

**สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจจับชนิด**

**Al/n-Si (Au Doped)/Al**

**ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF Al/n-Si (Au DOPED)/Al  
PHOTODETECTORS**

**คณกรณ์ ไพรวิทย์**  
**KONGKRIT PRIWAN**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครคอมพิวเตอร์**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ. 2552**

**KMITL-2009-BN-M-043-099**

สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิด

Al/n-Si (Au Doped)/Al

ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF Al/n-Si (Au DOPED)/Al  
PHOTODETECTORS



กงกฤษณ์ ไพรวัดย์

KONGKRIT PRIWAN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....1051001  
วัน,เดือน,ปี.....16 พ.ย. 2552

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-043-099

**ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF Al/n-Si (Au DOPED)/Al  
PHOTODETECTORS**

**KONGKRIT PRIWAN**

**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-043-099**

**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si (Au Doped) /Al  
Thesis Title Electrical and Optical Properties of Al/n-Si (Au Doped) /Al Photodetectors  
นักศึกษา นายคงกฤษณ์ ไพรวัดย์  
รหัสประจำตัว 50061307  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-043-099

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

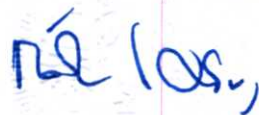
วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si (Au Doped)/Al
นักศึกษา	นายคงกฤษณ์ ไพรวลย์
รหัสนักศึกษา	50061307
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si (Au Doped)/Al โดยมีความมุ่งหมายที่จะเพิ่มความสามารถในการตอบสนองความถี่ที่สูงขึ้น โดยการเติมอะตอมทองคำให้กับฐานรองของตัวตรวจวัดแสง โดยใช้อุณหภูมิในการแพร่อะตอมทองคำเข้าสู่ฐานรองซิลิคอน เท่ากับ 1000 °C และ 1050 °C เป็นเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ผลของอะตอมทองคำต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดออคติกซ์ (Al/n-Si) พบว่าที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแพร่ที่สูงขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงขึ้น, กระแสรั่วไหลมีค่าสูงขึ้น และจะได้ค่าแฟกเตอร์อูคมคติประมาณ 2 ซึ่งตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่าแฟกเตอร์อูคมคติประมาณ 1 และจากผลของความจุไฟฟ้า พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับรอยสัมผัสชนิดออคติกซ์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ โดยอุณหภูมิในการแพร่เท่ากับ 1000 °C ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที จะมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.5-0.8 pF และอุณหภูมิในการแพร่เท่ากับ 1050 °C ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที จะมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.4-0.5 pF ในกรณีของคุณสมบัติทางไฟฟ้าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al พบว่าที่อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแพร่ที่สูงขึ้น จะทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้กระแสแสงที่ได้มีค่าลดลง และจากผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่ใช้ในการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งช่วยให้การตอบสนองทางแสงมีค่าสูงถึง 3.2 MHz โดยมีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ 1.45 เท่า

<b>Thesis Title</b>	Electrical and Optical Properties of Al/n-Si (Au doped)/Al Photodetectors
<b>Student</b>	Kongkrit Priwan
<b>Student ID</b>	50061307
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assist. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

### **ABSTRACT**

This thesis is a study and analysis electrical and optical properties of Al/ n-Si (Au doped) /Al photodetectors. The purpose of this thesis is to increase the frequency response of MSM structure. By using Au atoms doped into the semiconductor of photodetectors. The temperature for diffusion Au atomic into the silicon base is 1000 °C and 1050 °C for 15, 30, 45 and 60 minutes, respectively. When study the effect of Au atoms on the electrical characteristic of Schottky contact (Al/n-Si) found that the series resistance and the dark current were increased when increasing the temperature and time for diffusion. The ideality factor of Schottky contact that Au atoms were doped approximately 2, while the ideality factor of Schottky contact without Au atoms approximately 1. The capacitance of Schottky contact that Au atoms were doped is lower than Schottky contact without Au atoms. The capacitance of Schottky contact that Au atoms were doped at 1000 °C for 15, 30, 45 and 60 minutes is 0.5-0.8 pF and at 1050 °C for 15, 30, 45 and 60 minutes is 0.4-0.5 pF. When study the effect of Au atoms on the electrical characteristic of Al/n-Si/Al photodetectors found that the dark current is increased while the photocurrent is decreased when increasing the temperature and time for diffusion. Experimental results indicate that the best condition for fabricate Al/n-Si/Al photodetectors is 1000 °C and 15 minutes for diffusion Au atoms into silicon base that has the cutoff frequency 3.2 MHz and higher than Al/n-Si/Al photodetectors without Au atoms 1.45 times

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะตลอดจนอบรมสั่งสอน และให้ความอนุเคราะห์ในทุกๆ ด้านจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ สุขเดช, รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง, รองศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงเจริญ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมสร สิงขรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการศึกษาผลของรัทเทอร์ฟอร์ดแบ็คสแคตเตอร์ริง

ขอขอบคุณ คุณอภิษฎา ฤกษ์รัตน์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานทุกด้าน

ขอขอบคุณ คุณกุลวรางค์ นุตะมาน คุณสุรชาติ เมืองอ่ำ คุณวรเทพ น้อยปรีชา และ คุณอิสระ ศรีธนชัย ที่ได้ถ่ายทอดความรู้และขั้นตอนในการสร้างตัวตรวจวัดแสง รวมถึงนักศึกษาปริญญาโทของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน

ขอขอบคุณ คุณณัฐชา เมฆเจริญ, คุณชกพล ชวนะศักดิ์ และ คุณวันทิวดี สุนทรเต็ม นักศึกษาปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 และนักศึกษานิพนธ์ปริญญาตรีชั้นปีที่ 3 ในปีการศึกษา 2551 ทุกท่านที่ช่วยวัดผลการทดลองบางส่วน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับบิดา มารดา และญาติ พี่ น้อง ที่ให้ความรักความเมตตา อบรมสั่งสอน และสนับสนุนทางด้านภาระเรียนแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

คงกฤษณ์ ไพรวลย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อ.....	XVI
รายการสัญลักษณ์.....	XVII
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ.....	7
2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของทองคำและซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ.....	7
2.1.2 สภาพต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ.....	9
2.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	11
2.2.1 กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโคชอ้อม.....	13
2.2.1.1 กระบวนการการจับยึด.....	13
2.2.1.2 การรวมตัวแบบ Shockly-Hall-Read.....	15
2.2.1.3 การควบคุมช่วงอายุของพาหะด้วยอะตอมทองคำ.....	16
2.3 รอยสัมผัสชนิดกึ่ง.....	17
2.3.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่ง.....	17

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 รอยสัมผัสช็อคกีย์ขณะได้รับไปอัส.....	19
2.3.2.1 รอยสัมผัสขณะได้รับไปอัสตรง.....	19
2.3.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไปอัสย้อนกลับ.....	21
2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกีย์.....	22
2.3.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกีย์.....	23
2.4 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM.....	23
2.4.1 โครงสร้าง MSM ในสภาวะสมดุล.....	24
2.4.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไปอัส.....	25
2.4.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ.....	29
2.4.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....	30
2.4.5 ความเร็วในการตอบสนองและแบนด์วิดท์.....	30
บทที่ 3 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง.....	32
3.1 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง.....	32
3.2 กระบวนการสร้าง MSM (Al/n-Si/Al).....	33
3.2.1 กระบวนการสร้าง MSM ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอน.....	33
3.2.2 กระบวนการสร้าง MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอน.....	34
บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลการทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสช็อคกีย์ระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนที่ ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ.....	41
4.1.1 กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคกีย์.....	41
4.1.2 ความสูงกำแพงศักย์ช็อคกีย์.....	44
4.1.3 ความต้านทานอนุกรม.....	46
4.1.4 แฟลคเตอร์อุคมคติ.....	48
4.2 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ รอยสัมผัสช็อคกีย์.....	50

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสขั้วต่อที่มิได้มีการเติม อะตอมทองคำ.....	51
4.2.2	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสขั้วต่อที่มิได้มีการเติม อะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ.....	52
4.2.3	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสขั้วต่อที่มิได้มีการเติม อะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ.....	53
4.3	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้มีการเติมอะตอมทองคำ และที่มิได้มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆในสัญญาณแสงกระแสตรง.....	54
4.3.1	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้มีการเติมอะตอม ทองคำและที่มิได้มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆขณะไม่ได้รับ แสงตกกระทบ.....	54
4.3.1.1	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการ เติมอะตอมทองคำขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	55
4.3.1.2	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสงที่มิได้มีการเติม อะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C และที่เวลาในการแพร่ ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสง ตกกระทบ.....	56
4.3.1.3	ลักษณะสมบัติระหว่างกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสง ที่มิได้มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C และที่เวลา ในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	57
4.3.1.4	ลักษณะสมบัติของกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงและเวลาที่ ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	58
4.3.2	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้มีการเติมอะตอม ทองคำและที่มิได้มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ขณะไม่ได้ รับแสงตกกระทบ.....	59
4.3.2.1	ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันที่ความเข้มแสงต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้มีการเติมอะตอมทองคำ.....	60
4.3.2.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสง เมื่อมีการเติมทองด้วยอุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ.....	61

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงเมื่อมีการเติมทองด้วยอุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ.....	62
4.3.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	63
4.3.3 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ.....	64
4.3.3.1 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ.....	65
4.3.3.2 ลักษณะสมบัติกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ.....	66
4.3.3.3 ลักษณะสมบัติกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ.....	67
4.4 ผลการทดสอบลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ในสัญญาณแสงกระแสสลับ.....	68
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ.....	68
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ.....	69
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ.....	71
4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ที่ความถี่ต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ.....	72

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ที่ความ ต้านทานโหลดต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่การเติมอะตอมทองคำที่ อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาการแพร่ต่างๆ.....	73
4.4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ที่ความ ต้านทานโหลดต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่การเติมอะตอมทองคำที่ อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาการแพร่ต่างๆ.....	74
บทที่ 5 การวิเคราะห์และการอภิปรายผลการทดลอง.....	76
5.1 การวิเคราะห์ความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติม อะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ.....	76
5.1.1 ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจ- วัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่เงื่อนไขต่างๆ.....	77
5.2 การศึกษาซิลิคอนที่มีการเติมอะตอมทองคำด้วยวิธีเทอร์ฟอर्डแบ็คสแคด- เตอริง.....	79
5.2.1 ผลของเทอร์ฟอर्डแบ็คสแคดเตอริงของซิลิคอนก่อนการแพร่อะตอม ทองคำ.....	80
5.2.2 ผลของซิลิคอนที่แพร่อะตอมทองคำที่แพร่ที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาใน การแพร่ต่างๆ.....	81
5.2.3 ผลของซิลิคอนที่แพร่อะตอมทองคำที่แพร่ที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาใน การแพร่ต่างๆ.....	82
5.3 การวิเคราะห์สัญญาณแสงของ ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้ว ไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอม ทองคำที่เงื่อนไขต่าง.....	83
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	90

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	94
ภาคผนวก ข ชุดทดลองลักษณะสมบัติทางแสง.....	95
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	104

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ภาคตัดขวางการจับยึดของอะตอมทองคำในซิลิคอนที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน..... 17

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ..... 4
2.1	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำในซิลิคอน..... 8
2.2	ลักษณะการแพร่ของอะตอมสารเจือในซิลิคอน (ก) การแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (ข) การแพร่แบบเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม..... 8
2.3	ความสามารถในการละลายได้ในซิลิคอนของสารเจือเมื่ออุณหภูมิมีค่าต่างๆ..... 9
2.4	ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ (ก) ซิลิคอนบริสุทธิ์ (ข) ซิลิคอนชนิดเอ็นซึ่งอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมทองคำ (ค) ซิลิคอนชนิดพีอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมทองคำ..... 10
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานกับค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำ (ก) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) สารกึ่งตัวนำชนิดพี..... 11
2.6	กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม..... 12
2.7	แสดงกระบวนการจับยึดและกำเนิดของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง $E_T$ ..... 13
2.8	แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัส肖ตกี..... 18
2.9	แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัส肖ตกี..... 19
2.10	แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง..... 20
2.11	แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ..... 21
2.12	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ肖ตกีไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ-พี-เอ็น..... 22
2.13	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ肖ตกีไดโอด..... 23
2.14	(ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน..... 24
2.15	แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันริช-ทวร์ช ( $V_{RT}$ )..... 25
2.16	แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันเฟลต-เบนด์ ( $V_{FB}$ )..... 26
2.17	แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสมากกว่าแรงดันเฟลต-เบนด์ ( $V_{FB}$ )..... 26
2.18	แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส..... 28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับ โป๊สและมีแสงตกกระทบ.....	29
2.20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	30
2.21 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ.....	31
3.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al.....	32
3.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ.....	37
3.3 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอมทองคำ.....	38
3.4 ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น (ก) ภาพถ่ายของชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว (ข) ภาพถ่ายค่านบนของรอยสัมผัสสี่เหลี่ยม ที่สร้างเสร็จแล้ว.....	39
4.1 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดัน ของรอยสัมผัสสี่เหลี่ยม.....	41
4.2 ตัวอย่างลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสสี่เหลี่ยมของ โลหะอลูมิเนียมกับซิลิคอน ชนิดเอ็นที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่มีขนาดพื้นที่ $1 \times 1 \text{ mm}^2$ .....	42
4.3 ตัวอย่างลักษณะกระแส-แรงดันแบบกึ่งล็อกของรอยสัมผัสสี่เหลี่ยมของ โลหะอลูมิเนียม กับซิลิคอนชนิดเอ็นที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่มีขนาดพื้นที่ $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ซึ่งได้ กระแสรั่วไหล เท่ากับ $1 \times 10^{-7} \text{ A}$ .....	42
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลของสี่เหลี่ยมที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ.....	43
4.5 ตัวอย่างของสี่เหลี่ยมไดโอดที่สภาวะต่างๆ (ก) สภาวะที่ไม่ให้โพล (ข) สภาวะที่ให้โพลย้อนกลับ.....	44
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์สี่เหลี่ยมของรอยสัมผัสสี่เหลี่ยมที่ไม่ มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ.....	45
4.7 กราฟตัวอย่างการหาค่าความต้านทานอนุกรมของสี่เหลี่ยมไดโอด (ก) การหาค่า $\Delta V$ กราฟ $\ln(I)$ - $V$ ของไดโอด .....	46
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta V$ - $I$ .....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ค่าความต้านทานอนุกรมของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ไม่มี การเติมอะตอมทองคำและ ที่มีการเติมอะตอม ทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ..... 47
4.9	ตัวอย่างวิธีการหาค่าแฟลคเตอร์อุณหภูมิ จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{J}{J_0}\right)$ กับแรงดัน..... 48
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟลคเตอร์อุณหภูมิของชนิดกึ่งที่ไม่มี การเติมอะตอม ทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ..... 49
4.11	แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน..... 50
4.12	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ไม่มี การเติมอะตอม ทองคำ..... 51
4.13	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่มีการเติมอะตอมทองคำที่ อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 52
4.14	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่มีการเติมอะตอมทองคำที่ อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 53
4.15	แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ..... 54
4.16	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่ไม่มี การเติม อะตอมทองคำขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ..... 55
4.17	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอม ทองคำที่ อุณหภูมิ 1000 °C ที่เงื่อนไขเวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับ แสงตกกระทบ..... 56
4.18	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอม ทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เงื่อนไขเวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับ แสงตกกระทบ..... 57
4.19	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอม ทองคำเงื่อนไขในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 โวลต์..... 58
4.20	แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน..... 59

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21	ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในช่วง 5000 – 25,000 ลักซ์..... 60
4.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงต่างๆเมื่อมีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 61
4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงต่างๆของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 62
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและเวลาในแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM..... 63
4.25	ตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 20, 40 80, 100 และ 500 $\mu\text{m}$ ..... 64
4.26	ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ..... 65
4.27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 66
4.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 67
4.29	แผนภาพการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในสัญญาณแสงกระแสสลับ..... 68
4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ..... 69
4.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 70
4.32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 71
4.33	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด..... 72
4.34	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาการแพร่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด..... 73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาการแพร่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันทานโหลด..... 74
5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมสารเจือและเวลาที่ใช้ในการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ต่างๆ..... 78
5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมทองคำและเวลาในการแพร่เมื่อมีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ..... 79
5.3	ผลของรัทเทอร์ฟอร์ดเบ็คสแคตเตอร์ริงของซิลิคอนที่มาการเคลื่อนที่ด้านหลัง..... 80
5.4	ผลของรัทเทอร์ฟอร์ดเบ็คสแคตเตอร์ริงของซิลิคอนที่มีการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิห้องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 81
5.5	ผลของรัทเทอร์ฟอร์ดเบ็คสแคตเตอร์ริงของซิลิคอนที่มีการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ..... 82
5.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ..... 83
5.7	ลักษณะการตอบสนองทางแสง (ก) กระแสแสงไดโอด (ข) กระแสแสงคอนดักเตอร์ (ค) การตอบสนองทางแสงรวม..... 84
5.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำ..... 85
5.9	แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำ เมื่อได้รับไปอัสและมีแสงตกกระทบ..... 86

## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
ac	alternating current	กระแสสลับ
Al	Aluminium	อลูมิเนียม
Au	Gold	ทองคำ
dc	direct current	กระแสตรง
DI	De-ionization water	น้ำบริสุทธิ์
FET	Field Effect Transistor	ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานด้วยสนามไฟฟ้า
GaAs	Gallium Arsenide	แกเลียมอะไซด์
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
HNO <sub>3</sub>	Nitric acid	กรดไนตริก
MSM	Metal-Semiconductor-Metal	โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
RBS	Rutherford back scattering spectroscopy	รีทเทอร์ฟอร์ดแบ็คสแคตเตอริง
R-G center	Recombination-Generation center	ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่และเกิดใหม่
Si	Silicon	ซิลิคอน
SiO <sub>2</sub>	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์

## รายการสัญลักษณ์

$A$	คือ	พื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ
$C_A$	คือ	ความจุไฟฟ้าด้านแอนโนด
$C_C$	คือ	ความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด
$C_T$	คือ	ความจุไฟฟ้ารวม
$c$	คือ	อัตราการจัดยึด
$E_0$	คือ	ระดับสูญญากาศ
$E_A$	คือ	ระดับผู้รับ
$E_{A(Au)}$	คือ	ระดับผู้รับแบบลิท
$E_C$	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
$E_D$	คือ	ระดับผู้ให้
$E_{D(Au)}$	คือ	ระดับผู้ให้แบบลิท
$E_F$	คือ	ระดับเฟอร์มิ
$E_{FM}$	คือ	ระดับเฟอร์มิของโลหะ
$E_{FS}$	คือ	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
$E_g$	คือ	ช่องว่างพลังงาน
$E_{\text{photon}}$	คือ	พลังงานของโฟตอน
$E_t$	คือ	ระดับแทรมป
$E_v$	คือ	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
$e$	คือ	อัตราการจัดปล่อย
$f_c$	คือ	ความถี่คัทออฟ
$I_c$	คือ	กระแสคอนดักเตอร์
$I_d$	คือ	กระแสไดโอด
$I_{\text{dark}}$	คือ	กระแสมืด
$I_{MS}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
$I_{SM}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
$I_{\text{photo}}$	คือ	กระแสแสง
$I_{\text{total}}$	คือ	กระแสรวม
$J$	คือ	ความหนาแน่นกระแส
$K$	คือ	ค่าคงที่โบสค์มันน์

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$n$	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
$N_A$	คือ	อะตอมสารเจือผู้รับ
$N_{Au}$	คือ	ความหนาแน่นของอะตอมทองคำ
$N_D$	คือ	อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
$N_t$	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน $E_t$
$p$	คือ	ความหนาแน่นของโฮล
$q$	คือ	ประจุอิเล็กตรอน
$R$	คือ	ค่าคงที่ของริชาร์ดสัน
$R_L$	คือ	ความต้านทานโหลด
$R_s$	คือ	ความต้านทานในเนื้อสาร
$S$	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า
$V_A$	คือ	แรงดันไบอัส
$V_{bi}$	คือ	แรงดันภายใน
$V_{bi1}$	คือ	แรงดันภายในด้านขั้วแคโทด
$V_{bi2}$	คือ	แรงดันภายในด้านขั้วแอนโนด
$V_{th}$	คือ	ความเร็วของอิเล็กตรอน
$V_1$	คือ	แรงดันไบอัสขั้วแคโทด
$V_2$	คือ	แรงดันไบอัสขั้วแอนโนด
$T$	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
$U$	คือ	อัตราการรวมตัว
$W_A$	คือ	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอนโนด
$W_C$	คือ	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด
$W_D$	คือ	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ
$W_{D1}$	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด
$W_{D2}$	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอนโนด
$\mathcal{E}_s$	คือ	เปอร์มิตทิวิตีของสารกึ่งตัวนำ
$\mathcal{E}_0$	คือ	เปอร์มิตทิวิตีในสุญญากาศ

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\tau_n$	คือ	ช่วงอายุของอิเล็กทรอนิกส์
$\tau_p$	คือ	ช่วงอายุของโฮล
$\phi_{bn}$	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กทรอนิกส์
$\phi_{bn1}$	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ด้านขั้วแคโทด
$\phi_{bn2}$	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ด้านขั้วแอโนด
$\sigma$	คือ	ภาคตัดขวางการจับยึด
$\phi_M$	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_S$	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$\chi$	คือ	อิเล็กทรอนิกส์แอฟฟินิตี

# รายการคำศัพท์เทคนิค

## ภาษาไทย

กระบวนการรวมตัวใหม่  
กระบวนการเกิดใหม่  
กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง  
กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม  
กระบวนการปลดปล่อย  
กระบวนการยึดจับ  
กระแสมีด  
กระแสรั่วไหล  
กระแสแสง  
กระแสการรวมตัวและเกิดใหม่  
การส่องผ่านทางแสง  
การจำกัดเวลาการส่งผ่าน  
การดูดกลืนแบบแถบและสารเจือ  
การดูดกลืนแบบอินทรีนซิกจากแถบถึงแถบ  
กำแพงศักย์ช็อคกี  
กลไกการเคลื่อนที่แบบการแพร่  
กล่องป้องกันแสง  
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ  
ความต้านทานโหลดภายนอก  
ความยาวคลื่นคัทออฟ  
ความสูงของกำแพงศักย์  
ความหนาแน่นพาหะ  
ค่าคงที่ของเวลา  
ค่าเวลาช่วงชีวิต  
คู่อิเล็กตรอน-โฮล  
เครื่องระเหยโลหะด้วยความร้อนในสุญญากาศ

## ภาษาอังกฤษ

recombination process  
generation process  
direct recombination process  
indirect recombination process  
emission process  
capture process  
dark current  
leakage current  
photocurrent  
recombination-generation current  
transmittance  
transit-time-limited  
band and impurity absorption  
intrinsic band to band absorption  
Schottky barrier  
diffusion mechanism  
dark shield  
depletion width  
load resistance  
long wavelength cutoff  
barrier height  
carrier concentration  
time constant  
life time  
electron-hole pairs  
vacuum evaporator

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

### ภาษาไทย

เครื่องรับทางแสง  
จุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง  
ช่วงใกล้อินฟราเรด  
ช่องรับแสงเดี่ยว  
ช่องว่างแถบพลังงาน  
คีมอคูเลท  
ทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน  
นอร์มอลไรซ์  
บริเวณนิวทรัล  
บริเวณปลอดพาหะ  
แบนด์วิดท์  
ประสิทธิภาพควอนตัม  
ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก  
ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน  
จุดเชื่อมต่อ  
พาหะส่วนน้อย  
พาหะส่วนมาก  
ฟังก์ชันงาน  
โฟตอน  
โฟนอน  
โฟโตลิโธกราฟี  
โฟโตไดโอด  
ตัวตรวจวัดแสง  
รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ  
รอยสัมผัสแบบช็อดทกี  
รอยสัมผัสแบบโอมิก  
ระยะการแพร่

### ภาษาอังกฤษ

optical receiver  
half power point  
near infrared  
single slit  
energy band gap  
demodulate  
thermionic emission theory  
normalized  
neutral region  
depletion region  
bandwidth  
quantum efficiency  
external quantum efficiency  
internal quantum efficiency  
bonding pad  
minority carriers  
majority carriers  
work function  
photon  
phonon  
photolithography  
photodiode  
photodetector  
metal-semiconductor contact  
Schottky contact  
ohmic contact  
diffusion length

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

### ภาษาไทย

เรกติไฟร์  
แรงดันภายใน  
เวลาการแพร่  
เวลาส่งผ่าน  
ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่และเกิดใหม่  
สถานะผิว  
สภาพต้านทานไฟฟ้า  
สมบัติด้านแสง  
สัญญาณคลื่นรูปไซน์  
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
แสงในช่วงที่ตามองเห็น  
สารกึ่งตัวนำ  
สารกึ่งตัวนำชนิดพี  
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น  
สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง  
สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง  
สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก  
แหล่งจ่ายแสง  
ขั้วไฟฟ้า  
อิเล็กตรอน  
อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี  
อุปกรณ์ด้านแสง  
โฮล

### ภาษาอังกฤษ

rectifier  
built in voltage  
diffusion time  
transit time  
recombination-generation center  
surface state  
resistivity  
optical property  
sinusoidally waveform  
light absorption coefficient  
visible light  
semiconductor  
p-type semiconductor  
n-type semiconductor  
direct band gap semiconductor  
indirect band gap semiconductor  
intrinsic semiconductor  
light source  
electrode  
electron  
electron affinity  
optical devices  
hole

# บทที่ 1

## บทนำ

โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal structure) หรือโครงสร้าง MSM เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานทางด้านการตรวจวัดแสง มีคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ คือ มีกระแสมีดต่ำ สภาพการตอบสนองที่ดี การทำงานด้วยความเร็วสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวม ได้ง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ (planar) และกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟด (Field Effect Transistor : FET) จึงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ได้รับความสนใจอย่างมากตัวหนึ่ง และคาดว่าจะมีบทบาทมากในอนาคต

ในบทนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตของการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาแนร์ (planar Metal-Semiconductor-Metal photodetector) หรือโครงสร้าง MSM ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นโฟโตไดโอดชนิดหนึ่งประกอบด้วยกำแพงศักย์ช็อตคีย์ (Schottky barrier:  $\phi_{bs}$ ) ที่ปลายสุดทั้งสองด้าน ซึ่งต่อแบบหันหลังชนกัน [1] เป็นตัวตรวจวัดแสงที่ได้รับความสนใจอย่างมากตัวหนึ่ง และคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในอนาคตอันใกล้นี้ เพราะมีจุดเด่นหลายประการ เช่น มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำทำให้มีการตอบสนองสัญญาณที่ความถี่สูง หรือ มีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ที่สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ถึงแม้ว่าในขณะนี้โครงสร้าง MSM โดยส่วนมากนิยมใช้สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบที่อยู่ในกลุ่ม III-V เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ (GaAs) [2 - 3] หรือ อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์ (InGaAs) [4] เพื่อต้องการใช้งานด้านความถี่สูง แต่ในขณะนี้เทคโนโลยีซิลิคอน (Si) มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก การเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนเพื่อสร้างเป็นโครงสร้าง MSM จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจ ซึ่งซิลิคอนสามารถตอบสนองในช่วงแสงที่ตามองเห็น คือ 400-700 นาโนเมตร ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากมาย และที่สำคัญยังมีราคาถูกกว่าการสร้างขึ้นจากสารประกอบกลุ่ม III-V ดังนั้นในการศึกษานี้จึงนำเสนอตัวตรวจวัดแสงที่มีสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนและโลหะที่ใช้เป็นออลูมิเนียม (Al) ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนโดยใช้เทคโนโลยีซิลิคอนที่รู้จักกันดี และมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้สร้างเป็นวงจรรวมต่อไปในอนาคต

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา เช่น การศึกษาวิจัยโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีอิเล็กโทรด (electrode) แบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit) และ การศึกษาวิจัยโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิตเชิงซึ่งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมานี้ [5 - 7] โดยส่วนใหญ่จะเป็นการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ให้มีกระแสแสงที่สูงขึ้น แต่จะพบว่าการตอบสนองต่อความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM จะมีค่าความถี่คutoffอยู่ในช่วง 1-2 MHz ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะพัฒนาการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ให้มีค่าสูงขึ้นกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มค่าความถี่คutoffของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM โดยจะใช้ตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีอิเล็กโทรด แบบช่องรับแสงเดี่ยว ซึ่งในการเพิ่มค่าความถี่คutoffของตัวตรวจวัดแสงนี้จะทำการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองที่ป็นซิลิคอน ด้วยวิธีการแพร่ที่อุณหภูมิสูง โดยอะตอมทองคำที่เข้าไปในซิลิคอนจะทำให้เกิดพลังงานระดับลึก (deep level) ขึ้นในแถบช่องว่างพลังงานของซิลิคอน ซึ่งพลังงานระดับลึกนี้จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวและเกิดใหม่ (recombination – generation center) ซึ่งจะทำให้อายุของพาหะข้างน้อยมีค่าลดลง ทำให้ค่าความถี่คutoffมีค่าสูงขึ้น [8 - 12]

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM โดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นและโลหะอลูมิเนียม ซึ่งทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกี ทั้งนี้ เนื่องจากซิลิคอนและอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก และสร้างด้วยเทคโนโลยีซิลิคอนที่มีความแพร่หลาย
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น ด้วยวิธีการแพร่ที่อุณหภูมิสูง และเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่แตกต่างกัน
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อคกีของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น ในลักษณะของสัญญาณกระแสตรง (dc signal)
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น ในลักษณะของสัญญาณกระแสตรง (dc optical signal) และสัญญาณกระแสสลับ (ac optical signal)

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

พลังงานระดับลึก หรือ ระดับพลังงานการรวมตัวและเกิดใหม่ เป็นระดับพลังที่เกิดขึ้นภายในแถบช่องว่างพลังงาน โดยสถานะพลังงานจะอยู่ห่างจากขอบของแถบพลังงานมากกว่า  $3kT$  ซึ่งพลังงานระดับลึกอาจจะเกิดจากอะตอมสิ่งปนเปื้อนภายในสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะธาตุที่เป็นโลหะทรานซิชัน หรืออาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ซึ่งคุณสมบัติของระดับพลังงานนี้ จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการจับ (trap center) หรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) จากคุณสมบัติของพลังงานระดับลึกนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะทำการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งคุณสมบัติของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนจะทำให้เกิดพลังงานระดับลึกขึ้น และทองคำยังสามารถหาได้ง่ายกว่าโลหะชนิดอื่นๆ โดยระดับพลังงานที่จะเกิดขึ้นเมื่อทำการแพร่อะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนเกิดขึ้นจะมี 2 ระดับ คือ พลังงานระดับลึกที่มีลักษณะคล้ายระดับพลังงานผู้รับ (deep acceptor level) ซึ่งจะอยู่ต่ำกว่าแถบความนำ  $0.54 \text{ eV}$  และอีกระดับพลังงานที่เกิดขึ้นก็คือ พลังงานระดับลึกที่มีลักษณะคล้ายระดับพลังงานผู้ให้ (deep donor level) ซึ่งจะอยู่สูงกว่าแถบวาเลนซ์  $0.35 \text{ eV}$  [8 – 18]

จากการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนนี้ จะทำให้เกิดผลกระทบทางไฟฟ้ากับซิลิคอนขึ้น สามารถแบ่งออกได้ 2 ประการ [15] คือ

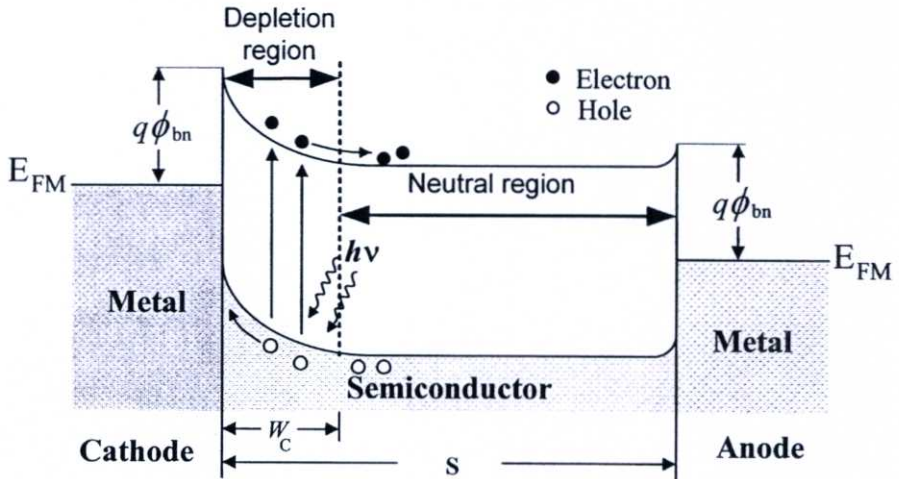
- ทำให้สภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น
- ทำให้ช่วงชีวิตของประจุพาหะข้างน้อย (minority carrier lifetime) มีค่าลดลง

และจากคุณสมบัติของอะตอมทองคำที่ทำให้อายุของพาหะข้างน้อยมีค่าลดลงนี้ ผู้วิจัยมีความคาดหวังว่าจะสามารถลดช่วงอายุของพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ในขณะที่ได้รับแสง โดยผลที่ได้น่าจะทำให้การตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้น และจากคุณสมบัติในการลดอายุของพาหะนี้ ผู้วิจัยจึงคิดว่าการเพิ่มจำนวนอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอน ก็จะทำให้อายุของพาหะยังมีค่าลดน้อยลงตามจำนวนอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากโครงสร้างแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีขั้วโลหะ ซึ่งสร้างจากอลูมิเนียม และสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น ดังรูปที่ 1.1 จากรูปเมื่อโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ได้รับแสงแล้ว จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น โดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกกระเด็นไปยังแถบความนำ โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโนด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทด ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกไปภายนอกอุปกรณ์ แต่เนื่องจากระยะห่างระหว่างขั้วของ

ตัวตรวจวัดแสงเป็นแบบกว้าง (wide electrode gap MSM) จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้ววาโนดจะเกิดการรวมตัวกันในส่วนนิวทรัล ดังนั้นกระแสที่ไหลออกไปภายนอกอุปกรณ์ จึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยของตัวตรวจวัดแสงที่มีสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น [5 – 7, 18]



รูปที่ 1.1 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับ โฟตอนและมีแสงตกกระทบ

จากคุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ เมื่อทำการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น พลังงานระดับลึกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่ลดช่วงอายุของพาหะข้างน้อยของตัวตรวจวัดแสง นั่นก็คือโฮลนั่นเอง โดยช่วงอายุของพาหะข้างน้อยจะมีค่าเท่ากับ สมการที่ 1.1 คือ [11, 12, 15 - 18]

$$\tau_p = \frac{1}{v_p \sigma_p^- N_{Au}} \quad (1.1)$$

- โดยที่  $\tau$  คือ เวลาช่วงชีวิตของพาหะ (carrier lift time :  $\text{sec}^{-1}$ )  
 $\sigma$  คือ ภาคตัดขวางการยึดจับ (capture cross section :  $\text{cm}^2$ )  
 $v$  คือ ความเร็วของพาหะ (thermal velocity :  $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ )  
 $N_{Au}$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมทองคำ (gold concentration :  $\text{cm}^{-3}$ )

จากการที่อายุของพาหะข้างน้อยมีค่าลดลงจะส่งผลทำให้การตอบสนองความถี่มีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 1.1 พบว่าเมื่อความหนาแน่นของอะตอมทองคำมีค่ามากขึ้น ก็จะทำให้ช่วงอายุของพาหะข้างน้อยมีค่าลดลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนอะตอม

ทองคำที่เข้าไปในซิลิคอน โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ โดยคาดว่าเมื่อเพิ่มจำนวนอะตอมทองคำให้มากขึ้น ก็จะได้ตัวตรวจวัดแสงที่สามารถตอบสนองความถี่ที่ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) ที่สูงขึ้นได้

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al และชนิด Al/n-Si(Au doped)/Al เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำ โดยโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่ได้ทำการสร้างจะเป็นแบบ MSM ที่มีลักษณะแบบช่องรับแสงเดี่ยว ที่มีขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  โดยสารกึ่งตัวนำที่ใช้จะใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) สภาพต้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร และจะทำการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น โดยทำการเคลือบทองคำด้านหลังแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ และทำการแพร่อะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนด้วยวิธีการแพร่ที่อุณหภูมิสูงพร้อมทั้งใช้เทคนิคการ quenching เพื่อให้อะตอมทองคำแทรกตัวอยู่ในซิลิคอนได้ [9] โดยจะทำการแพร่ที่อุณหภูมิ 1000 และ 1050 องศาเซลเซียส และใช้การแพร่อะตอมทองคำที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิในการแพร่อะตอมทองคำทั้งสองอุณหภูมิ และเมื่อทำการสร้างขั้วลุ่มิเนียมบนซิลิคอนแล้ว ในลำดับต่อไปจะทำการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งก็คือ ค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ), กระแสรั่วไหล ( $I_0$ ), แฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ), กำแพงศักย์ชนิดกึ่ง ( $\phi_{bn}$ ) และจะทำการวัดผลตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al และชนิด Al/n-Si(Au doped)/Al ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรงจะวัดในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ส่วนผลตอบตอบสนองทางความถี่จะวัดในสัญญาณแสงกระแสกลับและพิจารณาเป็นค่าแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต (output) เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุต (input) จากนั้นจึงนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติของอะตอมทองคำที่มีผลต่อตัวตรวจวัดแสง

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทํางานของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทํางานของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si (Au doped)/Al
3. ศึกษากระบวนการสร้าง และสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบช่องรับแสงเดี่ยว

4. ศึกษากระบวนการสร้าง และสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si (Au doped)/Al แบบช่องรับแสงเดี่ยว
5. ศึกษาสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง วิจารณ์ผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al และชนิด Al/n-Si (Au doped)/Al
6. ศึกษาผลตอบสนอง วิเคราะห์ผลการทดลอง เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al และชนิด Al/n-Si (Au doped)/Al ในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และผลตอบสนองทางความถี่
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลองของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si (Au doped)/Al ที่เงื่อนไขในการแพร่อะตอมทองคำต่างๆ

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงความจำเป็นมาของตัวตรวจวัดแสง และความสำคัญของงานวิจัยที่ได้ศึกษา หัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ที่ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al และชนิด Al/n-Si (Au doped)/Al สมมติฐาน และแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนสุดท้ายคือขอบเขตของงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีของทองคำ พลังงานระดับลึกของอะตอมทองคำ รอยสัมผัสชนิดกึ่งและตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ทฤษฎีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่เป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่ง ในภาวะสมดุลความร้อนและเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ซึ่งเป็นพื้นฐานของโครงสร้าง MSM รวมถึงโครงสร้างและการทำงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

บทที่ 3 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al และชนิด Al/n-Si (Au doped)/Al

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะกล่าวถึงผลทดลองเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น กำแพงศักย์ชนิดกึ่ง ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน เป็นต้น และลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และผลการทดลองลักษณะสมบัติทางแสงในกรณีที่ถูกกระตุ้นแสงแบบกระแสตรง และแบบกระแสสลับ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น

บทที่ 5 การวิเคราะห์และการอภิปรายผลการทดลอง จะเป็นวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำในซิลิคอนชนิดอื่นด้วยวิธีของความจุไฟฟ้า-แรงดัน ศึกษาผลของอะตอมทองคำที่เข้าไปในซิลิคอนด้วยวิธีเทอร์มอร์ฟอร์ดแบ็คสแคตเตอริง และผลการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ [8 – 19]

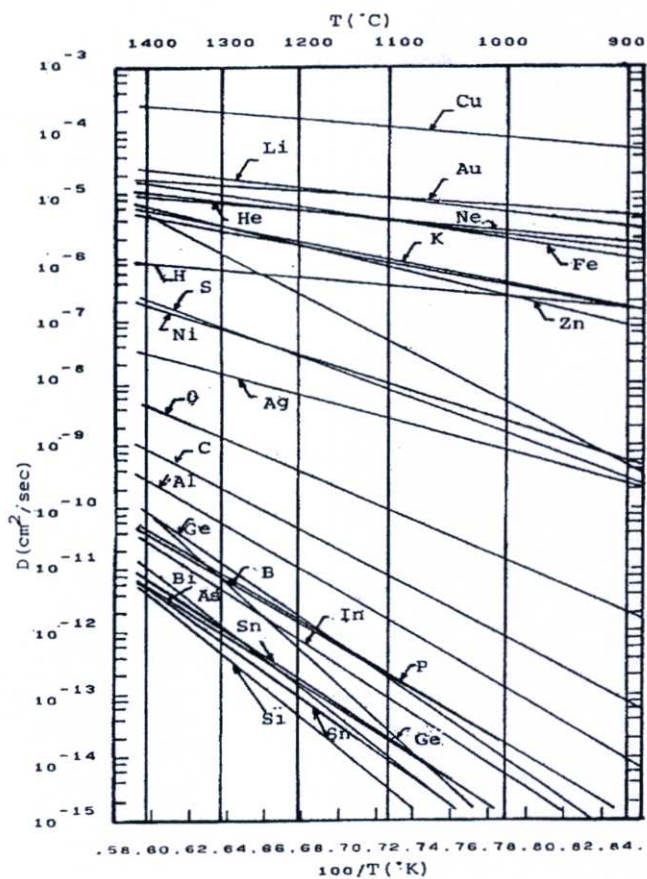
ในปัจจุบันนี้ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งได้มีการพัฒนาให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีการตอบสนองในช่วงความถี่ (frequency response) ที่สูงขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงที่จะสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ที่มีความสามารถในการตอบสนองทางความถี่ได้สูงๆ ซึ่งการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ก็เป็นวิธีหนึ่ง เพื่อเพิ่มความสามารถในการตอบสนองทางความถี่ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติทางฟิสิกส์ของอะตอมทองคำ และสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

##### 2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของทองคำและซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

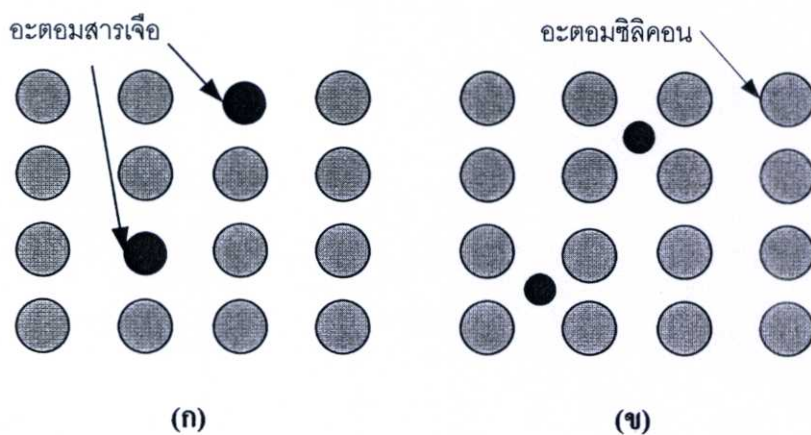
ทองคำเป็นอะตอมธาตุโลหะที่มีสมบัติ ดังนี้

- มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 1 และ 3 ตัว
- อะตอมมิกนัมเบอร์เท่ากับ 79
- มีจุดหลอมเหลว (melting point) ที่อุณหภูมิ 1063 °C
- มีจุดเดือด (boiling point) ที่อุณหภูมิ 2970 °C
- มีความหนาแน่น (density) เท่ากับ 19.3 g/ml
- น้ำหนักเฉลี่ย (atomic weight) เท่ากับ 196.967 (ใช้ carbon-12 เป็นมาตรฐาน)
- Oxidation state มีค่าเท่ากับ 3.1
- ความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนของธาตุ (electronegativity) มีค่าเท่ากับ 2.4
- ค่าสภาพต้านทาน (resistivity) ของทองคำบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 0, 20 °C และที่จุดหลอมเหลวจะมีค่า 2.06, 2.125 และ 13.68  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$  ตามลำดับ

ทองคำเป็นสารเจือระดับลึก (deep impurity) ที่สำคัญในซิลิคอนทั้งนี้เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) สูงคือ ประมาณ  $2.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$  ที่อุณหภูมิ 1300 °C ดังรูปที่ 2.1 ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณของทองในซิลิคอนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิอะตอมทองคำจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (interstitial) ของซิลิคอน โดยไม่มีพันธะใดๆ ยึดกับอะตอมซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) อัตราการแพร่ชนิดนี้จะเร็วกว่าอัตราการแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (substitutional diffusion) ดังรูปที่ 2.2 (ก)



รูปที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำในซิลิคอน



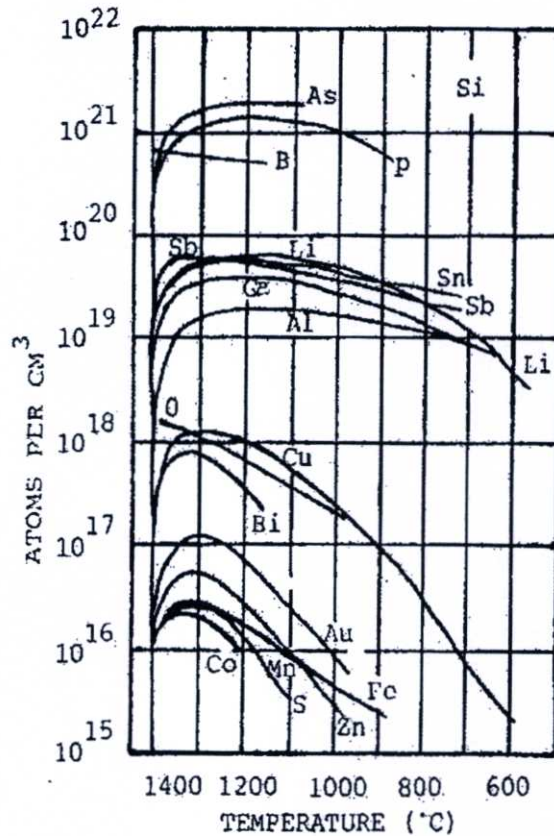
รูปที่ 2.2 ลักษณะการแพร่ของอะตอมสารเจือในซิลิคอน

(ก) การแพร่แบบเข้าไปแทนที่

(ข) การแพร่แบบเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม

เมื่ออะตอมทองคำแพร่เข้าไปในซิลิคอนจะไปควบคุมช่วงอายุและสภาพต้านทาน ทั้งชนิดเอ็นและพี กล่าวคือจะทำให้อายุพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมีค่าลดลง เราจึงเรียกทองคำว่าเป็น “carrier lifetime killer” และสามารถนำมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์พวกความเร็วสูง เช่น สวิตซ์ซิงโครตรอน และวงจรรวมดิจิทัลแบบต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

สำหรับค่าความสามารถในการละลาย (solid solubility) ของอะตอมทองคำในซิลิคอนจะมีค่าสูงสุดประมาณ  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการละลายได้ในซิลิคอนของสารเจือเมื่ออุณหภูมิมีค่าต่างๆ

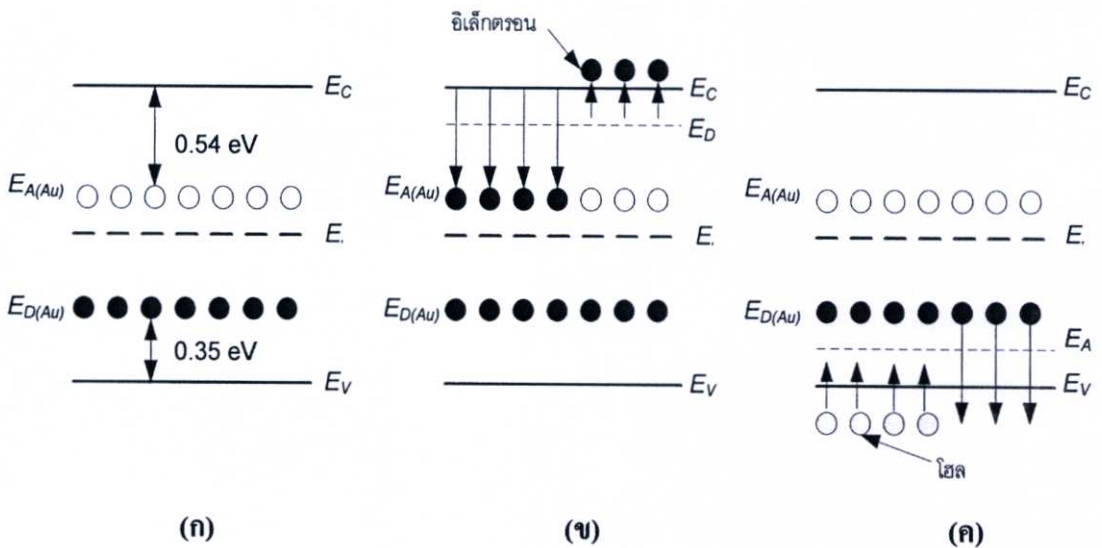
### 2.1.2 สภาพต้านทานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

ในซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกเมื่อถูกแพร่ด้วยทองคำจะทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นมา 2 ระดับ ซึ่งได้แก่ ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก (deep acceptor level) และ ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก (deep donor level) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.4 (ก)

ในซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำตกลงมาในระดับพลังงานผู้รับแบบลึก ซึ่งอยู่ห่างจากแถบความนำลงมาประมาณ 0.54 eV ดังรูปที่ 2.4 (ข) หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือ อิเล็กตรอนในแถบความนำจะถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับแบบ

ลึกลง คือเกิดปรากฏการณ์ซัดเซซ ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบความนำลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงเพิ่มขึ้น เมื่อให้ปริมาณอะตอมของทองคำมากขึ้นก็จะทำให้มีระดับพลังงานผู้รับแบบลึกลงมากขึ้น ซึ่งมีจำนวนมากพอที่จะจับอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำได้เกือบหมด ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าสูงมากขึ้นจนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก แต่หากยังเพิ่มปริมาณของอะตอมทองคำขึ้นอีก ค่าสภาพต้านทานจะลดลง ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยมีพาหะอิสระส่วนใหญ่เป็นโฮล

สำหรับซิลิคอนชนิดพีเมื่อถูกแพร่ด้วยทองคำจะทำให้เกิดระดับพลังงานที่เรียกว่าระดับพลังงานผู้ให้แบบลึกลง ซึ่งอยู่ห่างจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปประมาณ 0.35 eV โดยจะอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มี (fermi level) ดังนั้นอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานผู้ให้แบบลึกลง จะรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ทำให้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2.4 (ก) แต่หากยังเพิ่มปริมาณของอะตอมทองคำจนกระทั่งโฮลในแถบวาเลนซ์ถูกรวมตัวเกือบหมด ส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าสูงมากขึ้นจนกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก แต่หากยังเพิ่มปริมาณของอะตอมทองคำให้มากขึ้น ค่าสภาพต้านทานจะลดลง ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยมีพาหะอิสระส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน

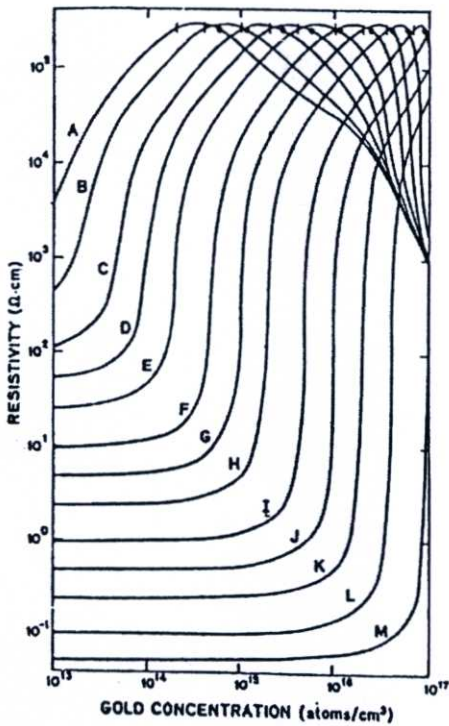


รูปที่ 2.4 ระดับพลังงานของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ

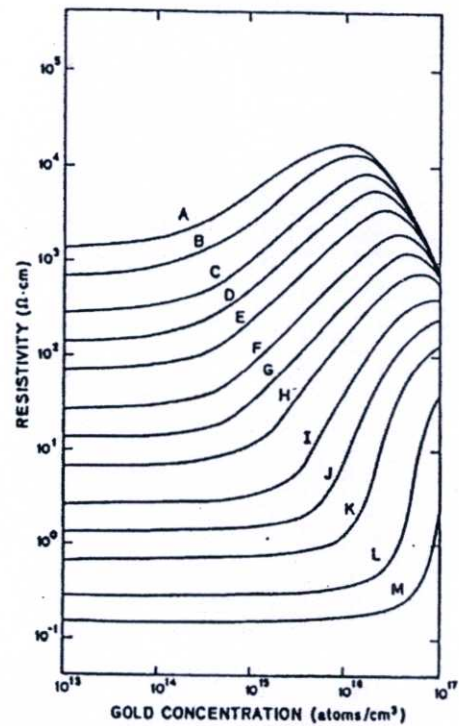
(ก) ซิลิคอนบริสุทธิ์

(ข) ซิลิคอนชนิดเอ็นซึ่งอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมทองคำ

(ค) ซิลิคอนชนิดพีอะตอมสารเจือมากกว่าอะตอมทองคำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิคัดความต้านทานกับค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำ

(ก) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) สารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ มีค่าต่างๆ ดังนี้

$$A = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}, B = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}, C = 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}, D = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}, E = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}, F = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}, G = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, H = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, I = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, J = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}, K = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}, L = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}, M = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

และเนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ชดเชยในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ จะทำให้ความหนาแน่นของพาหะลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานจำเพาะที่อุณหภูมิห้อง กับความหนาแน่นของอะตอมทองคำ ที่ถูกแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น และพี แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

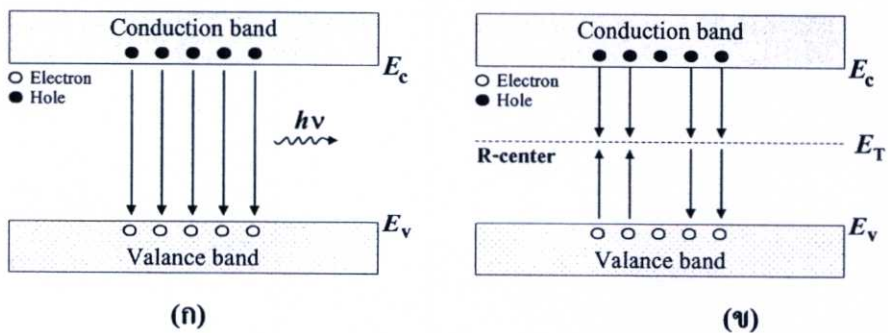
## 2.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล [21 – 24]

การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับ

โฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะ คือ โฮล และอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลตทิซ (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่ และการเกิดของพาหะ สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก [6, 7] คือ

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือโฟตอนได้ง่าย

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือ หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด



รูปที่ 2.6 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบโดยตรง

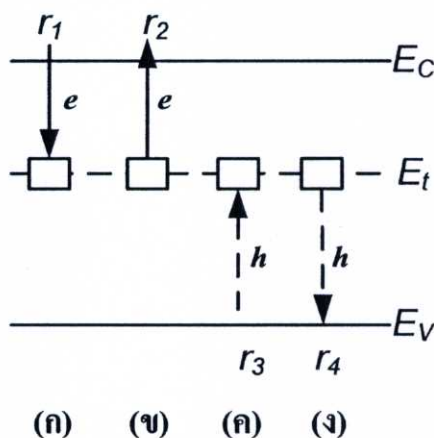
(ข) แบบโดยอ้อม

### 2.2.1 กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการรวมตัวแบบอ้อม เนื่องจากการเติมอะตอมของค่าเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น จะทำให้เกิดศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะเกิดขึ้น โดยเป็นการพิจารณาถึงกระบวนการจับยึด และการรวมตัวแบบการรวมตัวแบบ Shockley-Read-Hall

#### 2.2.1.1 กระบวนการการจับยึด

สำหรับสารเจือขั้วลึกลงนั้น จะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว เมื่อมีความหนาแน่นของพาหะมากในสารกึ่งตัวนำ และจะเป็นศูนย์กลางการเกิดใหม่เมื่อความหนาแน่นของพาหะมีน้อยกว่าจำนวนความหนาแน่นของพาหะในสภาวะสมดุล ซึ่งในหัวข้อนี้ จะเป็นการพิจารณาถึงกลไกการทำงานของศูนย์กลางการรวมตัว หรือ ศูนย์กลางการดักจับ จากการพิจารณาสารเจือขั้วลึกลึที่มีระดับพลังงาน  $E_t$  มีความหนาแน่นของพาหะเป็น  $N_t$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) กระจายอย่างต่อเนื่องในสารกึ่งตัวนำ ค่า  $n$  และ  $p$  เป็นค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮล ซึ่งเกิดจากสารเจือแบบดัดัน แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการจับยึดและกำเนิดของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง  $E_t$

- (ก) กระบวนการจับอิเล็กตรอน
- (ข) กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน
- (ค) กระบวนการจับโฮล
- (ง) กระบวนการปลดปล่อยโฮล

จากรูปที่ 2.7 กระบวนการจับยึดและการเกิดของอิเล็กตรอนและโฮลที่ตำแหน่ง  $E_t$  จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี คือ

## (ก) กระบวนการจับอิเล็กตรอน

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนจากแถบความนำเคลื่อนย้ายไปยังระดับพลังงาน แทรป ซึ่งอัตราการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนลงมาที่ระดับพลังงานแทรป จะมีค่าขึ้นอยู่กับ

- (1) จำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำ
- (2) จำนวนความหนาแน่นสถานะของระดับพลังงานแทรป (density of impurity localized state)  $[N_i(1 - f(E_i))]$
- (3) ความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอนที่จะผ่านเข้าไปในสถานะของระดับพลังงานแทรป ( $E_i$ )

ความน่าจะเป็นต่อหนึ่งหน่วยเวลา (probability per unit time) ที่อิเล็กตรอนจะถูกจับที่ localized state มีค่าเท่ากับ  $v_{th}\sigma_n$  เมื่อ  $v_{th}$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน (thermal velocity) ของอิเล็กตรอน และ  $\sigma_n$  คือ ภาคตัดขวางการจับยึด (capture cross section) ดังนั้นจะได้ผลรวมอัตราการจับอิเล็กตรอนที่สถานะแทรป (total rate of capture of electron by localized state) ดังสมการที่ (2.1)

$$r_1 = n\{N_i[1 - f(E_i)]\}v_{th}\sigma_n \quad (2.1)$$

## (ข) กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน

เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายจากระดับพลังงานแทรปไปยังแถบความนำ โดยอัตราการเคลื่อนย้าย ดังสมการที่ (2.2)

$$r_2 = [N_i f(E_i)]e_n \quad (2.2)$$

เมื่อ  $e_n$  คือ ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อย (emission probability of electron) และ ที่สภาวะสมดุลความร้อน

$$r_1 = r_2$$

$$n\{N_i[1 - f(E_i)]\}v_{th}\sigma_n = [N_i f(E_i)]e_n \quad (2.3)$$

จาก  $n = n_i \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right)$  และ  $f(E_i) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_i - E_f}{kT}\right)}$

จะได้ว่า 
$$e_n = v_{th}\sigma_n n_i \exp\left(\frac{E_i - E_f}{kT}\right) \quad (2.4)$$

## (ค) กระบวนการจับโฮล

เป็นกระบวนการจับโฮลจากแถบวาเลนซ์มายังระดับพลังงานแตรป หรือเป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานแตรปเคลื่อนย้ายไปจับกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งอัตราการจับโฮลจะมีค่าขึ้นอยู่กับ

- (1) ความหนาแน่นของสถานะที่ถูกครอบครองด้วยอิเล็กตรอน (density of localized state occupied by electron)
- (2) ความหนาแน่นของโฮล (density of hole)
- (3) ความน่าจะเป็นในการส่งผ่านต่อหนึ่งหน่วยเวลา (transition probability per unit time)

ดังนั้น 
$$r_3 = [N_t f(E_t)] \rho v_{th} \sigma_p \quad (2.5)$$

## (ง) กระบวนการปลดปล่อยโฮล

เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังสถานะว่าง (empty localized state)

$$r_4 = \{N_t [1 - f(E_t)]\} e_p \quad (2.6)$$

และที่สภาวะสมดุลความร้อน

$$r_3 = r_4$$

จะได้ว่า 
$$e_p = v_{th} \sigma_p n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \quad (2.7)$$

## 2.2.1.2 การรวมตัวแบบ Shockley-Read-Hall

เป็นการอธิบายการเกิด และการรวมตัว ของพาหะอิสระผ่านระดับพลังงานที่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัว

โดยที่อัตราการรวมตัว (net rate of recombination) ภายได้สภาวะไม่สมดุลในกระบวนการที่เป็น low level excitation ดังสมการที่ 2.8

$$U = R_{sp} - G_{sp} = r_1 - r_2 = r_3 - r_4 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $R_{sp}$  คือ อัตราการรวมตัว (spontaneous recombination rate)  
 $G_{sp}$  คือ อัตราการเกิดใหม่ (spontaneous generation rate)

แทนค่า  $r_1, r_2, r_3$  และ  $r_4$  ลงในสมการที่ 2.8 จะได้ว่า

$$U = \frac{N_t v_{th} \sigma_n \sigma_p (pn - n_i^2)}{\sigma_p \left[ p + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right] + \sigma_n \left[ n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right]} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\tau_{n0} = \frac{1}{N_t v_{th} \sigma_n}$  และ  $\tau_{p0} = \frac{1}{N_t v_{th} \sigma_p}$  จะได้ว่า

$$U = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{n0} \left[ p + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right] + \tau_{p0} \left[ n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right]} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10

- ถ้า  $U$  มีค่าเป็นบวก แสดงว่ามีการรวมตัวเกิดขึ้น (net recombination) โดยจะเกิดขึ้น

ในกรณีของไบอัสตรง

- ถ้า  $U$  มีค่าเป็นลบ แสดงว่าเกิดการเกิดใหม่ขึ้น (net generation) ซึ่งจะเกิดในกรณีของ

ไบอัสย้อนกลับ

### 2.2.1.3 การควบคุมช่วงอายุของพาหะด้วยอะตอมทองคำ

เมื่อพิจารณาซิลิคอนชนิดเอ็น  $N_D \gg N_A$  ที่มีการเติมอะตอมทองคำ จะทำให้ระดับพลังงานผู้รับแบบลึกของอะตอมทองคำ ซึ่งมีประจุเป็นกลาง ( $N_{Au}^0$ ) เมื่อไม่มีการครอบครองอิเล็กตรอน และเมื่ออิเล็กตรอนถูกจับ ทำให้ระดับพลังงานดังกล่าวมีประจุเป็นลบ ( $N_{Au}^-$ ) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการจับโฮล (hole trapping) จะทำให้ค่าเวลาช่วงชีวิตของโฮล ( $\tau_p$ ) ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยมีค่าลดลง ดังสมการที่ 2.11

$$\tau_p = \frac{1}{v_p \sigma_p^- N_{Au}} \quad (2.11)$$

และเมื่อพิจารณาซิลิคอนชนิดพี  $N_A \gg N_D$  ที่มีการเติมอะตอมทองคำ จะทำให้ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึกของอะตอมทองคำ ซึ่งมีประจุเป็นกลาง ( $N_{Au}^0$ ) เมื่อไม่มีการครอบครองโฮล และเมื่อโฮลถูกจับ ทำให้ระดับพลังงานดังกล่าวมีประจุเป็นลบ ( $N_{Au}^+$ ) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการจับ

อิเล็กตรอน (electron trapping) จะทำให้ค่าเวลาช่วงชีวิตของอิเล็กตรอน ( $\tau_n$ ) ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยมีค่าลดลง ดังสมการที่ 2.12

$$\tau_p = \frac{1}{v_n \sigma_n^+ N_{Au}} \quad (2.12)$$

โดยที่  $\tau$  คือ ค่าเวลาช่วงชีวิตของพาหะ  
 $\sigma$  คือ ภาคตัดขวางการยึดจับ  
 $v$  คือ ความเร็วของพาหะ  
 $N_{Au}$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมทองคำ

และค่าภาคตัดขวางการยึดจับของอิเล็กตรอนและโฮลในซิลิคอนที่มีการเติมอะตอมทองคำสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ภาคตัดขวางการจับยึดของอะตอมทองคำในซิลิคอนที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

Acceptor Level		Donor Level	
$\sigma_n^0$ (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_p^-$ (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_p^0$ (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n^+$ (cm <sup>2</sup> )
$1.7 \times 10^{-16}$	$1.1 \times 10^{-14}$	$2.4 \times 10^{-15}$	$6.5 \times 10^{-15}$

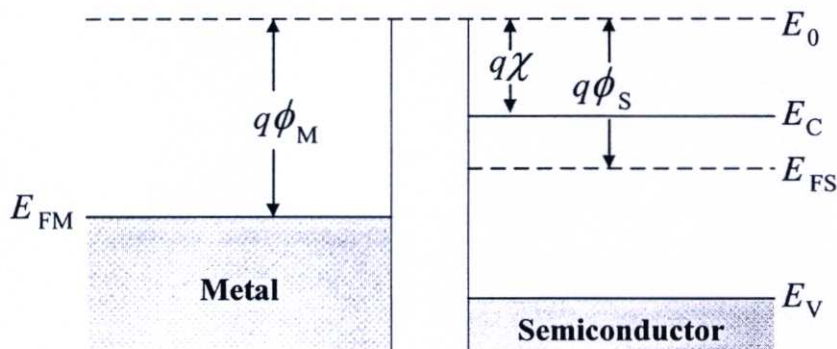
## 2.3 รอยสัมผัสชนิดกึ่ง [14]

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรอยสัมผัสชนิดกึ่ง เนื่องจากโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM เป็นโครงสร้างที่เกิดจากรอยสัมผัสชนิดกึ่งหันหลังชนกัน เพราะฉะนั้นในการศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสง จึงจำเป็นต้องศึกษารอยสัมผัสชนิดกึ่งด้วย เนื่องจากสมบัติชนิดกึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM

### 2.3.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.8 ระดับสุญญากาศ (vacuum level :  $E_0$ ) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่าง

สารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศนี้นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสขั้ว

ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มี (fermi level :  $E_{FM}$ ) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มีและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ เขียนแทนด้วย  $\phi_M$  มีค่าดังสมการที่ 2.13 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น อลูมิเนียม มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 4.3 eV เป็นต้น ซึ่งหาได้จาก

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (2.13)$$

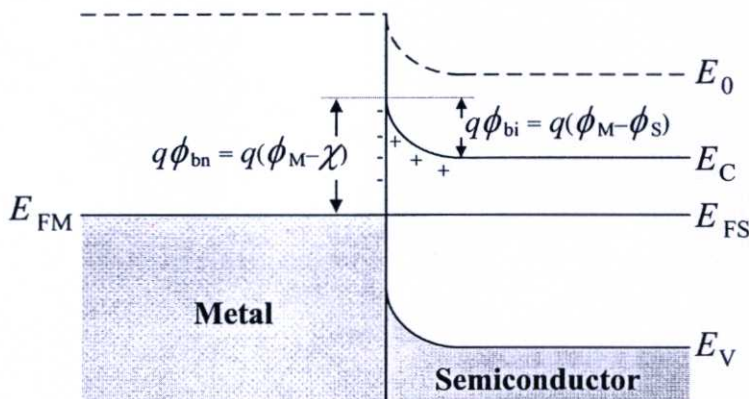
ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มีจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน ( $E_i$ ) และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย  $\phi_S$  มีค่าเท่ากับความต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มี ดังสมการที่ 2.14

$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \quad (2.14)$$

ส่วนค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ( $E_{FS}$ ) เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity :  $\chi$ ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.01 eV

การเกิดรอยสัมผัสขั้วระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $q\phi_M > q\phi_S$ ) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มีของโลหะ จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุณหพลศาสตร์มีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตก

คร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D^+$ ) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier :  $V_{bi}$ ) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.15

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_s) \quad (2.15)$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ชนิดกึ่ง (Schottky barrier :  $\phi_{bn}$ ) มีค่าดังสมการที่ 2.16 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ชนิดกึ่งต่างๆกัน

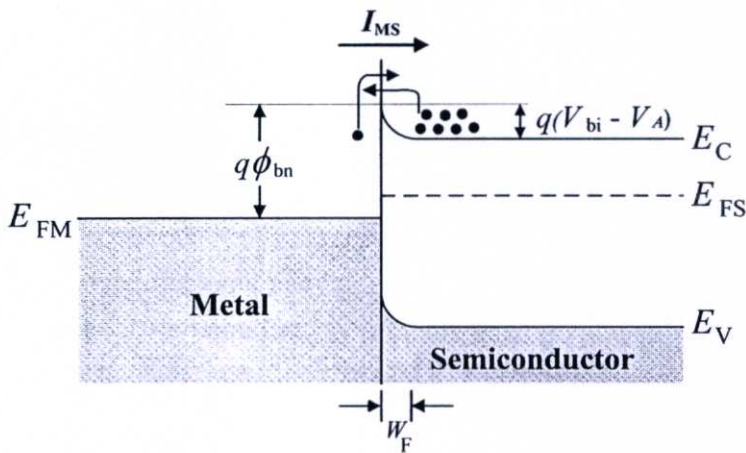
$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.16)$$

### 2.3.2 รอยสัมผัสชนิดกึ่งจะได้รับแรงดันไบอัส

#### 2.3.2.1 รอยสัมผัสชนิดกึ่งจะได้รับแรงดันไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส ( $V_a$ ) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.10 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายใน ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น ( $V_{bi}-$

$V_A$ ) และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้น อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคติย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงศักย์ช็อคติย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ 2.17



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่รอยสัมผัส ( $\text{cm}^2$ )

$R$  คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า  $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$  (n-Si) [14]

$\phi_{bn}$  คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคติย์

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

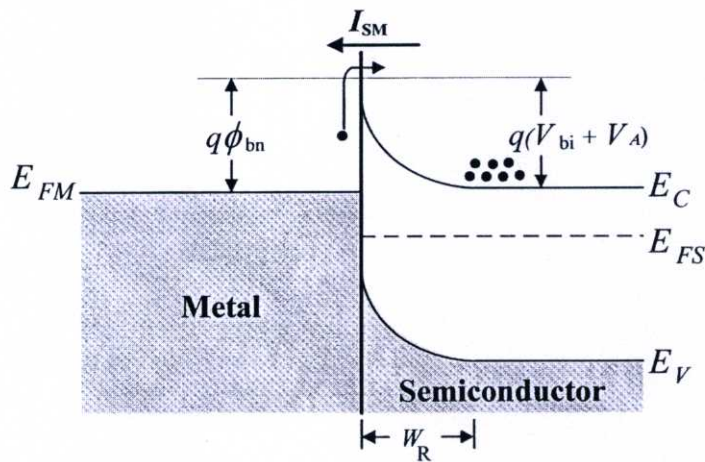
$k$  คือ ค่าคงที่โบสตันน์ มีค่าเท่ากับ  $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$W_F$  คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

### 2.3.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $-V_A$ ) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $(V_{bi} + V_A)$  และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคติจี้เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล



รูปที่ 2.11 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ ( $I_R$ ) มีค่าดังสมการที่ 2.18

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.18)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่รอยสัมผัส ( $\text{cm}^2$ )

$R$  คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า  $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$  (n-Si)

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

$\phi_{bn}$  คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคติจี้

$k$  คือ ค่าคงที่โบสตันน์ มีค่าเท่ากับ  $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

$W_R$  คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width :  $W_D$ ) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ 2.19 โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.19)$$

โดยที่  $\epsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

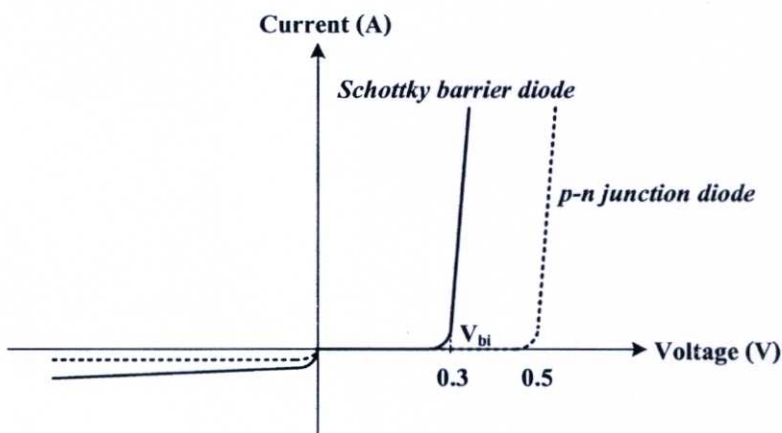
$q$  คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C

$N_D$  คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

### 2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดซีคกี

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสเรกติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น คือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าแรงดันภายในของซีคกีไดโอดมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็นที่มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V และเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนกระแสรั่วไหลของซีคกีไดโอดมีค่าสูงกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีคกีไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

### 2.3.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกี

ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13-จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ มีค่าดังสมการที่ 2.20 คือ

$$C = \frac{A\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.20)$$

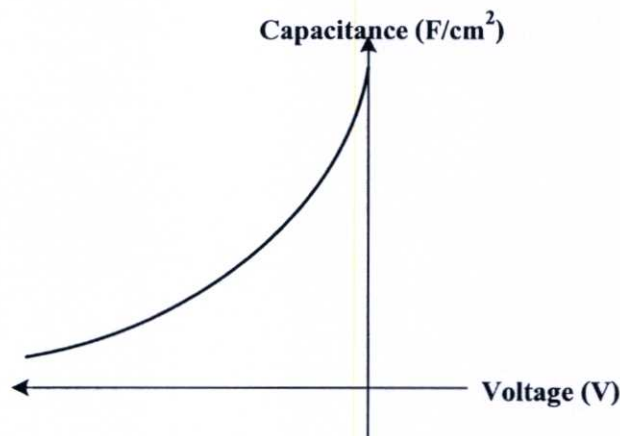
โดยที่  $\epsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C

$N_D$  คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

$V_A$  คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ



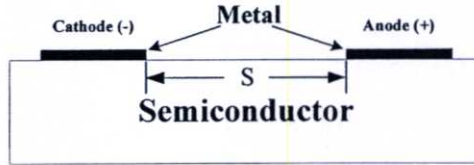
รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ肖ตกีไดโอด

## 2.4 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

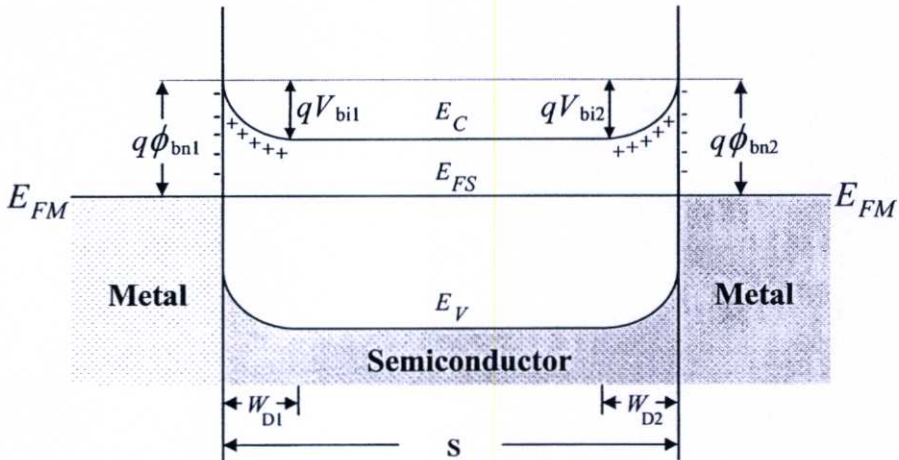
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM จัดอยู่ในกลุ่ม肖ตกีตัวตรวจวัดแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัส肖ตกี 2 รอยสัมผัส ต่อแบบหันหลังชนกัน มีคุณสมบัติเด่นคือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี กระแสมีค่าน้อย มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาเนอร์ กระบวนการสร้างง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย เนื่องจากและกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟด จึงทำให้ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน และเพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างและหลักการทำงานในหัวข้อนี้จึงจะได้อธิบายโครงสร้างและหลักการทำงาน โดยนำทฤษฎีของรอยสัมผัส肖ตกีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้อธิบายกับโครงสร้าง MSM

### 2.4.1 โครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จำนวนสองรอยสัมผัส ต่อกันแบบหันหลังชนกัน (back to back) มีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (S) ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีขนาดแคบมากๆ เพื่อให้ตัวตรวจวัดแสงสามารถทำงานด้วยความเร็วสูง สารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองทั้งสอง จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.14 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM

(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน

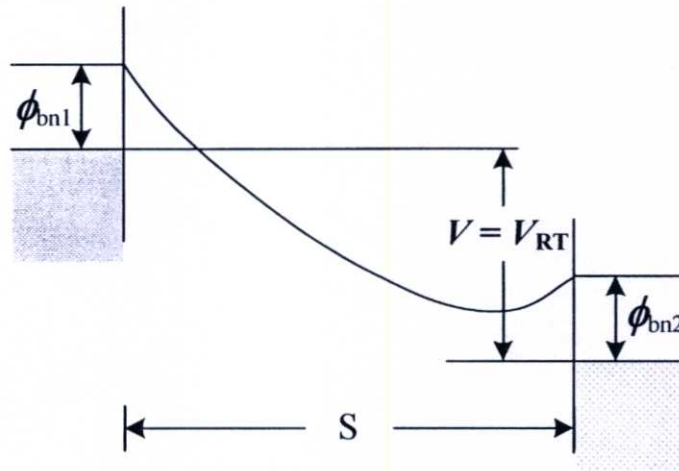
แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.14 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนขั้นตอนและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ชนิดกึ่งตัวนำของขั้วแคโทด ( $\phi_{bn1}$ ) และขั้วแอโนด ( $\phi_{bn2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} =$

$\phi_{bn}$  กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด ( $V_{bi1}$ ) และขั้วแอโนด ( $V_{bi2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$  และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_{D1}$ ) และด้านแอโนด ( $W_{D2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $W_{D1} = W_{D2} = W_D$  ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

#### 2.4.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส [26]

เมื่อให้แรงดันไบอัสแก่รอยสัมผัสทั้งสอง ในที่นี้จะให้แรงดันไบอัสบวกเข้าที่ขั้วแอโนด และแรงดันไบอัสลบเข้าที่ขั้วแคโทด ดังนั้นรอยสัมผัสด้านแอโนดจึงเป็นลักษณะของการให้ไบอัสตรง ส่วนรอยสัมผัสด้านแคโทดจะเป็นลักษณะของการให้ไบอัสย้อนกลับ สำหรับโครงสร้าง MSM โดยทั่วไปที่มักสร้างให้ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดแคบมากๆ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสจึงสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ คือ

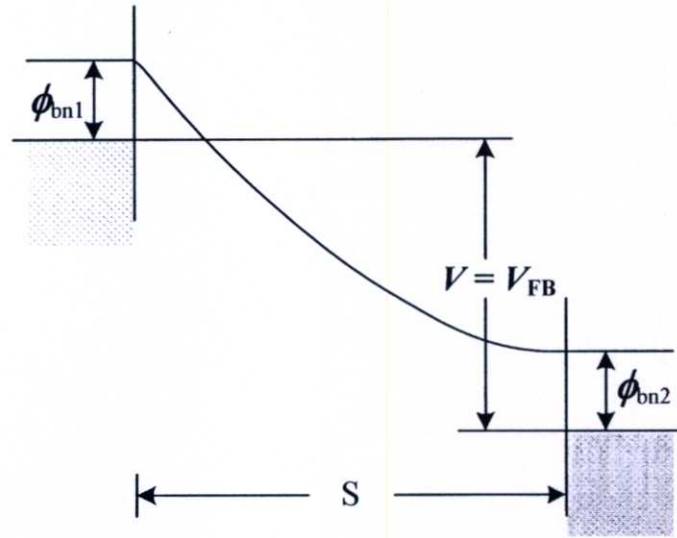
ช่วงที่ 1 เป็นช่วงแรงดันต่ำ ( $V \leq V_{RT}$ ) โดยให้แรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะทั้งสองมีค่ากว้างขึ้น จนในที่สุดมาถึงที่แรงดันรีช-ทรูช (reach-through voltage :  $V_{RT}$ ) ซึ่งบริเวณปลอดพาหะทั้งสองข้างจะสัมผัสกัน ทำให้ผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเท่ากับระยะห่าง  $S$  ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันรีช-ทรูช ( $V_{RT}$ )

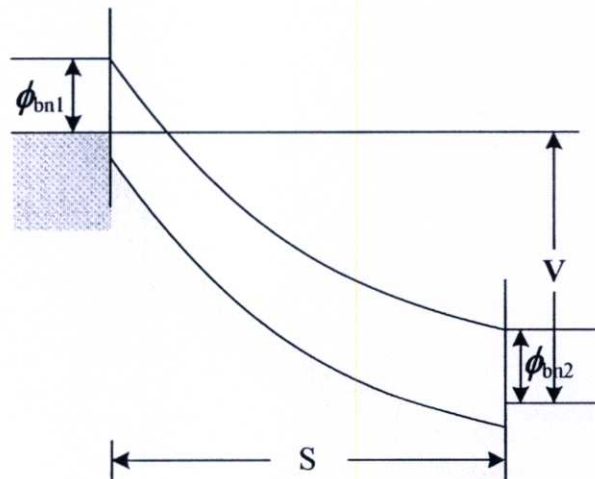
ช่วงที่ 2 เป็นช่วงแรงดันระหว่างแรงดันรีช-ทรูชถึงแรงดันแฟลต-แบนด์ ( $V_{RT} < V \leq V_{FB}$ ) โดยให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นอีกจนทำให้สนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้

แถบพลังงานที่ที่รอยสัมผัสด้านแอนโนดมีลักษณะแบนราบ ซึ่งคือ เงื่อนไขของแฟลต-แบนด์ ที่จุดนี้ เรียกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์ (flat-band voltage :  $V_{FB}$ ) แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันแฟลต-แบนด์ ( $V_{FB}$ )

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงแรงดันที่มากกว่า  $V_{FB}$  ( $V > V_{FB}$ ) เมื่อให้แรงดันไบอัสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์พบว่า แถบพลังงานจะโค้งงอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์ ( $V_{FB}$ )

แต่ในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ พบว่าโครงสร้าง MSM จะมีการทำงานอยู่ในช่วงที่ 1 เท่านั้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง แรงดันไบอัสที่ป้อนระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด จะถูกแบ่งตกคร่อมรอยสัมผัสทั้ง 2 ด้าน โดยแรงดันที่ตกคร่อมรอยสัมผัสขั้วแคโทดเป็น  $V_1$  ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมรอยสัมผัสขั้วแอโนดเป็น  $V_2$  ที่รอยสัมผัสด้านแคโทดจะเกิดลักษณะไบอัสย้อนกลับ โดยกำแพงศักย์ภายในมีค่าสูงขึ้นเป็น  $V_{bi} + V_1$  และทำให้บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) ขยายตัวกว้างขึ้นดังสมการที่ 2.21

$$W_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} + V_1)}{qN_D}} \quad (2.21)$$

ส่วนที่รอยสัมผัสด้านแอโนด กำแพงศักย์ภายในมีค่าลดลงเป็น  $V_{bi} - V_2$  และบริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด ( $W_A$ ) มีขนาดแคบลง ดังสมการที่ 2.22

$$W_A = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} - V_2)}{qN_D}} \quad (2.22)$$

โดยที่  $\varepsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C

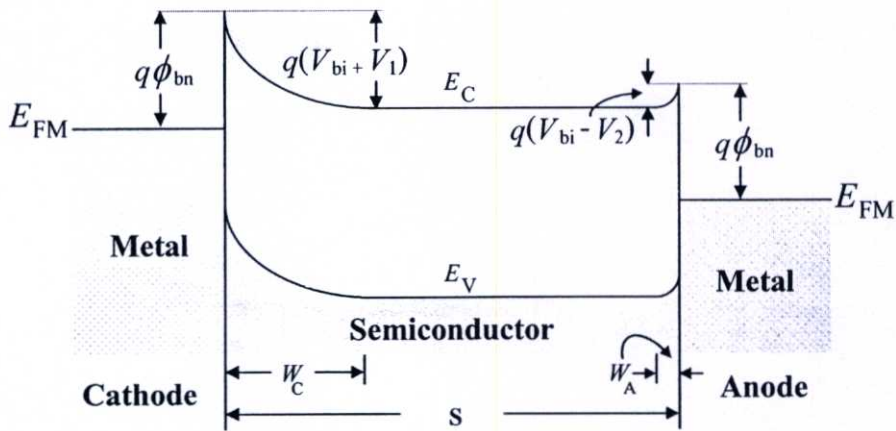
$N_D$  คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

$V_1$  คือ แรงดันไบอัสด้านแคโทด

$V_2$  คือ แรงดันไบอัสด้านแอโนด

โดยผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดและด้านแอโนดน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากแรงดันไบอัสมีค่าต่ำกว่าแรงดันริช-ทรูซ์ จึงทำให้เกิดมีบริเวณนิวทรัล (neutral region) ขึ้น ซึ่งบริเวณนิวทรัลนี้จะพิจารณาว่ามีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ทำให้แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง มีลักษณะดังรูปที่ 2.18



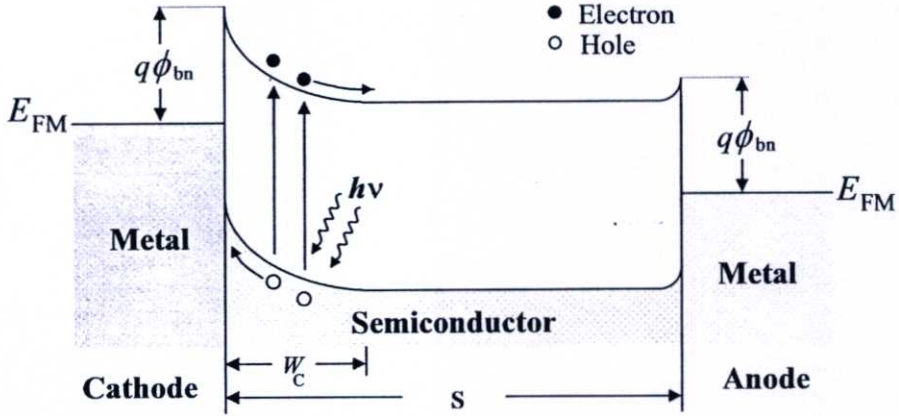
รูปที่ 2.18 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น  $(V_{bi} + V_1)$  อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคกีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ( $I_{SM}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคกีย์ ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ  $V_{bi} - V_2$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า ( $I_{MS}$ ) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วย ซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current :  $I_{dark}$ ) ของโครงสร้าง MSM โดยกระแสมืดของโครงสร้าง MSM จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก [5 – 7, 20]

ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้าง MSM กรณีที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้มีความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณปลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะได้อธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

### 2.4.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบบ

โครงสร้าง MSM สามารถใช้ทำหน้าที่ตรวจจับแสงได้เช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสงชนิดอื่นๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกระแสแสงในตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM



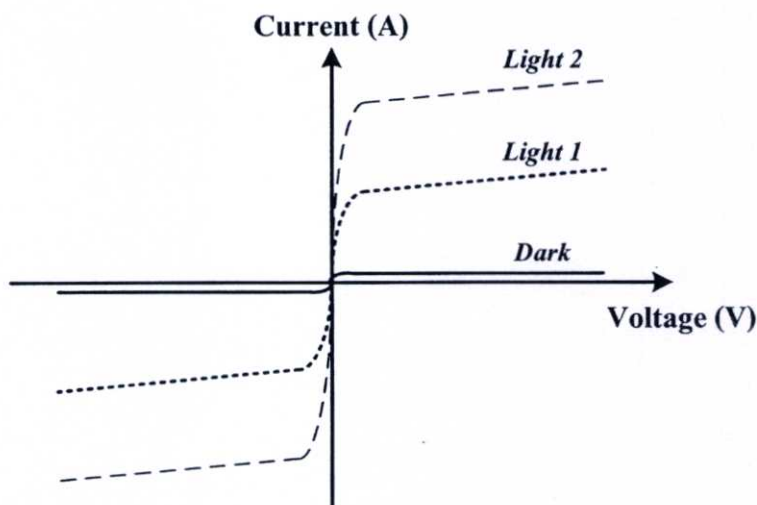
รูปที่ 2.19 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจจับแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัส แสดงดังรูปที่ 2.19 เมื่อแสงตกกระทบบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $h\nu \geq E_g$ ) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent :  $I_{photo}$ ) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบบและมีกรกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่

เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณหลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [5-7, 20]

#### 2.4.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ในรูปที่ 2.20 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของ MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับไบอัสตรงและด้านที่รับไบอัสย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบบนมีความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 2.20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบน

#### 2.4.5 ความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์ของโครงสร้าง MSM

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้ง แต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอกตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น ( $t_r$ ) และช่วงเวลาขาลง ( $t_f$ )

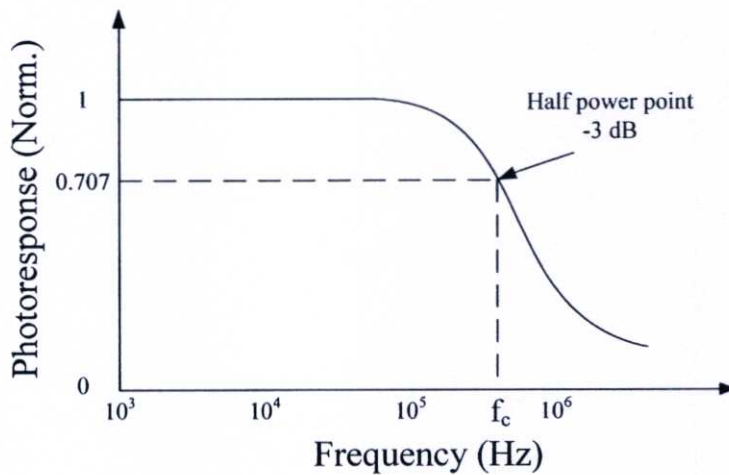
ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นกับแฟกเตอร์ของ

- (1) เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณหลอดพาหะ

- (2) เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ
- (3) ค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงกับค่าโหลด ความต้านทานภายนอก

ดังนั้นถ้าต้องการให้ตัวตรวจวัดแสงตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูงๆ จะต้องพิจารณาถึงแฟกเตอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มีพื้นที่ขนาดเล็กๆ เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น

แบนด์วิธ (bandwidth) คือ อัตราความเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณความถี่ค่าต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางประการของโฟโตดีเทคเตอร์ ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.21 ในทางปฏิบัติการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency :  $f_c$ ) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (half power point) หรือมีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงมีความหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่โฟโตดีเทคเตอร์สามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

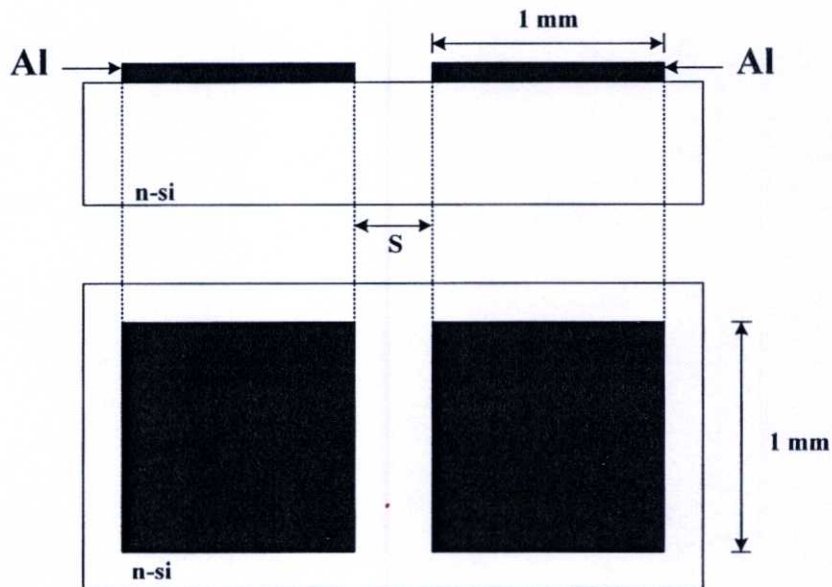
### บทที่ 3

## กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบพลาแนร์ สามารถสร้างได้ง่าย โดยมีการออกแบบให้มีพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษากระบวนการสร้างซึ่งจะมีทั้ง โครงสร้างที่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ เข้าไปในซิลิคอน เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติของโครงสร้าง MSM ต่อไป

### 3.1 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง

โครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม-ซิลิคอน จำนวนสองรอยสัมผัส ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ขั้วโลหะที่มีขนาดเท่ากันทั้งสองด้านเป็นอลูมิเนียมมีขนาด  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และมีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ (S) เท่ากับ 20, 40, 80, 100 และ  $500 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ส่วนสารกึ่งตัวนำจะเลือกใช้เป็นซิลิคอนชนิดเอ็นซึ่งจะมีการเติมอะตอมทองคำและไม่มีการเติมอะตอมทองคำ



รูปที่ 3.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al

### 3.2 กระบวนการสร้าง MSM (Al/n-Si/Al)

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมซึ่งใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยหลังจากขั้นตอนการออกแบบและการสร้างกระจกต้นแบบ (mask) แล้วจึงจะเริ่มกระบวนการสร้าง โดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็็น ระนาบ (100) สภาพด้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร มาเข้าสู่กระบวนการสร้าง เริ่มจาก

#### 3.2.1 กระบวนการสร้าง MSM ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอน

##### 1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

- อุลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water : DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- จุ่มใน DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในสารละลาย  $H_2SO_4 : H_2O_2$  แก้วที่ 1 โดยมีอัตราส่วนเป็น 1:3 ตามลำดับ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะและคราบไขมันที่ติดอยู่บนแผ่น ซิลิคอน
- ต้มในสารละลาย  $H_2SO_4 : H_2O_2$  แก้วที่ 2 โดยมีอัตราส่วนเป็น 1:3 ตามลำดับ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดคราบไขมันที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอน
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ที่มีความเข้มข้น 5 % ใช้เวลา 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

##### 2. กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  Torr

##### 3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาร์กที่ 1

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}C$  เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที

- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 2 ด้วยเครื่องปรับชั้นมาสก์ (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 10 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นฟิล์ม โลหะอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างเป็นขั้ว อิเล็กโทรด ใช้สารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching) ซึ่งมีส่วนผสมของ  $H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : H_2O$  ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 โดยจุ่มลงใน สารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียมที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C ใช้เวลาประมาณ 10-20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 4. กระบวนการซินเตอร์ริง

กระบวนการซินเตอร์ริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของ อลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่ อุณหภูมิ 500 °C โดยมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1000 cc/นาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็น เงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดีและมีกระแสรั่วไหลต่ำ [29]

### 3.2.2 กระบวนการสร้าง MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอน

#### 1) การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนโดย

- อัลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water : DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- จุ่มใน DI 1 แก้ว

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในสารละลาย  $H_2SO_4 : H_2O_2$  แก้วที่ 1 โดยมีอัตราส่วนเป็น 1 : 3 ตามลำดับเป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะและคราบไขมันที่ติดอยู่บนแผ่น ซิลิคอน
- ต้มในสารละลาย  $H_2SO_4 : H_2O_2$  แก้วที่ 1 โดยมีอัตราส่วนเป็น 1 : 3 ตามลำดับเป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเศษ โลหะและคราบไขมันที่ติดอยู่บนแผ่น ซิลิคอน
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ที่มีความเข้มข้น 5 % ใช้เวลา 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## 2) กระบวนการออกซิเดชัน

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation) ให้ได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 5000 Å โดยให้แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1000 °C เงื่อนไขและกระบวนการสร้างดังนี้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/นาที

## 3) นำไปสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าของซิลิคอน

- จุ่มในสารละลาย Buffer ประมาณ นาที (สารละลายจะสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 1000 อังสตรอม)
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## 4) กระบวนการเคลือบโลหะทองคำ

เคลือบผิวด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยโลหะทองคำ โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  Torr

## 5) การแพร่ทอง

นำแผ่นซิลิกอนเข้าเตาแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1000 °C และ 1050 °C เป็นเวลา 15,30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน = 1000 cc/min

## 6) การสกัดโลหะทองคำ

- จุ่มในสารละลายสกัดชั้นทองที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เวลา 10 - 20 วินาที (Au-Etching = HCL: HNO<sub>3</sub> = 3 : 1)
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## 7) นำไปสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหน้าของซิลิกอน

- จุ่มในสารละลาย Buffer ประมาณ นาที (สารละลายจะสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ประมาณ 1000 อังสตรอม)
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## 8) กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  Torr

## 9) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 1

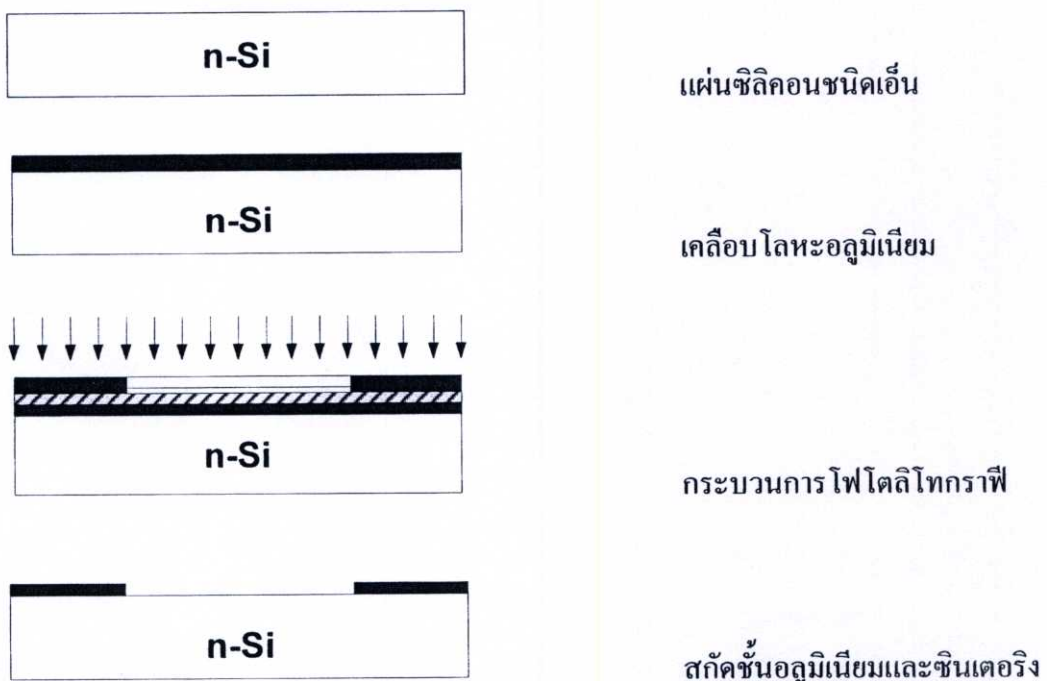
- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 2 ด้วยเครื่องปรับชั้นมาสก์ (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 10 วินาที
- ชื่นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาชื่นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที

- สกัดชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ ใช้สารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching) ซึ่งมีส่วนผสมของ  $H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : H_2O$  ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 โดยจุ่มลงในสารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียมที่อุณหภูมิประมาณ  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาประมาณ 10 - 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 10) กระบวนการซินเตอร์ริง

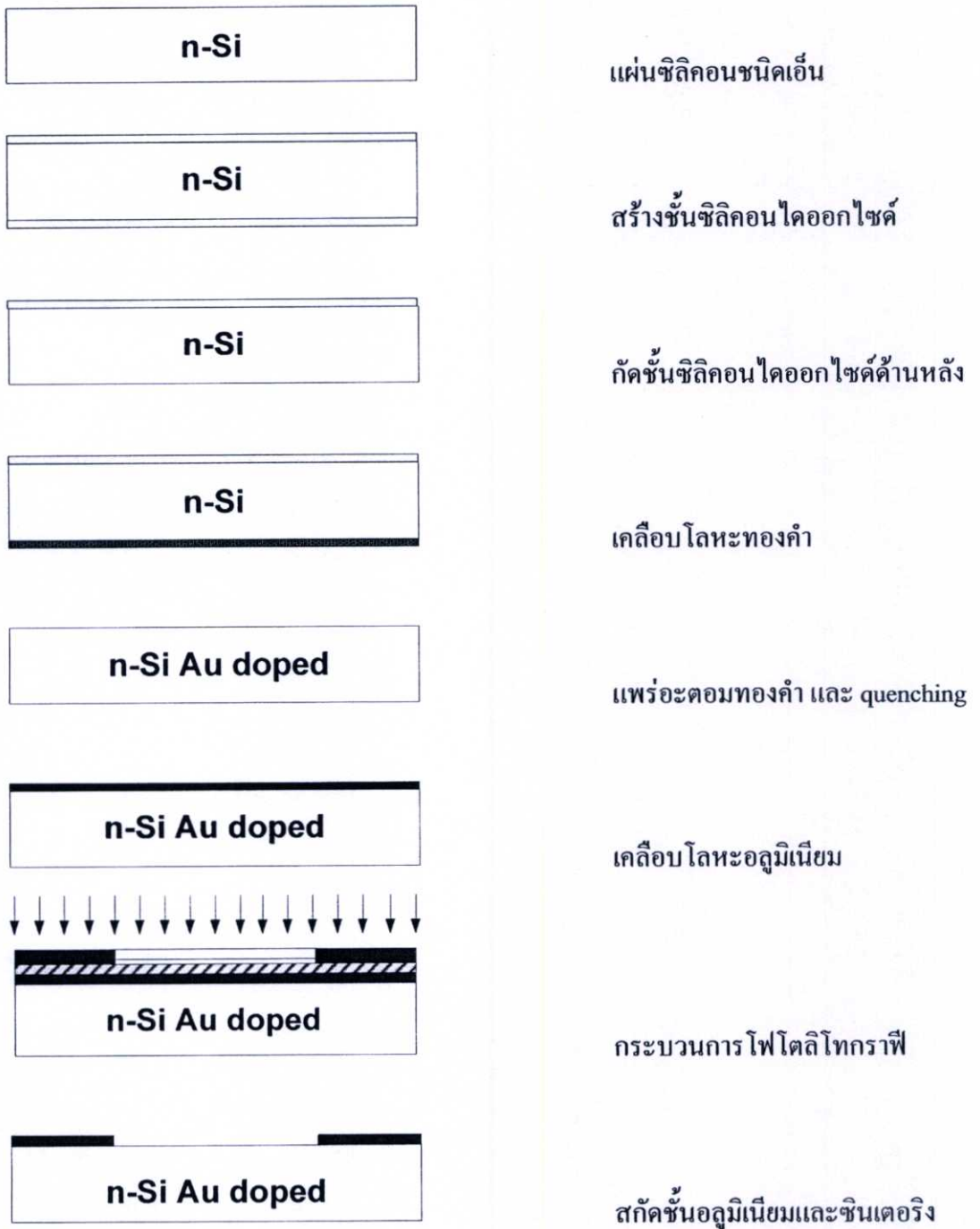
กระบวนการซินเตอร์ริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน  $1000\text{ cc/นาที}$  เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดีและมีกระแสรั่วไหลต่ำ [29]

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ สรุปได้ดังรูปที่ 4.2

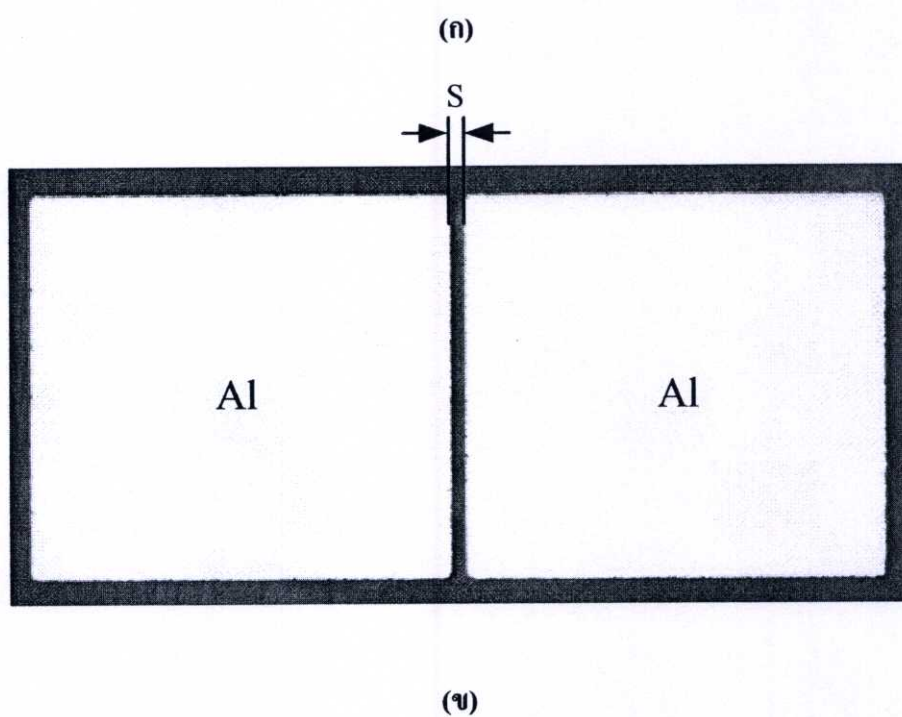
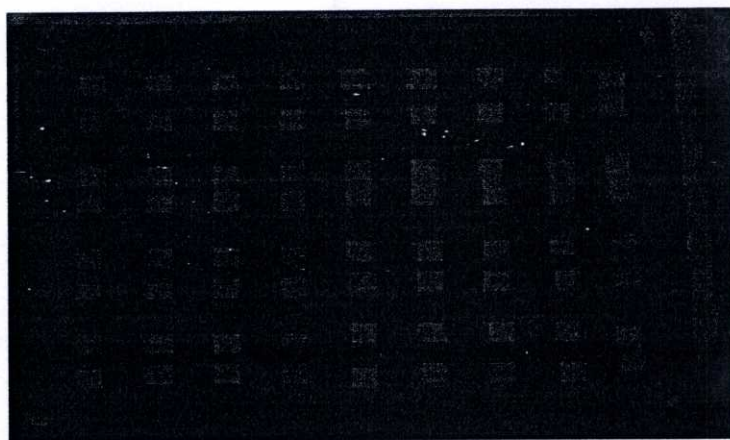


รูปที่ 3.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอมทองคำ สรุปลงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอมทองคำ



รูปที่ 3.4 ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น

(ก) ภาพถ่ายของชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว

(ข) ภาพถ่ายด้านบนของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว

## บทที่ 4

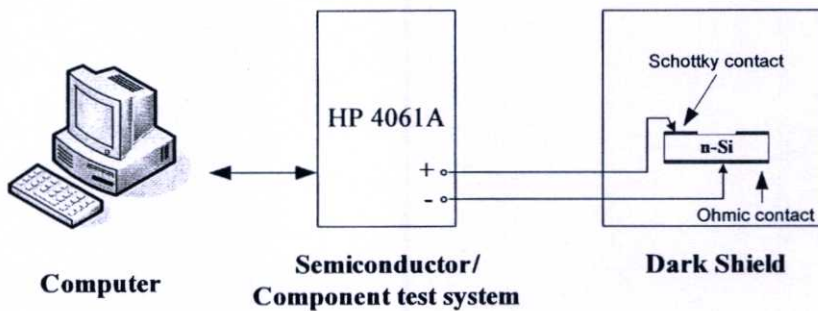
### การทดลองและผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้จะมีซิลิคอนชนิดเอ็นเป็นฐานรองและมีชั้นอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสขั้วต่อคีย์ ซึ่งโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้จะมีข้อเด่นหลายประการ แต่ที่ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาและพัฒนา คือ การตอบสนองที่ความถี่ที่สูงขึ้นกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [5 - 7] ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ปรับปรุงตัวตรวจวัดแสง MSM ให้มีการตอบสนองความถี่ที่สูงขึ้น โดยทำการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองซึ่งเป็นซิลิคอนชนิดเอ็นด้วยวิธีการแพร่ที่อุณหภูมิต่างๆ และใช้เวลาในการแพร่ต่างๆ กัน ซึ่งผลที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวนี้ น่าจะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนได้ และอะตอมทองคำจะทำให้เกิดระดับพลังงานระดับลึก หรือ ระดับพลังงานการรวมตัวและเกิดใหม่ขึ้น ระดับพลังงานนี้จะปรากฏอยู่ในแถบช่องว่างพลังงานของแถบพลังงานซิลิคอน ผลที่ได้จะทำให้การตอบสนองต่อความถี่ของตัวตรวจวัดแสงมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากพลังงานระดับลึกจะทำให้อายุของพาหะข้างน้อยลดลง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM นี้ กลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดจากพาหะข้างน้อย [5 - 7, 20] ซึ่งตรงกับเงื่อนไขในการทำงานของระดับพลังงานลึกที่จะทำหน้าที่ในการลดอายุของพาหะข้างน้อย [8, 9, 11, 12]

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงลำดับขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM ซึ่งจากโครงสร้างที่มีลักษณะขั้วต่อคีย์โคโอดหันหลังชนกัน ดังนั้นในการศึกษาสมบัติของตัวตรวจวัดแสงนี้ จะแบ่งการศึกษาออกเป็นการศึกษาสมบัติของรอยสัมผัสขั้วต่อคีย์ของตัวตรวจวัดแสงกับสมบัติของตัวตรวจวัดแสง โดยจะทำการศึกษาสมบัติของรอยสัมผัสขั้วต่อคีย์ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ โดยศึกษาจากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และลักษณะสมบัติของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน เพื่อศึกษาถึงสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสขั้วต่อคีย์ที่มีต่อผลกระทบที่เกิดจากการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น โดยจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับรอยสัมผัสขั้วต่อคีย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และในหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการศึกษาผลของอะตอมทองคำที่มีต่อสมบัติพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM โดยทำการเปรียบเทียบจากลักษณะสมบัติกระแสและแรงดัน และผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ

#### 4.1 ผลการทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างอูมิเนียมกับซิลิคอนที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ [14]

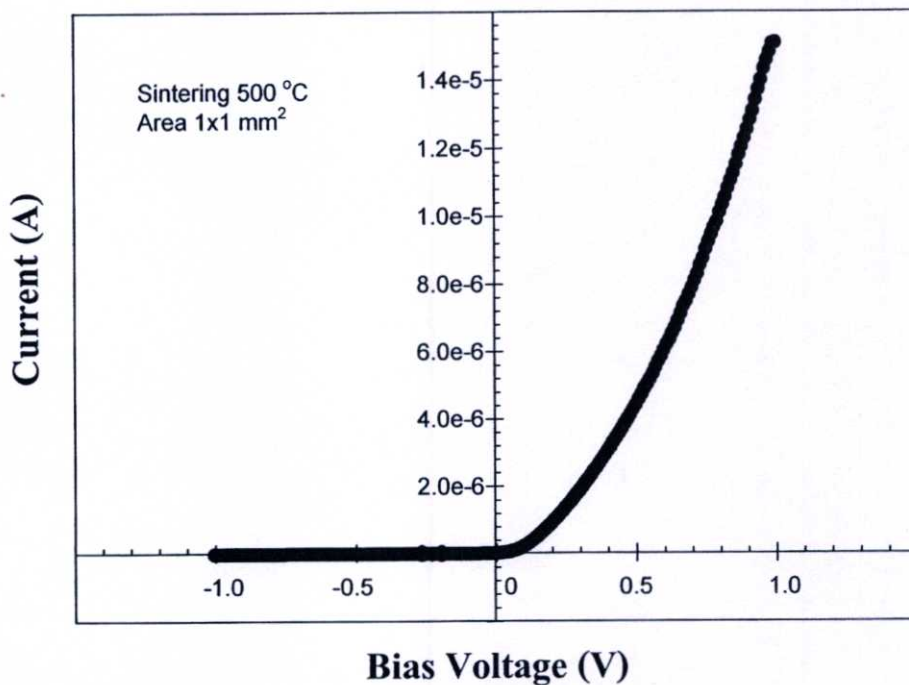
ตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM เป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะคล้ายชนิดซิลิคอนไดโอดหันหลังชนกัน ซึ่งจากคุณสมบัติของโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ สามารถทำการศึกษาศสมบัติพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง ได้โดยทำการศึกษาศสมบัติของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสง โดยจะทำการศึกษาศสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง ได้แก่ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง ( $I_0$ ), ความสูงกำแพงศักย์ชนิดกึ่ง ( $\phi_{bn}$ ), แฟกเตอร์อูมคติ ( $n$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ในการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งนี้จะใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor/Component test system) HP 4061A แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 4.1 โดยใช้เทคนิคการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งร่วมกับการคำนวณ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ได้ทำการสร้างขึ้น



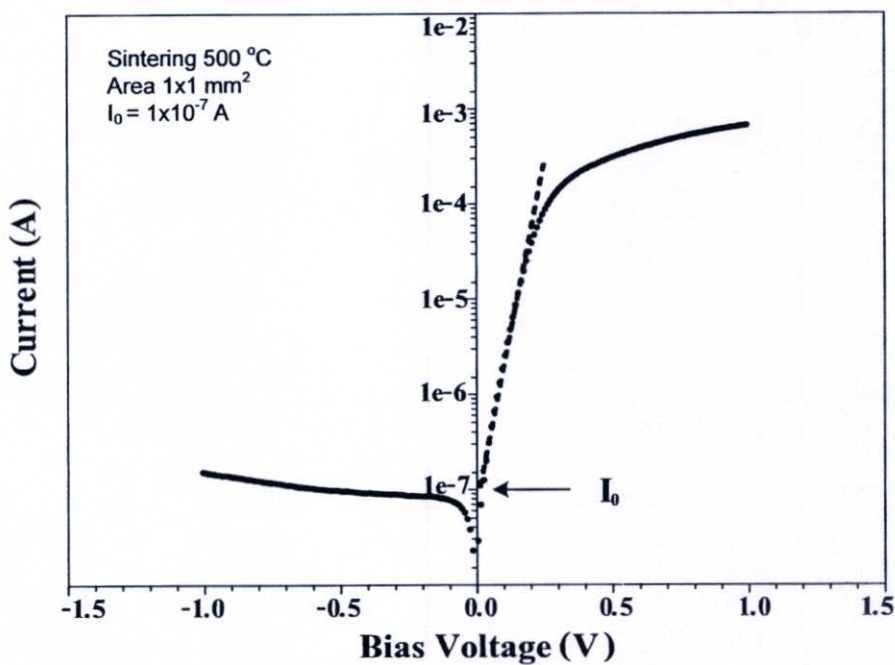
รูปที่ 4.1 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

##### 4.1.1 กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

จากการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งโดยต่อวงจรดังในรูปที่ 4.1 ซึ่งผลของการศึกษาศสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำถูกแสดงดังรูปที่ 4.2 และสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์หาค่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งสามารถหาได้ด้วยเทคนิคกระแสและแรงดัน โดยนำลักษณะสมบัติกระแสและแรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส ( $J$ ) และ แรงดัน ( $V$ ) ในแบบกึ่งล็อก ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3 ซึ่งจากกราฟของไดโอดจะพบว่ากราฟดังกล่าวจะสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน เพราะฉะนั้นในการพิจารณาหาค่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง สามารถทำได้โดยการลากเส้นตรงผ่านช่วงที่อยู่เหนือช่วงที่รีคอมไบเนชัน โดยลากไปตัดแกนความหนาแน่นกระแส ซึ่งจะให้ความหนาแน่นของกระแสที่แรงดัน ไบอัสเท่ากับศูนย์ หรือที่เรียกว่าค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ( $I_0$ )

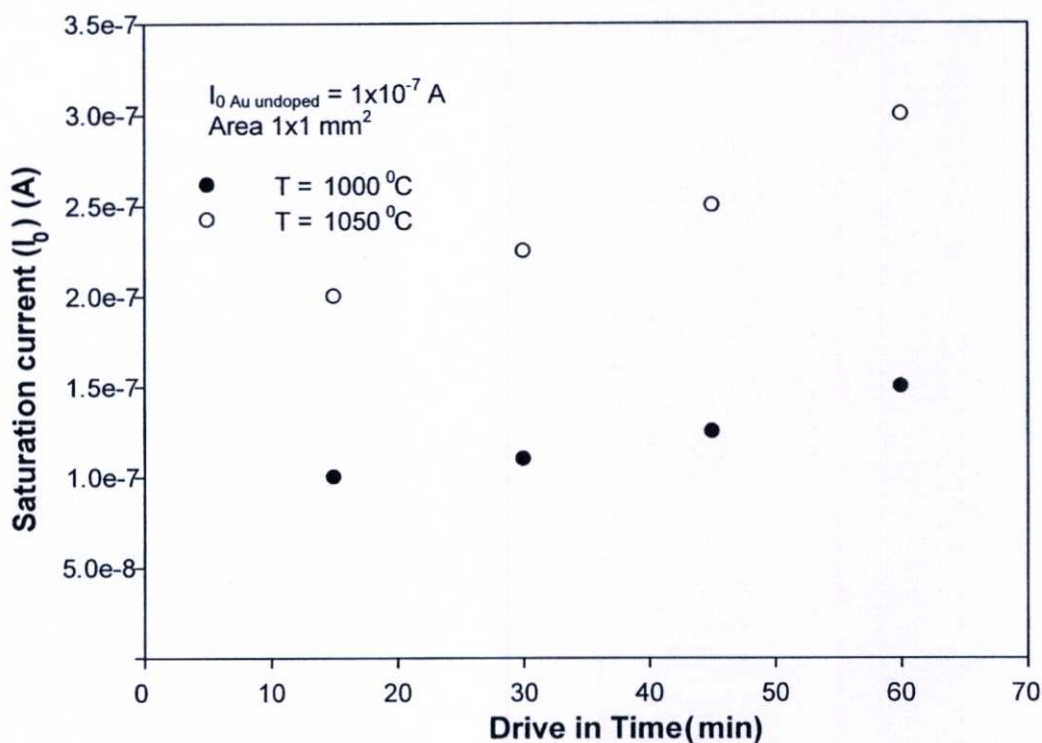


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างลักษณะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกีของโลหะอลูมิเนียมกับซิลิคอนชนิดเอ็นที่ไม่มีสารเติมอะตอมทองคำ ที่มีขนาดพื้นที่  $1 \times 1 \text{ mm}^2$



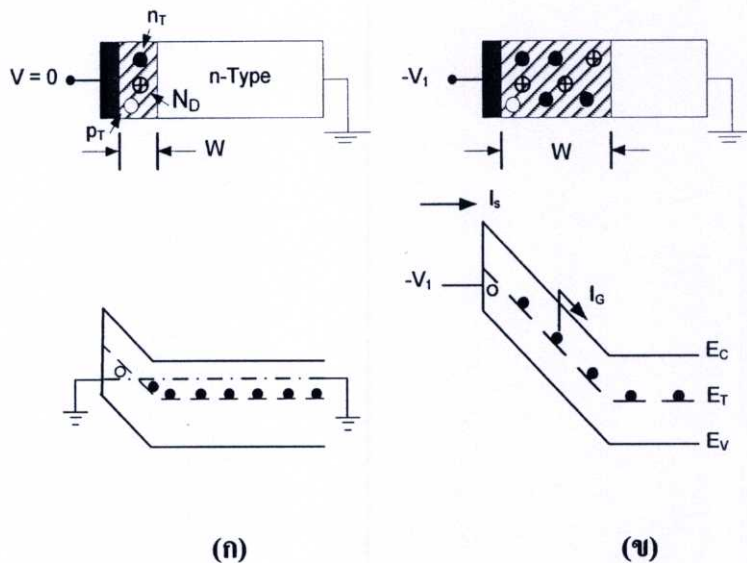
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างลักษณะกระแส-แรงดันในแบบกึ่งล็อกของรอยสัมผัส肖ตกีของโลหะอลูมิเนียมกับซิลิคอนชนิดเอ็นที่ไม่มีสารเติมอะตอมทองคำ ที่มีขนาดพื้นที่  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ซึ่งได้กระแสรั่วไหล เท่ากับ  $1 \times 10^{-7}$  A

จากขั้นตอนที่ใช้ในการหาค่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำดังรูปที่ 4.3 ขั้นตอนดังกล่าวสามารถนำมาหาค่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ได้ โดยค่ากระแสรั่วไหลที่ได้จะแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลของชนิดกึ่งที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลและเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ดังรูปที่ 4.4 พบว่าเวลาและอุณหภูมิในการแพร่อะตอมทองคำมีผลต่อกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง เมื่อพิจารณาที่เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำมากขึ้น ผลที่ได้ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งเพิ่มมากขึ้น โดยสาเหตุที่ทำให้กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากซิลิคอนที่มีอะตอมของทองคำมาแทรกอยู่ จะมีระดับพลังงานการรวมตัวและเกิดใหม่ขึ้นที่ช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อรอยสัมผัสชนิดกึ่งอยู่ในสภาวะไบอัสย้อนกลับ จะทำให้พลังงานระดับลึกเกิดการปลดปล่อยพาหะออกมา โดยการปลดปล่อยพาหะนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของบริเวณปลดปล่อยพาหะ [14, 21] เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวจะมีการปรับตัวให้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังรูปที่ 4.5 หรือการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งนี้อาจเกิดจากสถานะที่ผิวของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างของซ็อดทกีย์ไดโอดที่สภาวะต่างๆ

(ก) สภาวะที่ไม่ให้ไบอัส

(ข) สภาวะที่ให้ไบอัสย้อนกลับ

#### 4.1.2 ความสูงกำแพงศักย์ซ็อดทกีย์

ความสูงของกำแพงศักย์ซ็อดทกีย์ของรอยสัมผัสซ็อดทกีย์ของตัวตรวจวัดแสงนี้ เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ของรอยสัมผัสซ็อดทกีย์ที่มีความสำคัญ เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ซ็อดทกีย์นี้สามารถบ่งบอกถึงกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นภายในรอยสัมผัสซ็อดทกีย์ได้ ซึ่งการหาค่าความสูงกำแพงศักย์ซ็อดทกีย์ของรอยสัมผัสซ็อดทกีย์นี้ สามารถทำได้โดยการนำผลการทดลองจากการศึกษากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสซ็อดทกีย์ในหัวข้อการศึกษาที่ 4.1.1 โดยการนำค่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสซ็อดทกีย์ดังกล่าวนำมาหาค่ากำแพงศักย์ซ็อดทกีย์ของรอยสัมผัสซ็อดทกีย์ของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 4.1

ความสูงกำแพงศักย์ซ็อดทกีย์สามารถหาได้จาก

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{RT^2}{J_0}\right) \quad (4.1)$$

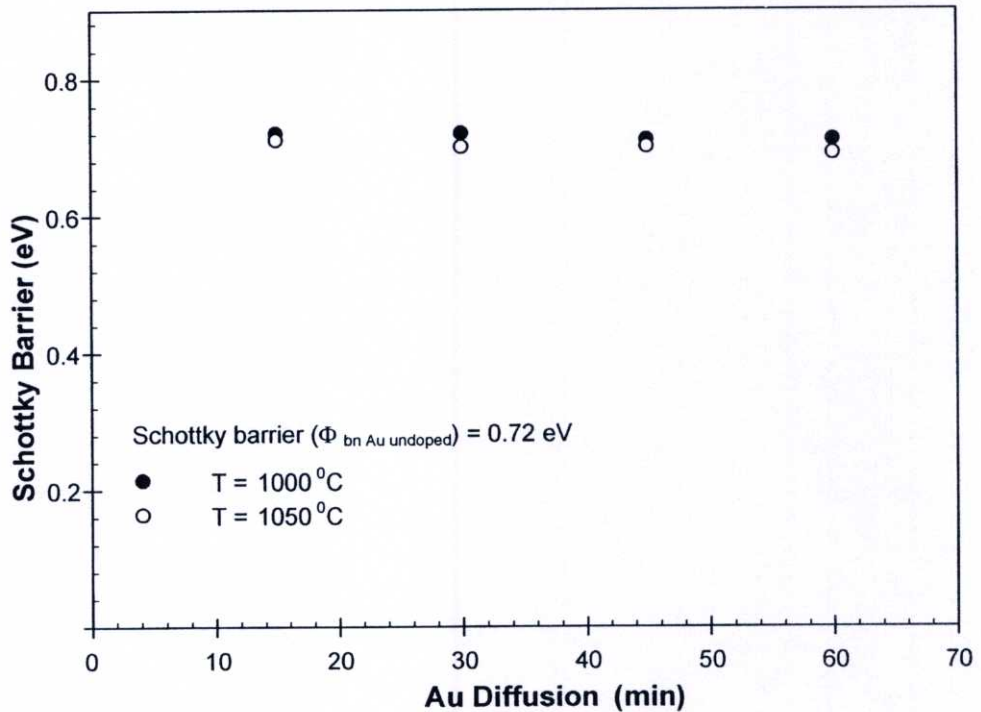
โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่ของโบสค์มันน์

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

$R$  คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่าเท่ากับ  $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$  (n-Si)

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 4.1 ทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ชอตกีย์ โดยค่ากำแพงศักย์ชอตกีย์ที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.6



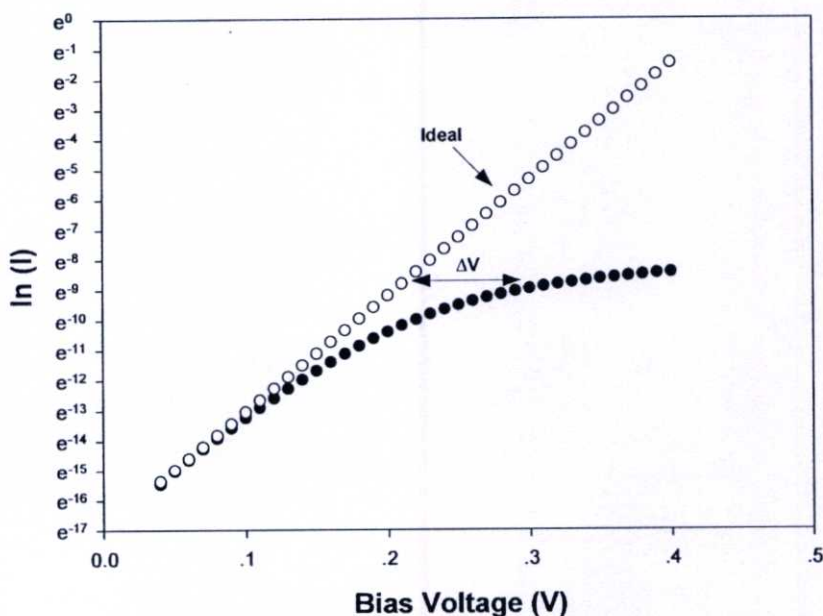
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ชอตกีย์ของรอยสัมผัสชอตกีย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกำแพงศักย์ชอตกีย์และเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าค่าความสูงกำแพงศักย์ชอตกีย์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ เนื่องจากผลจากการเติมอะตอมทองคำจะทำให้ค่ากระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มขึ้นตามเงื่อนไขในการแพร่อะตอมทองคำ และเมื่อนำค่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชอตกีย์มาแทนในสมการที่ 4.1 เพื่อหาค่ากำแพงศักย์ชอตกีย์จึงทำให้ผลของค่ากำแพงศักย์ชอตกีย์ที่ได้มีค่าลดลง แต่เนื่องจากค่าความสูงของกำแพงศักย์ชอตกีย์เป็นคุณสมบัติของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่มีค่าคงที่ ด้วยเหตุนี้จึงอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่ากำแพงศักย์ชอตกีย์ได้ว่า ในกรณีที่ให้ไบอัสย้อนกลับ กลไกของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นของรอยสัมผัสชอตกีย์ที่มีการแพร่ของอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ จะประกอบไปด้วยผลของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อชอตกีย์ ( $I_S$ ) บวกกับกระแสการเกิดใหม่ที่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของย่านบริเวณปลอด

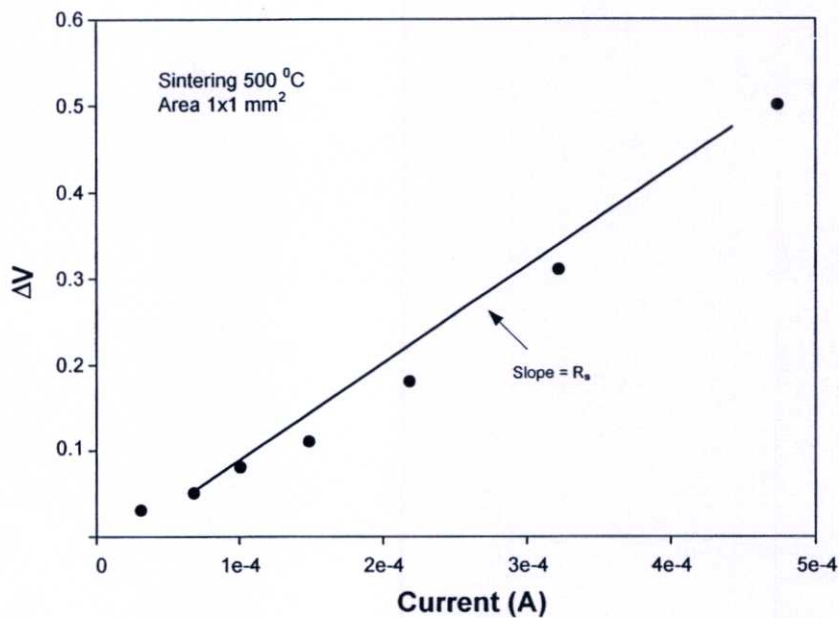
พาหะ ( $I_{G-R}$ ) ดังนั้นจะได้ว่าค่ากระแสรั่วไหลที่วัดได้คือ  $I_0 = I_S + I_{G-R}$  ซึ่งค่ากระแสการเกิดใหม่จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการแพร่อะตอมทองคำ ทำให้ค่ากระแสรั่วไหลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงและเมื่อนำไปแทนในสมการที่ 4.1 จึงทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อคก็ยมีค่าน้อยลง

#### 4.1.3 ความต้านทานอนุกรม

หัวข้อการทดลองนี้จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานอนุกรมของรอยสัมผัสช็อคก็ยของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM โดยจะทำการหาค่าความต้านทานอนุกรมของรอยสัมผัสช็อคก็ยที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ โดยค่าความต้านทานอนุกรมสามารถหาได้จากกราฟลักษณะสมบัติแบบกึ่งล็อก (semi-log) ของกระแสและแรงดันทางด้านไบอัสตรง ดังรูปที่ 4.7 (ก) โดยกราฟดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบกราฟลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสช็อคก็ย ในกรณีที่มีค่าความต้านทานอนุกรมเป็นศูนย์กลางกับกราฟลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสช็อคก็ยที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจากกราฟดังกล่าวสามารถหาผลต่างของแรงดันไบอัส ( $\Delta V$ ) ของกราฟในช่วงที่มีค่าความต้านทานอนุกรมเป็นศูนย์กลางกับผลที่ได้จากการทดลองและเมื่อนำค่า  $\Delta V$  ที่ได้ไปพล็อตกราฟกับค่ากระแส โดยค่ากระแสที่นำมาพล็อตกราฟต้องเป็นค่ากระแสที่ตำแหน่งเดียวกันกับการพิจารณาหาค่า  $\Delta V$  ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 4.7 (ข) โดยกราฟนี้จะมีค่าความชันเท่ากับค่าความต้านทานอนุกรมของรอยสัมผัสช็อคก็ยของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM



(ก)

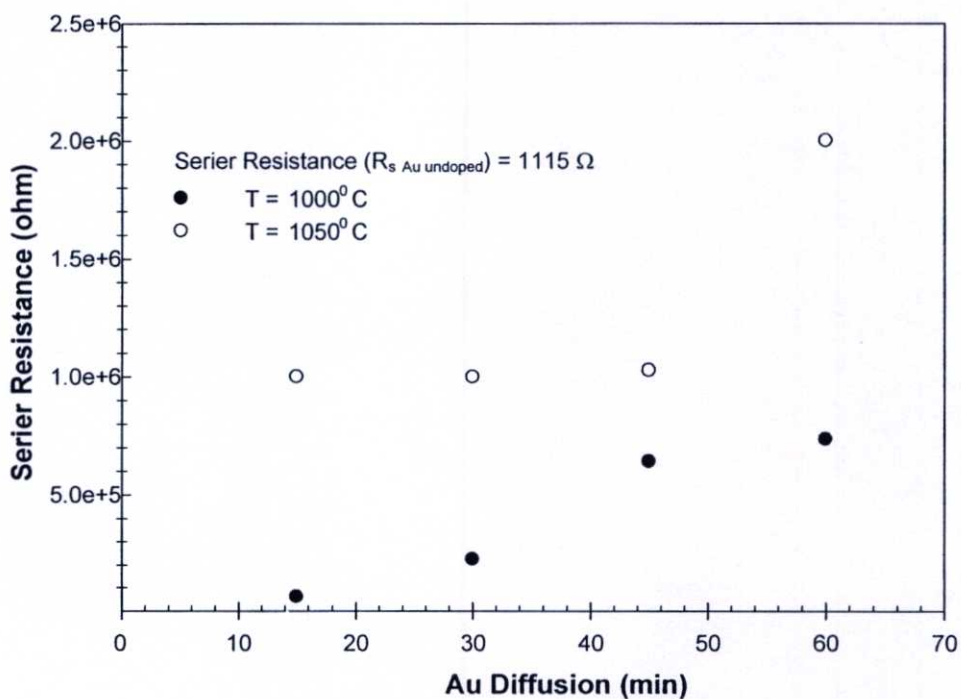


(ข)

รูปที่ 4.7 กราฟตัวอย่างการหาค่าความต้านทานอนุกรมของซีดทียกึ่งไดโอด

(ก) การหาค่า  $\Delta V$  กราฟ  $\ln(I)$ -V ของไดโอด

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V$ -I

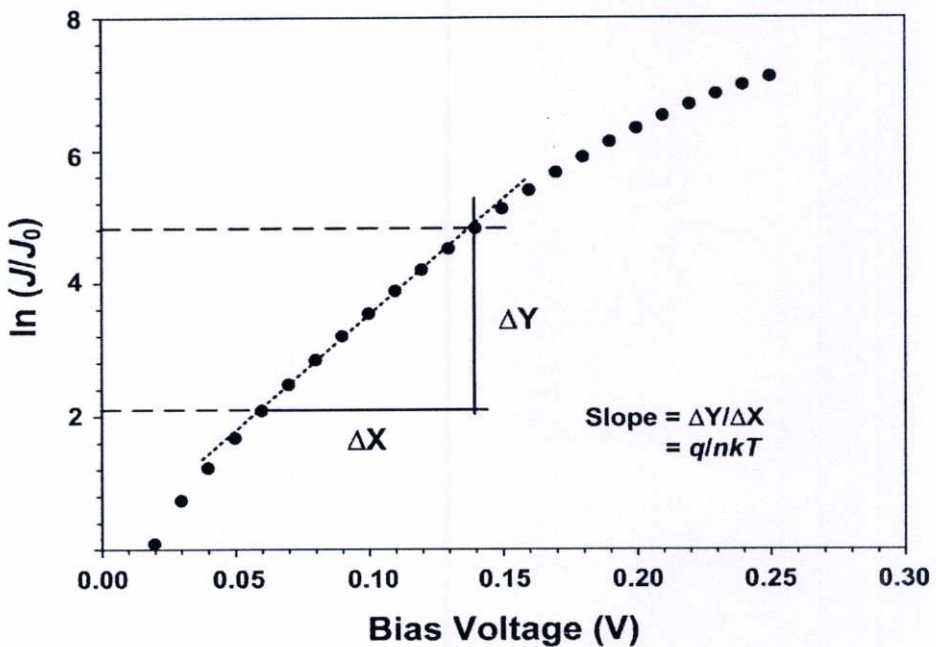


รูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานอนุกรมของรอยสัมผัสซีดทียกึ่งที่ไม่มี การเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการแพร่อะตอม ค่าความต้านทานอนุกรมของจะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ จะทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นในแถบช่องว่างแถบพลังงาน 2 ระดับ คือ ระดับพลังงานผู้รับแบบลิค และระดับพลังงานผู้ให้แบบลิคขึ้น ซึ่งในกรณีของซิลิคอนชนิดเอ็นอิเล็กตรอนในแถบความนำจะถูกจับด้วยระดับพลังงานผู้รับแบบลิคขึ้น ก็คือ การเกิดปรากฏการณ์ชดเชย ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบความนำมีค่าลดลง ทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมของซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น [11, 19] หรืออาจเกิดความบกพร่องของผลึกที่เกิดจากกระบวนการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานอนุกรมเช่นกัน

#### 4.1.4 แฟลคเตอร์อุดมคติ

สำหรับค่าแฟลคเตอร์อุดมคตินี้ เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของกระแสที่เกิดขึ้นภายในรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสง โดยสามารถหาค่าแฟลคเตอร์อุดมคติได้ด้วยเทคนิคกระแส-แรงดัน โดยนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(J/J_0)$  กับแรงดันไบอัส ดังรูปที่ 4.9 โดยที่ค่าความชันของกราฟดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับสมการที่ 4.3 ซึ่งความชันนั้นจะสามารถนำมาหาค่าแฟลคเตอร์อุดมคติได้



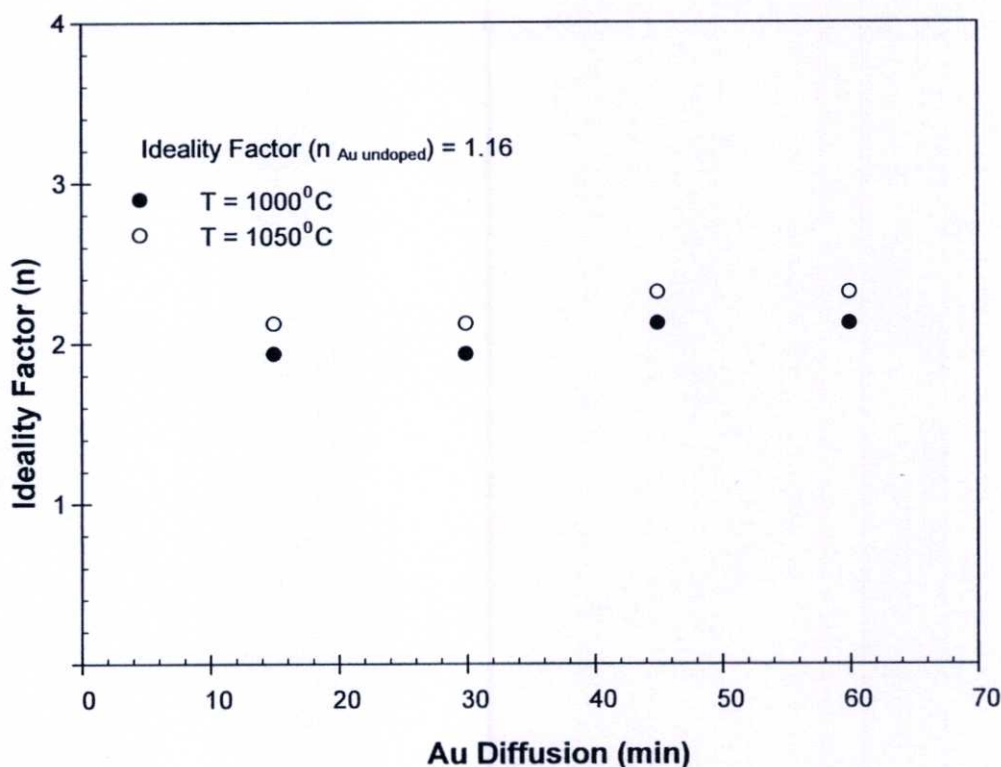
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างวิธีการหาค่าแฟลคเตอร์อุดมคติ จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{J}{J_0}\right)$  กับแรงดัน

ค่าแฟกเตอร์อุดมคติสามารถหาได้จาก

$$\text{จาก} \quad \ln\left(\frac{J}{J_0}\right) = \frac{qV}{nkT} \quad (4.2)$$

$$\text{จะได้} \quad \text{slope} = \frac{q}{nkT} \quad (4.3)$$

ในการทดลองนี้ จะทำการหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติของรอยสัมผัส肖ตกีของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งผลจากการคำนวณที่ได้ถูกแสดงดังรูปที่ 4.10



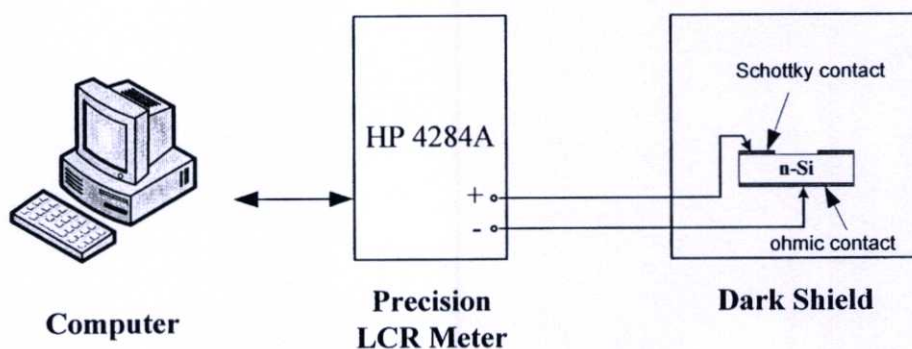
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติของ肖ตกีที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติและเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆมีผลต่อค่าแฟกเตอร์อุดมคติโดยค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่าประมาณ 1.16 เมื่อยังไม่มีการเติมอะตอมทองคำ สาเหตุที่ค่าแฟกเตอร์

อุดมคติของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากับ 1 เนื่องจากกระแสการแพร่และกระแสการรวมตัวและเกิดใหม่แต่เนื่องจากโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงดังกล่าวไม่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองซึ่งเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น ผลกระทบดังกล่าวอาจจะเกิดจากผลการกระจายของสถานะที่ผิว (surface state), ผลกระทบจากอิมเมจ-ฟอร์ซ (image-force effect) [30, 31] เป็นต้น แต่สำหรับกรณีในตัวตรวจวัดแสงที่โครงสร้างดังกล่าวมีการเติมอะตอมทองคำ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่าประมาณเท่ากับ 2 ทั้งนี้ชี้ให้เห็นว่ากลไกของการเกิดกระแสจะเหมือนกับกรณีแรก แต่น่าจะมีผลกระทบจากกลไกของกระแส R-G มากกว่า เนื่องจากโครงสร้างนี้จะมีระดับพลังงานระดับลึกอยู่ในแถบช่องว่างพลังงานของซิลิคอน ซึ่งแถบพลังงานดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่จะทำให้เกิดกระแส R-G ขึ้น [14]

#### 4.2 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง [14]

ในการทดลองนี้ จะเป็นการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็นที่เงื่อนไขต่างๆ ด้วยเครื่องมือวัด HP 4284A Precision LCR ของบริษัท Agilent ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 4.11



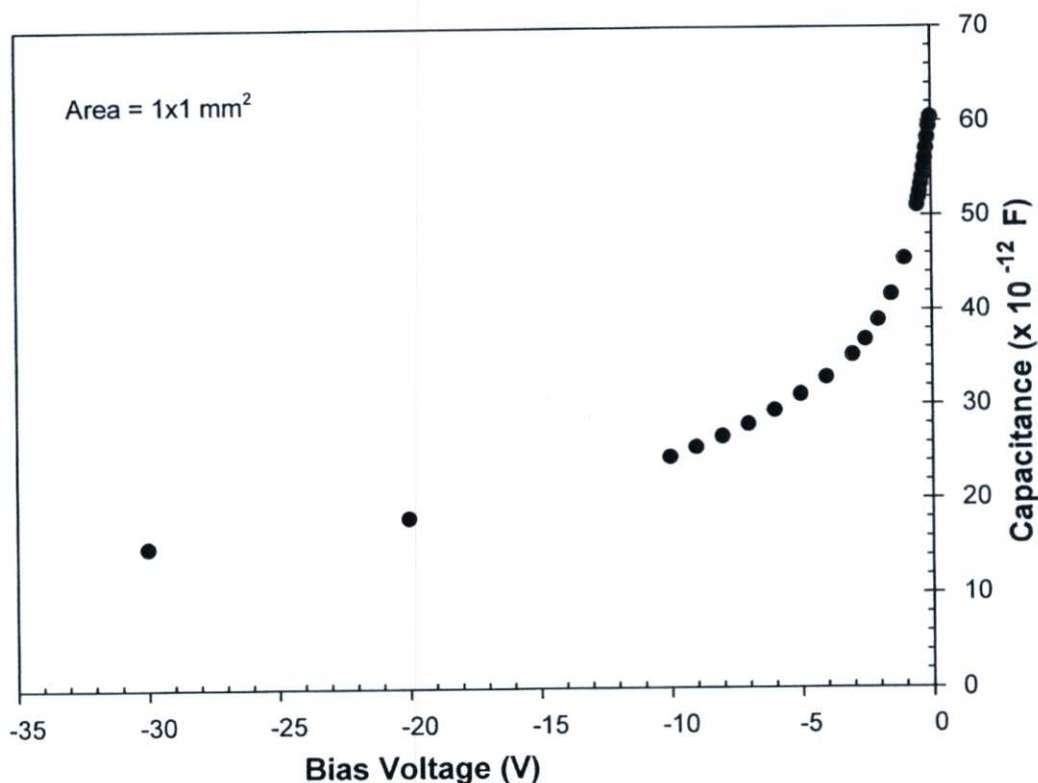
รูปที่ 4.11 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

จากรูปที่ 4.11 เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดัน โดยวัดความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง precision LCR meter ที่ปรับให้แรงดัน ac คลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด 50 mVpp ความถี่ 1 MHz ผสมเข้ากับแรงดัน dc ที่ปรับค่าได้จาก 0 ถึง - 30 V ในหัวข้อการศึกษานี้ จะเป็นการแสดงผลของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งในการวิเคราะห์ผลของอะตอมทองคำที่มีต่อคุณสมบัติทางความจุไฟฟ้า จะทำการศึกษาในบทต่อไป

#### 4.2.1 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกีที่มีไม่การเติมอะตอม

##### ทองคำ

ในหัวข้อการทดลองนี้ เป็นการทดลองวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกีของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งข้อมูลของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกีที่ได้จากการวัด สามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันได้ ดังรูปที่ 4.12 โดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนความจุไฟฟ้าส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัส

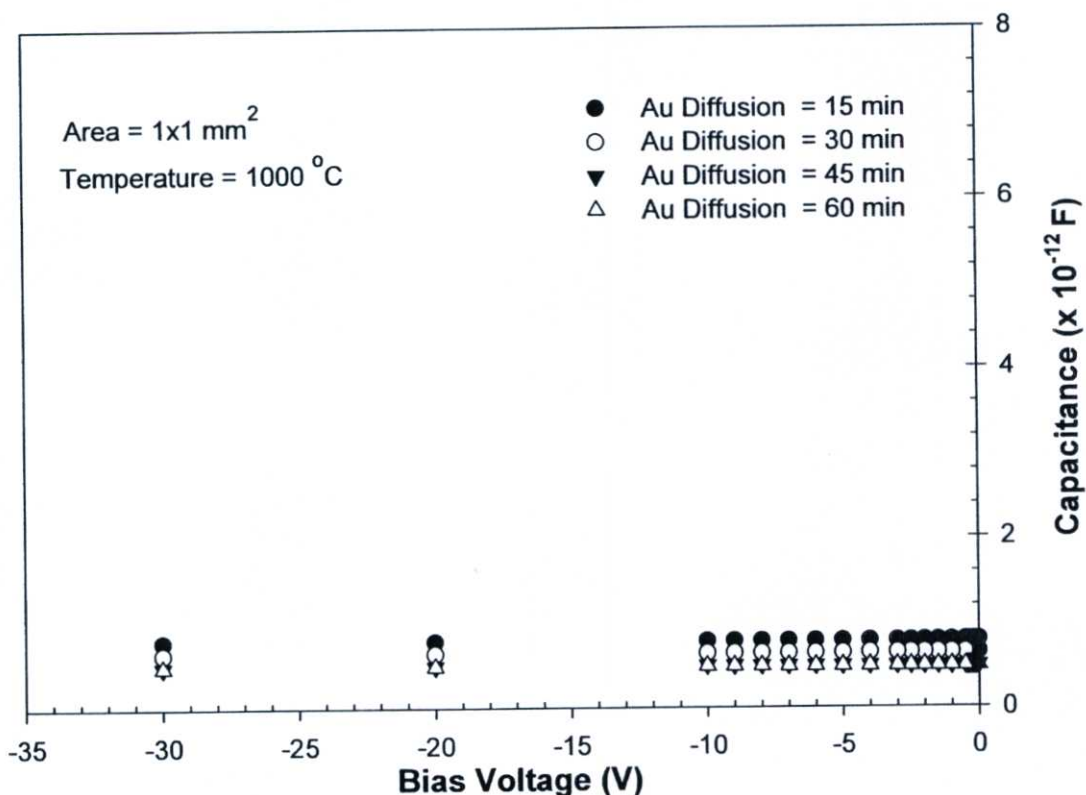


รูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกีที่มีไม่การเติมอะตอมทองคำ

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกีของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ แสดงดังรูปที่ 4.12 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกีเมื่อไม่มีการเติมอะตอมทองคำ พบว่ามีลักษณะที่แปรผกผันตามแรงดันไบอัส เนื่องจากผลมาจากการที่แรงดันไบอัสมากขึ้นจึงทำให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลง อย่างไรก็ตาม จากลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันนี้ สามารถนำไปวิเคราะห์ หาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของแผ่นซิลิคอนเริ่มต้นได้ โดยจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 6.1

#### 4.2.2 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ใช้อุณหภูมิในการแพร่อะตอมทองคำ 1000 °C และที่ใช้เวลาในการแพร่ 15, 30, 45 และ 60 นาที จากผลการวัดความจุไฟฟ้า-แรงดัน สามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.13 โดยให้แกนนั่งของกราฟเป็นแกนความจุไฟฟ้าส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัส



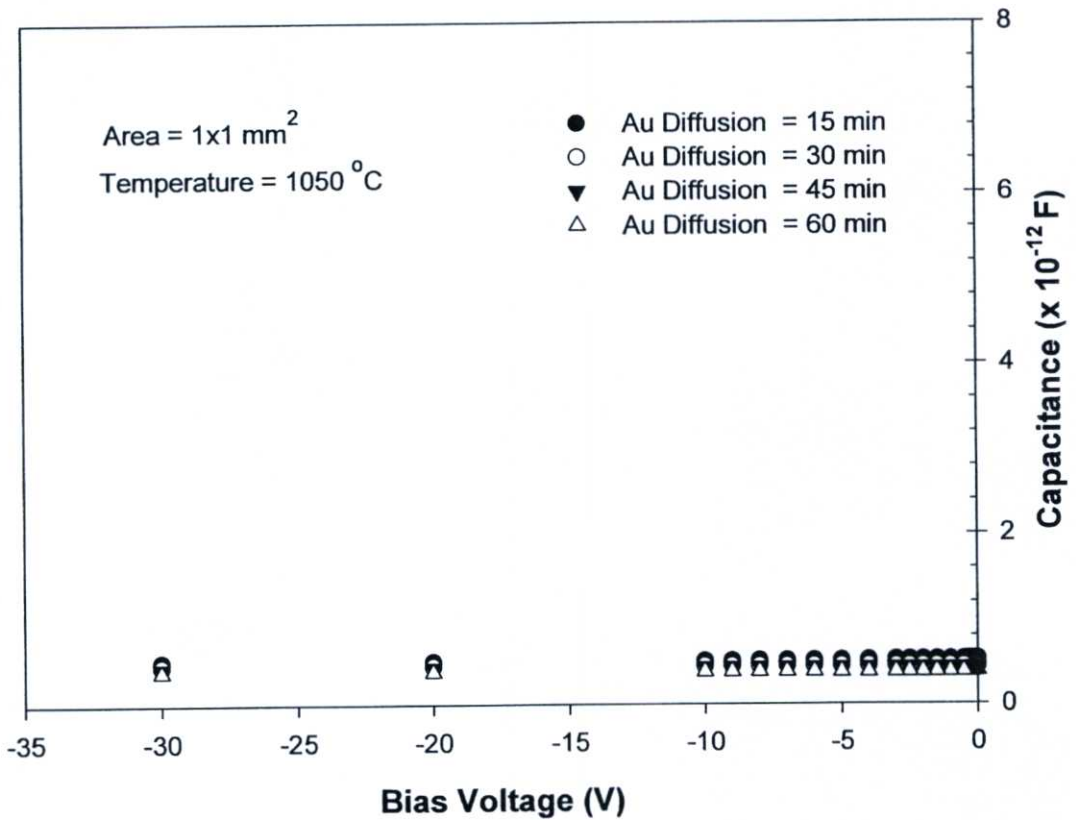
รูปที่ 4.13 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ 1000 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.13 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ พบว่ามีลักษณะคงที่ไม่แปรผันตามแรงดันไบอัส เนื่องจากผลของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ชดเชยขึ้น ผลที่ได้จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะสามารถขยายออกจนเกิดการอิ่มตัว จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำมีค่าคงที่

โดยค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่เวลาในการแพร่อะตอมทองคำต่างๆกัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 0.8 pF ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้ จะทำการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 6.1

#### 4.2.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่มีการ เติมอะตอมทองคำที่ใช้อุณหภูมิในการแพร่ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ใช้อุณหภูมิในการแพร่อะตอมทองคำ 1050 °C และที่เวลาในการแพร่ 15, 30, 45 และ 60 นาที จากผลการวัดความจุไฟฟ้า-แรงดัน สามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.14 โดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นแกนความจุไฟฟ้าส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัส



รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ 1050 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิในการแพร่ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.14 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน มีลักษณะคงที่ไม่แปรผันตามแรงดันไบอัสและพบว่ามีลักษณะ

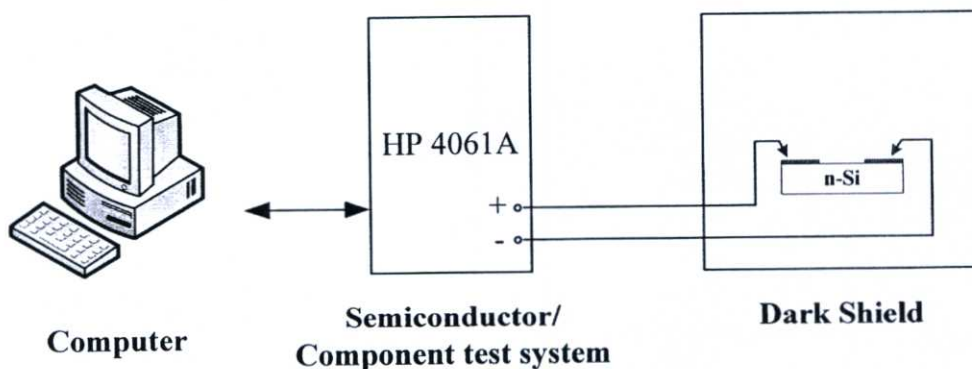
คงที่ไม่แปรผันตามแรงดันไบอัส เนื่องจากผลของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ชดเชยขึ้น ผลที่ได้จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะสามารถขยายออกได้เต็มที่ จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำมีค่าคงที่ โดยค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำที่เวลาในการแพร่อะตอมทองคำต่างกัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 – 0.5 pF ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้ จะทำการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 6.1

#### 4.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ในสัญญาณแสงกระแสดตรง

สมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ในสัญญาณแสงกระแสดตรงที่สำคัญได้แก่ สมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ, สมบัติกระแสแสง-แรงดันที่ความเข้มแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่างๆ โดยที่สมบัติต่างๆ นี้จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

##### 4.3.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

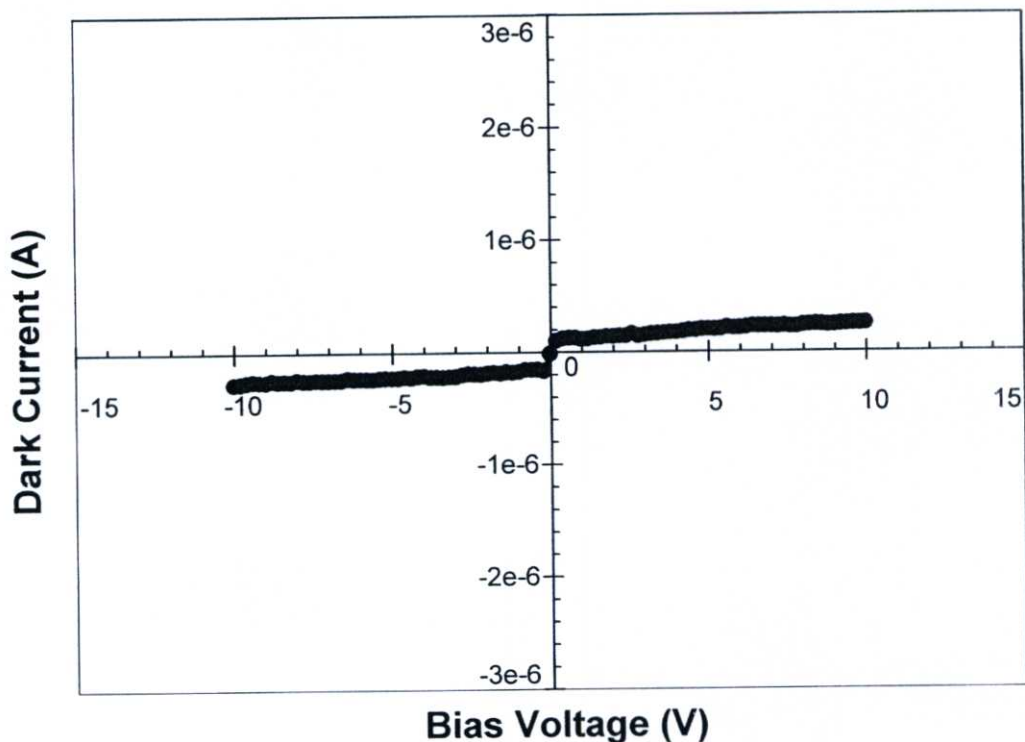
การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ หรือที่เรียกว่ากระแสมืด ( $I_{dark}$ ) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ เข้าไปในฐานรองซึ่งเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A ซึ่งแสดงแผนภาพของเครื่องมือดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

#### 4.3.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอม ของค่าขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมของค่าสามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันโดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัส ดังรูปที่ 4.16 เพื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

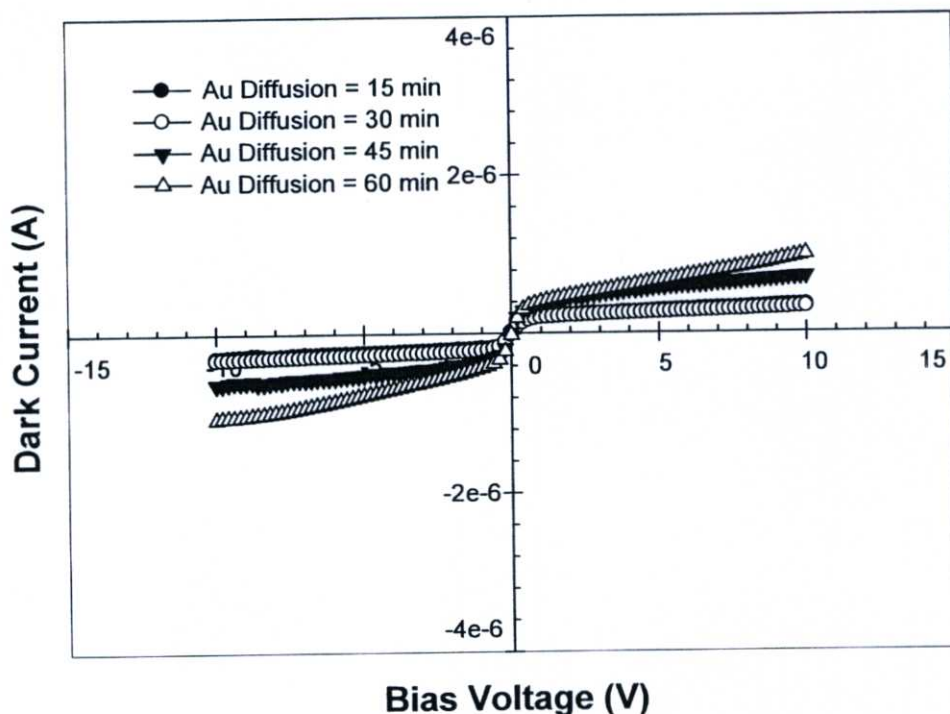


รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมของค่าขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ผลการทดสอบลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมของค่าขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ แสดงดังรูปที่ 4.16 กระแสมีคของตัวตรวจวัดแสงมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับแรงดันไบอัส เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นกระแสมีคของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้น และยังมีลักษณะของกราฟที่สมมาตร ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM โดยค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ  $2.2 \times 10^{-7}$  A ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V

#### 4.3.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C และที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสง ตกกระทบ

การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C และที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบสามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันโดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัส ดังรูปที่ 4.17 เพื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

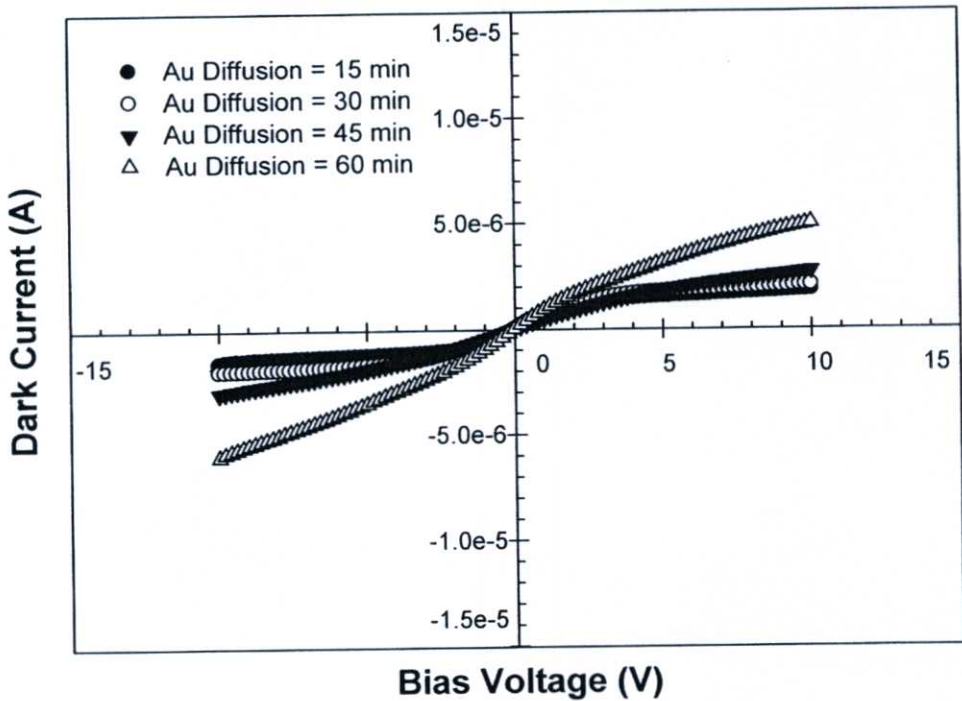


รูปที่ 4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอมทองคำที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไขเวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C และที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ แสดงดังรูปที่ 4.17 กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับแรงดันไบอัส เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้น และยังมีลักษณะของกราฟที่สมมาตร ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM นอกจากนี้กระแสมืดยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ โดยมีค่าเท่ากับ  $4.37 \times 10^{-7}$ ,  $5.42 \times 10^{-7}$ ,  $5.86 \times 10^{-7}$  และ  $6.7 \times 10^{-7}$  A ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V ที่เวลาในการแพร่เท่ากับ 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

#### 4.3.1.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C และที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C และที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบสามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน โดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัส ดังรูปที่ 4.18 เพื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น



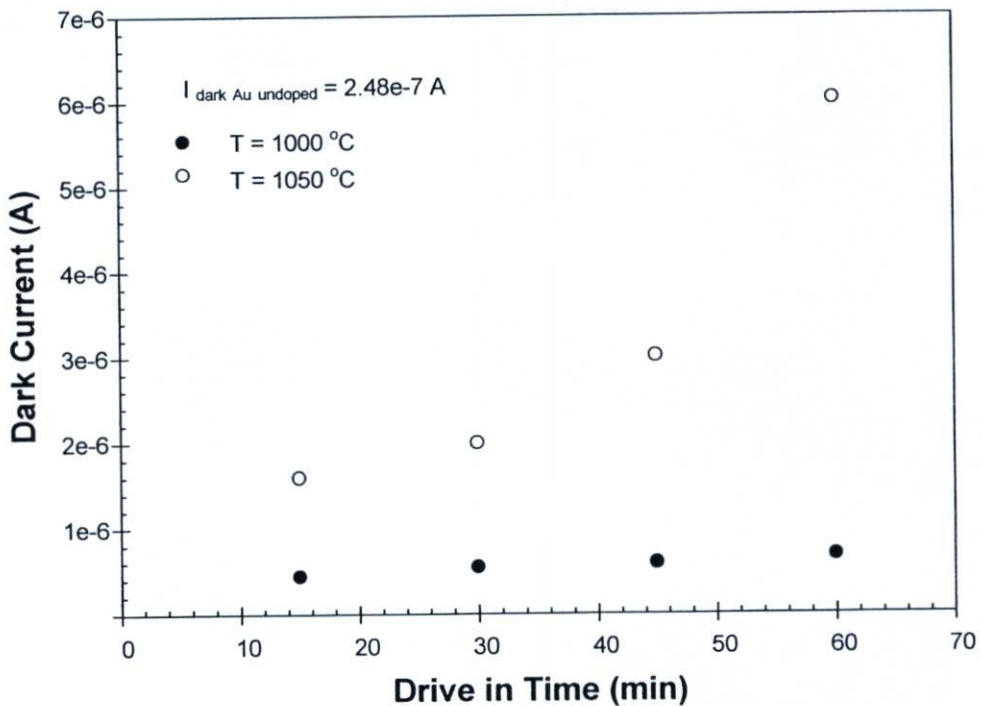
รูปที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไขเวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C และที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ แสดงดังรูปที่ 4.18 กระแสมีคของตัวตรวจวัดแสงมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับแรงดันไบอัส เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น กระแสมีคของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้น และยังมีลักษณะของกราฟที่สมมาตร ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM นอกจากนี้กระแสมีคยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ใน

การแพร่อะตอมทองคำโดยมีค่าเท่ากับ  $1.59 \times 10^{-6}$ ,  $1.99 \times 10^{-6}$ ,  $3.00 \times 10^{-6}$  และ  $6.01 \times 10^{-6}$  A ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V ที่เวลาในการแพร่เท่ากับ 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

#### 4.3.1.4 ลักษณะสมบัติของกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสงและเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ สามารถนำข้อมูลจากทุกเงื่อนไขที่ได้มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมีดและเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิในการแพร่ต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงและผลกระทบเมื่อมีการเติมอะตอมทองคำที่เวลาในการแพร่และที่อุณหภูมิในการแพร่ต่างๆ ดังรูปที่ 4.19



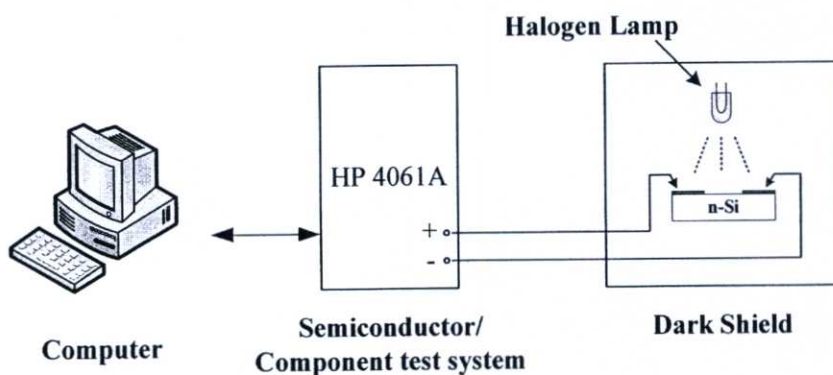
รูปที่ 4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่มีการเติมอะตอมทองคำเงื่อนไขในการแพร่ต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 โวลต์

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ดังรูปที่ 4.16 พบว่ากระแสมีดของตัวตรวจวัด

แสงมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับแรงดันไบอัส เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้นตาม ตามแรงดันไบอัสที่ได้รับ ส่วนกรณีของตัวตรวจวัดแสงที่มีการแพร์อะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 และ 1050 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไขการแพร์ที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ ผลของกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแพร์อะตอมทองคำ เนื่องผลของอะตอมทองคำจะทำให้ค่าของกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำหรือกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลของอะตอมทองคำจะทำให้เกิดศูนย์กลางการรวมตัวและเกิดใหม่ขึ้น ซึ่งระดับพลังงานดังกล่าวจะส่งผลต่อกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสง ดังรูปที่ 4.19

#### 4.3.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ขณะได้รับแสงตกกระทบ

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงในสภาวะแสง กระแสตรง โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A และใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ซึ่งแสดงแผนภาพของเครื่องมือดังรูปที่ 4.20 ซึ่งการทดลองจะทำการศึกษาผลของกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และ ที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 4.20 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

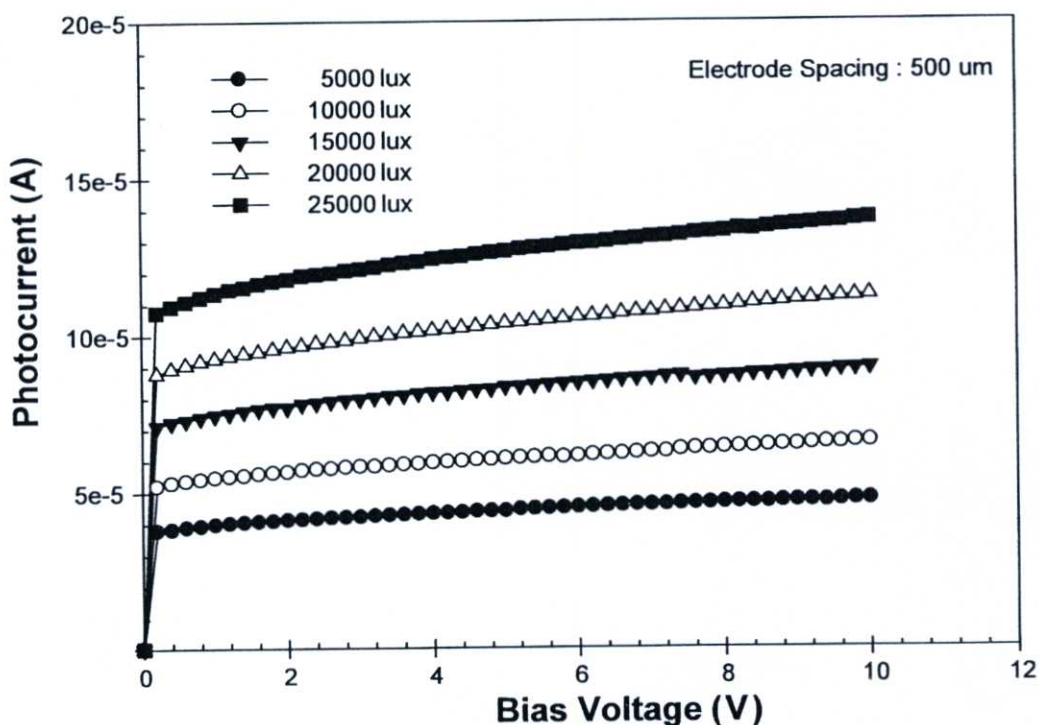
โดยทำการวัดกระแสมีดในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบ ( $I_{\text{dark}}$ ) และกระแสรวมของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงตกกระทบ ( $I_{\text{total}}$ ) จากนั้นจึงทำการหาค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ( $I_{\text{photo}}$ ) จากสมการที่ 4.4

$$I_{\text{photo}} = I_{\text{total}} - I_{\text{dark}} \quad (4.4)$$

จากนั้นนำค่ากระแสแสงที่ได้มาแสดงเป็นกราฟเพื่อวิเคราะห์และพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ซึ่งได้แก่ ความเข้มแสง, แรงดันไบอัส, ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะและผลกระทบในการเติมอะตอมทองคำรวมทั้งการพิจารณาแนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงของผลกระทบดังกล่าว

#### 4.3.2.1. ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันที่ความเข้มแสงต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันโดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัสของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ เพื่อเป็นการวิเคราะห์ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ดังรูปที่ 4.21

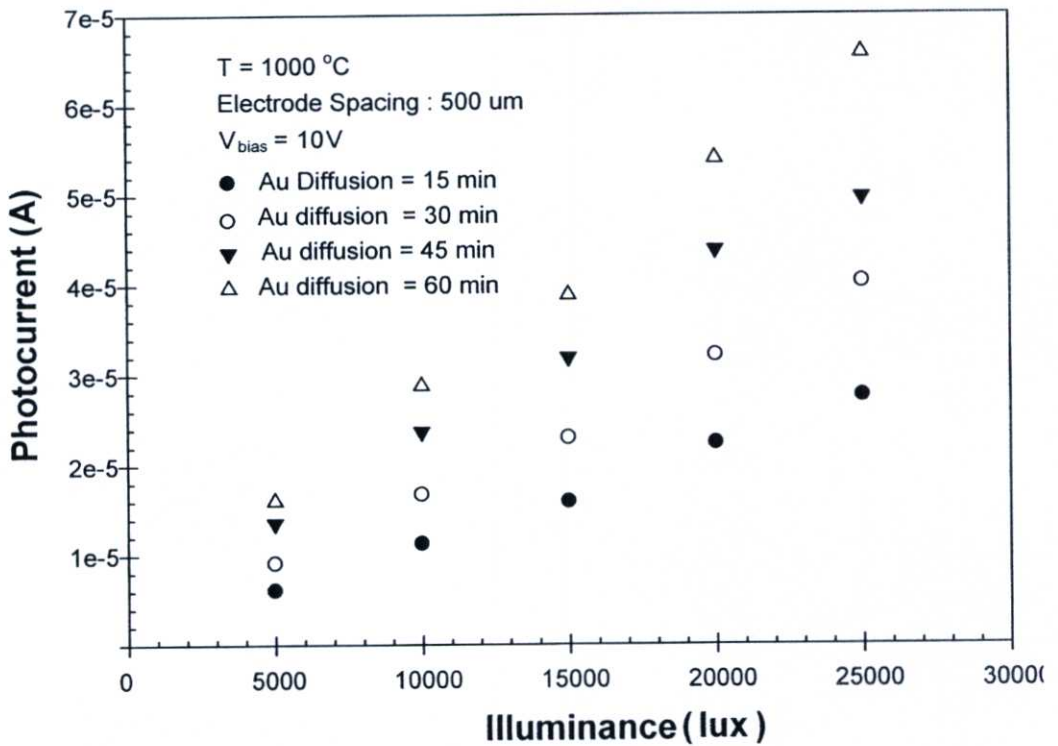


รูปที่ 4.21 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในช่วง 5000 – 25,000 ลักซ์

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ความเข้มแสงต่างๆ เมื่อไม่มีการเติมอะตอมทองคำในรูปที่ 4.21 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มแสงมากขึ้น เนื่องจากความเข้มแสงที่มากขึ้นจะทำให้มีปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสงมีมากขึ้นจึงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณพาหะที่ทำให้เกิดกระแสมีสูงขึ้น กระแสแสงที่ได้จึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ [20, 22, 23]

#### 4.3.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงเมื่อมีการเติมทองคำด้วยอุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงโดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสส่วนแกนนอนเป็นแกนความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C และที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ดังรูปที่ 4.22

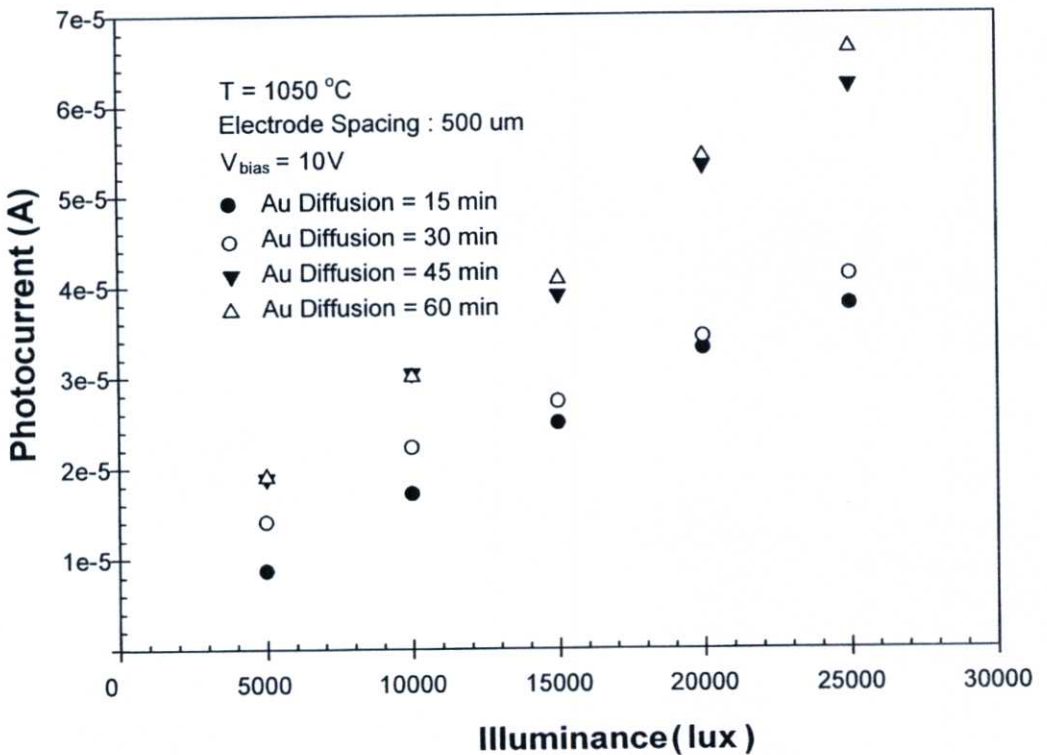


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงต่างๆเมื่อมีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงต่างๆ เมื่อมีการเติมทองที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ดังรูปที่ 4.22 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มแสงมากขึ้น เนื่องจากความเข้มแสงที่มากขึ้นจะทำให้มีปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสงมีมากขึ้นจึงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย เมื่อปริมาณพาหะที่ทำให้เกิดกระแสมีสูงขึ้น กระแสแสงที่ได้จึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ [20, 22, 23]

#### 4.3.2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงเมื่อมีการเติมทองด้วยอุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสง โดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสส่วนแกนนอนเป็นแกนความเข้มแสงและเลือกเงื่อนไข เมื่อมีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ดังรูปที่ 4.23

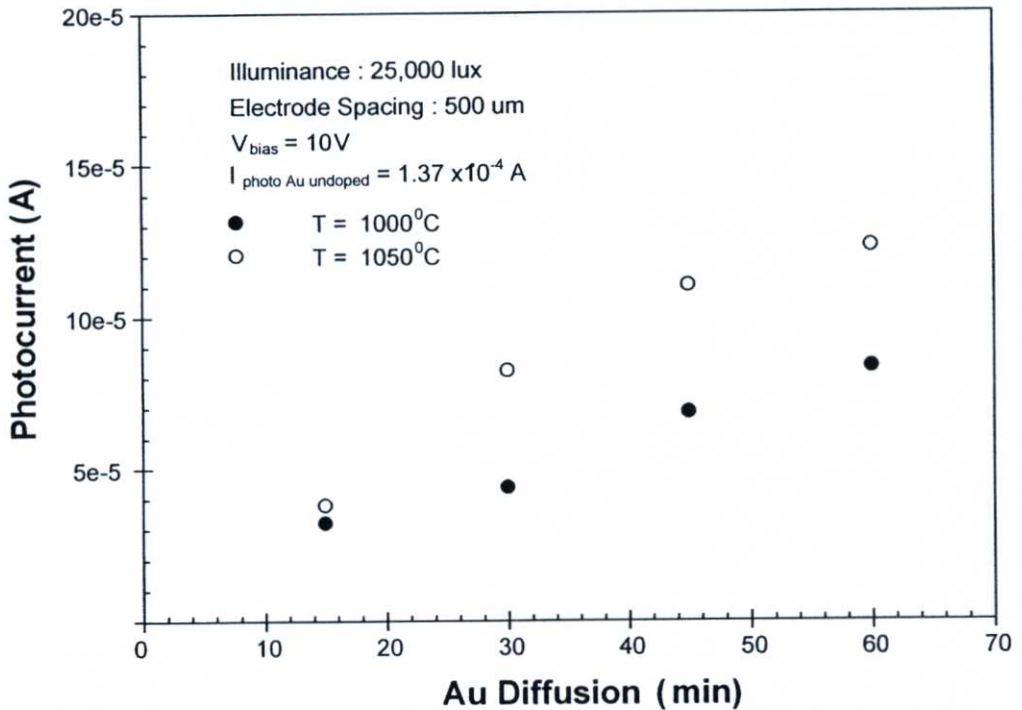


รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงต่างๆของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงต่างๆ เมื่อมีการเติมทองที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ดังรูปที่ 4.23 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มแสงมากขึ้น เนื่องจากความเข้มแสงที่มากขึ้นจะทำให้มีปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสงมีมากขึ้นจึงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย เมื่อปริมาณพาหะที่ทำให้เกิดกระแสมีสูงขึ้น กระแสแสงที่ได้จึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ [20, 22, 23]

#### 4.3.2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง สามารถนำข้อมูลจากทุกเงื่อนไขที่ได้มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและเวลาในการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิในการแพร่ต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงและผลกระทบเมื่อมีการเติมอะตอมทองคำที่เวลาและอุณหภูมิในการแพร่ต่างๆ ดังรูปที่ 4.24

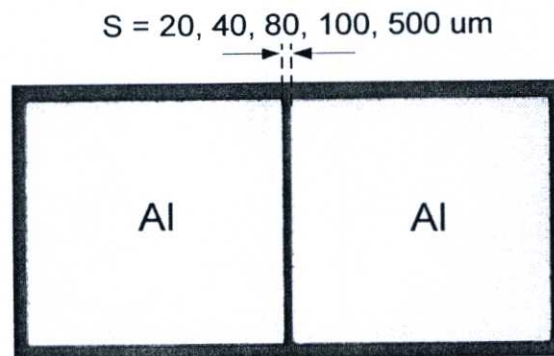


รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและเวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.24 เวลาและอุณหภูมิในการแพร่อะตอมทองคำมีผลต่อกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง โดยที่เมื่อเวลาและอุณหภูมิในการแพร่อะตอมทองคำมากขึ้นจะทำให้เกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มมากขึ้น ตามลำดับ เนื่องจากระดับพลังงานของอะตอมทองคำสามารถปลดปล่อยพาหะได้เมื่อได้รับแสง ซึ่งมีผลต่อกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ผลที่ได้จึงทำให้กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำมีค่ามากขึ้น แต่จากผลการทดลองจะพบว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่ากระแสแสงที่น้อยกว่าตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำเนื่องจากกระแสแสงบางส่วนถูกจับด้วยระดับพลังงานของอะตอมทองคำ จึงทำให้กระแสแสงมีค่าลดลงเมื่อทำการเติมอะตอมทองคำ

#### 4.3.3 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ

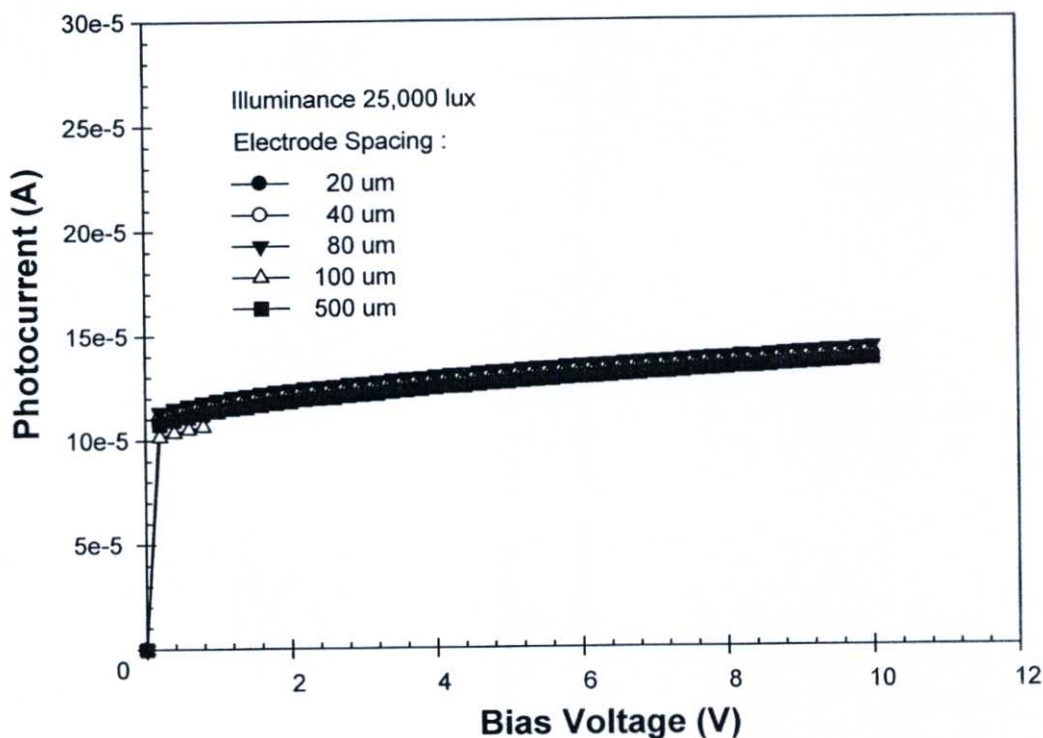
การทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะเท่ากับ 20, 40, 80, 100 และ 500  $\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 4.25 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่างๆ เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน



รูปที่ 4.25 ตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 20, 40 80, 100 และ 500  $\mu\text{m}$

### 4.3.3.1 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่างๆ โดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสแสงส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดัน ขณะได้รับแสง 25,000 lux เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ดังรูปที่ 4.26



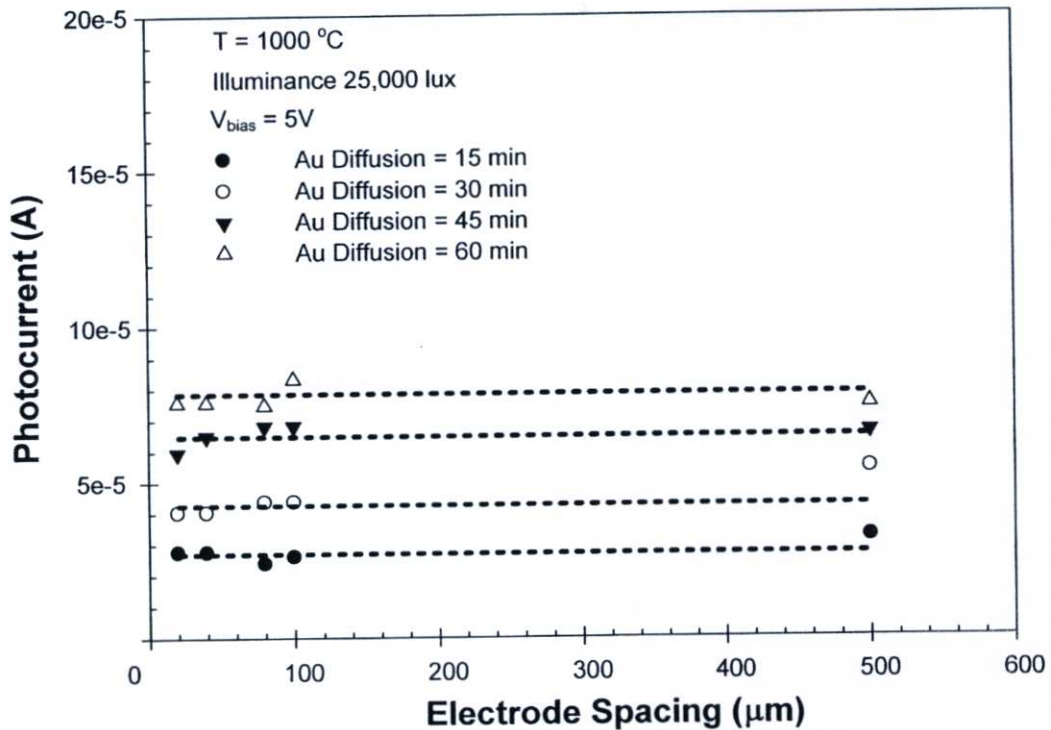
รูปที่ 4.26 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่างๆ ในรูปที่ 4.26 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ เนื่องจากโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ เป็นโครงสร้างที่ระยะห่างระหว่างขั้วเป็นแบบกว้าง ซึ่งผลดังกล่าวทำให้กระแสแสงที่ได้เป็นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในบริเวณหลอดพลาสมาเท่านั้น ส่วนในบริเวณนิวทรัลคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้น จะเกิดการรวมตัวกันหมดเนื่องจากบริเวณนิวทรัลมีขนาดที่กว้างมากขึ้น ดังนั้นกระแสแสงที่ได้จึงไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้ว

### 4.3.3.2 ลักษณะสมบัติกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัด

แสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ โดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสส่วนแกนนอนเป็นแกนระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ ดังรูปที่ 4.27

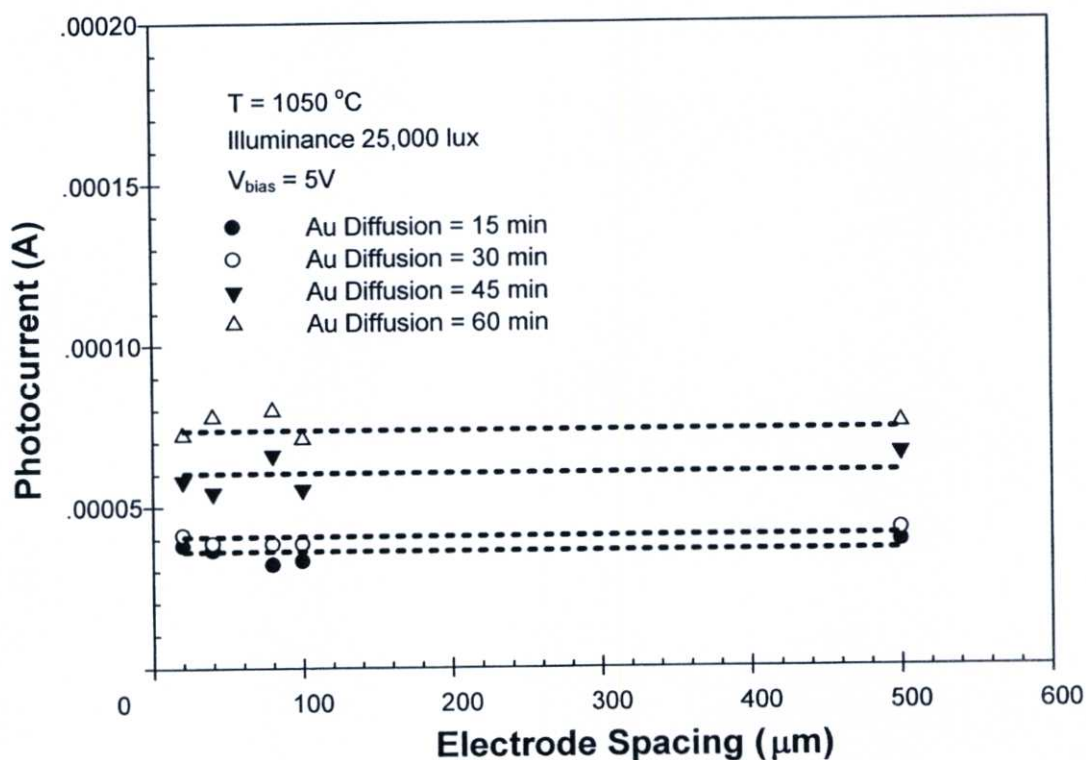


รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ในรูปที่ 4.27 พบว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วโลหะแต่กระแสแสงเนื่องจากโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ เป็นโครงสร้างที่ระยะห่างระหว่างขั้วเป็นแบบกว้าง ดังนั้นกระแสแสงที่ได้จึงไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้ว [6, 20]

### 4.3.3.3 ลักษณะสมบัติกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ โดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแสส่วนแกนนอนเป็นแกนระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ ดังรูปที่ 4.28

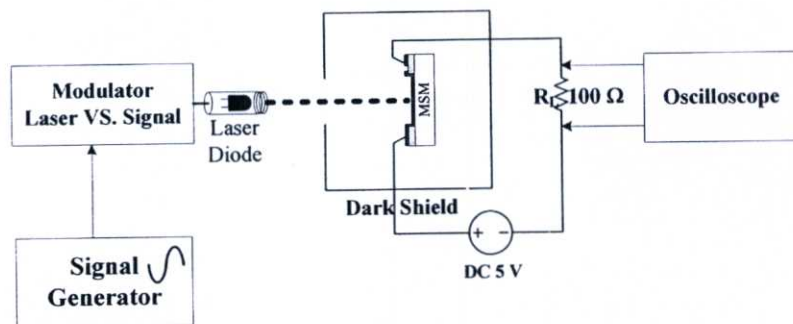


รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ ในรูปที่ 4.28 พบว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วโลหะแต่กระแสแสงเนื่องจากโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ เป็น โครงสร้างที่ระยะห่างระหว่างขั้วเป็นแบบกว้าง ดังนั้นกระแสแสงที่ได้จึงไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้ว [6, 20]

#### 4.4 ผลการทดสอบลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ในสัญญาณแสงกระแสดับ

การวัดผลการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในสัญญาณแสงกระแสดับตัวตรวจวัดแสงทำโดยต่อวงจรวัดดังแผนภาพในรูปที่ 4.29 โดยจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) ของบริษัท Tektronix รุ่น AFG 320 ส่งสัญญาณรูปไซน์ (sine) ขนาด  $400 \text{ mV}_{pp}$  ความถี่ต่างๆ เข้าสู่วงจรมอดูเลท (modulator) ซึ่งจะทำงานร่วมกับเลเซอร์ไดโอดโดยเปลี่ยนสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณแสงกระแสดับ เลเซอร์ไดโอดที่ใช้มีความยาวคลื่น  $670 \text{ nm}$  ของบริษัท RS รุ่น V9323 (194-004) กำลังงาน  $2.67 \text{ mW}$  (วัดด้วยเครื่องเลเซอร์วัดคีมิตเตอร์ของบริษัท Edmund Optics) โดยจัดตำแหน่งให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงซึ่งอยู่ในกล่องมืด ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al จะต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่ายไฟและความต้านทานโหลด ( $R_L$ ) การวัดสัญญาณจะวัดศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดด้วยออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ของบริษัท Tektronix รุ่น TDS 3012B แล้วนำค่าที่ได้ทำการนอร์มอลไรซ์ (normalize) เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่



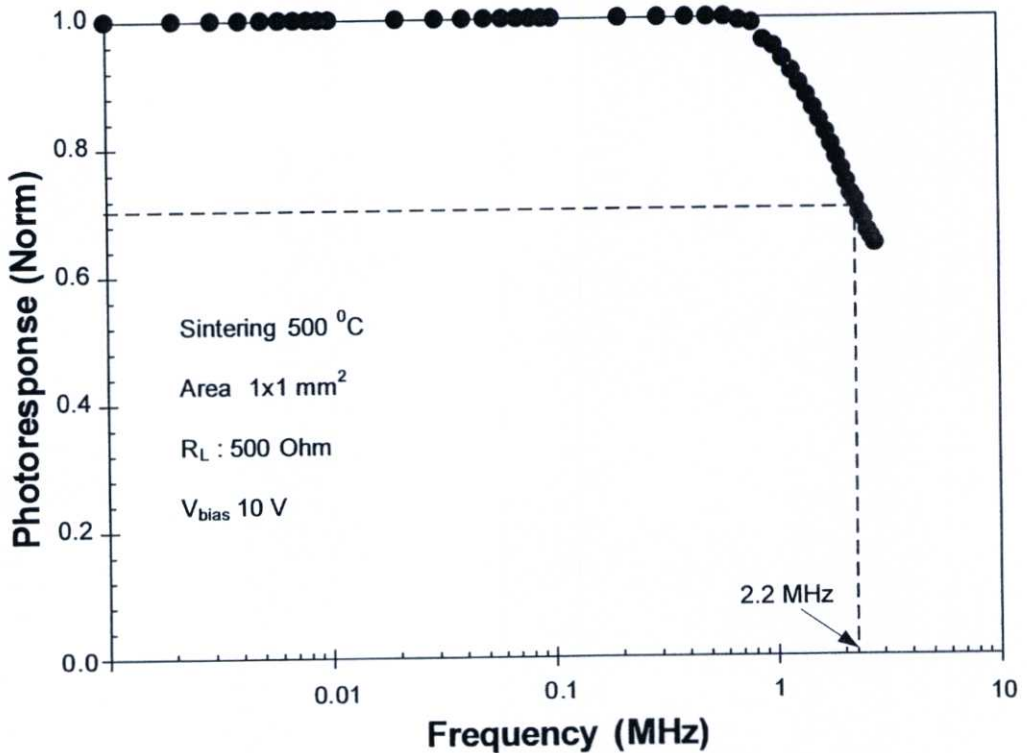
รูปที่ 4.29 แผนภาพการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในสัญญาณแสงกระแสดับ

##### 4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ โดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นแกนการตอบสนองทางแสงส่วนแกนนอนเป็นแกน

ความถี่ โดยมีแรงดันไบอัส เท่ากับ 10 โวลต์และที่ความต้านทานโหลด เท่ากับ 500 โอห์ม ดังรูปที่

4.30



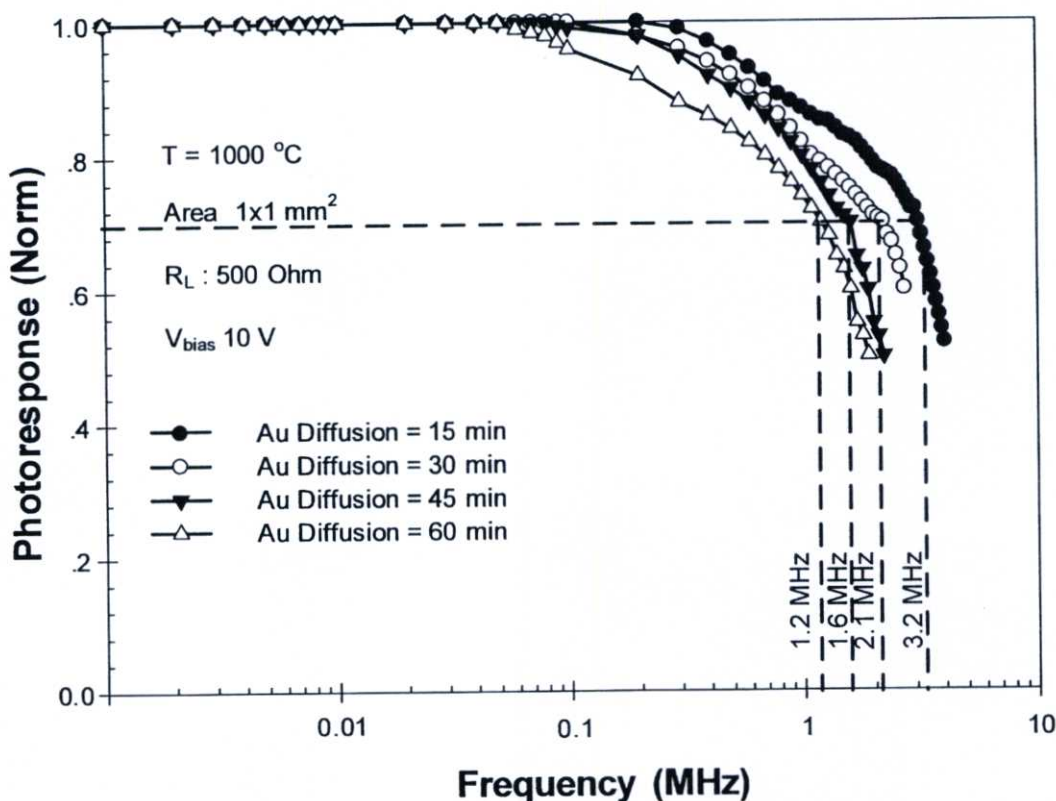
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

จากความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ในรูปที่ 4.30 การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ โดยมีค่าความถี่คัทออฟที่ 2.2 MHz ซึ่งจากผลการทดลองนี้จะทำการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 6.2

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ โดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นแกนการตอบสนอง

ทางแสงส่วนแกนนอนเป็นแกนความถี่ ให้แรงดันไบอัส เท่ากับ 10 โวลต์ ที่ความต้านทานโหลด เท่ากับ 500 โอห์ม ดังรูปที่ 4.31



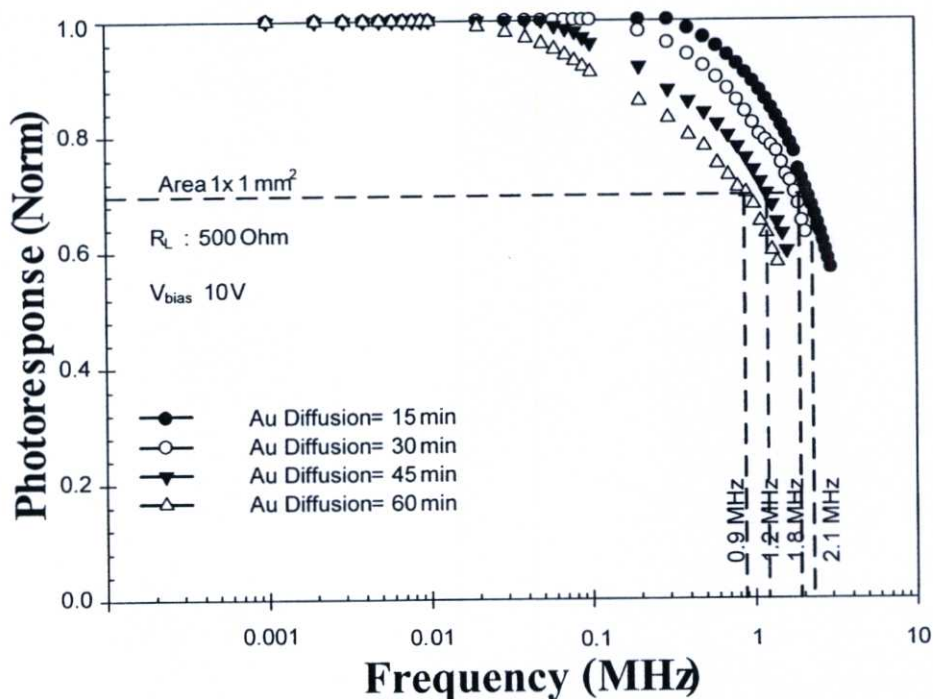
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ 15, 30, 45 และ 60 นาที ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ โดยมีค่าความถี่คutoff ที่ 3.2, 2.1, 1.6, 1.2 MHz ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีการตอบสนองความถี่ที่สูงที่สุดที่ 3.2 MHz แต่จะมีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาในการแพร่มากขึ้น เนื่องจากการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในตัวตรวจวัดแสงจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงมีค่าลดลง ซึ่งในผลการทดลองที่ผ่านมาจะมีค่าความจุไฟฟ้าอยู่ใน 0.5-0.8 pF ซึ่งการลดลงของค่าความจุไฟฟ้า น่าจะทำให้ค่าเวลาคงที่ซึ่งเกิดจากผลคูณของความจุไฟฟ้าและความต้านทานมีค่าลดลง แต่จากผลจากการทดลองจะพบอีกว่าตัวตรวจวัดจะมีค่าความต้านทานอนุกรม

มากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการแพร่านขึ้น ผลที่ได้จึงทำให้ให้ตัวตรวจวัดแสงที่ใช้อุณหภูมิในการแพร่ 1000 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่ 15 นาที มีค่าเวลาคงที่น้อยที่สุด

#### 4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ โดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นแกนการตอบสนองทางแสงส่วนแกนนอนเป็นแกนความถี่ ให้แรงดันไบอัส เท่ากับ 10 โวลต์ ที่ความต้านทานโหลด เท่ากับ 500 โอห์ม ดังรูปที่ 4.32



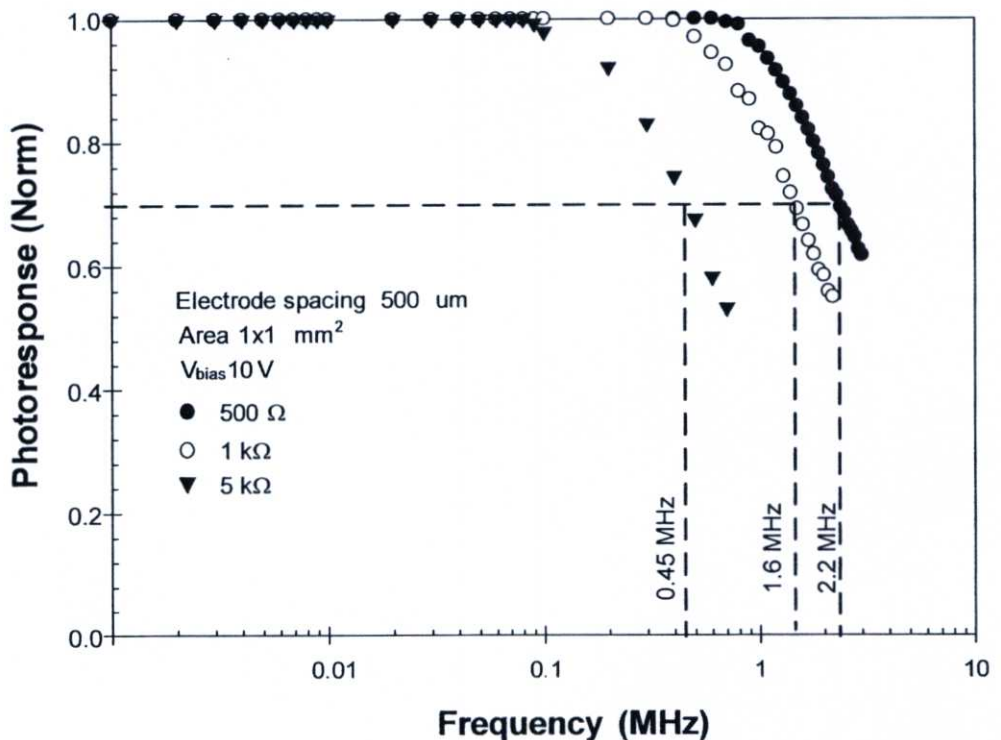
รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

จากความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ 15, 30, 45 และ 60 นาที ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ โดยมีค่าความถี่คัทออฟที่ 2.1, 1.8, 1.2, 0.9 MHz ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอม

ทองคำจะมีการตอบสนองความถี่ที่สูงที่สุดที่ 2.1 MHz สาเหตุที่ตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่ใช้อุณหภูมิในการแพร่ 1050 องศาเซลเซียสมีค่าการตอบสนองความถี่ที่ต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่ใช้อุณหภูมิในการแพร่ 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำที่ใช้อุณหภูมิในการแพร่ 1050 องศาเซลเซียสจะมีค่าความต้านทานอนุกรมที่สูงกว่า ผลที่ได้จะทำให้ค่าเวลาคงที่ของตัวตรวจวัดแสงนี้มีค่าเวลาคงที่ ที่มากกว่าตัวตรวจวัดแสงที่ใช้อุณหภูมิในการแพร่ 1000 องศาเซลเซียส

#### 4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ที่ความต้านทานโหลดต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ที่ความต้านทานโหลดต่างๆ โดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนการตอบสนองทางแสงส่วนแกนนอนเป็นแกนความถี่และเลือกเงื่อนไขเมื่อไม่มีการเติมทองคำและมีแรงดันไบอัส เท่ากับ 10 โวลต์เพื่อวิเคราะห์ผลของความต้านทานโหลดต่อลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ดังรูปที่ 4.33

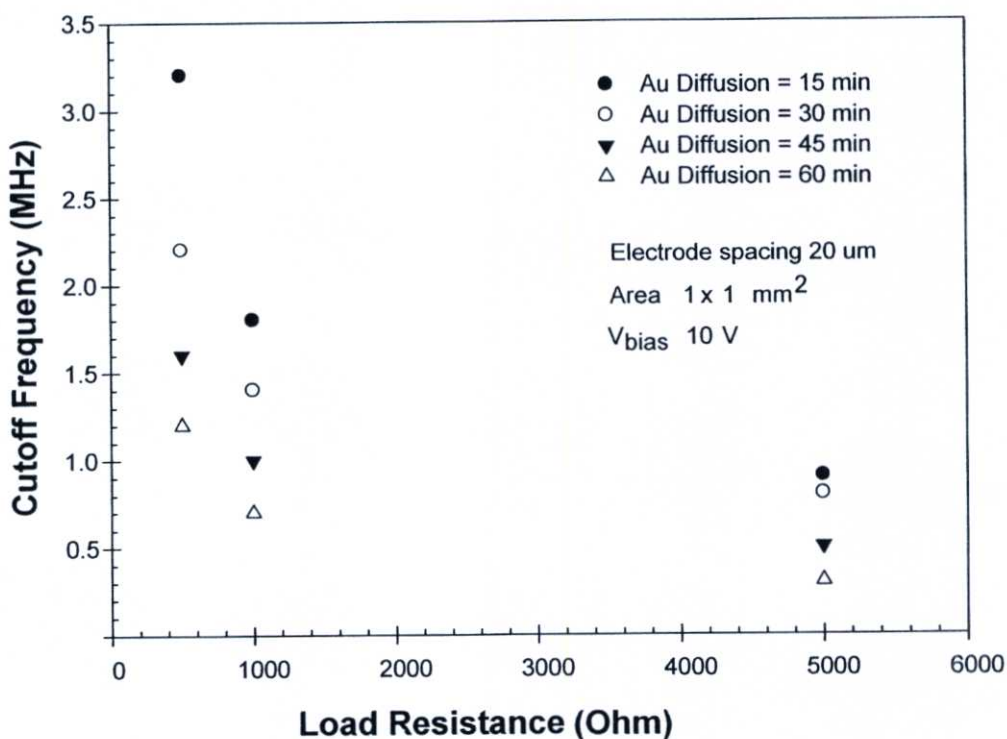


รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด

จากความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ที่ความต้านทานโหลดต่างๆ ในรูปที่ 4.33 การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความต้านทานโหลด เป็นผลมาจากค่าเวลาคงตัวซึ่งเกิดจากผลคูณของความจุไฟฟ้าและความต้านทานมีค่ามากขึ้น ซึ่งเวลาคงตัวจะมีผลต่อการตอบสนองต่อความถี่คัทออฟ

#### 4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ที่ความต้านทานโหลดต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาการแพร่ต่างๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัทออฟและความต้านทานโหลดของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำด้วยอุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ โดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนความถี่คัทออฟ ส่วนแกนนอนเป็นแกนความต้านทานโหลด ให้แรงดันไบอัส เท่ากับ 10 โวลต์ ดังรูปที่ 4.34



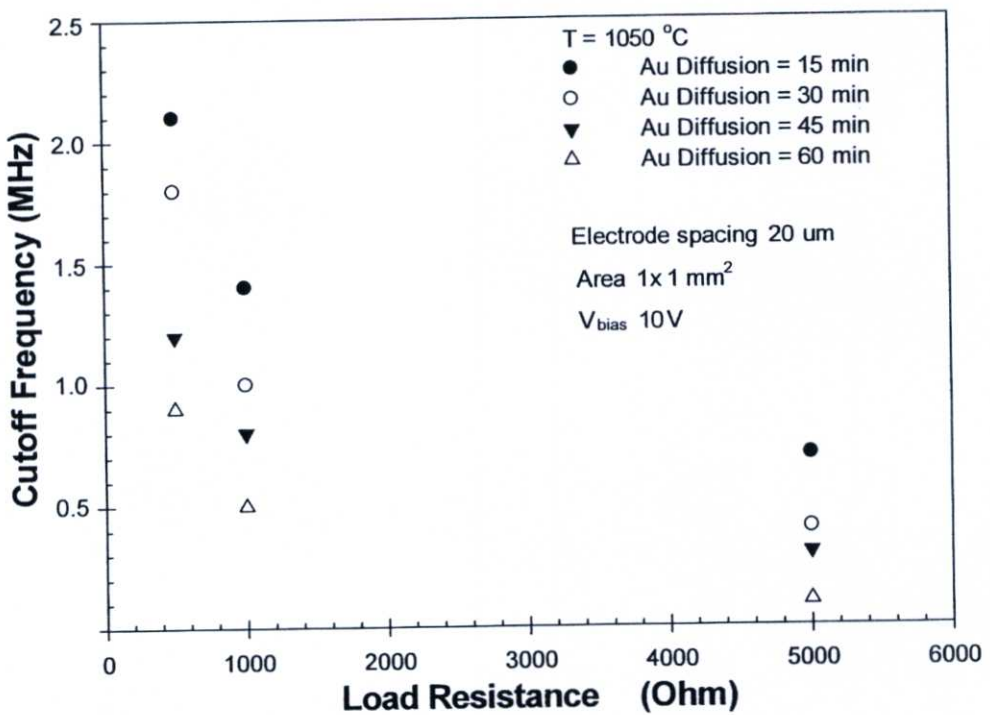
รูปที่ 4.34 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาการแพร่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด

จากความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ที่ความต้านทานโหลดต่างๆ ในรูปที่ 4.34 การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความต้านทานโหลด เป็นผลมาจากค่าเวลาคงตัวซึ่งเกิดจากผลคูณของความจุไฟฟ้าและความต้านทานมีค่ามากขึ้น ซึ่งเวลาคงตัวจะมีผลต่อการตอบสนองต่อความถี่คัทออฟ

#### 4.4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ที่ความต้านทานโหลดต่างๆ

ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาการแพร่ต่างๆ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัทออฟและความต้านทานโหลดของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำด้วยอุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ โดยให้แกนนตั้งของกราฟเป็นแกนความถี่คัทออฟส่วนแกนนอนเป็นแกนความต้านทานโหลด ให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 โวลต์ ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาการแพร่ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด

จากความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ที่ความต้านทาน โหลดต่างๆ ในรูปที่ 4.35 การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความต้านทาน โหลด เป็นผลมาจากค่าเวลาคงตัวซึ่งเกิดจากผลคูณของความจุ ไฟฟ้าและความต้านทานมีค่ามากขึ้น ซึ่งเวลาคงตัวจะมีผลต่อการตอบสนองต่อความถี่ที่ออฟ

## การวิเคราะห์และการอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองที่แสดงไว้ในบทที่ 4 ของโครงสร้าง MSM แบบพลาเนอร์ ชนิด Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ ซึ่งทำให้เข้าใจถึงกลไกการทำงานของพาหะอิสระที่เกิดขึ้น ในขณะที่อุปกรณ์ได้รับแสงตกกระทบ และผลจากการวิเคราะห์ที่ยืนยันถึงความถูกต้องของแนวความคิดริเริ่มนี้ด้วย การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองทั้งหมดในบทนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 5.1 การวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ [9, 11, 30]

จากหัวข้อการทดลองที่ผ่านมา ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำผลค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของซิลิคอน ในการหาค่าความหนาแน่นของสารเจือจากคุณลักษณะความจุไฟฟ้า [14, 30] จะเริ่มต้นมาจากสมการที่ 5.1

$$C = \frac{A \epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (5.1)$$

ซึ่งจากสมการที่ 5.1 สามารถนำมาหาค่าความหนาแน่นของสารเจือได้ โดยใช้สมการที่ 5.2

$$N_D = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{q \epsilon_s C^{-2}} \quad (5.2)$$

และเมื่อพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 และ 4.2.3 จะพบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อย

กว่าค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ เนื่องจาก การเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็นจะทำให้การปรากฏการณ์ชดเชย ระหว่าง อะตอมสารเจือของซิลิคอนกับอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนเกิดขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ของซิลิคอนชนิดเอ็นมีค่าลดลง ดังสมการที่ 5.3 [30]

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s(N_D - N_t)}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (5.3)$$

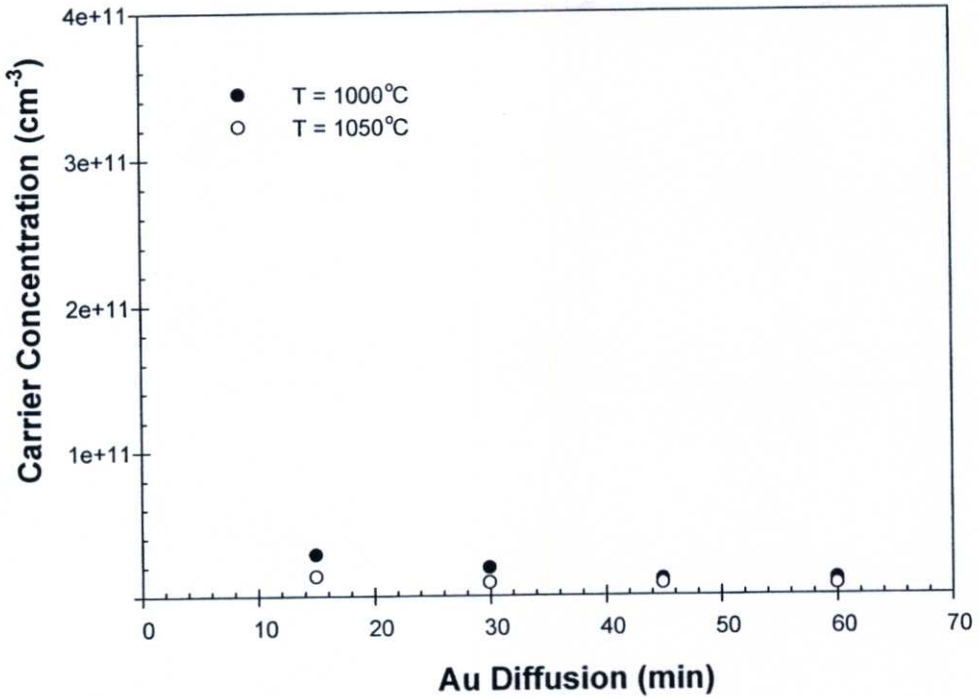
จากคุณลักษณะความจุไฟฟ้านี้ สามารถหาค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็นได้โดยใช้สมการที่ 5.4

$$N_D - N_t = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{q\epsilon_s C^2} \quad (5.4)$$

ในการหาค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็นนี้ สามารถทำได้โดยการหาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของซิลิคอนของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ มาแทนลงในสมการที่ 5.4 ผลที่ได้จะสามารถหาค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนได้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 5.1.1 ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ

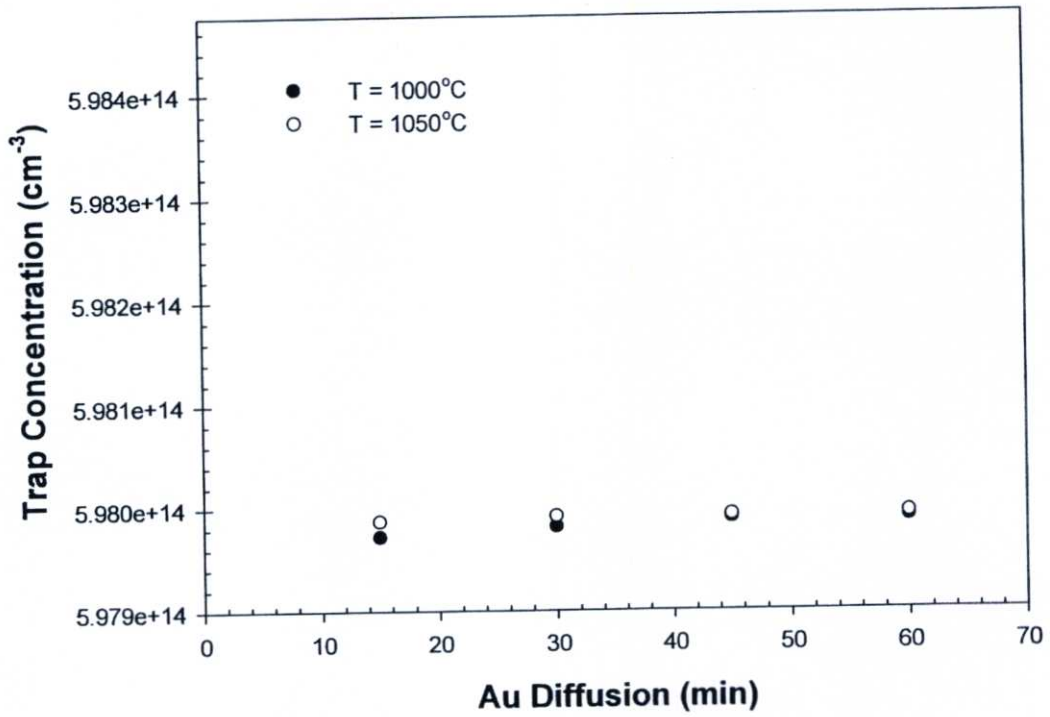
จากผลการทดลองที่ผ่านมาของค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ พบว่าจากการเติมอะตอมทองคำจะทำให้ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขยายจนเกิดการอ้อมตัว ซึ่งทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัส ดังนั้นในการวิเคราะห์การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของซิลิคอนที่มีการเติมอะตอมทองคำ จะเลือกพิจารณาที่แรงดันไบอัส 0 โวลต์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ซึ่งผลของค่าความหนาแน่นของสารเจือของซิลิคอนที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมสารเจือและเวลาที่ใช้ในการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ต่างๆ

จากข้อมูลในรูปที่ 5.1 ค่าความหนาแน่นของสารเจือที่ได้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของรอยสัมผัสขั้วของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ โดยจะมีค่าประมาณ  $5.98 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  สาเหตุที่ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของซิลิคอนที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ มีค่าน้อย เนื่องจากการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ชดเชย ระหว่างอะตอมสารเจือกับอะตอมทองคำเกิดขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ได้มีค่าน้อยกว่าซิลิคอนที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และเมื่อพิจารณาที่เวลาในการแพร่อะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอน จะพบว่าที่เวลาในการแพร่ต่างๆ กัน ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการแพร่ที่ต่างกัน จะพบว่าที่อุณหภูมิในการแพร่อะตอมทองคำที่ 1050 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่น้อยกว่าที่อุณหภูมิในการแพร่ 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากอะตอมทองคำมีสัมประสิทธิ์ในการแพร่ที่สูง ดังนั้นผลของเวลาในการแพร่จึงใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ จะพบว่าจำนวนอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าโซลิด โซลูบิลิตี และเมื่อ

นำค่าที่ได้จากรูปที่ 5.1 ไปหาค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็นที่เงื่อนไขในการแพร่ต่างๆ จะได้กราฟดังรูป 5.2



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมทองคำและเวลาในการแพร่เมื่อมีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟนี้จะพบว่าที่เวลาในการแพร่อะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนต่างๆ กัน จะได้อัตราความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอะตอมทองคำมีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สูง แต่จำนวนค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำจะต่างกันก็ต่อเมื่อทำการแพร่ที่อุณหภูมิที่ต่างกัน และเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองนี้ ผู้วิจัยจึงนำซิลิคอนที่มีการแพร่อะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ ไปทำการศึกษาดัวยวิธีรutherford backscattering spectroscopy ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

## 5.2 การศึกษาซิลิคอนที่มีการเติมอะตอมทองคำด้วยวิธีรutherford backscattering spectroscopy

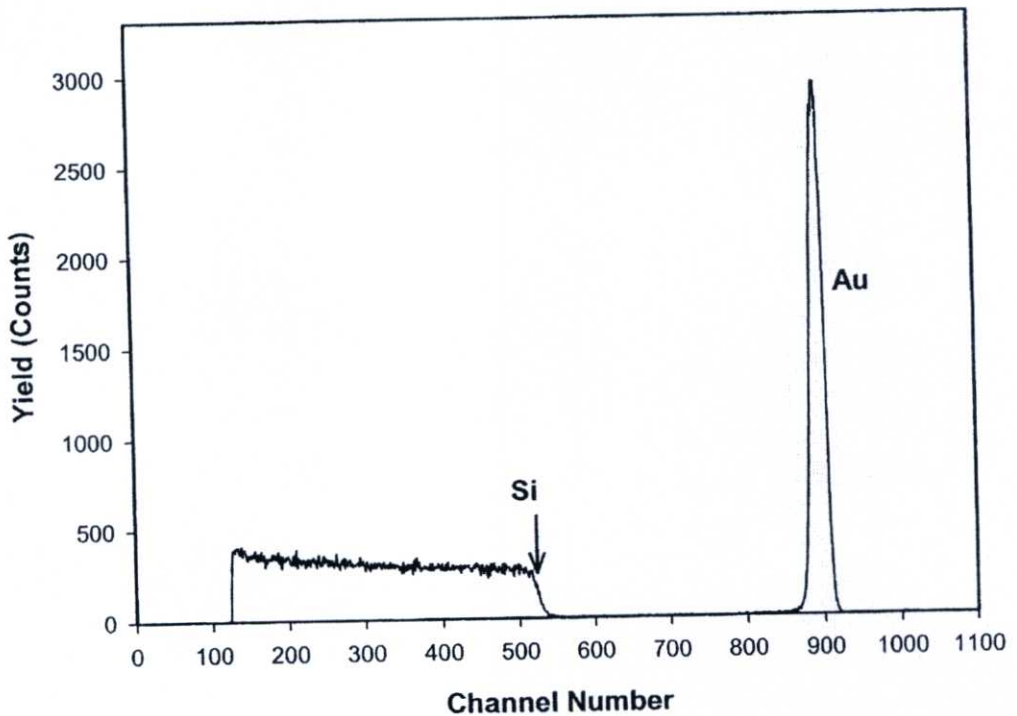
[10, 25]

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซิลิคอนที่มีการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งจะเป็นการศึกษาด้วยวิธีรutherford backscattering spectroscopy (Rutherford back scattering spectroscopy)

โดยเทคนิคนี้จะสามารถหาความหนาของชั้นสารได้ นอกจากนี้ยังสามารถหาธาตุองค์ประกอบของชั้นสารได้ และจากเทคนิคนี้ จะนำมาทำการศึกษาคูสมบัติของซิลิคอนที่มีการสร้างชั้นทองคำที่ด้านหลัง และทำการศึกษาคูสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 และ 1050 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่ 15, 30 และ 60 นาที เพื่อศึกษาผลของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน ผลการทดลองที่ได้จะถูกแสดงในหัวข้อต่อไป

### 5.2.1 ผลของรัทเทอร์ฟอร์ดแบ็กสแคตเตอริงของซิลิคอนก่อนการแพร่อะตอมทองคำ

หลังจากที่เคลือบทองคำลงบนด้านหลังของซิลิคอน ก็จะนำตัวอย่างนี้ไปทำการวัดด้วยวิธีรัทเทอร์ฟอร์ดแบ็กสแคตเตอริง ผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 5.3



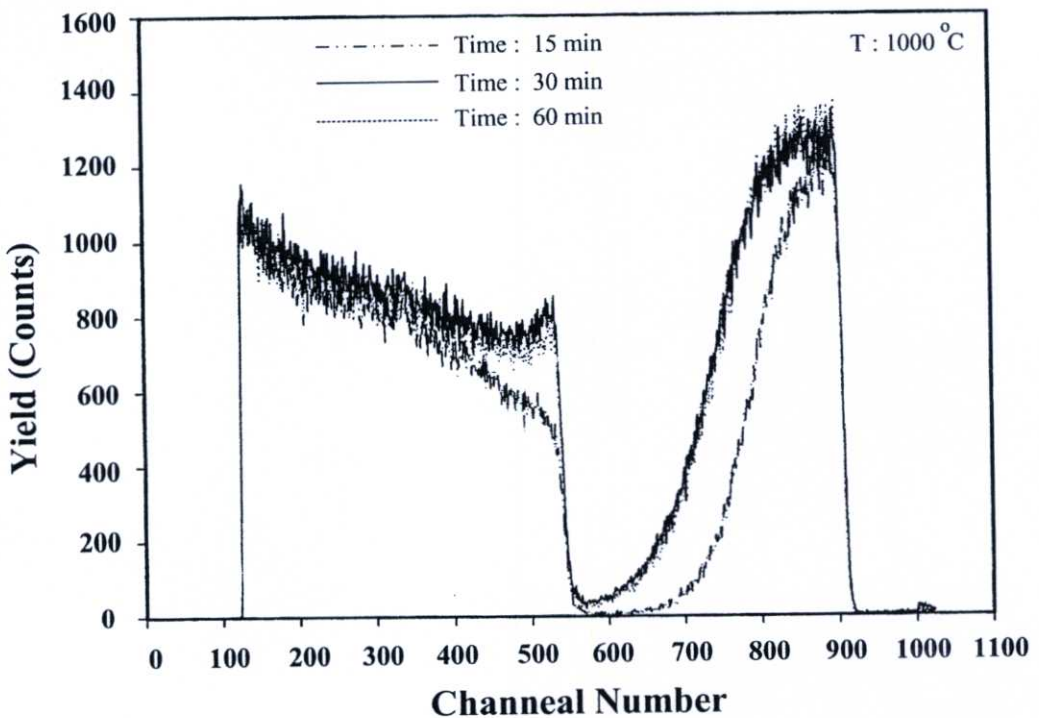
รูปที่ 5.3 ผลของรัทเทอร์ฟอร์ดแบ็กสแคตเตอริงของซิลิคอนที่มีการเคลือบทองคำที่ด้านหลัง

จากรูปที่ 5.3 จะประกอบไปด้วย 2 แกน โดยแกน x ที่เป็น Channel Number จะเป็นแกนของพลังงานที่ใช้ในการยิงอนุภาคแอลฟาเข้าไปยังชิ้นงาน ส่วนแกน y ที่เป็นแกน yield ซึ่งเป็นแกนที่แสดงผลของอนุภาคแอลฟาที่เกิดการสะท้อนกลับมาที่ตัวตรวจวัดซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของอะตอมกับความหนาของชั้นสาร จากผลการทดลองจะพบฟลักซ์เกิดขึ้นมา 2 ฟลักซ์ นั่นคือ

พีคของอะตอมทองคำที่ channel number 900 และที่ channel number 500 จะเป็นของซิลิคอน จะพบว่าพีคของอะตอมทองคำจะมีค่าสูงและมีความกว้างของพีคที่แคบเมื่อเทียบกับพีคของซิลิคอน เนื่องจากจำนวนของอะตอมทองคำที่มีมากจะทำให้ yield มีค่าสูงกว่าซิลิคอน และชั้นของทองคำที่มีความหนาที่น้อยมากจึงทำให้พีคที่ได้มีขนาดแคบกว่าซิลิคอนซึ่งมีความหนาที่มากกว่า และจากข้อมูลที่ได้นี้เมื่อใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณจะให้ความหนาของชั้นซิลิคอนมีชั้นของทองคำซึ่งมีค่าประมาณ 53 nm

### 5.2.2 ผลของซิลิคอนที่แพร่อะตอมทองคำที่แพร่ที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลาในการแพร่เท่ากับ 15, 30 และ 60 นาที ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.4



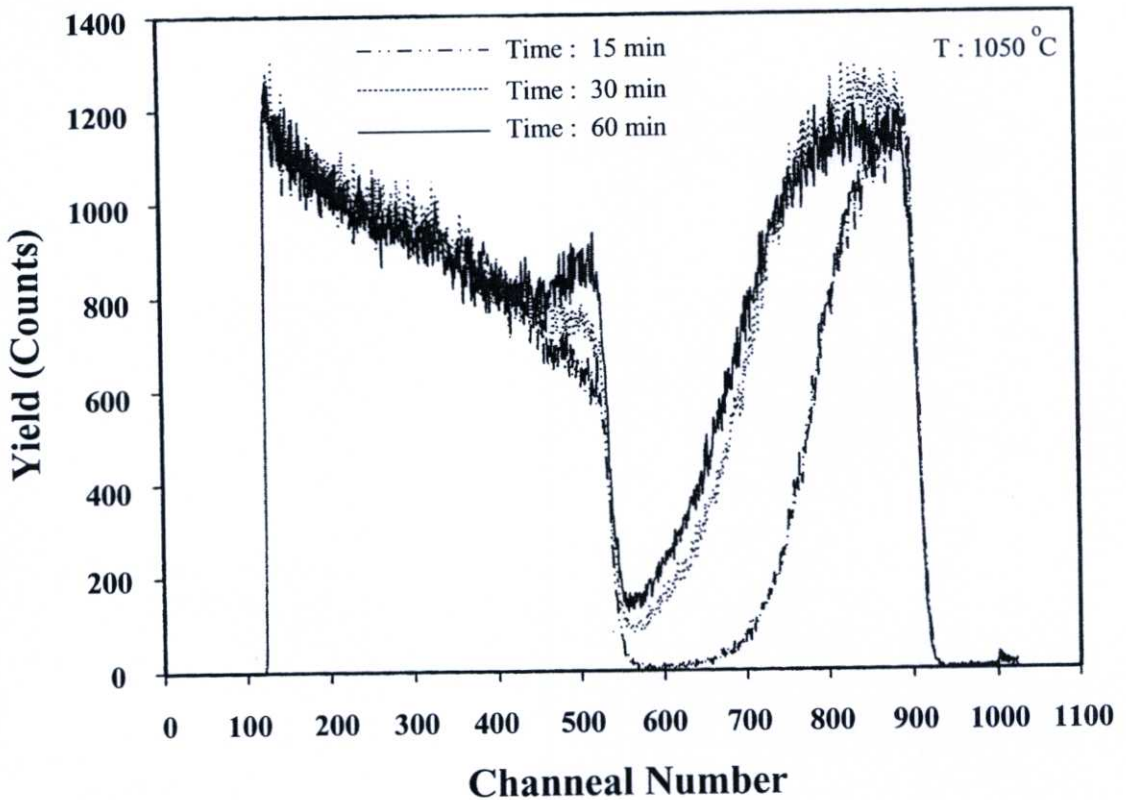
รูปที่ 5.4 ผลของรีทเทอร์ฟอร์ดแบ็คสแคตเตอร์ริงของซิลิคอนที่มีการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

จากรูปที่ 5.4 ค่า yield ของพีคของอะตอมทองคำมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับผลของ RBS จากหัวข้อที่ 5.2.1 เนื่องจากอะตอมทองคำบางส่วนแพร่เข้าไปในซิลิคอน และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของซิลิคอนจะพบว่า yield ของซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น ค่าความกว้างยังคงเท่าเดิม เนื่องจากผลของ

อะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน จึงทำให้จำนวนของอะตอมในซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้ yield ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมและขนาดของชิ้นงาน มีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ จะพบว่า ที่เวลา 30 และ 60 นาที อะตอมทองคำสามารถแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้จนเต็ม เพราะที่ตำแหน่งของซิลิคอนของกราฟทั้ง 2 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน นั้นหมายถึงจำนวนของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนมีค่าเท่ากัน

### 5.2.3 ผลของซิลิคอนที่แพร่อะตอมทองคำที่แพร่ที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลาในการแพร่เท่ากับ 15, 30 และ 60 นาที ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.5



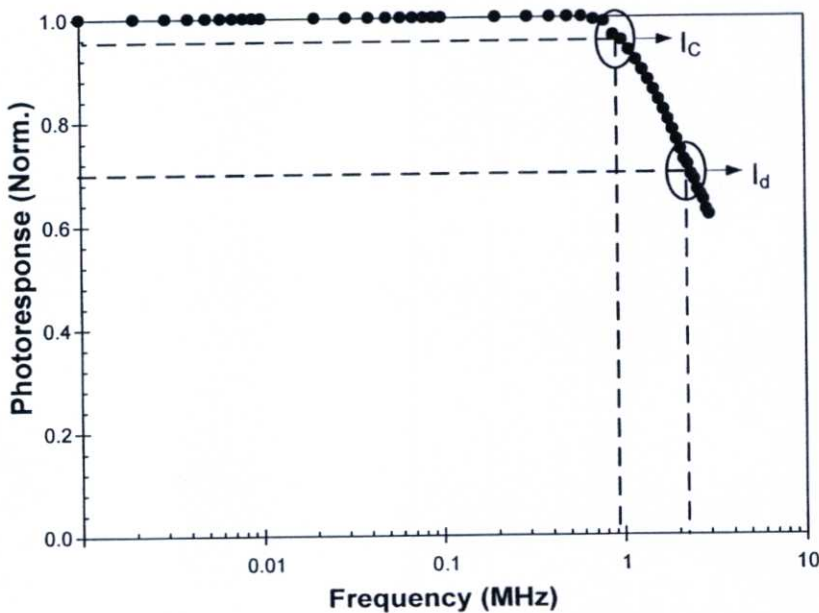
รูปที่ 5.5 ผลของรัทเทอร์ฟอร์ดแบ็คสแคตเตอร์ริงของซิลิคอนที่มีการแพร่อะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่ต่างๆ

จากรูปที่ 5.5 ค่า yield ของพีคของอะตอมทองคำมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับผลของ RBS จากหัวข้อที่ 5.2.1 เนื่องจากอะตอมทองคำบางส่วนแพร่เข้าไปในซิลิคอน และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง

ของซิลิคอนจะพบว่า yield ของซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น ค่าความกว้างยังคงเท่าเดิม เนื่องจากผลของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน จึงทำให้จำนวนของอะตอมในซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้ yield ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมและขนาดของชิ้นงาน มีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ จะพบว่า ที่เวลา 30 และ 60 นาที อะตอมทองคำสามารถแพร่เข้าไปในซิลิคอนได้จนเต็ม เพราะที่ตำแหน่งของซิลิคอนของเส้นกราฟทั้ง 2 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน นั่นหมายถึงจำนวนของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนมีค่าเท่ากัน

### 5.3 การวิเคราะห์สัญญาณแสงของ ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า มีขนาดกว้าง ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ

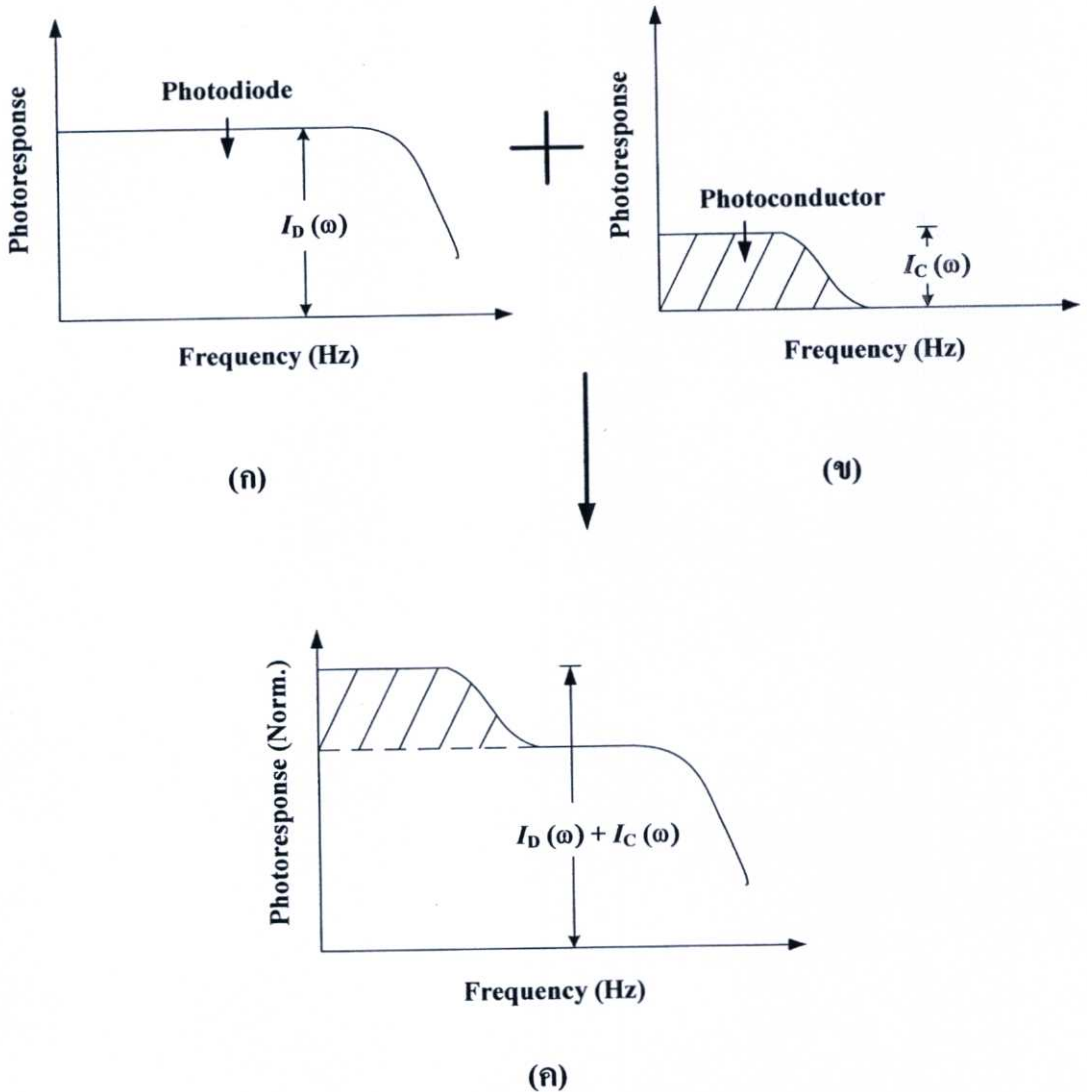
ในหัวข้อต่อไปนี้เป็นการศึกษาผลการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.4



รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

จากรูปที่ 5.6 ผลการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ จะพบว่าจากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่ากระแสแสงประกอบด้วยสองส่วน คือ กระแสแสงที่มา

จากบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นกระแสแสงส่วนมากของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al นั่นก็คือกระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) และค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ ) ตามลำดับ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ลักษณะการตอบสนองทางแสง

(ก) กระแสแสงไดโอด

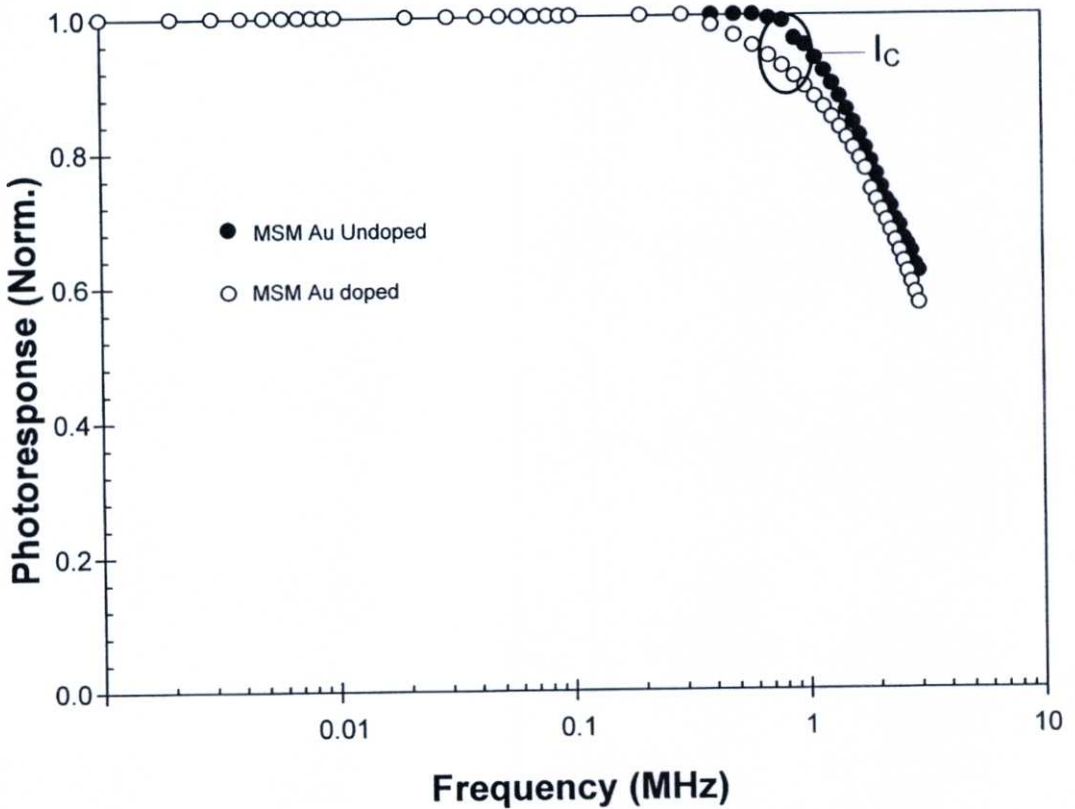
(ข) กระแสแสงคอนดักเตอร์

(ค) การตอบสนองทางแสงรวม

รูปที่ 5.7 เป็นกราฟลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ซึ่งประกอบไปด้วย (ก) กระแสแสงไดโอด ที่มีขนาดของสัญญาณมากกว่า กระแสแสงคอนดักเตอร์ (ข) และมี

การตอบสนองต่อสัญญาณที่ความถี่ที่สูงกว่า ส่วนในรูป (ค) เป็นการตอบสนองทางแสงรวมระหว่างกระแสแสงไดโอดและกระแสแสงคอนดักเตอร์ของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 20 ถึง 500  $\mu\text{m}$  ซึ่งจะอธิบายการเกิดส่วนประกอบกระแสทั้งสองส่วน ดังผลการทดลองที่ผ่านมา [5 – 7, 20]

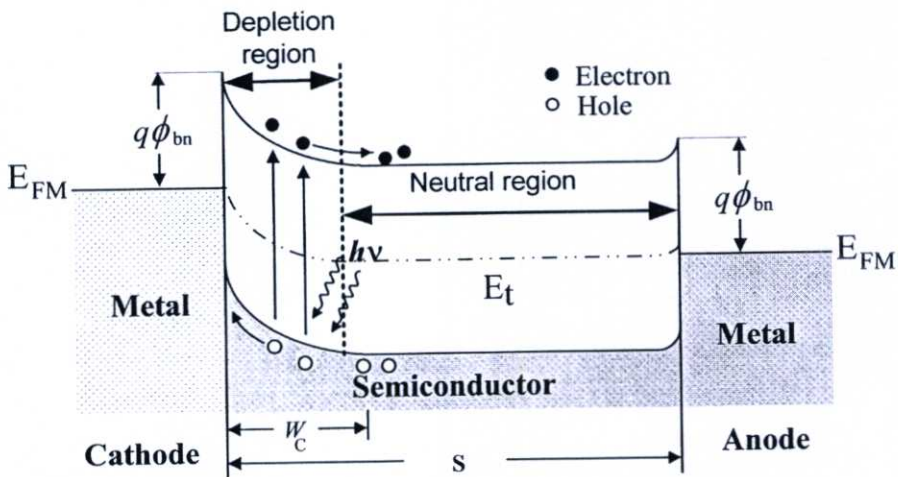
แต่เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำดังรูปที่ 5.8 โดยรูปดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองความถี่ระหว่างตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลของการเกิดกระแสแสงไดโอด และกระแสแสงคอนดักเตอร์ของอุปกรณ์



รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำ

จากรูปที่ 5.8 พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ จะไม่มีกระแสแสงไดโอดเกิดขึ้นเมื่อทำการวัดการตอบสนองทางความถี่ เนื่องจากในตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีแสงตกกระทบจะทำ

ให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ซึ่งการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้ จะเกิดขึ้นที่บริเวณเขตปลอดพาหะ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสงไดโอด และอีกส่วนจะเกิดขึ้นในบริเวณนิวทรัล ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสงคอนดักเตอร์ และจากผลการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ พบว่าจะไม่เกิดส่วนของกระแสแสงคอนดักเตอร์เกิดขึ้น เนื่องจากผลของอะตอมทองคำที่เข้าไปในซิลิคอนจะทำให้เกิดระดับพลังงานแทรกขึ้น ซึ่งระดับพลังงานดังกล่าวจะทำให้หน้าที่ในการดักจับพาหะส่วนน้อย (ซึ่งในกรณีนี้เป็นโฮลที่กำลังเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณเขตปลอดพาหะ) ผลที่ได้จึงทำให้ส่วนของกระแสแสงคอนดักเตอร์ถูกแทรกไปหมด ดังรูปที่ 5.9 [32]



รูปที่ 5.9 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำ เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ

ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อทำการศึกษาผลของการตอบสนองทางความถี่จะพบว่า ค่าความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสงนี้ จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่ากระแสไดโอดของตัวตรวจวัดแสง หรือมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานอนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดแสง

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาผลของอะตอมทองคำที่ถูกเติมเข้าไปในตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al โดยทำการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งผลจากการเติมอะตอมทองคำจะทำให้ความสามารถในการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูงขึ้นในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ ความกว้างของระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีค่า 20, 40, 80, 100 และ 500  $\mu\text{m}$  โดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  สภาพต้านทานของซิลิคอนที่มีค่าประมาณ  $20 \Omega\text{-cm}$  และในการทดลองนี้ได้แบ่งตัวอุปกรณ์ออกเป็น 9 ชุดด้วยกัน ได้แก่

1. MSM ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ
2. MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไปด้วยอุณหภูมิ  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่เวลา 15 นาที
3. MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไปด้วยอุณหภูมิ  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่เวลา 30 นาที
4. MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไปด้วยอุณหภูมิ  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่เวลา 45 นาที
5. MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไปด้วยอุณหภูมิ  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่เวลา 60 นาที
6. MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไปด้วยอุณหภูมิ  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่เวลา 15 นาที
7. MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไปด้วยอุณหภูมิ  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่เวลา 30 นาที
8. MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไปด้วยอุณหภูมิ  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่เวลา 45 นาที
9. MSM ที่มีการเติมอะตอมทองคำลงไปด้วยอุณหภูมิ  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่เวลา 60 นาที

จากการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ พบว่าค่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ และผลจากการแพร่อะตอมทองคำยังพบอีกว่า ผลของอุณหภูมิและผลของเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ จะทำให้ค่ากระแสรั่วไหลมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย โดยค่ากระแสรั่วไหลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำมีค่ามากขึ้น และจากผลของอะตอมทองคำยังทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมของรอยสัมผัสชนิดกึ่งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาค่ากับแพนดักซ์ชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่าเท่ากับ  $0.72 \text{ eV}$  แต่ถ้าเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ เนื่องจากผลของกระแสรั่วไหลที่มีค่าที่สูงกว่า ส่วนค่าแฟลคเตอร์อุณหภูมิต

ของรอยสัมผัสช็อคกีย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่าประมาณ 1 แต่ถ้าเป็นรอยสัมผัสช็อคกีย์ที่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่าประมาณ 2

ส่วนการพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อคกีย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำ จะสามารถหาค่าความหนาแน่นของสารเจือของซิลิคอนได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เมื่อทำการหาค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของซิลิคอนที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ จะได้ว่าที่เวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่ 15, 30, 45 และ 60 นาที ผลของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ จะได้ค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนที่ต่างกัน โดยที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน เท่ากับ  $5.977 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  และที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน เท่ากับ  $5.979 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวิธีรัทเทอร์ฟอร์ดแบ็คสแคตเตอริง ซึ่งจากวิธีนี้สามารถหาค่าความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอนได้ โดยมีค่าเท่ากับ 53 นาโนเมตร โดยค่าที่ได้เป็นการหาค่าโดยใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณ และจากผลของรัทเทอร์ฟอร์ดแบ็คสแคตเตอริง ยังบอกได้อีกว่าที่เวลาในการแพร่อะตอมทองคำที่ต่างกันทำให้ผลของจำนวนอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ส่งผลต่อจำนวนอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนนั้นคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ เมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งจากการทดลองจะได้ว่าตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีกระแสมีคติน้อยกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ และผลจากการเติมอะตอมทองคำจะทำให้กระแสมีคติน่าสูงขึ้นตามเงื่อนไขที่ใช้ในการแพร่อะตอมทองคำ และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างกระแสมีคตต่อกระแสแสงที่ค่าเข้มแสง 25,000 ลักซ์ ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 โวลต์ ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่าเท่ากับ 484 เท่า ส่วนตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่เท่ากับ 15, 30, 45 และ 60 นาที จะมีค่าเท่ากับ 133, 117, 84 และ 67 เท่า ตามลำดับ ส่วนตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการแพร่เท่ากับ 15, 30, 45 และ 60 นาที จะมีค่าเท่ากับ 25, 28, 14 และ 9 เท่า ตามลำดับ และจากผลการทดลองยังพบว่าระยะห่างระหว่างขั้วของตัวตรวจวัดแสงที่ได้ทำการสร้างขึ้น ไม่มีผลกระทบต่อกระแสแสงที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ เนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นมานี้ เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างระหว่างขั้วเป็นแบบกว้าง

ในกรณีการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัด การตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำจะมีค่าความถี่คutoff ที่ 2.2 MHz ส่วนตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติม

อะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ 15 นาที จะมีค่าความถี่คัทออฟที่ 3.2 MHz โดยมีค่าความถี่คัทออฟมากกว่าตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ถึง 1.45 เท่า ซึ่งผลจากการเพิ่มขึ้นของค่าความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ 15 นาที อาจเป็นผลมาจากค่าเวลาคงที่หรือผลคูณของค่าความต้านทานอนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณปลดพาหะ ซึ่งผลดังกล่าวเมื่อพิจารณาตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลาในการแพร่ 15 นาที จะมีค่าเวลาคงที่ลดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ ทำให้มีค่าความถี่คัทออฟที่สูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่เวลาในการแพร่ที่เพิ่มมากขึ้นที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่าเวลาคงที่มีค่ามากขึ้น ผลที่ได้จึงทำให้ค่าความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงมีค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 2.1, 1.6, 1.2 MHz ตามลำดับ ส่วนตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C ที่เวลาในการแพร่ 15, 30, 45 และ 60 นาที ผลของค่าความถี่คัทออฟจะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C เนื่องจากการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1050 °C จะทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าเวลาคงที่มีค่ามากขึ้น ผลที่ได้จึงทำให้ค่าความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงมีค่าลดลงตามลำดับ

จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบ MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำและที่มีการเติมอะตอมทองคำที่เงื่อนไขต่างๆ จะเห็นว่าในการเติมอะตอมทองคำจะสามารถเพิ่มความสามารถในการตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงได้ ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสที่เวลาในการแพร่เท่ากับ 15 นาที จะมีค่าความถี่คัทออฟที่สูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีค่ากระแสมืดที่ต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำตัวอื่นๆ และยังมีอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดที่สูง ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการตรวจวัดแสงที่ดีกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำตัวอื่นๆ ซึ่งในการใช้งานตัวตรวจวัดแสงนี้ จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องมีความเข้มแสงที่สูง แต่จากปัญหานี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำได้ โดยใช้โครงสร้างของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเท ซึ่งโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ จะสามารถเพิ่มกระแสแสงได้ เนื่องจากมีพื้นที่รับแสงที่เพิ่มมากขึ้น จึงน่าจะทำให้ตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งมีกระแสแสงที่น้อย ทำให้มีค่ากระแสแสงที่เพิ่มขึ้นได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Berger P. R., "MSM Photodiodes", **IEEE Potentials**, Vol. 15, No. 2, April/May 1996, pp25-2
- [2] Chou S. Y., Liu Y., Khalil W., Hsiang T. Y. and Alexandrou S., "Ultrafast Nanoscale Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors on Bulk and Low-Temperature-Grown GaAs", **Journal of Applied Physics Letters**, Vol. 61, No. 7, August 1992, pp. 819-821.
- [3] Parker J. S., and Bosman G., "Noise Characterization of GaAs Interdigitated Metal-Semiconductor Metal Photodetector (MSM PD)", **IEEE Trans. on Electron Device**, Vol. 39, November 1992, pp. 1282-1287.
- [4] Julian B. D. Soole ., and Schumacher H., "Transit-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodiode", **IEEE Trans. on Electron Device**, Vol. 37, No. 11, November 1990, pp. 2285-2291.
- [5] สราวุธ วิศวกรรม, "การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al", บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2545
- [6] มานิตา คิ้วแสง, "การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิต", บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- [7] ธเนศ โชชะเหม, "การออกแบบ และการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์", บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [8] จักรพงษ์ สุขเดช, วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์ไย, "ตัวตรวจจับแสง แบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/V-Si (Au Doped)/Al", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON-27), พ.ศ. 2547, หน้า 221-224
- [9] จักรพงษ์ สุขเดช, "การศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ Al /n-Si /Al และผลของอะตอมทองคำ", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2546

- [10] M. Msimanga, and M. McPherson., "Diffusion characteristics of gold in silicon and electrical properties of silicon diodes used for developing radiation-hard detectors", **Materials Science and Engineering B** 127 (2006) 47–54
- [11] G.Bemski, "Recombination properties of gold in silicon", **Physical review**, Volume 111, Number 6, 15 September 1958
- [12] J. Vobecky, "Lifetime Engineering in High-Power Devices", ASDAM 2000 .**The third international EuroConference on Advanced Semiconductor Device and Microsystems**. 16-18 October 2000.
- [13] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, คงฤกษ์ ไพรวลัย และ วรเทพ น้อยปรีชา, "การวิเคราะห์สมบัติของรอยต่อข้อต่อคิกซ์ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si (Au doped)/Al", **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31)**, พ.ศ. 2551, หน้า 1209-1212
- [14] สมเกียรติ สุขเดช, "เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545]
- [15] ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์. "การวิจัยอุปกรณ์ประเภท MOIS ในห้องทำงานก่อนแรงดันขึ้นขีดเริ่ม", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [16] อนุชา เรืองพานิช. "การศึกษาและวิจัยผลของอะตอมทองคำต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ประเภทมอยซ์.", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [17] สมศักดิ์ ชุมช่วย. "การศึกษาการออกแบบและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์.", วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2529
- [18] ชลิดา จรรยาหาญ. "การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดชนิด Alloyed p<sup>+</sup>-i-n<sup>+</sup>." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546
- [19] NATHAN SCLAR, "Resistivity and Deep Impurity Levels in Silicon at 300 K", **IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES**, VOL. ED-24, NO. 6, JUNE 1977.

- [20] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมา”, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [21] Dieter K. Schroder, “**Semiconductor Material and Device Characterization 2<sup>nd</sup>**”, pp. 147-159, (1998)
- [22] Sze S. M, “**Physics of Semiconductor Devices, 2<sup>nd</sup> Ed.**”, John Wiley & Sons Inc., New York, 1981.
- [23] รองศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย แก้วแดง, “**ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ**”, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ
- [24] สมเกียรติ สุขเดช, “**เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- [25] Terry L. Alford, Leonard C. Feldman and James W. Mayer, “**Fundamentals of Nanoscale Film Analysis**”, Library of Congress Control Number: 2005933265
- [26] S. M. Sze, D. J. Coleman., Jr. and A. Loya. “Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structure” **Solid-State Electronics**, Vol. 14, 1971, pp. 1209-1218
- [27] 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, No. 10, October 2003. pp. 1811-1816.
- [28] S. Niemcharoen, K. Kobayashi., M. Kimura. and K. Sato. “Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Condition” **Solid-State Electronics**, Vol. 45, No. 10, October 2001. pp. 1815-1819.
- [29] Chino K. “Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment” **Solid- State Electronics**, Vol. 16, 1973. pp. 119-121
- [30] E. H. Rhoderick and R. H. Williams, **Metal-Semiconductor Contacts, 2<sup>nd</sup> Ed.**, Oxford University Press, New York, 1988
- [31] P. R. Berger, “MSM photodiodes” **IEEE Potentials**, Vol. 15, No. 2, 1996, pp. 25-29.
- [32] G.Bemski., “Process induced and gold acceptor defects in silicon”, **Physical review**, Volume 36, Number 15, 15 November 1987

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

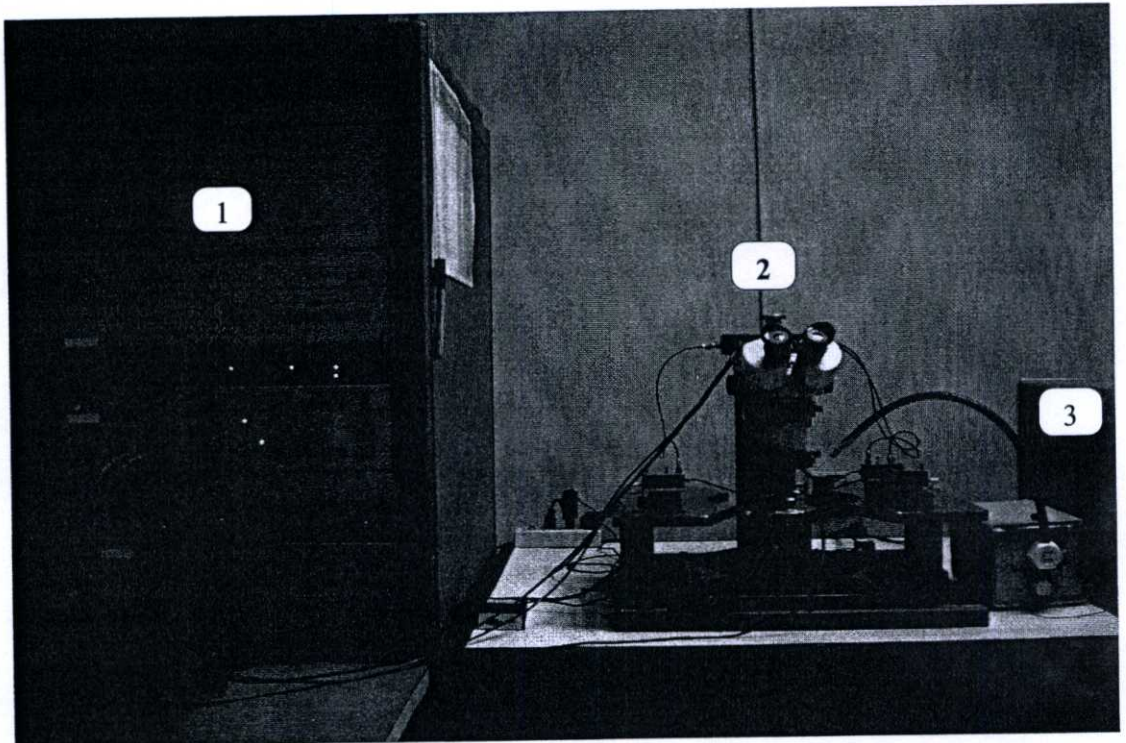
ตารางที่ ก.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ค่าคงที่ของพลังค์	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$	J-sec
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	$c$	$3 \times 10^8$	m/sec
ค่าคงที่รีชาร์ดสัน	$R$	110	$\text{Acm}^{-3}\text{K}^{-2}$
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	$q$	$1.602 \times 10^{-19}$	C
ค่าคงที่โบสตันน์	$k$	$1.38 \times 10^{-23}$	J/K
เปอร์มิตทิวิตีในสุญญากาศ	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-14}$	F/cm
เปอร์มิตทิวิตีของสารกึ่งตัวนำ (Si)	$\epsilon_s$	$11.8 \epsilon_0$	F/cm
สภาพคล่องของอิเล็กตรอน (Si)	$\mu_n$	1350	$\text{cm}^2/\text{V-sec}$
ความหนาแน่นอินทรินซิก (Si)	$n_i$	$1.5 \times 10^{10}$	$\text{cm}^{-3}$

## ภาคผนวก ข

## ชุดทดลองลักษณะสมบัติทางแสง

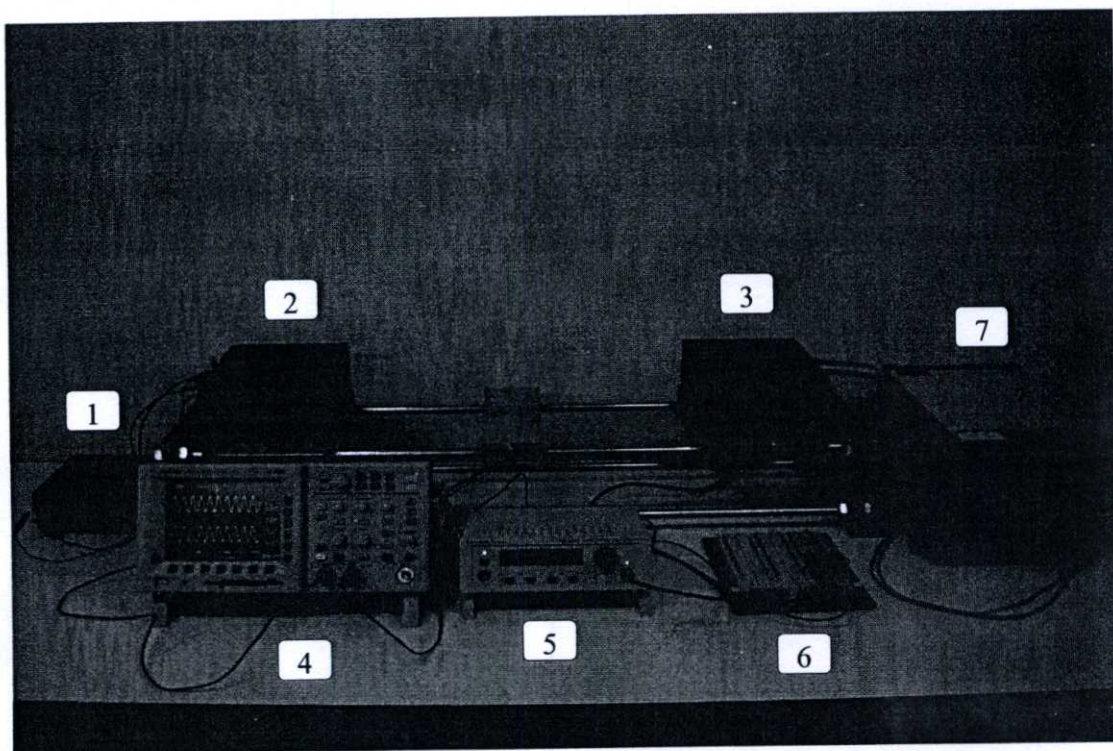
ข.1 ชุดทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง  
กระแสตรง



รูปที่ ข.1 ชุดทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง  
กระแสตรง

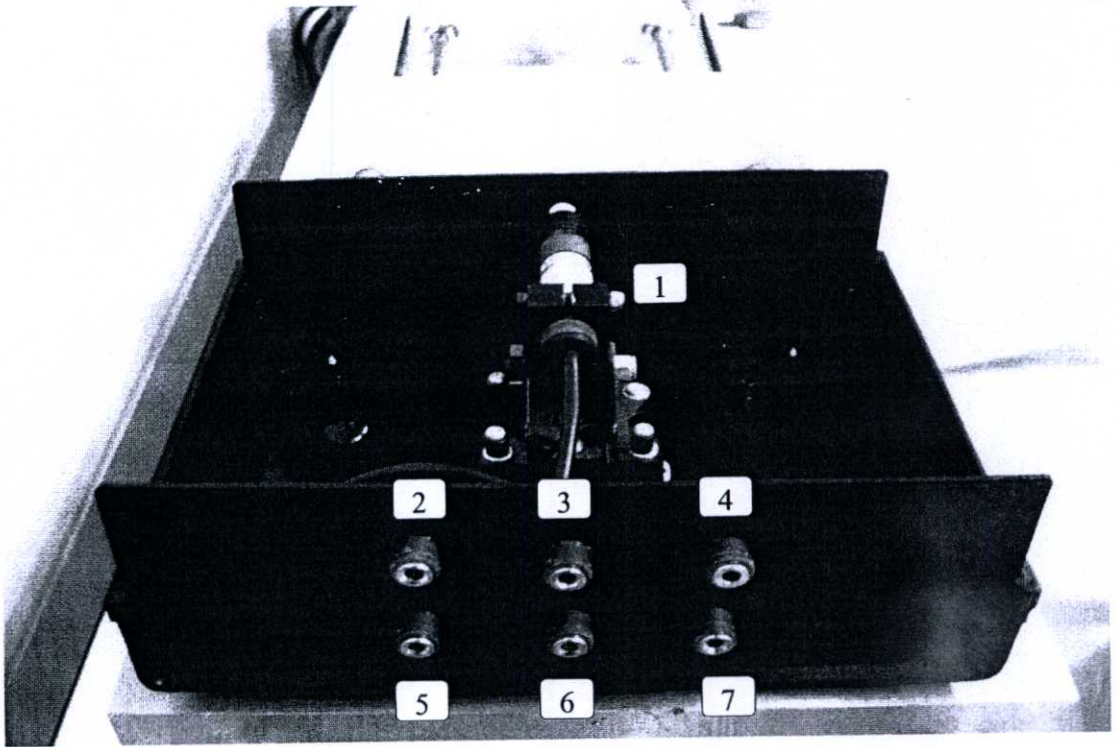
- (1) HP 4061A semiconductor/component test system
- (2) Probe & Al/n-Si/Al Photodetector
- (3) Halogen Lamp

**ข.2 ชุดทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง  
กระแสสลับ**



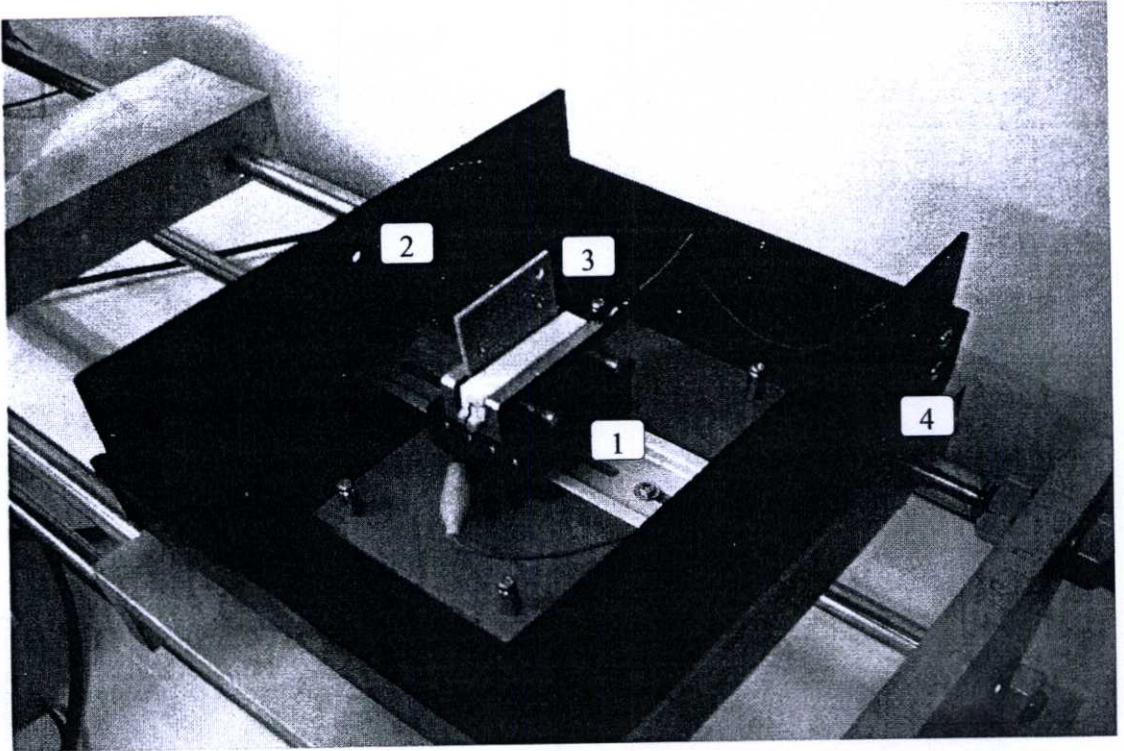
**รูปที่ ข.2 ชุดทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของ Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสง  
กระแสสลับ**

- (1) Power Supply for Laser Diode
- (2) Laser Diode Module
- (3) Dark Box & Al/n-Si/Al Photodetector
- (4) Oscilloscope
- (5) Function Generator
- (6) Load Resistance
- (7) Power Supply for Al/n-Si/Al Photodetector



**รูปที่ ข.3 ชุดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด**

- (1) Laser Diode Module
- (2) Modulation Input (-)
- (3) Ground (0 V)
- (4) Interlock
- (5) Modulation Input (+)
- (6) -Ve Supply (-8 to -12 V)
- (7) TTL disable



รูปที่ ข.4 ชุดอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ในกล่องที่บัสแสง

(1) แท่นวาง Al/n-Si/Al Photodetector

(2) ช่องรับแสง

(3) Al/n-Si/Al Photodetector

(4) Power Supply

ภาคผนวก ค

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



# การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31

31<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-31)



- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุม และการวัดคุม (CT)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

29 - 31 ตุลาคม 2551

ณ โรงแรมวิลล่า กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดนครนายก

ร่วมจัดโดย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
SRINAKHARINWIROT UNIVERSITYมหาวิทยาลัยศรีปทุม  
SRIPATUM UNIVERSITY

สนับสนุนโดย

Western  
Digital

# การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของรอยต่อชนิดกึ่งตัวของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si(Au doped)/Al

## Analysis properties of Schottky contacts of Al/n-Si(Au doped)/Al Photodetector

ศุภศักดิ์ เนียมธวัช คุงกฤษณ์ ไพรวลัย และ วรเทพ น้อยปรีชา

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

### บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของรอยต่อชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si(Au doped)/Al และ Al/n-Si/Al โดยศึกษา ลักษณะสมบัติของกระแสแรงดันไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติของชนิดกึ่ง ไดโอด, ค่าแรงกึ่งชนิดกึ่ง, แฟคเตอร์อุดมคติ, ความต้านทานอนุกรม, ได้จากการพล็อตกราฟ I-V,  $dv/d\ln(I)$ -I และ  $H(I)$ -I และจากการพล็อต กราฟ  $dv/d\ln(I)$  พบว่าในช่วงบริเวณเชิงเส้นของกราฟจะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของค่าความต้านทานอนุกรมของตัวอุปกรณ์ เมื่อพล็อตกราฟ  $dv/d\ln(I)$  กับ I ค่าความต้านทานอนุกรมจะได้จากค่าความชันของกราฟ และที่จุดตัดที่แกน y จะได้จากแฟคเตอร์อุดมคติ และเมื่อได้ค่าแฟคเตอร์ อุดมคติจากกราฟ  $dv/d\ln(I)$  กับ I นำค่าแฟคเตอร์อุดมคติที่ได้ไปแทนใน ฟังก์ชัน  $H(I)$  ซึ่งสามารถหาค่าค่าแรงกึ่งชนิดกึ่งได้ โดยกราฟที่ได้จาก ฟังก์ชันดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นและที่จุดตัดแกน y จะได้จาก  $n\phi_b$ ,

คำสำคัญ: ตัวตรวจวัดแสง, รอยต่อชนิดกึ่ง, อลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีการเติมอะตอมทองคำ/อลูมิเนียม, อลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดเอ็น/อลูมิเนียม

### Abstract

This paper presents analysis property of Schottky contacts of Photodetector Al/n-Si(Au doped)/Al and Al/n-Si/Al and then characterized using current-voltage measurement. Diode's parameters ,barrier height( $\phi_b$ ), ideality factor(n) and series resistance( $R_s$ ), were extracted form I-V,  $dv/d\ln(I)$ -I and  $H(I)$ -I. The  $dv/d\ln(I)$  plot is a straight line region where dominates the series resistance. In the plot of  $dv/d\ln(I)$  versus I, its slope gives the series resistance while its intercept with the y-axis give the ideality factor. Using so obtained value of n, the schottky barrier height is estimated from plot of a function  $H(I)$  given by (4). It is approximately the straight line which intercepts y-axis at the point equal to  $n\phi_b$ .

Keywords: Photodetector, Schottky contacts, Al/n-Si(Au doped)/Al, Al/n-Si/Al

### 1. บทนำ

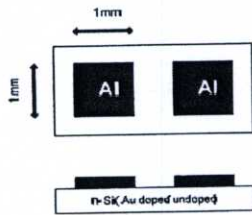
ตัวตรวจวัดแสงแบบ โลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ (Metal/Semiconductor/Metal: MSM) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Opto-electronics) ที่มีบทบาทและถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมี กระแสมืดต่ำ มีการตอบสนองสัญญาณทางแสงที่สูง และสามารถสร้างได้ง่าย ได้แก่ โครงสร้างแบบ อลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดเอ็น/อลูมิเนียม หรือ Al/n-Si/Al และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงแบบ อลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดเอ็น/อลูมิเนียม ให้การตอบสนองสัญญาณทางแสงที่สูงขึ้น โดยการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น ด้วยกระบวนการแพร่ที่อุณหภูมิสูง โดยอะตอมของทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน จะทำให้เกิดระดับพลังงานจับตักขึ้น 2 ระดับคือ Deep donor level และ Deep acceptor level ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะ (Recombination Center) มีคุณสมบัติในการดักจับพาหะ (carries trapping) ทำให้มีการตอบสนองสัญญาณทางแสงที่สูงขึ้น และจากการเติมอะตอมของทองคำยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระถูกจับด้วยระดับพลังงานของอะตอมทองคำ ทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าสูงขึ้น[1]

เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่มีรอยต่อแบบชนิดกึ่ง ในบทความนี้จึงทำการศึกษาลักษณะสมบัติของรอยต่อชนิดกึ่งของตัวตรวจวัดแสงแบบ อลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดเอ็น/อลูมิเนียมที่มีการเติมอะตอมทองคำ และที่ไม่มีการเติมอะตอมของทองคำ จากคุณสมบัติทางไฟฟ้า (I-V) โดยทำการพล็อตกราฟ  $dv/d\ln(I)$  กับ I และ  $H(I)$  กับ I ซึ่งจากการพล็อตกราฟดังกล่าวสามารถหาค่า แฟคเตอร์อุดมคติ (ideality factor:n), ค่าแรงกึ่งชนิดกึ่ง (barrier height: $\phi_b$ ) และความต้านทานอนุกรม (series resistance: $R_s$ ) ของรอยต่อชนิดกึ่งซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อชนิดกึ่ง และค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ยังเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะสมบัติที่สำคัญของตัวตรวจวัดแสงอีกด้วย

### 2. การเตรียมชิ้นงาน

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ อลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดเอ็น/อลูมิเนียม มีการเติมอะตอมทองคำเริ่มต้น นำแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น หนา (100) สภาพความต้านทาน 7-21

Ω-cm หน้า 360 μm มาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยวิธีเทอร์มอลออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 5000 Å จากนั้นลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกออก และทำการเคลือบทองคำที่ด้านหลังของแผ่นผลึกด้วยกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศความดันประมาณ 10<sup>-4</sup> torr แล้วนำไปเข้ากระบวนการแพะทองคำด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 และ 60 นาที แล้วลอกชั้นทองคำออกด้วยการใช้กรดกัดทอง จากนั้นทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นผลึกออก ทำการสร้างชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 3000 Å ด้วยกระบวนการเคลือบโลหะในสุญญากาศที่ความดันประมาณ 10<sup>-4</sup> torr ทำการสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสงด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี หลังจากนั้นทำการรีจันเดอร์ริงเพื่อทำให้เกิดรอยต่อสัมผัสที่ดีระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งโครงสร้างที่ได้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ Al/n-Si (Au Doped/Undoped)/Al

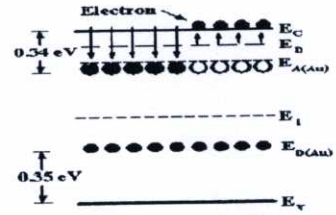
**3. ผลการทดลองและการอภิปราย**

เมื่อทำการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนจะทำให้สภาพด้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถหาค่าสภาพด้านทานของซิลิคอนได้จากเทคนิคการวัดแบบ 4 point probe สามารถสรุปผลที่ได้ดังตารางที่ 1 และทำการศึกษาลักษณะสมบัติของรอยต่อช็อคคีย์ (Schottky contacts: SC) ของตัวตรวจวัดแสง โดยที่ SC1 คือ รอยต่อช็อคคีย์ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ, SC2 คือ รอยต่อช็อคคีย์ที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลา 30 นาที และ SC3 คือ รอยต่อช็อคคีย์ที่มีการเติมอะตอมทองคำที่อุณหภูมิ 1000 °C ที่เวลา 60 นาที

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพด้านทานของซิลิคอนที่มีการเติมอะตอมทองคำและที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำ

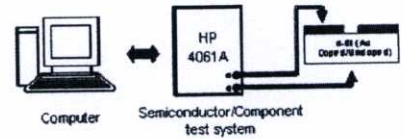
อุปกรณ์	เวลาในการแพะ (นาที)	อุณหภูมิที่ใช้ในการแพะ (°C)	สภาพความต้านทาน (Ω-cm)
SC1	-	-	21
SC2	30	1000	115.2
SC3	60	1000	140.4

จากตารางที่ 1 ค่าสภาพด้านทานของซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการแพะอะตอมทองคำมากขึ้น เนื่องจากจำนวนอะตอมทองคำที่แพะเข้าไปในซิลิคอนจะทำให้จำนวนของระดับพลังงานศูนย์กลางการรวมตัวมีค่ามากขึ้น ทำให้ความสามารถในการจับอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แถบพลังงานของซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีการเติมอะตอมทองคำ

จากนั้นทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของรอยต่อช็อคคีย์ SC1, SC2 และ SC3 ของตัวตรวจวัดแสงด้วยเครื่อง HP 4061A ดังรูปที่ 3 โดยทำการวัดที่อุณหภูมิห้องบนฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 3 อุปกรณ์และการวัดลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อช็อคคีย์ SC1, SC2 และ SC3 ของตัวตรวจวัดแสง

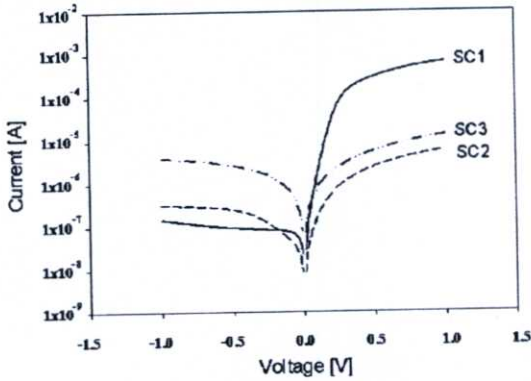
เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -1 ถึง 1 V แก่รอยต่อช็อคคีย์ของตัวตรวจวัดแสง SC1, SC2 และ SC3 จะได้คุณสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อช็อคคีย์ดังรูปที่ 4 ซึ่งกราฟดังกล่าวสามารถหาค่ากระแสรั่ว (I<sub>0</sub>), ค่ากำแพงศักย์ช็อคคีย์ (φ<sub>b</sub>) และค่าแฟคเตอร์อุดมคติ (n) ได้จากสมการที่ 1 และ 2

$$J = J_0 \left[ \exp \left( \frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \dots \dots (1)$$

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้แก่รอยต่อช็อคคีย์ (V), J<sub>0</sub> คือ ความหนาแน่นของกระแสรั่ว (A) และ n คือ แฟคเตอร์อุดมคติ

$$J_0 = A^* T^2 \exp \left( \frac{-q\phi_b}{kT} \right) \dots \dots (2)$$

โดยที่  $A^*$  คือค่าคงตัวของริชาร์ดสัน (Effective Richardson constant) มีค่าเท่ากับ  $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ,  $k$  คือค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $T$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ  $300 \text{ K}$ ,  $\phi_b$  คือค่าฟังก์ชันช็อคกี



รูปที่ 4 ลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันไฟฟ้า (I-V) ของรอยต่อช็อคกี SC1, SC2 และ SC3

พบว่ากระแสรั่วไหลของรอยต่อช็อคกี ซึ่งได้จากจุดตัดแกน  $y$  เมื่อทำการพล็อตกราฟ  $\log(I)$  กับ  $V$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในกระบวนการแพร่ของอะตอมทองคำมากขึ้น เนื่องจากอะตอมทองคำจะทำให้เกิดระดับศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ขึ้น ส่งผลทำให้เกิดกระแสการรวมตัวใหม่และการเกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion-layer recombination-generation current) หรือ กระแส R-G ขึ้น ทำให้ค่ากระแสรั่วไหลของรอยต่อช็อคกีที่มีค่ามากกว่าค่ากระแสรั่วไหลของรอยต่อช็อคกีของตัวตรวจวัดแสง ที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำทำให้ไม่มีผลกระทบของกระแส R-G อีกขึ้น[2]

นอกจากนี้ยังแฟคเตอร์อุดมคติ, ค่าฟังก์ชันช็อคกี และความต้านทานอนุกรมของรอยต่อช็อคกี SC1, SC2 และ SC3 ได้จากสมการที่ 3 และ 5 [3-4]

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad \dots \dots (3)$$

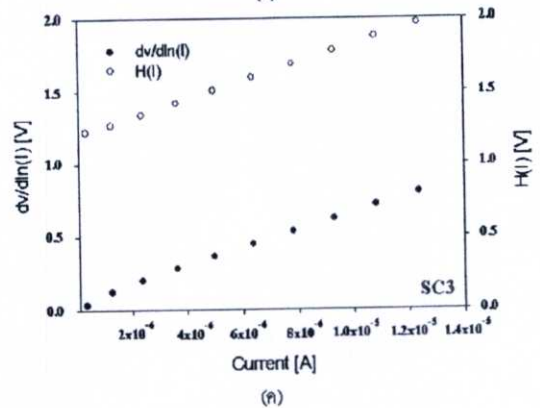
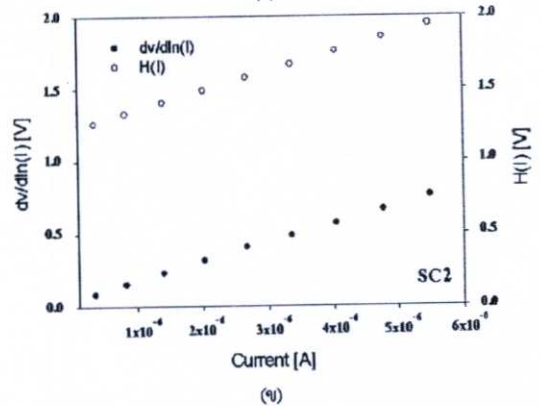
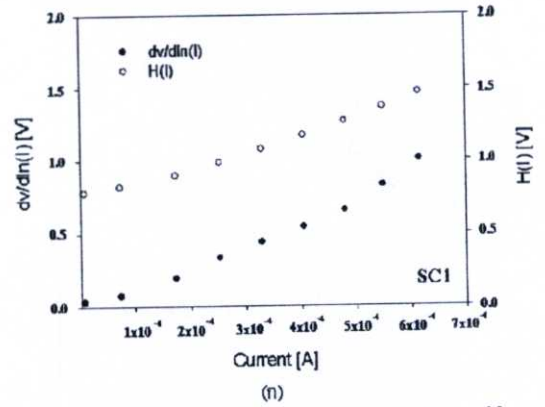
$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I}{A^* AT^2} \right) \quad \dots \dots (4)$$

และ

$$H(I) = IR_s + n\phi_b \quad \dots \dots (5)$$

โดยที่  $R_s$  คือ ค่าความต้านทานอนุกรม

จากสมการที่ 3 เมื่อนำมาพล็อตกราฟ  $dV/d \ln(I)$  กับ  $I$  ดังรูปที่ 5 ซึ่งกราฟดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น สามารถหาค่า  $R_s$  ของรอยต่อช็อคกี ได้จากความชันของกราฟและที่จุดตัดแกน  $y$  จะได้ค่า  $n$  หลังจากนั้นนำค่า  $n$  ที่ได้จากกราฟ  $dV/d \ln(I)$  มาพล็อตกราฟ  $H(I)$  กับ  $I$  ตามสมการที่ 5 ซึ่งจะได้อิงรูปที่ 5 และจากกราฟดังกล่าว  $R_s$  สามารถหาได้จากความชันของกราฟและที่จุดตัดแกน  $y$  จะได้ค่าฟังก์ชันช็อคกี



รูปที่ 5 กราฟ  $dV/d \ln(I)$  กับ  $I$  และ  $H(I)$  กับ  $I$  ของ รอยต่อช็อคกีของตัวตรวจวัดแสง (ก) SC1, (ข) SC2 และ (ค) SC3 ตามลำดับ

ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาสรุปเป็นตาราง ได้ดังตารางที่ 2 เป็นผลจากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำด้วยการคำนวณที่ต่างกัน ผลที่ได้แสดงถึงผลกระทบของรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำที่มีการเติมอะตอมของทองและที่ไม่มีการเติมอะตอมของทอง พบว่าค่าแฟคเตอร์อุดมคติของรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำจะเข้าใกล้ 2 เมื่อมีการเติมอะตอมของทองคำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแพร่ที่ไหลเป็นกระแสที่เกิดผลรวมของกระแสการแพร่และกระแสของ R-G

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆ ของรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V,  $dv/dln(I)$ ,  $H(I)$ -I

พารามิเตอร์	SC1	SC2	SC 3
n จาก I-V	1.28	2.38	2.26
n จาก $dv/dln(I)$	1.05	1.63	1.72
$R_s$ จาก $dv/dln(I)$ [ $\Omega$ ]	1526.9	132375	62565
$R_s$ จาก $H(I)$ [ $\Omega$ ]	1115.8	132533	62943
$\phi_b$ จาก $H(I)$ [eV]	0.70	0.73	0.69
$I_s$ จาก I-V [A]	$6 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
$\phi_b$ จาก I-V [eV]	0.72	0.71	0.69

และจากตารางค่า  $R_s$  จะมีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาในการแพร่มากขึ้น เนื่องจากอะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในซิลิคอนจะทำให้สภาพต้านทานของซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น ผลดังกล่าวจะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่ามากขึ้น ทำให้ขนาดของ  $R_s$  มีค่าลดลง [5] แต่เมื่อพิจารณา SC1 เนื่องจากตัวอุปกรณ์ดังกล่าวไม่มีการเติมอะตอมของทองคำและมีสภาพต้านทานที่ต่ำอยู่แล้ว จึงทำให้ค่า  $R_s$  ที่ได้มีค่าน้อยกว่าตัวอุปกรณ์ SC2 และ SC3 ส่วนค่าค่าแฟกเตอร์ชนิดกึ่งตัวนำของตัวอุปกรณ์ทั้ง 3 ตัวจะมีค่าใกล้เคียงกับ 0.72 eV ซึ่งเป็นค่าค่าแฟกเตอร์ชนิดกึ่งตัวนำของรอยต่อระหว่างอูมิเนียมกับซิลิคอนชนิดเอ็นที่ได้มีการศึกษาท่อนหน้านี้ [6]

**4.ผลการทดลอง**

จากการศึกษาคุณสมบัติของ รอยต่อชนิดกึ่งตัวนำของตัวตรวจวัดแสงที่มีการเติมอะตอมของทองคำและที่ไม่มีการเติมอะตอมของทองคำ พบว่าผลของอะตอมทองคำที่เติมเข้าไปในซิลิคอน จะทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่ามากขึ้นเมื่อมีจำนวนอะตอมของทองคำมากขึ้น ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ชดเชย (Compensation) ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวลดลง และผลของการเติมอะตอมของทองคำยังทำให้ค่าแฟคเตอร์อุดมคติมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าใกล้เคียงกับ 2 และจากสมการที่ 3 และ 5 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาค่า  $R_s$  ของตัวอุปกรณ์ และยังสามารถหาค่า n และ  $\phi_b$  ได้ โดยกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญ ในการใช้สำหรับการ

วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si(Au doped)/Al และ Al/n-Si/Al ในโอกาสต่อไป

**5.กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆ และที่เป็นประโยชน์ต่อบทความนี้

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] จักรพงษ์ สุขเดช "ตัวตรวจวัดแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/U-Si(Au Doped)/Al" การประชุมวิชาการวิศวกรรมมหัพชา ไฟฟ้า ครั้งที่ 27, หน้า 221-224, 2547
- [2] สมเกียรติ สุขเดช, "ตั้งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
- [3] Mariusz Sochacki\*, Adam Kolendo, Jan Szmidi, Aleksander Werbowy, "Properties of P/4H-SiC Schottky diode with interfacial layer at elevated temperatures", Solid-State Electronics, pp.585-590, 2001
- [4] Cheung SK, Cheung NW. "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", Appl Phys Lett 1986, 49:85-7.
- [5] อนุชา เรืองพานิช, "การศึกษาและวิจัยผลของอะตอมทองคำต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ประเภทออยซ์", วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สจล, 2538
- [6] ชนศ โขะเหม, "การออกแบบและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมาร์", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สจล, 2548



นายสุรศักดิ์ นิยมเจริญ วท.บ. (ฟิสิกส์) ม.ช., วศ.ม. และ ว.ศ. (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า) สจล. ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



นายกฤษฎณ์ ไพรวลัย วท.บ. (ฟิสิกส์ประยุกต์) สจล. ปัจจุบันเป็น นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



นายวรเทพ น้อยปรีชา วศ.บ. (อิเล็กทรอนิกส์) สจล. ปัจจุบันเป็น นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายคงกฤษณ์ ไพรวลัย

วัน เดือน ปีเกิด

29 ตุลาคม 2527

ที่อยู่

22/30 ถนนแนวเบเลหาสน์ ตำบลหัวหิน อำเภอหัวหิน จังหวัด  
ประจวบคีรีขันธ์ 77110

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

สถาบันการศึกษา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
2549

ปีการศึกษา

ความชำนาญเฉพาะด้าน

1) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

2) เครื่องมือวัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ