สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr แบบพลานาร์

# FABRICATION OF PLANAR Cr/n-Si/Cr PHOTODETECTOR

โดย

นายจีราวัฒน์ ปราบแก้ว

นายนุกูล สิงห์ศิลา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 72256
วัน,เดือน,ปี 12 มิ.ย. 2550

.b 11762192
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr แบบพลานาร์

# FABRICATION OF PLANAR Cr/n-Si/Cr PHOTODETECTOR


โดย

นายจีราวัฒน์ ปราบแก้ว รหัส 47015867

นายนุกูล สิงห์ศิลา รหัส 47015879

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ


ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr แบบพลานาร์


ผู้จัดทำ

1. นายจีราวัฒน์ ปราบแก้ว
2. นายนุกูล สิงห์ศิลา

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr แบบพลานาร์

นายจีราวัฒน์ ปราบแก้ว รหัส 47015867
นายนุกูล สิงห์ศิลา รหัส 47015879
ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ (อาจารย์ที่ปรึกษา)
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr ในแนวระนาบ ตัวตรวจวัดแสงมีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 ไมโครเมตรถึง 500 ไมโครเมตร โดยโครเมียมจะถูกสร้างบนแผ่นซิลิคอนชนิด n ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริ่งแล้วทำการเปิดช่องรับแสงด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี จากนั้นนำไปตรวจวัดสมบัติ กระแส-แรงดัน เมื่อไม่มีแสงมาตกกระทบตัวตรวจวัดแสงจะมีกระแสไหลผ่านตัวตรวจวัดแสงน้อย และเมื่อมีแสงมาตกกระทบกระแสก็จะไหลผ่านมากขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ จะพบว่ากระแสแสงจะเกิดในบริเวณปลอดพาหะ และเกิดทั้งในบริเวณนิวทรัล แต่กระแสแสงส่วนใหญ่จะเกิดจากบริเวณปลอดพาหะ โดยกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นจากบริเวณนิวทรัลจะเกิดจากผลกระทบจากการแพร่ภายในเนื้อสาร ส่วนกระแสที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ปลอดพาหะ ซึ่งพื้นที่บริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบอัสที่ให้และสภาพความต้านทานของฐานรอง(n-Si) จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปอธิบายการเกิดกระแสโฟโตของตัวตรวจวัดแสงชนิด Cr/n-Si/Crได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Fabrication of Planar Cr/n-Si/Cr Photodetector

Mr. Jerawat Prabkaeo Student ID 47015867

Mr. Nukool Singsila Student ID 47015879

Assist.Prof.Dr. Surasak Niemcharoen (Advisor)

Educational Year 2006

## Abstract

The purpose of this thesis is to present the design fabrication and characteristic of MSM Cr/n-Si/Cr in planar structure Cr contact semi. Will be Schottky borrier. In fabrication process is not require sintering so it reduce dark current. Electrode spacing of photodetector is 20 um to 1000 um Cr are form on n-si by sputtering process and make single slit by photolithography process Then, Take device to neasurement I-V choracteristic in dark condition and under light condition. To find out that phetocurrent will be generated in depletion region and neutral region but almost photocurrent will begenerated in depletion region and under light current will increase follow intersity of light incidence. . Photocurrent from neutral region due to carriers optically generated in neutral region within the diffusion length of substrate. On the other hand, photocurrent from depletion region reflects the applied bias and resistivity of silicon substrate. The experimental results can be explained photocurrent generation of Cr/n-Si/Cr photodetector.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อ | I |
| สารบัญ | III |
| สารบัญรูป | V |
| สารบัญตาราง | VII |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีในสารกึ่งตัวนำและตัวตรวจวัดแสง | 4 |
| 2.1 ลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ | 4 |
| 2.1.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง | 4 |
| 2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | 5 |
| 2.2 การรวมตัวใหม่ และการเกิดพาหะในสารกึ่งตัวนำ | 6 |
| 2.2.1 นิยาม | 6 |
| 2.2.2 กระบวนการ R-G (Recombination-Generation Process) | 6 |
| 2.3 โลหะโครเมียมและโครเมียมผสม | 9 |
| 2.4 กระบวนการโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ | 10 |
| หลักการพลาสมา | 11 |
| หลักการพื้นฐาน การสปัตเตอร์ | 13 |
| อาร์เอฟ ไดโอดสปัตเตอร์ RF Diode Sputtering | 16 |
| 2.5 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ | 18 |
| 2.5.1 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนสัมผัส | 19 |
| 2.5.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | 20 |
| 2.6 สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง | 25 |
| 2.6.1 โฟโตดีเทคเตอร์หรือตัวตรวจวัดแสง | 25 |
| 2.6.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ | 26 |
| 2.6.3 สภาวะสมดุลความร้อนของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM | 27 |
| 2.6.3.1 ขณะได้รับแรงดันไบอัส | 28 |
| 2.6.3.2 ขณะได้รับแสงตกกระทบ | 29 |
| 2.6.3.3 กระบวนการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr | 30 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัส 31
2.6.3.5 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส 31
2.6.4 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น 33
2.6.5 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n 35
2.6.6 โฟโตไดโอดแบบอะวาลันซ์ 36
บทที่ 3 การออกแบบการสร้างและการทดลอง 38
3.1 โครงสร้าง 38
3.2 กระบวนการสร้าง 39
3.3 การทดลอง 42
3.3.1 การศึกษากำแพงศักย์ 42
3.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน 42
3.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน 43
3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดันในแบบสัญญาณกระแสตรง 43
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง 44
4.1 ผลการทดลองกำแพงศักย์ช็อตกีย์ 44
4.2 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ในแบบสัญญาณกระแสตรง 46
4.2.1 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบในสัญญาณกระแสตรง 46
4.2.2 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในขณะได้รับแสงตกกระทบในสัญญาณกระแสตรง 47
4.2.3 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20,40,100,500 μm 50
4.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr 53
4.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่ขึ้นกับแรงดันไบอัส 54
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 56
บรรณานุกรม 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป


| รูปที่ | หน้า |
|---|---|
| 1.1 โครงสร้างโลหะ- สารกึ่งตัวนำ -โลหะ (MSM) (ก) ภาพด้านบนโครงสร้าง MSM (ข) ภาคตัดขวางโครงสร้าง MSM | 2 |
| 2.1 ความสัมพันธ์สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง | 4 |
| 2.2 การไอออไนซ์ ของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค | 6 |
| 2.3 (ก) การเกิดพาหะโดยตรง (ข) การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ | 7 |
| 2.4 (ก) การเกิดพาหะโดยอ้อม (ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ | 8 |
| 2.5 ตำแหน่งของระดับ R-G center ที่เกิดจากอะตอมสารเจือในซิลิคอน | 9 |
| 2.6 ขั้นตอนทางฟิสิกส์ของการสปัตเตอร์ริ่งของอนุภาค | 10 |
| 2.7 การเกิดโกลด์ดิสชาร์ทชนิดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงกับค่ากระแสดิสชาร์ท | 11 |
| 2.8 บริเวณการเกิดแถบมืดและแถบสว่างของ abnormal glow discharge | 12 |
| 2.9 ระบบสปัตเตอร์ | 14 |
| 2.10 โครงสร้างทางฟิสิกส์ของสปัตเตอร์ | 15 |
| 2.11 ลักษณะเกิด Dark space ที่สภาวะต่างๆ | 15 |
| 2.12 ระบบสปัตเตอร์แบบความถี่วิทยุ | 16 |
| 2.13 (ก) รอยสัมผัสโอห์มิค (ข) รอยสัมผัสเรคติไฟร์ | 18 |
| 2.14 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงาน | 19 |
| 2.15 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | 20 |
| 2.16 (ก) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (ข) สนามไฟฟ้า | 22 |
| 2.17 (ก) การให้ไบอัสตรง และสัญลักษณ์ ของช็อตกีย์ไดโอ (ข) แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสตรง | 23 |
| 2.18 (ก) การให้ไบอัสย้อนกลับ แก่ช็อตกีย์ไดโอด และ (ข) แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ ในกรณีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | 24 |
| 2.19 สมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | 25 |
| 2.20 โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM | 27 |
| 2.21 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน | 28 |
| 2.22 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบอัส | 29 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)


| รูปที่ | หน้า |
|---|---|
| 2.23 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ | 30 |
| 2.24 ลักษณะของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr มื่อมีแสงตกกระทบเมื่อได้รับไบอัส | 31 |
| 2.25 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส | 32 |
| 2.26 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM | 33 |
| 2.27 (ก) แสดงโครงสร้างภาคตัดขวาง (ข ) สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น | 34 |
| 2.28 การเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด | 35 |
| 2.29 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n | 36 |
| 2.30 โฟโตไดโอดแบบอะวาลันช์ที่สร้างจากซิลิคอน | 37 |
| 3.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr | 38 |
| 3.2 ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr | 41 |
| 3.3 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่สร้างเสร็จแล้ว | 41 |
| 3.4 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองหาค่าแพงศักย์ช็อตกีย์ | 42 |
| 3.5 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน | 42 |
| 3.6แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน | 43 |
| 3.7แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง | 43 |
| 4.1ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์ ขณะไบอัสตรงและขณะไบอัสย้อนกลับ | 44 |
| 4.2 การหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะไบอัสตรง | 45 |
| 4.3 การหาค่า $J_0$ จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์ | 45 |
| 4.4 กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้แสงตกกระทบ | 47 |
| 4.5 ตัวตรวจวัดแสงได้แสงตกกระทบน้อย | 48 |
| 4.6 ตัวตรวจวัดแสงได้แสงตกกระทบมาก | 48 |
| 4.7 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm เมื่อได้รับแรงดันไบแอส 3,7 และ 10โวลท์ | 49 |
| 4.8 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 40 μm เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน | 50 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน 51
4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 500 μm 51
4.11 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า ระหว่าง 20 ถึง 500 μm 52
4.12 แผนภาพแถบพลังงานของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส 53
4.13 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 และ 500 μm 54
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ 55
4.15 ความกว้างปลอดพาหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | หน้า |
|---|---|
| 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะโครเมียม | 10 |
| 2.2 ค่าฟังก์ชั่นงานของโลหะชนิดต่างๆ | 19 |




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

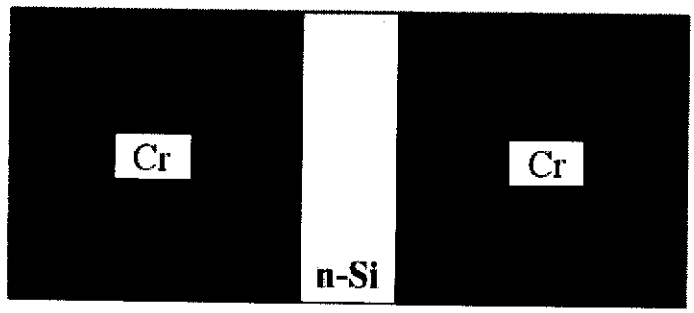
## ความสำคัญของโครงงาน

ปัจจุบันนี้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงเป็นหนึ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสามารถของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีการทำงานได้รวดเร็ว แม่นยำ มีเสถียรภาพดี ใช้กำลังงานน้อย และมีราคาที่ลดลงจึงได้รับความสนใจมาก ในปัจจุบันนี้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมาก เช่น การส่งผ่านข้อมูลผ่านเส้นใยแก้วนำแสง โดยใช้เซ็นเซอร์แสง เป็นต้น

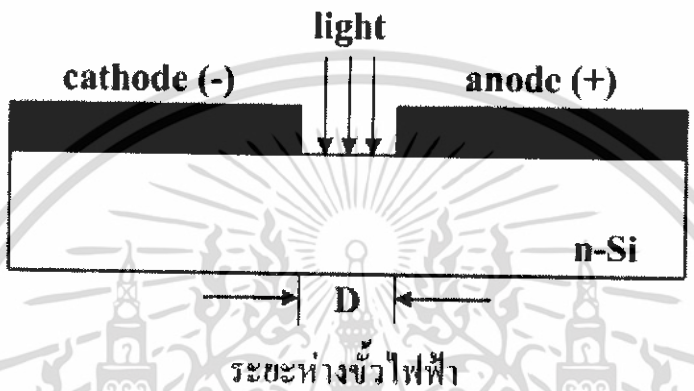
ตัวตรวจวัดแสง (Photodetector) มีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งตัวตรวจวัดแสงมีหลายลักษณะโดยแบ่งออกกว้างๆ ได้เป็น 2 กลุ่มคือ โฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductor) และโฟโตไดโอด (photodiode) สำหรับโฟโตไดโอดอาจจะแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้แก่ พี-เอ็นโฟโตไดโอด พินไดโอด อะวาลันช์โฟโตไดโอด และช็อตกีย์โฟโตไดโอด โฟโตไดโอด โครงสร้าง โลหะ- สารกึ่งตัวนำ -โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal: MSM) เป็นโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มของช็อตกีย์โฟโตไดโอด และกำลังได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน

ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอนนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ตัวอย่าง เช่น การสื่อสารด้วยแสง ซึ่งรวมถึงการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงในระยะใกล้ และการสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้เซ็นเซอร์แสง และระบบจัดเก็บข้อมูลโดยใช้แสงในการอ่าน และบันทึกข้อมูล เป็นต้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Type) และได้เลือกใช้โลหะโครเมียมในการทดลองเพราะโลหะโครเมียมมีสมบัติที่ดีเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอลูมิเนียม คือไม่ต้องใช้กระบวนการซินเตอร์ริ่ง ลดขั้นตอนในกระบวนการสร้าง ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายลง นอกจากนี้โลหะโครเมียมยังมีความแข็งแรงมากกว่าอลูมิเนียมสามารถทนต่อแรงขีดข่วนหรือเกิดการทะลุในขณะการวัด มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงกว่าอลูมิเนียมเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิสูง และมีความสเถียรภาพมากกว่าอลูมิเนียม ดังนั้นจึงเลือกเอาโลหะโครเมียมที่มีความแข็งแรงสูงเป็นขั้วสร้างรอยต่อช็อตกีย์ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริ่งโดยในโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะออกแบบเป็นรูปร่างช่องรับแสงแบบสลิตเดี่ยวที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ก)




(ข)

**รูปที่ 1.1** (ก) ภาพด้านบนโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr
(ข) ภาคตัดขวางโครงสร้าง MSM

โครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal) หรือโครงสร้าง MSM ที่สร้างจาก Cr/n-Si/Cr เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานทางด้านการตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ คือ มีโครงสร้างที่ง่าย ความจุไฟฟ้าต่ำ มีกระแสมืดต่ำ ไม่ต้องใช้กระบวนการซินเตอร์ริ่ง มีสภาพการตอบสนองที่ดีมีการทำงานด้วยความเร็วสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญสามารถทำเป็นวงจรรวมได้ง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบพลานาร์ (planar) และกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟต (Field Effect Transistor: FET) จึงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ได้รับความสนใจอย่างมากตัวหนึ่ง

## วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้สารกึ่งตัวนำแบบซิลิคอนชนิดเอ็นและโลหะโครเมียมซึ่งทำให้เกิดรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์
2. เพื่อศึกษาขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n- Si/Cr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติ กระแสแสง-แรงดัน ของโฟโตไดโอด ชนิด Cr/n-Si/Cr
4. เพื่อศึกษาโครงสร้างที่มีผลต่อลักษณะสมบัติ กระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Cr/n-Si/Cr
5. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทางความถี่ และการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส

**ขอบเขตของโครงงาน**

เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงงาน ดังนั้นขอบเขตของโครงงานจึงเริ่มต้นด้วยจากการศึกษาโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบสลิตเดี่ยวโดยใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมแบบพลานาร์ในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Cr/n-Si/Cr จะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นเคลือบฟิล์มโลหะโครเมียมบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยใช้วิธีการสปัตเตอร์ริ่ง นำไปทำการโฟโตลิโทกราฟฟี ( photolithography) และอิชชิ่ง ( etching) ให้ออกมาเป็นขั้วไฟฟ้าแบบสลิตเดี่ยวที่มีขนาดระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ต่าง กัน เพื่อศึกษาผลตกกระทบของพารามิเตอร์ในโครงสร้างแบบสลิตเดี่ยว ของโฟโตไดโอด ลักษณะการวัดเมื่อถูกฉายแสงของโฟโตไดโอดชนิด Cr/n-Si/Cr ในแบบสัญญาณกระแสตรง ( direct current : idc )จะวัดในลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน และนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงโครงสร้าง MSM แบบ Cr/n-Si/Cr ที่ดีต่อไป

**ขั้นตอนของการศึกษา**

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แบบ Cr/n-Si/Cr
2. ศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสง รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง MSM แบบ Cr/n-Si/Cr
3. ศึกษาขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบ Cr/n-Si/Cr
4. ศึกษาผลตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด Cr/n-Si/Cr ในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในแบบสัญญาณกระแสตรง (และลักษณะสมบัติความจุของประจุไฟฟ้ากับแรงดัน)
5. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการสร้าง และพารามิเตอร์ต่างๆ ให้ได้ตัวตรวจวัดแสงที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

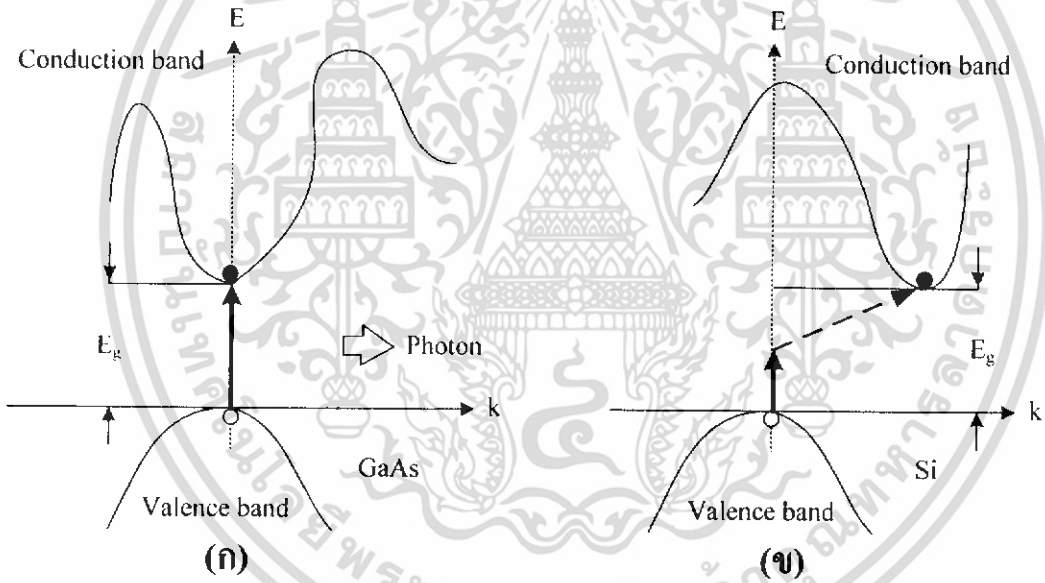
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 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" (in direct band gap semiconductor)




รูปที่ 2.1 (ก) ความสัมพันธ์สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและ (ข) ช่องแถบไม่ตรง

สมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้ จะแตกต่างกันมาก เช่น สมบัติทางด้านแสง (optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบช่องตรง พลังงานของโฟตอน (Photon) จากแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ $h\upsilon$ สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอน จากจุดสูงสุดของแถบวาเล็นซ์ ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง (Direct) และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม และกรณีนี้จะมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

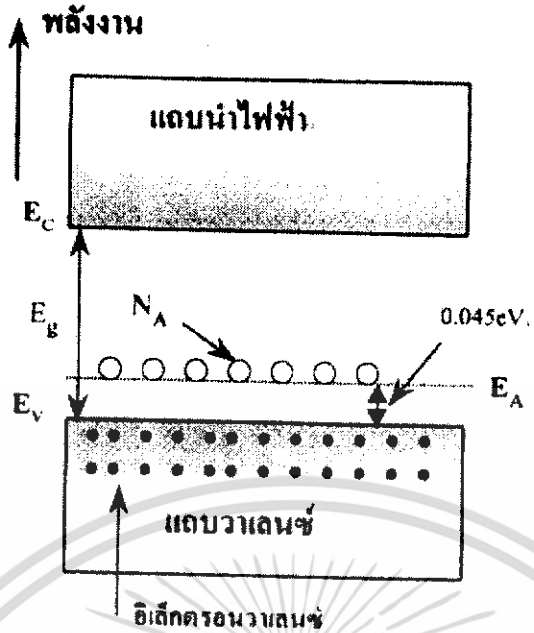
ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้า ไม่สามารถตกลงมา ยังแถบวาเล็นซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนพลังงานก่อน ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงลดลงมาสู่แถบวาเล็นซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปของความร้อน จึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้น ในทำนองเดียวกัน พลังงานโฟตอนจากแสง ก็ไม่สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเล็นซ์ ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยง่าย ถึงแม้ว่าพลังงานจากโฟตอนจะมีค่ามากเพียงพอก็ตาม แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสถานะ อย่างไรก็ดี การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเล็นซ์ และแถบนำไฟฟ้า ในกรณีนี้จะเกิดได้ดีขึ้น ถ้าหากในช่องวางพลังงานนั้นมีระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานใดๆ ปรากฏอยู่ ซึ่งจะช่วยทำให้โอกาสที่จะเกิดกระบวนการนี้เป็นไปได้มากขึ้น ดังนั้น การดูดกลืน หรือคายพลังงานแสง ของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ดีขึ้น แต่ด้อยกว่าสารกึ่งตัวนำแบบแถบช่องตรง

**2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น**

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หมายถึง สารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยอะตอมฟอสฟอรัส สารกึ่งตัวนำเช่นนี้ จะเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ ซึ่งเรียกว่า "สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค" (Extrinsic semiconductor)

ที่อุณหภูมิซึ่งสูงกว่าศูนย์องศาเคลวิน นอกจากจะมีการไอออไนซ์ของอะตอมสารเจือผู้ให้แล้ว อะตอมสารกึ่งตัวนำบางอะตอม หรือบางส่วนก็อาจเกิดมีการไอออไนซ์ได้ด้วย และทำให้ได้คู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แต่การไอออไนซ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำเหล่านี้จะมีค่าสูงไม่น้อยกว่าขนาดช่องว่างพลังงาน ($E_g$) และเนื่องจากการไอออไนซ์ของอะตอมสารเจือผู้ให้ จะทำให้เกิดเฉพาะอิเล็กตรอนอิสระเท่านั้น แต่จะไม่มีโฮลเกิดขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิห้อง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของโฮลมาก หรือ n >> p กรณีนี้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ จึงเป็นพาหะส่วนมาก (majority carrier) และ สารกึ่งตัวนำชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า "สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น" (n-Type Semicondutor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.2 การไอออไนซ์ ของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค

## 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) "

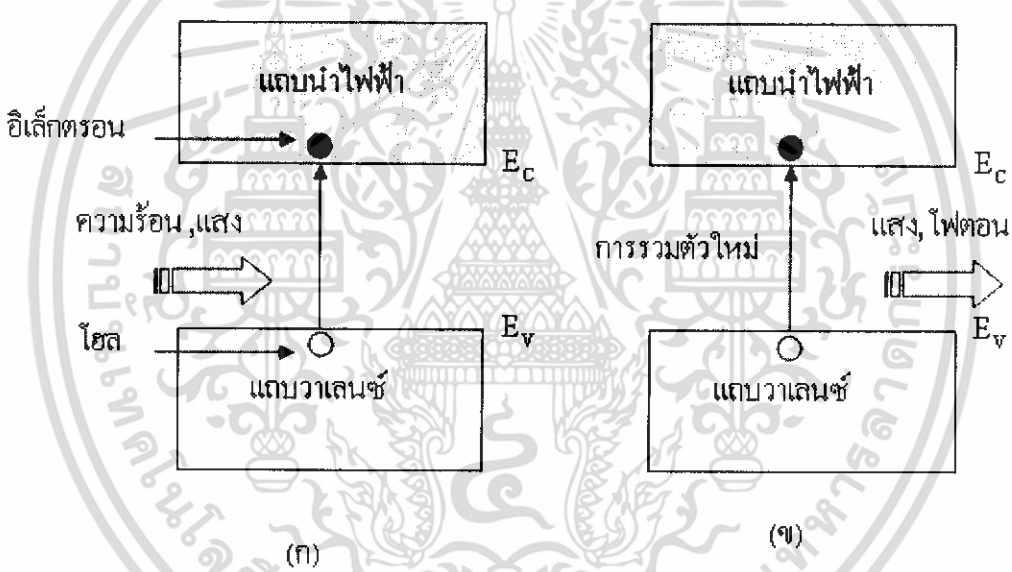
### 2.2.2 กระบวนการ R-G (Recombination-Generation Process)

โดยทั่วไป กระบวนการ R-G ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ อาจพิจารณาจัดแบ่งเป็นแบบใหญ่ๆ ได้ 2 แบบ ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**(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 ลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลน์โดยตรง ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระ และโฮลหายไป คล้ายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะ กระบวนการเกิดและรวมตัวของพาหะเช่นนี้ถูกเรียกว่า "กระบวนการ R-G โดยตรง"



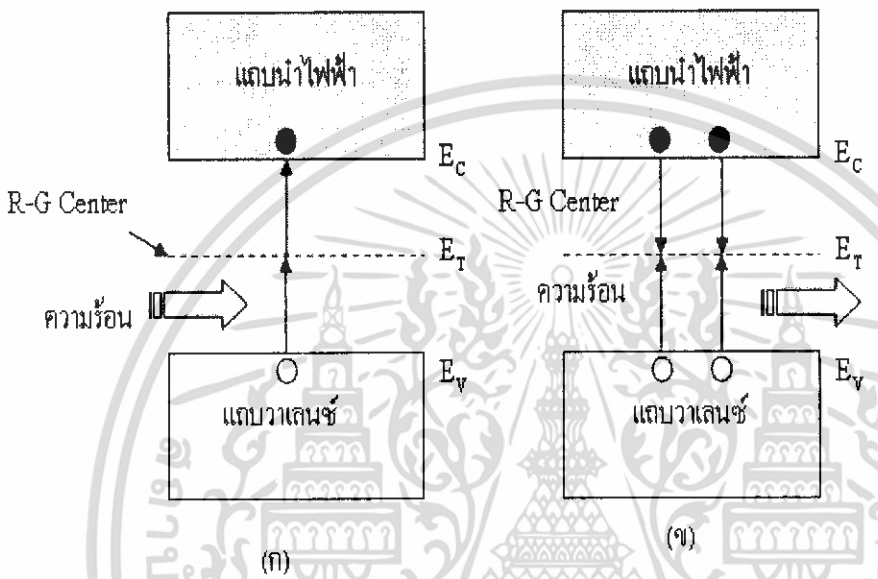

**รูปที่** 2.3 (ก) การเกิดพาหะโดยตรง (ข) การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ

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

จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) เช่น ซิลิคอน เยอรมันเนียม โดยเมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ ได้รับพลังงาน จะมีการย้ายระดับพลังงานแต่ไม่สามารถที่จะข้ามช่องแถบพลังงาน $E_g$ ไปยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง แต่จะเกิดขึ้นเป็นสองขั้นตอน โดยในขั้นแรกอิเล็กตรอนจะอาศัยระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นที่พักก่อนที่จะข้ามต่อไปยังแถบนำไฟฟ้า และในทางกลับกันการรวมตัวใหม่โดยอ้อมก็คือกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยอ้อมนั่นเอง โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้า จะลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่ง ที่อยู่ในช่องว่างพลังงาน ก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเล็นซ์ในที่สุด ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ถูกเรียกว่า "การเกิดและการรวมตัวโดยอ้อมของพาหะ" หรือ "กระบวนการ R-G โดยอ้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.4

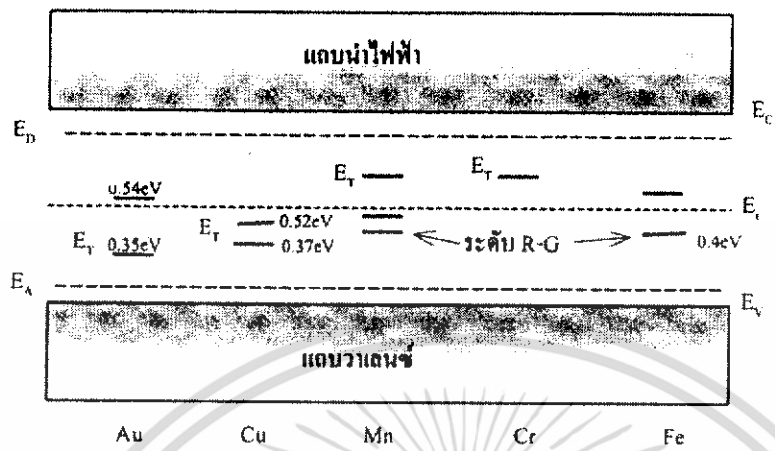



**รูปที่** 2.4 (ก) การเกิดพาหะโดยอ้อม (ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ

ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาและอาจมีผล ทำให้มีการสั่นของแลททีสได้ (lattice vibration) และการสั่นของแลททีสจะทำให้การปลดปล่อยพลังงาน ออกมาในที่สุด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่** 2.5 ตำแหน่งของระดับ R-G center ที่เกิดจากอะตอมสารเจือในซิลิคอน

## 2.3 โลหะโครเมียมและโครเมียมผสม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.1** คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะโครเมียม

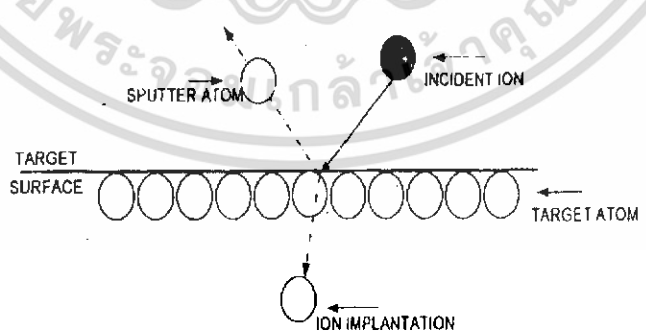
| | |
|---|---|
| น้ำหนักอะตอม | 52 |
| ระบบโครงสร้าง | Body-centered cubic A = 2.8844 – 2.8848 A |
| ความหนาแน่น (20 °C), g/cm3 | 7.19 |
| อุณหภูมิหลอมเหลว | 1875 °C |
| อุณหภูมิเดือดกลายเป็นไอ | 2199 °C |
| ความร้อนจำเพาะ (25 °C) | 0.123 cal/g °C |
| ความร้อนของแฝงของการหลอมละลาย | 3.2-3.5 kcal/mole |
| สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20 °C) | $6.2 \times 10^{-6}$ |
| ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20 °C) | 12.9 microhm/cm. |

## 2.4 กระบวนการโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์

### การสปัตเตอร์

การสปัตเตอร์ คือ เมื่อผิวของแข็งถูกชน (bombarded) ด้วยอนุภาคที่มีพลังงาน เช่น อะตอมของแข็งที่มีความเร่งที่เกิดจากการชนของอนุภาคระหว่างอะตอมในพื้นผิวและอะตอมที่มีพลังงานดังแสดงในรูป 2.6 ปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า "back-splluttering" เมื่อเป้าถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงาน (ความเร่ง) อนุภาคที่จะเคลื่อนที่ผ่านไปในเป้านี้ จะเกิด ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "tranemission-spluttering"

คำว่า "spluttering" จะเป็นรากศัพท์ของคำว่า "sputtering" ที่ให้ความหมายเดียวกับ "cathode sputtering" , "cathode disintegration" และ "impact varporation"




**รูปที่ 2.6** ขั้นตอนทางฟิสิกส์ของการสปัตเตอร์ริ่งของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หลักการพลาสมา**

การดิสชาร์ทของก๊าซในกระบวนการสปัตเตอร์ริ่ง ซึ่งเป็นการพิจารณาที่ diode gas discharge tube ของค่าแรงดันต่ำสุดที่ไม่เกิดการดิสก์ชาร์ท ซึ่งก็คือ แรงดันพังทลายหรือแรงดันที่เกิดการ spark voitage $V_S$ โดยที่

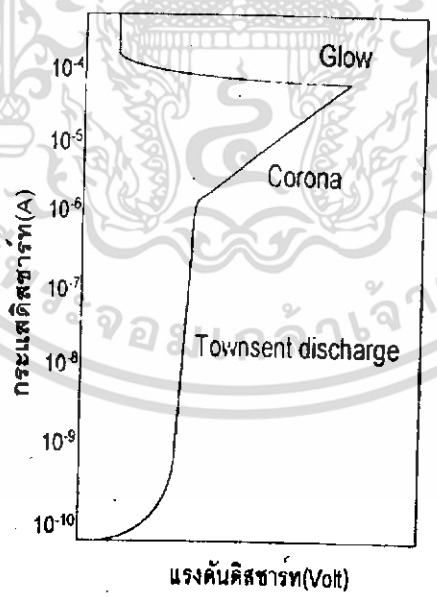
$$V_S = a\frac{pl}{\log pl + b} \qquad (2.1)$$

เมื่อ $p$ คือความดันก๊าซ $l$ คือ ระยะห่างระหว่างคู่อิเล็กโตรด โดยที่ $a$ และ $b$ เป็นค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง spark voltage $V_S$ และแรงดัน $p$ จะเป็นไปตามกฎ ของ pasche's law ดังกล่าวจะแสดงในรูป 2.17 ซึ่งจะแสดงค่าที่เกิด spark voltage ต่ำสุด ที่แรงดัน

โดยทั่วไปในระบบสปัตเตอร์ ริ่งจะรักษาความดันให้ต่ำกว่า เมื่อเริ่มให้เกิดการดิสชาร์ทค่าความดันของก๊าซ จะขึ้น อยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรด

$$p_S = \frac{\lambda_o}{l} \qquad (2.2)$$

เมื่อค่า $\lambda_o$ คือค่า mean free path ของอิเล็กตรอนในอนุภาคก๊าซจะเริ่มเกิดที่ความดันต่ำ ด้วยการป้อนกระแสตรงผ่านตัวต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าสูง ซึ่งมีอยู่หลายช่วงการเกิดดังแสดงรูป 2.7



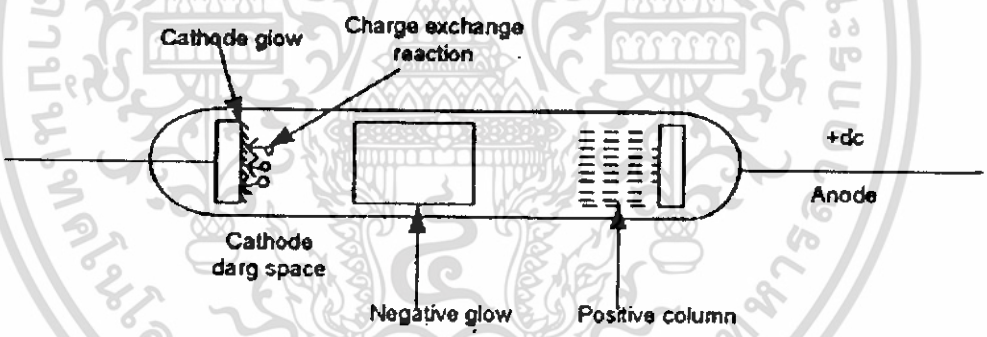

**รูปที่ 2.7** การเกิดโกลด์ดิสชาร์ทชนิดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงกับค่ากระแสดิสชาร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดการดิสชาร์ทในช่วงความหนาแน่นกระแสต่ำกว่า 0.1 mA/cm$^2$ จะเกิดการดิสชาร์ทแบบเรืองแสงจะเกิดขึ้นใกล้ขั้วอาโนด เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิด space charge ที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งไม่มีความสำคัญต่อโกล์ดดิสชาร์ทมากนัก

การเกิดดิสชาร์ทในช่วงกระแสสูงกว่า 1.1 mA/cm$^2$ จะเกิดดิสชาร์ทแบบเรืองแสงจะเกิดขึ้นใกล้ขั้วคาโธด ซึ่งการเกิดโกล์ดดิสชาร์ทในเงื่อนไขนี้จะมีความสำคัญต่อ space charge มาก

หลังการไอออนไนเซชั่นในการดิสชาร์ทก๊าซ จะเกิดขึ้นเมื่อ อิเล็กตรอนเกิดการปะทะด้วยโมเลกุลของก๊าซ ผลึกจะถูกไอออนไนและเกิดเป็นประจุบวกเกิดขึ้น พลังงานของอิเล็กตรอนควรจะมากกว่าพลังไอออไนเซชั่นของโมเลกุลก๊าซ เมื่อเริ่มเกิดการดิสชาร์ทอิเล็กตรอนจากขั้วคาโธดจะถูกแรงของสนามไฟฟ้าใกล้ๆกับคาโธดและพลังงานที่เกิดจากพลังงานไอออนไนเซชั่นของโมเลกุลของก๊าซ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานนี้จะปะทะกับโมเลกุลก๊าซและเกิดเป็นอิออนบวกก่อนจะไปชนกับผิวคาโธด การชนของประจุบวกกับผิวคาโธดจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอันดับสองจากผิวคาโธด การไอออนไนเซชั่นจนเกิดการดิสชาร์ท ดังแสดงในรูป 2.7 การดิสชาร์ทจะเกิดเมื่อกระแสดิสชาร์ทมีค่ามากกว่า $10^9$ Å




**รูปที่ 2.8** บริเวณการเกิดแถบมืดและแถบสว่างของ abnormal glow discharge

การเกิด dark space จะเกิดที่ด้านหน้าของผิวคาโธดและในช่วงที่อิเล็กตอรนอันดับสองถูกเร่งจากขั้วคาโธด ความกว้างของ dark space จะแปรผันกับความดันก๊าซ $pd \cong$ constant

ความกว้างของ dark space คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดการไอออนไนเซชั่น ซึ่งจะต้องใช้อิเล็กตรอนอันดับสองที่มีค่ามากพอที่จะเกิดการดิสชาร์ท และยังเป็นตัวกำหนดความดันที่ใช้ความกว้างของ cathode dark space จะมีค่าประมาณ 2cm (champman,1980)นอกจากนี้ประจุบวกใน dark space การเรืองแสงที่เรียกกว่า negative glow ในบริเวณนี้จะเริ่มเกิดเป็นไอออนบวก ($Ar^+$) เกิดขึ้นในช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

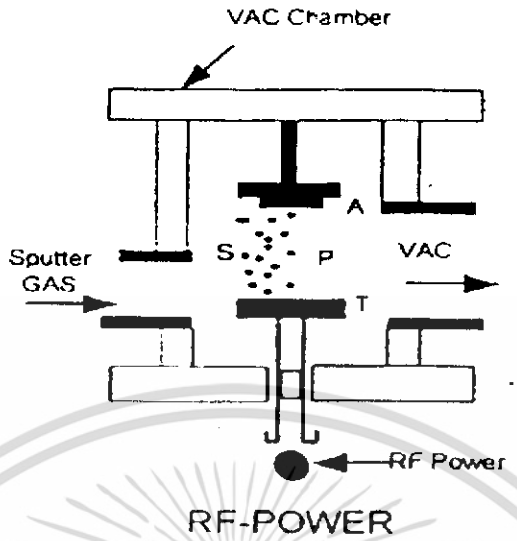
faraday dark space และ positive column จะเชื่อมโยงกับบริเวณที่เกิด negative glow ซึ่งจะเป็นพื้นที่ของสนามอิสระ

**หลักการพื้นฐาน การสปัตเตอร์**

การสปัตเตอร์ เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูก ทำให้หลุดออกมาด้วย การชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาค ที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรืออนุภาคที่มีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในการสปัตเตอร์คือ

1. มีสารเคลือบเป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นรองรับ
2. มีอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจจะเป็นกลางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงระหว่าง 10 ถึง 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อใช้ในการสปัตเตอร์ทำได้ค่อนข้างยาก จึงใช้วิธีการเร่งประจุภายใต้สนามไฟฟ้าแทน ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ง่ายต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของเป้าสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอร์เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการชนระหว่างสองอนุภาคที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงเลือกการเร่งไอออนบวกของก๊าซ ($Ar^+$) ในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งทำให้อัตราการปลดปล่อยอนุภาคของสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ
3. อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มเคลือบตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนโกลว์ดิสชาร์ท (glow discharge)

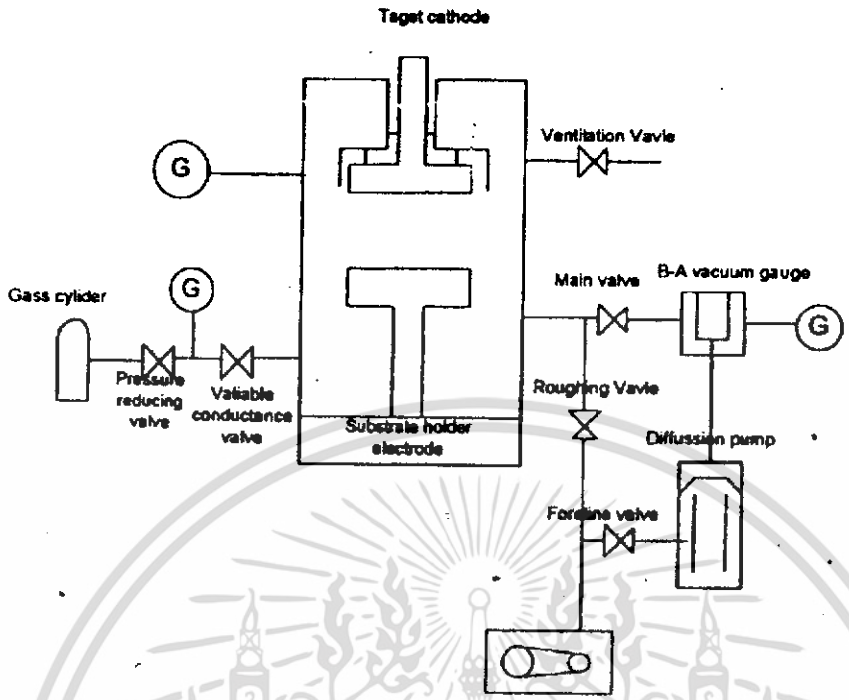
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



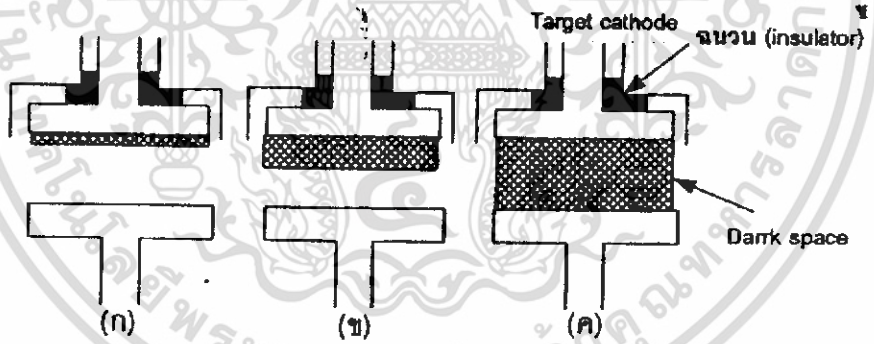

**รูปที่ 2.9** ระบบสปัตเตอร์ A คือขั้วอาโนด T คือ เป้าเคลือบสาร (target) S คือ ฐานรองรับวัสดุสปัตเตอร์ $p$ คือ บริเวณพลาสมา

เทคนิคสปัตเตอร์ เป็นการเคลือบสารในสุญญากาศอีกวิธีหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการของการสร้างวงจรรวม สำหรับโลหะที่นิยมใช้เคลือบได้แก่ Al, Ti, Pt, Au, Mo, W, N และ Co หลักการที่ใช้ของระบบ sputtering อาจจะเป็น DC หรือ RF discharge ในระบบไดโอด ดังแสดงระบบโครงสร้างทางฟิสิกส์ไว้ในรูปที่ 2.18 ภายใน chamber ของระบบจะเป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอนที่ความดันประมาณ $103\times10^{-2}$ Torr ซึ่ง sputter เป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ไฟฟ้าแรงสูงลบที่ขั้ว cathode มีสารที่ใช้เคลือบติดอยู่เกิดการดิสชาร์ท ระหว่าง chamber สุญญากาศกับฐานรองจะใช้ศักดาไฟฟ้ามีค่าประมาณ 2-4 KV การดิสชาร์ทจะทำให้อะตอมของอาร์กอนแตกออกเป็นอิออน$Ar^{+}$ และอิออนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งของสนามไฟฟ้า ไปกระทบกับเนื้อสารที่ขั้วคาโธดทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าของสารเคลือบจะเกิดการตกผลึกและเคลือบที่ผิวฐานรอง จึงทำให้เกิดฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีความหนาอย่างสม่ำเสมอและปริมาณของสิ่งเจือปนจะขึ้นอยู่กับความกว้าง dark space ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.10** โครงสร้างทางฟิสิกส์ของสปัตเตอร์




**รูปที่ 2.11** ลักษณะเกิด Dark space ที่สภาวะต่างๆ (ก) ที่ความดันของก๊าซสูง (ข) ที่ความดันของก๊าซปานกลาง (ค) ที่ความดันของก๊าซต่ำ

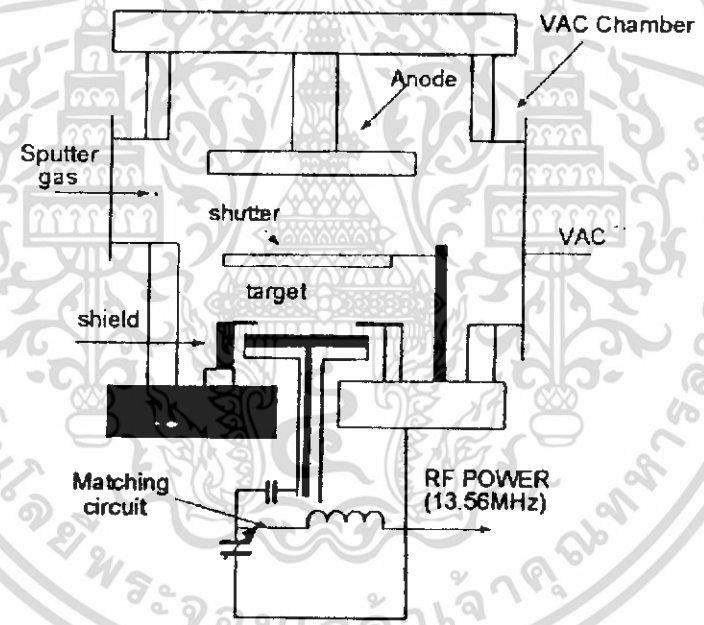
เมื่อความต้องการของ drak space น้อยเกินไปดังรูปที่ 2.11 (ก) เกิดขึ้นเนื่องจากความดันของก๊าซในchamber มีค่ามากเกินไปจะทำให้ไอออนที่เกิดขึ้นกระทบด้านหลัง ด้านข้างของคาโธดและของ shield ทำให้เกิดสารเจือที่ไม่ต้องการมาเคลือบฐานรองด้วย แต่เมื่อ dark space กว้างเกินไปในรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 (ค) เกิดขึ้นเนื่องจากความดันก๊าซใน chamber มีค่าที่ต่ำเกินไป ปกติการดิสชาร์ทในกรณีนี้จะเกิดขึ้นได้ยากและถ้าเกิดขึ้นได้จะไม่มีการเสถียรภาพ ดังนั้นดิสชาร์ทในระบบปัตเตอร์จึงจะขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ เนื้อสารที่ใช้เคลือบและระยะห่างระหว่างคาโธดอัตราการเคลือบสารวิธีนี้จะใช้เวลานานกว่าเทคนิคอื่น แต่เหมาะสำหรับใช้ในการเคลือบสารหลอมเหลวสูงและต้องการให้ชิ้นของสารที่เคลือบมีความบางมากๆ ที่สามารถควบคุมได้ในขณะเคลือบ

**อาร์เอฟ ไดโอดสปัตเตอร์ RF Diode Sputtering**

การสปัตเตอร์ใน RF –discharge นั้น การสปัตเตอร์ในการดิสชาร์ทที่คลื่นความถี่วิทยุ ได้พบใน 1960 พบว่าจะเกิดผิวแก้วเคลือบท่อดิสชาร์ทสปัตเตอร์ในระหว่างการเกิด RF-discharge จะใช้สำหรับการสร้างผลึกของฟิล์มบางและในปัจจุบันกำลังได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมากโดยระบบสปัตเตอร์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.12




**รูปที่ 2.12** ระบบสปัตเตอร์แบบความถี่วิทยุ

ในระบบ อาร์เอฟสปัตเตอร์จะต้องใช้วงจร impedance-matching ที่อยู่ระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานและ chamber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



โดยทั่วไปความต้านทานของแหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ค่าความต้านทานของโกล์ดดิสชาร์ทจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 กิโลโอห์มในการอาร์เอฟสปัตเตอร์ค่าความหนาแน่นของกระแสที่เป้า $I_S$ มีค่าเท่ากับ

$$I_S \cong \frac{Cdv}{dt} \tag{2.3}$$

เมื่อ $C$ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่าง discharge plasma และวัสดุเป้า $\frac{dv}{dt}$ คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงศักดาที่ผิวเป้าและพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ในการสร้างจะทำให้กระแสอิออนเป็นเป้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นโดยในทางปฏิบัติจะใช้ความถี่เท่ากับ 13.56 MHz

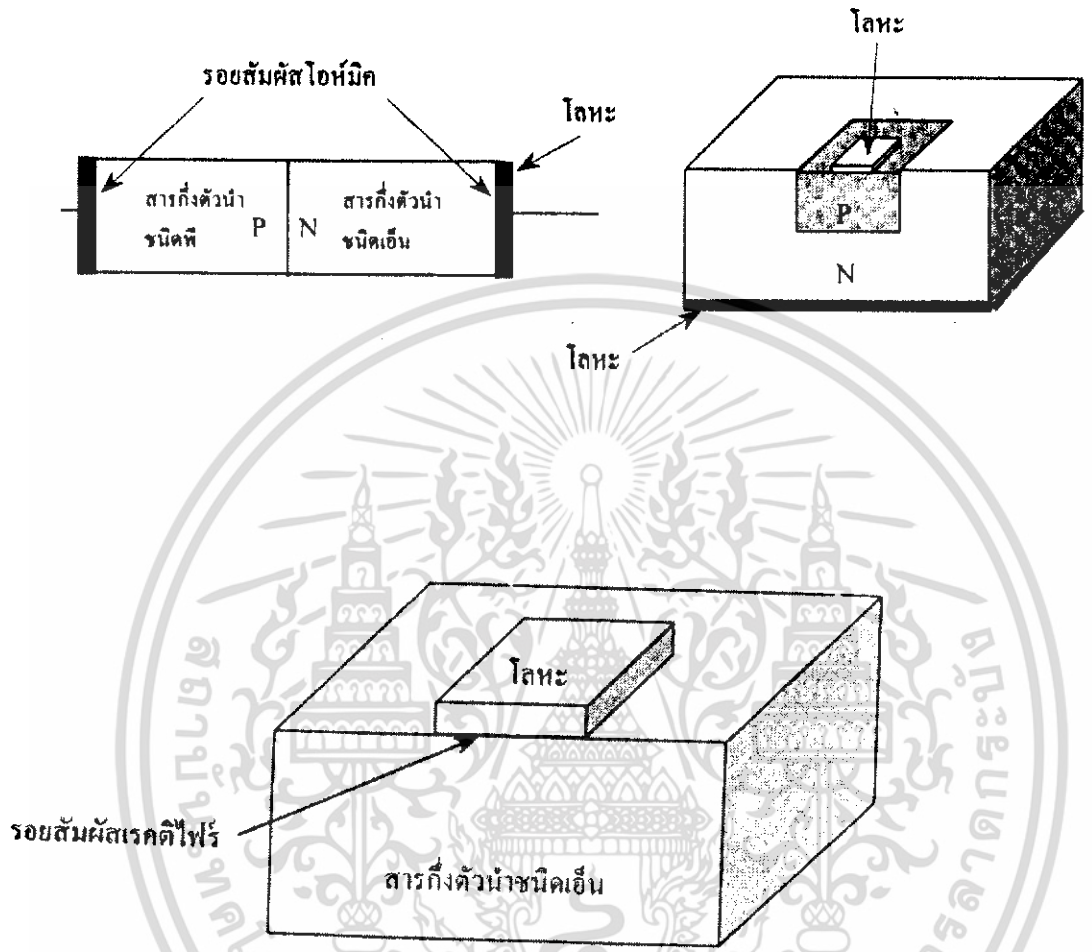
การเกิดดิสชาร์ทในระบบอาเอฟสปัตเตอร์ความดันจะมีค่าอยู่ที่ $10^{-2}$ Torr เมื่อสนามไฟฟ้าที่มีโอกาสเกิดชนระหว่างโมเลกุลก๊าซและอิเล็กตรอนอันดับสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ในระบบอาเอฟสปัตเตอร์ blocking capacitor จะต่ออยู่ระหว่างวงจร matching และเป้าซึ่งพื้นที่ของเป้าจะมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ของอาโนดและพื้นที่ภาชนะมากๆ โครงสร้างของการวางแบบสมมาตรของอิเล็กโตรดจะทำให้กระแสไฟตรงที่เป้ามีศักดาเป็นลบ

ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการสปัตเตอร์ในระบบอาร์เอฟ การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าครึ่งหนึ่งของศักดายอดคลื่นถึงคลื่นของแหล่งจ่าย พลังงานความถี่วิทยุสำหรับค่าสภาพความต้านทานของหน้าหล่อเย็นที่ขั้วคาโธดจะต้องมีค่าสูง พอที่จะรักษาค่าความเป็นฉนวน

72256

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal – Semiconductor Contact)




**รูปที่** 2.13 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ
(ก) รอยสัมผัสโอห์มิค (ข) รอยสัมผัสเรคติไฟร์

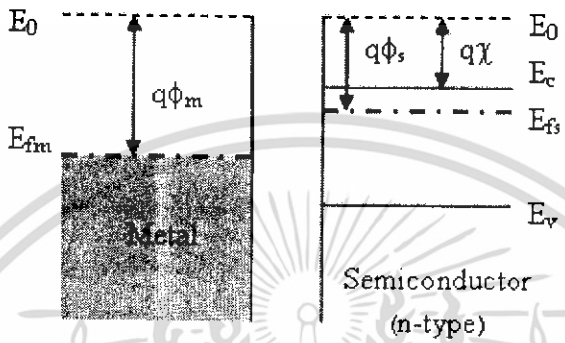
รอยสัมผัสโอห์มิค (ohmic contat) กล่าวคือ จะไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง ไม่มีแรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัส ดังในรูปที่ 2.13 (ก)

รอยสัมผัสเรคติไฟร์ (Rectifier contact) หรือ "ช็อตกีย์ไดโอด" (Schottky diode) ซึ่งคล้ายกับไดโอดโดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น ดังในรูปที่ 2.13 (ข)

### 2.5.1 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนการสัมผัส แถบพลังงานของโลหะโดยทั่วไป แสดงได้ดังในรูปที่ 2.14 (ก) และสำหรับสารกึ่งตัวนำ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.14 (ข) ระดับพลังงาน $E_0$ หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน




**รูปที่** 2.14 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงาน (ก) โลหะ (ข) สารกึ่งตัวนำ

ในส่วนของโลหะ ระดับเฟอร์มิของโลหะหรือ $E_{FM}$ จะอยู่สูงกว่าระดับค่าพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ($E_C$) เล็กน้อย ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศถูกเรียกว่า "ฟังก์ชั่นงาน" (work function) ของโลหะดังสมการที่ (2.1) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\phi_M$ โดยมีหน่วยวัดเป็นโวลต์ ถ้าวัดเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ เขียนแทนด้วย $q\phi_M$ ซึ่งหมายถึง พลังงานค่าน้อยที่สุด ที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการ เพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะนั้นๆ และเป็นอิสระโดยสมบูรณ์ ในโลหะที่ต่างชนิดกันจะมีค่าฟังก์ชั่นงาน $q\phi_M$ ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2

**ตารางที่** 2.2 ค่าฟังก์ชั่นงานของโลหะชนิดต่างๆ

| ชนิดของโลหะ | ฟังก์ชั่นงาน (ev) | ชนิดของโลหะ | ฟังก์ชั่นงาน (ev) |
|---|---|---|---|
| Ag (Silver) | 4.26 | Ni (nikel) | 5.15 |
| Al (Aluminum) | 4.28 | Pd (Pulladium) | 5.12 |
| Au (Gold) | 5.1 | Pt (Plainum) | 5.65 |
| Cr (Cromium) | 4.5 | Ti (Titanium) | 4.33 |
| Mo (Molybdenum) | 4.6 | Tungsten | 4.55 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

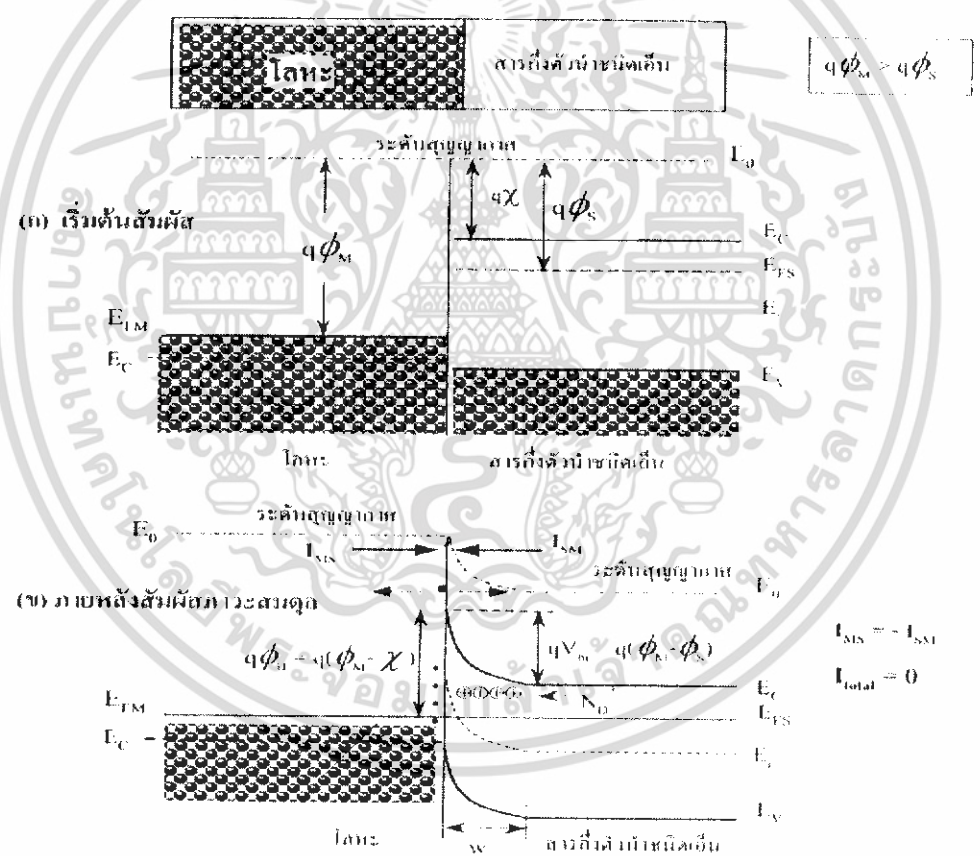
สำหรับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังในรูปที่ 2.14 (ข) ระดับเฟอร์มิจะอยู่ในช่องว่างพลังงานสำหรับแถบพลังงานโดยสูงกว่าระดับ $E_v$ และต่ำกว่าระดับ $E_c$ ค่าฟังก์ชั่นงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M$) มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานสุญญากาศ $E_0$ และระดับเฟอร์มิ $E_{FM}$ ดังสมการที่ 2.2

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \tag{2.4}$$

$$q\phi_S = E_O - E_{FS} \tag{2.5}$$

### 2.5.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2.5.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของรอยสัมผัส




**รูปที่** 2.15 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

(ก) เริ่มสัมผัส (ข) ภายหลังสัมผัสภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.15 (ก) จะเห็นว่าแถบพลังงานมีลักษณะเป็นแถบราบปกติ แต่ภายหลังการสัมผัสจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากค่าฟังก์ชั่นงานของสารทั้งสองไม่เท่ากัน โดยฟังก์ชั่นของโลหะมีค่ามากกว่า ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจะเห็นว่า ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงทำให้เกิดมีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสอง กล่าวคืออิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่แพร่เข้าไปทางด้านโลหะ ทิ้งให้เกิดไอออนบวก ปรากฏอยู่บริเวณรอยสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ และกลายสภาพเป็นบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างเท่ากับ W จะทำให้สนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำ สนามไฟฟ้า มีทิศทางที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้แพร่เข้าไปยังด้านโลหะ อย่างไรก็ดี ในช่วงเวลาแรกๆ สนามไฟฟ้านี้จะมีค่าน้อยจึงไม่สามารถต่อต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ทั้งหมด การแพร่ของอิเล็กตรอนจึงยังคงสามารถดำเนินต่อไปได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป สนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในที่สุดก็จะมีค่ามากพอที่จะหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้อย่างสมบูรณ์ ขณะนี้รอยสัมผัสจะเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งกระแสสุทธิที่ไหลผ่านรอยสัมผัสมีค่าเท่ากับศูนย์ สนามไฟฟ้าที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำสามารถสังเกตเห็นได้ จากการงอโค้งของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำ ในช่วง W ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งหมด จะปรับอยู่ในระดับเดียวกันโดยตลอด การงอโค้งของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามากที่สุด ที่ตำแหน่งผิวสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่จุดนี้จะมีค่ามากที่สุด ขณะที่รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุล กระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ และจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ จะมีค่าเท่ากับ กระแสสุทธิที่ผ่านรอยสัมผัสจึงมีค่าเป็นศูนย์ ศักย์สัมผัสหรือแรงดันภายในรอยสัมผัส $V_{bi}$ ซึ่งเป็นกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชั่นงานของโลหะ และของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (2.3) ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะซึ่งจะเคลื่อนที่ไปด้านสารกึ่งตัวนำเรียกว่า กำแพงศักย์ชื่อตคีย์ (Schottky barrier : $\phi_{bn}$) มีค่าดังสมการที่ (2.4)

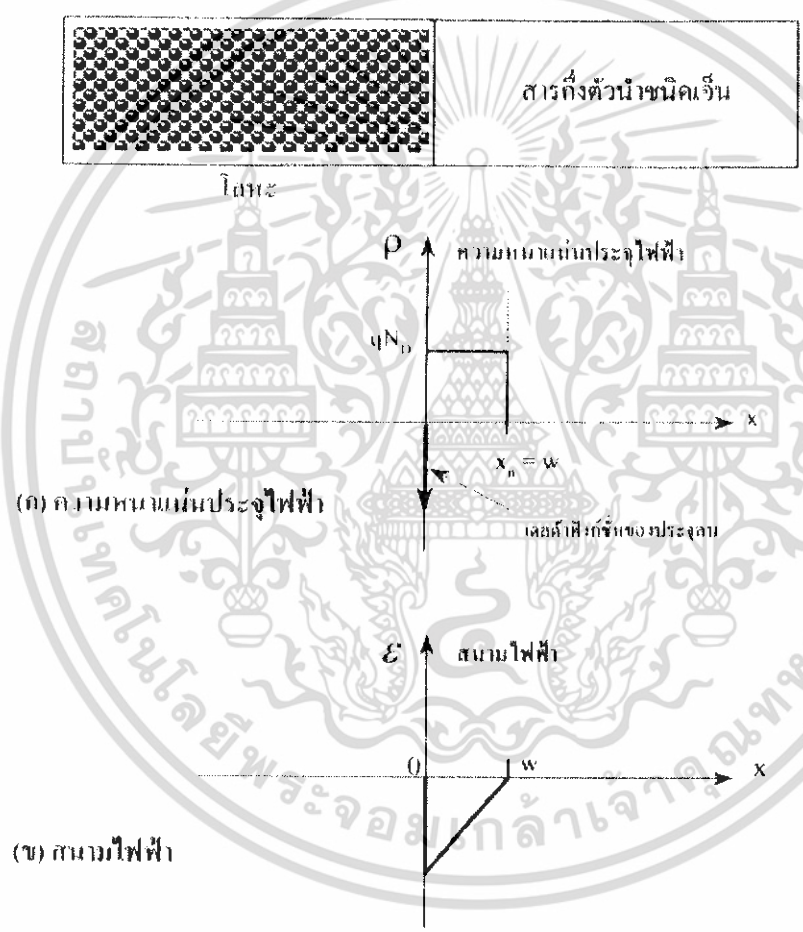
$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \tag{2.6}$$

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 สมบัติของรอยสัมผัสในภาวะสมดุลความร้อน

ในภาวะสมดุลความร้อน การกระจายความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ที่บริเวณรอยสัมผัสซ็อตกีย์ สามารถเขียนแสดงได้ดังในรูปที่ 2.16 การวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาว่า ที่บริเวณปลอดพาหะด้านเอ็นในช่วง จะมีประจุไฟฟ้าบวกเนื่องจากไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ กระจายอยู่ และคล้ายคับว่ารอยสัมผัสนี้ไม่มีด้านพี แต่มีโลหะมาแทน และประจุไฟฟ้าลบที่สะสมทางด้านโลหะจึงไม่มี ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสรวม $w$ มีค่าเท่ากับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านเอ็น หรือ $w = X_n$ และกระจายของประจุไฟฟ้าลบในด้านโลหะ

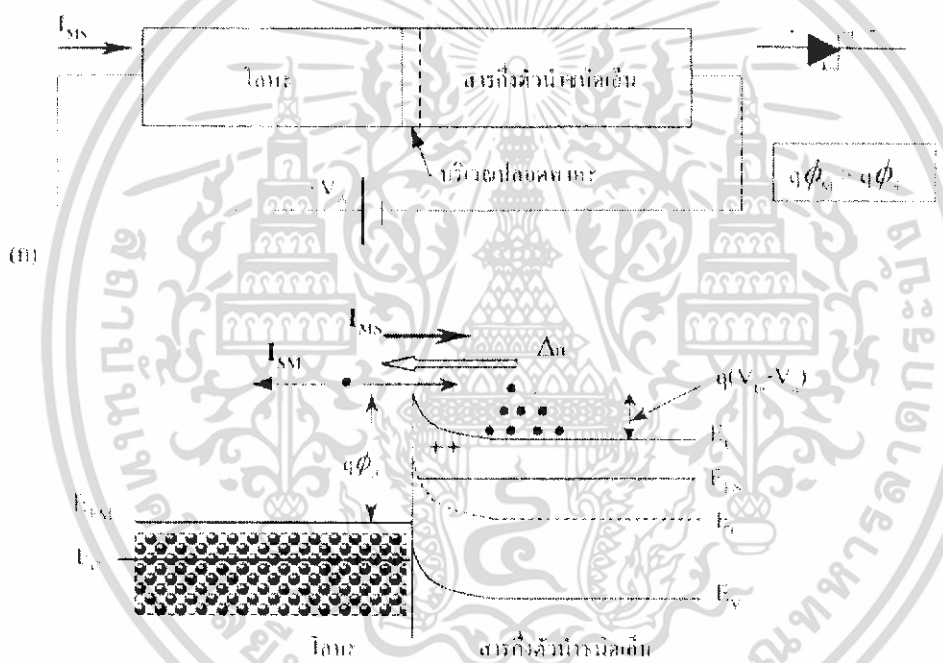



**รูปที่** 2.16 สมบัติของรอยสัมผัสในภาวะสมดุลความร้อน (ก) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (ข) สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.3 คุณสมบัติรอยสัมผัสขณะได้รับไบอัส

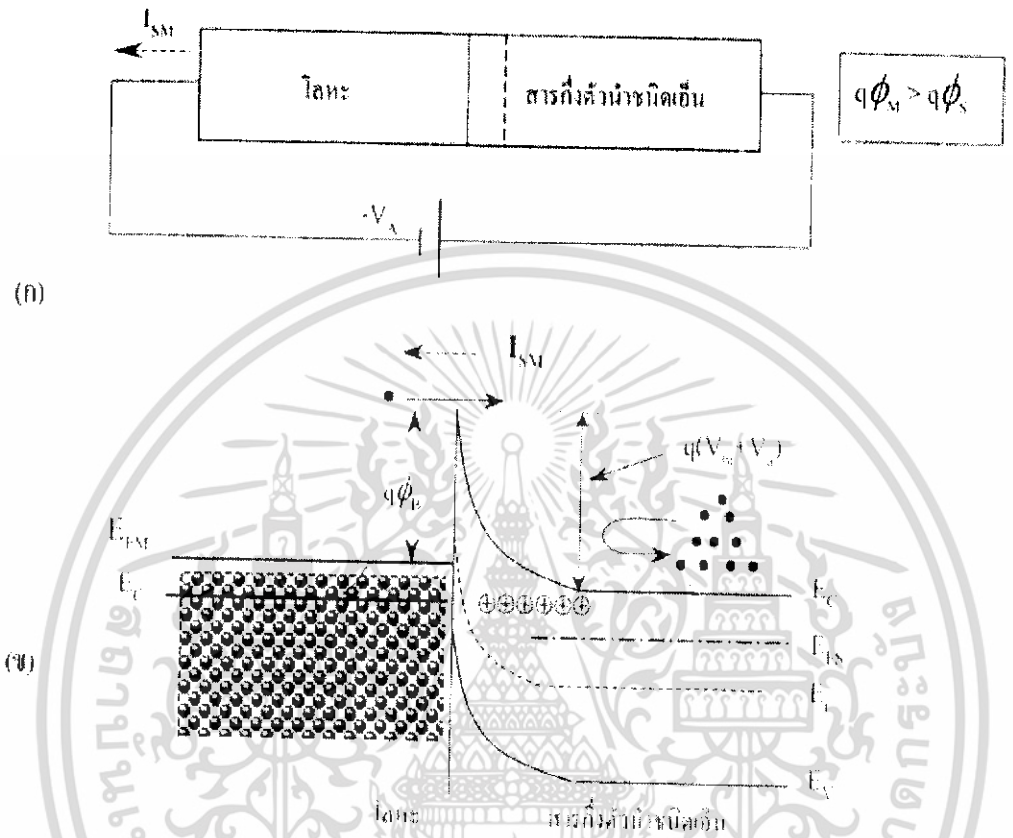
เมื่อให้แรงดันไบอัส ($V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) ในกรณีนี้จะทำให้ความสูงของศักย์สัมผัส หรือกำแพงศักย์ $V_{bi}$ ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น ($V_{bi} - V_A$) และทำให้ระดับพลังงาน $E_{FS}$ สูงกว่าระดับ $E_{FM}$ ดังนั้น อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้า ($I_{MS}$) ไหลจากด้านโลหะผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อตกีย์เข้าไปในด้านตัวนำด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้า ($I_{SM}$) ไหลในทิศตรงกันข้ามกับกระแสแรก โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ



**รูปที่** 2.17 คุณสมบัติรอยสัมผัสขณะได้รับไบอัส (ก) การให้ไบอัสตรง และสัญลักษณ์ของช็อตกีย์ไดโอด (ข) แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสตรง

ในทางตรงกันข้าม ถ้าเราให้แรงดันไบอัส ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังในรูปที่ 2.18(ก) กรณีนี้จะทำให้ระดับ $E_{FM}$ อยู่สูงกว่าระดับ $E_{FS}$ กำแพงศักย์ $V_{bi}$ จะ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น ($V_{bi} + V_A$) และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น สนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัสมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

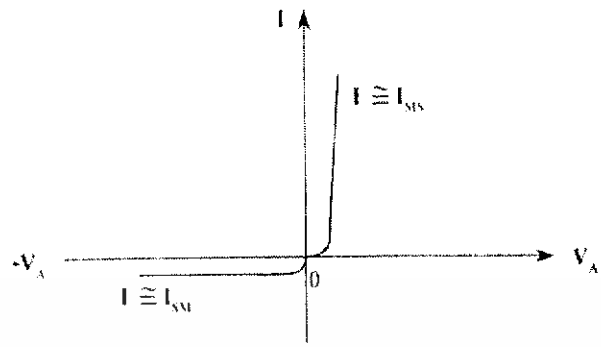



**รูปที่** 2.18 (ก) การให้ไบอัสย้อนกลับ แก่ช็อตกีย์ไดโอด และ (ข) แถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ ในกรณีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2.5.2.4 คุณสมบัติกระแส – แรงดันของช็อตกีย์ไดโอด

รอยสัมผัสเรคติไฟร์ (rectifier contact) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น กล่าวคือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือ ไบอัสตรง เมื่อให้ไบอัสกลับทางหรือไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลผ่านน้อยมาก กราฟกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสนี้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่** 2.19 สมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

## 2.6 สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง

### 2.6.1 โฟโตดีเทคเตอร์หรือตัวตรวจวัดแสง (Photo Detector)

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง "คลื่น" และ "อนุภาค" ปรากฏการณ์ที่แสงแสดงลักษณะสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด เป็นต้น

ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสงโดย

$$E_{photon} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad eV \tag{2.8}$$

โดยที่ $\nu$ คือ ความถี่ ($E_Z$)

$\lambda$ คือ ความยาวคลื่นแสง ($\mu$ m)

$h$ คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ มีค่าเท่ากับ $6.626 \times 10^{-34}$ J-sec

$c$ คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ $3 \times 10^{8}$ m/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap : $E_g$) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{photon} \geq E_{g(semi)}$ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง กรณีพลังงานโฟตอนของแสงมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน หรือ $E_{photon} < E_{g(semi)}$ การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น ในกรณีซิลิคอนมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นขนาดความถี่ต่ำสุด $\nu_{min}$ หรือความยาวคลื่นสูงสุด $\lambda_{max}$ ของคลื่นแสงที่จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงในวัสดุสารกึ่งตัวนำได้ คือ $\nu_{min} \geq \frac{E_g}{h}$ $E_Z$ หรือแสดงได้ดังในสมการที่ (2.6)

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad \mu m \tag{2.9}$$

โดย $\nu_{min}$ คือ ความถี่ต่ำที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ ซึ่งถูกเรียกว่า "ความถี่วิกฤต"

$\lambda_{max}$ คือ ความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ ซึ่งถูกเรียกว่า "ความยาวคลื่นวิกฤต"

$E_g$ คือ ขนาดความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน ของสารกึ่งตัวนำ

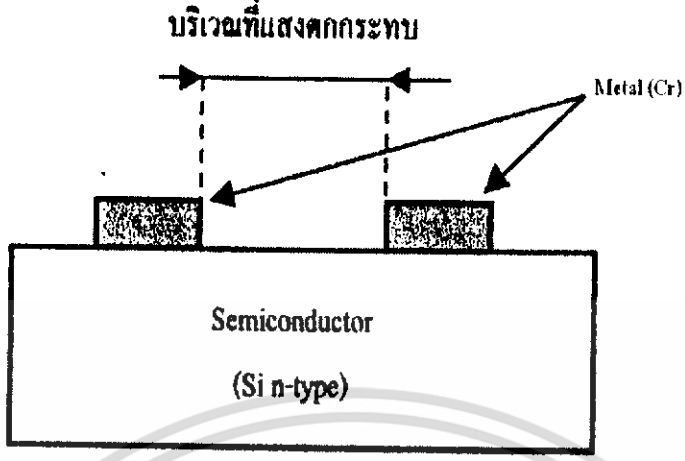
คลื่นแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ ต่างก็มีคุณสมบัติเป็นโฟตอนเช่นเดียวกัน โดยคลื่นแสงก็คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงหนึ่ง

คลื่นแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ ต่างก็มีคุณสมบัติเป็นโฟตอนเช่นเดียวกัน โดยคลื่นแสงก็คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงหนึ่ง ความยาวคลื่นสูงสุด หรือ ที่สามารถทำให้เกิดมีการดูดกลืนโฟตอนในสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ได้

**2.6.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ**

โครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส โดยมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง หรือระยะห่างขั้วไฟฟ้า เป็นส่วนแยกรอยสัมผัสทั้งสองของโครงสร้าง MSM ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นซิลิคอนจะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.20** โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

### 2.6.3 สภาวะสมดุลความร้อนของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แสดงในรูปที่ 2.21 (ก) ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีการแพร่สารเจือ ชนิดเอ็น อย่างสม่ำเสมอและขั้วโลหะสองขั้ว โดยลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดในสภาวะสมดุลความร้อนแสดงในรูปที่ 2.21 (ข)

$\phi_{n1}$ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนของรอยสัมผัสที่ 1

$\phi_{n2}$ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนของรอยสัมผัสที่ 2

$\phi_{p1}$ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของโฮลของรอยสัมผัสที่ 1

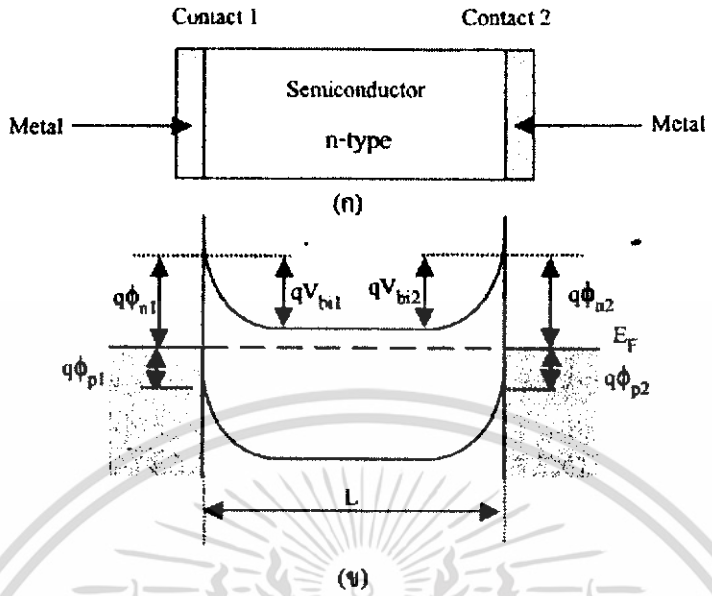
$\phi_{p2}$ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของโฮลของรอยสัมผัสที่ 2

$V_{bi1}$ คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยสัมผัสที่ 1

$V_{bi2}$ คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยสัมผัสที่ 2

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.21** (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

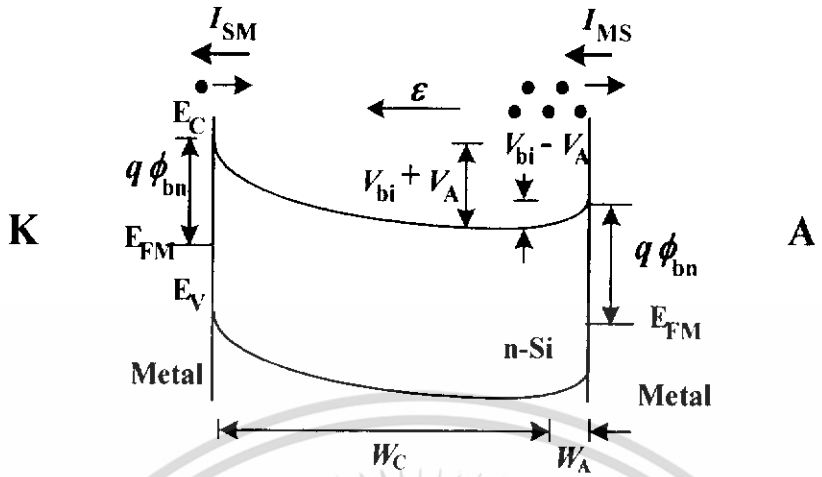
(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน

ถ้าพื้นที่ของทั้งสองรอยสัมผัสมีค่าเท่ากันและความสูงกำแพงศักย์ $\phi_{n1} = \phi_{n2}$ เท่ากันกล่าวได้ว่าโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แบบสมมาตร( Symmetrical MSM Structure )

**2.6.3.1 ขณะได้รับแรงดันไบอัส**

เมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ จะเห็นได้ว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ แบริเออร์ทางด้านคาโทด ($W_C$) มีขนาดกว้างขึ้น เมื่อไบอัสตรงบริเวณปลอดพาหะทางด้านอาโนด ($W_A$) จะมีขนาดลดลง สำหรับ ด้านที่ได้รับการไบอัสตรงจะมีค่าของกำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ ($V_{bi}$-$V_A$) ส่วนด้านที่ได้รับไบอัสย้อนกลับจะมีค่าของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ ($V_{bi}$+$V_A$) ดังนั้นอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในด้านที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ($I_{SM}$) ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า ($I_{MS}$) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านคาโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current) ของโครงสร้าง MSM ดังแสดงในรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.22 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบอัส

**2.6.3.2 ขณะได้รับแสงตกกระทบ**

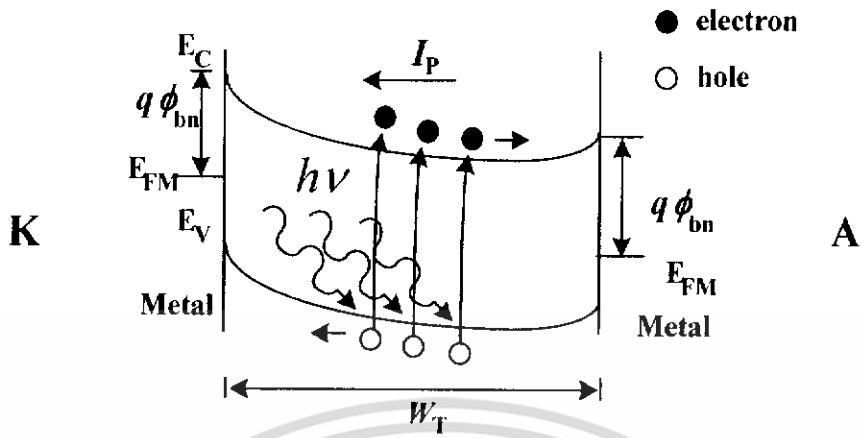
เมื่อแสงตกกระทบโครงสร้าง MSM จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วอาโนด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยกระแสแสง ($I_p$) ของโครงสร้าง MSM มีค่าดังสมการที่ (2.7)

$$I_P = I_{mca} - I_{dark} \tag{2.10}$$

โดยที่ $I_{mca}$ คือ กระแสที่ได้จากการวัด

$I_{dark}$ คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดของ MSM

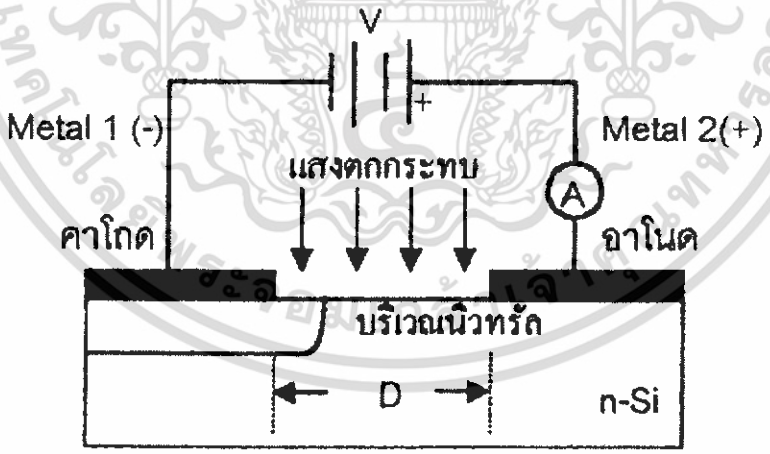
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.23** แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ

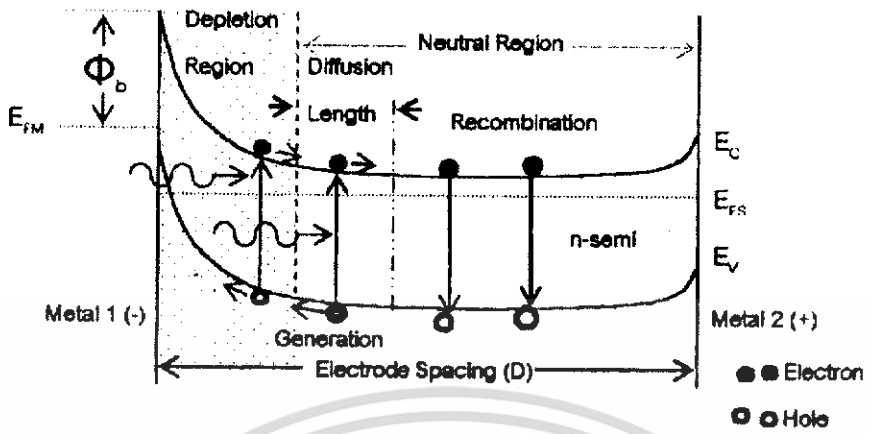
**2.6.3.3 กระบวนการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr**

เมื่อให้แสงตกกระทบดังรูปที่ 2.24 จะพบว่าแสงตกกระทบในบริเวณปลอดประจุพาหะ (Depletion Region) และบริเวณที่เป็นกลาง (Neutral Reion) ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นมา อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทางด้าน Metal 2 (+) เกิดการรวมตัว (Recombination) จนแทบจะไม่มีผลใดๆ เกิดขึ้นส่วนโฮลในบริเวณปลอดประจุพาหะถูกผลักออกไปทำให้เกิดกระแสขึ้นมาสามารถแบ่งกระแสได้เป็น 2 ส่วน คือ กระแสโฟโตไดโอดและกระแสโฟโตคอนดักเตอร์




**รูปที่ 2.23** ลักษณะของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เมื่อมีแสงตกกระทบขณะได้รับแรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.24** แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr มื่อมีแสงตกกระทบที่รับแรงดันไบอัส

**2.6.3.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัส**

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม ($W_T$) ของโครงสร้าง MSM เป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด ($W_C$) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านอาโนด ($W_A$) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.8

$$W_T = W_C + W_A \tag{2.11}$$

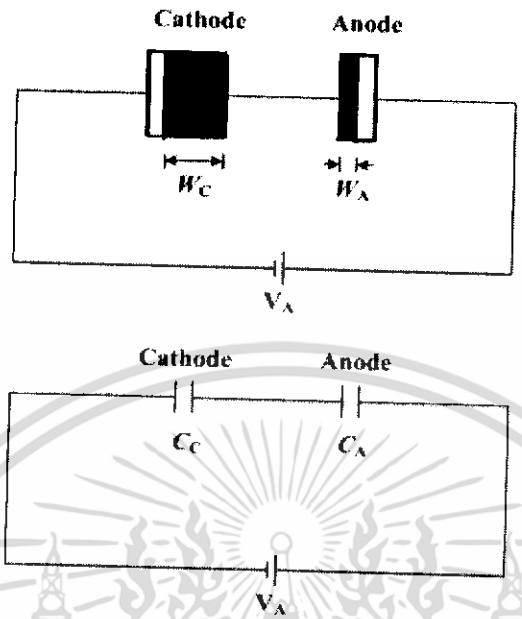
$$W_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S\left(V_{bi} - V_A\right)}{qN_D}} \tag{2.12}$$

$$W_A = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S\left(V_{bi} + V_A\right)}{qN_D}} \tag{2.13}$$

**2.6.3.5 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส**

ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยความจุไฟฟ้ารวม ($C_T$) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบ ด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านคาโทด ($C_C$) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านอาโนด ($C_A$) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.25** ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \tag{2.14}$$

$$C_C = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \tag{2.15}$$

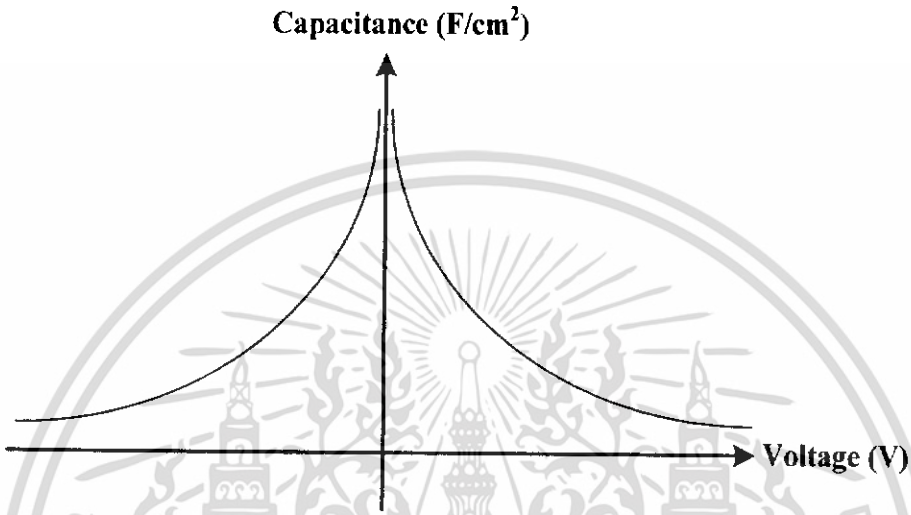
$$C_A = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \tag{2.16}$$

เมื่อแทนค่า $C_C$ และ $C_A$ ในสมการที่ 2.11 ทำให้ได้ความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ

$$C_T = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2}}\left[\frac{1}{\sqrt{(V_{bi} - V_A)} + \sqrt{(V_{bi} + V_A)}}\right] \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

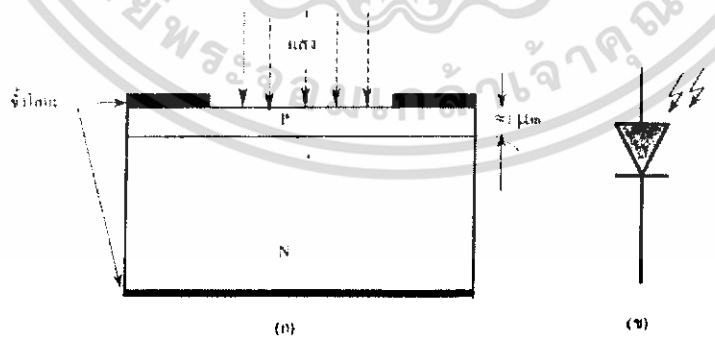
รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส โดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ




**รูปที่ 2.26** ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

**2.6.4 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น**

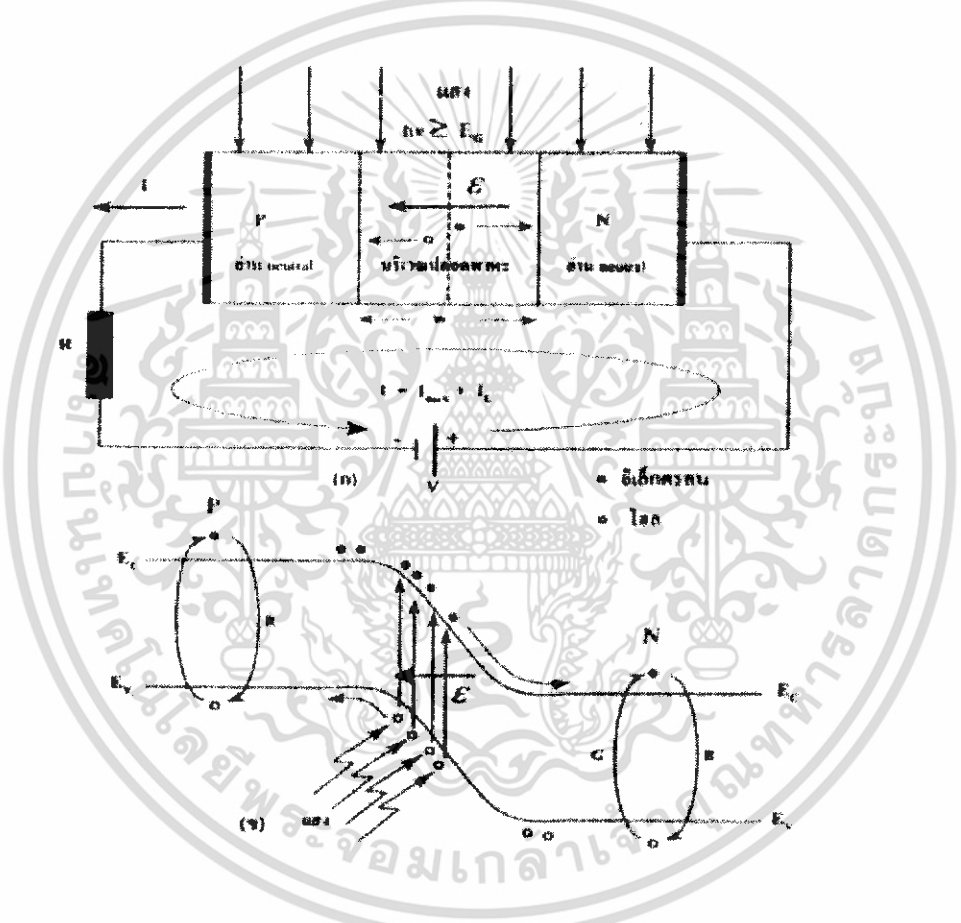
เป็นไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นทั่ว ๆ ไป ออกแบบให้สามารถรับแสงได้ขณะใช้งาน ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดแบบนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.27 (ก)




**รูปที่ 2.27** (ก) แสดงโครงสร้างภาคตัดขวาง (ข ) สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาเมื่อได้รับแสงโฟตอน ที่มีพลังงานสูงกว่า ขนาดช่องว่างพลังงาน (energy gap: $E_g$) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $h\nu > E_g$ จะทำให้มีการดูดกลืนโฟตอนในสารกึ่งตัวนำ และเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล แต่เนื่องจากที่ย่านส่วนเนื้อสาร (bulk) ของสารกึ่งตัวนำเป็นบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้น คู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นในย่านนี้ จึงรวมตัวกันเอง (recombination) โดยไม่มีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าใด ๆ แต่โฟตอนในลำแสงที่ตกกระทบและผ่านเข้าไปถึงบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ จึงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล เคลื่อนที่ออกจากบริเวณนี้อย่างรวดเร็ว โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น และโฮลจะเคลื่อนที่ออกไปทางด้านพี ดังแสดงด้วยลักษณะแถบพลังงานในรูปที่ 2.27 (ข)




**รูปที่ 2.28** การเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด
(ก) การให้แรงดันไบอัสแก่ไดโอด
(ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

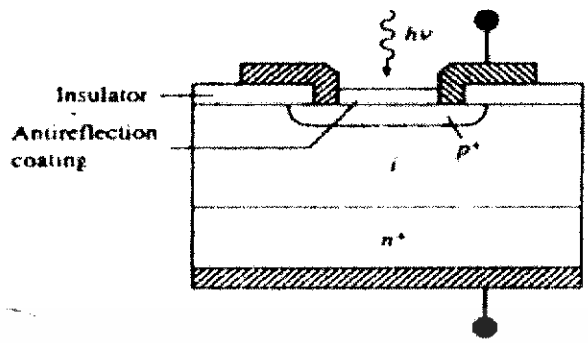
ดังนั้น จะทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าแสง (Photocurrent : $I_L$) ไหลในวงจรได้ จะเห็นว่ากระแสแสง มีทิศทางเดียวกับกระแส $I_{dark}$ แต่จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแส-แรงดันไบอัสตรง ดังนั้นจะได้ว่าขณะที่โฟโตไดโอดซึ่งได้รับไบอัสย้อนกลับได้รับแสงกระแสที่ไหลผ่านไดโอด สมบัติอื่นๆ ของโฟโตไดโอด ก็คืออัตราเร็วในการทำงาน เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง

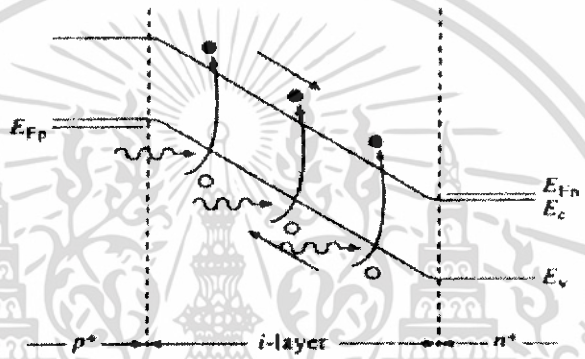
**2.6.5 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n**

เป็นโฟโตไดโอดชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง และอัตราเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดามีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ก) สร้างขึ้นให้มีขนาดบางมากๆ เพื่อให้โฟตอนในลำแสงสามารถทะลุผ่านลงไปถึงชั้น i ได้ และที่ชั้น i นี้จะมีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้ และโฟตอนเหล่านี้มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้ นอกจากนี้เนื่องจากชั้น i มีสภาพต้านทานสูงกว่าด้าน p+ และด้าน n+

ดังนั้นในขณะทำงานซึ่งไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น ขยายลึกเข้าไปในส่วน i ทั้งสองด้านและเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมส่วนที่ i จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น i ถ้าพิจารณาว่าสนามไฟฟ้าในส่วน i มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอโดยตลอดลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n สามารถเขียนแสดงได้ดังในรูปที่ 2.29 (ข) เมื่อโฟตอนจากแสงทำให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นที่ส่วน i สนามไฟฟ้าในส่วน i จะทำให้พาหะดริฟท์ออกไปยังขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านอย่างรวดเร็ว และทำให้มีกระแสแสงไหลในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.29** โฟโตไดโอดแบบ p-i-n
(ก) ภาพตัดขวาง
(ข) แถบพลังงานขณะเกิดพาหะ เนื่องจากแสงในส่วน i ของไดโอด

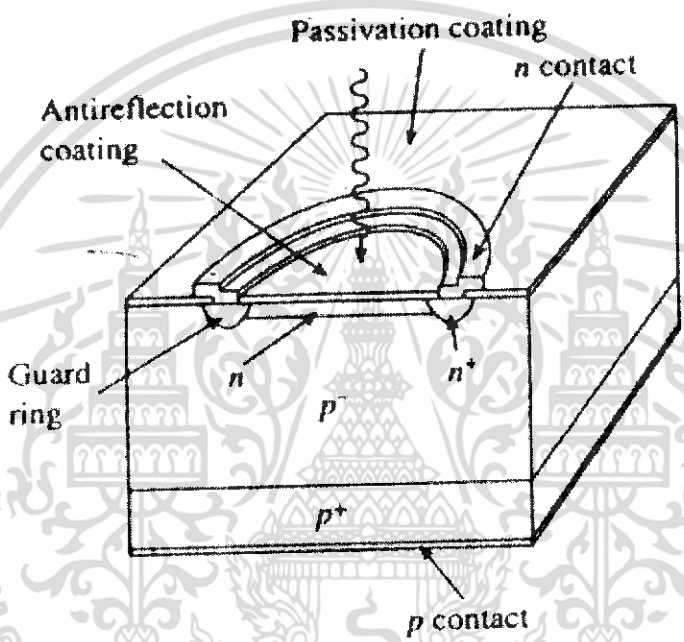
ข้อดีของไดโอดแบบนี้ก็คือ เราสามารถออกแบบ เพื่อควบคุม หรือกำหนดให้ไดโอดมีคุณสมบัติตอบสนองต่อแสงที่ความถี่ใด ๆ ตามที่ต้องการได้ โดยกำหนดขนาดความกว้างของชั้น i ทำให้สะดวก และสามารถกำหนดคุณสมบัติผลตอบสนองต่อสเปกตรัม (Spectral response) ได้เป็นอย่างดี พาหะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ดังนั้นความไวในการดูดกลืนโฟตอน และผลตอบสนองความถี่สูงสุดได้ดี

### 2.6.6 โฟโตไดโอดแบบอะวาลันช์ (Avalanche Photo Diode)

ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นหรือแบบ p-i-n นั่นเอง หรืออาจเป็นแบบ (Metal-Semiconductor Photo Diode) ก็ได้ ไดโอดทำงานในย่านใกล้ๆ กับจุดพังทลาย (Breakdown point) เนื่องจากที่ใกล้จุดพังทลายของรอยต่อพี-เอ็น สนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ หรือในชั้น i จะมีค่าสูงมาก กระทั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ "การทวีคูณของพาหะ" (Carrier multiplication) ได้ ดังนั้นในภาวะนี้กระแสแสงจะมีค่าสูงมาก ไดโอดจึงมีคุณสมบัติเป็น โฟโตไดโอดความไวสูง (High sensitive Photo Diode) และเนื่องจากสนามไฟฟ้าในช่วงนี้สูงมาก ความเร็วของพาหะจึงมีค่าสูง ดังนั้นความไวในการทำงานของไดโอดจึงสูงมากตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลันช์ของซิลิคอนแสดงได้ดังในรูปที่ 2.30




**รูปที่ 2.30** โฟโตไดโอดแบบอะวาลันช์ที่สร้างจากซิลิคอน

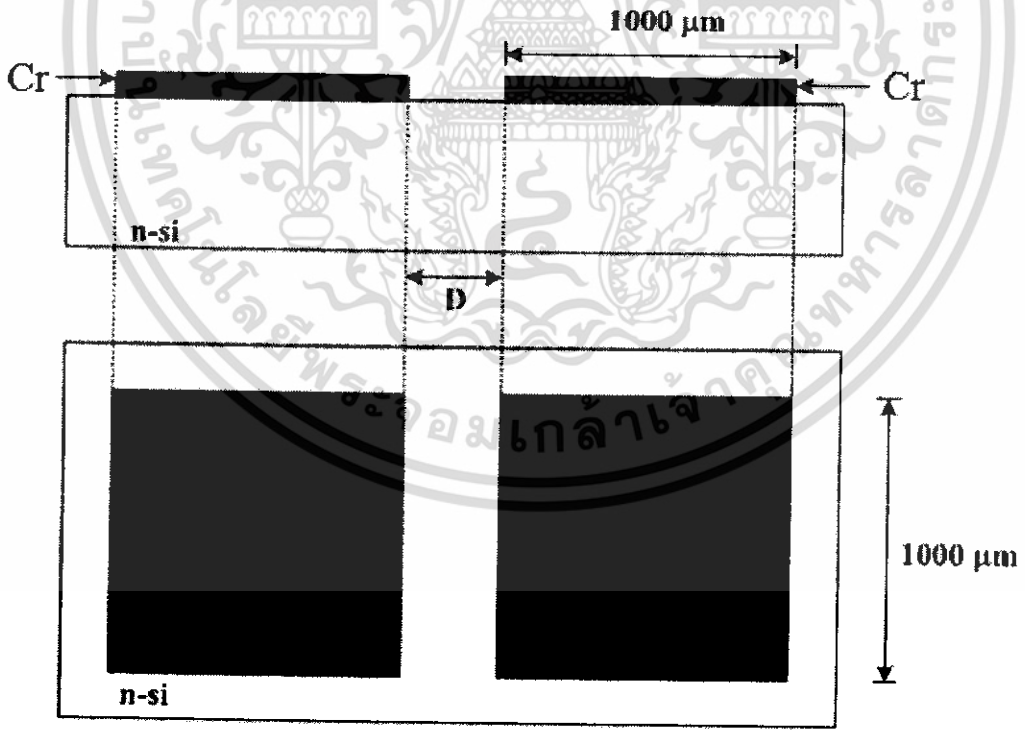
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# การสร้าง และ การทดลอง

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลานาร์ สามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งมีกระบวนการสร้างด้วยกระจกต้นแบบเพียง 1-2 แผ่น โดยมีการออกแบบให้มีพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา กระบวนการสร้างและการทดลองต่างๆ เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติของโครงสร้าง MSM ต่อไป

## 3.1 โครงสร้าง

โครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโครเมียม-ซิลิคอน จำนวนสองรอยสัมผัส ในรายงานนี้จะใช้ขั้วโลหะที่มีขนาดเท่ากันทั้งสองด้านเป็นโครเมียมมีขนาด 1 x 1 $mm^2$ ส่วนสารกึ่งตัวนำจะเลือกใช้เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งวัสดุทั้งสองสามารถหาได้ง่าย สำหรับระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) ที่ใช้เป็นส่วนของพื้นที่รับแสง มีค่า 20, 40, 100 และ 500 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.1




**รูปที่ 3.1** การออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 กระบวนการสร้าง

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

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

- Ultrasonic ด้วยน้ำขจัดไอออนแล้ว (de-ionization water : DI) 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่น
- จุ่มในน้ำยา DI 1 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยสายฉีดก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดไนตริก (nitric acid) 2 แก้วๆ ละ 5นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะ
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- ต้มใน DI 2 แก้วๆ ละ 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลเอทธีรีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน
- Ultrasonic ในอะซิโตน (Acetone) 2 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (hydrofluoric) ที่มีความเข้มข้น 5 % (HF 5 %) 10–30 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการสปัตเตอร์ริ่ง

เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอม บริเวณผิวหน้าของโลหะโครเมียมหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง ทำให้อะตอมของอาร์กอนแตกเป็นอิออนบวกและอิออนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งของสนามไฟฟ้ากระทบเนื้อสาร ทำให้เกิดการถ่ายเทอะตอมที่อยู่บนบริเวณผิวหน้าของสารเคลือบเกิดการตกผลึกที่ฐานรองจึง ทำให้ได้ฟิล์มที่ได้สม่ำเสมอ

- ใช้ก๊าซอาร์กอนที่ความดันประมาณ $1.3 \times 10^{-2}$ Torr
- ใช้ศักดาไฟฟ้าประมาณ 2-4 KV
- ใช้ RF Power 100 watt
- ใช้สปัตเตอร์ริ่ง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้ความหนาที่ 2100 °A ( Rate 77 °A/min )
- มีสารเคลือบเป็นเป้า ( target )ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปล่อยอะตอมของโลหะโครเมียมลงเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์

3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี (photolithography)

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้ทำการเคลือบโครเมียมแล้ว มาสร้างเป็นส่วนขั้วไฟฟ้าและพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่อง mask aligner
- การขึ้นลวดลาย (develop)
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที

4. การกัดชั้นโครเมียม

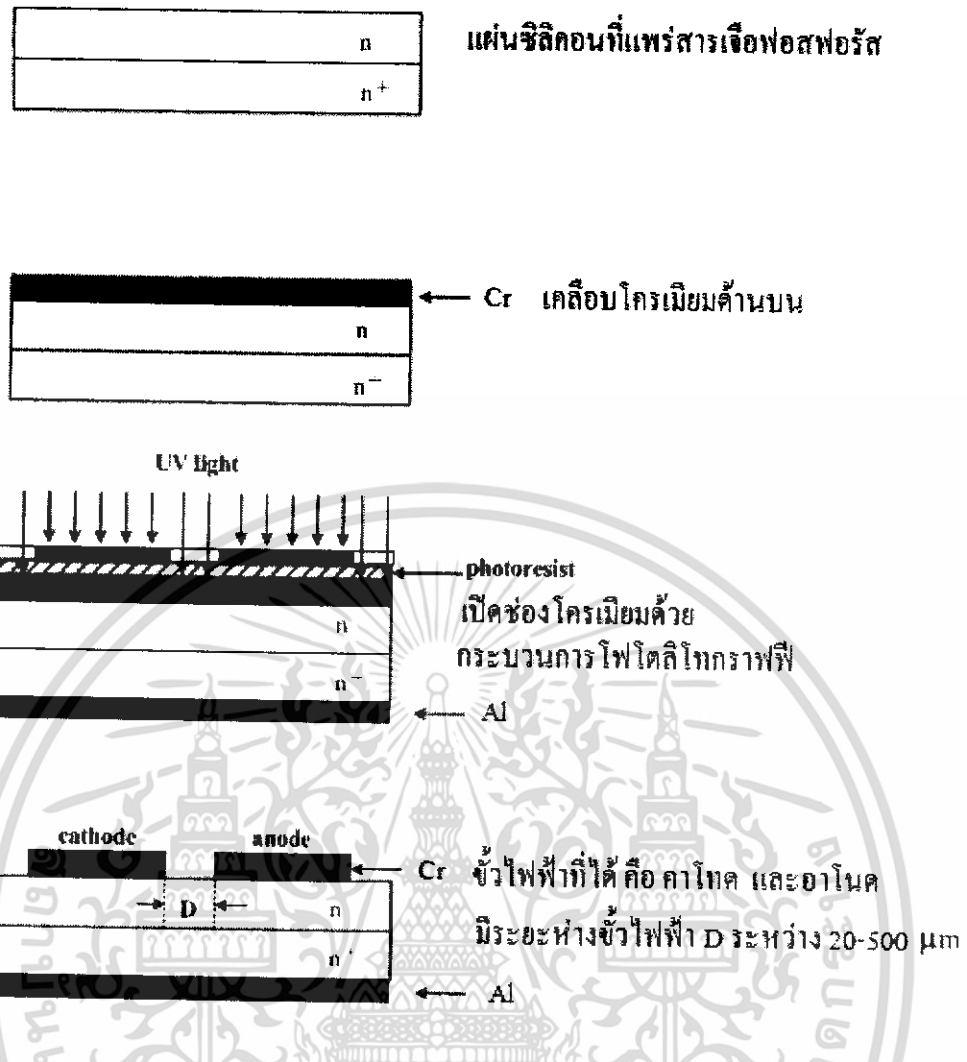
ทำการกัดชั้นของโครเมียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยสารละลายกัดชั้นโครเมียม ( cr etching ) ที่มีส่วนผสมของ HC1 : $H_2O$ ในอัตราส่วน 3 : 1

- จุ่มใน Cr etching ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

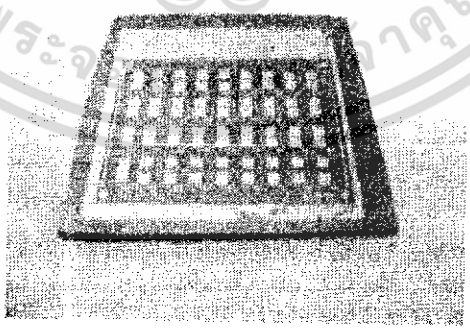
5. การลอกฟิล์มน้ำยาไวแสง

- จุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.2** ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr



**รูปที่ 3.3** ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่สร้างเสร็จแล้ว

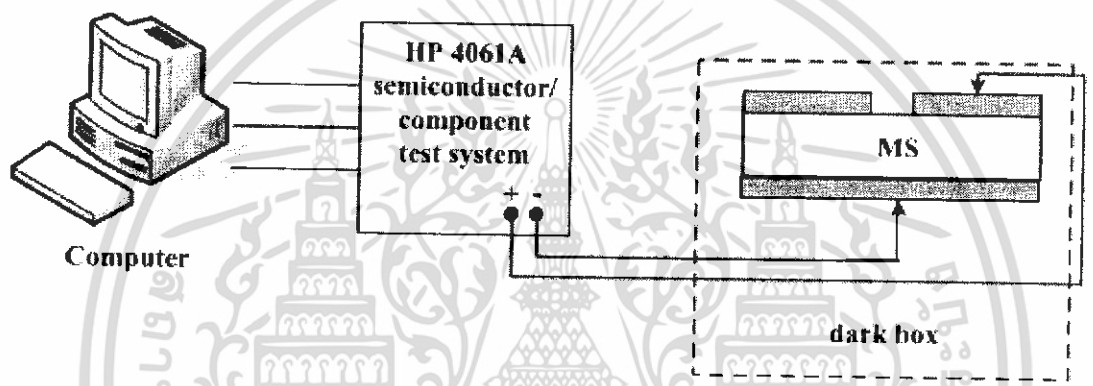
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.3 การทดลอง

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ ซึ่งจะมีการทดลองดังต่อไป

### 3.3.1 การศึกษากำแพงศักย์ช็อตกีย์

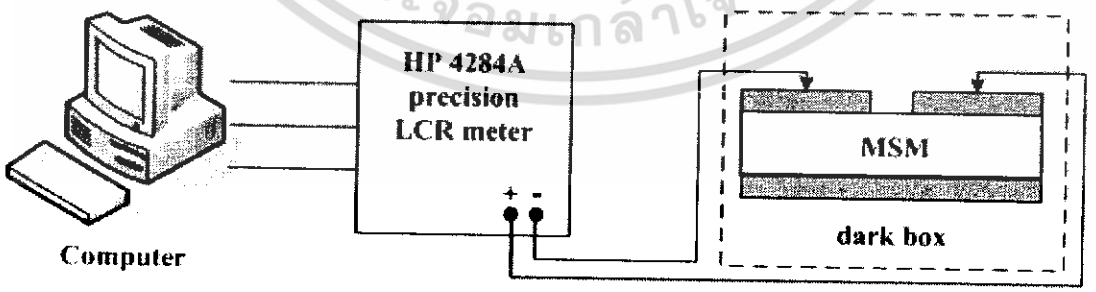
การศึกษากำแพงศักย์ช็อตกีย์ เป็นการทดลองเพื่อหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่เป็นโครงสร้างช็อตกีย์ไดโอด ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสูงกำแพงศักย์ต่อไป และเป็นการหาค่าแรงดันภายในของอุปกรณ์ โดยใช้เครื่อง HP 4061A semiconductor/component test system ดังแสดงในรูปที่ 3.4




**รูปที่ 3.4** แผนภาพที่ใช้ในการทดลองหากำแพงศักย์ช็อตกีย์

### 3.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr

นำอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่ผ่านกระบวนการสร้างมาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ด้วยเครื่อง HP 4284A precision LCR meter ดังแสดงในรูปที่ 5.5

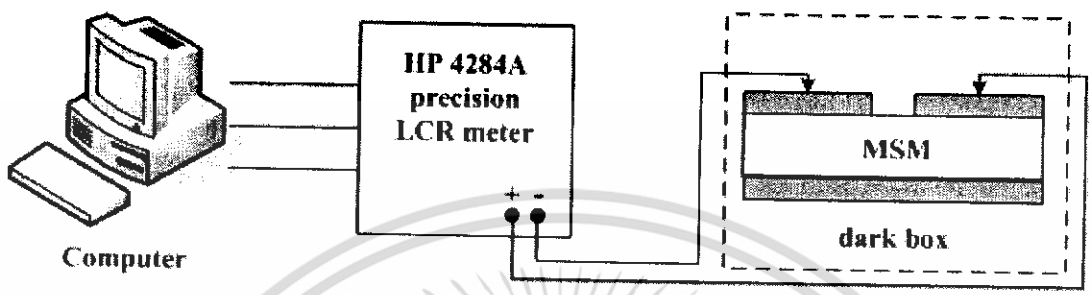



**รูปที่ 3.5** แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr

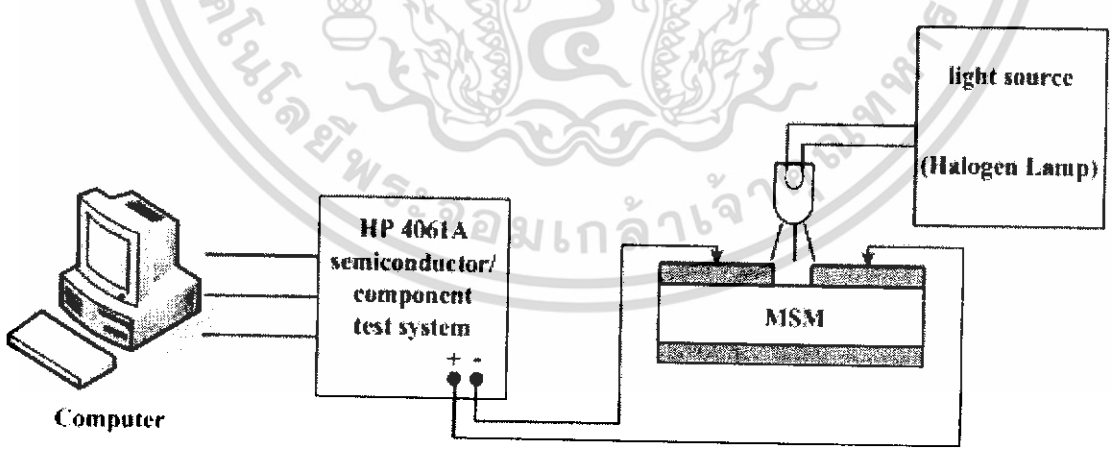
นำอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่ผ่านกระบวนการสร้าง มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ดังแสดงในรูปที่ 3.6




**รูปที่ 3.6** แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

### 3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

นำอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ซึ่งมีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 μm มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง (dc) ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.7




**รูปที่ 3.7** แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน
ในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง

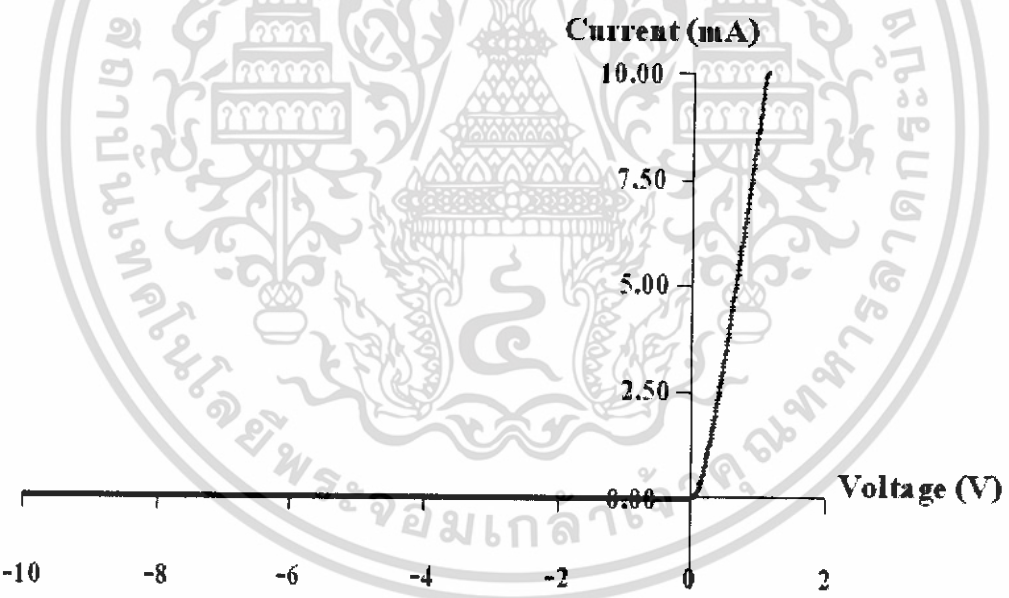
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

## 4.1 ผลการทดลองกำแพงศักย์ช็อตกีย์

เมื่อนำโลหะวางบนสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ที่รอยสัมผัสมีคุณสมบัติเป็นช็อตกีย์ไดโอดเกิดขึ้น คุณสมบัติที่สำคัญของรอยสัมผัสช็อตกีย์ คือ แรงดันภายใน ($V_{bi}$) และความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์ ($\phi_{bn}$) โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor/Component test system) HP 4061A แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 3.4

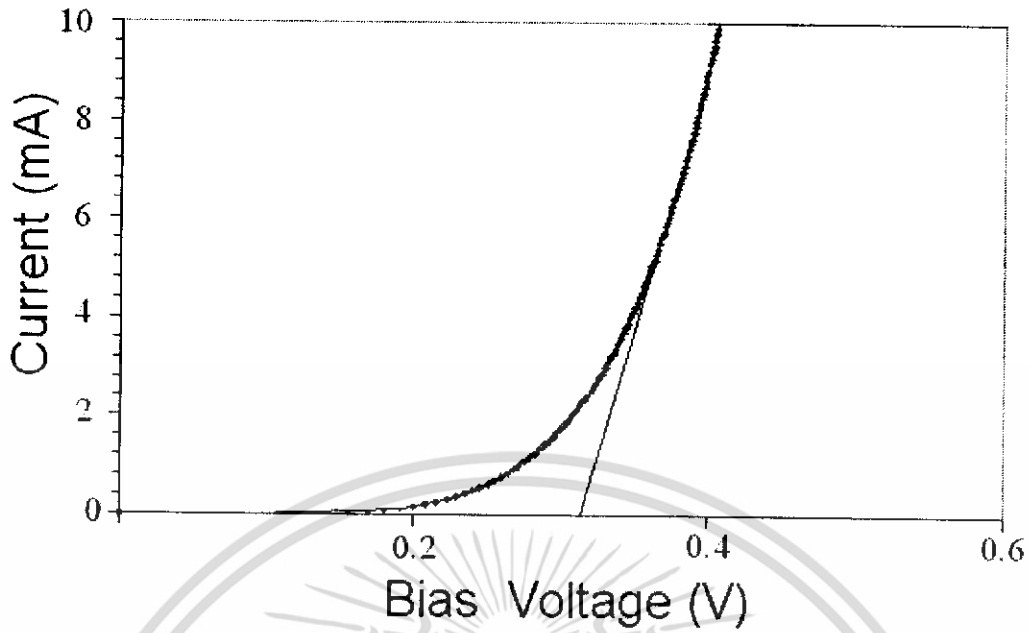
ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์ โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงกระแสเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัส เมื่อให้แรงดันไบอัสกลับกระแสจะไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันหรือเปลี่ยนน้อย แต่จะมีกระแสรั่วไหลอยู่ส่วนหนึ่ง ดังแสดงแผนภาพในรูปที่ 4.1




**รูปที่ 4.1** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะไบอัสตรงและขณะไบอัสย้อนกลับ

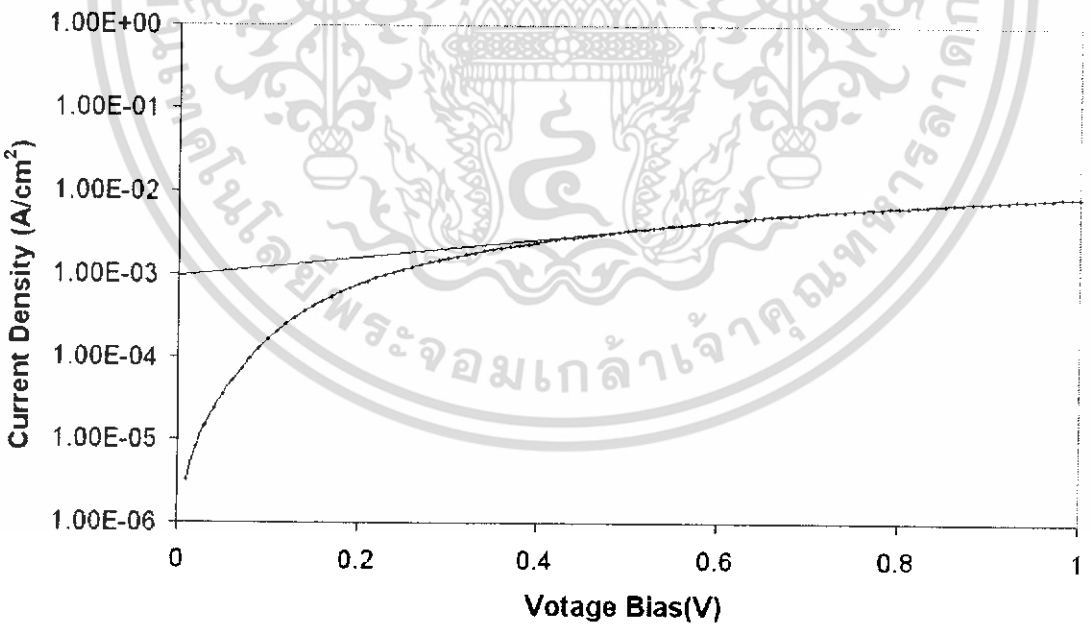
หาค่าแรงดันภายในจากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์ โดยแกนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแส ส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัสในแบบกึ่งล็อก (semi-log) ดังรูปที่ 4.2 ค่าแรงดันภายในมีค่าเท่ากับ 0.32 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.2** การหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะไบอัสตรง

หาค่าความสูงของกำแพงศักย์โดยหาค่าความหนาแน่นกระแสของความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับรอยสัมผัสช็อตกีย์ ($J_0$) จากกราฟในที่รูป 4.3




**รูปที่ 4.3** การหาค่า $J_0$ จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $J_0$ คือ ความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

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

ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์สามารถหาได้จาก

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

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของโบสต์มันน์ ค่าเท่ากับ $8.617\times10^{-5}$ ev/ K

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน กรณีของซิลลิคอนชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

จากกราฟได้ค่า $J_0$ เท่ากับ $1\times10^{-3}$ $A/cm^2$ คำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์โดยใช้สมการที่ 4.3 ทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อตกีย์เท่ากับ 0.535 V ซึ่งค่าความสูงกำแพงศักย์จะเป็นตัวกำหนดกระแสรั่วไหล

**4.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง**

นำเอาอุปกรณ์มาทำการหาความสัมพันธ์ของกระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบและเมื่อได้รับแสงตกกระทบในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

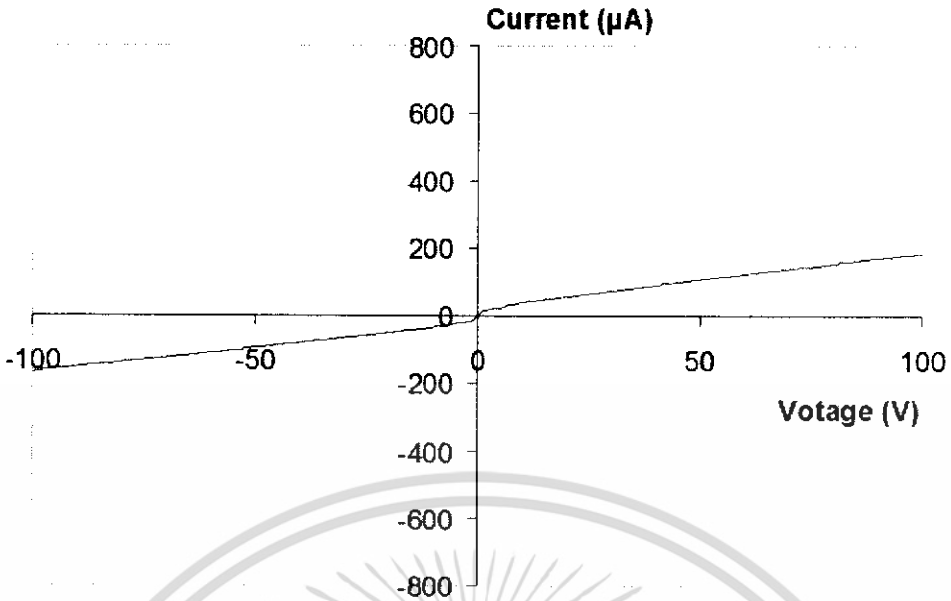
**4.2.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบแบบสัญญาณแสงกระแสตรง**

แรงดันพังทลายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM มีค่ามากกว่า 100V เมื่อเกิดแรงดันแรงดันพังทลายจะทำให้มีกระแสไหลตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM มากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเพียงเล็กน้อย ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เกิดแรงดันพังทลายอาจทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5

ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างMSM ชนิด Cr/n-Si/Crไม่ได้รับแสงตกกระทบ กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM จะมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 4.3 กระแสรั่วไหลจะคงที่แต่จะ มีกระแสรั่วไหลที่ 20 V ประมาณ 27. 7 μA ที่ 40V ประมาณ 40 μA

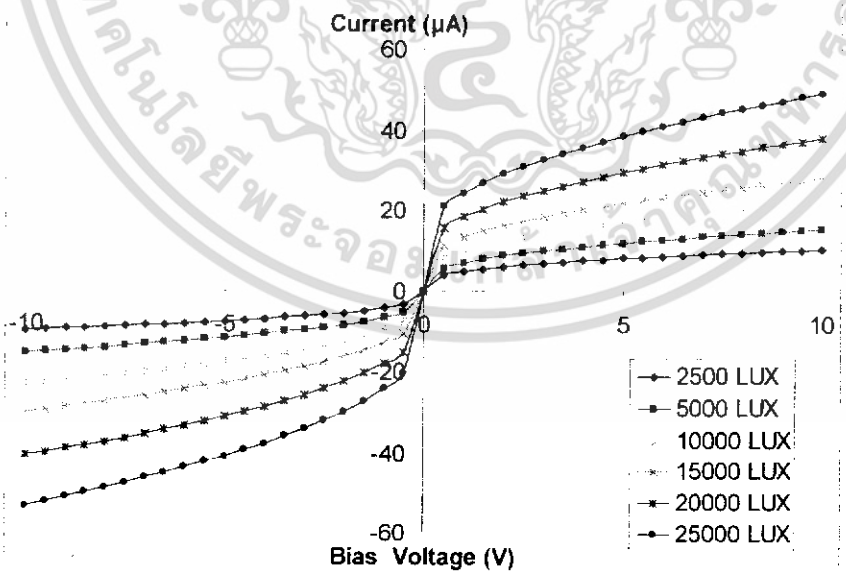
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.3** กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้แสงตกกระทบ

**4.2.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr เมื่อได้รับแสงตกกระทบแบบสัญญาณแสงกระแสตรง**

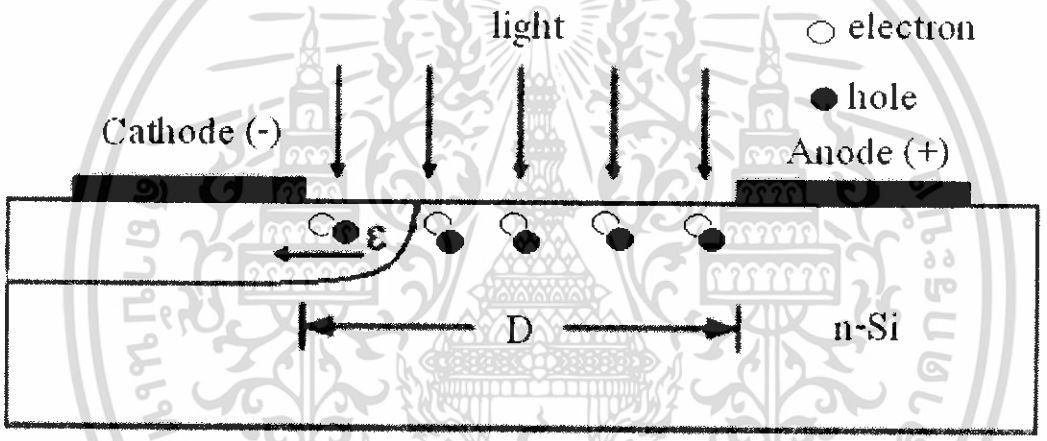
จากการทดลองเลือกอุปกรณ์นี้เพื่อทำการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันแบบกระแสตรงภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มค่าต่างๆ ดังการทดลอง



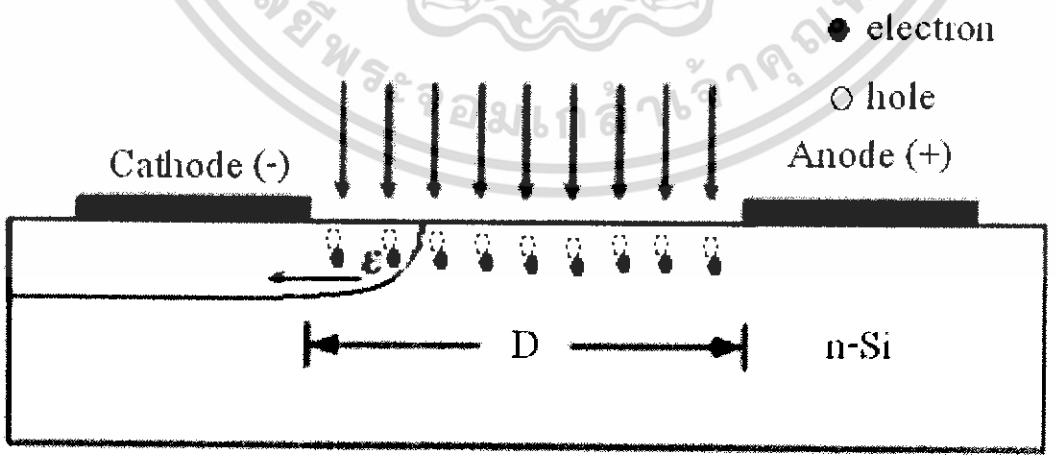

**รูปที่ 4.4** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า20 μm เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr พบว่าที่ความกว้างของพื้นที่รับแสงเดียวกันแต่ความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่รับแสงมีค่าความเข้มแสงต่างกัน คือ 2500 Lux, 5000 Lux ,10000 Lux,15000 Lux,2000 Lux และ 25000 Lux ปริมาณกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าต่างกัน โดยจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่รับแสง เนื่องมาจากความเข้มของแสงที่ฉายลงไปจะกระตุ้นให้เกิดคู่พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจำนวนคู่พาหะอิสระที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำก็จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่รูปที่ 4.5 เป็นกรณีที่ความเข้มของแสงน้อยทำให้จำนวนคู่พาหะอิสระที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำน้อยทำให้ปริมาณกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นน้อยส่วนในรูปที่รูปที่ 4.6 เป็นกรณีที่ความเข้มของแสงมากทำให้จำนวนคู่พาหะอิสระที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำมากทำให้ปริมาณกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นมากขึ้นตามความเข้มแสง



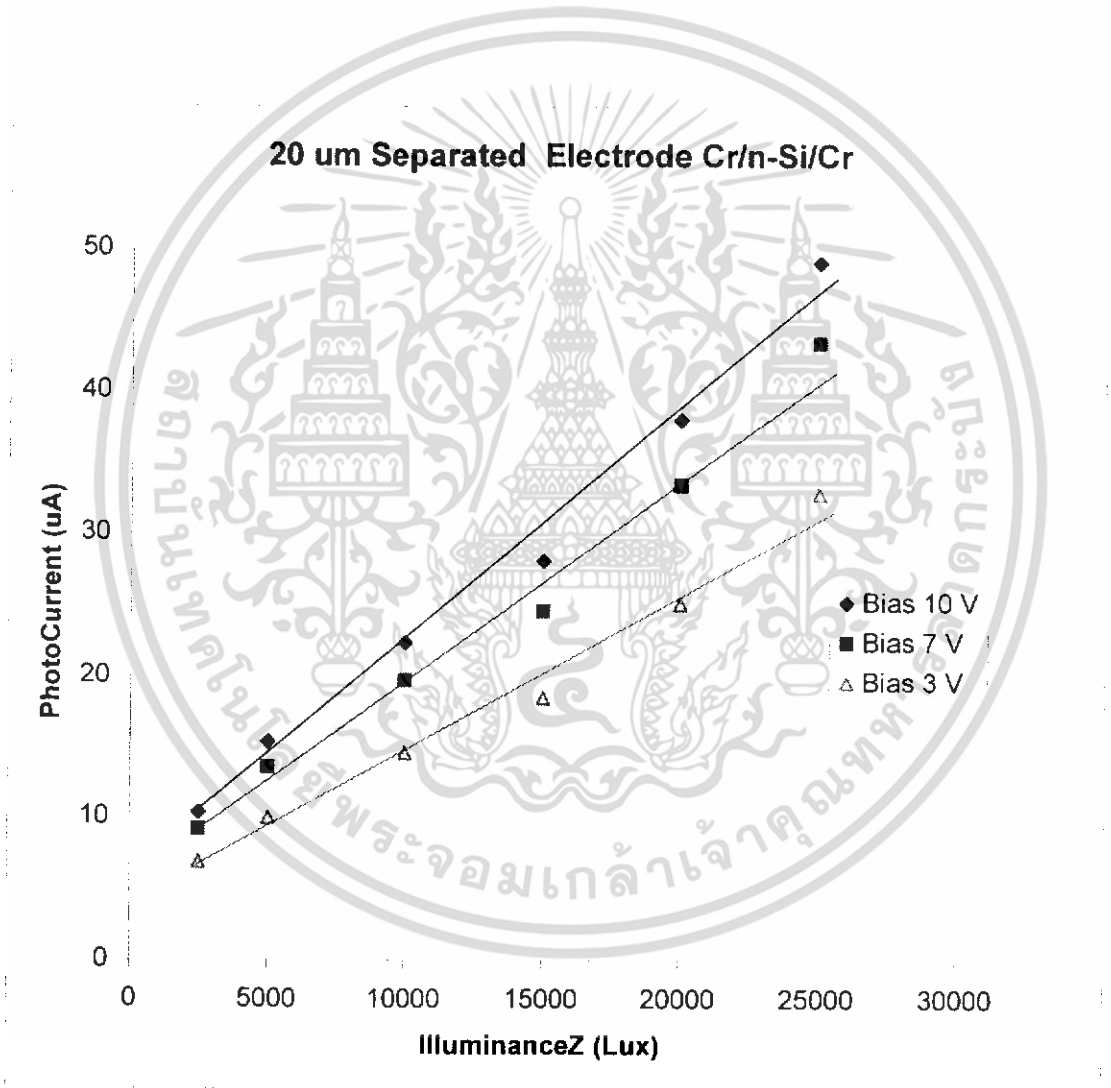

**รูปที่ 4.5** ตัวตรวจวัดแสงได้แสงตกกระทบน้อย




**รูปที่ 4.6** ตัวตรวจวัดแสงได้แสงตกกระทบมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นกระแสโฟโตก็ขึ้นอยู่กับจำนวนคู่พาหะอิสระที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงกล่าวได้ว่ากระแสโฟโตเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำโดยที่ความเข้มแสง 2500 Lux, 5000 Lux ,10000 Lux,15000 Lux,2000 Lux และ 25000 Lux ที่แรงดันไบอัส 10 โวลท์ จะมีค่ากระแสประมาณ 10.4 μA, 15.4 μA, 22.4 μA , 28.1 μA , 38 μA และ 49 μA ตามลำดับ และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ได้มีความสมมาตรดี ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 จากลักษณะสมบัติที่กล่าวข้างต้นทำให้โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ Cr/n-Si/Cr สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงได้



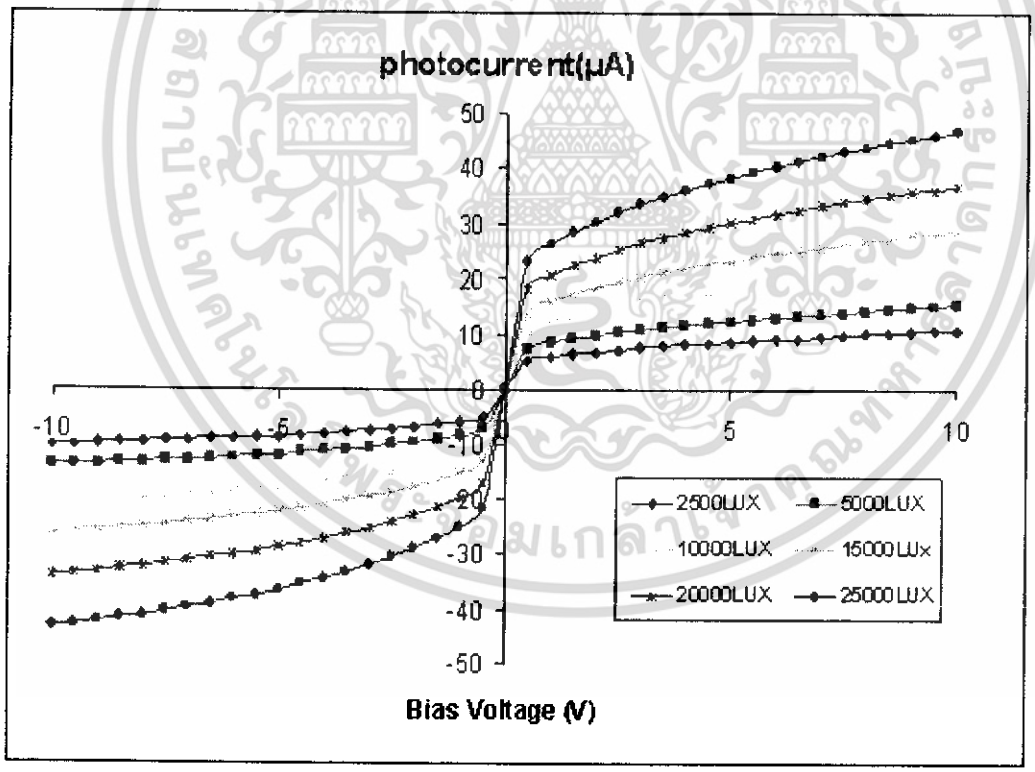

**รูปที่ 4.7** ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่มี ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm เมื่อได้รับแรงดันไบแอส 3,7 และ 10 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20μm, 40μm, 100 μm, 500 μm

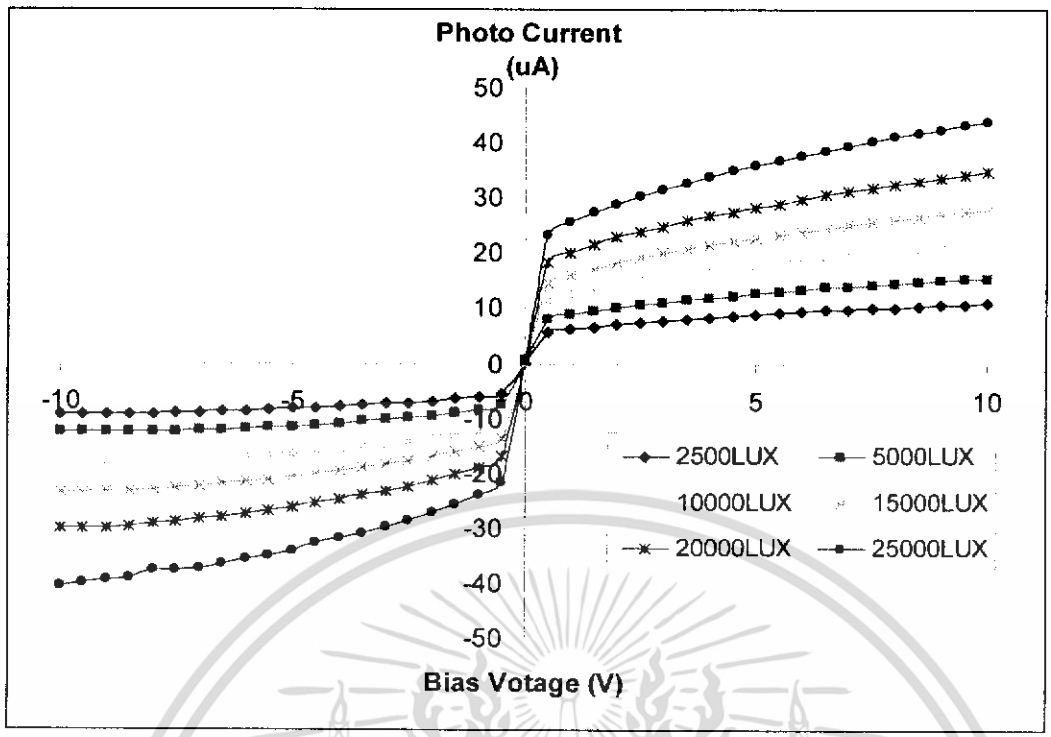
จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่วัดได้เมื่อ นำมาทำการหากระแสแสงของอุปกรณ์ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20-500 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.8 – 4.10 ซึ่งเป็นตัวอย่างของชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเป็น 20 μm ,40μm ,100μm และ 500 μm ตามลำดับ สำหรับกระแสแสงหาได้จากกระแสที่ได้จากการวัด ($I_{Mea}$) ลบด้วยกระแสมืด ($I_{Dark}$) ดังสมการที่ (4.4 ) กระแสแสง-แรงดันสมมาตรดี และ สามารถใช้กับแรงดันสูงได้ กระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าเดียวกัน จะมีค่าเกือบเท่ากันเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง และกระแสแสงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสง ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 μm ถึง 500 μm จะมีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นน้อยมาก

$$I_P = I_{Mea} - I_{Dark} \tag{4.4}$$

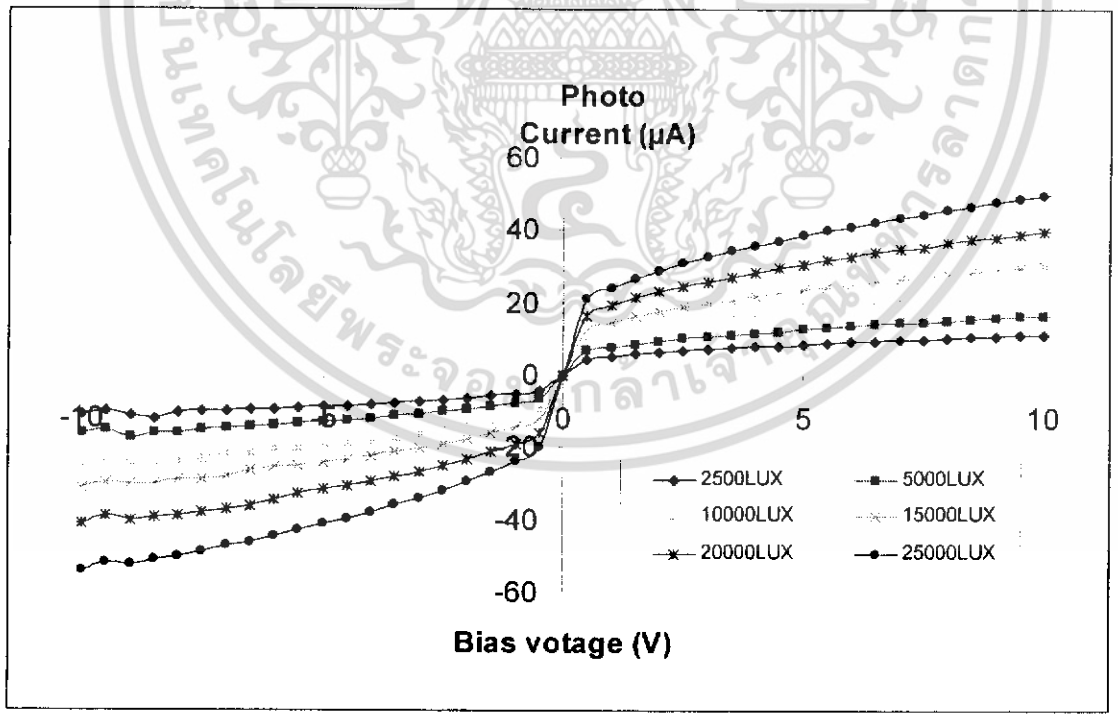



**รูปที่ 4.8** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 40μm เมื่อได้รับ แสง ที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



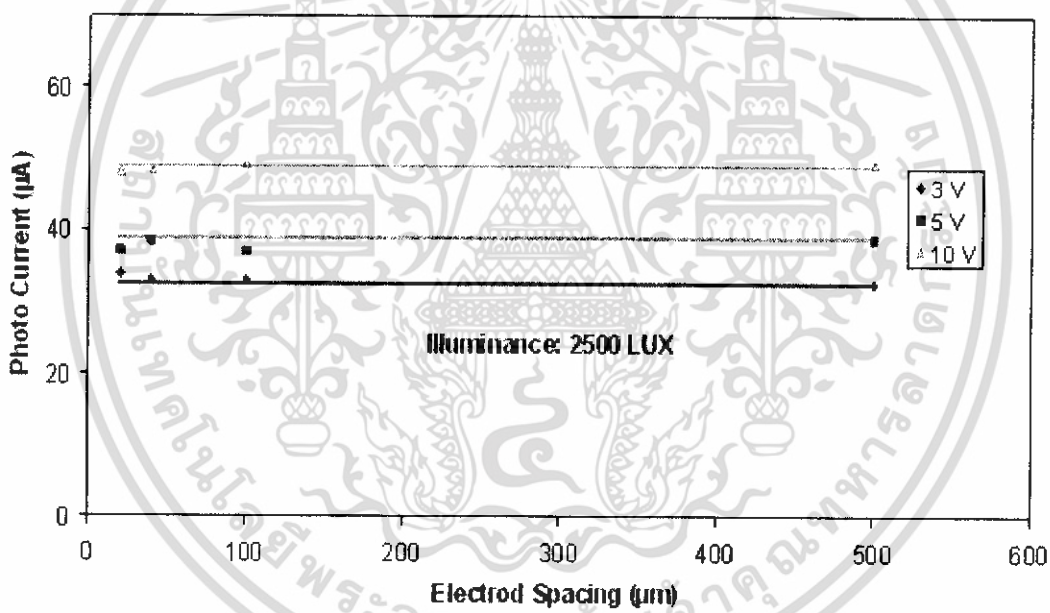

**รูปที่ 4.9** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสงCr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน




**รูปที่ 4.10** ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 500 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน จากรูปที่ 4.8 – 4.10 แต่ละรูปจะมีระยะห่างขั้วไฟฟ้าไม่เท่ากันซึ่งที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าต่างๆ จะได้กระแสแสง-แรงดันสมมาตรกัน เมื่อแรงดันเพิ่มกระแสแสงก็จะเพิ่มขึ้นจากการทดลองคุณสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ทางกระแสตรง ไม่ว่าเราจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่องรับแสง กระแสโฟโตก็จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสภายนอกโดยกระแสโฟโตจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงได้รับแรงดัน แสดงว่ากระแสจะเพิ่มตามแรงดันไบอัสด้วย เมื่อเลือกแรงดันไบอัสที่ 3V, 5V และ 10 V โดยใช้ความเข้มแสงคงที่ ที่ค่า 25000 LUX แล้วนำค่ากระแสแสง-แรงดันจากรูปที่ 4.8 – 4.10 เขียนกราฟดังในรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อกระแสแสงน้อยมากเมื่อได้รับแสงที่ความเข้มคงที่ เมื่อแรงดันคงที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าต่างๆ มีความกว้างบริเวณปลอดประจุพาหะเท่ากันทำให้กระแสแสงเท่ากันที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าต่างๆ

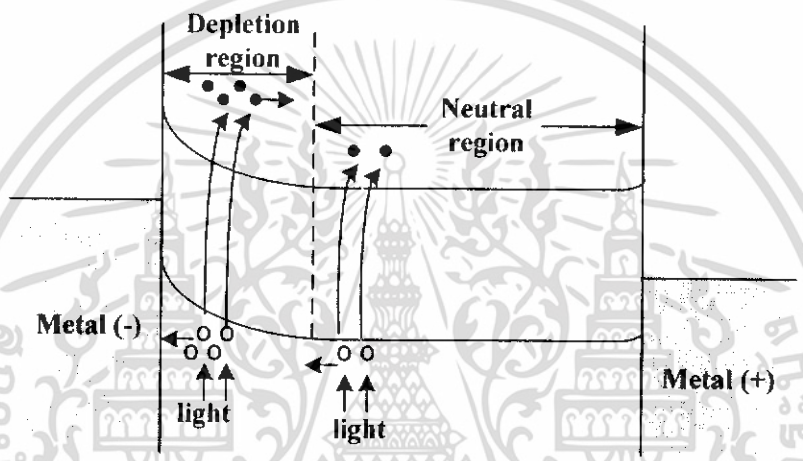



**รูปที่ 4.11** ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 ถึง 500 μm

เมื่อฉายความเข้มของแสงคงที่ ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดค่าต่างๆ ทำให้เกิดคู่อิเล็คตรอน-โฮลจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจะทำให้กระแสแสงไหลตามทิศทางของสนามไฟฟ้า เนื่องจากแสงที่ตกกระทบในบริเวณปลอดประจุพาหะ(Depletion Region) และบริเวณที่เป็นกลาง (Neutral Region) ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นมา อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทางด้าน Metal เกิดการรวมตัว (Recombination) จนแทบจะไม่มีผลใดๆ เกิดขึ้น ส่วนโฮลในบริเวณปลอดประจุพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกผลักออกไปทำให้เกิดกระแสขึ้น กระแสแสง ที่ได้เป็นผลรวมของกระแสแสง และกระแสแสงคอนดัคเตอร์ เมื่อพิจารณาแถบพลังงานในบริเวณนิวทรัล ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่ามีลักษณะแบนราบ ดังนั้นส่วนประกอบกระแสแสงคอนดัคเตอร์จะขึ้นอยู่กับการแพร่ของพาหะที่อยู่ใกล้ขอบของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งเกิดจากกลไกการแพร่ของโฮลที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแสงแล้วแพร่ไปที่ขอบบริเวณปลอดพาหะ โดยพบว่าที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 $\mu$m กระแสแสงที่เกิดจากการแพร่ของพาหะส่วนน้อยมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งกระแสแสงที่ได้เกิดจากบริเวณปลอดพาหะเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากรับแรงดันไบแอสค่าเดียวกัน โดยไม่ขึ้นกับระยะห่างขั้วไฟฟ้าเป็นผลให้กระแสแสงรวมมีค่าเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11




**รูปที่ 4.12** แผนภาพแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

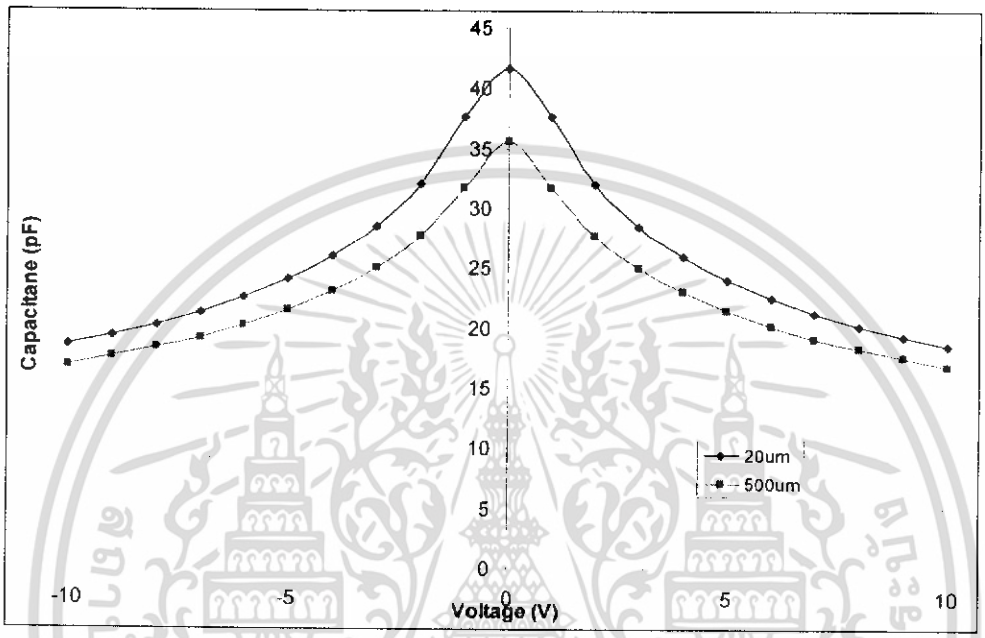
### 4.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr

โดยความจุไฟฟ้ารวม ($C_T$) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสองประกอบ ด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านคาโทด ($C_C$) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านอาโนด ($C_A$) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังในรูปที่ 2.25 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ซึ่งตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างเป็นแบบสมมาตร ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับจึงมีความสมมาตรกันและจะมีค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดัน 0 V และจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้น ที่ระยะความกว้างของพื้นที่รับแสงต่างกันค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีลักษณะที่สมมาตรกัน เนื่องจากโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เป็นโครงสร้างที่สมมาตรกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นไม่ขึ้นอยู่กับความกว้างของพื้นที่รับแสงแต่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้กับ MSM

ดังนั้นความจุไฟฟ้าของ MSM จึงมีค่าใกล้เคียงความจุไฟฟ้าด้านที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับ โดยที่แรงดันไบแอส 10 V ที่ 500 μm มีความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 16.87 pF ที่ 20μm มีความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 18.57 pF



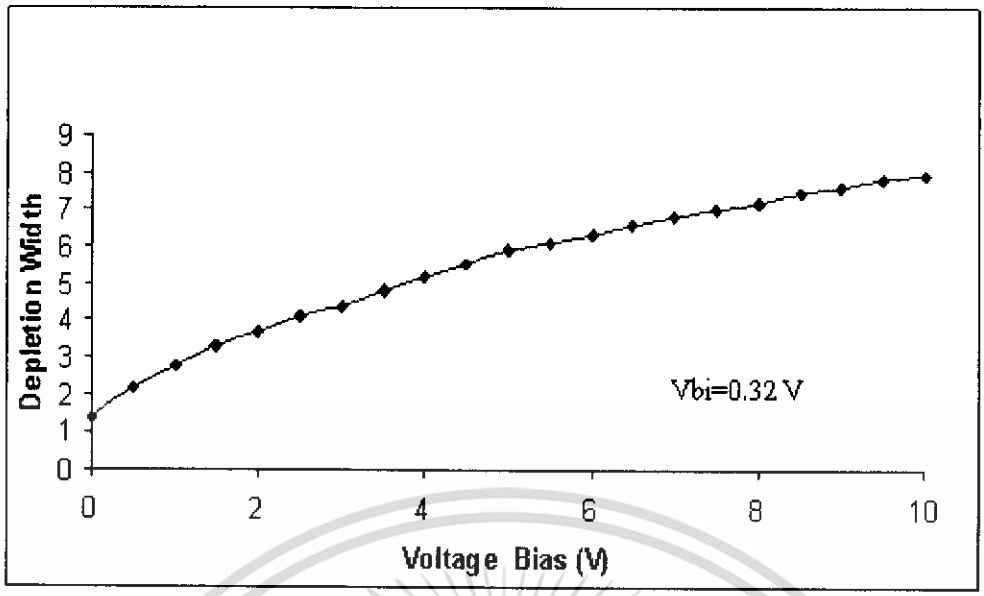

**รูปที่ 4.13** ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm และ 500 μm เมื่อได้รับแรงดันไบอัสค่าต่างๆ

### 4.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่ขึ้นกับแรงดันไบไบอัส

จากการทดลองพบว่ากระแสแสงที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดกว้างระหว่าง 20-500 μm แต่กระแสแสงจะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสที่ให้กับตัวตรวจวัดแสง โดยแรงดันไบอัสจะมีผลต่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งบริเวณปลอดพาหะของ ตัวตรวจวัดแสง จะมีค่าใกล้เคียงกับด้านที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.5) ส่วนในรูปที่ 4.14 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ที่มีศักดิ์ภายในเท่ากับ 0.32 V

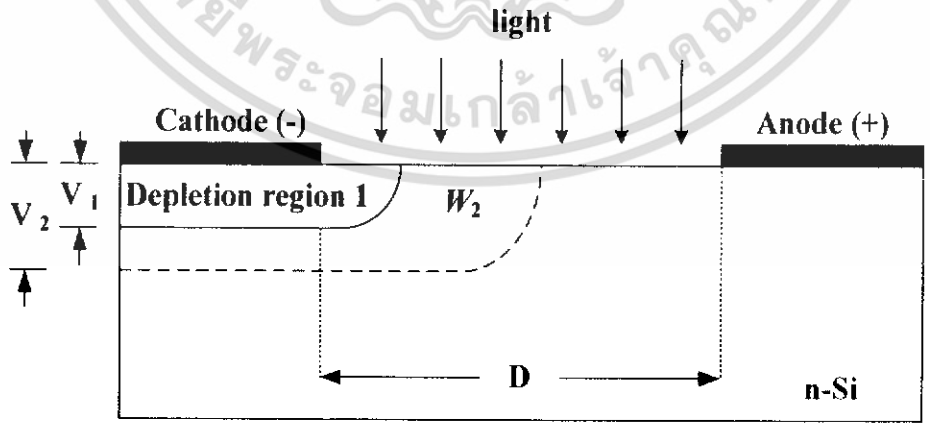
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S (V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \qquad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.14** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

จากรูปที่ 4.15 เมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับแรงดันไบอัส $V_1$ ทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อแรงดันไบอัสมีค่ามากขึ้น $V_2$ ทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ได้รับแรงดันไบอัส $V_1$ ทำ เมื่อแสงตกกระทบพบว่ากระแสแสงจะมีค่ามาก เมื่อให้แรงดันไบอัสขึ้น โดยเป็นผลมาจากกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะมีค่ามากขึ้นตามบริเวณปลอดพาหะที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส จึงกล่าวได้ว่ากระแสแสงมีค่ามากขึ้นเมื่อแรงดันไบอัสที่ให้มีค่ามากขึ้น ทำให้การควบคุมกระแสแสงทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสที่ให้กับตัวตรวจวัดแสง




**รูปที่ 4.15** ความกว้างปลอดพาหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษากระบวนการสร้าง การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Cr/n-Si/Cr ขั้นตอนของกระบวนการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1.การสร้างตัวตรวจวัดแสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซิลิคอนและโลหะโครเมียม ด้วยกระบวนการสร้างดังนี้ คือ ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีเบื้องต้นเมื่อทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้วนำแผ่นซิลิคอนที่ได้ไปทำการเคลือบโลหะโครเมียมด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริ่งหลังจากนั้นก็จะมาผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีเพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าและเปิดช่องรับแสงของตัวอุปกรณ์แล้วนำมากัดชั้นโครเมียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกก็จะได้เป็นตัวอุปกรณ์ออกมาและขั้นตอนที่ 2 คือการนำตัวอุปกรณ์ที่เราผ่านกระบวนการสร้างมาเรียบร้อยแล้วมาทำการวัดลักษณะสมบัติ กระแสแสง-แรงดัน และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์

ซึ่งผลที่ได้จากการวัดคุณสมบัติการเป็นช็อตกีย์ไดโอดนั้นก็คือจะมีแรงดันพังทลายอยู่ที่มากกว่า 100 โวลต์ และมีแรงดันภายในของตัวอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง ($V_{bi}$) มีค่าอยู่ที่ 0.32 โวลต์ ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ ($\phi_{bn}$) ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.535โวลต์

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ซึ่งโฟโตไดโอดโครงสร้างเป็นแบบสมมาตร ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับจึงมีความสมมาตรกันและจะมีค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดัน 0 V มีค่าเท่ากับ 41.35 pF ที่ ที่ 20 μm มีค่าเท่ากับ 35.89 pF ที่ 500 μm และจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้น ที่ระยะความกว้างของพื้นที่รับแสงต่างกัน ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีลักษณะที่สมมาตรกัน ดังนั้นความจุไฟฟ้าของ MSM จึงมีค่าใกล้เคียงความจุไฟฟ้าด้านที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับ โดยที่แรงดันไบแอส 10 V ที่ 500 μm มีความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 16.87 pF ที่ 20μm มีความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 18.57 pF ดังนั้นความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นไม่ขึ้นอยู่กับความกว้างของพื้นที่รับแสงแต่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้กับ MSM

ผลที่ได้จากการวัดคุณสมบัติ กระแสแสง-แรงดัน ซึ่งขณะที่ไม่มีแสงมาตกกระทบตัวตรวจวัดแสง ก็คือจะมีกระแสมืดไหลผ่านตัวอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง เมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสอิ่มตัวก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของแรงดันไบอัสที่ป้อนให้ด้วย มีกระแสรั่วไหลที่ 20 V ประมาณ 27. 7 μA ที่ 40V ประมาณ 40 μAที่ 100V ประมาณ 90.4 μA

เมื่อแสงมาตกกระทบอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงก็จะมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงมากขึ้นตามความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้นโดยที่ความเข้มแสง 2500 Lux, 5000 Lux ,10000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lux,15000 Lux,2000 Lux และ 25000 Lux ที่แรงดันไบอัส 10โวลท์ จะมีค่ากระแสประมาณ 10.4 μA , 15.4 μA ,28.1 μA, 22.4 μA, 38 μA และ 49 μA ตามลำดับ และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ได้มีความสมมาตรดี

เมื่อมีแสงตกกระทบคงที่ในขณะที่ระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงจะมีกระแสแสงคงที่เนื่องจากกระแสแสงจะเกิดที่บริเวณปลอดพาหะเป็นส่วนใหญ่แต่ในส่วนของบริเวณนิวทรัลจะเกิดกระแสแสงน้อยแต่จะมีกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะไหลผ่านบริเวณนิวทรัลเมื่อมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมากขึ้นโดยแรงดันไบอัสคงที่จะทำให้บริเวณนิวทรัลเพิ่มขึ้นแต่บริเวณปลอดพาหะคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม

[1] สมเกียรติ ศุภเดช., **เซมิคอนดัคเตอร์ฟิสิกส์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.

[2] สมเกียรติ ศุภเดช., **เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545.

[3] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ., "ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/ Mo แบบพลานาร์" วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณหารลาดกระบัง, 2547.

[4] สราวุทธ วิศวแสวงสุข, สมชาติ พนาเกษม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, โยอิจิ ยาซุมุระ และ วิสุทธิ์ฐิติรุ่งเรือง., "การศึกษาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสแบบชอตต์กีที่ผ่านการซินเตอร์ริง", **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า**, ครั้งที่ 23, พฤศจิกายน 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้