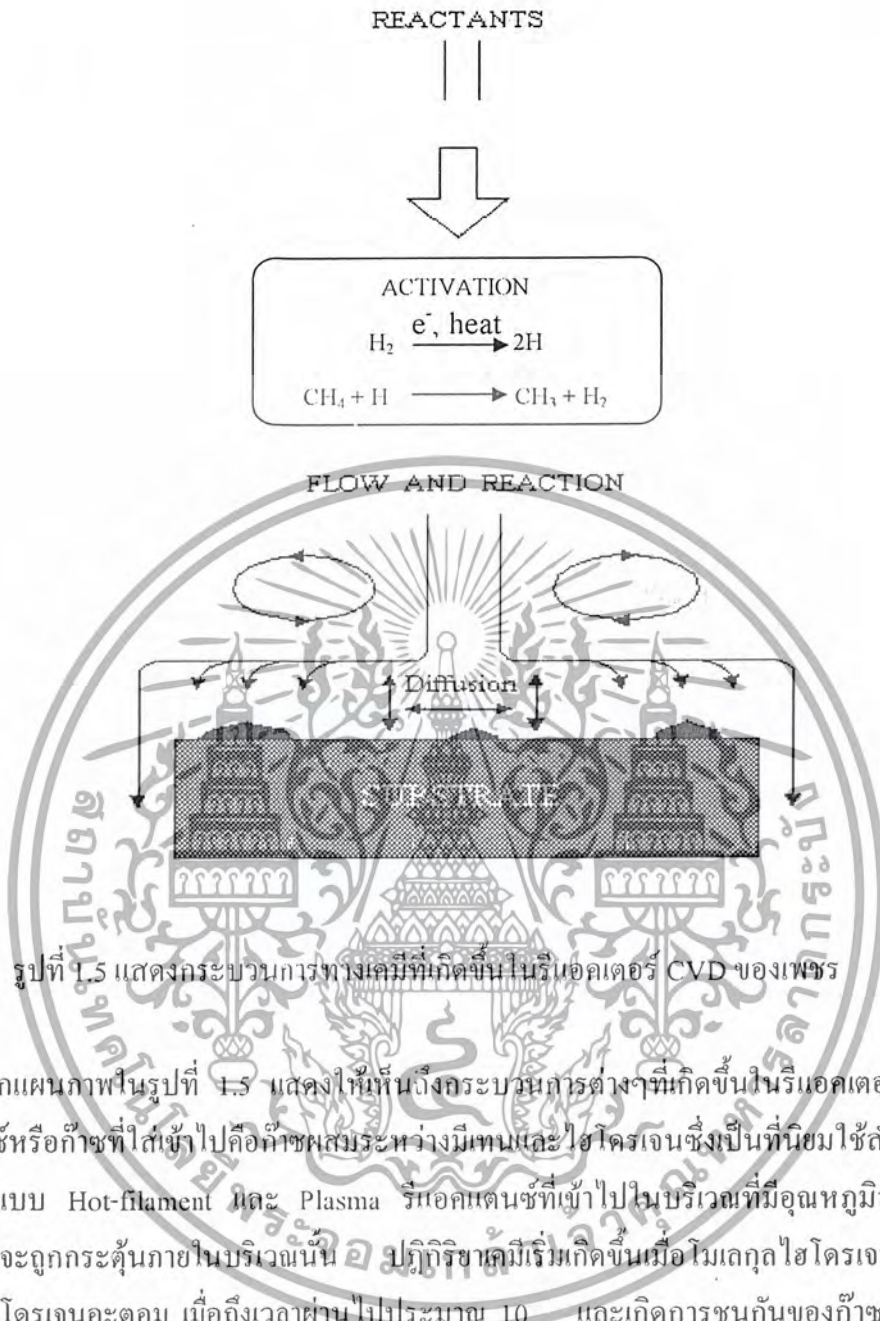
1. ทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุลซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิว

2. แยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอม

ไฮโดรเจน โดยทั่วไปแล้วรีแอกเตอร์ที่ใช้กระตุ้นที่อยู่ 4 วิธีที่นิยมคือ Hot-filament reactors, Microwave plasma reactors, DC arcjet reactor และ Combustion synthesis reactors

แม้ว่าแต่ละระบบการสร้างมีความแตกต่างกันในแง่ของรูปแบบทางวิศวกรรมแต่ทั้งหมดจะมีลักษณะสำคัญพื้นฐานเหมือนกัน คือทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีออกมา พลังงานจำนวนมากที่ใช้จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือเคมี ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนแตกตัว การสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำ เพื่อป้องกันการรวมตัวของอะตอมของไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุล อุณหภูมิของก๊าซเฟสมีค่าสูงกว่า 1700°C เกิดขึ้นที่บริเวณ Activation zone การระบายความร้อนทั้งแบบแอคทิฟหรือพาสซีฟเป็นตัวรักษาระดับอุณหภูมิของฐานรองให้มีความเร็วสูง ประมาณ 925°C

อย่างไรก็ตามกระบวนการส่งผ่านจะมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ในรีแอกเตอร์ทั้งสี่ชนิด ชนิด Hot-filament และ Microwave plasma มีการแพร่เป็นส่วนสำคัญเหมือนกันว่าตรงนั้นไม่มีความร้อน ความเร็วหรือความหนาแน่นของ Boundary layer ดังนั้นจึงมักจะพบการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในอุณหภูมิ ความเร็วหรือความหนาแน่นของอนุภาคระหวางบริเวณกระตุ้น และพื้นผิว การเกิดในแต่ละรีแอกเตอร์ ส่วนรีแอกเตอร์ชนิด Arcjet และ Combustion CVD เป็นชนิดที่มีความเร็วสูง ดังนั้นจึงมีการพาเป็นส่วนสำคัญ ชั้นบางๆของ Boundary layer ในอุณหภูมิ ความเร็ว และความหนาแน่นจะเกิดขึ้นใกล้ๆกับพื้นผิวที่เกิด



รูปที่ 1.5 แสดงกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นในรีแอคเตอร์ CVD ของเพชร

จากแผนภาพในรูปที่ 1.5 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในรีแอคเตอร์ CVD รีแอคแตนต์หรือก๊าซที่ใส่เข้าไปคือก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนซึ่งเป็นที่นิยมใช้สำหรับ รีแอคเตอร์แบบ Hot-filament และ Plasma รีแอคแตนต์ที่เข้าไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง หรือ พลังงานสูงจะถูกกระตุ้นภายในบริเวณนั้น ปฏิกิริยาเคมีเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลไฮโดรเจนแตกตัว ออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม เมื่อถึงเวลาผ่านไปประมาณ 10^{-4} และเกิดการชนกันของก๊าซในรีแอค เตอร์โดยใช้เวลาตั้งแต่ 10^{-4} ถึง 10 s จากนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่างๆจะถูกส่งผ่านโดยการไหล, การ แพร่และการพาจากรีแอคเตอร์ไปยังฐานรองที่บริเวณใกล้ฐานรอง การแพร่จะเข้าสู่บริเวณที่การ ไหลหยุดนิ่งซึ่งถูกเรียกว่า “Boundary layer” พื้นผิวของฐานรองจะเกิดการดูดกลืน, การคาย, การ แพร่ที่พื้นผิว หรือเข้าไปในเนื้อสารและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็น ประโยชน์ต่อการเกิดเพชรและมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อน ของอุณหภูมิ, โครงสร้างและองค์ประกอบของพื้นผิว นอกจากนี้ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD คาร์บอนที่เกิดขึ้นสามารถจับตัวเป็นพันธะเคมีได้หลายรูปแบบแต่ Hybridization ว่าเป็น

sp^1 , sp^2 หรือ sp^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

ภายหลังจากกระบวนการสร้างเพชรเสร็จสิ้นแล้ว ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบ และวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชรต่อไป การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรมีหลายวิธีการแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น ถ้าต้องการสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรหรือพื้นที่เกิดฟิล์มเพชร นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) แต่หากต้องการวิเคราะห์พันธะอะตอมของคาร์บอน เพื่อตรวจสอบว่าเป็นเพชร, กราไฟต์, อมอร์ฟัส หรือ DLC เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy จะถูกเลือกใช้ สำหรับในโครงการนี้จะใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร 2 วิธี คือ

1. Scanning electron microscopy (SEM)

2. Raman spectroscopy

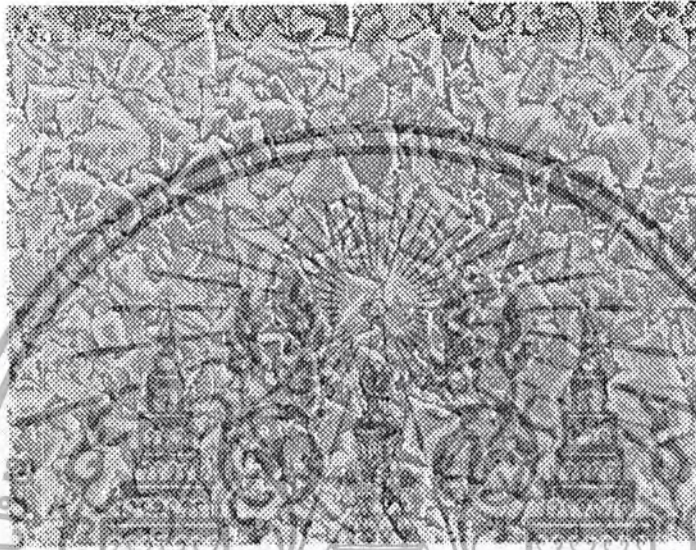
1.8.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน หลักการพื้นฐานของ SEM คือ การกวาดโพกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนจะสามารถปรับโพกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุลย์ ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT ซัดของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่นๆคือ มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50-40,000X) ความคมชัดของภาพสูง (2.5-10 nm) ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเทียบกับ TEM (Transmission Electron Microscopy) ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมากๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องผ่านการเตรียมก่อน แต่หากสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า ก่อนการใช้งานต้องนำไปเคลือบชั้นบางของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าก่อน (นิยมใช้ทองคำหรือคาร์บอน) เช่น ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง Si สามารถที่จะวัดด้วย SEM ได้เลย ในขณะที่ฟิล์มเพชรที่สร้างบนฐานรอง SiO₂ ต้องทำการเคลือบทองคำก่อนไปวัดด้วย SEM อย่างไรก็ตามในการใช้งานลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันแเบะกระแสต่างๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่างๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่

ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรองซิลิกอน Si) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่จนกว่าการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวที่ได้ทำการสร้างฟิล์มบางเพชรขึ้น ดังในรูปที่ 1.6 ซึ่งลักษณะของฟิล์มบางที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้าง โดยจะหาค่าคุณสมบัติของฟิล์มบางและสมบัติของฟิล์มบางของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่อก๊าซไฮโดรเจน ยกตัวอย่าง รูปที่ 1.6 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM ใช้ Si บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวเป็นระนาบ {111} ซึ่งหากใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy จะช่วยให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 1.6 รูปแสดงลักษณะของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นบนซิลิกอน ระนาบ {111}

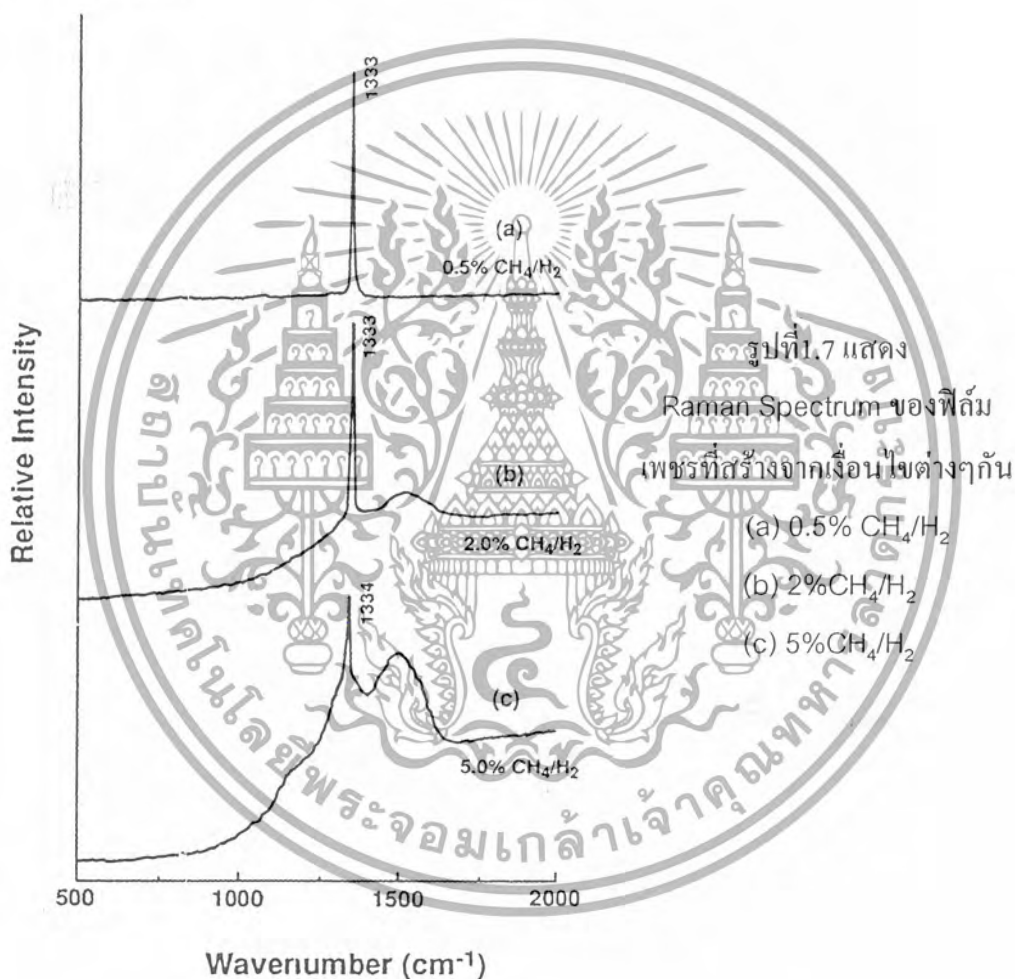
1.8.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman Spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและ กราไฟต์สูง แม้ว่าจะมีกราฟไฟต์เพียงเล็กน้อยก็ตามเนื่องจากประสิทธิภาพการกระเจิงของกราฟไฟต์มีค่ามากกว่าของเพชรมาก ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้ จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของ คาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร, กราไฟต์, อมอร์ฟัสคาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และ พันธะของคาร์บอนแสดงไว้ในตารางที่ 1.2 นอกจากนี้สามารถใช้ Raman spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่างๆกันเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด เช่น รูปที่ 1.7 แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่างๆกันคือ (a) 0.5% CH₄/H₂ (b) 2% CH₄/H₂ และ (c) 5% CH₄/H₂

รูปที่ 1.7a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm⁻¹ ซึ่งเป็นค่า

ยอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟไฟต์ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 1.7b พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ 1500 cm^{-1} อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่ สำหรับสเปกตรัมของรูป 1.7c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} ลดลงอย่างมาก และมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ 1334 cm^{-1} ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขในการสร้างที่ใช้ทั้งหมด



นอกจากนี้ Raman spectroscopy ยังมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์หาปริมาณความสัมพันธ์ของพันธะ sp^3 กับพันธะ sp^2 โดยหากทราบความแรงของการกระเจิงสัมพันธ์ก็สามารถพิจารณาหาจำนวนสัมพันธ์ขององค์ประกอบของเพชรและกราฟไฟต์ ในฟิล์มเพชรที่ได้จากการสร้างไม่มีการดูดกลืน ทำให้แสงสามารถผ่านเพชรได้ตลอด ดังนั้นถ้าหากฟิล์มมีกราฟไฟต์เจือปนอยู่แสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารจะไม่เป็นระเบียบ แต่ถ้าฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างที่ไม่เอกลักษณะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสม (เช่น ความเข้มข้นของ CH_4/H_2 มีค่ามากกว่า 20%) ขนาดของผลึกเพชรจะมีผลต่อการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์ม สรุปได้ว่า การวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มเพชรจากเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ของพันธะแบบ sp^3 และ sp^2 จึงมีความสำคัญและยังรวมไปถึงขนาดของผลึกเพชรที่บริเวณ sp^2 ก็มีความสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 1.2 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่างๆ ของคาร์บอน

Peak position	Type of carbon	Description
$\sim 1140 \text{ cm}^{-1}$	small size ($< 0.1 \mu\text{m}$) cubic diamond	Occasionally observed in diamond film with very small grain size ($< 0.1 \mu\text{m}$)
$1315\text{-}1326 \text{ cm}^{-1}$	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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง

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

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งถ้าให้ λ เป็นความยาวคลื่นแสง v คือความถี่ของคลื่นแสง และ c_0 คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ (3×10^8 m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = \frac{c_0}{v} \quad (2.1)$$

ถ้าแสงเดินทางในวัตถุที่มีเนื้อเรียบตลอดและเป็นวัตถุไอโซโทรปีแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง ที่ขอบของวัตถุทั้งสองนี้แสงจะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ n จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าในสุญญากาศ กล่าวคือความเร็วแสง (c) ในวัตถุเท่ากับ

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.2)$$

ค่าดัชนีหักเหแสงของวัตถุใดๆจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความถี่ของแสงด้วย และค่าดัชนีหักเหแสงนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ ของวัตถุ ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2.3)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของสุญญากาศ = 8.854×10^{-12} F/m

2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

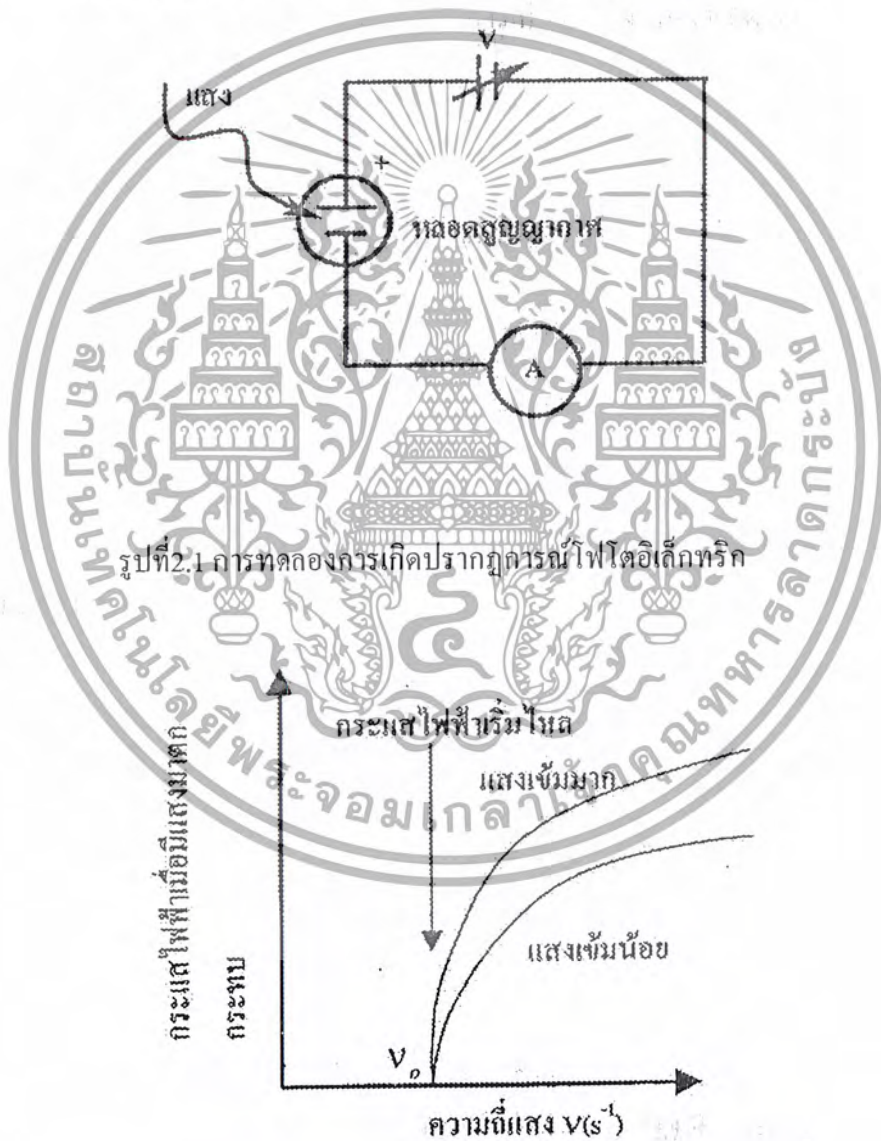
แสงนอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคของแสงว่า โฟตอน (Photon) อนุภาคของแสงจะมีพลังงานอยู่ภายในตัวของมันและถ้าแสงมีความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ V อนุภาคของแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์ มีค่า 6.6261×10^{-34} J.s และแสงที่มีความยาวคลื่น λ ใดๆจะมีพลังงานโฟตอนเป็น

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

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศ แล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะหลุดออกจากโลหะ แสดงวิธีการทดลองดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้อธิบายว่า เมื่อแสงที่มีความถี่ ν เดินทางไปเป็นปริภูมิ (space) แทนที่จะเป็นได้โดยแยกเป็นคลื่นต่อเนื่อง แต่จะแยกเป็นอนุภาคเป็นพลังงานเท่ากับ $h\nu$ ที่เรียกว่าเป็น ปริภูมินั้น โอน์สไตน์ได้ตั้งชื่ออนุภาคแสงนี้ว่า light quantum ต่อมาเรารู้จักกันในชื่อ โฟตอน

จากนั้น โอน์สไตน์ยังได้อธิบายรายละเอียดของปรากฏการณ์ในรูปที่ 2.2 ใ้ว่า พลังงาน สูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ E มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวโลหะ $h\nu$ ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก $q\phi$ และเขียนเป็น สมการได้เป็น

$$E = h\nu - q\phi \tag{2.5}$$

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

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์

หลักการทํางานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการค้นพบเมื่อประมาณ 180 ปีมาแล้ว โดยในปี ค.ศ.1817 เบอริชเชิลีอุส (Berzelius) ได้ค้นพบธาตุซิลิเนียม และสามารถเตรียมธาตุซิลิกอนได้เป็นครั้งแรกจากผลนี้ทำให้มีการค้นพบลักษณะความนำจําเพาะทางแสง(Photoconductivity) ในซิลิเนียม โดยวิลลาจบี สมิท(Willoughby smith) ในปี ค.ศ. 1873 จากนั้นได้มีการค้นพบผลของโฟโตโวลตาอิก โดยอดัมและเดย์(Adam and Day) ในปี ค.ศ.1876 หลังจากนั้นอีก 7ปีต่อมาฟริทท์(Fritts) จึงได้อธิบายผลของโฟโตโวลตาอิกเซลล์ที่ทำมาจากซิลิเนียมเป็นคนแรก และในปี ค.ศ.1904 ฮอลวอชด์ (Hallwachs) ก็ได้สังเกตพบความไวแสง(Photosensitivity)ในโครงสร้างของคอปเปอร์คิวปริสออกไซด์(Copper Cuprous oxide).

จากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในการสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบโกรว์จังก์ชัน(Growth junction)ทำให้มีการเตรียมสร้างอุปกรณ์แบบ โฟโตโวลตาอิกที่ทำมาจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอน ในปี ค.ศ.1941 จนกระทั่ง 12ปีต่อมาจึงได้มีการพัฒนาการสร้างรอยต่อพี-เอ็นขึ้นด้วยวิธีการแพร่สารเจือ (Impurity diffusion method) ในปีแรกของการพัฒนาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีใหม่ ทำให้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานได้ 6% อีก 2ปีต่อมามีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเป็น 14% ในปี ค.ศ.1958

นอกจากนี้ยังได้มีการสร้างเซลล์ด้วยสารประกอบอื่นๆนอกเหนือไปจากซิลิกอนซึ่งเป็นธาตุแท้ โดยเริ่มจากคอปเปอร์คิวปริสออกไซด์ แต่พบว่ามันให้พลังงานออกมาน้อยกว่าที่สร้างจากซิลิกอน จึงได้มีการพัฒนาเซลล์ที่สร้างมาจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ แคลเดเมียมซัลไฟด์และแคลเดเมียมเทลลูไรด์ ปรากฏว่าเซลล์ที่สร้างจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่เนื่องจากแกลเลียมอาร์เซไนด์มีราคาวัสดุที่สูงกว่าซิลิกอนมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอาทิตย์ สำหรับแคดเมียมเซลล์ไฟด์และแคดเมียมเทลลูไรด์สามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยใช้เทคนิคทางด้านฟิล์มบางทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง แม้ในช่วงแรกจะมีประสิทธิภาพต่ำและเสถียรภาพในการทำงานยังไม่ได้หนักแต่ก็คาดได้ว่าจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สำคัญต่อไปในอนาคต

2.2.2 พลังงานแสงที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกผ่านชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ (Atmosphere) จะมีพลังงานน้อยลง และมีผลตอบสนองทางความถี่แสงแตกต่างไปจากแสงอาทิตย์ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ ทั้งนี้เนื่องมาจากในชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์ประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด รวมทั้งไอน้ำและฝุ่นละอองต่างๆที่เป็นตัวดูดกลืนพลังงานแสงบางส่วนเอาไว้และทำให้แสงบางส่วนเปลี่ยนทิศทาง

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาความเข้มและผลตอบสนองทางความถี่ของแสงอาทิตย์จึงได้มีการกำหนดค่า แอร์แมสเอ็ม (Air Mass m) ขึ้น โดยที่แอร์แมสเอ็ม คืออัตราส่วนระหว่างระยะทางเดินของแสงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ ต่อระยะทางเดินของแสงเมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะ แสดงได้โดยสมการ

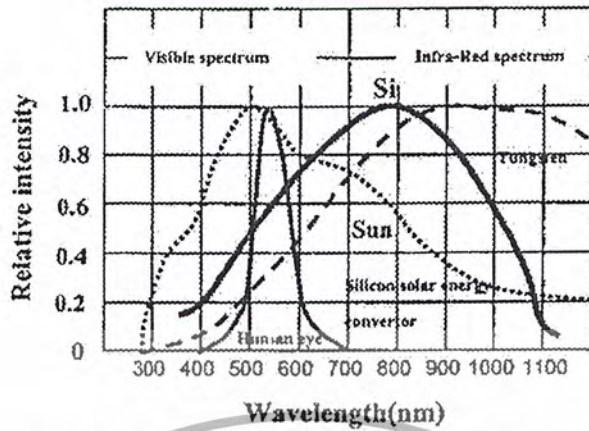
$$m = \sec(z) = 1/\cos(z) \quad (2.6)$$

โดยที่ z คือมุมระหว่างแนวของลำแสงที่ทำกับแนวตั้ง แสงอาทิตย์ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศเอทโมสเฟียร์จะเรียกว่าชั้นแอร์แมสซีโร (Air Mass Zero, AM0) จะถือว่ามีค่าพลังงาน 138 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับแสงอาทิตย์ที่ผิวโลกที่ระดับน้ำทะเลในตอนเที่ยงวันอยู่เหนือศีรษะจะเรียกว่า ชั้นแอร์แมสวัน (Air Mass One, AM1) จะถือว่ามีค่าพลังงาน 100 มิลลิวัตต์ ต่อตารางเซนติเมตร ในปัจจุบันในการวัดเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นโลกจะใช้ค่า Air Mass อยู่ที่ AM 1.5 ซึ่งจะมีพลังงานอยู่ที่ 832 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรปริมาณของพลังงานแสงนี้ ได้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งก็คือประสิทธิภาพของเซลล์นั่นเอง

2.2.3 ผลตอบสนองความถี่แสงของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแสงที่มีความถี่ต่างๆ มากมายรวมกันอยู่ตั้งแต่แสงที่มองไม่เห็นและมองเห็นด้วยตาเปล่า เส้นประในรูปที่ 2.3 เป็นผลตอบสนองความถี่ของแสงอาทิตย์ในชั้น AM1 เมื่อได้พิจารณาผลตอบสนองความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนที่มีความถี่ต่างๆ ดังแสดงเป็นเส้นทึบในรูปจะเห็นได้ว่าจุดสูงสุดของกราฟ ทั้งสองมีความถี่ไม่ตรงกันซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียพลังงานแสงในกรณีนี้ไปส่วนหนึ่ง โดยพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่นแสงที่ 5000 อังสตรอม ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์จะมีผลตอบสนองทางแสงมากที่สุดความยาวคลื่นแสงที่ 8000 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

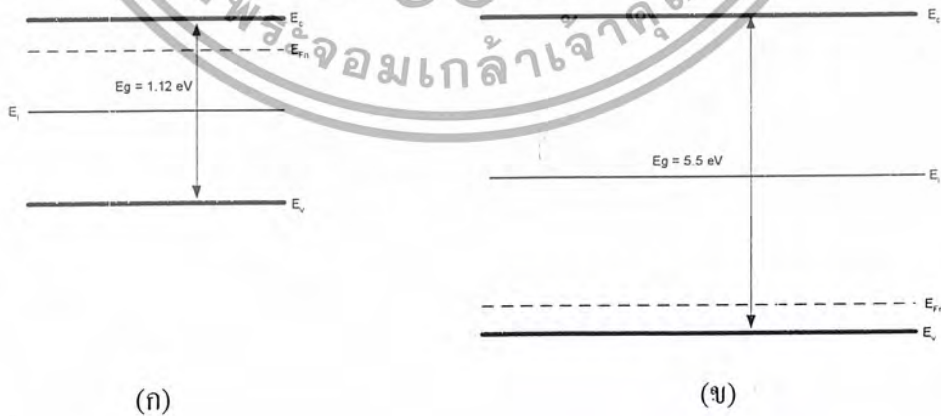


รูปที่ 2.3 ผลตอบค่นองทางควมยาวคลื่นแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

2.3 ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

2.3.1 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้แก่สารกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมของธาตุหมู่ที่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส (phosphorus) อาร์เซนิก (arsenic) และแอนติโมนี (antimony) ลงไปใน ซิลิกอนบริสุทธิ์ จะทำให้ซิลิกอนมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ ระดับเฟอร์มิของซิลิกอนจะอยู่ใกล้กับแถบความนำ จะอยู่ใกล้มากน้อยแค่ไหนก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมอะตอมสารเจือ ลักษณะของแถบพลังงานของซิลิกอนชนิดเอ็นนี้ จะแสดงได้ในรูปที่ 2.4 (ก)



รูปที่ 2.4 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (ก) ซิลิกอนชนิดเอ็น (ข)ซิลิกอนชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรชนิดพี

สารกึ่งตัวนำฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD ซึ่งในระหว่างขั้นตอนการสร้างนั้นต้องมีการเติมอะตอมสารเจือโบรอนเข้าไปด้วย และค่าระดับพลังงานเฟอร์มิของฟิล์มเพชร นั้นจะมีลักษณะอยู่ใกล้กับแถบพลังงานวาเลนซ์ ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมอะตอมสารเจือโบรอน ซึ่งได้มีผู้ทำการทดลองไว้แล้วว่า ถ้าเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือโบรอนอยู่ระหว่าง 10 ppm ถึง 1000 ppm นั้น ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ประมาณ 0.14 - 0.18 eV โดยรูปแถบพลังงานของฟิล์มเพชรจะแสดงได้ดังรูป 2.4(๗)

2.4 ทฤษฎีรอยต่อ

จากหัวข้อที่แล้วเราพูดถึงลักษณะของสารกึ่งตัวนำขึ้นเดี่ยวๆ ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้มากนัก แต่ถ้าเรานำสารกึ่งตัวนำสองชนิดไม่ว่าจะเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี มาต่อเข้าด้วยกันด้วยวิธีทางเคมีแล้ว เราจะสามารถนำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนี้มาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายขึ้น เช่น ทำเป็นไดโอด ทรานซิสเตอร์ โฟโตไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์และวงจรรวม(IC) รอยต่อนี้มีได้หลายรูปแบบเช่น รอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน(Homojunction) เช่น ซิลิกอนชนิดเอ็นกับซิลิกอนชนิดพี และรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน(Heterojunction) เช่น ซิลิกอนกับเพชร และรอยต่อก็มีได้อีกหลายแบบเช่น รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆรอยต่อที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะมีลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ อีกทั้งยังเป็นพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษอื่นๆ ซึ่งมีรอยต่อมากกว่าหนึ่งรอยต่ออีกด้วย ส่วนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพูดถึงรอยต่อแบบเนื้อสารต่างชนิดกันเท่านั้นซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างซิลิกอนและฟิล์มเพชร

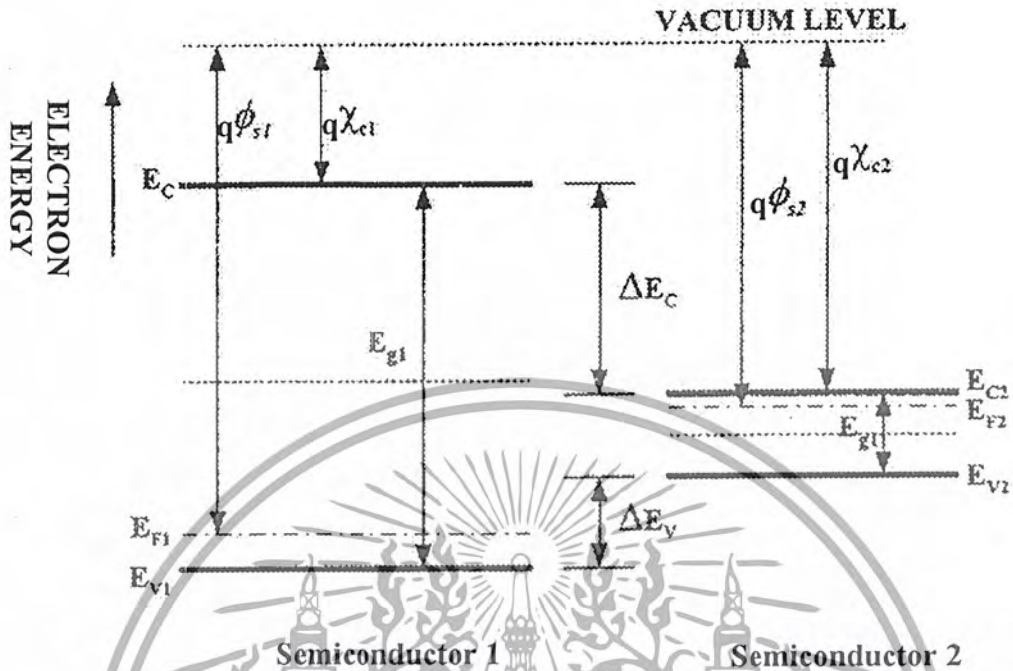
2.4.1 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารชนิดเดียวกัน

ได้แก่การนำเอาสารกึ่งตัวนำที่เป็นชนิดเดียวกันเช่น ซิลิกอนชนิดเอ็นและซิลิกอนชนิดพีมาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งจะสามารถประยุกต์การใช้งานต่างได้มากมายแต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่พูดถึงมากนัก

2.4.2 รอยต่อ พี-เอ็น ของเนื้อสารต่างชนิดกัน

รอยต่อพีเอ็นแบบเนื้อสารต่างชนิดกันเป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่างกัน โดยมีความเข้ากันได้ดีของ ค่าคงที่แลตทิซ(lattice constant) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน เช่น รอยต่อระหว่างเพชรกับซิลิกอน แต่อย่างไรก็ตาม อาจจะไม่เสมอไป และอาจจะมีจุดบกพร่อง เช่น เกิดสภาวะอินเตอร์เฟซ(interface) ที่พื้นที่ผิวของรอยต่อสภาวะนี้สามารถแสดงเป็นศูนย์กลางการกักเก็บ (trapping center) ซึ่งจะเป็นการจำกัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ แบบจำลองแถบพลังงานของรอยต่อที่มีเนื้อสารต่างชนิดกันแบบอุดมคติโดยปราศจากสภาวะอินเตอร์เฟซ ถูกเสนอโดย Anderson โดยมีพื้นฐานของ Shockley เราจะพิจารณาแบบจำลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

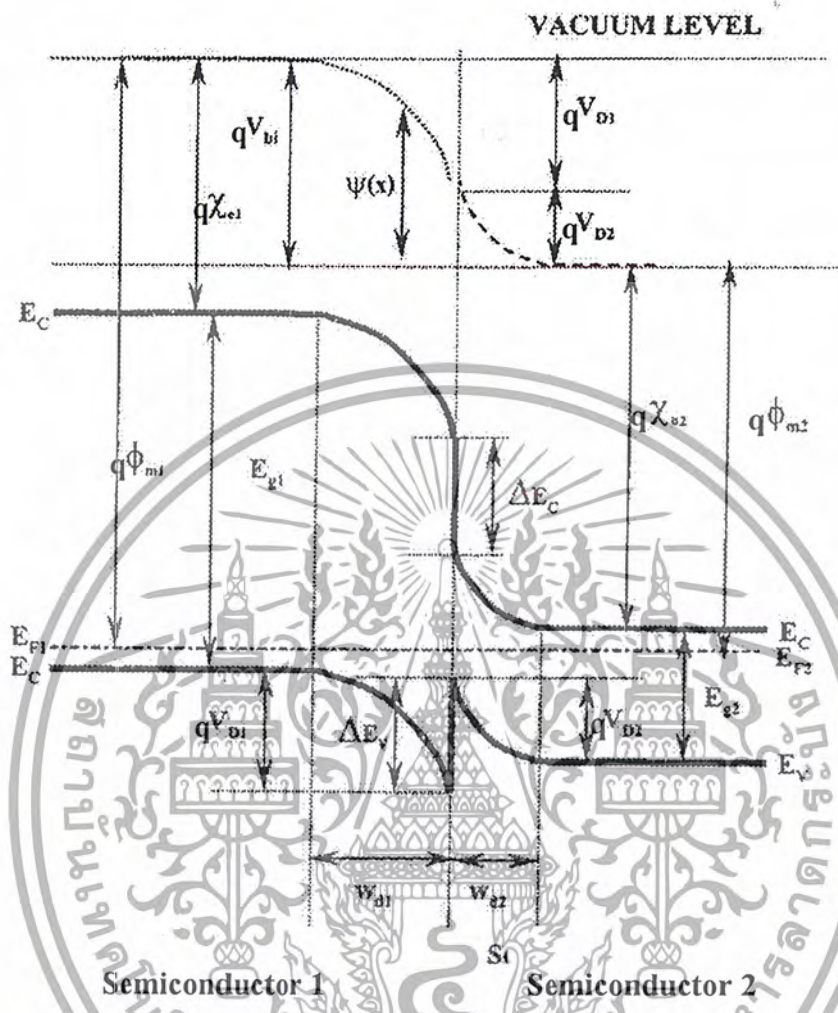


รูปที่ 2.5 ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ที่ยังไม่นำมาต่อกัน

จากรูปไดอะแกรมแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่มีความแตกต่างกันของแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ) และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (χ) โดยค่าฟังก์ชันงานและค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี คือพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากระดับเฟอร์มิไปยังระดับสูญญากาศ และพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขอบล่างของแถบความนำไปยังระดับสูญญากาศ ตามลำดับ และความแตกต่างของแถบความนำและแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเป็น ΔE_c และ ΔE_v ตามลำดับ เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาต่อเข้าด้วยกัน แถบพลังงานที่แสดงสถานะสมดุลจะแสดงในรูปที่ 2.6

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันที่สภาวะสมดุล

สมการสำหรับความแตกต่างของแถบความนำ ΔE_c คือ

$$\Delta E_c = \lambda_{e2} - \lambda_{e1} \tag{2.7}$$

และความแตกต่างของแถบวาเลนซ์แสดงได้จากสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.7 และ 2.8 เราได้ว่า

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

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

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

โดยที่

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

V_{D1} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 1

V_{D2} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 2

และค่าของ V_{D1} และ V_{D2} สามารถหาได้จากสมการ

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

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

โดยที่ ϵ_1 และ ϵ_2 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

N_1 และ N_2 คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

และค่าความกว้างของช่วงปลอดพาหะ (depletion width) ของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำที่หาได้จากสมการ Poisson มีค่าตามสมการดังนี้

$$w_{d1} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_1\epsilon_2 N_2 V_D}{qN_1(\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2)}} \quad (2.13)$$

$$w_{d2} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_1\epsilon_2 N_1 V_D}{qN_2(\epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2)}} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

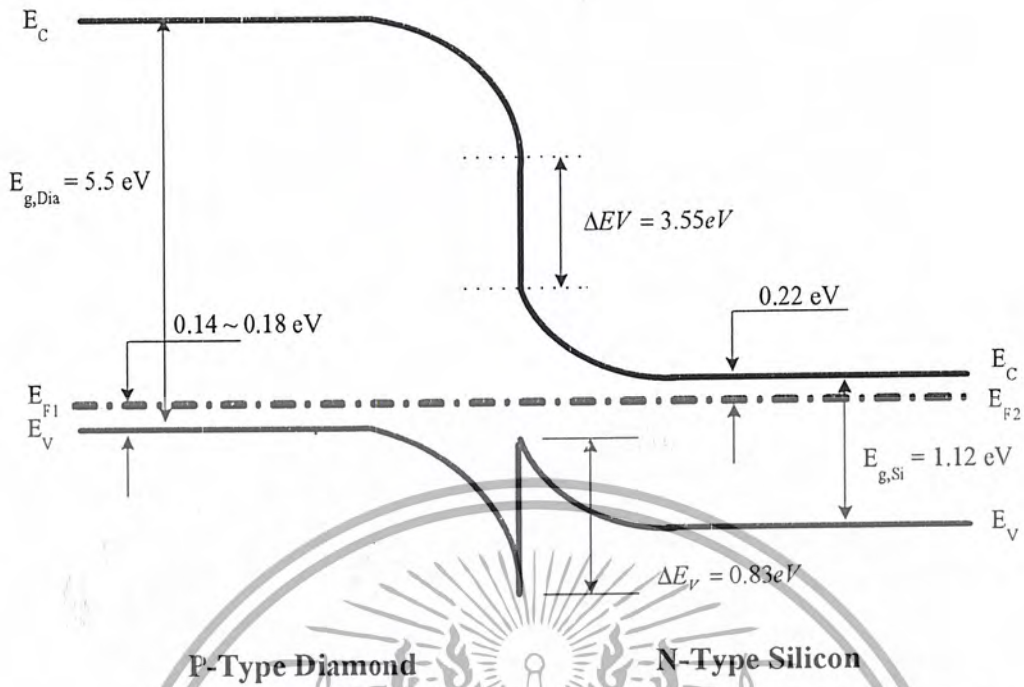
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษารายต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็น โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแถบพลังงานที่อุณหภูมิ 300K ได้มีผู้ทำการวิจัยไว้แล้ว แสดงได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้แบบจำลองแถบพลังงาน ที่อุณหภูมิ

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

นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาเขียนลักษณะของแถบพลังงานได้ดังรูปที่2.7 จะเป็นลักษณะแถบพลังงานในอุดมคติจะสังเกตได้ว่าที่บริเวณรอยต่อนั้นจะไม่มี interface states เกิดขึ้นแต่ในความเป็นจริงแล้วก่อนการสร้างฟิล์มเพชรลงบนซิลิกอนจะต้องมีการขัดผิวหน้าซิลิกอนก่อน ที่รอยขัดที่ผิวหน้าซิลิกอนนี้เองจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด interface states ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการแท็บบประจุพาหะที่จะข้ามตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนี้แย่ง ดังนั้นในการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ ของรอยต่อในขั้นตอนต่อไปนั้นจะต้องนำเอาผลของ interface states ที่เกิดขึ้นมาพิจารณาด้วย

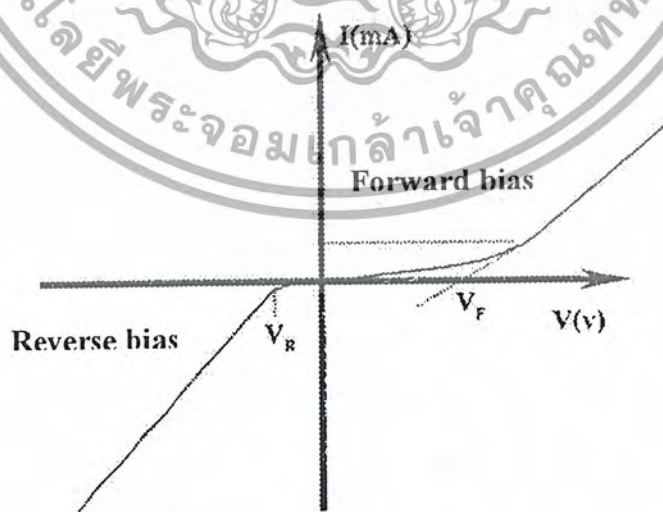
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดเอ็น

2.4.2.1 การไบแอสตรงให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si

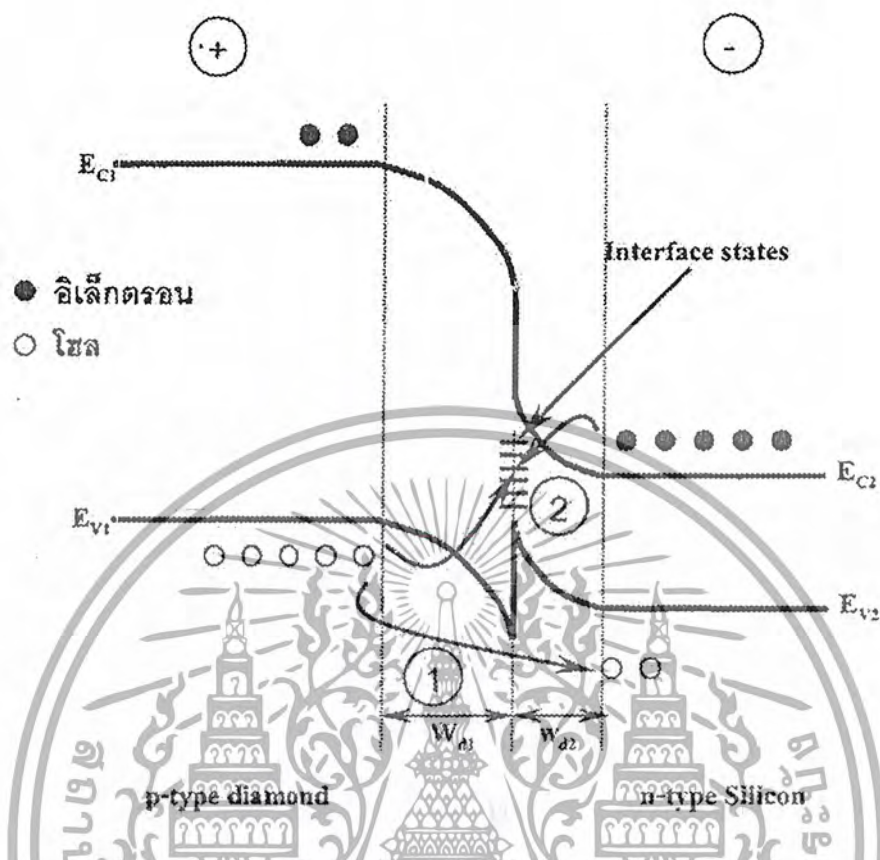
จากการทดลองวัดคุณสมบัติกระแสแรงดันของ p-Dia/n-Si จะได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะเป็นได้ว่าในขณะที่ทำการให้ไบแอสตรงในช่วงที่ต่ำกว่า V_F นั้น กระแสจะไหลได้น้อย และเมื่อให้ไบแอสเพิ่มขึ้นค่าแรงดันซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดันขั้วคริม ในกรณีนี้ให้เป็น V_F กระแสจะไหลได้มาก ผิดกับกรณีให้ไบแอสย้อนกลับถ้าให้แรงดันมากกว่า V_R ซึ่งมีค่าน้อยกับรอยต่อกระแสจะไหลได้ทันที



รูปที่ 2.8 กราฟคุณสมบัติกระแสแรงดันของ p-Dia/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถใช้ทฤษฎีของแถบพลังงานอธิบายได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ p-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสตรง

ในขณะที่ไบแอสตรงให้กับรอยต่อ นั้น กระแสที่ไหลจะแบ่งได้เป็นสองกรณี กรณีที่หนึ่ง แสดงโดยเลข 1 ในรูปที่ 2.9 โฮลจะไหลจากแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำเพชรไปยังแถบวาเลนซ์ของซิลิกอน ซึ่งที่แถบวาเลนซ์ตรงบริเวณรอยต่อ นั้นจะเกิด spike ขึ้น เมื่อให้การไบแอสน้อยๆซึ่งน้อยกว่า V_f นั้นกระแสจะไหลได้ปริมาณน้อยเนื่องจากบริเวณ spike นั้นจะมีพลังงานศักย์ค่าหนึ่งกันโฮลอยู่ ซึ่งถ้าโฮลมีพลังงานต่ำๆ จะไม่สามารถไหลไปยังซิลิกอนได้ โดยสังเกตได้จากรูปที่ 2.8

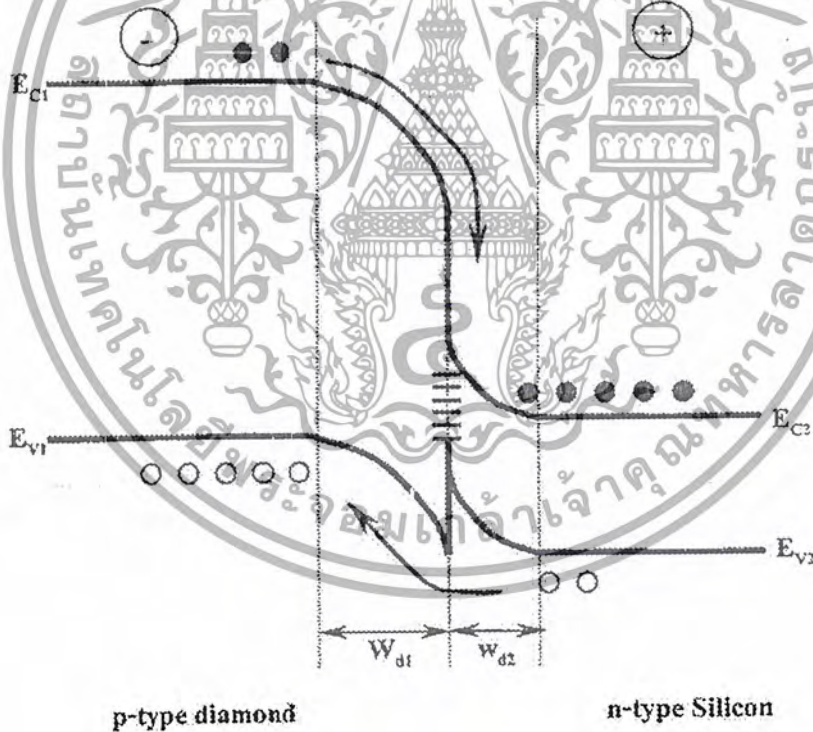
แต่ถ้าให้ไบแอสที่มีค่าสูงกว่าค่า V_f จะทำให้ความสูงของ spike ลดลงและพลังงานศักย์ที่บริเวณ spike มีค่าลดลงก็จะทำให้โฮลสามารถไหลผ่านไปยังซิลิกอนได้ กระแสมีการไหลเพิ่มขึ้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 การไบแอสย้อนกลับให้กับรอยต่อ p-Dia/n-Si

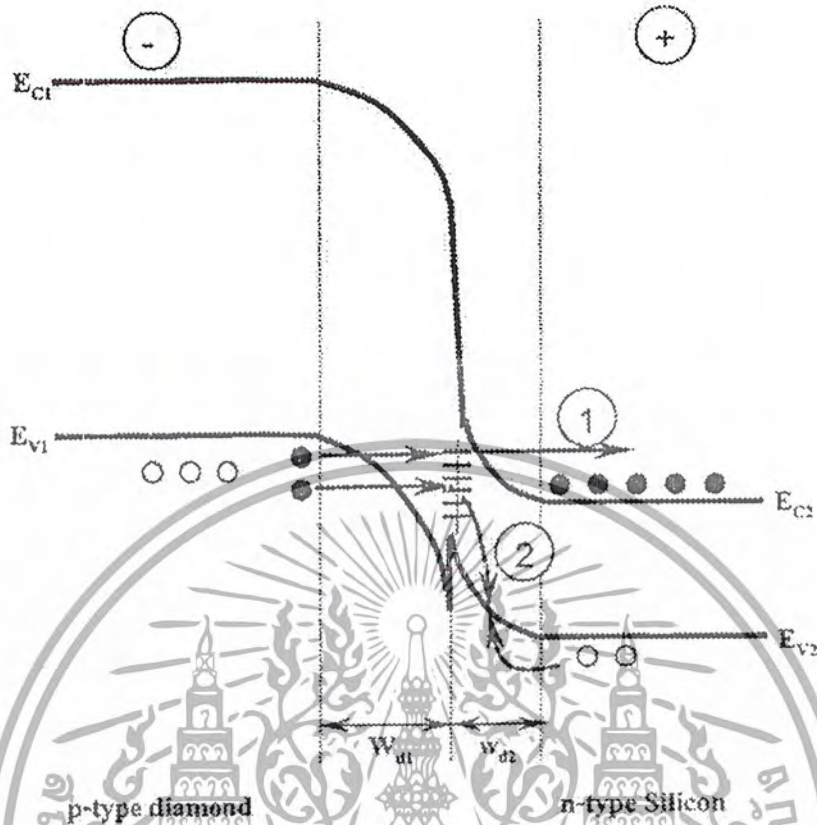
ในกรณีการให้ไบแอสย้อนกลับแก่รอยต่อนั้น ในขณะที่แรงดันน้อยๆซึ่งน้อยกว่าค่า V_R ประจุพาหะส่วนน้อยจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้กระแสไหลในรอยต่อ ซึ่งอิเล็กตรอนจากฟิล์มเพชรชนิดพีจะไหลมายังซิลิกอนเอ็น ในขณะที่เดียวกันโฮลจากซิลิกอนชนิดเอ็นจะไหลมายังฟิล์มเพชรชนิดพี กระแสจะยังไหลปริมาณน้อยอยู่เพราะเกิดการไหลของประจุส่วนน้อย ลักษณะของแถบพลังงานในกรณีนี้แสดงโดยรูปที่ 2.10 แต่ถ้าให้ไบแอสกลับเพิ่มขึ้น ลักษณะของแถบพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าระดับพลังงานวาเลนซ์ของฟิล์มเพชรจะอยู่สูงกว่าแถบความนำของซิลิกอนในกรณีนี้จะเกิดปรากฏการณ์ทะลุผ่าน(tunneling effect) ขึ้น คืออิเล็กตรอนในฟิล์มเพชรชนิดพีนั้นจะเคลื่อนที่ทะลุรอยต่อเข้าไปยังแถบความนำของซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งแสดงได้โดยเลข 1 ในรูปที่ 2.11 และโฮลในซิลิกอนจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ทะลุรอยต่อที่บริเวณแถบวาเลนซ์ของซิลิกอน ในบริเวณ depletion region แสดงได้โดยเลข 2 ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10

ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ p-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับขณะที่ $V < V_R$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11

ลักษณะของแถบพลังงานของรอยต่อ p-Dia/n-Si ในขณะที่ได้รับไบแอสย้อนกลับในขณะที่ $V > V_R$

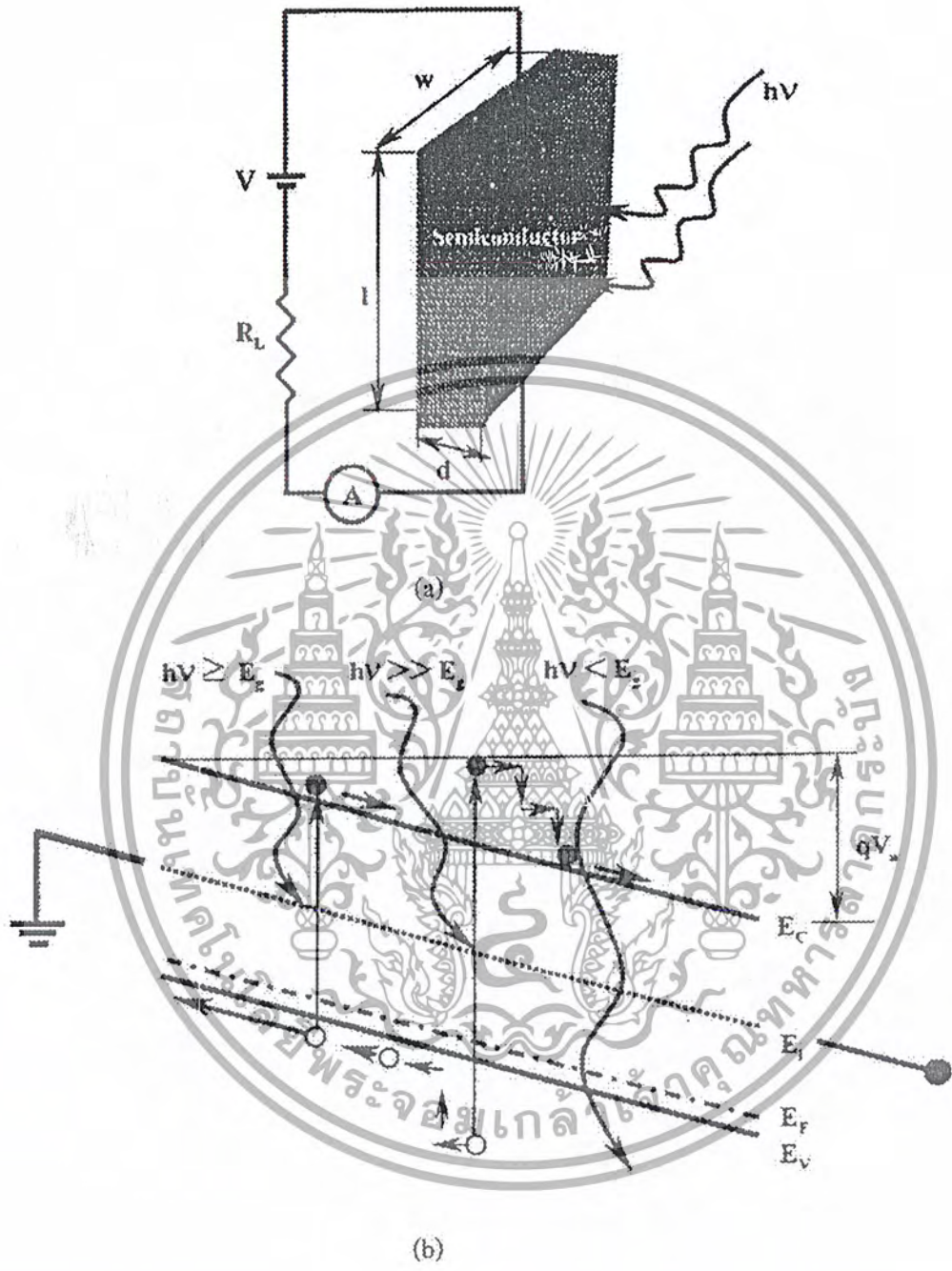
2.5 ปรัชการณไฟโตอิเล็กตริก

เป็นปรัชการณที่สงแสงเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ และเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุล ให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบความนำและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ โดยที่พลังงานของแสงนั้นจะต้องมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ปรัชการณไฟโตอิเล็กตริกนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามหลักการดึงอิเล็กตรอนไปใช้งาน คือ โฟโตคอนดักทีฟและโฟโตโวลตาอิก

2.5.1 โฟโตคอนดักทีฟ(Photoconductive)

โฟโตคอนดักทีฟ ได้แก่ การป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกให้สารกึ่งตัวนำ เพื่อให้อิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำวิ่งออกสู่ภายนอก และ เกิดกระแสไฟฟ้าไหล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 ส่วนโฮลในแถบวาเลนซ์ก็ช่วยให้กระแสไหลได้เช่นกัน สิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานด้วยปรัชการณนี้ ได้แก่ โฟโตเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12

(a) ลักษณะโฟโตเซลล์

(b) ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตเซลล์เมื่อได้รับแรงดันพร้อมกับมีแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำนั้น ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่า ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นไว้และ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น แต่ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่ง ตัวนำนั้น แสงจะทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำโดยไม่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อีกกรณีหนึ่งถ้าแสงมี พลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างพลังงานมากๆ ก็จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นเช่นกัน แต่ อิเล็กตรอนและโฮลจะมีพลังงานสูงกว่าปกติ และจะเกิดการชนกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำจนลด ระดับพลังงานมาอยู่ที่สภาวะปกติและจะเกิดความร้อนขึ้น เรียกว่าการผ่อนคลายพลังงานความร้อน ของอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12(b)

เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับสารกึ่งตัวนำและทำการฉายแสงดังรูปที่ 2.12(b) จะทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากแสงนั้นมีค่าดังสมการดังต่อไปนี้

$$I_{ph} = (qp E) wd \quad (2.15)$$

โดยที่ E คือสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ V/l

เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับการฉายแสงนั้นคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่เปลี่ยนไปก็คือ สภาพความ นำไฟฟ้า โดยสภาพความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนเนื่องจากแสงเรียกว่า สภาพความนำไฟฟ้าทางแสง (Photoconductivity) โดยเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าและมีการฉายแสงให้กับสารกึ่งตัวนำ สภาพ ความนำไฟฟ้าวรวมที่เปลี่ยนไปนั้นมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \sigma_D + \sigma_{ph} \quad (2.16)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \sigma_D &= e(p_o\mu_p + n_o\mu_n) \\ \sigma_{ph} &= e(\mu_p + \mu_n)G\tau \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

โดยที่ G คือ อัตราการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องมาจากแสง ในที่นี้สมมติให้อัตราการ เกิดอิเล็กตรอนเท่ากับอัตราการเกิดโฮล

τ คือ อายุของประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ในที่นี้สมมติให้อายุของประจุ พาหะอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมสารเจือ สภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าจะขึ้นอยู่กับค่าของจำนวนความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ และค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ ในขณะที่ ค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสงจะขึ้นอยู่กับค่าของประจุพาหะส่วนน้อยที่เกิดเนื่องจากแสง

2.5.2 โฟโตโวลทาทิก

สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น เมื่อมีแสงที่มีพลังงานมากพอมาตกกระทบ พลังงานแสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนเอาไว้ ถ้าพลังงานส่วนนี้มีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะทำให้ อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดข้ามไปยังแถบความนำได้ และจะเหลือโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนที่กระโดดข้ามไปยังแถบความนำนั้นจะเคลื่อนที่อย่างไม่มีการทิศทาง จนหมดพลังงานที่จะอยู่ในแถบความนำได้ ก็จะตกลงมาอยู่ที่แถบวาเลนซ์เหมือนเดิม อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากแสงนี้เองที่ทำให้สภาพความนำไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลง แม้จะไม่ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นแต่ก็สามารถนำผลที่เกิดขึ้นนี้ไปสร้างอุปกรณ์ที่มีสภาพความนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามแสงได้ อย่างเช่น โฟโตไดโอด

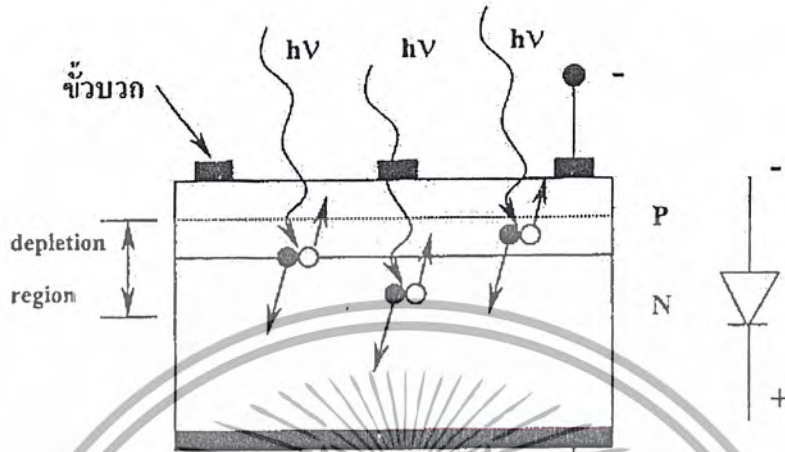
2.6 โฟโตไดโอด(Photodiode)

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่รับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพี-เอ็น เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่รอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ อาจรวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วถ้ากล่าวถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่ง ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจจับความเข้มแสง

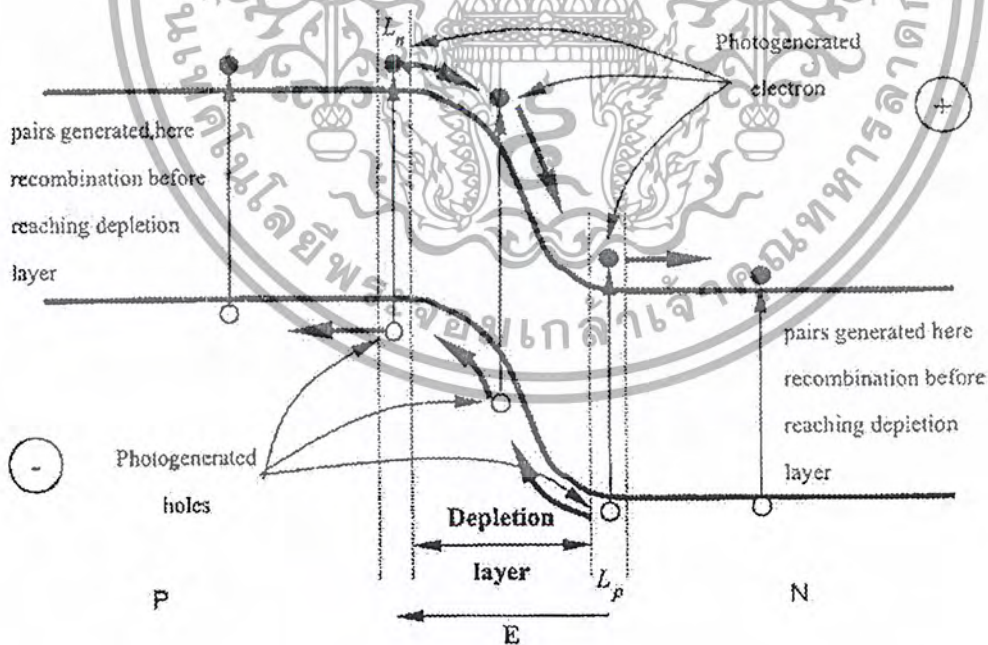
หลักการทำงานของโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็นที่เป็นแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดทางด้านที่รับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่ต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่รอยต่อพี-เอ็นนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยขบวนการโฟโตโวลทาทิก เมื่อมีแสงมาตกกระทบโฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบความนำ และที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่

รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ที่ชั้นพี ที่ชั้นปลอดพาหะ และที่ชั้นเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบความนำในชั้นพี จะแพร่กระจายไปในชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบความนำในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในพัฒนาให้วิ่งไปสู่ในชั้นเอ็น ส่วนในกรณีของโฮลก็จะไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจากแถบวาเลนซ์ในชั้นเอ็น หรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ในชั้นพี จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนของแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างภาคตัดขวางแสดงโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การหาสมการในการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในโฟโตไดโอดนั้นจะต้องอาศัยวงจรสมมูลของโฟโตไดโอด ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

2.6.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ คือ

I_L = กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง

C_j = ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็น

R_s = ความต้านทานอนุกรม

I_D = กระแสไฟฟ้ามืดในไดโอด

I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}

R_{sh} = ความต้านทานขั้ว

V_a = แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด

V_o = แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

I_o = กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพีเอ็น

จากวงจรนี้สามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้าเอาต์พุต(I_o) ได้จากสมการ

$$I_o = I_L - I_D - I = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_a}{kT} - 1 \right) - 1 \quad (2.18)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L - I'}{I_s}\right) \quad (2.19)$$

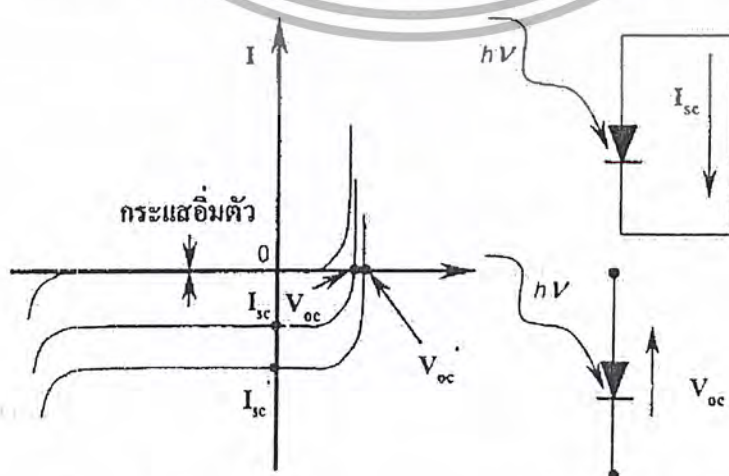
ถ้า I' มีค่าน้อยมาก เราอาจไม่คิดค่า I' ก็ได้ ส่วน I_s จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ ดังนั้น V_{oc} จะแปรผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น V_{oc} จะลดลง และ V_{oc} จะแปรผันตรงกับ I_L แบบ $\ln I_L$ แต่ถ้าแสงมีความเข้มน้อยมาก ความสัมพันธ์เหล่านี้จะไม่ชัดเจน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) คำนวณได้จากการให้ $R_L = 0$ และ $V_o = 0$ ดังนั้น

$$I_{sc} = I_L - I_s \left(\exp \frac{q(I_{sc} R_s)}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (2.20)$$

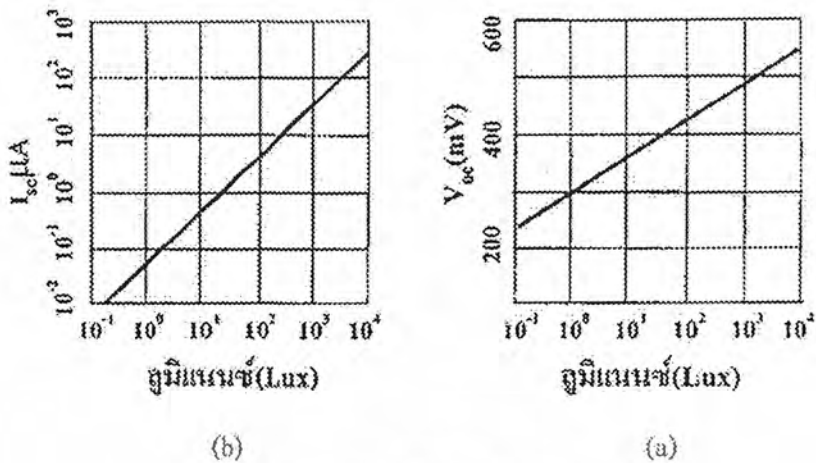
ในสมการนี้ พจน์ทางขวาพจน์ที่ 2 และ 3 จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการเป็นเชิงเส้นของ I_{sc} ถ้า R_s มีค่าไม่เกิน 10Ω และถ้า R_{sh} มีค่าระหว่าง $10^7 \sim 10^{11} \Omega$ จะทำให้สามารถตัดพจน์ที่ 2 และ 3 ทางขวามือได้

2.6.2 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า โฟโตไดโอดก็คือ อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับไดโอด ดังนั้นในขณะที่ยังไม่มีแสงส่องกระทบที่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้กันทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.16 (เส้นหมายเลขหนึ่ง) เมื่อมีแสงส่องเข้าสู่โฟโตไดโอด จะทำให้เส้นระหว่างกระแสแรงดันเลื่อนแบบขนานไปสู่เส้นหมายเลข 2 แต่ถ้าความเข้มแสงมากขึ้นก็จะเป็นเส้นกราฟแบบหมายเลข 3 ในขณะที่ส่องแสงอยู่ถ้าเราทำการวัดกระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอดจะได้ค่า I_{sc} หรือ I'_{sc} โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปแคโทด ถ้าเป็นวงจรเราจะได้แรงดันวงจรเปิด V_{oc} หรือ V'_{oc} และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sc} จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มแสงเป็นลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมากดังแสดงในรูปที่ 2.17(a)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่ขอใช้เอกสารนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น โดยเอกสารนี้ห้ามใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.16 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่.2.17

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

2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)

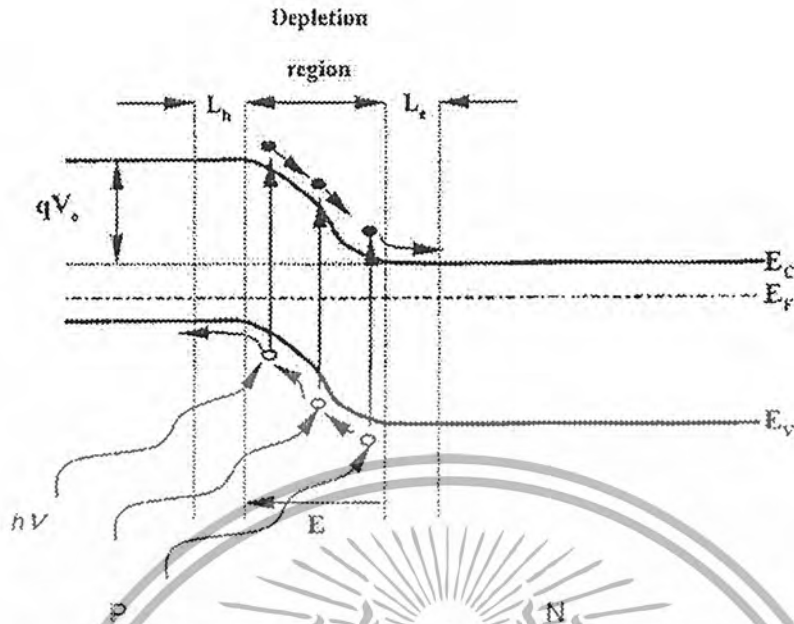
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับโฟโตไดโอด และใช้หลักการโฟโตโวลตาอิกเหมือนกัน โดยเมื่อมีแสงตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์จะเหมือนกับไดโอดทั่วไปทุกประการ แตกต่างกันเพียงแต่ ชั้นของสารกึ่งตัวนำทางด้านที่รับแสง ต้องมีความบางมากๆ จนแสงต้องทะลุไปถึงรอยต่อและสารกึ่งตัวนำด้านที่เป็นฐานรองได้ เพราะฉะนั้นกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่ถูกแสงจะมีลักษณะเหมือนกันกับไดโอดทั่วไป แต่ถ้ามีแสงมาตกกระทบบนแล้วคุณลักษณะกระแสและแรงดันจะเปลี่ยนไป

หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าขึ้นภายในเซลล์ เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปที่ขั้วลบและโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก

2.7.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

2.7.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน (homojunction solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกัน เช่น p-Si/n-Si นั้นหลักการเกิดกระแสโฟตอนนั้นก็จะเป็นลักษณะเช่นเดียวกับ โฟโตไดโอด เพียงแต่ลักษณะการใช้งานนั้นไม่ต้องมีการป้อน แรงดันให้กับเซลล์ ซึ่งรูปทฤษฎีแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



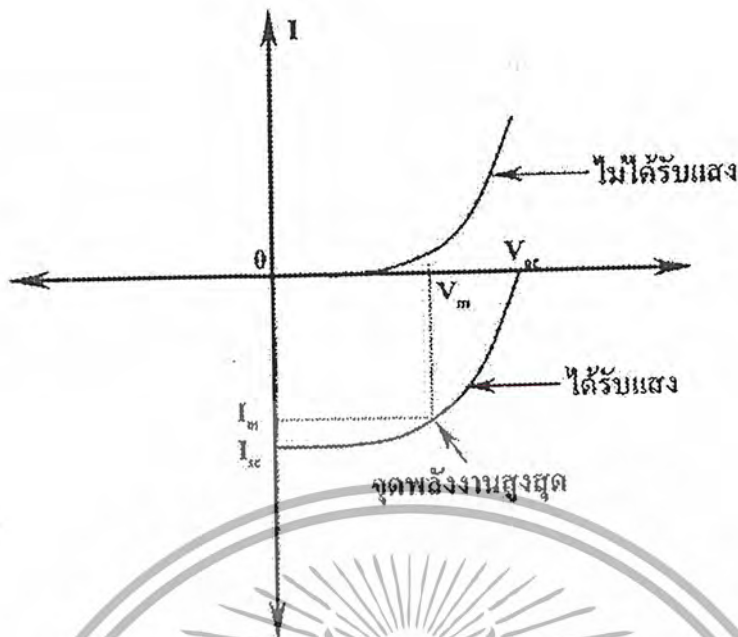
รูปที่ 2.18 ลักษณะการเกิดกระแสโฟโตในเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นและพินาต่อเข้าด้วยกันนั้น จะได้ลักษณะของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.18 ซึ่งอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ดังเกิดได้จากระดับของพลังงานเฟอร์มีมีค่าเท่ากัน โดยค่าของความต่างศักย์ภายในจะมีค่าเท่ากับ qV_0 เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่บริเวณเปลือยพาหะนั้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้น ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับพลังงานแสงด้วยว่าจะเพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้หรือไม่ ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.5.1 ถ้าพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้และจะเหลือโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ ที่บริเวณเปลือยพาหะนั้นจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ซึ่งมีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้านี้เองจะเป็นตัวทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงให้เคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น ในขณะที่โฮลก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านพี

2.7.1.1.1 คุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นว่า เซลล์จะจ่ายกระแสออกมามากที่สุดเมื่อเซลล์ถูกเปิดดวงจรวด ซึ่งให้ค่าเป็น V_{oc} เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันแล้ว จะพบว่ากราฟคุณสมบัติของเซลล์ในขณะที่ได้รับแสงในรูปที่ 2.19 จะมีอยู่จุดหนึ่งที่มีค่าผลคูณของกระแสและแรงดันมีค่าสูงสุด จุดนี้จะเรียกว่าจุดพลังงานสูงสุดของเซลล์ กระแสและแรงดันที่จุดนี้มีค่าเป็น I_m และ V_m ตามลำดับถ้าเรานำไปให้กับแหล่งรับพลังงานหรือโหลด ที่มีความต้านทานพอดีกับจุดนี้ เซลล์จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดมีค่าสูงสุด ค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมนี้จะคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง V_m ต่อ I_m เพราะฉะนั้น ค่าความต้านทานโหลด = V_m / I_m

ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟที่ 2.19 คือถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันก็จะมีค่ามากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้น เป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อ 2.7.2 จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า “ฟิลแฟกเตอร์” (F.F. :Fill Factor) ของเซลล์ ซึ่งคิดมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์ในทางอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F.F = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.21)$$

- เมื่อ F.F. คือ ค่าฟิลแฟคเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์
 P_m คือ พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ
 I_m คือ กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
 V_m คือ แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
 P_o คือ พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ
 I_{sc} คือ ค่ากระแสลัดวงจร
 V_{oc} คือ แรงดันขณะวงจรเปิด

จะเห็นว่าค่าฟิลแฟคเตอร์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ถ้าค่าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่า เซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติมาก

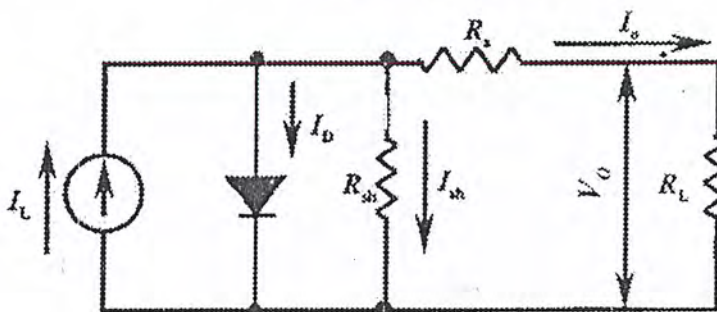
เพื่อที่จะเข้าใจคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะต้องพิจารณาจากวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสที่ นั่นคือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสง (I_L) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และ รอยต่อพี-เอ็นของไดโอด กระแส I_D ที่เกิด เนื่องจากแสงนี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอด และ R_{sh} แล้วจึงไหลมายังโหลด (R_L) กระแสที่ไหลผ่าน R_s และ R_L ให้มีค่าเป็น I_o จะได้ว่า

$$I_L = I_D + I_o \quad (2.22)$$

$$I_o = I_L - I_D \quad (2.23)$$

เมื่อ $R_s = 0$ กระแส I_D มีค่าดังนี้

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า n (Ideality factor) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า รอยต่อมีความสมบูรณ์มากน้อยเพียงใด ในทางอุดมคติถือว่า $n = 1$ ดังนั้น

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

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

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

$$(2.27)$$

ในกรณีนี้ I_o คือ I_{sc} ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดมาจากแสง ในกรณีที่เปิดวงจรทางโหลดเพื่อที่จะดูค่าแรงดันสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{oc}) จะได้ว่า $I_o = 0$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

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

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

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right) \quad (2.29)$$

2.7.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกัน (Heterojunction solar cell)

(cell)

รอยต่อสารกึ่งตัวนำแบบเนื้อสารต่างชนิดกันนั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบ โดยรอยต่อที่เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันมาต่อกันนั้นเราเรียกว่า รอยต่อเฮเทอโรจังก์ชัน (heterojunction) และถ้าสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมีประจุพาหะชนิดเดียวกันเช่นรอยต่อ n/n และ p/p เรียกว่า รอยต่อชนิดไอโซไทป์ (isotype junction) ถ้าสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมีประจุพาหะต่างชนิดกันเช่นรอยต่อ p/n และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n/p เรียกว่ารอยต่อชนิดแอนไอโซไทป์(anisotype junction) ในที่นี้จะพูดถึงเฉพาะรอยต่อแบบแอนไอโซไทป์เท่านั้น

ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแอนไอโซไทป์นั้น แสงอาทิตย์จะสามารถทะลุผ่านชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานมาก (เรียกว่าชั้นหน้าต่าง) ได้โดยถูกดูดกลืนแสงน้อยมาก แสงที่เด้งลอดผ่านชั้นหน้าต่างไปได้นั้นจะถูกดูดกลืนในชั้นถัดไปซึ่งคู่อิเล็กตรอนโฮลจะถูกผลิตขึ้นในชั้นนี้เอง ผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ในชั้นนี้ จะมีค่าสูงในช่วงพลังงานโฟตอนที่ครอบคลุมช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้ โดยชั้นหน้าต่างนี้ยังเป็นตัวช่วยกรองรังสีต่างๆได้อีกด้วย จึงนิยมนำไปใช้งานด้านอวกาศ

ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ สิ่งที่สำคัญสิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึง ก็คือ การเลือกขนาดของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองให้มีความสอดคล้องกันให้มีค่าใกล้เคียงกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ให้มากที่สุด

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

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha_1 x) \exp(-\alpha_2 x) \quad (2.30)$$

โดยที่ Φ_0 คือ โฟตอนฟลักซ์ที่ตกกระทบผิวงเซลล์แสงอาทิตย์

α_1, α_2 คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ณ ความยาวคลื่น (λ) ของสารกึ่งตัวนำชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สอง

x คือ ความหนาของสารกึ่งตัวนำชั้นหน้าต่าง

ถ้าสมมติให้ประสิทธิภาพควอนตัม(Quantum efficiency) ในการผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮล มีค่าเท่ากับ 1 จำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกผลิต ณ ตำแหน่ง x จะมีค่าเท่ากับ

$$G(x) = -\frac{d\Phi}{dx} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น กระแสโฟโวลต์จจะได้ว่า

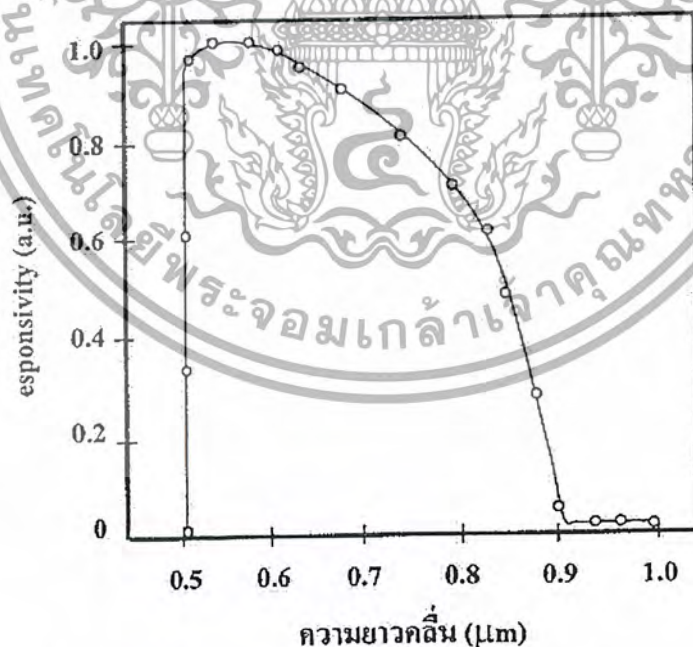
$$I = Aq \int_0^{\infty} G \exp\left(-\frac{x}{L}\right) dx$$

$$= \frac{Aq\Phi_0\alpha_2L \exp(-\alpha_1x_j)}{1+\alpha_2L} \quad (2.32)$$

โดยที่ L คือ ระยะทางแพร่ซึม(Diffusion length) ของพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำชั้นที่สอง

ในการคำนวณข้างต้น สมมติว่า กระแสไฟฟ้าโฟโตไม่ได้ผลิตในชั้นหน้าต่าง จากรูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์เฮเทอโรโรชนิด n-CdS/P-InP ในช่วงโฟตอนที่มีค่าระหว่าง E_{g1} และ E_{g2} ผลตอบสนองลดน้อยลงเมื่อความยาวคลื่นแสงยาวขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อความยาวคลื่นแสงยาวขึ้น ค่า α_2 จะลดลง และเมื่อ α_2 มีค่าลดลงจากสมการที่ 3 ค่า I จะมีค่าลดลงด้วย แต่สำหรับกรณีรอยต่อ P-n ชนิด โฮโม สเปกตรัมช่วงความยาวคลื่นสั้นของรอยต่อ เฮเทอโรโรจึงดีกว่ากรณีรอยต่อ โฮโม

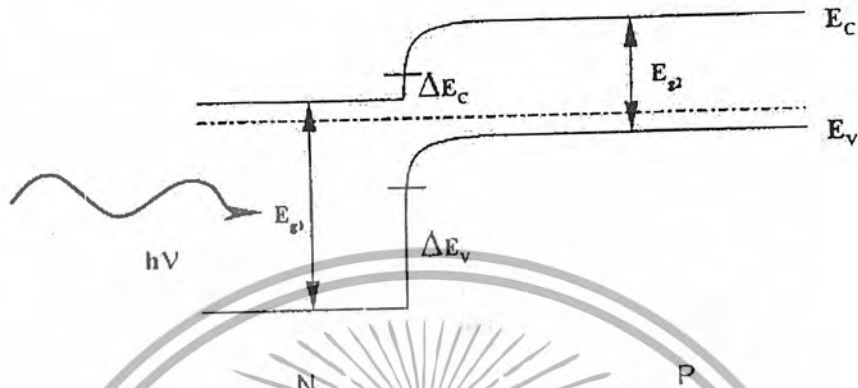
ในการพิจารณาข้างต้นทั้งหมด เราได้สมมติว่า สารกึ่งตัวนำชั้นที่ 2 มีความหนาเป็นอนันต์ และความหนาของชั้นปกคลุมพาหะมีค่าน้อยกว่าระยะทางแพร่ซึมของพาหะข้างน้อย ข้อสมมตินี้ไม่สามารถใช้ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีหรืออะมอร์ฟัสได้ ซึ่งมีค่าระยะทางแพร่ซึมของพาหะสั้นมาก



รูปที่ 2.21 สเปกตรัมผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.22 ลักษณะของแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเฮเทอโรโรที่ไม่มียอดแหลม

ในรูปที่ 2.22 ΔE_c มีค่าเป็นบวก ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตในชั้นพี นั้นสามารถไหลสู่ชั้นเอ็นได้ เป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ แต่ถ่า $\Delta E_c \leq kT$ จะเกิดยอดแหลม (spike) ขึ้นที่ชั้นรอยต่อของแถบความนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไม่ให้เคลื่อนที่ ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าโฟโตนิกมีค่าลดลง

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

อย่างไรก็ตามต้องระวังด้วยว่า ในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ n-p ถ้า ΔE_c มีค่ามากกว่า kT มากๆ หรือเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n ถ้า ΔE_v มีค่ามากกว่า kT มาก จะทำให้แรงดันไฟฟ้าภายใน V_d ลดลงตามสูตร ดังนี้

$$V_D = -\Delta E_c + E_{g2} - \delta_1 - \delta_2 \quad \text{กรณีรอยต่อ n-p} \quad (2.33)$$

$$V_D = -\Delta E_v + E_{g2} - \delta_1 - \delta_2 \quad \text{กรณีรอยต่อ p-n} \quad (2.34)$$

ในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อแบบเฮเทอโรโรแบบไม่มียอดแหลมดังแสดงในรูปที่ 2.22 นั้น อิเล็กตรอนจะเป็นพาหะส่วนใหญ่ที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทั้งนี้เพราะว่าค่าแ่งศักย์ของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นต่ำกว่าโสมมาก ถ้ากระแสรวมตัว (Recombination current) ในย่านปกอดพาหะนั้นมีค่าน้อย กระแสไฟฟ้าที่มีจะแสดงได้ว่า

$$I_D = AqXN_{d1}\sqrt{\frac{D_{e2}}{\tau_{e2}}}\exp\left[-\frac{q(E_{g2}-\delta_1-\delta_2)}{kT}\right]\times\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right] \quad (2.35)$$

โดยที่ X คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านรอยต่อของอิเล็กตรอน

N_{d1} คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิด n (ชั้นที่ 1)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

D_{e2}, τ_{e2} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม และอายุของอิเล็กตรอนตามลำดับในสารกึ่งตัวนำชนิด

p

(ชั้นที่ 2)

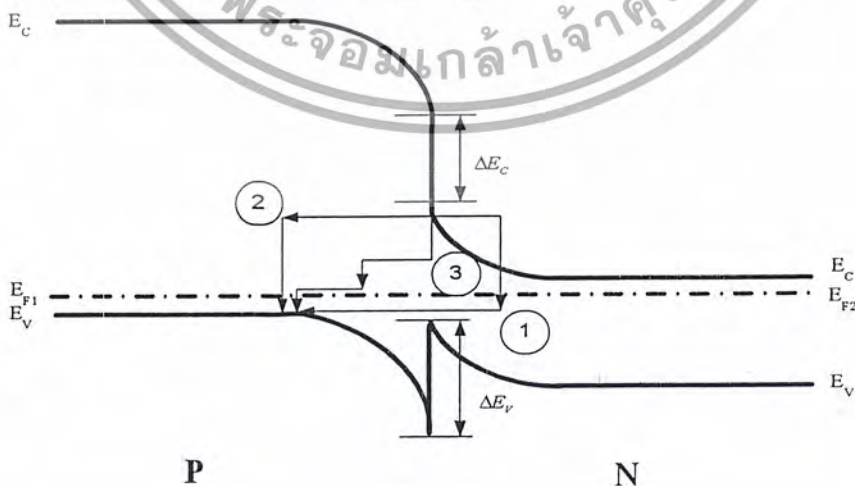
แต่ถ้ากระแสรวมตัวของประจุพาหะในชั้นปกอดมีค่ามาก เช่น รอยต่อระหว่างเพชรกับซิลิกอน ความสัมพันธ์ของ I-V จะมีรูปเหมือนในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n แบบโฮโม คือ

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.36)$$

I_s คือ กระแสไฟฟ้าย้อนกลับบวมตัวซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น และ จำนวนแก๊บสเตรต (Gap state) ในชั้นปกอดพาหะมีค่ามากขึ้น

n มีค่าระหว่าง 1 และ 2 (แต่ถ้าเป็นรอยต่อระหว่างเพชรและซิลิกอน n จะมีค่ามากกว่านี้)

สมการที่ 2.36 ใช้ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่แถบพลังงานไม่มียอดแหลมเท่านั้น ไม่สามารถใช้ได้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบมียอดแหลมดังรูปที่ 2.23 ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งคุณสมบัติของ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 2.23 พบว่าความชันของกราฟจะไม่ลดลงแม้อุณหภูมิจะสูงขึ้นค่าหนึ่ง ซึ่งขัดแย้งกับสมการที่ 2.36 โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีขั้วแคทอเด้นั้น มีด้วยกันหลายรูปแบบ คือ อิเล็กตรอนในแถบความนำของด้านเอ็น จะตกลงในแถบสแตต ซึ่งมีอยู่จำนวนมากที่รอยต่อเชื่อม ในแถบพลังงานต้องห้าม ต่อจากนั้นอิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์ (Tunnel) เข้าไปยังแถบวาเลนซ์ของด้านพี ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นทางที่ 1 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเช่นนี้ทำให้คุณสมบัติ I-V มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$I = AB \exp[-\alpha(V_D - V)] \quad (2.37)$$

โดยที่ B คือ ค่าคงตัว

V_D คือ ศักย์ภายในที่เกิดขึ้นในรอยต่อและ

$$\alpha = \frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \varepsilon_1}{N_A} \right)^{1/2}$$

โดยที่ m^* คือ effective mass ของอิเล็กตรอน

N_A คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในชั้น p

ε_1 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารชั้น p

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอาจเป็นไปในลักษณะเส้นทางที่ 2 และ 3 รูป 2.23 ก็ได้ซึ่งจะได้ผลเหมือนสมการที่ 2.37 ในกรณีเส้นทางที่ 2 นั้น เริ่มแรกอิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์เข้าไปในแถบพลังงานต้องห้าม แล้วถูกจับด้วยแถบสแตต ต่อจากนั้นอิเล็กตรอนจะตกลงไปในแถบวาเลนซ์และไปรวมตัวกับโฮล สำหรับกรณีเส้นทางที่ 3 นั้น อิเล็กตรอนจะทะลุอุโมงค์ไปสู่แถบสแตตหลายครั้ง เรียกว่า Multiple tunneling ก่อนที่จะรวมตัวกับโฮล

2.7.2 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานในเซลล์แสงอาทิตย์

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์(R_s) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส(Contact) ความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์นี้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์มาจากสมการที่ 2.38. ซึ่งคิดที่ $R_s = 0$ และ
ได้ I_o ออกมา ดังนี้

$$I_o = I_L - I_s \left[\exp \left\{ \frac{qV_o}{kT} \right\} - 1 \right] \quad (2.38)$$

ซึ่งถ้า $R_s \neq 0$ แล้ว แรงดัน V_o ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อและแรงดันที่ตก
คร่อม R_s ซึ่งเท่ากับ $I_o \cdot R_s$ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริงๆจะมีค่า ดังนี้

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

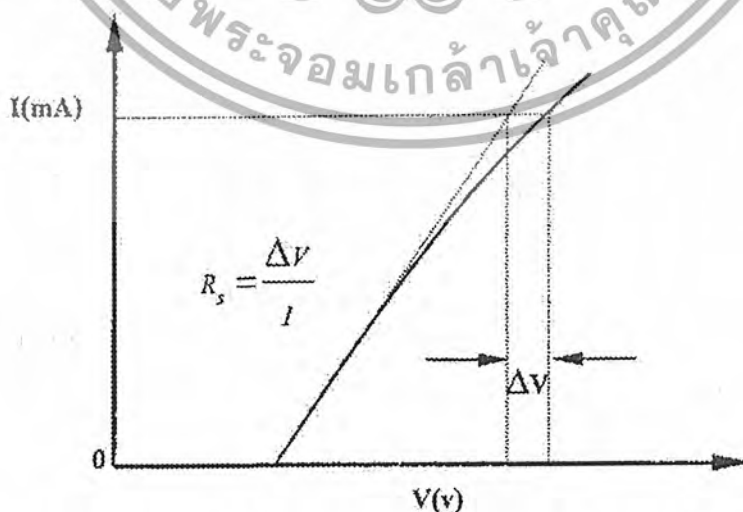
$$I_o = I_L - I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V_o + I_o \cdot R_s)}{kT} \right\} - 1 \right] \quad (2.39)$$

ความต้านทานอนุกรมสามารถหาได้โดยวิธีการ ดังนี้

เนื่องจาก กระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กัน ในลักษณะเอ็ก
โพเนนเชียล เช่นเดียวกับไดโอด เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันนี้ไปเขียนลงในกราฟเซมิล็อก จะได้
เป็นกราฟเส้นตรง แต่เนื่องจากผลของความต้านทานภายในเซลล์ จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความ
ต้านทานนี้ แรงดันส่วนนี้ จะมีความสัมพันธ์กับกระแสในลักษณะเชิงเส้น เมื่อกระแสไหลผ่านเซลล์
มากผลของแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานอนุกรมนี้ จะทำให้ ได้กราฟเส้นตรงที่ได้ในช่วงกระแส
สูงๆ นี้เบี่ยงเบนออกมานี้จะนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ได้

จากกราฟในรูปที่ 2.24 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์ ที่
ค่ากระแส I จะหาค่า R_s จากการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV ได้ ดังนี้

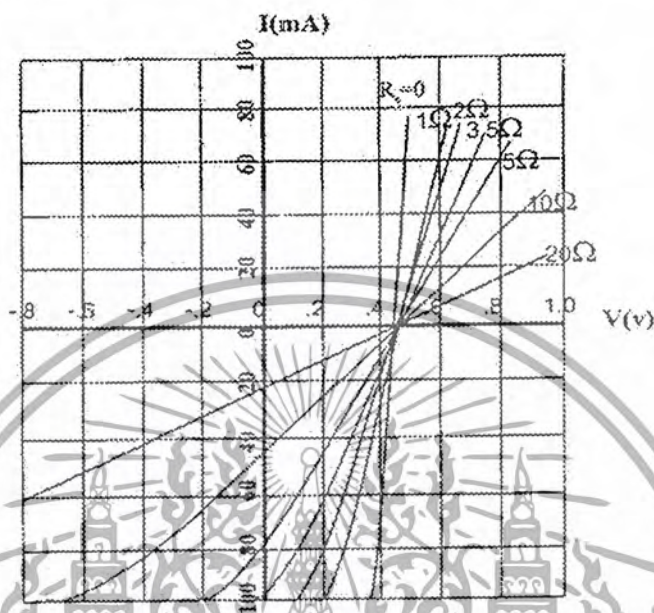
$$R_s = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เขียนอยู่บน

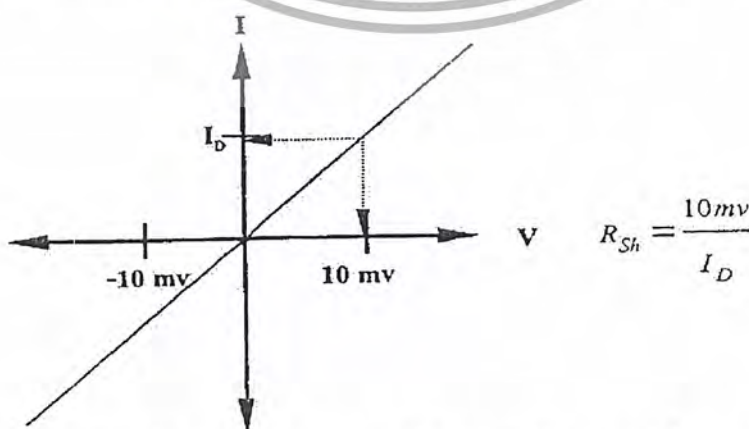
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.39 สามารถนำไปเขียนกราฟ เพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 2.25 จากรูปจะเห็นได้ว่าเซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะทำให้กระแสลัดวงจรน้อยลงและความชันของกราฟก็ลดลงด้วยเป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้น ในการสร้างเซลล์ จึงควรรหาทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.25 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีต่อแสงอาทิตย์

ส่วนความต้านทานขนานนั้นอาจจะเกิดจากกระแสรั่วที่บริเวณขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นความต้านทานขนานควรจะมีค่าสูงมากๆ แต่อาจจะมีค่าลดลงได้เนื่องมาจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น การหาค่าความต้านทานขนานนั้นสามารถทำได้โดยการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันในสภาพมืด โดยการไบแอสให้กับเซลล์ใน ระดับแรงดันต่ำๆ ประมาณ 10-20 mV ดังรูปที่ 2.26

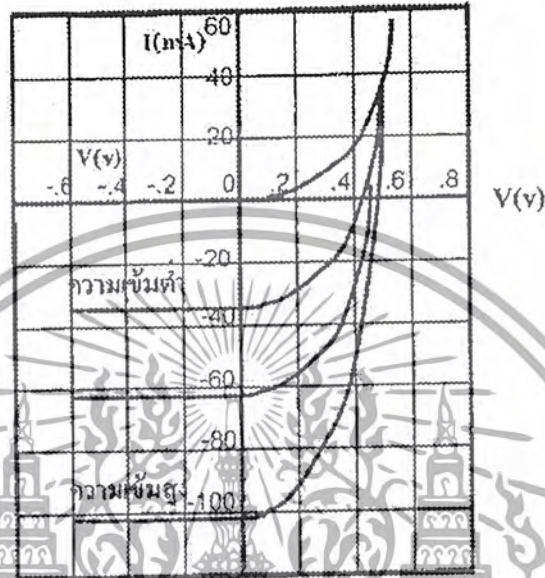


รูปที่ 2.26 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันในสภาพมืดของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องใช้แสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีอิสระหลุดจากการยึดเหนี่ยวกับโฮลภายในอะตอม ถ้าแสงที่ส่องมากระทบเซลล์มีความเข้มสูงมากขึ้น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงแตกต่างกันได้แสดงไว้ใน รูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ผลของความเข้มที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

2.7.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริงนั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดัน ที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย

เมื่อได้พิจารณาสมการของกระแส I_0 ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L ในสมการที่ 2.23 จะพบว่า กระแส I_0 นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรจะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องมาจากแสง I_L และกระแส I_D ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_L และ I_D

2.7.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

กระแส I_L ที่เกิดขึ้นจากแสงนั้นมีสมการดังต่อไปนี้

$$I_L = qg(x)A(L_c + L_n) \quad (2.41)$$

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

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร (Diffusion coefficient) สำหรับอนุภาคนั้นๆ นั้น จะที่ผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึม น้อยมาก จากสมการของ L จึงเหลืออยู่แค่อายุของพาหะ τ (Carrier lifetime) ที่ต้องพิจารณา ซึ่งก็พบว่าเมื่ออนุภาคนั้นๆ นั้น จะมีผลต่ออายุของประจุพาหะ น้อยมากเช่นกัน (สำหรับอายุของนี้จะขึ้นอยู่กับระดับการแพร่ซึมและระดับแตรบเป็นส่วนใหญ่)

องค์ประกอบอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อ I_L ก็คือ $g(x)$ โดยพบว่า $g(x)$ จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออนุภาคนั้นๆ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่ออนุภาคนั้นๆ เพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานโฟตอนจากแสงสามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะได้มากขึ้นกว่าเดิม แต่ผลที่เกิดขึ้นนี้เมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานจริงๆ อนุภาคนั้นๆ และมีการเปลี่ยนแปลงอนุภาคนั้นๆ เพียงเล็กน้อย (ในช่วง 20-70 องศาเซลเซียส) อนุภาคนั้นๆ จะมีผลต่อค่า $g(x)$ น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า I_L จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากกับอนุภาคนั้นๆ

2.7.4.2 ผลของอนุภาคนั้นๆ ที่มีต่อ I_D

เมื่อพิจารณาค่าของ I_D ในสมการ

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

จากสมการของ I_s จะมีผลต่อกระแส I_D มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอนุภาคนั้นๆ ที่มีต่อ I_s โดยพิจารณาจากสมการของ I_s ดังนี้

$$I_s = Aq n_i^2 \left[\frac{1}{N_a} \left(\frac{D_e}{\tau_e} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{N_d} \left(\frac{D_h}{\tau_h} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.43)$$

จากสมการของ I_s ในกรณีของซิลิกอน พบว่า n_i^2 จะเปลี่ยนแปลงตามอนุภาคนั้นๆ ตามสมการดังนี้คือ

$$n_i^2 = 1.5 \times 10^{32} \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (2.44)$$

จากสมการจะเห็นว่าเมื่ออนุภาคนั้นๆ เพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล เป็นผลให้ I_s มีค่าเพิ่มขึ้นตามอนุภาคนั้นๆ จากผลอันนี้ แสดงว่า I_D จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคนั้นๆ เพิ่มขึ้น

2.7.4.3 ผลของอนุภาคนั้นๆ ที่มีต่อ V_{oc}

สำหรับผลของอนุภาคนั้นๆ ที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ จะพิจารณาค่าแรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) ตามสมการ 2.45 ดังนี้

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_L}{I_s} + 1 \right] \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการนี้ค่าของ $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่าของ $\frac{kT}{q}$ มีค่าต่ำมาก ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} คือ ค่าของ I_s ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลทำให้ค่าของ V_{oc} มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิต่อ I_{sc} , V_{oc} และ P_o แสดงๆไว้ในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ผลของอุณหภูมิต่อกระแส แรงดันและพลังงานของแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีการสร้างโซล่าเซลล์จากวิธีการแพร่สารเจือเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับโซล่าเซลล์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรเพื่อหาข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชร

2.8 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้รับการพัฒนา และใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุด นั้นเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุหลัก ทั้งที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยว (single crystal) และผลึกหลายรูป (polycrystal) และในปัจจุบันนี้ได้มีการค้นคว้าเป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) แต่ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานยังไม่สูงมากนัก

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสามารถในการที่จะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น เมื่อแสงตกกระทบพลังงานแสงบางส่วนจะสะท้อนออกไปและบางส่วนจะถูกดูดกลืน ทำให้เกิดประจุอิสระขึ้น 2 ชนิดคือ ชนิดบวก ซึ่งเรียกว่า โฮล (hole) และชนิดลบ ซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอน ที่บริเวณของรอยต่อพี-เอ็นนี้โดยธรรมชาติแล้วจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น อิทธิพลจากสนามไฟฟ้างกล่าว จะทำให้ประจุอิสระแยกจากกัน ถ้าหากต่อให้ครบวงจรแล้วก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ เพื่อที่จะให้กระแสที่ไหลได้ เพื่อที่จะให้กระแสที่ไหลนั้นมีปริมาณมากพอที่จะใช้งานได้ นั้น พื้นที่รอยต่อพี-เอ็นจะต้องมีขนาดใหญ่ และรับแสงได้มากที่สุด จากที่กล่าวไปข้างแล้วจะเห็นได้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์นั้น ทางหนึ่งที่ได้รับการพัฒนา ก็คือ การทำให้แสงที่ตกกระทบนั้นสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด หรือ ทำให้มีการสะท้อนของแสงน้อยที่สุด จึงมีการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงที่เรียกกันว่า “ชั้นลดการสะท้อน”

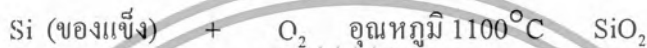
(anti-reflection) ชั้นลดการสะท้อนนี้ อาจทำโดยใช้สารโปร่งแสงชนิดต่างๆ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), ซิลิคอนมอนอกไซด์ (SiO) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นต้น นอกจากนี้ เพื่อให้ได้รอยต่อได้รับพลังงานมากที่สุด รอยต่อดังกล่าวจึงจำเป็นต้องอยู่ใกล้ผิวหน้ามากที่สุดและในทางปฏิบัติแล้ว มักจะสร้างรอยต่อให้สั้นน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ($1\mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}$ เมตร หรือ = 1 ในล้านเมตร) แผ่นผลึกซิลิคอนที่สามารถจะสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีนั้นทั่วไปแล้วจะต้องมีพิถีพิถันความต้านทานที่ต่ำกว่า 1 โอห์ม-ซม. และมีความหนาอยู่ในช่วง 200-400 ไมครอน ผิวของแผ่นผลึกที่โรงงานทำออกจำหน่ายนั้นมีทั้งชนิดขัดมัน (mirror polish) และชนิดขัดหยาบ (rush polish) แม้ว่าแบบที่ผิวหน้าขัดมันจะนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีประสิทธิภาพสูงก็จริงแต่ก็มีราคาแพงเช่นกัน โดยความจริงแล้ว โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะมีชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นอยู่บนชนิดพี หรือสารกึ่งตัวนำชนิดพีอยู่บนชนิดเอ็นก็ได้ โดยโรงงานจะผลิตเพียงชนิดเอ็นหรือพี ชั้นที่เหลือผู้สร้างจะต้องสร้างขึ้นมาเอง โดยการเติมสารเจือชนิดอื่นลงไปเพื่อทำให้ความนำไฟฟ้าเปลี่ยนไป

2.8.1 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation Procees)

เป็นการสร้างชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นบนผิวของแผ่นซิลิกอน เพื่อใช้ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการขณะที่ทำการแพร่สารเจือ เพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น ขบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal Oxidation)

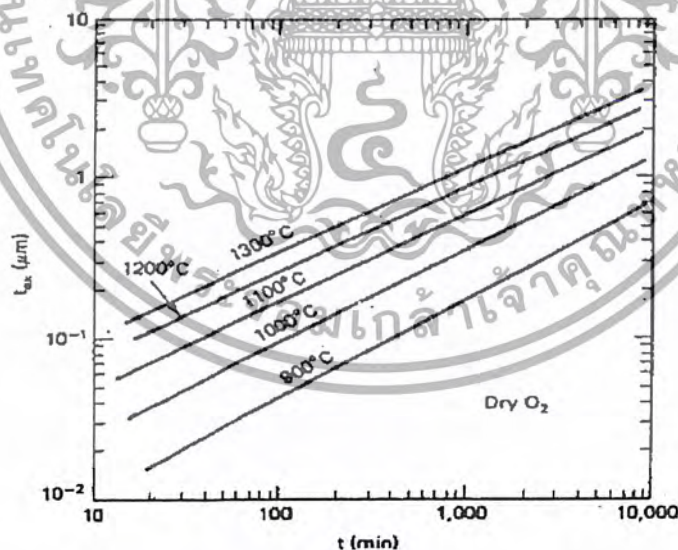
การสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ ด้วยขบวนการดังกล่าวนี้ ทำได้ 2 ลักษณะคือ

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของผลึกซิลิกอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปน ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1100°C จะทำให้อะตอมของซิลิกอนรวมตัว ออกซิเจนจนเกิดเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ดังสมการ



เตาที่ใช้ในการ Oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน(ผิดพลาด $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน

ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้โดยวิธีดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สำหรับความหนาของชั้น SiO_2 นี้ สามารถพิจารณาได้จากรูป 5.2



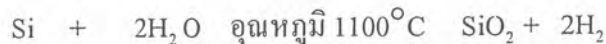
รูปที่ 2.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาในการสร้างออกไซด์

อุณหภูมิต่าง ๆ แบบ Dry Oxidation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟดังกล่าวนี้ ทำให้เราสามารถควบคุมความหนาของชั้นออกไซด์ ตามที่ต้องการได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน นอกจากนี้แล้วปริมาณของก๊าซออกซิเจนจะต้องมีมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับซิลิคอน

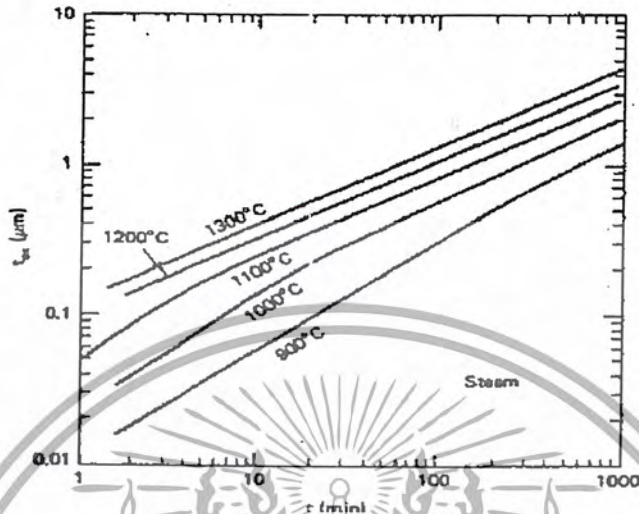
2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของ Si กับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้แสดงสมการ



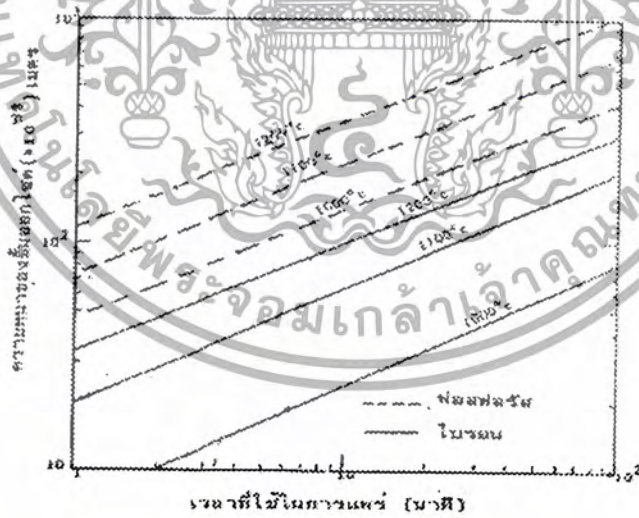
การออกซิเดชันแบบชื้นนี้ จะกล่าวเฉพาะเทคนิคที่ใช้ระบบไอน้ำ กล่าวคือ ระบบไอน้ำ (Steam System) เป็นวิธีการปล่อยก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้ว (bubbler) ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนแต่มีค่าต่ำกว่าจุดเดือดราว $90-95^\circ\text{C}$ ท่อก๊าซออกซิเจนจะถูกจุ่มลงในน้ำบริสุทธิ์ซึ่งร้อน ทำให้เกิดฟองอากาศผุดขึ้น ซึ่งฟองอากาศที่ผุดขึ้นมานี้ก็คือน้ำออกซิเจนซึ่งอิ่มตัว (มีไอน้ำด้วย) และจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในช่องควอทซ์ระยะห่างระหว่างทางออกของก๊าซในขวดแก้วและท่อควอทซ์ของเตาออกซิเดชันที่ไม่ควรอยู่ใกล้กัน เพราะอาจเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำได้ ซึ่งควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดกรณีเช่นนี้ได้ วิธีการดังกล่าวนี้เป็นระบบที่ใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ขบวนการออกซิเดชันแบบชื้นนี้ จะทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบชื้นนี้ก็คือ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่เร็วกว่าแบบแห้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ชั้น SiO_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบแห้งจะมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้น จึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือได้ดีกว่า และเนื่องจากการออกซิเดชันแบบชื้นนี้ จะทำให้สภาพผิวของผลึกไม่สมบูรณ์ คือ เกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) เกิดรูพรุนขึ้น

ถ้าสำหรับความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ที่ได้จากการออกซิเดชัน ซึ่งจะสัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ แสดงดังในรูปที่ 5.6



รูปที่ 2.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

การแพร่สารเจือเป็นการสร้างรอยต่อพี-เอ็นให้กับเซลล์แสงอาทิตย์โดยรอยต่อพี-เอ็นนี้จะอยู่ลึกจากผิวหน้าลงไปประมาณ 0.1 - 0.5 ไมครอน การแพร่สารเจือส่วนมากจะใช้การแพร่ซึมฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูงราว 800-1000°C ลงในฐานรองชนิดพีที่มีโบรอนแพร่ซึมอยู่ก่อนแล้วทั่วทั้งแผ่นผลึก ตั้งแต่ขบวนการปลูกผลึก วิธีการแพร่ซึมฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะใช้ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ (POCl_3) เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ (Impurities source) เนื่องจากฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์มีลักษณะเป็นของเหลวระเหยง่าย จึงต้องนำไปใส่ไว้ในหม้อแก้ว (Bubble) ที่มีการซีลดีอย่างดี จากนั้นจึงใช้ก๊าซเฉื่อยพวกไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหย POCl_3 พร้อมกับป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าไปในการแพร่สารที่มีแผ่นซิลิคอนวางอยู่ ที่อุณหภูมิสูงราว 800-1000°C จะเกิดขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์บาง ๆ ปกคลุมทั่วทั้งแผ่นผลึก พร้อมกันนั้นฟอสฟอรัสก็จะแพร่ซึมผ่านชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงไปซิลิคอน การแพร่ซึมใช้เวลาราว 20 นาที ก็จะได้ชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นบาง ๆ หนาราว 0.1 - 0.3 ไมครอน จากนั้นใช้กรดฟอสฟอริก (HF) กัดชั้นออกไซด์ออกทั้งหมด ก็จะได้แผ่นซิลิคอนที่มีรอยต่อพี-เอ็น เกิดขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งรอยต่อที่ด้านหลังนี้จะถูกกำจัดให้หมดไปโดยการเคลือบลึมนิยมซึ่งเป็นสารเจือชนิด P ด้วยขบวนการระเหยสารในสูญญากาศแล้วจึงนำไปทำการแพร่ซึมนิยมให้ทะลุผ่านชั้นฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 700-800 °C เป็นเวลา 15 นาที ก็จะได้ชั้น P บาง ๆ เกิดขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นเซลล์ฯ



รูปที่ 2.32 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสโดยใช้ ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ เป็นแหล่งจ่ายสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการทดลอง

ในบทนี้จะทำการกล่าวถึงกระบวนการทดลองซึ่งจะแบ่งออกเป็นการสร้างโซล่าเซลล์ 2 ชนิดคือ โซล่าเซลล์จากฟิล์มบางเพชรและโซล่าเซลล์จากการแพร่ซึม

3.1 การสร้างโซล่าเซลล์จากฟิล์มบางเพชร

3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง

สำหรับในโครงการนี้จะเลือกใช้ฐานรองเพียงอย่างเดียวคือ Si เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีโซอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ก่อนที่จะนำแผ่นฐานรองซิลิกอนไปใช้ในการทดลอง จำเป็นต้องมีกระบวนการเตรียมแผ่นฐานรองดังกระบวนการต่อไปนี้

3.1.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเบื้องต้น (Initial cleaning)

- กำจัดเศษฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกที่ผิวหน้าซิลิกอนในน้ำ DI (Deionized water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ลอกชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าฐานรองด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะบริเวณผิวหน้าฐานรองโดยต้มในกรดไนตริก (HNO_3 acid) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- กำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมันบริเวณผิวหน้าโดยการต้มในไตรโคลโรเอธิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างสารละลายไตรโคลโรเอธิลีนด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดครีมเพชร

ก่อนที่จะทำการสร้างฟิล์มเพชรนั้นจำเป็นต้องขัดแผ่นซิลิกอนเสียก่อนเพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการนิวเคลียสขึ้น เพื่อที่จะทำให้เกิดฟิล์มเพชรที่สมบูรณ์และเร็วขึ้น โดยการเตรียมพื้นผิวฐานรองวิธีนี้จะใช้ครีมเพชรขนาด $0.25 \mu\text{m}$ (รูปที่ 3.1 (a)) ขัดที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนซึ่งมีลักษณะเรียบและขัดมันเป็นกระจกเงา (Mirror polished) ใช้เวลาในการขัดประมาณ 1-2 ชั่วโมง โดยขัดวนไปรอบๆ ทั้งทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาผลจากการขัดด้วยครีมเพชรจะทำให้เกิดรอยขีดเล็กๆ (รูปที่ 3.1 (b)) ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนหลังจากขัดแผ่นซิลิกอนเรียบร้อยแล้วต้องนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาด โดยกระทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อุลตราโซนิกแผ่นซิลิกอนในไตรคลอโรเอทธีน เป็นเวลา 10 นาที
- อุลตราโซนิกในอะซิโตน 10 นาที
- อุลตราโซนิกในน้ำ DI 10 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูรอยขีดที่เกิดจากการขัดในกรณีที่รอยขีดเกิดมีจำนวนน้อยต้องนำแผ่นซิลิกอนไปขัดใหม่ โดยรอยขีดที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งสำคัญในการกระตุ้นให้เกิดการนิวเคลียสของฟิล์มเพชร



(a)

(b)

รูปที่ 3.1 (a) ครีมเพชรที่ใช้ในการขัดแผ่นซิลิกอน

(b) ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร

กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค HFCVD สามารถแสดงระบบที่ประกอบขึ้นเองซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2



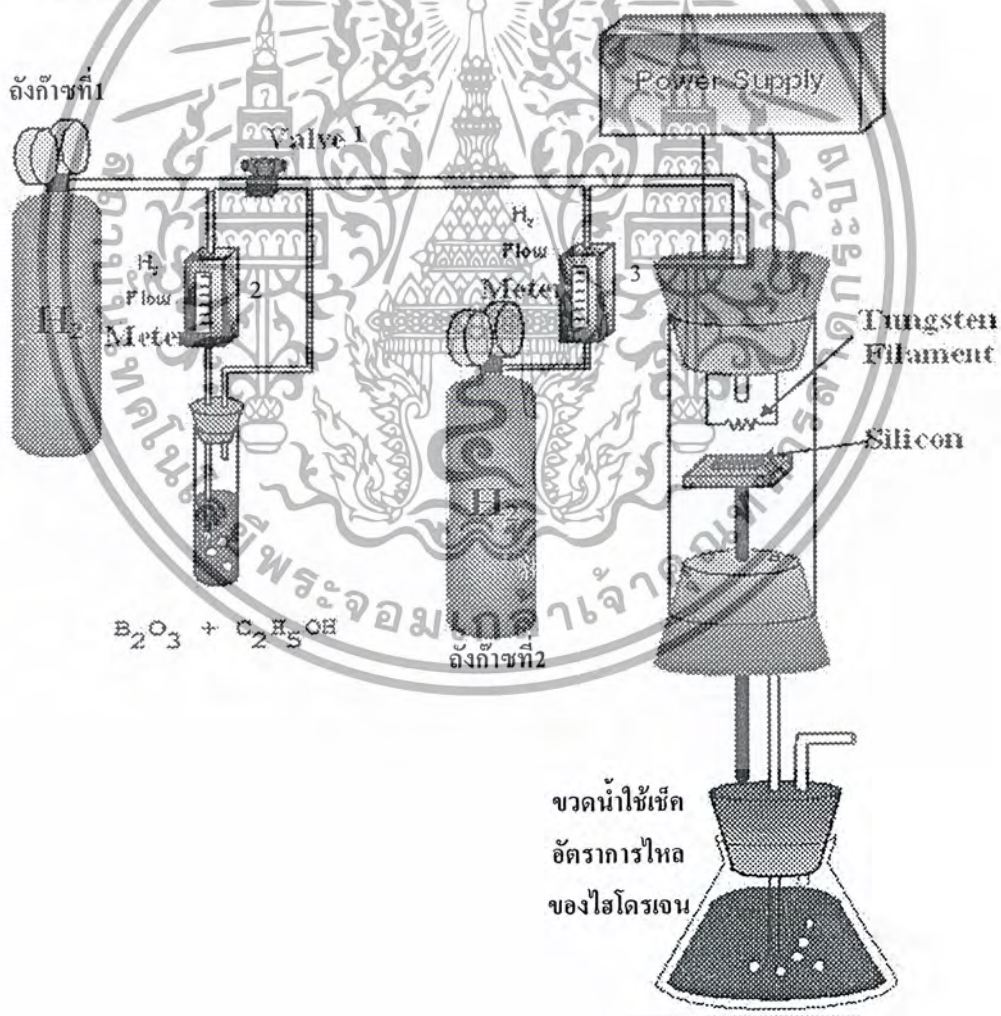
รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองในการสร้างฟิล์มเพชร

ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถแสดงได้จากแผนภาพในรูปที่ 3.3 โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบวาล์ว 1 ให้อยู่ตำแหน่งเปิดออก และปรับปรับกระแสของ Power supply ให้อยู่ตำแหน่งซ้ายสุด
2. เปิดถังก๊าซไฮโดรเจนปรับเรกกูเลเตอร์ที่ถังก๊าซที่ 1 เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนให้มีค่า 200 ml/min จับเวลา 15 นาที เพื่อที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนไล่อากาศออกจากระบบให้หมด โดยตั้งเกตฟองน้ำที่ออกทางขวดน้ำที่ถังที่คอยเช็ดก๊าซไฮโดรเจนที่ไหลออก
3. เปิดถังก๊าซไฮโดรเจนที่ 2 โดยปรับวาล์ว 3 ของ Flow meter ให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 10 ml/min
4. ปรับวาล์ว 1 เพื่อแบ่งก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนไหลผ่าน Flow meter พร้อมกับปรับวาล์ว 2 ของ Flow meter ให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 10 ml/min
5. ปรับวาล์ว 1 ให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเหลือ 70 ml/min พร้อมทั้งปรับวาล์ว 2 เพื่อให้ได้อัตราการไหลของก๊าซที่ผ่าน Flow meter เป็น 10 ml/min คงที่ จับเวลาอีก 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เปิดสวิตช์ Power และเปิดสวิตช์พัดลมระบายความร้อน
7. ค่อยๆ ปรับปุ่มจ่ายกระแสไปทางขวาอย่างช้าๆ ซึ่งในขณะนี้กระแสจะถูกจ่ายให้กับไส้หลอดทั้งสองต้น ทำการจ่ายกระแสไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเราได้อุณหภูมิที่ไส้หลอดที่ต้องการ
8. ปรับระยะห่างระหว่างไส้หลอดทั้งสองต้นกับฐานรองซิลิกอนให้ได้ระยะที่เหมาะสม
9. สร้างฟิล์มเพชรตามระยะเวลาที่ต้องการ
10. เมื่อครบเวลาสร้างฟิล์มเพชรที่กำหนดแล้วค่อยๆ ปรับปุ่มจ่ายกระแสไปทางซ้ายมืออย่างช้าๆ พร้อมทั้งปิดถังก๊าซไฮโดรเจนปิดสวิตช์ Power
11. รอจนกระทั่งก๊าซไฮโดรเจนที่ค้างอยู่ในหลอดทั้งหมด โดยสังเกตจากฟองน้ำในขวดรูปชมพู่
12. เปิดวาล์ว 2 รอจนกระทั่งระบบเย็น ปิดสวิตช์พัดลมเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร งานที่ได้ไปตรวจสอบต่อไป



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพกระบวนการสร้างฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 กระบวนการทดลอง การสร้างโซล่าเซลล์จากฟิล์มบางเพชร

3.1.3.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น (Initial cleaning) ดังข้อ 3.1.1.1

3.1.3.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร ดังข้อ 3.1.1.2

3.1.3.3 หลังจากขัดแผ่นซิลิกอนเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนอีกครั้ง ตามขั้นตอนดังนี้

- อุลตราโซนิกแผ่นซิลิกอนในไตรคลอโรเอทิลีน เป็นเวลา 10 นาที
- อุลตราโซนิกในอะซิโตน 10 นาที
- อุลตราโซนิกในน้ำ DI 10 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูรอยขีดที่เกิดจากการขัดในกรณีที่รอยขีดเกิดมีจำนวนมากต้องนำแผ่นซิลิกอนไปขัดใหม่

3.1.3.4 นำแผ่นซิลิกอนมาทำการตัดโดยให้มีขนาด 5 mm x 5 mm

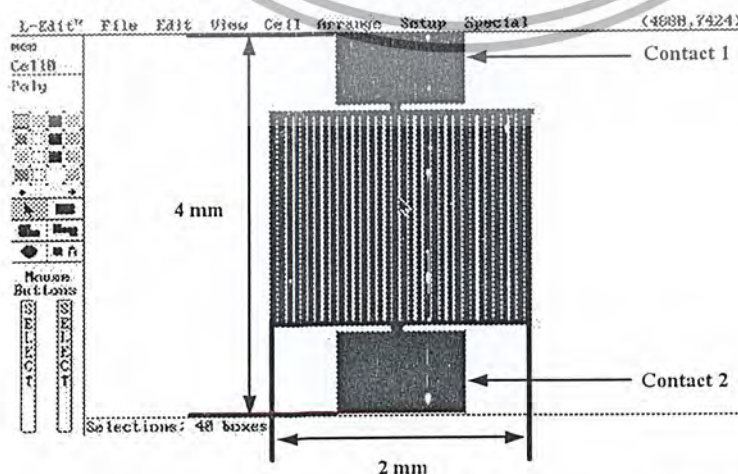
3.1.3.5 นำแผ่นซิลิกอนมาทำการสร้างฟิล์มเพชรโดยมีขั้นตอนดังข้อ 3.1.2 โดยสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆกัน คือ 30, 40, 50 และ 60 นาที

3.1.4 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

ในรายงานครั้งนี้จะทำการสร้างรอยสัมผัสโลหะที่เป็นแบบรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก (ohmic) ซึ่งจะให้โลหะเป็นทองคำเป็นตัวเคลือบบนฟิล์มเพชร โดยเครื่อง Vacuum Evaporator โดยจะอธิบายที่ละส่วนดังต่อไปนี้

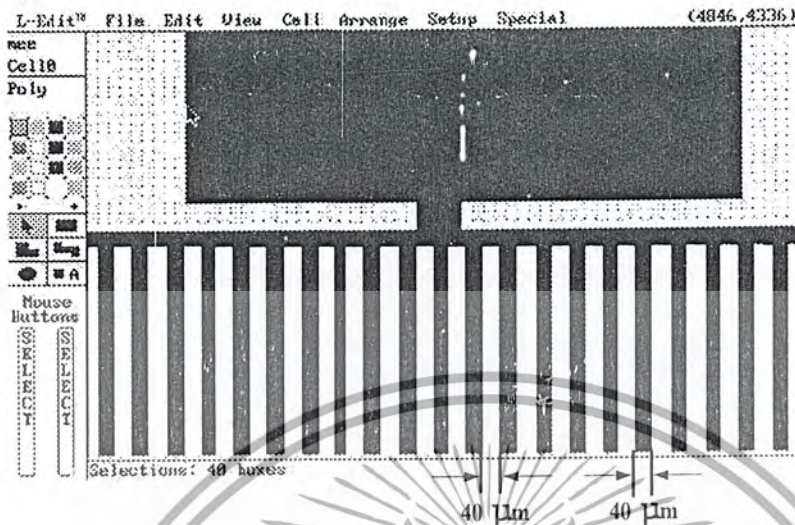
3.1.4.1 แบบของลวดลายโลหะ

ในรายงานนี้จะมีได้ทำการศึกษาการออกแบบลวดลายโลหะโดยจะทำการกำหนดให้ขนาดของเส้นโลหะซึ่งในรูปจะเป็นสี่ด้านนั้นมีขนาดคงที่ที่ 40 μm และมีระยะห่างระหว่างลวดลาย 40 μm เช่นกัน ซึ่งมีลักษณะลวดลายจะเป็นดังรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างลวดลายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์ หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถขยายให้ดูได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงภาพขยายลวดตายโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์

3.1.4.2 การสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะทองคำกับฟิล์มเพชร

ในขั้นตอนนี้ใช้โลหะทองคำสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก เพื่อใช้วัดข้อมูลต่างๆ ต้องผ่านขั้นตอนดังต่อไปนี้

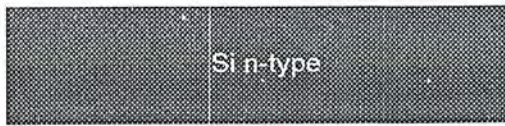
- นำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1.1
- ทำการเตรียมผิวหน้าฐานรองซิลิคอน ตามหัวข้อที่ 3.1.1.2
- ทำการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีด้วยวิธีตามหัวข้อที่ 3.1.2 โดยใช้แหล่งจ่ายเป็นสาร

ละลายผสมของแอลกอฮอล์กับโบรอนไตรออกไซด์

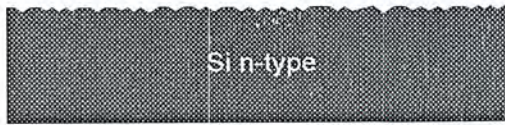
- นำแผ่นชิ้นงานที่สร้างได้มาทำความสะอาดเบื้องต้นตามหัวข้อที่ 3.1.1.1 อีกครั้ง
- ทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่อง Vacuum Evaporator
- ทำการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างลวดลายตามที่ออกแบบไว้
- ทำการ etching ทองคำด้วย Aqua reagi คือ ส่วนผสมของกรด $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$
- ทำการล้างฟิล์มกับแสงด้วยอะซิโตนจะได้ลวดลายของโลหะที่ได้ออกแบบไว้
- ทำการ sintering ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซ N_2 เป็นเวลา 10

นาที โดยสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



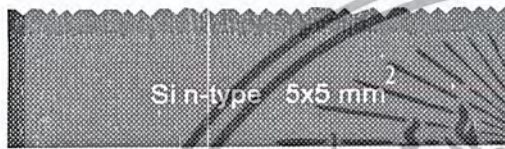
ฐานรองซิลิคอน ระบาย (111) ผ่านการ
ทำความสะอาดเบื้องต้น



ทำการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยการขัดด้วย
ครีมเพชรขนาดเม็ดผลึก 0.25 ไมครอน



ตัดฐานรองซิลิคอนก่อนนำไปสังเคราะห์
ฟิล์มเพชรมีขนาด 5x5 ตารางมิลลิเมตร



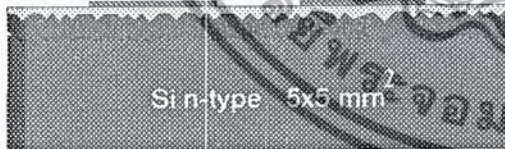
สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีโดยใช้แหล่งจ่าย
คาร์บอน เป็นสารละลาย $C_2H_5OH+B_2O_3$
อัตราส่วน 1000ppm



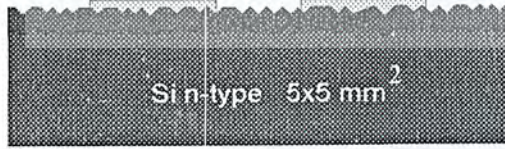
ทำการเคลือบทองคำด้วยเครื่อง Vacuum
Evaporator



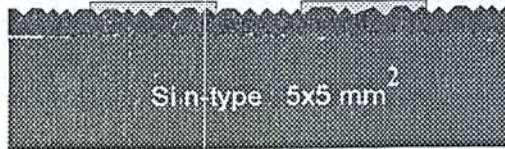
เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 1350



ใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อ
สร้างทวลายโลหะที่ต้องการ



ทำการกัดทองคำออกด้วยน้ำยาคัดทองคำ
aquaregia ($HCl+HNO_3$) ส่วนทองคำที่มี
น้ำยาไวแสงเคลือบอยู่จะไม่ถูกกัดออก



ลอกน้ำยาไวแสงออกด้วย อะซิโตน
(Acetone)

รูปที่ 3.6 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะทองคำ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการแพร์โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เราใช้แผ่นซิลิกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่า 2.5 นิ้ว มีค่าความต้านทานแผ่นที่ 3.5-4.5 Ω -cm

2. ทำความสะอาดแผ่นผลึกเบื้องต้น (Initial cleaning) ตามหัวข้อที่ 3.1.1.1

3. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ครั้งแรก (first oxidation)

- กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยกรด HF 5% นาน 10 วินาที

- ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง

- ปรับอุณหภูมิในเตาให้คงที่ 1000°C

- นำแผ่นผลึกวางลงบน Boat แล้วนำไปวางไว้ที่ปากท่อควอดซ์ 5 นาที

- ค่อยๆดัน Boat ให้เข้าไปในกลางท่อควอดซ์อย่างช้าๆ 5 นาที

- ทำการออกซิเดชันตามวิธีที่ต้องการ กล่าวคือ ถ้าเป็นแบบแห้งปล่อยก๊าซออกซิเจนแห้งในอัตรา 1000 ซีซี/นาที ถ้าเป็นแบบชื้นปล่อยก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำในอัตรา 600 ซีซี/นาที

- ทิ้งแผ่นไว้ในท่อตามเวลาที่ต้องการ

- ค่อยดึง Boat ให้ออกที่ปากท่อควอดซ์อย่างช้าๆ 5 นาที

- ทิ้งแผ่นผลึกไว้ปากเตา 5 นาที แล้วเก็บขึ้น

4. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อเกิดด้านหน้าออกไซด์

5. แพร์สารเจือครั้งแรก (Pre deposition)

6. ขับลึกและออกซิเดชัน (Drive in) ทำชั้นลดการสะท้อนแสง

7. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องทำขั้วสัมผัสโลหะ

8. เคลือบทองด้วยวิธีระเหยสารแข็งในสุญญากาศ

9. โฟโตลิโธกราฟีเพื่อทำขั้วสัมผัสโลหะ

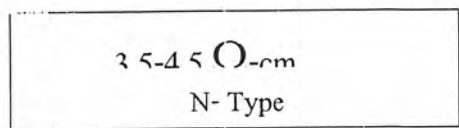
10. ทำการแอนนีส

11. ชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า

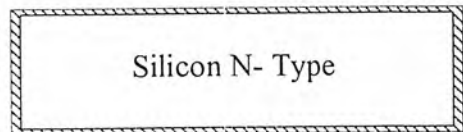
12. บอนขั้วเพื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

โดยกระบวนการนี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

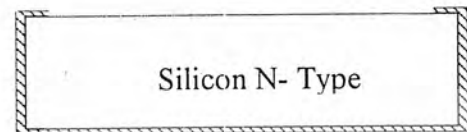


ทำความสะอาดแผ่นผลึกเบื้องต้น

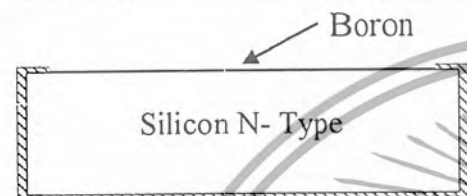


ออกซิเดชัน(First Oxidation)

แบบ Dry Wet Dry



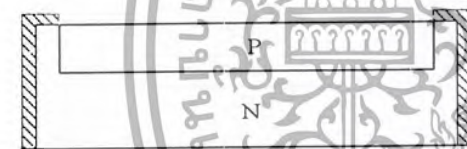
เปิดช่องออกไซด์ด้านหน้าเพื่อแพร่สารเจือโดยวิธีโฟโวลติโกราฟี



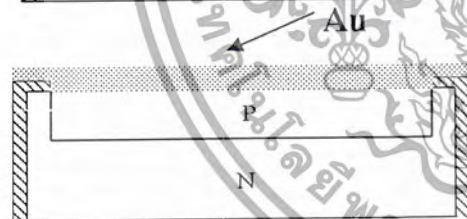
แพร่สารเจือครั้งแรกโดยการสปินที่ความเร็วรอบ 3000 rpm



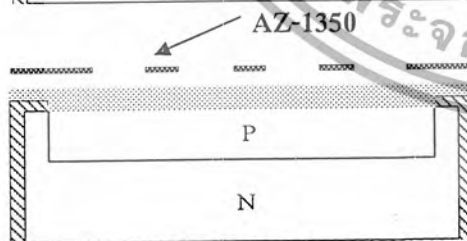
ขี้บดและออกซิเดชันเป็นเวลา 1 ชม. เพื่อให้ได้รอยต่อที่มีความลึกประมาณ 1 μm



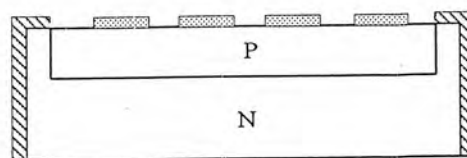
เปิดช่องออกไซด์เพื่อทำขั้วสัมผัสโลหะและเปิดช่องเพื่อทำจุดเชื่อมต่อทางด้านN-Type



ทำการเคลือบด้วยทองคำด้วยเทคนิค evaporator



ทำการโฟโวลติโกราฟีเพื่อสร้างลวดลายกริด



กัดทอง ด้วยHNO3+HCl

รูปที่ 3.7 ลำดับขั้นตอนในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์และการสร้างขั้วสัมผัสโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-Dia/n-Si

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความหนาของฟิล์มเพชร ผลตอบสนองทางแสง ผลของอุณหภูมิเป็นต้น

3.3.1 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาว่าผลของความเข้มแสงนั้นจะมีผลต่อค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรของเซลล์อย่างไร รวมถึงค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะนำชิ้นงาน มาทำการศึกษา ซึ่งจะใช้วงจรดังรูปที่3.8 และความเข้มแสงที่ให้นั้นมีค่าดังนี้ คือ 3000 และ11000 lux

3.3.2 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับความหนาของฟิล์มเพชรที่มีต่อประสิทธิภาพของฟิล์มเพชรอย่างไร โดยชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากับ 2,3,4,5 μm และอัตราส่วน B:C 1000 ppm มาทำการทดลองและใช้ขั้นตอนเหมือนขั้นที่3.6.1

3.3.3 การศึกษาผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยจะนำเซลล์มาต่อวงจรใหม่ดังรูปที่3.9 โดยสมมติว่าเซลล์ที่สร้างได้นั้นมีความต้านทานเป็นศูนย์โอห์มและเพิ่มความต้านทานปรับค่าได้ เข้าไปอีกหนึ่งตัวเพื่อปรับค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ให้มีความมากขึ้น

3.3.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้ ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่า ต่างๆอย่างไร เช่น กระแสลัดวงจร แรงดันเปิดวงจร ประสิทธิภาพของเซลล์ และค่า ฟิล์มเพคเตอร์ โดยในการทดลองนี้จะ ใช้ฟิล์มเพชรหนา 2 μm B:C 1000ppm โดยทำการให้ความร้อนแก่เซลล์ด้วยฮีตเตอร์ ซึ่งในการทดลองนี้จะให้ความร้อนแก่เซลล์ 2 ค่าคือ 27 และ50 $^{\circ}\text{C}$ พร้อมฉายแสงที่มีความเข้ม 11000 lux จากใต้หลอดทั้งสแตน โดยใช้วงจร ที่3.8

3.4 การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-Si/n-Si

3.4.1 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาว่าผลของความเข้มแสงนั้นจะมีผลต่อค่า กระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรของเซลล์อย่างไร รวมถึงค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะนำชิ้นงาน มาทำการศึกษา ซึ่งจะใช้วงจรดังรูปที่3.8 และความเข้มแสงที่ให้นั้นมีค่าดังนี้ คือ 3000 และ11000 lux

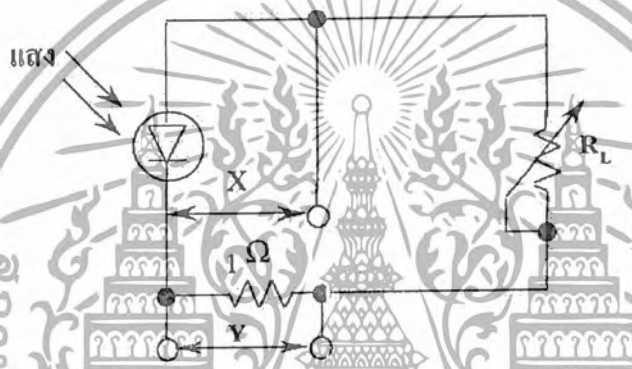
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การศึกษาผลของความต้านทานภายในที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

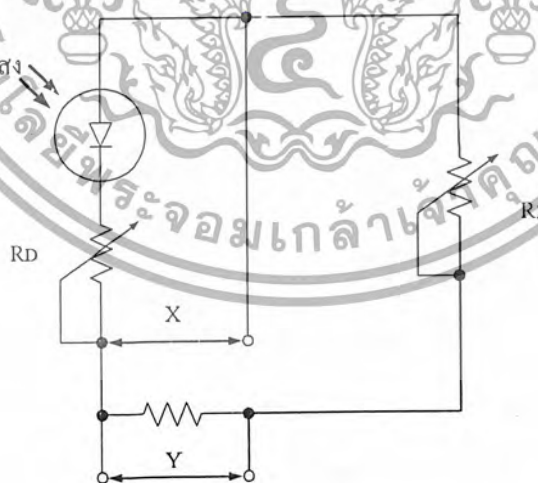
โดยจะนำเซลล์มาต่อวงจรใหม่ดังรูปที่ 3.9 โดยสมมติว่าเซลล์ที่สร้างได้นั้นมีความต้านทานเป็นศูนย์โอห์มและเพิ่มความต้านทานปรับค่าได้ เข้าไปอีกหนึ่งตัวเพื่อปรับตัวปรับค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ให้มีค่ามากขึ้น

3.4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้ ศึกษาผลของอุณหภูมิว่ามีผลต่อค่า ต่างๆอย่างไร เช่น กระแสลัดวงจร แรงดันเปิดวงจร ประสิทธิภาพของเซลล์ และค่า ฟิลแฟคเตอร์ โดยทำการให้ความร้อนแก่เซลล์ด้วยฮีตเตอร์ ซึ่งในการทดลองนี้จะให้ความร้อนแก่เซลล์ 2 ค่าคือ 27 และ 50°C พร้อมฉายแสงที่มีความเข้ม 11000 lux จากไส้หลอดทั้งสแตนโดยใช้วงจร ที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.9 วงจรการวัดผลของความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

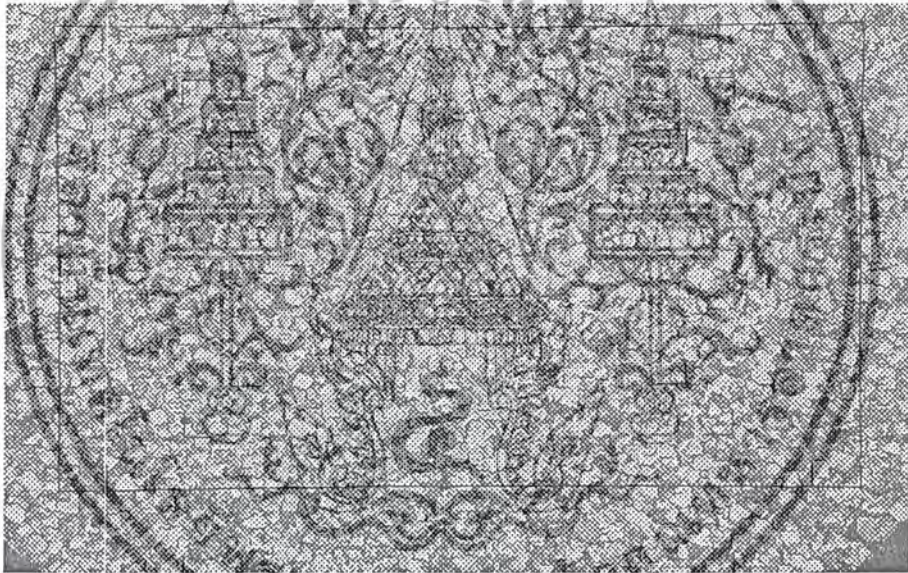
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

โดยจะทำการแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ 1. ส่วนของโซล่าเซลล์รอยต่อ p-Dia/n-Si และ 2. ส่วนของโซล่าเซลล์รอยต่อ p-Si/n-Si

4.1 ผลการทดลองส่วนของโซล่าเซลล์รอยต่อ p-Dia/n-Si

4.1.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

การตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆที่สร้างได้นั้นจะใช้ SEM เพื่อแสดงพื้นผิวและระนาบของฟิล์มเพชร และ Raman Spectroscopy เพื่อแสดงถึงคุณสมบัติความเป็นเพชร ที่สร้างขึ้นด้วยระบบ HFCVD ผลการตรวจสอบด้วย SEM นั้นแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้นมีระนาบ <111>

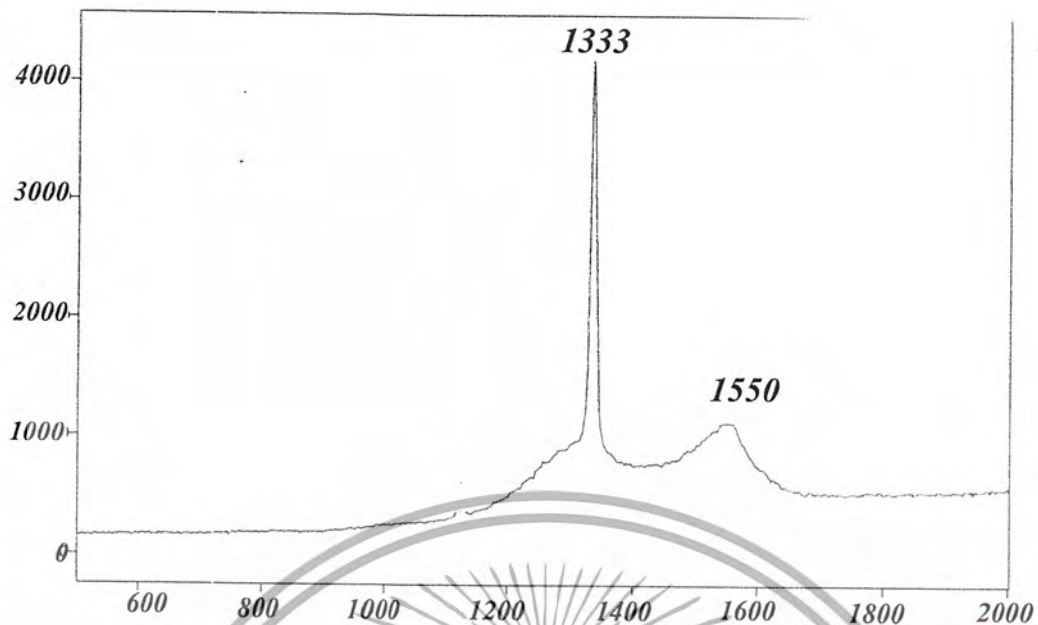


รูปที่ 4.1 ผลการตรวจสอบด้วย SEM

รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรระนาบ(111) ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี HFCVD

ส่วนความหนาของฟิล์มเพชรที่สร้างได้นั้นได้นำเสนอไปแล้วในรูปที่ 3.11 ส่วนการตรวจสอบด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy นั้นแสดงดังรูปที่ 4.2 จากรูปจะเห็นว่าค่ายอดสูงสุดนั้นจะมีค่าอยู่ที่ 1333 cm^{-1} ซึ่งมีค่ายอดสูงสุดใกล้เคียงกับเพชรในธรรมชาติมาก ซึ่งเพชรในธรรมชาติมีค่ายอดสูงสุดที่ 1332 cm^{-1} แม้ว่าจะมียอดของกราฟที่ 1550 cm^{-1} รวมอยู่ด้วยแต่จะเห็นว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเพชร ดังนั้นจากการตรวจสอบทั้งหมดที่ได้นำเสนอมานั้นเป็นเครื่องยืนยันได้อย่างชัดเจนว่าเพชรที่สร้างได้นั้นเป็นเพชรจริง

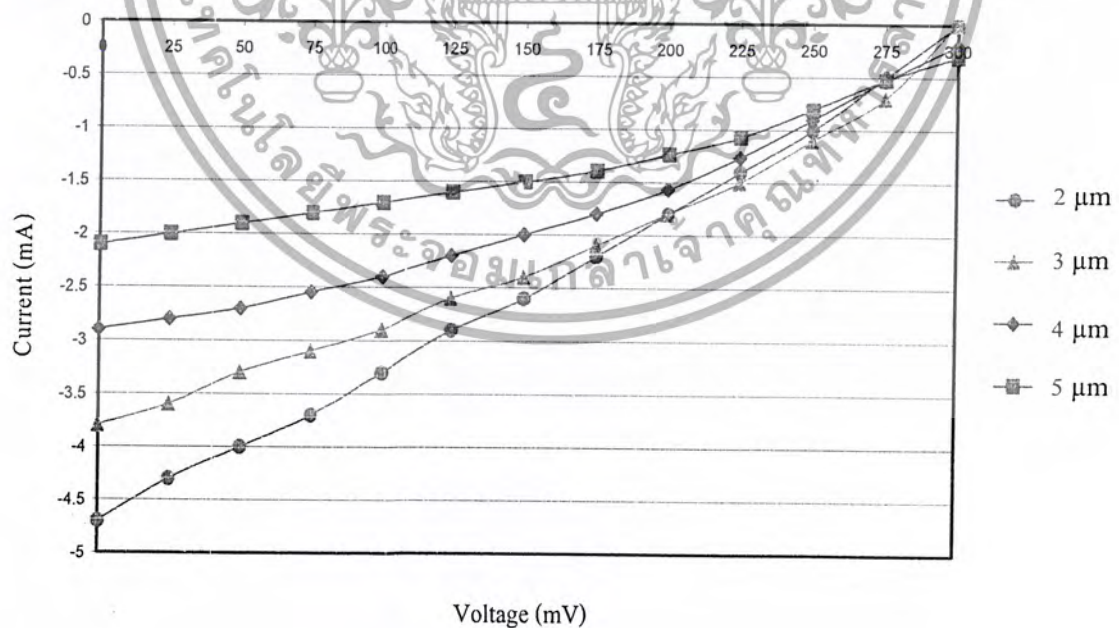
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ลักษณะของ Raman Spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD

4.1.2 ผลของคุณสมบัติกระแสและแรงดันของฟิล์มเพชรที่มีความหนาเป็น 2 μm

โดยในการทดลองนี้จะใช้อัตราส่วนของ B:C ที่ 1000 ppm และทำการทดลองโดยใช้ความเข้มแสง 11000 lux ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.3

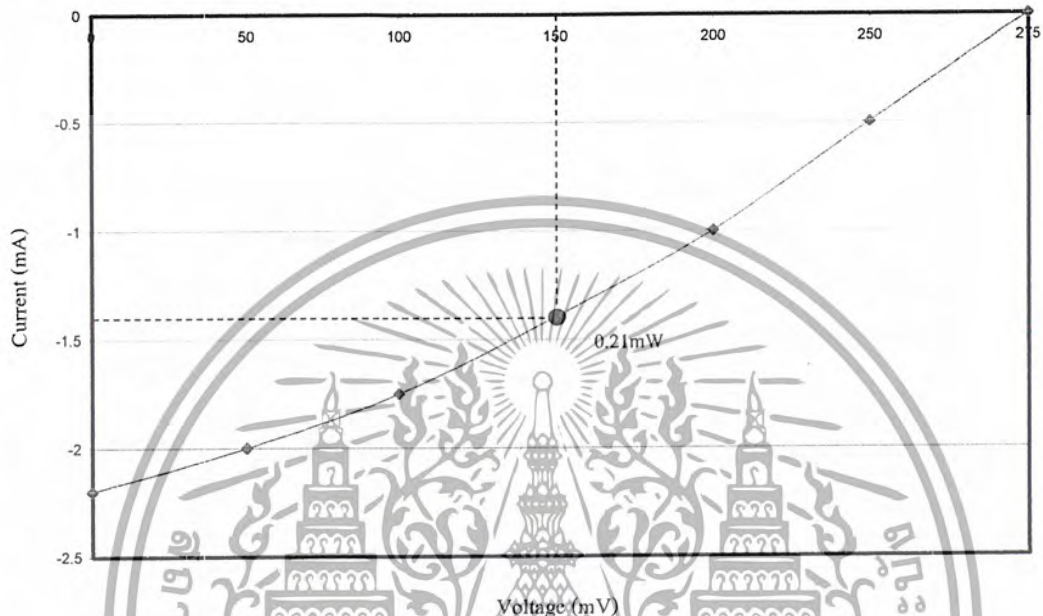


รูปที่ 4.3 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของฟิล์มเพชรค่าต่างๆกัน

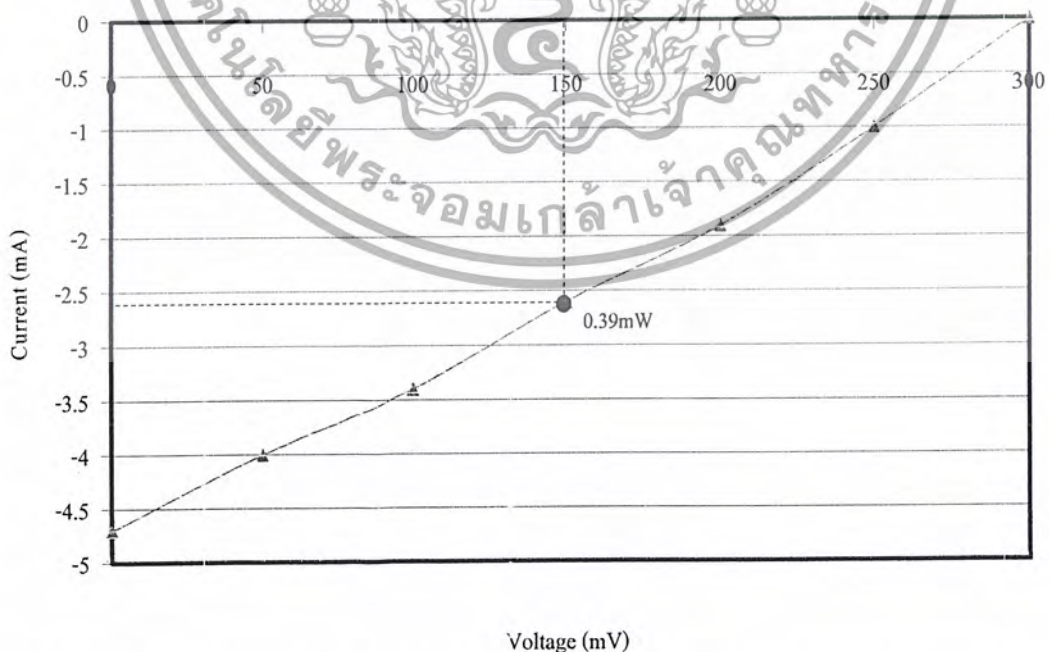
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลของความเข้มแสงที่ผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของความเข้มแสงว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ B:C 1000ppm ความหนา $2 \mu\text{m}$ และแสงที่ใช้คือแสงของหลอดทั้งสแตน โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเป็น 3000 lux, 11000 lux และ 100000 lux ผลการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.4 , 4.5 และ 4.6

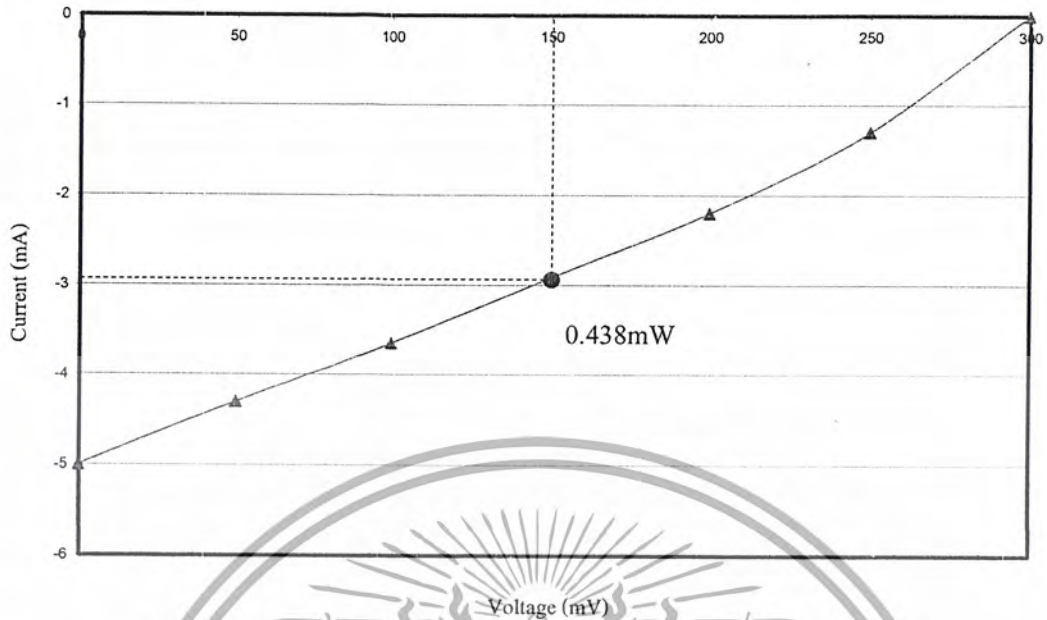


รูปที่ 4.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความเข้มแสง 3000 lux



รูปที่ 4.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความเข้มแสง 11000 lux

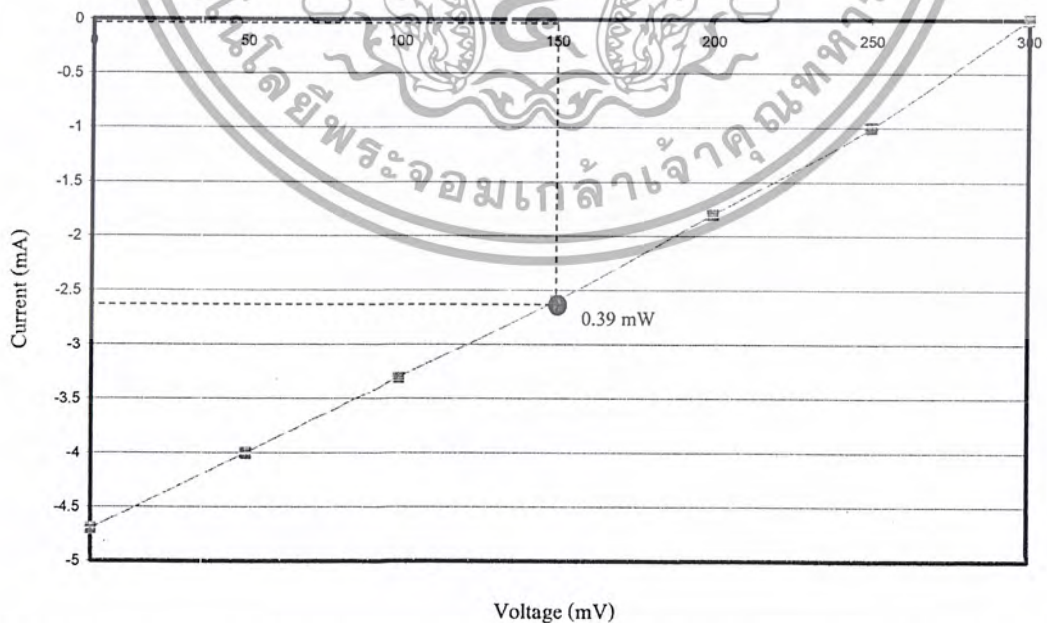
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความเข้มแสง 100000 lux

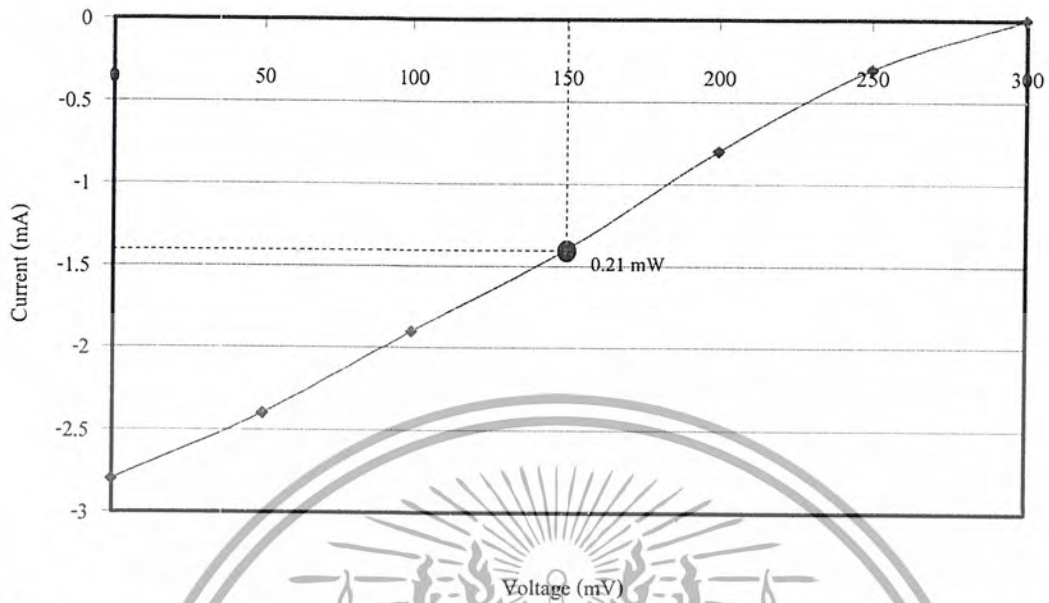
4.1.4 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทดลองนี้จะใช้เงื่อนไขของอัตราส่วน B:C 100ppm และความหนาของฟิล์มเพชร $2\mu\text{m}$ โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 3.9 โดยผลการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9

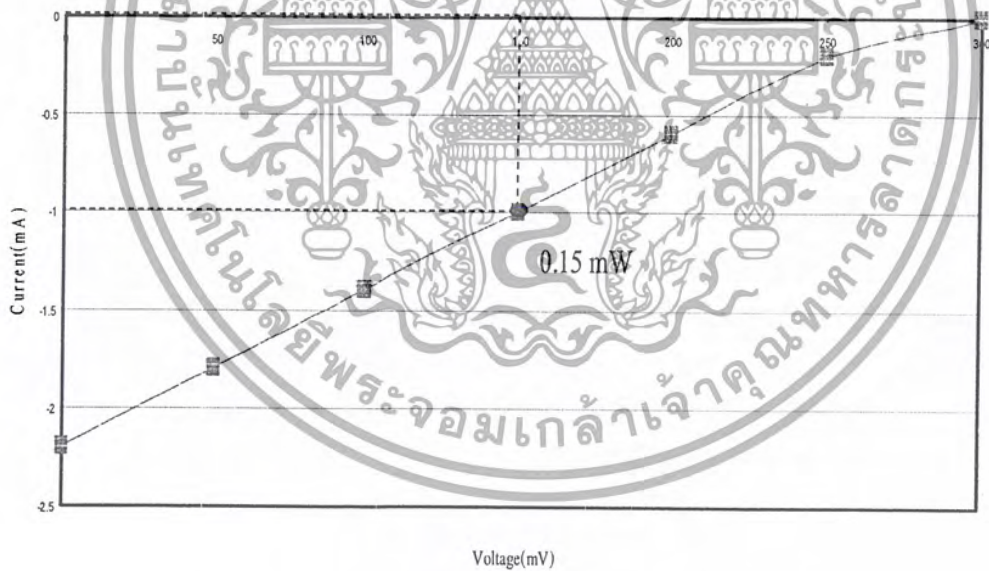


รูปที่ 4.7 ผลของความต้านทานที่ 0 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลของความต้านทานที่ 10 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si

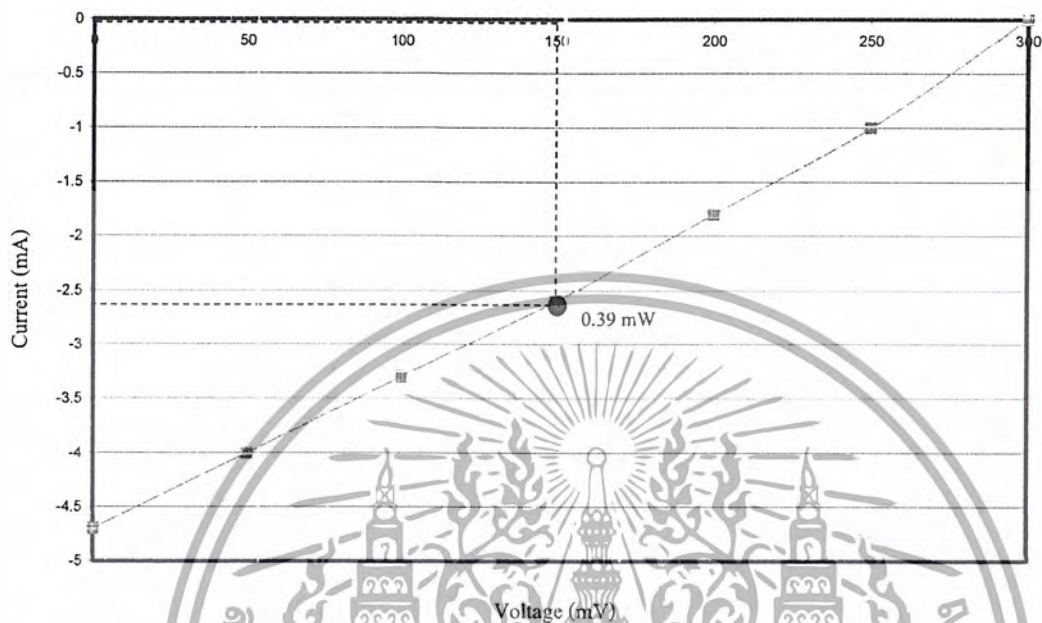


รูปที่ 4.9 ผลของความต้านทานที่ 20 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si

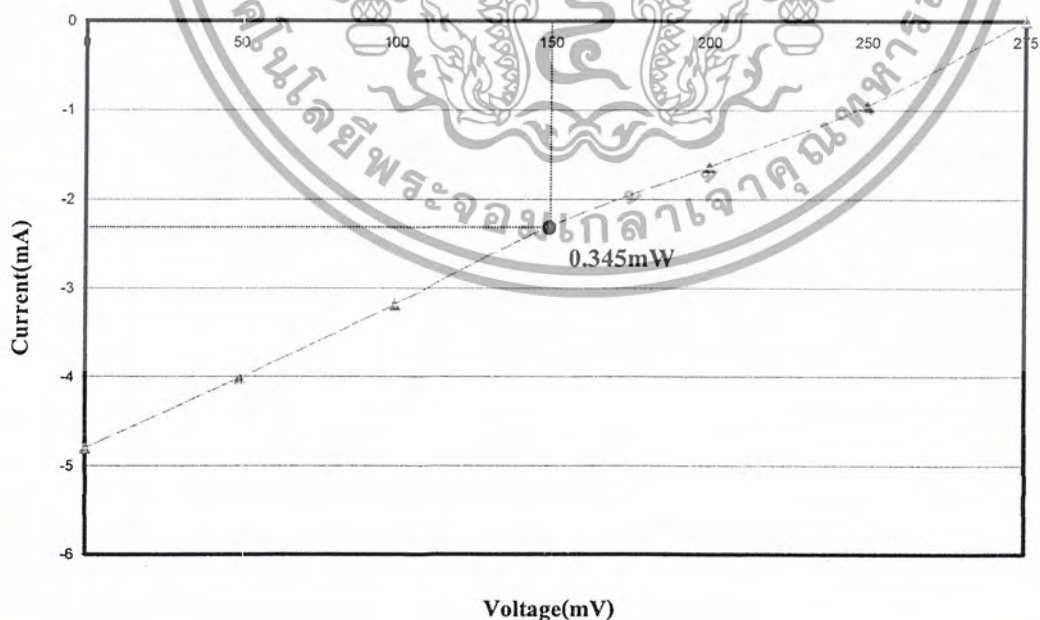
4.1.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้เงื่อนไขการสร้างเซลล์ดังนี้คือ B:C 1000ppm โดยฟิล์มเพชรมีความหนา $2\mu\text{m}$ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมียค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงขึ้นจะทำให้ค่าของ แรงดันเปิดวงจร และ กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำลง ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 , 4.11 และ 4.12

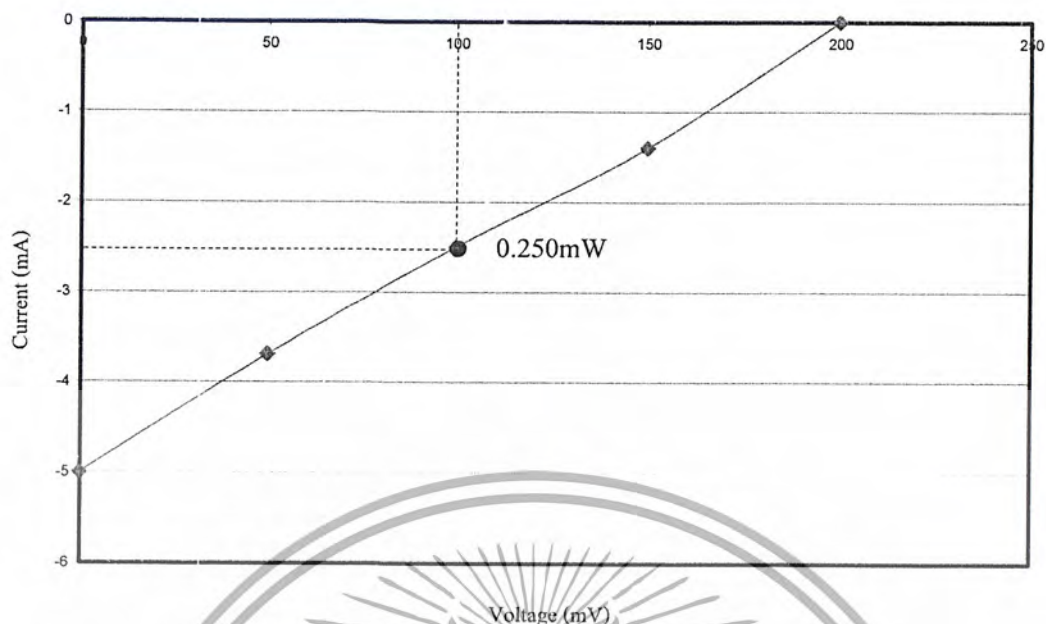


รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิที่ 27°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิที่ 50°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

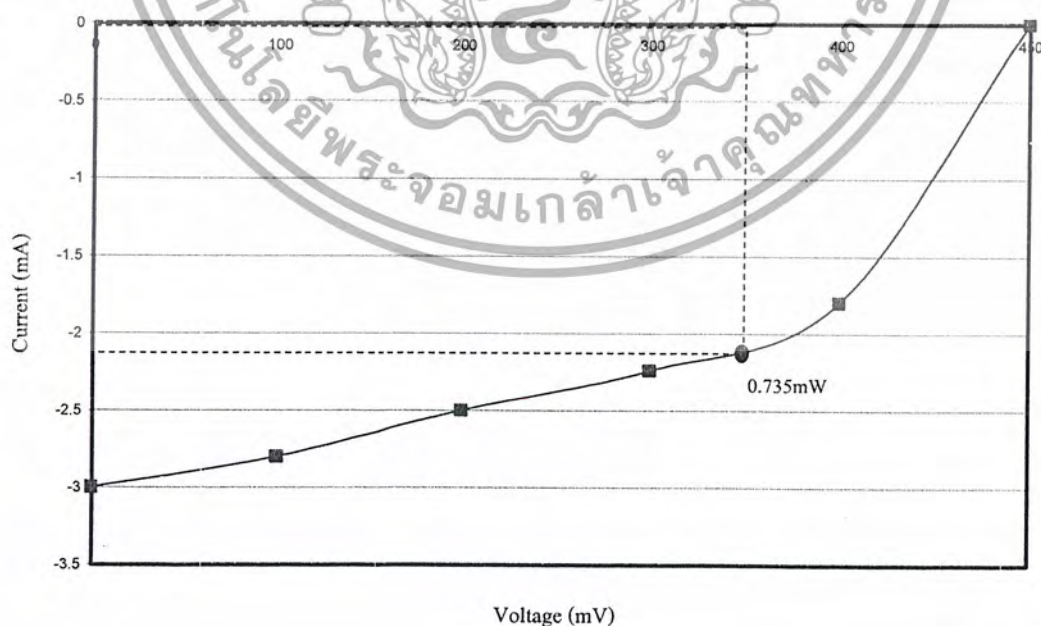


รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิที่ 100°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si

4.2 ผลการทดลองส่วนของโซลาร์เซลล์รอยต่อ p-Si/n-Si

4.2.1 ผลของคุณสมบัติกระแส-แรงดันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-Si/n-Si

โดยในการทดลองนี้ใช้การขั้วลึกลงที่ 60 นาฬิกา และใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนด์ที่ความเข้มแสง 11000 lux โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13

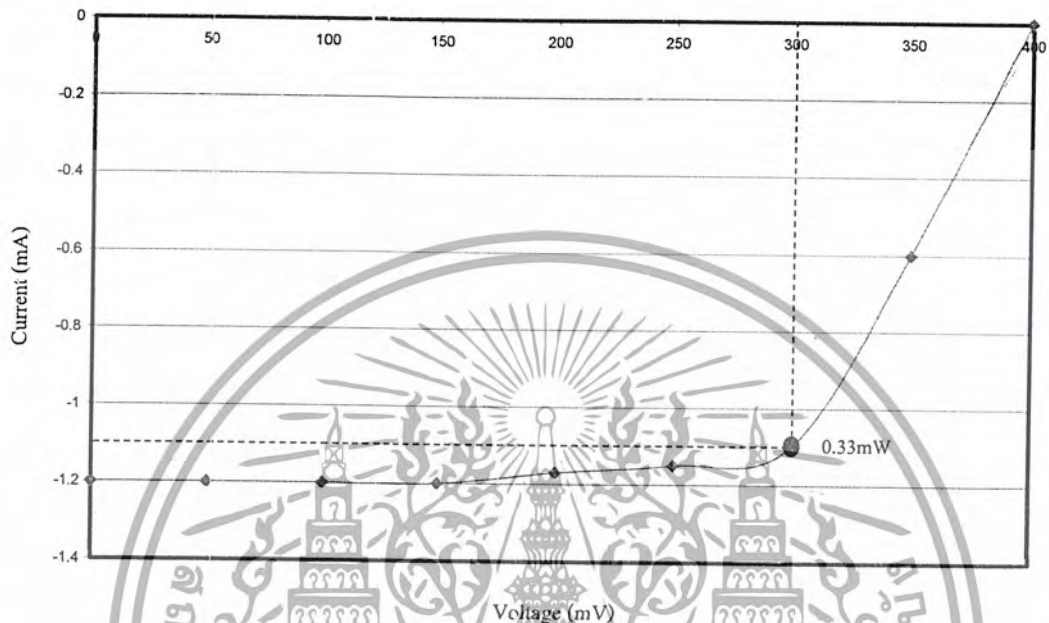


รูปที่ 4.13 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si

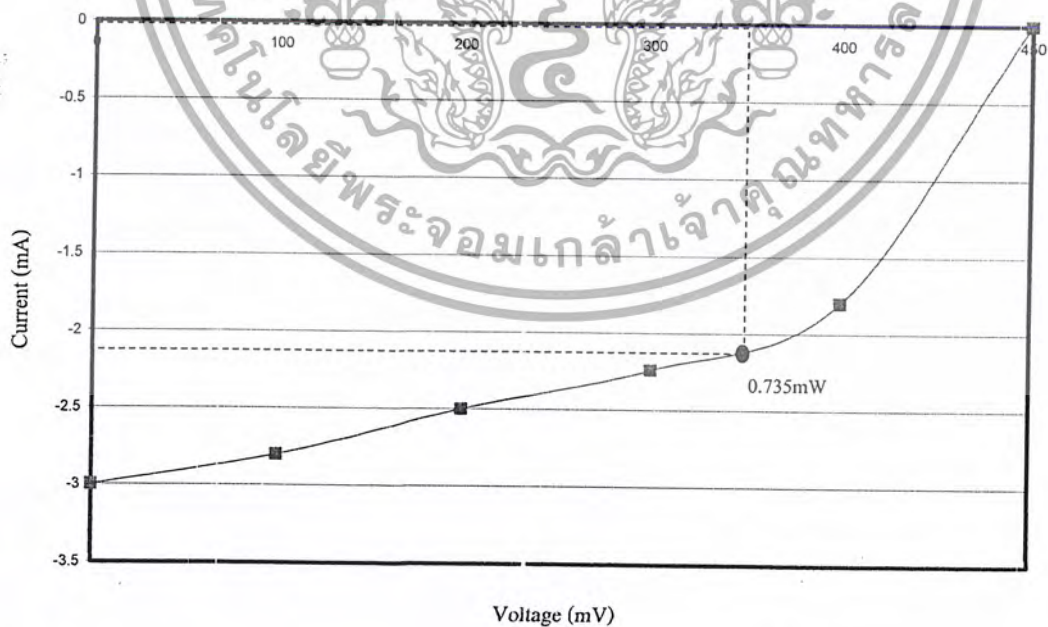
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของความเข้มแสงว่ามีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์และแสงที่ใช้คือแสงของหลอดทั้งสแตน โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเป็น 3000 lux 11000 lux ,100000 lux ผลการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 4.14 , 4.15 และ 4.16

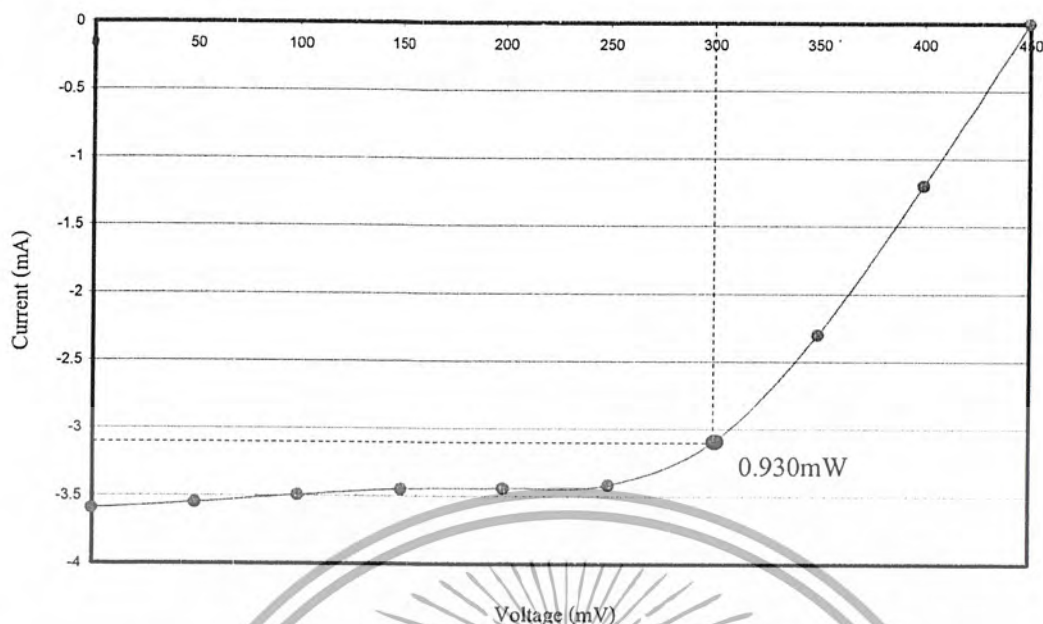


รูปที่ 4.14 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความเข้มแสง 3000 lux



รูปที่ 4.15 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความเข้มแสง 11000 lux

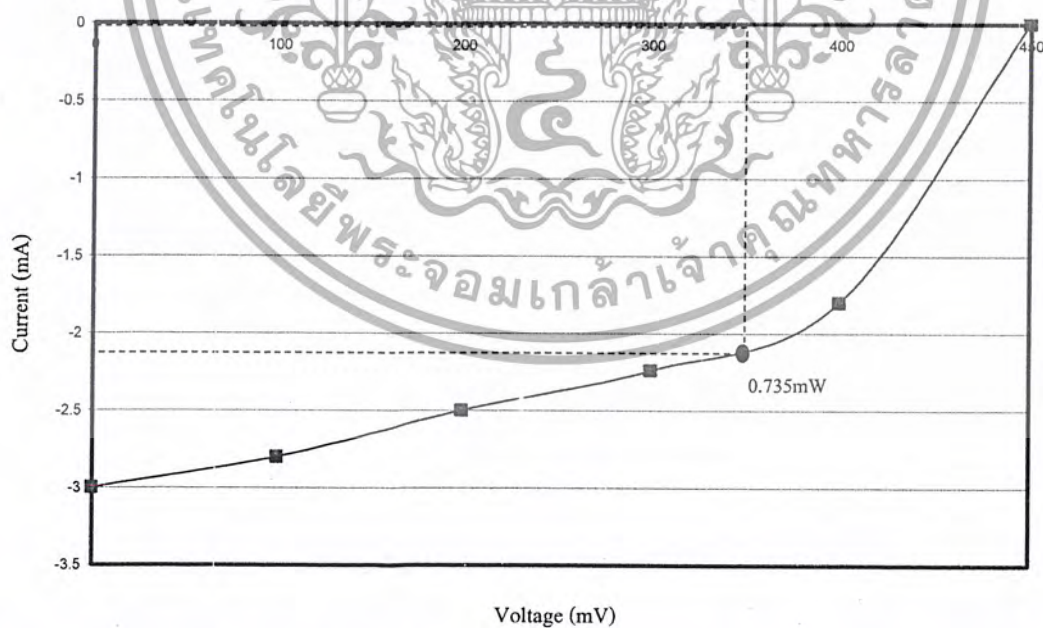
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความเข้มแสง 100000 lux

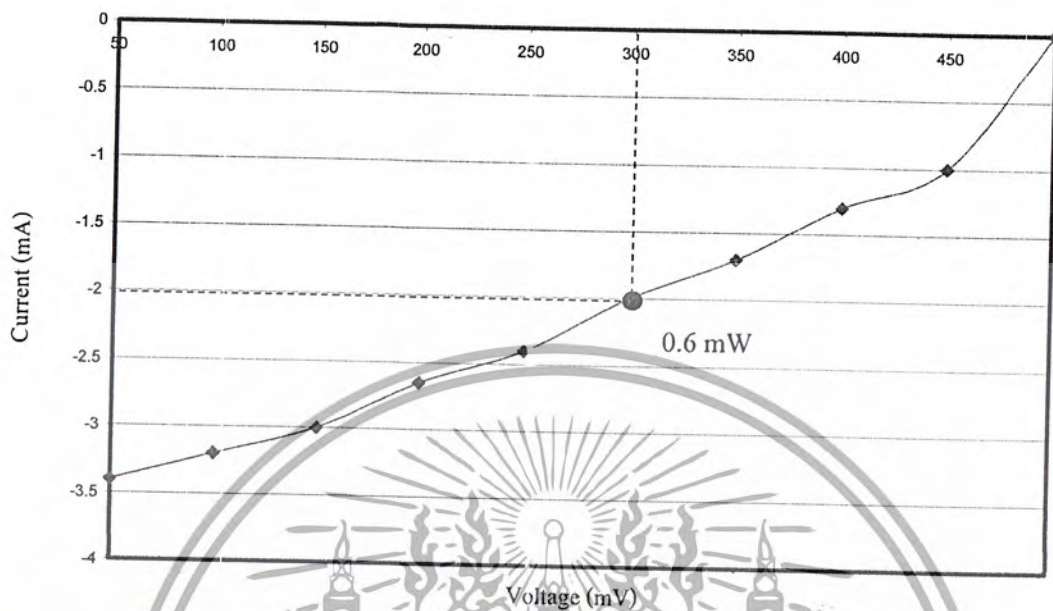
4.2.3 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองเพื่อศึกษาผลของค่าความต้านทานอนุกรม โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 3.9 โดยมีค่าความต้านทานอนุกรมที่ต่างกัน คือ 0,10,20 โอห์ม ผลการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19

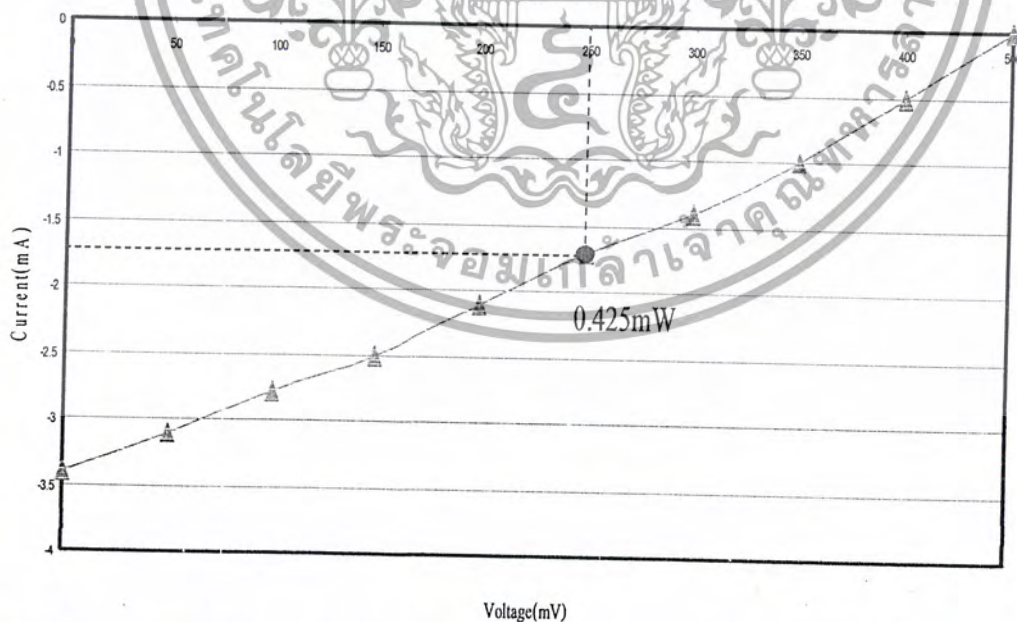


รูปที่ 4.17 ผลของความต้านทานที่ 0 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลของความต้านทานที่ 10 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si

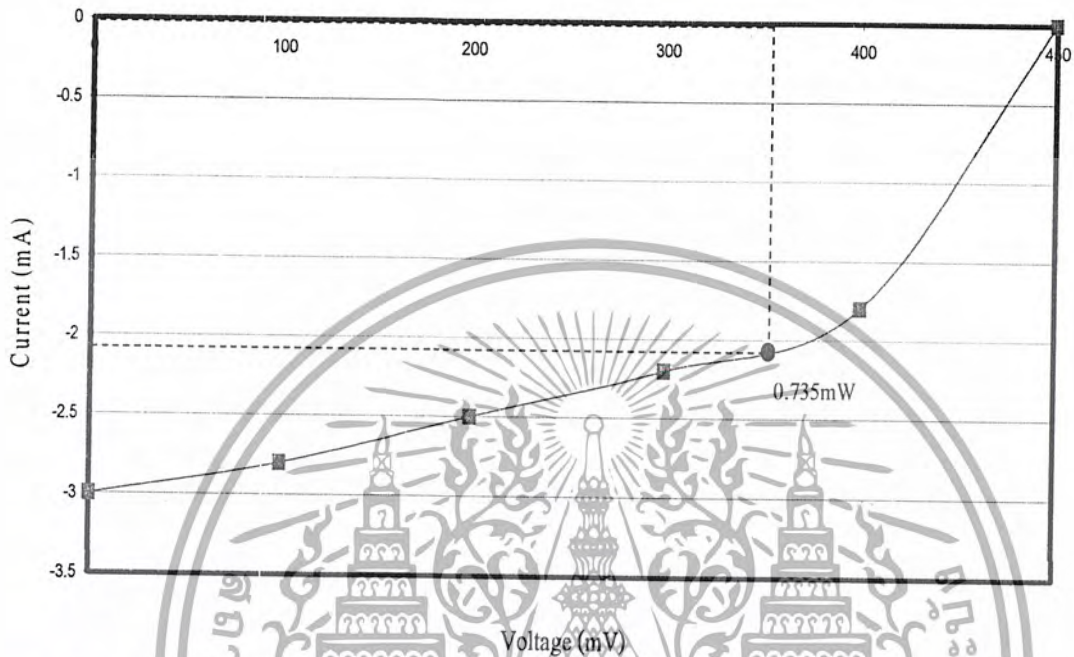


รูปที่ 4.19 ผลของความต้านทานที่ 20 โอห์ม ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si

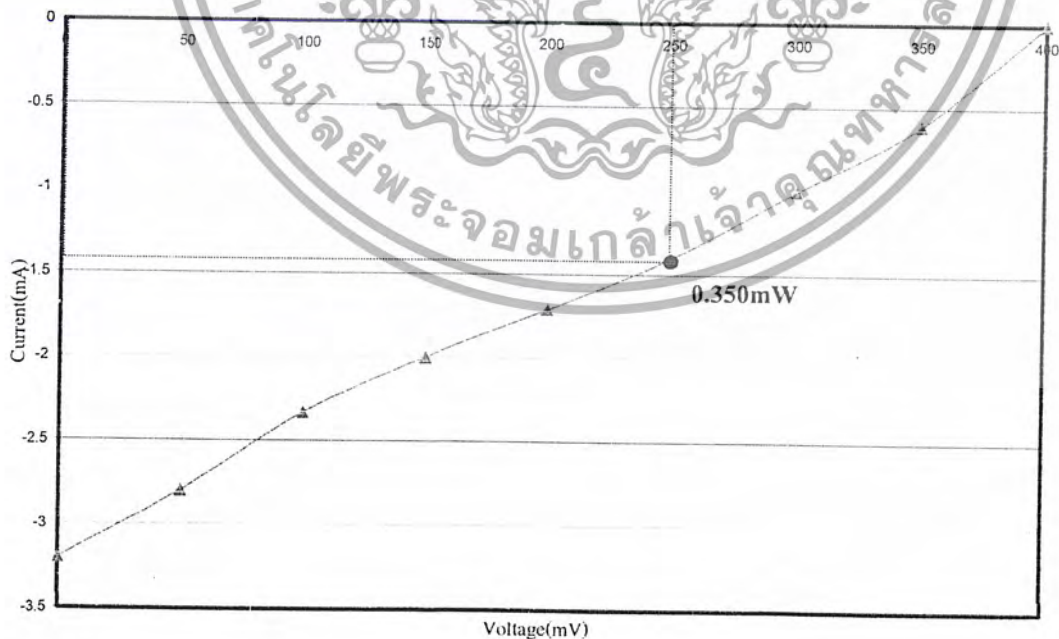
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

เป็นการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าของ แรงดันเปิดวงจร และ กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำลง ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22

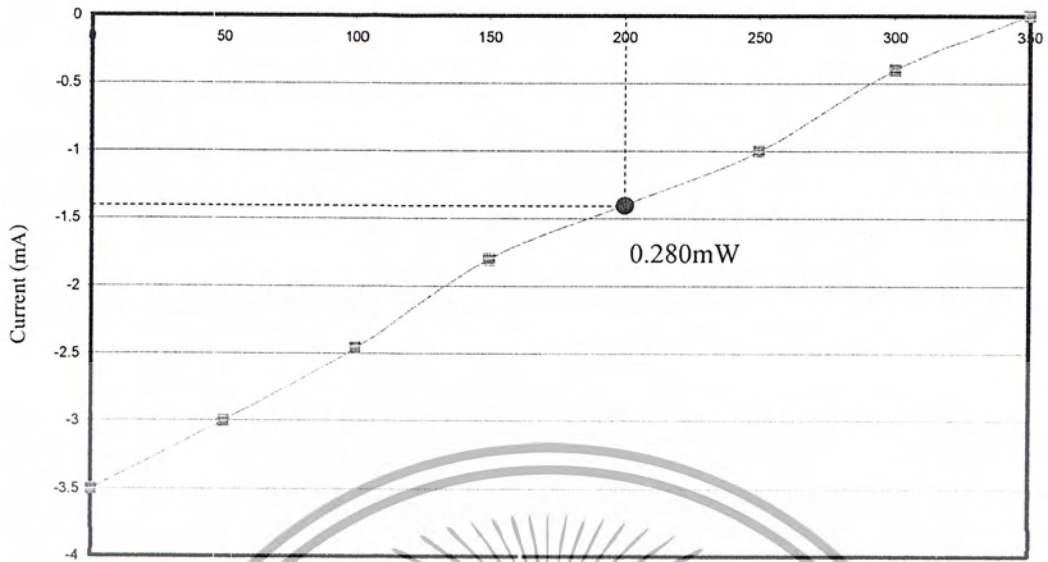


รูปที่ 4.20 ผลของอุณหภูมิที่ 27°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si



รูปที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิที่ 50°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิที่ 100°C ที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลองส่วนของโซลาร์เซลล์รอยต่อ p-Dia/n-Si

5.1.1 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์	3000 lux	11000lux	100000lux
กระแสลัดวงจร (Isc) mA	2.2	4.75	5.1
แรงดันเปิดวงจร(Voc) mV	275	300	300
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ(Po) mW	0.605	1.425	1.53
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(I _m) mA	1.4	2.6	2.9
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(V _m)mV	150	150	150
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด(P _m) mW	0.210	0.390	0.438
ค่าฟิลแฟคเตอร์(F.F)	0.347	0.274	0.286
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน(η)	3.94%	7.32%	8.23%
พื้นที่รับแสง(mm ²)	6.4	6.4	6.4

ตารางที่ 5.1 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความเข้มแสง 3000 lux , 11000 lux และ 100000 lux

5.1.2 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์	0 โอห์ม	10 โอห์ม	20 โอห์ม
กระแสลัดวงจร (Isc) mA	4.75	2.75	2.3
แรงดันเปิดวงจร(Voc) mV	300	300	300
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ(Po) mW	1.425	0.825	0.69
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(I _m) mA	2.6	1.4	1
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(V _m)mV	150	150	150
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด(P _m) mW	0.390	0.210	0.15
ค่าฟิลแฟคเตอร์(F.F)	0.274	0.254	0.21
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน(η)	7.32%	3.94%	2.25%
พื้นที่รับแสง(mm ²)	6.4	6.4	6.4

ตารางที่ 5.2 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Dia/n-Si ที่มีความต้านทาน 0 โอห์ม, 10โอห์ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และ 20 โอห์ม
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์	27°C	50°C	100°C
กระแสลัดวงจร (Isc) mA	4.75	4.8	5
แรงดันเปิดวงจร(Voc) mV	300	275	200
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ(Po) mW	1.425	1.32	1
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(I _m) mA	2.6	2.3	2.5
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(V _m)mV	150	150	150
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด(P _m) mW	0.390	0.345	0.25
ค่าฟิลแฟกเตอร์(F.F)	0.274	0.261	0.25
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน(η)	7.32%	6.47%	4.7%
พื้นที่รับแสง(mm ²)	6.4	6.4	6.4

ตารางที่ 5.3 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Di/n-Si ที่อุณหภูมิ 27 °C, 50 °C และ 100°C

5.2 ผลการทดลองส่วนของโวลตาเซลล์รอยต่อ p-Si/n-Si

5.2.1 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์	3000 lux	11000 lux	100000 lux
กระแสลัดวงจร (Isc) mA	1.2	3	3.6
แรงดันเปิดวงจร(Voc) mV	400	450	450
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ(Po) mW	0.480	1.5	1.6
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(I _m) mA	1.1	2.1	3.1
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(V _m)mV	300	350	300
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด(P _m) mW	0.330	0.735	0.930
ค่าฟิลแฟกเตอร์(F.F)	0.69	0.49	0.57
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน(η)	1.58%	3.53%	4.47%
พื้นที่รับแสง(mm ²)	25	25	25

ตารางที่ 5.4 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความเข้มแสง 3000 lux , 11000 lux และ 100000 lux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ผลของความต้านทานอนุกรมภายในที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์	0 โอห์ม	10 โอห์ม	20 โอห์ม
กระแสลัดวงจร (Isc) mA	3	3.4	3.4
แรงดันเปิดวงจร(Voc) mV	500	500	500
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ(Po) mW	1.5	1.7	1.7
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(I _m) mA	2.1	2	1.7
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(V _m)mV	350	300	250
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด(P _m) mW	0.735	0.6	0.425
ค่าฟิลแฟคเตอร์(F.F)	0.49	0.35	0.25
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน(η)	3.53%	2.88%	2.04%
พื้นที่รับแสง(mm ²)	25	25	25

ตารางที่ 5.5 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่มีความต้านทาน 0 โอห์ม, 10 โอห์ม และ 20 โอห์ม

5.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณสมบัติกระแสและแรงดัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์	27 °C	50 °C	100 °C
กระแสลัดวงจร (Isc) mA	3	2.7	3.5
แรงดันเปิดวงจร(Voc) mV	500	400	350
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ(Po) mW	1.5	1.08	1.225
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(I _m) mA	2.1	1.4	1.4
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด(V _m)mV	350	250	200
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด(P _m) mW	0.735	0.35	0.28
ค่าฟิลแฟคเตอร์(F.F)	0.49	0.32	0.23
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน(η)	3.53%	1.68%	1.35%
พื้นที่รับแสง(mm ²)	25	25	25

ตารางที่ 5.6 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ p-Si/n-Si ที่อุณหภูมิ 27 °C, 50 °C และ 100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวาระงานฉบับนี้เป็นกรณีวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด P-DiN/Si เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด P-Si/N-Si

จากบทความที่พบ ว่าผลของทวมดีเทค เทนเอกรวมก เลาในที่ต่อคุณสมบัติของไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ทวมดีเทค เทนเอกรวมก เลาในที่ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์มาก คือ ค่าความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์เพิ่มขึ้นเพียงนิดหน่อย ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้ลดลงเกือบครึ่งหนึ่ง เนื่องจาก มีแรงดันไฟฟ้ามาดกคร่อมที่ตัวต้านทานมาก ดังนั้น ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จึงควรวางทางลดความต้านทานอนุกรมภายในให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยการเลือกใช้แผ่นซิลิกอนที่จะนำมาสร้างเซลล์ให้มีค่าความต้านทานจำเพาะค่าต่ำๆ และหลังจากสร้างเซลล์เสร็จแล้วควรนำเซลล์ไปอบความร้อน เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าความต้านทานต่ำที่สุด

จากการทดลองผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า กระแสลัดวงจรจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากกับความเข้มแสง ส่วนแรงดันเปิดวงจรจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งเราสามารถนำผลนี้ไปพิจารณาออกแบบระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ได้

จากผลการทดลองในเรื่องผลของอุณหภูมิ พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่ออุณหภูมิที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นนั้นจะเปลี่ยนต่ออุณหภูมิน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากพี-เอ็น ซิลิกอน แสดงให้เห็นว่าในขณะที่อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิกอนชนิดเอ็นนั้น จะมีความเสถียรมากกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากพี-เอ็นซิลิกอน

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น จะเห็นได้ว่าสามารถที่จะนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์ใช้งานทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้เมื่อสร้างอยู่บนซิลิกอนโดยมีประสิทธิภาพเบื้องต้นประมาณ 7.32% อีกทั้งยังสามารถสร้างได้ง่าย และขั้นตอนไม่มากนัก ซึ่งเป็นงานวิจัยชิ้นหนึ่งที่นำได้รับการวิจัยและพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	สารกึ่งตัวนำที่เป็น วัสดุคิบ	ประสิทธิภาพของ เซลล์	ประสิทธิภาพของโมดูล
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกเดี่ยว	15-24 %	10-14 %
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกโพลี	10-17 %	9-12 %
ซิลิคอน-อะมอร์ฟิส	Amorphous Silicon Amorphous SiC Amorphous SiGe	8-13 %	6-9 %
สารกึ่งตัวนำ 2 วัสดุ	GaAs/InP CdS/CdTe	18-30 % (GaAs) 10-15 %	NA
สารกึ่งตัวนำ 3 วัสดุ	CdS/CuInSe ₂	10-15 %	NA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบ Molar Heat Capacity

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

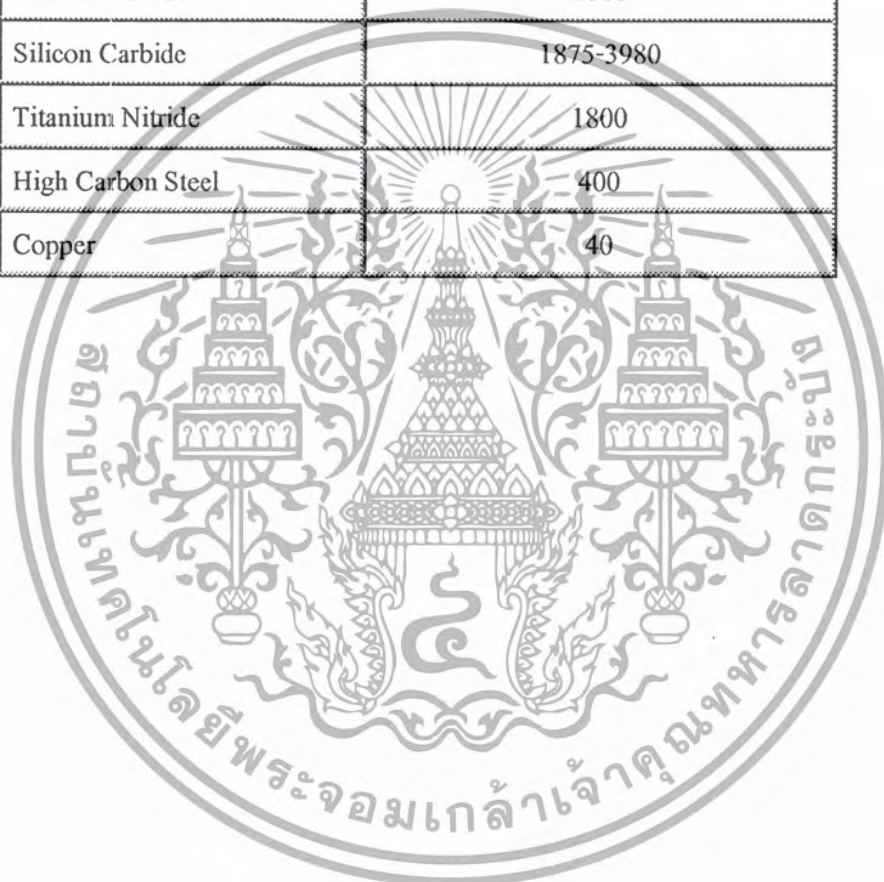
ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบ Thermal Expansion Coefficients

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบ Hardness

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบ Optical properties

Material	Refractive Index
Germanium	4.00-4.10
Silicon	3.42-3.50
Gallium Arsenide	3.34-2.12
Diamond	2.41-2.44
Sapphire	1.58-1.83
Fused Silica	1.40-1.48
Lithium Fluoride	1.11-1.45
Magnesium Oxide	1.62-1.77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

จากการที่โครงการนี้การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบความร้อน สำเร็จลุล่วง
ได้นั้น คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความรู้และสั่งสอน
ขอบคุณ พี่แบ็ค พี่ไอ้ และพี่ๆทุกคนในห้อง Superconductor ที่ช่วยวางแนวทาง ตลอดจนชี้แนะ
ข้อผิดพลาดต่างๆและมีส่วนช่วยเหลือให้รายงานฉบับนี้สำเร็จลงได้

สุดท้ายขอกราบของพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและผู้มีพระคุณทุกท่านที่
สนับสนุนทางด้านการเรียน คำลั้งใจและการเงินมาโดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้

บรรณานุกรม

1. กอบศักดิ์ ศรีประภา “การศึกษาการเลือกสร้างฟิล์มเพชรเฉพาะที่ ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541
2. คณรัชน์ วรรณมา “การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของพอร์สซิลิกอนกับฟิล์มเพชร” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2546
3. นิรุช ปิ่นเกตุ “การศึกษาและสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเนื้อสารต่างชนิดกันของฟิล์มบางเพชรและซิลิกอน” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544
4. ถัดดาวัลย์ สุภาดิ “การปลูกผลึกเพชรด้วยเทคนิค HFCVD” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544
5. สมเกียรติ สุขเดช. 2545. “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์”. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.
6. K.E.Spear, J.P. Dismukes, “synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology”, John Wiley and son, Inc. Newyork, 1994
7. R.F. Davis, “Diamond Films and Coating” Noyes Publication, Park Ridge, New Jersey, 1975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้