

ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวตรวจจับแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์
Temperature Effect of Planar MSM Al/n-Si/Al Photodetector



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์

Temperature Effect of Planar MSM Al/n-Si/Al Photodetector

โดย

นาย โชติช่วง ไชยประเสริฐ รหัส 48015204

นาย จัทรชัย คงแก้ว รหัส 48015201

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

รพ.
88250
2550

เลขที่.....
82189
เลข.....
วันเดือนปี -9 ก.ค. 2551

ปริญญาโท สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

b. 11946726

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์

ผู้จัดทำ

1. นาย โชติช่วง ไชยประเสริฐ รหัสประจำตัว 48015204
2. นาย ฉัตรชัย คงแก้ว รหัสประจำตัว 48015201



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวตรวจวัดแสงชนิด AI/n-Si/AI แบบพลาเนียร์

โชติช่วง ไชยประเสริฐ รหัส 48015204

ฉัตรชัย กงแก้ว รหัส 48015201

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง โลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ (MSM) โครงสร้าง AI/n-Si/AI แบบพลาเนียร์และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจวัดแสงตั้งแต่ อุณหภูมิห้องขึ้นไป โดยอะลูมิเนียมจะถูกสร้างบนแผ่นซิลิคอนชนิด n ด้วยกระบวนการระเหยสาร ในสุญญากาศ แล้วทำการเปิดช่องรับแสง ด้วยกระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี จากนั้นนำไปตรวจวัด คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ทั้งขณะมีแสงและไม่มีแสงมาตกกระทบ ในขั้นตอนการศึกษาผลของ อุณหภูมิที่มีผลต่อตัวตรวจวัดแสง เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยชุดเลเซอร์ไดโอด แหล่งจ่ายแรงดัน แอมป์มิเตอร์ และเคาแบบที่บแสงให้อุณหภูมิโดยขดลวดอินฟราเรดกับชุดควบคุมอุณหภูมิ พบว่า เมื่อไม่มีแสงตกกระทบกระแสจะไหลผ่านได้น้อยมากและเมื่อมีแสงมาตกกระทบกระแสจะไหล ผ่านมากขึ้นตามความเข้มของแสงที่ตกกระทบ พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและวัด คุณสมบัติกระแส-แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอุณหภูมิ กระแสที่ไหลจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้นและจะไหลได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง แรงดันพังทลายเป็นแบบอวาแลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature effect of planar Al/n-Si/Al Photodetector

Mr. Chotchuang Chaiprasert ID 4805204

Mr. Chatchai Kongkaew ID 4805201

Assist.Prof.Dr.Surasak Niemchareon Advisor

Educational Year 2007

ABSTRACT

The purpose of Thesis is present the fabrication of photodetector and study temperature effect of planar metal/semiconductor/metal photodetector by aluminium fabric on n-type silicon plate also evaporate process in vacuum and then open hole receive light by photolithography. After then the photo response in dc signal was measured in term of I-V characteristic, while receive light and dark found in dark current was a few and photo current was increased follow light. In study temperature effect photodetector instrument feature laser diode ,ampmeter ,dim stove give temperature by infrared coil and temperature control set. Found when vary temperature and measured in term of I-V characteristic vary from temperature ,current increased follow temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยเหลือเอาใจใส่ คอยแนะนำชี้แจงข้อบกพร่องต่างๆ และเป็นที่ปรึกษาการทำโครงการ ตลอดจนช่วยเหลือควบคุมกระบวนการในการออกแบบและการสร้าง

ขอขอบคุณพี่นักศึกษาปริญญาโทนายสุรชาติ เมืองอ่ำ ในการช่วยเหลือด้านข้อมูลและเทคนิคกระบวนการออกแบบและการสร้าง ทำให้สามารถจัดทำปริญญานิพนธ์นี้เสร็จได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และญาติพี่น้อง ตลอดจนเพื่อนๆทุกคน ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ตัวตรวจวัดแสงและกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ	4
2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ	4
2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง	4
2.1.2 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล	5
2.1.3 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล	6
2.2 การตอบสนองทางแสง	8
2.3 ชนิดและโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบต่างๆ	9
2.3.1 โฟโตคอนดักเตอร์	9
2.3.2 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น	10
2.3.3 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-i-n	10
2.3.4 โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์	11
2.4 รอยสัมผัสโลหะ – สารกึ่งตัวนำ	12
2.4.1 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนการสัมผัส	12
2.4.2 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังการสัมผัส	13
2.4.3 คุณสมบัติรอยสัมผัสขณะได้รับไบแอสตรง	15
2.4.4 คุณสมบัติรอยสัมผัสขณะได้รับไบแอสกลับ	16
2.4.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MS เปรียบเทียบกับ ไดโอดรอยต่อพีเอ็น	17
2.4.6 กระแสที่ไหลในรอยสัมผัส-สารกึ่งตัวนำ MS	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.5	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	21
2.5.1	โฟโตไดโอดแบบพลาเนอร์ โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาเนอร์ หรือโครงสร้าง MSM	21
2.5.2	โครงสร้างของ MSM ในสถานะสมดุลความร้อน	22
2.5.3	โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบแอส	23
2.5.4	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบแอส	24
2.5.5	โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ	24
2.6	ผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก	26
2.6.1	ผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบแอสตรง	28
2.6.2	ผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบแอสย้อนกลับ	32
2.7	ความเร็วเนื่องจากความร้อน	34
2.7.1	ผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ	36
2.8	การพังทลายที่รอยต่อพี-เอ็น	36
2.8.1	การพังทลายขณะได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ	36
2.8.2	การพังทลายของรอยต่อแบบอะวาแลนซ์	37
2.8.3	การพังทลายแบบซีเนอร์	44
2.8.4	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีไดโอด	46
บทที่ 3	การเตรียมอุปกรณ์ทดลอง การสร้าง และ การทดลอง	48
3.1	การเตรียมอุปกรณ์ทดลอง	48
3.1.1	การเตรียมเตาความร้อน	48
3.1.2	การเตรียมชุดทดลอง	48
3.2	การเตรียมชิ้นงานตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al	52
3.2.1	ลวดลายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al	52
3.2.2	กระบวนการสร้าง	53
3.3	การทดลอง	57
3.3.1	การทดลองวัดอุณหภูมิภายในเตา	58
3.3.2	ศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง	58
3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบ สัญญาณแสงกระแสตรง	59
3.3.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	60
3.3.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง	60
3.3.7 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดันฟังก์ทลาย ในลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	62
4.1 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิภายในเตา	62
4.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง	63
4.2.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ	63
4.2.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ในขณะที่รับแสงกระแสตรง	64
4.3 ผลการทดลองศึกษาเทคนิคการวัดผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง	64
4.4 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้น เมื่อได้รับแสงตกกระทบแบบสัญญาณแสงกระแสตรง	66
4.5 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ ตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสง	68
4.6 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบ	69
4.7 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันฟังก์ทลาย ในลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสง	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.8 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิต่ำที่ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงเมื่อทำการวัดหลายครั้ง	73
บทที่ 5 สรุปลงผลการทดลอง	75
บรรณานุกรม	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค	5
2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรีนซิค (ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี	6
2.3 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ	8
2.4 (ก) โครงสร้างของโฟโตคอนดักเตอร์ (ข) แถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์	9
2.5 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น เมื่อได้รับแสง	10
2.6 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n เมื่อได้รับแสง	10
2.7 โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาแลนซ์ชนิดรีซทอร์	11
2.8 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส (ก) โลหะ (ข) สารกึ่งตัวนำ	12
2.9 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำภายหลังการสัมผัส (ก) เริ่มต้นสัมผัส (ข) ภายหลังสัมผัสสถานะสมดุล	13 14
2.10 (ก) การให้ไบแอสตรงกับรอยต่อ (ข) แถบพลังงานขณะได้รับไบแอสตรงและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	15
2.11 (ก) การให้ไบแอสกลับกับรอยต่อ (ข) แถบพลังงานขณะได้รับไบแอสกลับและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	16
2.12 เปรียบเทียบคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ ไดโอดแบบ MS และไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น	20
2.13 (ก) ภาพตัดขวางโครงสร้าง MSM (ข) ภาพด้านบน โครงสร้าง MSM ชนิด A1/n-Si/A1	21

สารบัญรูป (ต่อ)

2.14 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM	22
(ข) แถบพลังงานในสถานะสมดุลความร้อน	
(ค) สัญลักษณ์ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM	
2.15 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบแอส	23
2.16 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแรงดันไบแอสและมีแสงตกกระทบ	24
2.17 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ	25
2.18 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกที่อุณหภูมิต่างๆ	26
(ก) ที่อุณหภูมิต่ำ	
(ข) ที่อุณหภูมิห้อง	
(ค) ที่อุณหภูมิสูง	
2.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในซิลิคอนชนิดเอ็นกับอุณหภูมิ	27
2.20 การให้ไบแอสตรงแก่รอยต่อพีเอ็น	28
2.21 แสดงแถบพลังงานไบแอส	28
2.22 การให้ไบแอสย้อนกลับแก่รอยต่อพีเอ็น	32
2.23 แถบพลังงานขณะให้ไบแอสย้อนกลับ	32
2.24 กราฟระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น	33
2.25 การเคลื่อนที่ของพาหะในผลึกสารกึ่งตัวนำเมื่อ อุณหภูมิ $T > 0$ K	34
(ก) กรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าและ	
(ข) กรณีอยู่ในสนามไฟฟ้า	
2.26 การชนกันระหว่างพาหะส่วนน้อยเช่นอิเล็กตรอนกับอะตอมสารกึ่งตัวนำในบริเวณ ปลอดพาหะในขณะที่ยังได้รับไบแอสย้อนกลับ	38
(ก) เมื่อ $ V_A \ll V_B$	
(ข) เมื่อ $ V_A \rightarrow V_B$	
2.27 การทำงานในย่านต่างๆของไดโอดขณะที่ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับซึ่ง สัมพันธ์กับค่าของแฟกเตอร์การทวีคูณของพาหะ โดย $M = 1$ เป็นย่านทำงานปกติ, $M > 1$ เป็นย่านการทวีคูณของพาหะ และที่ $M = \infty$	40

สารบัญรูป (ต่อ)

2.28	ค่าของแรงดันพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นแบบชั้นบันได $p^+ - n$ และ $p - n^+$ ของเยอรมันเนียม ซิลิคอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งขึ้นกับค่าของความหนาแน่นอะตอม สารเจือในด้านที่มีความหนาแน่นสารเจือต่ำ โดยเป็นการพังทลายแบบอะวาแลนซ์ ที่อุณหภูมิ $T=300\text{ K}$	41
2.29	ลักษณะโครงสร้างของไดโอด ซึ่งมีมุมหรือส่วนโค้ง จนเกิดผลของ curvature effect ทำให้แรงดันพังทลายมีค่าต่ำกว่าปกติ	42
2.30	แบบจำลองเกิดการปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์หรืออุโมงค์ของอิเล็กตรอน	44
2.31	การเกิดปรากฏการณ์ การทะลุผ่านกำแพงศักย์ (tunneling) หรือทะลุอุโมงค์ในซีเนอร์ไดโอด	44
2.32	การเปรียบเทียบคุณสมบัติการพังทลายแบบอะวาแลนซ์และแบบซีเนอร์	45
2.33	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดิกไดโอด 3.1 เตา เครื่องซอส-มิเตอร์ คอมพิวเตอร์	46
3.1	เตา เครื่องซอส-มิเตอร์ คอมพิวเตอร์	48
3.2	ภายในเตา	48
3.3	ขาจับตัวตรวจวัดแสง	49
3.4	ขาจับตัวตรวจวัดแสง และ ชุดเลเซอร์	49
3.5	ชุดวงจรควบคุมอุณหภูมิในเตา	50
3.6	บล็อกไดอะแกรมของชุดวัดอุณหภูมิของโฟโตไดโอด	50
3.7	บล็อกไดอะแกรมของเตา	51
3.8	โครงสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง $Al/n-Si/Al$	52
3.9	ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง $Al/n-Si/Al$	55
3.10	ภาพถ่ายของอุปกรณ์ $Al/n-Si/Al$ ที่สร้างเสร็จแล้ว	56
3.11	ภาพถ่ายของอุปกรณ์ $Al/n-Si/Al$ อุปกรณ์ที่ผ่านการเชื่อมต่อกับขั้วเงิน ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $1 \times 1\text{ mm}^2$	56
3.12	แผนภาพที่ใช้ในการทดลองวัดลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันขณะ ไม่ได้รับแสงตกกระทบ	57

สารบัญรูป (ต่อ)

3.13	แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง	57
3.14	แผนภาพที่ใช้ในการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส – แรงดัน ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	58
3.15	แผนภาพที่ใช้ในการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง	58
3.16	แผนภาพที่ใช้ในการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพหุหลายลักษณะ สมบัติกระแส - แรงดัน	59
4.1	อุณหภูมิเตาเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง 27°C ที่ตั้งค่าที่ 150°C	61
4.2	การเปลี่ยนอุณหภูมิเตาที่ตั้งค่าที่ 27°C ถึง 100°C	62
4.3	กระแสมีคของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้แสงตกกระทบ	62
4.4	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสง	63
4.5	ลักษณะสมบัติกระแสแสง - แรงดันตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสง	64
4.6	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้ไม่รับแสงที่อุณหภูมิต่างๆ	64
4.7	ลักษณะสมบัติกระแสมีค-อุณหภูมิของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แรงดัน 5 V และ 10 V	65
4.8	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสง 1.2 mW ที่อุณหภูมิต่างๆ	66
4.9	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสง 1.2 mW ที่อุณหภูมิต่างๆ	66
4.10	ลักษณะสมบัติกระแสแสงต่อกระแสมีค-แรงดัน ขณะได้รับแสง 1.2 mW ที่อุณหภูมิต่างๆ	67
4.11	ลักษณะสมบัติกระแสแสงต่อกระแสมีค-อุณหภูมิ ขณะได้รับแสง 1.2 mW ที่ค่าแรงดันต่างๆ	67
4.12	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเบรกคาวน์	68
4.13	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพหุหลาย ที่อุณหภูมิ 27°C	68
4.14	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพหุหลาย ที่อุณหภูมิ 50°C	69
4.15	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพหุหลาย ที่อุณหภูมิ 75°C	69

สารบัญรูป (ต่อ)

4.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพังทลาย ที่อุณหภูมิ 100 °C	70
4.17 ความเปลี่ยนแปลงของกระแสมัดที่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการวัดผ่านไปหลายครั้ง	71
4.18 ความเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงที่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการวัดผ่านไปหลายครั้ง	71



บทที่ 1

บทนำ

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงเป็นหนึ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้มีการพัฒนาคุณสมบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มขีดความสามารถในการใช้งานมาโดยตลอด ตัวตรวจวัดแสงก็เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในทางอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวาง และได้มีการพัฒนาโครงสร้างหลายแบบด้วยกัน เช่น โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) โฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น (p-n photodiode) โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-i-n (p-i-n photodiode) อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode)

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาเนารี (Planar Metal-Semiconductor-Metal Photodetector) หรือโครงสร้าง MSM เป็นโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นและคาดว่าจะเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีบทบาทสำคัญในทางอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นและน่าสนใจหลายประการ เช่น เป็นอุปกรณ์ที่สร้างได้ง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ ทำให้มีการตอบสนองสัญญาณที่ความถี่สูง มีแบนวิดท์ที่กว้าง

ในปริญญานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าและทางแสง โดยเริ่มจากการสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM สลิตเดี่ยว ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 100 ไมโครเมตร แบบพลาเนารี ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น และโลหะที่ใช้เป็นอลูมิเนียม (Al) สร้างโดยกระบวนการระเหยสาร ด้วยความร้อนในสุญญากาศ (vacuum evaporation) นำไปทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithographic process) และกระบวนการ อิชซิง (Etching) ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน และมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สร้างเป็นวงจรรวมต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

- 1.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al โดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นและโลหะอลูมิเนียม ซึ่งทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกี๋ ทั้ง

ซิลิคอนและอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก และสร้างด้วยเทคโนโลยีซิลิคอนที่มีความแพร่หลาย

- 1.2 ศึกษาขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีกระบวนการสร้างง่าย สอดคล้องกับกระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถสร้างพร้อมกับการสร้างวงจรรวมได้
- 1.3 สร้างชิ้นงานตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al
- 1.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในแบบสัญญาณกระแสตรง
- 1.5 นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการสร้าง พารามิเตอร์ต่างๆ และการนำไปใช้งาน ให้ได้ตัวตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นต่อไป

ขอบเขตของงาน

เพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการงาน ดังนั้นขอบเขตของโครงการงานจึงเริ่มต้นด้วยการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบสลิตเดี่ยว โดยมีขนาดของขั้วอลูมิเนียมเท่ากับ $1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ มีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมเท่ากับ $100 \mu\text{m}$ โดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) สภาพต้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร การเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียมบนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนจะใช้วิธีการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ ใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมแบบพลาสมาในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อการทำงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM โดยการวัดเมื่อถูกฉายแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณกระแสตรง (direct current : Idc) จะวัดในลักษณะ กระแส-แรงดัน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ให้มีประสิทธิภาพเพื่อการนำไปใช้งานในอุณหภูมิที่เหมาะสม และอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิของโครงสร้างแบบ MSM ต่อไป

ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.1 จัดทำชุดเตาความร้อน และติดตั้งชุดเลเซอร์
- 1.2 ทำการทดสอบเตาที่ออกแบบ
- 1.3 ศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสง
- 1.4 ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.5 สร้างอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงภายในห้องปฏิบัติการ
- 1.6 วัดคุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างในด้านผลของอุณหภูมิ
- 1.7 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

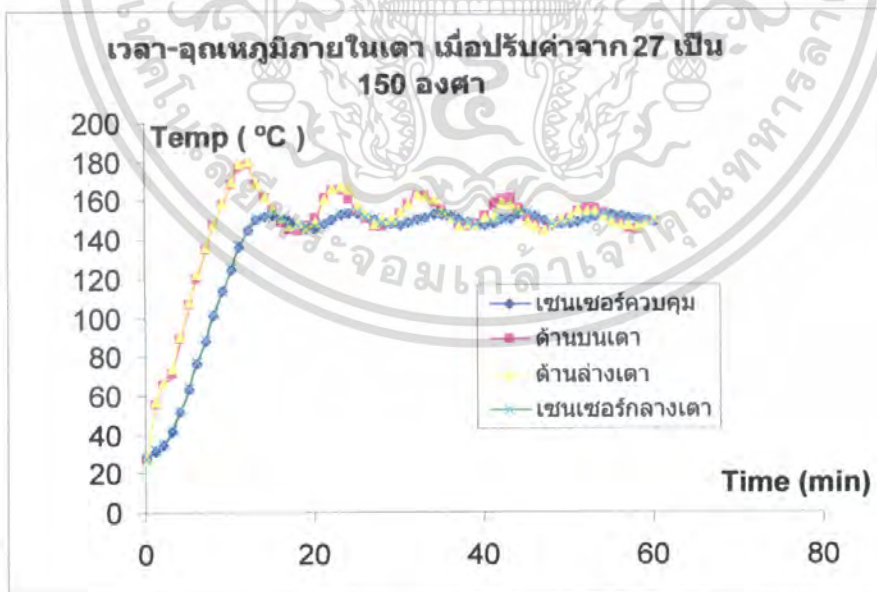
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิภายในเตา

จากการทดลองเมื่อตั้งอุณหภูมิทดสอบที่ 150 °C อุณหภูมิใช้งานโฟโตไดโอดจริงไม่เกิน 150 °C จากการเซ็เตา ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิเตาจะเริ่มคงที่ตามค่าที่เซ็ตไว้มีค่าอุณหภูมิแกว่งประมาณไม่เกิน ± 2 °C อุณหภูมิจากชุดควบคุมมีค่าใกล้เคียงกับตัววัด ± 1 °C ส่วนอุณหภูมิด้านบน และด้านล่างเตาจะมีอุณหภูมิต่างจากกลางเตาประมาณ ± 5 °C แสดงดังรูปที่ 4.1

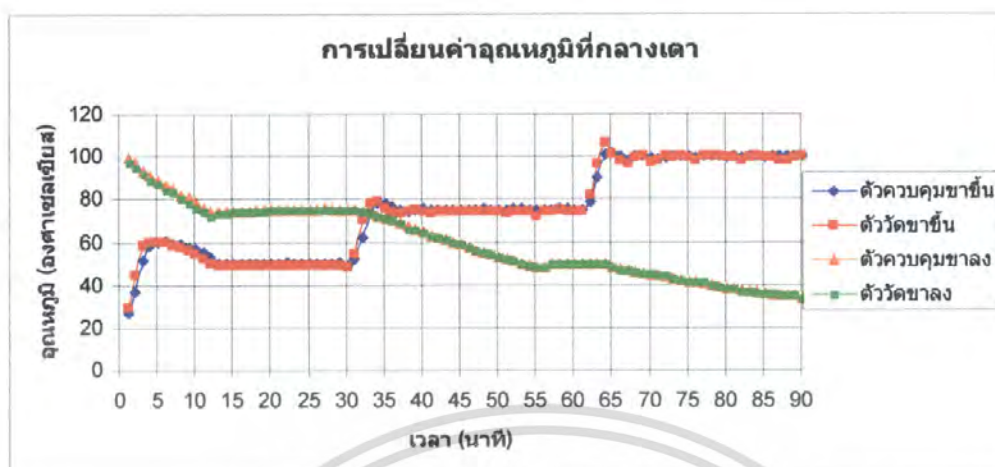
จากค่าที่ได้ในการทดลอง การใช้งานเตาในการนำมาให้อุณหภูมิตัวตรวจวัดแสง จึงควรนำชุดวัดอุณหภูมิของตัวคอมพิวเตอร์มาไว้ใกล้ตัวตรวจวัดแสงที่สุด เพื่อให้ค่าอุณหภูมิที่ตัวตรวจวัดแสงมีค่าใกล้เคียง กับอุณหภูมิจริงมากที่สุด

จากการทดลองทำการวัดอุณหภูมิในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ วัดด้วยเซนเซอร์ตัวควบคุม และเซนเซอร์ตัววัดกลางเตา จะใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเร็วกว่าในช่วงการลดอุณหภูมิ จึงควรใช้เตาในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิเตาเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง 27 °C ที่ตั้งค่าที่ 150 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

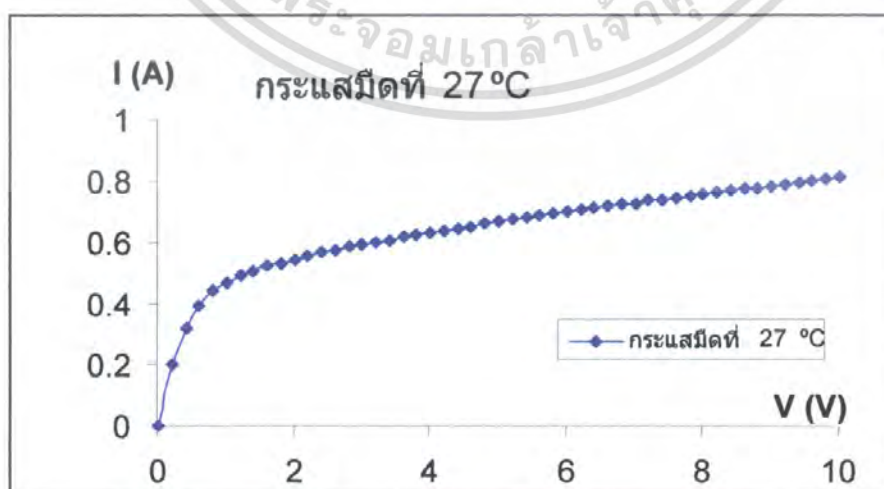


รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนอุณหภูมิเตาที่ตั้งค่าที่ 27 °C ถึง 100 °C

4.2 ผลการทดลองศึกษาเทคนิคการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

4.2.1 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้เครื่องซอส-มิเตอร์ ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบ กระแสมีคของตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าเพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 4.3 กระแสรั่วไหลมีค่า 10 V ประมาณ 811 nA

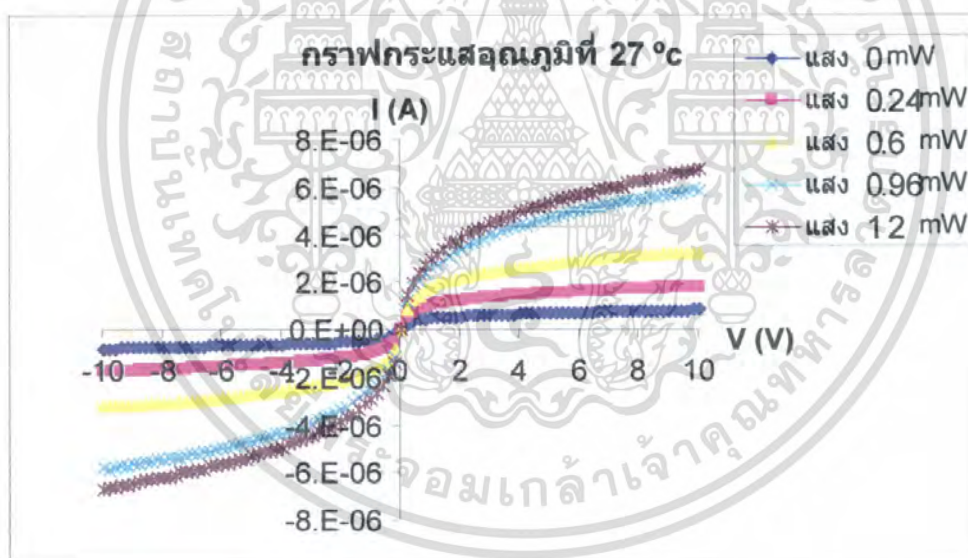


รูปที่ 4.3 กระแสมีคของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ไม่ได้แสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใจใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

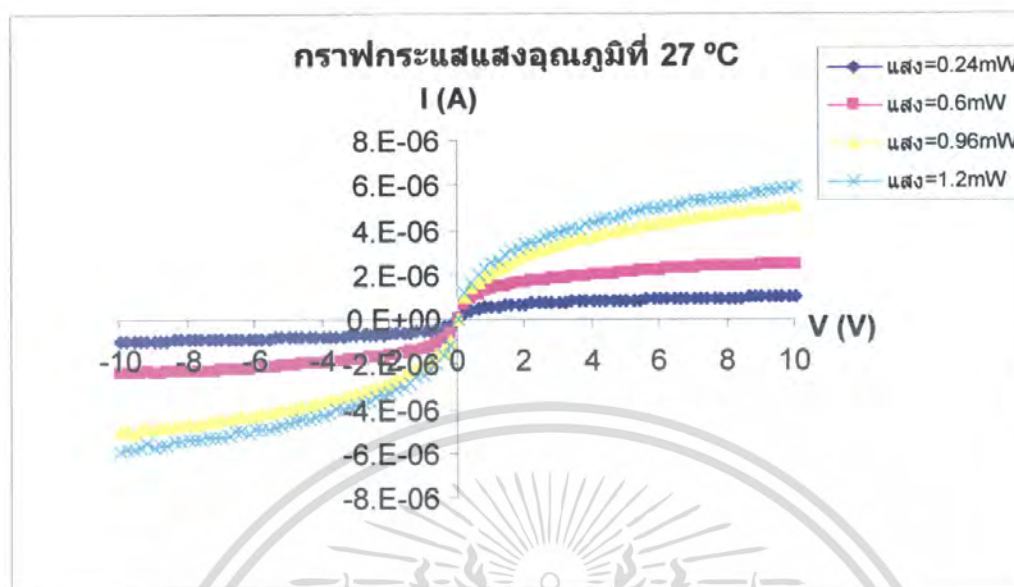
4.2.2 ผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้น เมื่อได้รับแสงตกกระทบแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

จากการทดลองทำการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันแบบกระแสตรง ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ที่มีความเข้มค่าต่างๆ ดังการทดลอง เมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด กระแสแสงขึ้นอยู่กับจำนวนคู่พาหะอิสระที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงกล่าวได้ว่ากระแสแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ฉายลงบนช่องรับแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำโดยที่ความเข้มแสง 0.24 mW, 0.6 mW, 0.96 mW และ 1.2 mW ที่แรงดันไบอัส 10 โวลท์ จะมีค่ากระแสประมาณ 0.968 μA , 2.42 μA , 5.04 μA และ 5.89 μA ตามลำดับ และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่ได้มีความสมมาตรดี ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5 จากลักษณะสมบัติที่กล่าวข้างต้นทำให้โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิปกติ



รูปที่ 4.4 ลักษณะสมบัติกระแสรวม-แรงดันตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสง

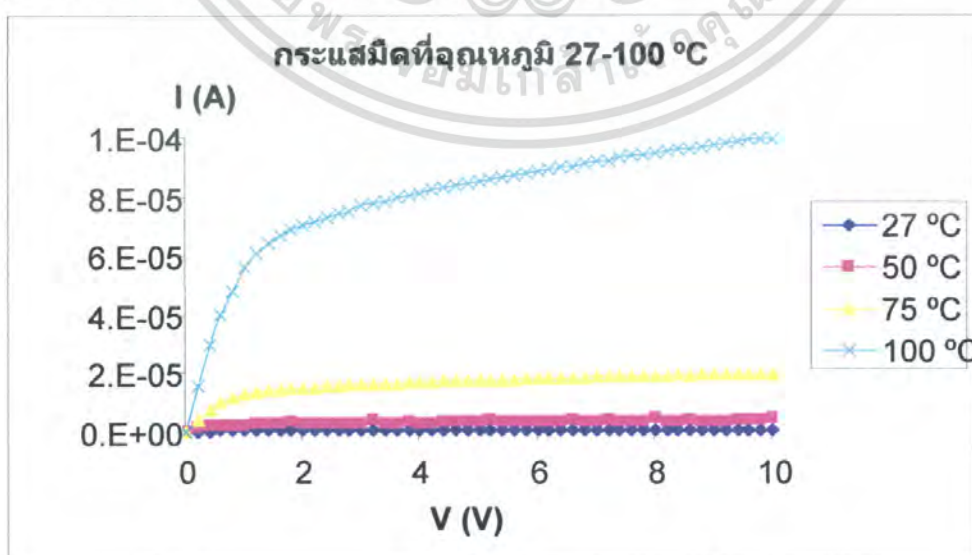
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



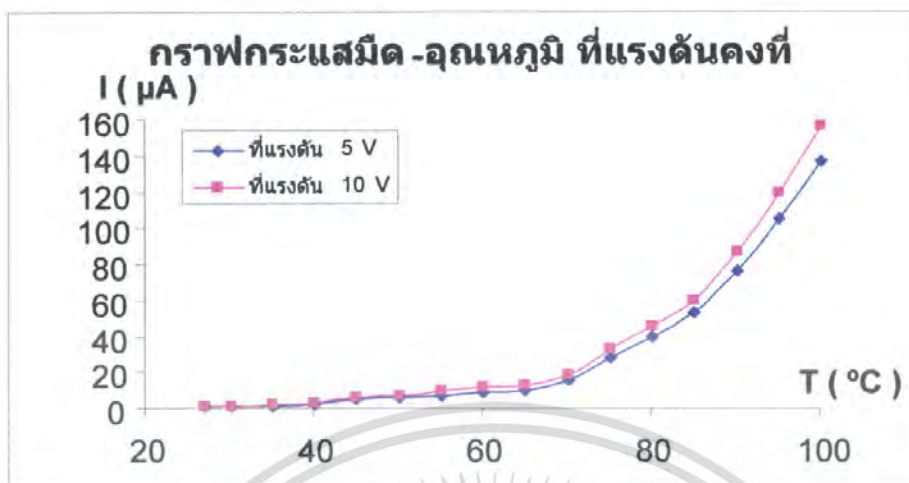
รูปที่ 4.5 ลักษณะสมบัติกระแสแสง - แรงดันตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสง

4.3 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสง

จากการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกำลังแรงดันไบอัสตรง ค่าแรงดันสัทธิภายในจะลดลง และเมื่อป้อนไบอัสกลับจะมีกระแสรั่วไหลสูงขึ้น เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 27 °C, 50 °C, 75 °C และ 100 °C กระแสรั่วไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ไบอัส 10 V ค่ากระแสที่ได้ประมาณ 0.811 μ A, 4.62 μ A, 19.6 μ A และ 99.4 μ A แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้ไม่รับแสงที่อุณหภูมิต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

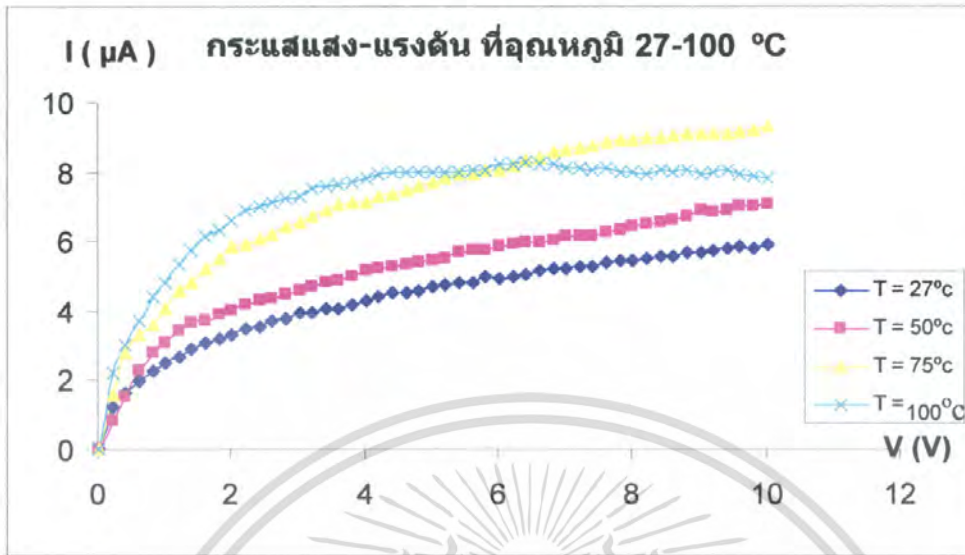


รูปที่ 4.7 ลักษณะสมบัติกระแสมีด-อุณหภูมิของตัวตรวจวัดแสงขณะ ได้รับแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แรงดัน 5 V และ 10 V

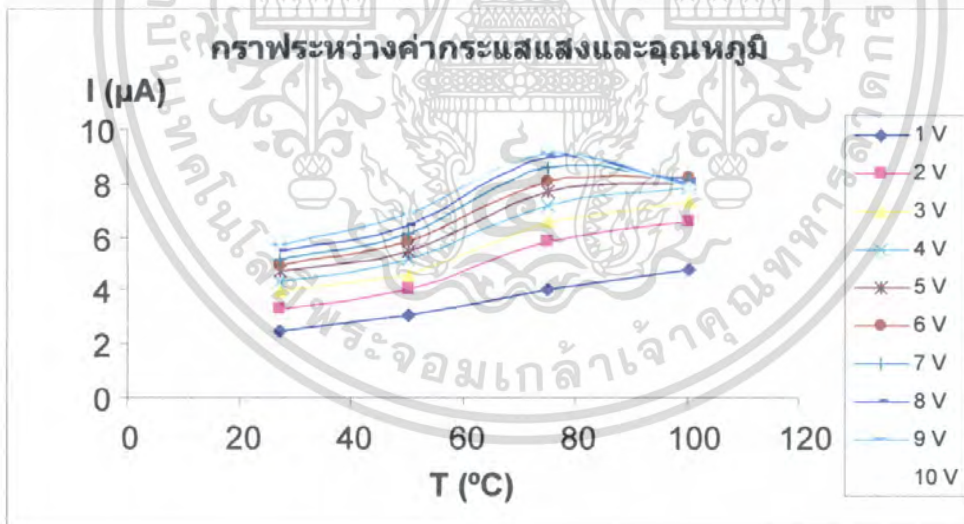
4.4 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบ

กระแสแสงจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิความเข้มแสง 1.2 mW กระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 100°C จะทำให้ค่ากระแสแสงที่ได้ลดลงที่แรงดันสูงขึ้นซึ่งเกิดจากกระแสรั่วซึมที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับกระแสรวม เมื่อไบอัสที่ 10 V ความเข้มแสง 1.2 mW ค่ากระแสแสงที่ได้ประมาณ 5.889 μA , 7.05 μA , 9.3 μA และ 7.8 μA แสดงในรูปที่ 4.8

ที่แรงดันค่าต่ำการเพิ่มของกระแสแสงจะเป็นแบบเชิงเส้น เมื่อแรงดันสูงขึ้นความเป็นเชิงเส้นจะลดลง หลังจากแรงดันไบอัส 5 V ที่ 100 °C กระแสแสงจะมีค่าลดลง แสดงในรูปที่ 4.9 อัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมีดจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ 50 °C อัตราส่วนกระแสต่อแรงดันมีค่าประมาณ 1 เท่า

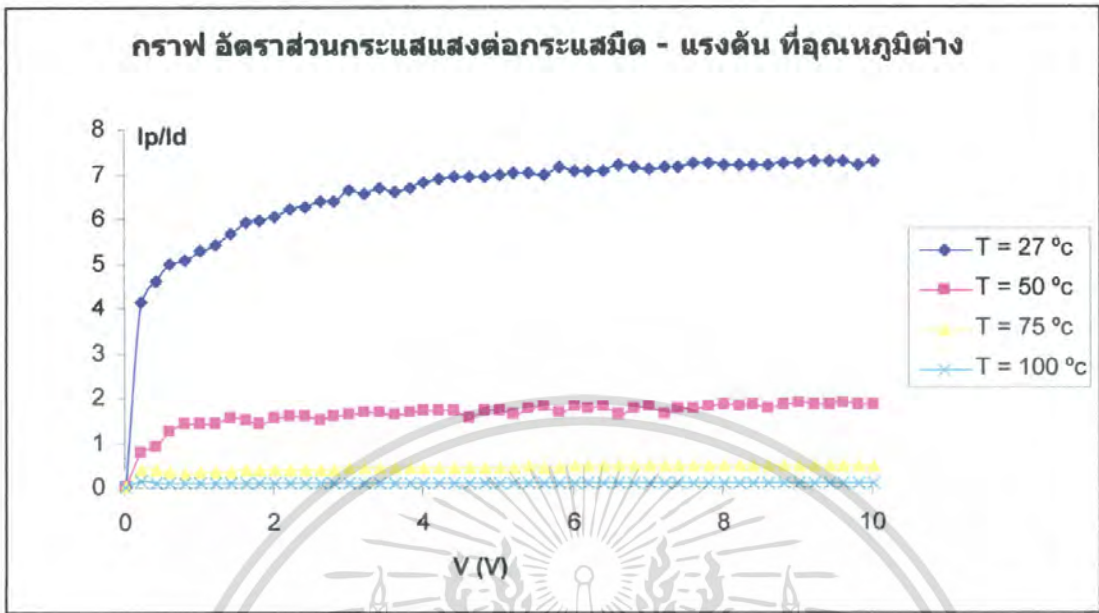


รูปที่ 4.8 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสง 1.2 mW ที่อุณหภูมิ
ต่างๆ

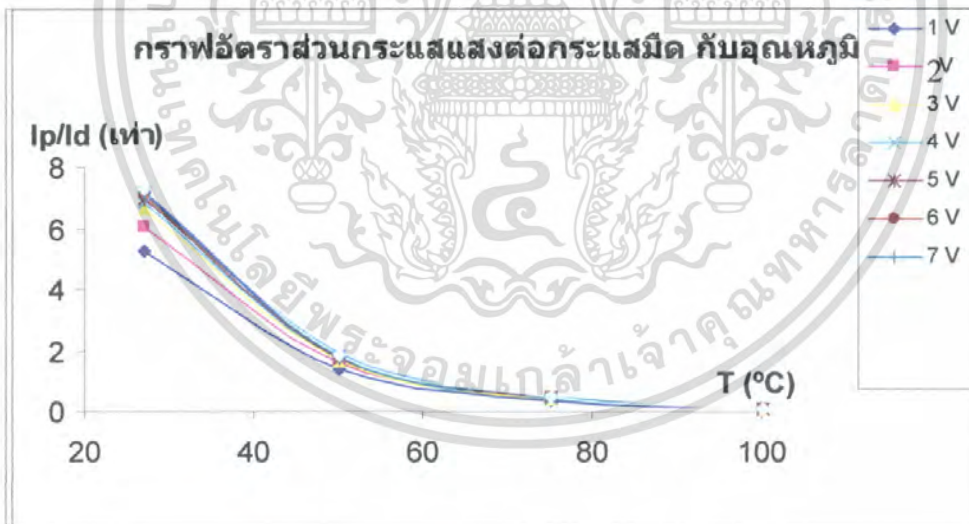


รูปที่ 4.9 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสง 1.2 mW ที่อุณหภูมิ
ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติกระแสแสงต่อกระแสมีด-แรงดัน ขณะ ได้รับแสง 1.2 mW ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.11 ลักษณะสมบัติกระแสแสงต่อกระแสมีด-อุณหภูมิ ขณะ ได้รับแสง 1.2 mW ที่ค่าแรงดันต่างๆ

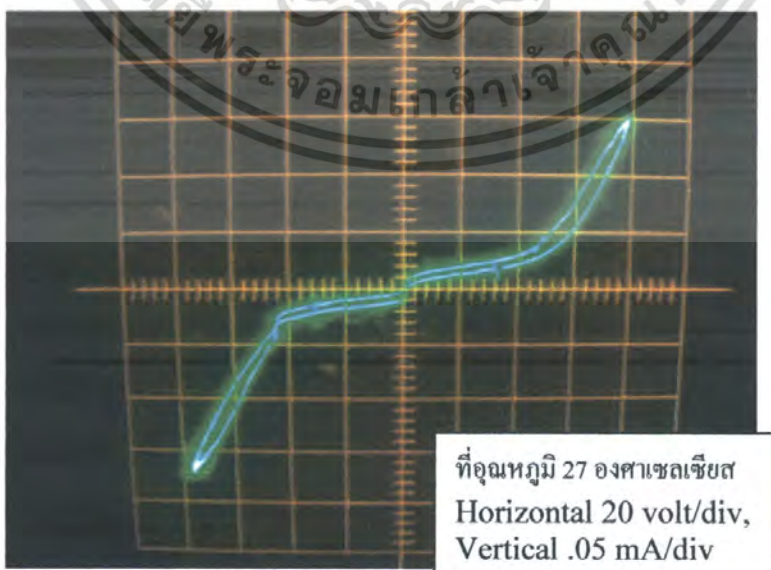
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพังทลาย ในลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสง

จากการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้น เมื่อป้อนไบอัสจะมีกระแสรั่วไหลสูงขึ้น เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 27 °C, 50 °C, 75 °C และ 100 °C แรงดันพังทลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ค่าแรงดันพังทลายประมาณที่ได้ประมาณ 40 V, 50 V, 80 V และ 90 V ตามลำดับจากทฤษฎีเป็นการพังทลายแบบอะวาลันซ์

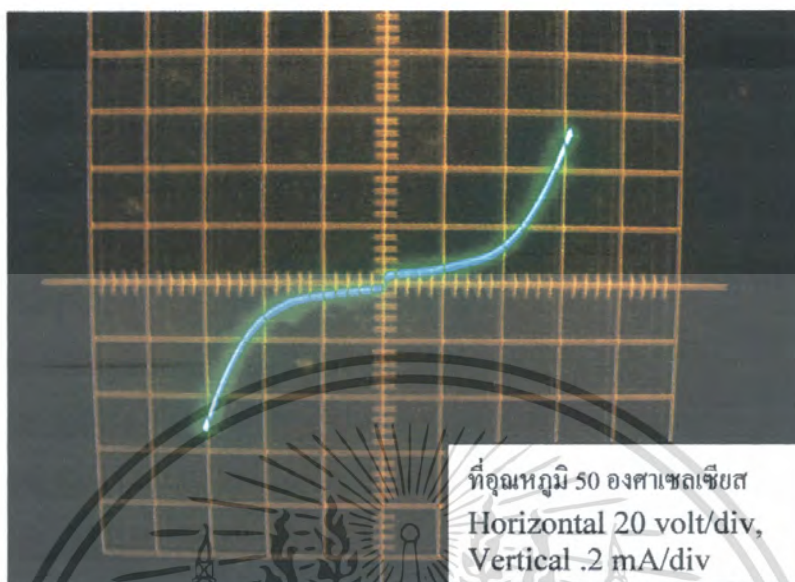


รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันเบรกดาวน์

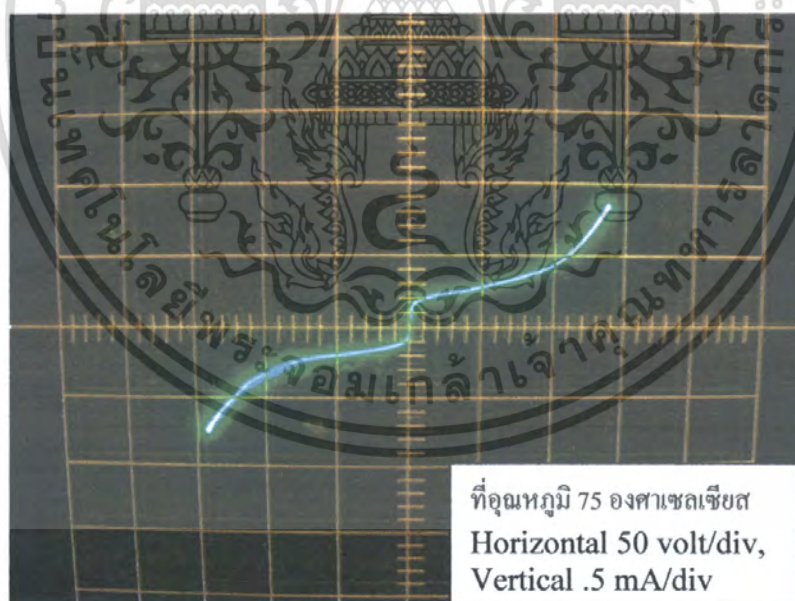


รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพังทลาย ที่อุณหภูมิ 27 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

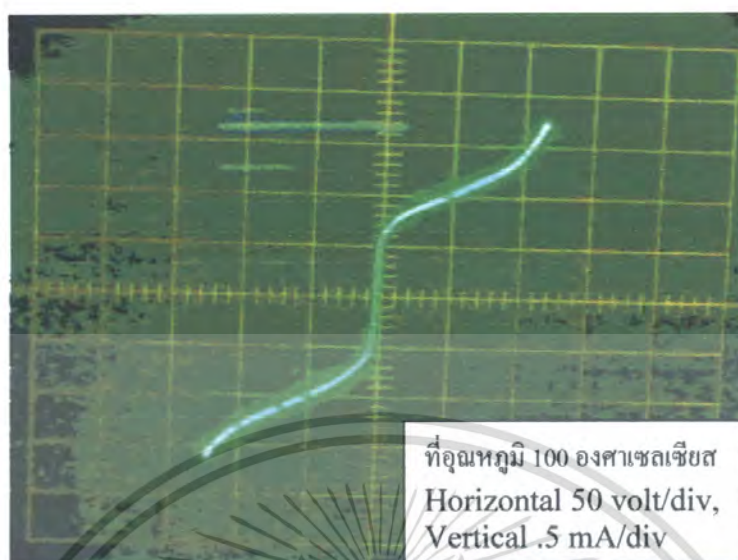


รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันฟังกทลาย ที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันฟังกทลาย ที่อุณหภูมิ 75 °C

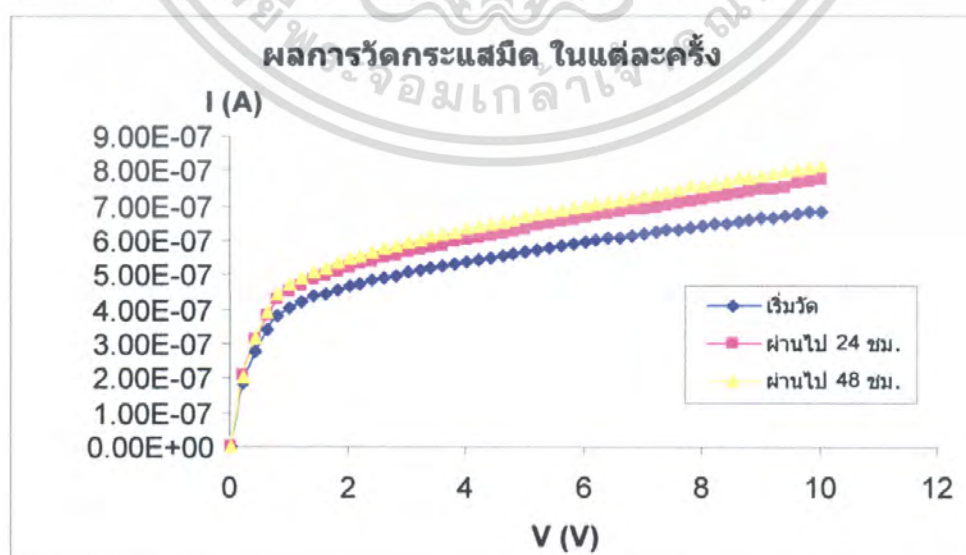
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันพังทลาย ที่อุณหภูมิ 100 °C

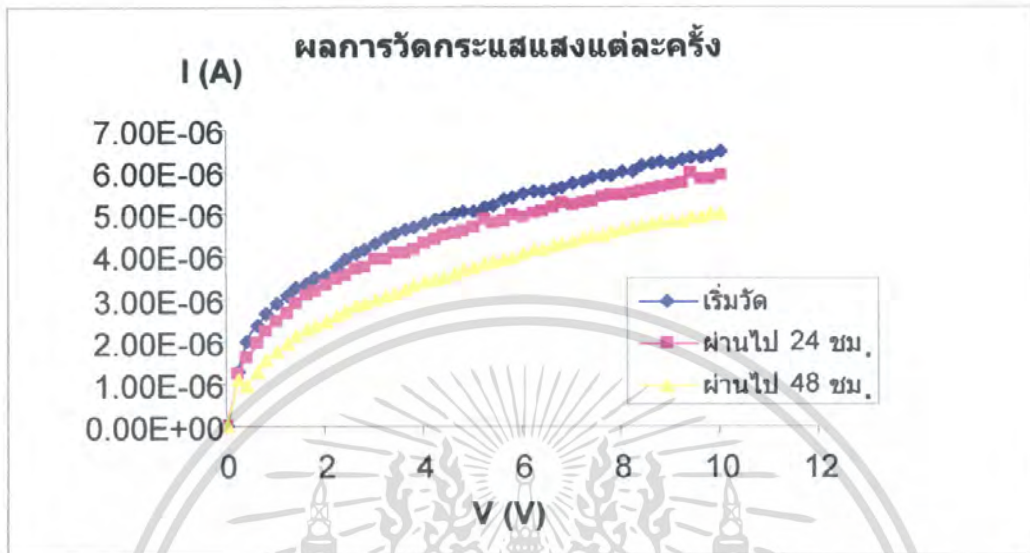
4.6 ผลการทดลองผลของอุณหภูมิที่ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง เมื่อทำการวัดหลายครั้ง

จากการทดลองเมื่อนำตัวตรวจวัดแสงมาทำการวัดที่ 27°C ครั้งแรก แล้วเพิ่มอุณหภูมิปล่อยให้ถึงไว้ที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชม. แล้วลดอุณหภูมิลงจะถึงอุณหภูมิห้อง ทำการวัดใหม่ครั้งต่อไป ค่ากระแสรั่วซึมที่ได้จากการวัดที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าสูงขึ้นจากครั้งแรก เมื่อไบอัสที่ 10 V ครั้งที่ 1, 2 และ 3 ค่ากระแสที่ได้ 0.683 μA , 0.773 μA และ 0.811 μA ค่ากระแสแสงที่ได้จะมีค่าลดลง เมื่อไบอัสที่ 10 V ครั้งที่ 1, 2 และ 3 ค่ากระแสที่ได้ 6.46 μA , 5.89 μA และ 5.02 μA



รูปที่ 4.17 ความเปลี่ยนแปลงของกระแสมืดที่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการวัดผ่านไปหลายครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงที่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการวัดผ่านไปหลายครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตัวตรวจวัดแสงและกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

ตัวตรวจวัดแสงทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานทางแสงให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยเมื่อมีแสงตกกระทบตัวตรวจวัดแสง แล้วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงดังเช่นเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เป็นผลจากกลไกภายในของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างตัวตรวจวัดแสงที่นำมาประยุกต์ใช้งานตัวตรวจวัดแสงที่นำมาประยุกต์ใช้งานมีด้วยกันหลายชนิด ดังจะได้นำเสนอต่อไป โดยในบทนี้จะกล่าวถึงชนิดและโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบต่างๆ และกระบวนการทางแสงที่เกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำ

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประกอบไปด้วย การดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮล

2.1.1 ลักษณะสมบัติของแสงในโครงสร้างของโหนดและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์มองเห็น (visible light) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร โดยที่แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าโฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรผันกับความถี่ของคลื่นแสงโดย

$$E_{\text{photon}} = h\nu = hc/\lambda = 1.24/\lambda \text{ eV} \quad (2.1)$$

โดยที่

ν คือ ความถี่ (Hz)

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (μm)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} J-sec

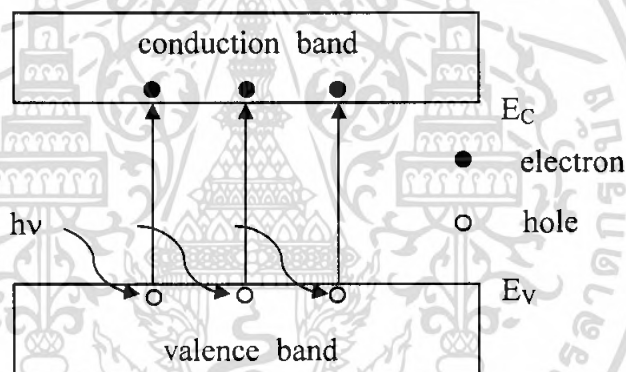
c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{\text{photon}} \geq E_{g(\text{semi})}$ แล้วสารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสงทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{semi})}$ การดูดกลืนแสงไม่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ

2.1.2 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล

กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกจะเกิดจากการให้พลังงานที่มีค่ามากพอหรือการให้แสงที่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้สารกึ่งตัวนำ เมื่อดูดกลืนแสงเข้าไปแล้วสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่แถบนำไฟฟ้าได้ เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดเป็นคู่กันเสมอ ดังรูปที่ 2.1

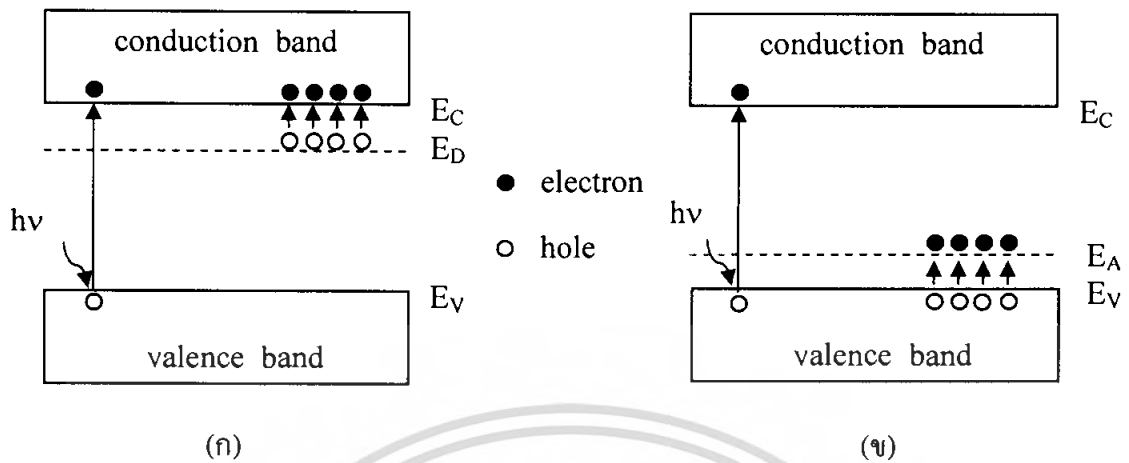


รูปที่ 2.1 การเกิดคู่วาหะอิเล็กตรอนและโฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรีนซิก (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการเติมอะตอมสารเจือ เช่น ซีลีคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส จะได้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ก็อจะเกิดระดับพลังงานผู้ให้ (donor level : E_D) ขึ้นในช่องว่างพลังงานใกล้ๆ กับระดับพลังงานของแถบความนำซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานก็สามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้

โดยพาหะอิสระที่เกิดขึ้นจะเป็นอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) ในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซีลีคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level : E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอึกทรินซิก

(ก) ชนิดเอ็น

(ข) ชนิดพี

2.1.3 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล (recombination)

การรวมตัวใหม่เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือเป็นการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำลระดับพลังงานลงไปรวมกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะคือ อิเล็กตรอนและโฮลหายไป โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะเรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (recombination and generation) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใด ๆ พลังงานจากความร้อนหรือพลังงานแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น และจะมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยมีอัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน ทำให้กระแสสุทธิที่เกิดในสารกึ่งตัวนำเท่ากับศูนย์ การรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำมี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงและแบบโดยอ้อม

กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือโฟตอนได้ง่าย

กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและอาจมีผลทำให้มีการสั้นของแลททิซได้ และการสั้นของแลททิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

การรวมตัวใหม่ และการเกิดของพาหะ (Recombination and Generation) **นิยามการเกิดของพาหะ** หรือ **Carrier Generation** หมายถึง กระบวนการซึ่งทำให้มีพาหะเกิดขึ้นใหม่โดยจะเป็นการเกิดของคู่อิเล็กตรอนและโฮล **การรวมตัวใหม่** หรือ **Recombination** หมายถึง กระบวนการตรงข้ามหรือย้อนกลับกับการเกิด กล่าวคือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับโฮล ทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนอิสระตกลงหรือหายไป กระบวนการทั้งสองนี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกัน และถูกเรียกว่า **“กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (Recombination - Generation Process)”** บางครั้งเรียกสั้นๆว่า **“กระบวนการ R-G (R-G Process)”**

สำหรับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ในสภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิ T ใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวกันอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยในภาวะสมดุลมีอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ความหนาแน่นของพาหะมีค่าคงที่ได้

ในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก ความหนาแน่นของพาหะถูกกำหนดด้วยปริมาณของอะตอมสารเจือ และความหนาแน่นของพาหะอินทรินซิก อย่างไรก็ตามในภาวะสมดุลความร้อนอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะต้องมีค่าเท่ากัน และสมการตามกฎของแมสแอคชั่น (mass action's law) คือ $n \cdot p = n_i^2$ ยังคงใช้ได้ แต่สารกึ่งตัวนำนั้นต้องเป็นสาร **“นอนดีเจนเนอเรต (nondegenerate)”**

ในขณะที่สารกึ่งตัวนำถูกรบกวน เช่น มีการกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก ได้แก่ ความร้อน หรือแสงหรือสนามไฟฟ้าและไม่อยู่ในภาวะสมดุล ตามกฎของแมสแอคชั่นไม่สามารถใช้หาความหนาแน่นได้ เพราะความหนาแน่นของพาหะมีการเปลี่ยนแปลง แต่ในที่สุดระบบก็พยายาม

จะเข้าสู่ในสภาวะสมดุลความร้อนเช่นเดิม ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการทำให้เกิดพาหะส่วนน้อยเพิ่มขึ้น จากเดิมที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งสารกึ่งตัวนำ ขณะที่ภาวะสมดุลถูกรบกวน แต่ระบบจะพยายาม กลับคืนสู่ภาวะสมดุล โดยอัตราการรวมตัวใหม่ จะมีค่าสูงกว่าอัตราการเกิดของพาหะซึ่งแสดงให้เห็นว่าในภาวะไม่สมดุล อัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวจะไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากระบบ พยายามจะกลับคืนสู่ภาวะสมดุลแล้ว ในที่สุดอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวก็จะมีค่าเท่ากันอีกครั้ง

2.2 การตอบสนองทางแสง

การตอบสนองทางแสง (photoresponse) คือ อัตราความเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้น ด้วยแสงที่สัญญาณความถี่ค่าต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลง ลักษณะสมบัติบางอย่างของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่ สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.3 ในทางปฏิบัติการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency : f_c) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูก กำหนดว่าเป็นจุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (half power point) หรือมีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงมีความหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่ตัวตรวจวัดแสงสามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้ กำลังงานของตัวตรวจวัดแสงมีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ



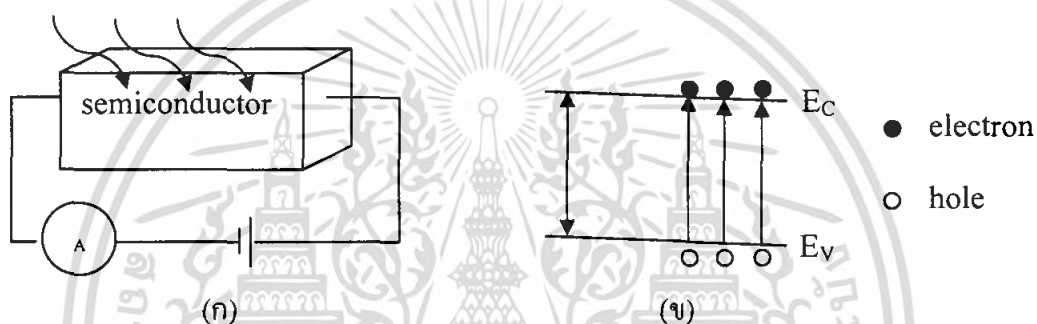
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ชนิดและโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบต่างๆ

2.3.1 โฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductor)

เป็นตัวตรวจวัดแสงที่ง่าย เนื่องจากโครงสร้างมีเพียงแท่งสารกึ่งตัวนำเพียงอย่างเดียว เมื่อแท่งตัวนำได้รับแสงตกกระทบ จะทำให้มีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดกระแสแสงได้ ซึ่งกระแสแสงจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดของพาหะความเข้มของแสงตกกระทบและความสามารถในการดูดกลืนแสง ส่วนการใช้งานจะป้อนแรงดันไบแอสให้แก่โฟโตคอนดักเตอร์ที่ขั้วทั้งสองดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 (ก) โครงสร้างของโฟโตคอนดักเตอร์
(ข) แถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์

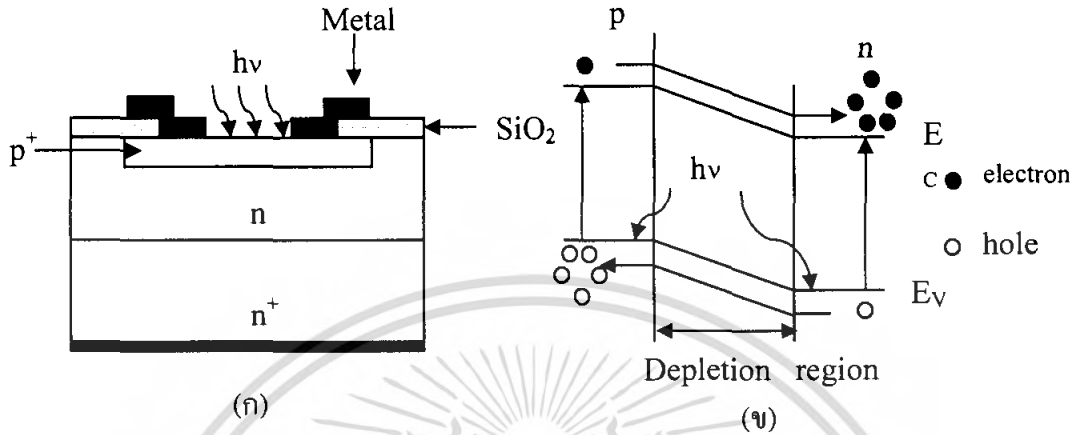
2.3.2 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น (p-n photodiode)

มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งบริเวณตรงกลางรอยต่อ พี-เอ็น เป็นบริเวณปลอดพาหะ เมื่อมีแสงตกกระทบรอยต่อและพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) แล้วพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไป สู่แถบนำไฟฟ้า และแถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2.3.3 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-i-n (p-i-n photodiode)

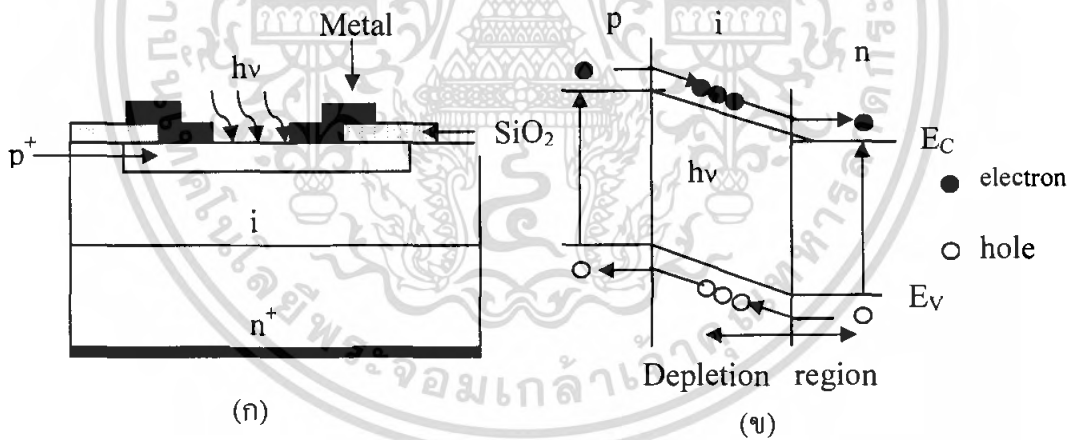
เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงและความเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 จากโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 เมื่อได้รับแรงดันไบแอส จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้น i และเนื่องจากแรงดันตกคร่อมที่ส่วน i จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น i เมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดคู่อิเล็กตรอน โฮลขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n คือการทำงานที่ความถี่สูง เนื่องจากการมีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าน้อย ทำให้มีผลการตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก



รูปที่ 2.5 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น เมื่อได้รับแสง



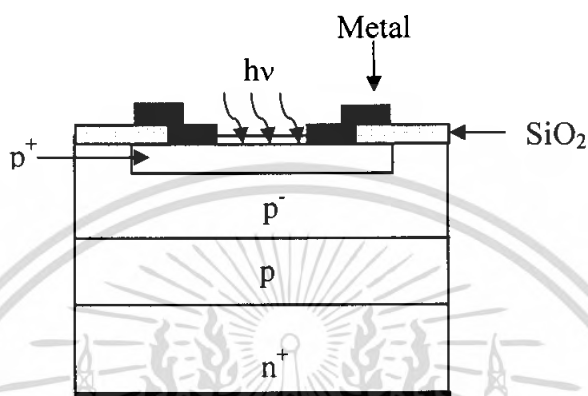
รูปที่ 2.6 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n เมื่อได้รับแสง

2.3.4 โฟโตไดโอดแบบอะวาแลนซ์

คือโฟโตไดโอดแบบ พี-เอ็น แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษ นั่นคือทำให้ไดโอดทำงานใกล้ๆ กับจุดพังทลายของรอยต่อ พี-เอ็น สนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะหรือชั้น i จะมีค่าสูงจนกระทั่งสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ทวีคูณของพาหะได้ ดังนั้นในภาวะนี้กระแสแสงจะมีค่าสูงมาก ไดโอดจึงมีสมบัติเป็นโฟโตไดโอดความเร็วสูง ตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตไดโอดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบอะวาลานซ์ชนิดริซทรู แสดงดังรูปที่ 2.7 เมื่อให้แรงดันไบอัสแบบย้อนกลับแก่อุปกรณ์จะเกิดบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ $p-n^+$ แล้วขยายกว้างไปจนถึงส่วน p^- ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามา โสไลต์จะเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้น p^+ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนไปยังรอยต่อ $p-n^+$ ซึ่งสนามไฟฟ้าที่สูงจะเร่งให้อิเล็กตรอนวิ่งไปชนกับโครงสร้างของผลึก และทำให้เกิดปรากฏการณ์อะวาลานซ์ขึ้น



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ชนิดริซทรู

2.4 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

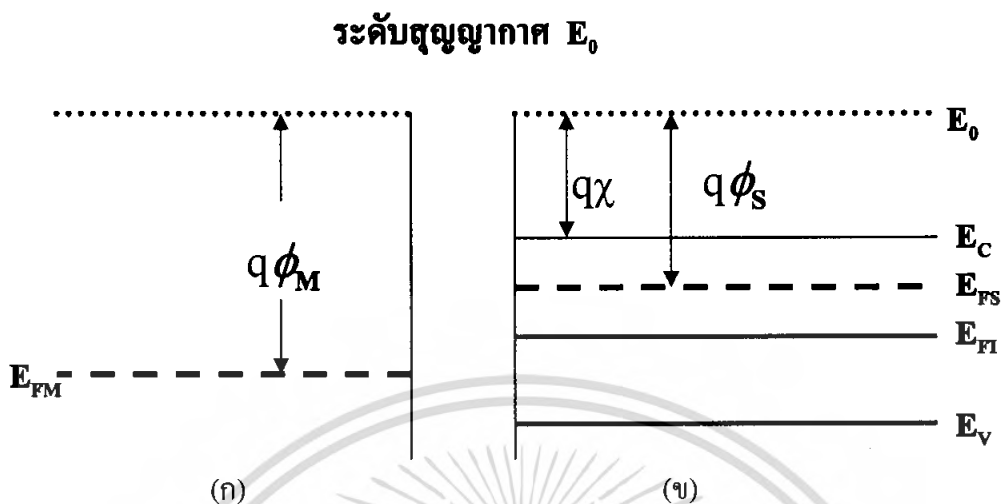
โดยทั่วไปแล้วรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ สามารถให้คุณสมบัติได้สองลักษณะคือ “รอยสัมผัสแบบโอห์มิก” หรือ “รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์” ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้าง สำหรับรอยต่อแบบโอห์มิกที่มีคุณสมบัติให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทั้งสองด้านของรอยต่อ ในขณะที่จะไม่กล่าวถึง เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง อลูมิเนียม-ซิลิคอนชนิดเอ็น-อลูมิเนียม จะมีรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์เท่านั้น

2.4.1 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนการสัมผัส

ก่อนการสัมผัสแถบพลังงานของโลหะแสดงดังรูป 2.8 (ก) และแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแสดงดังรูป 2.8 (ข) ระดับพลังงาน E_0 หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานของสารต่างชนิดกัน เรียกว่าระดับสุญญากาศ (vacuum level)

ในส่วนของโลหะ ระดับพลังงานเฟอร์มิ E_{FM} จะอยู่สูงกว่าระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้า E_C เล็กน้อย ค่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิและระดับสุญญากาศ เรียกว่าฟังก์ชันงาน (work function) ϕ_M ซึ่งหมายถึงพลังงานค่าน้อยสุด ที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการเพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกมาหุคหนึ่งทีผิวด้านนอก ในโลหะต่างชนิดกันจะมีค่าฟังก์ชันงานที่ต่างกัน ค่าฟังก์ชันงานในโลหะคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส

(ก) โลหะ

(ข) สารกึ่งตัวนำ

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

(2.2)

เมื่อ

q คือ ประจุของ e^-

ϕ_M คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ

E_0 คือ พลังงานในระดับสูญญากาศ

E_{FM} คือ ระดับพลังงานเฟอร์มีของโลหะ

สำหรับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มีจะอยู่ในช่องว่างพลังงานโดยอยู่สูงกว่าระดับ E_{FI} และต่ำกว่า E_C ค่าฟังก์ชันงานในสารกึ่งตัวนำคือ

$$q\phi_S = E_0 - E_F \quad (2.3)$$

ส่วนค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) $q\chi$ คือ ความแตกต่างของพลังงานระดับสูญญากาศ E_0 กับระดับนำไฟฟ้า E_C ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q\chi = E_0 - E \tag{2.4}$$

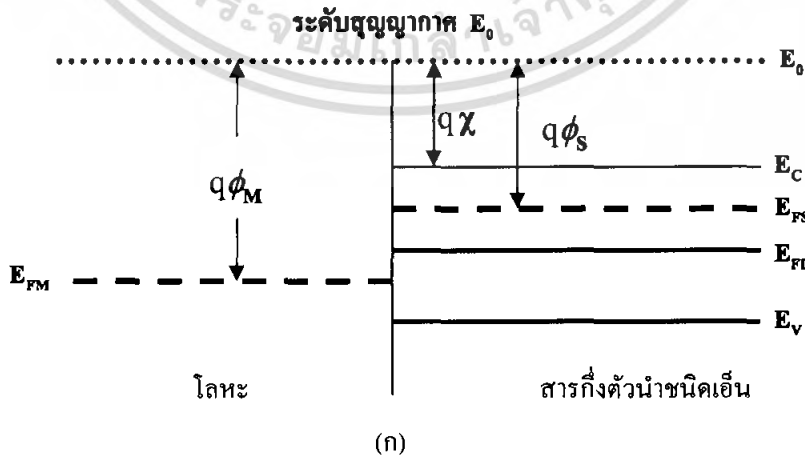
2.4.2 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังการสัมผัส

ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่ง $q\phi_M > q\phi_S$ ก่อนการสัมผัสหรือเมื่อเริ่มต้นสัมผัสแสดงดังรูป 2.9 (ก) จะเห็นว่าแถบพลังงานมีลักษณะเป็นแถบราบ แต่ภายหลังการสัมผัสจะมีการเปลี่ยนแปลงคือ ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำจะพยายามปรับให้พลังงานเฟอร์มิอยู่ในระดับเดียวกัน โดยที่อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่แพร่เข้าไปในโลหะบริเวณรอยสัมผัสและทิ้งโฮออนบวกไว้ภายในสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นบริเวณปลอดพาหะมีขนาดความกว้างเท่ากับ W ขยายเข้าไปในสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูป 2.9 (ข) ขณะนี้รอยสัมผัสจะเข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อน กระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปโลหะ และจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากัน กระแสสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ ศักย์สัมผัสหรือแรงดันภายในรอยสัมผัส V_{bi} เป็นค่าแรงศักย์ที่กั้นไม่ให้อิเล็กตรอนจากแถบความนำด้านสารกึ่งตัวนำข้ามไปยังโลหะ

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \tag{2.5}$$

และค่าแรงศักย์ที่กั้นไม่ให้อิเล็กตรอนจากโลหะข้ามไปยังแถบนำด้านสารกึ่งตัวนำเรียกว่า “ค่าแรงศักย์ MS” หรือ “MS แบริเออร์” ใช้สัญลักษณ์ $q\phi_B$ และ MS แบริเออร์มีค่าเท่ากับ

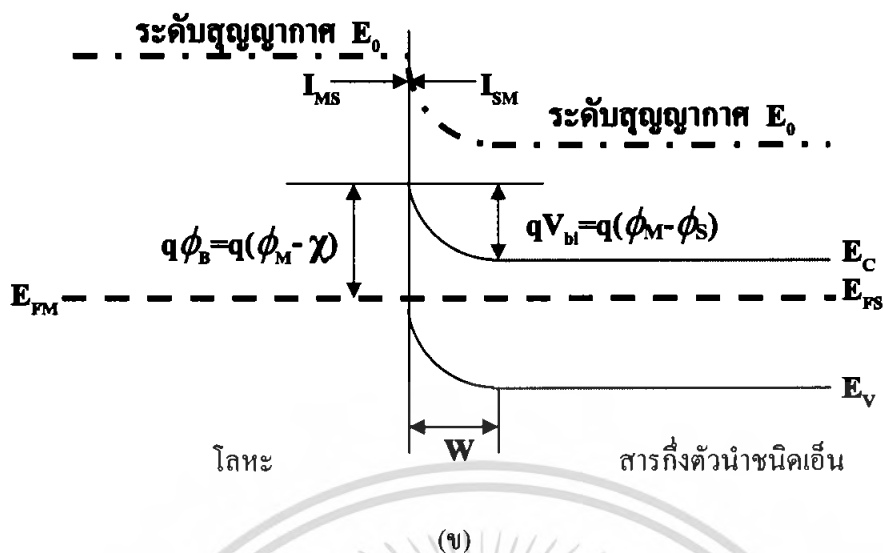
$$q\phi_B = q(\phi_M - \chi) \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.9 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำภายหลังการสัมผัส

(ก) เริ่มต้นสัมผัส

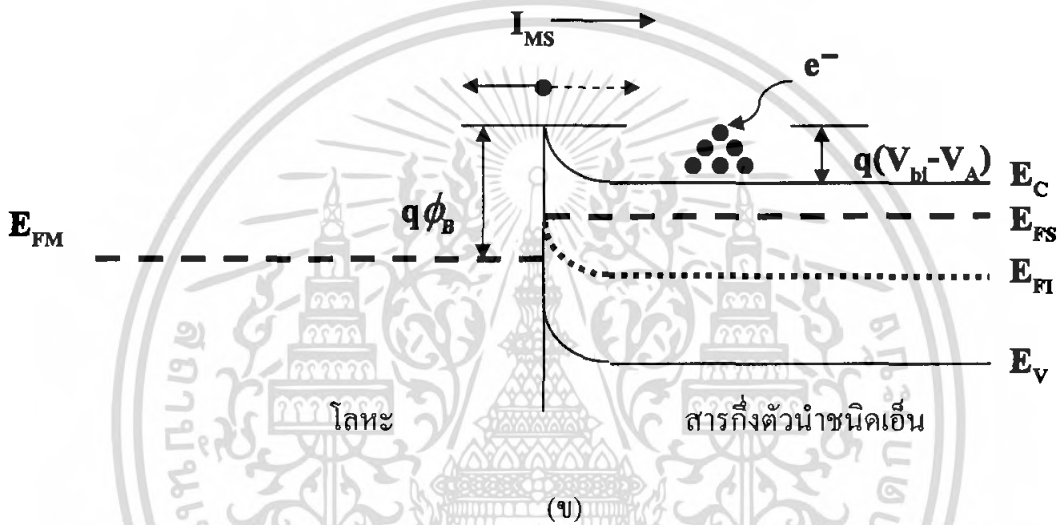
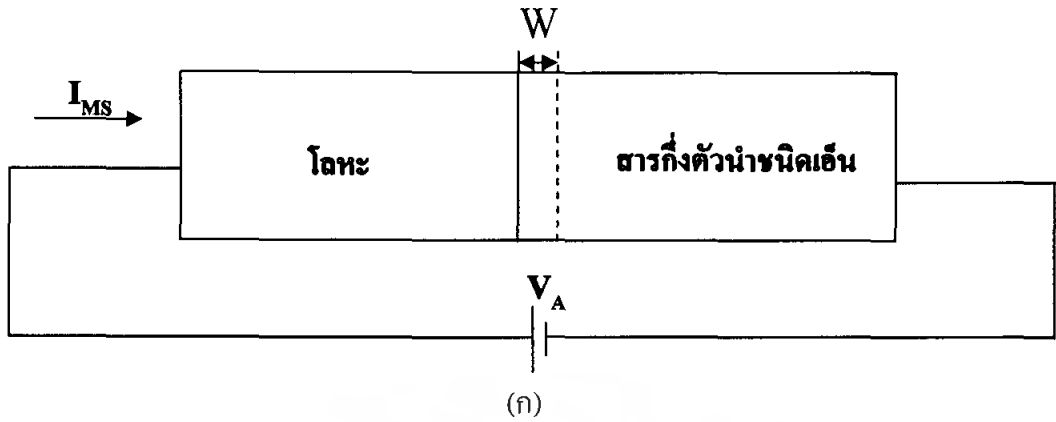
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำภายหลังการสัมผัส
(ข) ภายหลังสัมผัสสภาวะสมดุล

2.4.3 คุณสมบัติรอยสัมผัสจะได้รับไบแอสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส V_A แก่รอยสัมผัสแล้ว รอยต่อสัมผัสจะไม่อยู่ในสภาวะสมดุลอีกต่อไป ถ้าให้โลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำดังรูปที่ 2.10 (ก) แล้วจะทำให้ความสูงของศักย์สัมผัส V_{bi} มีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และระดับพลังงาน E_{FS} สูงกว่า E_{FM} ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจะสามารถข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางโลหะได้ เกิดเป็นกระแส I_{MS} ไหลจากด้านโลหะผ่านรอยสัมผัสเข้าไปในตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นกระแส I_{SM} ไหลสวนทางกับกระแส I_{MS} แต่กระแส I_{SM} มีค่าน้อยมาก ดังนั้นกระแสสุทธิจึงมีค่าประมาณเท่ากับ I_{MS} ดังรูป 2.10 (ข) การไบแอสแบบนี้เรียกว่าการไบแอสตรง และกระแสที่ได้เรียกว่ากระแสไบแอสตรง I_F (forward current)



รูปที่ 2.10 (ก) การให้ไบแอสตรงกับรอยต่อ
 (ข) แถบพลังงานขณะ ได้รับไบแอสตรงและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

$$I_F \approx I_{MS} = ART^2 \exp(-q\phi_B / kT) [\exp(qV_A / kT) - 1] \tag{2.7}$$

เมื่อ

A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm²)

R คือ ค่าคงที่ริชาร์ทสันของซิลิคอน มีค่าเท่ากับ 110 A.cm⁻².K⁻²

q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602 x 10⁻¹⁹ C

k คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์มีค่าเท่ากับ 1.38 x 10⁻²³ J/K

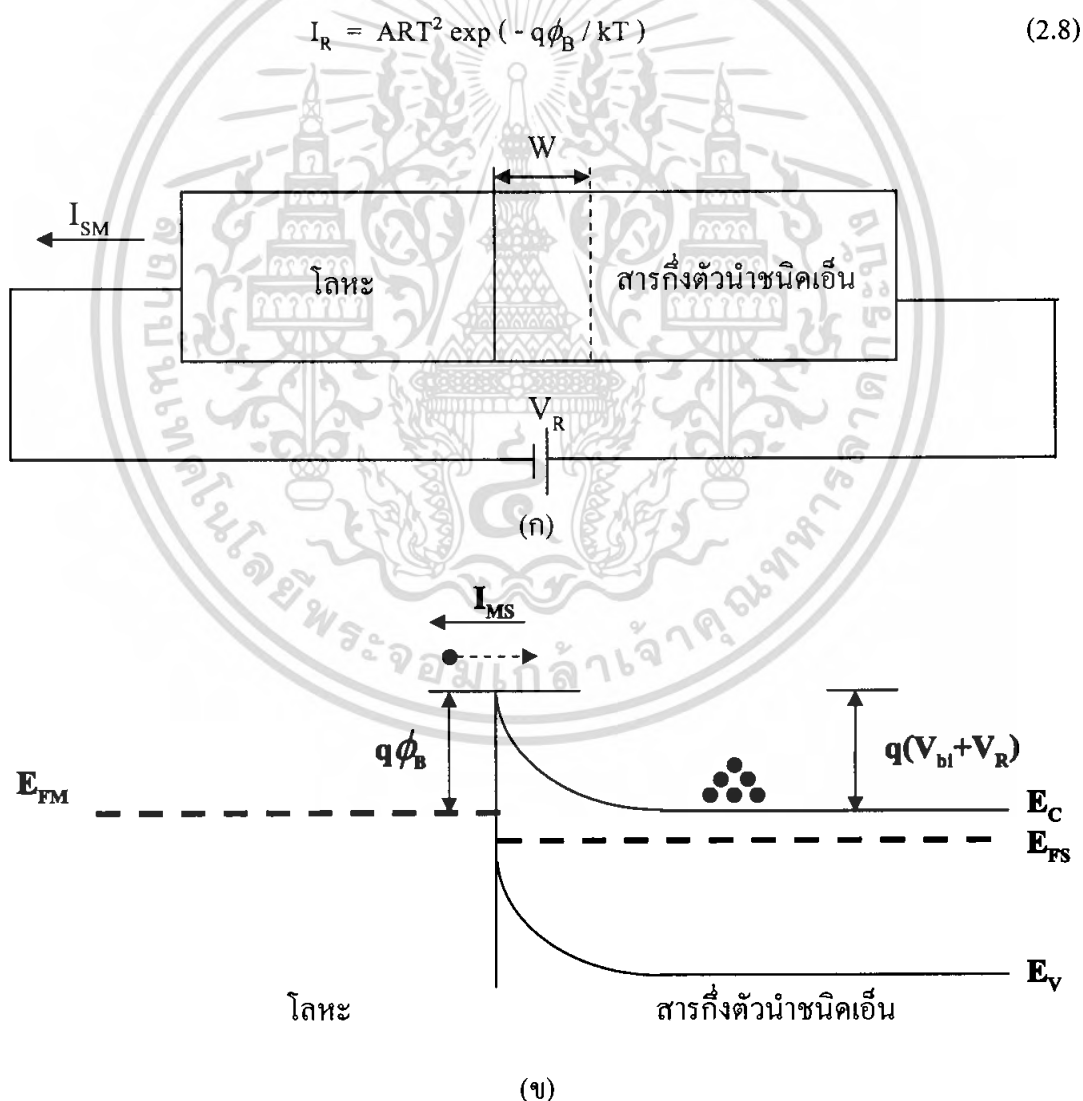
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 คุณสมบัติรอยสัมผัสขณะได้รับไบแอสกลับ

ถ้าเราให้แรงดันไบแอส V_R แก่รอยสัมผัสนี้โดยให้ศักย์ไฟฟ้าบวกกับด้านสารกึ่งตัวนำเมื่อเทียบกับด้านโลหะดังรูปที่ 2.11 (ก) กรณีนี้จะทำให้ระดับ E_{FM} อยู่สูงกว่าระดับ E_{FS} กำแพงศักย์ V_{bi} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_R)$ และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น

อิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพง MS เข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแส I_{SM} ไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะดังรูป 2.11 (ข) กระแส I_{SM} จะมีปริมาณคงที่เท่ากับตอนสมดุลความร้อน เรียกว่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ I_R (reverse saturation current)



รูปที่ 2.11 (ก) การให้ไบแอสกลับกับรอยต่อ

(ข) แถบพลังงานขณะได้รับไบแอสกลับและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปไซบ่ระเษชนดานการค้่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MS เปรียบเทียบกับไดโอดรอยต่อพีเอ็น

โลหะที่สัมผัสกับสารกึ่งตัวนำที่ถูกโด้ปด้วยความเข้มข้นต่ำจนถึงปานกลางจะทำให้เกิดรอยต่อแบบเร็คติไฟร์ดังได้กล่าวมาแล้ว โดยโลหะจะทำหน้าที่เป็นบริเวณ p' ของรอยต่อ p-n กลไกการเกิดกระแสใน MS จะแตกต่างจากไดโอดรอยต่อพีเอ็น กระแส MS คือกระแสการไหลของพาหะส่วนมาก ดังนั้นจะไม่เกิดปรากฏการณ์การสะสมพาหะส่วนน้อย MS สามารถที่จะสวิตซ์ได้เร็วกว่าไดโอดรอยต่อพีเอ็น และแรงดันนำกระแสที่แท้จริงของ MS จะน้อยกว่าไดโอดรอยต่อพีเอ็น ส่วนกระแสอิมิตัวย้อนกลับของ MS จะขึ้นกับขนาดของกำแพงศักย์ MS ($q\phi_B$) ยิ่งกำแพงศักย์มีค่ามาก กระแสอิมิตัวย้อนกลับก็จะมีค่าน้อย

2.4.6 กระแสที่ไหลในรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ MS

กระแสที่ไหลในรอยสัมผัส MS โดยหลักแล้วจะมาจากพาหะส่วนมาก (Majority Carrier) ซึ่งกระแสที่ไหลนั้นจะเกิดจากสาเหตุหลัก 4 ประการ คือ

- Thermionic emission คือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำข้ามกำแพงศักย์เข้าสู่โลหะ เรียกว่า กระแสที่เกิดจากการแผ่กระจายอนุภาคโดยความร้อน
- Tunnelling current คือกระแสที่เกิดจากการทะลุผ่านกำแพงศักย์ของประจุไฟฟ้า เรียกว่า กระแสทะลุผ่าน
- Recombination current คือกระแสที่ไหลในบริเวณปลอดพาหะ เรียกว่า กระแสการรวมตัว
- Minority carrier current คือกระแสของการฉีดพาหะส่วนน้อยซึ่งคือการฉีดของโฮล เรียกว่า กระแสพาหะส่วนน้อย

โดยทั่วไป MS จะแพร่สารเจือผู้ให้ในปริมาณน้อย เพื่อให้สามารถทนแรงดันพังทลายได้สูง ดังนั้นความกว้างของกำแพงศักย์จึงไม่แคบพอที่จะทำให้เกิดกระแสทะลุผ่านได้ รวมทั้งกระแสรวมตัวและกระแสพาหะข้างน้อยก็จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นกระแสที่สำคัญที่ไหลข้ามรอยสัมผัส MS ก็คือ กระแสที่แผ่กระจายโดยความร้อน (Thermionic emission) ทฤษฎีของ Thermionic emission จะสมมุติให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่ากำแพงศักย์ จึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกำแพงศักย์ไปได้ ซึ่งความหนาแน่นกระแสจะแสดงได้ดังสมการที่ 2.9

$$J = A * T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \tag{2.9}$$

โดย

T คือ ค่าสมบูรณ์ของอุณหภูมิ (องศาเคลวิน:K)

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน (คูลอมบ์:C)

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann (J/K)

V_A คือ แรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับรอยสัมผัส (โวลต์:V)

A^* คือ ค่าคงที่ของ Richardson = $4\pi m^* k^2 / h^3$ ซึ่งขึ้นกับมวลยังผลและชนิดของสารกึ่งตัวนำ ($A/cm^2.K^3$)

ซึ่งค่าความหนาแน่นจะมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสตามสมการ

$$J = I / A \quad (2.10)$$

โดย

I คือกระแส (แอมป์:A)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยสัมผัส (ตารางเซนติเมตร: cm^2)

และจากสมการที่ 2.9 จะได้ค่า J_0 ดังสมการ

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \quad (2.11)$$

ค่า J คือค่ากระแสอิ่มตัว (Saturation current) ซึ่งมีค่าคงที่

จากสมการที่ 2.11 ในขณะที่รอยสัมผัสได้รับไบอัสตรงจะได้ $\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) \gg 1$ เพราะฉะนั้นความ

หนาแน่นกระแสขณะรอยสัมผัสได้รับไบอัสตรงขณะแสดงได้ดังสมการที่ 2.12

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{qV_F}{k_B T}\right) \quad (2.12)$$

และในขณะที่รอยสัมผัสได้รับไบอัสย้อนกลับ $\exp\left(\frac{-qV_R}{kT}\right) \ll 1$ ความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้น

จะเป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_0 = A * T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 อาจกล่าวได้ว่ากระแสนี้คือกระแสรั่วไหลซึ่งถ้าไม่คิด
ว่า $\exp\left(\frac{-qV_R}{kT}\right) \ll 1$ กระแสรั่วไหลก็จะมีค่าขึ้นกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ถ้าไบอัสย้อนกลับยิ่ง
มีค่ามาก กระแสรั่วไหลก็จะมีค่ามากตามไปด้วย แต่ถ้าในที่นี้พิจารณาว่า $\exp\left(\frac{-qV_R}{kT}\right) \ll 1$
ฉะนั้นจากสมการที่ 2.13 กระแสรั่วไหลจะขึ้นกับค่าแพนดักซ์ MS ซึ่งค่าแพนดักซ์ MS ยิ่งมากกระแส
อิมิตัวยิ่งมีค่าน้อย และนั่นก็หมายความว่าถ้ามีกระแสรั่วไหล (Leakage current) น้อยลงนั่นเอง
ฉะนั้นเราอาจลดค่ากระแสรั่วไหลได้โดยการเลือกชนิดโลหะที่เหมาะสม เพราะค่าแพนดักซ์ MS
จะมีค่าต่างกันไปในแต่ละคู่สัมผัสของชนิดโลหะและชนิดของสารกึ่งตัวนำในการพิจารณาผลของ
อุณหภูมิที่มีต่อ MS นั้นจะคล้ายกับกรณีของรอยต่อพี-เอ็นกล่าวคือถ้าพิจารณาจากสมการ

$$J = A * T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.14 ค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลแล้วนำค่าสมการที่ 2.15 ความหนาแน่นกระแส
อิมิตัวแทนลงไปในสมการจะได้ว่า

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

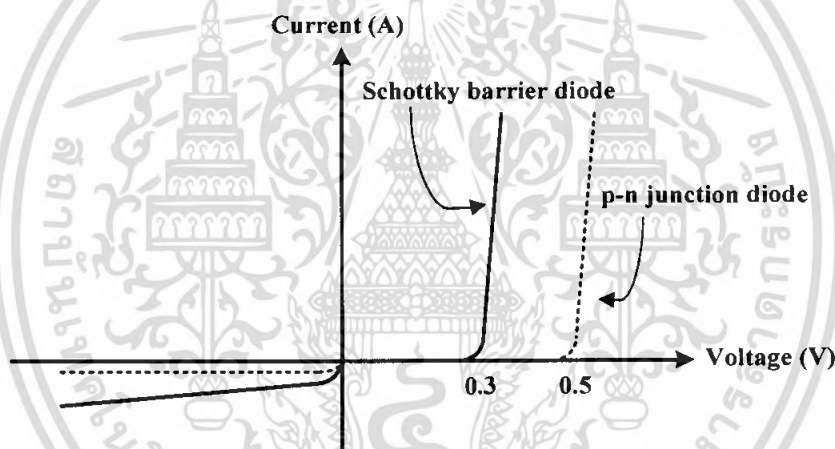
ทำการจัดรูปของสมการที่ 2.15

$$V = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{J}{J_0} + 1\right) \quad (2.16)$$

จะเห็นว่าหลังจัดรูปของสมการแล้วจะได้สมการแรงดันคล้ายกับสมการแรงดันของไดโอด
แบบรอยต่อพี-เอ็น ต่างกันตรงที่อัตราส่วน $\frac{I}{I_0}$ และ $\frac{J}{J_0}$ ดังนั้นจะทำให้สามารถพิจารณาแบบ
เดียวกันกับรอยต่อพี-เอ็นได้ โดยจะเห็นทางด้านขวาของสมการเป็นค่าคงที่ยกเว้นค่าของอุณหภูมิ
กับค่าของความหนาแน่นของกระแสอิมิตัว ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปเซบระโยชนดานการคร่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสในตัวก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจากสมการความหนาแน่นของกระแสในตัวจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นของกระแสในตัวจะแปรผันกับค่า T^2 ซึ่งจากเงื่อนไขนี้เองเมื่อนำค่าความหนาแน่นของกระแสในตัวกลับไปแทนในสมการแรงดันที่ตกคร่อมแล้วจะเห็นว่าเทอม $\ln\left(\frac{J}{J_0} + 1\right)$ จะมีค่าลดลงอย่างมากเนื่องจากค่าความหนาแน่นของกระแสในตัวจะแปรกับอุณหภูมิยกกำลังสองทำให้มีผลมากกว่าอุณหภูมิ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่ได้ตามสมการลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนกับกราฟแอกโปเนนเชียล

ซึ่งจากตรงนี้เองจะทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ MS นั้นจะมีความไวกับอุณหภูมิมาก ซึ่งความไวนี้มากจนทำให้ค่าแรงดันที่ให้ออกมานั้นไม่ตรงกับความเป็นจริง จึงพิจารณาได้ว่า MS ไม่เหมาะสมแก่การนำมาใช้สร้างเป็นไดโอดตรวจวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดแบบ MS และไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น

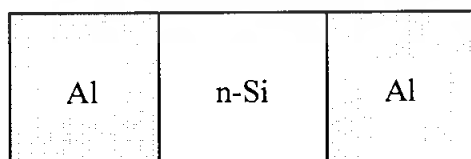
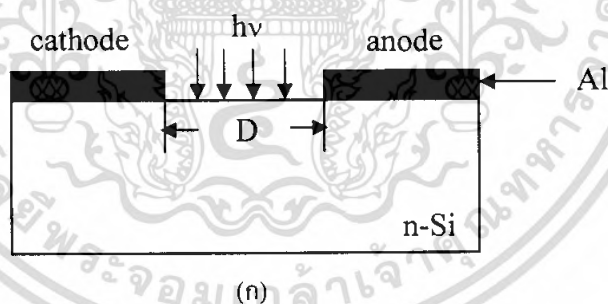
2.5 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ตัวตรวจวัดแสง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสแบบ MS ระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นจำนวนสองรอยสัมผัส ซึ่งรอยสัมผัสทั้งคู่จะต่อแบบหันหลังชนกัน โครงสร้างและหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงชนิด MSM มีดังต่อไปนี้

2.5.1 โฟโตไดโอด โครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาแนร์ หรือโครงสร้าง

MSM

เป็นโฟโตไดโอดชนิดหนึ่งประกอบด้วยกำแพงศักย์ (MS) ที่ปลายสุดทั้งสองด้าน ซึ่งต่อแบบหันหลังชนกันดังรูปที่ 2.12 ซึ่งในโครงงานนี้จะเลือกโครงสร้างแบบ MSM ในการทำโฟโตดีเทคเตอร์ เพราะมีจุดเด่นหลายประการเช่น มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ ทำให้มีการตอบสนองสัญญาณที่มีความถี่สูงได้ดีเป็นโครงสร้าง พลาแนร์สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย และโครงสร้างเป็นอย่างง่ายมีขั้นตอนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM โดยมากนิยมใช้สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบที่อยู่ในกลุ่ม III-V เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ (GaAs) หรืออินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์ (InGaAs) เพื่อต้องการใช้งานด้านความถี่สูง หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไอริส (electronics iris) จึงไม่จำเป็นต้องใช้สารประกอบในกลุ่ม III-V ซึ่งมีราคาแพงและในขณะนี้เทคโนโลยีซิลิคอนมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก การเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนเพื่อสร้างเป็นโครงสร้าง MSM จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจ ซึ่งซิลิคอนสามารถตอบสนองในช่วงแสงที่ตามองเห็น คือ 400-700 นาโนเมตร ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้มากมาย และที่สำคัญยังมีราคาถูก ดังนั้นในโครงสร้างนี้จึงเลือกซิลิคอนและอะลูมิเนียมในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM



(ข)

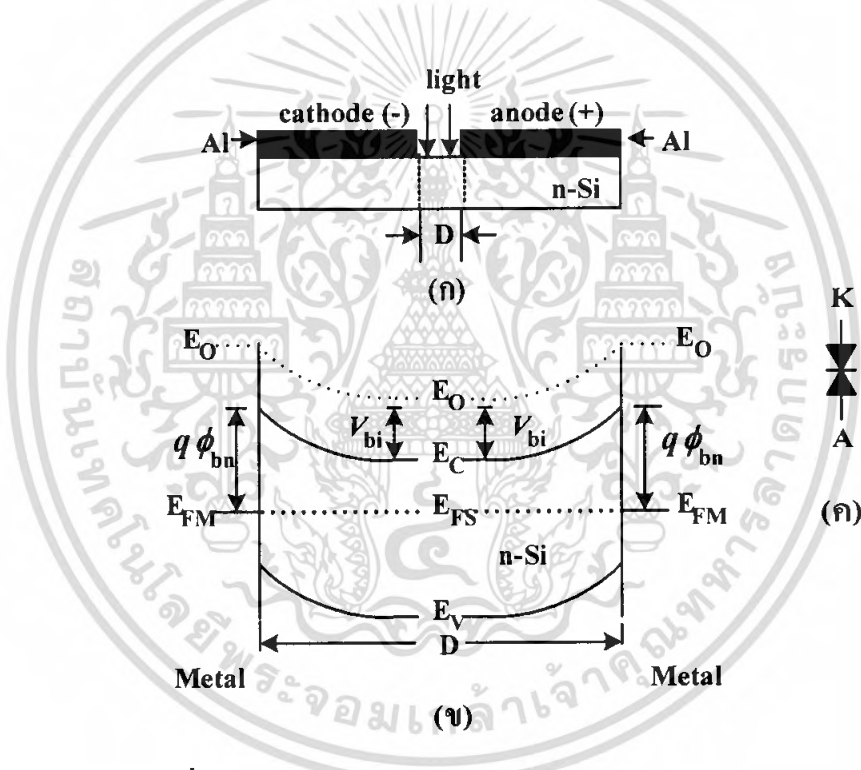
รูปที่ 2.13 (ก) ภาพตัดขวาง โครงสร้าง MSM

(ข) ภาพด้านบน โครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 โครงสร้างของ MSM ในสถานะสมดุลความร้อน

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส โดยมียุทธศาสตร์ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (D) หรือระยะห่างขั้วไฟฟ้า เป็นส่วนแยกรอยสัมผัสทั้งสองของโครงสร้าง MSM ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นซิลิคอนจะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุลความร้อน จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและเกิดกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยมีค่าที่เท่ากันเนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบสมมาตรและใช้วัสดุชนิดเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) ส่วนในรูปที่ 2.14 (ค) เป็นสัญลักษณ์ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM



รูปที่ 2.14 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM

(ข) แถบพลังงานในสถานะสมดุลความร้อน

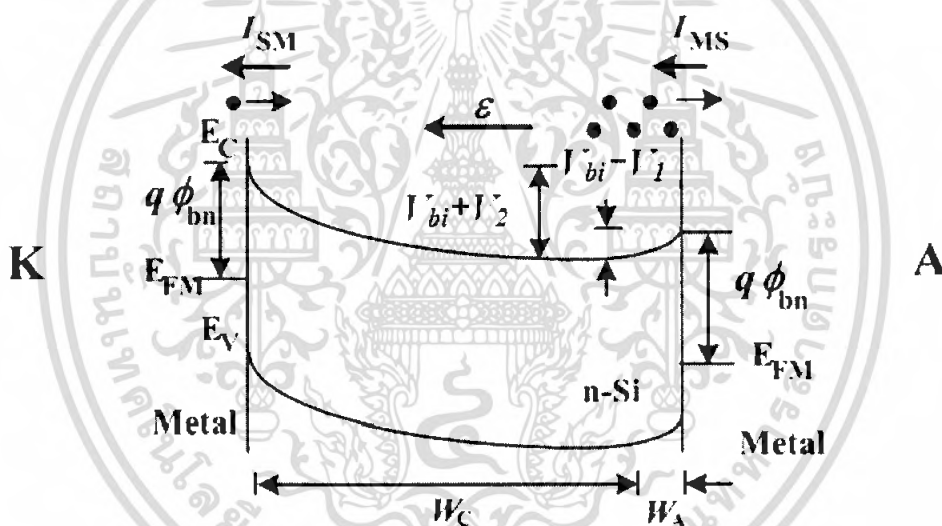
(ค) สัญลักษณ์ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

2.5.3 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบแอส

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบแอสดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสแบบ MS แบรีเออร์ทางด้านคาโทด (W_C) มีขนาดกว้างขึ้นเนื่องจากได้รับการไบแอสย้อนกลับ ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณปลอดพาหะทางด้านอโนด (W_A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับมีขนาดลดลงจากการไบแอสตรง สำหรับด้านที่ได้รับ ไบแอสย้อนกลับจะมีค่าของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ $V_{bi}+V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในด้านที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ส่วนด้านที่ได้รับการไบแอสตรงจะมีค่าของกำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ $V_{bi}-V_1$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านคาโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วย ซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current) ของ โครงสร้าง MSM



รูปที่ 2.15 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบแอส

2.5.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบแอส

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม (W_T) ของโครงสร้าง MSM เป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด (W_C) ที่ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านอานอด (W_A) ที่ได้รับแรงดันไบแอสตรง ดังสมการที่ 2.15

$$W_T = W_C + W_A \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_2)}{qN_D}} \tag{2.16}$$

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_1)}{qN_D}} \tag{2.17}$$

2.5.5 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ

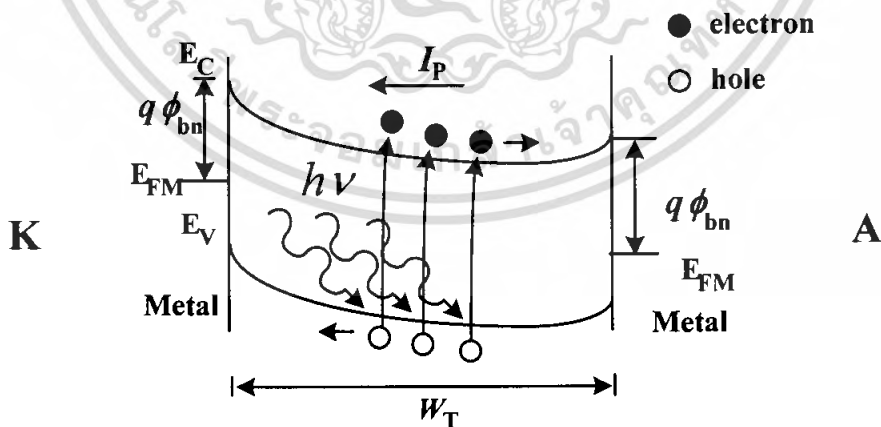
เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงแล้ว จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกไปภายนอกอุปกรณ์ โดยกระแสแสง (I_p) ของโครงสร้าง MSM มีค่าดังสมการที่ 2.18

$$I_p = I_{mea} - I_{dark} \tag{2.18}$$

โดยที่

I_{mea} คือ กระแสที่ได้จากการวัด

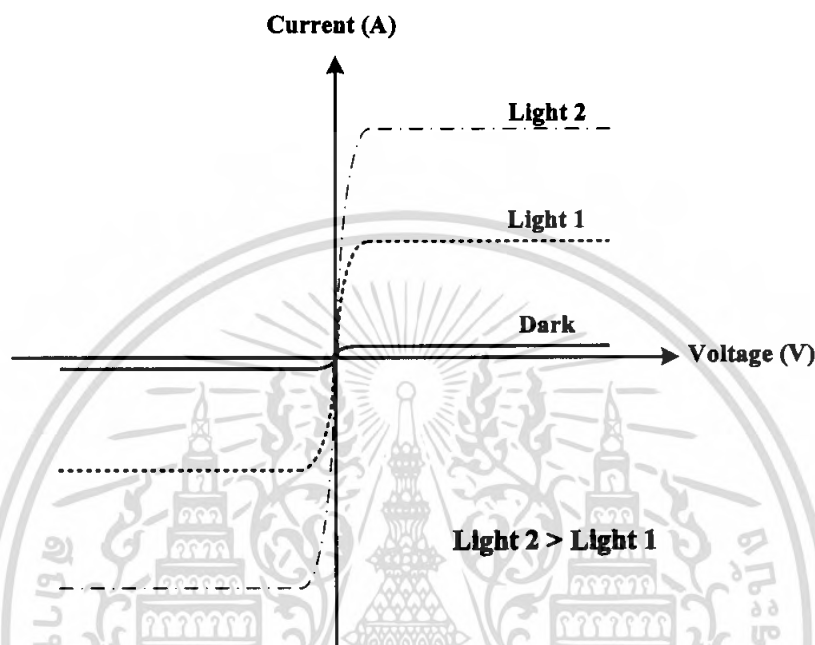
I_{dark} คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดของ MSM



รูปที่ 2.16 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแรงดันไบแอสและมีแสงตกกระทบ

ในรูปที่ 2.17 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับไบแอสตรงและด้านที่รับไบแอสย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบมีความเข้มแสงมากขึ้น



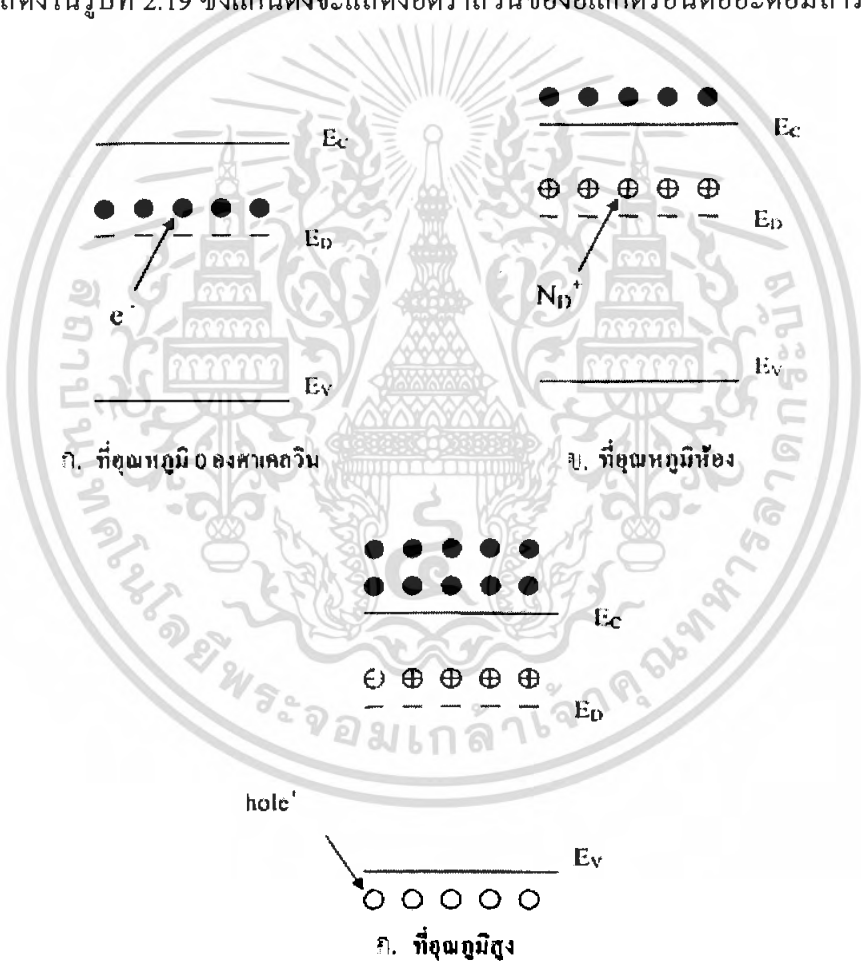
รูปที่ 2.17 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

2.6 ผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อสารกึ่งตัวนำเฮกเทรินซิก

สารกึ่งตัวนำเฮกเทรินซิก คือสารกึ่งตัวนำที่เติมอะตอมสารเจือให้แก่ซิลิคอนบริสุทธิ์ซึ่งทำให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขึ้นโดยในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะมีอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่อยูรอบ ๆ อะตอมผู้ให้แต่ละอะตอม ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องมาก ๆ อิเล็กตรอนจะไม่สามารถหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ ดังแถบพลังงานที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 แต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ประมาณอุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีพลังงานมากพอที่จะสามารถทำให้หลุดออกจากอะตอมได้ และทิ้งไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ (N_D^+) เอาไว้เมื่ออิเล็กตรอนหลุดเป็นอิเล็กตรอนอิสระแล้วก็หมายความว่า เป็นพาหะที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งที่อุณหภูมิห้องนี้จะมีการไอออไนซ์อะตอมผู้ให้เกือบทุกอะตอม นั่นคือที่อุณหภูมิห้องนี้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้ ($n \cong N_D^+ \cong N_D$) ดังแถบพลังงานที่แสดงไว้ดังรูป 2.18 ขณะที่มีการไอออไนซ์อะตอมผู้ให้ ก็มีการไอออไนซ์อะตอมของสารกึ่งตัวนำบางอะตอม ซึ่งจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นแต่การเกิดคู่อิเล็กตรอนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์จะเกิดน้อยมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์อะตอมผู้ให้ เพราะต้องใช้พลังงานมากในการไอออไนซ์อะตอมของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากและมีโฮลเป็นพาหะส่วนน้อย อย่างไรก็ตามหากอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิห้องมาก ๆ การไอออไนซ์อะตอมของสารกึ่งตัวนำจะมีมากขึ้นอย่างมาก จนมากกว่าอิเล็กตรอนที่ไอออไนซ์จากอะตอมสารเจือ ($p = n \cong n_i \gg N_D$) การไอออไนซ์อะตอมสารกึ่งตัวนำนอกจากจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่แถบนำไฟฟ้าแล้วยังทำให้เกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ด้วย ซึ่งลักษณะแบบนี้จะคล้ายกับสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกคั้งแถบพลังงานที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 ในสถานะต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรีนซิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้น อาจแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติได้ง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งแกนตั้งจะแสดงอัตราส่วนของอิเล็กตรอนต่ออะตอมสารเจือ ซึ่งจะ

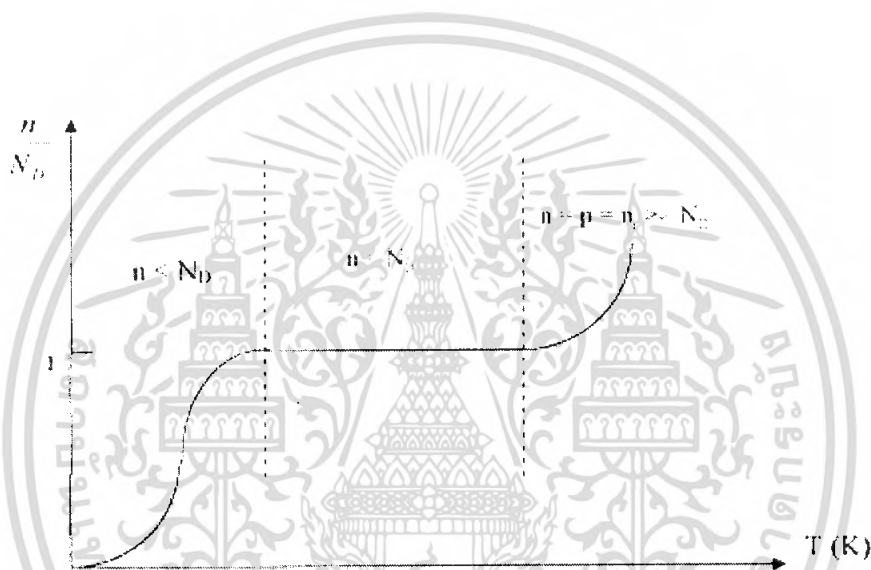


รูปที่ 2.18 แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรีนซิกที่อุณหภูมิต่างๆ

- (ก) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส
- (ข) ที่อุณหภูมิห้อง
- (ค) ที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง่ายต่อความเข้าใจว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ อิเล็กตรอนจะมีจำนวนน้อยกว่าอะตอมสารเจือ เพราะมีอิเล็กตรอนจำนวนน้อยที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดจากอะตอมสารเจือได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิเล็กตรอนจะมีพลังงานมากพอที่จะหลุดจากอะตอมสารเจือได้ทุกอะตอม ฉะนั้นช่วงนี้ $n = N_D$ หรือ $\frac{n}{N_D} = 1$ ถึงแม้ว่าจะมีอะตอมของสารกึ่งตัวนำสามารถไอออไนซ์ได้ แต่ก็จะมีจำนวนน้อยมากและช่วงที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ อะตอมของสารกึ่งตัวนำจะสามารถไอออไนซ์มากขึ้นเรื่อย ๆ ตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และคู่อิเล็กตรอนและโฮลจะมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนที่เกิดจากอะตอมสารเจือ $n = p = n_i \gg N_D$ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุจะคล้ายกับสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกดังกราฟ

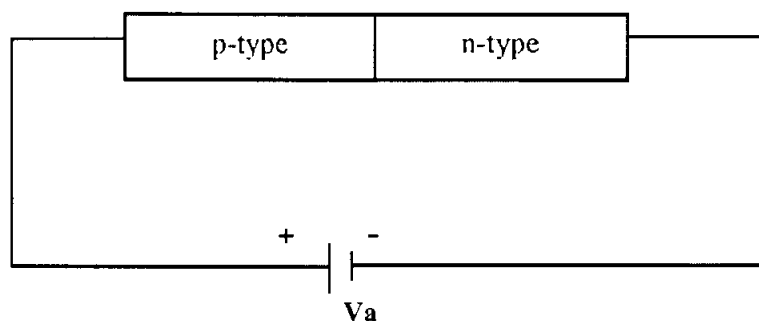


รูปที่ 2.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในซิลิคอนชนิดเอ็นกับอุณหภูมิ

2.6.1 ผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

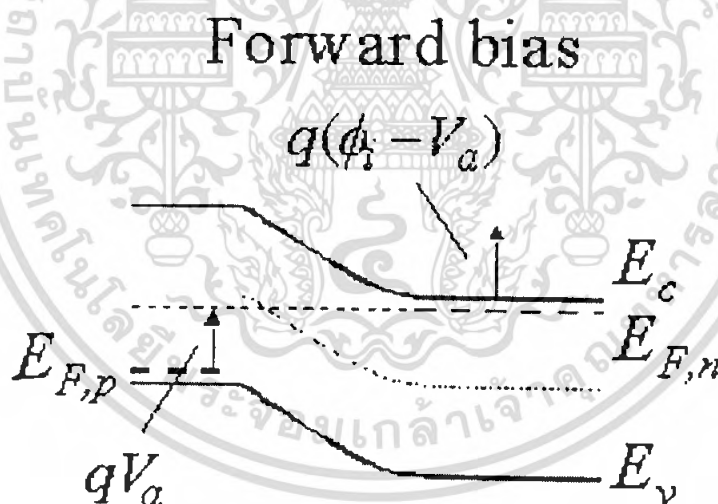
การไบอัสเป็นการใส่แรงดันที่ขั้วด้านนอกของสารพีและเอ็นที่ประกบกันเป็นรอยต่อพีเอ็นขณะที่ยังไม่ได้รับแรงดันไบอัส จะมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเพราะสนามไฟฟ้าภายในจะต้านการเคลื่อนที่ของพาหะไว้ แต่การให้ไบอัสตรงจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อได้ การให้ไบอัสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 การให้ไบอัสตรงเป็นการต่อวงจรไฟฟ้าให้ศักย์ไฟฟ้าบวกกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี และศักย์ไฟฟ้าลบกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การให้ไบอัสแบบนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าเดิมที่รอยต่อในสภาวะสมดุลความร้อน นั่นคือสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงก็หมายความว่าเมื่ออิเล็กตรอนจากด้านเอ็นสามารถเคลื่อนที่ข้ามไปด้านพี และก็มีโฮลจากด้านพีสามารถเคลื่อนที่ข้ามไปด้านเอ็นได้ ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.20 แสดงถึงแถบพลังงานขณะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงการให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อพีเอ็น

จากรูปที่ 2.20 ขณะได้รับไบอัสตรงจะทำให้ศักย์ภายในลดลงเป็น $V_{bi} - V_a$ โดยที่ V_a คือแรงดันไบอัสตรง ซึ่งการที่ศักย์ภายในโคนหักล้างโดยแรงดันไบอัสตรงทำให้ความชันของแถบพลังงานที่บริเวณปลอดพาหะเดิมลดลง นั่นก็คืออิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อได้นั่นเอง จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็นขณะให้ไบอัสตรงสามารถหาได้จากสมการ 2.19



รูปที่ 2.21 แสดงแถบพลังงานไบอัส

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right) \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่
$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อ

I_0 คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

D_p คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

L_n คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

L_p คือระยะการแพร่ของโฮล

จากสมการที่ 2.19 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \quad (2.21)$$

สมการที่ 2.21 นี้จะใช้เป็นสมการหลักในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอุณหภูมิ จะเห็นว่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดพีเอ็นจะแปรผันตามอุณหภูมิและกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ โดยปกติแล้วถือว่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับจะมีค่าคงที่แต่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป กระแสอิ่มตัวย้อนกลับก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เนื่องจากกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าแปรผันตามความหนาแน่นอินทรินซิกตามสมการที่ 2.21 และความหนาแน่นอินทรินซิกก็จะแปรผันตามอุณหภูมิ ดังนั้นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับก็จะมีการแปรผันตามอุณหภูมิดังนี้ ซึ่งความหนาแน่นอินทรินซิกหาได้จากสมการ

$$n_i = KT^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 นี้ยังสามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ เมื่อแทน n_i^2 จากสมการที่ 2.22 ในสมการที่ 2.20 จะได้

$$I_0 = qAKT^3 \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) \left(\frac{D_n}{L_n} + \frac{D_p}{L_p} \right) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.23 นี้จะเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กระแสอิ่มตัวย้อนกลับจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยดังนั้นหากย้อนกลับไปดูสมการที่ 2.21 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น I_0 จะเพิ่มขึ้นและมีผลให้เทอม $\ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)$ ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดพีเอ็นลดลงตามไปด้วย หากนำสมการที่ 2.23 และ 2.22 สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสไบอัสกับอุณหภูมิได้ดังนี้

$$I \propto \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 หากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเราอาจเขียนอัตราส่วนของกระแสไดโอดที่อุณหภูมิห้องทั้งสองได้ดังนี้

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\exp(-E_g/kT_2) \exp(eV_{a2}/kT_2)}{\exp(-E_g/kT_1) \exp(eV_{a1}/kT_1)} \quad (2.25)$$

หากทำการไบอัสกระแสคงที่ให้แก่ไดโอด ทำให้ $I_1 = I_2$ จะได้ว่า

$$\frac{E_g - eV_{a2}}{kT_2} = \frac{E_g - eV_{a1}}{kT_1} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะแปรผกผัน และเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง หรืออาจเขียนสมการที่ 2.27 ให้อยู่ในรูปพหุคูณของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดได้จาก $n_p = n_i^2$ และ $p_n = n_i^2/N_D$ และ $n_p = n_i^2/N_A$ ดังนั้นแทนค่า n_i^2 ในสมการที่ 2.27 จะได้

$$I_0 = qA \left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right) \quad (2.27)$$

เมื่อ

n_p คืออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย

p_n คือโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

D_p คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

L_n คือ ระยะเวลาแพร่ของอิเล็กตรอน

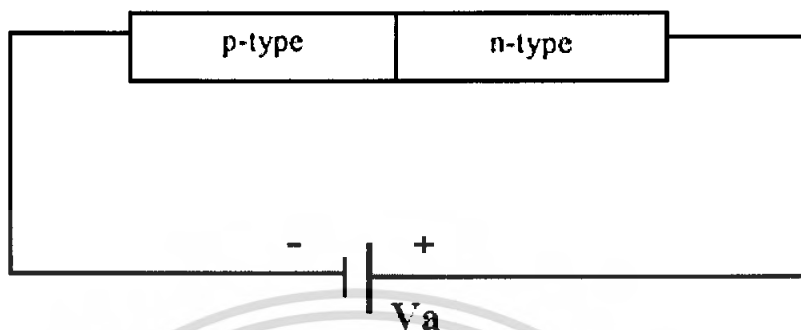
L_p คือระยะเวลาแพร่ของโฮล

สมการที่ 2.27 นี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอะตอมของสารกึ่งตัวนำจะถูกไอออไนซ์ ถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นการไอออไนซ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น เมื่อเกิดโฮลขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นโฮลจึงเป็นพาหะส่วนน้อย (p_n) และถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี การไอออไนซ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้เช่นกัน เมื่อเกิดอิเล็กตรอนขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อย (n_p) ดังนั้นขณะที่ให้ ไบอัสตรงแก่ไดโอดพีเอ็นจะทำให้เกิดพาหะส่วนน้อยของสารกึ่งตัวนำทั้งสองด้านเพิ่มขึ้น และพาหะส่วนน้อยนี้จะทำให้เกิดกระแสการครีพที่ขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากการไบอัสเมื่อ กระแสครีพที่เพิ่มขึ้นซึ่งกระแสครีพที่เพิ่มขึ้นนี้จะเป็กระแสอิมิตัวย้อนกลับสำหรับรอยต่อพีเอ็นซิลิคอนความหนาแน่นกระแสอิมิตัวย้อนกลับทางอุดมคติจะเพิ่มขึ้นโดยประมาณสี่เท่าทุก ๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส หากกระแสอิมิตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นเป็นผลให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าลดลง ตามสมการที่ 2.27

2.6.2 ผลของอุณหภูมิที่กระทบต่อรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

การไบอัสย้อนกลับของรอยต่อพีเอ็นนั้น คือการที่ให้ศักย์ไฟฟ้าลบแก่ด้านพีและให้ศักย์ไฟฟ้าบวกแก่ด้านเอ็น การให้ไบอัสย้อนกลับแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 การให้ไบอัสแบบนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ซึ่งมีทิศทางชี้จากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าขณะสภาวะสมดุลความร้อน ทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนและโฮลจะไม่สามารถเคลื่อนข้ามรอยต่อได้ ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างรอยต่อพีเอ็น ลักษณะแถบพลังงานขณะให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อพีเอ็นแสดงได้ดังรูปที่ 2.23 จากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าขณะให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อพีเอ็น จะทำให้ศักย์ภายในของรอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $V_{bi} + V_a$ โดย V_a คือแรงดันไบอัสย้อนกลับซึ่งการที่ศักย์ภายในมีค่าเพิ่มขึ้นโดย

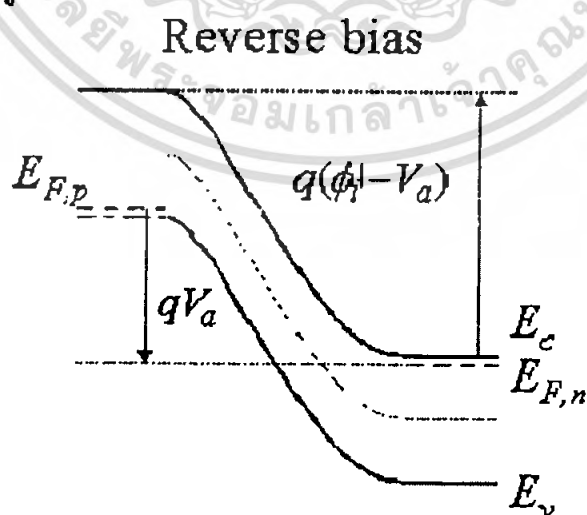
แรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้ความชันของแถบพลังงานที่บริเวณรอยต่อพาหะเดิมเพิ่มขึ้น นั่นคือ อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อได้ การให้ไบอัสย้อนกลับจึงไม่



รูปที่ 2.22 การให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อพีเอ็น

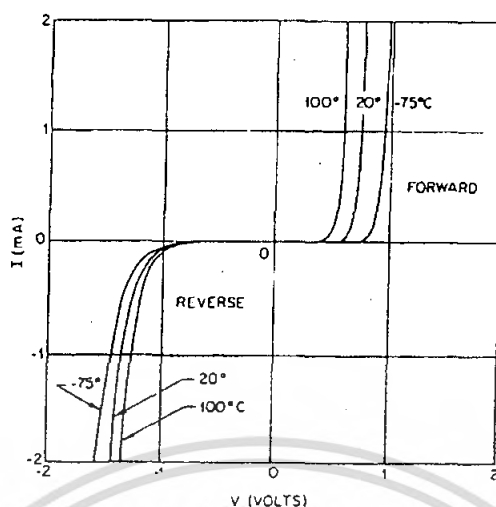
เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อ อย่างไรก็ตามแล้วแต่ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับก็ยังมีพาหะส่วนน้อยของสารกึ่งตัวนำในแต่ละข้างเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปได้ ผลของพาหะส่วนน้อยที่เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อทำให้เกิดกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ซึ่งโดยทฤษฎีแล้วจะมีค่าคงที่

จากคุณสมบัติขณะการให้ไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าโคโอดแบบรอยต่อพีเอ็นจะเป็นอุปกรณ์ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว คือกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านรอยต่อได้ในขณะให้ไบอัสตรง และกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อได้ขณะให้ไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นลักษณะกราฟระหว่างกระแสและแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 แถบพลังงานขณะให้ไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

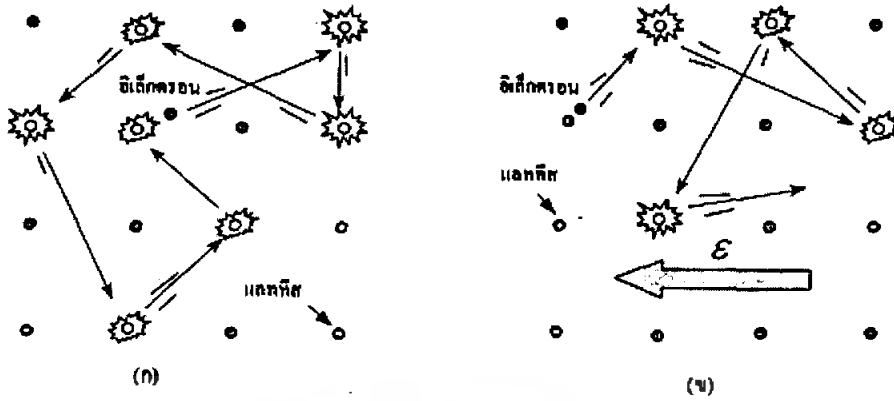


รูปที่ 2.24 กราฟระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น

2.7 ความเร็วเนื่องจากความร้อน (Thermal velocity)

ในสภาวะปกติ ที่อุณหภูมิซึ่งสูงกว่า 0 K และไม่มีสนามไฟฟ้าใดๆ อิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำจะได้รับพลังงานจากความร้อน จึงทำให้พาหะเหล่านี้มีพลังงานจลน์ ที่อุณหภูมิกำหนดหนึ่ง พาหะจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกความเร็วนี้ว่า **“ความเร็วเนื่องจากความร้อน”** (Thermal velocity) เช่นในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ที่ 300 K ความเร็วของพาหะเนื่องจากความร้อนมีค่าราว 10^7 ซม.ต่อวินาที (100 กม/วินาที) หรือคิดเป็น 1/100 ของความเร็วแสง ซึ่งนับว่าเป็นความเร็วที่สูงมาก อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของพาหะนี้จะเป็นการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง

กล่าวคือไม่มีทิศทางที่แน่นอนหรือก็คือการเคลื่อนที่แบบอิสระ ซึ่งภายในผลึกสารของแข็งซึ่งประกอบด้วยอะตอมที่มีอยู่อย่างหนาแน่น อะตอมเหล่านี้จะเป็นอุปสรรคและขัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะ ดังนั้นขณะที่พาหะเคลื่อนที่จึงเกิด **“การชนกัน”** (Collision) ระหว่างพาหะกับแกนของอะตอมหรือที่เรียกว่า **“แลตทิซ”** (Lattice) ซึ่งอาจเป็นอะตอมของสารกึ่งตัวนำเอง หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 การชนกันนี้เกิดขึ้นตลอดเวลา



รูปที่ 2.25 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะในผลึกสารกึ่งตัวนำเมื่อ อุณหภูมิ $T > 0\text{ K}$

- (ก) กรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าและ
- (ข) กรณีอยู่ในสนามไฟฟ้า

แต่เนื่องจากสภาพความคล่องแปรโดยตรงกับเวลารีแลกซ์ ดังนั้นสมการที่ 2.28 สามารถเขียนในรูปของสภาพคล่องได้เป็น

$$\frac{1}{\mu_T} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_i} \tag{2.28}$$

โดยที่

- μ_T หมายถึงสภาพคล่องโดยรวมของพาหะ
- μ_L หมายถึงสภาพคล่องเนื่องจากการชนกับแลททิซ
- μ_i หมายถึงสภาพคล่องเนื่องจากการชนกับอะตอมสารเจือ

ในทางทฤษฎี สภาพคล่องเนื่องจากการชนกับแลททิซ μ_L จะแปรกับ $\frac{1}{T^{\frac{3}{2}}}$ และสภาพ

คล่องเนื่องจากการชนกับอะตอมสารเจือ μ_i จะแปรกับ $\frac{T^{\frac{3}{2}}}{N}$ ซึ่ง N ในที่นี้หมายถึงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือทั้งหมดที่มีอยู่ (หรือ $= N_D + N_A$) อย่างไรก็ตามการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูงๆซึ่ง ผลการชนกันกับอะตอมสารเจือมีค่าน้อยมาก สภาพคล่องเนื่องจากการชนกันกับแลททิซ μ_L กรณีนี้จะแปรกับ $\frac{1}{T^{\frac{3}{2}}}$ ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎี

สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ที่อุณหภูมิ 300 K ซึ่งถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือความเข้มข้น N อะตอมต่อลบ.ซม. สามารถคำนวณหาค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ได้จากสมการที่ 2.29 และสมการที่ 2.30 ดังนี้

$$\text{สภาพคล่องของอิเล็กตรอน} \quad \mu_n = 88 + \frac{1252}{1 + 0.698 \times 10^{-17} N} \quad (2.29)$$

$$\text{และสภาพคล่องของโฮล} \quad \mu_p = 54.3 + \frac{407}{1 + 0.374 \times 10^{-17} N} \quad (2.30)$$

2.7.1 ผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ หรือ มีอะตอมสารเจืออยู่เพียงเล็กน้อย เช่น มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือน้อยกว่า 10^{16} อะตอมต่อลบ.ซม. ดังนั้นผลของการชนกันระหว่างพาหะกับอะตอมสารเจือจะมีค่าน้อยกว่าการชนระหว่างพาหะกับแลตทิซ ทำให้สภาพคล่องของพาหะแปรกับอุณหภูมิเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการชนกับแลตทิซจะมีมากขึ้น จึงทำให้สภาพคล่องมีค่าลดลง โดย μ จะแปรกับ T^{-2} ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ไป ซึ่งส่วนใหญ่มักจะจะเป็นกระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อยเท่านั้น เช่นกระแสที่ไหลในไดโอดและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

2.8 การพังทลายที่รอยต่อพี-เอ็น (p-n junction breakdown)

2.8.1 การพังทลายขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ I_0 หรือ I_R ไหลผ่านรอยต่อ ปริมาณกระแสนี้จะมีค่าน้อยมาก และพบว่ามีความเกือบคงที่ แม้ว่าจะเพิ่มแรงดันไบอัสก็ตาม กระแสนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงหรืออาจเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อย่างไรก็ตามเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับสูงถึงค่าหนึ่ง (V_B) กระแสนี้จะเพิ่มอย่างมากและรวดเร็ว ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การพังทลายของรอยต่อ” (Junction breakdown) เมื่อเกิดการพังทลายแล้วตัวไดโอดจะมีความต้านทานน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ ทำให้มีกระแสจำนวนมากเป็นอนันต์ไหลในวงจร ซึ่งอาจทำให้เกิดความร้อน หรือเกิดการไหม้และเสียหายได้ ดังนั้นโดยทั่วไปมักจะใช้ตัวต้านทาน (resistor) ต่ออนุกรมกับไดโอดไว้ เพื่อช่วยในการจำกัด (limit) กระแสไม่ให้มีค่ามากเกินไปกว่า ที่วงจรจะรับได้ ซึ่งจะช่วยป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร แรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์พังทลายนี้ถูกเรียกว่า “แรงดันทลาย” (Breakdown voltage : V_B) ในทางปฏิบัติอาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามค่าของแรงดันพังทลายได้ว่า คือ แรงดันที่ทำให้กระแสย้อนกลับเพิ่มขึ้นเป็นค่าๆหนึ่ง เช่น 1 มิลลิแอมป์ เป็นต้น หลังจากที่เกิดการพังทลายแล้วเพิ่มแรงดันไบอัสต่อไป จะมีเพียงกระแสเท่านั้นที่เพิ่มขึ้น ส่วนแรงดันตกคร่อมไดโอด จะมีค่าคงที่เกือบหรือคงที่ ซึ่งคุณสมบัติของไดโอดในย่านพังทลายนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานเป็น “ตัวควบคุมแรงดันให้คงที่” (Voltage regulator) ในอุปกรณ์จ่ายแรงดันคงที่หรือ นิยามเรียกว่า “โวลต์เตจเรกูเลเตอร์”(Regulator voltage supply)

ปรากฏการณ์การพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นที่เกิดขึ้นนี้ สามารถอธิบายด้วยกลไกการเกิดที่แตกต่างกันได้ 2 ลักษณะ คือ **การพังทลายแบบอะวาแลนซ์ (Avalanche breakdown)** **การพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener breakdown)** ซึ่งในไดโอดทั่วไปการพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นจะเป็นแบบอะวาแลนซ์ แต่ในกรณีของไดโอดที่มีการเติมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้นที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ มักจะเกิดการพังทลายของรอยต่อแบบซีเนอร์

2.8.2 การพังทลายของรอยต่อแบบอะวาแลนซ์ (Avalanche breakdown)

การพังทลายของรอยต่อแบบนี้ จะเกิดขึ้นกับไดโอดทั่วไป ซึ่งด้านทั้งสองของรอยต่อมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือในระดับปกติ กล่าวคือไม่เข้มข้นเป็นพิเศษ ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่า $-V_A$ ซึ่งมีค่าไม่สูงนักเมื่อเทียบกับค่าของแรงดันพังทลาย (V_B) จะมีกระแสอิมพัลส์ย้อนกลับไหลไปยังไดโอด ซึ่งเป็นกระแสของพาหะส่วนน้อย ที่เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อหรือบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าอยู่ ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ทำให้พาหะมีพลังงานจลน์ และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านบริเวณนี้ จะเกิดการชนกับอะตอมอยู่เสมอ ทำให้พาหะมีการสูญเสียพลังงาน ดังแสดงเปรียบเทียบได้เช่นในรูปที่ 2.26 โดยขณะที่แรงดันไบอัสมีค่าต่ำๆ สนามไฟฟ้าย่านปลอดพาหะก็มีค่าน้อย ความเร็วของพาหะส่วนน้อยก็มีค่าน้อยจึงทำให้พลังงานจลน์ของพาหะมีค่าน้อย การชนกับอะตอมแม้จะเกิดขึ้นก็สามารถทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนได้

แต่เมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะ ของรอยต่อจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และมีพลังงานจลน์มากขึ้น จนกระทั่งพลังงานจลน์มีค่ามากพอที่จะชนอะตอมและทำให้เกิดการไอออไนซ์ขึ้นทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล โดยที่อิเล็กตรอนตัวใหม่นี้จะได้รับพลังงานจากการถูกชน และกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบความนำกลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าดังรูปที่ 2.26 ปรากฏขึ้นนี้เรียกว่า **“การไอออไนซ์เนื่องจากการชน” หรือ “Impact ionization”** อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะถูกเร่งจากสนามไฟฟ้าภายในบริเวณปลอดพาหะ จึงมีพลังงานจลน์สูงพอที่จะทำให้เกิด impact ionization อย่างต่อเนื่อง

ดังนั้นปริมาณของพาหะจะทวีคูณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ลักษณะเช่นนี้คล้ายๆ กับก้อน

น้ำแข็งที่ตกลงมาจากภูเขาน้ำแข็ง แล้วชนกับก้อนน้ำแข็งอื่นๆ ทำให้เกิดการถล่มทลายของภูเขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านนอกรักร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำแข็งขึ้น คังนั้น กระแสอิมตัวย้อนกลับจึงมีค่าเพิ่มสูงกว่าเดิมอย่างรวดเร็ว และจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ กับการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่งที่เรียกว่า **“แรงดันพังทลาย”** (Breakdown voltage: V_B) ปริมาณของพาหะจะมีค่าสูงมาก และกระแสอิมตัวย้อนกลับจะมีค่าสูงมาก จนเป็นค่าอนันต์ การพังทลายของรอยต่อดังกล่าวนี้ ถูกเรียกว่า **“การพังทลายแบบอะวาลันซ์”** ขณะอยู่ในสภาวะการพังทลาย หรือ $V_A \geq V_B$ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะมีค่าเกือบคงที่คือประมาณเท่ากับ V_B กระแสย้อนกลับในขณะนี้จะถูกจำกัดด้วยค่าของตัวต้านทานอนุกรมที่ต่อไว้ในวงจร เพื่อควบคุมกระแสให้มีค่าที่เหมาะสม

การเพิ่มขึ้นของกระแสก่อนเกิดการพังทลาย จะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณพาหะซึ่งแสดงได้โดยค่า **“แฟกเตอร์ของการทวีคูณ”** (Multiplication factor : M) และเขียนได้ดังนี้

$$M \equiv \frac{|I|}{I_0} \quad (2.31)$$

โดย

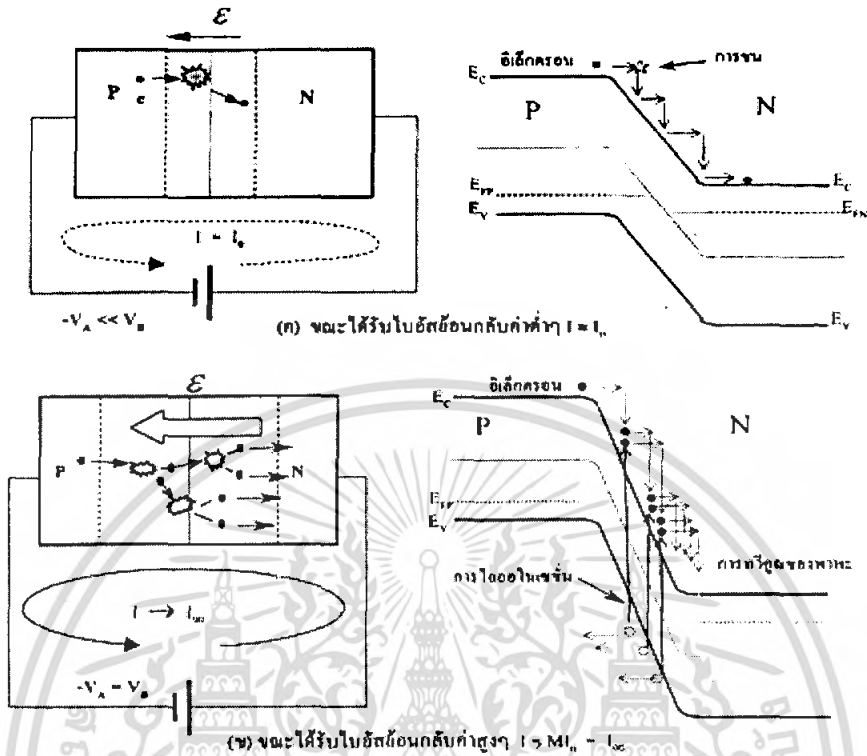
I คือ กระแสที่ไบอัสให้กับไดโอด

I_0 คือ กระแสอิมตัวย้อนกลับ

จากรูปที่ 2.26 การชนระหว่างพาหะส่วนน้อยเช่นอิเล็กตรอนกับอะตอมสารกึ่งตัวนำในบริเวณปลอดพาหะในขณะที่ยอยต่อได้รับแรงดันไบอัสกลับ (ก) เมื่อ $|V_A| \ll V_B$ และ (ข) เมื่อ $|V_A| \rightarrow V_B$ และจากการทดลองจะได้ว่า

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^m} \quad (2.32)$$

โดย m เป็นค่าคงที่มีค่าในช่วง 2-6 ขึ้นอยู่กับชนิดสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นไดโอดความสัมพันธ์ของค่า M และ $\left(\frac{V_A}{V_B}\right)$ ตามสมการที่ 2.32 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A มีค่าต่ำๆ หรือ $V_A \ll V_B$ แฟกเตอร์การทวีคูณ $M = 1$ ซึ่งหมายถึงไม่มีการทวีคูณของพาหะกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อเท่ากับกระแสอิมตัว ($I = I_0$) ซึ่งมีค่าน้อย ขณะที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A มีค่าเพิ่มขึ้น หรือ $V_A \rightarrow V_B$ แฟกเตอร์การทวีคูณ $M > 1$ ซึ่งแสดงว่าในขณะนี้เริ่มมีการ

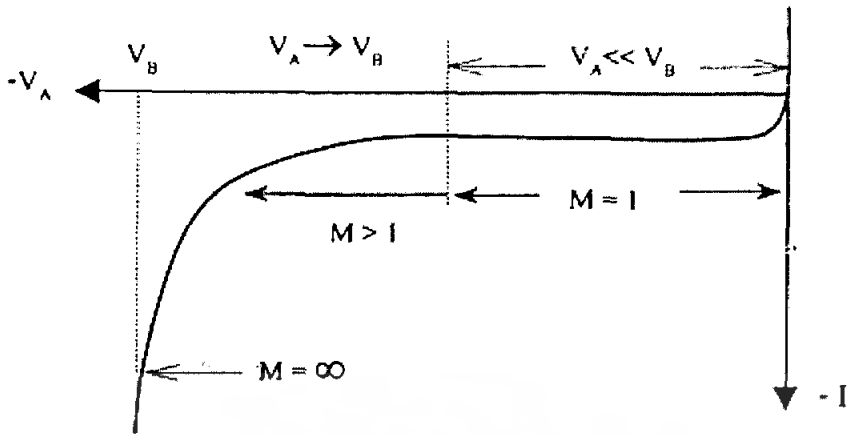


รูปที่ 2.26 การชนกันระหว่างพาหะส่วนน้อยเช่นอิเล็กตรอนกับอะตอมสารกึ่งตัวนำในบริเวณหลอดพาหะในขณะที่ยอดต่อได้รับไบอัสย้อนกลับ

- (ก) เมื่อ $|V_A| \ll V_B$
- (ข) เมื่อ $|V_A| \rightarrow V_B$

ทวิคูณพาหะ กระแสที่ไหลจะมีค่าสูงขึ้น และจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัส ยิ่ง V_A เข้าใกล้ V_B แฟกเตอร์การทวิคูณ M จะมีค่ายิ่งสูงขึ้นหรือ $M \gg 1$ และในช่วงก่อนที่ $V_A = V_B$ หรือก็คือช่วงก่อนการพังทลายเพียงเล็กน้อย จะทำให้ $M \rightarrow \infty$ ในขณะนี้กระแสที่ไหลจะมีค่าสูงมากและเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว ช่วงนี้อาจเรียกว่า **“ช่วงเริ่มพังทลาย”** หรือ **“ซอฟเบรคควาน”** (soft breakdown) และเมื่อ $V_A = V_B$ แฟกเตอร์การทวิคูณจะมีค่าเป็นค่าอนันต์ หรือ $M = \infty$ จากสมการที่ 2.32 กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อจะมีค่าเป็นค่าอนันต์ ซึ่งเป็นภาวะของการพังทลายที่สมบูรณ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ในช่วงต่างๆ ซึ่งแสดงด้วยค่าแฟกเตอร์ของการทวิคูณ M แสดงดังรูปที่ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 การทำงานในย่านต่างๆของไดโอดขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของแฟกเตอร์การทวีคูณของพาหะโดย $M = 1$ เป็นย่านทำงานปกติ, $M > 1$ เป็นย่านการทวีคูณของพาหะ และที่ $M = \infty$

จากการศึกษาพบว่า การเกิดปรากฏการณ์การพังทลายแบบอะวาลันซ์ จะเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลดพาหะ โดยพิจารณาว่า ที่สนามไฟฟ้าค่าวิกฤติ (Critical electric field) \mathcal{E}_{cr} จะทำให้พาหะที่เคลื่อนที่ผ่านสนามนี้ มีพลังงานจลน์มากพอที่จะทำให้อะตอมเกิดการไอออไนซ์หรือ **“impact ionization”** และมีผลทำให้เกิดการพังทลายในที่สุด ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตินี้จะต้องมีค่าคงที่ค่าหนึ่งคือ \mathcal{E}_{cr} ดังนั้น เมื่อพิจารณา จากสมการสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณรอยต่อที่รอยต่อได้รับแรงดันย้อนกลับ $-V_A$ จะได้ว่า

$$\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}(0) = \left[\frac{2q}{\epsilon} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) (V_{bi} + V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.33}$$

ขณะที่เกิดการพังทลาย สนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าวิกฤติ \mathcal{E}_{cr} และแรงดันไบอัสในขณะนี้ก็คือ

$$V_{bi} + V_A \approx V_A = V_B \tag{2.34}$$

จะได้ว่า

$$\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}_{cr} = \left[\frac{2q}{\epsilon} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) V_B \right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.35}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$(\mathcal{E}_{cr})^2 = -\left[\frac{2q}{\epsilon} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}\right) V_B\right]^2 \quad (2.36)$$

เนื่องจากค่าสนามวิกฤติ \mathcal{E}_{cr} ต้องมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้น จากสมการ 2.35 จะได้ว่า ถ้าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ด้านทั้งสองของรอยต่อคือ N_A, N_D มีการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันพ่วงทลาย V_B จะต้องเปลี่ยนแปลงด้วย เพื่อให้ผลลัพธ์มีค่าคงที่ ดังนั้น จึงพิจารณา

$$V_B \propto \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \quad (2.37)$$

และในกรณีที่เป็นรอยต่อชั้นบันไดแบบไม่สมมาตร

กรณี $p^+ - n$ ซึ่ง $N_A \gg N_D$

ดังนั้น

$$V_B \propto \frac{1}{N_D}$$

หรือกรณี $p^+ - n^+$ ซึ่ง $N_A \ll N_D$

ดังนั้น

$$V_B \propto \frac{1}{N_A}$$

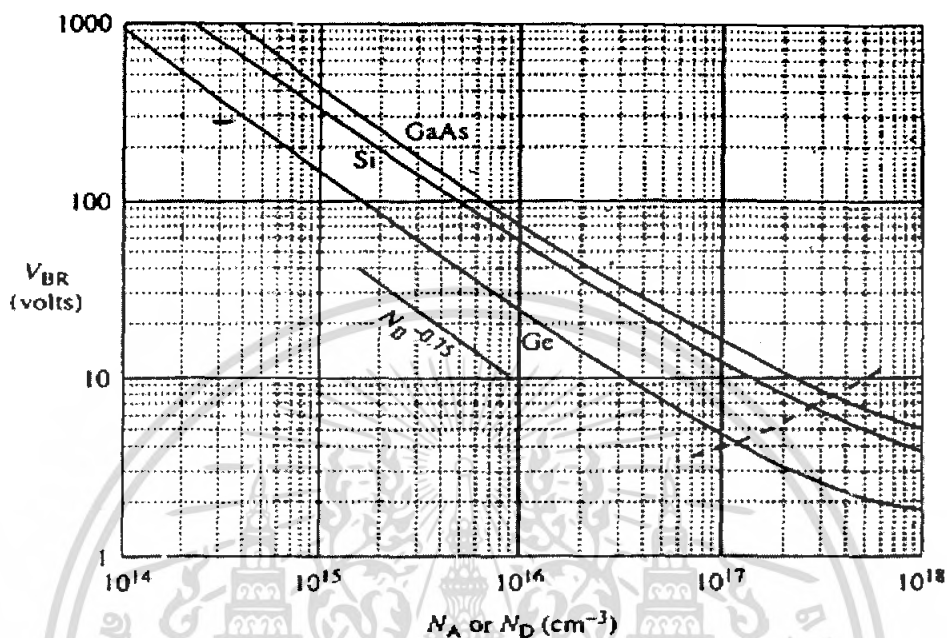
อาจสรุปได้ในที่สุดว่า

$$\text{แรงดันพ่วงทลาย} \quad V_B \propto \frac{1}{N_B} \quad (2.38)$$

โดย N_B คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำ หรือด้านที่เจือจาง อาจกล่าวสรุปได้ว่า ค่าของแรงดันพ่วงทลาย (V_B) ของไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น จะขึ้นอยู่กับค่าของความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ในด้านที่มีค่าความหนาแน่นสารเจือต่ำ (N_A หรือ N_D) โดยที่ไดโอดที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือต่ำๆ จะให้คุณสมบัติการพ่วงทลายที่แรงดันสูง นอกจากนี้แรงดันพ่วงทลายยังขึ้นกับขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงาน (E_g) โดยที่ไดโอดซึ่งสร้างจากสารกึ่งตัวนำที่มี ช่องว่างพลังงานกว้างๆ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ จะให้แรงดันพ่วงทลายที่สูงกว่าไดโอดจากซิลิคอน และไดโอดที่สร้างจากเยอรมันเนียม จะมีแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พังทลายที่ต่ำที่สุด การเปลี่ยนแปลงของแรงดันพังทลายกับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ในสารกึ่งตัวนำด้านที่มีค่าต่ำ ชนิดต่างๆกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ค่าของแรงดันพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นแบบชั้นบับนไค $p^+ - n$ และ $p - n^+$ ของเจอร์เมเนียม ซิลิคอน และ แกลเลียมอาเซไนด์ ซึ่งขึ้นกับค่าของความหนาแน่นอะตอมสารเจือในด้านที่มีความหนาแน่นสารเจือต่ำ โดยเป็นการพังทลายแบบอะวาแลนซ์ ที่อุณหภูมิ $T=300\text{ K}$

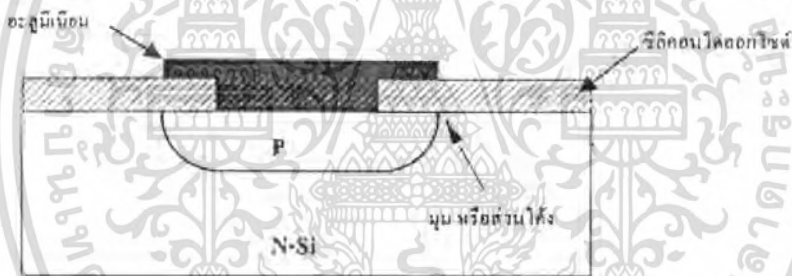
จากรูปที่ 2.28 จะเห็นได้ว่า แรงดันพังทลายของรอยต่อ อาจเปลี่ยนแปลงหรือควบคุมได้ตั้งแต่ประมาณไม่กี่โวลต์จนถึงค่าเป็นพันโวลต์ โดยการกำหนดความหนาแน่นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำ และจากผลการทดลองจะได้ว่า

$$V_B \propto \frac{1}{(N_B)^{0.75}} \quad (2.39)$$

นอกจากนี้แล้ว จะเห็นว่าที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่เท่ากัน แรงดันพังทลายของไดโอดที่สร้างจากสารที่ต่างชนิดกันจะมีค่าแตกต่างกัน โดยสารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงาน E_g ที่มากกว่าจะมีค่าแรงดันพังทลายสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานที่จะทำให้เกิดการไอออไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ionization) ของอะตอมสารเจือที่ E_g ค่าสูงกว่าจะมีค่ามากกว่าสารที่มี E_g ค่าต่ำกว่า ดังนั้นที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่เท่ากัน ไดโอดซึ่งทำจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ จะมีค่าแรงดันพังทลายมากกว่าไดโอดที่ทำจากซิลิคอนและเยอรมันเนียมตามลำดับ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น การสั่นของอะตอม (atomic vibration) จะมีมากขึ้น ทำให้พาหะอิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับอะตอมมากยิ่งขึ้น พาหะจึงมีความเร็วลดลง และพลังงานจลน์ก็ลดลงด้วย ดังนั้นจึงพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_{cr} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแรงดันพังทลายแบบอะวาลันซ์มีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของแรงดันพังทลายที่อุณหภูมิสูงขึ้น ถือเป็นคุณสมบัติเฉพาะของการพังทลายแบบอะวาลันซ์ นิยมนำไปใช้ตรวจสอบชนิดของการพังทลาย ยิ่งไปกว่านั้นในการสร้างไดโอด โดยเฉพาะวิธีการแพร่สารเจือ (diffusion) หรือแม้แต่วิธีฝังไอออน (ion implantation) อะตอมสารเจือเข้าไปในผลึกซิลิคอน โดยผ่านชั้นหน้ากากออกไซด์ (oxide mask) จะทำให้โครงสร้างของไดโอดเกิดมีมุมบริเวณรอบๆ ดังในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ลักษณะโครงสร้างของไดโอด ซึ่งมีมุมหรือส่วนโค้ง จนเกิดผลของ curvature effect ทำให้แรงดันพังทลายมีค่าต่ำกว่าปกติ

ดังนั้น ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าใดๆ บริเวณมุมเหล่านี้ จะมีความเข้มข้นสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่อื่นๆ และมีผลทำให้เกิดการพังทลายได้เร็วขึ้นกว่าเดิม หรือแรงดันพังทลายมีค่าลดลงนั่นเอง และผลดังกล่าวถูกเรียกว่า **“ผลของความโค้ง”** (curvature effect) อาจกล่าวง่ายๆ ได้ว่าเมื่อความลึกของรอยต่อลดลง จะทำให้แรงดันพังทลายมีค่าลดลงด้วย ในกรณีที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือ ที่ด้านทั้งสองของรอยต่อมีค่าสูงมาก จะทำให้เกิดการพังทลายของรอยต่อ ในอีกลักษณะหนึ่งซึ่งมีกลไกการพังทลายที่แตกต่างไปจากกรณีของอะวาลันซ์ และถูกเรียกว่า **“การพังทลายแบบซีเนอร์”** ซึ่งรายละเอียด จะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

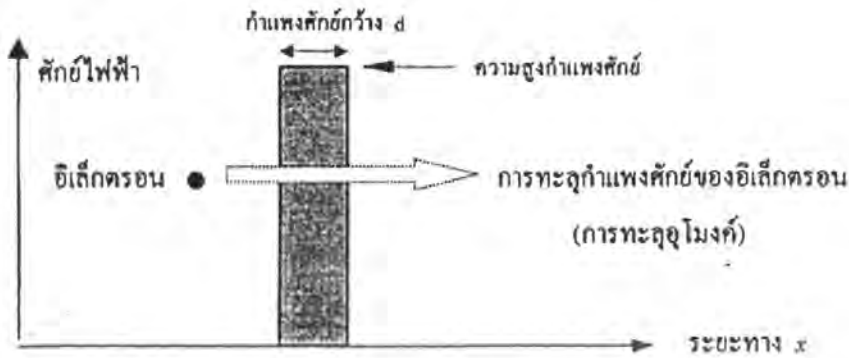
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 การพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener breakdown)

ปรากฏการณ์การพังทลายแบบซีเนอร์ มักจะเกิดขึ้นกับรอยต่อของไดโอดที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือค่าสูงๆ ($p^+ - n$) เช่นมีค่าสูงกว่า 10^{17} อะตอม / ลบ.ซม. ดังนั้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อจะมีขนาดแคบมาก เช่นมีค่าน้อยกว่า 100 Å เป็นต้น จึงทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อมีค่าสูงมาก เช่นราว 10^6 โวลต์/ซม. แม้ว่าจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพียงไม่กี่โวลต์ก็ตาม ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุของการเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้า หรือ Field emission หรือ Field ionization ของอะตอมสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อ และอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่เข้าไปด้านเอ็นส่วนโฮลเคลื่อนที่ไปด้านพี ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับเป็นจำนวนมากไหลผ่านไดโอด และปรากฏการณ์เช่นนี้ถูกเรียกว่า **การพังทลายแบบซีเนอร์ หรือ ปรากฏการณ์ซีเนอร์ (Zener effect)**

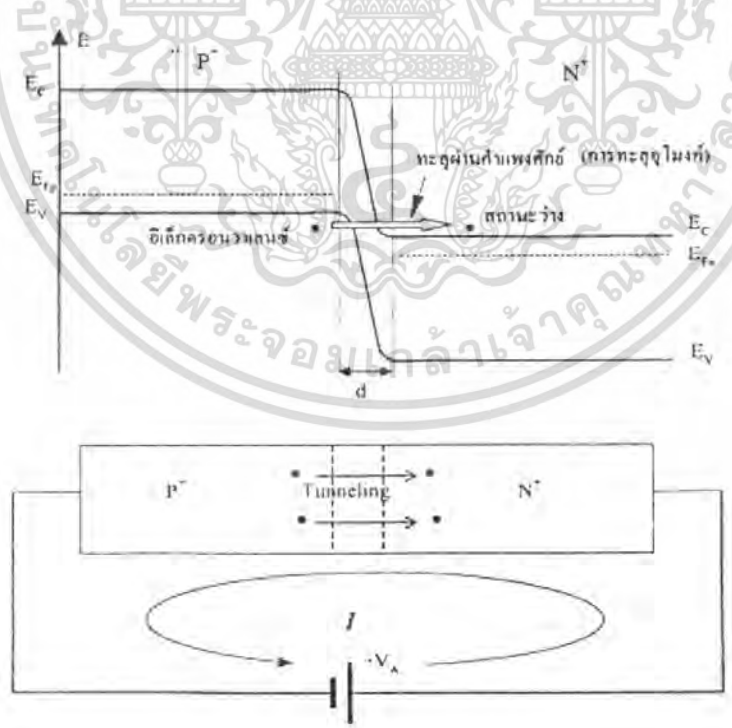
อย่างไรก็ดี การอธิบายกลไกการเกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ นิยมใช้ปรากฏการณ์ **การทะลุผ่านกำแพงศักย์** หรือการทะลุผ่านอุโมงค์ (Tunneling effect) ในทฤษฎีควอนตัม ซึ่งกล่าวถึงการทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.30 กล่าวคือ อนุภาคมีโอกาสที่จะทะลุผ่านกำแพงศักย์ได้ โดยโอกาสของการเกิดการทะลุผ่านหรือทะลุอุโมงค์ หรือ tunneling จะมีค่าเพิ่มมากยิ่งขึ้น ถ้าหากขนาดความกว้างของกำแพงศักย์ (d) มีค่าลดน้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเมื่อกำแพงศักย์มีขนาดแคบๆ การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะจะมีโอกาสเกิดได้ดียิ่งขึ้นการทะลุผ่านกำแพงศักย์ ที่รอยต่อพี-เอ็น ของอิเล็กตรอน ในกรณีไบอัสย้อนกลับ อาจพิจารณาได้จากรูปที่ 2.31 จะเห็นได้ว่า ขณะที่รอยต่อพี-เอ็นที่ถูกเจือด้วยอะตอมสารเจือที่เข้มข้นขนาดของความกว้างบริเวณปลอดพาหะจึงมีค่าน้อยหรือแคบ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแม้เพียงเล็กน้อยหรือแคบเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแม้เพียงเล็กน้อย สนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะก็จะมีค่าสูง และกำแพงศักย์ก็จะมีค่าสูงด้วย เนื่องจากกำแพงศักย์มีขนาดแคบๆ จนกระทั่งทำให้เกิดการทะลุผ่านกำแพงศักย์ได้ โดยอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่อยู่ด้านพีซึ่งใกล้ชิดกับบริเวณปลอดพาหะ สามารถที่จะเคลื่อนที่ทะลุอุโมงค์ (Tunneling) ผ่านกำแพงศักย์ในย่านปลอดพาหะไปยังแถบความนำทางด้านเอ็นซึ่งมีสถานะพลังงานที่ว่างจำนวนมากได้ ทำให้เกิด **กระแสทะลุอุโมงค์** หรือ ที่เรียกว่า Tunneling current และทำให้กระแสในวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ปรากฏการณ์ทะลุผ่านหรือ Tunneling นี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อขนาดของกำแพงศักย์ (d) มีขนาดแคบๆ (< 100 Å) ดังนั้นรอยต่อนี้จึงควรต้องมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูง เช่น ไดโอดประเภทอัลลอย (Alloy diode) เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ขนาดของกำแพงศักย์สูงขึ้น แต่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะถูกพิจารณาว่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก จนกระทั่งทำให้เกิดการทะลุผ่าน ดังนั้นแม้ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่ำๆ รอยต่อประเภทนี้ก็สามารถทำให้เกิดการพังทลายได้ เช่น สำหรับไดโอดที่ทำจากซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แบบจำลองเกิดการปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์หรืออุโมงค์ของอิเล็กตรอน

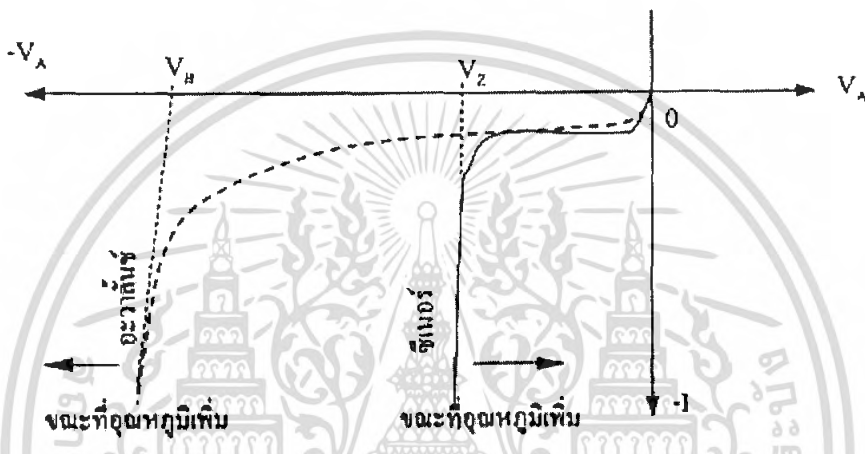
พิจารณาว่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก จนกระทั่งทำให้เกิดการทะลุผ่าน ดังนั้นแม้ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่ำๆ รอยต่อประเภทนี้ก็สามารถทำให้เกิดการพังทลายได้ เช่น สำหรับไดโอดที่ทำจากซิลิคอนที่ 300 K ที่แรงดันพังทลาย (V_B) ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 5 โวลต์ จะถูกพิจารณาว่าเป็นการเกิดของปรากฏการณ์ซีเนอร์ (Zener effect)



รูปที่ 2.31 การเกิดปรากฏการณ์ การทะลุผ่านกำแพงศักย์ (tunneling) หรือทะลุอุโมงค์ ในซีเนอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิ่งแรงดันไบอัสย้อนกลับยิ่งสูง จำนวนอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในแถบวาเลนซ์ด้านพี ที่จะสามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์มายังแถบความนำด้านเอ็นมากยิ่งขึ้น ทำให้กระแสมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากค่าแรงดันพังทลายจะช่วยบอกชนิดของการพังทลายแล้ว ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าของแรงดันพังทลายแบบซีเนอร์จะเปลี่ยนแปลงโดยลดลง ซึ่งต่างจากแรงดันพังทลายแบบอะวาเลนซ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ และนอกจากนี้แล้วการเพิ่มขึ้นของกระแสพังทลายแบบซีเนอร์ จะมีลักษณะเป็นไปอย่างทันทีทันใด หรือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าในกรณีการพังทลายแบบอะวาเลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.32

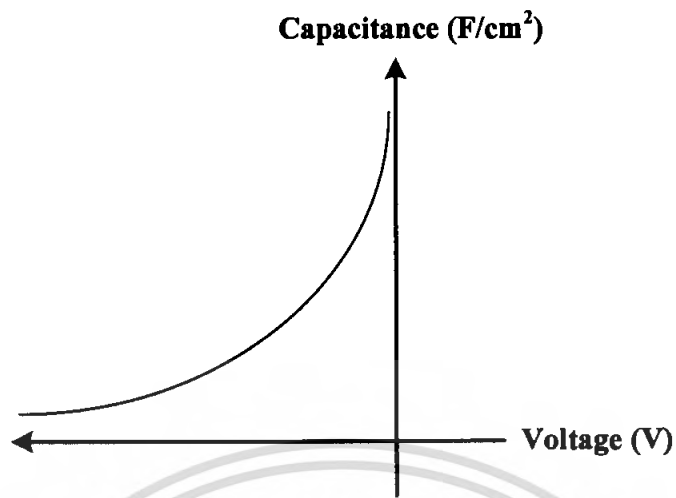


รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการพังทลายแบบอะวาเลนซ์และแบบซีเนอร์

2.8.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของร็อกกี้ไดโอด

ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.33 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ มีค่าดังสมการที่ 2.40

$$C = \frac{\epsilon_S}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.33 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีโคโอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การเตรียมอุปกรณ์ทดลอง การสร้าง และ การทดลอง

ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาแนร์ สามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งมีกระบวนการสร้างด้วยกระจกต้นแบบเพียง 1-2 แผ่น ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา กระบวนการสร้างและการทดลองต่างๆ เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติของโครงสร้าง MSM และการวัดผลของอุณหภูมิของตัวตรวจวัดแสงเพื่อเตรียมเตาความร้อน

3.1 การเตรียมอุปกรณ์ทดลอง

3.1.1 การเตรียมเตาความร้อน

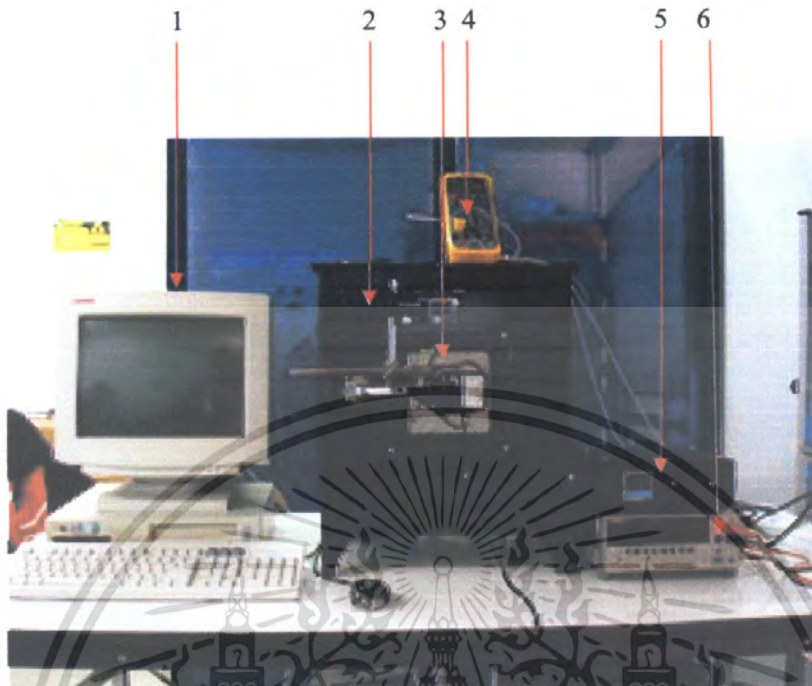
การวัดผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจวัดแสงจำเป็นต้องใช้เตาให้ความร้อนแบบทึบแสง จึงได้ทำเตาให้ความร้อนโดยขดลวดความร้อนแบบเตาทึบแสงขึ้นมา และออกแบบให้สามารถยิงแสงเลเซอร์ผ่านเตาทึบแสงไปยังตัวตรวจวัดแสงได้ ชุดเตาให้ความร้อนประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.1 เตาทึบแสง ขดลวดความร้อน ที่ยึดตัวตรวจวัดแสง เช่น เซอร์วิคอุณหภูมิ แชนฮิลล์ เลเซอร์ ชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.1.2 การเตรียมชุดทดลอง

การวัดผลของอุณหภูมิ มีชุดทดลองประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.1 ชุดควบคุมอุณหภูมิมิรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอร์
2. เตา
3. ชุดเลเซอร์ Helium Neon Gas Laser Diode
4. มิเตอร์วัดอุณหภูมิที่ตัวอุปกรณ์
5. มิเตอร์วัดอุณหภูมิที่ตัวอุปกรณ์ของตัวควบคุม
6. เครื่องซอส-มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

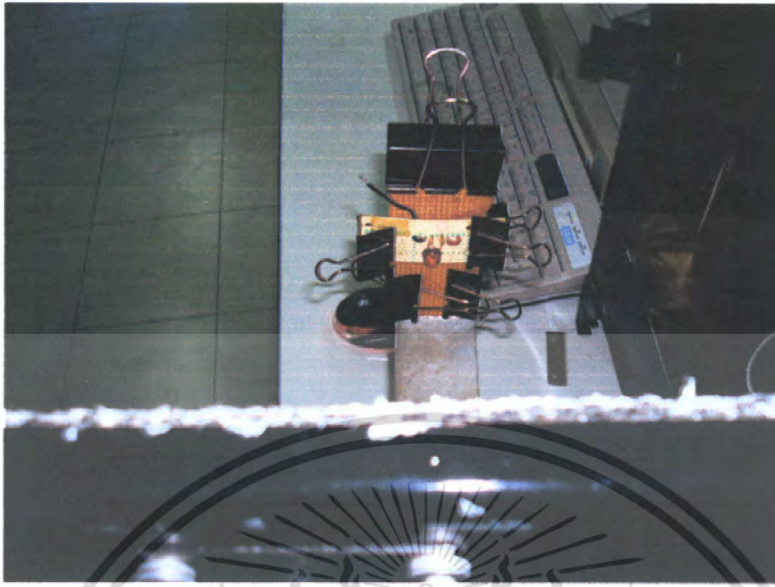


รูปที่ 3.1 เตา เครื่องซอส-มิเตอร์ คอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.2 ภายในเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

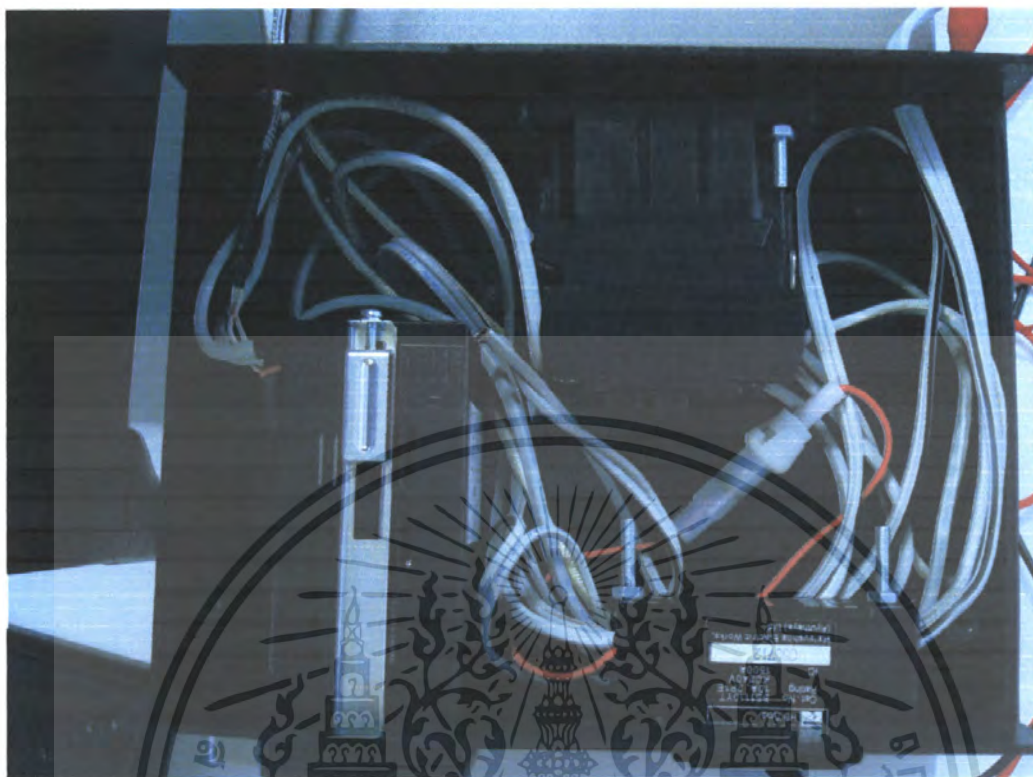


รูปที่ 3.3 ขาจับตัวตรวจวัดแสง

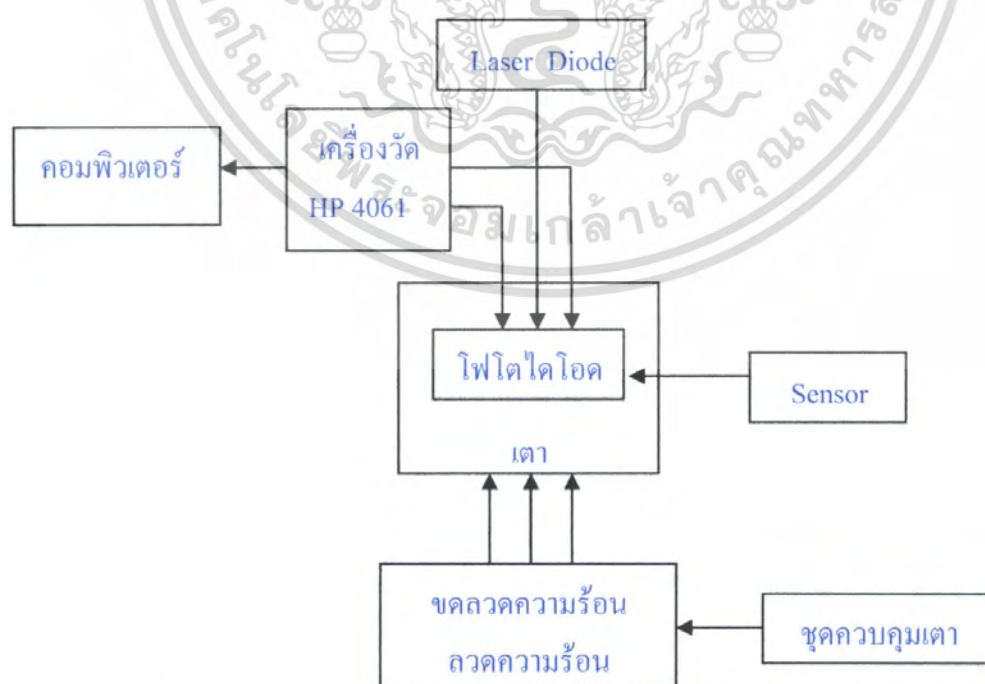


รูปที่ 3.4 ขาจับตัวตรวจวัดแสง และ ชุดเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

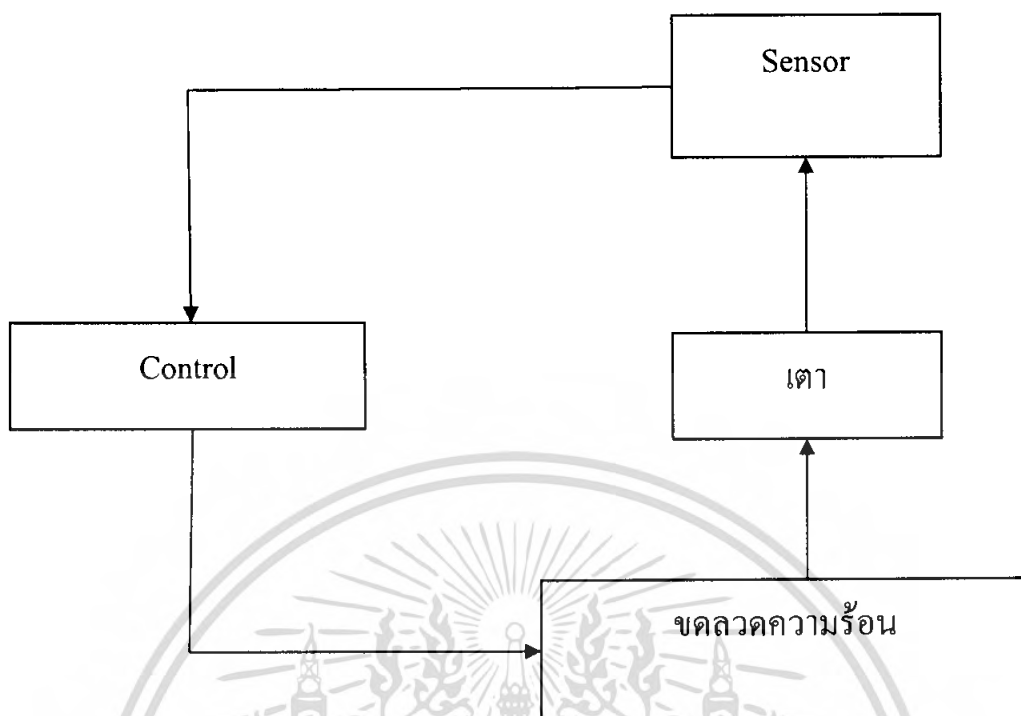


รูปที่ 3.5 ชุดวงจรควบคุมอุณหภูมิในเตา



รูปที่ 3.6 บล็อกโคะแกรมของชุดควบคุมอุณหภูมิของโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



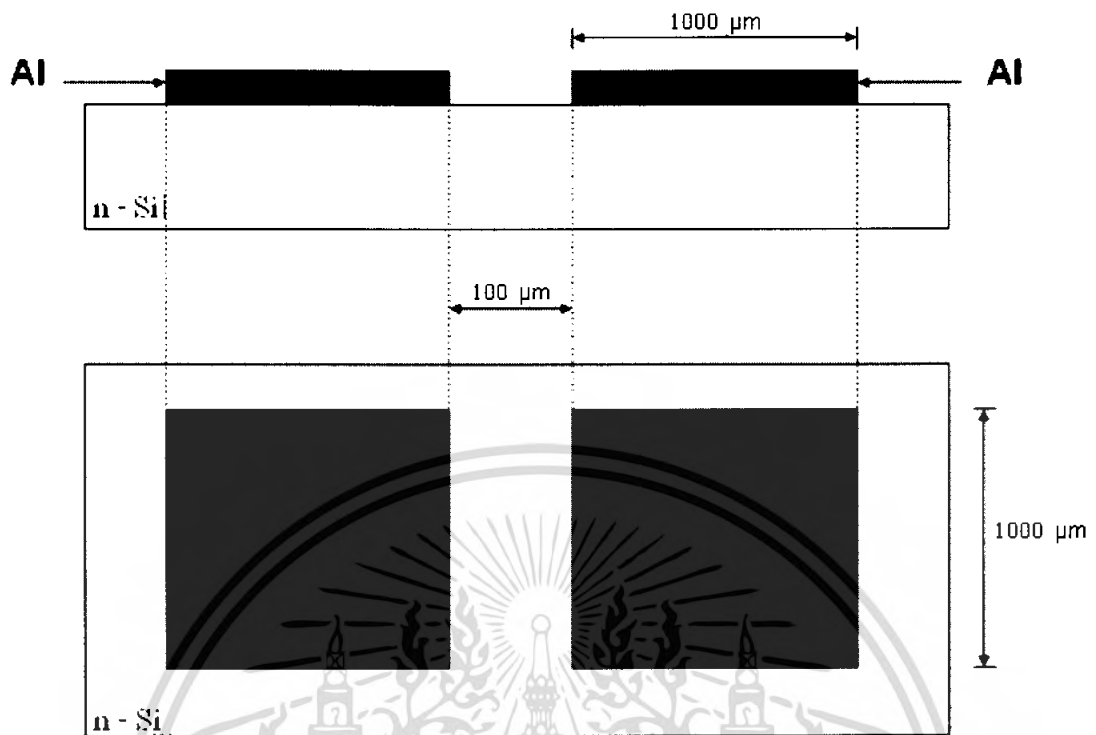
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของเตา

3.2 การเตรียมชิ้นงานตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AI/n-Si/Al

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาเนียร์ สามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งมีกระบวนการสร้างด้วยกระจกต้นแบบเพียง 1 แผ่น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษา กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ต่อไป

3.2.1 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิด AI/n-Si/Al

โครงสร้าง MSM ชนิด AI/n-Si/Al ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม-ซิลิคอน จำนวนสองรอยสัมผัส ในโครงงานนี้จะใช้ขั้วโลหะที่มีขนาดเท่ากันทั้งสองด้านเป็นอลูมิเนียมมีขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ส่วนสารกึ่งตัวนำจะเลือกใช้ซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งวัสดุทั้งสองสามารถหาได้ง่าย และยังเป็นวัสดุที่สำคัญในการสร้างวงจรรวม สำหรับระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) ที่ใช้เป็นส่วนของพื้นที่รับแสง มีค่า $100 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

3.2.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมเป็นหลัก โดยหลังจากการเตรียมกระจกต้นแบบ (mask) แล้ว จะนำแผ่นซิลิคอนมาทำการสร้างซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

- Ultrasonic ด้วยน้ำจืดไอออนแล้ว (De - Ionization water : DI) 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่น
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดไนตริก (nitric acid) 2 แก้วๆ ละ 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะ
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- ต้มใน DI 2 แก้วๆ ละ 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลเอทธีริน (trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ultrasonic ในอะซิโตน (acetone) 2 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (hydrofluoric) ที่มีความเข้มข้น 5 % (HF 5 %) 10–30 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการเคลือบโลหะ

เคลือบอลูมิเนียมด้านหน้าของแผ่น ด้วยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr

- วางแผ่นเวเฟอร์ในครอบแก้ว (glass chamber)
- ดูดอากาศออกจากครอบแก้ว
- เมื่อความดันลดต่ำลงจนถึง 2×10^{-6} Torr เริ่มให้กระแสเพื่อทำให้อลูมิเนียมละลาย
- เปิดชัตเตอร์ (shutter) เพื่อเริ่มทำการเคลือบอลูมิเนียม

3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography)

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้ทำการเคลือบอลูมิเนียมแล้ว 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 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่อง Mask aligner
- การขึ้นลวดลาย (develop)
- จุ่มใน AZ developer 2 แก้วๆ ละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้อิมัลชันน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

4. การกัดชั้นอลูมิเนียม

ทำการกัดชั้นของอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยสารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching) ที่มีส่วนผสมของ H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : H_2O ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10

- จุ่มใน Al etching ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. การลอกฟิล์มน้ำยาไวแสง

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

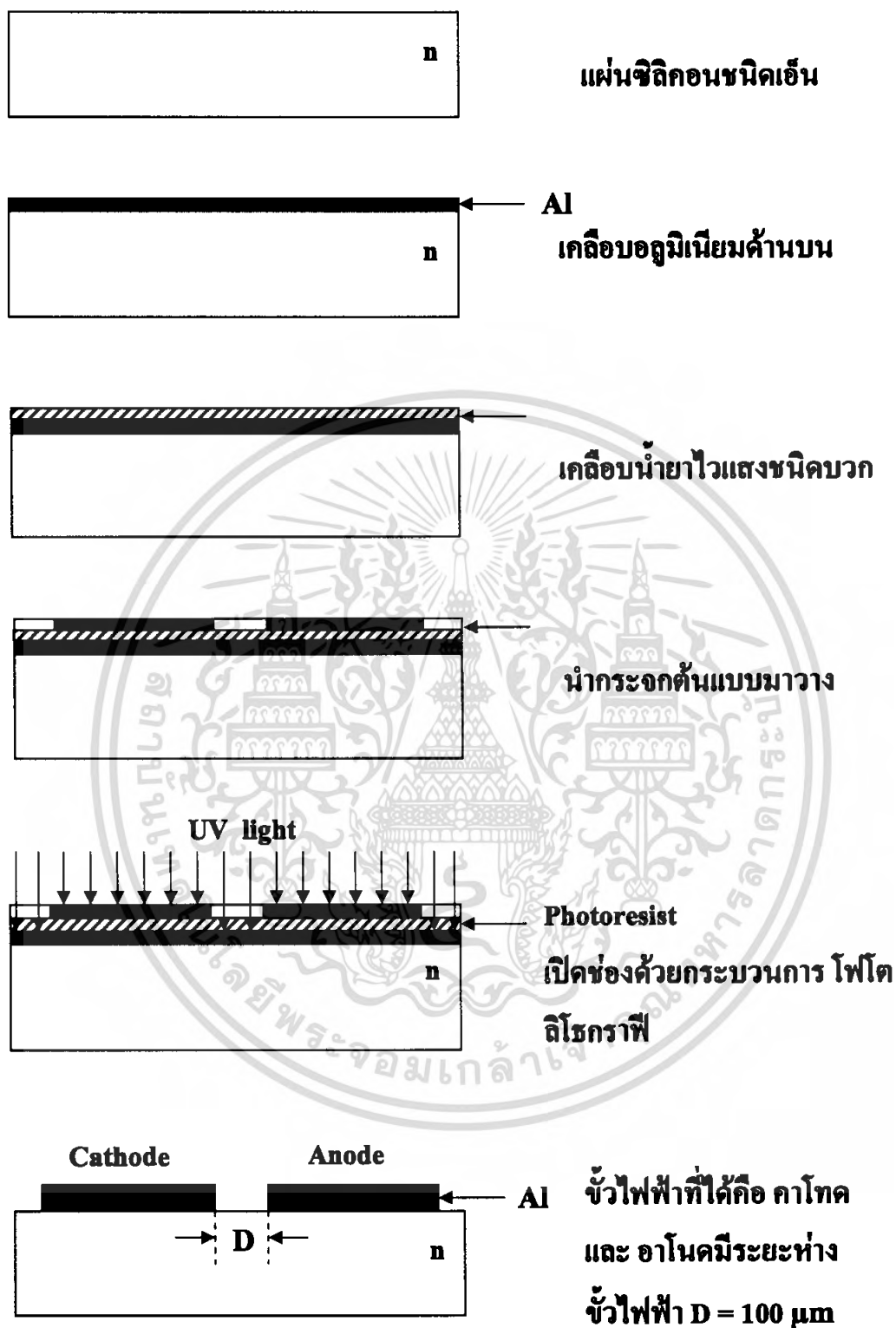
6. กระบวนการซินเทอริง (sintering)

กระบวนการซินเทอริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น

- นำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร/นาที โดยมีอุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดีและมีกระแสรั่วไหลต่ำ

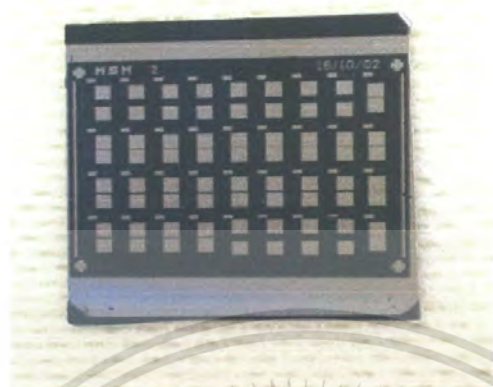
ในรูปที่ 3.9 แสดงภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง

Al/n-Si/Al

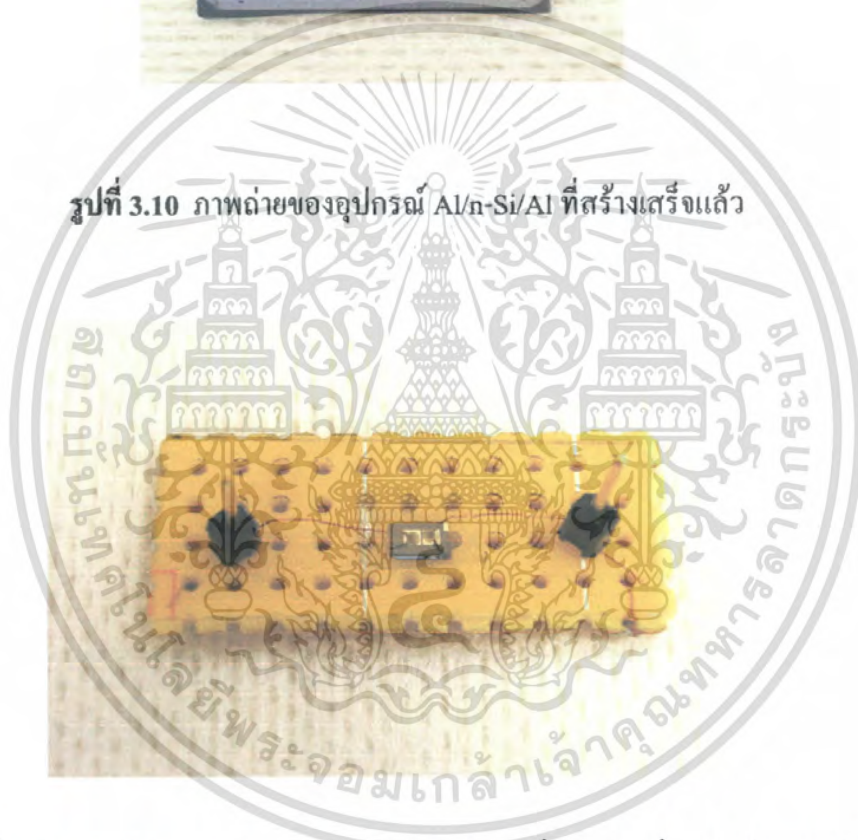


รูปที่ 3.9 ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่สร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al อุปกรณ์ที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $1 \times 1 \text{ mm}^2$

3.3 การทดลอง

การทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์และตัวตรวจวัดแสง ซึ่งจะมีการทดลองดังต่อไปนี้

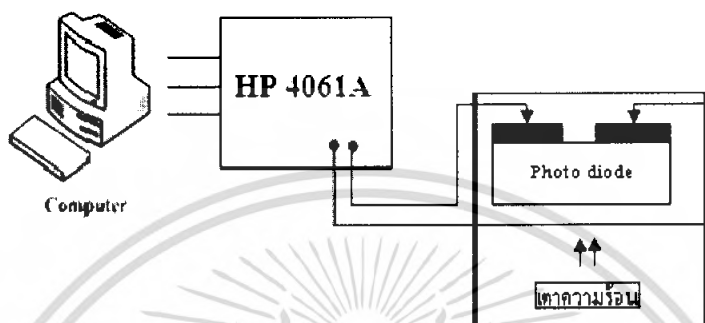
3.3.1 การทดลองวัดอุณหภูมิภายในเตา

การวัดอุณหภูมิภายในเตาเป็นการเก็บค่า อุณหภูมิไปหาค่าความมีเสถียรภาพของเตา เพื่อที่จะนำค่าที่ทดสอบได้ ไปใช้งานเตาในการใช้กับตัวตรวจวัดแสงต่อไป ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al

3.3.2.1 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง

นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ซึ่งมีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง $100\ \mu\text{m}$ มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12

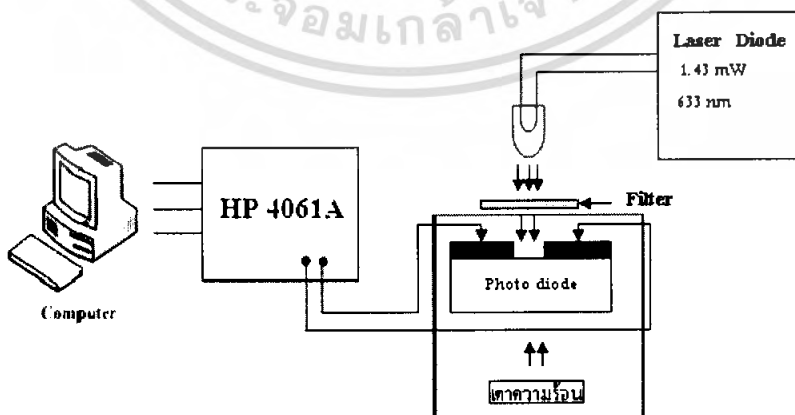


รูปที่ 3.12 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองวัดลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

3.3.2.2 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ขณะได้รับแสง

ตกกระทบ

นำอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ซึ่งมีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง $100\ \mu\text{m}$ มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง (dc) ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจาก Helium Neon Gas Laser Diode ของบริษัท JDS Uniphase ที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

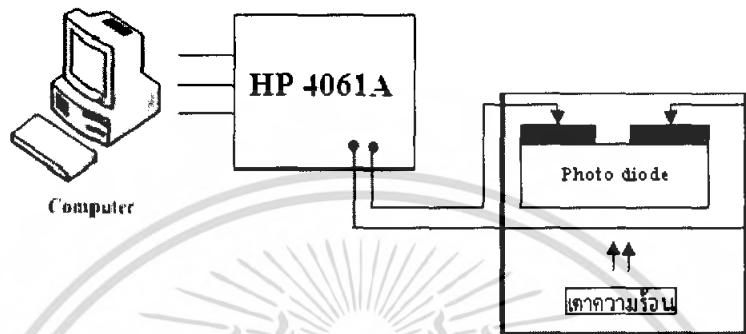


รูปที่ 3.13 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

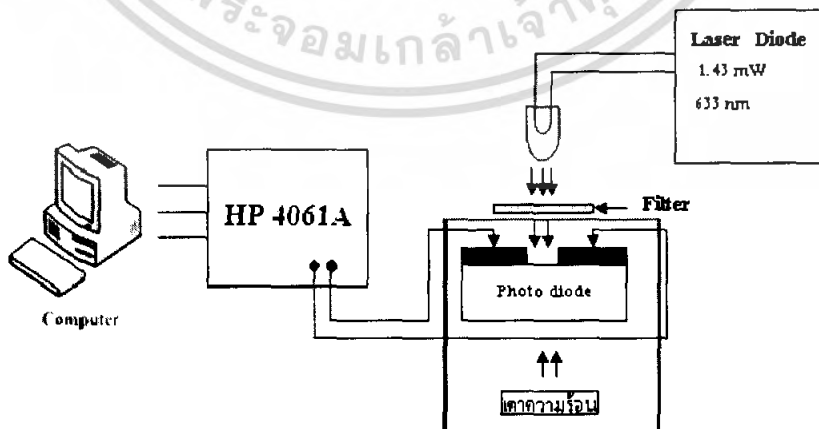
นำอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง มาทำการทดลองหาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแสและแรงดัน ขณะไม่ได้รับแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

3.3.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

นำอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง มาทำการทดลองหาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง (dc) ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจาก Helium Neon Gas Laser Diode ของบริษัท JDS Uniphase ดังแสดงในรูปที่ 3.15

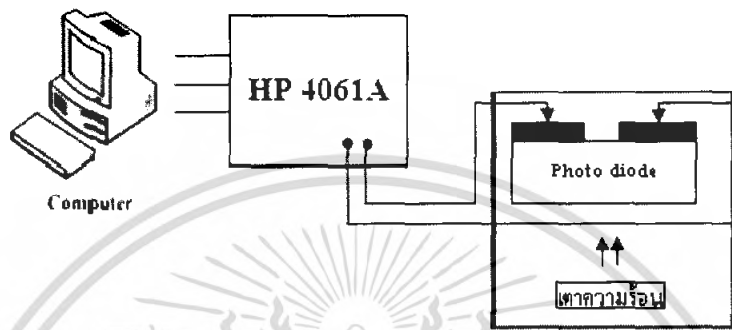


รูปที่ 3.15 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดันฟังก์ทลาย ในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

นำตัวตรวจวัดแสงมาทำการทดลองหาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดันฟังก์ทลาย ในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันฟังก์ทลายลักษณะสมบัติกระแส - แรงดัน

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานการศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM และการวัดผลทางอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ขั้นตอนของกระบวนการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM แบบสมมาตร สลิตเดี่ยว ขั้วโลหะ ขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) ที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่รับแสง มีค่า $100 \mu\text{m}$ ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซิลิคอนและโลหะอลูมิเนียม ด้วยกระบวนการสร้างดังนี้ คือ ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน ด้วยวิธีเบื้องต้นเมื่อทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว นำไปสร้างโดยกระบวนการระเหยสาร ด้วยความร้อนในสุญญากาศหลังจากนั้นก็จะมาผ่านกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าและเปิดช่องรับแสงของตัวอุปกรณ์แล้วนำมาสกัดชั้นอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออก แล้วทำกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ก็จะได้เป็นตัวอุปกรณ์ออกมาและ ส่วนที่ 2 คือการนำตัวอุปกรณ์ที่สร้างมาทำการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ หาค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อสัมผัส วัดลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน ในแบบแสง กระแสตรง และผลอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อตรวจวัดแสงและแรงดันพียงหลาย

ผลที่ได้จากการวัดตัวตรวจวัดแสงวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า กระแสแสง-แรงดัน ซึ่งขณะที่ไม่มีแสงมาตกกระทบตัวตรวจวัดแสง จะมีกระแสไหลผ่านตัวอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง เมื่อแรงดันไบอัสมีค่าลดลง กระแสรั่วไหลก็จะมีค่าลดลงตามแรงดันไบอัส แต่เมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสรั่วไหลก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของแรงดันไบอัสที่ป้อนให้ด้วย โดยมีกระแสรั่วไหลที่ 10 V ประมาณ 811 nA เมื่อแสงมาตกกระทบอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงก็จะมีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงมากขึ้นตามความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มแสง 0.24 mW , 0.6 mW , 0.96 mW และ 1.2 mW ที่แรงดันไบอัส 10 V จะมีค่ากระแสของแสงได้ค่าประมาณ $0.968 \mu\text{A}$, $2.42 \mu\text{A}$, $5.04 \mu\text{A}$ และ $5.89 \mu\text{A}$ ตามลำดับ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 27°C , 50°C , 75°C และ 100°C ที่ไบอัส 10 V ค่ากระแสรั่วไหลที่ได้ประมาณ $0.811 \mu\text{A}$, $4.62 \mu\text{A}$, $19.6 \mu\text{A}$ และ $99.4 \mu\text{A}$ ตามลำดับ กระแสรั่วไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จากการทดลองจะมีค่ากระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นประมาณ 1.8 - 1.9 เท่าทุกๆ 10 องศาเซลเซียส และกระแสแสง เมื่อไบอัสที่ 10 V ความเข้มแสง 1.2 mW ค่ากระแสแสงที่ได้ประมาณ $5.889 \mu\text{A}$, $7.05 \mu\text{A}$, $9.3 \mu\text{A}$ และ $7.8 \mu\text{A}$ ตามลำดับ ค่ากระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 100°C จะทำให้ค่ากระแสแสงที่ได้ลดลงที่แรงดันสูงขึ้นซึ่งเกิดจากกระแสรั่วซึมที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับกระแสรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าแรงดันเบรคความถี่ที่ได้ประมาณ 40 V, 50 V, 80 V และ 90 V ตามลำดับ ค่าแรงดันเบรคความถี่จะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิเป็นการพังทลายแบบอะวาแลนซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] สมเกียรติ สุภเดช., **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- [2] สมเกียรติ สุภเดช., **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545.
- [3] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ., **“ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมา”** วิทยานิพนธ์คุณวุฒิบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [4] สรายุทธ วิศวแสงสุข, สมชาติ พนาเกษม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, โยอิชิ ยาซุมุระ และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง., **“การศึกษาค่าความสูงของกำแพงสัณฐานของรอยต่อสัมผัสแบบขดคดที่ผ่านการจูนเตอร์ริง”**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 23 พฤศจิกายน 2543
- [5] ธเนศ โชะเหม., **“การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด AI/n-Si/AI แบบพลาสมา”**, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้