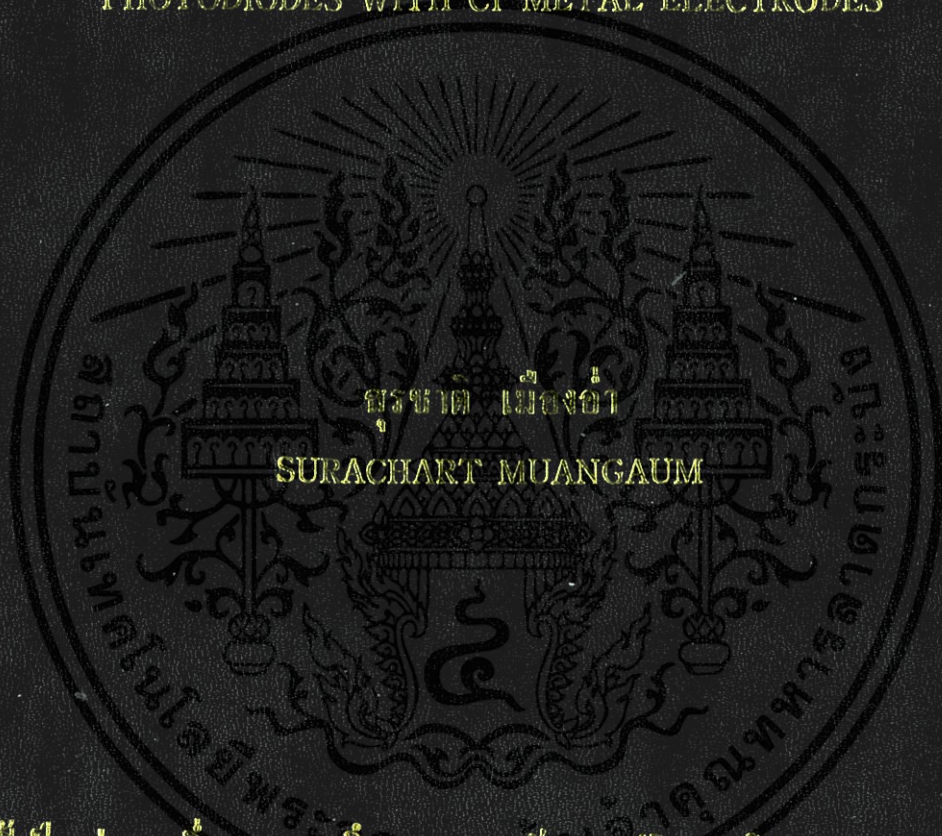


การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM
ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ

STUDY ON CHARACTERISTICS AND FABRICATION OF MSM
PHOTODIODES WITH Cr METAL ELECTRODES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-043-098

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM
ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ

STUDY ON CHARACTERISTICS AND FABRICATION OF MSM
PHOTODIODES WITH Cr METAL ELECTRODES



T105102

สุรชาติ เมืองอ่ำ

SURACHART MUANGAUM

พ.ศ.
๒๕๕๒

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....105102

วัน,เดือน,ปี.....16 พ.ย. 2552

.b.....121 64434
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-043-098

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON CHARACTERISTICS AND FABRICATION OF MSM
PHOTODIODES WITH Cr METAL ELECTRODES**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-043-098

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ
Thesis Title Study on Characteristics and Fabrication of MSM Photodiodes with Cr Metal Electrodes
นักศึกษา นายสุรชาติ เมืองอ่ำ
รหัสประจำตัว 49061303
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-043-098

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
รศ.ดร.วิสุทธี	ฐิติรุ่งเรือง	
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2552 เวลา 11.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ
นักศึกษา	นายสุรชาติ เมืองอ่ำ
รหัสนักศึกษา	49061303
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ของการศึกษาวิจัยทั้งหมด คือการแก้ไขปัญหาประสิทธิภาพเสถียรภาพทั้งในแง่ของกระบวนการสร้างและการใช้งานโฟโตไดโอด MSM โดยการนำ Cr มาสร้างเป็นขั้วโลหะทดแทน Al จากผลการทดสอบพบว่า Cr สามารถสร้างเป็นรอยสัมผัสชนิดที่ดี บนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นและพี ทนแรงดันพังทลายได้มากกว่า 100 V แต่ยังคงประสบปัญหากระแสรั่วไหลมีค่าสูงจากการบอมบาร์ดในการสปีดเตอร์ จึงทำการลดกระแสรั่วไหลด้วยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการสปีดเตอร์ โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างขั้วโลหะ Cr คือ ใช้กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน 4.5×10^{-3} mbar โดยไม่ได้ให้ความอุณหภูมิแก่ฐานรองเวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที โดยใน Cr/n-Si และ Cr/p-Si สามารถลดกระแสรั่วลงได้ 435 เท่า และ 428 เท่าตามลำดับ รอยสัมผัสทั้งสองมีค่าแรงดันภายใน 0.35 eV เท่ากัน ส่วนค่าแพนดักซ์ชนิดที่ดีมีค่า 0.71 eV และ 0.70 eV ตามลำดับ และขั้วโลหะ Cr มีค่าความหนาแน่นมากกว่า 1,000 Å เมื่อนำไปสร้างโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20 μm โดยที่แรงดันไบอัส 10 V มีค่ากระแสรั่วไหล 1.05 μA และ 0.25 μA ที่ความเข้มแสง 25,000 lux มีค่ากระแสแสง 18 μA และ 36 μA มีค่าความจุไฟฟ้า 38 pF และ 25 pF มีค่าความถี่คัทออฟ 3 MHz และ 5 MHz ตามลำดับ โดยค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าโฮล และจากแถบพลังงานที่แสดงให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ คาดว่าพาหะในการเกิดกระแสแสงส่วนใหญ่ของ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr เป็นโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ แต่เนื่องจากยังมีค่าคงที่เวลา RC สูง จึงควรออกแบบให้ขั้วโลหะมีค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานให้มีย่านค่าลดลง

Thesis Title	Study on Characteristics and Fabrication of MSM Photodiodes with Cr Metal Electrodes
Student	Surachart Muangaum
Student ID	49061303
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Surasak Niemchareon

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to solve the problem about the efficiency and the stability of fabrication and utilization of MSM Photodiode by replacing Al with Cr as metal electrode. The result of testing type of contact of Cr/n-Si and Cr/p-Si was Schottky contact. Breakdown voltage was over 100 V. But both Schottky contacts had high leakage current from sputtering bombardment. Therefore, to study on reducing the leakage current with changing sputter condition. The proper condition to sputter Cr were power 50 W, Ar pressure 4.5×10^{-3} mbar, unheated substrate and deposition time 30 min. The result of decreases the leakage current on Cr/n-Si and Cr/p-Si were 435 times and 428 times, respectively. Built in voltage of both Schottky contacts was $V_{bi} = 0.35$ eV. Schottky barrier of Cr/n-Si and Cr/p-Si were $\phi_{bn} = 0.71$ and $\phi_{bp} = 0.70$ eV, respectively. Thickness of Cr was over 1000 Å. Then, fabricated photodiode Cr/n-Si/Cr and Cr/p-Si/Cr had electrode spacing (S) = 20 μm. At biasing 10 V to Cr/n-Si/Cr and Cr/p-Si/Cr, leakage current were 1.05 μA and 0.25 μA, capacitance were 38 pF and 25 pF, photocurrent were 18 μA and 36 μA at 25,000 lux, cut off frequency were 3 MHz and 5 MHz, respectively. Hypothesis of mobility of electron is more than mobility of hole and direction of carrier transport that demonstrate to band diagrams. So, phtocurrent of Cr/n-Si/Cr and Cr/p-Si/Cr was hole and electron, respectively and frequency response of Cr/p-Si/Cr was more than Cr/n-Si/Cr. However, value of RC time constant was high. Therefore, should design electrode pad to minimum R and C.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และความอนุเคราะห์แก่ข้าพเจ้าจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุกเดช และ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อชี้แนะและแนวทางรวมถึง อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้เพิ่มพูนประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณคุณรุ่งสรรค์ เมืองเหลือ ที่ได้ถ่ายทอดวิธีการเตรียมฟิล์มบาง โครเมียมด้วยกระบวนการอาร์เอฟสปีดเตอร์ คุณนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง ที่ได้ถ่ายทอดกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี คุณอภิรักษ์ ฤกษ์รัตน์ ที่ได้ถ่ายทอดวิธีการวัดผลการทดลอง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาและถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในกระบวนการสร้างการทดลอง

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองวัดความหนาของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณคุณจิรวรรณ ปราบเขต คุณคงกฤษณ์ ไพรวัดย์ รวมถึงนักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้ช่วยแนะนำเทคนิคการวัดผลและมุมมองทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คุณชุตินันท์ โรงน้ำพุทติกุล คุณนริศรา ถิ่นวานิชรัตน์ คุณนิธิธร ชาญนำสิน คุณกมลวรรณ อุ่นสมบัติ คุณกิตติพงษ์ จันทรมัสการ และนักศึกษาปริญญาตรีที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ได้รับความช่วยเหลือในการทดลองและการวัดผลการทดลองบางส่วน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาเป็นอย่างสูง สำหรับกำลังใจและความรักที่มีให้อย่างไม่จำกัด จนการศึกษาในระดับปริญญาโทและวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้

สำหรับคุณประโยชน์ที่เกิดวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่อาจารย์ที่เคารพทุกท่านและศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	5
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย	7
1.5 ขอบเขตของการศึกษา	8
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	9
1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	9
บทที่ 2 โฟโตไดโอด MSM และการสปีดเตอร์	11
2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ	11
2.2 รอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำ	16
2.3 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM	28
2.4 ความเร็วในการตอบสนองและแบนด์วิดท์	38
2.5 กระบวนการสร้างขั้วโลหะโดยการสปีดเตอร์	40
2.6 สถานะผิวของรอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำ	45
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง	47
3.1 โครงสร้างโฟโตไดโอด	47
3.2 กระบวนการสร้าง	48
3.3 การทดลอง	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	57
4.1 การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสที่ใช้ขั้วโลหะ Cr	57
4.1.1 การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/n-Si	57
4.1.2 การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/p-Si	62
4.2 การทดลองการลดกระแสรั่วจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการสปีดเตอร์	66
4.2.1 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลง กำลังในการสปีดเตอร์	67
4.2.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลง ความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์	68
4.2.3 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์	69
4.2.4 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลง เวลาในการสปีดเตอร์	71
4.3 การทดสอบการวัดความหนาของฟิล์มบาง Cr ด้วย Surface profiler และ การทดสอบอัตราการกัดของน้ำยาคัด Cr	73
4.4 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบาง Cr เมื่อเปลี่ยนแปลง เงื่อนไขในการสปีดเตอร์	74
4.4.1 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบาง Cr เมื่อเปลี่ยนแปลง กำลังในการสปีดเตอร์	74
4.4.2 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบาง Cr เมื่อเปลี่ยนแปลง ความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์	75
4.4.3 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบาง Cr เมื่อเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์	76
4.4.4 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบาง Cr เมื่อเปลี่ยนแปลง เวลาในการสปีดเตอร์	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ	78
4.5.1 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr	78
4.5.1.1 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ขณะไม่ได้รับแสง	80
4.5.1.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ขณะได้รับแสง	81
4.5.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr	83
4.5.2.1 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ขณะไม่ได้รับแสง	84
4.5.2.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ขณะได้รับแสง	86
4.6 การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ	91
4.6.1 การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr	92
4.6.2 การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr	92
4.7 การทดลองการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ.....	94
4.7.1 การทดลองการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr	96
4.7.2 การทดลองการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	101
เอกสารอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3.1 การสปีดเตอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา52



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การนำเอาโฟโตไดโอดมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ.....	1
1.2 แถบพลังงานของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ขณะถูกไบอัสและได้รับแสง.....	7
2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ (ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง.....	13
2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	14
2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ (ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี.....	14
2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม.....	15
2.5 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อคกี.....	17
2.6 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อคกี.....	17
2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง.....	19
2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	20
2.9 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อคกี.....	22
2.10 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสช็อคกี.....	22
2.11 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	23
2.12 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	24
2.13 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกีและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น.....	26
2.14 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี.....	27
2.15 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกีที่แสดง ในเทอมของ $1/C^2$ ซึ่งจะได้เป็นกราฟเส้นตรง.....	27
2.16 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อนของ Cr/n-Si/Cr.....	29
2.17 แถบพลังงานของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	30
2.18 แถบพลังงานของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและได้รับแสง.....	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 (ก) ภาพภาคตัดขวางของ โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr	
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อนของ Cr/p-Si/Cr.....	33
2.20 แถบพลังงานของ โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดัน ไปอัส.....	34
2.21 แถบพลังงานของ โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดัน ไปอัสและ ได้รับแสง.....	35
2.22 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	36
2.23 ความจุไฟฟ้าของ โครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไปแอส.....	37
2.24 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของ MSM.....	38
2.25 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ.....	39
2.26 กระบวนการสปีดเตอร์ที่เกิดภายในแชนเนล.....	41
2.27 การบอมบ์บาร์ดของ Ar^+ ที่ก่อให้เกิดอะตอมในกระบวนการสปีดเตอร์.....	42
2.28 อนุภาคที่เกิดในกระบวนการสปีดเตอร์ที่ลงมายังฐานรอง.....	43
2.29 ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์.....	44
3.1 โฟโตไดโอด MSM โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr.....	47
3.2 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด MSM โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr.....	51
3.3 โฟโตไดโอด MSM โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr.....	51
3.4 ฟิล์มบางโครเมียมจากการสปีดเตอร์บนกระจกสไลด์.....	51
3.5 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ Cr/n-Si และ Cr/p-Si.....	53
3.6 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	54
3.7 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ในสัญญาณแสงกระแสตรง.....	55
3.8 การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr.....	55
3.9 การทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ.....	56
4.1 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพัทธ์กระแส - แรงดันรอยสัมผัส Cr/n-Si.....	57
4.2 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/n-Si.....	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส Cr/n-Si.....	58
4.4 การหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตัวย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส Cr/n-Si.....	59
4.5 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี๋ ในช่วงไบอัสย้อนกลับ แรงดันพังทลายของรอยสัมผัส Cr/n-Si สูงกว่า 100 V.....	60
4.6 (ก) แถบพลังงานของรอยสัมผัส Cr/n-Si ในกรณีอุณหภูมิต่ำ.....	61
(ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัส Cr/n-Si ในกรณีที่มีสถานะผิว.....	61
4.7 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพัทธ์กระแส - แรงดันรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	62
4.8 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	63
4.9 การหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	63
4.10 การหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตัวย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	64
4.11 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Al/p-Si.....	64
4.12 (ก) แถบพลังงานของรอยสัมผัส Cr/p-Si ในกรณีอุณหภูมิต่ำ.....	65
(ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัส Cr/p-Si ในกรณีที่มีสถานะผิว.....	66
4.13 ความสัมพันธ์ค่าแรงศักย์ช็อคกี๋กับกำลังการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	67
4.14 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลกับกำลังในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	67
4.15 ความสัมพันธ์ค่าแรงศักย์ช็อคกี๋กับความดันก๊าซอาร์กอนของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	68
4.16 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลกับความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	69
4.17 ความสัมพันธ์ค่าแรงศักย์ช็อคกี๋กับอุณหภูมิฐานรองของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	70
4.18 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลกับอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	70
4.19 ความสัมพันธ์ค่าแรงศักย์ช็อคกี๋กับเวลาในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	71
4.20 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลกับเวลาในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	72
4.21 การทดสอบวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเครื่อง Surface profiler.....	73
4.22 ความสัมพันธ์ความหนาของฟิล์มบาง Cr กับกำลังในการสปีดเตอร์.....	74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ความสัมพันธ์ความหนาของฟิล์มบาง Cr กับความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์.....	75
4.24 ความสัมพันธ์ความหนาของฟิล์มบาง Cr กับอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์.....	76
4.25 ความสัมพันธ์ความหนาของฟิล์มบาง Cr กับเวลาในการสปีดเตอร์.....	77
4.26 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง Cr/n-Si.....	79
4.27 การหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตัวย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส Cr/n-Si.....	79
4.28 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสง.....	80
4.29 ความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสง ที่ผ่านการลดกระแสรั่วจากปรับเงื่อนไขในการสปีดเตอร์.....	81
4.30 ความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสง ที่ไม่ได้ปรับเงื่อนไขในการสปีดเตอร์.....	81
4.31 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะได้รับแสง.....	82
4.32 ความสัมพันธ์กระแสแสง - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะได้รับแสง ความเข้มค่าต่างๆ.....	82
4.33 ความสัมพันธ์กระแสแสงกับความเข้มแสงของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr.....	83
4.34 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง Cr/p-Si.....	84
4.35 การหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตัวย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส Cr/p-Si.....	84
4.36 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสง.....	85
4.37 ความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสง ที่ผ่านการลดกระแสรั่วจากปรับเทคนิคในการสปีดเตอร์.....	85
4.38 ความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสงที่ ไม่ได้ปรับเทคนิคในการสปีดเตอร์.....	86

สารบัญรูป(ต่อ)

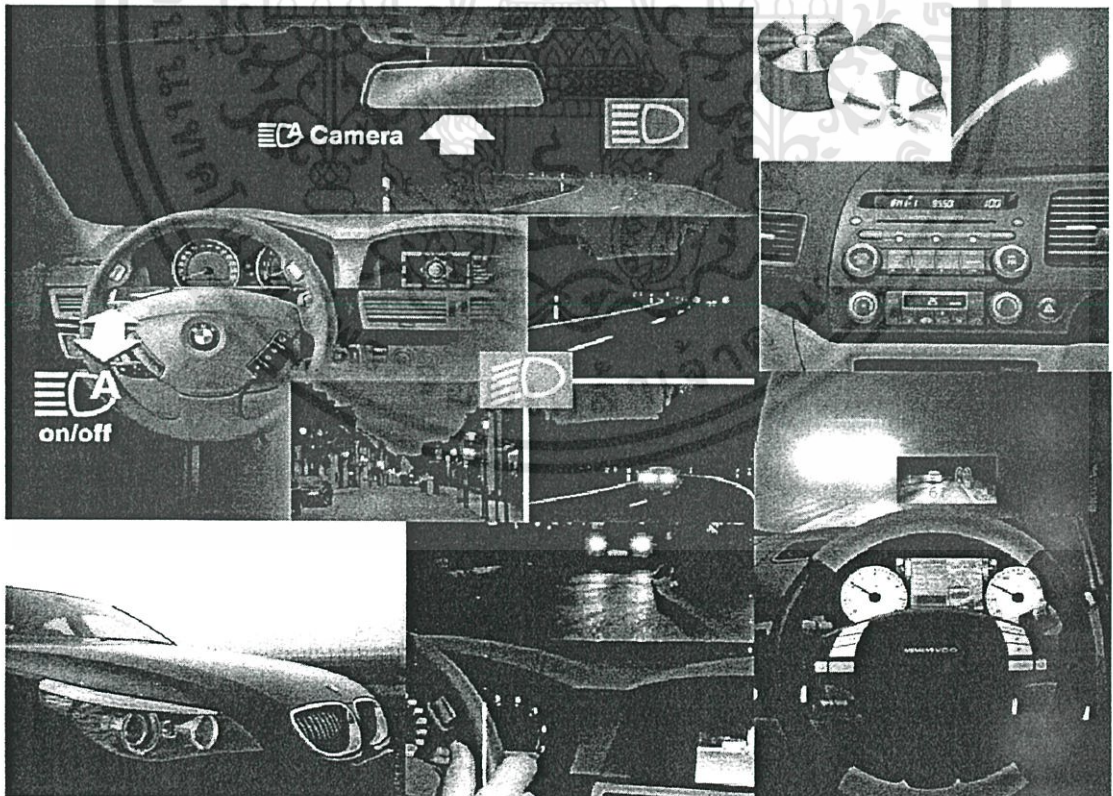
รูปที่	หน้า
4.39 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพัทธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะได้รับแสง.....	87
4.40 ความสัมพัทธ์กระแสแสง - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะได้รับแสงความเข้มต่างๆ.....	87
4.41 ความสัมพัทธ์กระแสแสงกับความเข้มแสงของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr.....	88
4.42 ความสัมพัทธ์ความกว้างบริเวณปลอดพาหะกับแรงดันไบอัส.....	89
4.43 ความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสแสงกับบริเวณปลอดพาหะของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr	90
4.44 ความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสแสงกับบริเวณปลอดพาหะของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr	90
4.45 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพัทธ์ความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ.....	91
4.46 ความสัมพัทธ์ความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr.....	92
4.47 ความสัมพัทธ์ความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr.....	93
4.48 ระบบเครื่องมือวัดการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ.....	94
4.49 ตัวอย่างสัญญาณจากออสซิลโลสโคปของโฟโตไดโอด.....	95
4.50 การตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 MHz.....	96
4.51 การตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 MHz.....	97
4.52 แถบพลังงานของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและได้รับแสง.....	99
4.53 แถบพลังงานของโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและได้รับแสง.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ซิลิคอนโฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้สำหรับการตรวจจับแสงแล้วเปลี่ยนสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถตรวจจับแสงทั้งในย่านอัลตราไวโอเล็ต ย่านแสงมองเห็น ย่านอินฟราเรด มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความน่าเชื่อถือ ทนทาน อายุการใช้งานยาวนาน สัญญาณรบกวนต่ำ ความเร็วสูง ตอบสนองต่อแสงได้ดีและเป็นเชิงเส้น ราคาถูก ใช้พลังงานต่ำ [1] ออกแบบได้หลากหลายตามความต้องการตามจุดประสงค์ของการนำไปใช้ ไม่ว่าจะในการถ่ายภาพ การวัดระยะทางและด้วยความเร็วแสงทำให้การสื่อสารทางแสงเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ระบบการจับเก็บข้อมูลด้วยแสง การตรวจหาควัน การวัดความเข้มแสง เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ และอุตสาหกรรม ล้วนแต่ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอด [2]



รูปที่ 1.1 การนำเอาโฟโตไดโอดมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศไทยในปี 2552 ได้ก้าวขึ้นมามีบทบาทเป็นประเทศผู้ประกอบรถยนต์ส่งออกรายใหญ่ของโลก ด้วยข้อดีของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ได้กล่าวมาในข้างต้นที่สอดคล้องกับความต้องการในอุตสาหกรรมรถยนต์ ไม่ว่าจะเป็นขนาดเล็ก มีความทนทาน การใช้พลังงานต่ำ ทำให้ในปัจจุบันซิลิคอนเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมรถยนต์เป็นอย่างมาก และโฟโตไดโอดสามารถนำมาใช้ในรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 1.1 รถยนต์ที่มีระบบช่วยการมองเห็นในเวลากลางคืน ระบบเปิด-ปิดไฟหน้าอัตโนมัติ ระบบปรับองศาไฟหน้าอัตโนมัติตามสภาพแวดล้อม เช่น ปรับองศาไฟต่ำเมื่อมีรถยนต์ที่วิ่งสวนทางมาหรือขับตามหลังรถยนต์คันอื่น และปรับองศาไฟสูงเมื่อต้องการทัศนวิสัยที่ดี เพื่อมิให้รบกวนผู้ร่วมท้องถนนท่านอื่น หรือระบบปรับอากาศอัตโนมัติที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและปรับความแรงของพัดลมตามปริมาณแสงแดดที่ส่องเข้ามาภายในห้องโดยสาร

แม้ว่าในปัจจุบันสารประกอบหมู่ III-V จะได้รับความสนใจกันมากเป็นอย่างมากแต่ว่าสารประกอบหมู่ III-V นั้นราคาแพง มีความเป็นพิษต่อมนุษย์สูง มีขั้นตอนการเตรียมสารกระบวนการนำมาใช้ที่ยุ่งยากซับซ้อน [3,4,26] หากนำมาสร้างร่วมกับวงจรรวม ประกอบกับเทคโนโลยีซิลิคอนได้รับการพัฒนาปรับปรุงมาโดยตลอดและมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ซึ่งซิลิคอนโฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่มีกระบวนการสร้างสอดคล้องกับกระบวนการสร้างวงจรรวม ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ไม่สูงมากนัก และยังคงสอดคล้องเหมาะสมกับเทคโนโลยีซิลิคอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดมีหลายชนิด เช่น พี-เอ็น โฟโตไดโอด พี-ไอ-เอ็น โฟโตไดโอด อวาลันซ์โฟโตไดโอด และ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โฟโตไดโอด (MSM-PD) แต่ละชนิดมีข้อดี ข้อด้อยและจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป โฟโตไดโอดโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะเป็นตัวตรวจวัดแสง ที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสร้างได้ง่ายมีเพียงโลหะวางอยู่บนสารกึ่งตัวนำเป็นโครงสร้างรอยต่อชนิดกึ่งสองรอยต่อเท่านั้น อีกทั้งสามารถใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงในแบบเชิงราบสอดคล้องกับกระบวนการสร้างวงจรรวม ทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรรวมไดโอดอิเล็กทรอนิกส์หรือสามารถสร้างวงจรรขยายให้อยู่ใกล้กับตัวตรวจวัดแสงได้ [3] การออกแบบใช้กระจกชั้นแบบเพียง 1-2 แผ่น ทำให้ประหยัดเวลาในการออกแบบและลดขั้นตอนในการสร้าง นอกจากนี้โครงสร้าง MSM ยังมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำทำให้ตอบสนองสัญญาณความถี่สูงได้

เป็นอย่างดี และด้วยโครงสร้างที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างทำให้สามารถควบคุมกระแสด้วยแรงดันได้ [5]

ที่ผ่านมาการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ได้เลือกใช้สารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดเอ็นและใช้ขั้วโลหะเป็นอลูมิเนียม พบปัญหาในการใช้งาน

1. Al/n-Si/Al ที่สร้างทนแรงดันพังทลายได้ต่ำเพียง 5 – 10 V [6,7] ทำให้ใช้งานอุปกรณ์ได้ในช่วงแคบๆ หากสามารถเพิ่มความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ได้ก็เป็นการเพิ่มช่วงการใช้งานให้มากขึ้น และยังสามารถศึกษากลไกการเกิดกระแสแสงในช่วงที่แรงดันไบอัสมากกว่า 10 V ได้

2. กระบวนการสร้างอลูมิเนียมโดยการระเหยสารในสุญญากาศควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มบางได้ยาก หลังการสร้างโลหะอลูมิเนียมต้องนำอุปกรณ์ผ่านการซินเตอร์เพื่อให้ได้รอยสัมผัสที่ดียิ่งขึ้น [6,8]

3. โลหะอลูมิเนียมมักเกิดการสไปล์เมื่อได้รับความร้อน การสไปล์ทำให้อุปกรณ์ทนแรงดันพังทลายได้ต่ำเพราะเกิดสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณปลายแหลมของสไปล์ หากอลูมิเนียมแพร่ซึมทะลุชั้นฉนวนหรือซิลิคอนทำให้เกิดการลัดวงจรได้ [9]

4. อลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ 660 °C [10] ทำให้หลังกระบวนการสร้างโลหะอลูมิเนียมอุปกรณ์ไม่สามารถนำไปผ่านกระบวนการสร้างอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียม ซึ่งเป็นข้อจำกัดหากนำไปใช้กับกระบวนการ CVD ในการสร้างชั้นฉนวนของวงจรรวมที่จะต้องผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิสูง

5. อลูมิเนียมมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่ำ [10] ทำให้เป็นโลหะเนื้ออ่อนเกิดรอยขีดข่วนได้ง่ายหรือในกระบวนการวัดตรวจสอบวงจบบนแผ่นเวเฟอร์จึงจำเป็นต้องใช้เข็มโพรบ เข็มวัดอาจทะลุชั้นโลหะวงจรเกิดการเสียหายได้

6. อลูมิเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง [10] ทำให้เมื่อนำอุปกรณ์ผ่านอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทำให้อลูมิเนียมหลุดล่อนจากผิวซิลิคอนได้

7. อลูมิเนียมสร้างบนซิลิคอนชนิดพีได้ยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง [11] เพราะ Al อยู่ในตารางธาตุหมู่ III ก่อให้เกิดระดับพลังงานสารเจือผู้รับในแถบต้องห้ามจึงคล้ายกับเป็นสารเจือชนิดพี [48] ดังนั้นเมื่อสร้างอลูมิเนียมบนซิลิคอนชนิดพีแล้วผ่านการซินเตอร์ รอยสัมผัสจะเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก [46] ซึ่งโฟโตไดโอดโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ต้องการรอยสัมผัสชนิดที่ดี

8. ในโครงสร้าง Al/n-Si/Al กลไกการเกิดกระแสแสงส่วนใหญ่เกิดจากพาหะ โฮล [5-7] ซึ่งโฮลมีค่าความคล่องตัวของพาหะน้อยกว่าอิเล็กตรอน [12]

9. ในโครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อไว้ในบรรยากาศเป็นเวลานานมักเกิดปัญหาด้านเสถียรภาพของอุปกรณ์ เช่น ระดับของกระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นเมื่อทิ้งอุปกรณ์ไว้เป็นเวลานาน [5,6]

ปัญหาดังที่กล่าวมาเป็นข้อจำกัดของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นและใช้ซิลิโคนเป็นอลูมิเนียม ทำให้เป็นอุปสรรคต่อประสิทธิภาพ เสถียรภาพทั้งในแง่ของกระบวนการสร้างและการใช้งานโฟโตโวลตาอิก โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะได้ทำการศึกษาและทดลองวิจัย เพื่อหาโลหะและสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาแก้ไขปัญหาของ MSM-PD รวมไปถึงวิธีการสร้างที่เหมาะสมและมีราคาต้นทุนต่ำเหมาะสมกับเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำในประเทศไทย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา MSM-PD โดยได้เลือกใช้โลหะ โครเมียม (Chromium: Cr) โดยใช้เทคนิคการสเปกโตรสโกปีสร้างซิลิโคน ส่วนสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดเอ็นและชนิดพี โดยความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อศึกษากลไกการทำงานและชนิดของพาหะที่เกิดเป็นกระแสแสงในชั้นสารกึ่งตัวนำ
2. เพื่อแก้ไขปัญหาค่าประสิทธิภาพ เสถียรภาพของซิลิโคน AI ใน MSM-PD ในลักษณะของกระแสแสงและการตอบสนองทางความถี่ที่ทั้งยังสามารถสร้างเป็นอุปกรณ์ MSM ได้ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี
3. เพื่อศึกษากระบวนการสร้าง MSM-PD ที่สอดคล้องกับเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ
4. เพื่อศึกษาตัวแปรในการสเปกโตรสโกปี ทั้งความดันก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิฐานรอง กำลังงานในการสเปกโตรสโกปี ระยะเวลาในการสร้างฟิล์มโลหะ ความหนาของซิลิโคน ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อชนิดพีเพื่อให้ได้รอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีความสมบูรณ์ส่งผลให้กระแสรั่วไหลต่ำ
5. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าได้แก่ กำแพงศักย์ (Schottky barrier: ϕ_B), แรงดันภายใน (Built in voltage: V_{bi}), ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน, ความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า-แรงดัน และสถานะพื้นผิว ของ MSM-PD ที่ใช้ Cr เป็นซิลิโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อสัญญาณแสงทั้งกระแสตรงและกระแสสลับของ MSM-PD ที่มี Cr เป็นขั้วโลหะ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การเกิดรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี แล้วสามารถเกิดเป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งพีได้ก็ต่อเมื่อค่าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ($\phi_M > \phi_S$) และค่าฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ($\phi_M < \phi_S$) [13] พิจารณาฟังก์ชันงานของโลหะ Cr มีค่า 4.5 eV เมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันงานของ Al ที่มีค่า 4.2 eV พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนักและรอยสัมผัส Al/n-Si ที่สร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์สามารถสร้างเป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งพีได้แต่จากการทดลองที่ผ่านมาได้พบปัญหาของโลหะ Al ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ และจากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่าค่ากำแพงศักย์ของโลหะ Cr มีค่าสูงพอสมควรทั้งใน Cr/n-Si และ Cr/p-Si จึงคาดว่าโลหะ Cr จะสามารถเกิดเป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งพีได้เช่นกัน และในการเลือกใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพียังช่วยให้ลดขั้นตอนในการสร้างรอยสัมผัสได้อีกด้วย โดยสามารถใช้โลหะ Al สร้างลงบนสารกึ่งตัวนำชนิดพีเพื่อให้เกิดเป็นรอยสัมผัสได้ ในขณะที่การใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนั้นต้องทำการเติมสารเจือปริมาณสูงหรือสร้างชั้น n^+ ลงในสารกึ่งตัวนำให้เกิดภาวะดีเจเนอเรตเพื่อให้พาหะทะลุผ่านกำแพงศักย์ได้จึงจะเกิดรอยสัมผัสโอห์มิกได้

โครงสร้าง MSM-PD ที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะประกอบด้วยรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำหรือรอยต่อชนิดกึ่งพี 2 รอยต่อ โดยที่ด้านหนึ่งเป็นคาโทดและอีกด้านหนึ่งเป็นอโนด โลหะโครเมียมมีจุดหลอมเหลวสูง 1,857 °C [10] ขณะที่จุดหลอมเหลวของซิลิคอนคือ 1,410 °C [10] ทำให้หลังกระบวนการสร้างโลหะโครเมียมอุปกรณ์สามารถนำไปผ่านกระบวนการสร้างวงจรรวมอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิสูงได้ เช่น การสร้างชั้นฉนวนที่มักใช้อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอลูมิเนียม [14] เป็นต้น และเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่สูงจึงคาดว่าไม่ต้องผ่านกระบวนการซินเตอร์ เป็นการลดขั้นตอนในกระบวนการสร้างลงได้ โครเมียมมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ [10] ทำให้เมื่อนำอุปกรณ์ผ่านอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ไม่ทำให้โครเมียมหลุดก่อนจากผิวซิลิคอนหรือสร้างความเค้นความเครียดบนผิวหน้าซิลิคอน โลหะโครเมียมไม่เกิดการสไปค์เมื่อได้รับความร้อน เพราะโครเมียมมีการขยายตัวทางความร้อนน้อยกว่าอลูมิเนียม [10] เมื่อไม่เกิดการสไปค์จึงช่วยทำ

ให้อุปกรณ์ทนแรงดันพังทลายได้สูงขึ้น การเพิ่มความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ได้ก็เป็นการเพิ่มช่วงการใช้งานให้มากขึ้น เพราะโฟโตไดโอด MSM นั้นใช้งานในด้านไบอัสย้อนกลับเป็นหลัก และยังสามารถศึกษากลไกการเกิดกระแสแสงเพิ่มเติมได้ในช่วงที่แรงดันไบอัสมากกว่า 10 V ได้อีกด้วย และโครเมียมมีค่าอิเล็กตรอนกอลด์สูง [10] ทำให้เป็นโลหะที่แข็งทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนชิ้นงานได้ยากหรือในกระบวนการวัดตรวจสอบวงจรบนแผ่นเวเฟอร์ต้องใช้เข็มวัด เข็มวัดจะไม่สามารถทะลุชั้นโลหะจนวงจรเกิดการเสียหาย

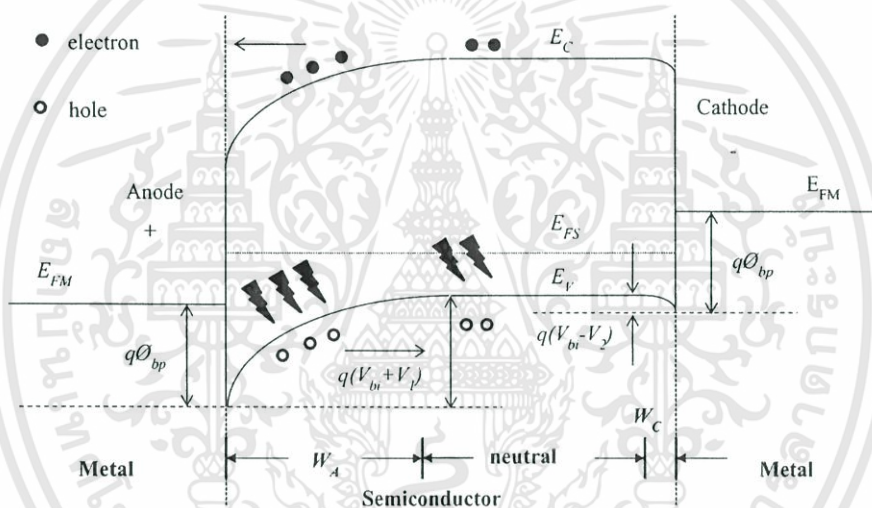
ในการสร้างขั้วโลหะ Cr ได้เลือกวิธีการสปัตเตอร์ซึ่งเป็นวิธีที่กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถควบคุม ความบริสุทธิ์ ความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง ได้ดีกว่าการระเหยสารในสุญญากาศ [49] วิธีการสปัตเตอร์นั้นจะใช้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าโครเมียมเพื่อให้อะตอมโครเมียมตกลงบนฐานรอง ทำให้ฟิล์มบางโลหะที่ได้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งนอกจากจะมีอะตอมของโครเมียมที่ตกลงมาแล้วยังมีอิเล็กตรอนพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์จากการที่เป้าถูกบอมบ์บาร์ดที่ก่อให้เกิดการบอมบ์บาร์ดที่ฐานรองเวเฟอร์เช่นกัน [15] สามารถก่อให้เกิดสถานะผิวที่รอยสัมผัสขั้วต่อซึ่งทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เปลี่ยนแปลงไปจากอุดมคติหรือทำให้เกิดกระแสรั่วไหลมากขึ้นจากการสร้างสถานะผิว [16,17] จึงมีความคิดที่จะหาเงื่อนไขในการสปัตเตอร์ที่ทำให้รอยสัมผัสมีความสมบูรณ์และมีกระแสรั่วไหลต่ำ โดยตัวแปรสำคัญที่สามารถควบคุมระหว่างการสร้างได้แก่กำลังงานในการสปัตเตอร์ ความดันก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิฐานรอง และเวลาในการสปัตเตอร์ ซึ่งคาดการณ์ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมน่าจะเป็นเงื่อนไขที่กำลังงานในการสปัตเตอร์ต่ำ ความดันก๊าซอาร์กอนต่ำ อุณหภูมิฐานรองต่ำ และใช้เวลาในการสปัตเตอร์น้อย เนื่องจากคาดว่ารอยสัมผัสจะได้รับผลกระทบจากอนุภาคพลังงานสูงน้อยลง

ในโครงสร้าง MSM-PD เมื่อได้รับไบอัส ในด้านที่ได้รับไบอัสย้อนกลับจะเกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องด้วยระยะห่างของขั้วโลหะมีขนาดกว้างมากเมื่อเทียบกับขนาดของบริเวณปลอดพาหะ ทำให้ยังคงเหลือบริเวณนิวทรัลอยู่ด้วย เมื่อได้รับพลังงาน โฟตอน อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ให้ขึ้นสู่แถบความนำและเกิดโฮลที่แถบเวเลนซ์เกิดเป็นพาหะอิสระหรือกระแสแสง ในกรณีโครงสร้าง Al/n-Si/Al และ Cr/n-Si/Cr กระแสแสงเกิดจากพาหะโฮล [5-7] แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความคล่องตัวของพาหะโฮลและอิเล็กตรอนมีค่าไม่เท่ากัน โดยค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่าโฮล จึงคาดว่าถ้าหากเปลี่ยนไปใช้ซิลิคอนชนิดพีเป็นโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr กลไกการเกิดกระแสแสงคาดว่าน่าจะเกิดจากพาหะอิเล็กตรอน ดังนั้นจึง

สามารถส่งผลให้ Cr/p-Si/Cr สามารถทำงานตอบสนองต่อความถี่ได้เร็วขึ้น [18] เนื่องจากสามารถลดเวลาที่พาหะใช้ในการเคลื่อนที่ไปที่ขั้วไฟฟ้าได้และจากการศึกษาข้างต้นจะทำให้เข้าใจถึงกลไกการเกิดกระแสแสงเนื่องจากพฤติกรรมของพาหะใน MSM-PD ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในกรณีที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี กระแสแสงในโครงสร้าง MSM-PD ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (spacing: S) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดภายใต้การให้แรงดันไบอัส แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แถบพลังงานของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ขณะถูกไบอัสและได้รับแสง

เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นที่รับแสง เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน โฮลในทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล ในบริเวณปลอดพาหะอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า [19] ส่วนทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วอโนดเกิดเป็นกระแสแสง ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศสนามไฟฟ้าออกจากบริเวณปลอดพาหะผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัลไปยังขั้วคาโทด ในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบบและมีการกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนทำให้ความหนาแน่นของประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแอโนด ส่วนโฮลที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและโฮลที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะ จะไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ไปจนถึงขั้วคาโทดแล้วเกิดเป็นกระแสแสงได้เนื่องจากเป็นประจุพาหะส่วนมากจึงเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในบริเวณนิวทรัลหมดไปในที่สุด [19]

กล่าวโดยสรุปได้ว่ากระแสแสงจะเกิดจาก 2 ส่วนได้แก่พาหะข้างน้อยที่อยู่ในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลที่มีระยะเท่ากับระยะการแพร่ซึมของพาหะ กระแสแสงที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะเป็นกระแสที่เกิดจากการครีฟและกระแสแสงที่เกิดในบริเวณนิวทรัลเป็นกระแสที่เกิดจากการแพร่ [5-7,20]

1.5 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของงานวิจัยนี้อยู่ที่การศึกษาและการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่มีซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำและโลหะที่ใช้เป็นโครเมียม โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง MSM-PD ที่สร้างมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) 20 μm และมีขนาดขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$ โดยมีสภาพต้านทานของซิลิคอนชนิดเอ็นประมาณ 3-5 $\Omega\text{-cm}$ และสภาพต้านทานของซิลิคอนชนิดพีประมาณ 9-10 $\Omega\text{-cm}$ เป็นโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ตามลำดับ โดยสร้างขั้วโลหะโครเมียมด้วยการสปัตเตอร์ภายใต้เงื่อนไขตัวแปร กำลังที่ใช้ในการสร้าง ความดันก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิฐานรอง ระยะเวลาหรือความหนาของฟิล์มบางโครเมียม ที่มีค่าต่างๆ ทำการเปิดช่องรับแสงด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบมาตรฐาน และหาค่าความหนาของฟิล์มบาง Cr ด้วยการจับเวลาในการกัดแบบเปียก แล้วนำอุปกรณ์ที่สร้างไปทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า คือค่าแรงดันภายใน ความสูงกำแพงศักย์ขั้วต่อขั้ว กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสร้างรอยสัมผัสขั้วต่อขั้ว เพื่อเลือกเงื่อนไขที่จะนำไปสร้างเป็นโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่กระแสรั่วไหลต่ำที่สุด จากนั้นนำอุปกรณ์มาทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ลักษณะสมบัติทางแสงแบบกระแสตรงภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มค่าต่างๆ และส่วนการทดสอบลักษณะสมบัติทางแสงแบบกระแสลับเพื่อหาการตอบสนองทางความถี่ของอุปกรณ์ จะใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 670 nm, กำลังงาน 3 mW ซึ่งถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด 400 mV_{pp} เข้ากับเลเซอร์ที่ความถี่ในช่วง 100 Hz – 10 MHz แล้ว

นำมาอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงของ MSM-PD ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง และใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะบนซิลิคอนทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของ MSM-PD
2. ศึกษากระบวนการสร้าง MSM-PD ที่สอดคล้องกับเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
3. ศึกษาปัญหาของ MSM-PD ที่ใช้ AI เป็นขั้วโลหะและนำ Cr มาทดแทนขั้วโลหะ AI โดยทดลองสร้างรอยสัมผัส Cr/n-Si, Cr/p-Si เพื่อทดสอบชนิดของรอยสัมผัส
4. ทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าได้แก่ กำแพงศักย์, แรงดันภายใน, ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน, ความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า-แรงดัน และสถานะพื้นผิว ของ MSM-PD ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ
5. ทำการสร้าง MSM-PD และปรับเงื่อนไขการสร้างขั้วโลหะ Cr ด้วยการสปีดเตอร์ให้ได้รอยสัมผัสชนิดกึ่งที่สมบูรณ์ที่สุดมีกระแสรั่วไหลน้อยจนเป็นที่พอใจ
6. ทดสอบลักษณะสมบัติทางแสงเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อสัญญาณแสงทั้งกระแสตรงและกระแสสลับของ MSM-PD ที่มี Cr เป็นขั้วโลหะ
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง อธิบายกลไกการทำงาน ชนิดของพาหะในการเกิดกระแสแสงสรุปและยืนยันในสมมติฐานที่ตั้งไว้

1.7 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะแบ่งเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนการศึกษา ในการศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ

บทที่ 2 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM และการสปีดเตอร์กล่าวถึงทฤษฎีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีที่เป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่ง ในภาวะสมดุลความร้อนและเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ซึ่งเป็นพื้นฐานของโครงสร้าง MSM รวมถึงโครงสร้างและการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับแสง ในส่วนของการสปีดเตอร์ กล่าวถึง ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์ หลักการทำงาน ตัวแปรสำคัญในเงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่มีผลกระทบต่อฟิล์มบางโลหะเช่น กำลังในการสปีดเตอร์ การให้ความร้อนฐานรอง ความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์ ความหนาของชั้นฟิล์ม

บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง กล่าวถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr รวมถึงเงื่อนไขในกระบวนการสร้างต่างๆ ที่ได้เลือกใช้ในการทดลอง วิธีการและแผนภาพการทดลองหาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและการหาลักษณะสมบัติทางแสงแบบ กระแสตรงและแบบกระแสสลับ

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง กล่าวถึงผลทดลองเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น กำแพงศักย์ช็อคตีกัย ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน และผลการทดลองลักษณะสมบัติทางแสงในกรณีที่อุปกรณ์ได้รับแสงแบบ กระแสตรง และแบบกระแสสลับ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

โฟโตไดโอด MSM และการสปีดเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการเกิดรอยสัมผัสช็อคติย์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี ซึ่งเป็นพื้นฐานกลไกการทำงานหลักของโฟโตไดโอดชนิด MSM ซึ่งประกอบไปด้วยรอยสัมผัสช็อคติย์สองรอยสัมผัส ดังนั้นในการทำความเข้าใจการทำงานของโฟโตไดโอด MSM ควรต้องศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสช็อคติย์ เพื่อนำไปอธิบายการเปลี่ยนแปลงของรอยสัมผัส เมื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์จริง โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้กระบวนการสร้างขั้วโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่รอยสัมผัสจะได้รับผลกระทบจากกระบวนการสปีดเตอร์ จึงได้กล่าวถึงทฤษฎีการสปีดเตอร์ ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์ หลักการทำงาน ตัวแปรสำคัญในเงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่มีผลกระทบต่อฟิล์มบาง โลหะไวในบทนี้ด้วย

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประกอบไปด้วย การดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (Visible light) ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” ปรากฏการณ์ที่แสงแสดงลักษณะสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด เป็นต้น แต่ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัมคลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสงโดยมีค่าดังสมการ 2.1 เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap: E_g) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{\text{photon}} \geq E_g$ (semi) สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_g$ (semi) การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{\lambda} \quad (\text{J}) \quad (2.1)$$

หรือเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วย eV

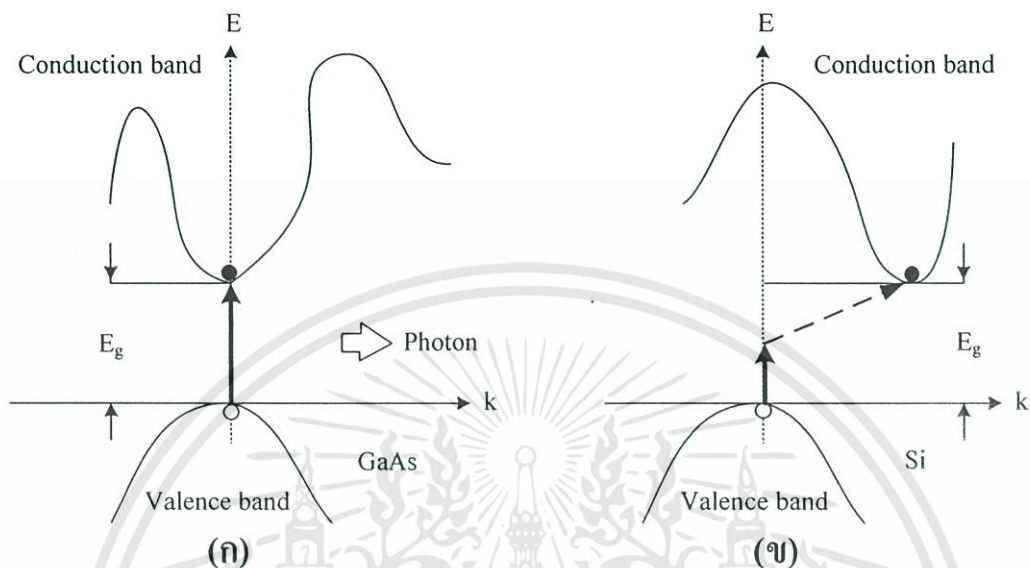
$$E_{\text{photon}} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{q\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{eV}) \quad (2.2)$$

โดยที่	ν	คือ ความถี่ (Hz)
	λ	คือ ความยาวคลื่นแสง (μm)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-sec
	c	คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง [12]

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ คือ กราฟ E-k diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งของค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าหรือก็คือจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยพบว่าในสารกึ่งตัวนำบางชนิดตำแหน่งทั้งสองนี้จะอยู่ตรงกัน เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ดังรูปที่ 2.1 (ก) เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า ช่องแถบตรง (direct band gap) และสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) ส่วนกรณีที่สารกึ่งตัวนำซึ่งตำแหน่งของจุดสำคัญทั้งสองนี้จะอยู่ไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) เช่น ซิลิคอน ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า ช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) โดยที่สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้จะถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor) โดยปกติจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง $k = 0$ แต่จากรูปที่ 2.1 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าจะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือก็คือ จุดทั้งสองนี้มีค่า k ที่ต่างกันหรือก็คือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกัน ดังนั้นลักษณะสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะแตกต่างกันมาก เช่น ลักษณะสมบัติทางด้านแสง (optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงพลังงานของโฟตอนจากแสงสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำ

ไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E-k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ

(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง

เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบนี้เกิดได้ง่ายทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดีจึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (optical devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง และตัวตรวจจับแสง ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ทำให้สารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้ไม่นิยมนำมาทำเป็นอุปกรณ์ทางด้านแสง

2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ [12]

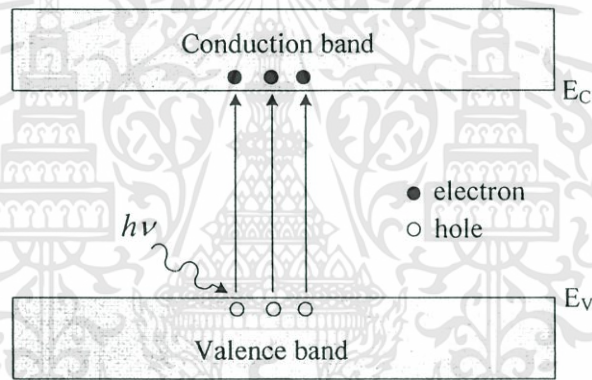
2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดจากการให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ($> E_g$) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ($E = h\nu$) ที่มีพลังงานมากพอ ($> E_g$) ที่จะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อดูดกลืนแสงเข้าไปแล้วสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้น

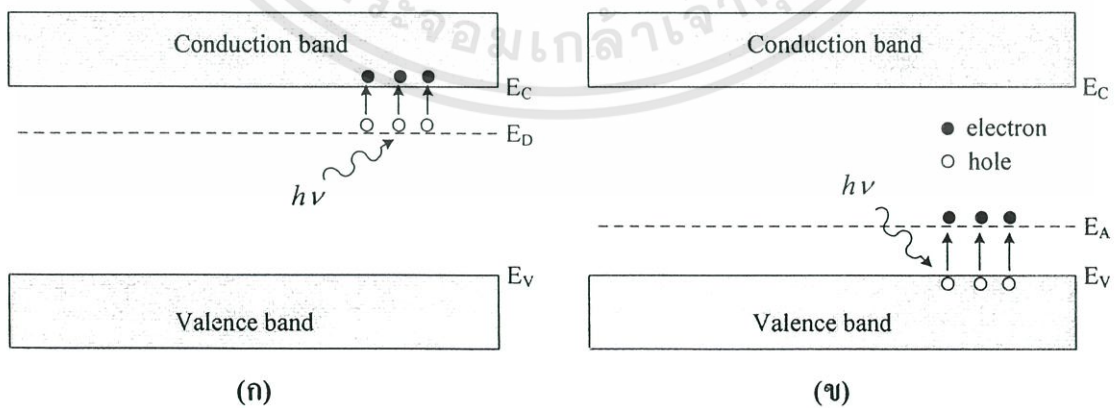
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แถบวาเลนซ์ซึ่งก็คือ โฮล ซึ่งการเกิดอิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส จะทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (donor level: E_D) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ในส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level: E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

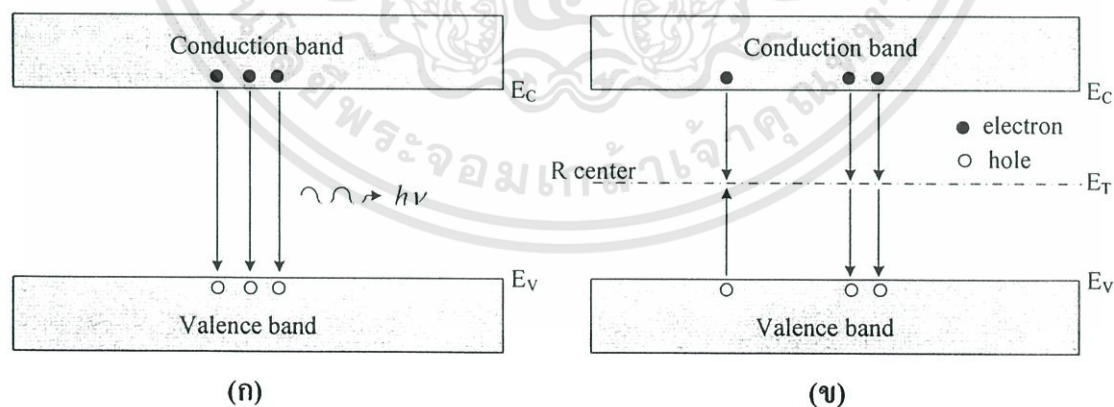
(ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลตทิซ (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (recombination and generation process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

1. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือ โฟตอนได้ง่าย



รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

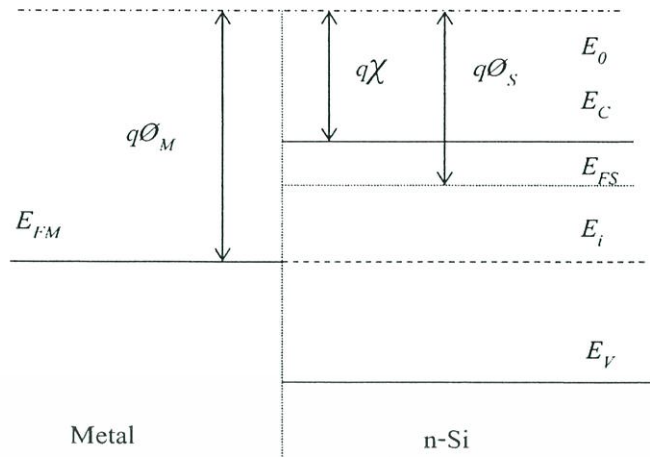
2. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าตกลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

2.2 รอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำ [13]

2.2.1 รอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2.2.1.1 รอยสัมผัสโลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในสมดุลความร้อน

แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.5 ระดับสุญญากาศ (Vacuum level: E_0) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศนี้นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มิ (fermi level: E_{FM}) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศเรียกว่า ฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ เขียนแทนด้วย ϕ_M มีค่าดังสมการที่ 2.3 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น โครเมียม มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 4.5 eV ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (E_i) และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย ϕ_S มีค่าเท่ากับความต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มิ ดังสมการที่ 2.4

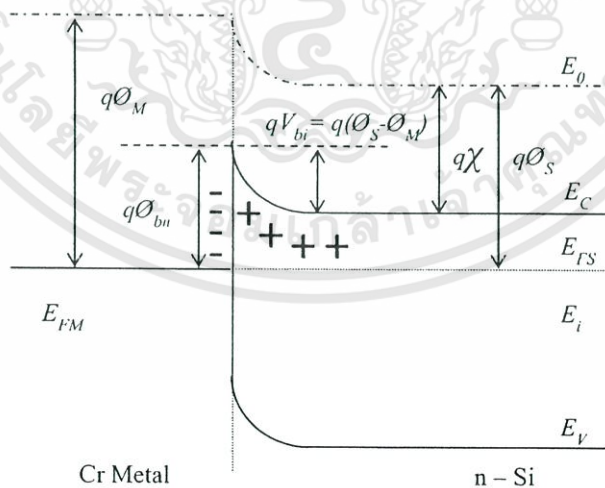


รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อ

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (2.3)$$

$$q\phi_s = E_0 - E_{FS} \quad (2.4)$$

ส่วนค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity: χ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.01 eV



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อ

การเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของ

โลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M > q\phi_s$) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำหรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงเกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D^+) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ดังรูปที่ 2.6

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier: qV_{bi}) ปกป้องการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.5

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

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.6)$$

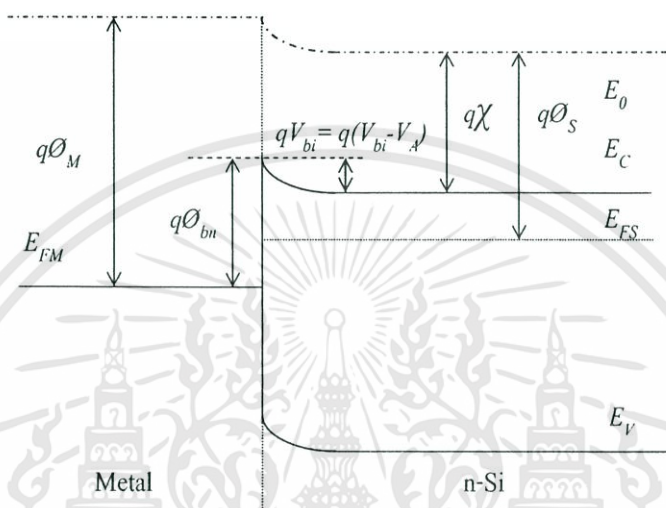
ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ชอตทกี (Schottky barrier: $q\phi_{bn}$) มีค่าดังสมการที่ 2.6 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ กัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ชอตทกีต่างๆ กัน

2.2.1.2 รอยสัมผัสชอตทกีในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัส

ไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายใน ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะ

เคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อคติย์เข้าไปในต้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงช็อคติย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ 2.7

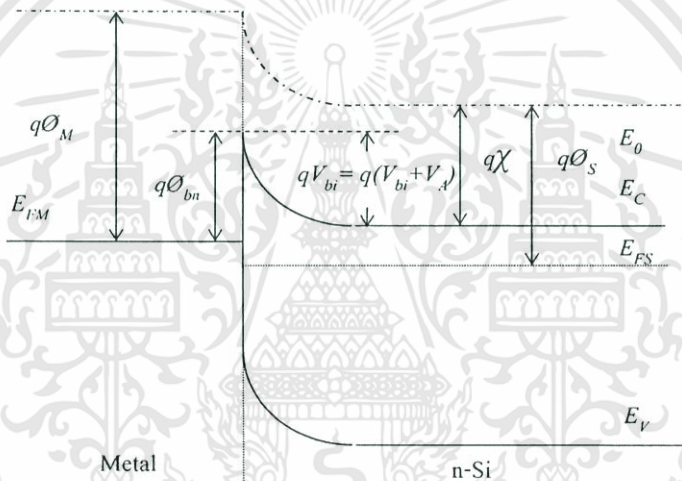
$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

โดยที่	A	คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
	R	คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน n-Si มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$
	ϕ_{bn}	คือ ความสูงกำแพงช็อคติย์
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
	k	คือ ค่าคงที่โบสค์มันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	V_A	คือ แรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช้อตก็ย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ 2.8

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \tag{2.8}$$

- โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
- R คือ ค่าคงตัวรีชาร์ดสัน n-Si มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ [12]
- T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
 ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ชนิดกึ่งตัวนำ
 k คือ ค่าคงที่โบสท์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion width: W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ 2.9 โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.9)$$

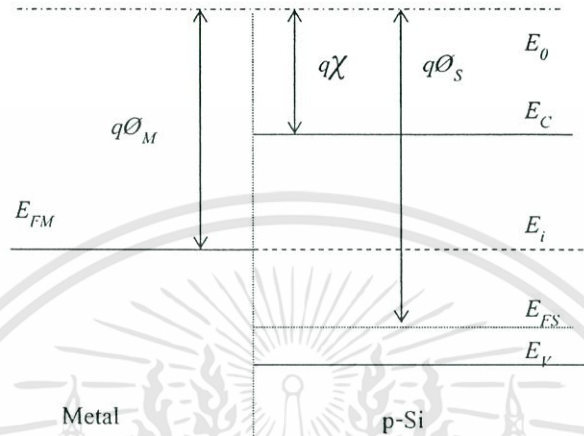
- โดย ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
 q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
 N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
 V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
 V_A คือ แรงดันไบอัส

2.2.2 รอยสัมผัสโลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดพี

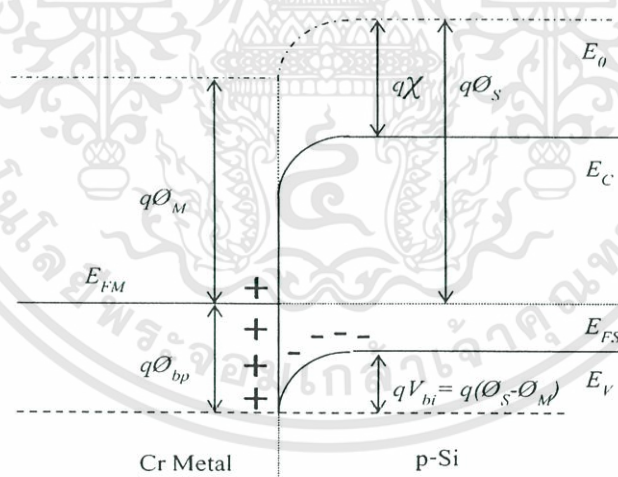
2.2.2.1 รอยสัมผัสโลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดพีในสมดุลความร้อน

การเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M < q\phi_S$) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของโลหะจะอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.9 จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากด้านโลหะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี และเกิดการสะสมประจุอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น และทิ้งให้เกิดประจุบวกที่ด้านโลหะบริเวณผิวสัมผัส จนกระทั่งถึงสภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองอยู่ที่ระดับเดียวกันดังรูปที่ 2.10 ขณะที่อิเล็กตรอนจากโลหะที่เคลื่อนที่เข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเกิดการรวมตัวใหม่ (Recombination) ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่บริเวณผิวสัมผัส ทำให้โฮลในบริเวณนี้มีความหนาแน่นลดลง การลดลงของโฮลจะทำให้เกิดไอออนลบของอะตอมผู้รับ (N_A^-) ในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำคิ่งนั้นจึงเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับในสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากประจุไฟฟ้าบวกในโลหะ และประจุไฟฟ้าลบในสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัส



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่ง



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

ทำให้มีสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ โดยมีทิศทางจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นทิศที่ต่อต้านการเคลื่อนที่โฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำ ไม่ให้เคลื่อนที่ไปยังด้านโลหะ หรือก็คือมีกำแพงศักย์ของโฮลเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส กำแพงศักย์นี้มีค่าเท่ากับ qV_{bi}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหาได้จากกรองโค้งลงของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.10

$$qV_{bi} = q(\phi_S - \phi_M) \quad (2.10)$$

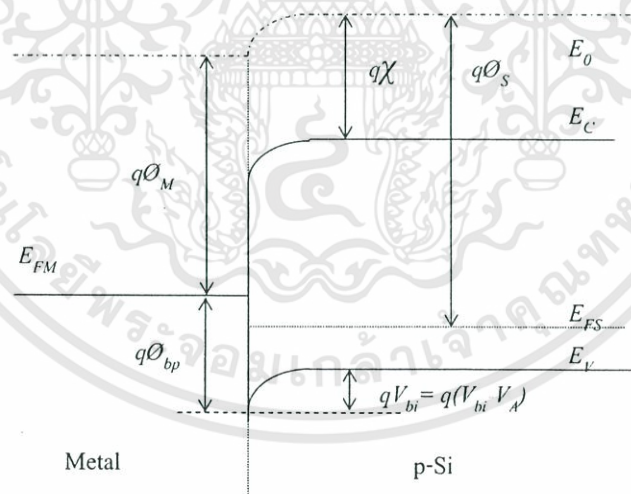
$$q\phi_{bp} = E_g + q\chi - q\phi_M \quad (2.11)$$

นอกจากนี้จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่ามีกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีความสูงเท่ากับ $q\phi_{bp}$ จะมีค่าเท่ากับดังสมการที่ 2.11

2.2.2.2 รอยสัมผัสชนิดกึ่งในสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับไบอัส

ไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และทำให้ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ทำให้โฮลจึงสามารถเคลื่อนที่จากด้านสารกึ่งตัวนำเข้าไปยังด้านโลหะ ทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยสัมผัส โดยกระแสจะไหล

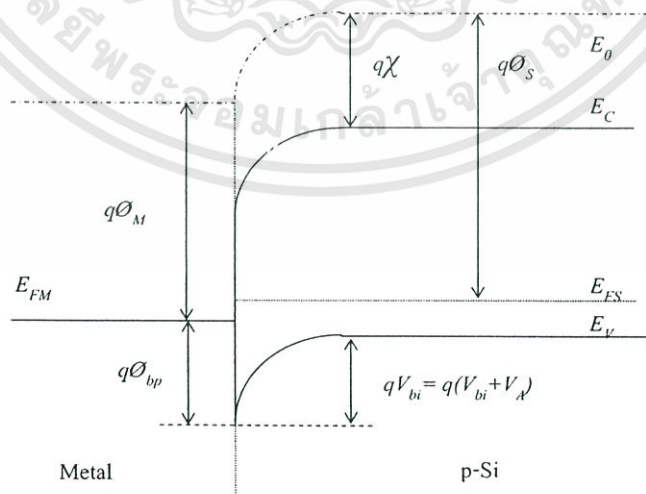
จากด้านสารกึ่งตัวนำไปทางด้านโลหะ โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ 2.12

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bp}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

โดยที่	A	คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
	R	คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า $32 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (p-Si) [12]
	ϕ_{bp}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคติจี้
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
	k	คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
	V_A	คือ แรงดันไบอัส

ไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับด้านโลหะดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ ทำให้ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ซึ่งโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ แต่กำแพงศักย์ของอิล็กตรอนด้านโลหะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง จึงมีกระแสจำนวนน้อยไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากอิล็กตรอน (พาหะข้างน้อย) จากชั้นแถบนำ ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ไหลเข้าไปในโลหะ พิจารณาว่าเป็นการฉีดโฮลข้าม $q\phi_{bp}$ ในโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ แต่เป็นกระแสที่มีค่าน้อยมาก ซึ่งก็คือกระแสรั่วไหลของรอยต่อหรือกระแสแรมี่ดจึงพิจารณาว่าเป็นการให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัส ดังนั้นจะเห็นว่าคุณสมบัติของรอยสัมผัสนี้เป็นแบบเรกติไฟร์ โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ 2.13

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bp}}{kT}\right) \quad (2.13)$$

โดยที่ A	คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
R	คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า $32 \text{ A}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{K}^2$ (p-Si) [12]
T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
ϕ_{bp}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ซีอติกี
k	คือ ค่าคงที่โบสต์มันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

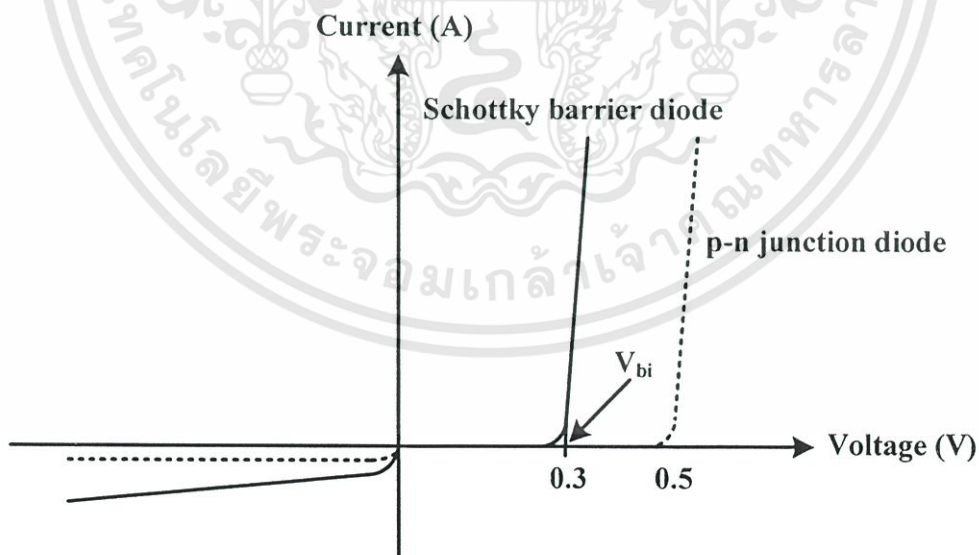
ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width: W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ 2.14 โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_A}} \quad (2.14)$$

โดย	ϵ_s	คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
	q	คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
	N_A	คือ อะตอมสารเจือผู้รับให้ใน p-Si
	V_{bi}	คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
	V_A	คือ แรงดันไบอัส

2.2.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดซีดกี [21,22]

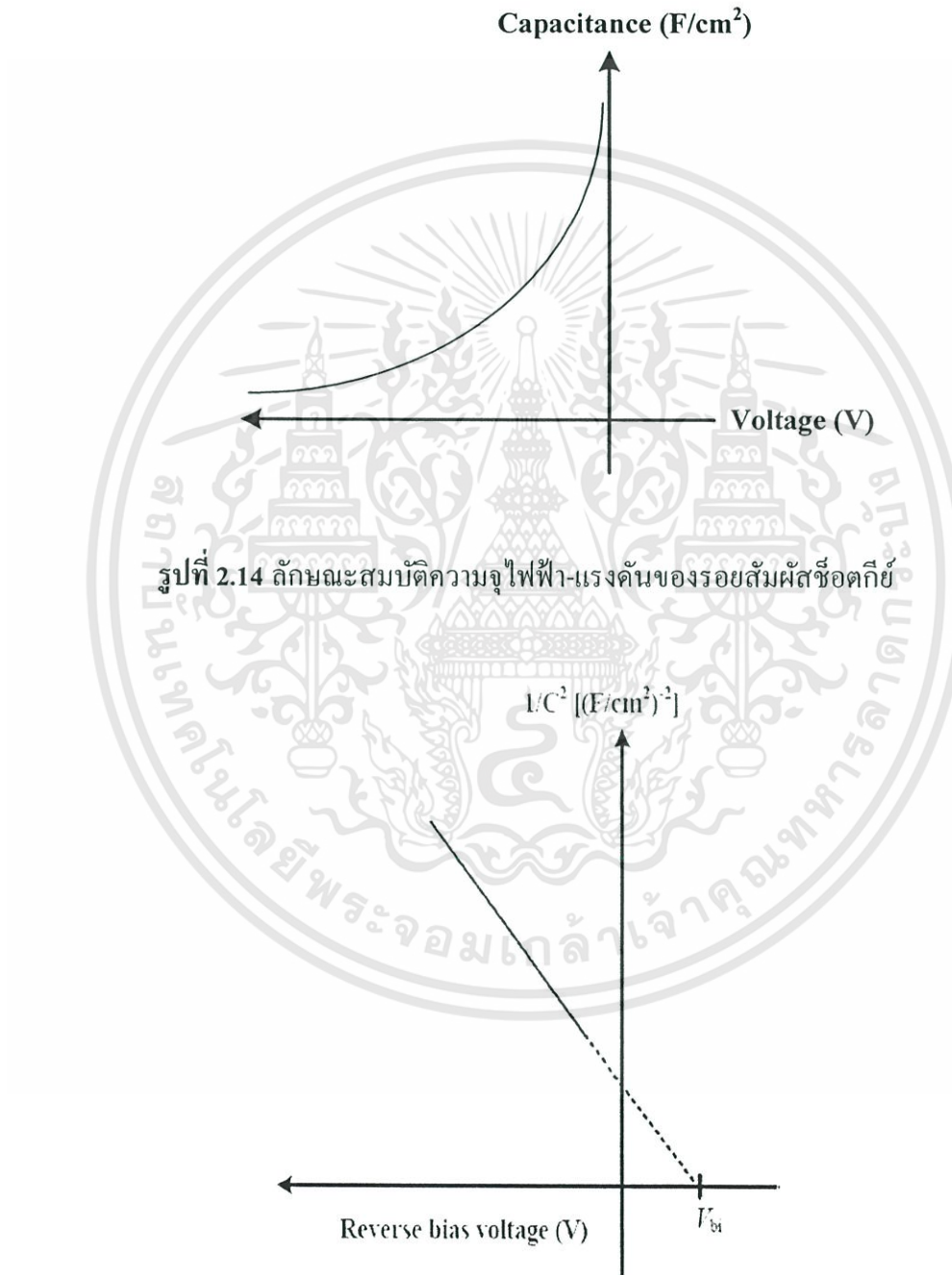
จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับรอยต่อ พี-เอ็น คือ ขอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว เมื่อได้รับการให้ไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก (กระแสรั่วไหล) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 พบว่าแรงดันภายใน (built-in voltage: V_{bi}) ของรอยสัมผัสชนิดซีดกีมีค่าต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น โดยมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ส่วนรอยต่อ พี-เอ็น จะมีค่าประมาณ 0.5-0.7 V แต่กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดซีดกีมีค่าสูงกว่ารอยต่อ พี-เอ็น เป็นผลมาจากผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดยจะมีค่ากระแสรั่วไหลมากกว่ารอยต่อ พี-เอ็น ประมาณ 10^4 เท่า



รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดซีดกีและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

2.2.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสซีอติคีย์ [21,22]

ค่าความจุไฟฟ้า (C) ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่แสดงในรูปที่ 2.14 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส เห็นได้ว่า เมื่อให้แรงดันไบแอสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ และมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.15 คือ



รูปที่ 2.15 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดันของรอยสัมผัสซีอติคีย์ กราฟที่แสดงในเทอมของ $1/C^2$ ซึ่งจะได้เป็นกราฟเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{\epsilon_s A}{W_D} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.15)$$

- โดยที่ N_D คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})
 W_D คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (cm)
 A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
 ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
 q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
 V_A คือ แรงดันไบอัส
 V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

จากกราฟในรูปที่ 2.14 เมื่อนำไปเขียนใหม่ให้อยู่ในเทอมของ $1/C^2$ กับ V ดังแสดงในรูปที่ 2.15 รูปของสมการที่ 2.15 จะเปลี่ยนเป็นสมการ 2.16

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{q\epsilon_s N_D} \quad (2.16)$$

ซึ่งลักษณะของกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรงทำให้ง่ายในการวิเคราะห์หาตัวแปร ดังเช่น จากเส้นกราฟจะได้ค่าความชันมีค่าเท่ากับ $2/q\epsilon_s N_D$ ทำให้สามารถหาความเข้มข้นอะตอมของสารกึ่งตัวนำเริ่มต้นได้ และที่จุดตัดแกน x ของกราฟจะทราบค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคก็ย์ จากความสัมพันธ์ของกราฟในรูปที่ 2.15

2.3 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

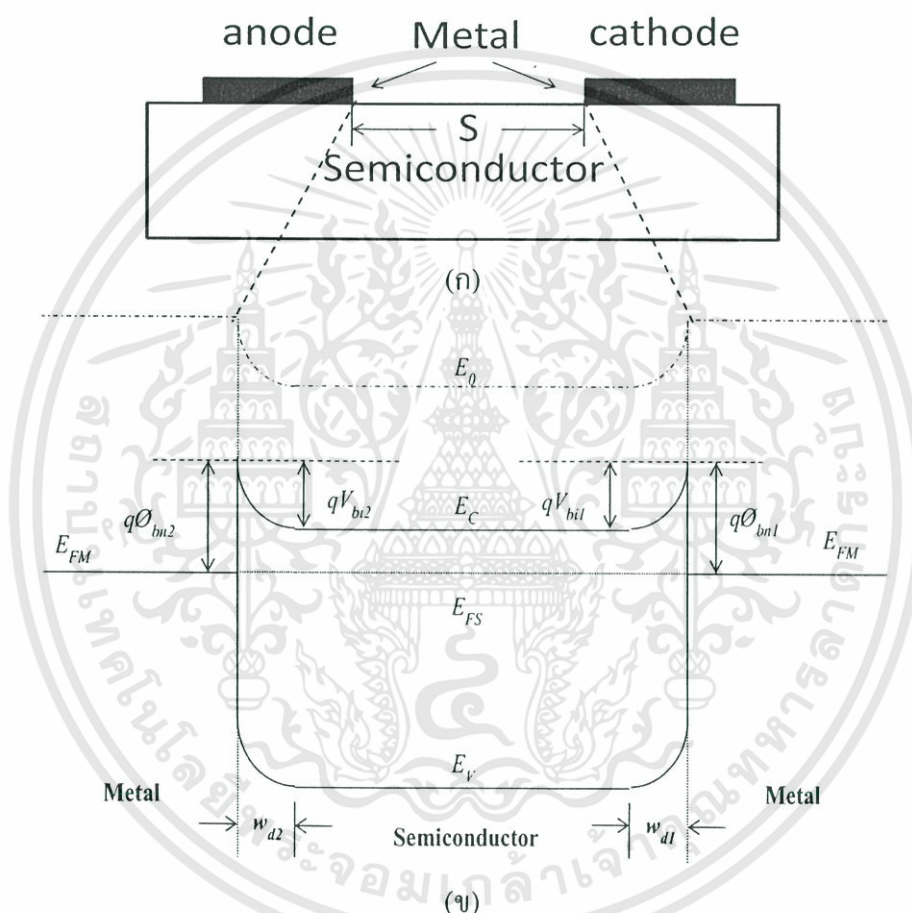
2.3.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2.3.1.1 โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ในภาวะสมดุล

โฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จำนวนสองรอยสัมผัส ต่อกันแบบหันหลังชนกัน (back to back) มีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (S) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดแคบมากๆ เพื่อให้โฟโตไดโอดสามารถทำงานด้วยความเร็วสูง สาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองทั้งสอง จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ในสถานะสมดุล ความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.16 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งจะไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode)



รูปที่ 2.16 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr

(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อนของ Cr/n-Si/Cr

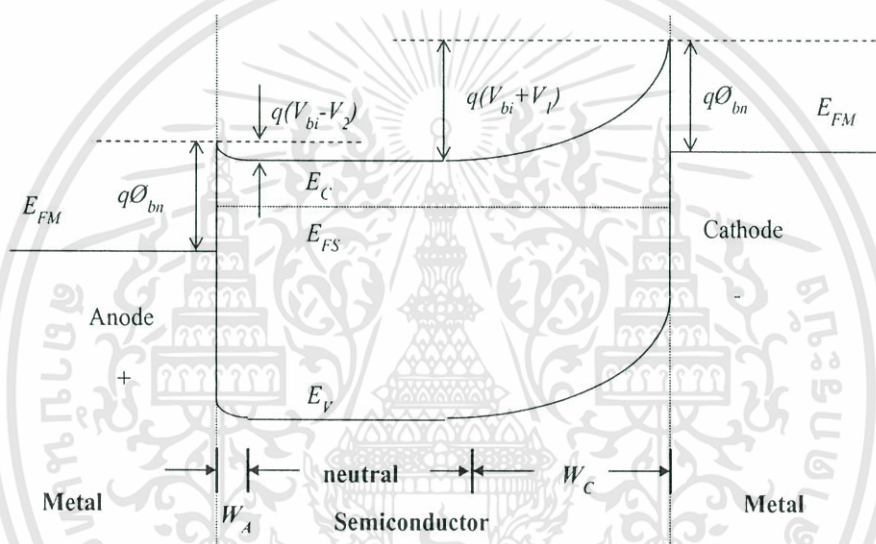
โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ช็อกกีของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ แรงดันภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอนโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

2.3.1.2 โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ขณะได้รับแรงดันไบอัส

โพโตไดโอดโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยรอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแอนโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง



รูปที่ 2.17 แถบพลังงานของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

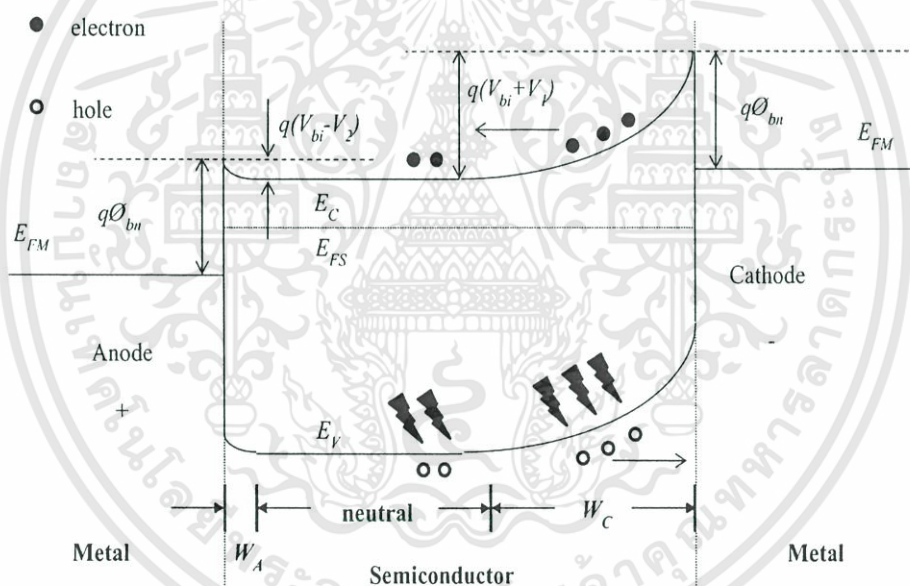
บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_c) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคติย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคติย์ ส่วนด้านแอนโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_c) แถบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_1$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) ของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr โดยกระแสมืดของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอนโอดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก

2.3.1.3 โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบบ

เมื่อโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ได้รับแสงตกกระทบบ พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดภายใต้การให้แรงดันไบอัสและได้รับแสง แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แถบพลังงานของโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เมื่อ ได้รับแรงดันไบอัสและได้รับแสง

เมื่อแสงตกกระทบบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโอด ซึ่งจะต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นโฮลที่อยู่บนสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าแรงเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะจะไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ เนื่องจากเป็นประจุพาหะส่วนมากจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล

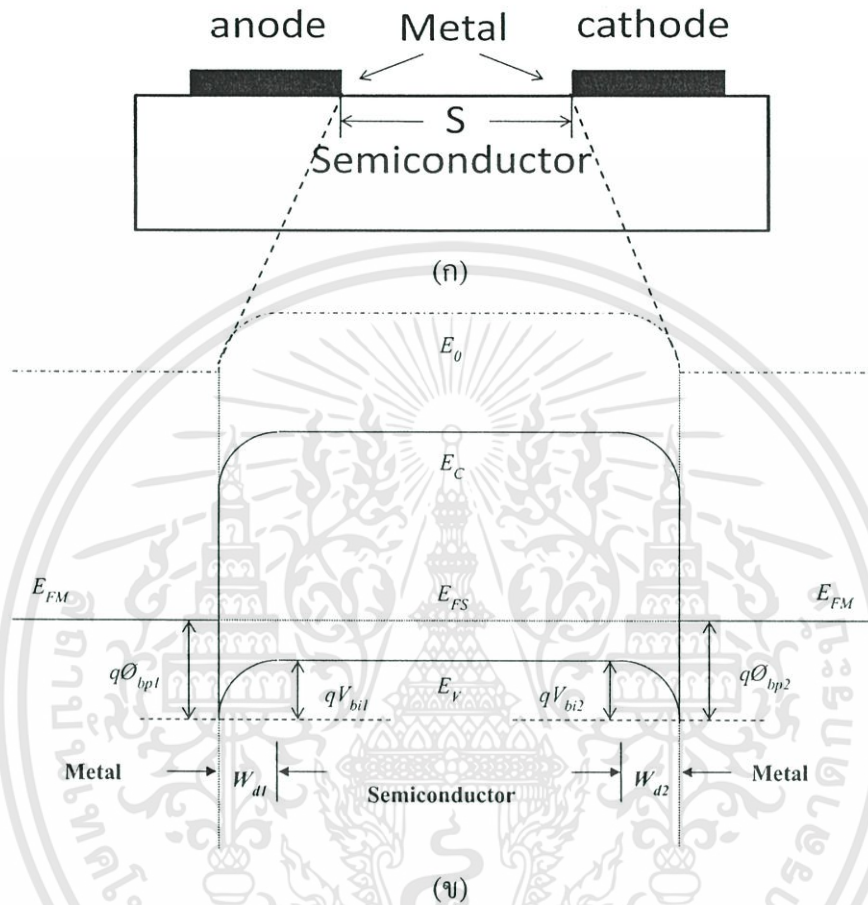
2.3.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี

2.3.2.1 โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr ในภาวะสมดุล

โฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจำนวนสองรอยสัมผัส ต่อกันแบบหันหลังชนกัน (back to back) มีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (w) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีขนาดแคบมากๆ เพื่อให้โฟโตไดโอดสามารถทำงานด้วยความเร็วสูง สารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองทั้งสอง จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr ในสภาวะสมดุลความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.19 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ช็อคกีย์ของขั้วแอโนด (ϕ_{bp1}) และขั้วแคโทด (ϕ_{bp2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $\phi_{bp1} = \phi_{bp2} = \phi_{bp}$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วแอโนด (V_{bi1}) และขั้วแคโทด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ

$V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแอนโนด (W_{d1}) และด้านแคโทด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร



รูปที่ 2.19 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr

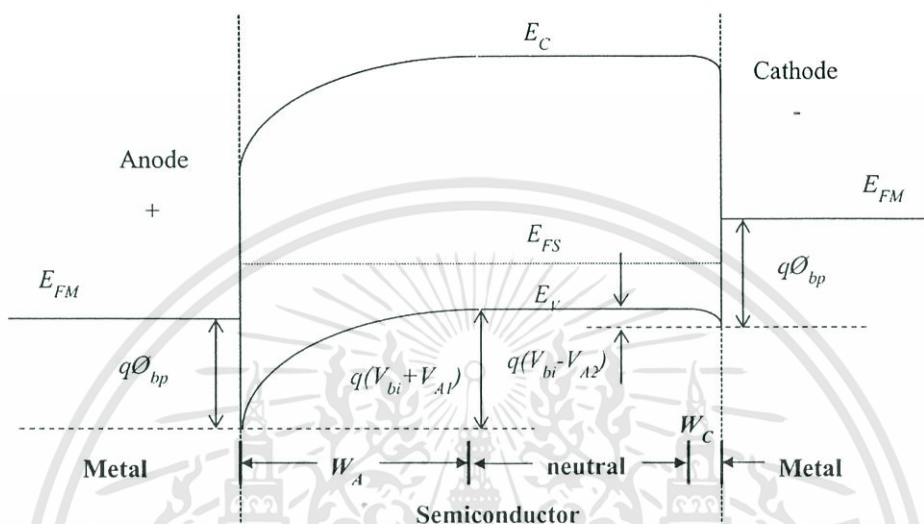
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อนของ Cr/p-Si/Cr

2.3.2.2 โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr ขณะได้รับแรงดันไบอัส

เมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ จะเห็นได้ว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสแบบช็อตก็ย์แบรีเออร์ทางด้านแอนโนด (W_A) มีขนาดกว้างขึ้น เมื่อไบอัสตรงบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด (W_C) จะมีขนาดลดลง สำหรับด้านที่ได้รับการไบอัสตรงจะมีค่าของกำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ $(V_{bi} - V_{A2})$ ส่วนด้านที่ได้รับไบอัสย้อนกลับจะมีค่าของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ $(V_{bi} + V_{A2})$ ดังนั้นที่ด้านคาโทดโฮลจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจะสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปยังด้านโลหะ ทำให้เกิดกระแสไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ (I_{SM}) และเนื่องจากทางด้านแอนโนดจะมีอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้อยไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไหลเข้ามาที่ด้านโลหะ ทำให้เกิดกระแสไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ (I_{MS}) ซึ่งเป็นกระแสส่วนน้อย โดยเราเรียกว่า กระแสรั่ว ของโครงสร้าง MSM ดังแสดงในรูปที่ 2.20

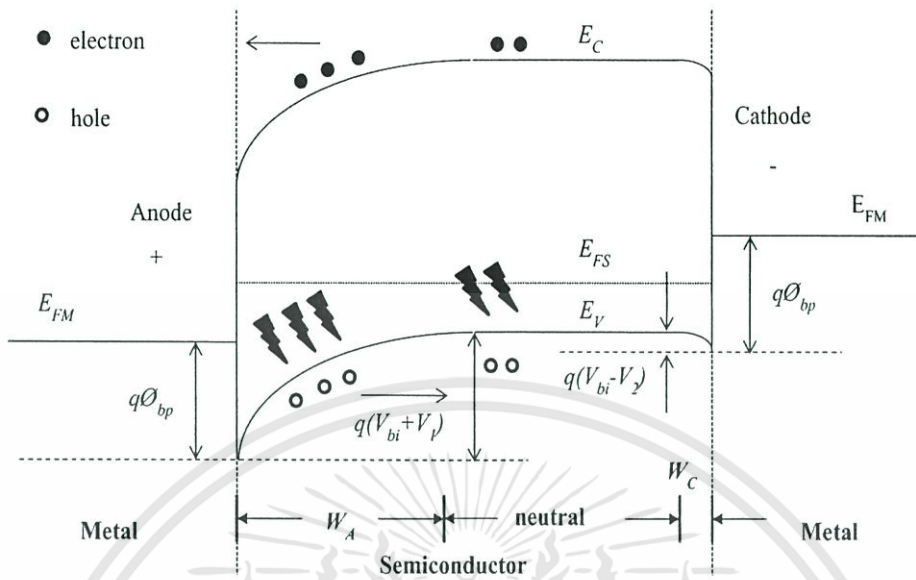


รูปที่ 2.20 แถบพลังงานของโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr เมื่อได้รับแสงอินฟราเรด

2.3.2.3 โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบบ

โครงสร้าง MSM สามารถใช้ทำหน้าที่ตรวจจับแสงได้เช่นเดียวกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกระแสแสงในโฟโตไดโอด โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr เมื่อโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr ได้รับแสงตกกระทบบ พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดภายใต้การให้แสงอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 2.21 เมื่อแสงตกกระทบบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแอโนดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



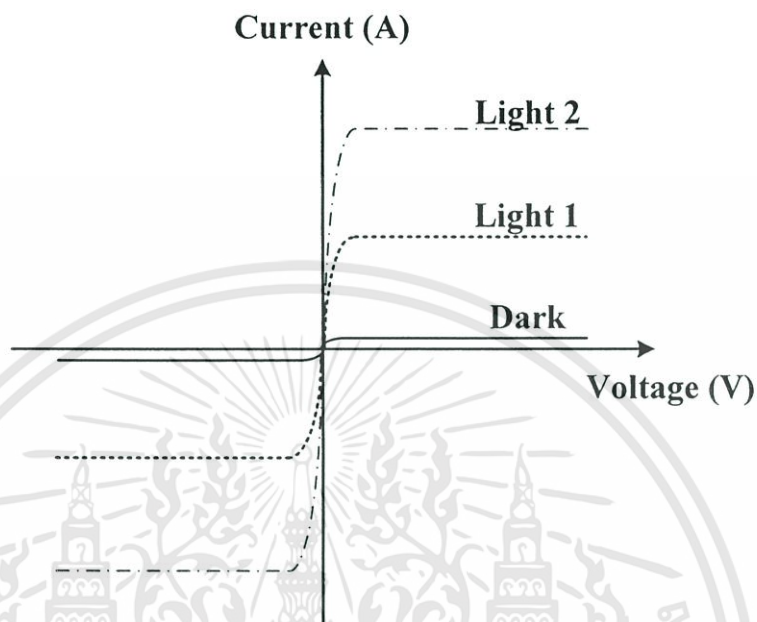
รูปที่ 2.21 แถบพลังงานของโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและได้รับแสง

แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบและมีการกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแอโนด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะ จึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอน

2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ในรูปที่ 2.22 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ทั้งสองชนิดที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะ

สมบัติของ MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับไบอัสตรงและด้านที่รับไบอัสย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบมีความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 2.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

2.3.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัส

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม (W_T) ของโครงสร้าง MSM เป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านที่รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (W_R) และบริเวณปลอดพาหะทางด้านที่รับแรงดันไบอัสตรง (W_F) ดังสมการที่ 2.17 คือ

$$W_T = W_R + W_F \quad (2.17)$$

โดยที่

$$W_R = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_1)}{qN_D}} \quad (2.18)$$

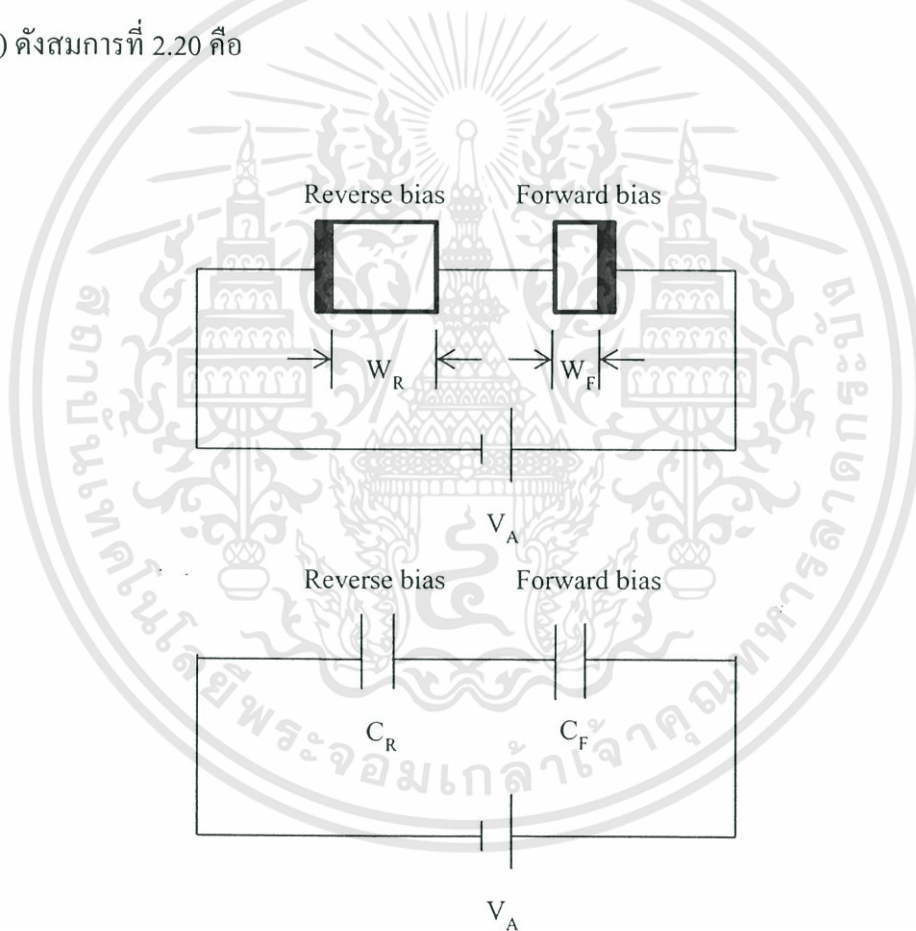
$$W_F = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_2)}{qN_D}} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ V_1, V_2 คือ แรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัสด้านไบอัสย้อนกลับและไบอัสตรง ตามลำดับ (V) และในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะใช้ค่า N_A แทน N_D

2.3.5 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ขณะได้รับไบอัส ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยความจุไฟฟ้ารวม (C_T) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านที่รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (C_R) และความจุไฟฟ้าทางด้านที่รับแรงดันไบอัสตรง (C_F) ดังสมการที่ 2.20 คือ



รูปที่ 2.23 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

$$C_T = \frac{C_R C_F}{C_R + C_F} \quad (2.20)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

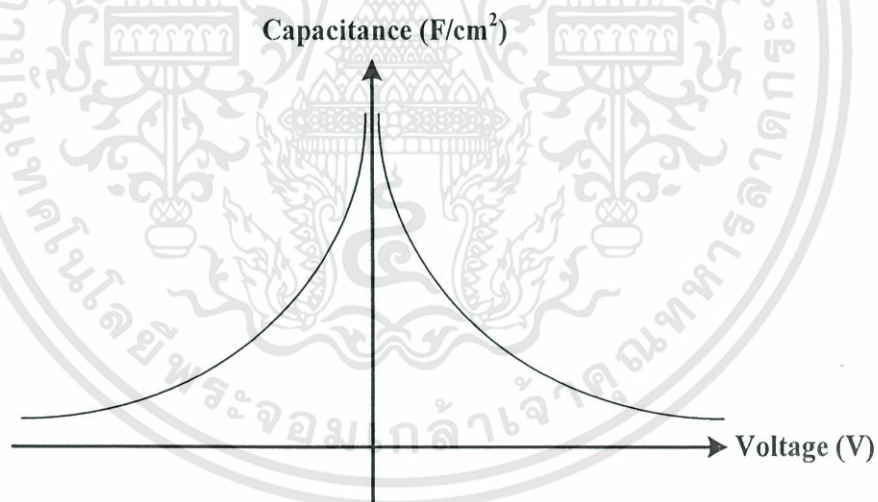
$$C_R = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_1)}} \quad (2.21)$$

$$C_F = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_2)}} \quad (2.22)$$

เมื่อแทนค่า C_R และ C_F ในสมการที่ 2.20 ทำให้ได้ความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ

$$C_T = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{(V_{bi} + V_1)} + \sqrt{(V_{bi} - V_2)}} \right]} \quad (2.23)$$

รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส โดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้น และมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.24 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

2.4 ความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้ง แต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น (t_r) และช่วงเวลาขาลง (t_f) ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นกับแฟคเตอร์ของ เวลาการครีฟท์ (drift time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่าน ชั้นบริเวณปลอดพาหะ เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ ค่าคงที่ของเวลา RC (RC time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกับค่าโหลด ความต้านทานภายนอกดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูงๆ จะต้องพิจารณาถึงแฟคเตอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มีพื้นที่ขนาดเล็กๆ เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น

แบนด์วิดท์ (bandwidth) คือ อัตราความเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณความถี่ต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางประการของโฟโตดีเทคเตอร์ ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

ในทางปฏิบัติการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency: f_c) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (half power point) หรือมีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงมีความหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่โฟโตดีเทค

เตอร์สามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ

2.5 กระบวนการสร้างขั้วโลหะโดยการสปีดเตอร์ [15-17]

กระบวนการสปีดเตอร์ได้ถูกค้นพบในปี 1852 โดย เซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต กรูฟ (Sir William Robert Grove) และได้รับการพัฒนาต่อมาเป็นกระบวนการปลูกฟิล์มบางโดย แลงมัวร์ (Langmuir) ในปี 1920 ในกระบวนการสร้าง MSM-PD ต้องมีขั้นตอนในการสร้างขั้วโลหะ หนึ่งในวิธีการสร้างขั้วโลหะคือการสปีดเตอร์ ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำได้ อันเนื่องมาจากการสปีดเตอร์เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยอาศัยการชนกระแทกของอนุภาคพลังงานสูง เพื่อถ่ายเท โมเมนตัมให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาและเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศตกลงบนฐานรองรับสารกึ่งตัวนำ กระบวนการนี้สามารถสร้างให้เกิดสถานะผิวบนรอยต่อของโลหะสารกึ่งตัวนำได้ รวมไปถึงสภาวะเงื่อนไขกำลังสปีดเตอร์ได้แก่ กำลังในการสปีดเตอร์ ความดันก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิฐานรอง ระยะเวลาในการสปีดเตอร์ ถ้วนส่งผลถึงลักษณะสมบัติของ MSM-PD เช่น กำแพงศักย์ข้อต่อกึ่ง กระแสรั่ว ค่าความจุไฟฟ้า การตอบสนองต่อแสง การตอบสนองต่อความถี่

ข้อดีของการสปีดเตอร์ [8]

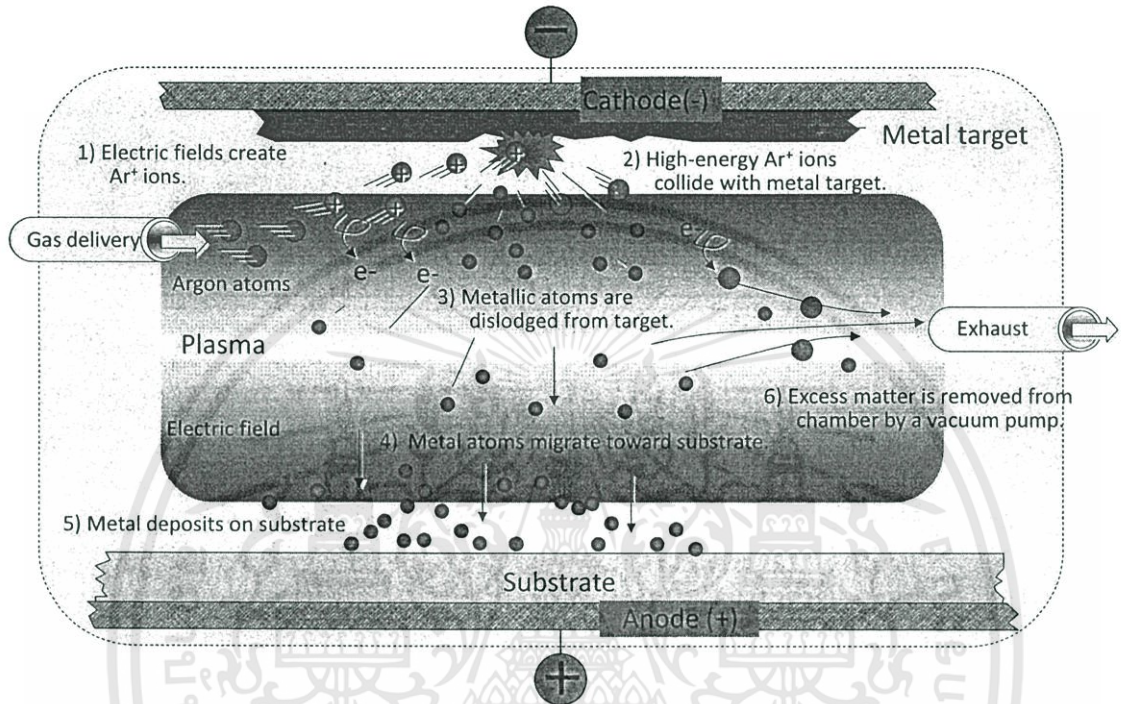
1. สามารถสร้างฟิล์มบางของวัสดุโลหะและฉนวนได้
2. สามารถสร้างฟิล์มบางของวัสดุจุดหลอมเหลวสูงและต่ำได้
3. ควบคุมความสม่ำเสมอของฟิล์มบางได้ดี
4. สร้างชั้นอัลลอยได้ดี
5. ฟิล์มบางที่สร้างมีความบริสุทธิ์สูง

2.5.1 กระบวนการสปีดเตอร์

ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์แสดงดังภาพที่ 2.26 ประกอบไปด้วยแผ่นคู่ขนานอยู่ในระบบสุญญากาศ ด้านหนึ่งคือเป้าโครเมียมหรือขั้วคาโทด ส่วนอีกด้านหนึ่งคือฐานรองเวเฟอร์หรือขั้วแอโนด เมื่อป้อนก๊าซอาร์กอนและจ่ายกำลังงานให้ระบบสปีดเตอร์ทำให้เกิดโกลด์ดิซชาร์ท หรือการสร้างพลาสมาเพื่อให้เกิดอาร์กอนไอออน ในบริเวณพลาสมาอาร์กอนไอออนจะถูกเร่งเข้าสู่เป้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครเมียม ระหว่างที่อาร์กอนไอออนถูกเร่งจะได้รับโมเมนตัมและเข้าชนเป้าโครเมียม อะตอมของโครเมียมเมื่อถูกอาร์กอนไอออนชนก็จะได้รับการถ่ายทอดโมเมนตัมและหลุดออกมาจากเป้าวิ่งเข้าสู่แผ่นฐานรองเวเฟอร์ควบแน่นเป็นฟิล์มบาง

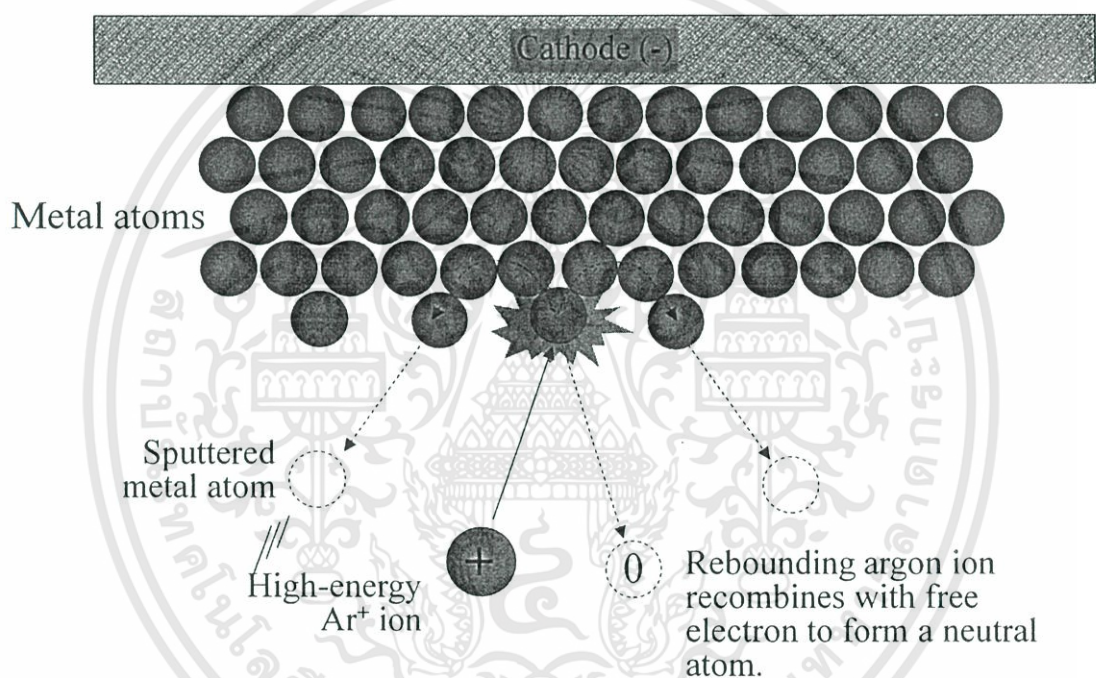


รูปที่ 2.26 กระบวนการสปีดเตอร์ที่เกิดภายในแชมเบอร์

สิ่งสำคัญในกระบวนการสปีดเตอร์ก็คืออาร์กอนไอออนในพลาสมา ก๊าซอาร์กอนถูกใช้ในการสปีดเตอร์เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมากและเป็นก๊าซเฉื่อยจึงไม่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มบางที่สร้างหรือเป้าที่ใช้สร้างฟิล์มบาง ปกติอะตอมของก๊าซอาร์กอนมีความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้า แต่เมื่อถูกชนด้วยอิเล็กตรอนจากภายนอกพลังงานสูง อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดของอะตอมอาร์กอนจะหลุดออกไป ทำให้อะตอมอาร์กอนแสดงประจุไฟฟ้าเป็นบวก ดังนั้นอาร์กอนไอออนที่อยู่ในพลาสมาจะถูกแรงกระทำจากศักย์ไฟฟ้าลบที่ขั้วคาโทดให้เคลื่อนที่ด้วยความเร่งเข้าชนเป้าและถ่ายทอดโมเมนตัมแก่อะตอมของเป้าให้หลุดออกมา อะตอมของเป้าซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้าจะหลุดออกมาผ่านพลาสมา (จำนวนเล็กน้อยจะถูกไอออไนซ์) ตกลงบนฐานรองเวเฟอร์เกิดเป็นฟิล์มบาง พลังงานที่ให้แก่อะตอมที่ชนเป้าจะต้องมากพอที่จะชนให้อะตอมหลุดออกจากเป้าได้แต่ต้องไม่มากเกินไปจนอาร์กอนไอออนเข้าไปฝังอยู่ในเป้าซึ่งส่วนใหญ่ค่าพลังงานที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 500 – 5,000 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้อะตอมของเป่าหลุดออกมาจากผิวหน้าคล้ายกับการชนกันของลูกบิลเลียด เมื่ออาร์กอนไอออนชนเป่าและทำให้อะตอมของเป่าหนึ่งหรือสองอะตอมหลุดออกมามีรูปร่างที่ 2.27 สปีดเตอร์ยิลล์ คือจำนวนอะตอมของเป่าที่หลุดออกจากเป่าต่อจำนวนไอออนที่วิ่งเข้าชน ดังนั้นค่ายิลล์หมายความว่าถึงอัตราการสปีดเตอร์ ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ประมาณ 0.5 – 1.5 ตัวอย่างเช่นค่าสปีดเตอร์ยิลล์ 0.5 หมายความว่าโดยเฉลี่ยไอออนของอาร์กอนไอออนสองไอออนสามารถวิ่งชนแล้วทำให้อะตอมของเป่าหลุดออกมาได้หนึ่งอะตอม สปีดเตอร์ยิลล์ขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบ มวลพลังงานของไอออนที่วิ่งเข้าชนเป่า สารประกอบและรูปร่างของเป่า



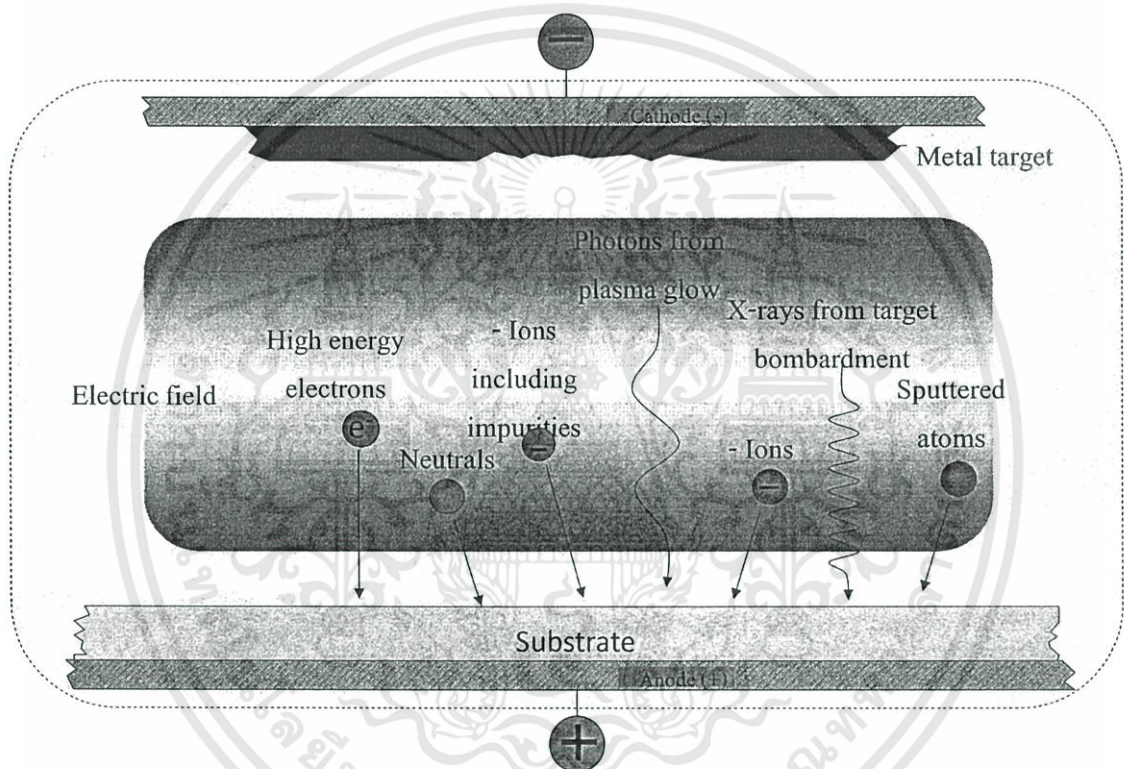
รูปที่ 2.27 การบอมบ์บาร์ดของ Ar⁺ ที่ก่อให้เกิดอะตอมในกระบวนการสปีดเตอร์

การโกลว์ดิซชาร์ทคือ การสร้างพลาสมาด้วยการให้กระแสไฟฟ้าหลายร้อยจนถึงหลายกิโลโวลต์ไหลผ่านก๊าซ ที่ความดันต่ำ อิเล็กตรอน, ไอออนและอนุภาคอื่นๆ ในบริเวณพลาสมาจะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วไฟฟ้า อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนไปสู่ขั้วไฟฟ้าบวกได้เร็วกว่าไอออนบวกที่เคลื่อนที่ไปสู่ขั้วไฟฟ้านลบได้ช้ากว่าเนื่องจากมีมวลมากกว่า ผลจากความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันของพาหะส่งผลให้เกิดศักย์ไฟฟ้าบวกในบริเวณพลาสมา ในการที่ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วคาโทดต้องผ่านบริเวณคาร์กสเปส บริเวณคาร์กสเปสเกิดมาจากการขาดอิเล็กตรอนในบริเวณนั้นและเป็นบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรวมถึงสนามไฟฟ้ามีค่าสูง ทำให้ไอออนบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกเร่งเข้าชนขั้วคาโทด ส่วนอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็จะหลุดออกมาจากคาโทดและวิ่งเข้าบริเวณคาร์กสเปสเพื่อกลับเข้าสู่กระบวนการสร้าง โกลว์ดิซซาร์ทอีกครั้งหนึ่ง

เนื่องจากการสปัตเตอร์นั้นเกิดขึ้น ในบริเวณพลาสมาที่ด้านหน้าและรวมไปถึงด้านข้างของเป้าด้วย จึงต้องใช้ฉนวนป้องกันไม่ให้เกิดการสปัตเตอร์ด้านข้างของเป้า แต่ฉนวนป้องกันนั้นจะถูกวัสดุที่นำมาใช้สปัตเตอร์เคลือบไปด้วยในขณะที่สร้างฟิล์ม ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนหรือทำความสะอาดเป็นประจำเพื่อให้ลดการเกิดการปนเปื้อน อายุการใช้งานของเป้าที่ใช้สปัตเตอร์จะเปลี่ยนเป้าเมื่อเหลือเป้าน้อยกว่าร้อยละ 50



รูปที่ 2.28 อนุภาคที่เกิดในกระบวนการสปัตเตอร์ที่ลงมายังฐานรอง

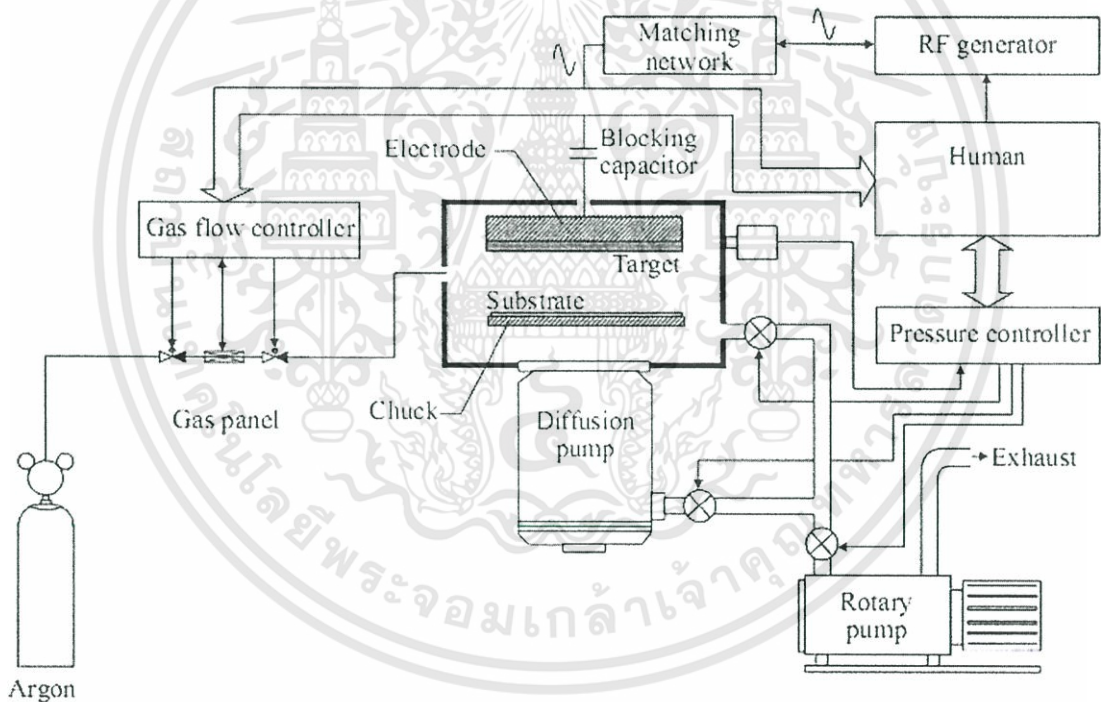
พลังงานส่วนมากที่ใช้ในการสปัตเตอร์ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนหรือปลดปล่อยพลังงานในรูปอิเล็กตรอนทุติยภูมิ รังสีเอ็กซ์และโฟตอน ทำให้ต้องมีการระบายความร้อนให้แก่เป้า ส่วนบนฐานรองนอกจากอะตอมของเป้าที่ตกลงบนฐานรอง ยังมีอนุภาคอีกหลายชนิดที่ตกลงมาด้วยตามรูป 2.28 ได้แก่ สปัตเตอร์อะตอม อิเล็กตรอนพลังงานสูง อนุภาคเป็นกลาง ไอออนของสิ่งปนเปื้อน ไอออนลบ รังสีเอ็กซ์จากการบอมบ์บาร์ดเป้า ซึ่งสามารถทำให้ฐานรองร้อนขึ้นได้จนมีอุณหภูมิสูงถึง 350 °C จนอาจทำให้ฟิล์มที่เกิดมีลักษณะไม่เรียบ อุณหภูมิที่สูงสามารถเหนียวนาให้เกิดออกไซด์ที่ผิวหน้าของโลหะในขณะที่สร้างฟิล์มโลหะ และอนุภาคหลายชนิดที่ตกบนฐานรองเว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟอร์ขณะสปีดเตอร์สามารถสร้างให้เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าของเวเฟอร์หรือก่อให้เกิดสถานะที่ผิวของสารกึ่งตัวนำทำให้มีผลต่ออุปกรณ์ที่สร้างได้ จึงต้องมีการระบายความร้อนแก่ฐานรอง

อีกหนึ่งปัจจัยในการสปีดเตอร์คือก๊าซที่ใช้ในระหว่างสปีดเตอร์จะต้องบริสุทธิ์มากเพราะถ้าหากก๊าซที่ใช้มีสิ่งเจือปน สิ่งเจือปนสามารถเข้าไปรวมตัวกับอะตอมของเป้าที่ใช้สร้างฟิล์มแหล่งกำเนิดหลักๆ ของสารเจือปนเหล่านี้เกิดขึ้นจาก ก๊าซสปีดเตอร์ที่ไม่สะอาดเพียงพอ เอทที่แก๊สจากชิ้นงานเวเฟอร์ เอทที่แก๊สจากผนังแชมเบอร์ รอยรั่วซึมของแชมเบอร์ การสปีดเตอร์ที่ความดันต่ำเป็นเทคนิคที่สร้างฟิล์มบาง ให้มีสิ่งเจือปนแปลกปลอมน้อยลงและมีอัตราการเกิดที่สูงขึ้น

ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและอโนดของระบบสปีดเตอร์ที่เหมาะสม ต้องมีระยะห่างที่ทำให้มีอัตราการเกิดสปีดเตอร์อะตอมมากที่สุด



รูปที่ 2.29 ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์

สปีดเตอร์ไดโอดแบบกระแสตรงมีปัญหาในการสปีดเตอร์เป้าที่เป็นฉนวนหรือสารไดอิเล็กตริก เพราะขั้วไฟฟ้าคาโทดจะมีประจุบวกมากอยู่ที่ผิวหน้าของเป้าและส่งผลให้ไม่สามารถเกิดการสปีดเตอร์ขึ้นได้ ด้วยสาเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนา สปีดเตอร์ไดโอดแบบกระแสสลับหรืออาร์เอฟสปีดเตอร์ ตามรูป 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะใช้สนามไฟฟ้ากระแสสลับในย่านความถี่คลื่นวิทยุเป็นตัวสร้างพลาสมา มีค่าความถี่ 13.56 MHz แทนการสร้างพลาสมาด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงธรรมดา ซึ่งสนามไฟฟ้าอาร์เอฟถูกไบอัสที่ด้านหลังของเป้า ทั้งอิเล็กตรอนและไอออนในพลาสมาจะอยู่ในสนามอาร์เอฟ แต่เนื่องจากอาร์เอฟเป็นความถี่สูงทำให้มีอิเล็กตรอนเท่านั้นที่ตอบสนองได้ทันต่อความถี่อาร์เอฟทำให้เป้ามียุทธศาสตร์จำนวนมากอยู่ที่ผิวหน้า จึงคิดให้อาร์กอนไอออนซึ่งมีประจุบวกวิ่งเข้าชน ดังนั้นอาร์เอฟสปีดเตอร์จึงสามารถสปีดเตอร์ได้ทั้งเป้าตัวนำและเป้าฉนวน

2.6 สถานะผิวของรอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำ [13,23,46]

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถสร้างรอยสัมผัสในอุดมคติได้ แม้จะใช้กระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงก็ตาม เนื่องจากมีความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสเกิดขึ้น เช่นกรณีของโลหะและซิลิคอน พบว่าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารทั้งสอง จะมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บางๆราว 5 - 25 Å กั้นอยู่เสมอ เนื่องจากผิวซิลิคอนสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย จึงเกิดเป็นชั้นออกไซด์ นอกจากนี้ก็จะมีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆหรือประจุไฟฟ้าใดๆอยู่ที่บริเวณรอยสัมผัสไม่มากนัก สาเหตุนี้ทำให้เกิดมีระดับพลังงานปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัส ระดับพลังงานนี้ถูกเรียกว่า “สถานะผิว” (Surface states) ระดับพลังงานนี้จะมีคุณสมบัติและทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอน (electron trapped) หรือ ระดับจับโฮล (hole trapped) หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ผลของสถานะผิวจะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสแตกต่างไปจากอุดมคติ

ผลการทดลองส่วนใหญ่พบว่าสถานะผิวจะมีความหนาแน่นมากบริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงานและประจุอันเนื่องจากสถานะผิวเหล่านี้จะบังคับให้ระดับ E_f อยู่กลาง E_g ที่บริเวณผิวหน้าสาร นั่นคือ สถานะผิวจะทำให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำแม้ว่าจะไม่มีโลหะมาทำรอยสัมผัสอยู่ด้วยก็ตาม โดยสถานะผิวที่อยู่ต่ำกว่าระดับ E_f จะมีอิเล็กตรอนอยู่ในขณะที่สถานะผิวที่อยู่เหนือขึ้นไปจะเป็นสถานะว่าง เมื่อนำโลหะมาทำรอยสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำจะมีการเปลี่ยนแปลงการโค้งงอของแถบพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการปรับระดับ E_f ระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อเทียบกับการทำผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำในกรณีอุดมคติ ดังนั้นสถานะผิวจึงลดผลของฟังก์ชันงานของโลหะที่มีต่อการโค้งงอของ

แถบพลังงาน โดยชนิดและความหนาแน่นของสถานะผิวจะขึ้นอยู่กับการจัดเตรียมผิวหน้ารอยสัมผัสหรือกระบวนการสร้าง

สถานะพื้นผิวของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำที่ความถี่สูงจะไม่สามารถเป็นตัวเก็บประจุ แต่จะสามารถวัดค่าได้เฉพาะค่าตัวเก็บประจุรวม C_T ที่เท่ากับค่าความจุประจุเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะ (space-charge capacitance: C_{SC}) หาได้ดังสมการที่ 2.24 และที่ความถี่ต่ำ ค่าตัวเก็บประจุรวม C_T เป็นผลบวกของค่าความจุประจุเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะ C_{SC} และตัวเก็บประจุที่ผิว (Surface states: C_{SS}) ดังสมการที่ 2.25

$$\text{High Frequency;} \quad C_T = C_{SC} \quad (2.24)$$

$$\text{Low Frequency;} \quad C_T = C_{SC} + C_{SS} \quad (2.25)$$

โดยที่ C_T คือค่าความจุประจุรวม

C_{SC} คือค่าความจุประจุเนื่องจากบริเวณปลอดพาหะ

C_{SS} คือค่าความจุประจุที่ผิว

ความหนาแน่นของสถานะพื้นผิว (N_{SS}) หาได้ดังสมการที่ 2.26

$$N_{SS} = \frac{C_{SS}}{q^2 A} \quad (2.26)$$

โดยที่ N_{SS} คือความหนาแน่นของสถานะพื้นผิว

A คือพื้นที่ของ Schottky region

q คือประจุอิเล็กตรอน

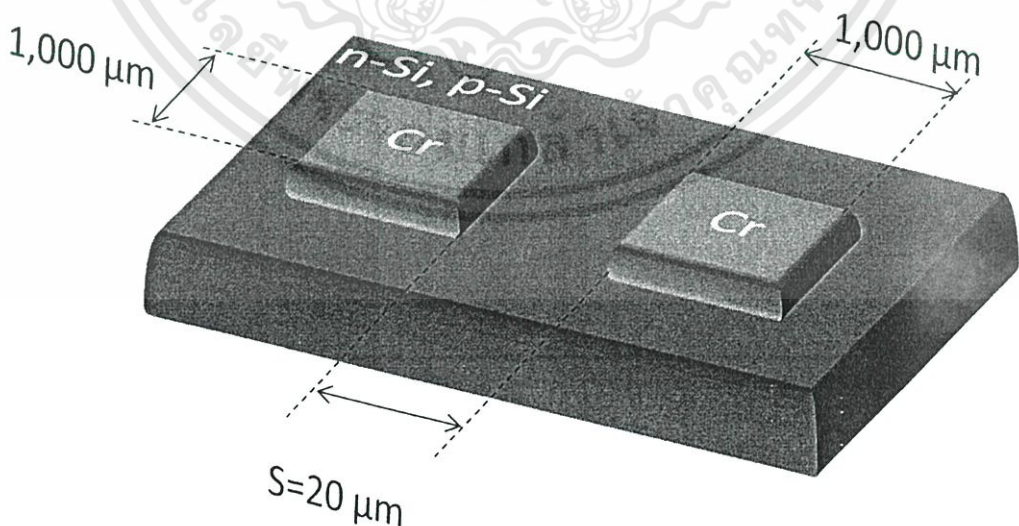
บทที่ 3

กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในการสร้างและการทดลองในการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะ ในการออกแบบการทดลองนี้ได้แยกประเด็นในการศึกษา ออกเป็นสองแนวทางใหญ่ๆ ได้แก่ การสร้างขั้วโลหะลงบนซิลิคอนทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี เพื่อศึกษาชนิดของพาหะที่ก่อให้เกิดกระแสแสง และการปรับเปลี่ยนตัวแปรในกระบวนการสเป็คเตอร์ ที่ใช้สร้างขั้วโลหะโครเมียมเพื่อการลดกระแสรั่วไหลของโฟโตไดโอด MSM จากนั้นนำโฟโต ไดโอด MSM ที่สร้างได้ไปทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง

3.1 โครงสร้างโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดที่ใช้ในการศึกษาคือ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ซึ่งประกอบด้วยรอยสัมผัส ระหว่างโครเมียม - ซิลิคอนที่เป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งจำนวนสองรอยสัมผัส สารกึ่งตัวนำชนิด n-Si ค่าสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด p-Si มีค่าสภาพต้านทาน 1-10 Ω -cm ขนาดของ ขั้วโลหะมีขนาดเท่ากันทั้งสองด้าน โดยมีขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) ที่ใช้เป็น ส่วนของพื้นที่รับแสง มีค่า 20 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โฟโตไดโอด MSM โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr และ Cr/n-Si/Cr จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมเป็นหลัก ซึ่งสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดสามารถนำมาสร้างได้ด้วยวิธีการเดียวกันมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

- อัลตราโซนิกในน้ำปราศจากไอออน (De – Ionization water: DI) 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่น

- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

- ต้มในพินันฮา (3H₂SO₄ + H₂O₂: Piranha) เป็นเวลา 15 นาที เพื่อขจัดคราบไขมันและฝุ่น

- เปิดน้ำ DI ไหลผ่าน 5 นาที

- จุ่มใน DI 2 แก้ว

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก HF 5% (Hydrofluoric acid: HF) เป็นเวลา 20 วินาที เพื่อกำจัด

ออกไซด์ตามธรรมชาติ (native Oxide) ที่เกิดบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจากออกซิเจนในบรรยากาศ

- จุ่มใน DI 2 แก้ว

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการสร้างขั้วโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอร์

- บั้มสุญญากาศที่ความดัน 6×10^{-6} Torr

- ป้อนก๊าซอาร์กอนที่ความดันในกรณีที่ต้องการศึกษา

- ปรับอุณหภูมิฐานรองที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา

- ปรับกำลังที่ป้อนให้แก่อาร์เอฟสปัตเตอร์ที่กำลังที่ต้องการศึกษา

- ทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของเป้า (target)

- ทำการสปัตเตอร์โลหะโครเมียม (เป้าหมายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3", ความบริสุทธิ์

99.95%, ความหนา 3 mm, ของบริษัท Kurt J. Leskar) ในระยะเวลาที่ต้องการศึกษา

3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

- อบแผ่นไต่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เคลือบแผ่นด้วยน้ำยาไวแสง AZ – 1350 ด้วยเครื่องสปินที่ความเร็ว 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 วินาทีและที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที

- อบแผ่นระเหยสารละลายในน้ำยาไวแสง (pre bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 15 นาที

- ทำการถ่ายแบบขึ้นลวดลายโดยการฉายแสง UV ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (Mask Aligner) เป็นเวลา 15 วินาที

- จุ่มในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ – developer)

- จุ่มใน DI 2 แก้ว

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบแผ่นระเหยสารละลายในน้ำยาไวแสง (Post bake) เพื่อเพิ่มการยึดติดของลวดลายที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 15 นาที

4. กระบวนการสกัดโครเมียมเปิดช่องรับแสง (Cr Etching)

- ใช้กรดกัดโครเมียม ($\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$) + HClO_4 + DI ด้วยอัตราส่วน 50 : 13 : 220 ซึ่งมีอัตราการกัด 1000 Å/min ที่อุณหภูมิห้อง

- จุ่มใน DI 2 แก้ว

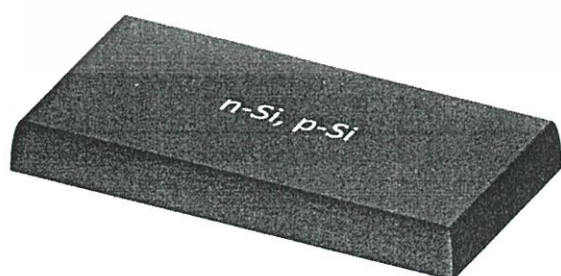
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) เป็นเวลา 1 นาที 2 แก้ว เพื่อลอกน้ำยาไวแสงออก

- จุ่มใน DI 2 แก้ว

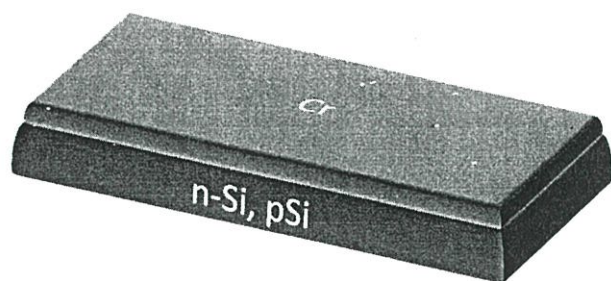
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นหรือพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สปีเตอร์ชั้น โลหะโครเมียม



เคลือบน้ำยาไวแสง

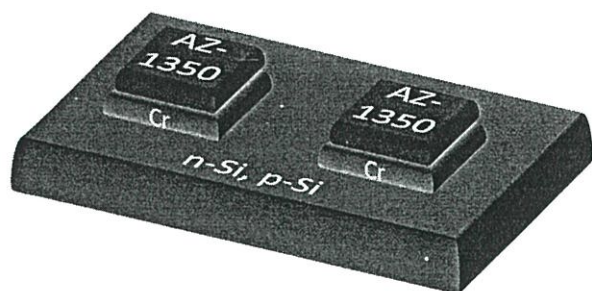


กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

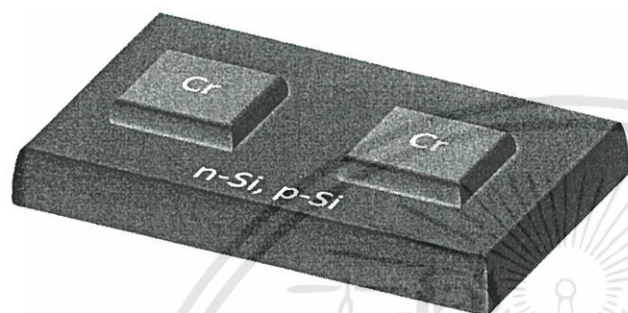


จุ่มน้ำยาขึ้นลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

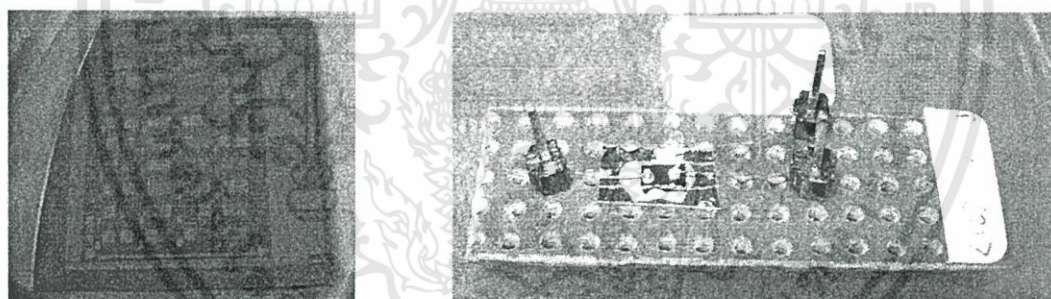


การสกัดชั้นโครเมียม

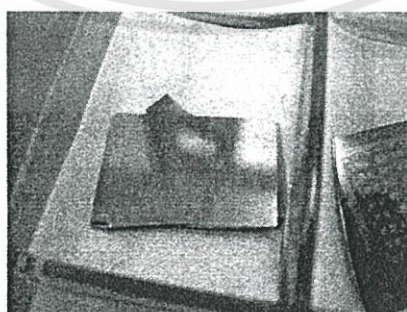


โฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr

รูปที่ 3.2 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด MSM โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr



รูปที่ 3.3 โฟโตไดโอด MSM โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr



รูปที่ 3.4 ฟิล์มบางโครเมียมจากการสปีดเตอร์บนกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลอง

3.3.1 การศึกษาการลดกระแสรั่วไหลจากเทคนิคในการสปัตเตอร์

การทดลองทำการสปัตเตอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขในการสร้างขั้วโลหะและรอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม เพื่อให้ได้กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสที่มีค่าน้อยที่สุด ขั้วโลหะที่ได้มีค่าความหนาที่เหมาะสม ซึ่งหมายความว่าเงื่อนไขในการสร้างที่ก่อให้เกิดการบอมบ์บาร์ดสร้างสถานะผิวที่รอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม โดยเงื่อนไขต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 3.1

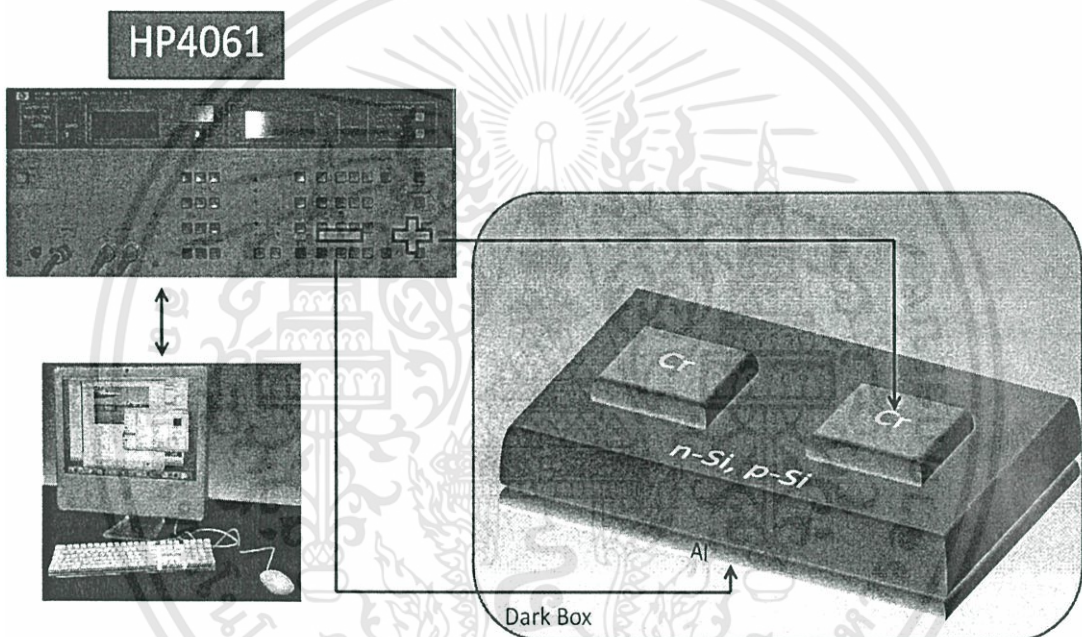
ตารางที่ 3.1 การสปัตเตอร์ที่ปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา

กำลังในการสปัตเตอร์ (Watt)	ความดันก๊าซอาร์กอน (mbar)	อุณหภูมิฐานรอง (°C)	เวลาในการสปัตเตอร์ (Min)
50	4.5x10 ⁻³	25	30
75			
100			
150			
50	4.5x10 ⁻³	25	30
	6x10 ⁻³		
	8x10 ⁻³		
	10x10 ⁻³		
50	4.5x10 ⁻³	25	30
		100	
		200	
50	4.5x10 ⁻³	25	10
			20
			30
			40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของ Cr/n-Si และ Cr/p-Si

การศึกษาลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของรอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำ เป็นการทดลองเพื่อหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่เป็นโครงสร้างชนิดกึ่งตัวนำไดโอด ที่ผ่านการสับเตอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสูงกำแพงศักย์และหาค่าแรงดันภายในของอุปกรณ์ต่อไป โดยใช้เครื่อง HP 4061A semiconductor/component test system ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยทำการวัดขั้วไฟฟ้าด้านบนซึ่งเป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ และขั้วไฟฟ้านล่างเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก



รูปที่ 3.5 การทดลองลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของ Cr/n-Si และ Cr/p-Si

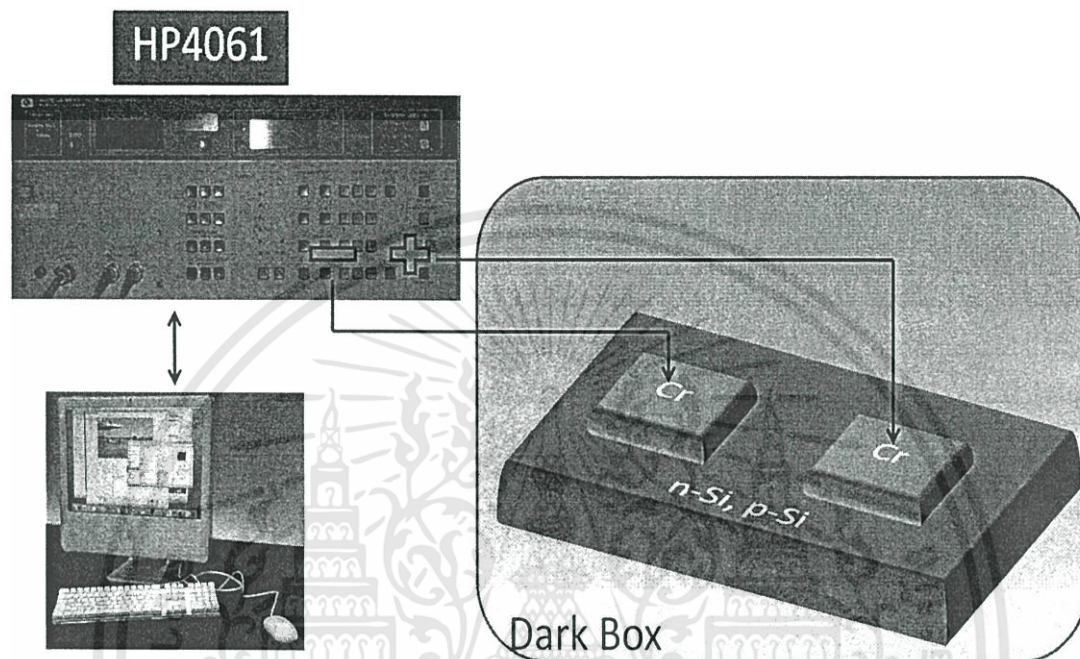
เมื่อทราบถึงค่ากำแพงศักย์ที่มีผลกระทบเนื่องจากการสร้าง ทำให้สามารถปรับปรุงกระบวนการสร้างรอยสัมผัสให้มีความสมบูรณ์เหมาะแก่การนำไปสร้างเป็นโฟโตไดโอดในการทดลองหัวข้อต่อไป

3.3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ขณะไม่ได้รับ

แสงตกกระทบ

นำโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ที่ผ่านกระบวนการสร้างที่มีเงื่อนไขที่เหมาะสม มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ด้วยเครื่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งค่าที่ได้คือ กระแสมืดของโฟโตไดโอด ทำการวัดชั่วไฟฟ้าต้านบนทั้งสองของอุปกรณ์ซึ่งเป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งทั้งสองรอยสัมผัส

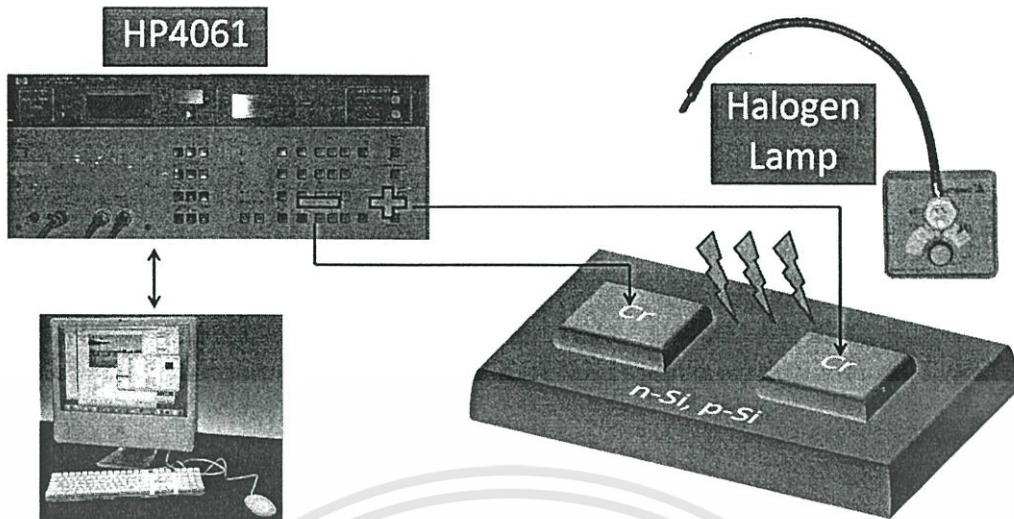


รูปที่ 3.6 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

3.3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ในสภาวะแสงกระแสดตรง

นำโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ที่ผ่านกระบวนการสร้างที่เงื่อนไขที่เหมาะสม และมีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง $20\ \mu\text{m}$ มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ในแบบสัญญาณแสงกระแสดตรง (dc) ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนของบริษัท STOCKER & YALE รุ่น 20 Series ที่มีความเข้ม 5000 lux, 10000 lux, 15000 lux, 20000, lux และ 25000 lux ดังแสดงในรูปที่ 3.7

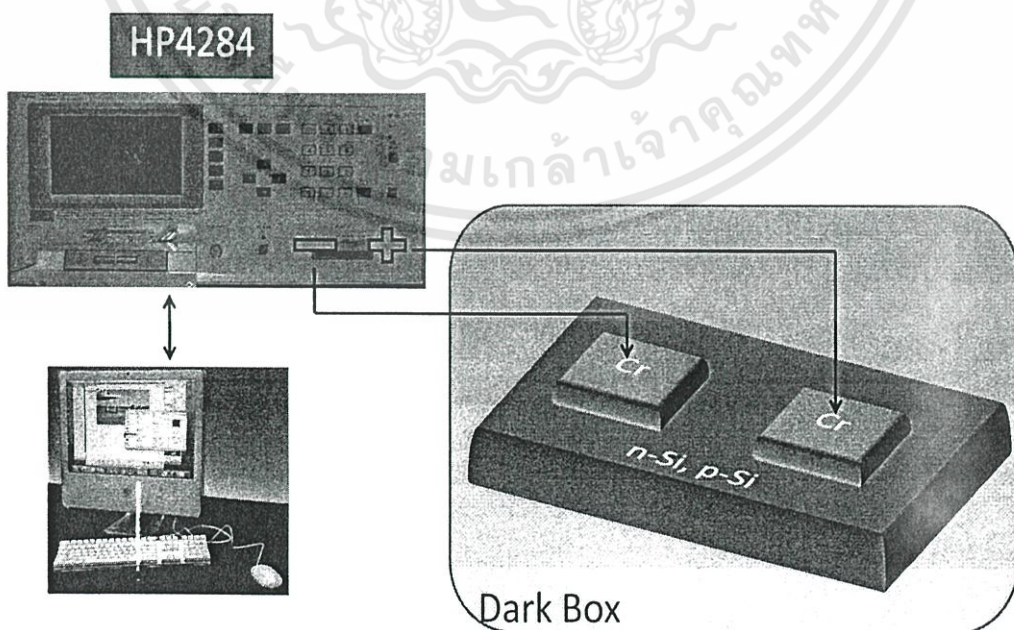
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr
ในสัญญาณแสงกระแสดตรง

3.3.5 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr

นำโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ที่ผ่านกระบวนการสร้างที่เงื่อนไขที่เหมาะสม มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ด้วยเครื่อง HP 4284A precision LCR meter ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -12 V ถึง 12 V ที่สัญญาณกระแสสลับแรงดัน 26mV ความถี่ 1 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.8

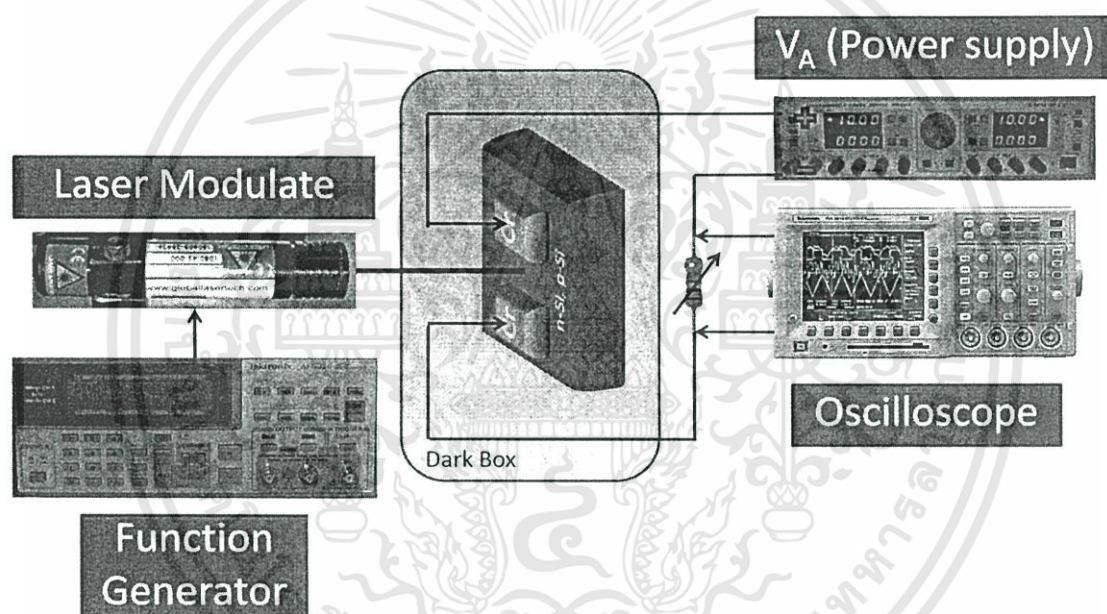


รูปที่ 3.8 การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การศึกษาลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ในสัณฐานแสงกระแสลับ

นำโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr, Cr/p-Si/Cr ที่ผ่านกระบวนการสร้างที่เงื่อนไขต่างๆ มาทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงในแบบสัณฐานแสงกระแสลับ (ac) โดยใช้เลเซอร์ไดโอดของบริษัท Global Laser รุ่น Beta -TX ที่มีความยาวคลื่น 670 nm, กำลังงาน 3 mW (laser power meter รุ่น N54-018 บริษัท Edmund Optics) ซึ่งถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด 400 mV_{pp} (Textronix AFG320 Arbitrary function generator) เข้ากับเลเซอร์ที่ความถี่ต่ำในช่วง 100 Hz-10 MHz ที่แรงดันไบอัส (V_A) 10 โวลต์ และให้โหลดความต้านทาน (R_L) มีค่า 100 Ω ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงในแบบสัณฐานแสงกระแสลับ

เมื่อทำการศึกษาดัชนีประจักษ์ต่างๆ ในการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของโฟโตไดโอดที่กระบวนการสร้างที่เงื่อนไขต่างๆ สามารถทำให้สรุปได้ถึงกระบวนการสร้างที่เหมาะสมและอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดทั้ง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr

บทที่ 4

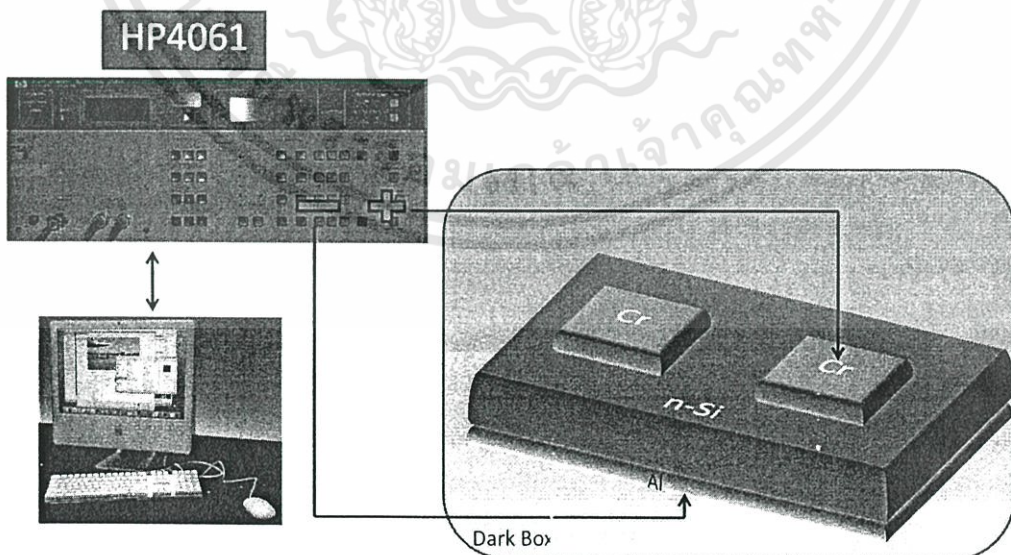
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากได้ทำการสร้างอุปกรณ์ตามกระบวนการสร้างในบทที่ 3 เสร็จแล้ว จึงนำอุปกรณ์ไปทดสอบหาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของรอยต่อทั้งสองชนิด (Cr/n-Si และ Cr/p-Si) ได้แก่ แรงดันภายใน กำแพงศักย์ช็อคตีก์ กระแสรั่วไหล เป็นต้น แล้วนำผลที่ได้มาปรับปรุงกระบวนการสร้างให้มีความเหมาะสมและได้เงื่อนไขในการสร้างที่เป็นมาตรฐาน จากนั้นจึงนำกระบวนการสร้างนั้นมาสร้างเป็นโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แล้วจึงนำไปทดสอบลักษณะสมบัติทางกระแส-แรงดัน ความจุไฟฟ้า-แรงดัน การตอบสนองสัญญาณทางแสงทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ตามลำดับ โดยผลการทดลองทั้งหมดมีค่าต่อไปนี้

4.1 การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสที่ใช้ขั้วโลหะ Cr

4.1.1 การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/n-Si

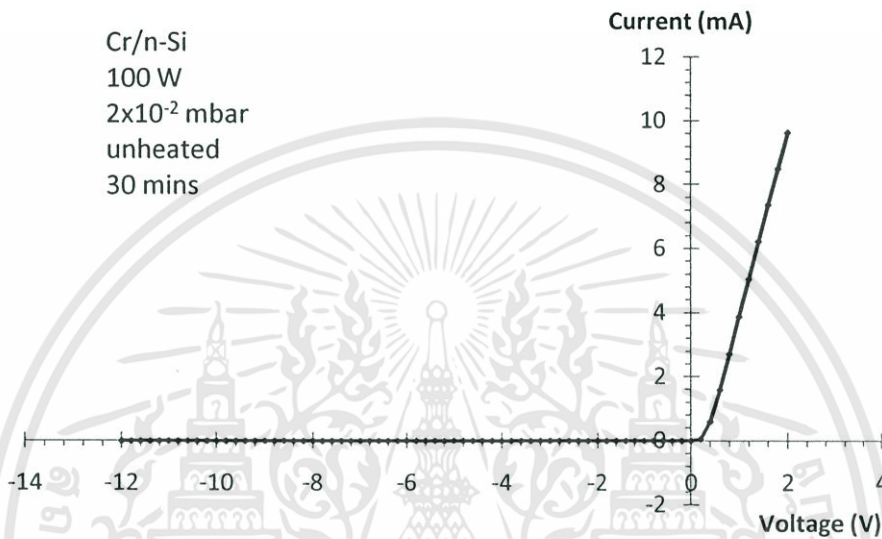
ในขั้นแรกของการทดลองใช้ Cr เป็นขั้วโลหะของโฟโตไดโอดชนิด MSM ต้องทดลองสร้างรอยสัมผัส Cr/n-Si เพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสว่าเป็นรอยสัมผัสชนิดใด



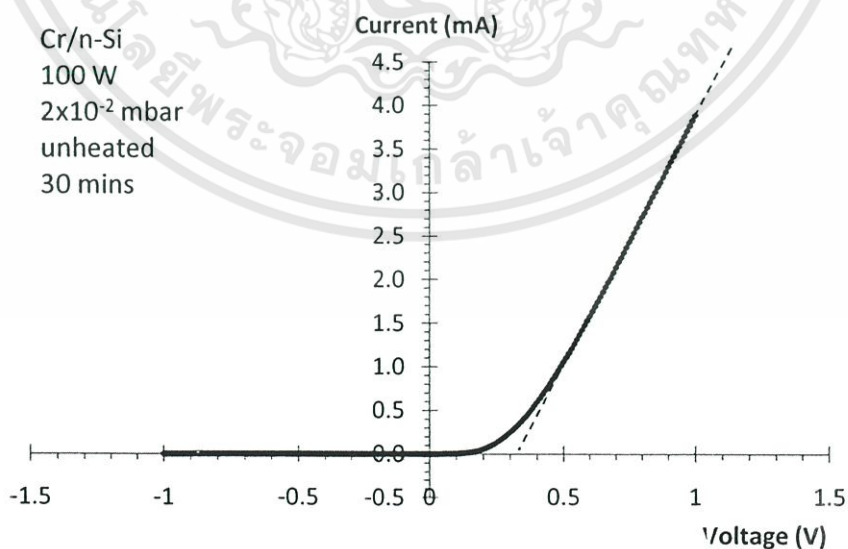
รูปที่ 4.1 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยได้เลือกเงื่อนไขในการสเปคเตอร์ที่กำลังไฟฟ้า 100 W ความดันก๊าซอาร์กอน 2×10^{-2} mbar เวลาในการสเปคเตอร์ 30 min โดยไม่ได้ให้ความร้อนแก่ฐานรอง นำรอยสัมผัส Cr/n-Si ที่สร้างขึ้นมาทดสอบโดยระบบเครื่องมือวัด HP 4061A Semiconductor/component test system ของบริษัท Agilent แสดงในรูปที่ 4.1

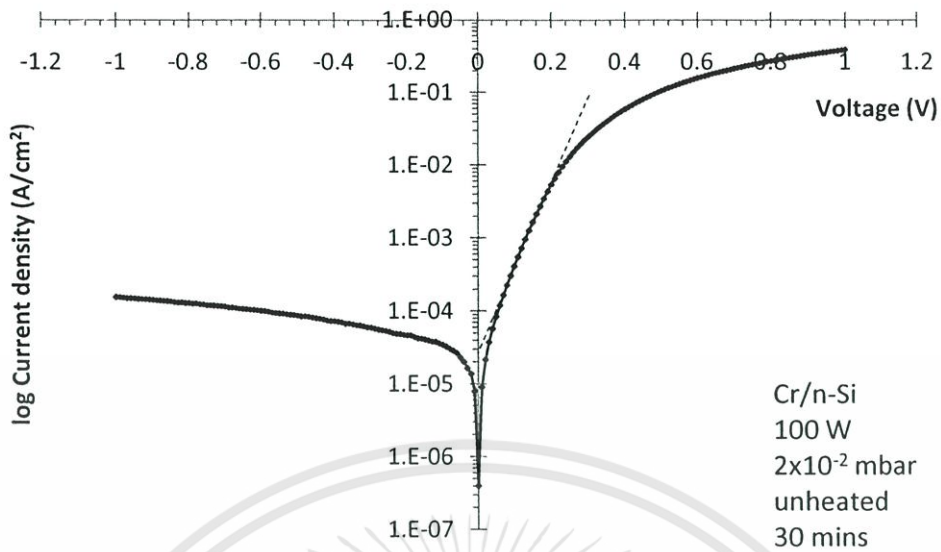


รูปที่ 4.2 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/n-Si



รูปที่ 4.3 การหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส Cr/n-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตวย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส Cr/n-Si

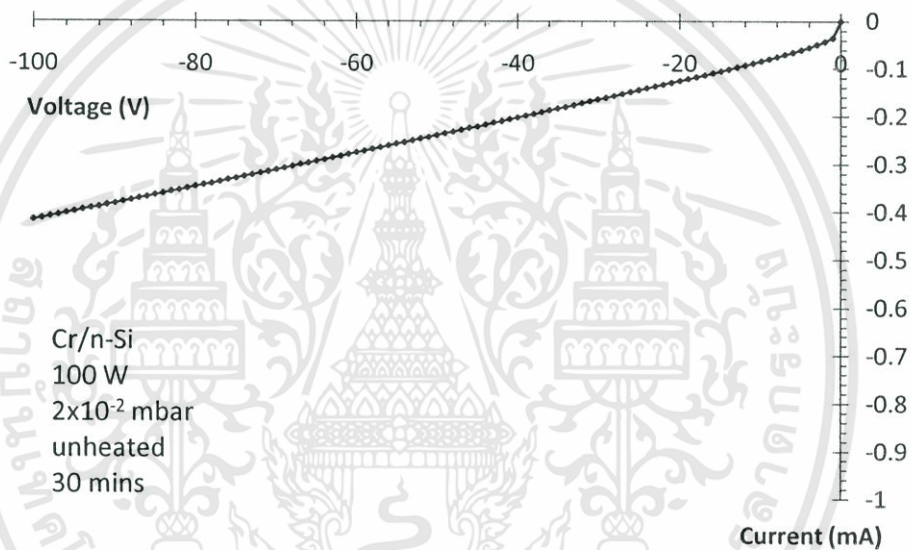
พบว่ารอยสัมผัส Cr/n-Si มีความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน ดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัส Cr/n-Si เป็นรอยสัมผัสช็อคติคัล จากรูปที่ 4.3 สามารถหาค่าแรงดันภายในได้ 0.32 eV และจากการหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตวย้อนกลับ (J_0) ในรูปที่ 4.4 โดยแทนตั้งเป็นค่าความหนาแน่นกระแสในแกน log หาค่า J_0 ได้ 3×10^{-5} A/cm² นำค่าที่อ่านได้ไปคำนวณค่ากำแพงศักย์ช็อคติคัลที่ได้จากการทดลองด้วยสมการที่ (2.8) ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อคติคัล 0.67 eV

จากผลการทดลองเบื้องต้นจะเห็นได้ว่าค่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส Cr/n-Si มีค่าสูง อันเนื่องมาจากค่ากำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้าง Al/n-Si ที่เคยสร้างขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีค่ากระแสรั่วไหลอยู่ในระดับ 10^{-9} A และมีค่ากำแพงศักย์ช็อคติคัลที่ได้จากการทดลองสูงถึง 0.72 V [6,7] ทำให้ในการนำโลหะ Cr ไปใช้เป็นขั้วโลหะของโพโตไดโอดโครงสร้าง MSM ยังต้องปรับปรุงเทคนิคการสร้างที่เหมาะสม เพราะว่าเมื่อค่ากระแสรั่วไหลของรอยต่อมีค่าสูงจะส่งผลให้อัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดมีค่าต่ำทำให้อุปกรณ์ไม่สามารถทำงานได้ตามที่คาดหวังไว้

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของโลหะทั้งสองชนิดพบว่าในด้านกระบวนการสร้างขั้วโลหะ Al นั้นสร้างด้วยการระเหยสารในสุญญากาศแล้วทำการซินเตอร์ด้วยความร้อน ส่วนขั้วโลหะ Cr นั้นสร้างด้วยวิธีการสปัตเตอร์อันเนื่องมาจาก Cr เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ในด้านของฟังก์ชันงานของโลหะทั้งสองชนิดพบว่าฟังก์ชันงานของโลหะทั้งสองชนิดมีค่าไม่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากนัก โดยโลหะ Al มีค่าฟังก์ชันงาน 4.28 eV ค่าแฟงค์กซ์ช็อคตีย์ $q\phi_{bn}$ ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการที่ 2.6 มีค่า 0.27 eV จะเห็นได้ว่าถึงแม้ค่าค่าแฟงค์กซ์ของ Al/n-Si ทางทฤษฎีจะมีค่าต่ำแต่สามารถปรับปรุงรอยสัมผัสได้ด้วยการซินเตอร์จึงทำให้รอยสัมผัสที่ได้จากการทดลองมีค่าค่าแฟงค์กซ์สูงและกระแสรั่วไหลต่ำ [6] และเมื่อพิจารณาถึงแรงดันพังทลายของรอยสัมผัสช็อคตีย์ Cr/n-Si พบว่ามีค่าสูงมากกว่า 100 V แสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งมีค่ามากกว่าของรอยสัมผัส Al/n-Si ซึ่งโลหะ Al เมื่อได้รับความร้อนมักเกิดการสไปคได้ง่าย เกิดเป็นจุดกั๊บกั๊งของสนามไฟฟ้าวิกฤตจึงอาจเป็นสาเหตุให้รอยสัมผัส Al/n-Si มีค่าแรงดันพังทลายที่ต่ำกว่า Cr/n-Si [24]

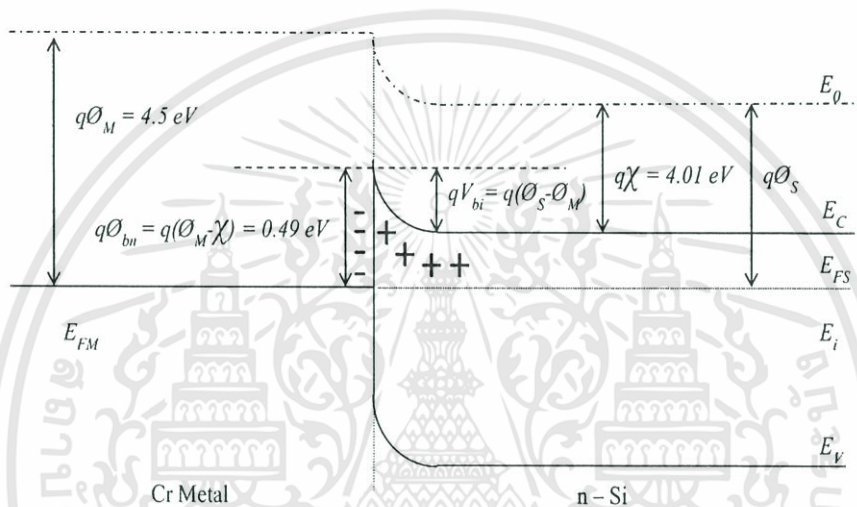


รูปที่ 4.5 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสช็อคตีย์ ในช่วงไบอัสย้อนกลับ แรงดันพังทลายของรอยสัมผัส Cr/n-Si สูงกว่า 100 V

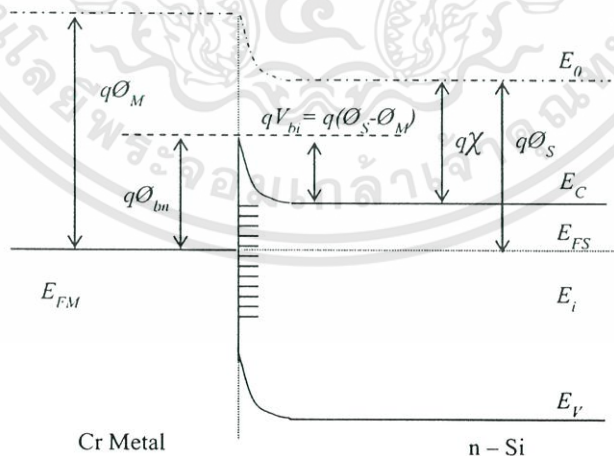
ในกรณีของรอยสัมผัส Cr/n-Si สามารถแสดงแถบพลังงาน ได้ดังรูปที่ 4.6 (ก) โดยโลหะ Cr มีค่าฟังก์ชันงาน 4.5 eV n - Si มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี $\chi = 4.01$ eV ซึ่งทั้งสองค่าเป็นค่าคงที่ค่าแฟงค์กซ์ช็อคตีย์ $q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi)$ ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่า 0.49 eV โดยสังเกตได้ว่าค่าทางทฤษฎีมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง สาเหตุเนื่องมาจากการคำนวณทางทฤษฎี เป็นกรณีของรอยสัมผัสในอุดมคติที่พิจารณาว่าระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ระหว่างอะตอมกับอะตอม โดยไม่มีความบกพร่องเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส อะตอมแปลกปลอมอื่น หรือประจุไฟฟ้าใดๆ อยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสของสารทั้งสอง ในกรณีอุดมคตรอยสัมผัสจะมี

คุณสมบัติเป็นแบบเรกติไฟเลอร์หรือแบบโอห์มิก จะขึ้นอยู่กับค่าเปรียบเทียบของฟังก์ชันงานระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารทศวงวิสาห์หรับการแข่งขานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารทั้งสอง ซึ่งในทางปฏิบัติข้อกำหนดดังกล่าวอาจใช้ไม่ได้ เพราะไม่สามารถสร้างรอยสัมผัสในอุดมคติอย่างแท้จริงได้ แม้จะใช้กระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยีชั้นสูงก็ตาม เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสเกิดขึ้น ในกรณีของโลหะและซิลิคอน จะพบว่าระหว่างสารทั้งสองจะมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บางๆ ราว $5 - 15 \text{ \AA}$ กั้นอยู่เสมอ เนื่องจากผิวของซิลิคอนสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย และมักมีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรือประจุไฟฟ้าใดๆ ปรากฏที่บริเวณรอยสัมผัส [13]



รูปที่ 4.6 (ก) แถบพลังงานของรอยสัมผัส Cr/n-Si ในกรณีอุดมคติ



รูปที่ 4.6 (ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัส Cr/n-Si ในกรณีที่มีสถานะที่ผิว

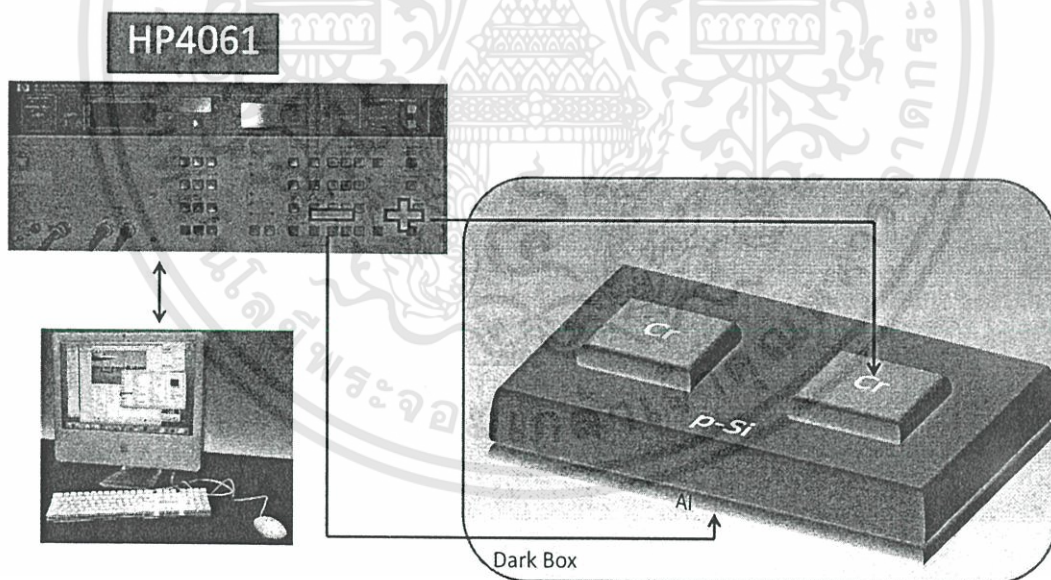
สาเหตุดังกล่าวนี้ทำให้เกิดมีระดับพลังงานปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัส

ระดับพลังงานนี้ถูกเรียกว่า สถานะผิว (Surface state) ระดับพลังงานนี้มีคุณสมบัติและทำหน้าที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับจับอิเล็กทรอนิกส์หรือระดับจับ โสลหรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัว ผลของสถานะผิวทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสแตกต่างกันไปจากกรณีอุดมคติ ผลจากการคำนวณเพียงอย่างเดียวจึงอาจใช้ไม่ได้ จำเป็นต้องใช้วิธีการวัดจากไดโอดจริงร่วมด้วย [22,25] โดยสถานะผิวก่อให้เกิดการโค้งงอมากขึ้นหรือกำแพงศักย์แคบลงทำให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ง่ายขึ้นกำแพงศักย์จึงดูคล้ายกับมีค่าน้อยลง [16,22,32,48] ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข)

4.1.2 การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/p-Si

เมื่อทราบว่ารอยสัมผัส Cr/n-Si เป็นรอยสัมผัสชนิดดี จึงได้ทดลองสร้างรอยสัมผัส Cr/p-Si เพื่อทดสอบว่าเป็นรอยสัมผัสชนิดใด โดยเงื่อนไขในการสปีดเตอร์ที่กำลังไฟฟ้า 100 W ความดันก๊าซอาร์กอน 1.5×10^{-2} mbar เวลาในการสปีดเตอร์ 30 min อุณหภูมิฐานรอง 25°C นำรอยสัมผัส Cr/p-Si ที่สร้างขึ้นมาทดสอบโดยระบบเครื่องมือวัด HP 4061A Semiconductor/component test system ของบริษัท Agilent แสดงในรูปที่ 4.7

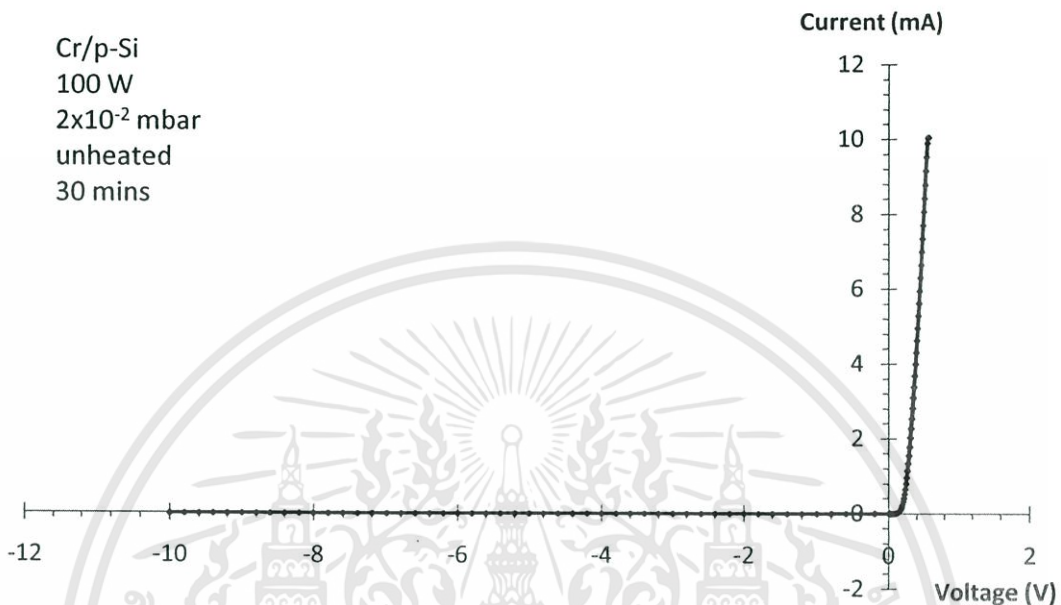


รูปที่ 4.7 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์กระแส - แรงดันรอยสัมผัส Cr/p-Si

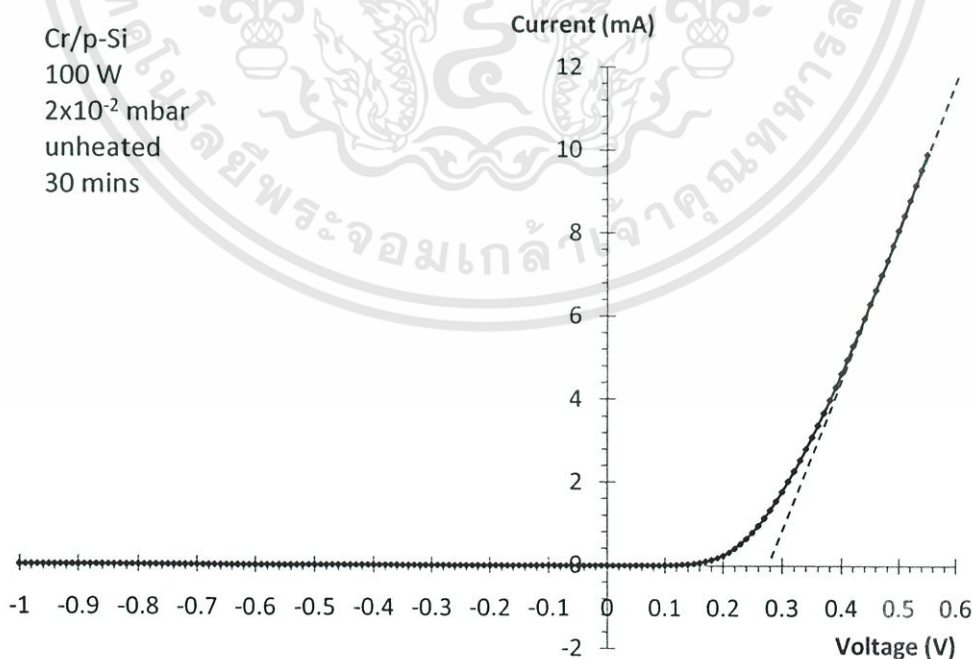
พบว่ารอยสัมผัส Cr/p-Si มีความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดันดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่ารอยสัมผัส Cr/p-Si เป็นรอยสัมผัสชนิดดี จากรูปที่ 4.9 สามารถหาค่าแรงดันภายในได้ 0.28 V และจากการหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตัวย้อนกลับ (J_0) ในรูปที่ 4.10 โดยแกนตั้งเป็นค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกระแสในแกน log หาค่า J_0 ได้ $4 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ นำค่าที่อ่านได้ไปคำนวณค่ากำลัง
ศักย์ช็อคติย์ที่ได้จากการทดลองด้วยสมการที่ 2.13 ได้ค่ากำลังศักย์ช็อคติย์ 0.64 V

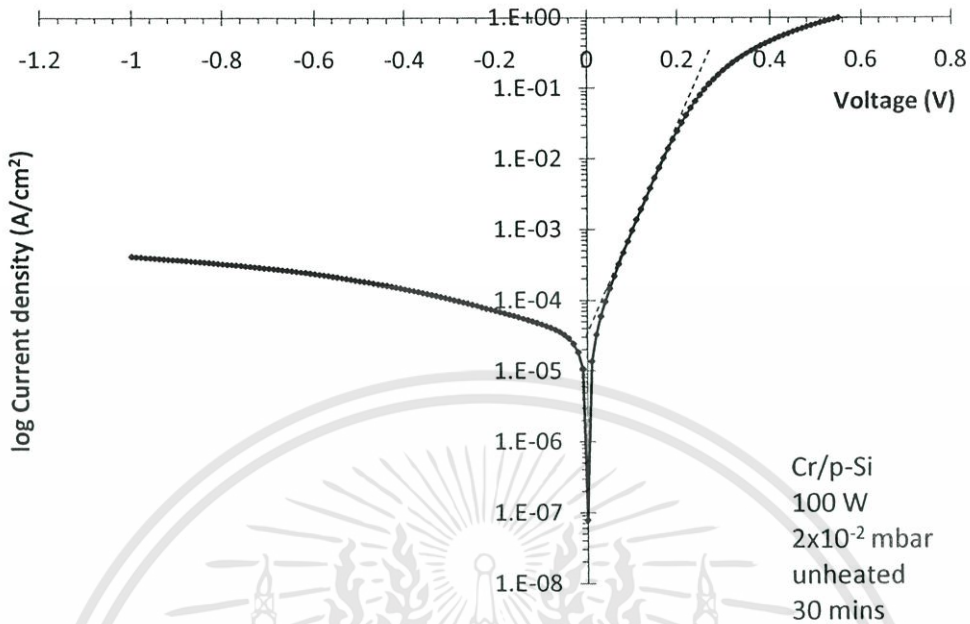


รูปที่ 4.8 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Cr/p-Si



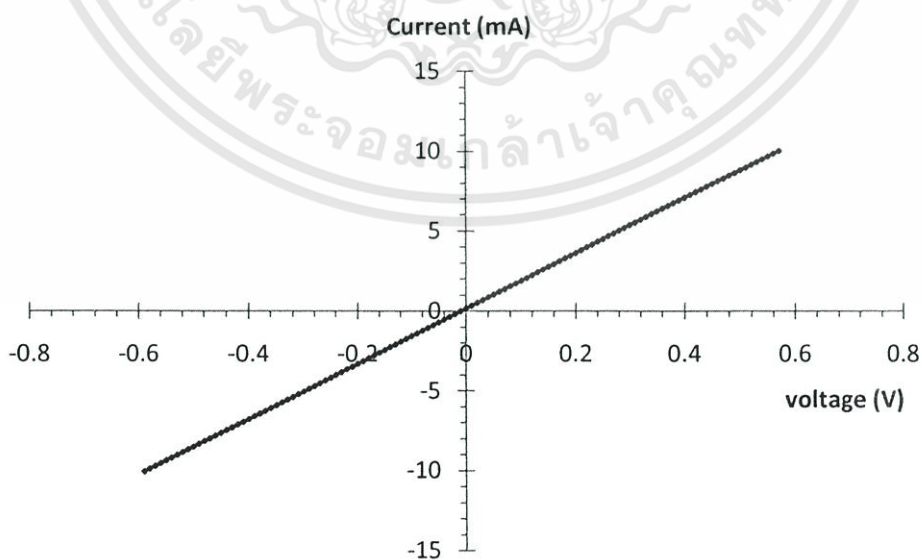
รูปที่ 4.9 การหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส Cr/p-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตซ์ย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส Cr/p-Si

จากผลการทดลองเบื้องต้นจะเห็นได้ว่ารอยสัมผัส Cr/p-Si มีค่ากระแสรั่วไหลที่มีค่าสูงเช่นเดียวกับรอยสัมผัส Cr/n-Si แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรอยสัมผัส Al/p-Si ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดันตามรูปที่ 4.11



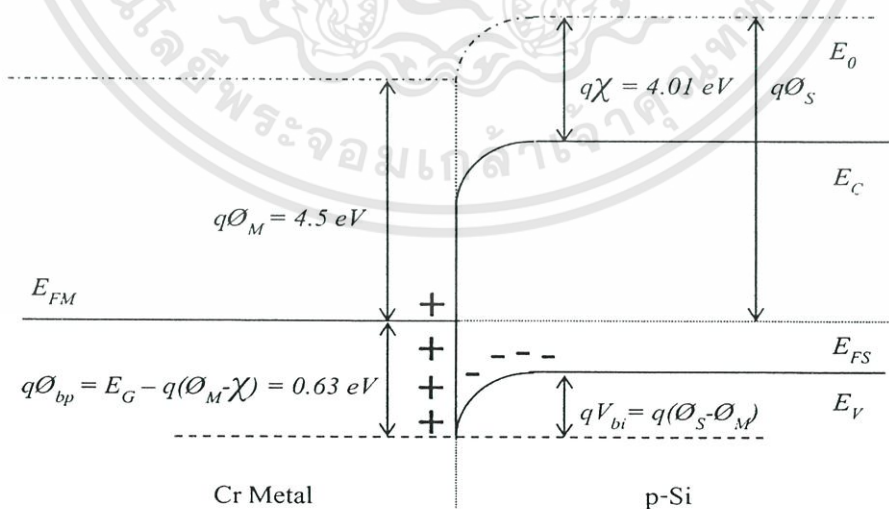
รูปที่ 4.11 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัส Al/p-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแสดงว่ารอยสัมผัส Al/p-Si ที่สร้างด้วยวิธีการระเหยสารในสุญญากาศแล้วชินเตอร์ด้วยความร้อนนั้นเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก จากการศึกษางานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นๆ [11] ในการที่จะสร้างให้รอยสัมผัส Al/p-Si สามารถเป็นรอยสัมผัสช็อคติย์ได้นั้น ต้องใช้กระบวนการเพิ่มเติมอีกหลายอย่าง เช่น การเพิ่มความสูงกำแพงศักย์จากชั้น barrier enhancement โดยใช้สารกึ่งตัวนำหรือฉนวนที่มีความกว้างของช่องว่างพลังงานกว้างกว่าของซิลิคอน เป็นต้น [26] ซึ่งกระบวนการสร้างเสียค่าใช้จ่ายสูงรวมถึงต้องการเครื่องมือที่มีความซับซ้อนไม่สอดคล้องกับการวิจัยที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

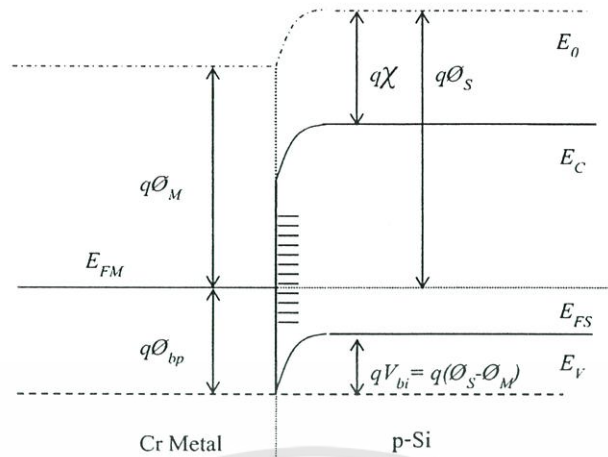
เมื่อพิจารณาในส่วนของความแตกต่างของโลหะทั้งสองชนิดเมื่อนำมาสร้างลงบน p-Si โลหะ Al นั้นมีกำแพงศักย์ช็อคติย์ $q\phi_{bp}$ ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการที่ 2.11 มีค่า 0.85 eV จะเห็นได้ว่ารอยสัมผัสมีค่ากำแพงศักย์ที่สูง จึงควรจะเป็นรอยสัมผัสช็อคติย์ [45] แต่จากการทดลองที่แสดงในรูป 4.11 แสดงให้เห็นว่ารอยสัมผัส Al/p-Si ในทางปฏิบัติมักเกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก [46] เนื่องจาก Al อยู่ในหมู่ III เมื่อได้รับความร้อนแล้วแพร่เข้าสู่ Si จะมีค่าระดับพลังงานผู้ให้จึงกลายเป็นสารเจือชนิดพี

ส่วนรอยสัมผัส Cr/p-Si มีกำแพงศักย์ช็อคติย์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี $q\phi_{bp} = E_g - q(\phi_M - \chi)$ มีค่า 0.63 eV แสดงในแถบพลังงานในรูปที่ 4.12 (ก)



รูปที่ 4.12 (ก) แถบพลังงานของรอยสัมผัส Cr/p-Si ในกรณีอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 (ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัส Cr/p-Si ในกรณีที่มีสถานะที่ผิว

ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อรอยสัมผัสในทางปฏิบัติคือสถานะผิว ซึ่งในกระบวนการสร้างขั้วโลหะ Cr ด้วยวิธีการสปัตเตอร์จะทำให้เกิดอนุภาคพลังงานสูงเช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งเข้าชนผิวหน้าแผ่นซิลิคอน ทำให้เกิดจุดบกพร่องเสียหายหรือเกิดความร้อนเหนียวทำให้เกิดออกไซด์ต่างๆ ที่รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ก่อให้เกิดสถานะผิว ทำให้รอยสัมผัสไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ [16,17,27,47] โดยสถานะผิวก่อให้เกิดการโค้งงอมากขึ้นหรือกำแพงศักย์แคบลงทำให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ง่ายขึ้นกำแพงศักย์จึงคู่ด้ายกับมีค่าน้อยลง [16,22,32,48] ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข)

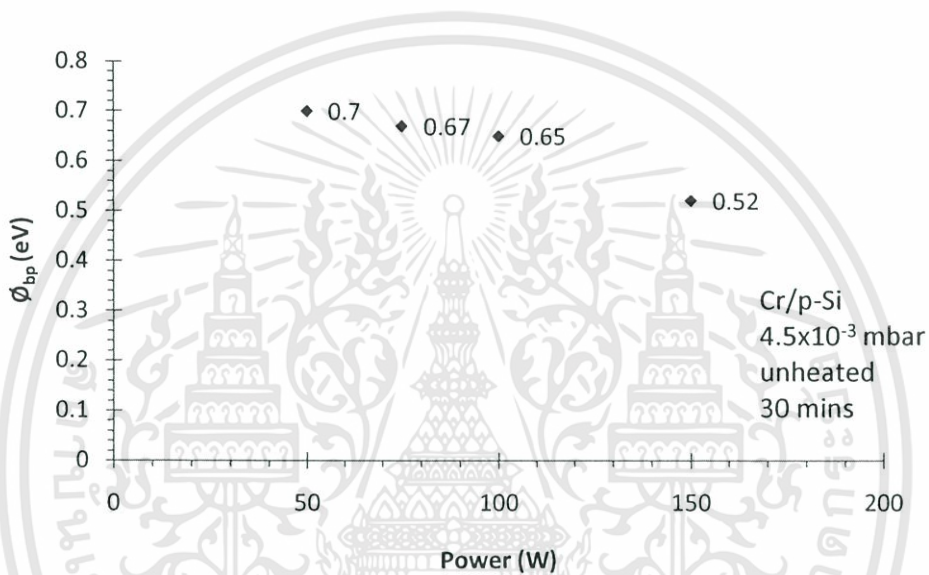
ดังนั้นเมื่อโลหะ Cr สามารถสร้างให้เกิดเป็นรอยสัมผัสชนิดที่ดีทั้งใน n-Si และ p-Si ได้ด้วยกระบวนการที่ง่ายไม่ซับซ้อน นับว่าเป็นข้อได้เปรียบของโลหะชนิดนี้ในการนำไปใช้เป็นขั้วโลหะของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM แต่เนื่องจากกระแสรั่วไหลยังมีค่าสูง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงกระบวนการสร้างขั้วโลหะ Cr เพื่อให้สามารถควบคุมการเกิดสถานะที่ผิวและความสูงกำแพงศักย์จนได้ค่ากระแสรั่วไหลที่ต่ำจนเป็นที่พอใจ ซึ่งจะได้ศึกษาในหัวข้อถัดไป

4.2 การทดลองการลดกระแสรั่วจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการสปัตเตอร์

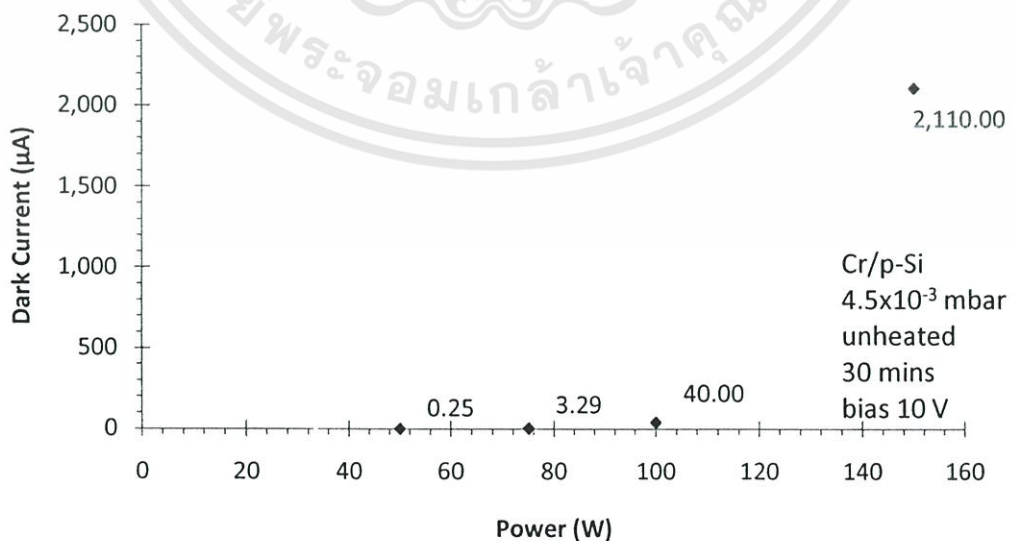
ในการทดลองนี้จะแสดงผลการทดลองเฉพาะ Cr/p-Si เท่านั้น อย่างไรก็ตาม จากการทดลองรอยสัมผัสระหว่าง Cr/n-Si ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องในทำนองเดียวกันกับรอยสัมผัส Cr/p-Si

4.2.1 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในการสปีดเตอร์

จากตอนต้นของการทดลองได้ใช้กำลังในการสปีดเตอร์ที่ 100 W แล้วพบว่ามีการกระแสรั่วไหล ประมาณ 70 – 100 μA ใน p-Si ส่วนใน n-Si มีค่ากระแสรั่วไหลประมาณ 200 – 300 μA ซึ่งยังเป็นค่าที่สูง จึงได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าที่ให้แก่สปีดเตอร์เป็น 50, 75, 100 และ 150 W พบว่า ค่ากำแพงศักย์มีการเปลี่ยนแปลงแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์กำแพงศักย์ขั้วต่อเทียบกับกำลังการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลกับกำลังในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si

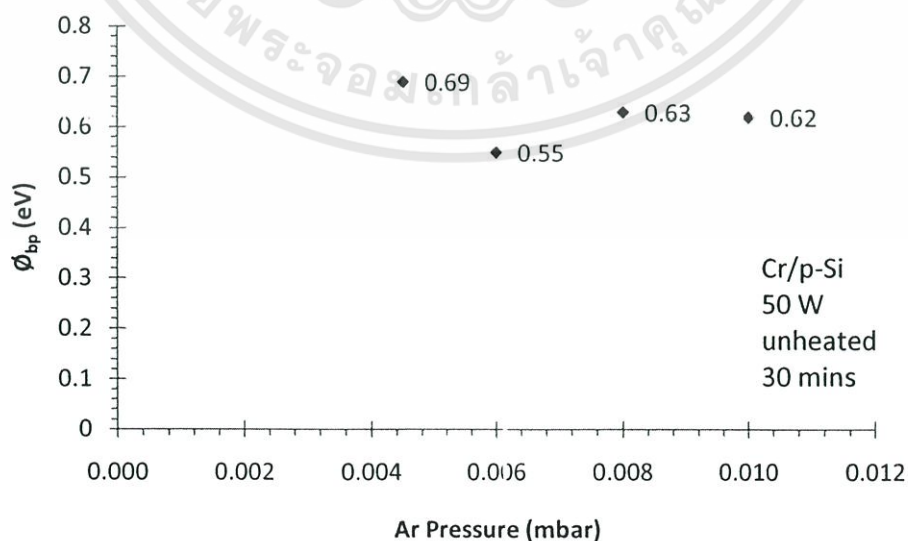
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กำลังในการสเปคเตอร์ยังมีค่ามากยิ่งทำให้ค่าแกมมาแกมมีค่าลดต่ำลง นั้นเป็นเพราะเมื่อกำลังในการสเปคเตอร์มากขึ้น อิเล็กตรอนทุติยภูมิได้รับกำลังมากขึ้นในการวิ่งเข้าชนขั้วแอโนดซึ่งเป็นฐานรองเวเฟอร์ และจะเกิดบอมบ์บาร์ดที่ผิวหน้า Si แรงขึ้น [22,32] ส่งผลให้มีสถานะผิวเกิดมากขึ้นค่าแกมมาแกมมีค่าลดลงทำให้กระแสรั่วเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่ากระแสรั่วที่กำลังในการสเปคเตอร์ 50 W มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่า 0.25 μA

ดังนั้นในการเลือกกำลังในการสเปคเตอร์ควรเลือกค่าที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในแต่ละระบบในวิทยานิพนธ์นี้เลือกที่ 50 W เพราะเป็นค่ากำลังที่น้อยที่สุดที่ยังทำให้เกิดพลาสมาและพลาสมาที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพที่ดีกล่าวคือไม่เกิดการกระพริบของพลาสมา นอกจากนี้ยังมีค่าความหนาที่ต้องคำนึงถึงซึ่งจะได้กล่าวถึงในการศึกษาเกี่ยวกับความหนาที่เหมาะสมต่อไป

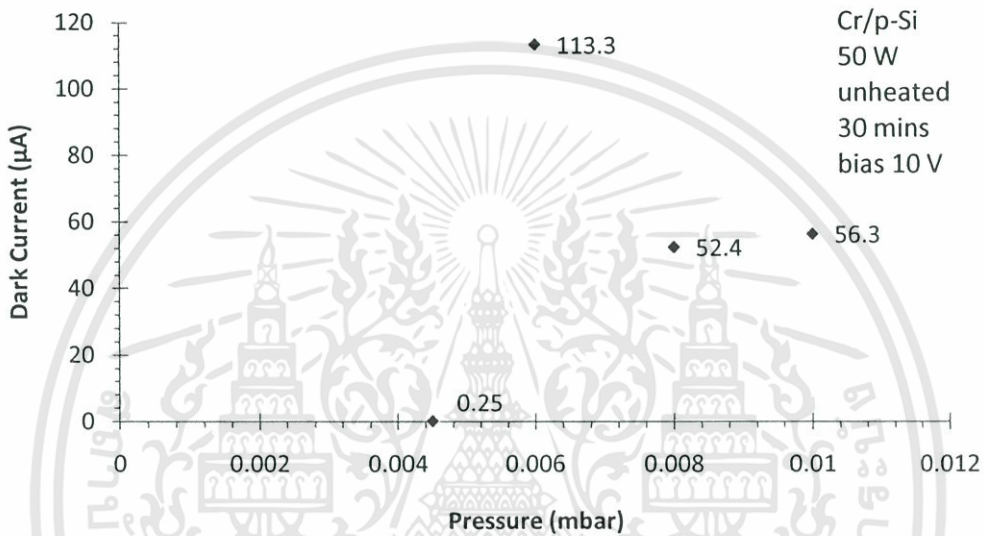
4.2.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสเปคเตอร์

เมื่อทราบค่ากำลังที่เหมาะสมแล้วต่อไปจึงจะคงที่ค่ากำลังไว้ที่ 50 W ในส่วนของความดันในตอนต้นของการทดลองได้ใช้ค่าความดันเป็น 2×10^{-2} mbar แล้วพบว่าค่ากระแสรั่วมีค่าสูง จึงทำการหาความดันก๊าซอาร์กอนที่เหมาะสม โดยทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความดันเป็น 4.5×10^{-3} , 6×10^{-3} , 8×10^{-3} และ 1×10^{-2} mbar ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ค่าแกมมาแกมมีค่ากับความดันก๊าซอาร์กอนของรอยสัมผัส Cr/p-Si เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยพบว่าเมื่อความดันก๊าซอาร์กอนมีค่าต่ำลงส่งผลให้ค่ากำลังศักย์มีค่าสูงขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากปริมาณก๊าซอาร์กอนที่น้อยลงทำให้มีจำนวนอะตอมของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งเข้าชนข้ออาร์กอนหรือผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์น้อยลงตามไปด้วย [8,51] ทำให้ปริมาณสถานะที่ผิวมีค่าน้อยลงด้วย ส่งผลให้ค่ากระแสรั่วไหลจึงมีค่าน้อยลงด้วยที่ค่าความดันก๊าซอาร์กอนมีค่าน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลกับความดันก๊าซอาร์กอนในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส

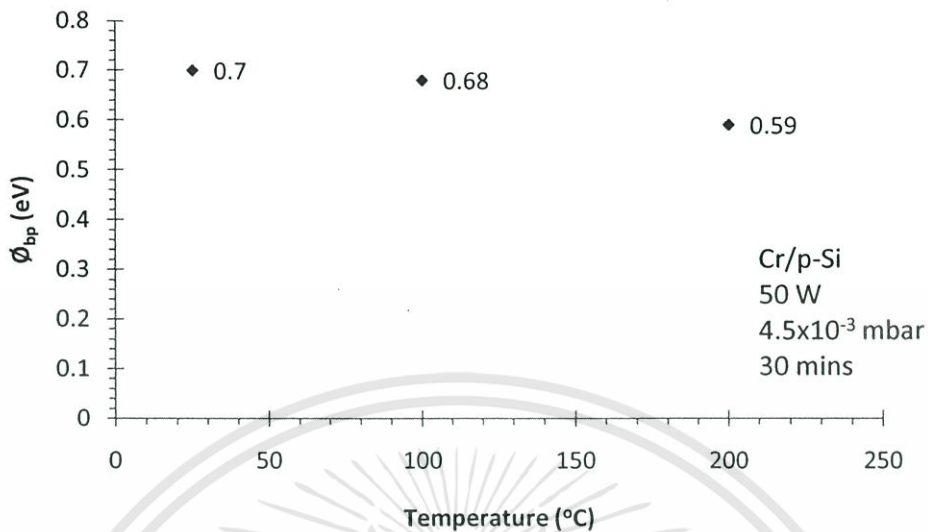
Cr/p-Si

ดังนั้นในการเลือกค่าความดันที่เหมาะสมควรเลือกค่าความดันก๊าซอาร์กอนที่มีค่าน้อย แต่ไม่น้อยเกินไปจนทำให้ไม่สามารถสร้างพลาสมาได้หรือพลาสมาที่เกิดขึ้นไม่มีเสถียรภาพและใช้กระแสในการสร้างสูงเกินไป ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกที่ความดันก๊าซอาร์กอนที่ 4.5×10^{-3} mbar ทำให้กระแสรั่วไหลที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.25 µA

4.2.3 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์

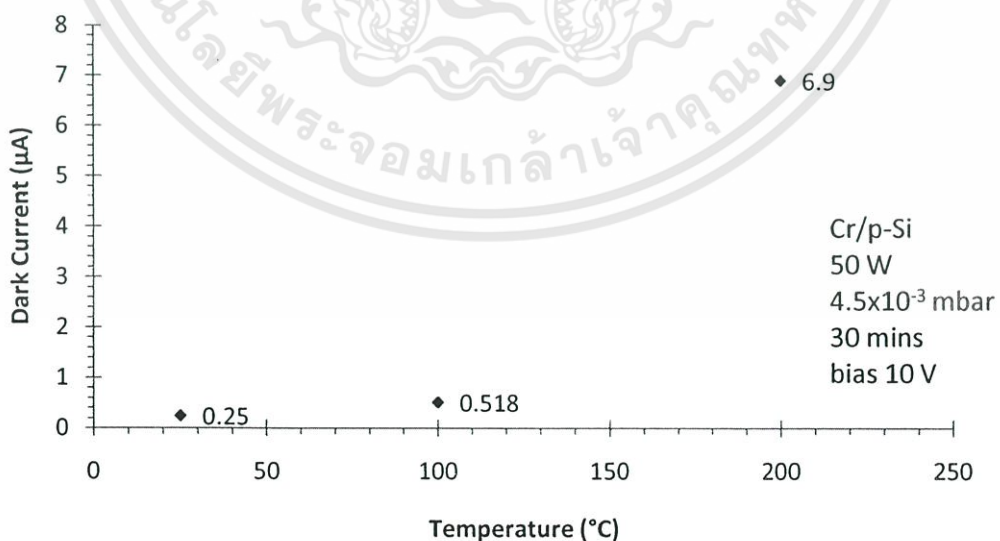
เมื่อทราบว่ากำลังและความดันที่เหมาะสมในการสปีดเตอร์คือ 50 W และ 4.5×10^{-3} mbar ตามลำดับต่อไปจึงได้ทำการหาค่าอุณหภูมิฐานรองที่เหมาะสมในการสปีดเตอร์โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะกำลังทำการสร้างฟิล์มบาง Cr โดยทำการทดลองที่ค่า 25, 100 และ 200 °C พบว่าค่ากำลังศักย์ขั้วต่อก็ยมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ค่าแก่งศักย์ช็อคติย์กับอุณหภูมิฐานรองของรอยสัมผัส Cr/p-Si

จากการที่ค่าแก่งศักย์ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฐานรอง เกิดมาจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์ ความร้อนที่เพิ่มขึ้นสามารถเหนี่ยวนำให้ออกซิเจนที่ยังตกค้างอยู่ในระบบเกิดเป็นชั้นออกไซด์บางๆ และอะตอมของ Cr ยังมีพลังงานไม่มากพอที่จะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ [22] ชั้นที่รอยสัมผัสจึงทำให้เกิดสถานะที่ผิวมากขึ้นส่งผลให้มีกระแสรั่วสูงขึ้นด้วย แสดงในรูปที่ 4.18



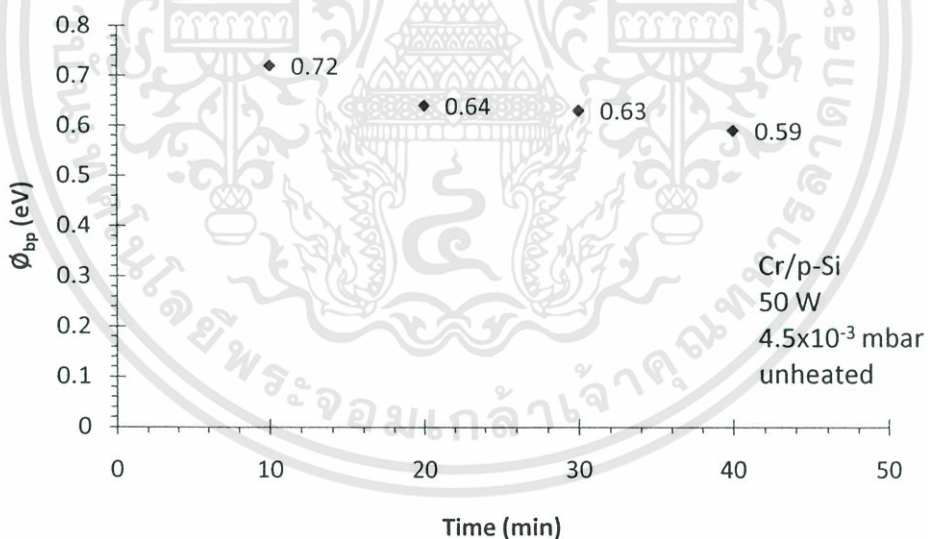
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลกับอุณหภูมิฐานรองในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเลือกค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสปัตเตอร์ควรมีค่าน้อยที่สุด [30] เพื่อลดการเกิดออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์และอุณหภูมิการสร้างที่มีค่าน้อยสามารถช่วยควบคุมปริมาณออกซิเจนที่ตกค้างอยู่ในระบบหรือการเกิดเอาท์แก๊สภายในแชมเบอร์ที่สามารถออกมาเกิดเป็นออกไซด์ได้เช่นกัน [31] รอยสัมผัสที่ได้จะมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกค่าอุณหภูมิ 25 °C หรืออุณหภูมิห้องเป็นอุณหภูมิฐานรองในการสปัตเตอร์ โดยมีค่ากระแสรั่วไหล 0.25 μA

4.2.4 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสปัตเตอร์

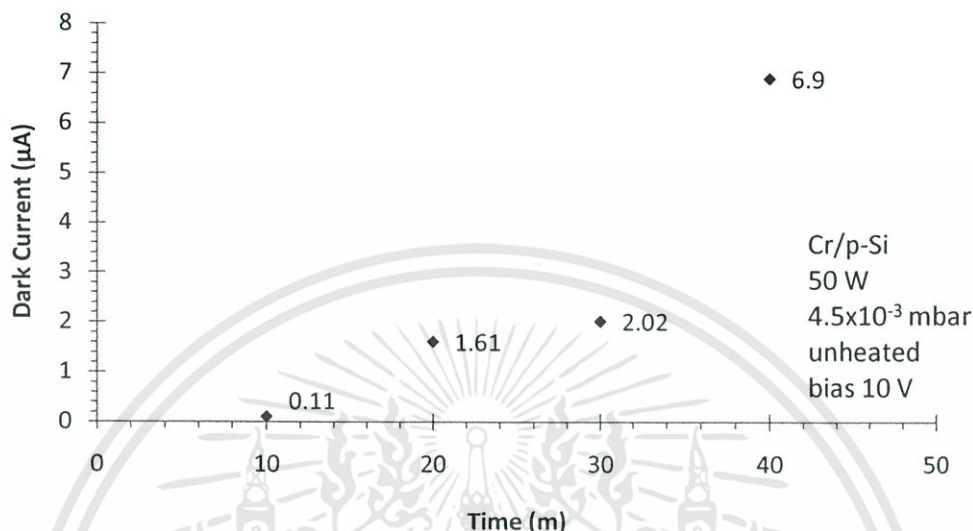
หลังจากที่ทราบตัวแปรที่เหมาะสมทั้งกำลังความดันและอุณหภูมิฐานรองแล้วต่อไปจะเป็นการหาเวลาในการสปัตเตอร์ที่เหมาะสม โดยในช่วงแรกของการทดลองได้ทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 30 นาที เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์เป็น 10, 20, 30 และ 40 นาที พบว่ามีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ค่าแรงศักย์ช็อคติ์กับเวลาในการสปัตเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสปัตเตอร์ส่งผลให้ค่าค่าแรงศักย์มีค่าลดลงและส่งผลให้กระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.20 เป็นเพราะว่าการเพิ่มเวลาในการสปัตเตอร์ทำให้การบอมบ์บาร์ดเนื่องจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นมีโอกาสมาก

ชั้นที่วิ่งเข้าชนฐานรองเวเฟอร์เกิดเป็นสถานะที่ผิวได้หรือกล่าวได้ว่าเวเฟอร์ถูกอบบ่มบาร์ดนานขึ้น ดังนั้นกระแสจึงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการสปีดเตอร์ [22,32]



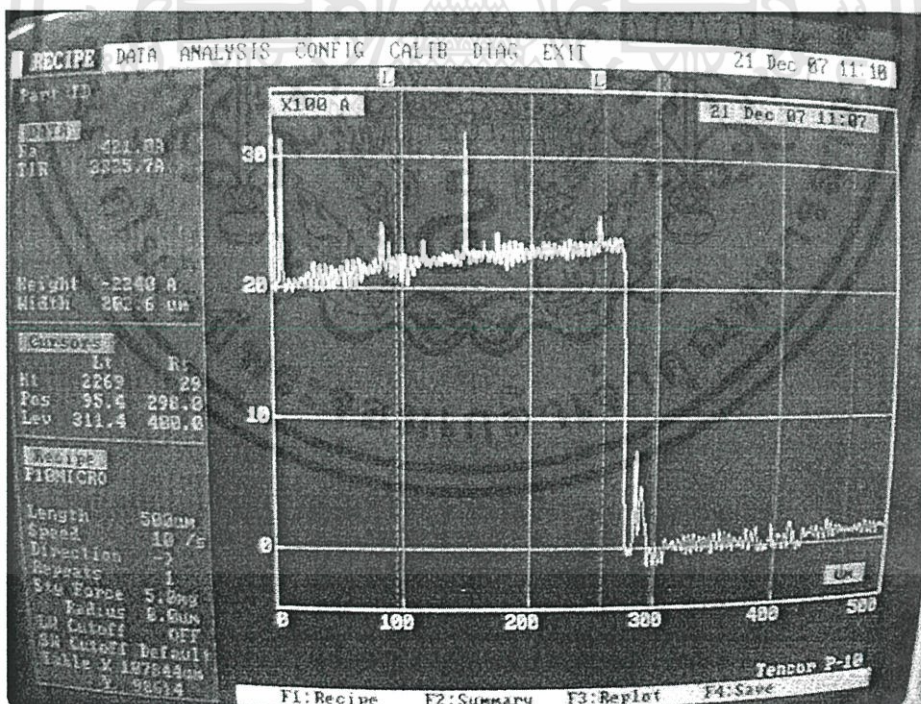
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์กระแสรั่วไหลกับเวลาในการสปีดเตอร์ของรอยสัมผัส Cr/p-Si

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลสำหรับค่าเวลาที่เหมาะสมในการสปีดเตอร์ควรจะเป็นค่า 10 นาที เนื่องจากมีค่ากำลังแสงสูงและกระแสรั่วไหลน้อยที่สุด แต่เนื่องจากต้องพิจารณาความหนาของชั้นซิลิคอนบางเกินไปจะทำให้แสงสามารถลอดผ่านชั้นซิลิคอนได้ทำให้การวิเคราะห์สเปกตรัมในหนึ่งมิติผิดพลาดไปได้ [33] ชั้นซิลิคอนจึงต้องมีค่าความหนาพอที่จะกันแสงได้ จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการสปีดเตอร์ที่มีผลต่อความหนาในหัวข้อถัดไปเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปสร้างโฟโตไดโอด MSM ที่มี Cr เป็นชั้นซิลิคอน

จากการศึกษาการลดกระแสรั่วจากการเปลี่ยนแปลงเทคนิคในการสปีดเตอร์ สามารถสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นชั้นซิลิคอน Cr ได้คือ ใช้กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน 4.5×10^{-3} mbar โดยไม่ต้องทำการให้ความร้อนแก่ฐานรอง ใช้เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที โดยสามารถลดกระแสรั่วใน Cr/n-Si/Cr ได้ 435 เท่า และเมื่อนำเงื่อนไขเดียวกันนี้ไปสร้าง Cr/p-Si/Cr สามารถลดกระแสรั่วลงได้ 428 เท่า ดังแสดงในการทดลองหัวข้อที่ 4.5.1.1 และหัวข้อที่ 4.5.2.1 ตามลำดับ

4.3. การทดสอบการวัดความหนาของฟิล์มบาง Cr ด้วย Surface profiler และการทดสอบอัตราการกัดของน้ำยากัด Cr

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยวิธีการจับเวลาในการกัดฟิล์มบาง Cr จากสารละลายที่ทราบอัตราการกัด เพื่อความแม่นยำจึงต้องทำการสอบเทียบน้ำยากัดกับเทคนิคการวัดที่มีความแม่นยำสูง โดยน้ำยากัด Cr เป็นสารละลาย $(\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6) + \text{HClO}_4 + \text{DI}$ ด้วยอัตราส่วน 50 : 13 : 220 ซึ่งมีอัตราการกัด $1,000 \text{ \AA}/\text{min}$ ที่อุณหภูมิห้อง [34] นำฟิล์มบาง Cr ที่สปีดเตอร์ลงบนกระจกในเงื่อนไข 100 W ความดันก๊าซอาร์กอน $2 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที โดยไม่ได้ให้ความร้อนแก่ฐานรอง จากนั้นนำฟิล์มบางที่สร้างมาผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน แล้วนำมาทดสอบการกัดด้วยน้ำยากัด Cr พบว่าใช้เวลาในการกัด 2 นาที 15 วินาที ดังนั้นค่าความหนาที่ได้จากเทคนิคการกัดด้วยน้ำยามีค่าประมาณ $2,250 \text{ \AA}$ จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้จากข้างต้นไปทดสอบหาค่าความหนาด้วยเครื่อง Surface profiler ของบริษัท TENCOR รุ่น P-10



รูปที่ 4.21 การทดสอบวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเครื่อง Surface profiler

จากการทดสอบการวัดความหนาด้วยเทคนิค Surface profiler ในรูปที่ 4.21 พบว่ามีค่าความ

หนา $2,240 \text{ \AA}$ จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากเทคนิคการวัดทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

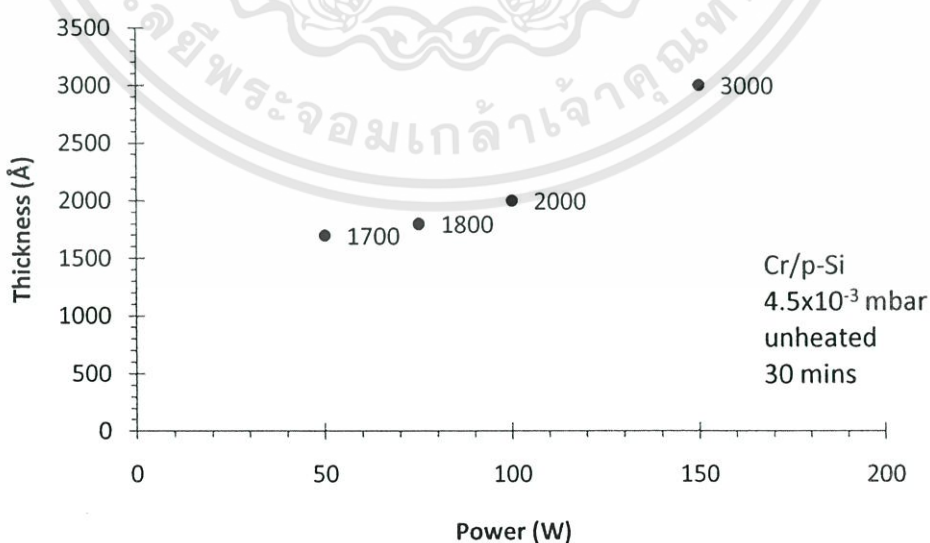
สามารถใช้วิธีการวัดความหนาของฟิล์มบาง Cr ด้วยการจับเวลาในการกัดได้และมีความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ

4.4 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการสเป็คเตอร์

เมื่อได้วิธีการวัดค่าความหนาที่มีความแม่นยำแล้วต่อไปจะทำการทดลองหาความหนาของฟิล์มบาง Cr ที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการสเป็คเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าความหนาและเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างขั้วโลหะของโฟโตไดโอด MSM โดยค่าความหนาที่เหมาะสมนั้นจะต้องมีความหนาเพียงพอที่จะสามารถกันแสงไม่ให้ผ่านลงไปสู่ได้ขั้วโลหะได้ โดยปกติแล้วโลหะตัวนำที่มีค่าความหนาตั้งแต่ 1000 Å ขึ้นไปจะสามารถกันแสงได้โดยสมบูรณ์ [35]

4.4.1 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังในการสเป็คเตอร์

เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่ากำลังในการสเป็คเตอร์โดยใช้กำลัง 50, 75, 100 และ 150 W ส่วนความดันก๊าซอาร์กอนมีค่า 4.5×10^{-3} mbar โดยไม่ได้ให้ความร้อนแก่ฐานรอง พบว่ามีความหนาเปลี่ยนแปลงไปตามรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ความหนาของฟิล์มบาง Cr กับกำลังในการสเป็คเตอร์

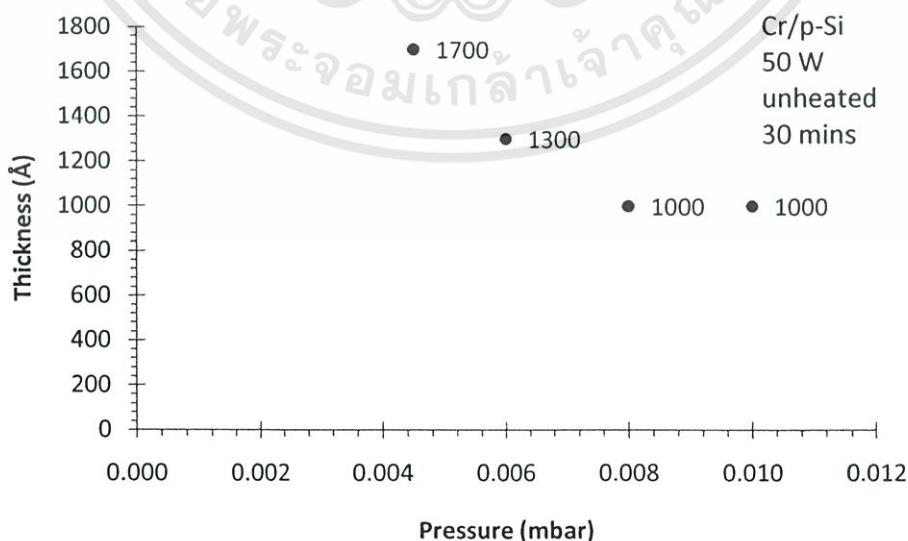
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่ากำลังในการสเปคเตอร์ 50, 75, 100 และ 150 W มีค่าความหนา 1,700 Å, 1,800 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาเพิ่มขึ้นตามค่ากำลังในการสเปคเตอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อกำลังมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดฟิล์มบางสูงขึ้น เพราะพลังงานจลน์ที่ Ar^+ ได้รับมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อ Ar^+ ที่มีพลังงานจลน์สูงวิ่งเข้าชนเป้าโครเมียมจึงทำให้โครเมียมหลุดออกมาจากเป้าได้มากขึ้น ดังนั้นความหนาของชั้น Cr จึงเพิ่มมากขึ้น [15,51,52]

แต่ปกติแล้วค่าความหนาของขั้วโลหะตัวนำที่สามารถกันแสงไม่ให้ผ่านขั้วโลหะจะมีค่าตั้งแต่ 1,000 Å ขึ้นไป เมื่อพิจารณาผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 ที่พบว่าขั้วโลหะที่สร้างที่กำลังในการสเปคเตอร์ 50 W มีค่ากระแสรั่วไหลต่ำที่สุด และมีความหนาของขั้วโลหะมากกว่า 1000 Å ดังนั้นค่ากำลังในการสเปคเตอร์ที่ 50 W จึงสามารถใช้ในการสร้างขั้วโลหะของโพโตไดโอดได้อย่างเหมาะสม

4.4.2 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซอาร์กอนในการสเปคเตอร์

ตามข้อสรุปในหัวข้อที่ผ่านมาได้ใช้ค่ากำลังในการสเปคเตอร์ที่ 50 W จากนั้นจึงทดลองสร้างขั้วโลหะโดยเปลี่ยนแปลงค่าความดันก๊าซอาร์กอนเป็น 4.5×10^{-3} , 6×10^{-3} , 8×10^{-3} และ 1×10^{-2} mbar ทำการสเปคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที โดยไม่ได้ให้ความร้อนแก่ฐานรอง แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มบาง Cr ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ความหนาของฟิล์มบาง Cr กับความดันก๊าซอาร์กอนในการสเปคเตอร์

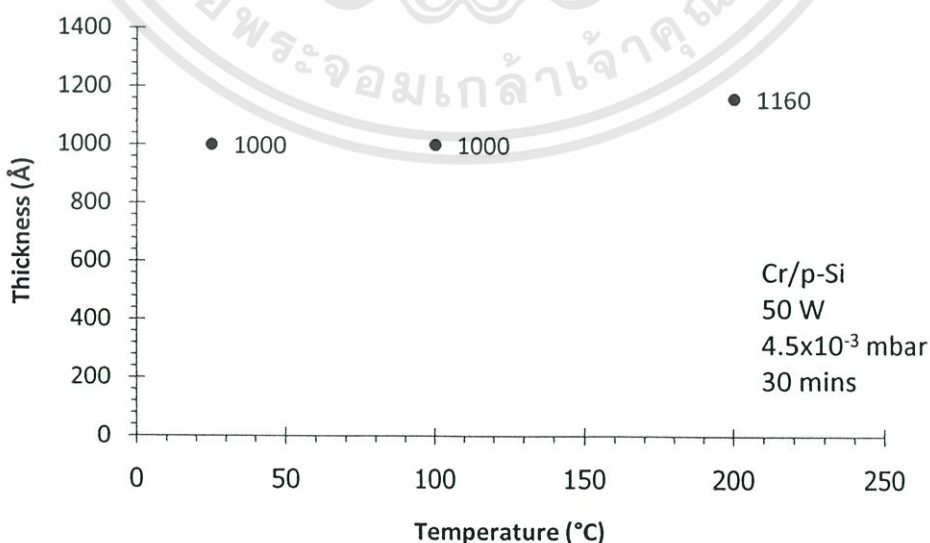
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าที่ความดัน 4.5×10^{-3} , 6×10^{-3} , 8×10^{-3} และ 1×10^{-2} mbar มีค่าความหนา 1,700 Å, 1,300 Å, 1,000 Å และ 1,000 Å ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความหนาลดลงเมื่อเพิ่มค่าความดันก๊าซอาร์กอน เนื่องจากที่ความดันสูงระยะเฉลี่ยปลอดการชน (mean free path) ของ Ar^+ จะลดลง อันเนื่องมาจากโมเลกุลของ Ar^+ จะเกิดการชนกันเอง ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ ก่อนที่จะมีโอกาสเข้าชนกับเป้าโครเมียมจึงทำให้อัตราการเกิดของโครเมียมลดลง [8,15,31,50-52] และการสร้างขั้วโลหะที่ความดันของก๊าซอาร์กอนมีค่าต่ำยังช่วยให้ใช้เวลาน้อยลงได้อีกด้วย ทำให้ช่วยลดเวลาในการที่ผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ถูกบอมบาร์ด ซึ่งช่วยให้กระแสรั่วมีค่าน้อยลงได้อีกด้วย [32]

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.2 ที่พบว่าขั้วโลหะที่สร้างที่ความดัน 4.5×10^{-3} mbar มีค่ากระแสรั่วไหลต่ำที่สุด และมีค่าความหนามากกว่า 1,000 Å ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ความดัน 4.5×10^{-3} mbar ในการสร้างขั้วโลหะของโฟโตไดโอดได้อย่างเหมาะสม

4.4.3 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองในการสปัตเตอร์

เมื่อทำการสปัตเตอร์ที่กำลังในการสปัตเตอร์ 50 W และความดันก๊าซอาร์กอนเป็น 4.5×10^{-3} mbar เวลาในการสปัตเตอร์ 30 นาที ทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองเป็น 25, 100 และ 200 °C แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มบาง Cr พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 4.24



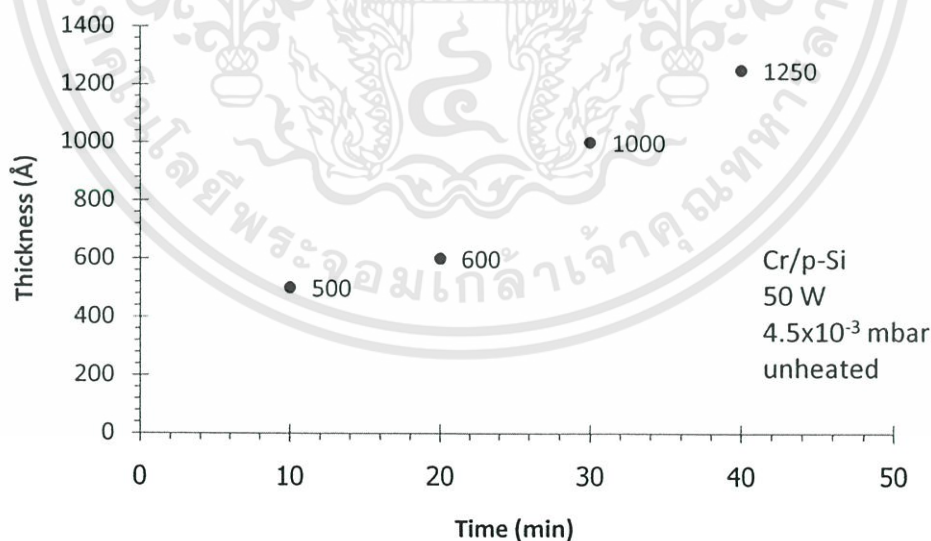
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ความหนาของฟิล์มบาง Cr กับอุณหภูมิฐานรองในการสปัตเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าอุณหภูมิฐานรองเป็น 25, 100 และ 200 °C มีค่าความหนา 1,000 Å, 1,000 Å และ 1,166 Å ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความหนามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฐานรอง [36,37] ปกติแล้วการให้อุณหภูมิฐานรองทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโลหะได้ดีขึ้น ขนาดเกรนของฟิล์มบางขยายขนาดขึ้น ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากหัวข้อที่ 4.2.3 ที่พบว่าการสเปคเตอร์โดยไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรองหรือที่อุณหภูมิห้องมีค่ากระแสรั่วไหลน้อยที่สุด และมีค่าความหนา 1,000 Å จึงสามารถกันแสงได้ ทำให้สามารถทำการสเปคเตอร์โดยไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรอง ในการสร้างขั้วโลหะของโฟโตไดโอดได้

4.4.4 การทดลองลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการสเปคเตอร์

เมื่อทำการสเปคเตอร์ที่กำลังในการสเปคเตอร์ 50 W และความดันก๊าซอาร์กอนเป็น 4.5×10^{-3} mbar โดยไม่ได้ให้ความร้อนแก่ฐานรอง ทดลองเปลี่ยนแปลงเวลาในการสเปคเตอร์ 30 นาที แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มบาง Cr พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ความหนาของฟิล์มบาง Cr กับเวลาในการสเปคเตอร์

ที่เวลาในการสเปคเตอร์ 10, 20, 30 และ 40 นาที มีค่าความหนา 500 Å, 600 Å, 1,000 Å

และ 1,250 Å จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการสเปคเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาเพิ่มขึ้นจำนวนอะตอมที่มาเกาะกันเป็นฟิล์มบางโครเมียมบนแผ่นเวเฟอร์จึงมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย [37]

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.4 ที่พบว่าชั้นโลหะที่สร้างในเวลา 10 นาที มีค่ากระแสรั่วไหลต่ำที่สุด แต่เนื่องจากค่าความหนา มีค่าน้อยกว่า 1,000 Å จึงทำให้เวลาในการสร้าง 10 นาทีเป็นตัวเลือกที่ยังไม่เหมาะสม สำหรับค่าที่เหมาะสมได้แก่การสร้างที่เวลา 30 นาที ซึ่งผลการทดลองกระแสรั่วที่ได้มีค่ามากกว่าที่เวลา 10 นาทีแต่ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในระดับของ 10^{-6} A และที่เวลาในการสร้าง 30 นาที มีค่าความหนา 1,000 Å ทำให้สามารถกันแสงให้ตกกระทบเฉพาะบริเวณรับแสงไม่เกิดกระแสแสงที่มาจากใต้ชั้นโลหะ ซึ่งในการวิเคราะห์สมการกระแสในหนึ่งมิติอย่างง่าย เพื่อที่จะตอบคำถามเรื่องระยะเวลาแพร่ของพาหะในเบื้องต้น กระแสแสงที่มาจากใต้ชั้นโลหะจึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณได้

จากการศึกษาลักษณะสมบัติความหนาของฟิล์มบางโครเมียมเมื่อเปลี่ยนแปลงเทคนิคในการสเปคเตอร์ สามารถสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นชั้นโลหะ Cr ได้คือ ใช้กำลังในการสเปคเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน 4.5×10^{-3} mbar โดยไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรอง ใช้เวลาในการสเปคเตอร์ 30 นาที โดยให้ความหนาของชั้นโลหะเพียงพอที่จะสามารถกันแสงได้

4.5 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้ Cr เป็นชั้นโลหะ

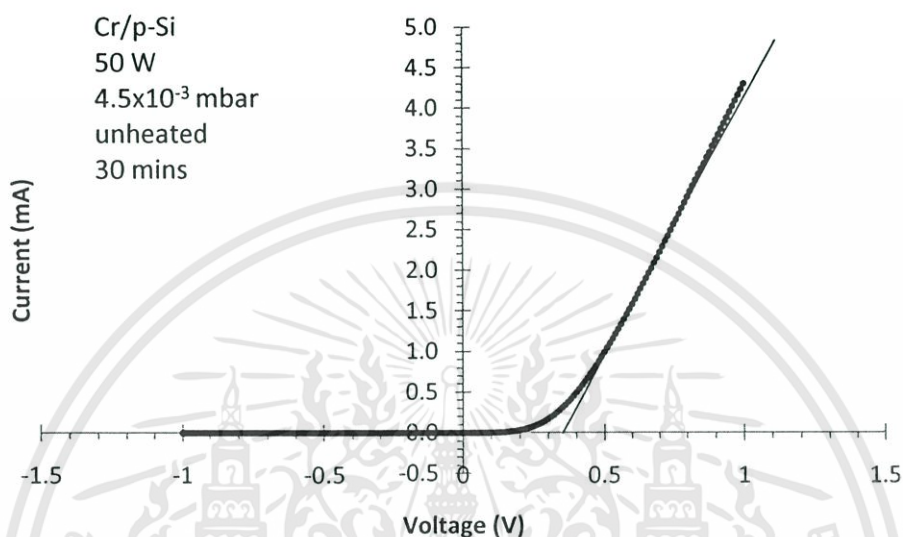
เมื่อทราบค่ากำลัง ความดันก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิฐานรองและเวลาในการสเปคเตอร์ที่มีผลต่อรอยสัมผัสสามารถลดค่ากระแสรั่วได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2 รวมถึงมีค่าความหนาของ Cr ที่เหมาะสมจากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.4 โดยใช้กำลังในการสเปคเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน 4.5×10^{-3} mbar โดยไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรอง ใช้เวลาในการสเปคเตอร์ 30 นาที จึงนำเงื่อนไขดังกล่าวมาทดลองสร้างเป็นชั้นโลหะของโฟโตไดโอด MSM โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ซึ่งต่อไปจากนี้จะใช้เงื่อนไขนี้ในการทำการทดลองต่อไป

4.5.1 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr

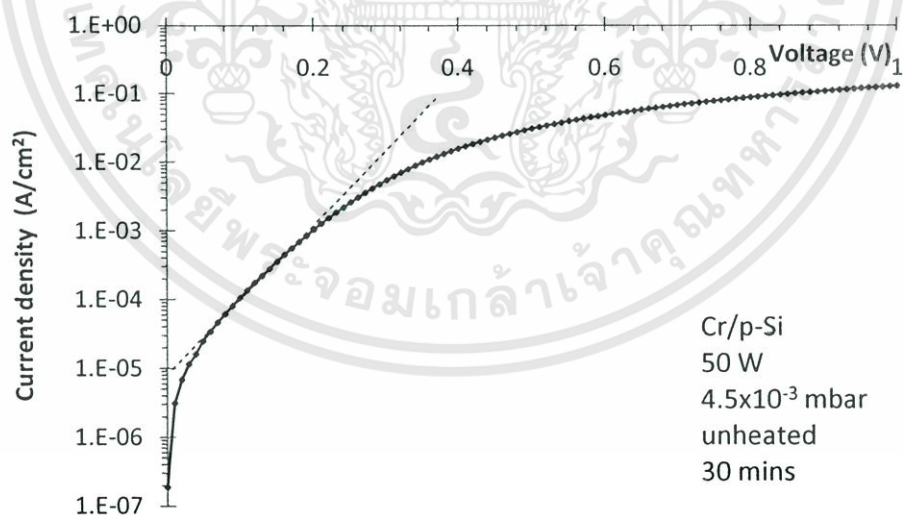
เมื่อนำเทคนิคในการลดกระแสรั่วและค่าความหนาของ Cr ที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.4 ตามลำดับ มาสร้างเป็นโฟโตไดโอดชนิด Cr/n-Si/Cr และนำไปวัดลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติโดยระบบเครื่องมือวัด HP 4061A Semiconductor/component test system ของบริษัท Agilent ตามรูปที่ 4.1 โดยลักษณะสมบัติทางกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสซีลซ็อกทิกซ์ Cr/n-Si มีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสซีลซ็อกทิกซ์ Cr/n-Si



รูปที่ 4.27 การหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตัวย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส Cr/n-Si

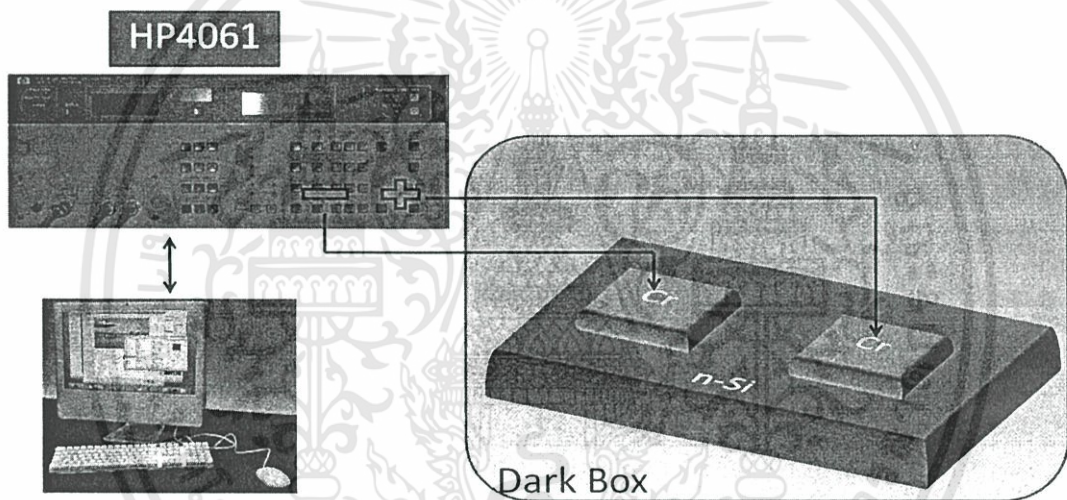
สามารถหาค่าแรงดันภายในได้ 0.35 V และจากการหาค่ากระแสรั่วไหลอิมิตัวในขณะ

แรงดันเป็นศูนย์ตามรูปที่ 4.27 ค่า J_0 มีค่า 9×10^{-6} A/cm² และจากสมการที่ 2.8 สามารถหาค่าค่าแพน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ช็อคติย์ได้ 0.71 V จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่ากำแพงศักย์ช็อคติย์ของรอยสัมผัส Cr/n-Si มีค่าสูงขึ้น จากเดิมที่มีค่า 0.49 V ซึ่งยังมีค่าต่ำและกระแสรั่วไหลสูง แต่จากการปรับปรุงเทคนิคในการสปีดเตอร์สามารถเพิ่มความสูงกำแพงศักย์และลดกระแสรั่วลงได้

4.5.1.1 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ขณะไม่ได้รับแสง

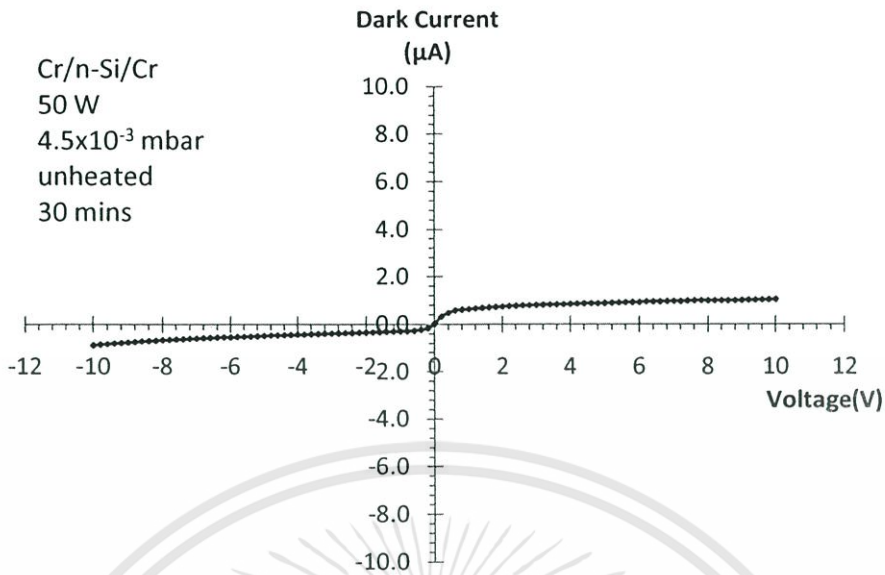
นำโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ที่สร้างมาวัดลักษณะสมบัติในขณะไม่ได้รับแสงโดยระบบเครื่องมือวัด HP 4061A Semiconductor/component test system ของบริษัท Agilent ตามรูปที่ 4.28



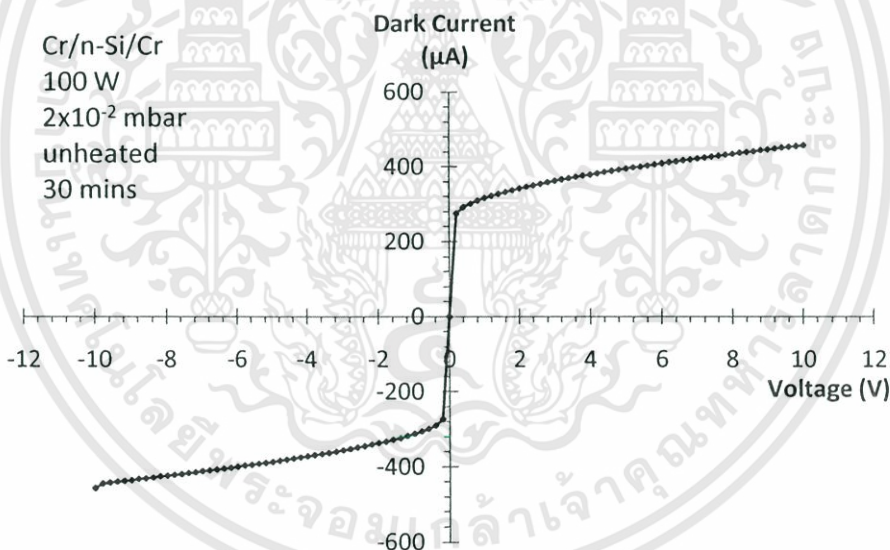
รูปที่ 4.28 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr
ในขณะไม่ได้รับแสง

จากผลการทดลองรูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสงแสดงให้เห็นว่าค่ากระแสรั่วไหลของ Cr/n-Si/Cr ที่ผ่านการปรับปรุงเงื่อนไขในการสปีดเตอร์มีค่า $1.05 \mu\text{A}$ ที่ 10 โวลต์

ในขณะที่ผลการทดลองหาค่ากระแสรั่วของ Cr/n-Si/Cr ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงเทคนิคในการสปีดเตอร์ในรูปที่ 4.30 มีค่ากระแสรั่ว $457 \mu\text{A}$ ที่ 10 โวลต์ โดยสามารถลดกระแสรั่วใน Cr/n-Si/Cr สามารถลดลงได้ 435 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่ากระแสรั่วไหลมีค่าลดน้อยลงเป็นที่น่าพอใจ เนื่องมาจากการปรับปรุงเทคนิคในการสปีดเตอร์และมีความสมมาตรเหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับแสงได้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสงที่ผ่านการลดกระแสรั่วจากปรับเงื่อนไขในการสปีดเตอร์

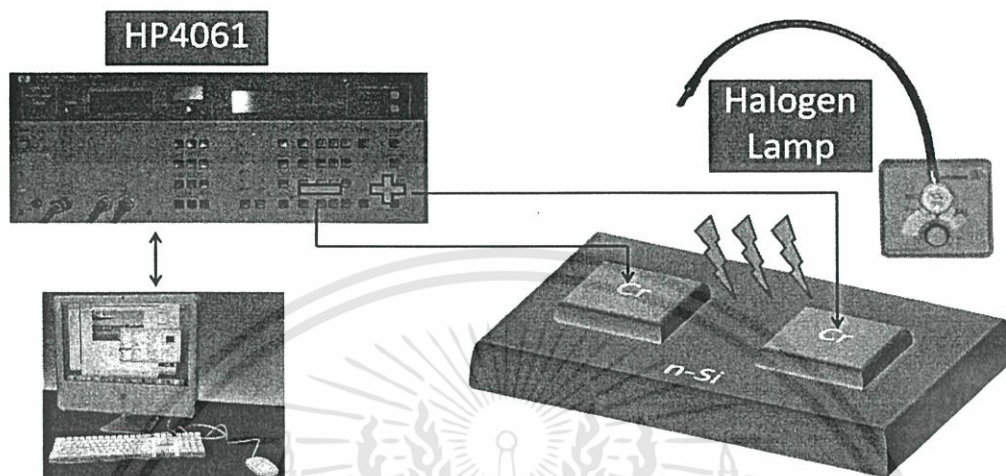


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะไม่ได้รับแสงที่ไม่ได้ปรับเงื่อนไขในการสปีดเตอร์

4.5.1.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ขณะได้รับแสง

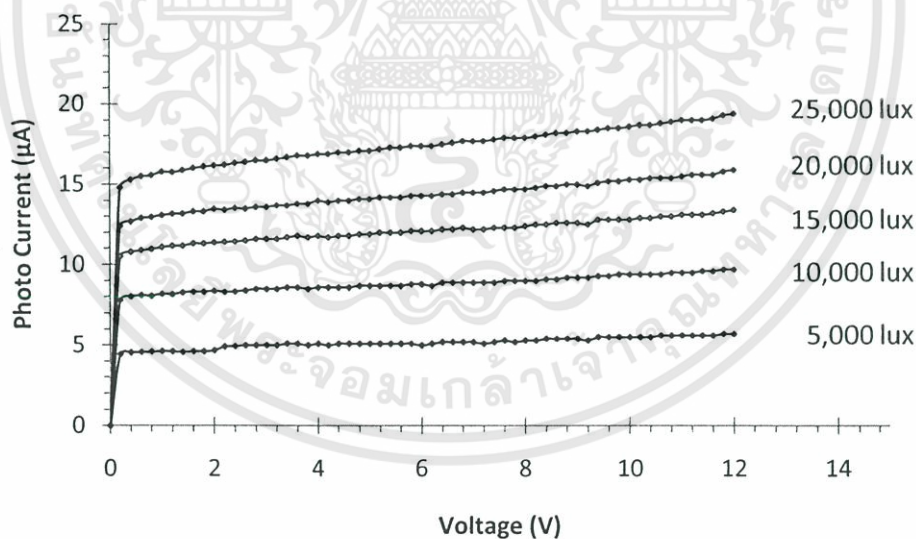
เมื่อนำโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr มาทดสอบลักษณะสมบัติทางกระแส - แรงดันในขณะที่ได้รับแสงโดยระบบเครื่องมือวัด HP 4061A Semiconductor/component test system ของบริษัท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Agilent และแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนของบริษัท Stocker & Yale รุ่น 20 series กำลัง 150 W ที่ความเข้มค่าต่างๆ ตามรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพัทธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr

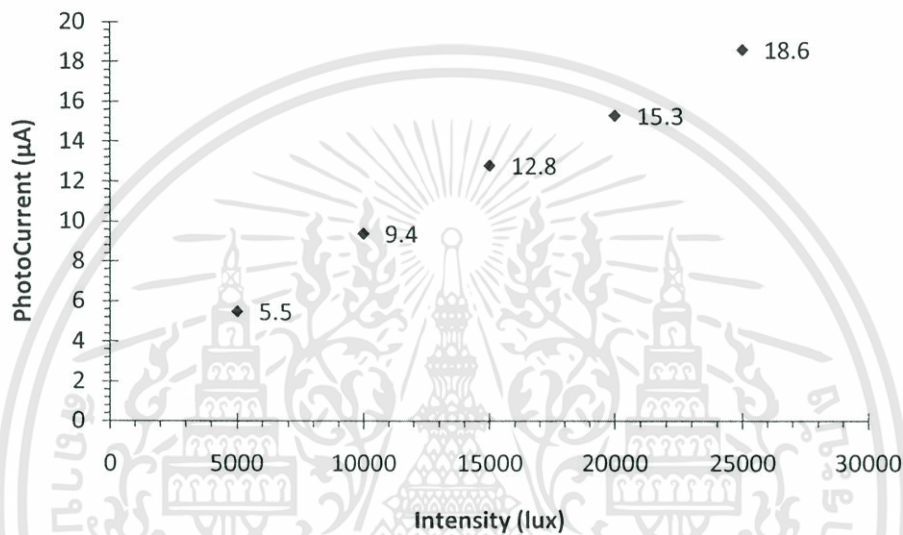
ในขณะที่ได้รับแสง



รูปที่ 4.32 ความสัมพัทธ์กระแสแสง - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในขณะที่ได้รับแสงความเข้มค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.32 โฟโตไดโอดเมื่อได้รับแสงตกกระทบเป็นความเข้ม 5,000 lux, 10,000 lux, 15,000 lux, 20,000 lux และ 25,000 lux พบว่ามีค่ากระแสแสงประมาณ 5 μA , 9 μA , 13 μA , 17 μA และ 21 μA ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μA , $12 \mu\text{A}$, $15 \mu\text{A}$ และ $18 \mu\text{A}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฟโตไดโอดสามารถตอบสนองต่อแสงและมีการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงตามความเข้มของแสงอันเนื่องมาจากการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้นเมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.33 ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่ดีของโฟโตไดโอดเมื่อนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับแสง



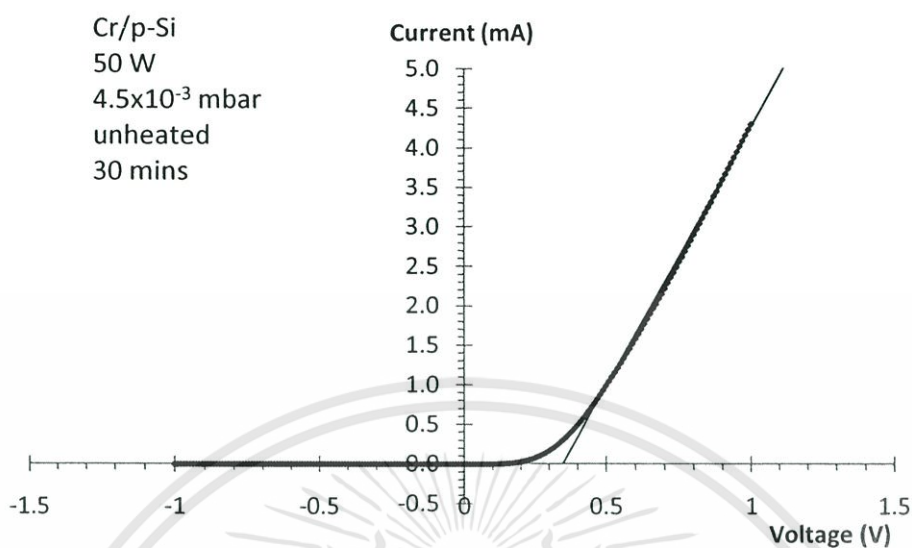
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์กระแสแสงกับความเข้มแสงที่ได้รับของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr

4.5.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr

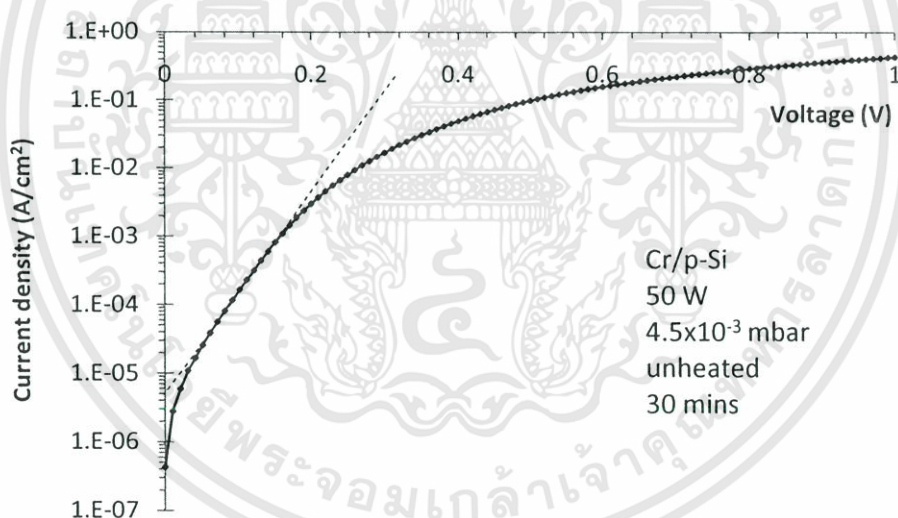
เมื่อนำเงื่อนไขในการลดกระแสรั่วและค่าความหนาของ Cr ที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.4 ตามลำดับ มาสร้างเป็นโฟโตไดโอดชนิด Cr/p-Si/Cr และนำไปวัดลักษณะสมบัติโดยระบบเครื่องมือวัด HP 4061A Semiconductor/component test system ของบริษัท Agilent ตามรูปที่ 4.7 โดยลักษณะสมบัติทางกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง Cr/p-Si มีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.34

สามารถหาค่าแรงดันภายในได้ 0.35 V และจากการหาค่ากระแสรั่วไหลอิมพัลส์ในขณะแรงดันเป็นศูนย์ตามรูปที่ 4.35 ค่า J_0 มีค่า $5 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ และจากสมการที่ 2.13 สามารถหาค่ากำแพงศักย์ชนิดกึ่งได้ 0.70 V จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่ากำแพงศักย์ชนิดกึ่งของรอยสัมผัส Cr/p-Si มีค่าสูงขึ้น จากเดิมที่มีค่า 0.64 V ซึ่งยังมีค่าต่ำและกระแสรั่วไหลสูง แต่จากการปรับปรุงเทคนิค

ในการสเปคเตอร์สามารถเพิ่มความสูงกำแพงศักย์และลดกระแสรั่วลงได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง Cr/p-Si



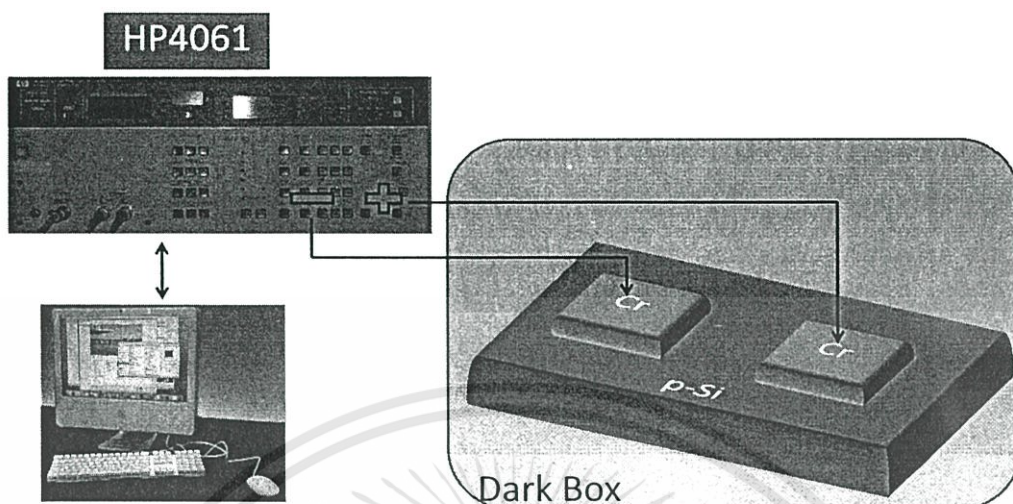
รูปที่ 4.35 การหาค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลอิมิตซ์ย้อนกลับ (J_0) ของรอยสัมผัส Cr/p-Si

4.5.2.1 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr

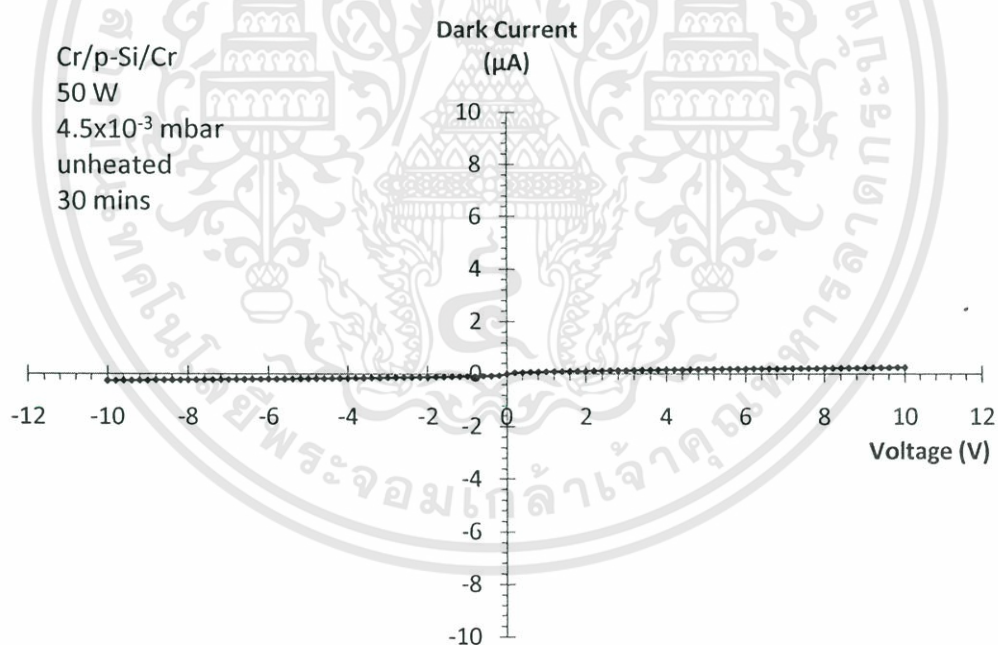
ขณะไม่ได้รับแสง

นำโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ที่สร้างมาวัดลักษณะสมบัติในขณะไม่ได้รับแสงโดยระบบเครื่องมือวัด HP 4061A Semiconductor/component test system ของบริษัท Agilent ตามรูปที่ 4.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพัทธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะที่
ไม่ได้รับแสง

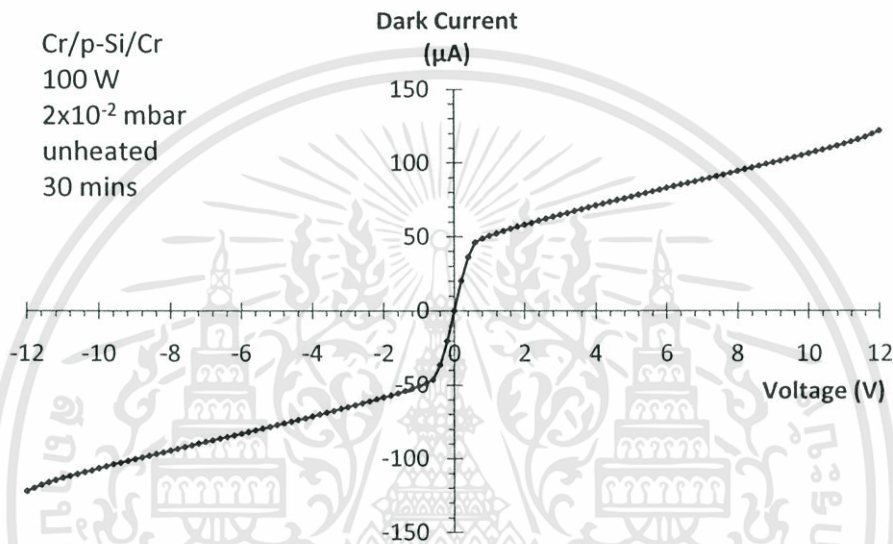


รูปที่ 4.37 ความสัมพัทธ์กระแสแรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงที่ผ่านการ
ลดกระแสรั่วจากปรับเงื่อนไขในการสปีดเตอร์

จากผลการทดลองรูปที่ 4.37 ความสัมพัทธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr
ในขณะที่ไม่ได้รับแสงแสดงให้เห็นว่าค่ากระแสรั่วไหลของ Cr/p-Si/Cr ที่ผ่านการปรับปรุงเทคนิคใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสปีดเตอร์มีค่า $0.25 \mu\text{A}$ ที่ 10 โวลต์ ในขณะที่ผลการทดลองหาค่ากระแสรั่วของ Cr/p-Si/Cr ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงเงื่อนไขในการสปีดเตอร์ในรูปที่ 4.38 มีค่ากระแสรั่ว $107 \mu\text{A}$ ที่ 10 โวลต์ โดยสามารถลดกระแสรั่วใน Cr/p-Si/Cr สามารถลดลงได้ 428 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่ากระแสรั่วไหลมีค่าลดน้อยลงเป็นที่น่าพอใจ เนื่องมาจากการปรับปรุงเทคนิคในการสปีดเตอร์ และมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับแสงได้



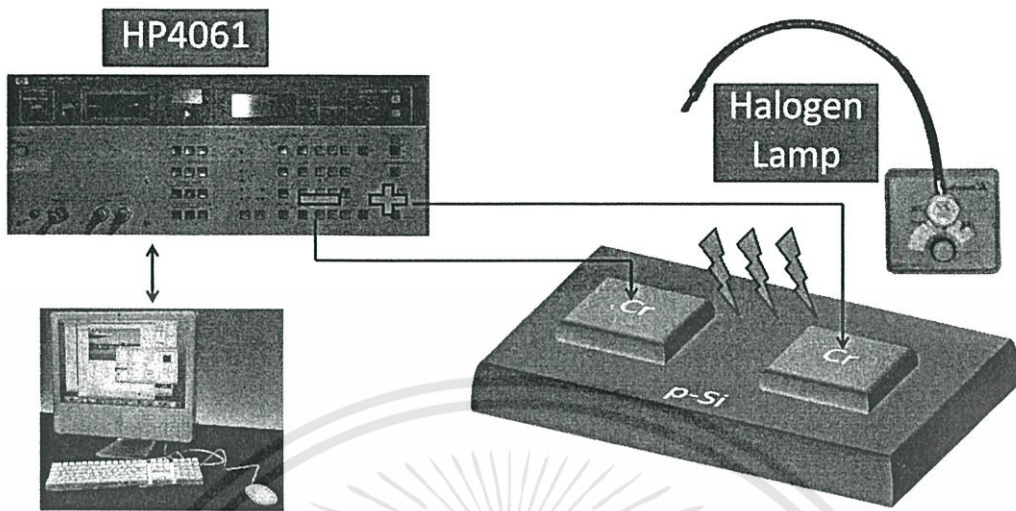
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ไม่ได้รับแสงที่ไม่ได้ปรับเงื่อนไขในการสปีดเตอร์

4.5.2.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ขณะได้รับแสง

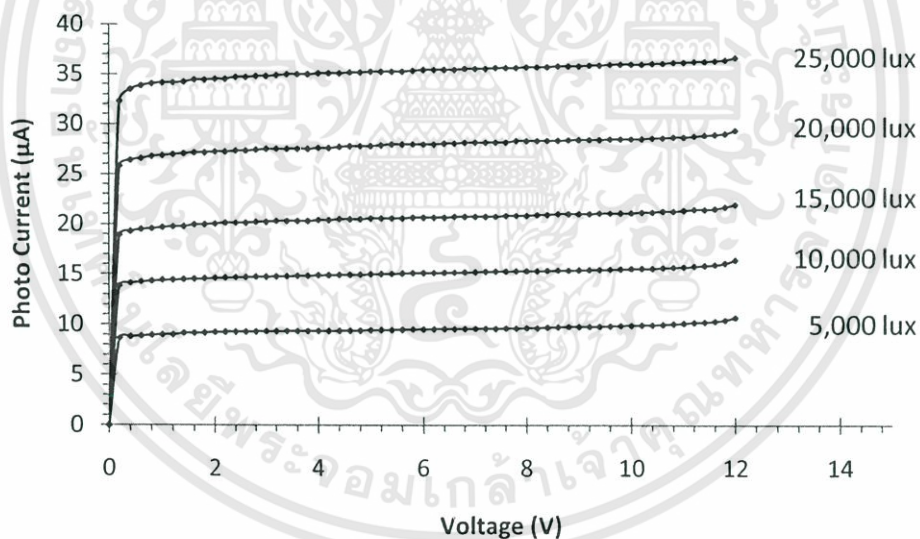
เมื่อนำโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr มาทดสอบลักษณะสมบัติทางกระแส - แรงดันในขณะที่ได้รับแสงโดยระบบเครื่องมือวัด HP 4061A Semiconductor/component test system ของบริษัท Agilent และแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนของบริษัท Stocker & Yale รุ่น 20 series กำลัง 150 W ที่ความเข้มค่าต่างๆ ตามรูปที่ 4.39

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.40 โฟโตไดโอดเมื่อได้รับแสงตกกระทบเป็นความเข้ม 5,000 lux, 10,000 lux, 15,000 lux, 20,000 lux และ 25,000 lux พบว่ามีค่ากระแสแสงประมาณ $10 \mu\text{A}$, $15 \mu\text{A}$, $21 \mu\text{A}$, $28 \mu\text{A}$ และ $36 \mu\text{A}$ ที่แรงดัน 10 V ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพัทธ์กระแส - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ได้รับแสง

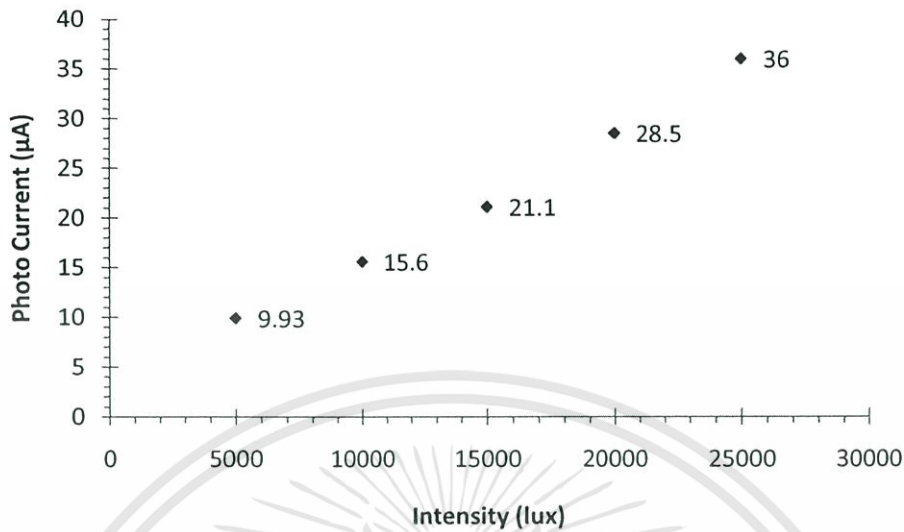


รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์กระแสแสง - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในขณะที่ได้รับแสงความเข้มต่างๆ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฟโตไดโอดสามารถตอบสนองต่อแสงและมีการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงตามความเข้มของแสงอันเนื่องมาจากการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้นเมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.41 ซึ่งเป็น

ลักษณะสมบัติที่ดีของโฟโตไดโอดเมื่อนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์กระแสแสงกับความเข้มแสงที่ได้รับของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr

สำหรับกลไกการเกิดกระแสแสงและการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3.1.3 และหัวข้อ 2.3.2.3 ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าในโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr มีโหนดในบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและโฮลในบริเวณระยะการแพร่เป็นพาหะในการเกิดกระแสแสง ส่วนในโครงสร้าง Cr/p-Si/Cr มีอิเล็กตรอนในบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและอิเล็กตรอนในบริเวณระยะการแพร่เป็นพาหะในการเกิดกระแสแสง ในส่วนของความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีความสัมพันธ์กับแรงดันไบอัสที่ให้แก่โฟโตไดโอดตามสมการที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2

ในกรณี n-Si

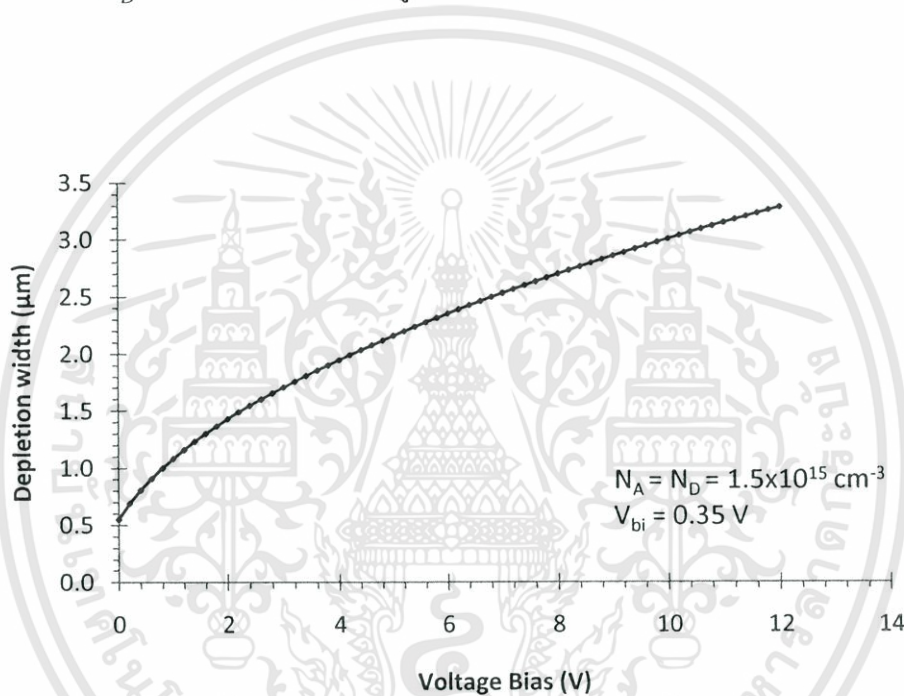
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi}-V_A)}{qN_D}} \quad (4.1)$$

ในกรณี p-Si

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi}-V_A)}{qN_A}} \quad (4.2)$$

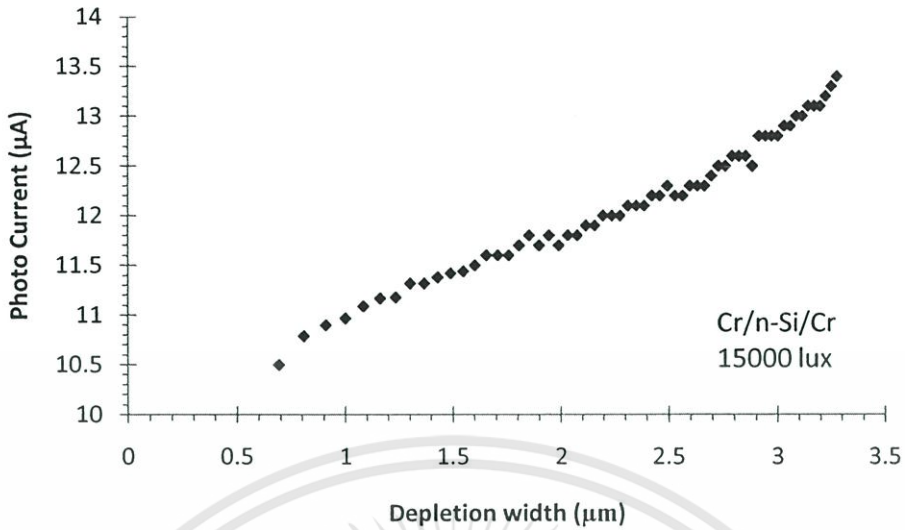
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	W	คือ ขนาดของบริเวณปลอดพาหะ (m)
	ϵ_s	คือ เปรอริมิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ = 1.044×10^{-10} (F/m)
	V_{bi}	คือ แรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคกี = 0.35 (V)
	V_A	คือ แรงดันไบอัสที่ให้แก่อรอยสัมผัสช็อคกี (V)
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} (C)
	N_A	คือ อะตอมสารเจือผู้รับ = 1.5×10^{15} atom/cm ³ = 1.5×10^{21} atom/m ³
	N_D	คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ = 1.5×10^{15} atom/cm ³ = 1.5×10^{21} atom/m ³

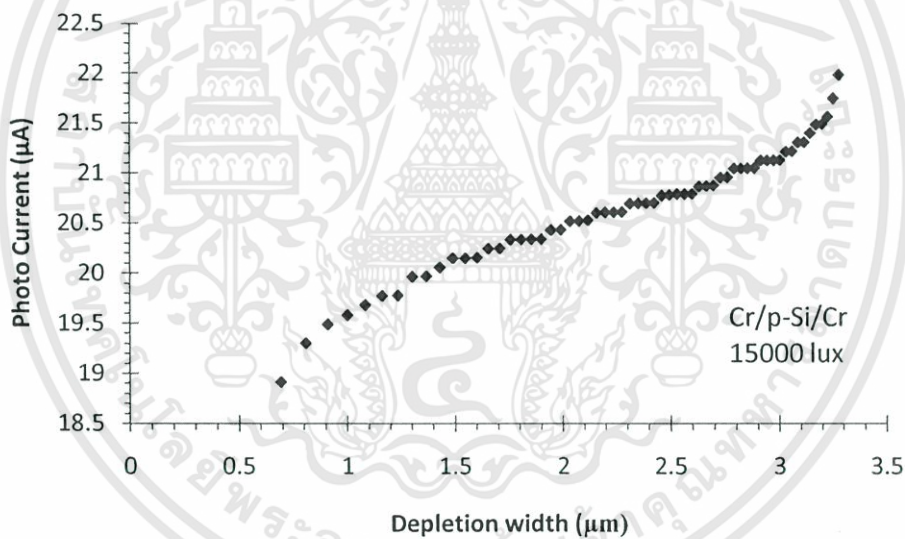


รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ความกว้างบริเวณปลอดพาหะกับแรงดันไบอัส

และสามารถคำนวณค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.42 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณปลอดพาหะมีการขยายตัวเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัส โดยที่ 10 V มีความกว้างของบริเวณปลอดพาหะประมาณ 3 μm ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์มีขนาด 20 μm จึงถือได้ว่าโฟโตไดโอดที่ใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นโฟโตไดโอดที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง โดยในโครงสร้าง MSM จะมีบริเวณนิวทรัลอยู่ด้วย



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับบริเวณปลอดพาหะของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr



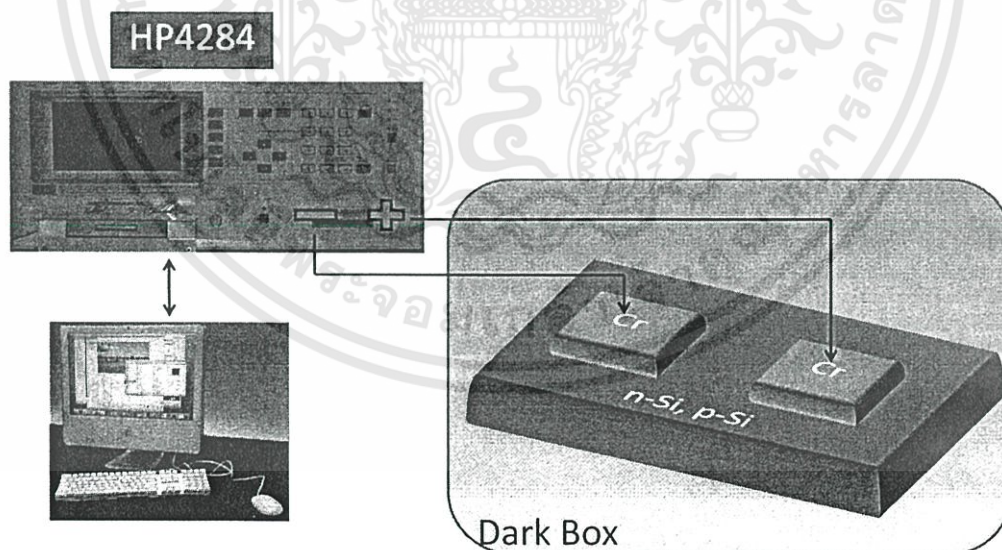
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับบริเวณปลอดพาหะของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ที่ได้รับแสงที่มีความเข้ม 15,000 lux กับขนาดของบริเวณปลอดพาหะที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับไบอัสของโฟโตไดโอดทั้ง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ตามลำดับ จากรูปที่ 4.43 และ รูปที่ 4.44 จะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นกระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นการยืนยันให้ทราบว่ากระแสแสงส่วนใหญ่เกิดบริเวณปลอดพาหะ

จากการที่โฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้างนั้นมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของบริเวณปลอดพาหะตามแรงดันไบอัสจึงส่งผลให้กระแสแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสด้วยเช่นกัน จึงทำให้สามารถควบคุมกระแสด้วยแรงดันได้ ซึ่งแตกต่างจากโฟโตไดโอดชนิดอื่นที่ความสัมพันธ์กระแสแสงแรงดันเป็นเส้นตรง เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิดอื่น เช่น พินโฟโตไดโอด อะวาลันซ์โฟโตไดโอด จะมีขนาดของบริเวณปลอดพาหะคงที่ ทำให้ไม่สามารถควบคุมกระแสด้วยแรงดันได้ [38]

4.6 การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ

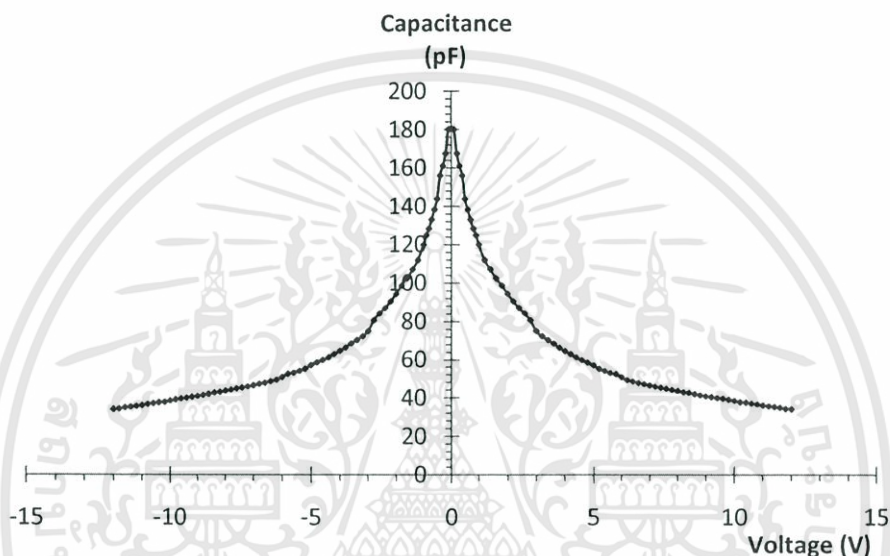
นำโฟโตไดโอดมาทดสอบหาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดัน เพื่อหาลักษณะสมบัติของค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญต่อความเร็วในการตอบสนองความถี่ ด้วยเครื่องมือวัด HP 4284A Precision LCR ของบริษัท Agilent ดังแผนภาพในรูปที่ 4.45 ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -12 V ถึง 12 V ที่แรงดันสัญญาณกระแสสลับ 26 mV_{pp} ความถี่ 1 MHz



รูปที่ 4.45 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ

4.6.1 การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr

นำโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr มาทดสอบลักษณะสมบัติทางความจุไฟฟ้า - แรงดันในขณะที่ไม่ได้รับแสง ดังรูปที่ 4.46 ซึ่งค่าความจุที่แสดงนั้นเป็นค่าความจุประจุที่บริเวณรอยสัมผัสทั้งสองต่ออนุกรมกัน ดังนั้น ค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM จึงมีค่าใกล้เคียงค่าความจุไฟฟ้าด้านที่^๑ได้รับไบอัสย้อนกลับซึ่งคือด้านคาโทด



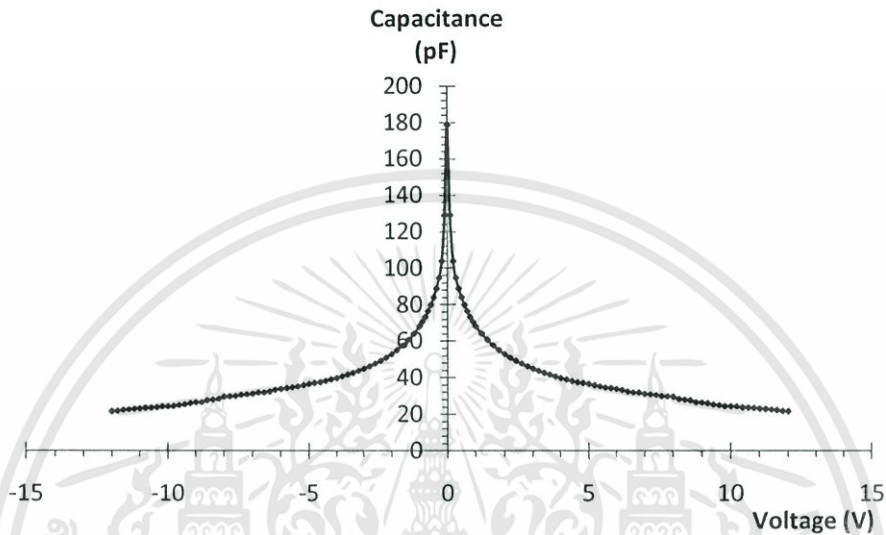
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า - แรงดันของ โฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความจุมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสเนื่องมาจากการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะและที่แรงดันไบอัส 10 V โฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 38 pF

4.6.2 การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr

นำโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr มาทดสอบลักษณะสมบัติทางความจุไฟฟ้า - แรงดันในขณะที่ไม่ได้รับแสง ดังรูปที่ 4.47 ซึ่งค่าความจุที่แสดงนั้นเป็นค่าความจุประจุที่บริเวณรอยสัมผัสทั้งสองต่ออนุกรมกัน ดังนั้น ค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM จึงมีค่าใกล้เคียงค่าความจุไฟฟ้าด้านที่^๑ได้รับไบอัสย้อนกลับซึ่งคือด้านแอนโนด

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความจุมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสเนื่องมาจากการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะและที่แรงดันไบอัส 10 V โฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 25 pF



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้า - แรงดันของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr

เมื่อพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าในโครงสร้าง MSM ในทางทฤษฎีนั้น มีค่าตามสมการที่ 4.3

$$C_T \approx \frac{\epsilon_s \cdot A}{W_D} \approx A \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (4.3)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม

ϵ_s คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิคอน 1.04×10^{-10} (F/m)

A คือ พื้นที่ขั้วโลหะ 1×10^{-6} (m²)

W_D คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (m)

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน 1.6×10^{-19} (C)

$N_D = N_A$ คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ = อะตอมสารเจือผู้รับ $= 1.5 \times 10^{15}$ (cm⁻³) = 1.5×10^{21} (m⁻³)

V_{bi} คือ แรงดันภายใน 0.35 V

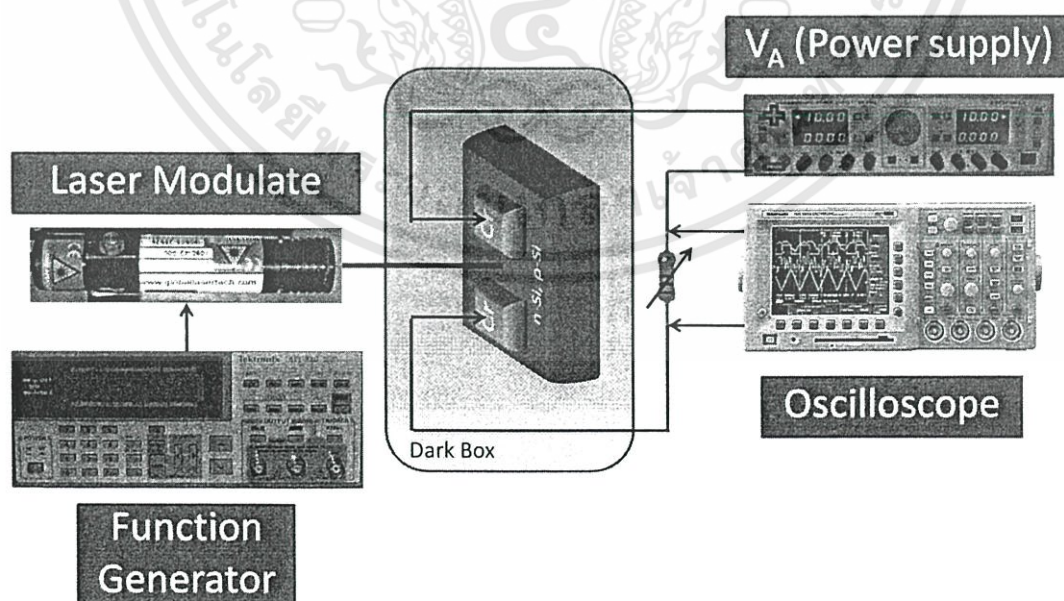
V_A คือ แรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงดันไบอัส 10 V (ซึ่งเป็นค่าไบอัสที่นำไปใช้ในการทดลองการตอบสนองทางความถี่ของอุปกรณ์ในหัวข้อต่อไป) ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่า $3 \mu\text{m}$ ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 4.2 ลงในสมการที่ 4.3 พบว่ามีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 34 pF ส่วนค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr ในรูปที่ 4.46 มีค่าความจุไฟฟ้า 38 pF ส่วนใน Cr/p-Si/Cr ในรูปที่ 4.47 มีค่าความจุไฟฟ้า 25 pF

4.7 การทดลองการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ

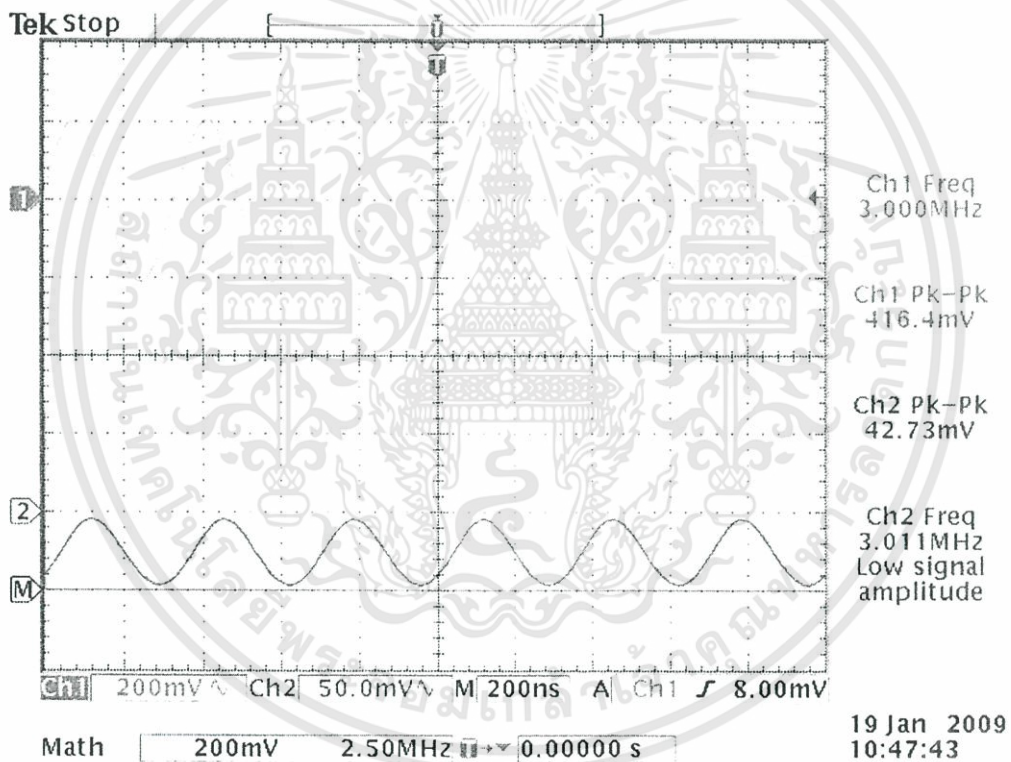
จากแนวความคิดที่กล่าวมาในตอนต้นว่าพาหะที่เป็นกลไกในการเกิดเป็นกระแสแสงในโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr คือโฮล ส่วนพาหะที่เป็นกลไกในการเกิดเป็นกระแสแสงในโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr คือ อิเล็กตรอน ซึ่งพาหะทั้งสองชนิดมีค่าความคล่องตัวไม่เท่ากัน โดยอิเล็กตรอนมีค่าความคล่องตัวที่ผิว $580 \text{ cm}^2/\text{v}\cdot\text{sec}$ และโฮลมีค่าความคล่องตัวที่ผิว $230 \text{ cm}^2/\text{v}\cdot\text{sec}$ ดังนั้นจึงทำการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดทั้งสองชนิด โดยคาดการณ์ว่าโฟโตไดโอดที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นพาหะซึ่งอิเล็กตรอนมีค่าความคล่องตัวสูงกว่าโฮลน่าจะตอบสนองต่อความถี่ได้ในช่วงกว้าง หรือกล่าวในอีกทางหนึ่งคือทำงานได้รวดเร็วกว่าโฟโตไดโอดที่ใช้โฮลเป็นพาหะ



รูปที่ 4.48 ระบบเครื่องมือวัดการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวัดลักษณะการตอบสนองทางสัญญาณแสงกระแสสลับของโฟโตไดโอดที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะนั้น ใช้เลเซอร์ของบริษัท Global Laser รุ่น Beta TX ความยาวคลื่น 670 nm กำลัง 3 mW ที่ถูกมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณของบริษัท Tektronix Co., Ltd. รุ่น AFG 320 สัญญาณกระแสสลับมีขนาด 400 mV_{pp} ฉายแสงเลเซอร์ไปยังโฟโตไดโอดที่ได้รับการไบอัส 10 V และต่ออยู่กับความต้านทานโหลด 100 Ω วัดสัญญาณที่ตกคร่อมความต้านทานโหลดด้วย ออสซิลโลสโคปของบริษัท Tektronix รุ่น TDS 3012 แผนภาพการทดลองแสดงในรูปที่ 4.48 ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ที่มอดูเลตให้แก่เลเซอร์ ตั้งแต่ 1 – 10 MHz เพื่อหาค่าความถี่คัทออฟ ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่ทำให้กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง

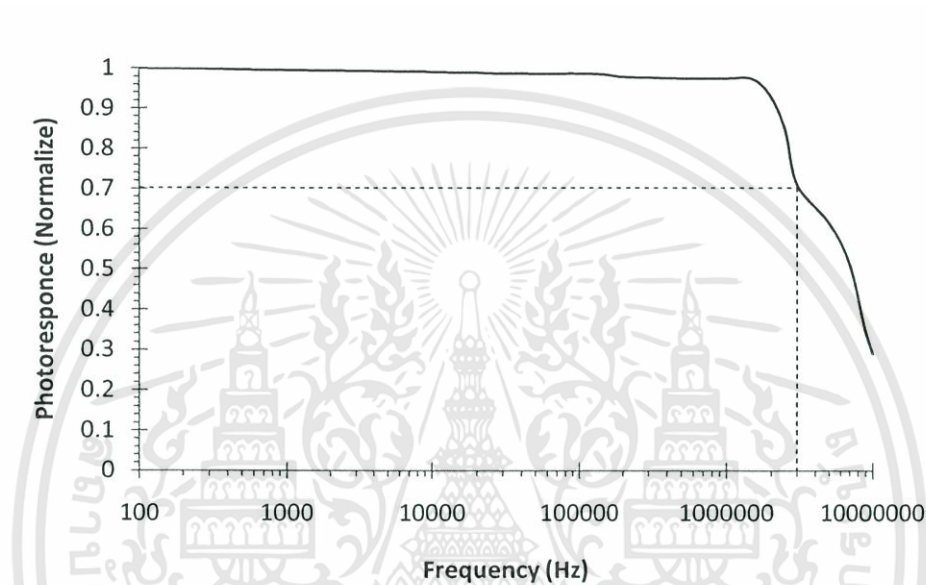


รูปที่ 4.49 ตัวอย่างสัญญาณจากออสซิลโลสโคปของโฟโตไดโอด

การวัดสัญญาณจากออสซิลโลสโคปแสดงในรูปที่ 4.49 โดยสัญญาณใน CH 1 เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ มีค่าแรงดันประมาณ 400 mV_{pp} และสัญญาณใน CH 2 เป็นสัญญาณที่วัดได้จากความต้านทานโหลดที่ต่ออยู่กับโฟโตไดโอด ซึ่งสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณรูปไซน์เหมือนกับแหล่งจ่าย

4.7.1 การทดลองการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr

ทำการวัดลักษณะการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ตามวงจรรูปที่ 4.48 โดยจากสัญญาณที่ได้ นำแอมพลิจูดของสัญญาณมาทำการนอร์มอลไลซ์เทียบกับความถี่เพื่อหาลักษณะการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr พบว่ามีลักษณะสมบัติการตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 4.50 และสามารถหาค่าความถี่คัทออฟได้ 3 MHz

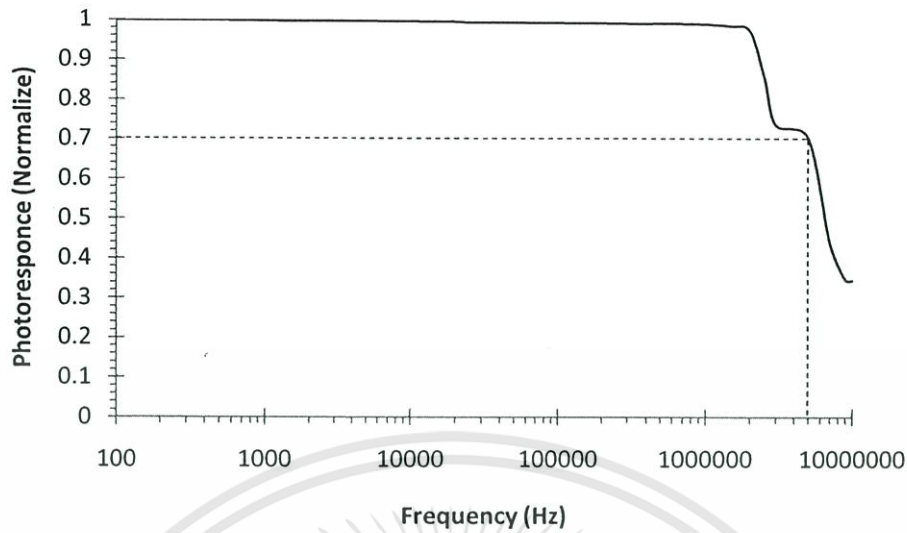


รูปที่ 4.50 การตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 MHz

4.7.2 การทดลองการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr

ทำการวัดลักษณะการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ตามวงจรรูปที่ 4.48 โดยจากสัญญาณที่ได้ นำแอมพลิจูดของสัญญาณมาทำการนอร์มอลไลซ์เทียบกับความถี่เพื่อหา ลักษณะการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr พบว่ามีลักษณะสมบัติการตอบสนองทางความถี่ดังรูปที่ 4.51 และสามารถหาค่าความถี่คัทออฟได้ 5 MHz

จากผลการทดลองการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดทั้งสองชนิดที่พบว่า โฟโตไดโอดชนิด Cr/p-Si/Cr มีความถี่คัทออฟสูงกว่าโฟโตไดโอดชนิด Cr/n-Si/Cr จึงคาดว่า Cr/p-Si/Cr มีอิเล็คตรอนเป็นพาหะในการเกิดกระแสแสง ส่วน Cr/n-Si/Cr มีโฮลเป็นพาหะในการเกิดกระแสแสง ตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ในตอนแรก



รูปที่ 4.51 การตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr ในช่วงความถี่ 100 Hz - 10 MHz

แต่เมื่อพิจารณาถึงตัวแปรที่มีผลต่อความถี่คัทออฟจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ประการได้แก่ เวลาการครีพท์ (drift time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ และค่าคงที่ของเวลา RC (RC time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกับค่าโหลดความต้านทานภายนอก [39]

โดยสามารถประมาณค่าความถี่คัทออฟ f_{-3dB} ด้วย first order approximation ได้ตามสมการที่ 4.4 [40]

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\tau_{tr}^2 + (RC)^2}} \quad (4.4)$$

- โดย t_{tr} คือ เวลาการส่งผ่านของพาหะ
 R คือ ค่าความต้านทาน โหลด (Ω)
 C คือ ค่าความจุประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ (F)

การประมาณค่าเวลาการส่งผ่านของพาหะสามารถหาได้โดยสมการ First order approximation carrier transit time มีค่าตามสมการที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_{tr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{S}{v_s} \quad (4.5)$$

โดย t_{tr} คือ เวลาการส่งผ่านของพาหะ
 S คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)
 v_s คือ ความเร็วของพาหะที่ความเร็วอิ่มตัว

ความเร็วของพาหะที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้ามีค่าตามสมการที่ 4.6

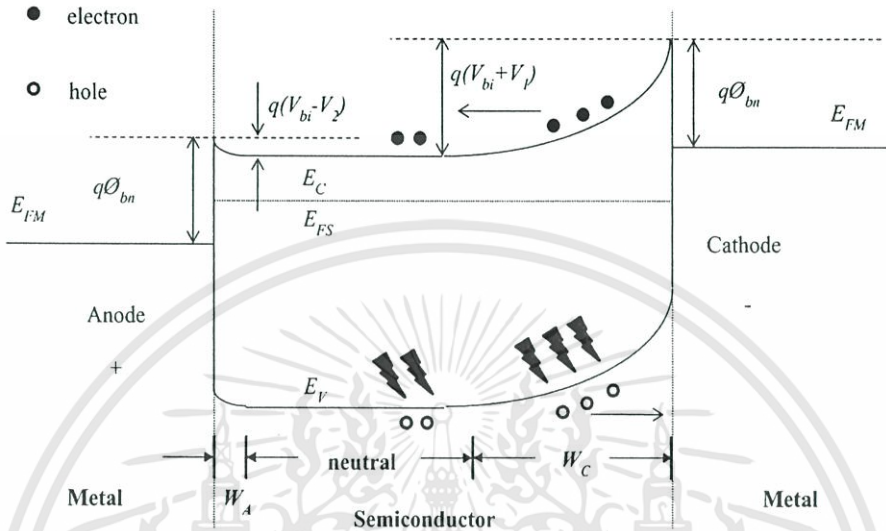
$$v = \mu E \quad (4.6)$$

โดย v คือ ความเร็วครีฟท์ของพาหะ
 μ คือ ค่าความคล่องตัวของพาหะ
 E คือ ค่าสนามไฟฟ้า

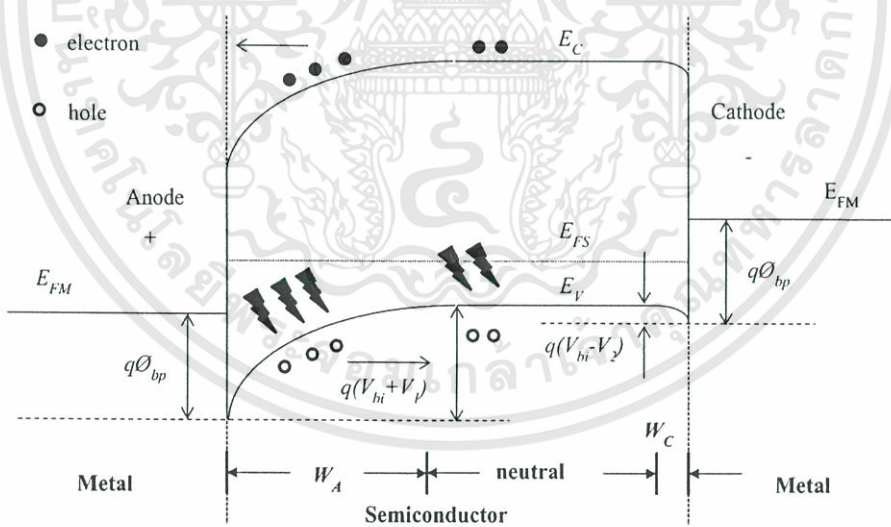
ซึ่งในการใช้สมการประมาณค่าเวลาการส่งผ่านของพาหะอย่างง่ายนั้น ค่าเวลาที่ได้เป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้า แต่ผลของค่าความคล่องตัวของพาหะที่แตกต่างกันทำให้ความเร็วของพาหะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งโฟโตไดโอดชนิด MSM เป็นอุปกรณ์ที่พาหะเคลื่อนที่ที่ผิวหน้าเป็นส่วนใหญ่ โดยในซิลิคอนระนาบ 100 พาหะอิเล็กตรอนมีค่าความคล่องตัวที่ผิว $580 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ และมีค่าความเร็ว $2.9 \times 10^6 \text{ cm/s}$ ส่วนโฮลมีค่าความคล่องตัวที่ผิว $230 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ค่าความเร็ว $1.15 \times 10^6 \text{ cm/s}$ [42] และต้องมีชั้นดูดกลืนแสงที่มีระยะน้อยเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (1 Dimension) [33]

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการคำนวณสมการที่ 4.4 โดยใช้ค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) = $20 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งถ้าไม่คิดผลของ RC โฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr จะมีค่าความถี่คัทออฟที่ 183 MHz ส่วนโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr จะมีค่าความถี่คัทออฟที่ 461 MHz ซึ่งสามารถสังเกตเห็นผลของความแตกต่างของค่าความคล่องตัวของพาหะที่มีผลต่อค่าความถี่คัทออฟได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริงพบว่าค่าจากการคำนวณและการทดลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริงมีค่าแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ซึ่งจากการทดลองจริงค่าความถี่คัทออฟอยู่ในระดับเพียงไม่เกิน 5 MHz เท่านั้น



รูปที่ 4.52 แถบพลังงานของ โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสและได้รับแสง



รูปที่ 4.53 แถบพลังงานของ โครงสร้าง Cr/p-Si/Cr เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสและได้รับแสง

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลองลงในสมการที่ 4.4 โดยจากการปรับค่าความต้านทานโหลดจนทำให้กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ความต้านทานโหลดจะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานอนุกรมในเนื้อสาร โดยในรอยสัมผัส Cr/n-Si พบว่ามีค่าความต้านทาน 1400 Ω ส่วนในรอยสัมผัส Cr/p-Si พบว่ามีค่าความต้านทาน 1250 Ω [41] และเมื่อนำค่าความจุประจุไฟฟ้าที่ได้จาก

การทดลองของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ซึ่งมีค่า 38 pF และ 25 pF ที่ 10 V ตามลำดับไปคำนวณในสมการที่ 4.5 สามารถคำนวณค่าความถี่คutoffของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr จากการทดลองมีค่า 3 MHz และ 5 MHz ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง เมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณและการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่เวลา RC ส่งผลกระทบต่อค่าความถี่คutoffของตัวอุปกรณ์เป็นอย่างมาก [43]

จากผลการทดลองการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดทั้งสองชนิดที่พบว่า โฟโตไดโอดชนิด Cr/p-Si/Cr มีความถี่คutoffสูงกว่าโฟโตไดโอดชนิด Cr/n-Si/Cr แต่จากปัจจัยอื่น ๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้องจึงยังไม่สามารถสรุปได้โดยตรงชี้ชัดลงไปได้ว่า Cr/p-Si/Cr มีอิเล็คตรอนเป็นพาหะในการเกิดกระแสแสง ส่วน Cr/n-Si/Cr มีโฮลเป็นพาหะในการเกิดกระแสแสง ต้องทำการลดผลของปัจจัยที่เข้ามามีผลต่อตัวโฟโตไดโอดจึงสามารถสรุปได้ชัดเจนแน่นอน โดยการออกแบบต้องลดผล RC ให้มีค่าน้อยและโฟโตไดโอดทั้งสองชนิดต้องมีค่า RC เท่ากัน จนกระทั่งเห็นผลของเวลาการส่งผ่าน ค่าความคล่องตัวของพาหะจึงจะมีผลต่อค่าความถี่คutoffที่ได้จากการทดลองได้อย่างชัดเจน [18,44]

สามารถกล่าวโดยสรุปว่าเนื่องจากค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็คตรอนมีค่ามากกว่าโฮล และจากแถบพลังงานที่แสดงให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะในรูปที่ 4.52 และรูปที่ 4.53 โดยในโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr โฮลสามารถวิ่งด้วยความเร็วครีฟที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะเข้าสู่ขั้วคาโทดได้ทันที ส่วนอิเล็คตรอนจะเกิดการแพร่ผ่านบริเวณนิวทรัลเข้าสู่ขั้วแอนโนดและในโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr อิเล็คตรอนสามารถวิ่งด้วยความเร็วครีฟที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะเข้าสู่ขั้วแอนโนดได้ทันที ส่วนโฮลจะเกิดการแพร่ผ่านบริเวณนิวทรัลเข้าสู่ขั้วคาโทด จึงคาดว่าพาหะในการเกิดกระแสแสงส่วนใหญ่ของ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr เป็น โฮลและอิเล็คตรอนตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษาวิจัยทั้งหมด คือการแก้ไขปัญหาประสิทธิภาพและเสถียรภาพทั้งในแง่ของกระบวนการสร้างและการใช้งานโฟโตไดโอด MSM ที่ใช้ขั้วโลหะเป็น Al โดยการนำโลหะ Cr มาสร้างเป็นขั้วโลหะของโฟโตไดโอด MSM ทดแทน Al จากผลการทดลองทดสอบพบว่าการใช้โลหะ Cr สามารถทนแรงดันพังทลายได้สูงขึ้น ลดขั้นตอนการสร้างไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการซินเตอร์ เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงและมีความแข็งแรงทนทานต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศทำให้มีเสถียรภาพในการทำงาน และโลหะ Cr สามารถสร้างเป็นรอยสัมผัสขั้วได้ดีบนสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ในขณะที่โลหะ Al เมื่อนำไปสร้างบนสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะเกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก จึงนับว่าเป็นจุดเด่นของโลหะ Cr เนื่องจากการที่สามารถสร้างให้เกิดรอยสัมผัสขั้วได้ดีทั้งบนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้สามารถสร้างเป็นโฟโตไดโอด MSM โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr เพื่อศึกษาพฤติกรรมของพาหะที่ก่อให้เกิดเป็นกระแสแสง

เมื่อทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกระแสแรงดันของรอยสัมผัสขั้วชนิด Cr/n-Si พบว่ามีค่าแรงดันภายใน 0.32 V ค่าแรงศักย์ขั้วชนิด Cr/n-Si มีค่าแรงดันภายใน 0.28 V ค่าแรงศักย์ขั้วชนิด Cr/p-Si มีค่าแรงดันภายใน 0.67 V ส่วนรอยสัมผัสขั้วชนิด Cr/p-Si มีค่าแรงดันภายใน 0.64 V แต่รอยสัมผัสทั้งสองยังคงประสบปัญหากระแสรั่วไหลมีค่าสูงซึ่งหากนำไปสร้างเป็นโฟโตไดโอด MSM อุปกรณ์จะไม่สามารถตอบสนองต่อแสงได้

จึงมุ่งศึกษาในประเด็นการลดกระแสรั่วไหล พบว่าในกระบวนการสร้างขั้วโลหะ Cr ใช้วิธีการสปัตเตอร์ ซึ่งใช้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าโครเมียมเพื่อให้อะตอมโครเมียมตกลงบนฐานรองนอกจากจะมีอะตอมของโครเมียมที่ตกลงมาแล้วยังมีอิเล็กตรอนทุติยภูมิพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์จากการที่เป้าถูกบอมบาร์ด ที่ก่อให้เกิดการบอมบาร์ดที่ฐานรองเวเฟอร์ เกิดจุดบกพร่องเสียหายรวมไปถึงเกิดความร้อนเหนียวทำให้เกิดออกไซด์ต่างๆ จากออกซิเจนที่ตกค้างอยู่ในระบบซึ่งก่อให้เกิดสถานะผิวที่รอยสัมผัส ทำให้รอยสัมผัสขั้วที่สร้างเกิดกระแสรั่วไหลสูง จึงทำการลดกระแสรั่วไหลด้วยการเปลี่ยนแปลงเทคนิคในการสปัตเตอร์

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเทคนิคในการสปัตเตอร์ที่มีผลต่อกระแสรั่วไหล พบว่า

กำลังในการสปัตเตอร์มีค่าต่ำลง ส่งผลให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิได้รับกำลังน้อยลงในการวิ่งเข้าชน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วแอโนดซึ่งเป็นฐานรองเวเฟอร์ และเกิดการบอมบ์บาร์ดที่ผิวหน้า Si น้อยลง ทำให้ปริมาณสถานะผิวเกิดน้อยลงค่าแก๊สจี้จี้จึงสูงขึ้นทำให้กระแสรั่วมีค่าน้อยลง

ความดันก๊าซอาร์กอนมีค่าต่ำลง ส่งผลให้มีจำนวนอะตอมของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วิ่งเข้าชนขั้วแอโนดหรือผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์น้อยลงตามไปด้วย ทำให้ปริมาณสถานะที่ผิวมีค่าน้อยลงด้วย ทำให้ค่ากระแสรั่วไหลมีค่าน้อยลง

อุณหภูมิฐานรองมีค่าต่ำลง ส่งผลให้สถานะผิวซึ่งเกิดเนื่องจากความร้อนได้เหนี่ยวนำให้เกิดออกไซด์ต่างๆ ที่ผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์มีจำนวนน้อยลง ทำให้ค่ากระแสรั่วไหลมีค่าน้อยลง

เวลาในการสปีดเตอร์ลดลง ส่งผลให้การบอมบ์บาร์ดเนื่องจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นมีโอกาสน้อยลงที่วิ่งเข้าชนฐานรองเวเฟอร์เกิดเป็นสถานะที่ผิวได้หรือกล่าวได้ว่าเวเฟอร์ถูกบอมบ์บาร์ดน้อยลง ค่าแก๊สจี้จี้จึงมีค่าสูงขึ้นและทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้น

โดยสามารถสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นขั้วโลหะ Cr ได้คือ ใช้กำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดันก๊าซอาร์กอน 4.5×10^{-3} mbar โดยไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรอง เวลาในการสปีดเตอร์ 30 นาที โดยสามารถลดกระแสรั่วใน Cr/n-Si ได้ 435 เท่า และ Cr/p-Si สามารถลดกระแสรั่วลงได้ 428 เท่า

แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเทคนิคในการสปีดเตอร์มีผลกระทบต่อความหนาของขั้วโลหะซึ่งหากบางเกินไปจะทำให้แสงสามารถลอดผ่านขั้วโลหะได้ทำให้การวิเคราะห์สมการในหนึ่งมิติผิดพลาดไปได้ขั้วโลหะจึงต้องมีค่าความหนาพอที่จะกันแสงได้ จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเทคนิคในการสปีดเตอร์ที่มีผลต่อความหนาได้ พบว่า กำลังในการสปีดเตอร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเกิดฟิล์มบางสูงขึ้น เพราะพลังงานจลน์ที่ Ar^+ ได้รับมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อ Ar^+ ที่มีพลังงานจลน์สูงวิ่งเข้าชนเป้าโครเมียมจึงทำให้โครเมียมหลุดออกมาจากเป้าได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มค่าความดันก๊าซอาร์กอน ทำให้อัตราการเกิดของโครเมียมลดลง เนื่องจากที่ความดันสูงระยะเฉลี่ยปลอดการชน (mean free path) ของ Ar^+ จะลดลง อันเนื่องมาจากโมเลกุลของ Ar^+ จะเกิดการชนกันเอง ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ ก่อนที่จะมีโอกาสเข้าชนกับเป้าโครเมียม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิฐานรอง ค่าความหนามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อเพิ่มเวลาในการสปีดเตอร์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลามากขึ้นจำนวนอะตอมที่มาเกาะกันเป็นฟิล์มบางโครเมียมบนแผ่นเวเฟอร์จึงมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย สามารถสรุปที่เงื่อนไขกำลังในการสปีดเตอร์ 50 W ความดัน

ก๊าซอาร์กอน 4.5×10^{-3} mbar อุณหภูมิฐานรอง 25°C เวลาในการสเปคเตอร์ 30 นาที ล้วนมีค่าความหนาแน่นมากกว่า 1000 \AA

นำเงื่อนไขที่ได้จากการศึกษาการลดกระแสรั่วและค่าความหนาที่เหมาะสมไปสร้างโฟโตไดโอด MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะ มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า $20 \mu\text{m}$ พบว่ารอยสัมผัสซีดก็ Cr/n-Si มีค่าแรงดันภายใน 0.35 V กำแพงศักย์ซีดก็ 0.71 V ส่วนรอยสัมผัสซีดก็ Cr/p-Si มีค่าแรงดันภายใน 0.35 V กำแพงศักย์ซีดก็ 0.70 V ลักษณะสมบัติทางกระแสแรงดันของโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr มีค่ากระแสรั่วไหล $1.05 \mu\text{A}$ ที่ 10 V และ Cr/p-Si/Cr มีค่ากระแสรั่วไหล $0.25 \mu\text{A}$ ที่ 10 V โดยทั้งโฟโตไดโอดทั้งสองมีค่ากระแสรั่วไหลต่ำเป็นที่น่าพอใจ ลักษณะสมบัติกระแสแรงดันมีความสมมาตร เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับแสง และเมื่อทดลองนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับแสงพบว่าโฟโตไดโอดทั้งสองสามารถตอบสนองความเข้มแสงได้เป็นอย่างดี กระแสแสงมีความเป็นเชิงเส้นกับความเข้ม และกระแสแสงส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะเนื่องจากกระแสแสงเพิ่มมากขึ้นตามการขยายของบริเวณปลอดพาหะและกระแสแสงเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มแสง เนื่องจากจำนวนคู่อิเล็กตรอนโฮลเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง ซึ่งที่ความเข้มแสง $25,000 \text{ lux}$ โฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr มีค่ากระแสแสง $18 \mu\text{A}$ ที่ 10 V มีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืด 17 เท่า และ Cr/p-Si/Cr มีค่ากระแสแสง $36 \mu\text{A}$ ที่ 10 V มีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืด 144 เท่า

นำโฟโตไดโอดทั้งสองชนิดมาทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าแรงดันพบว่า ที่แรงดันไบอัส 10 V โฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 38 pF และ โฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 25 pF และค่าความจุไฟฟ้าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสเนื่องมาจากการขยายของบริเวณปลอดพาหะ

ในการตอบคำถามถึงชนิดของพาหะที่เกิดเป็นกระแสแสงของ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr สามารถทำได้โดยการทดสอบการตอบสนองทางความถี่ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความถี่คัทออฟของ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr มีค่า 3 MHz และ 5 MHz ตามลำดับ โดยค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าโฮล และจากแถบพลังงานที่แสดงให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโดยในโฟโตไดโอด Cr/n-Si/Cr โฮลสามารถวิ่งด้วยความเร็วคริฟท์ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะเข้าสู่ขั้วคาโทดได้ทันที ส่วนอิเล็กตรอนจะเกิดการแพร่ผ่านบริเวณนิวทรัลเข้าสู่ขั้วแอนโนดและในโฟโตไดโอด Cr/p-Si/Cr อิเล็กตรอนสามารถวิ่งด้วยความเร็ว

คริปท์ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าในบริเวณปลดพาหะเข้าสู่ข้อาโนดได้ทันที ส่วนโฮลจะเกิดการแพร่ผ่านบริเวณนิวทรัลเข้าสู่ข้อคาโทด จึงคาดว่าพาหะในการเกิดกระแสแสงส่วนใหญ่ของ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr เป็น โฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ

แต่จากปัจจัยอื่นๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อทำการคำนวณค่าความถี่ที่ออฟเพบว่าค่าทางทฤษฎีมีค่าความถี่ที่ออฟสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการทดลองมาก เมื่อทำการวิเคราะห์ห้ลึกลงไปพบว่าค่าคงที่เวลา RC มีผลมากต่อค่าความถี่ที่ออฟ ดังนั้นการออกแบบต้องลดผลค่าคงที่เวลา RC ให้มีค่าน้อยมาก โดยขนาดของขั้วโลหะควรต้องมีขนาดพื้นที่น้อยเพื่อลดค่าความจุไฟฟ้า ค่าความต้านทานอนุกรม ค่าความต้านทานรอยสัมผัส ควรมีค่าน้อย และโฟโตไดโอดทั้งสองชนิดต้องมีค่า RC เท่ากัน เมื่อสามารถลดผลของ RC ได้ ผลของความถี่ที่ออฟเนื่องจากเวลาการส่งผ่านของพาหะที่มีค่าความคล่องตัวไม่เท่ากันจึงจะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน



เอกสารอ้างอิง

- [1] G. P. Agrawal, Fiber Optic Communication System, 3rd ed, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [2] Ginés Lifante, Integrated Photonics Fundamentals, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2003.
- [3] Nadir Dagli, High-Speed Photonic Devices, Taylor & Francis Group, New York, 2007.
- [4] Richard A. Bolmen, SEMICONDUCTOR SAFETY HANDBOOK, Noyes Publications, New Jersey, 1998.
- [5] สूरศักดิ์ เนียมเจริญ, ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาเนอร์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [6] สราวุธ วิศวแสงสุข, การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [7] มานิดา ด้วงแสง, การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิต, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [8] R. A. Powell and S. M. Rossnagel, Thin Films PVD for Microelectronics Sputter Deposition Applied to Semiconductor Manufacturing, Academic Press, California, 1999.
- [9] G.C. Schwartz and K.V. Srikrishnan, Handbook of Semiconductor Interconnection, 2nd ed, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [10] David R. Lide, Handbook of Chemistry and Physics 73rd edition 1992-1993, CRC Press, Florida, 1992.
- [11] S. Ashok and K. Giewont, "High-Barrier Al/p-Si Schottky Diodes", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, vol. EDL-6, no 9, pp.462-464, September 1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] สมเกียรติ สุภเดช, เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, พิมพ์ครั้งที่ 4, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [13] สมเกียรติ สุภเดช, เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์, พิมพ์ครั้งที่ 3, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [14] Hwaiyu Geng, SEMICONDUCTOR MANUFACTURING HANDBOOK, McGraw-Hill, www.digitalengineeringlibrary.com, 2004.
- [15] M. Quirk and J. Serda, Semiconductor Manufacturing Technology, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 2001.
- [16] S. J. Fonash, S. Ashok and R. Singh, "Effect of ion-beam sputter damage on Schottky barrier formation in silicon", Applied Physics letter Vol. 39, No.5, pp.423-424, September 1981.
- [17] S. Hara, T. Teraji, H. Okushi and K. Kajimura, "Control of Schottky and ohmic interfaces by unpinning Fermi level", Applied Surface Science Vol. 117/118, pp.394-399, 1997.
- [18] Shu Wu and Sung-Mo Kang, "Modeling and Simulation of Metal-Semiconductor-Metal Photodetector using VHDL-AMS".
- [19] E. Rosencher and B. Vinter, Optoelectronics, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [20] B. Tatar, A. E. Bulgurcuoglu, P. Gokdemir, P. Aydogan, D. Yilmazer, O. Ozdemir, K. Kutlu, "Electrical and photovoltaic properties of Cr/Si Schottky diodes", International Journal of Hydrogen Energy (2008), doi:10.1016/j.ijhydene.2008.10.040
- [21] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981
- [22] E.H. Rhoderick and R.H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts, 2nd ed., Clarendon, Oxford, 1988.
- [23] H. K. Henisch, Semiconductor Contacts an approach to ideas and models, Clarendon press, oxford, 1984.
- [24] M. Levinshstein, J. Kostamovaara and S. Vainshtein, BREAKDOWN PHENOMENA IN SEMICONDUCTORS AND SEMICONDUCTOR DEVICES, World Scientific Publishing, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] E. D. Vita, D. Narducci, “Metallization of grafted silicon surfaces: sputtering-related damage effects”, surface science, Vol.601 pp.2855-2858, 2007.
- [26] H. T. Griem, S. Ray, J. L. Freeman and D. L. West, “Long-Wavelength (1.0-1.6 μm) $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ / $\text{In}_{0.53}(\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x})_{0.47}\text{As}$ / $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ Metal-Semiconductor-Metal Photodetector”, Applied Physics letter, Vol.56, pp.1067-1068, 1990.
- [27] M. Hirai, H. Iwakuro, J. I. Ohno and T. Kuroda, “Damage in Silicon Caused by Magnetron Ion Etching and Its Recovery Effect”, IEEE Transaction on components, hybrids and manufacturing technology, Vol. 13, No.4, pp.629-632, December 1990.
- [28] Donald L. Smith, Thin-Film Deposit, McGraw-Hill, Inc., New York, 1995.
- [29] Nagamitsu Yoshimura, Vacuum Technology - Practice for Scientific Instruments, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [30] L. He, J.E. Siewenie, “Cryogenic processing of thin metal films”, Surface and Coatings Technology, Vol.150, pp. 76–79, 2002.
- [31] J. Musil, “Low-pressure magnetron sputtering”, Vacuum, Vol.50, pp.363-372, 1998.
- [32] F. H. Mullins and A. Brunnschweiler, “The effect of sputtering damage on the characteristics of molybdenum-silicon Schottky barrier diodes”, Solid-State Electronics, Vol.19, pp. 47-50, 1976.
- [33] S. Khunkhao, Y. Yasumura, K. Kitagawa, T. Masui and K. Sato, “On laterally spreading of space-charge-region in planar metal-semiconductor-metal structures”, Solid-State Electronics, Vol. 47, pp. 1811–1816, 2003.
- [34] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และคณะวิจัย, “การพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการสร้างวงจรรวมแบบซีมอส ระดับ 5 ไมครอน” รายงานการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, พ.ศ. 2549
- [35] Donald M. Mattox, Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control, Noyes Publications, New Jersey, 1998.

- [36] S. L. Duan, J. O. Artman, B. Wong and D. E. Laughlin, "Study of the growth characteristics of sputtered Cr thin films", Applied Physics letter, Vol.67, No.9, pp.4913-4915, 1 May 1990.
- [37] H. Kim, S. Seo, J. Park, J. Lee, Y. Lee, B. Ju, J. Jang, N. Kim and D. Kim "Effect of Substrate Temperature on Etched Feature of Chromium Film and Its Application to Field Emitter Arrays (FEAs)", Journal of the Korean Physical Society, Vol.39, pp. S101-S107, December 2001.
- [38] Hamamatsu, Technical information SD-28 Characteristics and Use of Si APD (Avalanche Photodiode), [online], <http://www.hamamatus.com>
- [39] J. Bum, K. I. Litvin, W. J. Schaff and L. F. Eastman, "Optimization of High-speed Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.6, No.6, pp.722-724, June 1994.
- [40] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007
- [41] H. Takano, M. Kimura, T. Ando, S. Niemcharoen, Y. Yasumura and K. Sato, "Optical response of planar Mo/n-Si/Mo Structure with long neutral region and Schottky barriers at both ends", Solid-State Electronics, Vol. 44, pp. 2161–2164, 2000.
- [42] Gerhard Lutz, Semiconductor Radiation Detectors Device Physics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [43] ศุภิต เครื่องาม, สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2542.
- [44] Mark Johnson, Photodetection and Measurement - Maximizing Performance in Optical Systems, McGraw-Hill, 2003.
- [45] Dieter K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization, 3rd ed, John Wiley & Son, Inc. New Jersey. 2006.
- [46] กรกฎ วัฒนวิเชียร, โพลีซิลิคอนออปโตอิเล็กทรอนิกส์, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2540.

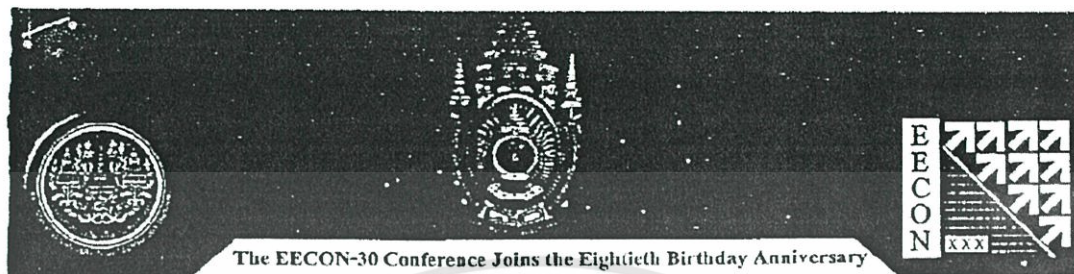
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [47] F. D. Auret, S. A. Goodman, F. K. Koschnick, J.-M. Spaeth, B. Beaumont and P. Gibart, "ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF SPUTTER DEPOSITION INDUCED DEFECTS IN n-GaN", MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 4S1, 1999.
- [48] Frank Hartmann, Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics, STMP 231, Springer, Berlin Heidelberg, 2009.
- [49] Brigham Young University, "Physical Vapor Deposition Metal Deposition", [online], <http://www.ee.byu.edu/cleanroom/metal.phtml?list-see-all=tur&references-see-all=tur>
- [50] T. Nakano and S. Baba, "Gas pressure effect on thickness Uniformity and circumvented deposition during sputter deposition process", Vacuum Vol.80, pp.647-649, 2006.
- [51] S. L. Liang, K. W. Wang and Y.C. Liu, "Argon Concentration of RF Sputtered Silicon Films", Chinese journal of physics, Vol.17, No.2, pp.102-106, 1979.
- [52] Ayhan Guldeste, "Effect of deposit condition on composition of rf-sputtered Bi-Sr-Ca-Cu-O thin films", Tr. J. of Physics, Vol.22 pp.901-910, 1998.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



30th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่นำเสนอนในการประชุม เล่ม 2

- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

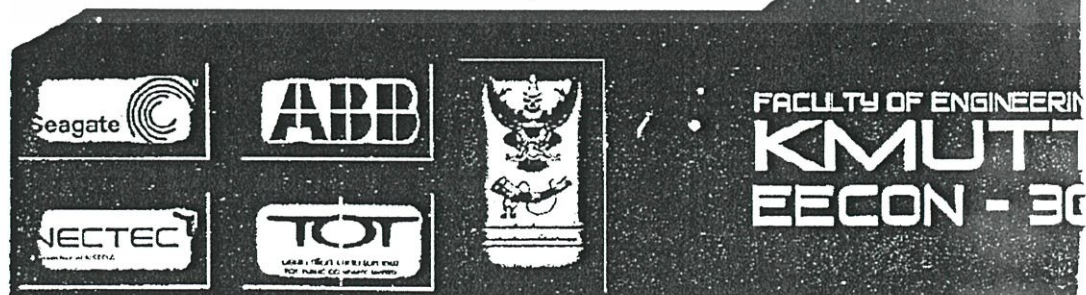
Volume II

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเพลิกซ์ ริเวอร์วิว รีสอร์ท กาญจนบุรี
25 - 26 ตุลาคม 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr แบบสลิตเดี่ยวในแนวระนาบ

Planar Single slit Cr/n-Si/Cr Photodetector

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ สุรชาติ เมืองอ่ำ

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร (66)-2739-0643 E-mail: knsurasa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบสลิตเดี่ยวในแนวระนาบ โดยใช้ขั้วโลหะเป็นโครเมียมซึ่งสร้างด้วยวิธีการอาร์เอฟสเปคเตอร์ เปิดช่องรับแสงโดยการโฟโตลิโทกราฟีมาตรฐาน สารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อนำอุปกรณ์ไปหาความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างนั้นมีค่าแรงดันภายใน 0.32 V ค่าความสูงกำแพงศักย์เป็น 0.59 V และค่าแรงดันพังทลายมีค่ามากกว่า 100 V และเมื่ออุปกรณ์ได้รับแสงตกกระทบ พบว่ากระแสแสงเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงและการไบอัส โดยไม่เกี่ยวกับระยะห่างระหว่างขั้วโลหะที่มีขนาดกว้าง

Abstract

This paper presents fabrication of planar single slit metal-semiconductor-metal photodetector (MSM-PD). Electrode of MSM-PD is chromium (Cr). Cr is grown by rf sputtering on n-type semiconductor. Space of electrode (D) is made by standard photolithography. From I-V characteristic, built in voltage is 0.32 V, barrier height is 0.59 V and breakdown voltage is more over 100 V. Photocurrent depends on intensity of light and bias voltage. But photocurrent is not related with space of wide electrode.

Keyword: MSM Photodetector, Schottky contact

1. บทนำ

อุปกรณ์ตรวจจับแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) ในแนวระนาบได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในช่วงเวลาไม่กี่

ปีที่ผ่านมา เพราะกระบวนการสร้างนั้นสอดคล้องกับเทคโนโลยีการสร้าง FET ทำให้สามารถรวมตัวตรวจจับแสงเข้ากับวงจรรวมเป็นวงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้ มีความเร็วในการตอบสนองสูง และมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้ MSM มีบทบาทในการสื่อสารทางแสงเป็นอย่างมาก ที่ผ่านมามีโลหะที่นำมาใช้สร้างเป็นขั้วโลหะของ MSM คือ อะลูมิเนียม ซึ่งปัญหาที่พบคือ ในกระบวนการสร้างต้องนำอุปกรณ์ผ่านการซินเตอร์ [1] อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูงเมื่อผ่านความร้อนมักเกิดการสไปค สามารถทำให้เกิดการลัดวงจรของอุปกรณ์ได้ อะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวที่ค่อนข้างต่ำที่ 660 °C ทำให้กระบวนการสร้างวงจรรวมขั้นต่อไปต้องระงับในเรื่องความร้อนที่ใช้ไม่ให้เกิดจุดหลอมเหลว อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนทำให้เข็มวัดหรือเข็มบอนด์อาจทะลุชั้นโลหะได้ และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า MSM ที่สร้างด้วยอะลูมิเนียมแรงดันพังทลายของอุปกรณ์มีค่าน้อย เพียง 3 – 5 V [2] จึงได้นำโครเมียมมาทดลองสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสง เพราะโครเมียมมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 1,857 °C จึงสามารถนำอุปกรณ์ผ่านกระบวนการสร้างที่มีอุณหภูมิสูงได้และในกระบวนการสร้างนั้นไม่ต้องผ่านการซินเตอร์ทำให้ไม่พบปัญหาการเกิดสไปคจึงทนแรงดันพังทลายได้สูง เป็นโลหะที่มีความแข็งแรงส่งผลให้ชั้นโลหะเกิดการทะลุได้ยาก

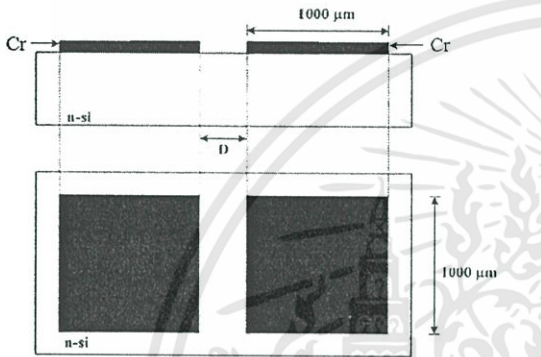
ในบทความนี้ได้เสนอผลของการนำเอา Cr มาใช้เป็นขั้วโลหะในอุปกรณ์ตรวจวัดแสง MSM เพื่อเป็นแนวทางในเลือกโลหะเพื่อสร้างและปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับแสง

2. การทดลอง

นำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นสภาพความต้านทาน 7 – 21 Ω-cm ระนาบ (100) มาทำความสะอาด จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนเข้าแชมเบอร์สุญญากาศ เพื่อสร้างฟิล์มบางโครเมียมเป็นขั้วโลหะด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วิธีการอาร์เอฟสปีดเตอร์ บี้มความดันสูญญากาศที่ความดันฐาน 1×10^{-6} torr จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเพื่อทำการสปีดเตอร์ ความดันก๊าซอาร์กอน 1.5×10^{-2} torr กำลังในการสปีดเตอร์ 100 W ที่อุณหภูมิห้อง ความหนาของฟิล์มบางโครเมียม 200 nm นำชิ้นงานไปทำการเปิดช่องรับแสงด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาตรฐาน โดยอุปกรณ์ตรวจจับแสงโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr แบบสลิคเดียวที่สร้างนั้นมีขนาดของขั้วโลหะ $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ และมีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ (D) เป็น 20, 40, 100 และ 500 μm ดังรูปที่ 1



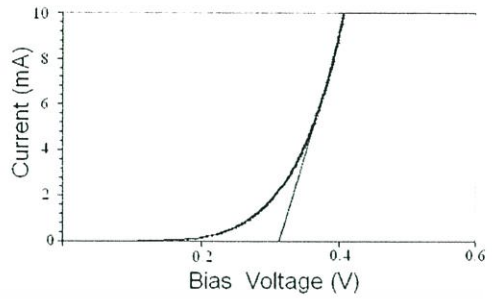
รูปที่ 1 อุปกรณ์ตรวจจับแสง โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr แบบสลิคเดียว

อุปกรณ์ตรวจวัดแสง Cr/n-Si/Cr ที่สร้างได้นั้นจะนำไปหาคุณลักษณะเฉพาะตัวโดยวัดความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน ทั้งที่ได้รับแสงตกกระทบบและไม่ได้รับแสงตกกระทบบ โดยเครื่อง HP4061 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นหลอดฮาโลเจนกำลัง 150 W ทดลองฉายแสงความเข้มต่างๆ แก่ตัวอุปกรณ์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งค่ากระแสที่วัดขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบคือกระแสมืด ส่วนกระแสที่วัดขณะได้รับแสงตกกระทบบนั้นจะเป็นกระแสรวมระหว่างกระแสแสงและกระแสมืด ดังนั้นค่ากระแสแสงจึงหาได้จากสมการที่ 1

$$I_{\text{photo}} = I_{\text{total}} - I_{\text{dark}} \quad (1)$$

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

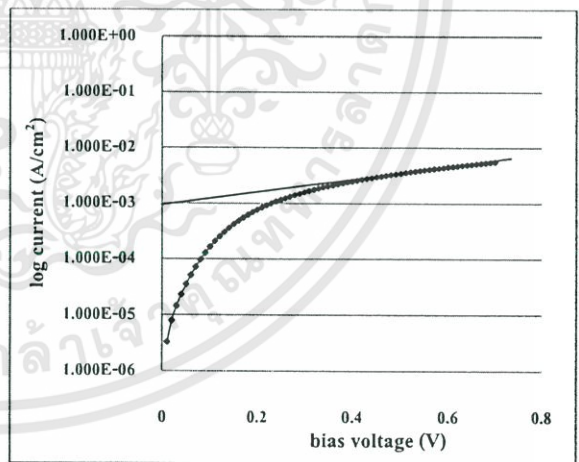
เมื่อนำอุปกรณ์ที่สร้างไปหาคุณลักษณะเฉพาะตัวของโครงสร้างรอยต่อ Cr/n-Si หรือชื่ออีกยี่ห้อคือไดโอดโดยการวัดความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน พบว่าค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) มีค่าเป็น 0.32 V ซึ่งหาได้จากรูปที่ 2 การหาความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_{bn}) จากความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน [3] สามารถทำได้โดยอาศัยสมการอธิบายกระแสที่ไหลในรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ในสมการที่ 2



รูปที่ 2 ค่าแรงดันภายในของรอยต่อ Cr/n-Si จากการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน

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

ทำการหาค่าความหนาแน่นของกระแสที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ (J_0) ทำโดยพล็อตกราฟกระแส-แรงดันในแกนกึ่งล็อกแล้วลากเส้นตรงต่อกราฟตัดแกนกระแสดังรูปที่ 3 ซึ่งได้ $J_0 = 1 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ เมื่อค่าคงที่โบสท์มันต์ (k) = $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, อุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) = 300 K, ค่าคงตัวของริชาร์ดสัน (R) = $110 \text{ A.cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$, ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (q) = $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ทำให้คำนวณค่า ϕ_{bn} ได้เป็น 0.59 V

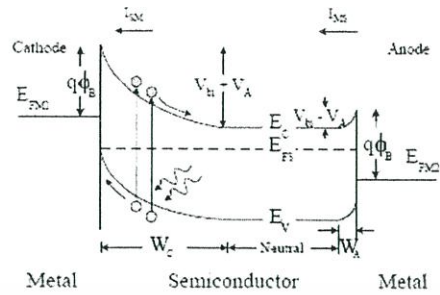


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันในแกนกึ่งล็อกเพื่อหาค่าความหนาแน่นของกระแสที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ (J_0)

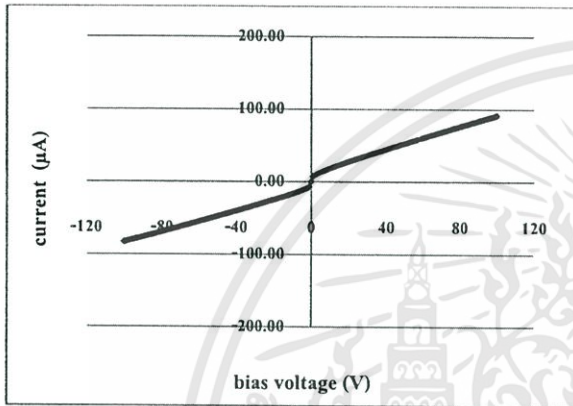
เมื่อนำอุปกรณ์ตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr ไปวัดความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน ขณะที่ไม่ได้รับแสง พบว่ามีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4 มีแรงดันพังทลายมากกว่า 100 V กระแสมีความสมมาตรและเป็นกระแสที่เกิดจากการไบอัสย้อนกลับที่ด้านคาโทด สามารถอธิบายพฤติกรรมของตัวตรวจวัดแสงโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (ECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

แถบพลังงานของ MSM ดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าด้านคาโทดที่เป็นการไบอัสตรงนั้นทำให้ค่าฟังก์ชันภายในมีค่าลดลงเป็น $V_b - V_A$ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านคาโทด (W_c) มีค่าลดลง ทำให้อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปที่ขั้วโลหะได้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า I_{MS} สำหรับด้านคาโทดที่เป็นการไบอัสย้อนกลับ ทำให้ค่าฟังก์ชันภายในมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $V_b + V_A$ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านคาโทด (W_c) มีค่าเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนจาก



รูปที่ 5 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อถูกไบอัสและได้รับแสง

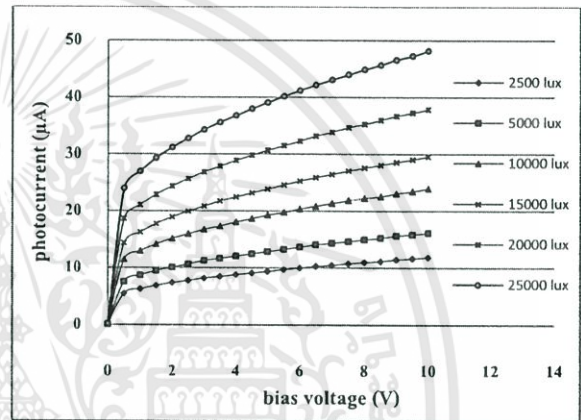


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

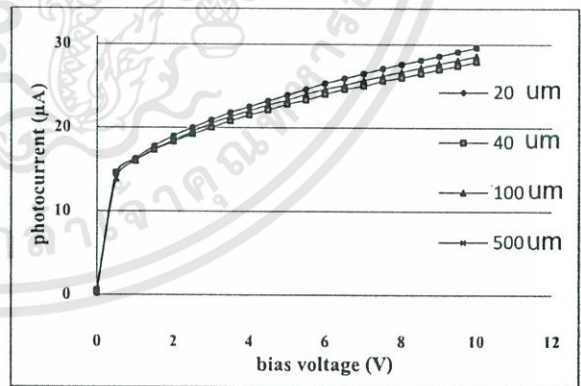
ด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปในโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ซีกเข้าไปในสารกึ่งตัวนำได้เล็กน้อย ทำให้เกิดมีกระแส I_{SM} เกิดเป็นกระแสมืดของอุปกรณ์ตรวจจับแสง [4]

เมื่อนำอุปกรณ์ตัวตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr ไปวัดความสัมพันธ์ทางกระแสแสง-แรงดันขณะได้รับแสง โดยแสงที่มีความเข้มต่างๆ กันเป็น 2,500, 5,000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux แต่มีระยะห่างของขั้วโลหะคงที่เป็น 20 μm พบว่ากระแสแสงที่เกิดมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบ่งเป็นระดับๆ ตามความเข้มแสงอย่างชัดเจนและมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงตามแรงดัน ดังในรูปที่ 6

เมื่อนำอุปกรณ์ตัวตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr ที่สร้างไปวัดความสัมพันธ์ทางกระแสแสง-แรงดัน ขณะได้รับแสงความเข้มคงที่ 15,000 lux แต่ระยะห่างของขั้วโลหะมีขนาดต่างๆ กันเป็น 20, 40, 100 และ 500 μm พบว่ากระแสแสงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงตามแรงดันดังในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงว่าระยะ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์กระแสแสง-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm ขณะได้รับแสงความเข้มต่างๆ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์กระแสแสง-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20, 40, 100, 500 μm ขณะได้รับแสงความเข้ม 15,000 lux

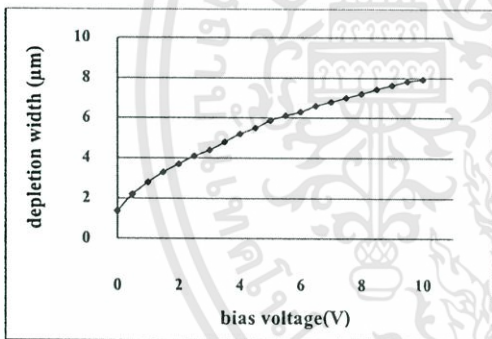
ห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไม่ได้มีผลต่อกระแสแสงอริบขโดยพิจารณาจากแถบพลังงานในรูปที่ 5 พบว่ากระแสแสงเกิดจากโฟตอนที่กระทบผิวของสารกึ่งตัวนำแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

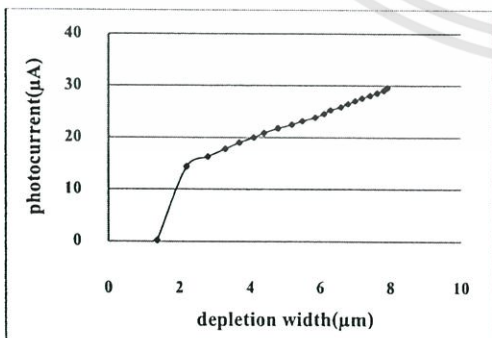
จะถูกพัดพาด้วยสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว โดยโฮลจะเคลื่อนที่เข้าหาคาโทด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาแอนโนด โดยต้องผ่านบริเวณนิวทรัลทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนถูกรวมตัว ส่วนพาหะที่เกิดในบริเวณนิวทรัลจะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวกันหมดไป จึงพิจารณาได้ว่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ เกิดในบริเวณปลอดพาหะซึ่งการเพิ่มความเข้มแสงเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนที่เกิดกระทบทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดเพิ่มขึ้น กระแสแสงที่เกิดจึงเพิ่มขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงแรงดันนั้น แรงดันทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (W) เกิดการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่ให้ (V_b) ดังสมการที่ 3

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_b - V_{bi})}{qN_D}} \quad (3)$$

ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ (ϵ_s) = 11.9, ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C, อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si (N_D) = $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $V_{bi} = 0.32$ V ค่าจากการคำนวณแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของบริเวณปลอดพาหะกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์กระแสแสงกับขนาดของบริเวณปลอดพาหะของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm ได้รับความเข้ม 15,000 lux

เมื่อนำค่ากระแสแสงที่ได้จากอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm ได้รับความเข้ม 15,000 lux มาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับขนาดของบริเวณปลอดพาหะ พบว่ามีความสัมพันธ์สอดคล้องกันเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 9 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการที่กระแสแสงเปลี่ยนแปลงตามแรงดันเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงของบริเวณปลอดพาหะ

4. สรุป

อุปกรณ์ตรวจจับแสง MSM ที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะที่ได้สร้างขึ้นนั้นสามารถตอบสนองต่อความเข้มของแสงได้เป็นอย่างดี แสดงให้เห็นว่ารอยสัมผัส Cr/n-Si เป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกโลหะในการสร้างและปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวตรวจจับแสงที่เป็นโครงสร้าง MSM ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน คุณวรินทร์ น้อยปรัชญาและคุณจิรวัดน์ ปราบเขต ที่ได้ให้คำแนะนำเทคนิคการสร้างและการวัดผลที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ธนศ โขะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สราวุธ วิศวแสงสุข, “ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน, หน้า 14-19, 2547.

[2] มานิดา ค้างแสง, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต “การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิฟฟิเคชัน”, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.

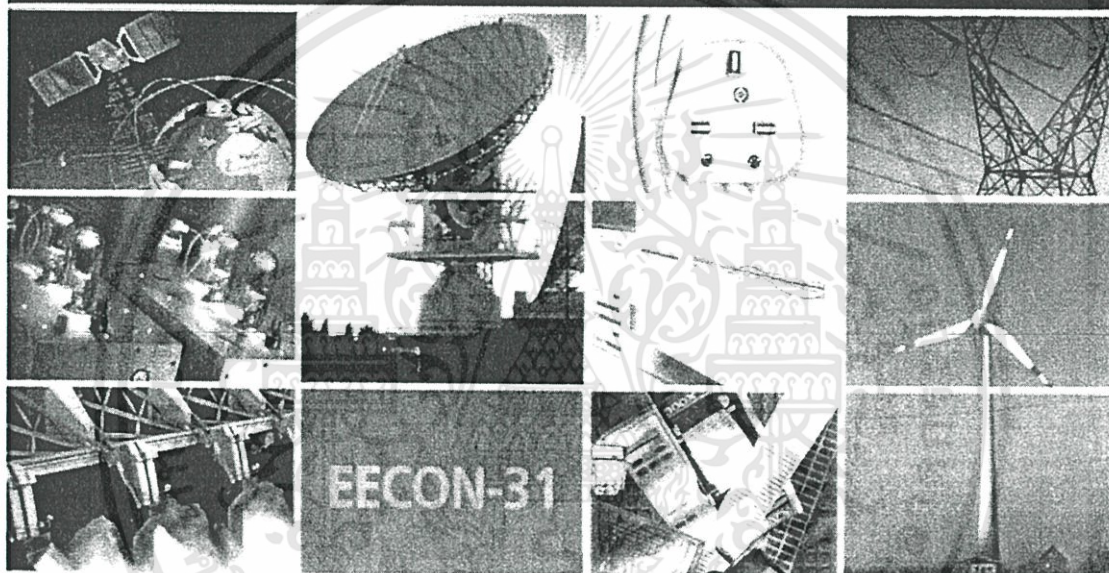
[3] E.H. Rhoderick, R.H. Williams, “Metal-Semiconductor Contacts 2nd Edition”, Oxford University Press, 1988.

[4] สมเกียรติ ฤกษ์เดช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (ECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 31st Electrical Engineering Conference (ECON-31)



- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบงานฝัง (การควบคุม) (CT)
- เทคโนโลยีใหม่
- การประยุกต์ของวิศวกรรมไฟฟ้า (CN)

29 - 31 ตุลาคม 2551

ณ โรงแรมฮิลส์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

ร่วมจัดโดย



มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
SRINAKHARINWIROT UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

สนับสนุนโดย



Western Digital



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของอุปกรณ์ตรวจจับแสง MSM ที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะ

Electrical and Optical Characteristics of MSM Photodetectors with Cr Metal Electrodes

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ¹ สุรชาติ เมืองอ่ำ¹ สันญา อุนขาว²

¹ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร 0-2739-0643 E-mail: knsurasak@kmitl.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

61 ถนนพหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900 E-mail: sanya@spu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึง ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของอุปกรณ์ตรวจจับแสง MSM โดยใช้ขั้วโลหะเป็นโครเมียม (Cr) สร้างโดยการอาร์เอฟสปีดเตอร์ สารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็น n-Si และ p-Si นำอุปกรณ์ตรวจจับแสงไปหาความสัมพันธ์ทางกระแสแรงดัน พบว่าค่าแรงดันภายในและค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัส Cr/n-Si เป็น 0.32 V และ 0.59 V ส่วนรอยสัมผัส Cr/p-Si เป็น 0.25 V และ 0.65 V ตามลำดับ การตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr พบว่ากระแสแสงเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและการไบอัส ดังนั้นโลหะ Cr จึงสามารถนำมาใช้สร้างอุปกรณ์ตรวจจับแสงได้และสามารถสร้างเป็นรอยสัมผัสช็อคกีได้ทั้งบน n-Si และ p-Si

Abstract

The purpose of this paper is to study on electrical and optical characteristics of MSM photodetector with Cr metal electrodes. Cr was grown on n-type and p-type semiconductor by RF Sputtering. From I-V characteristics, they found that built in voltage and barrier height of Cr/n-Si is 0.32 V and 0.59 V, while Cr/p-Si is 0.25 V and 0.65 V respectively. Optical characteristics of Cr/n-Si/Cr and Cr/p-Si/Cr were depending on intensity of light and bias voltage. Cr can be metal electrodes in photodetector. The advantage of Cr can be growing on n-Si and p-Si, which they are Schottky contacts.

Keyword: MSM Photodetector; MS Contact; Schottky barrier;

Cr/n-Si/Cr; Cr/p-Si/Cr

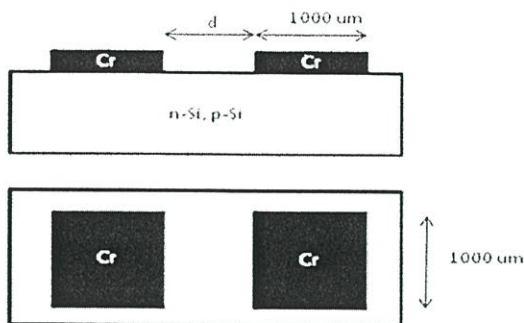
1. บทนำ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับแสง MSM ได้เลือกใช้สารกึ่งตัวนำเป็น n-Si และใช้ขั้วโลหะเป็นอลูมิเนียม (Al) ทำให้เกิดปัญหาคือ อุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่สร้างทนแรงดันพังทลายได้ต่ำ [1,4] กระบวนการสร้าง Al จำเป็นต้องผ่านการซินเตอร์ [2] Al มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ หลุดล่อนได้ง่ายและเป็นโลหะเนื้ออ่อนมักเกิดการสไปล์เมื่อได้รับความร้อน [3] ประกอบกับการเกิดกระแสแสงส่วนใหญ่ใน Al/n-Si/Al เกิดจากพาหะโฮล [1] ซึ่งมีค่าความคล่องตัวต่ำกว่าอิเล็กตรอน และ Al สร้างบน p-Si ให้เกิดเป็นรอยสัมผัสช็อคกีได้ยาก [3,4] เพื่อเป็นการแก้ปัญหาที่กล่าวข้างต้น จึงเลือกนำ Cr มาใช้เป็นขั้วโลหะของอุปกรณ์ตรวจจับแสง MSM เนื่องจาก Cr มีจุดหลอมเหลวสูง ไม่ต้องนำอุปกรณ์ผ่านการซินเตอร์ Cr มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ค่าอิเล็กตรอนออกไซด์สูงทำให้เป็นโลหะที่แข็ง และสามารถสร้างให้เป็นรอยสัมผัสช็อคกีทั้ง n-Si และ p-Si ได้

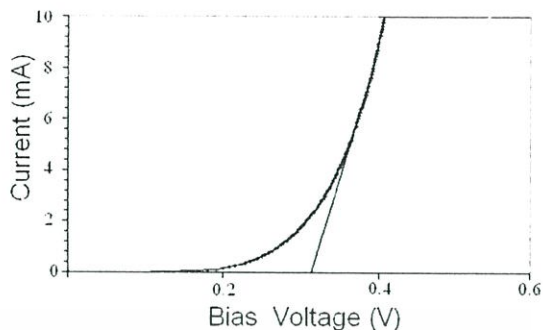
2. การทดลอง

นำแผ่น n-Si สภาพความต้านทาน 7 k Ω -cm และแผ่น p-Si สภาพความต้านทาน 1 k Ω -cm ระบาย (100) มาทำความสะอาดเพื่อสร้างฟิล์มบาง Cr เป็นขั้วโลหะด้วยวิธีการอาร์เอฟสปีดเตอร์ เมื่อได้ความดันประมาณที่ 6×10^{-6} Torr จึงเริ่มทำการสปีดเตอร์โลหะ Cr ที่ความดันของก๊าซอาร์กอนประมาณ 2×10^{-3} Torr กำลังงานที่ใช้ในการสปีดเตอร์ 100 W ที่อุณหภูมิห้อง ความหนาของฟิล์มบาง Cr ประมาณ 2,000 Å นำชิ้นงานไปทำการเปิดช่องรับแสงด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาตรฐาน โดยอุปกรณ์ตรวจจับแสงโครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr จะมีโครงสร้างแบบสลิคเดียว โดยมีขนาดของขั้วโลหะ $1,000 \times 1,000 \mu\text{m}^2$ และมีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ (d) เป็น 20 μm ดังแสดงในรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 อุปกรณ์ตรวจจับแสง โครงสร้าง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Cr/n-Si

อุปกรณ์ตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ที่สร้างได้นั้นจะนำไปหาลักษณะสมบัติเฉพาะโดยวัดความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดันโดยเครื่อง HP4061 เพื่อหาค่าแรงดันภายในและค่ากำลังศักย์ช็อคกีย์ของรอยสัมผัส Cr/n-Si และ Cr/p-Si และหา ลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ขณะได้รับแสงและไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยถูกทดลองและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

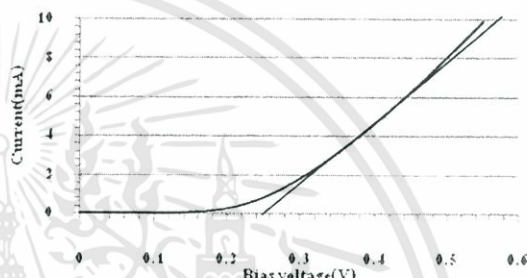
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

เมื่อนำ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ที่สร้างไปหาแรงดันภายในของรอยสัมผัส Cr/n-Si และ Cr/p-Si โดยการวัดความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน พบว่ารอยสัมผัสทั้งสองแสดงสมบัติการเรกติ-ไฟล์เป็นรอยสัมผัสช็อคกีย์ โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ สามารถหาค่าแรงดันภายในโดยลากเส้นตรงต่อกราฟกระแสตัดแกนแรงดันทำให้ได้ค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) ของรอยสัมผัส Cr/n-Si และ Cr/p-Si มีค่าเป็น 0.32 V และ 0.25 V ตามลำดับ

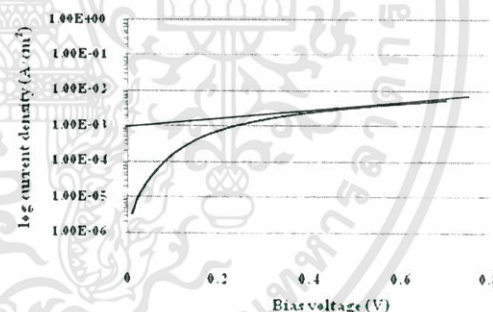
หาค่าความหนาแน่นกระแสคิมตัวก้นกลับของกรรขยสัมผัสช็อคกีย์ (J_0) ด้วยการพล็อตกราฟกระแส-แรงดันในแกนกึ่งล็อก จากนั้นลากเส้นตรงต่อกราฟตัดแกนกระแส นำค่า J_0 แทนค่าลงในสมการที่ 1 [5] ซึ่งเป็นสมการกระแสที่ไหลในรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ความสูงกำลังศักย์ช็อคกีย์สามารถหาได้จาก

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{RT^2}{J_0}\right) \quad (1)$$

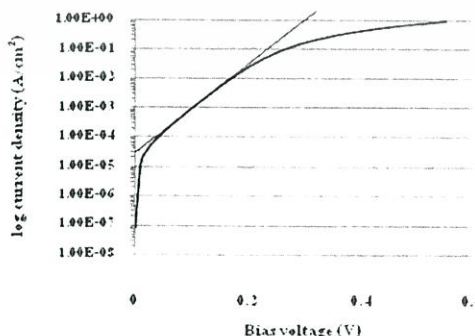
โดยที่ค่าคงที่ของโบสตันน์ (k) = 1.38×10^{-23} J/K, อุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) = 300 K, ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (R) ของ n-Si = $110 \text{ A.cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$, ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (R) ของ p-Si = $32 \text{ A.cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ [5], ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (q) = 1.6×10^{-19} C



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Cr/p-Si



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันในแกนกึ่งล็อกของรอยสัมผัส Cr/n-Si

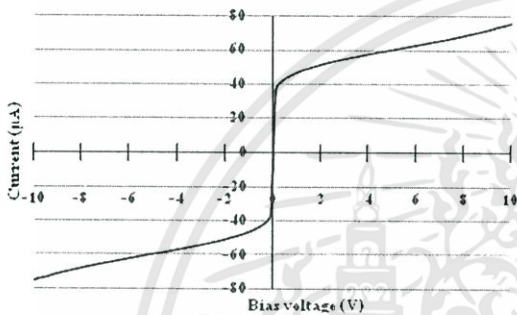


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันในแกนกึ่งล็อกของรอยสัมผัส Cr/p-Si

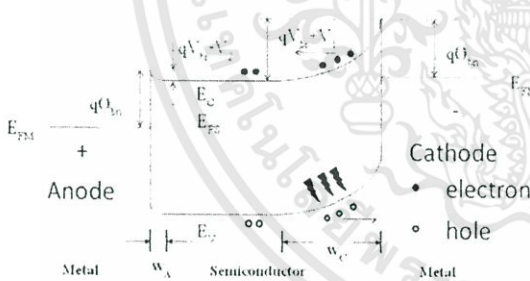
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4 ได้ค่า J_0 ของรอยสัมผัส Cr/n-Si เท่ากับ $1 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ และจากรูปที่ 5 ได้ค่า J_0 ของรอยสัมผัส Cr/p-Si เท่ากับ $3 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ คำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์ช็อคติย์โดยใช้สมการที่ 1 ทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อคติย์ของรอยสัมผัส Cr/n-Si (ϕ_{bn}) และของรอยสัมผัส Cr/p-Si (ϕ_{bp}) เท่ากับ 0.59 V และ 0.65 V ตามลำดับ

เมื่อนำ Cr/n-Si/Cr ไปวัดความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน ขณะที่ไม่ได้รับแสงพบว่ามีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6 เป็นกระแสที่เกิดจากการไบอัสย้อนกลับที่ด้านคาโทด พิจารณาแถบพลังงานรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

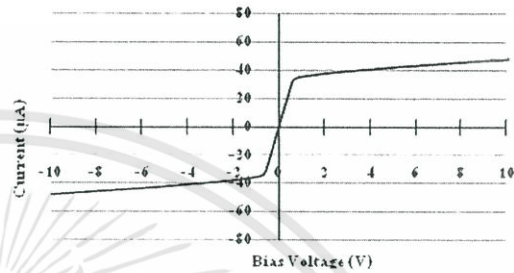


รูปที่ 7 แถบพลังงานของ Cr/n-Si/Cr ขณะถูกไบอัสและได้รับแสง

Cr/n-Si/Cr เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 7 ด้านคาโทดที่เป็นการไบอัสตรงมีความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W_A) ลดลง ค่าของกำแพงศักย์ภายในเพิ่มขึ้นเป็น $V_{b1} + V_1$ ทำให้อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปที่ขั้วโลหะได้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า I_{MS} สำหรับด้านคาโทดที่เป็นการไบอัสย้อนกลับ ทำให้กำแพงศักย์ภายในมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $V_{b1} + V_1$ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W_C) มากขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปในโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะ

เคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคติย์เข้าไปในสารกึ่งตัวนำได้เล็กน้อย ทำให้เกิดกระแส I_{SM} เกิดเป็นกระแสชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับแสง [1]

เมื่อนำ Cr/p-Si/Cr ไปวัดความสัมพันธ์ทางกระแส-แรงดัน ขณะที่ไม่ได้รับแสงพบว่ามีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 8 เป็นกระแสที่เกิดจากการไบอัสย้อนกลับที่ด้านคาโทด พิจารณาแถบพลังงานรูปที่ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของ Cr/p-Si/Cr ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ



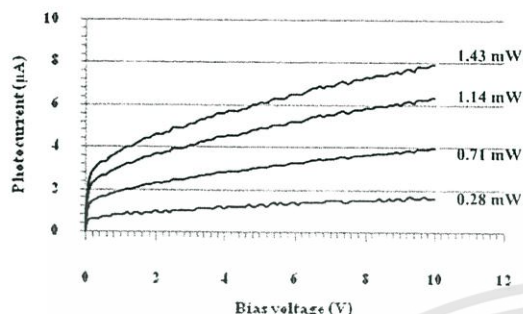
รูปที่ 9 แถบพลังงานของ Cr/p-Si/Cr ขณะถูกไบอัสและได้รับแสง

Cr/p-Si/Cr เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงรูปที่ 9 จะเห็นว่าด้านคาโทดเป็นการไบอัสย้อนกลับมีความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W_A) มากขึ้น ค่าของกำแพงศักย์ภายในเพิ่มขึ้นเป็น $V_{b1} + V_1$ ส่วนด้านคาโทดที่เป็นการไบอัสตรงมีความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W_C) ลดลง ค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเป็น V_{b1} กับ V_2 ดังนั้นที่ด้านคาโทด โอลจากทางด้าน p-Si สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปยังด้านโลหะ ทำให้เกิดกระแสไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ (I_{SM}) และทางด้านแอโนดจะมีอิเล็กตรอนปริมาณน้อยไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ เกิดเป็นกระแสไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ (I_{MS}) ซึ่งเป็นกระแสชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับแสง

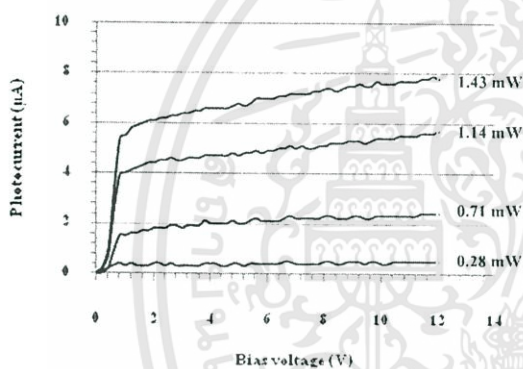
เมื่อนำ Cr/n-Si/Cr และ Cr/p-Si/Cr ที่มีระยะห่างของขั้วโลหะเป็น $20 \mu\text{m}$ ไปวัดความสัมพันธ์ทางกระแสแสง-แรงดันขณะได้รับแสง โดยแหล่งกำเนิดแสงเป็น He-Ne เลเซอร์ มีความยาวคลื่นแสง 633 nm และมีกำลังความเข้มเป็น 0.28, 0.71, 1.14 และ 1.43 mW พบว่ากระแสแสงที่เกิด มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบ่งเป็นระดับๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามความเข้มแสงอย่างชัดเจนและมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสแสง
ตามแรงดัน [1] ดังในรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์กระแสแสง-แรงดันของ Cr/n-Si/Cr ที่มี
ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm ขณะได้รับแสงกำลังความเข้มต่างๆ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์กระแสแสง-แรงดันของ Cr/p-Si/Cr ที่มี
ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm ขณะได้รับแสงกำลังความเข้มต่างๆ

เมื่อแสงตกกระทบบนบริเวณเปลือยและบริเวณ
นิวทรัล จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล คู่อิเล็กตรอน-โฮล
ที่เกิดบริเวณเปลือยจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณเปลือย
พาหะพาให้เกิดการเคลื่อนที่

สำหรับ Cr/n-Si/Cr พิจารณารูปที่ 7 โฮลในบริเวณเปลือย
พาหะจะถูกสนามไฟฟ้าพาเข้าหาขั้วคาโทดเกิดเป็นกระแสแสง
อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกจากบริเวณเปลือยจะไม่สามารถ
เคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้เนื่องจากเป็นประจุพาหะส่วนมากจึงเกิดการ
รวมตัวกับโฮลในนิวทรัลหมดไป สำหรับ Cr/p-Si/Cr พิจารณารูปที่ 9
อิเล็กตรอนในบริเวณเปลือยจะถูกสนามไฟฟ้าพาเข้าหาขั้ว
อโนดเกิดเป็นกระแสแสง โฮลที่เคลื่อนที่ออกจากบริเวณเปลือย
พาหะ จะไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้เนื่องจากเป็นประจุ
พาหะส่วนมากจึงเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในนิวทรัลหมดไป

4. สรุป

อุปกรณ์ตรวจจับแสง MSM ที่ใช้ Cr เป็นขั้วโลหะนั้น
สามารถตอบสนองต่อความเข้มของแสงและแรงดันไบอัสได้เป็น
อย่างดีและสามารถสร้างเป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่งได้บนสารกึ่งตัวนำทั้ง
สองชนิดโดยพาหะที่เกิดเป็นกระแสแสงใน Cr/n-Si/Cr คือ โฮล ส่วน
พาหะที่เกิดกระแสแสงใน Cr/p-Si/Cr คือ อิเล็กตรอน ซึ่งจากข้อมูลที่ได้
สามารถนำไปแก้ปัญหาและพัฒนาศักยภาพของอุปกรณ์ตรวจจับ
แสงโครงสร้าง MSM ได้ในโอกาสต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ เจ้าหน้าที่
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ขอขอบคุณคุณวาท น้อยปรีชาและ
คุณจิรวรรณ ปราบเขต ที่ได้ให้คำแนะนำเทคนิคการสร้างและการ
วัดผลการทดลองที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มานิดา ค้างแสง, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโต
ไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิเจคทีฟ, บัณฑิต
วิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง, 2549.
- [2] ธนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ นิยมเจริญ, สราวุธ วิศวแสงสุข,
ผลกระทบของอุณหภูมิจันเตอร์ที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส
แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนรี, วิศว
สารลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน, หน้า 14-19, 2547.
- [3] สมเกียรติ ฤกษ์เดช, วิจัยประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง, 2540.
- [4] สราวุธ วิศวแสงสุข, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง
Al/Si/Al_i, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [5] A.Tataroglu, S.Altindal, i Analysis of interface states and series
resistance of MIS Schottky diodes using the current-voltage
(I-V) characteristicsi, Microelectronic Engineering: An
international journal, Volume 85, 2008, pp. 233 ถึง 237.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุรชาติ เมืองอ่ำ
วันเดือนปีเกิด	23 สิงหาคม 2527
ที่อยู่	152/1 หมู่ 1 ซอยโพธาราม ถนนโรจนะ ตำบลไผ่ลิง อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2548 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ โพลีเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	ตั้งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซ็อดทีย์ไดโอด กระบวนการสปีเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2548 – 2550 เจ้าหน้าที่วิจัย ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร	[1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สุรชาติ เมืองอ่ำ. “อุปกรณ์ตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr แบบสลิตเดี่ยวในแนว ระนาบ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 30, ตุลาคม 2550, หน้า 560-563. [2] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สุรชาติ เมืองอ่ำ และสัญญา คุณขาว. “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง ของอุปกรณ์ตรวจจับแสง MSM ที่ใช้โครเมียมเป็นขั้วโลหะ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ไฟฟ้า, ครั้งที่ 31, ตุลาคม 2551, หน้า 1217-1220.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้