

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การลดกระแสรั่วใน MSM โฟโตไดโอดที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะจากเทคนิค  
การสปัตเตอร์

Lowering Leakage Current in MSM Photodiode with Cr metal Electrode  
by Sputtering Technique



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...104166  
วัน,เดือน,ปี... 3 0 ต.ค. 2552

b. 12106524  
i.....

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดกระแสรั่วใน MSM โฟโตไดโอดที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะจากเทคนิคการสปัตเตอร์  
Lowering Leakage Current in MSM Photodiode with Cr metal Electrode by Sputtering Technique



ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานปีการศึกษา 2551

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr

ผู้จัดทำ

1. นายชุตินันท์ โรจน์พิทักษ์กุล รหัส 48010214
2. นางสาวนริศรา ลิ้มวานิชรัตน์ รหัส 48010427
3. นายนิธิธร ชาญนำสิน รหัส 48010457



  
(ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในช่องทางอื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การลดกระแสรั่วใน MSM โฟโตไดโอดที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะจากเทคนิค การสปีดเตอร์

นายชุตินันท์	โรจน์พุทธิกุล	รหัส 48010214
นางสาวนริศรา	ลิมวานิชรัตน์	รหัส 48010427
นายนิธิธร	ชาญนำสิน	รหัส 48010457
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่ใช้ขั้วโลหะเป็นโครเมียมและสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นและพีประกอบเป็นโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr และทำการศึกษาการลดกระแสรั่วจากเทคนิคในการสปีดเตอร์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างขั้วโลหะโครเมียมให้ได้กระแสรั่วต่ำสุด พบว่ากำลังในการสปีดเตอร์มีค่า 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^3$  mbar อุณหภูมิฐานรอง 25 °C เวลาในการสปีดเตอร์ 30 min ซึ่งใน Cr/p-Si/Cr มีแรงดันภายใน 0.36 โวลต์ และค่าพวงศักร์ซีอติคีย์ 0.67 โวลต์ ส่วน Cr/n-Si/Cr มีแรงดันภายใน 0.32 โวลต์ และค่าพวงศักร์ซีอติคีย์ 0.70 โวลต์ และสามารถลดกระแสรั่วใน Cr/p-Si/Cr ลงได้ 80 เท่า และใน Cr/n-Si/Cr สามารถลดลงได้ 264 เท่า เมื่อนำตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิดมาวัดการตอบสนองทางความถี่ โดยการมอดูเลตสัญญาณกระแสสลับด้วยเลเซอร์ พบว่าตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr สามารถตอบสนองทางความถี่ได้มากกว่า Cr/n-Si/Cr แสดงว่าในซิลิคอนชนิดเอ็นมีโฮลเป็นพาหะในการก่อให้เกิดกระแสแสง ส่วนในซิลิคอนชนิดพีมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะในการก่อให้เกิดกระแสแสง ซึ่งอิเล็กตรอนมีค่าความคล่องตัวมากกว่าโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Lowering Leakage Current in MSM Photodiode with Cr metal Electrode by Sputtering Technique

Mr.Chutipon Roatputikul      Student ID 48010214

Ms.Narissara Limwanitcharat Student ID 48010427

Mr.Nitiithorn Channamsin      Student ID 48010457

Assist.Prof.Dr.Surasak Niemcharoen      Advisor

Educational Year 2008

### Abstract

The purpose of this project is to study on electrical and optical characteristics of MSM Cr/n-Si/Cr and Cr/p-Si/Cr in planar structure Cr contact semiconductor. Then , study on factors of sputtering for find the proper condition to reduce the dark current as  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar pressure of Ar, 25 °C temperature at substrate, 50 W power of the sputtering , and 30 min duration of the sputtering. On Cr/n-Si/Cr has  $\Phi_{bn} = 0.70$  V and  $V_{bi} = 0.32$  V. Cr/p-Si/Cr has  $\Phi_{bp} = 0.67$  V and  $V_{bi} = 0.32$  V. The result of reduce the dark current on p-Si is 80 times and n-Si is 264 times. In testing for frequency response, Cr/p-Si/Cr photodetector is more frequency reponse than Cr/n-Si/Cr photodetector because n-Si has hole as a carrier of light current but p-Si has electron as a carrier of light current, so electron is more mobility than hole.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะแนวทางการทำงานตลอดจนขอบเขตการทำงาน พร้อมทั้งช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งรายละเอียดต่างๆที่เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ นายสุรชาติ เมืองอ่ำ นักศึกษาปริญญาโทสำหรับความช่วยเหลือและดูแลการทำงานในทุกๆเรื่อง ทั้งคำปรึกษา ตลอดจนคำชี้แนะ รวมทั้งรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์ รวมถึงรุ่นพี่และเพื่อนๆทุกคนและทุกๆกำลังใจที่ให้กับตลอดมา

ขอขอบคุณ นางสาวกมลวรรณ อุณสมบัติ และ นายกิตติพงษ์ จันทรมัสการ นักศึกษาปริญญาตรีสำหรับความช่วยเหลือในการวัดผลการทดลอง

ขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี  
สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา



### ผู้จัดทำ

1. นายชุตติพันธ์ โรจน์พุทธิกุล รหัส 48010214
2. นางสาวนริศรา ลิ้มวานิชรัตน์ รหัส 48010427
3. นายนิธิธร ชาญนำสิน รหัส 48010457

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
1.3 ขอบเขตโครงการ	4
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	5
บทที่ 2 ทฤษฎีในสารกึ่งตัวนำและตัวตรวจวัดแสง	6
2.1 ลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ	6
2.1.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง	6
2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี	7
2.2 การรวมตัวใหม่และการเกิดพาหะในสารกึ่งตัวนำ	8
2.2.1 นิยาม	8
2.2.2 กระบวนการ R-G (Recombination-Generation Process)	8
2.3 โลหะโครเมียมและโครเมียมผสม	11
2.4 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ	11
2.5 รอยสัมผัส肖ตกี	12
2.5.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัส肖ตกี	12
2.5.2 รอยสัมผัส肖ตกีขณะได้รับไบอัส	15
2.5.2.1 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง	15
2.5.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ	15
2.6 รอยสัมผัสโอห์มมิก	16
2.6.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสโอห์มมิก	16
2.6.2 รอยสัมผัสโอห์มมิกขณะได้รับไบอัส	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไปไว้บนโต๊ะในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2.1 รอยสัมผัสขณะได้รับ ไปอัสตรง	17
2.6.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับ ไปอัสย้อนกลับ	18
2.7 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM	19
2.7.1 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล	19
2.7.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดัน ไปอัส	20
2.7.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ	21
2.7.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ โครงสร้าง MSM	22
2.8 ซีตทียูไดโอด	22
2.8.1 โมเดลพื้นฐานของพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ	22
2.8.2 โมเดลพื้นฐานของพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ	24
2.9 RF Diode Sputtering	24
2.10 ข้อพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง	25
2.10.1 สภาพตอบสนอง (Responsivity)	26
2.10.2 ประสิทธิภาพควอนตัม	26
2.10.3 ดีเทกทิวิตี หรือความสามารถของการตรวจจับ	26
2.10.4 กำลังเอาต์พุตเทียบสัญญาณรบกวน	27
2.10.5 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม	28
2.10.6 เวลาตอบสนอง	28
บทที่ 3 การสร้างและการทดลอง	31
3.1 โครงสร้าง	31
3.2 กระบวนการสร้าง	32
3.3 การทดลอง	34
3.3.1 การศึกษากำแพงศักย์ซีตทียู	35
3.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/p-Si/Cr	35
3.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/p-Si/Cr	36
ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติการตอบสนองสัญญาณเลเซอร์ ของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr	37
3.3.5 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Cr/p-Si/Cr	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	38
4.1 ผลการทดลองกำแพงศักย์ช็อคกี	38
4.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ในแบบสัญญาณกระแสตรง	43
4.2.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ	43
4.2.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ได้รับแสงจากหลอด Halogen ในความเข้มต่างๆมาตกกระทบ	44
4.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังและความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์	46
4.3.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์	46
4.3.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์	47
4.3.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์	48
4.3.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์	49
4.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบาง โครเมียม เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังและความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์	53
4.4.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบาง โครเมียมเมื่อ เปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบาง โครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์	54
4.4.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียม เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสปีดเตอร์	54
4.4.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียม เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์	55
4.5 ผลการทดลองการหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - แรงดันของอุปกรณ์ Cr/p-Si/Cr ที่เงื่อนไขการสปีดเตอร์ต่างๆ	56
4.6 ผลการทดลองค่าพียงศักย์ช็อกกีของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr	58
4.7 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในสัญญาณแสงกระแสตรง	59
4.7.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ	59
4.7.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส -แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในขณะที่ได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจน ในความเข้มต่างๆ มาตกกระทบ	60
4.8 ผลการทดลองลักษณะสมบัติการตอบสนองสัญญาณกระแสสลับ ของตัวตรวจวัดแสง ที่ค่าโหลคความต้านทาน ( $R_L$ ) 100 $\Omega$	61
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	66
บรรณานุกรม	69

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้าง MSM ชนิด Cr/p-Si/Cr	
(ก) ภาพด้านบนโครงสร้าง MSM (ข) ภาคตัดขวาง โครงสร้าง MSM	3
2.1 กราฟความสัมพันธ์ E-k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ	
(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง	6
2.2 การไอออไนซ์ของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก	8
2.3 กระบวนการ R-G โดยตรง	
(ก) การเกิดพาหะโดยตรง (ข) การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ	9
2.4 กระบวนการ R-G โดยอ้อม	
(ก) การเกิดพาหะโดยอ้อม (ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ	10
2.5 ตำแหน่งของระดับ R-G center ที่เกิดจากอะตอมสารเจือในซิลิคอน	10
2.6 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ	
(ก) รอยสัมผัสโอห์มิก (ข) รอยสัมผัสเรกติไฟรี	11
2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อคกี	12
2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสช็อคกี	15
2.9 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงของรอยสัมผัสช็อคกี	15
2.10 แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อคกี	16
2.11 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ก่อนเกิดรอยสัมผัสโอห์มิก	16
2.12 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสโอห์มิก	17
2.13 แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสตรงของรอยสัมผัสโอห์มิก	18
2.14 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสโอห์มิก	18
2.15 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล	
(ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน	19
2.16 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบอัส	20
2.17 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ	21
2.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ	22
2.19 ตัวอย่างสเปกตรัมค่าดีเทกทิวิตีของวัสดุชนิดต่างๆ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr	31
3.2 ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr	34
3.3 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองหาค่าแกมมาสัมพัทธ์ของตัว	35
3.4 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน	35
3.5 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง	36
3.6 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติการตอบสนองสัญญาณเลเซอร์ของตัว	37
3.7 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน	37
4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วตรงและ ขั้วตรงไบอัสย้อนกลับที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง $25^{\circ}\text{C}$ ซิลิคอนชนิดพี	38
4.2 การหาค่า $J_0$ จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้ว	39
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันภายใน, ค่าค่าแกมมาสัมพัทธ์กับกำลัง ในการสปีดเตอร์ ที่ความดันของก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง $25^{\circ}\text{C}$	41
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันภายใน, ค่าค่าแกมมาสัมพัทธ์กับความดัน ของก๊าซอาร์กอน ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง $25^{\circ}\text{C}$	41
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันภายใน, ค่าค่าแกมมาสัมพัทธ์กับเวลาในการสปีดเตอร์ ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar อุณหภูมิฐานรอง $25^{\circ}\text{C}$	42
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันภายใน, ค่าค่าแกมมาสัมพัทธ์กับอุณหภูมิฐานรอง ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที	43
4.7 สมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้ รับแสงตกกระทบที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง $25^{\circ}\text{C}$	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 สมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง $25^{\circ}\text{C}$	45
4.9 ลักษณะสมบัติกระแสแสง - ความเข้มแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ที่แรงดันไบอัส 10 V ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง $25^{\circ}\text{C}$	46
4.10 กระแสมีดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์ ที่ 50, 75, 100 และ 150 W ที่แรงดันไบอัส 10 V	46
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและกำลังไฟฟ้าในการสปีดเตอร์ ที่แรงดันไบอัส 10V ความเข้มแสง 25,000 lux	47
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมีดกับกำลังไฟฟ้า ที่แรงดันไบอัส 10V, ความเข้มแสง 25,000 lux	47
4.13 กราฟกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันในการสปีดเตอร์ที่ $4.5 \times 10^{-3}$ , $6.0 \times 10^{-3}$ , $8.0 \times 10^{-3}$ , และ $1.0 \times 10^{-2}$ mbar ที่แรงดันไบอัส 10 V	48
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความดันที่ค่าแรงดันไบอัส 10V ความเข้มแสง 25,000 lux	49
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมีดกับความดันที่แรงดันไบอัส 10V, ความเข้มแสง 25,000 lux	49
4.16 กระแสมีดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสปีดเตอร์ ที่ 10, 20, 30 และ 40 min ที่แรงดันไบอัส 10 V	50
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและเวลาในการสปีดเตอร์ ที่แรงดันไบอัส 10V ความเข้มแสง 25,000 lux	50
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมีดกับเวลาในการสปีดเตอร์	51
4.19 กระแสมีดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์ที่ 25, 100, 200 และ $300^{\circ}\text{C}$ ที่ 10 V	51
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและอุณหภูมิฐานรองที่ค่าแรงดัน 10V ความเข้มแสง 25,000 lux	52
4.21 อัตรากระแสแสงต่อกระแสมีด ของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและอุณหภูมิฐานรอง	52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 สมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์	53
4.23 สมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์	54
4.24 สมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสปีดเตอร์ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar อุณหภูมิฐานรอง 25 °C	54
4.25 สมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์	55
4.26 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/p-Si/Cr ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง 25 °C	56
4.27 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วตรงและขั้วตรงกลับที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง 25 °C	58
4.28 การหาค่า $J_0$ จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วตรง	58
4.29 สมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบบที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง 25 °C	59
4.30 สมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง 25 °C	60
4.31 ลักษณะสมบัติกระแสแสง - ความเข้มแสงตกกระทบบของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่แรงดันไบอัส 10 V ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน $4.5 \times 10^{-3}$ mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง 25 °C	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติการตอบสนองสัญญาณเลเซอร์ของตัว ตรวจจับแสง	61
4.33 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของการติมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 100 Hz ที่แรงดันไบแอส 10 V ของตัวอุปกรณ์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 $\mu\text{m}$ ชนิดพีซีลีคอน	62
4.34 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของการติมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 2.992 MHz ที่แรงดันไบแอส 10 V ของตัวอุปกรณ์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 $\mu\text{m}$ ชนิดพีซีลีคอน	62
4.35 สมบัติการตอบสนองสัญญาณเลเซอร์ของตัวตรวจจับแสง Cr/p-Si/Cr ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 $\mu\text{m}$ ชนิดพีซีลีคอน	63
4.36 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของการติมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 100 Hz ที่แรงดันไบแอส 10 V ของตัวอุปกรณ์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 $\mu\text{m}$ ชนิดเอ็นซีลีคอน	63
4.37 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของการติมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 2.992 MHz ที่แรงดันไบแอส 10 V ของตัวอุปกรณ์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 $\mu\text{m}$ ชนิดเอ็น	64
4.38 สมบัติการตอบสนองสัญญาณเลเซอร์ของตัวตรวจจับแสง Cr/p-Si/Cr ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 $\mu\text{m}$ ชนิดเอ็นซีลีคอน	64
4.39 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ	65

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติดีเด่นด้านต่างๆ ของออปโตอิเล็กทรอนิกส์	2
2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะ โครเมียม	11
2.2 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าอัตราขยายและเวลาขาขึ้นของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดต่างๆ	30
3.1 ตารางเงื่อนไขในการสปีดเตอร์ที่ตัวแปรต่างๆ	34
4.1 ค่าความหนาแน่นกระแส แรงดันภายในและกำแพงศักย์ช็อคกีย์ที่เงื่อนไขต่างๆ	40
4.2 ค่าความจุไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของโครงงาน

“ออปโตอิเล็กทรอนิกส์” (Optoelectronics) เป็นเทคโนโลยีที่เกิดจากการผสมผสานเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับแสง (opto, optical) เข้าด้วยกันกับเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ (electronics) ออปโตอิเล็กทรอนิกส์เป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับแสงในหลายๆด้าน เช่น การเปล่งแสง การรับแสง การควบคุมแสง การขยายแสง การมอดูเลตแสง และการประมวลสัญญาณแสง ฯลฯ สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นที่รู้จักกันทั่วไป เช่น ไดโอดเปล่งแสง โฟโตไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์ เลเซอร์ชนิดต่างๆ กล้องถ่ายภาพวิดีโอ ฯลฯ เป็นต้น เราสามารถนำสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้มากมายหลายด้าน เช่น ใช้ในการวัดและควบคุม การสื่อสาร สารสนเทศ พลังงาน การแพทย์ สิ่งแวดล้อม เกษตรกรรม กสิกรรม อาหาร อุตสาหกรรม ต่างๆ การทหาร และการขนส่ง ฯลฯ เป็นต้น

ปัจจุบันในประเทศไทย มีการใช้งานสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์กันอย่างกว้างขวาง ทั้งในรูปของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น ดิสเพลย์แสดงผลชนิดต่างๆ กล้องถ่ายภาพวิดีโอ ในรูปของพลังงานทดแทน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ในรูปแบบของการสื่อสารด้วยแสง เช่น เลเซอร์ไดโอด เส้นใยแสง และโฟโตไดโอด เป็นต้น

“ออปโตอิเล็กทรอนิกส์” มีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีของแสง กลศาสตร์ควอนตัม และอิเล็กทรอนิกส์ จุดเด่นของออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่

- 1) แสงที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นนั้นสามารถใช้ในการสื่อสารข้อมูลให้มนุษย์ได้รับรู้ด้วยแสง จึงมีการผลิตสิ่งประดิษฐ์ถ่ายภาพวิดีโอและดิสเพลย์ต่างๆ
- 2) แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงและสามารถวิ่งได้เร็วที่สุด เร็วกว่าอนุภาคหรือคลื่นอื่นใดจึงมีการใช้แสงในการสื่อสารด้วยแสงและการประมวลข้อมูล (information processing)
- 3) แสงสามารถรวมโฟกัสให้เป็นจุดเล็กๆ จึงมีการใช้แสงในการบันทึกข้อมูล (optical memory) ด้วยแสงและใช้แสงในด้านพลังงานซึ่งมีความเข้มของพลังงานสูง นอกจากนี้เนื่องจากแสงมีพลังงานโฟตอน( $h\nu$ ) สูงจึงสามารถใช้ในการกระตุ้นให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และทางเคมีได้ง่ายด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติดีเด่นด้านต่างๆ ของออปโตอิเล็กทรอนิกส์

การใช้งาน	คุณสมบัติดีเด่น
แสงทั่วไป	ไม่ถูกรบกวนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีการช้อตหรือสปาร์กของไฟฟ้า โฟกัสแสงได้ง่าย
แสงเลเซอร์	มอดูเลตที่ความถี่สูงได้ มีความเข้มของพลังงานต่อพื้นที่สูงมาก
เส้นใยแสง	มีการสูญเสียแสงน้อย เป็นเส้นเล็กยาว ราคาถูก อ่อนโค้งงอได้ วัสดุทรัพยากรมีมาก

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงมีบทบาทสำคัญในงานด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งงานอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแสง ถูกเรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optical Electronics or Opto-Electronics) งานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงเป็นงานที่ได้รับการพัฒนา และก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทั้งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทุกๆ ด้านอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ ซึ่งเป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง (Opto-Communication System) การสื่อสารระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งความเร็ว ความแม่นยำ เที่ยงตรง และความประหยัด เมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิม

ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความไวต่อรังสีของแสง (Optical radiation) และสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ โดยตัวตรวจจับแสงจะอยู่ในวงจรภาครับ เพื่อแปลงข้อมูลที่เป็นสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วแสดงออกที่ด้านเอาต์พุต การทำงานลักษณะนี้ถูกเรียกว่า ดิมอดูเลเตอร์ และยังสามารถนำไปใช้ในการวัดความเข้มแสง ในวงจรสวิตซ์แสงเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งตัวตรวจจับแสงมีหลายลักษณะโดยแบ่งออกกว้างๆ ได้เป็น 2 กลุ่มคือ โฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductor) และโฟโตไดโอด (photodiode) สำหรับโฟโตไดโอดอาจจะแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้แก่ พี-เอ็นโฟโตไดโอด พินไดโอด อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด และช็อตกีย์โฟโตไดโอด ในส่วนโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal: MSM) เป็นโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มของช็อตกีย์โฟโตไดโอด และกำลังได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอนนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ตัวอย่าง เช่น การสื่อสารด้วยแสง ซึ่งรวมถึงการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงในระยะใกล้ และการสื่อสารแบบไร้สาย โดยใช้เซ็นเซอร์แสง และระบบจัดเก็บข้อมูลโดยใช้แสงในการอ่าน และบันทึกข้อมูล เป็นต้น ใน การศึกษานี้จึงเลือกใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดพี (p-Type) และได้เลือกใช้โลหะโครเมียมในการ ทดลองเพราะโลหะโครเมียมมีสมบัติที่ดีเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอลูมิเนียม คือไม่ต้องใช้ กระบวนการซินเตอร์ริง ลดขั้นตอนในกระบวนการสร้าง ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายลง นอกจากนี้โลหะโครเมียมยังมีความแข็งแรงมากกว่าอลูมิเนียม และสามารถทนต่อแรงขีดข่วนหรือ เกิดการทะลุในขณะการวัด โครเมียมมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงกว่าอลูมิเนียมเหมาะสำหรับ ใช้ในกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิสูง และมีความเสถียรภาพมากกว่าอลูมิเนียม ดังนั้นจึงเลือกเอา โลหะโครเมียมที่มีความแข็งแรงสูงเป็นวัสดุสร้างรอยต่อข้อตักด้วยวิธีการสปัดเตอร์ริง โดยใน โครงสร้าง MSM ชนิด Cr/p-Si/Cr ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะออกแบบเป็นรูปร่างช่องรับแสง แบบสลิตเดี่ยวที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้าง MSM ชนิด Cr/p-Si/Cr

(ก) ภาพด้านบนโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/p-Si/Cr (ข) ภาคตัดขวางโครงสร้าง MSM

โครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal) หรือ โครงสร้าง MSM ที่สร้างจาก Cr/p-Si/Cr เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานทางด้านการตรวจวัดแสงมี คุณสมบัติที่เด่นหลายประการ คือ มีโครงสร้างที่ง่าย ความจุไฟฟ้าต่ำ มีกระแสมีดต่ำ ไม่ต้องใช้ กระบวนการซินเตอร์ริง มีสภาพการตอบสนองที่ดีมีการทำงานด้วยความเร็วสูง สัญญาณรบกวนต่ำ เอกมีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญสามารถทำเป็นวงจรรวมได้ง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบ การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาแนร์ (planar) และกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟต (Field Effect Transistor: FET) จึงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ได้รับความนิยมอย่างมากตัวหนึ่ง

ที่ผ่านมาปัญหาที่พบในการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Cr/n-Si/Cr กับ Cr/p-Si/Cr มีค่ากระแสรั่ว 264  $\mu\text{A}$  และ 77  $\mu\text{A}$  ตามลำดับซึ่งเป็นค่ากระแสรั่วที่มีค่าสูงทำให้อัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดมีค่าต่ำ ทำให้ไม่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณแสงได้ จึงได้ทำการศึกษาการลดกระแสรั่วใน MSM โฟโตไดโอดที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะจากเทคนิคการสปีดเตอร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาวิธีและขั้นตอนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด Cr/p-Si/Cr, Cr/n-Si/Cr
2. เพื่อศึกษาไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้สารกึ่งตัวนำแบบ Si ชนิด p และ Cr เป็นขั้วโลหะ ซึ่งทำให้เกิดรอยสัมผัสแบบช็อคกี
3. เพื่อศึกษาตัวแปรในการสปีดเตอร์ทั้งความดันก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิฐานรอง กำลังในการสปีดเตอร์ ความหนาหรือระยะเวลาในการสร้างฟิล์มโลหะ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อช็อคกี Cr/p-Si, Cr/n-Si
4. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าแรงศักย์, แรงดันภายใน, ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน, ความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า-แรงดัน และสถานะพื้นผิว
5. การตอบสนองต่อสัญญาณแสงทั้งกระแสตรงและกระแสสลับของโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr, Cr/n-Si/Cr และชนิดของพาหะที่ทำให้เกิดกระแสแสง

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ดังนั้นขอบเขตของโครงการจึงเริ่มต้นด้วยการศึกษาโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบเป็นสลิคเดี่ยวโดยใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมแบบพลาแนร์ในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Cr/p-Si/Cr, Cr/n-Si/Cr จะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพีเคลือบฟิล์มโลหะโครเมียมบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยใช้วิธีการสปีดเตอร์ริง จากนั้นนำไปทำการ โฟโตลิโทกราฟี (photolithography) และอิชชิ่ง (etching) ให้ออกมาเป็นขั้วไฟฟ้าแบบสลิคเดี่ยว เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในโครงสร้างแบบสลิคเดี่ยวของโฟโตไดโอด ลักษณะการวัดเมื่อถูกฉายแสงของโฟโตไดโอดชนิด Cr/p-Si/Cr, Cr/n-Si/Cr ในแบบสัญญาณกระแสตรง (direct current :  $i_{dc}$ ) จะวัดในลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดันทั้งที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสง เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน, ค่ากำลังศักย์ช็อคกี, แรงดันภายใน, จำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นชอบเรียบร้อยแล้ว การดำเนินการต่อไปจะดำเนินการตามเงื่อนไขที่ระบุไว้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะพื้นผิว และความสัมพันธ์ความจุ-แรงดัน โดยนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อสามารถนำไปพัฒนาโครงสร้าง MSM แบบ Cr/p-Si/Cr, Cr/n-Si/Cr ที่ดีต่อไป

#### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและทำความเข้าใจเกี่ยวกับรอยต่อ MS แบบ Cr/p-Si, Cr/n-Si และทดลองวัดหาลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของรอยต่อ MS เพื่อนำมาหา  $V_{bi}$ ,  $\phi_{bp,bn}$
2. ศึกษาทฤษฎีและทำความเข้าใจเกี่ยวกับโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แบบ Cr/p-Si/Cr รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง MSM แบบ Cr/p-Si/Cr, Cr/n-Si/Cr
3. ศึกษาขั้นตอนเทคโนโลยีในกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบ Cr/p-Si/Cr, Cr/n-Si/Cr และทดลองสร้างตัวตรวจวัดแสงในแต่ละเงื่อนไขที่ต่างกันไป
4. ศึกษาตัวแปรในการสปีดเตอร์ เช่น กำลังในการสปีดเตอร์, ความดันของก๊าซอาร์กอน, อุณหภูมิฐานรอง และเวลาที่มีผลในการสปีดเตอร์ เพื่อให้ได้รอยต่อข้อต่อที่ยึดสมบูรณ์
5. ศึกษาผลตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด Cr/p-Si/Cr, Cr/n-Si/Cr ในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในแบบสัญญาณกระแสตรงทั้งที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสง ในแต่ละเงื่อนไขที่เราได้สร้าง
6. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการสร้าง และพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ได้ตัวตรวจวัดแสงที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

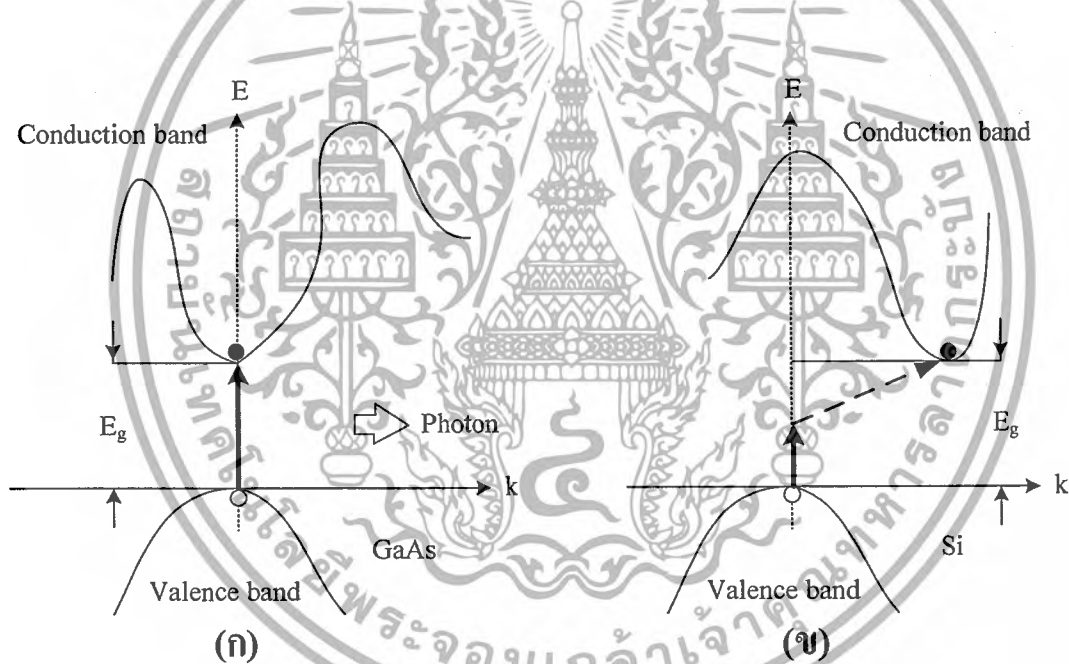
## บทที่ 2

### ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำและตัวตรวจวัดแสง

#### 2.1 ลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

##### 2.1.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง

ในรูปที่ 2.1 (ก) สารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำแถบตรง” (direct band gap semiconductor) และยังมีสารกึ่งตัวนำอีกกลุ่มหนึ่ง ซึ่งตำแหน่งของจุดสำคัญทั้งสองนี้ไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) สารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง” (indirect band gap semiconductor)



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E-k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ

(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง

สมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้ จะแตกต่างกันมาก เช่น สมบัติทางด้านแสง (optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบช่องตรง พลังงานของโฟตอน (Photon) จากแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ  $h\nu$  สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง (Direct) และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม และกรณีนี้จะมีเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งผ่านเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้เนาไปไซประโยชน์ดานการค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลดปล่อยพลังงานออกมา  $E_g$  ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแสงสีต่างๆ ได้ และเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ในรูปแบบโดยตรงเช่นนี้จะเกิดได้โดยง่าย ทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืน หรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี จึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (Optical devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) เลเซอร์ไดโอด และตัวตรวจจับแสง เป็นต้น

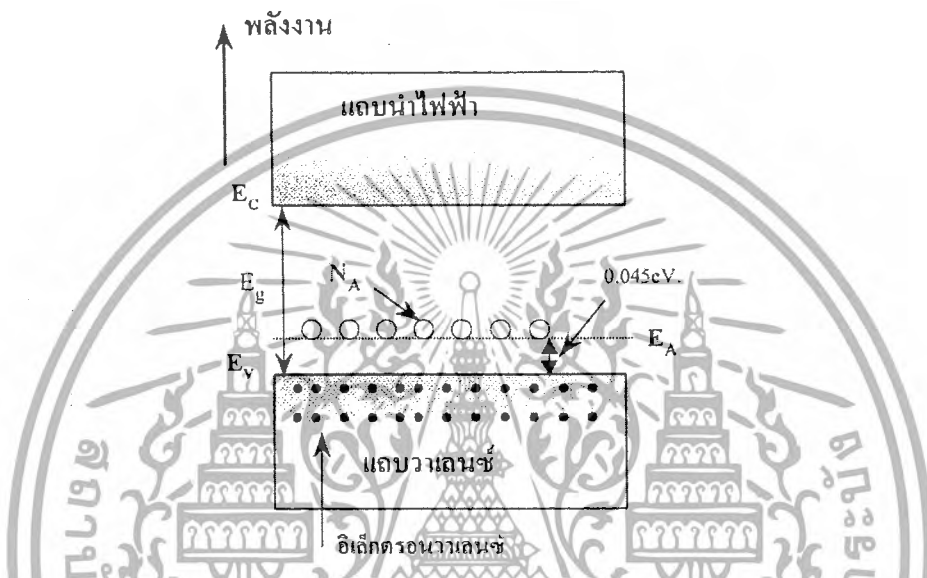
ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้า ไม่สามารถตกลงมา ยังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนพลังงานก่อน ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปของความร้อน จึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้น ในทำนองเดียวกัน พลังงานโฟตอนจากแสง ก็ไม่สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยง่าย ถึงแม้ว่าพลังงานจากโฟตอนจะมีค่ามากเพียงพอก็ตาม แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสถานะ ใดๆ ก็ดี การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบนำไฟฟ้า ในกรณีนี้จะเกิดได้ก็ขึ้น ถ้าหากในช่องว่างพลังงานนั้นมีระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานใดๆ ปรากฏอยู่ ซึ่งจะช่วยให้โอกาสที่จะเกิดกระบวนการนี้เป็นไปได้มากขึ้น ดังนั้น การดูดกลืน หรือคายพลังงานแสง ของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ดีขึ้น แต่ด้อยกว่าสารกึ่งตัวนำแบบแถบช่องตรง

### 2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี

สารกึ่งตัวนำชนิดพี หมายถึง สารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ อะตอมโบรอน อะตอมสารเจือผู้รับนี้ แต่ละอะตอมมี 3 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ เมื่อเข้าไปอยู่ในผลึกสารกึ่งตัวนำ จะเกาะเกี่ยวกับอะตอมสารกึ่งตัวนำที่อยู่ข้างเคียง เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ที่สมบูรณ์ได้เพียง 3 พันธะ อีกหนึ่งพันธะจะไม่สมบูรณ์ เพราะขาดอิเล็กตรอนอีกหนึ่งอิเล็กตรอน ที่อุณหภูมิ 0 K แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ และลักษณะแถบพลังงาน ของผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดพี เขียนได้ดังรูปที่ 2.2 จะสังเกตเห็นว่า อะตอมสารเจือผู้รับทำให้เกิดมีระดับพลังงานที่เรียกว่า ระดับผู้รับ ( $E_A$  : Acceptor Level) ขึ้นที่ช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานนี้จะอยู่เหนือ ระดับวาเลนซ์ ( $E_V$  : Valance level) เพียงเล็กน้อย ซึ่งระดับพลังงานค่านี้ก็คือ ค่าพลังงาน ไอออนไนซ์ของอะตอมสารเจือ ซึ่งอะตอมสารเจือที่ต่างชนิดกัน จะมีค่าแตกต่างกัน

ที่อุณหภูมิ 100 K พลังงานความร้อนสามารถทำให้อะตอมผู้รับบางส่วนเกิดการไอออไนซ์ กลายเป็น ไอออนลบ ทำให้มีโฮลเกิดขึ้น โดยไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นด้วย แต่ที่อุณหภูมิสูง เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติเนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300K พลังงานความร้อนจากความร้อนมีค่ามากพอที่จะทำให้อะตอมผู้รับเกือบทุกอะตอมเกิดการไอออไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์ ทุกอะตอมของสารเจือชนิดพี จึงทำให้เกิดโฮล ความหนาแน่นของโฮลจึงมีค่าสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก หรือ  $p \gg n$  โฮลซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก จึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้า สารกึ่งตัวนำชนิดนี้จึงถูก เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี ( P-Type Semiconductor)



รูปที่ 2.2 การไอออไนซ์ของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก

## 2.2 การรวมตัวใหม่ และการเกิดของพาหะ (Recombination and Generation) ในสารกึ่งตัวนำ

### 2.2.1 นิยาม

การเกิดของพาหะ หรือ (carrier generation) หมายถึง กระบวนการซึ่งทำให้มีพาหะเกิดขึ้นใหม่ โดยจะเป็นการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ หรือ recombination หมายถึง กระบวนการตรงข้ามหรือย้อนกลับกับการเกิด กล่าวคือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับโฮล ทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนอิสระหายไป กระบวนการทั้งสองนี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกัน และถูกเรียกว่า “กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (Recombination-Generation Process) ” บางครั้งเรียกสั้นๆ ว่า “กระบวนการ R-G (R-G Process) ”

### 2.2.2 กระบวนการ R-G (Recombination-Generation Process)

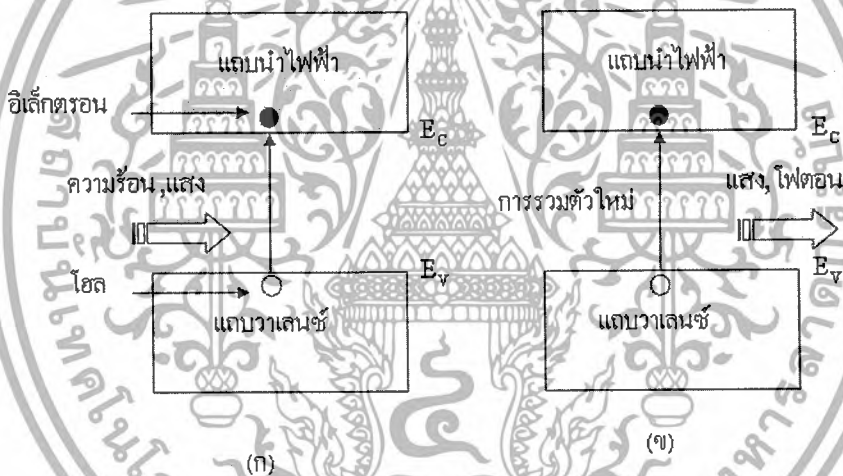
โดยทั่วไป กระบวนการ R-G ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ อาจพิจารณาจัดแบ่งเป็นแบบใหญ่ๆ

ได้ 2 แบบ ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) กระบวนการ R-G โดยตรง (Direct R-G Process)

เป็นกระบวนการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอน (Photon) ได้ง่าย กระบวนการเกิดและการรวมตัวใหม่โดยตรง แสดงได้ดังในรูปที่ 2.3 กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานมากพอจากความร้อน หรือแสง คือต้องมากกว่าขนาด  $E_g$  eV. อิเล็กตรอนจะสามารถย้ายขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการข้ามช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ในทางกลับกัน เมื่ออิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้า ลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระ และโฮลหายไป คล้ายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะ กระบวนการเกิดและรวมตัวของพาหะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “กระบวนการ R-G โดยตรง”



รูปที่ 2.3 กระบวนการ R-G โดยตรง

(ก) การเกิดพาหะ โดยตรง (ข) การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ

(ข) กระบวนการ R-G โดยอ้อม (Indirect R-G Process)

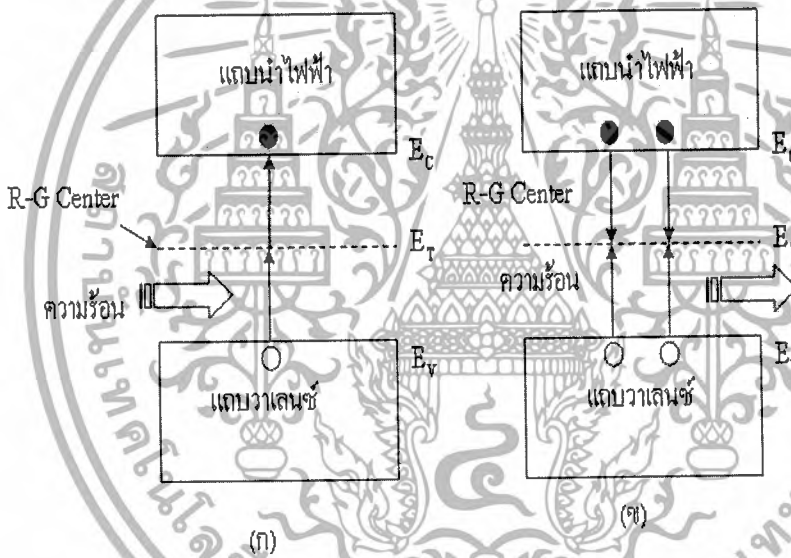
จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) เช่น ซิลิคอน เยอรมันเนียม โดยเมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ ได้รับพลังงาน จะมีการย้ายระดับพลังงานแต่ไม่สามารถที่จะข้ามช่องแถบพลังงาน  $E_g$  ไปยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง แต่จะเกิดขึ้นเป็นสองขั้นตอน โดยในขั้นแรกอิเล็กตรอนจะอาศัยระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นที่พัก ก่อนที่จะข้ามต่อไปยังแถบนำไฟฟ้า และในทางกลับกันการรวมตัวใหม่โดยอ้อมก็คือกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยอ้อมนั่นเอง โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้า จะลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่ง ที่อยู่ในช่องว่างพลังงาน ก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ในที่สุด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ถูกเรียกว่า “การเกิดและการรวมตัวโดยอ้อมของพาหะ” หรือ “กระบวนการ R-G โดยอ้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.4

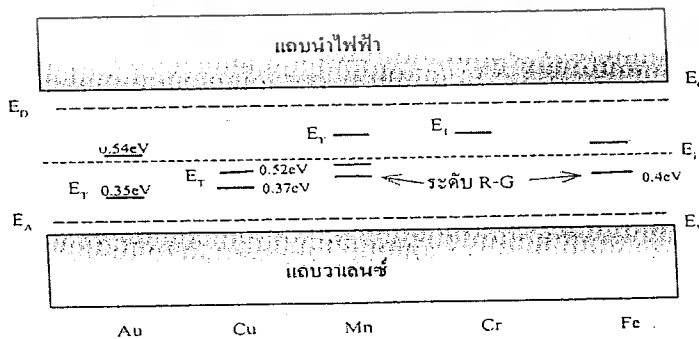
ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา และอาจมีผล ทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ (lattice vibration) และการสั่นของแลตทิซจะทำให้การปลดปล่อยพลังงาน ออกมาในที่สุด

โอกาสของการรวมตัวใหม่จะมีค่าสูงสุดเมื่อระดับ R-G center อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ ช่องว่างพลังงานพหุติ ซึ่งจะเห็นว่า แตกต่างจากระดับอะตอมสารเจือผู้ให้ และอะตอมสารเจือผู้รับ ซึ่งจะอยู่ใกล้กับขอบล่างของแถบนำไฟฟ้า  $E_c$  และขอบบนของแถบวาเลนซ์ ( $E_v$ ) ตามลำดับดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 กระบวนการ R-G โดยอ้อม

(ก) การเกิดพาหะโดยอ้อม (ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งของระดับ R-G center ที่เกิดจากอะตอมสารเจือในซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

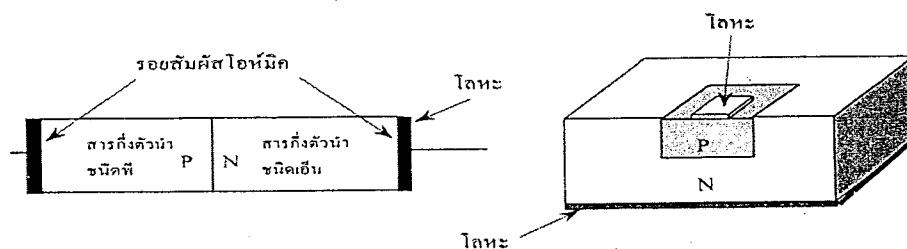
### 2.3 โลหะโครเมียมและโครเมียมผสม

โครเมียมเป็นโลหะที่มีความแข็งแรง และความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงกว่า โลหะนอกกลุ่มเหล็กทั่ว ๆ ไป นอกจากนี้คุณสมบัติโดยเฉพาะเชิงกลจะเปลี่ยนแปลงได้มากขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ การผลิตและลักษณะการขึ้นรูป การใช้งานโลหะโครเมียมในสภาพบริสุทธิ์จะใช้เคลือบผิวโลหะอื่น โดยเฉพาะเหล็ก (electroplating) จะกระทำสองลักษณะ คือ เพื่อความสวยงาม (silver white) และป้องกันสนิมจะเคลือบบางมากและจะต้องเคลือบรองพื้นด้วยทองแดงหรือนิกเกิลก่อน อีกลักษณะหนึ่งเคลือบในลักษณะเพิ่มความแข็งให้กับชิ้นโลหะเพื่อเสริมความต้านทานต่อการสึกหรอที่เรียกว่า Hard chrome หรือ Hard plating จะเคลือบหนาและผิวโครเมียมมีแรงเชื่อมประสานกับผิวของชิ้นโลหะ ซึ่งใช้มากในงานเคลือบผิวแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการความคงทนต่อการสึกและการกัดกร่อน ส่วนการใช้งานโลหะโครเมียมที่มีปริมาณสูง คือ ใช้ในลักษณะเป็นโลหะผสมในเหล็กกล้าผสมและเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะโครเมียม

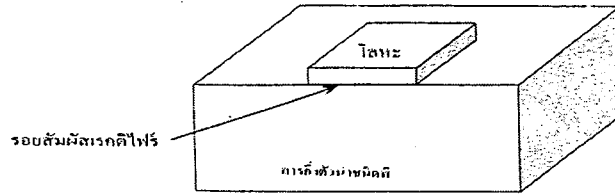
น้ำหนักอะตอม	52
ระบบโครงสร้าง	Body-centered cubic $A = 2.8844 - 2.8848 \text{ \AA}$
ความหนาแน่น ( $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), $\text{g/cm}^3$	$7.19 \text{ g/cm}^3$
อุณหภูมิหลอมเหลว	$1875 \text{ }^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิเดือดกลายเป็นไอ	$2199 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ความร้อนจำเพาะ ( $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$0.123 \text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$
ความร้อนของแฝงของการหลอมละลาย	$3.2-3.5 \text{ kcal/mole}$
สัมประสิทธิ์การขยายตัว ( $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$6.2 \times 10^{-6}$
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ( $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$12.9 \text{ } \mu\text{ohm/cm}$ .

### 2.4 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-Semiconductor Contact)



(ก) รอยสัมผัสไอพิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) รอยสัมผัสเรกติไฟร์

รูปที่ 2.6 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ

(ก) รอยสัมผัสโอห์มิก (ข) รอยสัมผัสเรกติไฟร์

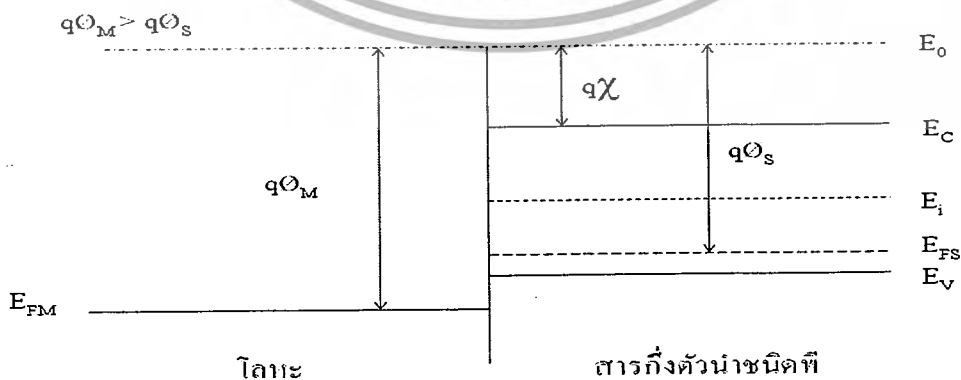
รอยสัมผัสโอห์มิก(ohmic contact) กล่าวคือ จะไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง ไม่มีแรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัส ดังรูปที่ 2.6 ก

รอยสัมผัสเรกติไฟร์(rectifier contact) หรือ “ซีออตทีย์ไดโอด”(Schottky diode) ซึ่งคล้ายกับไดโอดโดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น ดังรูป 2.6 ข

2.5 รอยสัมผัสซีออตทีย์

2.5.1. กลไกการเกิดรอยสัมผัสซีออตทีย์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ก่อนการสัมผัสแถบพลังงานของโลหะโดยทั่วไปและสำหรับสารกึ่งตัวนำ แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ระดับพลังงาน  $E_0$  หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน นิยมเรียกว่า “ระดับสุญญากาศ” (Vacuum level) และนิยามได้ว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็ง และหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัสซีออตทีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของโลหะ ระดับเฟอร์มิของโลหะหรือ  $E_{FM}$  จะอยู่สูงกว่าระดับค่าพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) เล็กน้อย และถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่อยู่ในโลหะนั้น ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศถูกเรียกว่า “ฟังก์ชันงาน” (work function) ของโลหะซึ่งมีค่าเท่ากับ  $q\phi_M$  หมายถึง พลังงานค่าน้อยที่สุด ที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการ เพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะ ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังสมการที่ (1)

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (1)$$

โดยที่

$q\phi_M$  : ฟังก์ชันงานของโลหะ (eV)

$E_0$  : ระดับพลังงานสุญญากาศ

$E_{FM}$  : ระดับเฟอร์มิของโลหะ

ส่วนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับเฟอร์มิจะอยู่ต่ำกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) และอยู่สูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ ( $E_V$ ) ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำแทนด้วย  $q\phi_S$  มีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างระดับสุญญากาศกับระดับเฟอร์มิ ดังสมการที่ (2)

$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \quad (2)$$

โดยที่

$q\phi_S$  : ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (eV)

$E_0$  : ระดับพลังงานสุญญากาศ

$E_{FS}$  : ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ

ส่วนค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี ( $q\chi$ ) ซึ่งจะนิยามได้ว่า เป็นค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุด

ของแถบนำไฟฟ้า  $E_c$  ต้องการ เพื่อที่จะเคลื่อนที่ออกไปหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวภายนอกของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (3)

$$q\chi = E_0 - E_c \quad (3)$$

การเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของโลหะจะอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากด้านโลหะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี และเกิดการสะสมประจุอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น และทำให้เกิดประจุบวกที่ด้านโลหะบริเวณผิวสัมผัส จนกระทั่งถึงสภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองอยู่ที่ระดับเดียวกันดังรูปที่ 2.8 ขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะที่เคลื่อนที่เข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเกิดการรวมตัวใหม่ (Recombine) ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่บริเวณผิวสัมผัส ทำให้โฮลในบริเวณนี้มีความหนาแน่นลดลง การลดลงของโฮลจะทำให้เกิดไอออนลบของอะตอมผู้รับ ( $N_A^-$ ) ในด้านสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับในสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากประจุไฟฟ้าบวกในโลหะ และประจุไฟฟ้าลบในสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัส ทำให้มีสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ โดยมีทิศทางจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นทิศที่ต่อต้านการเคลื่อนที่โฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำ ไม่ให้เคลื่อนที่ไปยังด้านโลหะ หรือก็คือมีกำแพงศักย์ของโฮลเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส กำแพงศักย์นี้มีค่าเท่ากับ  $qV_{bi}$  ซึ่งหาได้จากกรงอโด่งลงของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (4)

$$qV_{bi} = q(\phi_s - \phi_M) \quad (4)$$

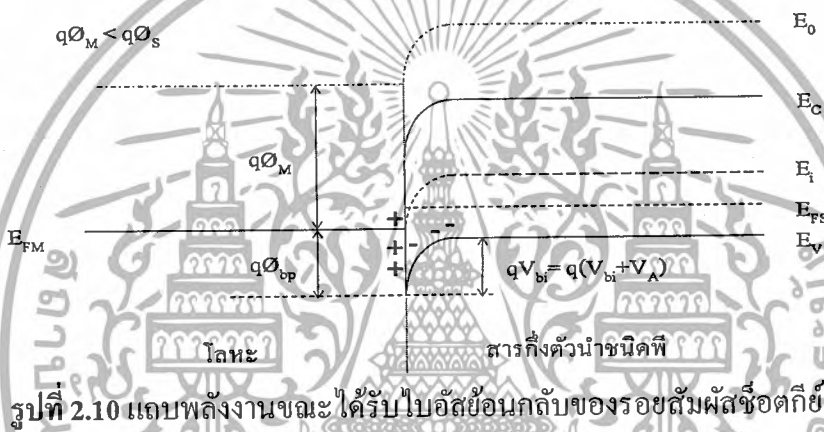
นอกจากนี้จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่ามีกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีความสูงเท่ากับ  $q\phi_p$  จะมีค่าเท่ากับดังสมการที่ (5)

$$q\phi_p = q\chi + E_g - q\phi_M \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รอยสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $(V_{bi}+V_A)$  ทำให้ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ซึ่งโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ แต่กำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง จึงมีกระแสจำนวนน้อยไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอน (พาหะข้างน้อย) จากชั้นแถบนำของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ไหลเข้าไปในโลหะ พิจารณาว่าเป็นการฉีดโฮลข้าม  $q\phi_{bp}$  ในโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ แต่เป็นกระแสที่มีค่าน้อยมาก ซึ่งก็คือกระแสรั่วไหลของรอยต่อหรือกระแสมีดจึงพิจารณาว่าเป็นการให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัส ดังนั้นจะเห็นว่าคุณสมบัติของรอยสัมผัสนี้เป็นแบบเรกติไฟร์

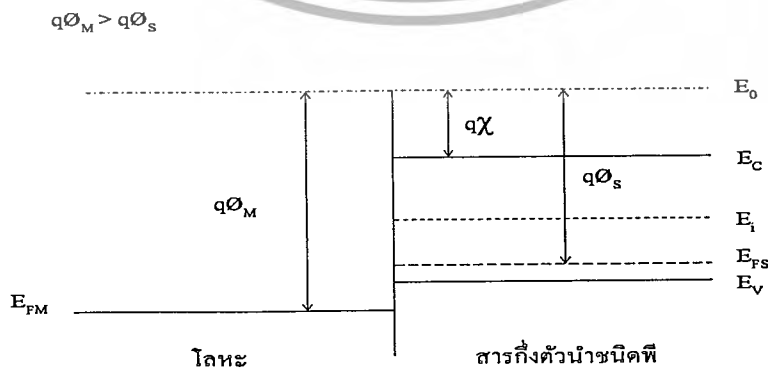


รูปที่ 2.10 แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

2.6 รอยสัมผัสโอห์มมิก

2.6.1. กลไกการเกิดรอยสัมผัสโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

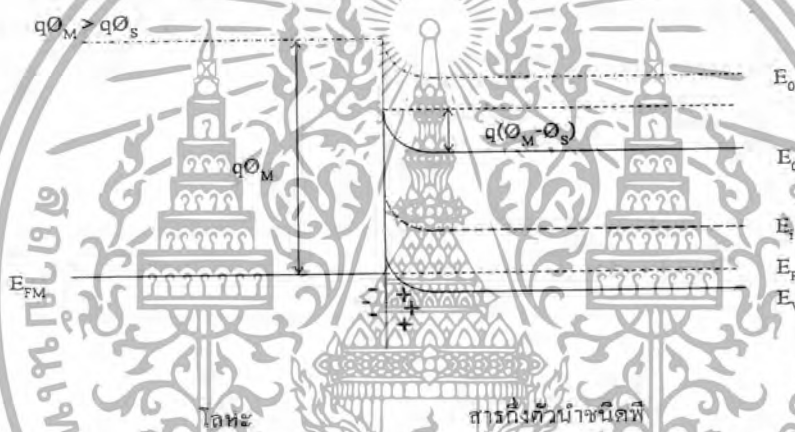
ก่อนการสัมผัสแถบพลังงานของโลหะและสำหรับสารกึ่งตัวนำ ในกรณีที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะมากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับเฟอร์มิทางด้านโลหะจะอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิทางด้านสารกึ่งตัวนำ แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัส โอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของโลหะจะอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ ซึ่งในขณะที่เดียวกันด้านสารกึ่งตัวนำจะเกิดไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ ( $N_D^+$ ) ทำให้โฮลที่บริเวณรอยสัมผัสมีความหนาแน่นมากกว่าโฮลที่อยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น จึงเกิดการงอโค้งขึ้นของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสกับโลหะ ลักษณะเช่นนี้ไม่มีกำแพงศักย์สำหรับ โฮลจากด้านทั้งสอง ที่บริเวณรอยสัมผัสจะไม่มีกำแพงศักย์ที่จะป้องกันการเคลื่อนที่ของโฮล จากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ หรืออิเล็กตรอนจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ รอยสัมผัสเช่นนี้เรียกว่า รอยสัมผัสโอห์มมิก ดังรูปที่ 2.12

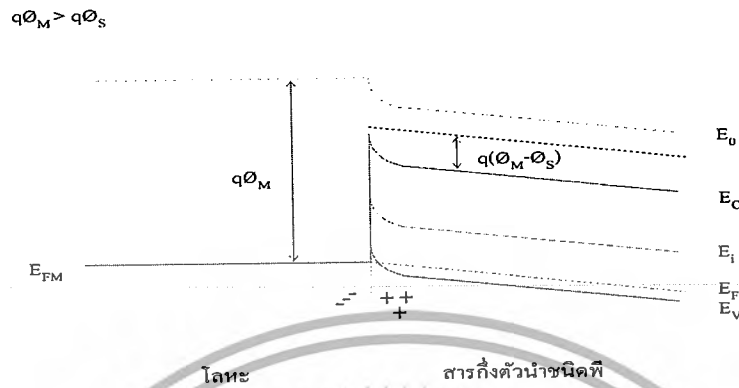


รูปที่ 2.12 แถบพลังงานของโลหะและ สารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสโอห์มมิก

## 2.6.2 รอยสัมผัสโอห์มมิกขณะได้รับไบอัส

### 2.6.2.1 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง

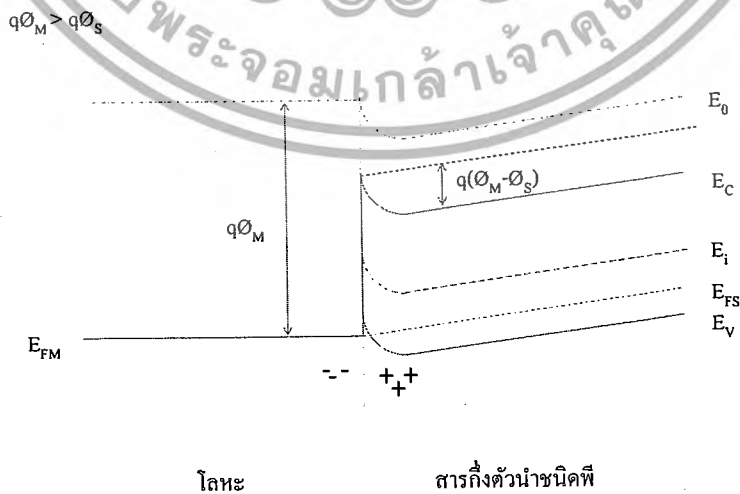
เมื่อให้แรงดัน ไบอัส ( $V_A$ ) แก่รอยสัมผัสเพียงเล็กน้อย โดยให้ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เนื่องจากแรงดันไบอัสจะตกคร่อมทั้งบริเวณชั้นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีผลทำให้โฮลมีระดับพลังงานสูงขึ้นจึงทำให้แถบพลังงานของด้านสารกึ่งตัวนำเอียงต่ำลง พบว่าจะมีโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำไหลไปยังด้านโลหะ และเมื่อโฮลไหลเข้าไปในโลหะที่บริเวณรอยต่อจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในโลหะ ทำให้ต้องมีอิเล็กตรอนไหลจากโลหะผ่านวงจรเข้าทางทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี เข้ามาชดเชยอิเล็กตรอนที่ถูกรวมตัวไป จึงทำให้เกิดกระแสไหลผ่านรอยสัมผัสจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสตรงของรอยสัมผัสไอหุ้มมิก

2.6.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $-V_A$ ) แก่รอยสัมผัส โดยให้ด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับด้านโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เนื่องจากการไบอัสย้อนกลับทำให้ค่าสนามไฟฟ้าของด้านสารกึ่งตัวนำเป็นลบและด้านโลหะเป็นบวก ทำให้แถบพลังงานของด้านสารกึ่งตัวนำเอียงสูงขึ้น พบว่าอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะไหลผ่านรอยสัมผัสเข้าสู่โลหะ ในขณะที่โฮลในแถบวาเลนซ์จะไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลผ่านวงจรรวมตัวกับโฮลที่ปลายของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านรอยสัมผัสจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสไอหุ้มมิก

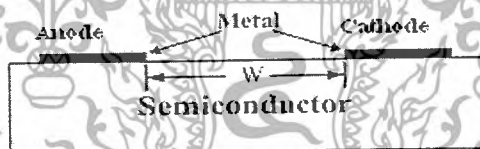
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

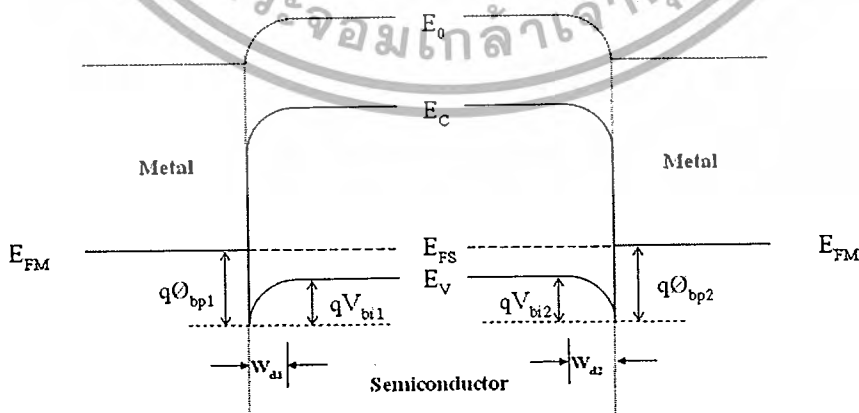
โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM จัดอยู่ในกลุ่มซีร็อกไมซ์โฟโตไดโอด และมีคุณสมบัติเด่นคือมีโครงสร้างแบบพลาเนอร์ กระบวนการสร้างง่าย ความจุไฟฟ้าต่ำ กระแสมีดต่ำ มีสภาพการตอบสนองที่ดี ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย และกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟด จึงทำให้ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน และเพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างและหลักการทำงานในหัวข้อนี้จึงจะได้อธิบายโครงสร้างและหลักการทำงาน

### 2.7.1 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จำนวนสองรอยสัมผัส ต่อกันแบบหันหลังชนกัน (back to back) มีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง ( $w$ ) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดแคบมากๆ เพื่อให้โฟโตไดโอดสามารถทำงานด้วยความเร็วสูง สารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองทั้งสอง จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า



(ก)



(ข)

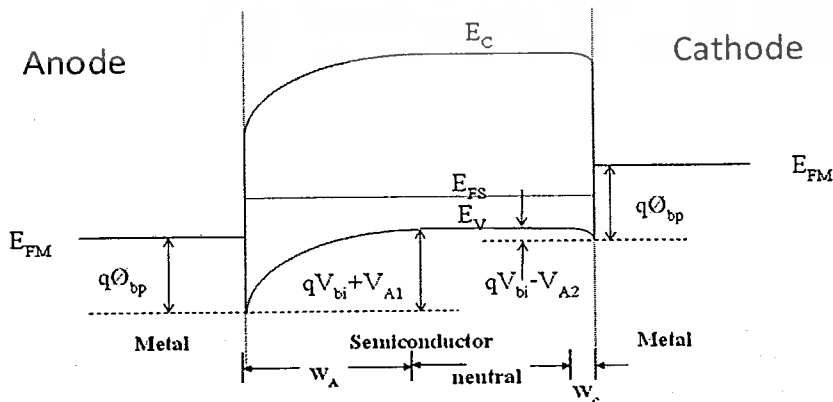
รูปที่ 2.15 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอน (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในสภาวะสมดุลความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.15 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ช็อคติย์ของขั้วแอโนด ( $\phi_{bp1}$ ) และขั้วแคโทด ( $\phi_{bp2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $\phi_{bp1} = \phi_{bp2} = \phi_{bp}$  กำแพงศักย์ภายในของขั้วแอโนด ( $V_{bi1}$ ) และขั้วแคโทด ( $V_{bi2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$  และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด ( $W_{d1}$ ) และด้านแคโทด ( $W_{d2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $W_{d1} = W_{d2} = W_d$  ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

2.7.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส

เมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ จะเห็นได้ว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสแบบช็อคติย์แบริเออร์ทางด้านแอโนด ( $W_A$ ) มีขนาดกว้างขึ้น เมื่อไบอัสตรงบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด ( $W_C$ ) จะมีขนาดลดลง สำหรับด้านที่รับการไบอัสตรงจะมีค่าของกำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ ( $V_{bi} - V_{A2}$ ) ส่วนด้านที่รับการไบอัสย้อนกลับจะมีค่าของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ ( $V_{bi} + V_{A2}$ ) ดังนั้นที่ด้านคาโทดโฮลจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจะสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปยังด้านโลหะ ทำให้เกิดกระแสไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ( $I_{SM}$ ) และเนื่องจากทางด้านแอโนดจะมีอิเล็กตรอนปริมาณน้อยไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไหลเข้ามาที่ด้านโลหะ ทำให้เกิดกระแสไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ ( $I_{MS}$ ) ซึ่งเป็นกระแสส่วนน้อย โดยเราเรียกว่า กระแสรั่ว ของโครงสร้าง MSM ดังแสดงในรูปที่ 2.16



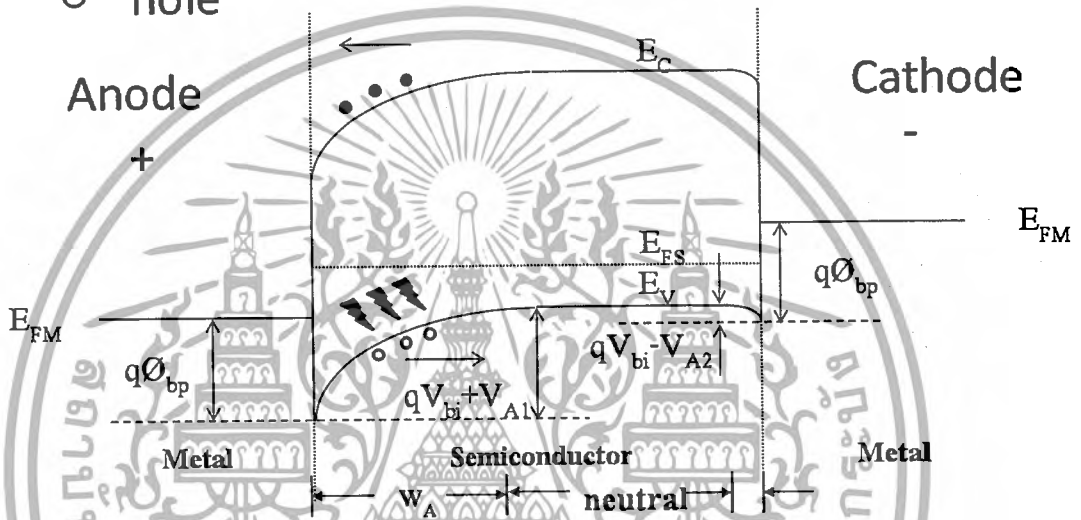
รูปที่ 2.16 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบบ

โครงสร้าง MSM สามารถใช้ทำหน้าที่ตรวจจับแสงได้เช่นเดียวกับโฟโตไดโอดชนิดอื่น ๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกระแสแสงในโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM

- electron
- hole



รูปที่ 2.17 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบบ พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน (W) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดภายใต้การให้แรงดันไบอัส แสดงดังรูปที่ 2.17 เมื่อแสงตกกระทบบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $h\nu \geq E_g$ ) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแอโนดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent :  $I_{photo}$ ) ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบบและมีการกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ภายใต้การคุ้มครองของสำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแอโนด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะ จึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นใน โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอน

#### 2.7.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ในรูปที่ 2.18 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนขั้วรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของ MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับ ไบอัสตรงและด้านที่รับ ไบอัสย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบมีความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 2.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

#### 2.8 ซ็อตทีย์ไดโอด (Schottky diode)

ความสูงของกำแพงศักย์  $\phi_B$  บอกถึงความต่างศักย์ระหว่างพลังงานเฟอร์มิของ โลหะกับของพลังงานของพาหะส่วนมาก  $\phi_B$  ในชนิดอื่น เท่ากับ

$$\phi_B = \phi_M - \chi \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$\phi_M$  : เป็น work function ของโลหะ

$\chi$  : เป็น electron affinity

$\phi_B$  : ในชนิดที่ เท่ากับ

$$\phi_B = \frac{E_z}{q} + \chi - \phi_M \quad (2)$$

โดยที่  $\phi_1$  : เป็นความแตกต่างระหว่างพลังงานเฟอร์มิของโลหะและสารกึ่งตัวนำเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\phi_1 = \phi_M - \chi - \frac{E_c - E_{F_1}}{q} \quad \text{สำหรับชนิดเอ็น} \quad (3)$$

$$\phi_1 = \chi + \frac{E_c - E_{F_1}}{q} - \phi_M \quad \text{สำหรับชนิดพี} \quad (4)$$

### 2.8.1 สถานะผิวของรอยต่อ MS

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถสร้างรอยสัมผัสในอุดมคติได้ แม้จะใช้กระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงก็ตาม เนื่องจากมีความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสเกิดขึ้น เช่นกรณีของโลหะและซิลิคอน พบว่าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารทั้งสอง จะมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บางๆราว 5 อังตรอม ถึง 25 อังตรอมกั้นอยู่เสมอ เนื่องจากผิวซิลิคอนสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย จึงเกิดเป็นชั้นออกไซด์ นอกจากนี้มักจะมีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆหรือประจุไฟฟ้าใดๆอยู่ที่บริเวณรอยสัมผัสไม่มากนักน้อย สาเหตุนี้ทำให้เกิดมีระดับพลังงานปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัส ระดับพลังงานนี้ถูกเรียกว่า “สถานะผิว” (Surface states) ระดับพลังงานนี้จะมีคุณสมบัติและทำหน้าที่เป็น ระดับจับอิเล็กตรอน (electron trapped) หรือ ระดับจับโฮล (hole trapped) หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ผลของสถานะผิวจะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสแตกต่างไปจากอุดมคติ

สถานะพื้นผิวของ GaN Schottky UV-PDs (ultraviolet photodetectors) ที่ความถี่สูงจะไม่แสดงเป็นตัวเก็บประจุ แต่จะสามารถวัดค่าได้เฉพาะ space-charge capacitance ( $C_{sc}$ ) หาได้ดังสมการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $C = C_{sc}$  ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (5)

และที่ความถี่ต่ำ ค่าตัวเก็บประจุรวมเป็นผลบวกของ  $C_{sc}$  และ ตัวเก็บประจุที่ผิว ( $C_{ss}$ ) ได้ดังสมการนี้

$$C = C_{sc} + C_{ss} \quad (6)$$

ความหนาแน่นของสถานะพื้นผิว ( $N_{ss}$ ) ได้สมการดังนี้

$$N_{ss} = \frac{C_{ss}}{q^2 A} \quad (7)$$

โดยที่

A : เป็นพื้นที่ของ Schottky region

q : เป็นประจุอิเล็กตรอน

พลังงานที่พื้นผิว ( $E_{ss}$ ) ได้แถบความนำ ( $E_c$ ) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_c - E_{ss} = q\phi_b - qV \quad (8)$$

เหตุผลที่ทฤษฎีและผลการทดลองไม่ตรงกัน

เกิดจากสมมติฐานผิดพลาด : พื้นผิวมีคุณสมบัติเหมือนกับเนื้อสารกึ่งตัวนำ

ที่พื้นผิวมีระดับชั้นพลังงานที่กว้าง ไม่เหมือนในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ชั้นพลังงานมักจะมี

พฤติกรรมที่ต่อเนื่องและสามารถอธิบายได้ด้วยความหนาแน่นสถานะพื้นผิว ( $N_{ss}$ )

### 2.8.2 โมเดลพื้นฐานของพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ

สถานะพื้นผิวเป็นทั้งผู้รับหรือผู้ให้ โดยแต่ละชนิดจะเกิดภายในแถบช่องว่างพลังงาน

สมมติฐาน สถานะเหนือพลังงานเฟอร์มิจะไม่ปรากฏ และสถานะใต้จะปรากฏ

สถานะผู้ให้ เนื้อพลังงานเฟอร์มิจะมีประจุบวก

สถานะผู้รับ ใต้พลังงานเฟอร์มิจะมีประจุลบ

## 2.9 Rf Diode Sputtering

Rf diode sputtering จะใช้ Rf power supply แทน DC voltage power supply ในการ

เอก เหนียวนำไอออนบวกที่ผิวประจุการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสเปคเตอร์แบบนี้ถูกค้นพบโดย Robertson และ Clapp ในปี 1933 โดยค้นพบที่พื้นผิว  
แก้วของ discharge tube ที่กำลังสเปคเตอร์ ขณะทำ rf-discharge ในปี 1960 ได้นำ rf-discharge มาใช้  
sputtering เพื่อสร้างฟิล์มบาง ในปัจจุบันได้มีการนำ rf-sputtering มาใช้กันเป็นจำนวนมาก

ใน Rf-diode sputtering จำเป็นต้องมี impedance-matching network ระหว่าง power supply  
กับ discharge chamber

อิมพีแดนซ์ของ rf power supply อยู่ที่  $50\Omega$  ส่วนอิมพีแดนซ์ของ glow discharge อยู่ที่  
 $1-10k\Omega$

ความหนาแน่นกระแส  $i_s$  หาจาก

$$I_s \cong C(dV/dt) \quad (9)$$

โดยที่  $C$  : ความจุไฟฟ้าระหว่าง discharge plasma กับเป้า

$dV/dt$  : การเปลี่ยนแปลงเวลาของความต่างศักย์ที่พื้นผิว target

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะมีกระแสไอออนของ target เพิ่มขึ้น ในการทดสอบ ใช้ความถี่ที่ 13.56  
MHz ใน Rf discharge system ความดันต้นทำงานเท่ากับ 1 mTorr สนามไฟฟ้า Rf ใน discharge  
chamber ช่วยเพิ่มโอกาสในการชนระหว่าง secondary electrons กับ โมเลกุลแก๊ส

การสเปคเตอร์ที่ความดันต่ำเป็นเทคนิคที่สร้างฟิล์มบาง ให้มีสิ่งเจือปนแปลกปลอมน้อยลง  
และมีอัตราการเกิดที่สูงขึ้น

## 2.10 ข้อพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสงหลายแสงมีการแทรกสอดกัน (interference)  
และแสงเดินทางได้ด้วยความเร็วสูงมาก ในการใช้งานสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงจะต้องคำนึงถึง  
คุณสมบัติต่างๆหลายด้าน เช่น

- ความเข้มของแสงที่จะตรวจจับ
- ความยาวคลื่นแสงที่จะถูกคลื่นได้
- ความเร็วการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง
- เสถียรภาพและราคาสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

ซึ่งมีรายละเอียดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ควรพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงดังนี้

### 2.10.1 สภาพตอบสนอง (Responsivity)

ถ้าให้  $P_{in}$  คือความเข้มของแสง (หน่วย radiant flux) ที่เข้าสู่สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง และ  $V_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง นิยามของ “สภาพตอบสนอง” หรือ (responsivity)  $R$  คือ (วัดแสงแบบต่อเนื่อง)

$$R = \frac{V_s}{P_{in}} \quad (10)$$

ถ้ามีการตัดแสงอินพุตด้วยชอปเปอร์ด้วยความถี่เชิงมุม  $\omega$  และค่าคงที่เวลา (time constant) ของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงคือ  $\tau$  จะได้ค่า  $R(\omega)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ของการชอปแสงว่า

$$R(\omega) = \frac{R}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (11)$$

โดยที่  $R$  หรือ  $R(\omega)$  มีหน่วยเป็น  $V/W$

ถ้าเอาต์พุตที่วัดคือ กระแสไฟฟ้า หน่วยของสภาพตอบสนอง คือ  $A/W$  ค่าสภาพตอบสนองนี้เป็นการบ่งชี้ว่าถ้าแสงอินพุตมีกำลัง  $1W$  สิ่งประดิษฐ์จะให้เอาต์พุตเท่าใหรั้นเอง

### 2.10.2 ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency)

ได้แก่อัตราส่วนระหว่างจำนวนของโฟตอนที่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าโฟโต (photo current) ต่อจำนวนของโฟตอนที่วิ่งเข้าสู่สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

### 2.10.3 ดีเทกทิวิตี หรือความสามารถของการตรวจจับ (Detectivity)

ดีเทกทิวิตีนิยมใช้สัญลักษณ์ว่า  $D^*$  (อ่านว่า D star) หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณรบกวนในกรณีที่กำลังของแสงอินพุตมีค่าเท่ากับ  $1W$  โดยทำการวัดแบบมีการเปิดและปิดแสงแบบ AC ค่า  $D^*$  จะไม่ขึ้นกับพื้นที่รับแสง แต่จะเป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุ เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้  $D^*$  เปรียบเทียบคุณภาพของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดต่างๆ ด้วยกันได้  $D^*$  เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$D^* = \sqrt{a \cdot \Delta f} \cdot R / I_n \quad (\text{cm.Hz}^{1/2}/W) \quad (12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $a$  : พื้นที่รับแสง ( $\text{cm}^2$ )

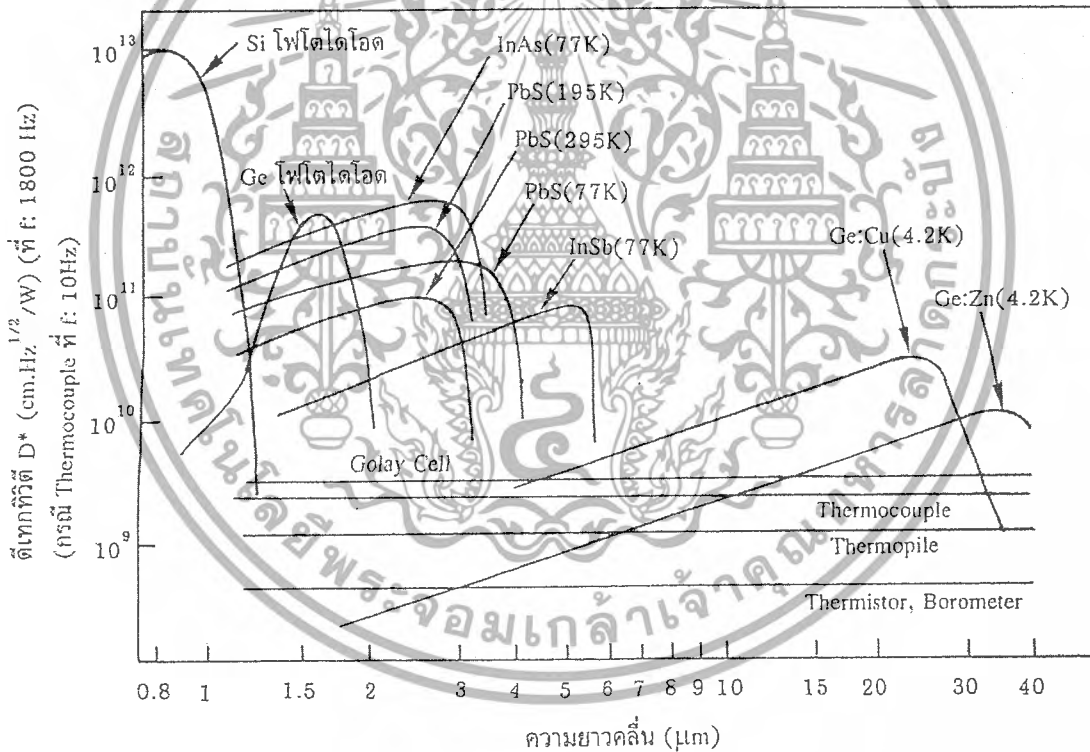
$\Delta f$  : แบนด์วิดท์ (bandwidth) หรือ ความถี่ของการวัด (Hz)

$R$  : สภาพตอบสนอง (responsibility) (A/W)

$I_n$  : กระแสไฟฟ้ารบกวน (current noise) (A)

(พารามิเตอร์  $R, I_n$  ใช้เป็นแรงดันไฟฟ้าก็ได้)

โดยทั่วไป  $D^*$  จะเป็นฟังก์ชันของ 1. ความยาวคลื่นของแสง 2. ความถี่ของการชอปแสง (chopping frequency of light) และ 3. แบนด์วิดท์ของสัญญาณรบกวน (noise band width) โดยทั่วไปจะใช้ค่า 1 Hz เป็นเกณฑ์มาตรฐานของแบนด์วิดท์ของสัญญาณรบกวน รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างค่า  $D^*$  ของวัสดุต่างๆ ในรูปฟังก์ชันของความยาวคลื่นของแสง



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างสเปกตรัมค่าดีเทกทีวิตีของวัสดุชนิดต่างๆ

### 2.10.4 กำลังเอาต์พุตเทียบสัญญาณรบกวน (Noise Equivalent Power: NEP)

ค่า NEP ได้แก่ค่าที่แสดงฟลักซ์ของแสง (radiant flux : W) ต่ำสุดที่ทำให้ S/N เท่ากับ 1 ใช้เป็นเกณฑ์บอกชี้ว่าถึงประดิษฐ์จะสามารถวัดแสงที่มีความเข้มต่ำสุดได้เท่าไร เพราะถ้า S/N น้อยกว่า 1 ก็จะทำให้การวัดแสงยากลำบากมาก NEP มีหน่วยเป็น ( $\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ ) และมีสูตรว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{NEP} = a^{1/2} / D^* \quad (13)$$

โดยที่  $a$  : พื้นที่รับแสง

$D^*$  : ดีเทกทิวิตี

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตคอนดักทิฟในย่านการทำงานไม่เกินหลาย kHz มักเป็นชนิด  $1/f$  ( $1/f$  noise) และในย่าน MHz ขึ้นไปมักเป็นสัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล (thermal noise) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนไหวเชิงความร้อนของพาหะในสารกึ่งตัวนำ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายนอกมักเป็นสัญญาณรบกวนชนิดช็อต (shot noise) ซึ่งเกิดจากการไหลอย่างไม่ต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้าโฟโต

### 2.10.5 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Response)

โดยปกติสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงจะมีผลตอบสนองไม่เท่ากันถ้าความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่า ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (spectral response) ใช้สัญลักษณ์ว่า  $R(\lambda)$  ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตลัดวงจร  $I_{sc}(\lambda)$  ต่อกำลังของแสงอินพุต  $P(\lambda)$  กล่าวคือ

$$R(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (\text{A/W}) \quad (14)$$

สูตรนี้แสดงค่าผลตอบสนองสเปกตรัมที่มีค่าแบบสัมบูรณ์ตามความเป็นจริง (absolute spectral response) และถ้าเราทำการนอร์มัลไลซ์สูตรนี้ด้วยค่าผลตอบสนองของแสงที่ความยาวคลื่นใดๆ เราก็จะได้ค่าผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์ (relative spectral response)

### 2.10.6 เวลาตอบสนอง (Response Time)

ในการใช้งานสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงบางครั้งต้องการผลตอบสนองที่รวดเร็วมาก อาจจะมีเร็วถึงระดับไมโครวินาที นาโนวินาที หรือพิโกวินาที สิ่งประดิษฐ์บางชนิดทำงานช้า บางชนิดทำงานเร็ว เพราะฉะนั้นผู้ใช้ต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

- ความเร็วตอบสนอง (response speed) ถูกกำหนดด้วยสาเหตุ 2 ข้อคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) เป็นค่าเฉพาะตัวที่ขึ้นกับวัสดุที่ใช้ผลิต การเปิดและปิดแสงทำให้เกิดคลัตเตอร์ (clutter) ค่าเวลาผ่อนคลายนี้นับจากเวลาที่มีการเปิดหรือปิดแสงจนถึงเวลาที่คลัตเตอร์เข้าสู่สภาพคงที่

- ค่าคงที่เวลาซีอาร์ (CR time constant) ได้แก่ผลคูณของ C และ R โดยที่ C คือความจุไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง และ R คือความต้านทานของโหลด การวัดค่าคงที่เวลาซีอาร์ ทำโดยการตัดแสงที่เข้าสู่สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงและวัดระยะเวลาที่ทำให้เอาต์พุตลดลงเหลือเศษหนึ่งส่วนเอกซ์โพเนนเชียลของค่าเริ่มต้นเมื่อตอนมีแสง ในกรณีเป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ ค่าคงที่เวลาซีอาร์จะมีค่าเท่ากับ  $C/g$  โดยที่ C คือความจุไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ และ g คือความนำความร้อน (thermal conductance)

ในกรณีวัสดุชนิดโฟโตคอนดักเตอร์ (photo conductor) นั้น จำนวนของศูนย์กลางแตร็ป (trapping centers) และศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะ (recombination centers) จะเป็นตัวกำหนดความเร็วตอบสนองที่สำคัญ

- อัตราขยาย (Gain) และ ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)
- อัตราขยาย (Gain: G) ของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงคือ อัตราส่วนของจำนวนพาหะที่เกิดจากแสงต่อจำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน นั่นคือ

$$G = \frac{I_{ph}}{qN_{ph}} \quad (15)$$

โดยที่  $I_{ph}$  : กระแสไฟฟ้าโฟโตเอาต์พุต  
 $N_{ph}$  : จำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนในสิ่งประดิษฐ์  
 $q$  : ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

ถ้าสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงทำจากสารกึ่งตัวนำ (photo conductor) ค่า G นี้อาจแสดงผลได้ด้วยอัตราส่วนของเวลาอายุพาหะ  $\tau$  (life time) ต่อเวลาที่พาหะใช้ในการเดินทางจากขั้วด้านหนึ่งไปสู่ขั้วอีกด้านหนึ่ง  $t$  (transit time) คือ

$$G = \frac{\tau}{t} = \frac{\tau \mu V}{l^2} \quad (16)$$

โดยที่  $\mu$  : ความคล่องตัว (mobility) ของพาหะ  
 $V$  : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

l : ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

โดยทั่วไปค่าอัตราขยายที่ดี และความเร็วตอบสนองที่ดีจะขึ้นกับชนิดของวัสดุและเงื่อนไขการผลิตด้วย ค่าโดยทั่วไปแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าอัตราขยายและเวลาขาขึ้นของสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดต่างๆ

	อัตราขยาย	เวลาขาขึ้น (s)	ความเข้มแสงต่ำสุดที่วัดได้ (W)	$D^*$
โฟโตเซลล์ชนิด Cds	$10^5$	$10^{-3}$	$10^{-6} \sim 10^{-2}$	$10^{14}$
โฟโตเซลล์ชนิด Pbs	$10 \sim 100$	$10^{-5}$	$10^{-11} \sim 10^{-5}$	$10^{11}$
โฟโตไดโอดชนิด Si (p-n)	1	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	$10^{-13} \sim 10^{-2}$	$10^{13}$
พินโฟโตไดโอดชนิด Si (p-i-n)	1	$10^{-9}$	$10^{-13} \sim 10^{-2}$	$10^{13} \sim 10^{14}$
อะวาลานซ์โฟโตไดโอดชนิด Si	$10^2$	$10^{-9} \sim 10^{-10}$	$10^{-14} \sim 10^{-5}$	$10^{14}$
โฟโตไดโอดชนิด InSb (195 K ~ 77K)	1	$10^{-6}$	$10^{-11} \sim 10^{-6}$	$10^{10} \sim 10^{11}$
หลอดสูญญากาศ	1	$10^{-9}$	$10^{-11} \sim 10^{-3}$	$10^{13}$
โฟโตมัลติพลายเออร์	$10^6$	$10^{-9}$	$10^{-17} \sim 10^{-6}$	$10^{16}$

คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (linearity) ของสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงอินพุตและขนาดของสัญญาณเอาต์พุตว่าจะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เพียงไร นับเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญที่ต้องพิจารณาด้วย โดยทั่วไปแล้ว 1. ในกรณีที่แสงอินพุตมีความเข้มต่ำ กระแสไฟฟ้ามีค่าจะเป็นตัวกำหนดความเป็นเชิงเส้น และ 2. ถ้าแสงอินพุตมีความเข้มสูง ค่าความต้านทานอนุกรมของสิ่งประดิษฐ์ของสิ่งประดิษฐ์จะเป็นตัวกำหนดความเป็นเชิงเส้น ดังนั้นผู้ใช้จะต้องเลือกชนิดของสิ่งประดิษฐ์ให้ถูกต้องตรงสภาพของการใช้งานและตรงวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

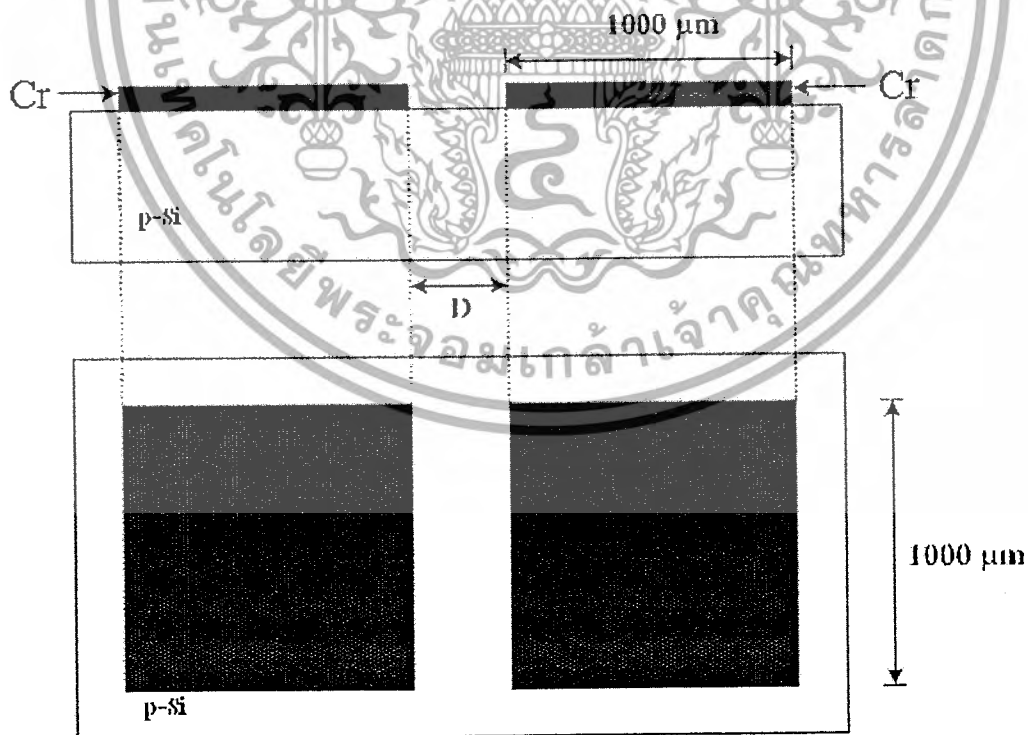
### บทที่ 3

## การสร้าง และ การทดลอง

ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาเนียร์ สามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งมีกระบวนการสร้างด้วยกระจกต้นแบบเพียง 1 แผ่น โดยมีการออกแบบให้มีพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา กระบวนการสร้างและการทดลองต่างๆ เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติของ โครงสร้าง MSM ต่อไป

#### 3.1 โครงสร้าง

โครงสร้าง MSM ชนิด Cr/p-Si/Cr ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโครเมียม-ซิลิคอน จำนวนสองรอยสัมผัส ในรายงานนี้จะใช้ขั้วโลหะที่มีขนาดเท่ากันทั้งสองด้านเป็นโครเมียมมีขนาด  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ส่วนสารกึ่งตัวนำจะเลือกใช้เป็นซิลิคอนชนิดพี สำหรับระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) ที่ใช้เป็น ส่วนของพื้นที่รับแสง มีค่า  $40 \text{ }\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมเป็นหลัก โดยหลังจากการเตรียมกระจกต้นแบบ (mask) แล้วจะนำแผ่นซิลิคอนมาทำการสร้างซึ่งมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

#### 1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

- Ultrasonic ด้วยน้ำ DI (de-ionization water : DI) 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่น
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรด Piranha เป็นเวลา 15 นาที เพื่อขจัดคราบไขมันและฝุ่น
- เปิดน้ำไหลผ่าน 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรด HF for oxidation เป็นเวลา 20 วินาที เพื่อกำจัด native oxide
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 2. กระบวนการ sputtering

- ทำการ sputtering Cr ในกรณีทีศึกษาระบบต่างๆ

#### 3. กระบวนการ photolithography

- นำเข้าเตาอบ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้น
- สปินด้วยน้ำยาไวแสง AZ 1350 ด้วยความเร็ว 3000 รอบ/ นาที
- นำเข้าเตาอบ เป็นเวลา 15 นาที
- ทำการถ่ายแบบขึ้นลวดลาย โดยการฉายแสง UV เป็นเวลา 15 วินาที
- develop น้ำยาไวแสง
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- นำเข้าเตาอบ เป็นเวลา 15 นาที

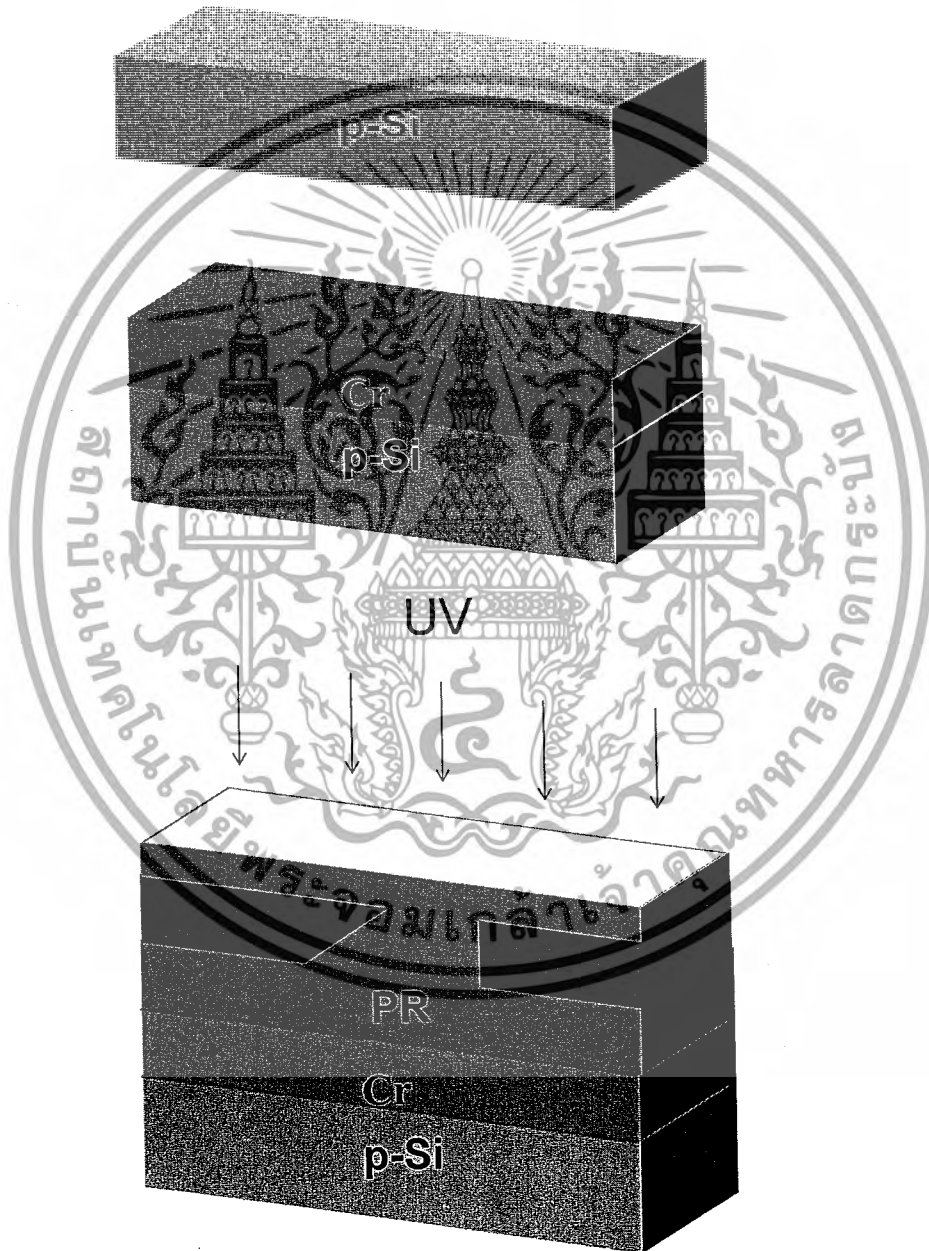
#### 4. กระบวนการ Etching

- ใช้กรดกัด Cr Etching ในเวลาต่างๆ ที่อัตราการเกิด 1000 Å/min
- จุ่มใน DI 2 แก้ว

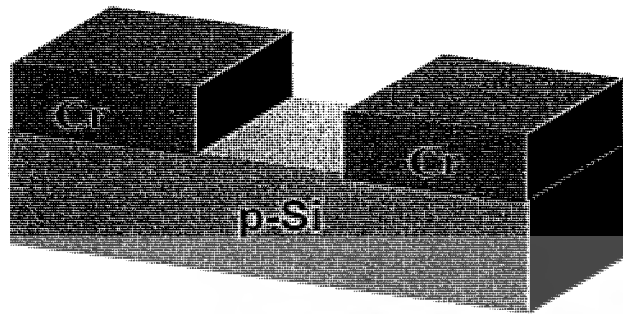
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่ม acetone เป็นเวลา 1 นาที 2 แก้ว เพื่อล้างฟิล์มออก
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr

### 3.3 การทดลอง

ตารางที่ 3.1 ตารางเงื่อนไขในการสเปกตรัมที่ตัวแปรต่างๆ

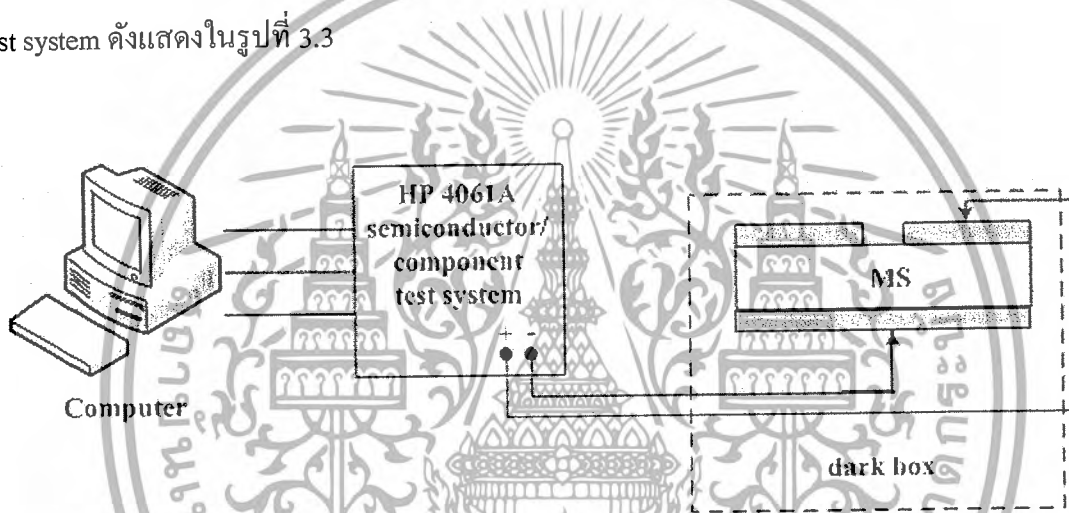
กำลังไฟฟ้า (W)	ความดันอาร์กอน (mbar)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิฐานรอง (°C)
50	$4.5 \times 10^{-3}$	30	25
75			
100			
150			
50	$4.8 \times 10^{-3}$	30	
	$6.0 \times 10^{-3}$		
	$8.0 \times 10^{-3}$		
	$10 \times 10^{-3}$		
50	$4.5 \times 10^{-3}$	10	
		20	
		40	
		30	
			200
			300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์ตามเงื่อนไขในการสปีดเตอร์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ ซึ่งจะมีการทดลองดังต่อไปนี้

### 3.3.1 การศึกษากำแพงศักย์ช็อคกีย์

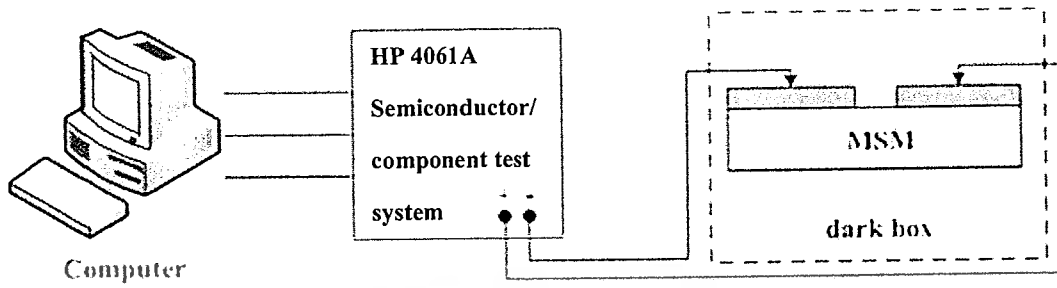
การศึกษากำแพงศักย์ช็อคกีย์ เป็นการทดลองเพื่อหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่เป็นโครงสร้างช็อคกีย์ไดโอด ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสูงกำแพงศักย์ต่อไป และเป็นการหาค่าแรงดันภายในของอุปกรณ์ โดยใช้เครื่อง HP 4061A semiconductor/component test system ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองหาคำแพงศักย์ช็อคกีย์

### 3.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/p-Si/Cr

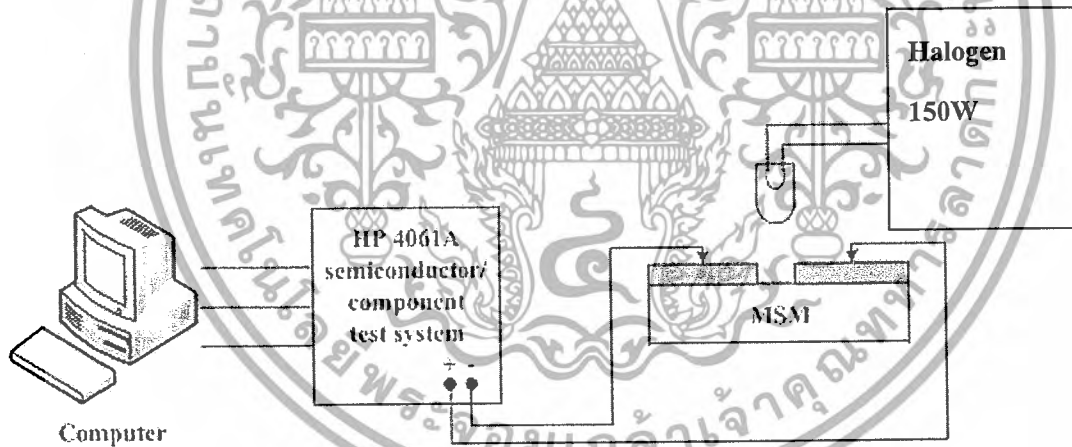
นำอุปกรณ์ Cr/p-Si/Cr ที่ผ่านกระบวนการสร้าง มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A โดยอยู่ใน dark box ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

### 3.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/p-Si/Cr ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

นำอุปกรณ์ Cr/p-Si/Cr มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง (dc) ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงจาก หลอด halogen กำลัง 150 W โดยมีความสว่างที่ 10000, 15000, 20000, 25000 lux แล้วดักกระทบอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

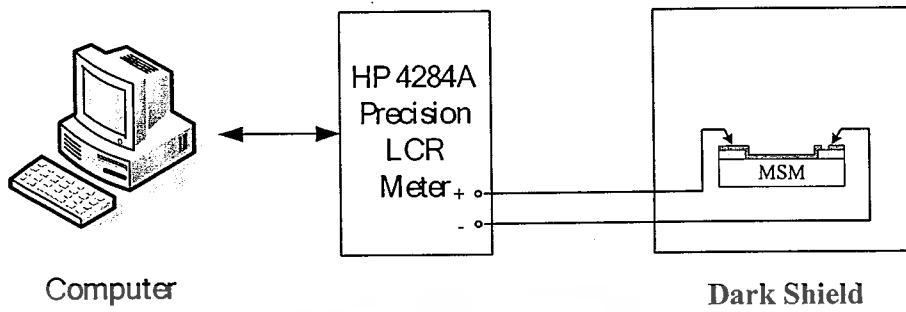


รูปที่ 3.5 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

### 3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Cr/p-Si/Cr

การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน จะใช้เครื่อง HP 4284 A ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

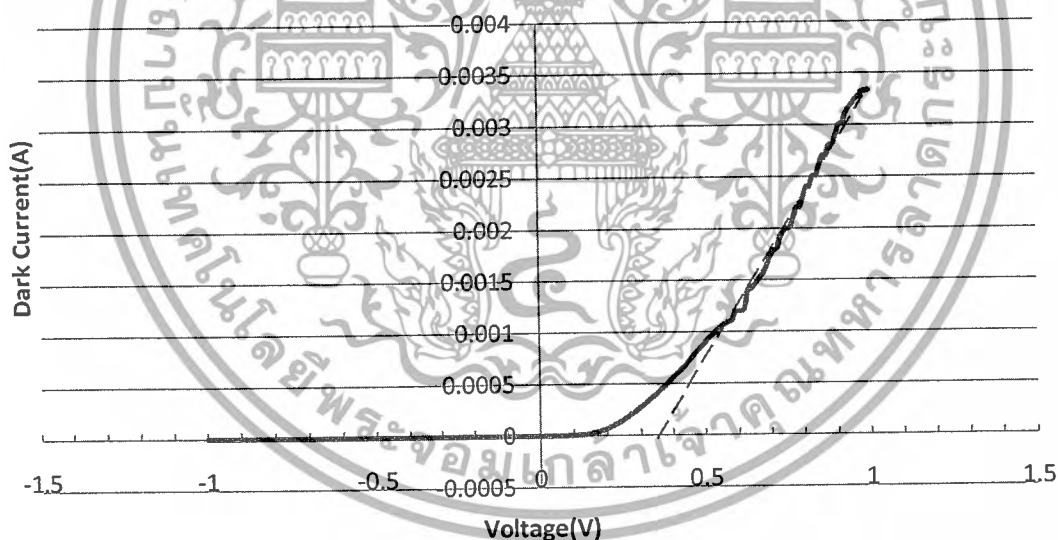
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

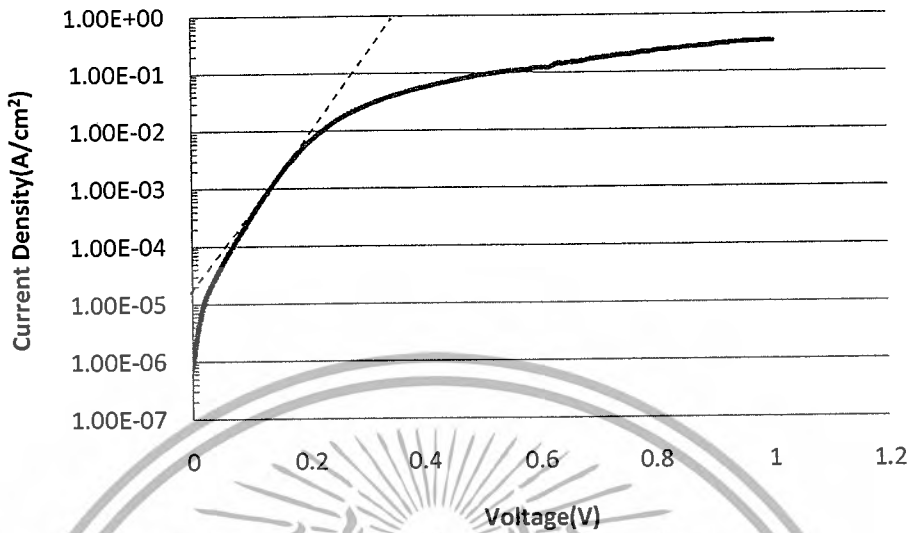
#### 4.1 ผลการทดลองกำแพงศักย์ช็อคติย์ของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr

เมื่อนำโลหะวางบนสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดพี ที่รอยสัมผัสมีคุณสมบัติเป็นช็อคติย์ ไดโอดเกิดขึ้น คุณสมบัติที่สำคัญของรอยสัมผัสช็อคติย์ คือ แรงดันภายใน ( $V_{bi}$ ) และความสูงกำแพงศักย์ช็อคติย์ ( $\phi_{bp}$  และ  $\phi_{bn}$ ) โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor/Component test system) HP 4061A

ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคติย์ โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงกระแสเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัส เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับกระแสจะไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันหรือเปลี่ยนน้อย แต่จะมีกระแสรั่วไหลอยู่ส่วนหนึ่ง โดยได้ทำการวัดที่พารามิเตอร์ต่างๆดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคติย์ขณะไบอัสตรงและขณะไบอัสย้อนกลับที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^\circ\text{C}$  ซิลิคอนชนิดพี



รูปที่ 4.2 การหาค่า  $J_0$  จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

หาค่าแรงดันภายในจากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง โดยแกนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแส ส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัส ดังรูปที่ 4.1 ค่าแรงดันภายใน ( $V_{bi}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.36 V

$$J = \frac{I}{A} = J_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (4.1)$$

โดยที่  $J_0$  คือ ความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

$$J_0 = RT^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bp}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

ความสูงกำแพงศักย์ชนิดกึ่งสามารถหาได้จาก

$$\phi_{bp, bn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{RT^2}{J_0}\right) \quad (4.3)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่ของโบสตันน์ ค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  eV/K

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

$R$  คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน กรณีของซิลิคอนชนิดพีมีค่าเท่ากับ 32  $A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$  ชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ  $110 A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

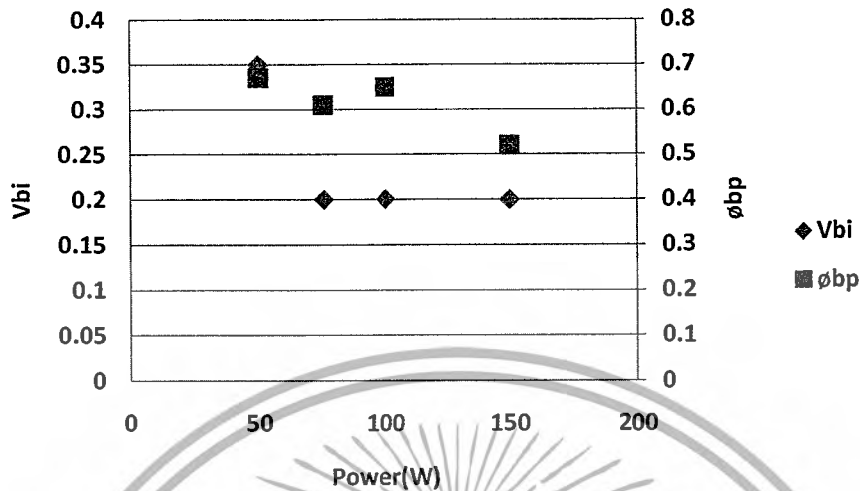
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 ได้ค่า  $J_0$  เท่ากับ  $1.2 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$  คำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์ซีกโดย  
ใช้สมการที่ 4.3 ทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ซีกเท่ากับ 0.67 V ซึ่งค่าความสูงกำแพงศักย์จะเป็น  
ตัวกำหนดกระแสรั่วไหล

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นกระแส แรงดันภายในและกำแพงศักย์ซีกที่เงื่อนไขต่างๆ

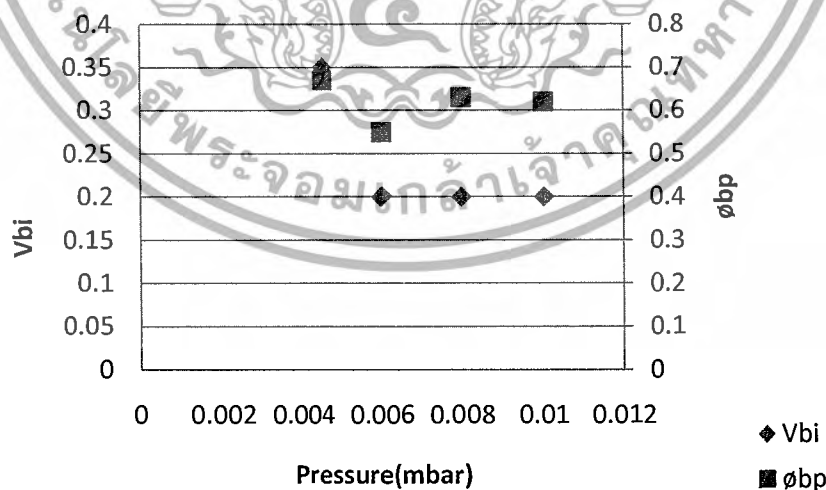
ความดัน อาร์กอน (mbar)	กำลังไฟฟ้า (W)	เวลา (m)	อุณหภูมิ ฐานรอง (°C)	$J_0$ ( $\text{A/cm}^2$ )	$V_{bi}$ (คำนวณ) (V)	$V_{bi}$ (ทดลอง) (V)	$\phi_{bp}$ (คำนวณ) (V)	$\phi_{bp}$ (ทดลอง) (V)
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	25	$1.2 \times 10^{-5}$		0.36		0.67
$6 \times 10^{-3}$	50	30	25	$2 \times 10^{-3}$		0.2		0.55
$8 \times 10^{-3}$	50	30	25	$8 \times 10^{-5}$		0.2		0.63
$1 \times 10^{-2}$	50	30	25	$1 \times 10^{-4}$		0.2		0.62
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	25	$1.2 \times 10^{-5}$		0.35		0.67
$4.5 \times 10^{-3}$	75	30	25	$2 \times 10^{-4}$		0.2		0.61
$4.5 \times 10^{-3}$	100	30	25	$2 \times 10^{-5}$		0.2		0.65
$4.5 \times 10^{-3}$	150	30	25	$5 \times 10^{-3}$		0.2		0.52
$4.5 \times 10^{-3}$	50	10	25	$3.7 \times 10^{-6}$	0.36	0.4	0.63	0.71
$4.5 \times 10^{-3}$	50	20	25	$1.6 \times 10^{-4}$		0.2		0.61
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	25	$1.2 \times 10^{-5}$		0.35		0.67
$4.5 \times 10^{-3}$	50	40	25	$4 \times 10^{-4}$		0.2		0.59
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	25	$1.2 \times 10^{-5}$		0.35		0.67
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	100	$1 \times 10^{-5}$		0.2		0.68
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	200	$1 \times 10^{-3}$		0.1		0.56
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	300	$1 \times 10^{-7}$		0.3		0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.3** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันภายใน, ค่าแฟกซ์ยซ์ซอดกียกับกำลังการสปีดเตอร์ ที่ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^{\circ}\text{C}$

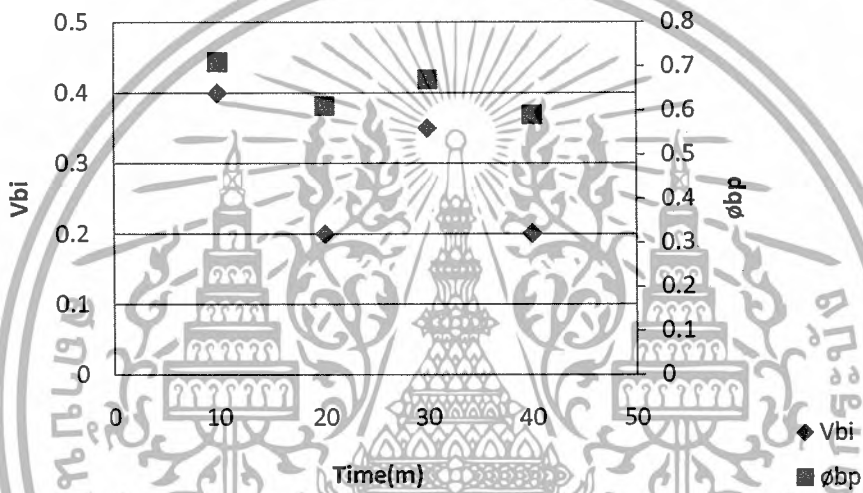
นำค่าแรงดันภายในและค่าแฟกซ์ยซ์ซอดกียที่กำลังการสปีดเตอร์ต่างๆมาพล็อตได้รูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่า ค่าแรงดันภายในและค่าแฟกซ์ยซ์ซอดกียที่กำลังการสปีดเตอร์ที่ 50 W มีค่ามากที่สุด คือ 0.36 โวลต์และ 0.67 โวลต์ ตามลำดับ ที่ 150W มีค่าน้อยที่สุด คือ 0.20 โวลต์และ 0.52 โวลต์ ตามลำดับ จากกราฟค่าแรงดันภายในและค่าแฟกซ์ยซ์ซอดกียแนวโน้มที่ลดลง



**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันภายใน, ค่าแฟกซ์ยซ์ซอดกียกับความดันของก๊าซอาร์กอนที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^{\circ}\text{C}$

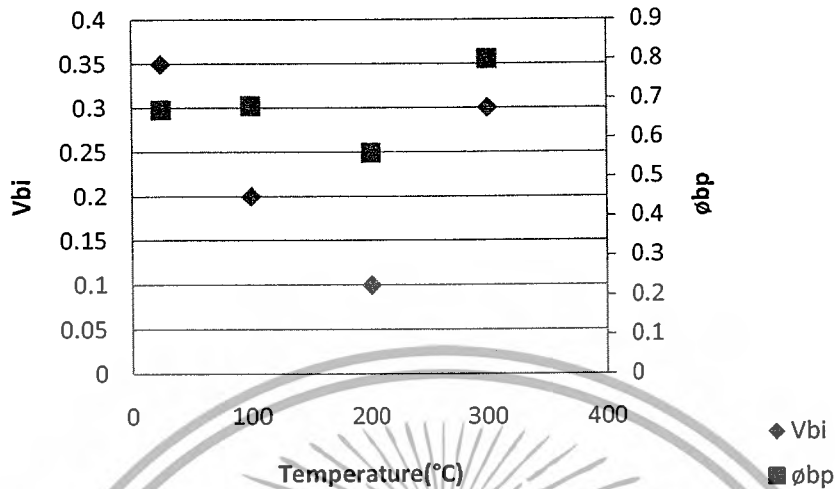
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่าแรงดันภายในและค่าแรงศักย์ช็อคที่ความดันของก๊าซอาร์กอนเปลี่ยนไปมาพลอตได้รูปที่ 4.4 จะสังเกตเห็นว่าค่าแรงดันภายในและค่าแรงศักย์ช็อคที่ความดันของก๊าซอาร์กอนที่  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar มีค่ามากที่สุด คือ 0.25 โวลต์และ 0.66 โวลต์ ตามลำดับ ที่  $1 \times 10^{-2}$  mbar มีค่าน้อยที่สุด คือ 0.20 โวลต์ และ 0.62 โวลต์ จากกราฟค่าแรงดันภายในและค่าแรงศักย์ช็อคก็มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันภายใน, ค่าแรงศักย์ช็อคกับเวลาในการสปีดเตอร์ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar อุณหภูมิฐานรอง  $25^{\circ}\text{C}$

ส่วนค่าแรงดันภายในและค่าแรงศักย์ช็อคที่เวลาเปลี่ยนไปมาพลอตได้รูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่าค่าแรงดันภายในและค่าแรงศักย์ช็อคที่เวลาที่ 10 นาที มีค่ามากที่สุด คือ 0.4 โวลต์ และ 0.71 โวลต์ ตามลำดับ ที่ 40 นาที มีค่าน้อยที่สุด คือ 0.2 โวลต์ และ 0.59 โวลต์ จากกราฟค่าแรงดันภายในและค่าแรงศักย์ช็อคก็มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันภายใน, ค่าแพนดักซ์ช็อคกีย์กับอุณหภูมิฐานรองที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที

ส่วนค่าแรงดันภายในและค่าแพนดักซ์ช็อคกีย์ที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปมาพลอตได้รูปที่ 4.6 จะสังเกตเห็นว่าค่าค่าแพนดักซ์ช็อคกีย์ที่อุณหภูมิที่ 300 °C มีค่ามากที่สุด คือ 0.80 โวลต์ จากกราฟค่าค่าแพนดักซ์ช็อคกีย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

#### 4.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในสัญญาณแสงกระแสตรง

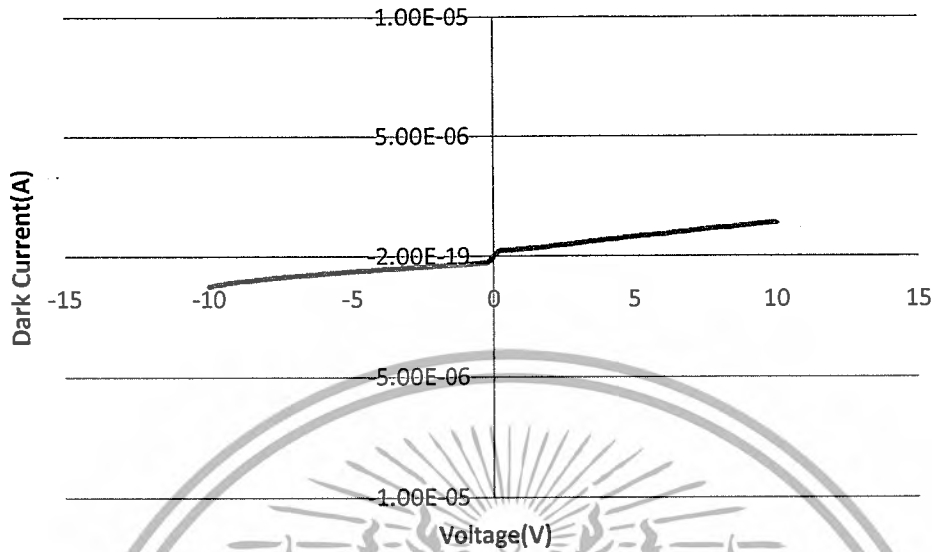
นำเอาอุปกรณ์มาทำการหาความสัมพันธ์ของกระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบและเมื่อได้รับแสงตกกระทบในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

##### 4.2.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A

ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/p-Si/Cr ไม่ได้รับแสงตกกระทบ กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM จะมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัส จะได้ค่ากระแสรั่ว  $1.38 \mu\text{m}$  ที่ 10 โวลต์ และมีความสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

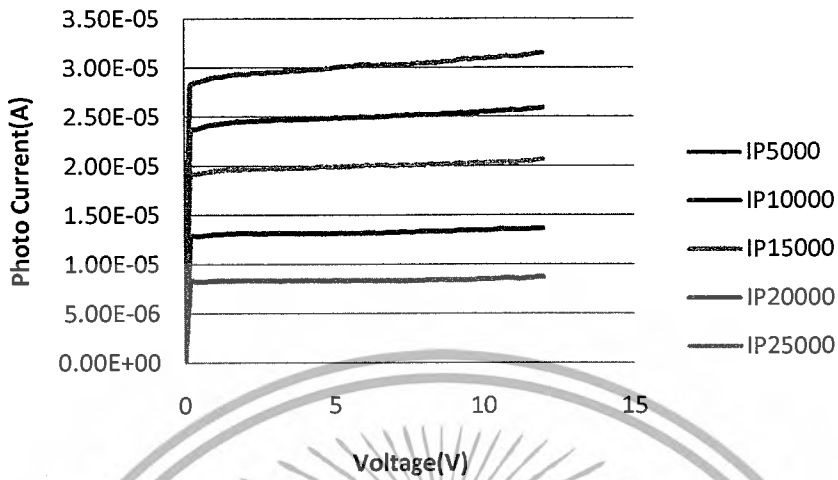


**รูปที่ 4.7** สมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบบที่ กำลังในการสเป็คเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสเป็คเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^{\circ}\text{C}$

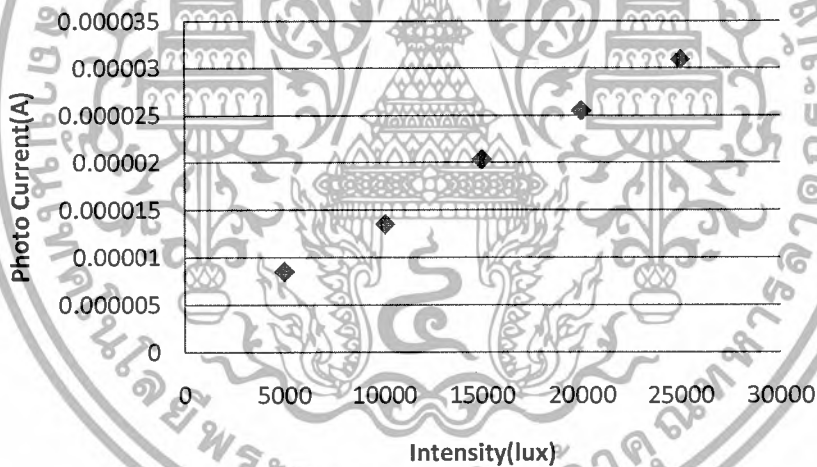
#### 4.2.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจน ในความเข้มต่างๆ มาตกกระทบบ

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงเลเซอร์ที่ความเข้มต่างๆตกกระทบบ โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A

ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/p-Si/Cr ได้รับความเข้มของแสงฮาโลเจน 5000, 10000, 15000, 20000 และ 25000 lux ตกกระทบบ กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM จะมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มความเข้มของแสงฮาโลเจน คือ ที่ความเข้มแสง 25000 lux จะมีกระแสแสงมากที่สุด และที่ความเข้มแสง 5000 lux จะมีกระแสแสงน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากจากความเข้มของแสงที่ฉายลงไปจะกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำก็จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยที่ความเข้มแสง 5000 lux , 10000 lux, 15000 lux, 20000 lux และ 25000 lux ที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ จะมีค่ากระแสประมาณ  $8.5 \mu\text{A}$  ,  $13.5 \mu\text{A}$  ,  $20.3 \mu\text{A}$  ,  $25.5 \mu\text{A}$  และ  $30.9 \mu\text{A}$  ตามลำดับ และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ได้มีความสมมาตรเป็นกราฟเส้นตรง จากรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 สมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^\circ\text{C}$



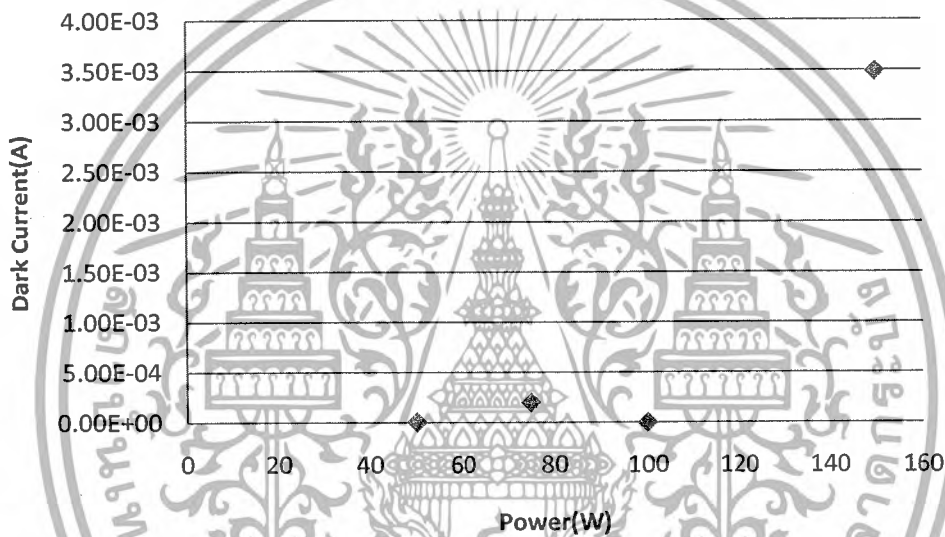
รูปที่ 4.9 ลักษณะสมบัติกระแสแสง - ความเข้มแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ที่แรงดันไบอัส 10 V ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์กระแสแสง - ความเข้มแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสแสงเพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่ดีของตัวตรวจวัดแสง แสดงให้เห็นว่าลักษณะอุปกรณ์ที่เราสร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังและความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์

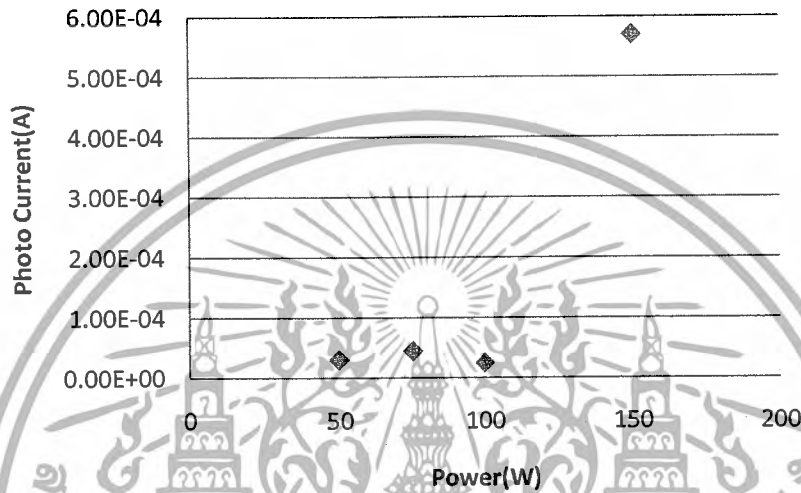
#### 4.3.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์



รูปที่ 4.10 กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์ที่ 50, 75, 100 และ 150 W ที่แรงดันไบอัส 10 V

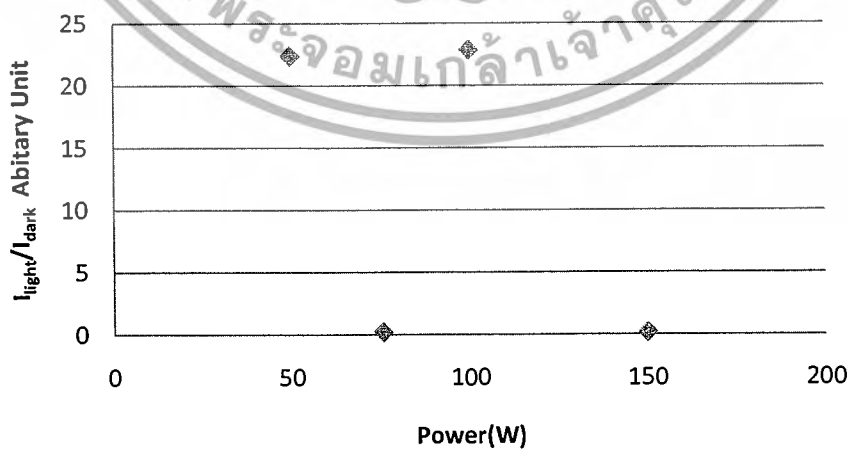
จากการผลการทดลองจะพบว่า กระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อใช้กำลังในการสปีดเตอร์ที่ 50, 75, 100 และ 150 W โดยที่กำลัง 150 W จะมีกระแสมืดมากที่สุด โดยจากรูปที่ 4.10 จะได้ว่าเมื่อกำลังในการสปีดเตอร์มากขึ้นจะเกิดบอมบ์บาร์ดมากขึ้น เนื่องจากมีพลาสมาที่เกิดจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ วิ่งเข้าชนขั้วแอโนดซึ่งเป็นฐานรองเวเฟอร์ ส่งผลให้มีสถานะผิวมากขึ้นทำให้กระแสรั่วมากขึ้น

#### 4.3.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและกำลังไฟฟ้าในการสปีดเตอร์ ที่แรงดันไบอัส 10V, ความเข้มแสง 25,000 lux

จากการผลการทดลองจะพบว่า กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อใช้กำลังในการสปีดเตอร์ ที่ 50, 75, 100 และ 150 W โดยที่กำลัง 150 W จะมีกระแสแสงมากที่สุด

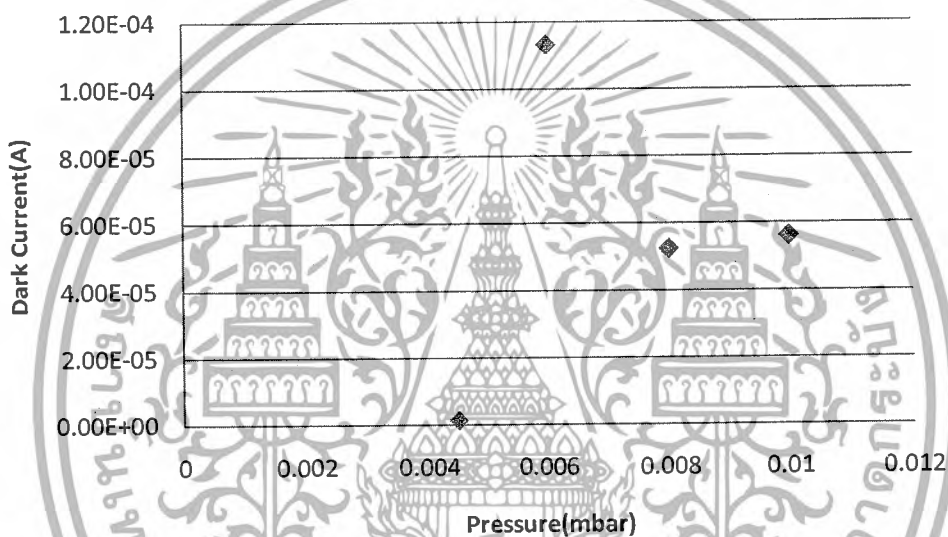


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดกับกำลังไฟฟ้า ที่แรงดันไบอัส

10V, ความเข้มแสง 25,000 lux  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองทำให้เลือกค่ากำลังไฟฟ้า 50 วัตต์มาใช้เพราะมีค่ากระแสแสงต่อกระแสมืดมากที่สุดและมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

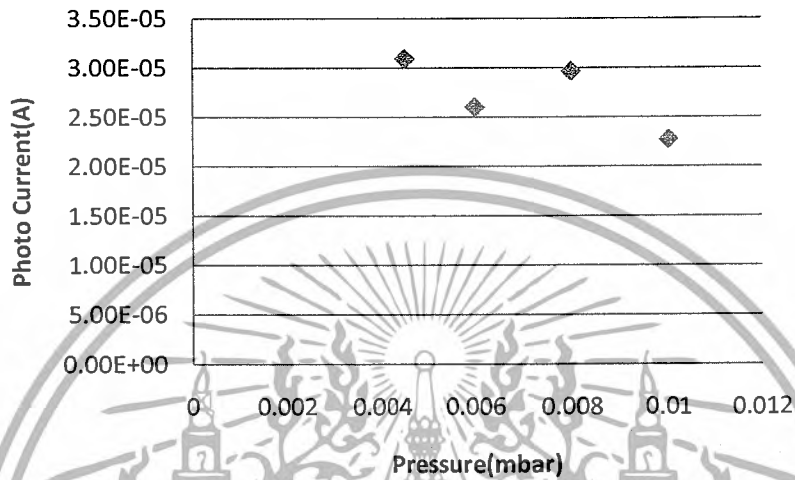
#### 4.3.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์



รูปที่ 4.13 กราฟกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันในการสปีดเตอร์ที่  $4.5 \times 10^{-3}$ ,  $6.0 \times 10^{-3}$ ,  $8.0 \times 10^{-3}$ , และ  $1.0 \times 10^{-2}$  mbar ที่แรงดันไบอัส 10 V

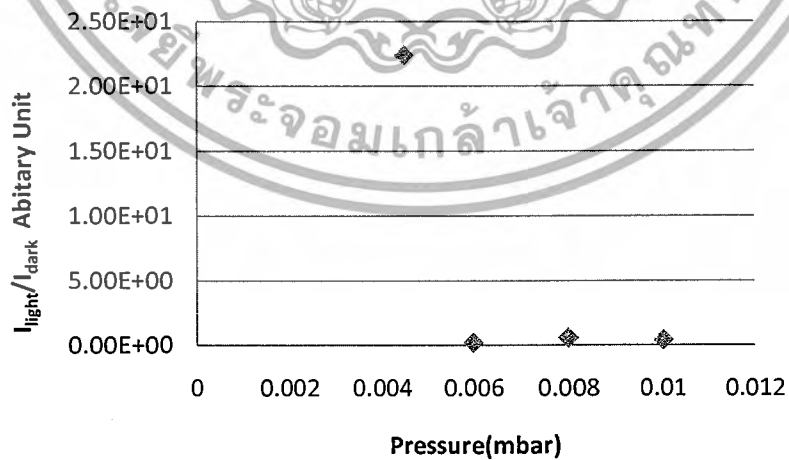
จากผลการทดลอง จะพบว่า กระแสมืดจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความดันของการสปีดเตอร์ที่  $4.5 \times 10^{-3}$ ,  $6.0 \times 10^{-3}$ ,  $8.0 \times 10^{-3}$ , และ  $1.0 \times 10^{-2}$  mbar โดยจากรูปที่ 4.13 ที่ความดันต่ำจะสามารถสร้างได้เร็วขึ้น เพราะจะมีค่าระยะเฉลี่ยปลอดการชน (mean free path) สูงทำให้อะตอมของอาร์กอนไม่ชนกันเองสามารถวิ่งชนโครเมียมให้ตกลงมาที่ฐานรองได้ ส่งผลให้มีกระแสรั่วต่ำลง เพราะจะมีปริมาณการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่น้อยลงด้วย

4.3.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความดันที่ค่าแรงดันไบอัส 10V, ความเข้มแสง 25,000 lux

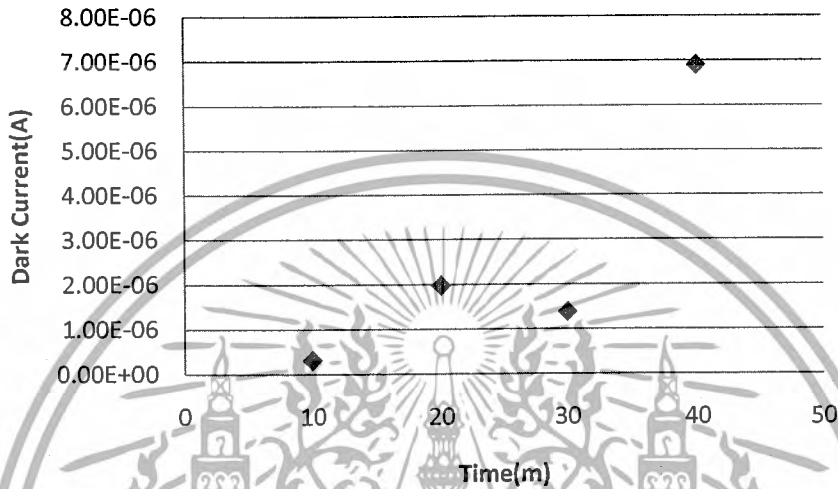
จากผลการทดลอง จะพบว่า กระแสแสงจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความดันของการสปีดเตอร์ที่  $4.5 \times 10^{-3}$ ,  $6.0 \times 10^{-3}$ ,  $8.0 \times 10^{-3}$ , และ  $1.0 \times 10^{-2}$  mbar



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดกับความดันที่แรงดันไบอัส

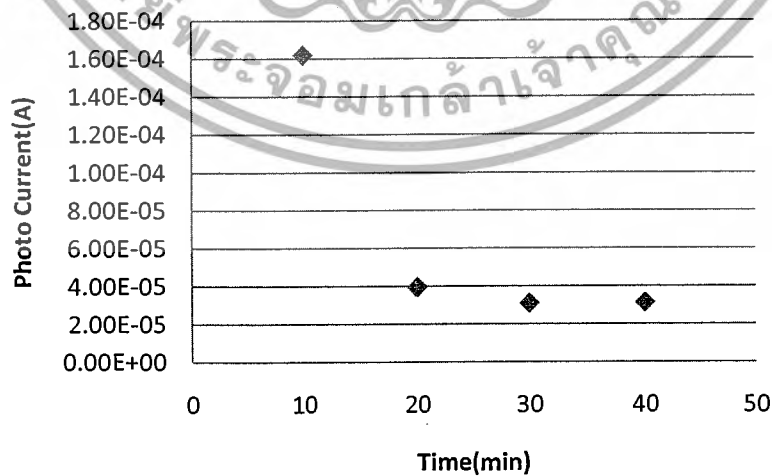
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองทำให้เลือกค่าความดันที่ 4.5 mbar เพราะมีค่ากระแสแสงต่อกระแสมืดมากที่สุด ทำให้สามารถตอบสนองต่อแสงได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.16 กระแสมืดของตัวตรวจจับแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสปีดเตอร์ที่ 10, 20, 30 และ 40 min ที่แรงดันไบอัส 10 V

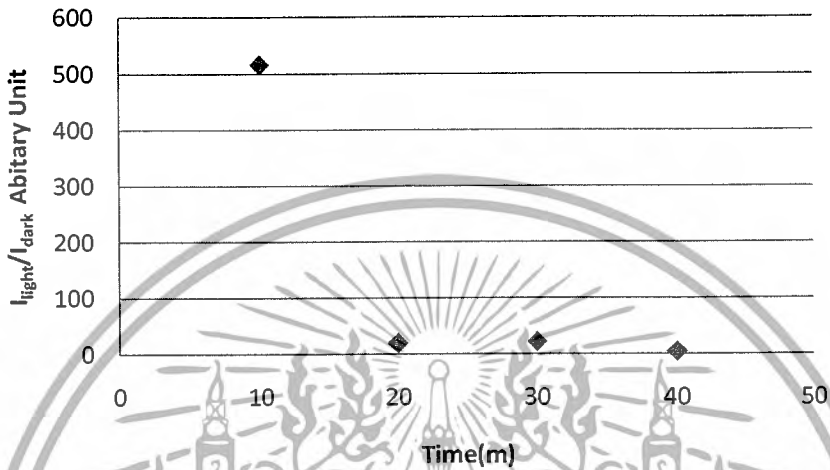
จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อเวลาในการสปีดเตอร์มากขึ้นจะทำให้เกิดการบอมบ์บาร์ดมากขึ้น เนื่องจากมีอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดขึ้นจำนวนมาก ดังนั้นกระแสรั่วจะมากขึ้น



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและเวลาในการสปีดเตอร์ ที่แรงดันไบอัส

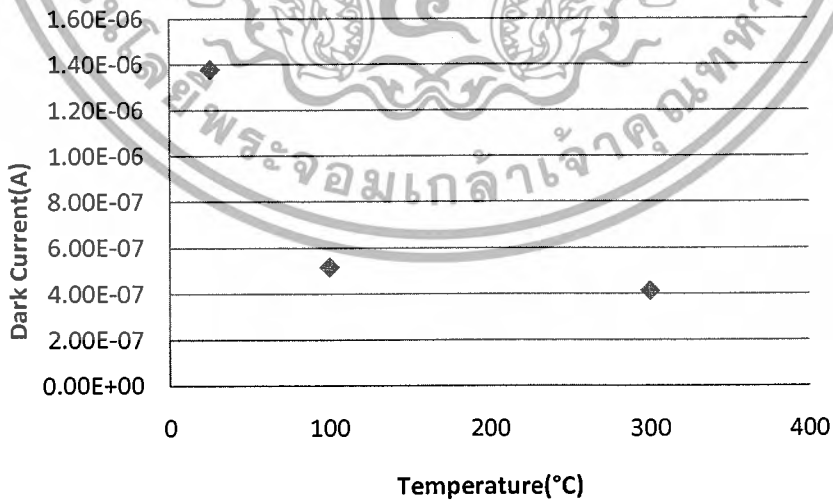
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง จะพบว่า กระแสแสงจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มเวลาของการสปีดเตอร์ที่ 10 20 30 และ 40 นาที



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดกับเวลาในการสปีดเตอร์

จากการทดลองจะได้ว่าที่ 10 นาทีจะมีค่ากระแสแสงต่อกระแสมืดมากที่สุด แต่ที่เราใช้ 30 นาทีเพราะที่ 10 นาทีจะได้ฟิล์มที่บางเกินไปทำให้แสงทะลุผ่านชั้นซิลิโคนได้ ซึ่งเราต้องการศึกษาเฉพาะช่วงของช่องรับแสงเท่านั้น และค่าความจุไฟฟ้าที่ 30 นาทีจะมีค่าน้อยกว่า 10 นาทีอีกด้วย

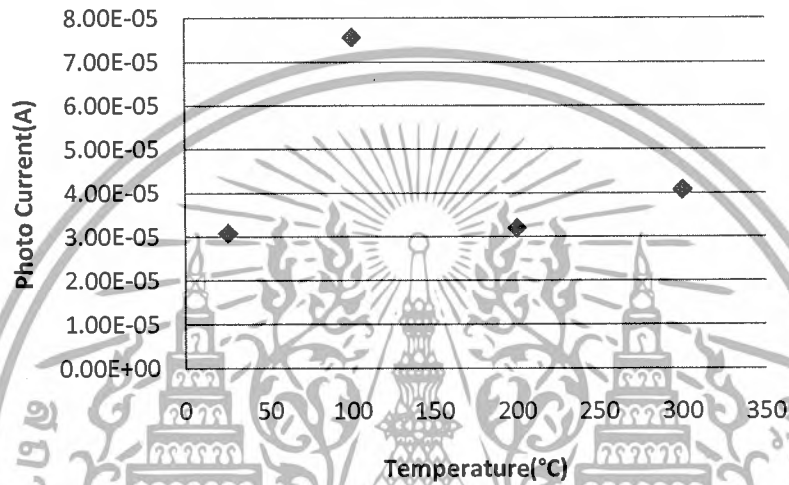


รูปที่ 4.19 กระแสมืดของตัวตรวจจับแสง Cr/p-Si/Cr เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองใน

การสปีดเตอร์ที่ 25, 100, 200 และ 300 °C ที่ 10 V

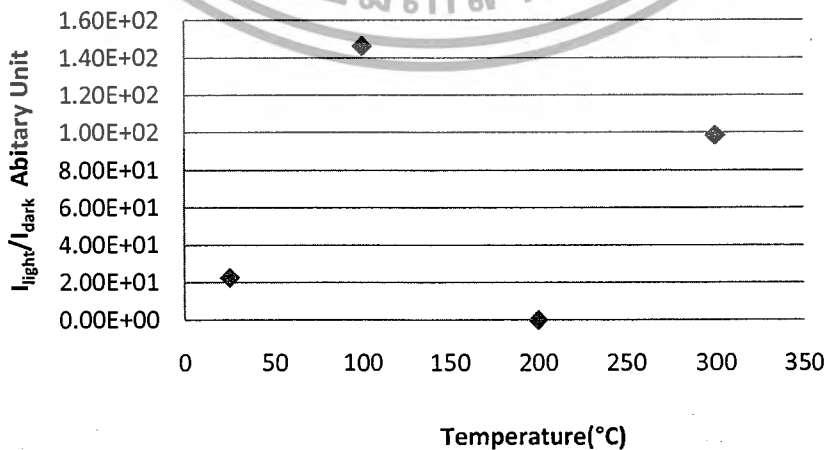
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 เมื่ออุณหภูมิฐานรองมากขึ้น จะมีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีค่าสภาพต้านทานน้อยลง เนื่องจากมีการเกิดการจัดเรียงตัวของ โคร่งผลึกโครเมียมใหม่และเกิดเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์มากขึ้น ทำให้มีกระแสรั่วต่ำลงด้วย



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและอุณหภูมิฐานรองที่ค่าแรงดัน 10V, ความเข้มแสง 25,000 lux

จากผลการทดลอง จะพบว่ากระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิฐานรองของการสปีดเตอร์ที่ 25 100 200 และ 300 องศาเซลเซียส



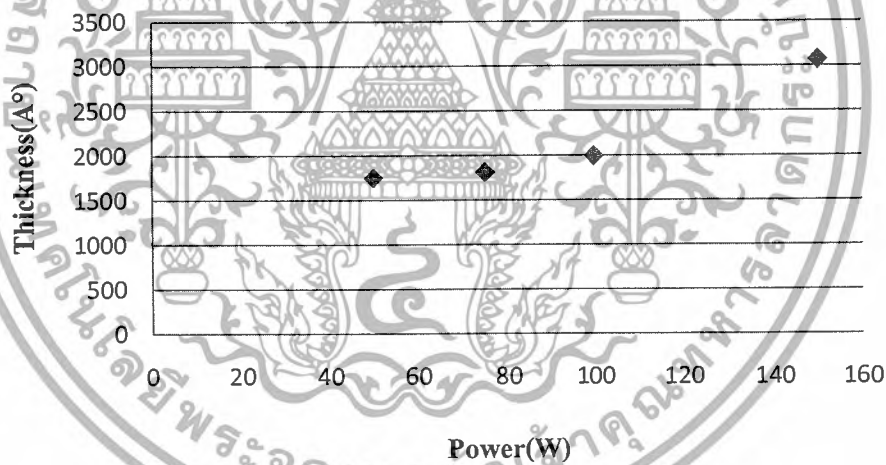
รูปที่ 4.21 อัตรากระแสแสงต่อกระแสมืด ของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและอุณหภูมิฐานรอง เอกสารฉบับนี้ขอสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองเลือกค่าอุณหภูมิฐานรองที่ 25 องศาเซลเซียส เพราะมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำที่สุด ส่งผลให้มีความเร็วมากที่สุด

#### 4.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังและความดันก๊าซอาร์กอนในการสเป็คเตอร์

ในการวัดความหนาของฟิล์มบางโครเมียมทำได้โดยใช้อัตราการกัดของสารเคมี Cr etching  $(\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6) + \text{HClO}_4 + \text{DI}$  ด้วยอัตราส่วนเป็น  $100\text{g} : 26\text{ cm}^3 : 440\text{ cm}^3$  มีอัตราการกัดประมาณ  $1000 \text{ \AA}/\text{min}$  และ Stylus profiler Tencore

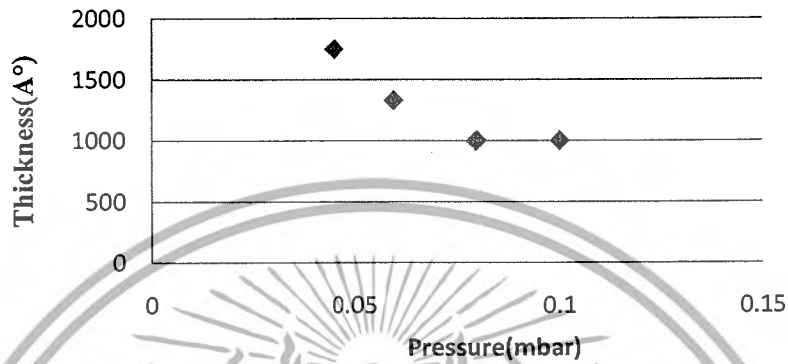
##### 4.4.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสเป็คเตอร์



รูปที่ 4.22 สมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสเป็คเตอร์

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อกำลังมากขึ้น จะทำให้อัตราการเกิดฟิล์มบางสูงขึ้น เพราะพลังงานจลน์ที่  $\text{Ar}^+$  ได้รับมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อ  $\text{Ar}^+$  ที่มีพลังงานจลน์สูงวิ่งเข้าชนเป้าโครเมียมจึงทำให้โครเมียมหลุดออกมาจากเป้าได้มากขึ้น ดังนั้นความหนาของชั้นโครเมียมจึงแปรผันตรงกับกำลังในการสเป็คเตอร์

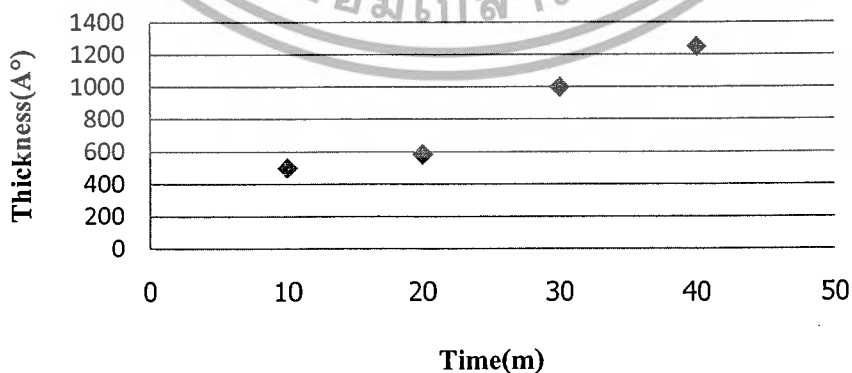
#### 4.4.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสปัตเตอร์



รูปที่ 4.23 สมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสปัตเตอร์

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความดันของ  $Ar^+$  ขณะที่กำลังในการสปัตเตอร์คงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มความดันจะทำให้อัตราการเกิดของโครเมียมลดลง เนื่องจากที่ความดันสูงระยะเฉลี่ยปลอดการชนของ  $Ar^+$  จะลดลง อันเนื่องมาจากโมเลกุลของ  $Ar^+$  จะเกิดการชนกันเอง ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ ก่อนที่จะมีโอกาสเข้าชนกับเป้าโครเมียมจึงทำให้อัตราการเกิดของโครเมียมลดลง ดังนั้นความหนาของชั้นโครเมียมจึงแปรผกผันกับความดัน

#### 4.4.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสปัตเตอร์

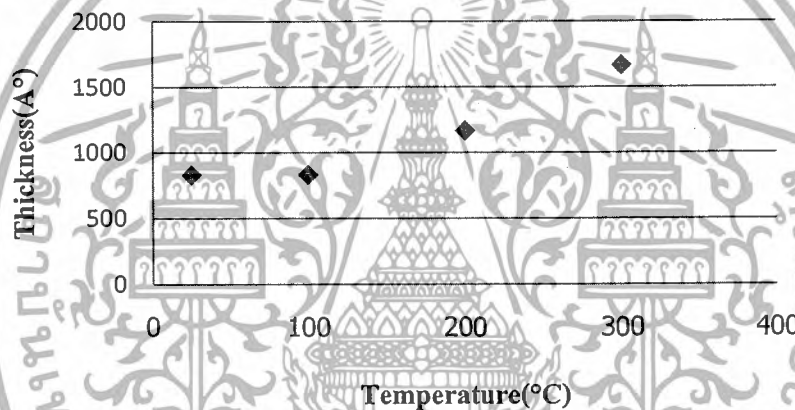


รูปที่ 4.24 สมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสปัตเตอร์ที่กำลังใน

การสปัตเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar อุณหภูมิฐานรอง  $25^\circ C$   
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนแปลงเวลาในการสเปคเตอร์พบว่าที่เวลามากขึ้นค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่กำลังในการสเปคเตอร์ 50W และมีอัตราการเกิดประมาณ  $30 \text{ \AA}/\text{min}$  เนื่องมาจากระยะเวลาเพิ่มขึ้นจำนวนอะตอมที่มาเกาะกันเป็นฟิล์มบางโครเมียมบนแผ่นเวเฟอร์จึงมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย

#### 4.4.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองในการสเปคเตอร์

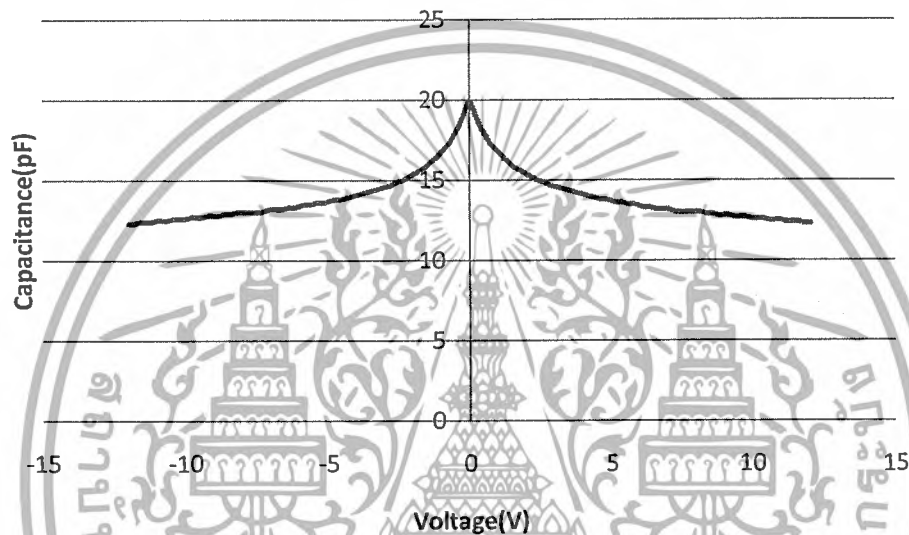


รูปที่ 4.25 สมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองในการสเปคเตอร์

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฐานรองในการสเปคเตอร์พบว่าที่อุณหภูมิมากขึ้นค่าความหนาของฟิล์มบางโครเมียมมีค่าเพิ่มขึ้นอาจจะไม่ใช่ที่ความหนาของฟิล์มแต่เป็นความหนาแน่นของฟิล์มบางโครเมียมมีค่าสูงขึ้น ทำให้ทนต่อการกัดกร่อนจากน้ำยาคัดโครเมียมได้สูงขึ้น ทำให้ใช้เวลาที่นานขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิฐานรอง ทำให้เกิดการจัดเรียงผลึกที่คึกซ์ขึ้นนั่นเอง

#### 4.5 ผลการทดลองการหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/p-Si/Cr ที่เงื่อนไขการสปีดเตอร์ต่างๆ

เมื่อนำอุปกรณ์ Cr/p-Si/Cr ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^{\circ}\text{C}$  ไปหาความสัมพันธ์ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันพบว่า ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าประมาณ 20 pF และมีลักษณะความเป็นสมมาตร



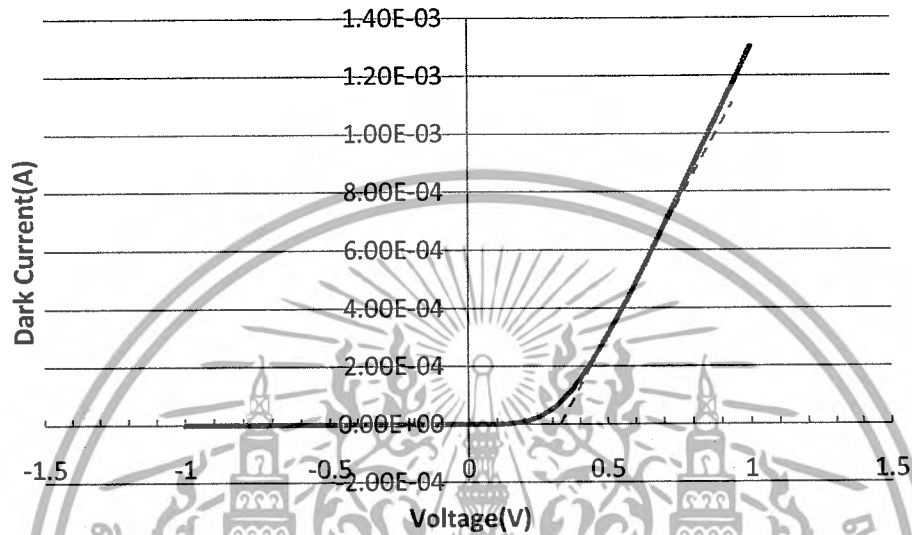
รูปที่ 4.26 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/p-Si/Cr ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4.2 ค่าความจุไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ

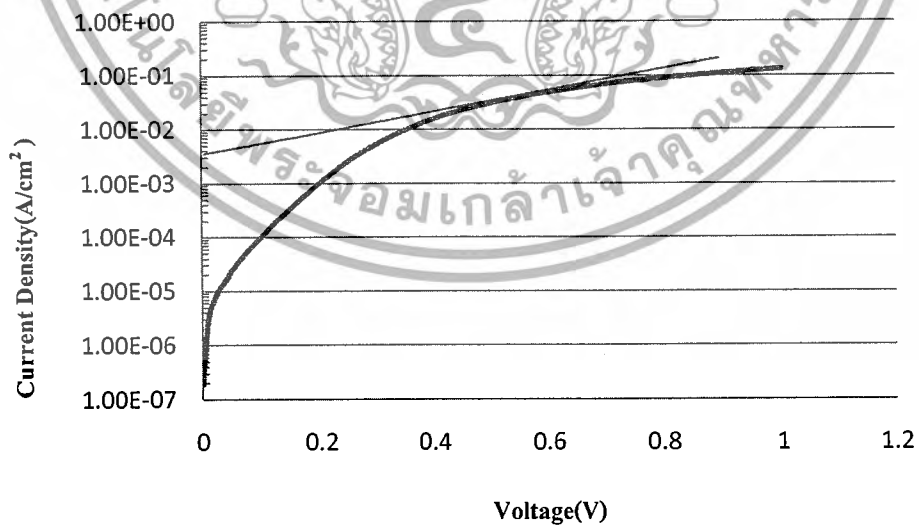
ความดันอาร์กอน (mbar)	กำลังไฟฟ้า (W)	เวลา (m)	อุณหภูมิฐานรอง (°C)	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	25	19.9
$6 \times 10^{-3}$	50	30	25	91.7
$8 \times 10^{-3}$	50	30	25	36.4
$1 \times 10^{-2}$	50	30	25	53.3
$4.5 \times 10^{-3}$	75	30	25	62
$4.5 \times 10^{-3}$	100	30	25	68.5
$4.5 \times 10^{-3}$	150	30	25	143
$4.5 \times 10^{-3}$	50	10	25	81.9
$4.5 \times 10^{-3}$	50	20	25	50
$4.5 \times 10^{-3}$	50	40	25	52.7
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	100	23
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	200	39
$4.5 \times 10^{-3}$	50	30	300	78.4

จากตารางจะเห็นว่าที่เงื่อนไขการสปีดเตอร์ 50 W  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar 30 min 25 องศาเซลเซียส มีค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งถ้าได้ค่าความจุไฟฟ้าน้อยจะได้ค่าคงที่ทางเวลาน้อย ทำให้ค่าการตอบสนองทางความถี่ของอุปกรณ์เร็วขึ้น

#### 4.6 ผลการทดลองกำแพงศักย์ช็อกกีของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr



รูปที่ 4.27 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อกกีของอะไซด์ตรงและอะไซด์ย้อนกลับที่กำล้งในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^{\circ}\text{C}$  ซิลิคอนชนิดเอ็น



รูปที่ 4.28 การหาค่า  $J_0$  จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อกกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าแรงดันภายในจากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสซีอติคัล โดยแกนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแส ส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัส ดังรูปที่ 4.27 ค่าแรงดันภายใน ( $V_{bi}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.32 V

จากรูปที่ 4.28 ได้ค่า  $J_0$  เท่ากับ  $1.5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$  คำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์ซีอติคัลโดยใช้สมการที่ 4.3 ทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ซีอติคัลเท่ากับ 0.70 V ซึ่งค่าความสูงกำแพงศักย์จะเป็นตัวกำหนดกระแสรั่วไหล

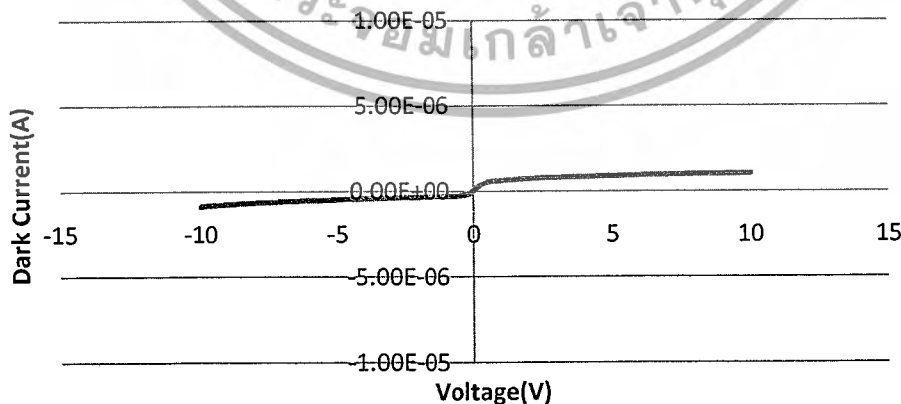
#### 4.7 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในสภาวะแสงกระแสดตรง

นำเอาอุปกรณ์มาทำการหาความสัมพันธ์ของกระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบและเมื่อได้รับแสงตกกระทบในแบบสภาวะแสงกระแสดตรง

##### 4.7.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A

ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr ไม่ได้รับแสงตกกระทบ กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM จะมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัส จะได้ค่ากระแสรั่ว  $1.05 \mu\text{m}$  ที่ 10 โวลต์ และมีความสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 สมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

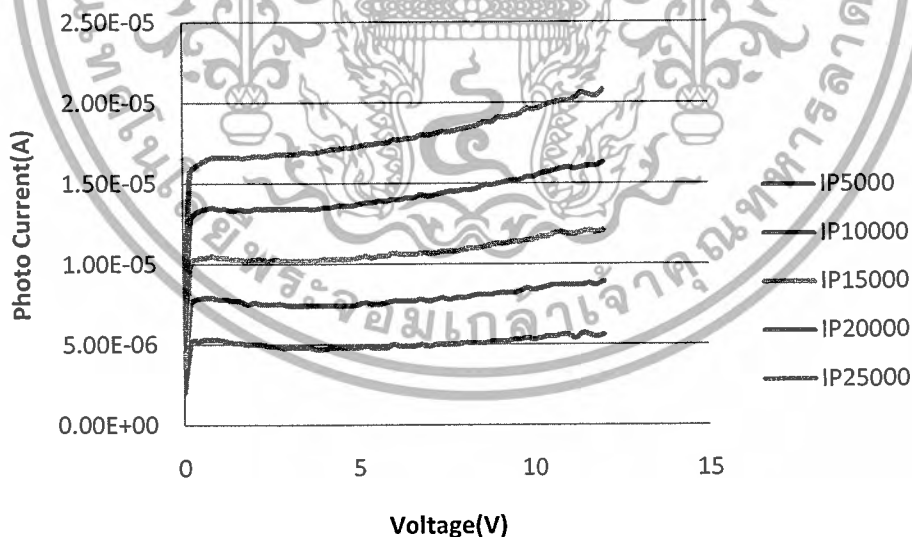
ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  เวลาในการสปีดเตอร์

เอกสารนี้เป็น 30 นาที ออณหภูมิฐานรอง  $25^\circ\text{C}$  งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในขณะที่ได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจน ในความเข้มต่างๆ มาตกกระทบ

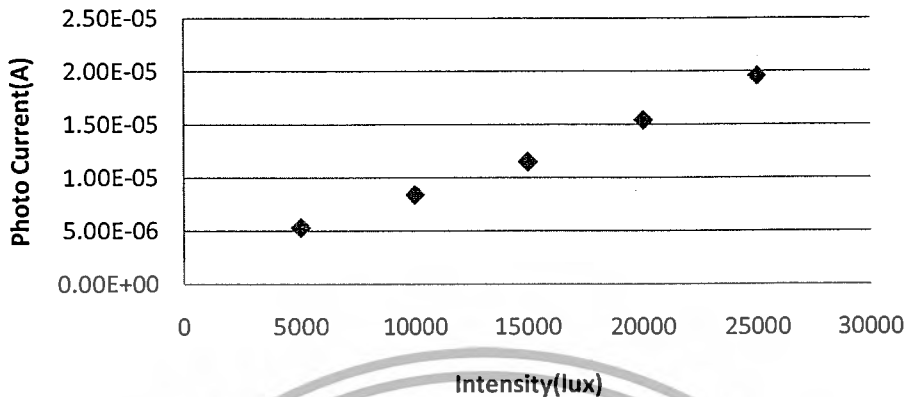
ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มต่างๆตกกระทบ โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A

ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr ได้รับความเข้มของแสงฮาโลเจน 5000, 10000, 15000, 20000 และ 25000 lux ตกกระทบ กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM จะมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มความเข้มของแสงฮาโลเจน คือ ที่ความเข้มแสง 25000 lux จะมีกระแสแสงมากที่สุด และที่ความเข้มแสง 5000 lux จะมีกระแสแสงน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.30 เนื่องจากความเข้มของแสงที่ฉายลงไปจะกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำก็จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ได้มีความสมมาตรเป็นกราฟเส้นตรง จากรูปที่ 4.30 และ 4.31



รูปที่ 4.30 สมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง 25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

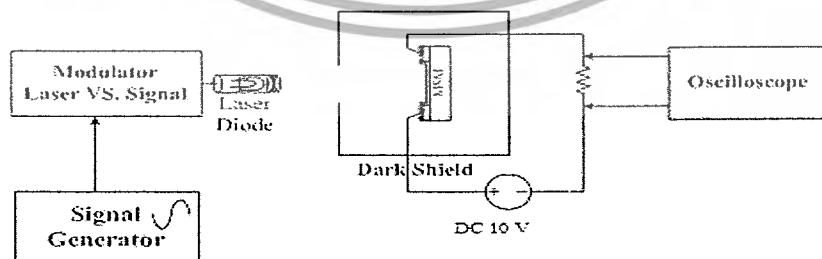


**รูปที่ 4.31** ลักษณะสมบัติกระแสแสง – ความเข้มแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่แรงดันไบอัส 10 V ที่กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที อุณหภูมิฐานรอง  $25^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์กระแสแสง – ความเข้มแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสแสงเพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น

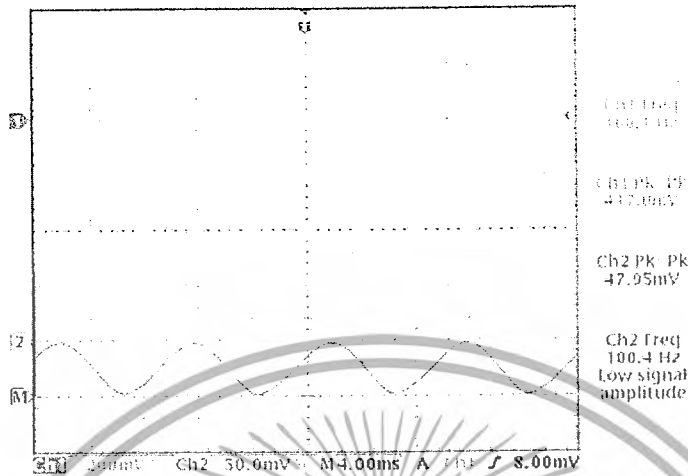
#### 4.8 ผลการทดลองลักษณะสมบัติการตอบสนองสัญญาณกระแสลับของตัวตรวจวัดแสง ที่ค่าโหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) 100 $\Omega$

ในการวัดลักษณะสมบัติการตอบสนองสัญญาณกระแสลับของตัวตรวจวัดแสง โดยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal- waveform) ที่มีค่าแอมพลิจูด 400mV เข้ากับแสงเลเซอร์ไดโอด ( $\lambda = 670 \text{ nm}$ ) ที่ความถี่ช่วง 100 Hz - 4 MHz ที่โหลดความต้านทาน 100  $\Omega$



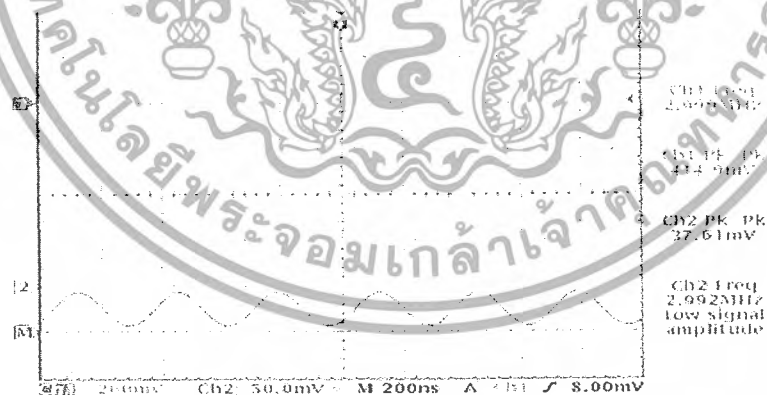
**รูปที่ 4.32** แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติการตอบสนองสัญญาณเลเซอร์ของตัว

เอกสารนี้เข้ตรวจวัดแสง งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



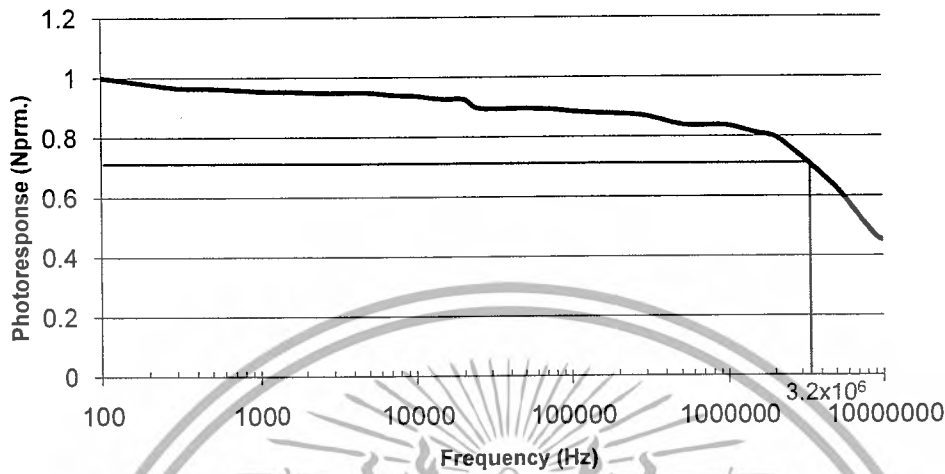
รูปที่ 4.33 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของการตีมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 100 Hz ที่แรงดันไบแอส 10 V ของตัวอุปกรณ์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  ชนิดพีซีดีคอน

จากการทดลองเส้นที่ 1 เป็นรูปซายน์ที่มาจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ส่วนเส้นที่ 2 เป็นรูปซายน์ที่มาจากตัวอุปกรณ์ จะเห็นได้ว่า ทั้งสองจะมีเฟสที่ตรงกัน แสดงว่าตัวตรวจวัดแสงมีการตอบสนองที่ดี โดยเราให้สัญญาณรูปซายน์ความถี่ 100 Hz

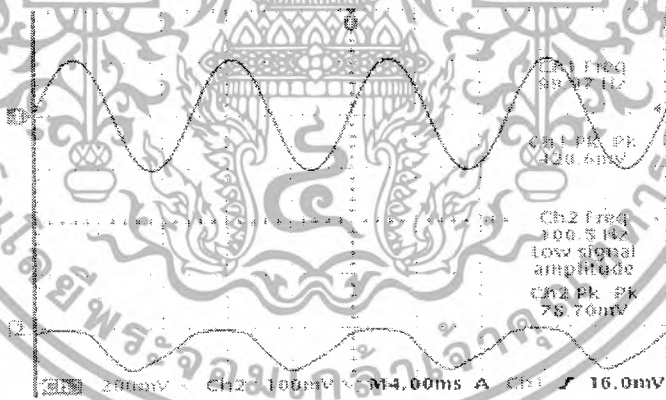


รูปที่ 4.34 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของการตีมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 2.992 MHz ที่แรงดันไบแอส 10 V ของตัวอุปกรณ์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  ชนิดพีซีดีคอน

จากการทดลองเส้นที่ 1 เป็นรูปซายน์ที่มาจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ส่วนเส้นที่ 2 เป็นรูปซายน์ที่มาจากตัวอุปกรณ์ จะเห็นได้ว่า ทั้งสองจะมีเฟสที่ตรงกัน แสดงว่าตัวตรวจวัดแสงมีการตอบสนองที่ดี โดยเราให้สัญญาณรูปซายน์ความถี่ 3 MHz เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



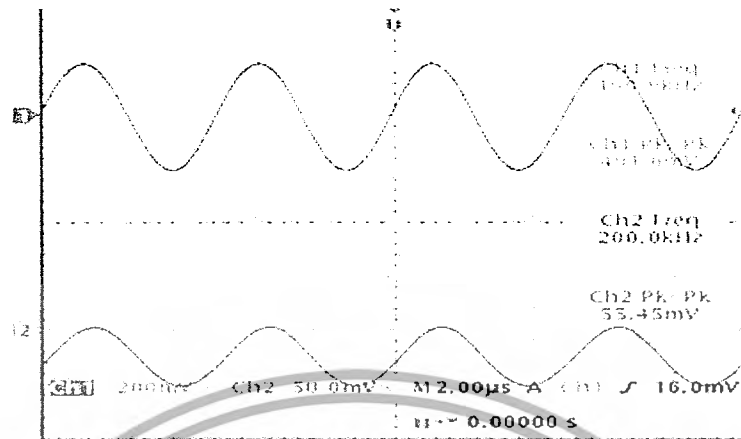
รูปที่ 4.35 สมบัติการตอบสนองสัญญาณเลเซอร์ของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  ชนิดพีชนิดอน จากค่าที่วัดทั้งหมดนำมาประมวลผลได้กราฟดังรูปที่ 4.35 พบว่าจะคัทออฟที่ความถี่ 3.2 MHz



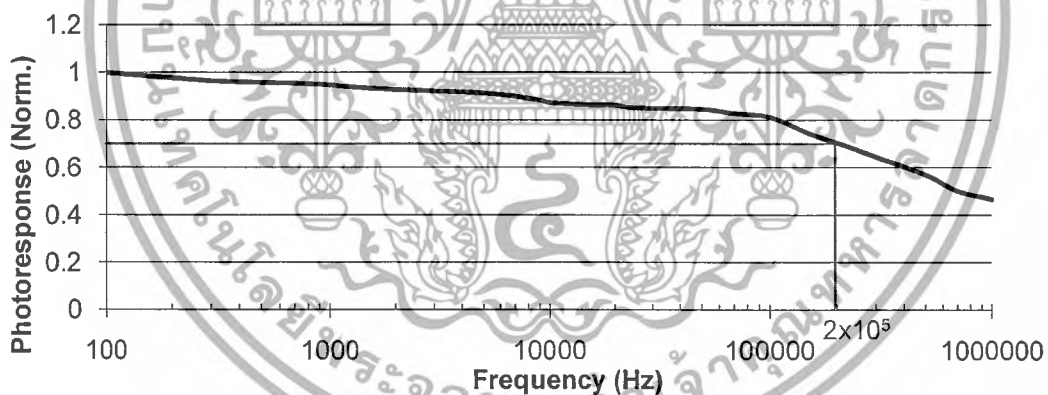
รูปที่ 4.36 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของการดัดแปลงของสัญญาณรูปคลื่นที่ 100 Hz ที่แรงดันไบแอส 10 V ของตัวอุปกรณ์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  ชนิดเอ็นชนิดอน

จากการทดลองเส้นที่ 1 เป็นรูปซายน์ที่มาจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ส่วนเส้นที่ 2 เป็นรูปซายน์ที่มาจากตัวอุปกรณ์ จะเห็นได้ว่า ทั้งสองจะมีเฟสที่ตรงกัน แสดงว่าตัวตรวจวัดแสงมีการตอบสนองที่ดี โดยเราให้สัญญาณรูปซายน์ความถี่ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของการคิมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 2.992 MHz ที่แรงดันไบแอส 10 V ของตัวอุปกรณ์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  ชนิดเอ็น จากการทดลองเส้นที่ 1 เป็นรูปซายน์ที่มาจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ส่วนเส้นที่ 2 เป็นรูปซายน์ที่มาจากตัวอุปกรณ์ จะเห็นได้ว่า ทั้งสองจะมีเฟสที่ตรงกัน แสดงว่าตัวตรวจวัดแสงมีการตอบสนองที่ดี โดยเราให้สัญญาณรูปซายน์ความถี่ 200 kHz



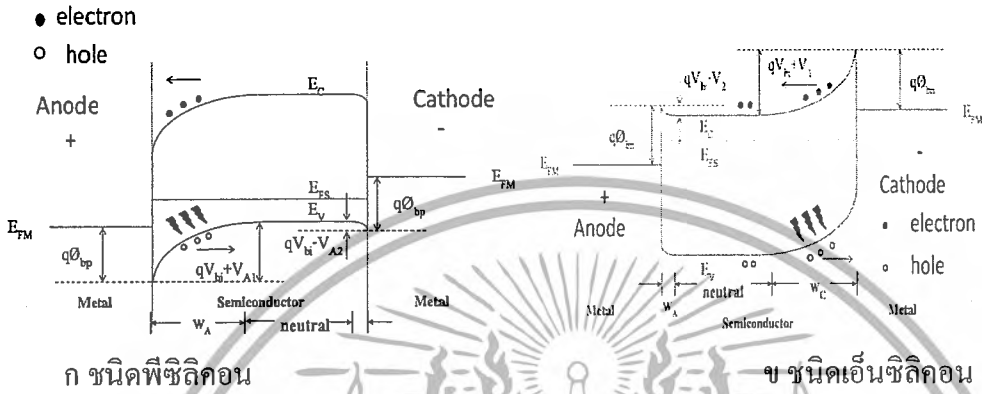
รูปที่ 4.38 สมบัติการตอบสนองสัญญาณเลเซอร์ของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20  $\mu\text{m}$  ชนิดเอ็นซิลิคอน

จากค่าที่วัดทั้งหมดนำมาคำนวณมอดูลัส จะได้กราฟดังรูปที่ 4.38 พบว่าจะคัทออฟที่ความถี่ 200 kHz

จากผลการมอดูเลทแสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอนเป็นตัวก่อให้เกิดกระแสแสงในซิลิคอนชนิดพี ส่วนในซิลิคอนชนิดเอ็น โสไลเป็นตัวก่อให้เกิดกระแสแสงดังรูปที่ 4.39 จะเห็นว่าในซิลิคอนชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีจะ ได้ความเร็วที่เร็วกว่าซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากอิเล็กตรอนมีค่าความคล่องตัวมากกว่าโฮล ดังรูปที่ 4.35 และ 4.38



รูปที่ 4.39 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr สาเหตุที่เลือกศึกษา ตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr มีดังนี้

1. นำซิลิคอนชนิดพีมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำของอุปกรณ์โฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะสามารถช่วยปรับปรุงความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์เพราะกลไกการเกิดกระแสแสงส่วนใหญ่จะเกิดจากพาหะอิเล็กตรอนการที่อิเล็กตรอนมีค่าความคล่องตัวสูงทำให้อุปกรณ์โฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะมีค่าความเร็วเพิ่มสูงขึ้น

2. กระบวนการสร้างฟิล์มบางโครเมียมโดยการสเป็คเตอร์สามารถควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มบางได้ดีกว่าการระเหยสารในสุญญากาศ หลังการสร้างฟิล์มบางไม่จำเป็นต้องนำอุปกรณ์ผ่านการซินเตอร์และหากต้องการซินเตอร์สามารถให้ความร้อนฐานรองในระบบสเป็คเตอร์ในขณะที่กำลังสร้างฟิล์มบางโครเมียมได้

3. โครเมียมสามารถสร้างบนซิลิคอนชนิดพีได้ และสามารถสร้างเป็นรอยต่อช็อคกีย์ได้ ซึ่งโฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ต้องการรอยสัมผัสช็อคกีย์สองรอยต่อ

โดยจะศึกษากำแพงช็อคกีย์ช็อคกีย์, ศึกษาลักษณะสมบัติกระแสมีด – แรงดันของ Cr/p-Si/Cr, ศึกษาลักษณะสมบัติกระแสแสง – แรงดันของ Cr/p-Si/Cr และศึกษา 4 เงื่อนไขของการสเป็คเตอร์ที่มีผลกับรอยต่อ ได้แก่ กำลังการสเป็คเตอร์, ความดันของก๊าซอาร์กอน, เวลาในการสเป็คเตอร์, และอุณหภูมิฐานรอง

จากการวัดคุณสมบัติการเป็นช็อคกีย์ไดโอด Cr/p-Si และ Cr/n-Si มีแรงดันภายในของตัวอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง ( $V_{bi}$ ) มีค่าอยู่ที่ 0.36 โวลต์ และ 0.32 โวลต์ ส่วนค่าความสูงของกำแพงช็อคกีย์ช็อคกีย์ ( $\phi_{bp}, \phi_{bn}$ ) ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.67 โวลต์ และ 0.7 โวลต์

เมื่อแสงมาตกกระทบอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงก็จะมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงมากขึ้นตามความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้น โดยค่าของกระแสแสงจะเพิ่มเป็นเชิงเส้น ซึ่งเหมาะที่จะเป็นตัวตรวจวัดแสง โดยเงื่อนไขการสเป็คเตอร์ที่กำลัง 50 W ความดัน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลา 30 min อุณหภูมิฐานรอง 25 °C เหมาะสมที่สุด โดยมีค่ากระแสรั่วลดลงและสามารถตอบสนองต่อแสง

เอกได้ตีพิมพ์เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาการลดกระแสรั่วจากเทคนิคการสปีดเตอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังในการสปีดเตอร์ พบว่าเมื่อกำลังสปีดเตอร์มีค่ามากขึ้นค่ากำลังของศักย์ช็อคก็จะมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการบอมบ์บาร์ดที่ผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งเข้าชนขั้วแอโนดซึ่งเป็นฐานรองเวเฟอร์มากขึ้น ส่งผลให้มีสถานะผิวมากขึ้น ทำให้เกิดกระแสรั่วมากขึ้น ส่วนความหนาของโครเมียมจะหนาขึ้นเมื่อใช้กำลังในการสปีดเตอร์มากขึ้น เนื่องจากอะตอมอาร์กอนมีพลังงานจลน์มากขึ้นทำให้สามารถวิ่งเข้าชนเป้าโครเมียมให้หลุดออกมาได้มากขึ้น ซึ่งที่กำลัง 50 W เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการลดกระแสรั่วจากเทคนิคการสปีดเตอร์

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความดันในการสปีดเตอร์ พบว่าเมื่อความดันก๊าซของอาร์กอนมีค่ามากขึ้น ค่ากำลังของศักย์ช็อคก็จะมีค่าลดลง และที่ความดันต่ำจะสามารถสร้างฟิล์มได้เร็วขึ้น เพราะจะมีค่าระยะเฉลี่ยปลอดการชน(mean free path) สูงทำให้อะตอมของอาร์กอนไอออนไม่ชนกันเองและมีค่าพลังงานจลน์สูงสามารถวิ่งชนโครเมียมให้ตกลงมาที่ฐานรองได้ ส่งผลให้มีกระแสรั่วน้อยลงเพราะจะมีปริมาณก๊าซอาร์กอนน้อยลง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่จะมาบอมบ์บาร์ดผิวหน้าเวเฟอร์น้อยลงด้วย ส่วนความหนาของโครเมียมจะบางลงเมื่อใช้ความดันในการสปีดเตอร์มากขึ้นเนื่องจากค่าระยะปลอดการชนจะต่ำทำให้เกิดการชนกันเองมากขึ้นของอาร์กอนไอออน ทำให้อาร์กอนไอออนมีพลังงานจลน์น้อยลงทำให้อัตราการเกิดโครเมียมจึงน้อยลงด้วย ซึ่งที่ความดัน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการลดกระแสรั่วจากเทคนิคการสปีดเตอร์

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงเวลาในการสปีดเตอร์ เมื่อใช้เวลาในการสปีดเตอร์มากขึ้น พบว่าค่ากำลังของศักย์ช็อคก็จะมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดเวลาในการบอมบ์บาร์ดจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งเข้าชนขั้วแอโนดซึ่งเป็นฐานรองเวเฟอร์นานขึ้น ส่งผลให้มีสถานะผิวมากขึ้น ทำให้เกิดกระแสรั่วมากขึ้น ส่วนความหนาของโครเมียมจะหนาขึ้นเมื่อใช้เวลาในการสปีดเตอร์มากขึ้น เนื่องจากอะตอมอาร์กอนสามารถตกลงมาเกิดเป็นฟิล์มบางได้มากขึ้น ซึ่งที่เวลา 10 นาทีจะได้ค่ากระแสรั่วที่น้อยที่สุด แต่ความหนาของฟิล์มจะบางมาก เมื่อแสงตกกระทบจะทะลุผ่านขั้วโลหะได้ ซึ่งเราต้องการศึกษาเฉพาะบริเวณช่องรับแสงเท่านั้น ดังนั้นค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 30 min ซึ่งมีความหนาประมาณ 1000 Å ที่แสงไม่สามารถผ่านได้

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิฐานรองมากขึ้น ค่ากำลังของศักย์ช็อคก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเกิดการจัดเรียงตัวของโครงผลึกโครเมียมเอกซ์ทริมและเกิดเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้สถานะที่ผิวมีค่าลดลงทำให้มีกระแสรั่วต่ำลงการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีค่าสภาพต้านทานน้อยลง ส่วนความหนาของโครเมียมจะหนาขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิฐานรองมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากค่าความจุไฟฟ้าพบว่าที่อุณหภูมิฐานรอง 25 °C เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด เพราะมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำที่สุด

เมื่อนำตัวตรวจวัดแสงที่เงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่กำลัง 50 W ความดัน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลา 30 min อุณหภูมิฐานรอง 25 °C พบว่าได้ค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อย และค่าความต้านทานคงที่ ทำให้ค่าคงที่ทางเวลา RC มีค่าน้อย ทำให้ค่าการตอบสนองทางความถี่ของอุปกรณ์มีค่ามากขึ้น

ดังนั้นจากการศึกษาเงื่อนไขการสปีดเตอร์ทั้งหมด 4 เงื่อนไขคือ จะได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ 50 W ความดัน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลา 30 min อุณหภูมิฐานรอง 25 °C ซึ่งเราสามารถลดกระแสรั่วจาก 77  $\mu\text{A}$  เป็น 1  $\mu\text{A}$  คิดเป็น 77 เท่า ในส่วนของ Cr/n-Si/Cr ที่สร้างด้วยเงื่อนไข 50 W ความดัน  $4.5 \times 10^{-3}$  mbar เวลา 30 min อุณหภูมิฐานรอง 25 °C พบว่าสามารถลดกระแสรั่วลงได้จาก 264  $\mu\text{A}$  เป็น 1  $\mu\text{A}$  คิดเป็น 264 เท่า

เมื่อนำตัวตรวจวัดแสงทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีที่สร้างขึ้นในเงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดมาวัดการตอบสนองทางความถี่ โดยการมอดูเลตสัญญาณกระแสสลับด้วยเลเซอร์ พบว่าตัวตรวจวัดแสง Cr/p-Si/Cr สามารถตอบสนองทางความถี่ได้มากกว่า Cr/n-Si/Cr สอดคล้องกับสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ว่าในซิลิกอนชนิดเอ็นมีโฮลเป็นพาหะในการก่อให้เกิดกระแสแสง ส่วนในซิลิกอนชนิดพีมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะในการก่อให้เกิดกระแสแสง โดยอิเล็กตรอนมีค่าความคล่องตัวมากกว่าโฮล

## บรรณานุกรม

- คู่มือ เครื่องาม, สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ : ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการทำงาน เล่ม 1, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2542.
- สมเกียรติ สุขเกษ, **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- สมเกียรติ สุขเกษ, **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545.
- Kiyotaka Wasa and Shigeru Hayakawa, **Handbook of sputter deposition technology, and applications**, Noyes Publication.
- E.H. Rhoderick and R.H. Williams, **Metal – Semiconductor Contacts**, Oxford University Press, 1988.
- Graham T. Reed and Andrew P. Knights, **Silicon Photonics An Introduction**, John Wiley & Son Ltd, England, 2004.
- Geraldine Cugin Schwartz, K.V.S, A.B., **Handbook of Semiconductor Interconnection Technology**, 161 – 174, 1998.
- J. Musil, **Low – pressure magnetron sputtering**, Elsevier Science Ltd, Great Britain, 1998.
- The Metal – Semiconductor Junction, Schottky Diode,  
[http://www.mtmi.vu.t/pfk/funkc\\_dariniai/diod/schottky.htm](http://www.mtmi.vu.t/pfk/funkc_dariniai/diod/schottky.htm).
- John L. Vossen and Werner Kern, **Thin Film Process**, Academic Press INC., New York, 1978.
- Heinz K. Henisch, **Semiconductor Contacts An approach to ideas and models**, Clarendon Press, 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้