

การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

THE STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF Al/Si/Al PHOTODIODE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

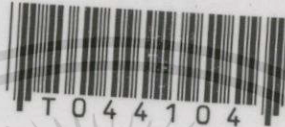
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-041-1

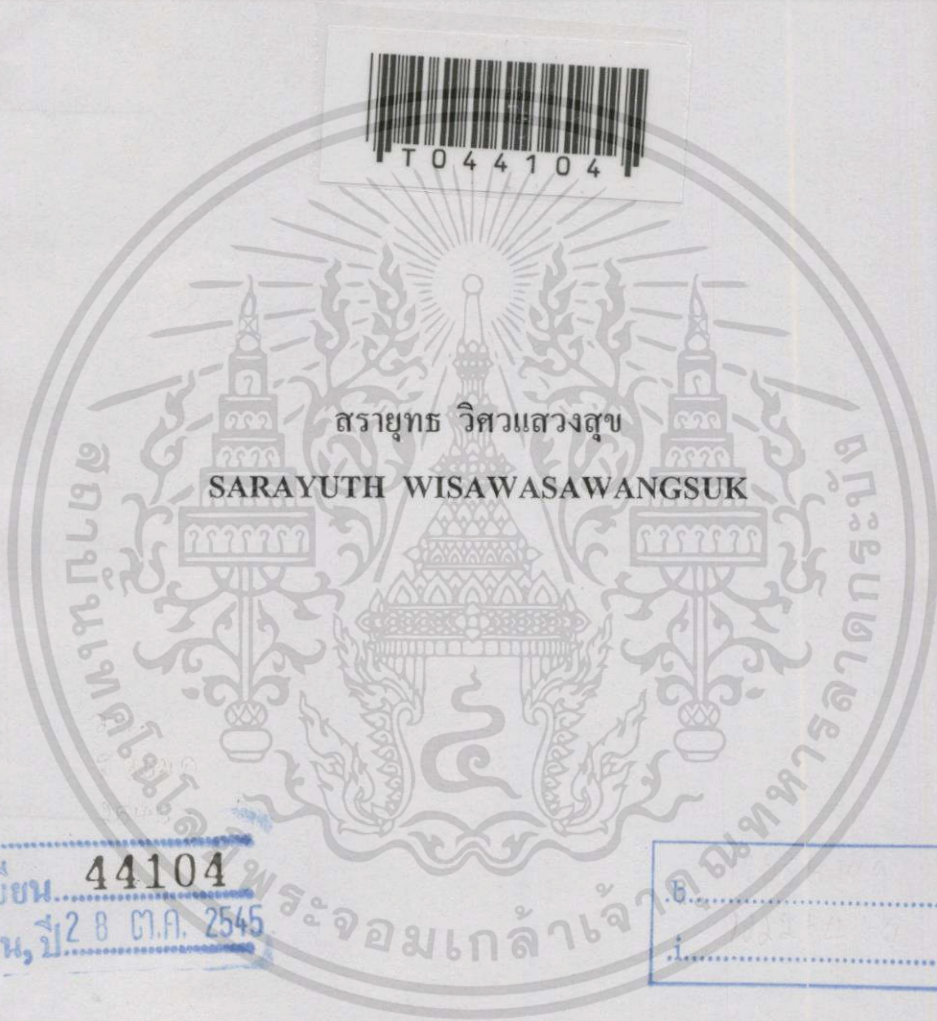
การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

THE STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF Al/Si/Al PHOTODIODE

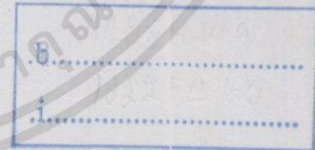


สรายุทธ วิศวรสว่างสุข

SARAYUTH WISAWASAWANGSUK



เลขหม.....
เลขทะเบียน 44104
วัน, เดือน, ปี 28 ต.ค. 2545



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-041-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF Al/Si/Al PHOTODIODE



SARAYUTH WISAWASAWANGSUK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**


2002

ISBN 974-324-041-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติทางแสง ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al
THE STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF Al/Si/Al PHOTODIODE
ชื่อนักศึกษา นายสรายุทธ วิศวแสงสุข
รหัสประจำตัว 41061129
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร. สมเกียรติ	ศุภเดช	
ผศ.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
รศ.ดร. สุริกณ	สมควรพาณิชย์	
รศ.ดร. วันชัย	วีรจจา	
รศ.ดร. วิสุทธิ์	จูติรุ่งเรือง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 29 กรกฎาคม 2545 เวลา 14.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



วันที่.....๒๐.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ. ๒๕๔๕.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al
นักศึกษา	นายสรายุทธ วิสวแสงสุข
รหัสประจำตัว	41061129
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงกระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ซึ่งมีโครงสร้างแบบพลาร์นา อะลูมิเนียมจะถูกสร้างบนซิลิคอนชนิดเอ็น ด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ จากนั้นจึงสร้างลวดลายและซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C ซึ่งจะทำให้ได้โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al มีรอยสัมผัสแบบขอดคัททีและรอยสัมผัสแบบอัลลอย ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีรอยสัมผัสแบบอัลลอยเท่านั้น ซึ่งโฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบอัลลอยจะให้ปริมาณกระแสรั่วที่คงที่ โดยมีกระแสรั่วประมาณ 10 nA และมีแรงดันพังทะลายที่คงที่ โดยแรงดันพังทะลายเท่ากับ 2 V แต่โฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบขอดคัทที จะมีปริมาณกระแสรั่วและแรงดันพังทะลายที่ไม่แน่นอน เนื่องมาจากการสไปซ์ของอะลูมิเนียม เมื่อนำโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีรอยสัมผัสแบบอัลลอยไปศึกษาคุณสมบัติทางแสงพบว่าปริมาณกระแสโฟโตของโฟโตไดโอดจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ปลอดประจุพาหะบริเวณรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน พื้นที่ปลอดประจุพาหะนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสที่ให้กับโฟโตไดโอด จึงสามารถควบคุมกระแสโฟโตจากแรงดันไบอัสได้ เมื่อนำไปทดสอบต่อสเปกตรัมของแสงด้วยเครื่อง Monochromator พบว่าโฟโตไดโอดจะตอบสนองในช่วงแสงมองเห็นและอินฟราเรดได้ นอกจากนี้ยังได้นำไปทดสอบคุณสมบัติทางเวลาซึ่งพบว่าโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นนี้ จะมีช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงเท่ากับ 90 μs และ 140 μs ตามลำดับ ความถี่แบนด์วิทที่โฟโตไดโอดสามารถตอบสนองได้เท่ากับ 4 kHz

Thesis Title	The Study of Optical Properties of Al/Si/Al Photodiode.
Student	Mr. Sarayuth Wisawasawangasuk
Student ID.	41061129
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents the fabrication and properties of photodiode with Al/Si/Al planar structure. Aluminium metallization deposited on n-type silicon substrate by vacuum evaporation, performs Schottky contact and alloy contact. Patterning is developed and sintering at 300°C and 500°C, respectively. But Schottky contact on photodiode characterizes the breakdown voltage and leakage current uncertainly causing by aluminium spiking. On the contrary, alloy contact characterizes the certain breakdown voltage and low leakage current about 2 V and 10 nA, respectively. According to the certainty of alloy contact, optical properties is investigated. The photo current is depended controllably on the depletion region of Al/Si junction related to the applied voltage bias. By monochromator, the spectrum verification is shown that photodiode is sensitive and responsive in range of visible light and infrared. In term of time dependence, the rise time and fall time of photodiode are 90 μ s and 140 μ s, respectively. Finally, photodiode is capable to respond at bandwidth of 4 kHz.

กิตติกรรมประกาศ

ในส่วนองงานวิจัยและส่วนองวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ที่ให้แนวความคิด คำปรึกษา การแก้ไขปัญหาและสนับสนุนในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ Prof.Dr. Kazunori Sato จาก Tokai และ Assoc.Prof. Yoichi Yasamura สำหรับคำแนะนำทางวิชาการที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ ผศ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ในการให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ สำหรับความเป็นห่วงและดูแล คุณภควัด คุณกอบศักดิ์ คุณภานุพันธ์ คุณลัดดาวัลย์ คุณโยธิน คุณนิรุช เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ห้องวิจัยสารตัวนำไฟฟ้า ยิงยวดและศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสารและทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

สรายุทธ วิสวเสวงสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XV
ศัพท์เทคนิค.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาทางวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง.....	3
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง.....	3
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง.....	3
2.2 การดูดกลืนแสงในผลึกซิลิคอน.....	4
2.3 ชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงตามหลักการทำงาน.....	5
2.3.1 สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายนอก.....	5
2.3.2 สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน.....	5
2.3.2.1 ปรากฎการณ์โฟโตโวลตาอิก.....	5
2.3.2.2 ปรากฎการณ์โฟโตคอนดักทิฟ.....	6
2.4 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	6
2.4.1 รอยสัมผัสแบบขอตัดก็.....	8
2.4.2 สถานะพื้นผิว (Surface State).....	10
2.4.3 รอยสัมผัสแบบอัลลอย.....	11
2.4.4 รอยสัมผัสแบบโอห์มิก.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM.....	12
2.5.1 สภาวะสมดุลความร้อนของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM.....	12
2.5.2 การให้ไบอัสและการกระจายพลังงานศักย์.....	13
2.5.3 การไหลของกระแสโฮลและอิเล็กตรอน.....	14
2.5.3.1 การไหลของกระแสอิเล็กตรอน.....	14
2.5.3.2 การไหลของกระแสโฮล.....	16
2.5.4 คุณลักษณะของความหนาแน่นกระแสและแรงดัน.....	17
2.5.5 ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM.....	18
2.5.6 กระบวนการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM.....	19
2.5.6.1 กระบวนการดูดกลืนแสงของบริเวณปลอดประจุพาหะ.....	19
2.5.6.2 กระบวนการดูดกลืนแสงของบริเวณที่เป็นกลาง.....	20
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	21
3.1 การออกแบบและกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิกอน ชนิดเอ็น.....	21
3.1.1 การออกแบบรอยสัมผัส.....	21
3.1.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัส.....	22
3.2 การออกแบบและกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al.....	27
3.2.1 การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	27
3.2.2 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al.....	30
3.3 การศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัส.....	31
3.3.1 การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน.....	31
3.3.2 การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส.....	32
3.4 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	33
3.4.1 การศึกษาคุณสมบัติกระแส-แรงดัน และ ค่าความจุไฟฟ้า.....	33
3.4.2 การศึกษากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al เมื่อได้รับแสง.....	34

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.3 การศึกษาผลของพื้นที่รับแสงต่อกระแสไฟโตของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	34
3.4.4 การศึกษาการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	34
3.4.5 การศึกษาการตอบสนองทางเวลาของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลการทดลองการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิคอน ชนิดอื่น.....	37
4.1.1 ผลการทดลองเวลาสำหรับการขึ้นเตอรืงรอยสัมผัส.....	37
4.1.2 ผลการทดลองคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ขึ้นเตอรืง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	40
4.1.3 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสที่ขึ้นเตอรืงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากการวัดกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส.....	41
4.1.4 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสที่ขึ้นเตอรืงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส.....	43
4.1.5 ค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน และ ค่าความจุ ไฟฟ้าที่รอยสัมผัส.....	44
4.2 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่ผ่านการขึ้นเตอรืงที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C.....	46
4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	59
4.3.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	59
4.3.2 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	62
4.4 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	64
4.4.1 ผลการทดลองความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.1.1 ผลของกระแสโฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีขนาดต่างกัน แต่มีขนาดของขั้วโลหะเท่ากัน.....	70
4.4.1.2 ผลของกระแสโฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีพื้นที่เท่ากันแต่มีขนาดของขั้วโลหะไม่เท่ากัน.....	71
4.4.2 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	73
4.4.3 ผลการตอบสนองทางเวลาของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	80
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	82
เอกสารอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	85
ภาคผนวก ก.....	85
ภาคผนวก ข.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดของพื้นที่รับแสงและขนาดพื้นที่ขั้วสัมผัส.....	28
4.1 ปริมาณของกระแสของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	41
4.2 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดกระแส-แรงดัน.....	42
4.3 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส.....	44
4.4 ขนาดของพื้นที่รับแสงและขนาดพื้นที่ขั้วสัมผัส.....	48
4.5 กระแสรั่วและแรงดันพังทะลายขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับของ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	59
4.6 ค่าความจุไฟฟ้ารวมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่ได้จากการคำนวณและ การวัด.....	64
4.7 พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ถึง A5 และมีความ กว้างของขั้วโลหะเท่ากัน (ความกว้างของขั้วโลหะเท่ากับ 2000 μm).....	70
4.8 ขนาดของพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีพื้นที่เท่ากันแต่มี ความกว้างของขั้วโลหะไม่เท่ากัน.....	71
4.9 ค่าของช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงที่ได้จากการอ่านค่าสัญญาณเอาต์พุทของ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	1
2.1 ลักษณะกราฟ E-k ของสารกึ่งตัวนำ (ก) แถบช่องตรง (ข) แถบช่องไม่ตรง.....	4
2.2 แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น กรณี (ก) เป็นกลางและแยกกันอยู่ (ข) การเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (ค) แยกออกจากกันด้วยช่องว่างแคบ ๆ (ง) รอยสัมผัสที่สมบูรณ์.....	7
2.3 กำแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันและฟังก์ชันงานของ ชนิดเอ็น (ก) $\phi_s < \phi_m$ (ชอตต์กี) (ข) $\phi_s > \phi_m$ (โอห์มิก) ชนิดพี (ค) $\phi_s > \phi_m$ (โอห์มิก) (ง) $\phi_s < \phi_m$ (ชอตต์กี).....	8
2.4 ลักษณะแถบพลังงานเมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส.....	9
2.5 ลักษณะของสถานะพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.6 การเกิดรอยสัมผัสแบบอัลลอย.....	11
2.7 ลักษณะของกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบโอห์มิก.....	12
2.8 โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM.....	12
2.9 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุลความร้อน.....	13
2.10 การกระจายประจุ สนามไฟฟ้า และการกระจายพลังงานศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อให้แรงดันไบอัส (ด้วยการไบอัสค่าบวกที่รอยสัมผัสที่ 2).....	14
2.11 ลักษณะของแถบพลังงานชอตต์กีไดโอด ขณะที่พลังงานแสงถูกดูดกลืนภายในพื้นที่ ปกคลุมประจุ.....	19
2.12 ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์ชนิดเอได้รับแรงดันไบอัสพร้อมกับมีแสง ตกกระทบ.....	20
3.1 โครงสร้างของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น.....	21
3.2 ลำดับขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น.....	26
3.3 โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	27
3.4 การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	27
3.5 ลักษณะลวดลายของอะลูมิเนียม A1, A2, A3 A4 และ A5.....	29
3.6 ลักษณะลวดลายของอะลูมิเนียม B1, B2 และ B3.....	29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	30
3.8 การหาค่า J_s จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส.....	31
3.9 การหาค่า V_{bi} จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันของรอยสัมผัส.....	32
3.10 ความสัมพันธ์ $\phi_{bn} = V_{bi} + V_n$	32
3.11 การวัดกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	33
3.12 การวัดกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al เมื่อได้รับแสง.....	34
3.13 การวัดการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	34
3.14 การวัดการตอบสนองทางเวลาของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	35
3.15 การวัดช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงของสัญญาณเอาต์พุต.....	36
4.1 การวัดกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น.....	37
4.2 ความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ.....	38
4.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ.....	38
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ.....	39
4.5 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	40
4.6 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ.....	40
4.7 คุณลักษณะระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของจากชิ้นงานที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	42
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	43
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันซึ่งได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส.....	43
4.10 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ซึ่งวัดจากกระแส-แรงดันและวัดจากค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ผ่านการซินเตอร์ริง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แถบพลังงานแบบแบนราบ.....	46
4.12 การวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	47
4.13 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al แบบสมมาตร.....	47
4.14 ลักษณะพารามิเตอร์ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	48
4.15 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	49
4.16 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A2 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	49
4.17 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A3 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	50
4.18 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A4 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	50
4.19 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A5 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	51
4.20 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	51
4.21 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B2 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	52
4.22 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B3 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	52
4.23 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	53
4.24 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A2 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	53
4.25 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A3 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A4 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	54
4.27 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A5 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	55
4.28 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	55
4.29 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B2 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	56
4.30 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B3 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง).....	56
4.31 ลักษณะสถานะพื้นผิวระหว่างของอะลูมิเนียมและซิลิคอนที่ซินเตอร์ริงอุณหภูมิ 300°C และ 500°C.....	58
4.32 โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	60
4.33 แถบพลังงานของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	60
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของพื้นที่ปัดออกประจุพาหะกับแรงดันไบอัสกลับ.....	61
4.35 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ถึง A5.....	62
4.36 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B1 ถึง B3.....	62
4.37 การเกิดความจุไฟฟ้าขณะให้ไบอัสของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	63
4.38 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน.....	64
4.39 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A2 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน.....	65
4.40 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A3 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน.....	65
4.41 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A4 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน.....	66
4.42 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A5 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน.....	66

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B1 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน.....	67
4.44 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B2 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน.....	67
4.45 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B3 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน.....	68
4.46 ความสัมพันธ์กระแสโฟโตและความเข้มแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (ขณะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ ± 1 V).....	68
4.47 ลักษณะของพื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	69
4.48 ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตต่อความเข้มแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีพื้นที่รับแสงต่างกันแต่มีขั้วโลหะเท่ากัน.....	70
4.49 ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ของหมายเลข A1 และ B1 (ขณะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V).....	71
4.50 ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ของหมายเลข A2 และ B2 (ขณะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V).....	72
4.51 ความสัมพันธ์ของกระแสต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ของหมายเลข A3 และ B3 (ขณะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V).....	73
4.52 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 380 nm ถึง 640 nm.....	74
4.53 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 640 nm ถึง 760 nm.....	75
4.54 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับในช่วงความยาวคลื่น 760 nm ถึง 880 nm.....	76
4.55 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 880 nm ถึง 1020 nm.....	77
4.56 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 1020 nm ถึง 1300 nm.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 ผลการทดลองการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	79
4.58 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ.....	79
4.59 สัญญาณเอาต์พุทของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al.....	80
ก-1 แผนภาพของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่าง ๆ.....	85
ข-1 เครื่อง Vacuum Evaporator.....	86
ข-2 เครื่องมีอิวัด HP 4061A (Semiconductor/Component Test System).....	86



สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
λ	ความยาวคลื่นของแสง
ν	ความถี่ของแสง
c_0	ความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ
h	ค่าคงตัวของพลังค์
k	ค่าคงตัวของ โบลทซ์มันน์
ϕ	ฟังก์ชันงาน
χ_s	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ
V_{bi}	ศักย์ไฟฟ้าภายใน
W	ความกว้างของพื้นที่ปลอดประจุพาหะ
ϕ_{b_n}	ค่าความสูงของกำแพงศักย์
ϕ_m	ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_s	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
E_g	แถบพลังงานต้องห้าม
E_0	ระดับพลังงานที่สุญญากาศ
E_{fm}	ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ
E_{fs}	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
E_C	ระดับพลังงานความนำ
E_V	ระดับพลังงานวาเลนซ์
E_i	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก
J	ความหนาแน่นกระแส
J_s	ความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
V	แรงดันไบอัส
q	ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
ϕ_n	ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอน
ϕ_p	ความสูงของกำแพงศักย์ของโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ **XV** อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

w	ความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะ
A_n^*	ค่าคงที่ยังผลริชาร์ดสันของอิเล็กตรอน
A_p^*	ค่าคงที่ยังผลริชาร์ดสันของโฮล
α	สัมประสิทธิ์อินทรินซิก แบร์รีเออร์ โลเวอร์ริง
$\Delta\phi_n$	ขอตศ์กี แบร์รีเออร์ โลเวอร์ริง
P_{n0}	ความหนาแน่นของโฮลในสภาวะสมดุลความร้อน
D_p	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
τ_p	ช่วงการมีชีวิตของ โฮล
L_p	ค่าคงตัวของการแพร่ซึมของโฮล
J_{ns}	ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว
J_{ps}	ความหนาแน่นกระแสโฮลอิ่มตัว
A	พื้นที่ของรอยสัมผัส
N_D	ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้
N_C	ความหนาแน่นสถานะพลังงานที่แถบความนำ
ϵ_S	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ
τ_r	ช่วงเวลาขาขึ้น
τ_f	ช่วงเวลาขาลง
f_c	ความถี่ตัด
ϕ_b^0	ความสูงของกำแพงศักย์ขณะที่แถบพลังงานแบนราบ
V_{ox}	แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์
ϵ_{ox}	สนามไฟฟ้าภายในชั้นออกไซด์
δ	ความหนาของชั้นออกไซด์
C	ความจุไฟฟ้า
C_j	ความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส

ศัพท์เทคนิค

คลื่น	Wave
อนุภาค	Particle
การแทรกสอด	Interference
การสะท้อน	Reflection
การหักเหแสง	Refraction
โฟตอน	Photon
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกแบบภายนอก	External Photoelectric Effect
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน	Internal Photoelectric Effect
ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก	Photovoltaic Effect
ปรากฏการณ์โฟโตคอนดักทิฟ	Photoconductive Effect
แถบช่องตรง	Direct Band Gap
แถบช่องไม่ตรง	Indirect Band Gap
ศักย์ไฟฟ้าภายใน	Built-in Potential
ความสูงกำแพงศักย์	Barrier Height
แถบพลังงานแบนราบ	Flat-band Barrier Height
ฟังก์ชันงาน	Work Function
สถานะพื้นผิว	Surface State
เงื่อนไขขอบเขต	Boundary Condition
แถบพลังงานโค้งงอ	Band Bending
รอยสัมผัสแบบชอตต์กี	Schottky Contact
รอยสัมผัสแบบอัลลอย	Alloy Contact
รอยสัมผัสแบบโอห์มิก	Ohmic Contact
ชอตต์กี แบริเออร์ โลเวอร์ริง	Schottky Barrier Lowering
เทอร์มิโอนิก อิมิสชัน	Thermionic Emissions
พื้นที่เป็นกลาง	Neutral Area
พื้นที่ปลอดประจุพาหะ	Depletion Area
แรงดันไบอัสตรง	Forward Bias
แรงดันไบอัสกลับ	Reverse Bias

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

คู่อิเล็กตรอน-โฮล	Electron-hole Pair
ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส	Junction Capacitance
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized Water
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก	Dielectric Permittivity
ออกซิเดชัน	Oxidation
มาสก์	Mask
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ซินเตอร์ริง	Sintering
พื้นที่รับแสง	Active Area
ช่วงเวลาดำเนิน	Rise Time
ช่วงเวลาขาด	Fall Time
ฮาโลเจน	Halogen
ความถี่ตัด	Cutoff Frequency
แถบพลังงานแบนราบ	Flat-band Energy
กระแสรั่ว	Leakage Current
แรงดันพังทลาย	Breakdown Voltage
แรงดันไบอัส	Bias Voltage
ความเข้มแสง	Light Intensity
กระแสโฟโต	Photocurrent
แบนด์วิท	Bandwidth
ความยาวคลื่น	Wavelength
เครื่องสั่นความถี่สูง	Ultrasonic Cleaning

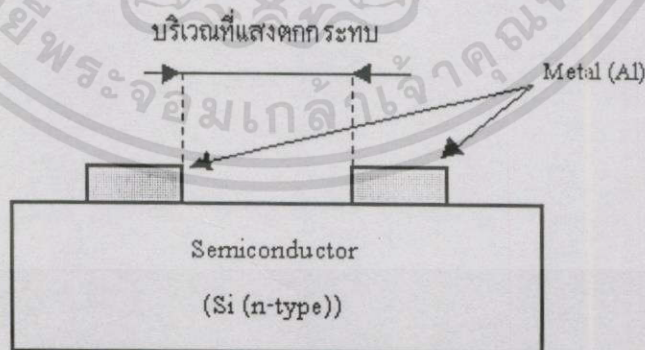
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตโวลทอิก ซึ่งมีการประยุกต์ใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์มากมาย โดยทำหน้าที่หลักคือ การเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าภายในวงจร สารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นโฟโตไดโอดจะมีชนิดต่าง ๆ กัน เช่น เจอร์มาเนียม (Ge), ซิลิคอน (Si), แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้ก็จะมีคุณสมบัติความไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตไดโอดซึ่งก็มีโครงสร้างหลายลักษณะด้วยกัน เช่น พีเอ็นโฟโตไดโอด, พินโฟโตไดโอด, โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM, อะวาลานซ์โฟโตไดโอด ในการเลือกใช้โฟโตไดโอดว่าควรจะเป็นโครงสร้างแบบใดหรือสร้างจากวัสดุชนิดไหนก็จะขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่จะนำไปประยุกต์ใช้

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al โดยโครงสร้างทั่วไป ประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส ดังรูปที่ 1.1 และแสงที่จะถูกตรวจจะตกกระทบบนระหว่างรอยสัมผัสระหว่างขั้วโลหะ ข้อดีของโฟโตไดโอดชนิดนี้คือ กระบวนการสร้างของโฟโตไดโอดชนิดนี้จะน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการสร้างของโฟโตไดโอดชนิดอื่น ๆ และมีโครงสร้างแบบพลาแนร์ (Planar Structure) ทำให้เหมาะสมในการพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์ร่วมกับวงจรรวม โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอน ชนิดเอ็น และโลหะที่เป็นอะลูมิเนียม



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

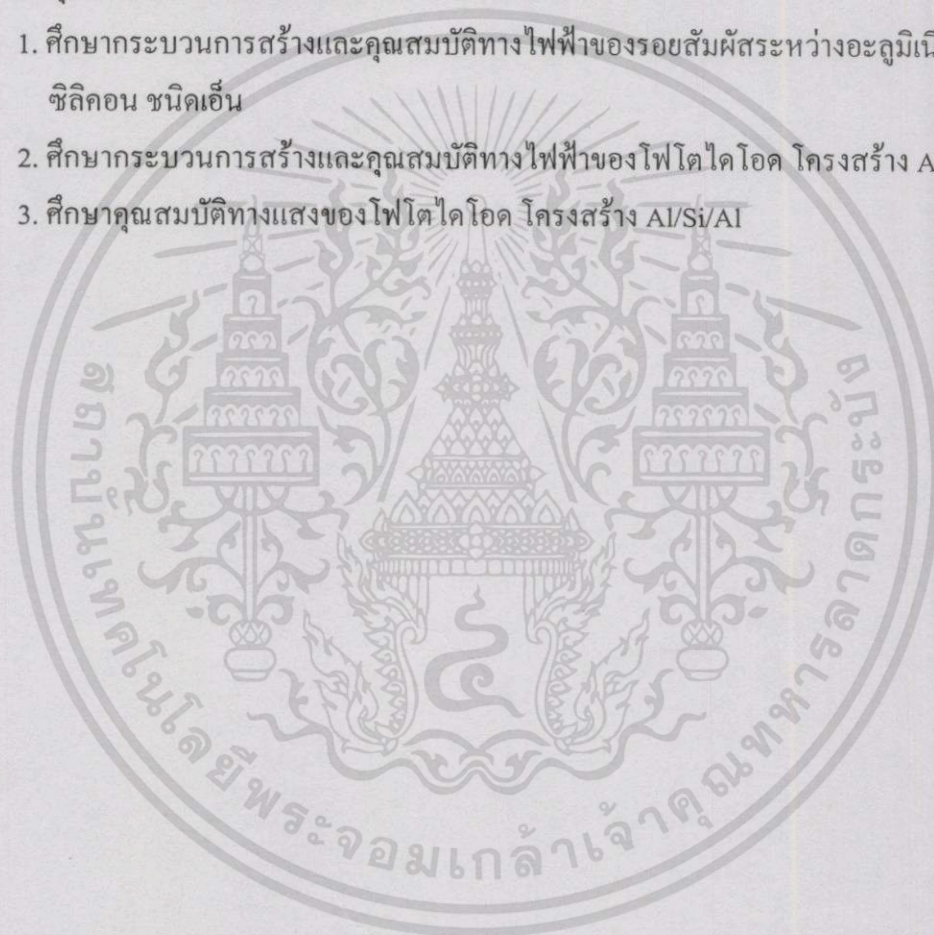
สารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่ถ้าเป็นอุปกรณ์ทางแสงจะเป็นแกลเลียมอาเซไนด์ เนื่องจากมีแถบพลังงานแบบช่องตรง (Direct Band Gap) แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซิลิคอน ถึงแม้ว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนจะมีแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรง (Indirect Band Gap) เนื่องจากปัจจุบันซิลิคอนถูกใช้ เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างวงจรรวมและมีราคาถูก สำหรับโลหะที่สามารถที่จะเลือกใช้ได้หลาย อย่างเช่น ทองแดง (Cu), โมลิบดีนัม (Mo) สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้อะลูมิเนียม (Al) เนื่องจาก สร้างได้ง่ายโดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศในการสร้าง ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการสร้างชั้น โลหะ อีกทั้งอะลูมิเนียมยังเป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างวงจรรวมเหมือนกับซิลิคอน

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

1. ศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและ ซิลิคอน ชนิดอื่น
2. ศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al
3. ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น (Wave) และ อนุภาค (Particle) ปรากฏการณ์ที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวันเช่น การสะท้อนแสง (Reflection) การแทรกสอด (Interference) และการหักเหแสง (Refraction) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ การส่องแสงเข้าสู่ผิวโลหะแล้วทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออกสู่อวกาศ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (External Photoelectric Effect)

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ถ้าให้ λ คือความยาวคลื่นของแสง, ν คือความถี่ และ c_0 คือความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($c_0 = 2.99792458 \times 10^8$ m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda \nu = c_0 \quad (2.1)$$

2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

แสงนอกจากมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคแสงว่า โฟตอน (Photon) อนุภาคแสงมีพลังงานอยู่ภายใน และถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ ν อนุภาคแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ (หน่วย electron volt : ย่อว่า eV)

โดยที่ h คือค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) = 4.136×10^{-15} (eV-s)

ปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศแล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะกระเด็นหลุดออกจากผิวโลหะ

พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ E มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวโลหะ $h\nu$ ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก ϕ และเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$E = hv - q\phi \tag{2.2}$$

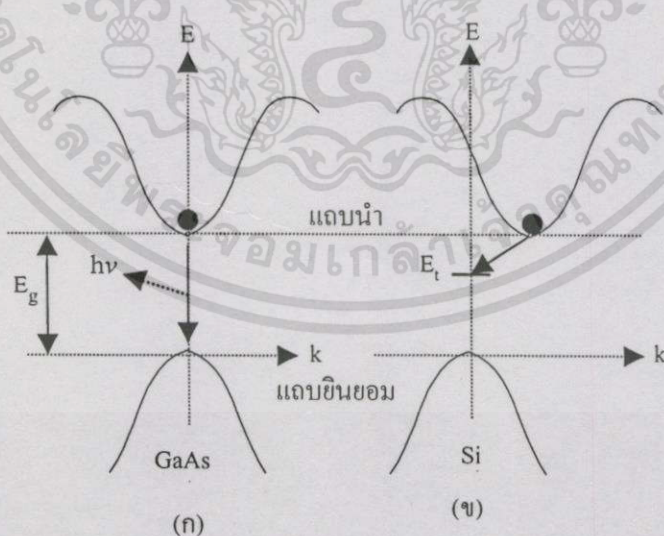
โดยที่ ϕ เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (Work Function) และ $q\phi$ มีหน่วยเป็น eV

2.2 การดูดกลืนแสงในผลึกซิลิคอน

การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ จนกระทั่งขึ้นไปอยู่ในแถบความนำ พลังงานของโฟตอนของแสงที่มากกระตุ้นอิเล็กตรอนจะต้องมีค่ามากกว่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำดังสมการที่ (2.3) ซึ่งแถบพลังงานต้องห้ามของซิลิคอนเท่ากับ 1.12 eV

$$hv \geq E_g \tag{2.3}$$

การดูดกลืนแสงเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่จุดต่ำสุดของแถบความนำนั้น การดูดกลืนแสงชนิดนี้จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เราจะพิจารณาให้แสดงลักษณะของฟังก์ชันเลขคลื่น k (Wave Number) ในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบความนำที่ตำแหน่ง $k = 0$ ดังรูปที่ 2.1 (ก) แถบพลังงานที่มีลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า แถบพลังงานแบบช่องตรง หรือ แถบช่องตรง (Direct Band Gap) [8] สารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะแถบพลังงานแบบช่องตรง เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์



รูปที่ 2.1 ลักษณะกราฟ E-k ของสารกึ่งตัวนำ (ก) แถบช่องตรง (ข) แถบช่องอ้อม

ในกรณีที่จุดยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบความนำ ที่ตำแหน่ง $k = 0$ ดังรูปที่ 2.1 (ข) แถบพลังงานลักษณะนี้เรียกว่า แถบพลังงานช่องไม่ตรง หรือ แถบช่องไม่ตรง (Indirect Band Gap) และสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรง เช่น ซิลิคอน, เจอร์มาเนียม

เนื่องจากซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดแถบช่องไม่ตรง ดังนั้นคุณสมบัติทางแสงจึงไม่ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางแสงของแกลเลียมอาเซไนด์ แต่ก็ยังสามารถผลิตซิลิคอนเป็นสิ่งที่ประดิษฐ์ด้านตรวจจับแสง เช่น โฟโตไดโอดและเซลล์แสงอาทิตย์

2.3 ชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงตามหลักการทำงาน

ในการแบ่งสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงตามหลักการทำงาน [9] ก็สามารที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.3.1 สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายนอก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกแบบภายนอก (External Photoelectric Effect) คือ ปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนกระโดดออกจากผิวของวัสดุไปสู่สุญญากาศเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงอย่างเพียงพอ เรียกอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกจากวัสดุด้วยพลังงานแสงว่า “โฟโตอิเล็กตรอน” (Photoelectron) มีการนำปรากฏการณ์นี้ไปใช้ในงานโฟโตมัลติพลายเออร์, หลอดถ่ายภาพวิดีโอ (Image Type) เป็นต้น

2.3.2 สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (Internal Photoelectric Effect) คือ การส่องแสงเข้าสู่สารกึ่งตัวนำแล้วกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบความนำ และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ พลังงานโฟตอนของแสงที่มากระตุ้นอิเล็กตรอน ต้องมีค่าพลังงานมากกว่าแถบพลังงานต้องห้ามของวัสดุ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายในสามารถ แบ่งได้ 2 ประเภท

2.3.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก

ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) จะเกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in Potential) ซึ่งเกิดจากรอยสัมผัสของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี หรือรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำ บริเวณศักย์ไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นจะเป็นบริเวณปิดวงจรพหุซึ่งจะเป็นส่วนที่แยกอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระที่เกิดจากการกระตุ้นของแสงและออกสู่วงจรภายนอกทางชั้นเอ็นและพี

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่ใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ได้แก่ โฟโตไดโอด ซอตตี้ โฟโตไดโอด

2.3.2.2 ปรากฏการณ์โฟโตคอนดักทีฟ

ปรากฏการณ์โฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive Effect) เกิดจากกระแสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระตุ้นของแสงที่ทำให้ค่าความนำ (Conductivity) ของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้น

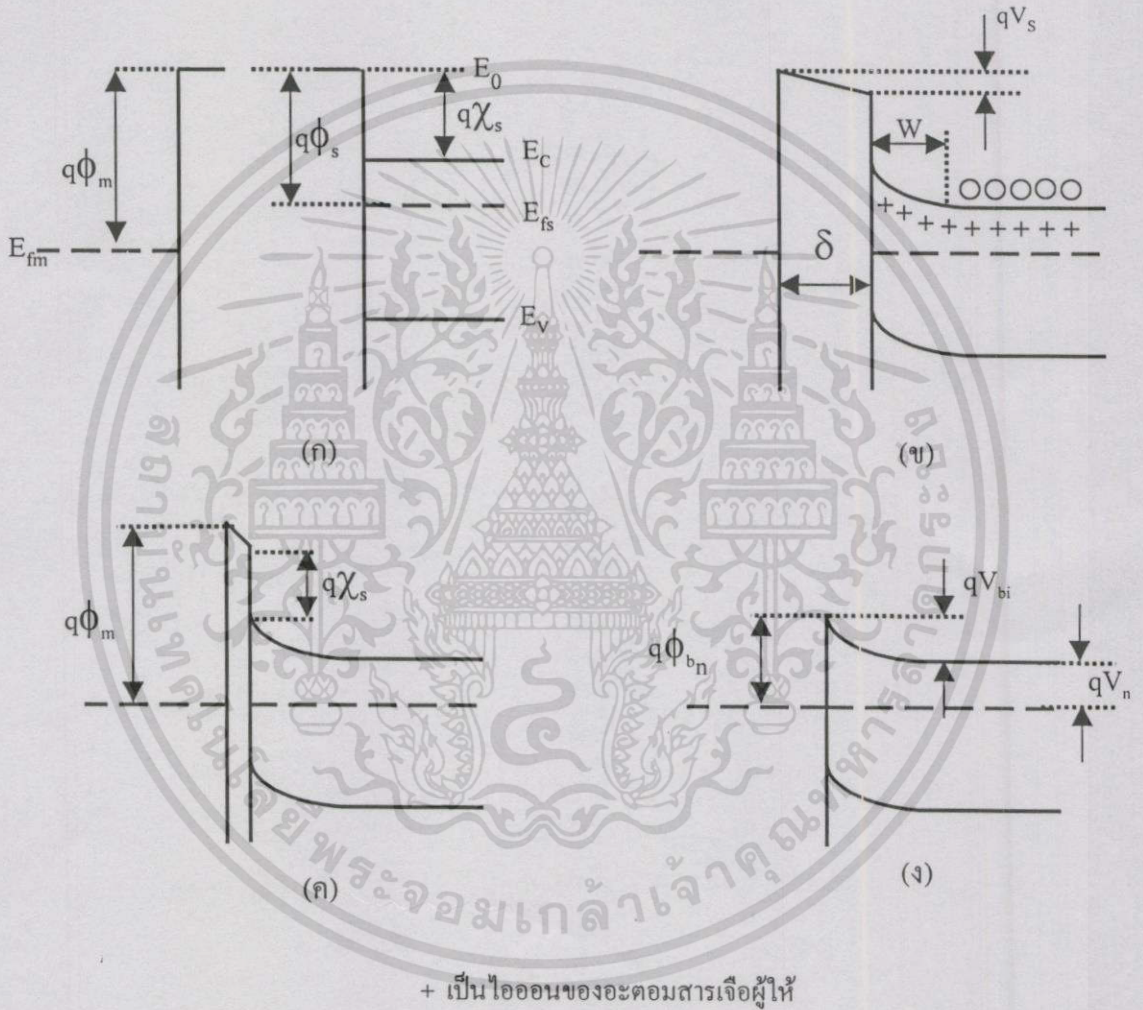
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ปรากฏการณ์โฟโตคอนดักทีฟ ได้แก่ ตัวต้านทานไวแสง (Photoresistor), โฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive)

2.4 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจะให้คุณสมบัติของแรงดันไฟฟ้าออกมาเป็น 2 กรณีคือ รอยสัมผัสแบบโอห์มิก และรอยสัมผัสแบบซอตตี้ โดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_m) ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ (χ_s) ที่นำมาสัมผัส สำหรับค่าฟังก์ชันงานสารกึ่งนำที่นำมาสัมผัสมีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของโลหะและสมมติให้ไม่มีสถานะพื้นผิวเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.2 (ก) เมื่อนำมาสัมผัสกันอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจะไปยังโลหะ ระดับเฟอร์มิทั้งสองจะตรงกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัส กรณีของสารกึ่งตัว ชนิดเอ็น ประจุบวกจะเกิดจากอิเล็กตรอนความนำที่หลุดจากพื้นผิวทำให้เกิดไอออนบวกของสารเจือผู้ให้บริเวณปลอดอิเล็กตรอนขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้มีความน้อยกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในโลหะมาก จึงทำให้เกิดชั้นของสารเจือผู้ให้ที่มีความหนาแน่น W โดยเทียบเคียงได้กับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสพี-เอ็น แถบพลังงานของสารกึ่งนำจะโค้งงอขึ้นดังรูปที่ 2.2 (ข) ศักย์ไฟฟ้าสถิต V_s (Electrostatic Potential) ระหว่างภายนอกของพื้นผิวของโลหะและสารกึ่งตัวนำหาได้จาก $V_s = \delta \epsilon_s$ โดยที่ δ เป็นความกว้างภายในช่องว่างระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ และ ϵ_s เป็นสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ถ้าโลหะและสารกึ่งตัวนำเข้ามาใกล้กันมาก ๆ V_s มีค่าเป็นศูนย์ ถ้า ϵ_s ยังคงมีปริมาณที่แน่นอน (รูปที่ 2.2 (ค) และในที่สุด (รูปที่ 2.2 (ง)) กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นบริเวณสูญญากาศจะหายไปหลังจากนั้นจะได้รอยสัมผัสในอุดมคติของโลหะและสารกึ่งตัวนำเห็นได้ชัดจากความจริงที่ว่า เมื่อ V_s มีค่าเป็นศูนย์ ความสูงของกำแพงศักย์ ϕ_{bn} ที่สัมพันธ์กับระดับเฟอร์มิหาได้จาก

$$\phi_{bn} = \phi_m - \chi_s \quad (2.4)$$

ในทางปฏิบัติ รอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.2 (ง) จะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากจะเกิดชั้นบาง ๆ ของฉนวนที่เป็นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 10 – 20 Å เกิดขึ้นบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ รอยสัมผัสในทางปฏิบัติมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 2.2 (ค) อย่างไรก็ตามกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นจากชั้นออกไซด์จะมีความหนาน้อยมากจนทำให้อิเล็กตรอนสามารถผ่านทะลุไปได้โดยง่าย ดังนั้นจึงไม่ทำให้เกิดความแตกต่างเกี่ยวกับอิเล็กตรอนความนำระหว่างรูปที่ 2.2 (ค) กับรูปที่ 2.2 (ง) นอกจากนี้ศักย์ตกคร่อม V_s ในฟิล์มออกไซด์มีค่าน้อยมากซึ่งสมการที่ (2.4) ยังคงเป็นสมการที่ดีในการประมาณค่า



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ชนิดอื่น กรณี

- (ก) เป็นกลางและแยกกันอยู่
- (ข) การเชื่อมต่อทางไฟฟ้า
- (ค) แยกออกจากกันด้วยช่องว่างแคบ ๆ
- (ง) รอยสัมผัสที่สมบูรณ์

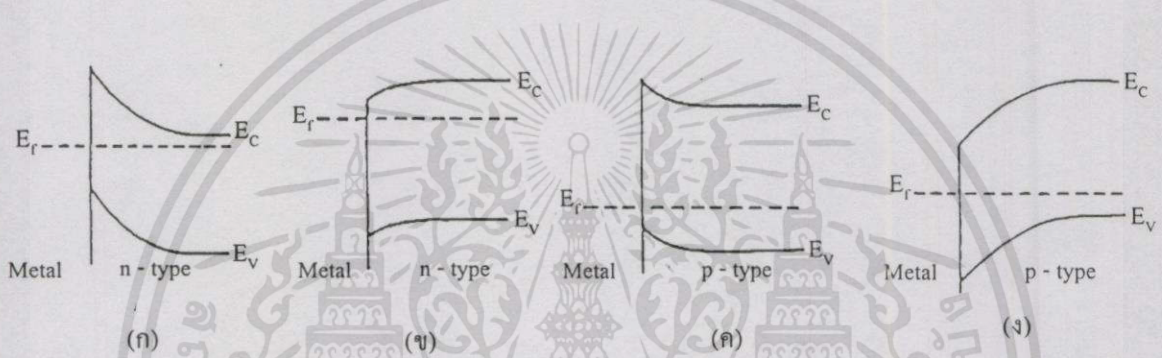
จากข้างต้นเป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิดอื่น ที่มีฟังก์ชันงาน ϕ_s น้อยกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ ϕ_m บริเวณรอยสัมผัสจะเกิดกำแพงศักย์ซึ่งเป็นคุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบขอตต์กี แต่ในกรณีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ_s มีค่ามากกว่า ϕ_m แถบพลังงานมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 (ข) เมื่อทำการไบแอสให้กับรอยสัมผัสเป็นผลให้อิเล็กตรอนไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ บริเวณรอยสัมผัสจะไม่มีกำแพงศักย์เกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก

ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งมี ϕ_m มากกว่า ϕ_s จะได้แถบพลังงานดังรูปที่ 2.3 (ค) ซึ่งเป็นลักษณะของรอยสัมผัสแบบโอห์มิก กรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มี ϕ_s มากกว่า ϕ_m มีลักษณะของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.3 (ง) ซึ่งเป็นกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีโฮลยาที่จะข้ามกำแพงศักย์ไปได้ มีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 2.3 (ก) และเป็นลักษณะของรอยสัมผัสที่มีการเรกติไฟร์เกิดขึ้น

จากรูปที่ 2.3 (ข) และ (ค) จะไม่เหมือนรอยสัมผัสในทางปฏิบัติ การรวมตัวของพาหะส่วนมากของโลหะและสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการเรกติไฟร์ขึ้น หรือ เป็นรอยสัมผัสแบบชอตต์กี



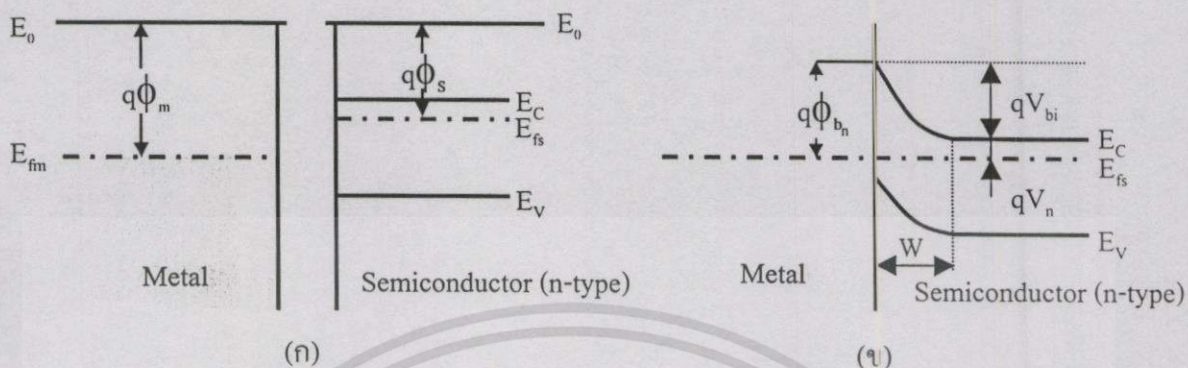
รูปที่ 2.3 กำแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันและฟังก์ชันงานของ

- ชนิดเอ็น (ก) $\phi_s < \phi_m$ (ชอตต์กี)
- (ข) $\phi_s > \phi_m$ (โอห์มิก)
- ชนิดพี (ค) $\phi_s > \phi_m$ (โอห์มิก)
- (ง) $\phi_s < \phi_m$ (ชอตต์กี)

2.4.1 รอยสัมผัสแบบชอตต์กี

รอยสัมผัสแบบชอตต์กีเกิดจากการนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น ซึ่งถ้าค่าฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_m) มีค่ามากกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) และสมมติให้ไม่มีสถานะพื้นผิว จะพบว่าเมื่อนำมาสัมผัสกันอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัส ซึ่งสนามไฟฟ้านี้ทำให้แถบพลังงานบริเวณรอยสัมผัสเกิดการโค้งงอ โดยที่ขนาดของระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำในสารกึ่งตัวนำที่โค้งงอขึ้นจนกระทั่งถึงระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ เรียกว่า ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ϕ_{b_n} (Barrier High) จากรูปที่ 2.4 เป็นลักษณะแถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยในด้านของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นบริเวณที่สัมผัสกับโลหะ ทำให้เกิดความ

กว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะขึ้นในระยะ W หรือเกิดศักย์ไฟฟ้าภายใน V_{bi} (Built-in Voltage) ในสถานะสมดุลความร้อน ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะเท่ากับสมการที่ (2.5)



รูปที่ 2.4 ลักษณะแถบพลังงานเมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น

(ก) ก่อนการสัมผัส (ข) หลังการสัมผัส

จากรูปที่ 2.4 ϕ_{b_n} คือ ค่าความสูงของกำแพงศักย์

ϕ_m คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ

ϕ_s คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

E_0 คือ ระดับพลังงานที่สูญญากาศ

E_{fm} คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ

E_{fs} คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ

E_c คือ ระดับพลังงานความนำ

E_v คือ ระดับพลังงานวาเลนซ์

V_{bi} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายใน

q คือ ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

$$q\phi_{b_n} = q(V_{bi} + V_n) \quad (2.5)$$

และเมื่อให้แรงดันไบอัส จะมีปริมาณความหนาแน่นกระแสไหลผ่านรอยสัมผัสดังสมการที่ (2.6)

$$J = J_s \left(e^{qV/kT} - 1 \right) \quad (2.6)$$

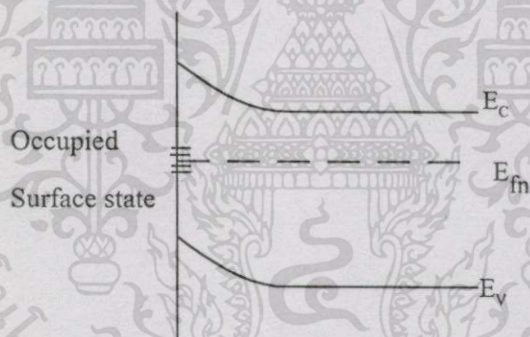
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ
$$J_s = A_n^* T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_{b_n}}{kT}\right)} \tag{2.7}$$

- โดย J คือ ความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัส
- J_s คือ ความหนาแน่นกระแสอิมิตัวของรอยสัมผัส
- V คือ แรงดันไบอัสภายนอก
- k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์
- T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์
- A_n^* คือ ค่าคงที่ริชาร์ดสันของอิลีกตรอน

2.4.2 สถานะพื้นผิว (Surface State)

โดยทั่วไปสิ่งสกปรกที่ผิวหรือความคลาดเคลื่อนในการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวของผลึกของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ภายในแถบต้องห้ามเกิดแถบพลังงานศักย์ที่สามารถรับอิลีกตรอนเข้าไปอยู่ได้อย่างมากมาย ซึ่งเรียกแถบพลังงานศักย์เหล่านี้ว่า สถานะพื้นผิว



รูปที่ 2.5 ลักษณะของสถานะพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ

ในการคำนวณค่าแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ได้สมมติให้ว่าก่อนสารกึ่งตัวนำนั้นมีขนาดใหญ่มาก จนความยาวตามแนวแกนทั้งสามมีค่าเป็นอนันต์ แต่ความจริงแล้วก่อนสารกึ่งตัวนำจะมีขนาดเล็กกว่าที่สมมติไว้มาก จึงทำให้เกิดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำและผลที่คำนวณได้ก็คือจะเกิดระดับพลังงานศักย์สำหรับอิลีกตรอนได้มากมายภายในแถบพลังงานต้องห้าม โดยเฉพาะบริเวณที่ผิวและบริเวณใกล้ผิวของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกระดับพลังงานศักย์เหล่านี้ว่าสถานะพื้นผิวอีกเช่นเดียวกัน

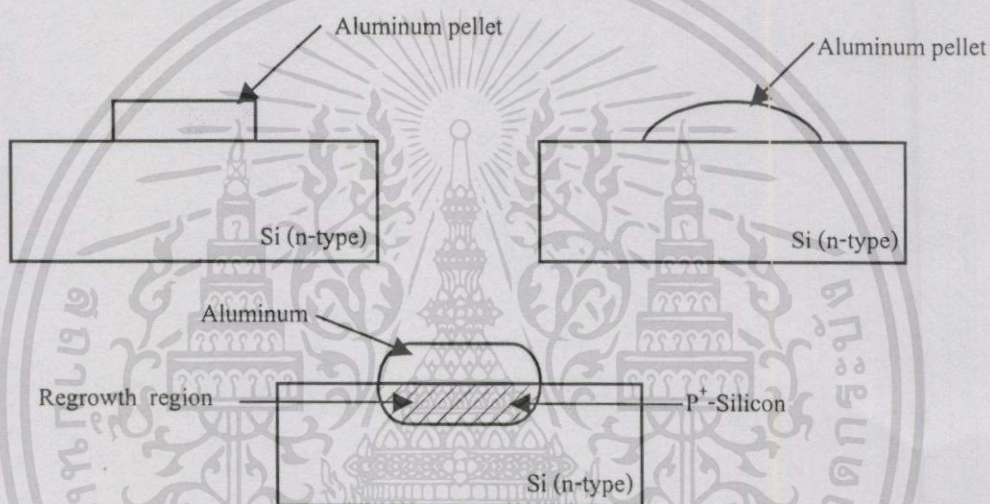
จากสถานะพื้นผิวนี้เองที่จะเป็นตัวรับอิลีกตรอนอิสระจากแถบความนำ ทำให้เกิดการเสียอิลีกตรอนไปและทำให้เกิดประจุบวกแบบเคลื่อนที่ไม่ได้บริเวณใกล้ผิวของสารกึ่งนำ ทำให้แถบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่อยู่ใกล้ผิวของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะโค้งงอ (Band Bending) [6] ถึงแม้ว่าจะยังไม่มีโลหะมาสัมผัสก็ตาม ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงพร้อมที่จะทำหน้าที่เป็นขั้วสัมผัสแบบชอตต์กีไม่ว่าค่าฟังก์ชันงานของโลหะที่มาสัมผัสจะมีค่าเท่าไรก็ตาม

2.4.3 รอยสัมผัสแบบอัลลอย

ในกระบวนการสร้างรอยสัมผัสแบบอัลลอย (Alloy Contact) [7] หรือแบบ $p^+ - n$ ในกระบวนการสร้างเราจะใช้ฐานรองสารกึ่งตัวนำที่เป็นชนิดเอ็น จากนั้นก็จะสร้างขั้วโลหะ (ที่เป็นสารเจือ) สร้างบนผิวฐานรองโดยตรง แล้วให้ความร้อนจนกระทั่งเกิดปฏิกิริยากระตุ้นให้อะตอมของโลหะ สามารถที่จะแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ

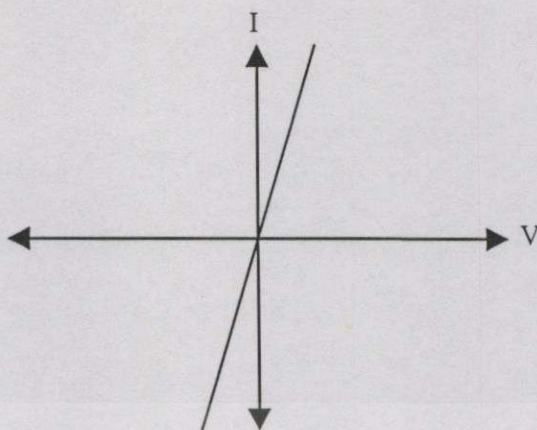


รูปที่ 2.6 การเกิดรอยสัมผัสแบบอัลลอย

จากรูปที่ 2.6 เราจะพบว่าฐานรองที่ใช้จะเป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น และโลหะที่จะนำมาสร้างอาจจะเป็นอะลูมิเนียม (Al) หรืออินเดียม (In) เนื่องจากอะลูมิเนียมหรืออินเดียม เมื่อแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำแล้ว ก็จะประพฤติตัวเป็นอะตอมผู้รับ (Acceptor)

2.4.4 รอยสัมผัสแบบโอห์มิก (Ohmic Contact)

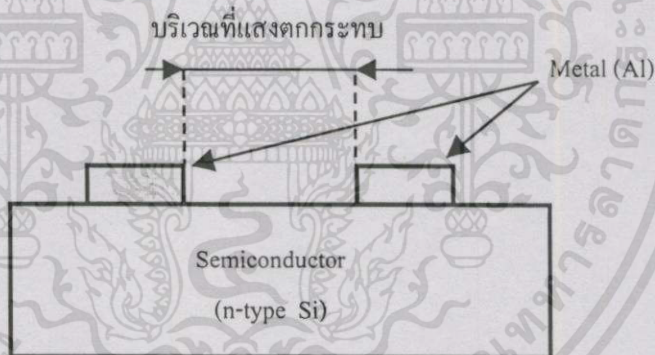
โดยทั่วไปการสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกจะเป็นรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ สร้างขึ้นเพื่อเป็นตัวผ่านการไหลกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออกไปยังวงจรรภายนอก สามารถสร้างขึ้นได้โดยการพิจารณาความแตกต่างของฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำและโลหะที่จะนำมาสัมผัสหรือการแพร่สารเจือมาก ๆ เป็นชั้นบาง ๆ ของสารกึ่งนำก่อนทำขั้วสัมผัส หรือการทำลายพื้นผิวสารกึ่งตัวนำก่อนทำขั้วสัมผัส



รูปที่ 2.7 ลักษณะของกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบโอห์มิก

2.5 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจำนวนสองรอยสัมผัสสองขั้วที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำ และแสงที่จะทำการตรวจจับจะถูกกำหนดให้กระทบบริเวณพื้นที่ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วโลหะทั้งสอง



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

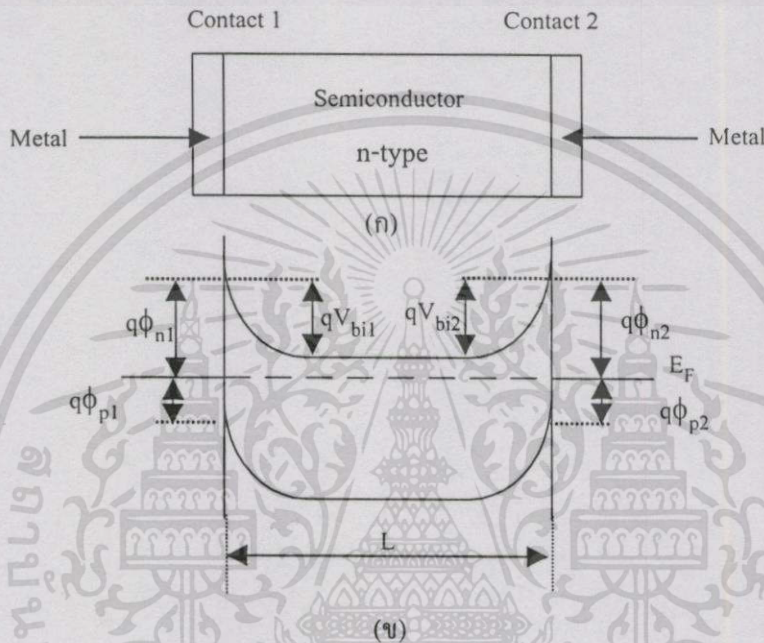
2.5.1 สถานะสมดุลความร้อนของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM

โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM [4] แสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีการแพร่สารเจือ ชนิดเอ็น อย่างสม่ำเสมอและขั้วโลหะสองขั้ว โดยลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดในสถานะสมดุลความร้อนแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) ซึ่งค่า

ϕ_{n1} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนของรอยสัมผัสที่ 1

ϕ_{n2} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนของรอยสัมผัสที่ 2

- ϕ_{p1} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของโฮลของรอยสัมผัสที่ 1
 ϕ_{p2} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของโฮลของรอยสัมผัสที่ 2
 V_{bi1} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยสัมผัสที่ 1
 V_{bi2} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยสัมผัสที่ 2
 L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส



รูปที่ 2.9 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

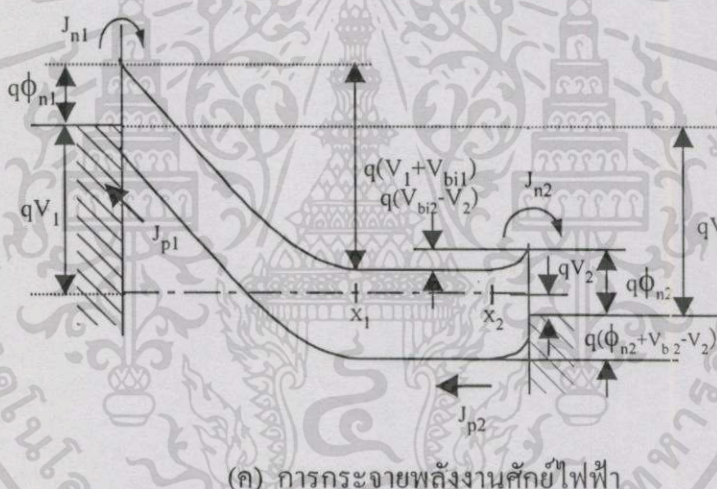
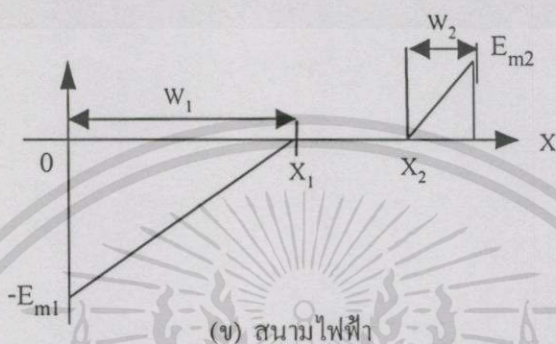
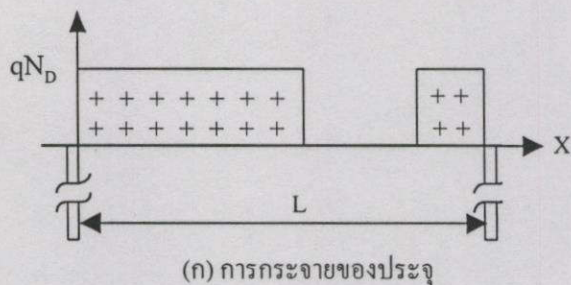
(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในสภาวะสมดุลความร้อน

ถ้าพื้นที่ของทั้งสองรอยสัมผัสมีค่าเท่ากันและค่าความสูงกำแพงศักย์ $\phi_{n1} = \phi_{n2}$ เท่ากัน กล่าวได้ว่าโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แบบสมมาตร (Symmetrical MSM Structure)

2.5.2 การให้ไบอัสและการกระจายพลังงานศักย์

เมื่อมีการไบอัสให้กับโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยโพลบจะต่อเข้ากับขั้วโลหะที่ 1 และขั้วบวกต่อเข้ากับรอยสัมผัสที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 รอยสัมผัสที่ 1 เป็นแบบไบอัสกลับและรอยสัมผัสที่ 2 เป็นแบบไบอัสตรง จากทฤษฎีเทอร์มิโอนิก อิมิชชัน (Thermionic Emission) ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมาจากรอยสัมผัสที่ 1 กระแสโฮลจะเกิดจากการแพร่จากรอยสัมผัสที่ 2 ไปยังรอยสัมผัสที่ 1 ดังนั้นความต่อเนื่องของกระแส (Current Continuity) จะเป็นเงื่อนไขที่ทำให้กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสทั้งสองต้องมีขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การกระจายประจุ สนามไฟฟ้า และการกระจายพลังงานศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ภายใต้การให้แรงดันไบอัส (ด้วยการไบอัสค่าบวกที่รอยสัมผัสที่ 2)

2.5.3 การไหลของกระแสโพลและอิเล็กตรอน

2.5.3.1 การไหลของกระแสอิเล็กตรอน

แรงดันไบอัสเริ่มต้น คือ แรงดันไบอัสที่ทำให้ผลรวมของบริเวณปลอดพาหะ W_1 และ W_2 มีความยาวน้อยกว่าระยะ L การกระจายของประจุพาหะของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แสดงในรูปที่ 2.10 (ก) โดยประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับที่มีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ ที่สอดคล้องกับสนามไฟฟ้าและการกระจายของศักย์ไฟฟ้าจะแสดงดังแสดงในรูปที่ 2.10

(ข) และ 2.10 (ค) โดยสนามไฟฟ้าและการกระจายของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งได้จากการ อินทิเกรตชันของสมการพัวซองซ์ (Poisson Equation) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และ 2.10 (ค) ตามลำดับ เมื่อเราให้แรงดันไบอัส V โดยแรงดันที่จะตกคร่อมอยู่ที่รอยสัมผัสทั้ง 2 ด้าน จะได้

$$V = V_1 + V_2 \quad (2.8)$$

โดยที่ V คือ แรงดันไบอัสภายนอก

V_1 คือ แรงดันตกคร่อมรอยสัมผัสที่ 1

V_2 คือ แรงดันตกคร่อมรอยสัมผัสที่ 2

จากกระแสต่อเนื่องได้รับ (อ้างอิงจากรูปที่ 2.10 (ค)) จะได้ว่า (สมมติให้พื้นที่ของรอยสัมผัสทั้งสองเท่ากัน)

$$J_{n1} = J_{n2} \quad (2.9)$$

ความหนาแน่นของกระแสขณะไบอัสกลับ J_{n1} ของรอยสัมผัสที่ 1 คือ

$$J_{n1} = A_n^* T^2 e^{-\beta\phi_{n1}} e^{\beta(\Delta\phi_{n1} + \alpha_1 E_{m1})} \left(1 - e^{-\beta V_1}\right) \quad (2.10)$$

โดย A_n^* คือ ค่าคงที่ซึ่งผลริชาร์ดสันของอิเล็กตรอน (Effective Richardson Constant of Electron), T คือ อุณหภูมิ, β มีค่าเท่ากับ q/kT , E_{m1} คือ สนามไฟฟ้าสูงสุด ณ จุด $x = 0$, α_1 คือ สัมประสิทธิ์อินทรินซิก บาร์เรียอร์ โลเวอร์ริง (Intrinsic Barrier Lowering Coefficient) และ $\Delta\phi_{n1}$ คือ ซอตต์กี บาร์เรียอร์ โลเวอร์ริง (Schottky Barrier Lowering) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\text{โดย } \Delta\phi_{n1} = \sqrt{\frac{qE_{m1}}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.11)$$

$$\text{และ } E_{m1} = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s} (V_1 + V_{bi1})} \quad (2.11 a)$$

ความหนาแน่นของกระแส J_{n2} ของรอยสัมผัสที่ 2 ขณะได้รับไบอัสตรง คือ

$$J_{n2} = A_n^* T^2 e^{-\beta\phi_{n2}} e^{\beta(\Delta\phi_{n2} + \alpha_2 E_{m2})} (e^{\beta V_2} - 1) \quad (2.12)$$

ซึ่งค่า $\Delta\phi_{n2}$ หาได้จากสมการที่ (2.11) โคนการแทนค่า $(V_1 + V_{bi1})$ ด้วยเทอม $(V_{bi2} - V_2)$ ความสัมพันธ์ระหว่าง V_1 และ V_2 ได้นำสมการที่ (2.11) และ (2.12) แทนในสมการที่ (2.9) และจัดความสัมพันธ์ในรูปของ V_1 และ V_2 จะได้

$$(\Delta\phi_{n1} - \Delta\phi_{n2}) + (\alpha_1 E_{m1} - \alpha_2 E_{m2}) - (\phi_{n1} - \phi_{n2}) = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{(e^{\beta V_2} - 1)}{(1 - e^{-\beta V_1})} \right] \quad (2.13)$$

สำหรับโครงสร้างของโฟโตไดโอด แบบสมมาตร $\phi_{n1} = \phi_{n2}$, $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และสมมติให้ $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ สมการที่ (2.13) ลดรูปได้เป็น

$$\left(\frac{q^3 N_D}{8\pi^2 \epsilon_s^3} \right)^{1/4} \left[(V_1 + V_{bi})^{1/4} - (V_{bi} - V_2)^{1/4} \right] = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{(e^{\beta V_2} - 1)}{(1 - e^{-\beta V_1})} \right] \quad (2.13 a)$$

สมการที่ (2.8) และ (2.13) สามารถหาคำตอบได้จากวิธีการ Numerically หรือ Graphically กระแสอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันของแรงดัน เนื่องจากรอยสัมผัสที่ 1 เป็นไบอัสกลับ และรอยสัมผัสที่ 2 เป็นไบอัสตรง แรงดันที่ไบอัสส่วนใหญ่แล้วจะตกคร่อมอยู่บริเวณปลอดประจุพาหะของรอยสัมผัสที่ 1

2.5.3.2 การไหลของกระแสโฮล

กระแสโฮลสามารถที่จะไหลในโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดนี้ได้ เนื่องจากตามทฤษฎีเทอร์มิออนิก อิมิสชัน (Thermionic Emission) กระแสโฮลจะไหลจากรอยสัมผัสที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค) เมื่อให้แรงดันไบอัสเริ่มต้น กำแพงศักย์ขั้วผล (Effective Barrier) ของโฮลที่รอยสัมผัสที่ 2 มีค่าเท่ากับ $(\phi_{p2} + V_{bi2} - V_2)$ โฮลที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสที่ 2 จะมีการแพร่จากตำแหน่ง x_2 ไปยัง x_1 เกิดเป็นกระแสโฮลนั่นเอง

บริเวณที่เป็นกลาง (Neutral region; ระยะที่ x เท่ากับ $x_1 > x > x_2$) สมการภาวะคงตัวต่อเนื่อง (Steady-State Continuity Equation) คือ

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p - p_{no}}{D_p \tau_p} = 0 \quad (2.14)$$

โดย p_{no} คือ ความหนาแน่นของโฮลในสภาวะสมดุลความร้อน

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

τ_p คือ ช่วงการมีชีวิตของโฮล (lifetime)

คำตอบของสมการที่ (2.14) คือ

$$p - p_{no} = Ae^{x/L_p} + Be^{-x/L_p} \quad (2.15)$$

โดย L_p คือ ค่าคงตัวของการแพร่ซึม [$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$]

และเงื่อนไขขอบเขต กำหนดให้ (1) ที่ตำแหน่ง $x = x_1$, $p = p_{no} e^{-qV_1/kT}$

(2) ที่ตำแหน่ง $x = x_2$

$$J_{p2} = A_p^* T^2 e^{-\beta(\phi_{p2} + V_{bi2} - V_2)} \quad (2.16)$$

โดย A_p^* คือ ค่าคงที่ซึ่งผลริชาร์ดสันของโฮล (Effective Richardson Constant of Hole)

เงื่อนไขขอบเขตจะเป็นตัวกำหนดค่าคงตัว A และ B ในสมการที่ (2.15) ความหนาแน่นกระแส J_{p1} ถูกกำหนดโดย แกรเดียนต์ (Gradient) ที่ตำแหน่ง x_1 และเงื่อนไขที่สภาวะสมดุลความร้อน กระแสโฮล J_{p1} เท่ากับศูนย์ เนื่องจากแรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์

$$J_{p1} = qD_p \left. \frac{dp}{dx} \right|_{x_1}$$

$$= \frac{qD_p p_{no} \tanh[(x_2 - x_1)L_p]}{L_p} (1 - e^{-\beta V_1}) + \frac{A_p^* T^2 e^{-\beta(\phi_{p1} - V_{bi2})}}{\cosh[(x_2 - x_1)/L_p]} (e^{\beta V_2} - 1) \quad (2.17)$$

2.5.4 คุณลักษณะของความหนาแน่นกระแสและแรงดัน

ความหนาแน่นกระแสรวมทั้งหมดเท่ากับความหนาแน่นของกระแสโฮลและอิเล็กตรอนรวมกัน ความหนาแน่นกระแสรวมสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้หลายลำดับ (Order) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ

กับการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสทั้งสองข้าง เพื่อให้สะดวกกับการอธิบาย เราจะกำหนดเงื่อนไขที่สำคัญดังต่อไปนี้

$$J_{ns} = \text{ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนอิมิต์} \equiv A_n^* T^2 e^{-q\phi_{n1}/kT}$$

$$J_{ps} = \text{ความหนาแน่นกระแสโฮลอิมิต์} \equiv A_p^* T^2 e^{-q\phi_{p1}/kT}$$

จากสมการที่ (2.10) และ (2.17) จะได้

$$J = J_{n1} + J_{p1} = J_{ns} e^{\beta\Delta\phi_{n1}} \left(1 - e^{-\beta V_1}\right) + \left[\frac{qD_p p_{n0} \tanh[(x_2 - x_1)/L_p]}{L_p} \left(1 - e^{-\beta V_1}\right) + \frac{J_{ps} e^{-\beta V_{bi2}}}{\cosh[(x_2 - x_1)/L_p]} \left(e^{\beta V_2} - 1\right) \right] \quad (2.18)$$

2.5.5 ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM

ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าในช่วงนี้จะประกอบไปด้วยความหนาแน่นความจุไฟฟ้า 2 ตัว คือ C_1 และ C_2 ต่อกัน ดังนั้น ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้ารวม C_T จึงได้ ดังสมการ

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.19)$$

โดย C_1 คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ 1 = $\sqrt{(q\epsilon_s N_D / 2(V_1 + V_{bi1}))}$

C_2 คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ 2 = $\sqrt{(q\epsilon_s N_D / 2(V_{bi2} - V_2))}$

C_T คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้ารวม

ส่วนโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบสามาตรและถ้า $v \ll v_{bi}$ ($= v_{bi1} = v_{bi2}$) ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าจะลดลงและเท่ากับ

$$C_T = \sqrt{\left(\frac{q\epsilon_s N_D}{2}\right)} \left[\frac{1}{\sqrt{(V_1 + v_{bi})} + \sqrt{v_{bi} - V_2}} \right] \quad (2.20)$$

$$\approx \sqrt{\left(\frac{q\epsilon_s N_D}{8v_{bi}}\right)} \left[1 + \frac{v^2}{32v_{bi}^2} \right]$$

เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มมากขึ้น โดยส่วนใหญ่แรงดันที่ไบอัสจะตกคร่อมอยู่ที่รอยสัมผัสที่ 1 และความหนาแน่นความจุไฟฟ้าจะเท่ากับ

$$C_T \approx \sqrt{\left(\frac{q\epsilon_s N_D}{2}\right)} \left[\frac{1}{\sqrt{(V+V_{bi})} + \sqrt{V_{bi}}} \right] \quad (2.21)$$

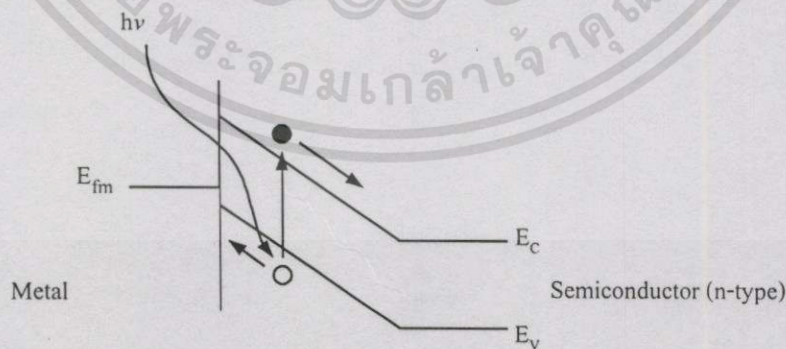
จากสมการที่ (2.20) และ (2.21) พบว่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจากแรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์และเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าก็จะลดลง

2.5.6 กระบวนการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

เมื่อให้แรงดันไบอัสจากรูปที่ 2.10 (ก) พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM สามารถแบ่งพื้นที่รับแสงเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง ซึ่งพื้นที่ปลอดประจุพาหะจะมีกระบวนการดูดกลืนแสงเหมือนกับการดูดกลืนแสงของชอตต์กีโฟโตไดโอด และส่วนพื้นที่เป็นกลางจะมีกระบวนการดูดกลืนแสงเหมือนกับโฟโตคอนดักเตอร์

2.5.6.1 กระบวนการดูดกลืนแสงของบริเวณปลอดประจุพาหะ

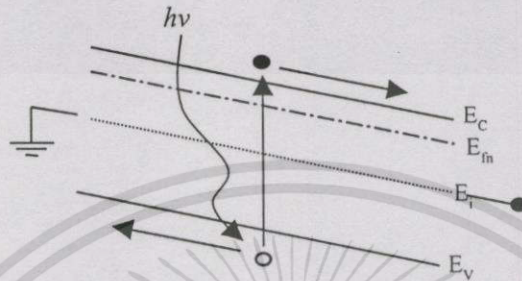
กระบวนการดูดกลืนแสงของพื้นที่ปลอดประจุพาหะของรอยสัมผัสมีกระบวนการดูดกลืนแสงเหมือนกับกระบวนการดูดกลืนแสงของชอตต์กีโฟโตไดโอด [2] พลังงานแสงจะถูกดูดกลืนในพื้นที่ปลอดประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนจะต้องมีค่าพลังงานมากกว่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole Pair) คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดภายในพื้นที่ปลอดประจุพาหะจะถูกแยกออกโดยสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 ลักษณะของแถบพลังงานชอตต์กีไดโอด ขณะที่พลังงานแสงถูกดูดกลืนภายในพื้นที่ปลอดประจุ

2.5.6.2 กระบวนการดูดกลืนแสงของพื้นที่เป็นกลาง

กระบวนการดูดกลืนแสงของพื้นที่เป็นกลาง จะมีกระบวนการดูดแสงเหมือนกับของโฟโตคอนดักเตอร์ [9] เมื่อแสงตกกระทบบริเวณสารกึ่งตัวนำที่เป็นกลาง จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยที่ระดับพลังงานของแสงที่ถูกดูดกลืนจะต้องมีมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



รูปที่ 2.12 ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์ซึ่งจะได้รับแรงดันไบอัสพร้อมกับมีแสงตกกระทบ



บทที่ 3

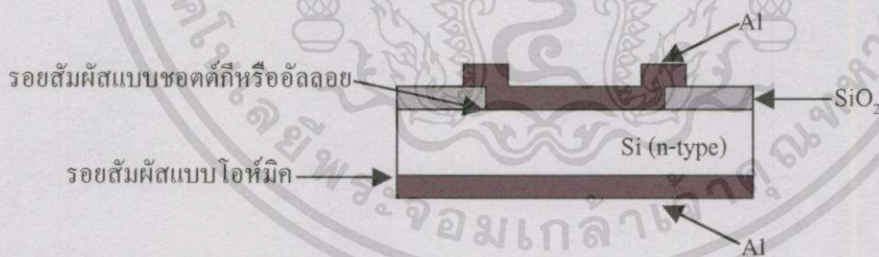
กระบวนการสร้างและการทดลอง

การออกแบบและกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al สามารถที่จะแบ่งได้ออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

3.1 การออกแบบและกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น

3.1.1 การออกแบบรอยสัมผัส

การออกแบบและการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัสจากอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น จากรูปที่ 3.1 แผ่นซิลิคอน ชนิดเอ็น หนา 100 ความต้านทาน $25 \Omega\text{cm}$ โดยทั่วไปบริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจะผ่านการขัดมันและบริเวณผิวด้านหลังแผ่นจะผ่านการขัดแบบหยาบ จากนั้นนั้นสร้างชั้นอะลูมิเนียมบริเวณผิวด้านหน้าและผิวด้านหลัง จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปขึ้นเตอร์ริง หลังจากขึ้นเตอร์ริงแล้วรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและบริเวณผิวด้านหน้าของแผ่นซิลิคอน ชนิดเอ็น ซึ่งผ่านการขัดแบบขัดมันจะได้รอยสัมผัสแบบขอตต์กีหรืออัลลอย รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและด้านหลังของแผ่นซิลิคอน ซึ่งผ่านการขัดแบบหยาบ หลังจากขึ้นเตอร์ริงแล้วจะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น

ในการออกแบบขนาดพื้นที่รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น ได้กำหนดความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสเท่ากับ 100 pF และนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.1) ซึ่งทำให้ได้พื้นที่รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น เท่ากับ $54 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$

$$A = C_j \left[\frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon_S N_D} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดย A คือ พื้นที่ของรอยสัมผัส
 C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส (Junction Capacitance)
 V_{bi} คือ แรงดันศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in Voltage)
 V คือ แรงดันไบอัสที่ให้กับรอยสัมผัส
 q คือ ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
 N_D คือ ความหนาแน่นของสารเจืออะตอมผู้ให้
 ϵ_s คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ

3.1.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัส

กระบวนการสร้างรอยสัมผัส เป็นการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัสเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่จะใช้ในกระบวนการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตักและอัลลอยสำหรับโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์คั้นแบบทั้งหมด 2 มาส์ค ด้วยกันซึ่งจะใช้สำหรับกระบวนการสร้างดังต่อไปนี้

มาส์คที่ I ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วอะลูมิเนียม

มาส์คที่ II ใช้สำหรับสร้างลวดลายอะลูมิเนียม

โดยมีลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

1. การทำความสะอาดผิวซิลิกอนเบื้องต้น

- ทำความสะอาดผิวน้ำด้วยน้ำบริสุทธิ์ (De-ionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic Cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าแผ่นผลึกด้วยกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน (Trichloethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

เพื่อทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ให้มีความหนาประมาณ 5000 Å ในการทำออกซิเดชันนำแผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 °C

เงื่อนไขและขั้นตอนกระบวนการสร้าง

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.1 ลิตร/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที

3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี 1

ใช้กระจกมาส์คต้นแบบสำหรับการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ออกบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัสอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่าสปินเนอร์ (Spinner) แล้วนำไปอบให้แห้ง จึงนำไปทำการถ่ายภาพกระจกต้นแบบมาส์คที่ I

ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 - 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ Waycoat โดยใช้เครื่องสปินเนอร์ความเร็ว 5000 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรก ให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90 - 100°C เป็นเวลา 25 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาส์คที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask Aligner ซึ่งจะให้แสงอัลตราไวโอเล็ตออกมา แหล่งกำเนิดแสง คือ หลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ เป็นเวลา 12 วินาที
- การล้างภาพ จุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที
จุ่มในน้ำยาทำความสะอาด (Isopropyl) 3 ครั้ง ครั้งละ 30 วินาที
ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ให้นำแผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90 - 100°C เป็นเวลา 20-30 นาที

4. การใช้สารเคมีกัดซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 1000 Å/นาที่

ขั้นตอนการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลาย Buffer เป็นเวลาประมาณ 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. การลอกชั้นสารไวแสง Waycoat

สารไวแสงที่ถูกแสงและยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโรเอททีดิน เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

6. กระบวนการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ

ในการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมโดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) ทำการเคลือบแผ่นซิลิคอนด้วยอะลูมิเนียมที่ความดันประมาณ 1.6×10^{-6} Torr.

7. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

ในกระจกมาสค์ที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของอะลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ

มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ $100^{\circ}C$ เป็นเวลา 15-20 นาที

- เคลื่อนย้ายยาไวแสง ชนิดบวก AZ โดยใช้เครื่องสปินเนอร์ ขนาด 5000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาไวแสงแห้งที่อุณหภูมิ 85-90°C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกดันแบบมาส์ค II ด้วยอุปกรณ์ Mask Aligner เป็นเวลา 12 วินาที
- การล้างภาพ จุ่มในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้ง ครั้งละ 30 วินาที
ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90°C เป็นเวลา 20-30 นาที

8. การกัดชั้นอะลูมิเนียม

หลัก

สารละลายที่ใช้ละลายชั้นอะลูมิเนียมได้แก่ สารละลายผสมซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็น
มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- จุ่มแผ่นซิลิคอนที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50°C เป็นเวลาประมาณ 10-20 วินาที
- ล้างในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

9. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก AZ

มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- จุ่มแผ่นซิลิคอนลงในอะซิโตน เป็นเวลาประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

10. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้านหลัง

มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที
- ทาน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ ที่ด้านหน้าของแผ่น
- อบให้น้ำยาไวแสงแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 85-90°C เป็นเวลา 10 นาที
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 12 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- จากนั้นทำการลอกชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ เหมือนขั้นตอนที่ 9

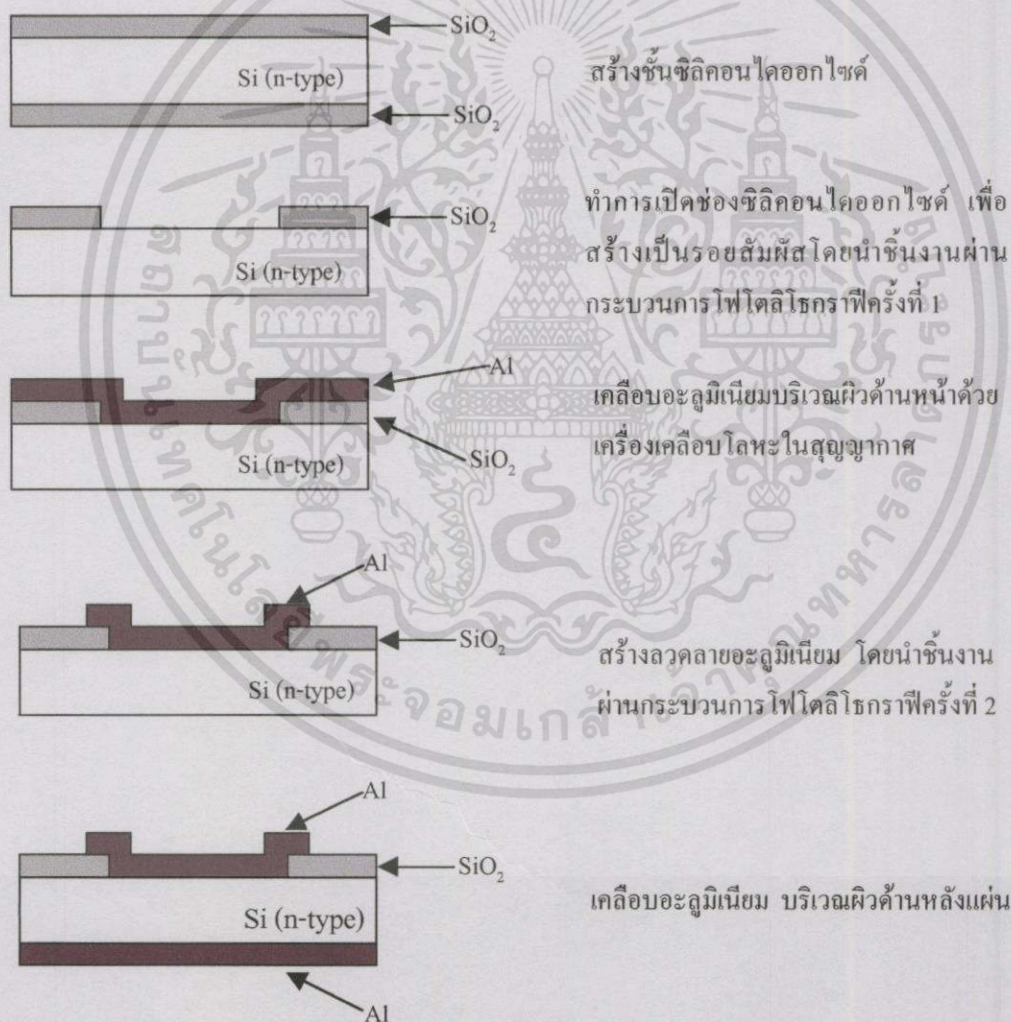
11. การเคลือบชั้นด้านหลังแผ่นซิลิคอน

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่น จะมีรายละเอียดเหมือนกับขั้นตอนที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. กระบวนการซินเตอร์ริง

กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering) เป็นกระบวนการที่ทำให้การสัมผัสของ อะลูมิเนียมและซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ โดยปกติแล้วจะนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ใน บรรยากาศของไนโตรเจนที่มี อัตราการไหล 0.7 ลิตร/นาที่ เป็นเวลา 12 นาที ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ ปกติคือ 500°C แต่สำหรับการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัส จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ ในการซินเตอร์ริง จะเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่เป็นตัวกำหนดว่ารอยสัมผัสที่ได้จะเป็นรอยสัมผัส แบบขดคดกหรืออัลลอย ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนนี้จึงทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 100°C, 200°C, 300°C, 400°C และ 500°C ตามลำดับ จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าต่อไป



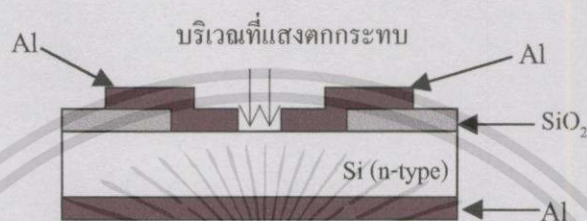
รูปที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบและกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

3.2.1 การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

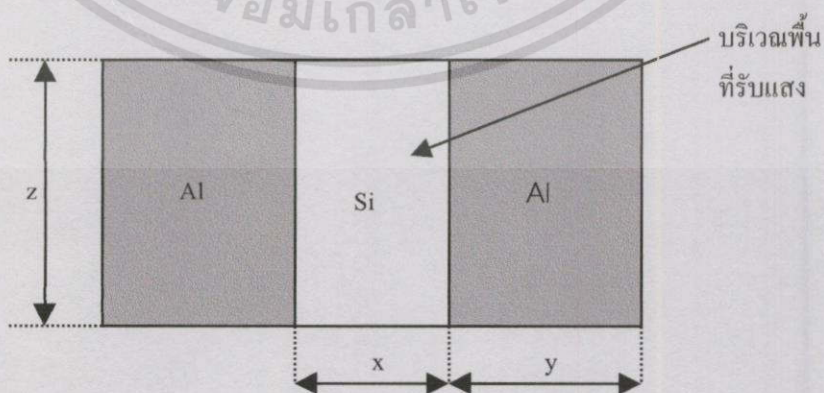
โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น ระบาย (100) ความต้านทาน 25 Ωcm จำนวน 2 รอยสัมผัส และมีพื้นที่รับแสงอยู่ระหว่างขั้วสัมผัส โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นตัวกำหนดพื้นที่รับแสง บริเวณด้านหลังแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมเพื่อสร้างเป็นเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

ในการออกแบบนี้สามารถแบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ขั้วสัมผัสโลหะที่เป็นอะลูมิเนียม และพื้นที่รับแสงที่เป็นซิลิคอน ชนิดเอ็น

การออกแบบบริเวณที่เป็นพื้นที่ของขั้วสัมผัสแต่ละด้านจะถูกกำหนดให้มีพื้นที่ของรอยสัมผัสหนึ่งด้านเท่ากับพื้นที่รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น ในหัวข้อที่ 3.1 ดังนั้นรายละเอียดในการคำนวณพื้นที่จะเหมือนกับการออกแบบและการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัสในหัวข้อที่ 3.1.1 ซึ่งพื้นที่ที่เป็นขั้วสัมผัสของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al จะมีขนาดเท่ากับพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัส 1 รอยสัมผัสซึ่งมีพื้นที่เท่ากับ $54 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$



รูปที่ 3.4 การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ x คือ ความยาวของพื้นที่รับแสงหรือระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส

y คือ ความยาวของขั้วสัมผัส

z คือ ความกว้างของพื้นที่รับแสงหรือความกว้างของขั้วสัมผัส

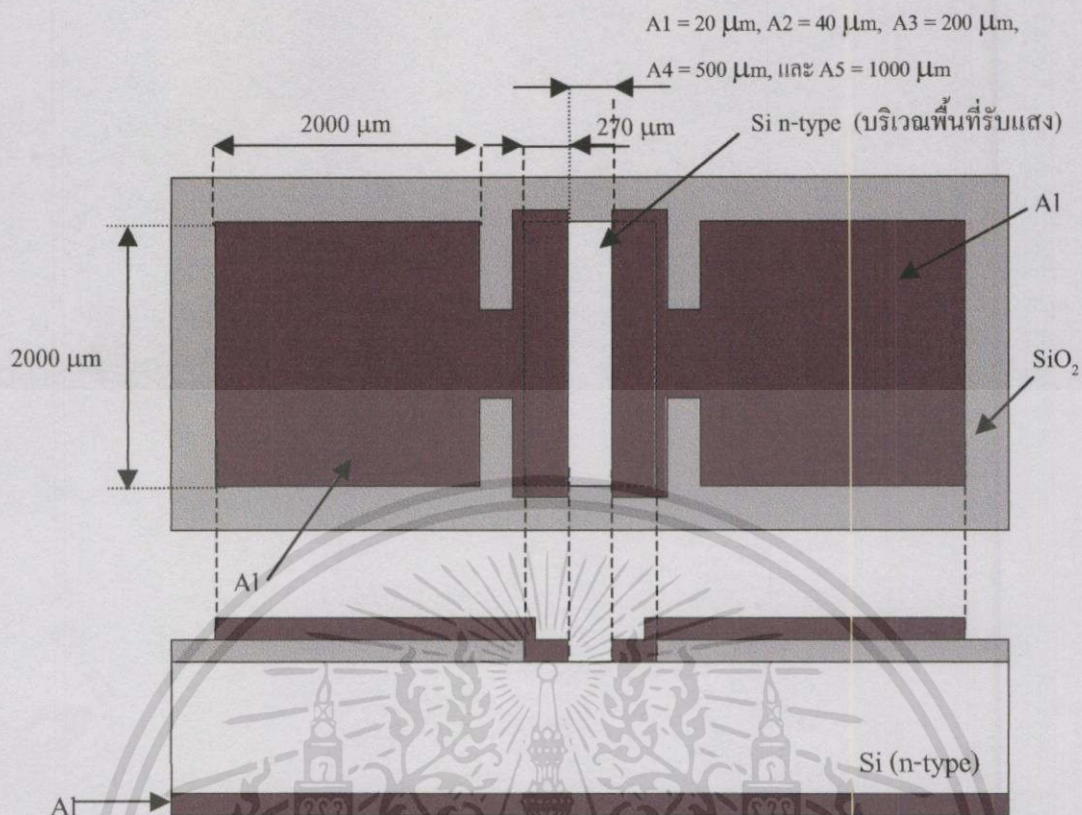
ส่วนพื้นที่รับแสงมีความกว้างเท่ากับ $2000 \mu\text{m}$ และ $1000 \mu\text{m}$ จากรูปที่ 3.4 ก็คือระยะ z ระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส โดยที่ความกว้างของพื้นที่รับแสง $2000 \mu\text{m}$ จะมีระยะ x หรือระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสเท่ากับ $20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ และ $1000 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ที่ความกว้างของพื้นที่รับแสงเท่ากับ $1000 \mu\text{m}$ จะมีระยะ x เท่ากับ $40 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$ และ $1000 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

การกำหนดให้พื้นที่ของรอยสัมผัสทั้งสองด้านเท่ากัน โดยแต่ละด้านมีพื้นที่เท่ากับ $54 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ ความกว้างของพื้นที่รับแสง ซึ่งก็คือ ความกว้างด้านหนึ่งของขั้วสัมผัส จากรูปที่ 3.4 คือค่า y โดยที่ ความกว้างของขั้วสัมผัส $2000 \mu\text{m}$ จะมีความยาวของพื้นที่รับแสง $270 \mu\text{m}$ และ ความกว้างของขั้วสัมผัส $1000 \mu\text{m}$ จะมีความยาวของขั้วสัมผัส $540 \mu\text{m}$ และได้กำหนดให้ A1, A2 และ A3 มีพื้นที่รับแสงเท่ากันกับ B1, B2 และ B3 ตามลำดับ แต่จะมีความกว้างและความยาวของพื้นที่รับแสงแตกต่างกัน ดังตาราง 3.1

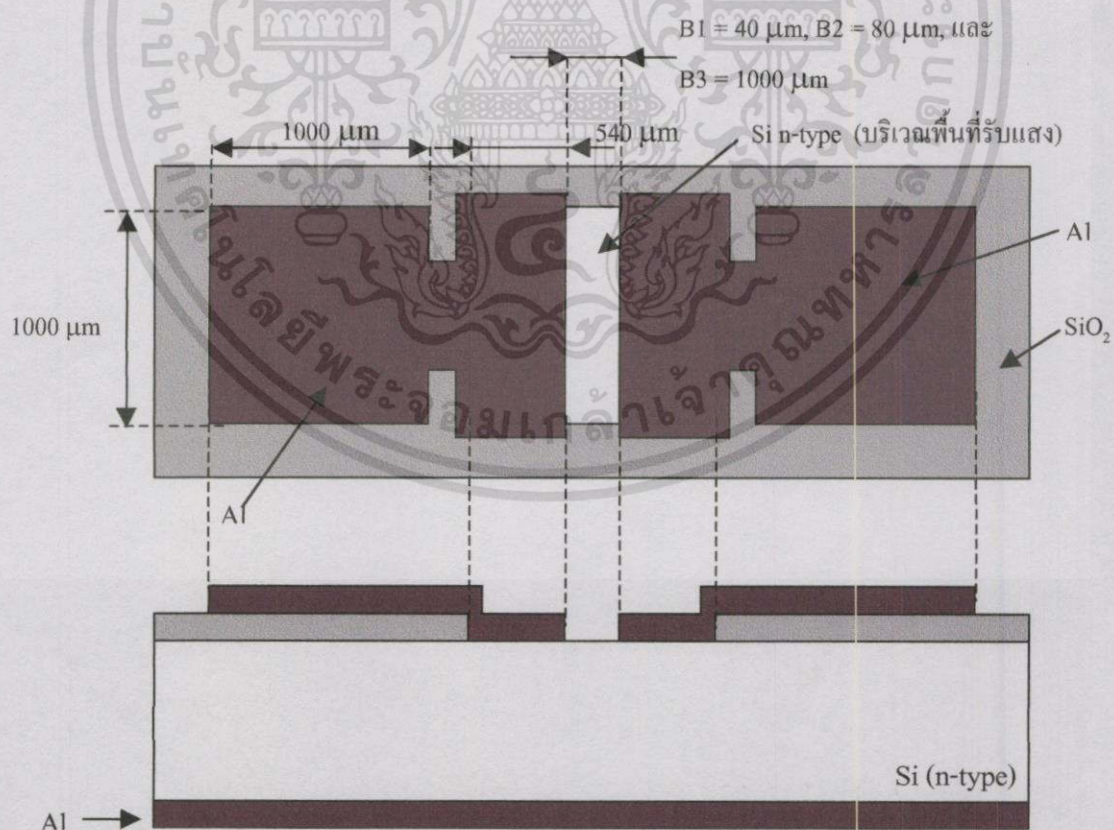
ตาราง 3.1 ขนาดของพื้นที่รับแสงและขนาดพื้นที่ขั้วสัมผัส

หมายเลข	ขนาด x (μm)	ขนาด y (μm)	ขนาด z (μm)
A1	20	270	2000
A2	40	270	2000
A3	200	270	2000
A4	500	270	2000
A5	1000	270	2000
B1	40	540	1000
B2	80	540	1000
B3	400	540	1000

จากตารางที่ 3.1 A1 ถึง A5 จะต่อกับแพด (Pad) ขนาด $2000 \mu\text{m} \times 2000 \mu\text{m}$ และ B1 ถึง B3 จะต่อกับแพด ขนาด $1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$



รูปที่ 3.5 ลักษณะทวิภาคของอะลูมิเนียม A1, A2, A3 A4 และ A5



รูปที่ 3.6 ลักษณะทวิภาคของอะลูมิเนียม B1, B2 และ B3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

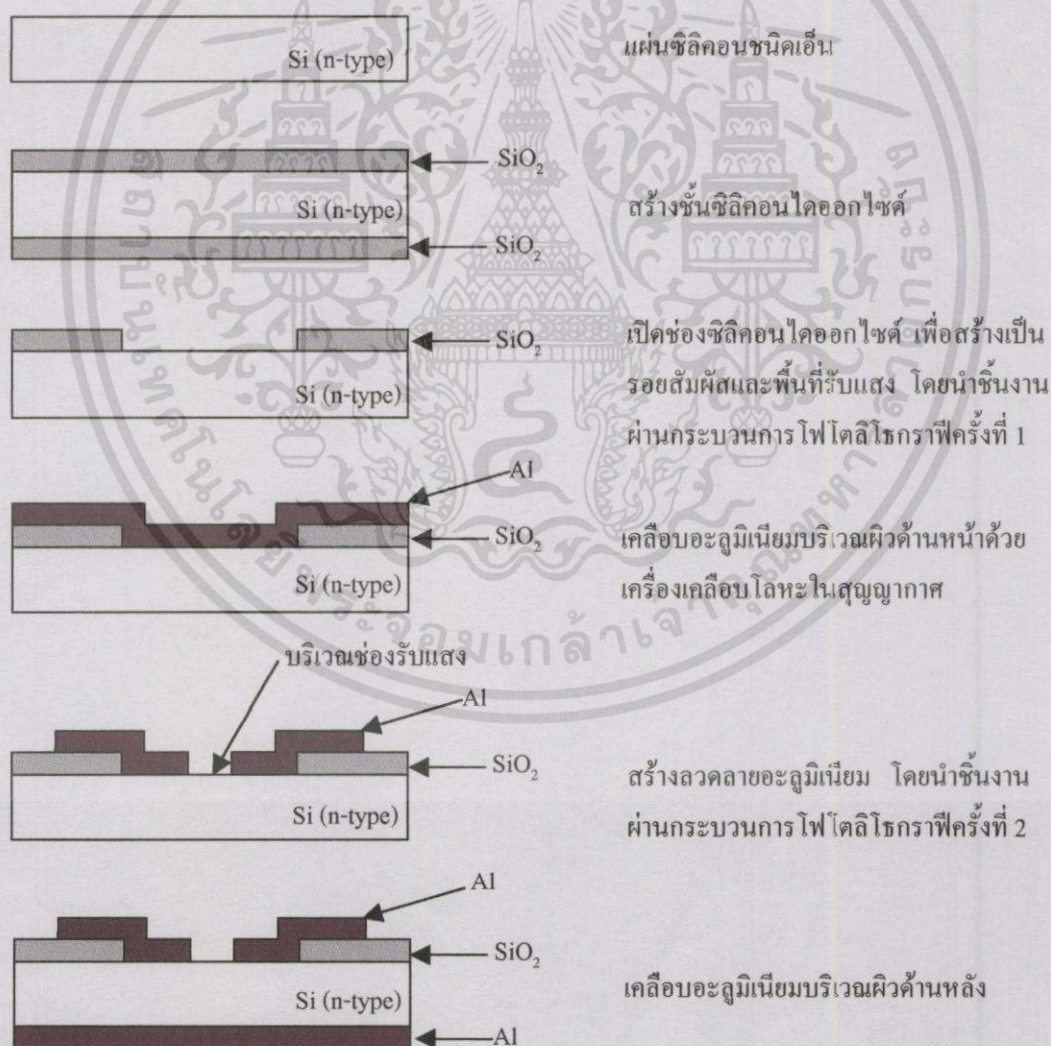
3.2.2 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์คั้นแบบทั้งหมด 2 มาส์ค ด้วยกันซึ่งจะใช้สำหรับกระบวนการสร้างดังต่อไปนี้

มาส์คที่ I ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วอะลูมิเนียมและบริเวณที่เป็นพื้นที่รับแสง

มาส์คที่ II ใช้สำหรับสร้างลวดลายอะลูมิเนียม

สำหรับลำดับขั้นตอนการสร้างจะเหมือนกับกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น โดยเปลี่ยนมาส์คั้นแบบมาเป็นมาส์คั้นแบบสำหรับสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al และในขั้นตอนของการซินเตอร์ริงจะเปลี่ยนเป็นการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ริงได้จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น



รูปที่ 3.7 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

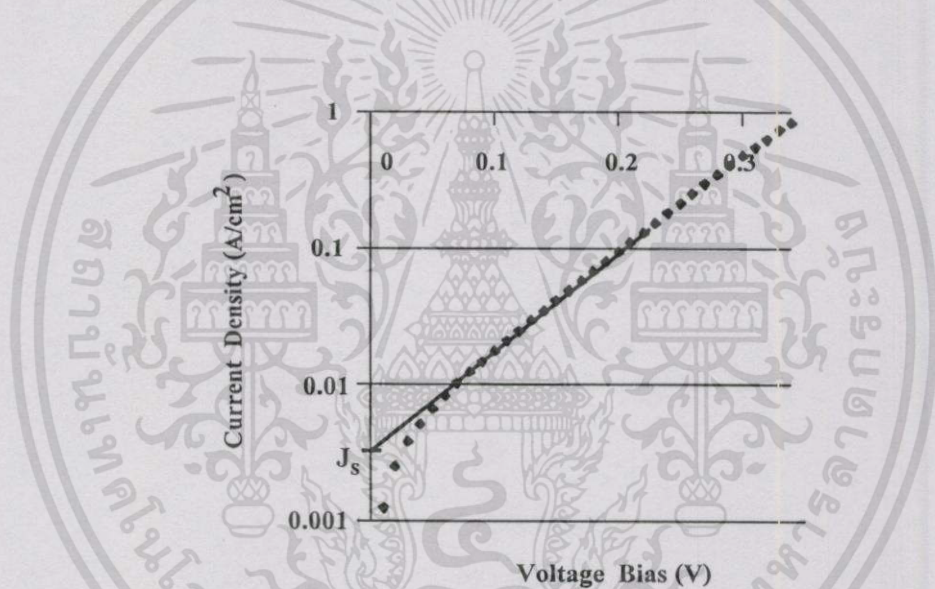
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัส

เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงมีผลกับค่าความสูงของกำแพงศักย์ ดังนั้นการทดลองจึงทำการซินเตอร์ริงชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้ววัดค่าความสูงกำแพงศักย์ การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากการวัดกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัส [2]

3.3.1 การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน

ในการวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน โดยการนำค่ากระแส-แรงดันที่ของรอยสัมผัสที่วัดได้ นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส-แรงดันเพื่อหาความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_s โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.2) ซึ่งจากสมการที่ (3.2) สามารถหาค่า J_s ขณะที่แรงดันไบอัสภายนอกเท่ากับศูนย์โวลต์



รูปที่ 3.8 การหาค่า J_s จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส

$$J = J_s \left(\frac{qV}{e kT} - 1 \right) \quad (3.2)$$

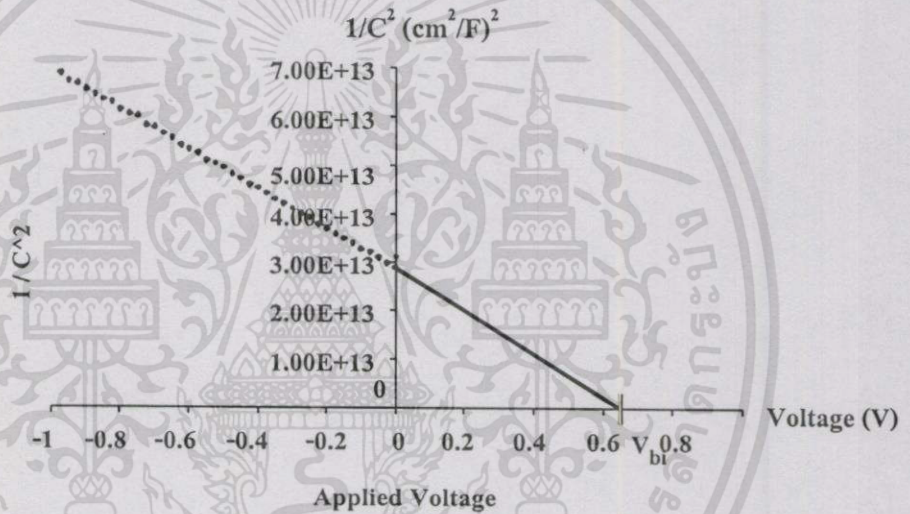
จากนั้นจึงนำค่า J_s ไปแทนค่าในสมการที่ (3.3) เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์

$$\phi_{b_n} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A_n * T^2}{J_s} \right) \quad (3.3)$$

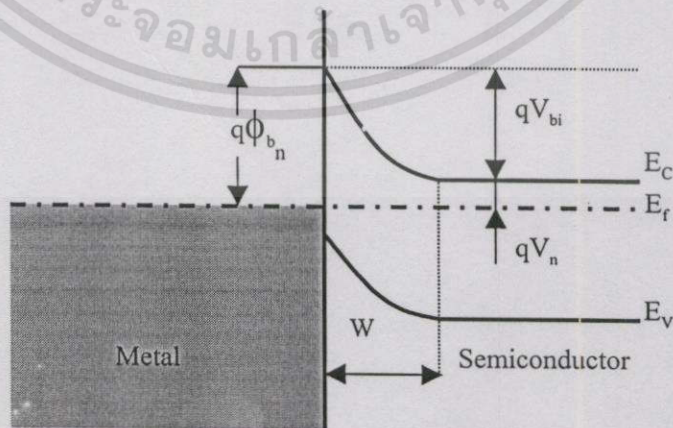
3.3.2 การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส

การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส โดยนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดัน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.4) โดยจะพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 3.10 และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.4) สามารถหาศักย์ไฟฟ้าภายใน V_{bi} ขณะที่ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสเท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 3.9

$$\left(\frac{1}{C}\right)^2 = 2 \left(\frac{V_{bi} - V}{2\epsilon_s N_D} \right) \tag{3.4}$$



รูปที่ 3.9 การหาค่า V_{bi} จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันของรอยสัมผัส



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ $\phi_{bn} = V_{bi} + V_n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า V_{bi} ไปแทนค่าในสมการที่ (3.4) และ V_n จะได้จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) ค่า $d(1/C^2)/dV$ ในสมการที่ (3.7) ได้จากความชันของกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ แรงดันไบอัสในรูปที่ 3.10

จากรูปที่ 3.10 จะได้

$$\phi_{bn} = V_{bi} + V_n \quad (3.5)$$

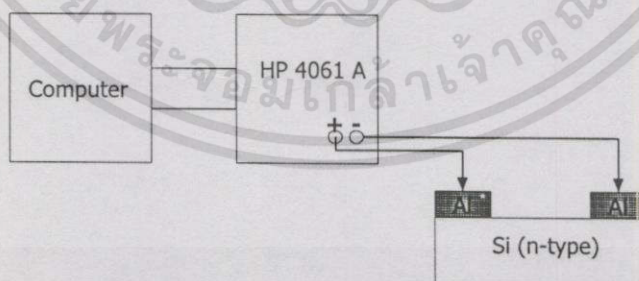
$$V_n = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{N_D} \quad (3.6)$$

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[\frac{-1}{d(1/C^2)/dv} \right] \quad (3.7)$$

โดย V_{bi} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายใน
 V_n คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อสาร
 N_c คือ ความหนาแน่นสถานะพลังงานที่แถบความนำ
 N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้
 ϵ_s คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิคอน

3.4 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al

3.4.1 การศึกษาคุณสมบัติกระแส-แรงดัน และ ค่าความจุไฟฟ้า

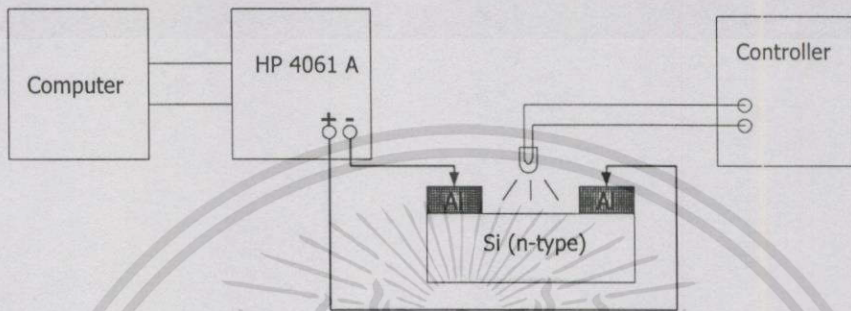


รูปที่ 3.11 การวัดกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 ในการศึกษาหัวข้อนี้ จะใช้การวัดจากเครื่อง HP4061A ซึ่งต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการควบคุมเครื่อง HP4061A และเก็บข้อมูล โดยเครื่อง HP4061A จะให้แรงดันไบอัสกับชิ้นงานและวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือค่าความจุไฟฟ้า

3.4.2 การศึกษากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al เมื่อได้รับแสง



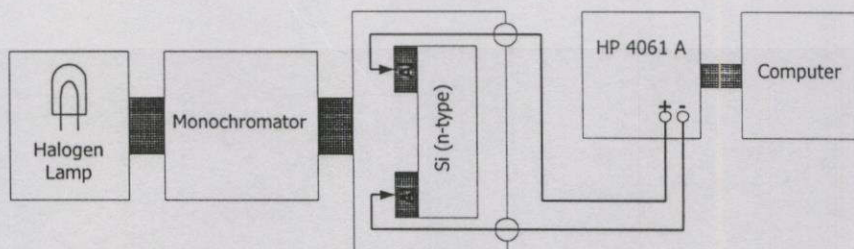
รูปที่ 3.12 การวัดกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al เมื่อได้รับแสง

การศึกษาในหัวข้อนี้ จากรูปที่ 3.12 ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฮาโลเจน (Halogen Lamp) ขนาด 150 W และมีชุดควบคุมสำหรับปรับความเข้มแสง ฉายแสงลงบนชิ้นงานที่ต่ออยู่กับเครื่อง HP4061A โดยจะฉายแสงที่ความเข้มต่าง ๆ กัน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้น

3.4.3 การศึกษาผลของพื้นที่รับแสงต่อกระแสโฟโตของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

ในหัวข้อนี้ จะพิจารณาจากผลการทดลองในหัวข้อ 3.4.2 โดยเปรียบเทียบกับพื้นที่รับแสงที่ได้ออกแบบไว้

3.4.4 การศึกษาการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al



รูปที่ 3.13 การวัดการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

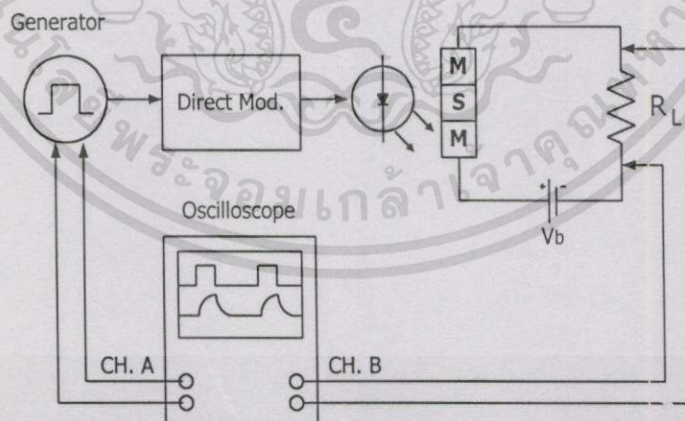
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อนี้จะศึกษาการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al โดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฮาโลเจนส่องผ่านเครื่อง Monochromator เพื่อกำหนดความยาวคลื่นที่จะออกไปยังโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ซึ่งต่ออยู่กับเครื่องวัด HP4061A ซึ่งจะเป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสโฟโตที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.13 โดยเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสจากเครื่องวัด Spectrophotometer

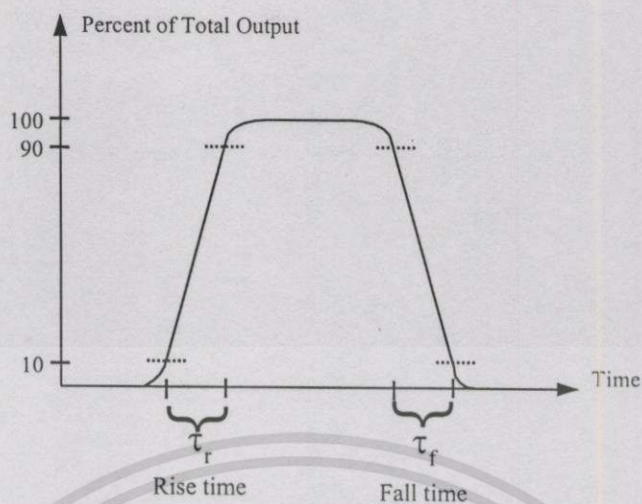
3.4.5 การศึกษาการตอบสนองทางเวลาของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al

ในการศึกษาหัวข้อนี้จะป้อนพัลส์แบบสี่เหลี่ยม (Square Wave) แล้วมอดูเลตเข้ากับเลเซอร์ไดโอด แล้วฉายแสงลงบนชิ้นงานซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายและ R_L มีออสซิลโลสโคปต่อเข้ากับเอาต์พุตของเจเนอเรเตอร์ และ เอาต์พุตที่ได้จาก R_L แล้วนำสัญญาณที่วัดได้มาเปรียบเทียบ เพื่อคำนวณหาค่าช่วงเวลาขาขึ้น τ_r (Rise Time) และช่วงเวลาขาลง τ_f (Fall Time) [1] ดังรูปที่ 4.14 โดยค่าช่วงเวลาขาขึ้นพิจารณาจากระดับสัญญาณ 10% ถึง 90% ของระดับสัญญาณสูงสุด และช่วงเวลาขาลงพิจารณาจากระดับสัญญาณ 90% ถึง 10% ถึงระดับสัญญาณต่ำสุด สามารถหาการตอบสนองทางความถี่โดยคำนวณจากสมการที่ (3.8) ซึ่ง f_c ความถี่ตัด (Cutoff Frequency) หรือค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของอุปกรณ์

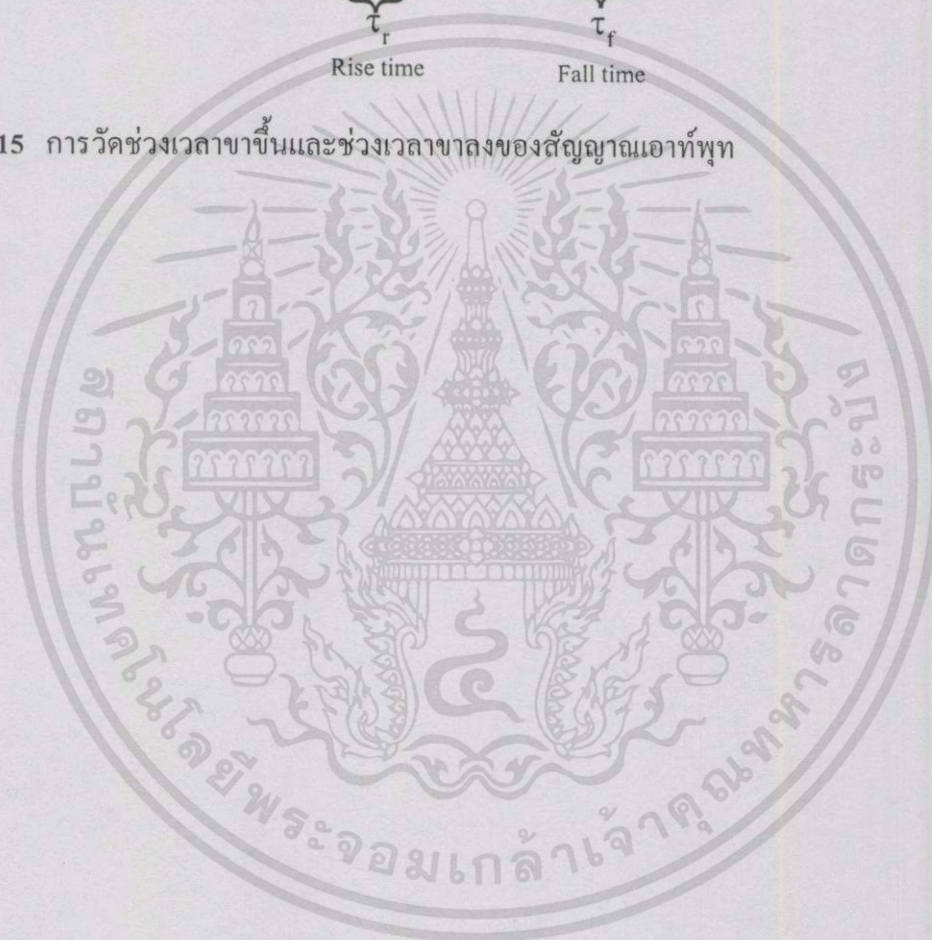
$$\tau_r \approx 0.35 / f_c \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.14 การวัดการตอบสนองทางเวลาของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al



รูปที่ 3.15 การวัดช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงของสัญญาณเอ๊าท์พุท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

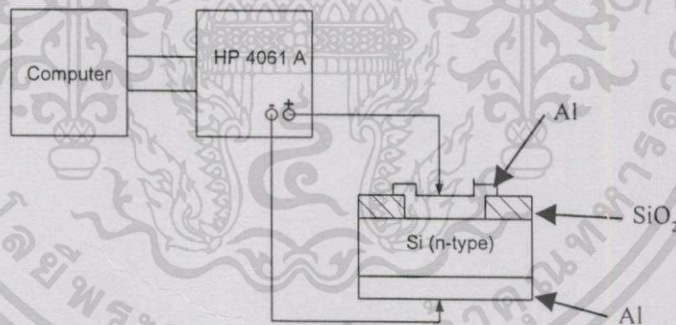
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น

โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al โดยขั้นตอนกระบวนการสร้างแล้ว เงื่อนไขที่สำคัญในการสร้างโฟโตไดโอดชนิดนี้ คือ ขั้นตอนของการให้อุณหภูมิในการซินเตอร์ริงกับรอยสัมผัสของโฟโตไดโอด เนื่องรอยสัมผัสอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็นสามารถที่จะสร้างให้เป็นรอยสัมผัสแบบขอตักหรืออัลลอย ดังนั้นจึงศึกษาถึงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการซินเตอร์ริง

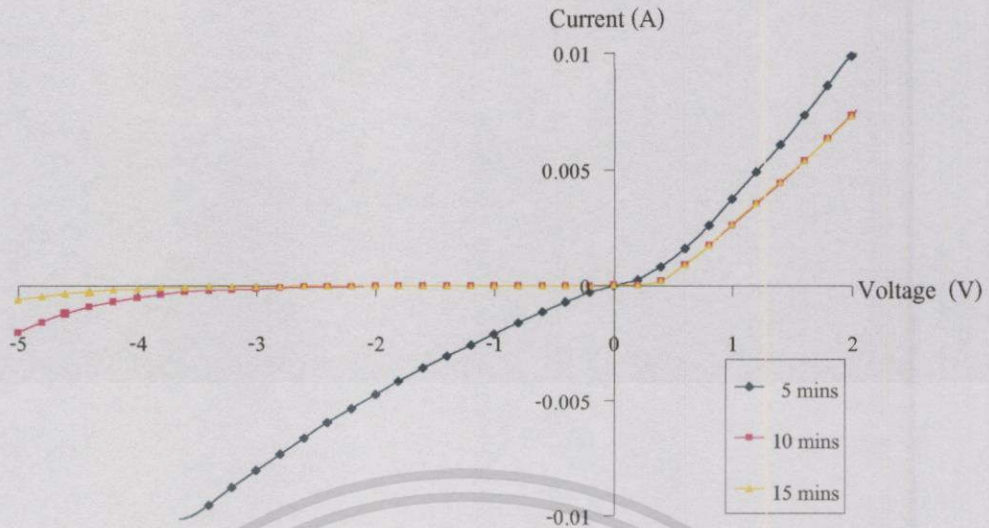
4.1.1 ผลการทดลองเวลาสำหรับการซินเตอร์ริงรอยสัมผัส

หลังจากได้สร้างชิ้นงานตามหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาวัดหาความต้านทานของกระแสและแรงดัน และ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส ซึ่งจะได้อ้างรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

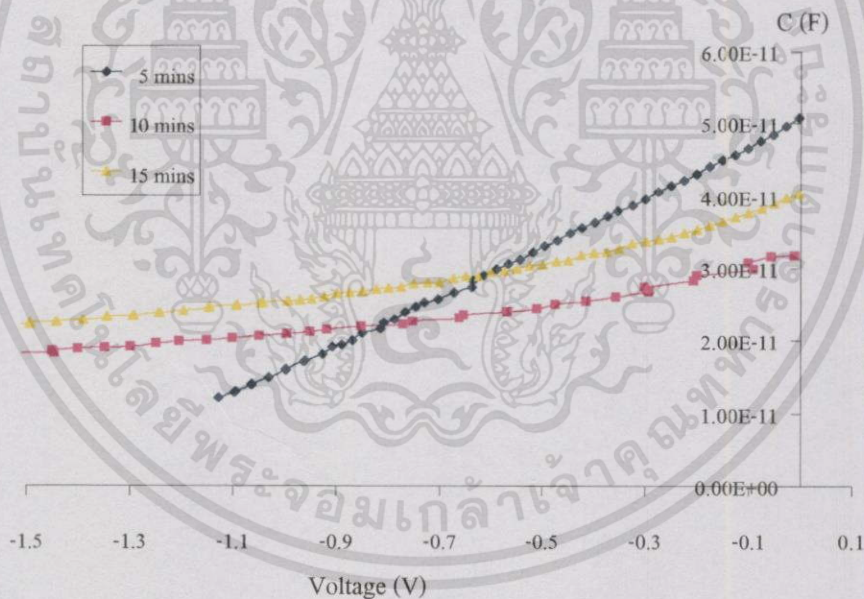


รูปที่ 4.1 การวัดกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น

จากรูปที่ 4.2 ขณะรอยสัมผัสได้รับแรงดันไบอัสตรงที่เวลา 5 นาทีจะมีกระแสไหลมากกว่าที่เวลา 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ ที่เวลา 10 นาที และ 15 นาที จะมีกระแสไหลขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงเท่ากัน ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับที่เวลา 5 นาทีจะมีกระแสรั่วไหลมากที่สุดและจะมีกระแสรั่วไหลน้อยลงเมื่อเวลาของการซินเตอร์ริงเพิ่มขึ้น คือ 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานไปวัดหาค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3

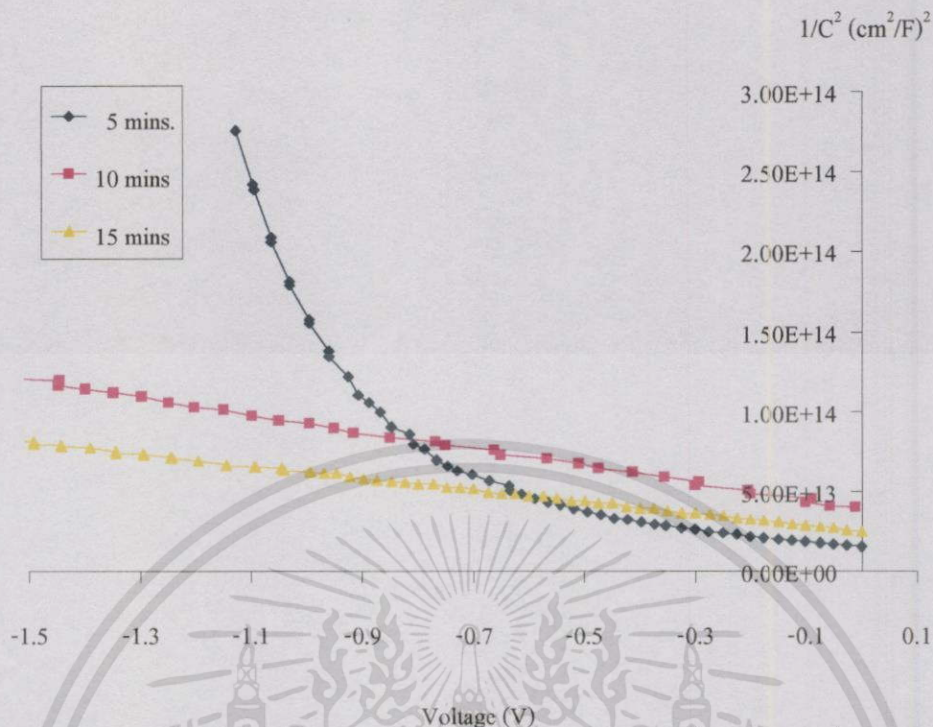


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ ที่เวลา 5 นาที ค่าความจุไฟฟ้าจะมีลักษณะเส้นตรงและลดลงตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มขึ้น และที่เวลา 10 นาที ความจุไฟฟ้าจะมีลักษณะลดลงตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มขึ้นแต่ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะไม่สม่ำเสมอ และที่เวลา 15 นาที ความจุไฟฟ้าจะมีลักษณะลดลงตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มขึ้นและมีลักษณะที่สม่ำเสมอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ

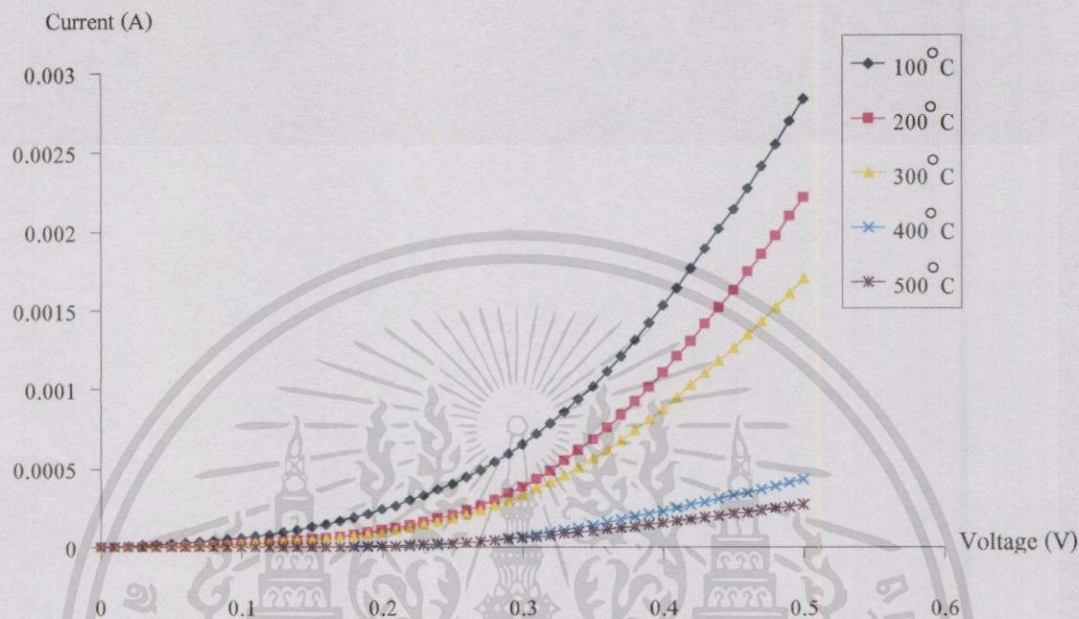
ถ้านำค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัส ตามสมการที่ (3.4) ลักษณะกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งเมื่อนำค่าความจุไฟฟ้าในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้ารอยสัมผัสซึ่งซินเตอร์ริงที่เวลาต่าง ๆ กันมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัส ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ก็จะพบว่าที่เวลา 5 นาที จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงแรกและจะโค้งขึ้นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ที่เวลา 10 นาที จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่ค่าที่ได้จะไม่ค่อยสม่ำเสมอ และที่เวลาที่ 15 นาที จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าสม่ำเสมอมากที่สุด

จากผลการทดลองชิ้นงานซึ่งซินเตอร์ริงที่เวลา 15 นาที รอยสัมผัสจะให้คุณสมบัติทางกระแส-แรงดัน โดยจะให้กระแสรัวในขณะที่ไบอัสกลับน้อยที่สุด และเมื่อนำค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสไปหาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัส ตามสมการที่ (3.4) ลักษณะกราฟที่ได้จะมีความเป็นเส้นตรงมากที่สุด ดังนั้น เวลาที่เหมาะสมในการซินเตอร์ริงคือ 15 นาที

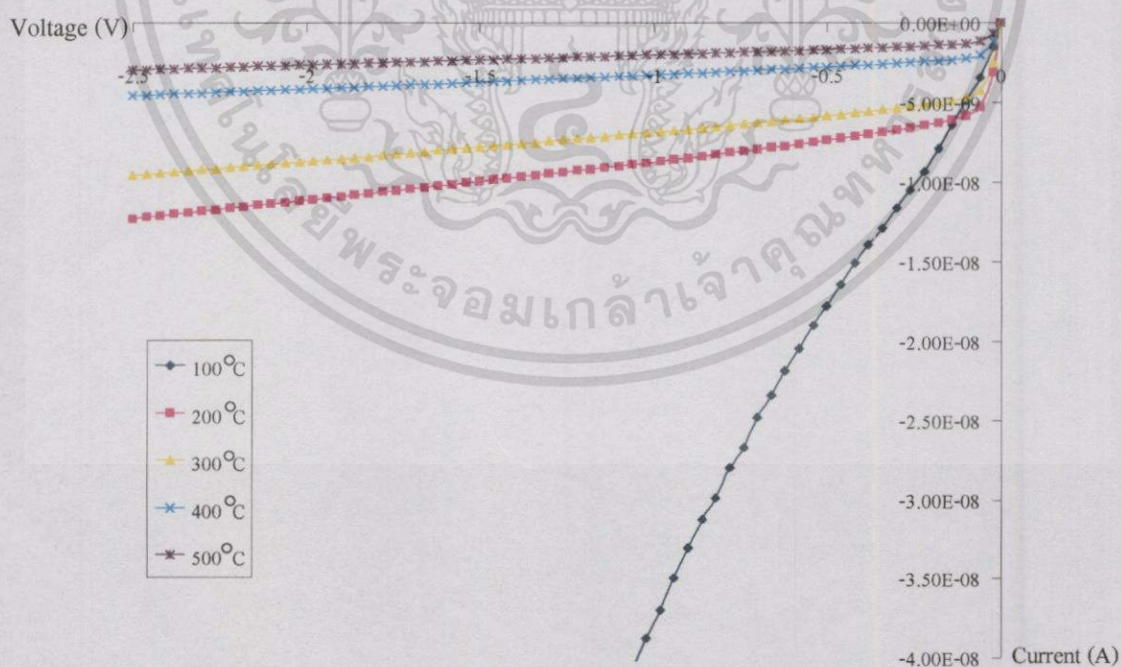
ในการทดลองต่อไปซึ่งเป็นการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการซินเตอร์ริงโดยซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C และ 500°C ตามลำดับ และใช้เวลาในการซินเตอร์ริงเป็นเวลา 15 นาที

4.1.2 ผลการทดลองคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ขึ้นเตอร้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อรอยสัมผัสได้ผ่านการขึ้นเตอร้งที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C และ 500°C ตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที จึงนำมาวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับ ดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ขึ้นเตอร้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ขึ้นเตอร้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของกระแสของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ

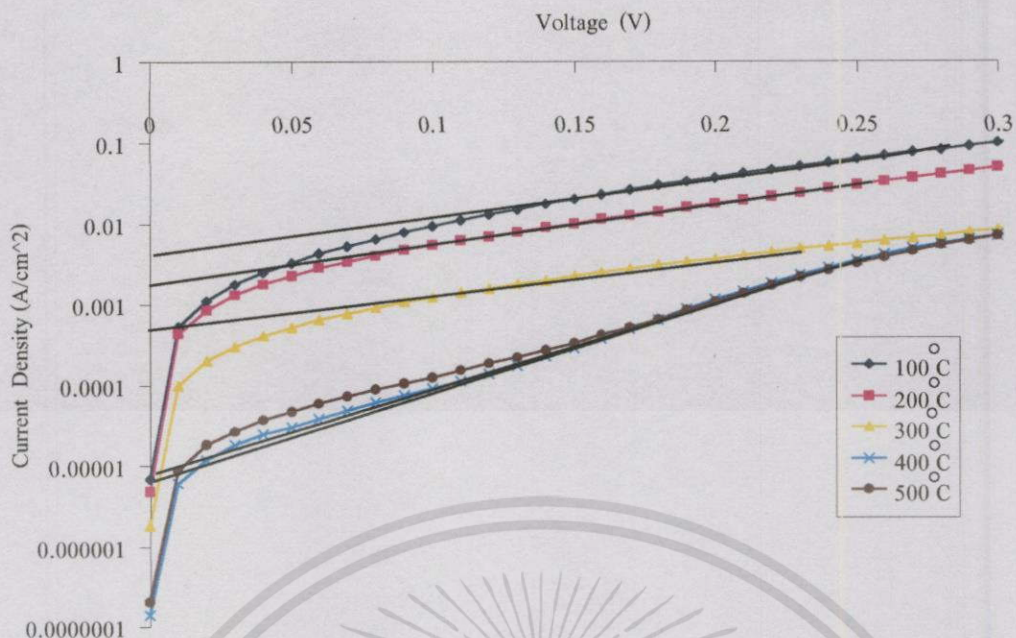
อุณหภูมิของการซินเตอร์ริง	กระแสขณะไบอัสตรง (0.4 V)	กระแสรั่วไหลขณะ ไบอัสกลับ (-1V)
100°C	1.526 mA	-40.9 nA
200 °C	1.106 mA	-8.91 nA
300°C	0.874 mA	-7.01 nA
400°C	0.23 mA	-2.34 nA
500°C	0.156 mA	-2.08 nA

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป เมื่อผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากรูปที่ 4.5 รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิด เอ็น ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 100°C จะให้กระแสไหลในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงมากที่สุดและกระแสที่ไหลจะน้อยลงเมื่ออุณหภูมิที่ซินเตอร์ริงมีค่าสูงขึ้นตามลำดับคือ 200 °C, 300°C, 400°C และที่อุณหภูมิ 500°C จะมีกระแสไหลน้อยที่สุด ในขณะที่เดียวกันเมื่อรอยสัมผัสได้รับแรงดันไบอัสกลับที่อุณหภูมิ 500°C ก็จะมีกระแสรั่วน้อยที่สุดและกระแสรั่วจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับเมื่ออุณหภูมิของการซินเตอร์ริงมีค่าลดลง คือ 400°C, 300°C, 200 °C และที่อุณหภูมิ 100°C จะมีกระแสรั่วไหลมากที่สุด ดังรูปที่ 4.6

จากนั้นนำค่ากระแส-แรงดันของรอยสัมผัสซึ่งซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน มาหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส

4.1.3 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากการวัดกระแส-แรงดัน

กระแส-แรงดันของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากรูปที่ 4.5 นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส-แรงดันดังรูปที่ 4.7 เพื่อหาค่า J_s ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ และนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.3) เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสดังตารางที่ 4.2



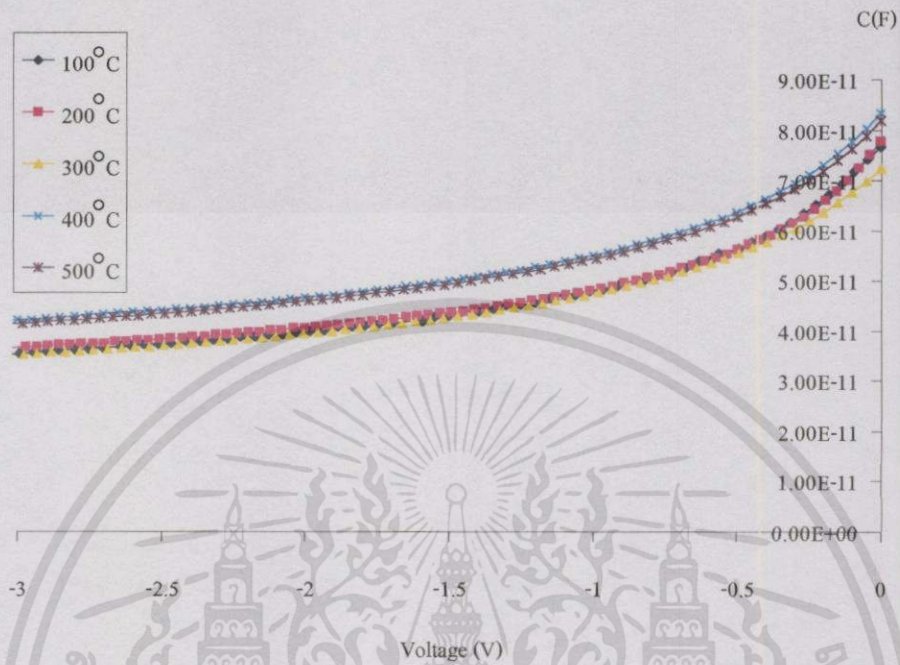
รูปที่ 4.7 คุณลักษณะระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของจากชิ้นงานที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดกระแส-แรงดัน

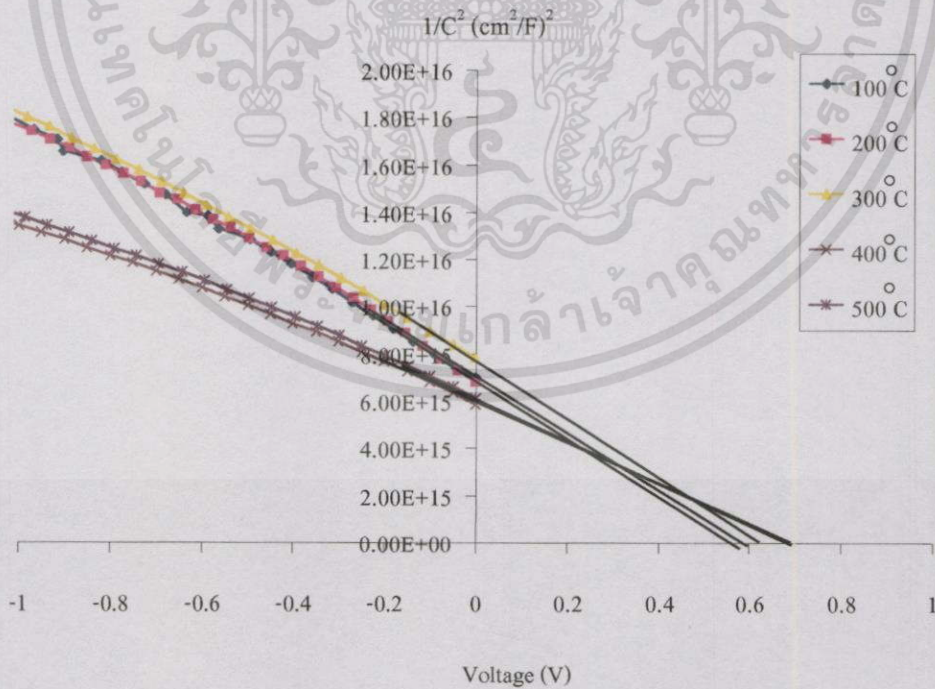
อุณหภูมิของการซินเตอร์ริง	ค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน(V)
100°C	0.59 V
200°C	0.60 V
300°C	0.61 V
400°C	0.72 V
500°C	0.72 V

จากตารางที่ 4.2 ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิของการซินเตอร์ริง แต่จะค่าใกล้เคียงกันในช่วง 100°C, 200 °C และ 300°C และจะมีค่าสูงขึ้นในช่วง 400°C และ 500°C เมื่อนำค่าความสูงของกำแพงศักย์จากตารางที่ 4.2 และความสัมพันธ์กระแสและแรงดันขณะที่รอยสัมผัสได้รับแรงดันไปอัสตรงจากรูปที่ 4.5 มาเปรียบเทียบกับกันก็จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิของการซินเตอร์ริงสูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าความสูงของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้กระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัสมีค่าลดลง

4.1.4 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันซึ่งได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากรอยสัมผัสซึ่งผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.8 ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อมีการไบอัสกลับสูงขึ้น จากนั้นจึงนำค่าความจุไฟฟ้าไปหาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัส เพื่อนำไปหาค่า V_{bi} และ V_n ซึ่งจะแทนค่าในสมการที่ (3.5) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ต่อไป

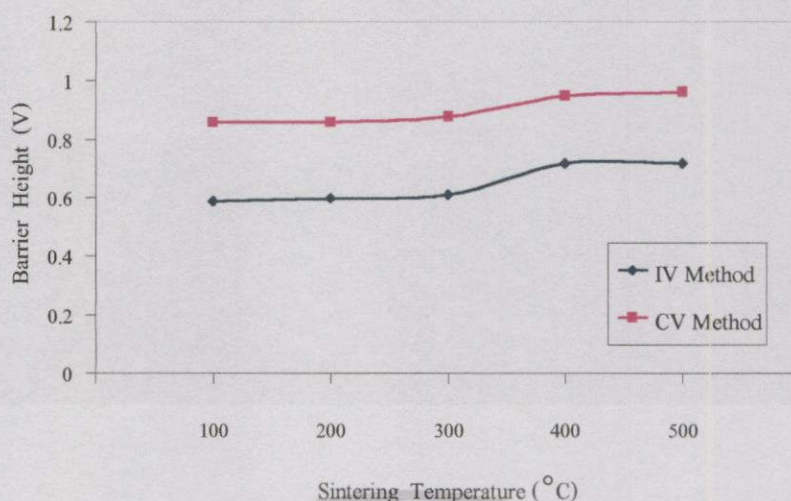
ตารางที่ 4.3 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส

อุณหภูมิของการซินเตอร์ริง	ค่าความสูงของกำแพงศักย์จากวัดค่าความจุไฟฟ้า (V)
100°C	0.86
200 °C	0.86
300°C	0.88
400°C	0.95
500°C	0.96

จากตารางที่ 4.3 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของการซินเตอร์ริงมีค่าสูงขึ้น แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 100°C, 200 °C และ 300°C และมีค่าสูงขึ้นในช่วง 400°C และ 500°C ซึ่งค่าที่ได้จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงเหมือนกับค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส

4.1.5 ค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน และ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส

เมื่อนำค่าความสูงของกำแพงศักย์จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากวัดกระแส-แรงดันและจากการวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์ ตามลำดับ มาหาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.10 จากการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ทั้ง 2 วิธี ค่าที่ได้จะมีความแตกต่างกัน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เหมือนกัน นั่นคือ ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงอุณหภูมิ 100°C, 200 °C และ 300°C แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400°C และ 500°C



รูปที่ 4.10 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ซึ่งวัดจากกระแส-แรงดันและวัดจากค่าความจุไฟฟ้าของ รอยสัมผัสที่ผ่านการซินเตอร์ริง ณ อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 ในช่วงอุณหภูมิ 400°C และ 500°C เป็นช่วงที่ค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่สูงขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 660°C ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิที่อยู่ใกล้กับจุดหลอมเหลว ทำให้อะลูมิเนียมสามารถแพร่ลงไปในซิลิคอน ชนิดเอ็น ทำให้รอยสัมผัสที่ได้เป็นรอยสัมผัสแบบอัดลอย และจากรูปที่ 4.6 ขณะที่รอยสัมผัสได้รับแรงดันไบอัสกลับ ที่อุณหภูมิ 500°C จะมีกระแสรั่วไหลน้อยกว่าเมื่อเทียบกระแสรั่วของอุณหภูมิที่ 400°C ดังนั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงสำหรับการสร้างรอยสัมผัสแบบอัดลอย คือ 500°C

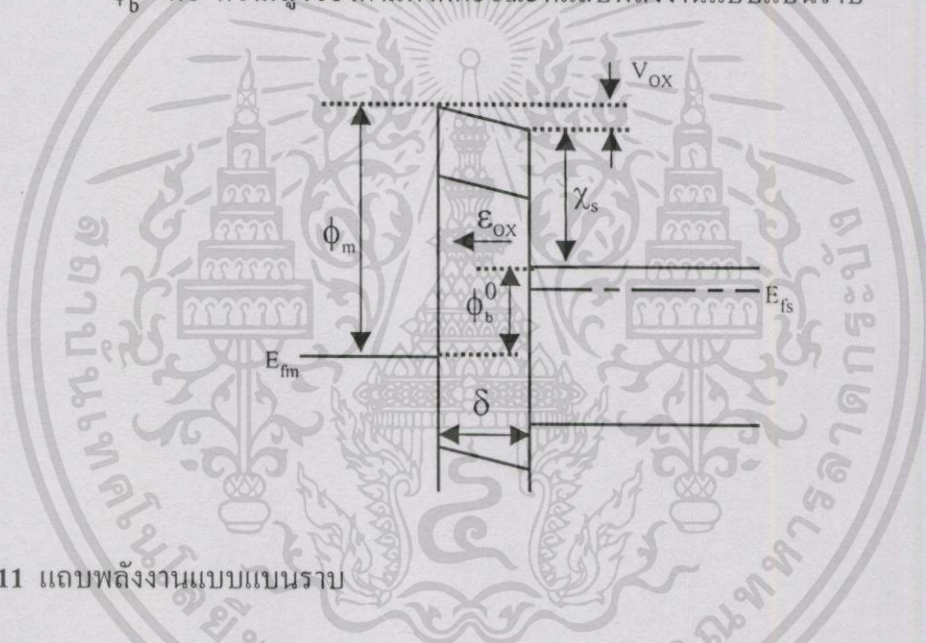
สำหรับในช่วงอุณหภูมิ 100°C, 200 °C และ 300°C จะได้ความสูงของกำแพงศักย์ที่มีค่าคงที่ ซึ่งเนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้อะลูมิเนียมจะยังไม่สามารถแพร่ลงไปยังซิลิคอน ชนิดเอ็น ทำให้รอยสัมผัสที่ได้จากการซินเตอร์ริงในช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นรอยสัมผัสแบบขอตค์กี จากรูปที่ 4.6 ที่อุณหภูมิ 300°C ขณะให้ไบอัสกลับจะมีกระแสรั่วไหลน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับรอยสัมผัสซึ่งซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิที่ 100°C และ 200°C ซึ่งรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่ 300°C ดังนั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงสำหรับการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตค์กีคือ 300°C

สำหรับความแตกต่างของค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดกระแส-แรงดัน และค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส เนื่องจากค่าความสูงของกำแพงศักย์ซึ่งได้จากการวัดกระแส-แรงดันจะเป็นการวัดค่าความสูงกำแพงศักย์ขณะที่แถบพลังงานที่รอยสัมผัสได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ แต่ค่าความสูงกำแพงศักย์ซึ่งได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสจะเป็นการวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์ขณะที่แถบพลังงานที่รอยสัมผัสมีลักษณะแถบพลังงานแบนราบ ϕ_0^0 (Flat-band Barrier Height) [3] ดังรูปที่ 4.11

ขณะที่เกิดแถบพลังงานแบบแบนราบซึ่งเกิดเนื่องจากชั้นออกไซด์ระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ทำให้ไม่เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากซิลิคอน ชนิดเอ็น ไปยังโลหะ จากรูปที่ 4.11 ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะเท่ากับ

$$\phi_b^0 = \phi_m - \chi_s - V_{ox} \quad (4.1)$$

- โดย V_{ox} คือ แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์
 ϵ_{ox} คือ สนามไฟฟ้าภายในชั้นออกไซด์
 δ คือ ความหนาของชั้นออกไซด์
 χ_s คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ
 ϕ_b^0 คือ ความสูงของกำแพงศักย์ขณะที่แถบพลังงานแบบแบนราบ



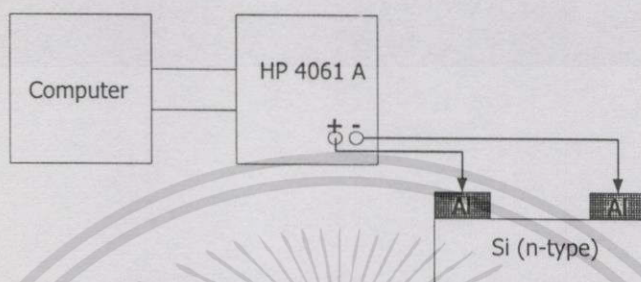
รูปที่ 4.11 แถบพลังงานแบบแบนราบ

4.2 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง

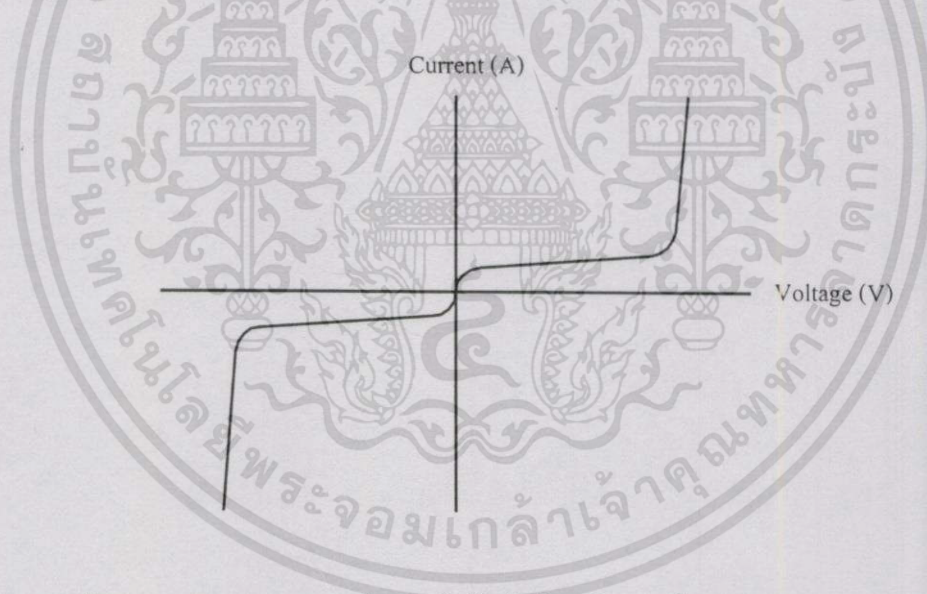
Al/Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและกระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น จะได้รอยสัมผัสสองชนิดคือ รอยสัมผัสแบบชอตต์กีและอัลลอย โดยซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ ที่ 300°C และ 500°C ตามลำดับ ดังนั้นในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ในขั้นตอนของซินเตอร์ริงจะซินเตอร์ริงที่ 2 อุณหภูมิ คือ 300°C และ 500°C ซึ่งจะทำให้ได้โฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสสองชนิด คือ โฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบชอตต์กีและแบบอัลลอย จากนั้นจึงนำโฟโตไดโอดทั้งสองชนิดไปวัดหาคุณสมบัติกระแส-แรงดัน

เนื่องจากโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่ได้ออกแบบไว้เป็นแบบสมมาตร คือ พื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนทั้ง 2 ด้าน เท่ากัน และค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน ($\phi_{n1} = \phi_{n2}$) ดังนั้น กระแสของโฟโตไดโอดขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับจะมีลักษณะที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 4.13

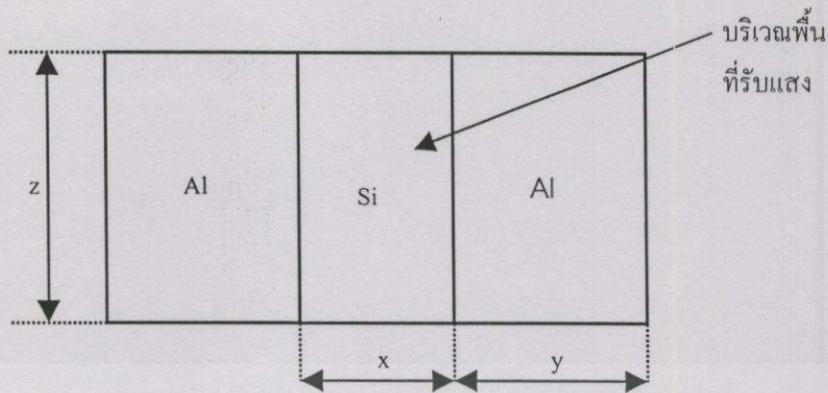


รูปที่ 4.12 การวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al



รูปที่ 4.13 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al แบบสมมาตร

การออกแบบในหัวข้อที่ 3.2.1 การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ในการแสดงค่าพารามิเตอร์จะใช้เป็นหมายเลขดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.14 ลักษณะพารามิเตอร์ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

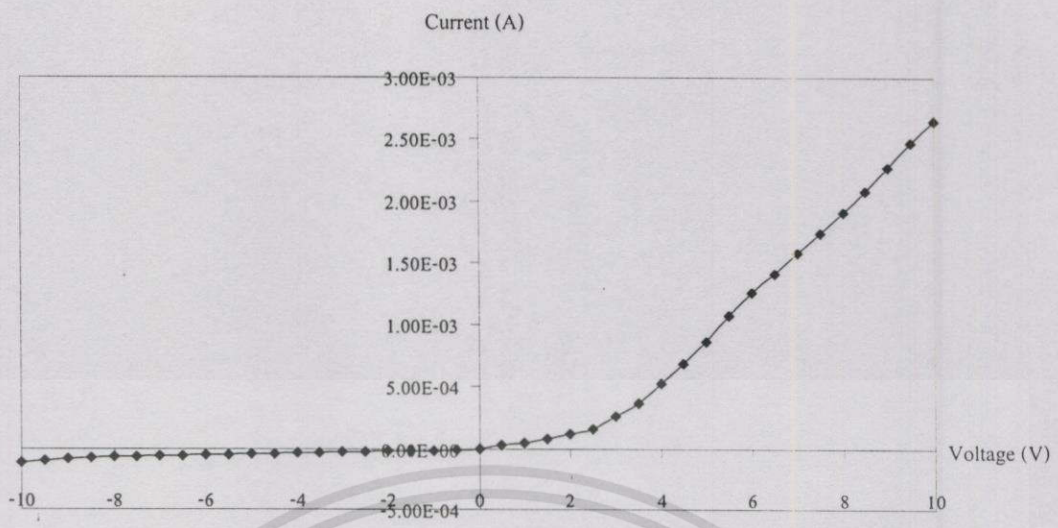
กำหนดให้ x คือ ความยาวของพื้นที่รับแสงหรือระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส

y คือ ความยาวของขั้วสัมผัส

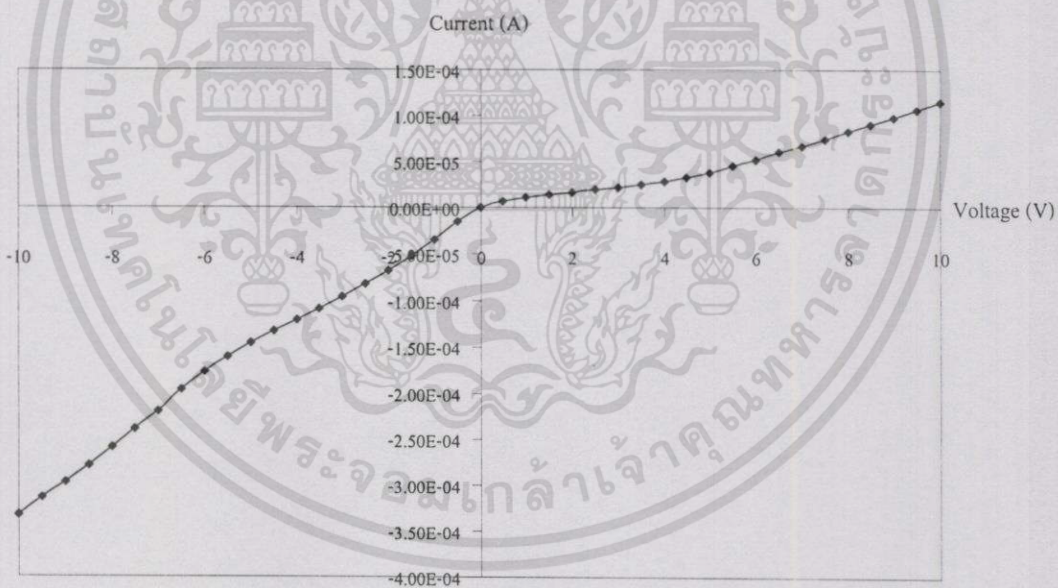
z คือ ความกว้างของพื้นที่รับแสงหรือความกว้างของขั้วสัมผัส

ตารางที่ 4.4 ขนาดของพื้นที่รับแสงและขนาดพื้นที่ขั้วสัมผัส

หมายเลข	ขนาด x (μm)	ขนาด y (μm)	ขนาด z (μm)
A1	20	270	2000
A2	40	270	2000
A3	200	270	2000
A4	500	270	2000
A5	1000	270	2000
B1	40	540	1000
B2	80	540	1000
B3	400	540	1000

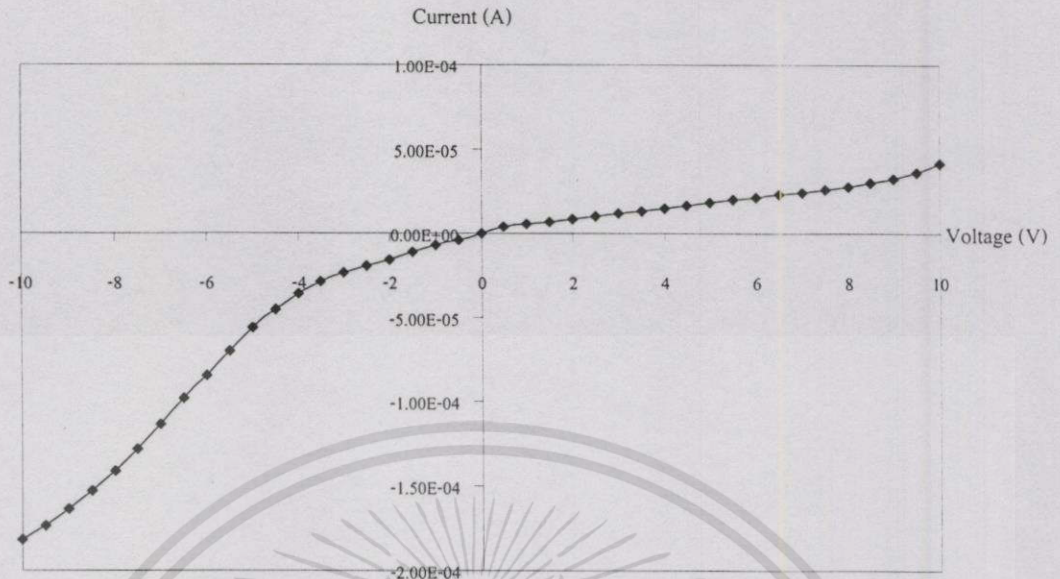


รูปที่ 4.15 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

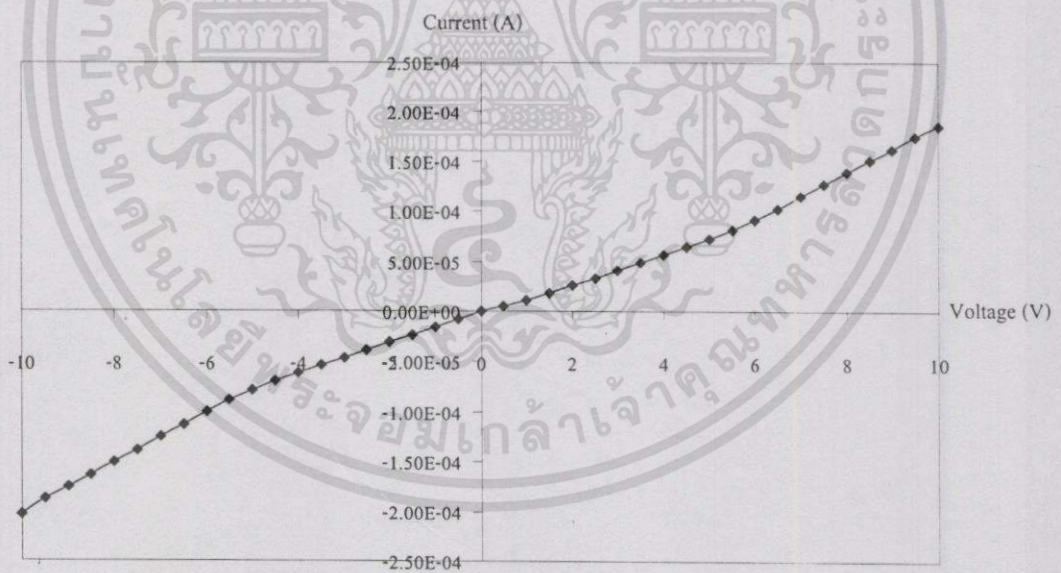


รูปที่ 4.16 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A2 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

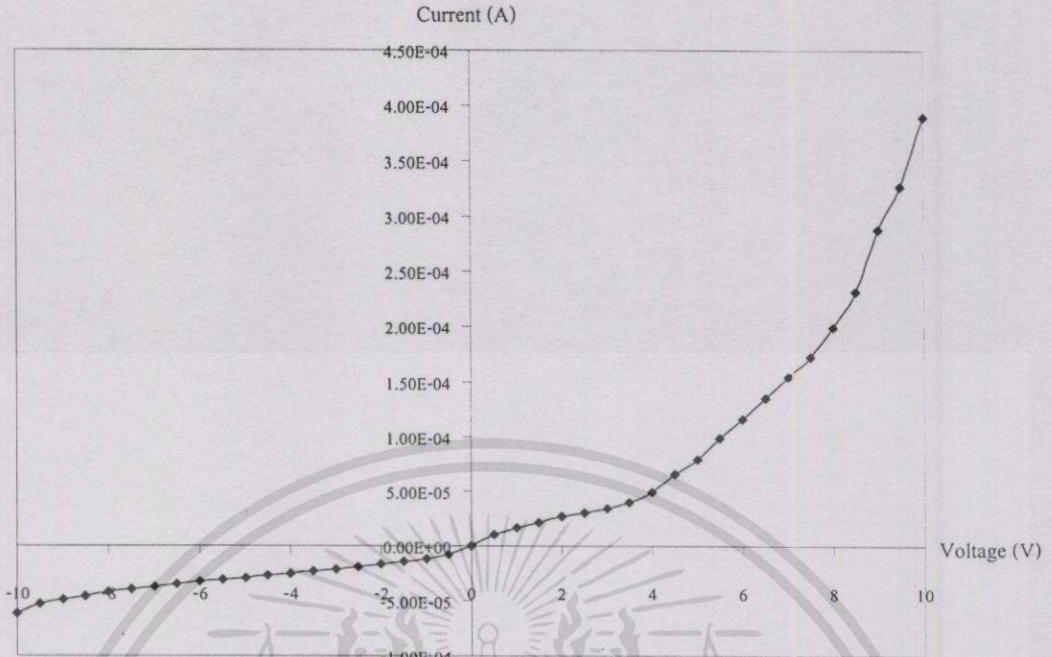


รูปที่ 4.17 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A3 ที่
ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

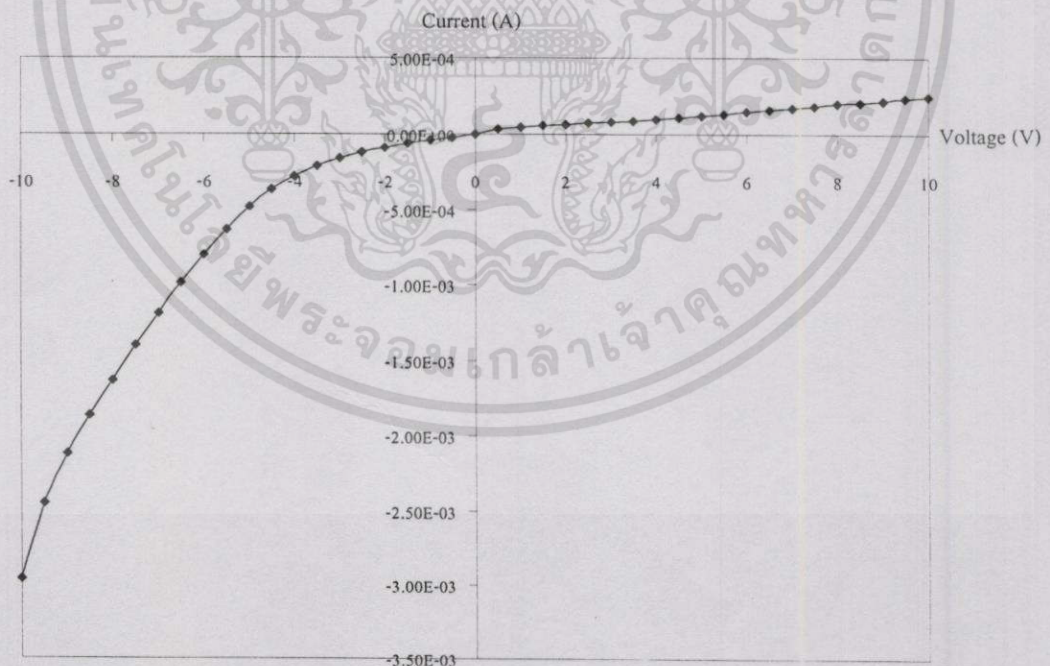


รูปที่ 4.18 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A4 ที่
ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

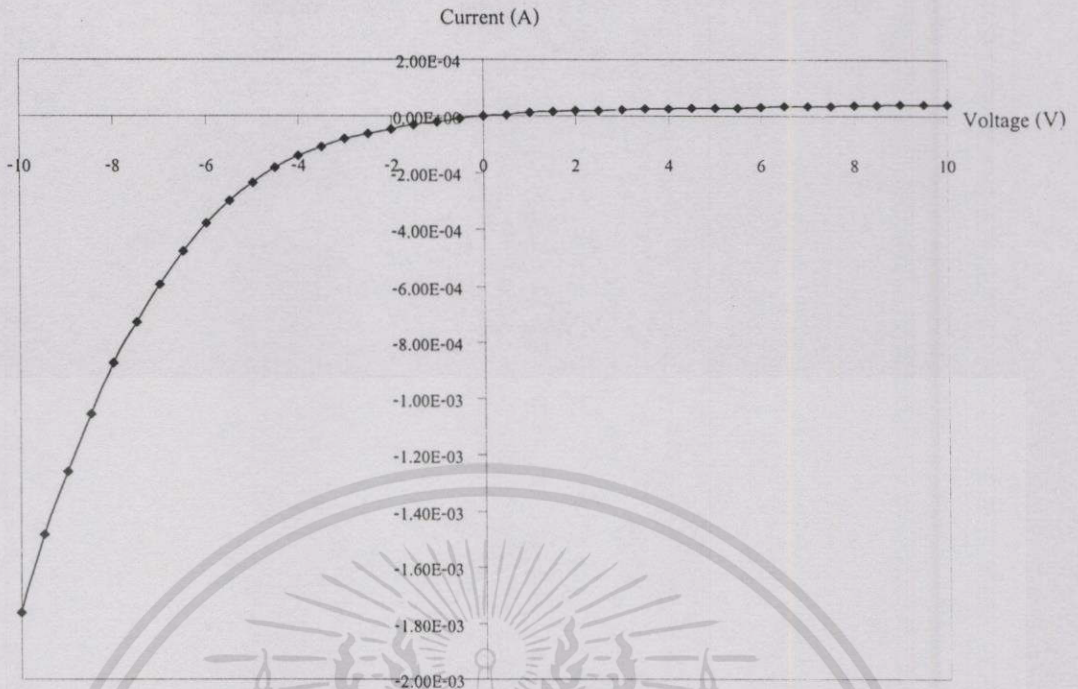


รูปที่ 4.19 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A5 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

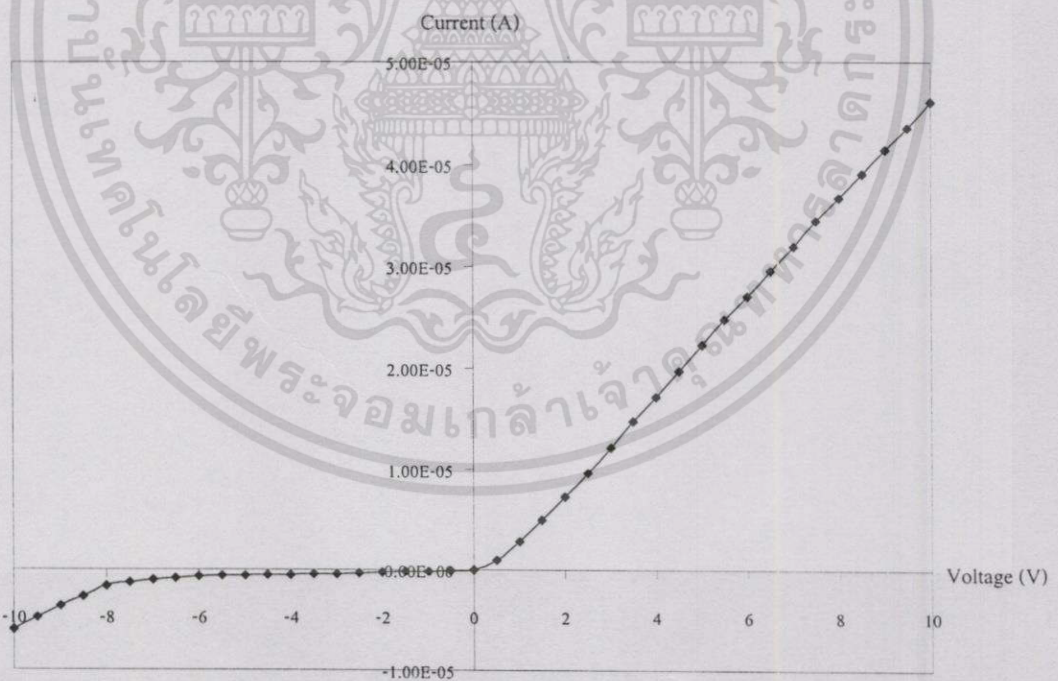


รูปที่ 4.20 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

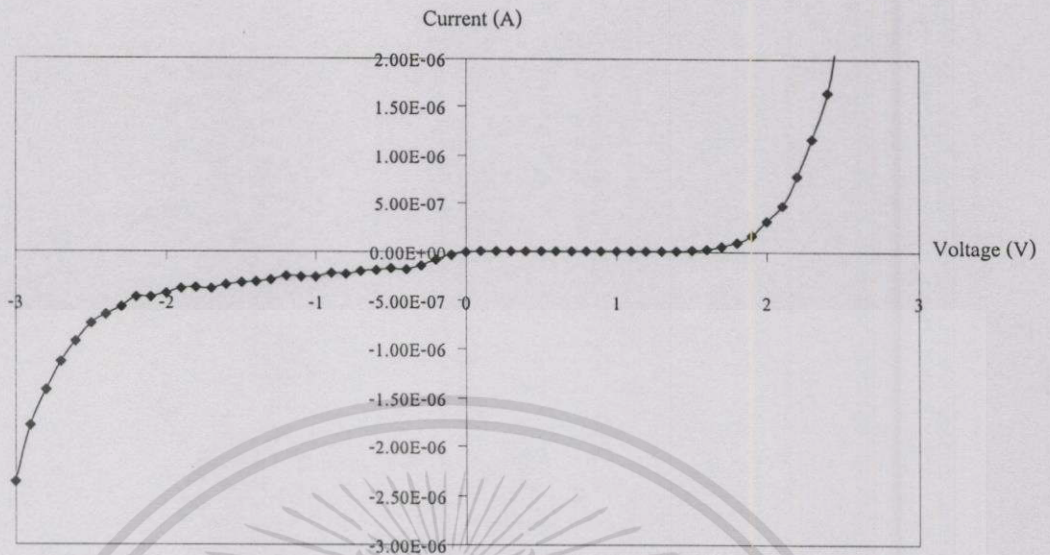


รูปที่ 4.21 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B2 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

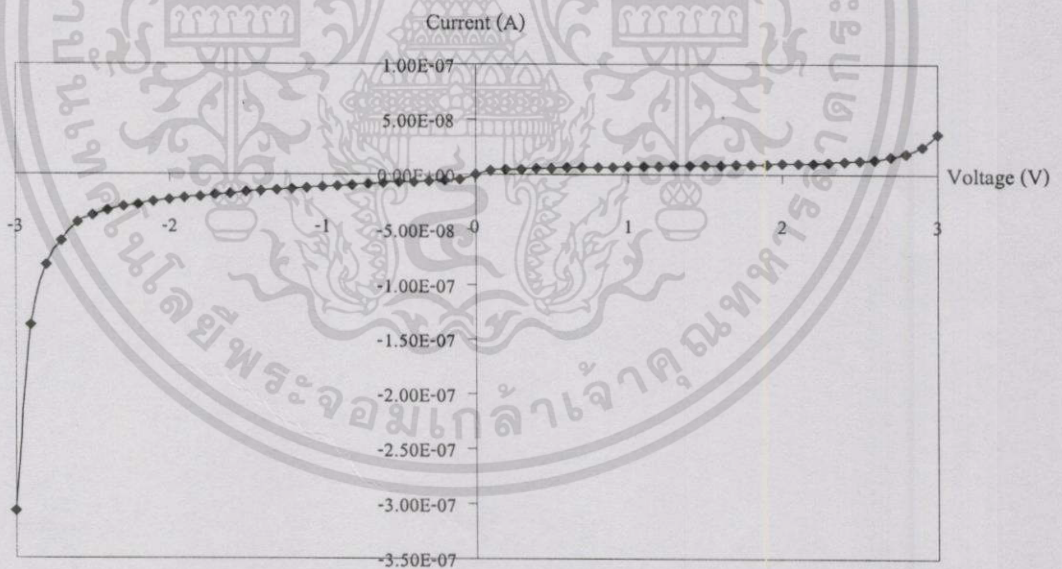


รูปที่ 4.22 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B3 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

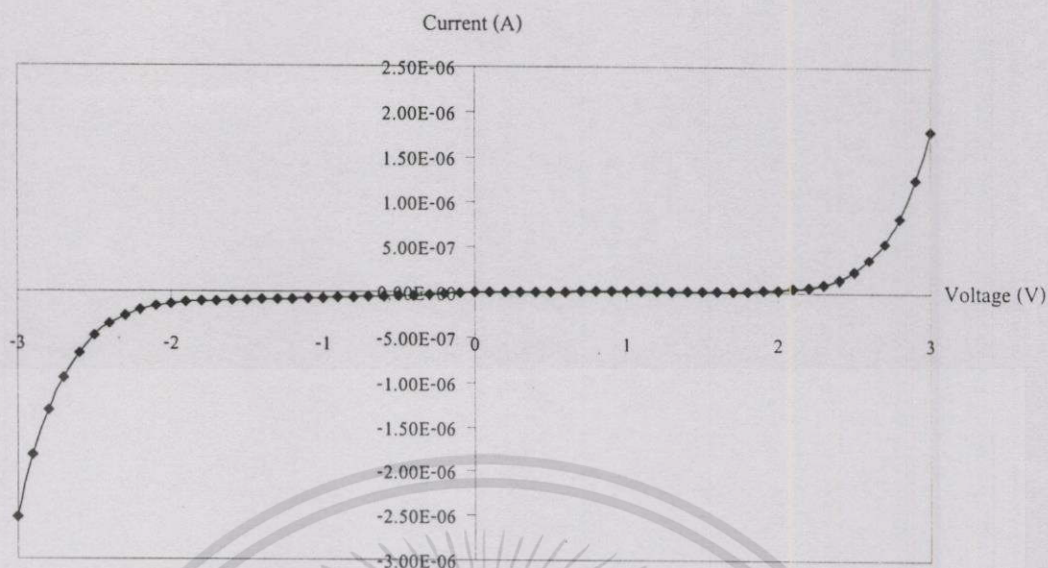


รูปที่ 4.23 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

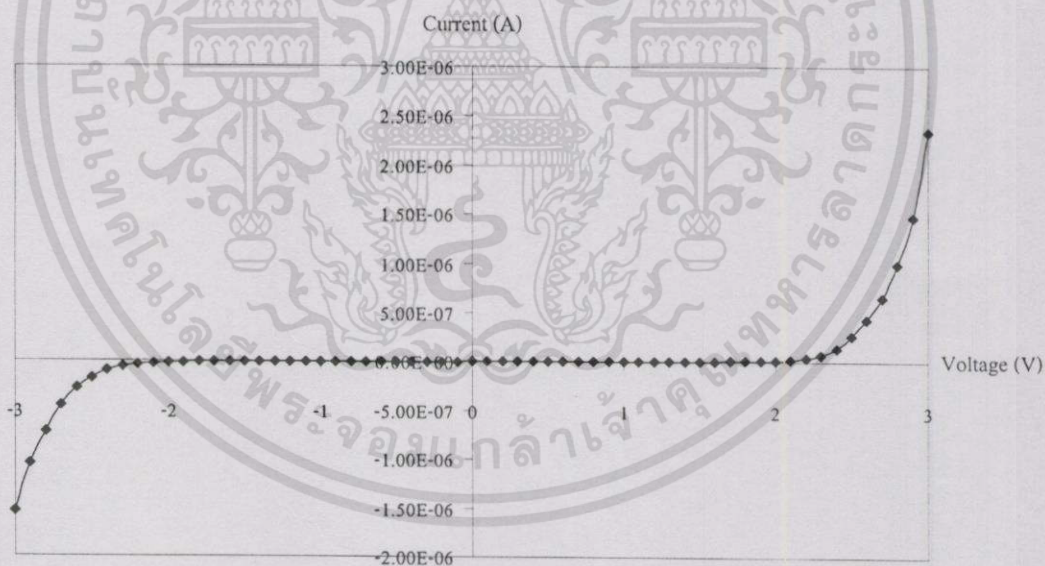


รูปที่ 4.24 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A2 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

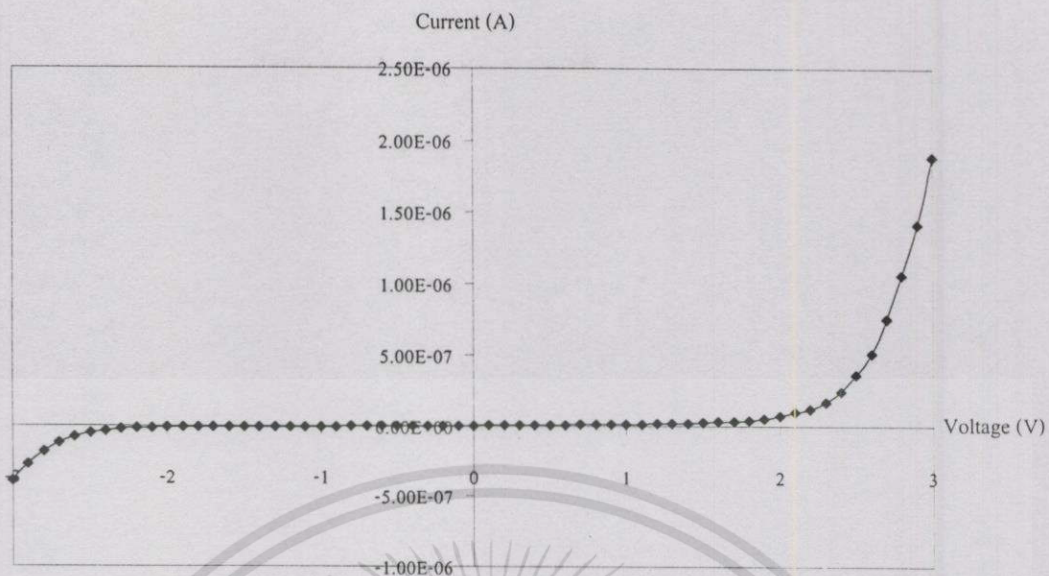


รูปที่ 4.25 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A3 ที่ ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

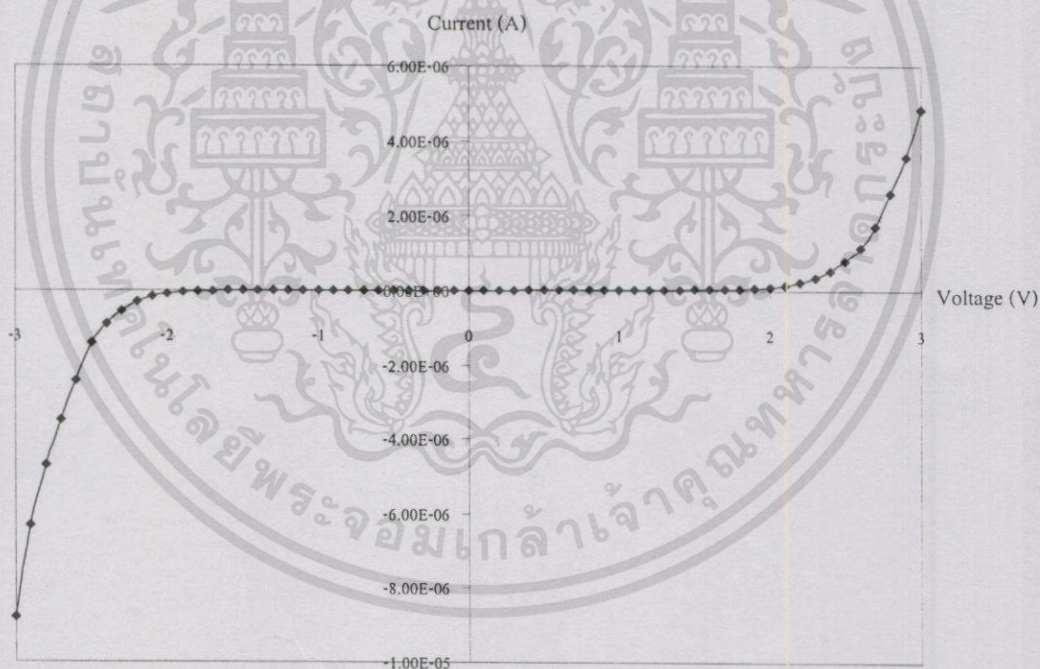


รูปที่ 4.26 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A4 ที่ ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

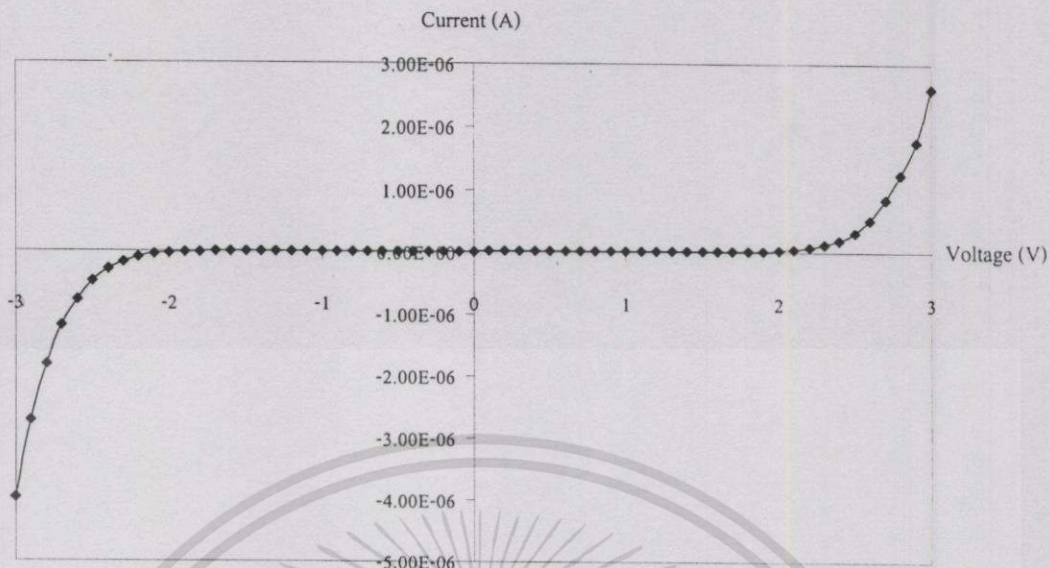


รูปที่ 4.27 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A5 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

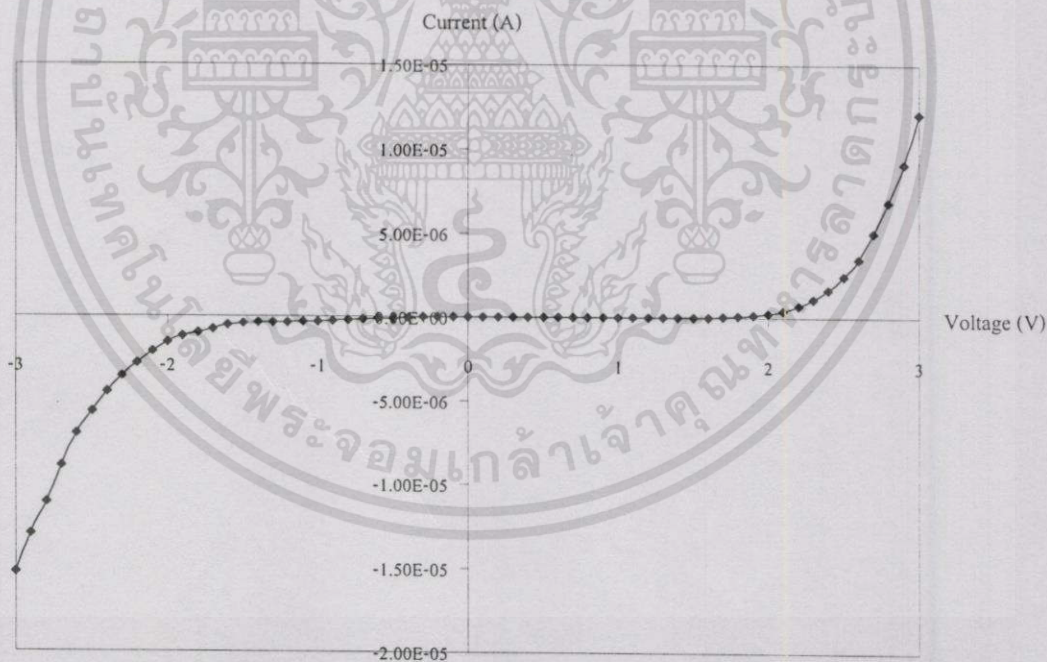


รูปที่ 4.28 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B2 ที่ ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง)



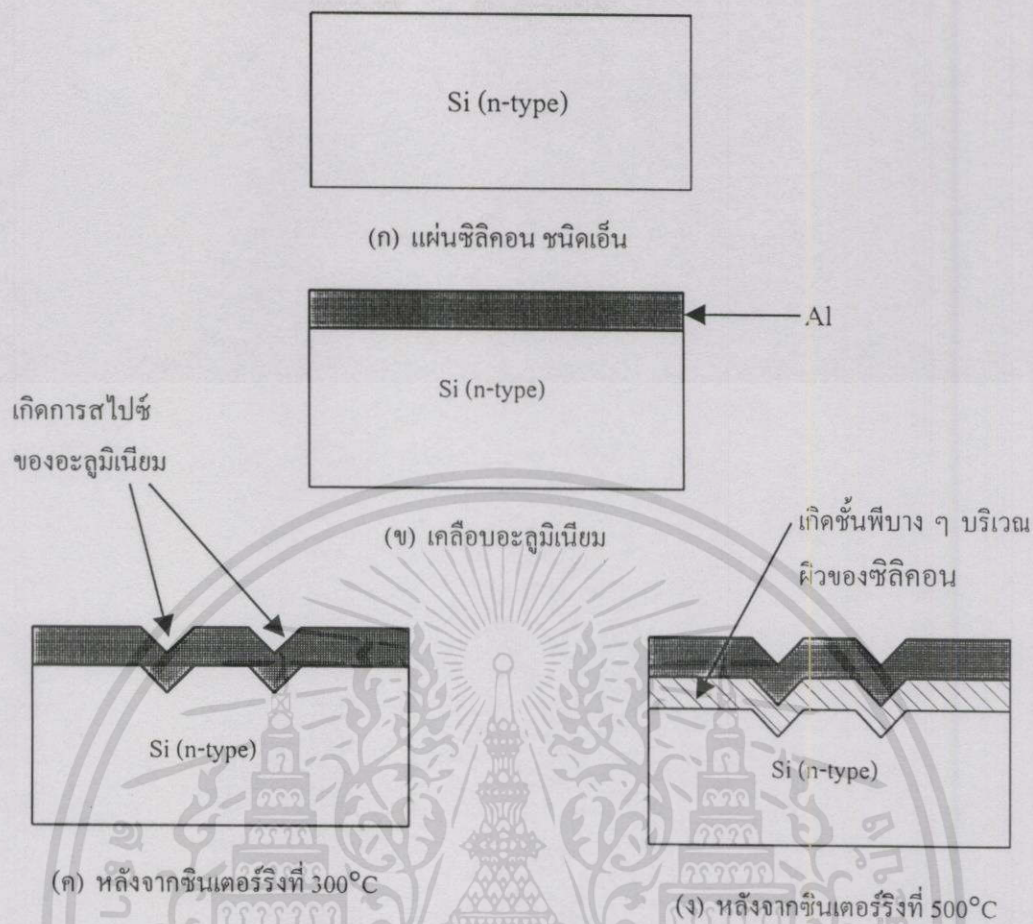
รูปที่ 4.30 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B3 ที่ ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C (ขณะไม่ได้รับแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 ถึง 4.22 และรูปที่ 4.23 ถึง 4.30 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด ที่ซินเตอร์ริงที่ 300°C และ 500°C ตามลำดับ โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ กันตามที่ได้ออกแบบไว้ จะมีความแตกต่าง คือ โฟโตไดโอดที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่ 300°C จะมีกระแสรั่วขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสกลับ มีลักษณะไม่ใกล้เคียงกัน โดยทุก ๆ พารามิเตอร์จะมีกระแสรั่วและมีแรงดันพังทะลายที่แตกต่างกัน แต่โฟโตไดโอดที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่ 500°C จะมีกระแสรั่วขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยทุก ๆ พารามิเตอร์จะมีกระแสรั่วประมาณ 10 nA และแรงดันพังทะลายประมาณ 2-3 V

เมื่อนำความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดทั้งสองชนิด มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบสมมาตร จะพบว่ารูปที่ 4.23 ถึง 4.30 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ผ่านซินเตอร์ริงที่ 500°C จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำรูปที่ 4.15 ถึง 4.22 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ผ่านซินเตอร์ริงที่ 300°C เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 จะมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งผลความแตกต่างของความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดทั้งสองชนิดเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการซินเตอร์ริง ซึ่งมีผลทำให้สถานะพื้นผิวระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอนแตกต่างกันไปด้วย

โดยปกติแล้วบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอน ชนิดเอ็น จะเกิดการสไปซ์ (Spiking) ของอะลูมิเนียมบริเวณผิวของซิลิกอน ซึ่งหลังจากซินเตอร์ริงแล้วอะตอมของอะลูมิเนียมที่แพร่ลึกเข้าไปในฐานรองซิลิกอน ชนิดเอ็น มักที่จะไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดส่วนเล็ก ดันไม่เท่ากัน เกิดเป็นปลายแหลม ทำให้สถานะพื้นผิวมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสมีลักษณะที่ไม่คงที่ตามไปด้วย สำหรับโฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบ ซอตต์กี ซึ่งผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C ซึ่งอุณหภูมินี้อะลูมิเนียมจะยังไม่เกิดการแพร่ไปยังซิลิกอน ชนิดเอ็น ดังรูปที่ 4.31 (ก) ซึ่งจะทำให้ผลของสถานะพื้นผิวที่ไม่คงที่มีผลกับกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบซอตต์กี ดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.22 จะพบว่า โฟโตไดโอดจะมีกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับมีค่าที่แตกต่างกัน ในการแก้ปัญหาของการเกิดการสไปซ์ของอะลูมิเนียม สามารถใช้การสร้างรอยสัมผัสให้เป็นแบบอัลลอย ในที่นี้คือการซินเตอร์ริงที่ 500°C ซึ่งจะทำให้อะลูมิเนียมแพร่ลงไปซิลิกอนจนเกิดชั้นที่บาง ๆ บริเวณผิวของซิลิกอน รองรับบริเวณการเกิดการสไปซ์ของอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.31 (ง) ทำให้ผลของสถานะพื้นผิวที่ไม่คงที่ไม่มีผลกับกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบอัลลอย ดังรูปที่ 4.23 ถึง 4.30 จะพบว่าโฟโตไดโอดมีกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.31 ลักษณะสถานะพื้นผิวระหว่างของอะลูมิเนียมและซิลิคอนที่ขึ้นเตอร์ริงอุณหภูมิ 300°C และ 500°C

สำหรับกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al อุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นเตอร์ริง คือ 500°C ซึ่งจะได้โฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบอัตรอย ซึ่งจะให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือมีกระแสรั่วประมาณ 10 nA และมีแรงดันพังทะลายประมาณ 2 V และมีกระแสไหลขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจจับทางแสง สำหรับโฟโตไดโอดที่ขึ้นเตอร์ริงที่ 300°C ซึ่งจะให้โฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบชอตต์กีซึ่งให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่ดี คือ มีกระแสรั่วที่สูงและแรงดันพังทะลายที่ไม่แน่นอน และมีกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับที่แตกต่างกัน จากการทดลองสร้างหลาย ๆ ครั้งพบว่าคุณสมบัติของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิดนี้ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปจึงศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีรอยสัมผัสแบบอัตรอยเท่านั้น

4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโพลีไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

4.3.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโพลีไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

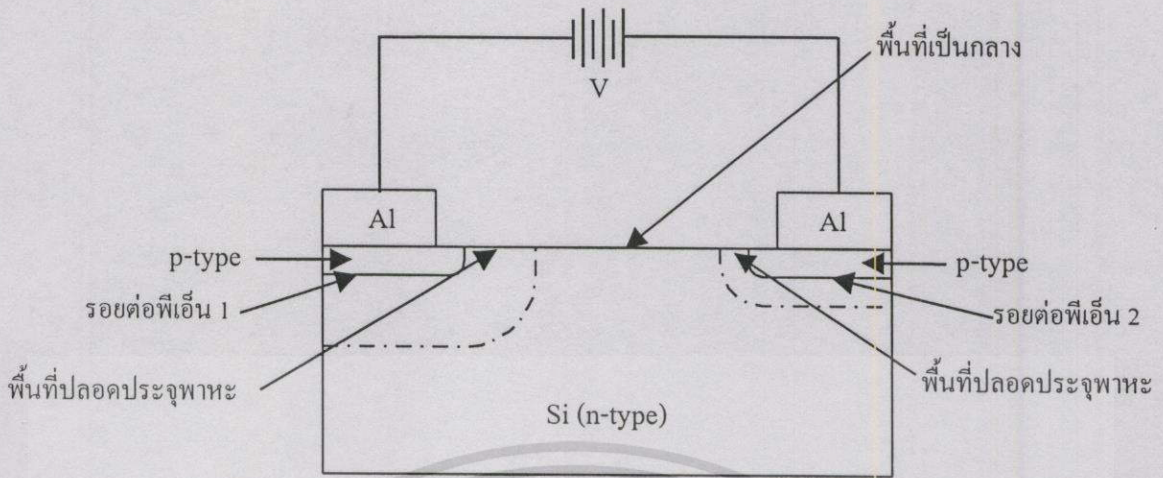
จากรูปที่ 4.23 ถึง 4.30 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโพลีไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ถึง A5 และ B1 ถึง B3 ที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C ซึ่งสามารถอ่านค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทะลายขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับของโพลีไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

ตารางที่ 4.5 กระแสรั่วและแรงดันพังทะลายขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับของโพลีไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

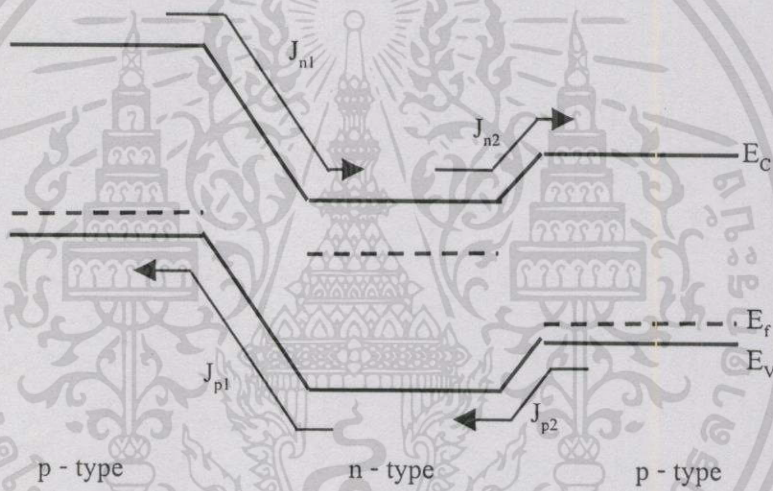
หมายเลข	ความกว้างของขั้วโลหะ (μm)	ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ (μm)	กระแสรั่วขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงเท่ากับ 1 V (μA)	แรงดันพังทะลายขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง (V)	กระแสรั่วขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับเท่ากับ -1 V (μA)	แรงดันพังทะลายขณะได้รับแรงดันไบอัสกลับ (V)
A1	2000	20	0.006	1.8	-0.259	-2.2
A2	2000	40	0.0068	2.7	-0.011	-2.3
A3	2000	200	0.0084	2.2	-0.071	-2.3
A4	2000	500	0.0066	2.3	-0.0069	-2.3
A5	2000	1000	0.011	1.8	-0.0069	-2.2
B1	1000	40	0.021	2	-0.0049	-2.1
B2	1000	80	0.0071	2.1	-0.0047	-2
B3	1000	100	0.008	1.9	-0.305	-1.7

จากตารางที่ 4.5 โพลีไดโอดทุก ๆ พารามิเตอร์ คือ A1 ถึง A5 และ B1 ถึง B3 ทั้งหมดจะมีกระแสรั่วน้อยกว่า $0.5 \mu\text{A}$ และมีแรงดันพังทะลายขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับประมาณ $\pm 2 \text{ V}$

เมื่อให้แรงดันไบอัสกับโพลีไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งจะทำให้รอยต่อพีเอ็น 1 ได้รับแรงดันไบอัสกลับทำให้บริเวณปลอดประจุพาหะขยายตัวออก และรอยต่อพีเอ็น 2 ได้รับแรงดันไบอัสตรงทำให้บริเวณปลอดประจุพาหะขยายตัวได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างปลอดประจุพาหะของรอยต่อพีเอ็น 1 และสามารถเขียนแถบพลังงานของโพลีไดโอด ขณะได้รับแรงดันไบอัสได้ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.32 โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ขณะได้รับแรงดันไบอัส



รูปที่ 4.33 แถบพลังงานของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ขณะได้รับแรงดันไบอัส

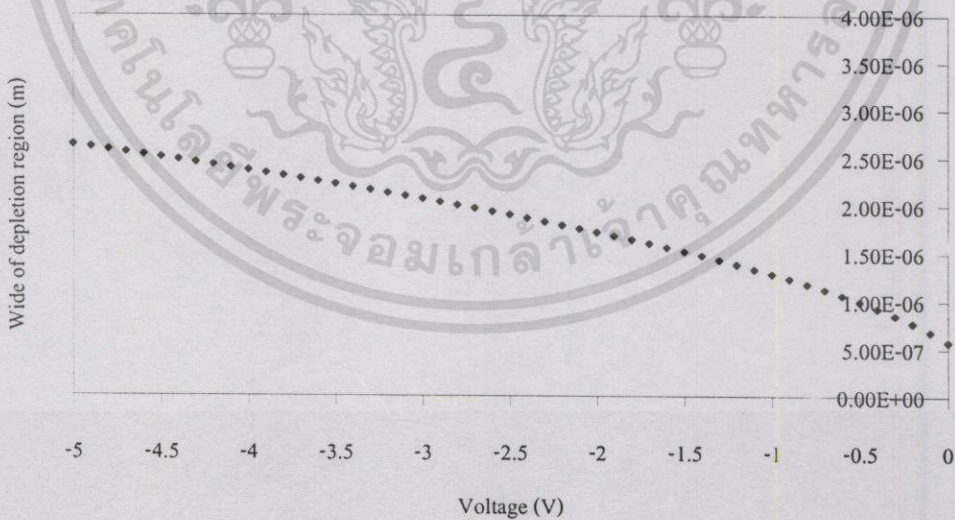
จากรูปที่ 4.33 ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน J_{n2} จะไหลจากด้านเอ็นไปยังด้านพีได้ สะดวกรอยต่อพีเอ็น 2 ได้รับแรงดันไบอัสตรง แต่อิเล็กตรอนที่ข้ามรอยต่อพีเอ็น 2 จะถูกจำกัดอยู่ที่ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน J_{n1} จากด้านพีมายังด้านเอ็น เนื่องจากรอยต่อพีเอ็น 1 ได้รับแรงดันแบบไบอัสกลับ ส่วนความหนาแน่นกระแสโฮล J_{p2} จะได้รับแรงดันไบอัสจะไหลจากด้านพีมายังด้านเอ็นและแพร่ผ่านบริเวณพื้นที่เป็นกลางและผ่านจากด้านเอ็นไปยังด้านพีนั่นก็คือความหนาแน่นกระแสโฮล J_{p1} แรงดันไบอัสที่ให้กับโฟโตไดโอด ส่วนใหญ่แล้วจะตกคร่อมอยู่ที่รอยต่อพีเอ็น 1 เนื่องจากเป็นรอยต่อที่ได้รับแรงดันไบอัสกลับ ซึ่งเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น 1 เพิ่มถึงจุด ๆ หนึ่งจะทำให้เกิดแรงดันพังทะลายแบบซีเนอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นพีที่เกิดจากการอัลลอย ทำให้ชั้นพีที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือสูง เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

กลับ จะทำให้ประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณปลอดประจุพาหะที่แคบ ๆ บริเวณรอยต่อได้ และการเกิดแรงดันพังทะลายแบบซีเนอร์นี้จะเกิดในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสกลับค่าต่ำ ๆ ซึ่งจากผลการทดลองแรงดันพังทะลายของโฟโตไดโอดเท่ากับ 2 V

สำหรับพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ซึ่งจากโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้จะอยู่ระหว่างขั้วสัมผัสโลหะ ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณหาความกว้างบริเวณปลอดประจุพาหะของรอยสัมผัสที่ 1 โดยเปรียบเทียบกับความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะ 1 รอยสัมผัส ซึ่งความกว้างของพื้นที่ปลอดประจุพาหะ [2] นี้ได้จากคำนวณในสมการที่ (4.2) ซึ่งพบว่าขณะแรงดันไบอัสเท่ากับ 2 V ความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะจะเท่ากับ 1.75 μm ซึ่งจากการออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วโลหะได้ออกแบบเล็กสุดคือ 20 μm ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะจากรอยสัมผัสที่ 1 ที่เกิดขึ้นจะยังไม่ถึงรอยสัมผัสที่ 2 ทำให้พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ พื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่ที่เป็นกลาง

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_D} (V_{bi} + V)} \tag{4.2}$$

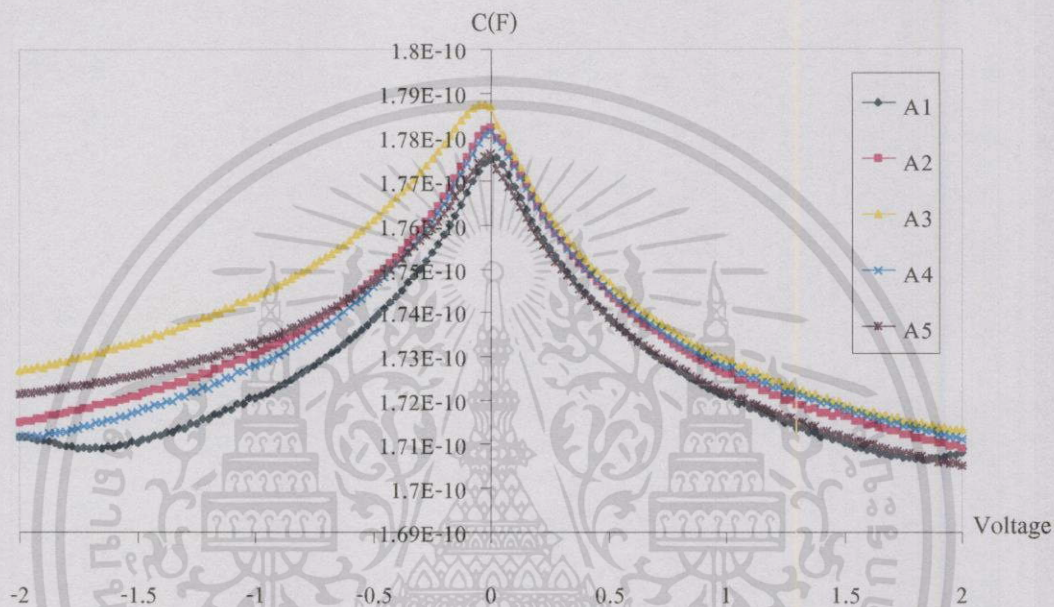
โดย V คือ แรงดันไบอัส
 V_{bi} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายใน (0.25 V)



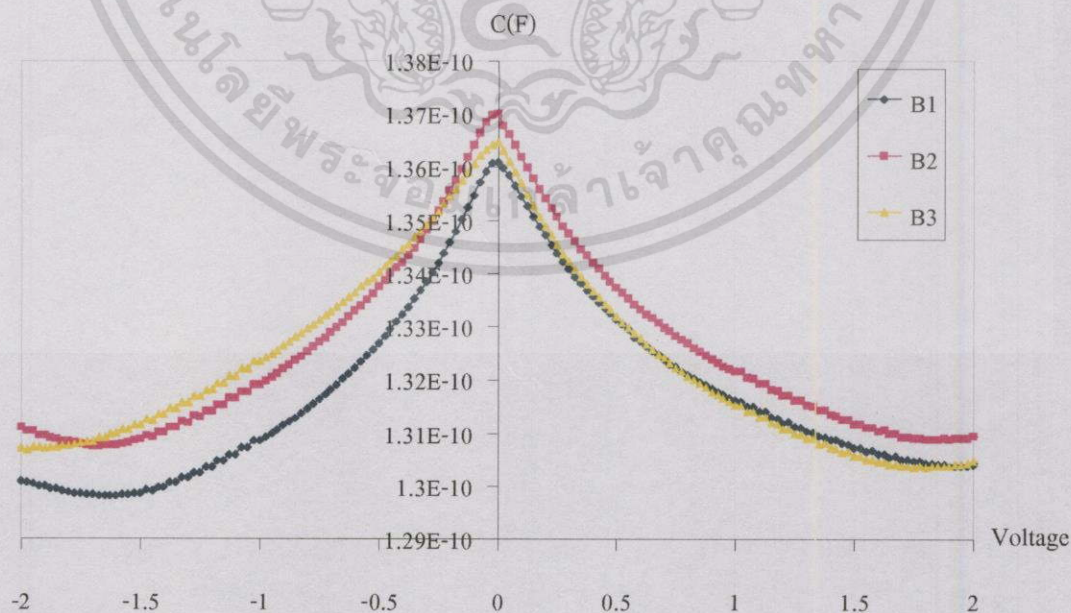
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของพื้นที่ปลอดประจุพาหะกับแรงดันไบอัสกลับ

4.3.2 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al

เนื่องจากโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al เป็นโครงสร้างแบบสมมาตรดังนั้นเมื่อมีการไบอัสให้กับโฟโตไดโอดดังแสดงในรูปที่ 4.32 ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าทั้งขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับจะมีลักษณะที่เหมือนกันดังรูปที่ 4.35 เป็นค่าความจุไฟฟ้าหมายเลข A1 ถึง A5 จะมีค่าความจุไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันโดยจะมีค่าสูงสุดอยู่แรงดันไบอัสเท่ากับ 0 V และจะมีค่าลดลงจนกระทั่งถึงแรงดันประมาณ ± 2 V ซึ่งเท่ากับแรงดันพังทะลายของโฟโตไดโอด



รูปที่ 4.35 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ถึง A5

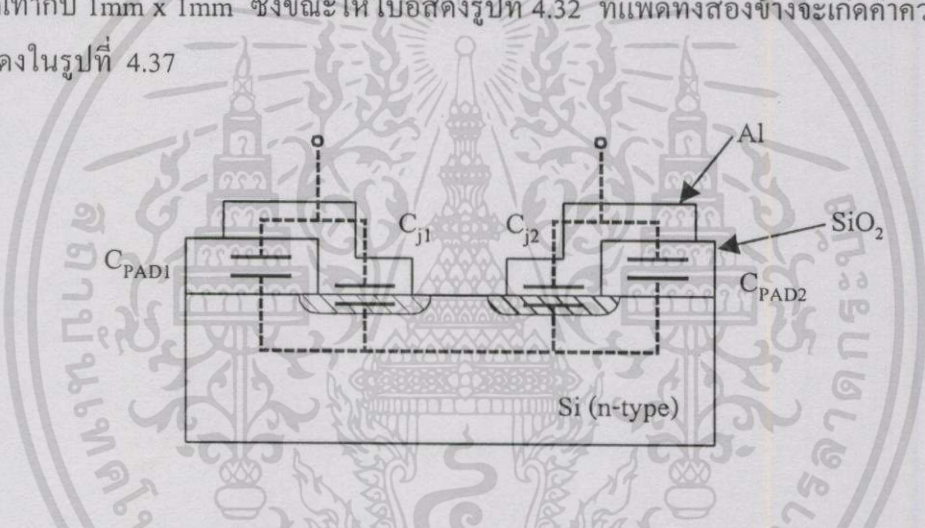


รูปที่ 4.36 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B1 ถึง B3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข A1 ถึง A5 จะมีความกว้างของขั้วโลหะเท่ากับ 2000 μm และระยะห่างระหว่างขั้วโลหะเท่ากับ 20 μm , 40 μm , 200 μm , 500 μm และ 1000 μm ตามลำดับ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าระยะห่างระหว่างขั้วโลหะจะไม่มีค่าความจุไฟฟ้า แต่ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับบริเวณปอดประจุพาหะของรอยสัมผัสทั้ง 2 ข้าง ซึ่งในโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al เป็นโครงสร้างแบบสมมาตร

ในการออกแบบพื้นที่รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น ได้ออกแบบให้พื้นที่รอยสัมผัสของหมายเลข A1 ถึง A5 และ B1 ถึง B3 ให้มีพื้นที่เท่ากัน ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ควรจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จากรูปที่ 4.36 และ รูปที่ 4.37 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากแพด (Pad) ที่ออกแบบไว้สำหรับต่อขั้วไฟฟ้าออกมายังวงจรรภายนอก ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 โดยหมายเลข A1 ถึง A5 จะมีพื้นที่แพด เท่ากับ 2mm x 2mm และ B1 ถึง B3 จะมีพื้นที่แพดเท่ากับ 1mm x 1mm ซึ่งขณะให้ไบอัสดังรูปที่ 4.32 ที่แพดทั้งสองข้างจะเกิดค่าความจุไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 การเกิดความจุไฟฟ้าขณะให้ไบอัสของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

จากรูปที่ 4.37 สามารถเขียนสมการความจุไฟฟ้า C_T รวมภายในโครงสร้างของโฟโตไดโอดได้ดังนี้

$$C_T = (C_{PAD1} // C_{j1}) + (C_{PAD2} // C_{j2}) \tag{4.3}$$

$$= \frac{(C_{PAD1} + C_{j1})(C_{PAD2} + C_{j2})}{(C_{PAD1} + C_{j1}) + (C_{PAD2} + C_{j2})}$$

เมื่อนำสมการที่ (2.21) มาคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al แล้วแทนค่าในสมการที่ (4.3) จะได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าความจุไฟฟ้ารวมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่ได้จากการคำนวณและการวัด

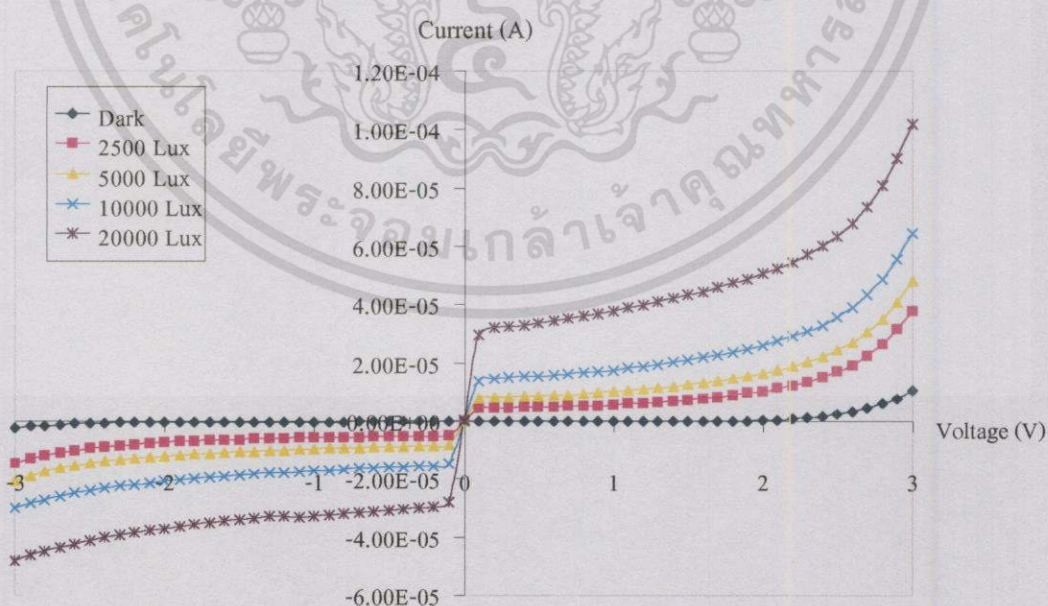
หมายเลข	ขนาดของแพด (mm)	ค่าความจุไฟฟ้าของแพด (pF)	ค่าความจุไฟฟ้ารวมขณะแรงดันไบอัสเท่ากับ 0 V		ค่าความจุไฟฟ้ารวมขณะแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V	
			จากการคำนวณ(pF)	จากการวัด (pF)	จากการคำนวณ(pF)	จากการวัด (pF)
A1 ถึง A5	2 x 2	320	167.61	~ 178	165.03	~ 173
B1 ถึง B5	1 x 1	220	117	~ 137	114.9	~ 132

จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าหมายเลข A1 ถึง A5 และ B1 ถึง B3 จะมีพื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างและซิลิคอน ชนิดเอ็น เท่ากัน แต่มีความแตกต่างที่ขนาดของแพดก็จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีความแตกต่างกันไปด้วย

4.4 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

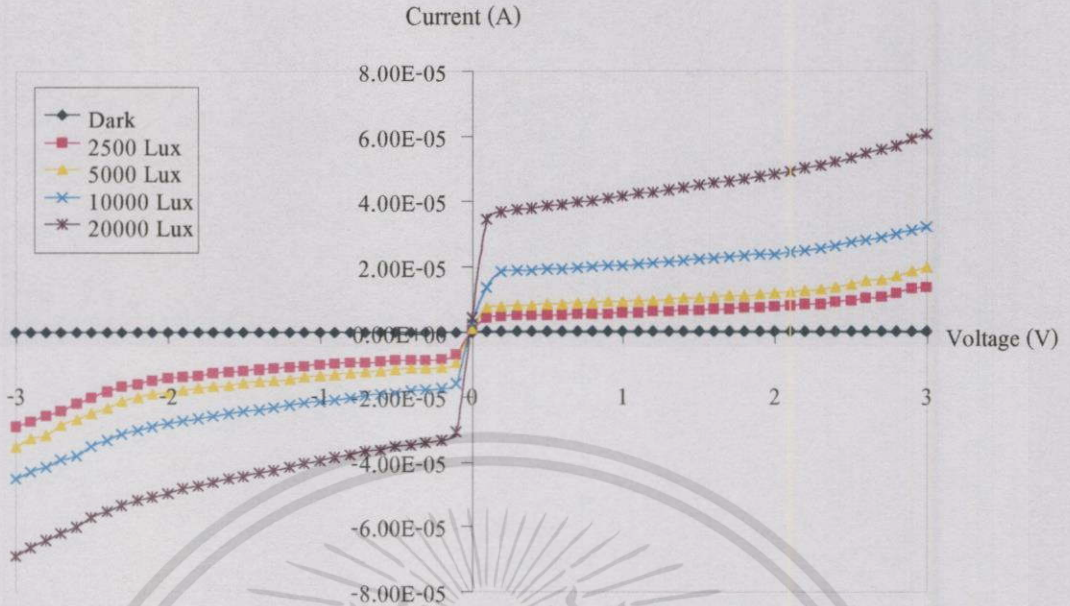
4.4.1 ผลการทดลองความเข้มแสงที่มีผลต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

การศึกษาในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาถึงความเข้มแสงจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al โดยการฉายแสงที่มีความเข้มต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ถึง 4.45

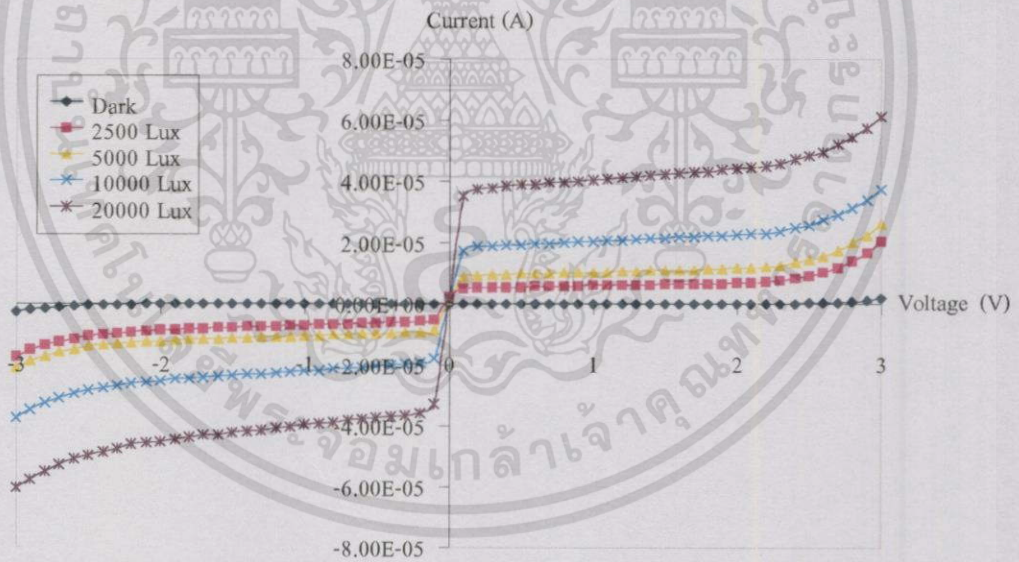


รูปที่ 4.38 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 เมื่อได้ รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

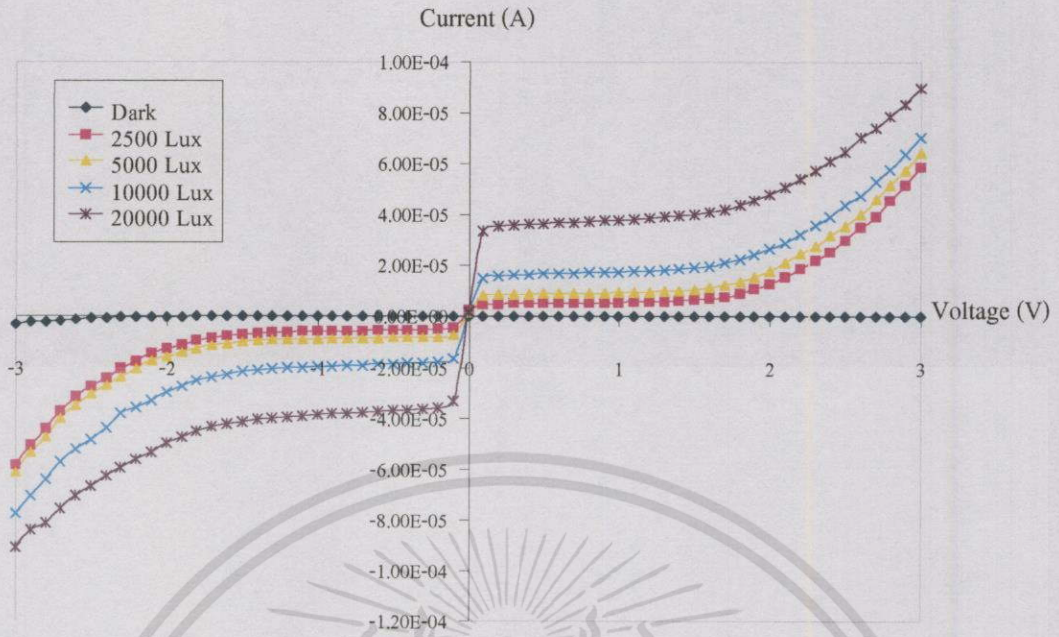


รูปที่ 4.39 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A2 เมื่อได้รับ ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน

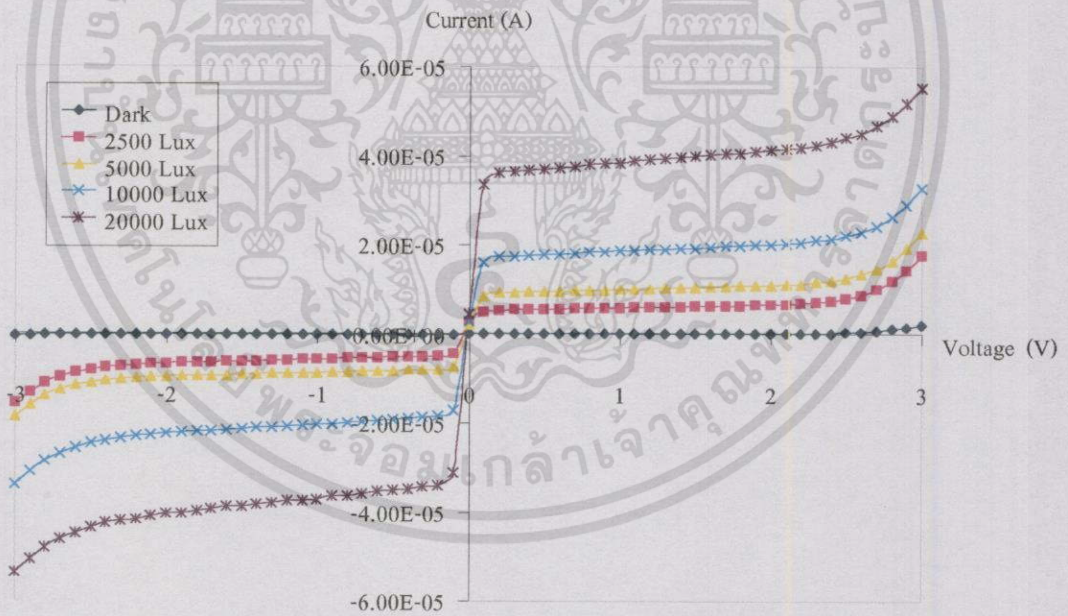


รูปที่ 4.40 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A3 เมื่อได้รับ ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน

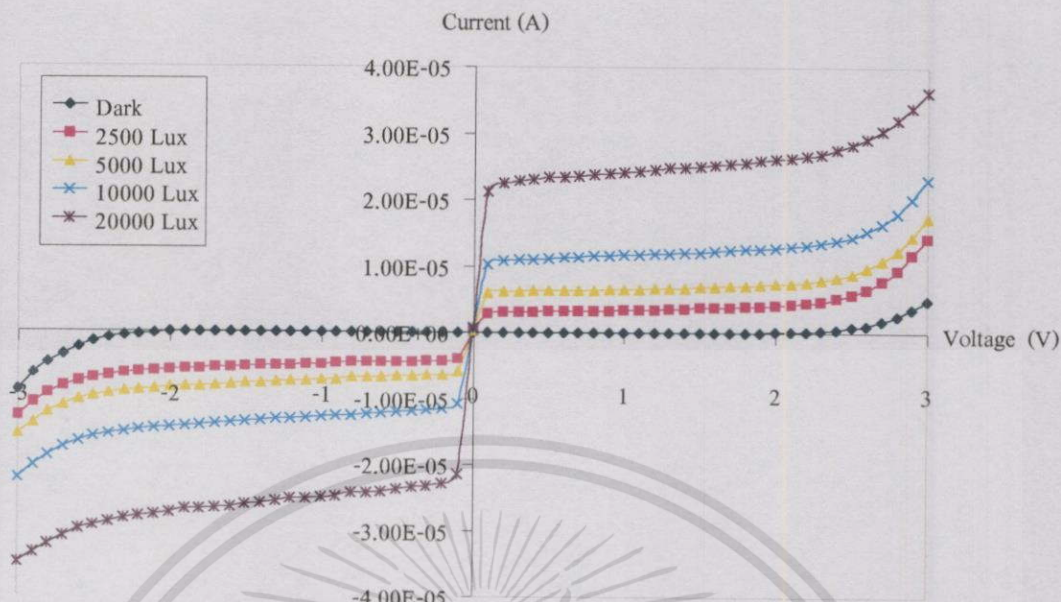
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



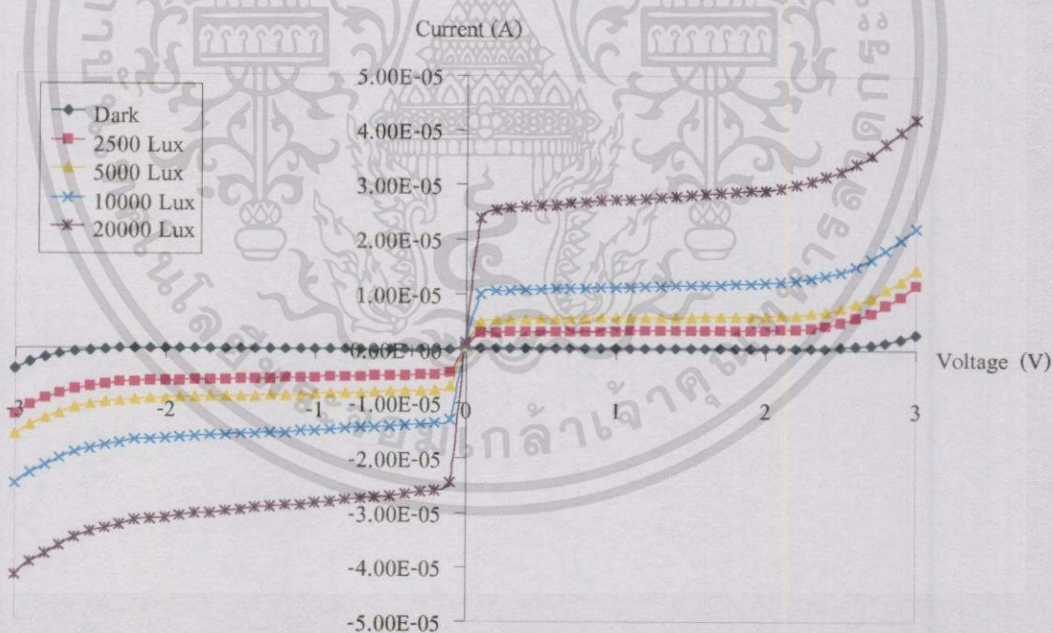
รูปที่ 4.41 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A4 เมื่อได้รับ ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.42 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A5 เมื่อได้รับ ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน

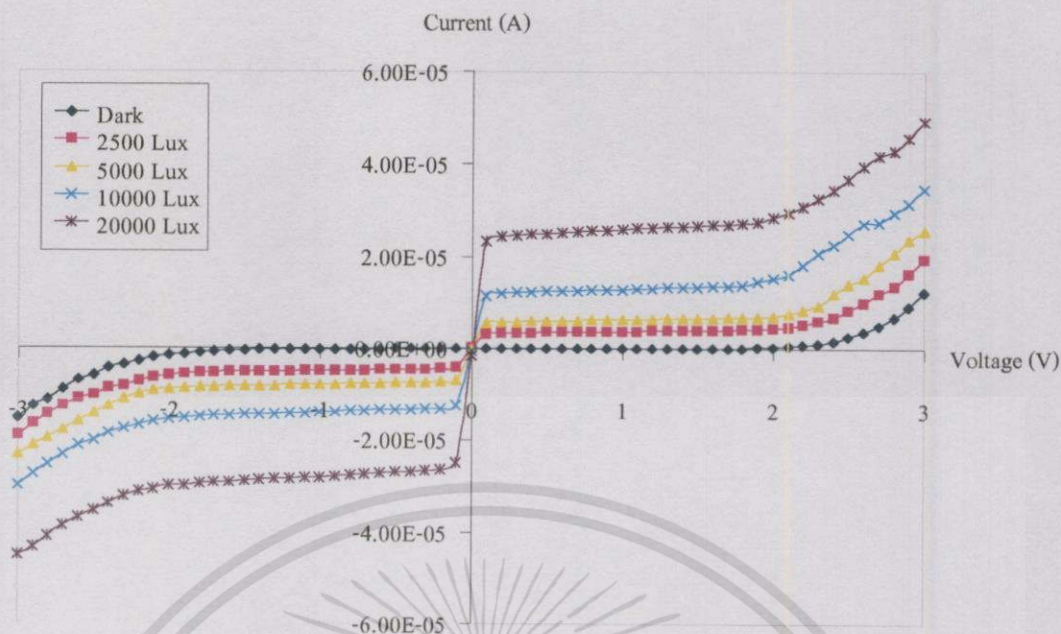


รูปที่ 4.43 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B1 เมื่อได้รับ ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน



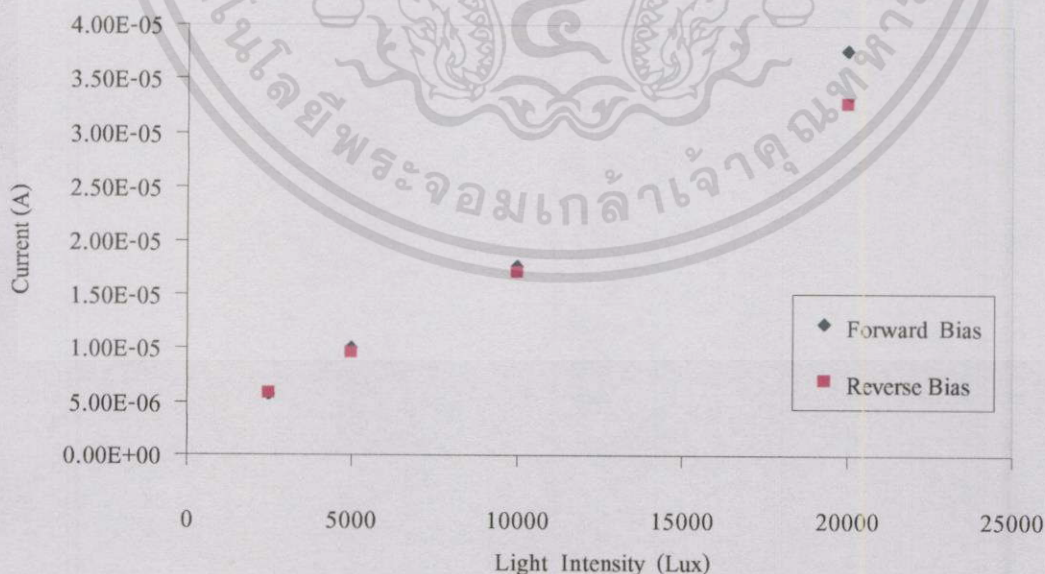
รูปที่ 4.44 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B2 เมื่อได้รับ ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



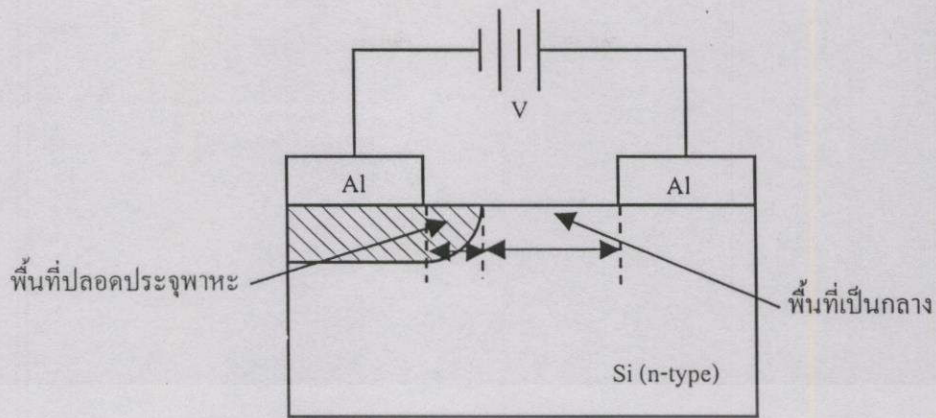
รูปที่ 4.45 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข B3 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 4.38 ถึง 4.45 พบว่าที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน ปริมาณกระแสโฟโตจะมีการเพิ่มตามความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่รับแสง และโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al เป็นแบบสมมาตร ดังนั้น กระแสโฟโตที่วัดได้ในขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับในแต่ละความเข้มแสงจะมีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์กระแสโฟโตและความเข้มแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 เมื่อได้รับความเข้มแสงต่าง ๆ กัน (ขณะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 ลักษณะของพื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง

Al/Si/Al

จากรูปที่ 4.47 พื้นที่รับแสงซึ่งอยู่ระหว่างขั้วสัมผัสสะสมประจุลบกับซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งเป็นพื้นที่รับแสง เมื่อให้ไบอัสดังรูปที่ 4.47 จะว่าพื้นที่รับแสงจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ พื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง เมื่อมีการเพิ่มแรงดันไบอัสภายนอกจะทำให้พื้นที่ปลอดประจุพาหะขยายตัวออก ในขณะที่พื้นที่เป็นกลางจะลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพื้นที่ปลอดประจุพาหะจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงเพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้มากกว่าพื้นที่เป็นกลาง ดังนั้น เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสจะทำให้พื้นที่ปลอดประจุพาหะเพิ่มขึ้น ซึ่งก็จะทำให้ได้กระแสโฟโตมากขึ้น และพื้นที่เป็นกลางจะลดลง

พื้นที่ปลอดประจุพาหะได้จากการหาความกว้างของพื้นที่ปลอดประจุพาหะจากสมการที่ (4.2) คูณกับความกว้างของพื้นที่รับแสงดังสมการที่ (4.5) และพื้นที่เป็นกลางจะได้จากพื้นที่รับแสงทั้งหมดลบด้วยพื้นที่ปลอดประจุพาหะดังสมการที่ (4.6) ในการเปรียบเทียบผลของกระแสโฟโตต่อพื้นที่รับแสง ได้กำหนดให้พื้นที่ปลอดประจุพาหะของรอยสัมผัสที่ 2 เท่ากับศูนย์ เนื่องจากรอยสัมผัสที่ 2 ได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้พื้นที่ปลอดประจุพาหะของรอยสัมผัสที่ 2 มีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ปลอดประจุพาหะของรอยสัมผัสที่ 1 ซึ่งได้รับแรงดันแบบไบอัสกลับ

$$\text{พื้นที่รับแสงทั้งหมด} = \text{ความยาวของพื้นที่รับแสง} \times \text{ความกว้างของพื้นที่รับแสง} \quad (4.4)$$

$$\text{พื้นที่ปลอดประจุพาหะ} = \text{ความกว้างของพื้นที่ปลอดประจุพาหะ} \times \text{ความกว้างของพื้นที่รับแสง} \quad (4.5)$$

$$\text{พื้นที่เป็นกลาง} = \text{พื้นที่รับแสงทั้งหมด} - \text{พื้นที่ปลอดประจุพาหะ} \quad (4.6)$$

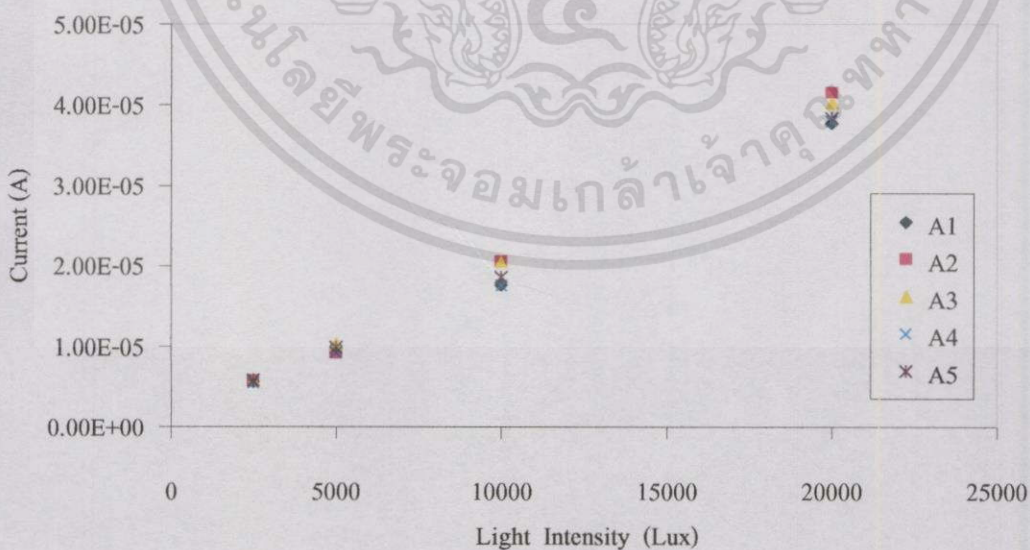
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.1 ผลของกระแสโฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีขนาดต่างกันแต่มีขนาดของขั้วโลหะเท่ากัน

ตารางที่ 4.7 พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al หมายเลข A1 ถึง A5 และมีความกว้างของขั้วโลหะเท่ากัน (ความกว้างของขั้วโลหะเท่ากับ 2000 μm)

หมายเลข	ระยะห่างขั้วโลหะ (μm)	พื้นที่รับแสง(แรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V)		
		พื้นที่ทั้งหมด (mm^2)	พื้นที่ปลอดประจุ พาหะ(mm^2)	พื้นที่เป็นกลาง (mm^2)
A1	20	0.04	0.0035	0.0365
A2	40	0.08	0.0035	0.0765
A3	200	0.4	0.0035	0.3965
A4	500	1	0.0035	0.9965
A5	1000	2	0.0035	1.9965

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่าทั้ง A1 ถึง A5 จะมีพื้นที่ปลอดประจุพาหะเท่ากันและมีพื้นที่เป็นกลางแตกต่างกัน เมื่อนำกระแสโฟโตมาหาความสัมพันธ์ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.48 พบว่า กระแสโฟโตที่เกิดขึ้นแต่ละความเข้มแสงทุก ๆ พารามิเตอร์จะมีขนาดใกล้เคียงกัน ในขณะที่พื้นที่ปลอดประจุพาหะมีค่าเท่าเดิม แต่พื้นที่เป็นกลางเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระแสโฟโตที่เกิดจากพื้นที่เป็นกลางมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสโฟโตที่เกิดจากพื้นที่ปลอดประจุพาหะ

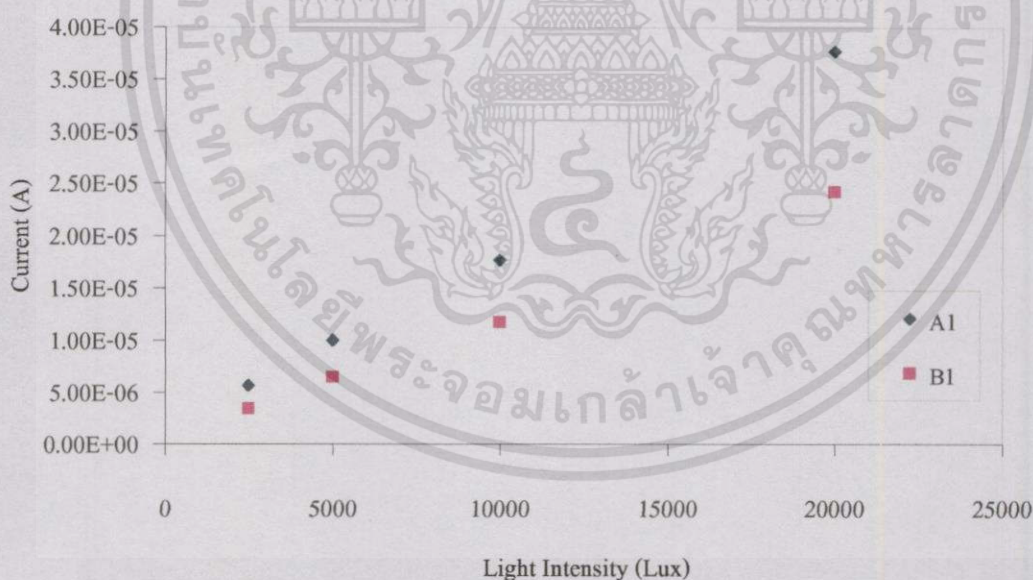


รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตต่อความเข้มแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีพื้นที่รับแสงต่างกันแต่มีขั้วโลหะเท่ากัน

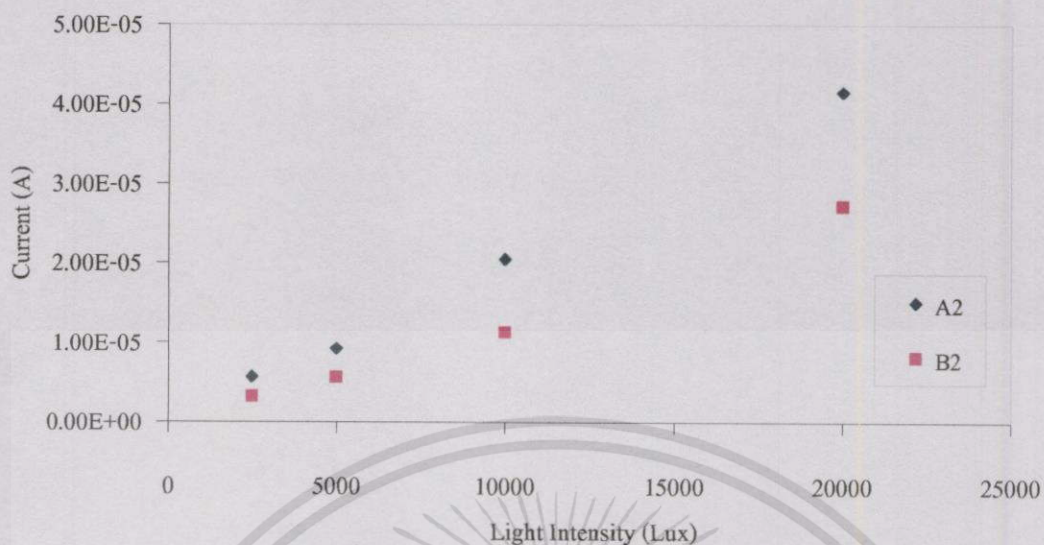
4.4.1.2 ผลของกระแสโฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีพื้นที่เท่ากันแต่มีขนาดของขั้วโลหะไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.8 ขนาดของพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่มีพื้นที่เท่ากันแต่มีความกว้างของขั้วโลหะไม่เท่ากัน

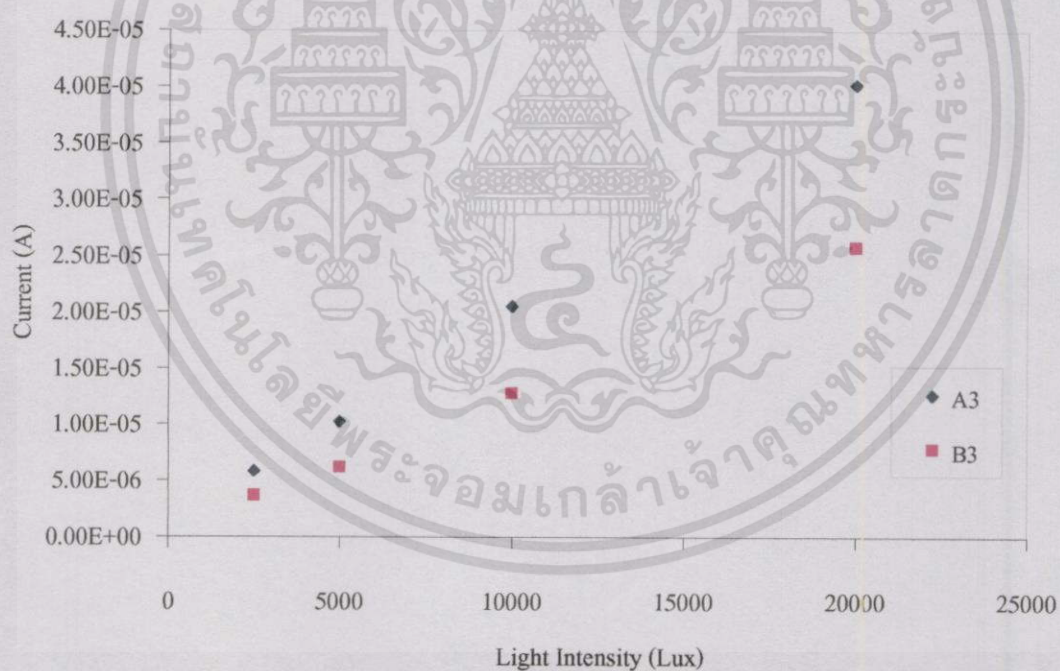
หมายเลข	ความกว้างของขั้วโลหะ (μm)	ระยะห่างของขั้วโลหะ (μm)	พื้นที่รับแสงขณะแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V		
			พื้นที่ทั้งหมด (mm^2)	พื้นที่ปลอดประจุ (mm^2)	พื้นที่เป็นกลาง (mm^2)
A1	2000	20	0.04	0.0035	0.0365
B1	1000	40		0.00175	0.03825
A2	2000	40	0.08	0.0035	0.0765
B2	1000	80		0.00175	0.07825
A3	2000	200	0.4	0.0035	0.3965
B3	1000	400		0.00175	0.39825



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ของกระแสโฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ของหมายเลข A1 และ B1 (ขณะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V)



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ของหมายเลข A2 และ B2 (ขณะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V)



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟโตต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ของหมายเลข A3 และ B3 (ขณะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V)

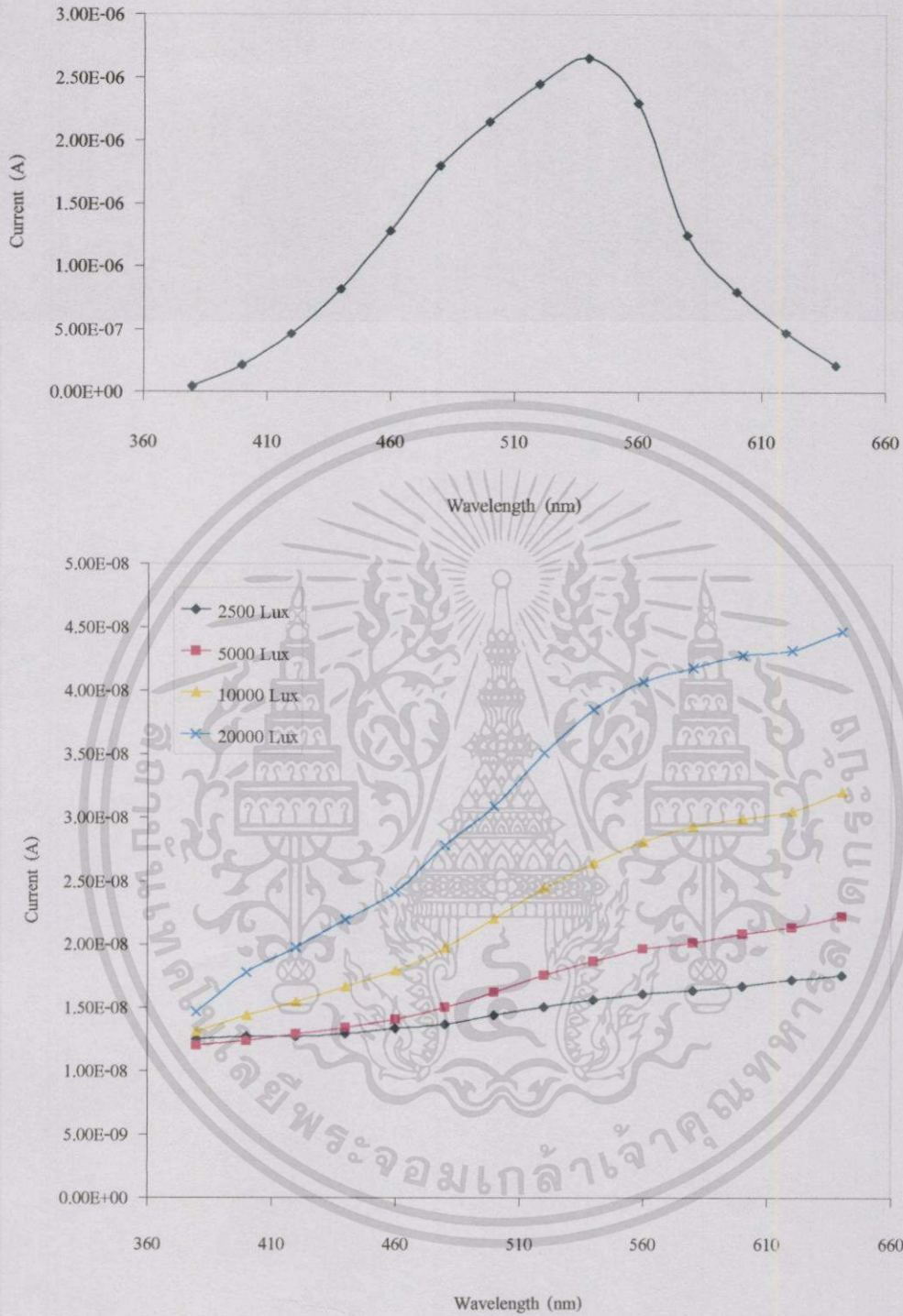
จากตารางที่ 4.8 พื้นที่รับแสงทั้งหมดของ A1, A2 และ A3 เท่ากับพื้นที่รับแสงทั้งหมดของ B1, B2 และ B3 ตามลำดับ แต่จะแตกต่างกันที่ความกว้างของขั้วโลหะซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของพื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง ซึ่งจากรูปที่ 4.49 กระแสโฟโตในแต่ละความเข้มของแสงจะมีค่าแตกต่างกัน จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.49, 4.50 และ 4.51 จะพบว่าในแต่ละความเข้มแสงของกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นจาก A1, A2 และ A3 จะมีค่ามากกว่ากระแสโฟโตของ B1, B2 และ B3 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ปลอดประจุพาหะของ A1, A2 และ A3 มากกว่า B1, B2 และ B3 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันพื้นที่เป็นกลางของ A1, A2 และ A3 จะน้อยกว่าพื้นที่เป็นกลางของ B1, B2 และ B3 ตามลำดับ

4.4.2 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al โดยใช้เครื่อง Monochromator ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฮาโลเจนที่มีความยาวคลื่นในช่วง 300 nm ถึง 3000 nm ซึ่งช่วงความยาวคลื่นที่โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al โดยพลังงานแสงที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำให้เป็นอิสระ ค่าพลังงานต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจากสมการที่ (4.7) ความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ดูดกลืนต้องมีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1100 nm เมื่อแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) ของซิลิคอนเท่ากับ 1.12 eV

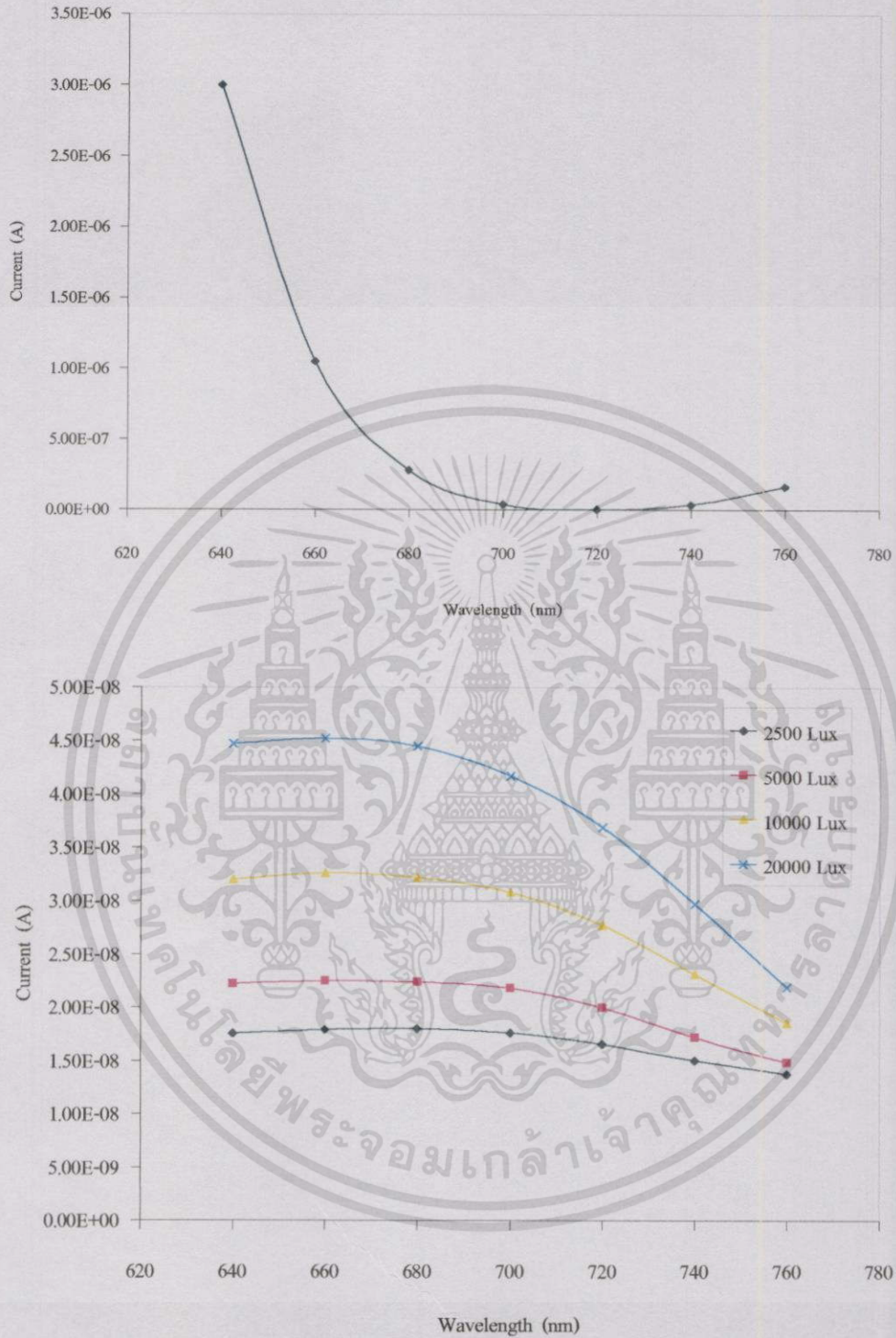
$$\lambda \leq \frac{hc_0}{E_g} = \frac{1240}{E_g} \quad (\text{nm}) \quad (4.7)$$

ผลการทดลองการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และเนื่องจากเครื่อง Electrophotometer สามารถวัดการตอบสนองทางสเปกตรัมได้ที่ช่วงความยาวคลื่น ดังนั้น การเปรียบเทียบผลการทดลองการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอดและเครื่อง Electrophotometer จึงทำการวัดเปรียบเทียบที่ช่วงความยาวคลื่น ดังรูปที่ 4.52 ถึง 4.56



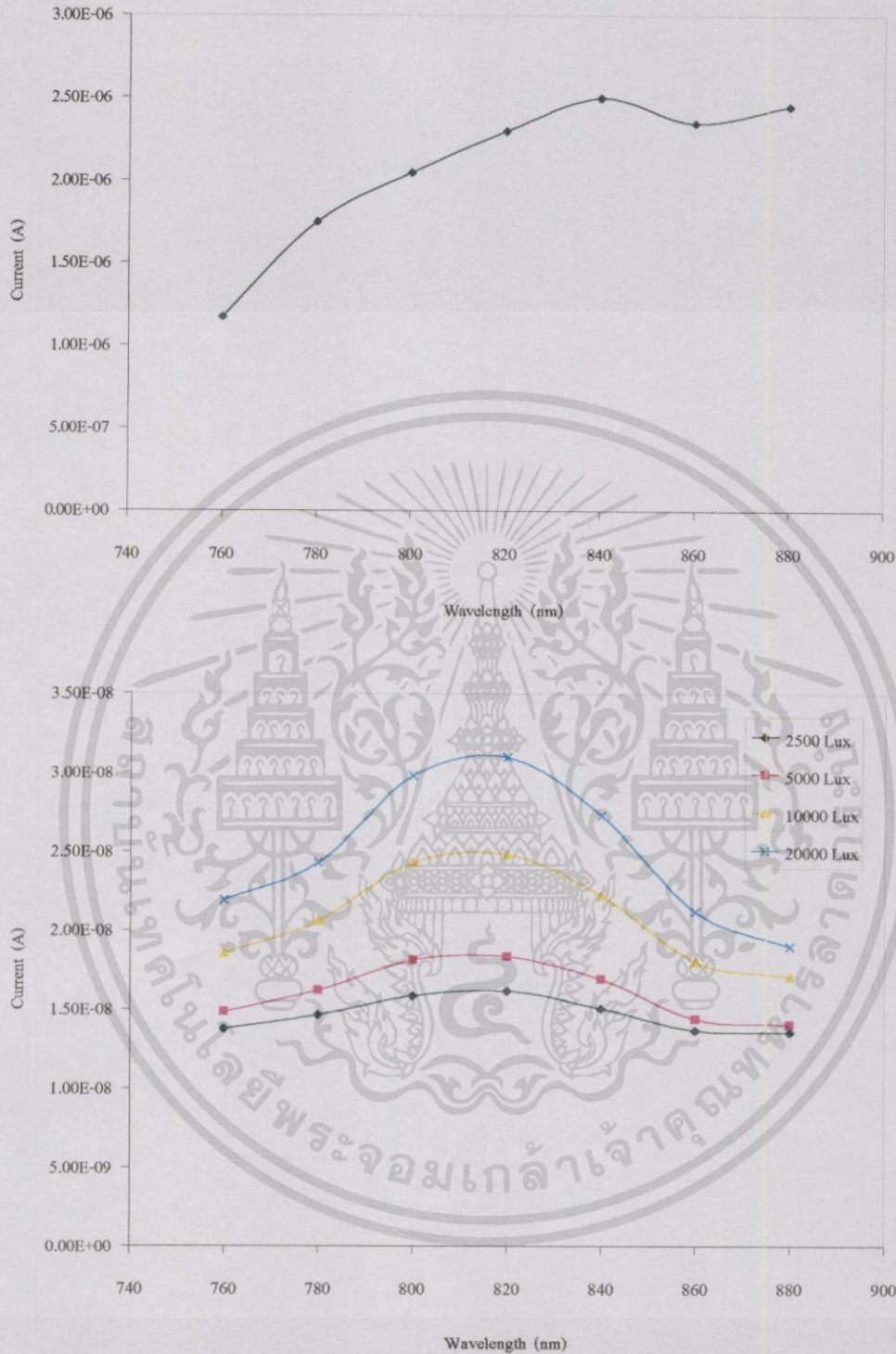
รูปที่ 4.52 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 380 nm ถึง 640 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



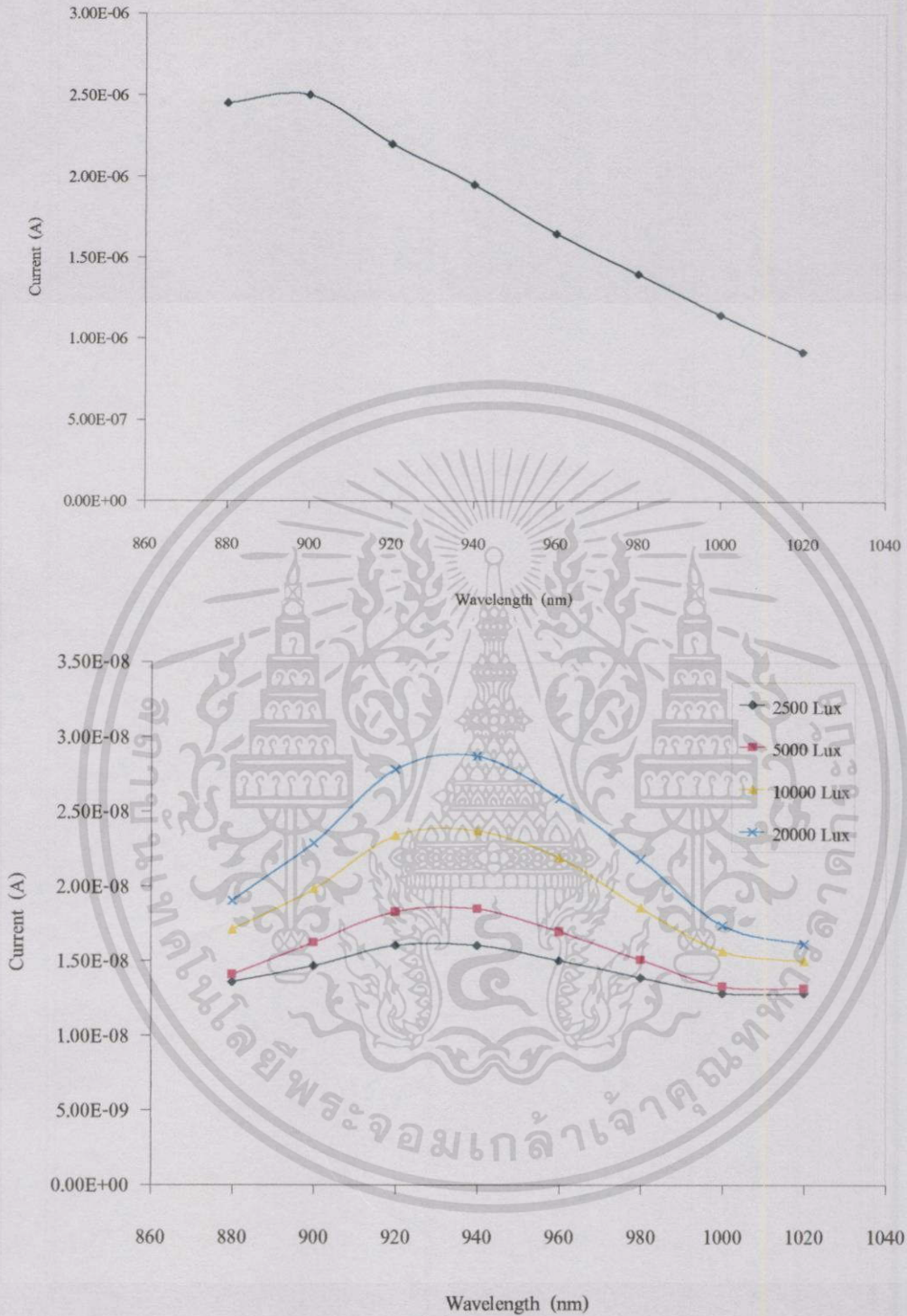
รูปที่ 4.53 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 640 nm ถึง 760 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



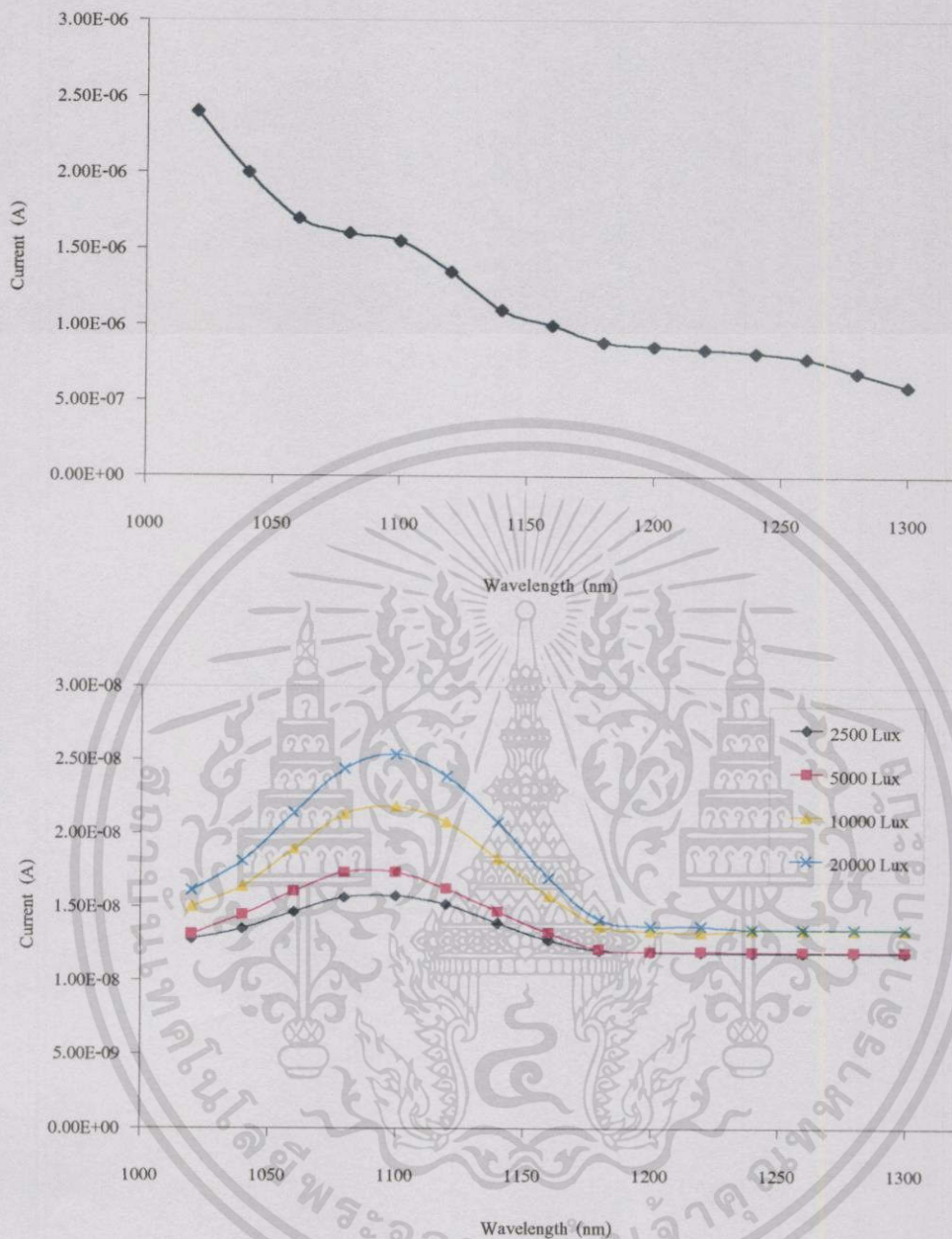
รูปที่ 4.54 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับในช่วงความยาวคลื่น 760 nm ถึง 880 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 880 nm ถึง 1020 nm

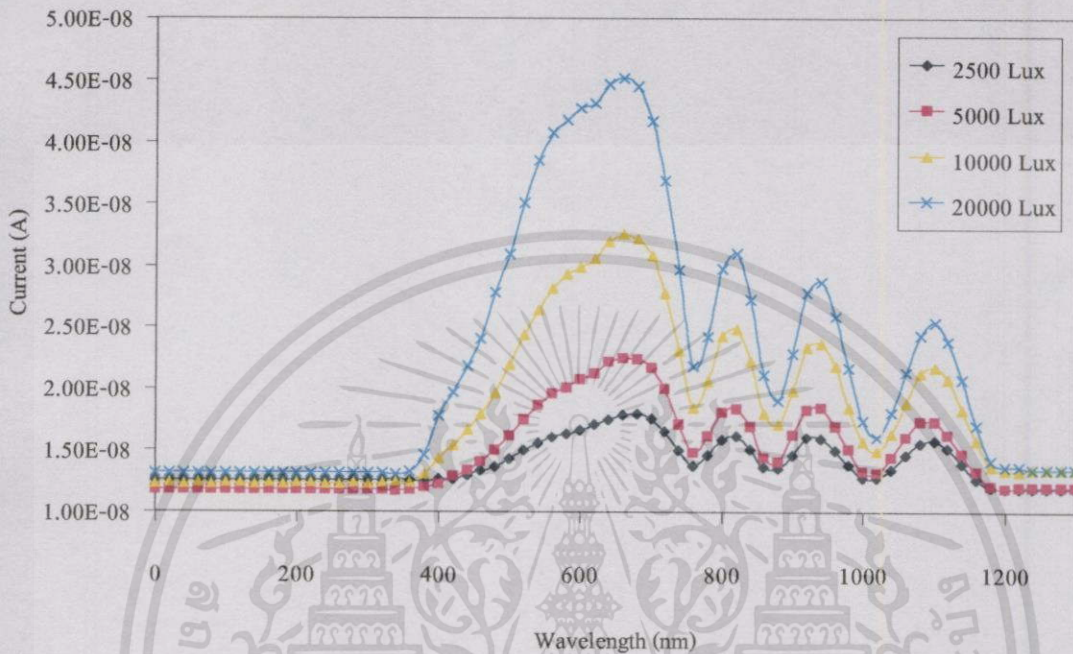
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



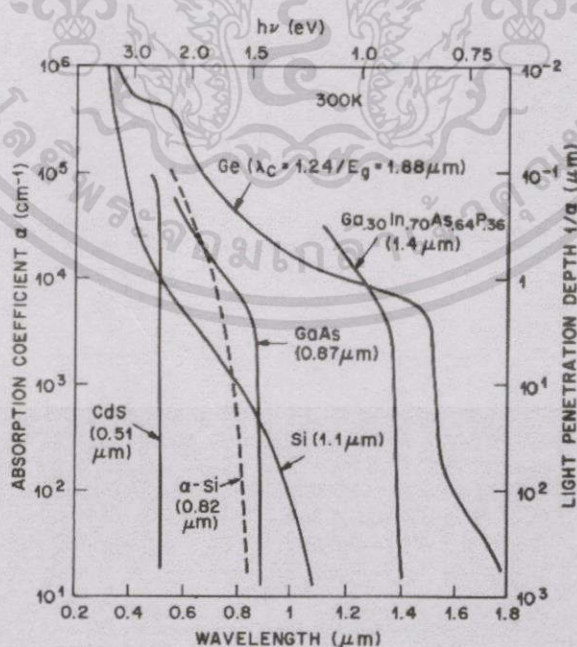
รูปที่ 4.56 ผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของเครื่อง Electrophotometer และ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 1020 nm ถึง 1300 nm

จากรูปที่ 4.52 ถึง 4.56 การตอบสนองทางความสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al จะมียอดความยาวคลื่นที่ตอบสนองคือ 660 nm, 820 nm, 940 nm และ 1100 nm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การตอบสนองทางสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง Electrophotometer ซึ่งใน 3 ยอดความยาวคลื่นของโฟโตไดโอดตอบสนอง คือ 660 nm, 820 nm และ 940 nm จะพบความยาวคลื่นในช่วงใกล้ซึ่งได้จากการตอบสนองของเครื่อง Electrophotometer คือ 520 nm, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

840 nm และ 900 nm ตามลำดับ ส่วนความยาวคลื่นสุดท้ายคือที่ 1100 nm เป็นความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับช่องว่างของแถบพลังงานต้องห้ามของซิลิคอนทำให้สามารถตอบสนองความยาวคลื่นนี้ได้



รูปที่ 4.57 ผลการทดลองการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

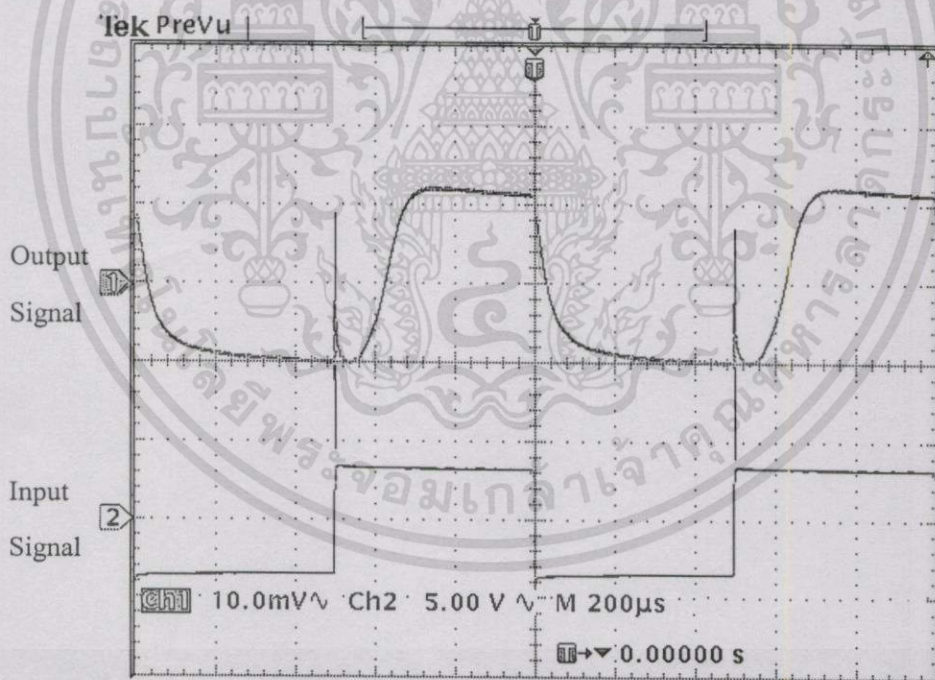


รูปที่ 4.58 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al จากรูปที่ 4.52 ถึง 4.56 มาพล็อตกราฟต่อกันซึ่งจะได้ดังรูปที่ 4.57 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถตอบสนองทางสเปกตรัมที่มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฮาโลเจน โฟโตไดโอดสามารถตอบสนองในช่วงความยาวคลื่น 380 nm ถึง 1200 nm และโฟโตไดโอดจะมีการตอบสนองยอดความยาวคลื่นต่าง ๆ กันคือ 660 nm, 820 nm, 940 nm และ 1100 nm ซึ่งกระแสที่ความยาวคลื่น 660 nm จะมีค่ากระแสมากที่สุดและกระแสจะมีค่าลดลงตามความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นคือ 820 nm, 940 nm และ 1100 nm ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงของซิลิคอนจะมีค่าลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 4.58 ดังนั้นกระแสที่วัดได้จากโฟโตไดโอดที่ความยาวคลื่น 660 nm จะมีปริมาณกระแสมากที่สุดและปริมาณกระแสจะลดลงตามค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิคอนที่ลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น คือ 820 nm, 940 nm และ 1100 nm ตามลำดับ

4.4.3 ผลการตอบสนองทางเวลาของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al



รูปที่ 4.59 สัญญาณเอาต์พุตของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

จากรูปที่ 4.59 เป็นสัญญาณการตอบสนองทางเวลาของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ขณะได้รับแสงจากเลเซอร์ไดโอด (แสงสีแดง) โดยมีอินพุตเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 1 kHz และโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับ 1 V และต่อกับ R_L เท่ากับ 40 k Ω เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้สามารถอ่านค่าช่วงเวลาขาขึ้น (Rise Time) และ ช่วงเวลาขาลง (Fall Time) ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าของช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงที่ได้จากการอ่านค่าสัญญาณเอาต์พุตของ โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

หมายเลข	ความกว้างของ ขั้วโลหะ(μm)	ระยะห่างระหว่างขั้ว โลหะ(μm)	ช่วงเวลาขาขึ้น (μs)	ช่วงเวลาขาลง (μs)
A1	2000	20	92	130
A2	2000	40	88	140.8
A3	2000	200	88	140.8
A4	2000	500	91	134.6
A5	2000	1000	91.2	141.6

จากตารางที่ 4.9 ช่วงเวลาขาขึ้นของทุก ๆ พารามิเตอร์ จะมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องมาจากค่าของ RC time constant ที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่า R คือ ผลรวมของความต้านภายในโครงสร้างของโฟโตไดโอดและ R_L ที่ต่ออยู่นอก และค่า C คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวมภายในของโครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al

จากรูปที่ 4.35 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดของทุก ๆ พารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการที่โฟโตไดโอดทุก ๆ พารามิเตอร์มีช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงได้ใกล้เคียงกันเป็นผลมาจากความต้านทานภายในโครงสร้างและ R_L ซึ่งต่ออยู่นอก โดย R_L ที่ใช้โดยทั่วไปจะมีค่าน้อย แต่เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al มีเพียง 2 รอบสัมผัส ทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีค่าน้อยมาก เพื่อเพิ่มกระแสในวงจรและเป็นการเพิ่มสัญญาณเอาต์พุต จึงต้องเพิ่ม R_L เป็น 40 k Ω ดังนั้น RC time constant ของตัวโฟโตไดโอดทุก ๆ พารามิเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงของแต่ละพารามิเตอร์จึงมีค่าใกล้เคียงกันไปด้วย

เมื่อนำค่าช่วงเวลาขาขึ้นไปคำนวณหาค่าแบนด์วิดหรือช่วงความถี่ที่โฟโตไดโอดสามารถตอบสนองได้ซึ่งทุก ๆ พารามิเตอร์มีค่าเท่ากับ 4 kHz

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการงานวิจัยเรื่องกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al โดยในส่วนแรกนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น โดยอะลูมิเนียมสร้างจากการเคลือบโลหะในสุญญากาศแล้วทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากนั้นหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ด้วยเทคนิคการวัดกระแส-แรงดัน และการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส ซึ่งจากการวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์จากทั้ง 2 วิธี ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิต้น คือ 100°C, 200°C และ 300°C ซึ่งรอยสัมผัสที่ได้จะเป็นรอยสัมผัสแบบชอตต์กี และเมื่ออุณหภูมิของการซินเตอร์ริงเป็น 400°C และ 500°C ในช่วงอุณหภูมินี้จะทำให้อะตอมของอะลูมิเนียมจะแพร่ไปยังซิลิคอน ชนิดเอ็น ซึ่งทำให้รอยสัมผัสที่ได้เป็นรอยสัมผัสแบบอัลลอย จากการพิจารณาค่าความสูงของกำแพงศักย์และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น ให้เป็นรอยสัมผัสแบบชอตต์กีและอัลลอยได้ โดยซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C ตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษากระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al โดยใช้เงื่อนไขของการซินเตอร์ริงซึ่งได้จากการศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น โดยซินเตอร์ริงโฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C ซึ่งทำให้ได้โฟโตไดโอด ที่มีรอยสัมผัสแบบชอตต์กีและแบบอัลลอย ตามลำดับ และในการออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al นี้ได้ออกแบบให้โฟโตไดโอดมีโครงสร้างแบบสมมาตร ซึ่งจะมีผลกับกระแสของโฟโตไดโอดขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับ จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อนำโฟโตไดโอดที่สร้างทั้งสองชนิด ไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าโฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบชอตต์กีจะมีกระแสรั่วและแรงดันพังทะลายที่ไม่แน่นอน และกระแสที่ไหลขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับจะมีลักษณะที่ไม่ใกล้เคียงกัน ส่วนโฟโตไดโอด ที่มีรอยสัมผัสแบบอัลลอยจะมีกระแสรั่วที่ต่ำและแรงดันพังทะลายที่แน่นอน และมีกระแสไหลขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ซึ่งสร้างชั้นอะลูมิเนียมจากเทคนิคเคลือบโลหะในสุญญากาศ จึงเหมาะสมที่จะสร้างโฟโตไดโอด ให้มีรอยสัมผัสแบบอัลลอย

ความแตกต่างของกระแสรั่วและแรงดันพังทะลายของโฟโตไดโอด ที่ซินเตอร์ริงที่ 300°C และ 500°C เกิดจากโฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบชอตต์กี ซึ่งซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C จะมีกระแสรั่วจากการสไปซ์ของอะลูมิเนียมบริเวณผิวของซิลิคอน ซึ่งทำให้สถานะพื้นผิวของรอยสัมผัส

มีค่าไม่แน่นอน ซึ่งทำให้โฟโตไดโอด ที่มีรอยสัมผัสแบบขดตัวก็มีกระแสรั่วและแรงดันพังทะลายที่ไม่แน่นอน ส่วนโฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบอัลลอย ซึ่งซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C ซึ่งจะทำให้บริเวณรอยสัมผัสเกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดการสไปซ์ของอะลูมิเนียม ทำให้มีกระแสรั่วต่ำและแรงดันพังทะลายคงที่

ในส่วนต่อไปเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al จากผลการทดลองของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ค่าของกระแสรั่วของโฟโตไดโอดจะมีค่าน้อยกว่า $0.5 \mu\text{A}$ และมีแรงดันพังทะลายประมาณ $\pm 2\text{V}$ ส่วนค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดพบว่าค่าความจุไฟฟ้าประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นค่าความจุไฟฟ้าจากรอยสัมผัส และส่วนที่สองจะเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากแพดทั้งสองข้าง ซึ่งหลังจากเกิดแรงดันพังทะลายแล้วค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าที่แพดทั้งสองข้าง

สุดท้ายเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al คือผลของพื้นที่รับแสง โดยพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดสามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง ถ้าเพิ่มแรงดันไบอัสจะทำให้พื้นที่ปลอดประจุพาหะเพิ่มมากขึ้น และพื้นที่เป็นกลางจะลดลง ในขณะที่พื้นที่ปลอดประจุพาหะเท่าเดิม กระแสโฟโตที่ได้จะมีค่าเท่าเดิม ถึงแม้ว่าพื้นที่เป็นกลางจะเพิ่มขึ้น กระแสโฟโตจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพื้นที่ปลอดประจุพาหะ ถึงแม้ว่าพื้นที่ที่เป็นกลางจะลดลง แสดงให้เห็นว่ากระแสโฟโตของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al เกิดจากพื้นที่ปลอดประจุพาหะมากกว่าพื้นที่เป็นกลาง

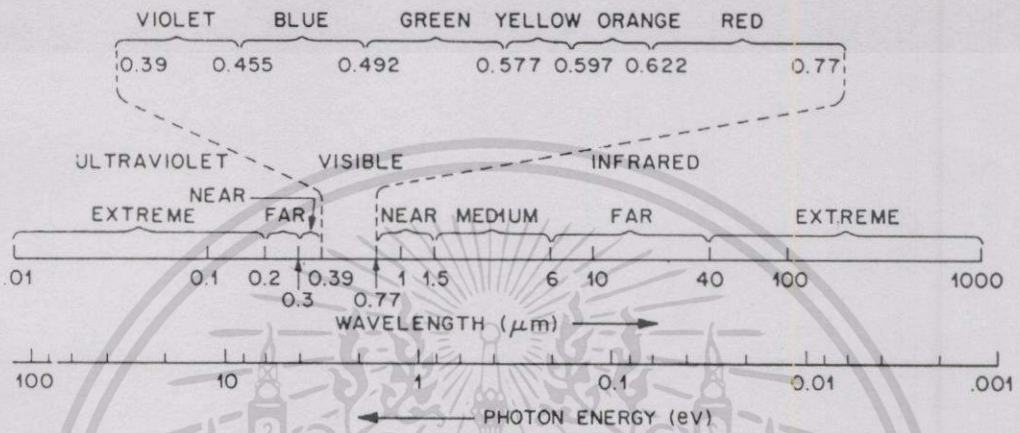
การตอบสนองทางสเปกตรัมของโฟโตไดโอด โดยสามารถตอบสนองในย่านความยาวคลื่นแสงมองเห็นและในช่วงต้นของความยาวคลื่นแสงอินฟราเรด โดยมีขีดความยาวคลื่น คือ 660 nm , 820 nm , 940 nm และ 1100 nm ตามลำดับ การตอบสนองทางเวลาของโฟโตไดโอด พบว่าช่วงเวลาขาขึ้นและเวลาขาลงของโฟโตไดโอดทุก ๆ พารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องมาจากค่า RC time constant ของโฟโตไดโอดแต่ละพารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลง คือ ประมาณ $90 \mu\text{s}$ และ $140 \mu\text{s}$ และค่าแบนด์วิดหรือความถี่ที่โฟโตไดโอดสามารถตอบสนองได้เท่ากับ 4 kHz

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al สามารถที่จะใช้เป็นตัวประดิษฐ์ตรวจจับแสงในย่านความยาวคลื่นแสงมองเห็นและแสงอินฟราเรดได้ สำหรับในการพัฒนานั้นผลการทดลองทั้งหมดนี้ สามารถที่จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาและพัฒนาโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al ตามเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Desmarais Louis. **Applied Electro-optics**. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR. 1998.
- [2] Sze S. M. **Physics of Semiconductor Devices 2nd Edition**. 1981.
- [3] Rhoderick E. H. Williams R. H. **Metal-Semiconductor Contacts 2nd Edition** Oxford University Press. New York. 1988.
- [4] Sze S M. Coleman D. J. JR. and Loya A. "Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structures." *Solid-State Electronics*. 1971. Vol. 14. pp. 1209-1248.
- [5] Takano H. Kimura M. Ando T. Niemcharoen S. Yasamura Y. and Sato K. "Optical Response of Planar Mo/n-Si/Mo Structure With Long Neutral Region and Schottky Barriers at Both Ends.", *Solid-State Electronics* 44 (2000). pp.2161-2164.
- [6] Solymar L. Walsh D. **Lectures on the electrical properties of materials**. 5th ed. Oxford : Oxford University Press. 1993.
- [7] Gerikd W. Neudeck. **The PN junction diode**. 2nd ed. Reading MA : Addison-Wesley. 1989.
- [8] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ.2542.
- [9] คุณิต เครื่องงาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ : ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งานงาน**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [10] สราวุธ วิสวแสงสุข และคณะ. "การศึกษาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสแบบขอตตักที่ผ่านการซินเตอร์ริง". การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23. พ.ศ.2543. หน้า 721-724.

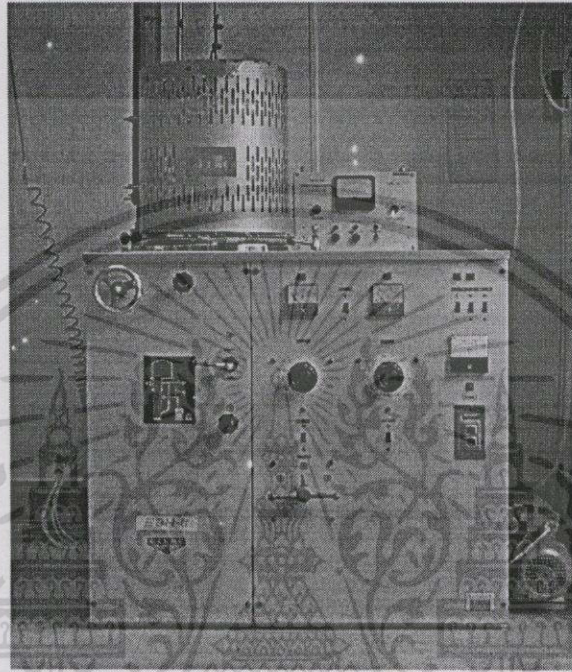
ภาคผนวก ก



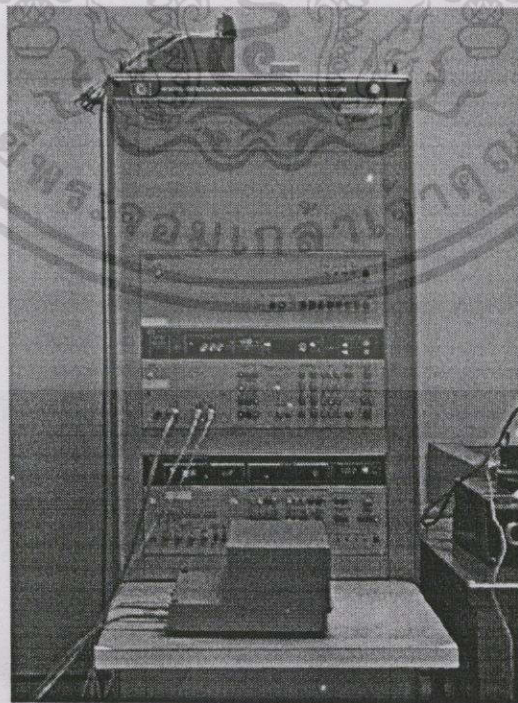
รูปที่ ก-1 แผนภาพของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



รูปที่ ข-1 เครื่อง Vacuum Evaporator



เอกสารรูปที่ ข-2 เครื่องมือวัด HP4061A (Semiconductor/Component Test System) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายสรายุทธ วิสวแสงสุข
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2518
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้