

ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง $\text{Mo}/n\text{-Si}/\text{Mo}$
แบบพลาแนรี

ELECTRICAL AND OPTICAL CHARACTERIZATION OF PLANAR
 $\text{Mo}/n\text{-Si}/\text{Mo}$ STRUCTURES

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
SURASAK NIEMCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1290-2

ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo
แบบพลาแนร์

ELECTRICAL AND OPTICAL CHARACTERIZATION OF PLANAR
Mo/n-Si/Mo STRUCTURES

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
SURASAK NIEMCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1290-2

ELECTRICAL AND OPTICAL CHARACTERIZATION OF PLANAR
Mo/n-Si/Mo STRUCTURES

SURASAK NIEMCHAROEN

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

2004

ISBN 974-15-1290-2

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนรี
นักศึกษา	นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ
รหัสประจำตัว	44060004
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ศ.ดร. คาซุโนะริ ซาโตะ

บทคัดย่อ

โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) แบบพลาแนรี ที่ประกอบด้วยรอยสัมผัส肖ตกีที่ปลายสุดทั้งสองด้านเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมาก เนื่องจากสร้างเป็นวงจรรวมทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงในระบบสื่อสารและระบบจัดการข้อมูลทางแสงได้ดี ดังนั้นจึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการทดลองและผลการทดลองของโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 ถึง 2000 μm และได้กล่าวถึงการหาลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้งแบบกระแสตรง (dc) และกระแสสลับ (ac) จากผลการทดลองการตอบสนองสัญญาณความถี่ต่ำในช่วง 100 Hz ถึง 1 MHz พบว่า เมื่อให้แสงตกกระทบบที่บริเวณระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดกว้างจะเกิดกระแสสัญญาณขึ้น สเปกตรัมการเกิดของกระแสสัญญาณ แสดงได้ในลักษณะของความถี่เทิร์นโอเวอร์ 2 ค่า โดยที่ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าต่ำเกิดจากพาหะที่เกิดขึ้นที่บริเวณนิวทรัลภายในระยะการแพร่จากขอบบริเวณปลอดพาหะ และความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าต่ำนี้จะไม่ขึ้นกับระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 ถึง 2000 μm กระแสสัญญาณอีกส่วนหนึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ ซึ่งแสดงได้ในลักษณะของความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าสูง ความถี่นี้จะสะท้อนถึงผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของความต้านทานภายนอก นอกจากนี้ได้นำเสนอวงจรมูลอย่างง่าย เพื่ออธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้น พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับผลจากการจำลองแบบ สำหรับประโยชน์ที่เห็นได้ชัดของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ คาดว่าสามารถนำไปใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ไอริสได้เป็นอย่างดี

Thesis Title	Electrical and Optical Characterization of Planar Mo/n-Si/Mo Structures
Student	Mr. Surasak Niemcharoen
Student ID	44060004
Degree	Doctor of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech
Thesis Co-Advisor	Prof.Dr. Kazunori Sato

ABSTRACT

Planar Metal-Semiconductor-Metal (MSM) structures with Schottky barriers at both ends have attracted much attention for use in high speed optical communication and data processing systems as photodetectors due to their simple planar structures, also allowing them to be easily incorporated into OptoElectronic Integrated Circuits (OEICs). Thus, they became an important photodetector structures.

The purpose of this thesis is to report the test results of electrical and optical characteristics of planar Mo/n-Si/Mo structures. The electrode spacing is between 20 to 2000 μm . We measured the current-voltage (I-V) and optical response characteristics in both direct current (dc) and alternating current (ac) schemes. The experimental results at the low frequencies (100 Hz-1 MHz) revealed that the presence of wide electrode spacing under optical illumination can enhance the device output signal current with bias and the spectrum of the output current exhibits two turn-over frequencies. The lower turn-over frequency is due to carriers optically generated in neutral region within the diffusion length from the boundary with the depletion region. This lower turn-over frequency was independent of the electrode spacing between 20 to 2000 μm . On the other hand, the originating current from the depletion region exhibits a higher turn-over frequency. The higher turn-over frequency reflects the influence of the external load resistance. An equivalent circuit representation of such a structure has also been proposed. The good agreement is achieved between the experimental results and simulated ones. The device of this structure is expected to various applications such as an electronic iris component.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช และอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม Prof.Dr. Kazunori Sato จากภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ และอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยโตไก ที่ให้ความช่วยเหลือทุกด้าน ตั้งแต่ความรู้ในการวิจัยที่มุ่งเน้นและเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวหลายชนิดที่สัมพันธ์กับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์ รศ.ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง Assoc.Prof. Yoichi Yasumura รศ.ดร. ถวิล พึ่งมา รศ.ดร. จงกล งามวิวิทย์ และ ดร. กิตติพล ชิตสกุล ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนการศึกษานี้

ขอขอบคุณทุนความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังกับมหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น (KMITL-TOKAI UNIVERSITY ACADEMIC COOPERATION) ในโปรแกรมของอาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม และให้การสนับสนุนทางด้านงบประมาณในการเดินทางไปทำงานวิจัยร่วม ณ มหาวิทยาลัยโตไก

ขอขอบคุณ คุณวิจา ดินตะโมระ แผนกวิเทศสัมพันธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคุณ Akiko Uchida แผนกต่างประเทศ มหาวิทยาลัยโตไก ที่กรุณาช่วยติดต่อประสานงานเกี่ยวกับทุนความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังกับมหาวิทยาลัยโตไก

ขอขอบคุณ คุณสัญญา คุณขาว จากมหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่ให้ความช่วยเหลือระหว่างที่ทำงานวิจัยที่มหาวิทยาลัยโตไก

ขอขอบคุณ คุณชลิดา คุณาเรือง และคุณธนศ โชะเหม ที่ช่วยเหลืองานทางด้านเทคนิคบางส่วน ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และนักศึกษาทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และทำงานร่วมกันมาโดยตลอด

สำหรับคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นสถานที่ทำงานที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XVI
รายการสัญลักษณ์.....	XVIII
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XXII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 ความเป็นมา.....	2
1.1.2 ความสำคัญของปัญหา.....	3
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	7
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	8
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	8
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	9
บทที่ 2 การตรวจวัดทางแสงและตัวตรวจวัดแสง.....	11
2.1 บทนำ.....	11
2.2 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	12
2.2.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง.....	12
2.2.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	13
2.2.2.1 กลไกการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	15
2.2.2.3 ปฏิกิริยาการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	16
2.3 คุณสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสง.....	18
2.3.1 ประสิทธิภาพควอนตัม.....	18
2.3.2 สภาพการตอบสนอง.....	19
2.3.3 ความเร็วในการตอบสนอง.....	19
2.3.4 สัญญาณรบกวนแบบซีด.....	20
2.4 ชนิดของตัวตรวจวัดแสง.....	20
2.4.1 โฟโตคอนดักเตอร์.....	20
2.4.2 โฟโตไดโอด.....	21
2.4.2.1 p-n และ p-i-n โฟโตไดโอด.....	21
2.4.2.2 อะวาลานซ์โฟโตไดโอด.....	24
2.4.2.3 โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด.....	25
บทที่ 3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM).....	27
3.1 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิด n.....	27
3.1.1 การเกิดซีดที่แบริเออร์ในภาวะสมดุล.....	28
3.1.2 การทำงานของซีดที่แบริเออร์.....	29
3.1.3 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดที่แบริเออร์.....	31
3.2 ตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	33
3.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน.....	33
3.2.1.1 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล.....	34
3.2.1.2 โครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส.....	35
3.2.1.3 การนำกระแสไฟฟ้าในโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส.....	35
3.2.1.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส.....	37
3.2.1.5 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ.....	39
3.2.3 แบบจำลองทางแสงของโครงสร้าง MSM.....	41
บทที่ 4 การเตรียมชิ้นงานและการทดลอง.....	42
4.1 ลวดลายสำหรับการสร้างชิ้นงาน.....	42
4.1.1 ลวดลายแบบช่องเดี่ยว.....	42
4.1.2 ลวดลายแบบอินเตอร์ดิฟิเคต.....	43
4.2 กระบวนการสร้าง.....	43
4.3 การทดลอง.....	46
4.3.1 การหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน.....	46
4.3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณ แสงแบบกระแสตรง.....	48
4.3.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณ แสงแบบกระแสสลับ.....	48
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	50
5.1 การหาความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด.....	50
5.2 การหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้ว ไฟฟ้ามีขนาดกว้าง.....	52
5.3 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแส ตรง (dc).....	53
5.3.1 การหาลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์.....	53
5.3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่าง ขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง.....	54
5.4 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแส สลับ (ac).....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล.....	58
5.5.1 ลักษณะเฉพาะแบบกระแสตรง.....	59
5.5.2 ลักษณะเฉพาะแบบกระแสลับ.....	60
บทที่ 6 การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง.....	64
6.1 การวิเคราะห์สัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo จากลักษณะเฉพาะกระแส- แรงดันแบบกระแสลับ เพื่อหาวงจรมูลอย่างง่าย สำหรับอธิบายการตอบสนอง สัญญาณแสงความถี่ต่ำของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง.....	64
6.2. การวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสแสงกับแรงดันไบแอสของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง.....	70
6.2.1 ผลกระทบของกระแสแสงกับแรงดันไบแอสของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo.....	70
6.2.2 ผลกระทบของการตอบสนองสัญญาณกับแรงดันไบแอส.....	76
6.3 การวิเคราะห์แรงดันภายในและความหนาแน่นอะตอมสารเจือจากลักษณะเฉพาะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน.....	79
6.4 การวิเคราะห์สัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล...	80
บทที่ 7 สรุป.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก ก. สัญญาณรบกวนแบบช็อตในตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo.....	93
ภาคผนวก ข. การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ.....	99
ภาคผนวก ค. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ และทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่าง ๆ.....	5
2.1 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ.....	15
6.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1000 μm ที่แรงดันไบแอส 10 V.....	67
6.2 กระแสแสง ความจุไฟฟ้า และความกว้างปลอดพาหะที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสของชั้นงาน ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm	75
6.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ สำหรับชั้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm	76
6.4 สัญลักษณ์ และค่าคงที่ ซึ่งใช้คำนวณในสมการที่ (6.3) และ (6.4).....	82
ก1 แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนของโฟโตไดโอดแบบ GaP ซ้อตกี และ GaAsP ซ้อตกี ที่มีขายทั่วไป (อุณหภูมิ : 300 K).....	97
ค1 ค่าคงที่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้.....	100

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของโครงสร้าง MSM แบบพลารนาร์ ซึ่งสร้างขั้วโลหะ 2 ข้างบน สารกึ่งตัวนำ และมีส่วนรับแสงอยู่ที่บริเวณระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (Distance between electrode : D)	
(ข) ภาพด้านบน และภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM แบบพลารนาร์.....	2
2.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแสงแบบเชิงเลข.....	11
2.2 แผนภาพของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่แสดงในรูปของฟังก์ชันเลขคลื่น (k)	
(ก) กรณีช่องแถบตรง (ข) กรณีช่องแถบไม่ตรง.....	12
2.3 กลไกการเกิดพาหะจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	
(ก) การดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิกจากแถบถึงแถบ	
(ข) การดูดกลืนแสงแบบแถบและระดับสารเจือ.....	14
2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ	
(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม.....	16
2.5 การดูดกลืนแสงภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ.....	17
2.6 สเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้สร้างเป็น ตัวตรวจวัดแสง.....	17
2.7 (ก) โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตคอนดักเตอร์ และการให้แรงดันไบแอส	
(ข) กลไกการเกิดพาหะในโฟโตคอนดักเตอร์ เมื่อได้รับการฉายแสง.....	21
2.8 (ก) ภาคตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของ p-n โฟโตไดโอด	
(ข) การเกิดพาหะของ p-n โฟโตไดโอด เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	22
2.9 ตัวตรวจวัดแสงชนิด p-i-n โฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างพื้นฐาน (ข) การให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ	
(ค) แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ.....	23
2.10 (ก) โครงสร้างของอะวาลานซ์โฟโตไดโอดชนิดรีทาร์ (reach-through APD)	
(ข) ความเข้มข้นของสารเจือในชั้นต่างๆ (ค) สนามไฟฟ้าในชั้นต่างๆ	24
2.11 (ก) โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด	
(ข) การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลแบบแถบถึงแถบ เมื่อได้รับการฉายแสง.....	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 (ก) โลหะที่สร้างขึ้นบนสารกึ่งตัวนำชนิด n แล้วเกิดเป็นซ็อตตีแบริเออร์ หรือรอยสัมผัสแบบโอห์มิก (ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของซ็อตตีแบริเออร์.....	27
3.2 แผนภาพแถบพลังงานของโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิด n ซึ่งเกิดเป็นซ็อตตีแบริเออร์ (ก) ก่อนการสัมผัส (ข) ภายหลังจากการสัมผัสที่ภาวะสมดุล.....	28
3.3 (ก) การให้แรงดันไบแอสตรงแก่ซ็อตตีแบริเออร์ (ข) แถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เมื่อให้แรงดันไบแอสตรงแก่ซ็อตตีแบริเออร์.....	29
3.4 (ก) การให้แรงดันไบแอสย้อนกลับแก่ซ็อตตีแบริเออร์ (ข) แถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เมื่อให้แรงดันไบแอสย้อนกลับแก่ซ็อตตีแบริเออร์.....	30
3.5 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของซ็อตตีแบริเออร์ (เส้นทึบ) และรอยต่อ p-n (เส้นประ).....	31
3.6 (ก) ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของซ็อตตีแบริเออร์ (ข) ลักษณะเฉพาะจากรูป (ก) เมื่อนำมาเขียนใหม่ในเทอม $1/C^2$ กับแรงดัน และเมื่อลากเส้นต่อจุดจนตัดแกนแรงดัน ($1/C^2 = 0$) จะทราบค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) ของซ็อตตีแบริเออร์.....	32
3.7 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM ที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะพลาแนร์ ซึ่งมีความเหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้สร้างร่วมกับวงจรรวมทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM.....	33
3.8 (ก) โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล (ข) แผนภาพแถบพลังงานในภาวะสมดุล เมื่อ ϕ_{bn1} และ ϕ_{bn2} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ และ V_{bi1} และ V_{bi2} คือ แรงดันภายใน สำหรับรอยสัมผัสด้านคาโทดและด้านแอนโนดตามลำดับ.....	34
3.9 (ก) เงื่อนไขของริช-ทูร์ช ซึ่งบริเวณปลอดพาหะทั้งสองสัมผัสซึ่งกันและกัน และสอดคล้องกับแรงดัน V_{RT} ที่เรียกว่า แรงดันริช-ทูร์ช (ข) เงื่อนไขของแฟลต-แบนด์ ซึ่งแถบพลังงานที่ $x = D$ กลายเป็นแบนราบและสอดคล้องกับแรงดันแฟลต-แบนด์ (ค) เงื่อนไขที่ให้แรงดันมากกว่า V_{FB}	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 (ก) โครงสร้าง MSM เมื่อให้แรงดันไบแอส V_A แล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะ W_{d1} และ W_{d2} (ข) บริเวณปลอดพาหะ W_{d1} และ W_{d2} แทนด้วยความจุไฟฟ้าแฝง C_{d1} และ C_{d2}	37
3.11 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....	38
3.12 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ได้รับแรงดันไบแอสแล้วจะเกิดบริเวณปลอดพาหะ คลุมตลอดระยะห่าง D และเมื่อให้แสงตกกระทบแล้วจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทำให้ เกิดเป็นกระแสแสงไหลออกไปภายนอกตัวอุปกรณ์.....	39
3.13 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน เมื่อไม่ให้แสง และให้แสงตกกระทบของโครงสร้าง (ก) โครงสร้างเสมือนโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดตัวที่ 1 (ข) โครงสร้างเสมือนโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดตัวที่ 2 (ค) โครงสร้าง MSM ที่รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำทั้งสองเชื่อมต่อแบบหันหลังชนกัน.....	40
3.14 วงจรสมมูลของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM ภายใต้การให้แสงตกกระทบ.....	41
4.1 ลวดลายของต้นแบบที่มีลักษณะเป็นช่องเดี่ยว เพื่อสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo.....	42
4.2 ลวดลายของต้นแบบที่มีลักษณะเป็นอินเตอร์ดิจิตเท เพื่อสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo.....	43
4.3 ตัวอย่างลวดลายของต้นแบบที่มีลักษณะเป็นอินเตอร์ดิจิตเท ซึ่ง $D = 100 \mu\text{m}$ และ $W = 100 \mu\text{m}$ (ก) แบบ 3 แถบ และ (ข) แบบ 5 แถบ.....	43
4.4 (ก) เครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน (ข) การวางแผ่นฉลิกซิลิคอนในเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน (ค) โลหะโมลิบดีนัม (Mo) ที่ใช้สร้างเป็นขั้วไฟฟ้า.....	44
4.5 กระบวนการสร้างของโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมา.....	45
4.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมาที่สร้างเสร็จแล้ว (ก) แบบช่องเดี่ยว (ข) แบบอินเตอร์ดิจิตเท 5 แถบ (ค) ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงิน.....	46

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 บล็อกไดอะแกรมของการหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน.....	47
4.8 การหาค่าแรงดันภายในจากลักษณะเฉพาะระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบแอส.....	47
4.9 บล็อกไดอะแกรมของการวัดสัญญาณทางแสงในลักษณะสัญญาณแบบกระแสตรง.....	48
4.10 บล็อกไดอะแกรมของการวัดสัญญาณทางแสงในลักษณะสัญญาณแบบกระแสสลับ.....	48
5.1 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะ $D = 2000 \mu\text{m}$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบกวาด	
(ข) ความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมประมาณ 1140 \AA	51
5.2 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ และความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส.....	52
5.3 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ซึ่งได้จากเครื่องวัด คุณสมบัติทรานซิสเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน.....	53
5.4 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง หลังจากให้แรงดันไบแอสที่ขั้วคาโทด เป็นลบ และขั้วแอโนดเป็นบวก และยังพบส่วนของบริเวณนิวทรัลเหลืออยู่.....	54
5.5 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไบแอส เมื่อให้ความเข้มแสงที่แตกต่างกันตกกระทบบน อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $2000 \mu\text{m}$	55
5.6 แผนภาพชุดเครื่องมือทดลอง เพื่อหาการตอบสนองของสัญญาณทางแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo.....	56
5.7 การตอบสนองของสัญญาณทางแสงของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่มีขนาดของระยะ ห่างขั้วไฟฟ้า $1000 \mu\text{m}$ และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหนดความต้านทาน (R_L) ระหว่าง $200 \Omega, 2 \text{ k}\Omega, 20 \text{ k}\Omega$ และ $200 \text{ k}\Omega$	57
5.8 ภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตแบบ 3 แถบ (หรือ 3 ฟิงเกอร์).....	58
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบอินเตอร์ดิจิต ที่มี 3 แถบ ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 4 ระดับ.....	59
5.10 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองการตอบสนองความถี่ต่ำที่อยู่ระหว่าง 1-20 kHz ของ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11	
เส้นกราฟจากออสซิลโลสโคปของการตีมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 1 kHz ในโดเมนเวลาของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ ที่แรงดันไบแอส (ก) 1 V และ (ข) 20 V.....	60
5.12	
เส้นสเปกตรัมของสัญญาณตีมอดูเลทที่แรงดันไบแอส (ก) $V = 1\text{ V}$ และ (ข) $V = 20\text{ V}$ ที่ความถี่ 1 kHz ของอุปกรณ์ตัวเดียวกันกับที่แสดงผลใน รูปที่ 5.11 ในโดเมนความถี่ ซึ่งวัดจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบ FFT.....	62
6.1	
การเกิดพาหะอิสระของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง จากแสงตก กระทบ ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลของอุปกรณ์.....	65
6.2	
การเกิดกระแสแสงจาก (ก) กระแสโฟโตไดโอด (ข) กระแสโฟโตคอนดักเตอร์ และ (ค) กระแสแสงรวมของกระแสโฟโตไดโอดและกระแสโฟโตคอนดักเตอร์ เพื่อนำไปอธิบาย การตอบสนองของสัญญาณแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง.....	66
6.3	
วงจรสมมูลความถี่ต่ำของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo เมื่อฉายแสงตกกระทบบน.....	67
6.4	
เปรียบเทียบผลการทดลอง และการจำลองแบบของการตอบสนองสัญญาณแสง ความถี่ต่ำที่อุณหภูมิลำดับไมโครกับความถี่ของสัญญาณที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1000 μm ของโหนดความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเป็น 200 Ω , 2 k Ω , 20 k Ω และ 200 k Ω โดยใช้ตัวแปรในการจำลองแบบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.1.....	68
6.5	
แผนภาพแถบพลังงานของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ได้รับแรงดันไบแอสแล้วสนาม ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่บริเวณปลอดพาหะเกือบทั้งหมด ในขณะที่บริเวณนิวทรัล แถบพลังงานจะแบนราบ.....	69
6.6	
ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดทั่วไป (Conv.) ซึ่งมีโครงสร้างเป็น แบบแนวตั้ง ซึ่งแสดงกระแสมืดและกระแสแสงที่ความเข้มแสง (ill.) ค่าต่างๆ แสดงด้วยเส้นทึบ ส่วนกรณีของโครงสร้าง MSM กระแสแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ แสดงด้วยเส้นประ.....	71
6.7	
กระแสแสงที่ขึ้นกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของสัญญาณที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 2000 μm	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 ความกว้างปลอดพาหะที่เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับแรงดันไบแอสสูงขึ้น ทำให้กระแสแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo นี้มีค่าเพิ่มขึ้น.....	73
6.9 กระแสแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสที่มาจากบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลของชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm (Δ คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ, \bigcirc คือ กระแส I_g และ \blacksquare คือ กระแส I_c).....	75
6.10 การตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสของชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm และใช้โหลดความต้านทาน 200 Ω ต่ออนุกรมเข้ากับชิ้นงาน.....	76
6.11 เปรียบเทียบสเปกตรัมของการตอบสนองแสงที่แรงดันไบแอส 1 V และ 10 V ของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ซึ่งมีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2000 μm	78
6.12 ลักษณะเฉพาะของ $1/C^2$ กับแรงดันไบแอส เมื่อลากเส้นต่อจนตัดแกนแรงดันจะได้แรงดันภายในประมาณ 0.23 V.....	79
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับเทอมรากกำลังที่ 2 ของแรงดันไบแอสของอุปกรณ์เดียวกับที่แสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันอย่างเชิงเส้น.....	81
6.14 ลักษณะเฉพาะกระแสแสง-แรงดันจากการทดลองและการคำนวณ โดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 6.4.....	82
g1 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองการหาสัญญาณรบกวนแบบช็อตของ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง.....	93
g2 ภาพถ่ายชุดทดลอง เพื่อทดลองหาสัญญาณรบกวนแบบช็อตของ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง.....	94
g3 ความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนกับกระแสของตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ภายใต้แสงตกกระทบ โดยวัดที่ความถี่ 15 kHz.....	95
g4 แพลตฟอร์มของสัญญาณรบกวนของตัวตรวจวัดชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 ถึง 2000 μm เส้นประยาวแสดงแพลตฟอร์มของสัญญาณรบกวนเฉลี่ย สำหรับชิ้นงานที่ถูกทดสอบ ($r^2 = 0.98$) ส่วนเส้นประสั้นแสดงถึงระดับเต็มของสัญญาณรบกวนแบบช็อตแบบเต็มระดับ (full shot noise).....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- ข1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอะตอมสารเจือกับสภาพต้านทาน [56] ซึ่ง
- $N_B < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ จะเป็นบริเวณที่ความเข้มข้นสารเจือไม่ขึ้นกับค่าสภาพคล่องของพาหะ
 - $N_B > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ จะเป็นบริเวณที่ความเข้มข้นสารเจือขึ้นกับค่าสภาพคล่องของพาหะ..... 99

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
ac	alternating current	กระแสสลับ
AlGaAs	Aluminium Gallium Arsenide	อะลูมิเนียมแกเลียมอาเซไนด์
AOM	Acousto Optic Modulator	อคูสโตออปติกมอดูเลเตอร์
APD	Avalanche Photodiode	อะวาลานซ์โฟโตไดโอด
BARITT	Barrier Injection Transit Time diode	บารีตตีไดโอด
BWD	Backward Direction	ไบแอสย้อนกลับ
Cr	Chromium	โครเมียม
dc	direct current	กระแสตรง
DUT	Device Under Test	อุปกรณ์ที่ทดสอบ
FET	Field Effect Transistor	ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานด้วยสนามไฟฟ้า
FFT	Fast Fourier Transform	การแปลงแบบฟาสต์ฟูริเยร์
FWD	Forward Direction	ไบแอสตรง
GaAs	Gallium Arsenide	แกเลียมอาเซไนด์
Ge	Germanium	เยอรมันเนียม
He-Ne laser	Helium-Neon Laser	เลเซอร์ ชนิดฮีเลียม-นีออน
HTF	Higher Turn-over Frequency	ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าสูง
InGaAs	Indium Gallium Arsenide	อินเดียมแกเลียมอาเซไนด์
InP	Indium Phosphide	อินเดียมฟอสไฟด์
LTF	Lower Turn-over Frequency	ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าต่ำ
Mo/n-Si/Mo	Molybdenum/n - Silicon/Molybdenum	โมลิบดีนัม/เอ็น-ซิลิคอน/โมลิบดีนัม
MSM	Metal-Semiconductor-Metal	โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
M-S PD	Metal-Semiconductor Photodiode	โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด
ND filter	Neutral Density filter	แผ่นกรองแสงชนิดไม่มีสี
OEICs	OptoElectronic Integrated Circuits	วงจรรวมทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์
R-center	Recombination center	ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่
SEM	Scanning Electron Microscopy	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด

รายการคำย่อ

อักษรย่อ

Si

คำเต็มภาษาอังกฤษ

Silicon

คำแปลภาษาไทย

ซิลิคอน

รายการสัญลักษณ์

A	คือ	ขั้วอาโนด
A^*	คือ	ค่าคงที่รีดซาร์ดสัน
A_n^*	คือ	ค่าคงที่รีดซาร์ดสันของอิเล็กทรอนิกส์
A_p^*	คือ	ค่าคงที่รีดซาร์ดสันของโฮล
B	คือ	แบนด์วิททางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง
c	คือ	ความเร็วแสงในสุญญากาศ
C_d	คือ	ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะ
C_{d1}	คือ	ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วคาโทด
C_{d2}	คือ	ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วอาโนด
C_p	คือ	ความจุไฟฟ้าของแผ่นเชื่อมต่อขา
C_T	คือ	ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะรวม
$c(s)$	ค่า	สัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์ร่วมกัน
D	คือ	ระยะห่างขั้วไฟฟ้า
D_p	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
E_C	คือ	ระดับพลังงานขอบล่างของแถบนำไฟฟ้า
E_{Fm}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ
E_{Fs}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
E_g	คือ	ช่องว่างแถบพลังงาน
E_T	คือ	ระดับพลังงานแทรก
E_V	คือ	ระดับพลังงานขอบบนของแถบเวเลนซ์
G	คือ	ความนำไฟฟ้า
h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์
$h\nu$	คือ	โฟตอน หรือพลังงานของแสง
\hbar	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์แบบลดค่า ($= h/2\pi$)
I	คือ	กระแสรวมของกระแสแสงกับกระแสมืด
I_c	คือ	กระแสโฟโตคอนดักเตอร์

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

I_d	คือ กระแสโฟโตไดโอด
I_{dark}	คือ กระแสมืด
I_p	คือ กระแสแสง
\bar{I}	คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสเอาทัพูท
$\langle i_n^2 \rangle$	คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสของสัญญาณรบกวนแบบช็อค
J	คือ ความหนาแน่นกระแสรวม
J_F	คือ ความหนาแน่นกระแสของการให้แรงดันไบแอสตรง
J_n	คือ ความหนาแน่นกระแสอิเล็กทรอนิกส์รอน
J_p	คือ ความหนาแน่นกระแสโฮล
J_R	คือ ความหนาแน่นกระแสของการให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ
k	คือ เลขคลื่น
k	คือ อัตราส่วนในการเกิดกระแสแสงของบริเวณปลอดพาหะต่อบริเวณนิวทรัล
k_B	คือ ค่าคงที่ของโบสต์มานต์
K	คือ ขั้วคาโทด
L	คือ ระยะการแพร่
m^*	คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ
M	คือ โลหะ
N_d	คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้
p	คือ โมเมนตัม
$P_{\text{abs}}(x)$	คือ กำลังงานการดูดกลืนของแสงที่ขึ้นกับระยะทาง (x) ของสารกึ่งตัวนำ
P_{inc}	คือ กำลังงานของแสงตกกระทบ
q	คือ ประจุอิเล็กทรอนิกส์รอน
r_s	คือ ความต้านทานอนุกรม
R	คือ สภาพการสะท้อนแสงของสารกึ่งตัวนำ
R_D	คือ ความต้านทานของไดโอด
R_L	คือ ความต้านทานโหลด
t_r	คือ ช่วงเวลาขาขึ้น

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

t_f	คือ ช่วงเวลาขาลง
V, V_A	คือ แรงดันไบแอส
V_{bi}	คือ แรงดันภายใน
V_{bi1}	คือ แรงดันภายในด้านขั้วคาโทด
V_{bi2}	คือ แรงดันภายในด้านขั้วอโนด
V_F	คือ แรงดันไบแอสตรง
V_R	คือ แรงดันไบแอสย้อนกลับ
V_{RT}	คือ แรงดันรีซ-ทอร์ช
V_{FB}	คือ แรงดันเฟลต-แบนด์
V_1	คือ แรงดันไบแอสขั้วคาโทด
V_2	คือ แรงดันไบแอสขั้วอโนด
S	คือ สารกึ่งตัวนำ
$S(\omega)$	คือ กระแสสัญญาณรบกวน
$S_c(\omega)$	คือ สัญญาณรบกวน เนื่องจากกระแสจากบริเวณนิวทรัล
$S_d(\omega)$	คือ สัญญาณรบกวน เนื่องจากกระแสจากบริเวณปลดพาหะ
T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
W_d	คือ ความกว้างบริเวณปลดพาหะ
W_{d1}	คือ ความกว้างของบริเวณปลดพาหะด้านขั้วคาโทด
W_{d2}	คือ ความกว้างของบริเวณปลดพาหะด้านขั้วอโนด
W_T	คือ ความกว้างของบริเวณปลดพาหะรวม
W	คือ ระยะความกว้างของแถบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมของลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล
α	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
β	คือ พารามิเตอร์ของ $2\epsilon_s/qN_d$
\mathfrak{R}	คือ สภาพการตอบสนอง
ϵ_s	คือ เปรอริมิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
ϵ_0	คือ เปรอริมิติวิตีในสุญญากาศ

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

η	คือ ประสิทธิภาพควอนตัม
η_{ext}	คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก
η_{int}	คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน
η'	คือ แฟคเตอร์ของการแปรผันตรงที่รวมส่วนของความยาวของแถบโลหะและผลกระทบที่ส่วนปลายแถบ และแฟคเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ประสิทธิภาพควอนตัม เป็นต้น
λ	คือ ความยาวคลื่นแสง
λ_{max}	คือ ความยาวคลื่นคัทออฟ หรือความยาวคลื่นสูงสุด
ν	คือ ความถี่ของแสง
τ	คือ เวลาชีวิตหรือลักษณะเฉพาะเวลา
Γ^2	คือ แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวน
Γ_c^2	คือ แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนของส่วนประกอบกระแสจากบริเวณนิวทรัล
Γ_d^2	คือ แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนของส่วนประกอบกระแสจากบริเวณปลดพาหะ
$\Delta\phi_{bn}$	คือ ข้อตักแบริเออร์ โลเวอร์ริงของความสูงกำแพงศักย์ของอิลีกตรอน
$\Delta\phi_{bp}$	คือ ข้อตักแบริเออร์ โลเวอร์ริงของความสูงกำแพงศักย์ของโฮล
ϕ_{bn}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ของอิลีกตรอน
ϕ_{bp}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ของโฮล
ϕ_{bn1}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ด้านขั้วคาโทด
ϕ_{bn2}	คือ ความสูงกำแพงศักย์ด้านขั้วอโนด
ϕ_m	คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_s	คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
χ_s	คือ อิลีกตรอนแอฟฟินิตี

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

กระจกฟิลเตอร์
กระบวนการดูดกลืนแสง
กระบวนการรวมตัวใหม่
กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง
กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม
กระแสทันเนล
กระแสมืด
กระแสรั่วไหล
กระแสแสง
กระแสสัญญาณรบกวน
กลไกการเคลื่อนที่แบบการแพร่
กล่องป้องกันแสง
การจำกัดเวลาการรวมตัว
การจำกัดเวลาการส่งผ่าน
การใช้ความร้อน
การดูดกลืนแบบแถบและระดับสารเจือ
การดูดกลืนแบบอินทรินซิกจากแถบถึงแถบ
การตอบสนองอย่างรวดเร็วมาก
การแยกสัญญาณ
ขอบการดูดกลืนแสง
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ
ความต้านทานโหลด
ความถี่เทิร์นโอเวอร์
ความเป็นมา
ความยาวคลื่นคัทออฟ
ความไว

ภาษาอังกฤษ

filter mirror
absorption process
recombination process
direct recombination process
indirect recombination process
tunneling current
dark current
leakage current
photocurrent
current noise spectrum
diffusion mechanism
dark box
recombination-time-limited
transit-time-limited
heat treatment
band and impurity absorption
intrinsic band to band absorption
ultra-fast response speed
demodulation
absorption edge
depletion width
load resistance
turn-over frequency
literature review
long wavelength cutoff
sensitivity

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

ความสูงของกำแพงศักย์

ค่าคงที่ของเวลา

คู่อิเล็กตรอน-โฮล

เครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ

เครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำ-

อิเล็กตรอน

เครื่องรับทางแสง

เครื่องรับสัญญาณแบบเชิงเลข

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการเปลี่ยนแปลง-

แบบ FFT

เครื่องวัดแรงดันแบบล็อก-อิน

โครงสร้างแบบแนวตั้ง

โครงสร้าง MSM ที่ตอบสนองสัญญาณแสงที่ผิว-

ซิลิคอน ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า

ช่วงใกล้อินฟราเรด

ช่องว่างแถบพลังงาน

ช็อตกีแบร์ริเออร์

ช็อตกีแบร์ริเออร์ โลเวอร์ริง

ดีมอดูเลท

ทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน

นอร์มอลไรซ์

บริเวณที่ไม่ใช่ปลอดพาหะ

บริเวณนิวทรัล

บริเวณปลอดพาหะ

บริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะห่างขั้ว-

ไฟฟ้าทั้งหมด

ภาษาอังกฤษ

barrier height

time constant

electron-hole pairs

low noise preamplifier

electron beam evaporator

optical receiver

digital optical receiver

FFT spectrum analyzer

lock-in voltmeter

vertical structure

blocking MSM structure

near infrared

energy band gap

Schottky barrier

Schottky barrier lowering

demodulate

thermionic emission theory

normalized

undepletion region

neutral region

depletion region

fully depleted between electrode

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

ประสิทธิภาพควอนตัม
ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก
ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน
ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก
ผลกระทบของแรงอิมเมจ
ผลกระทบของสปูเรียส
ผลกระทบในลักษณะของไอริส
ผลึกเชิงเดี่ยว
แผ่นเชื่อมต่อขา
พลาแนร์
พาหะส่วนเกิน
พาหะแสง
พาหะส่วนมาก
เลขคลื่น
ฟังก์ชันงาน
ฟิงเกอร์
ฟิทกราฟ
แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวน
โฟตอน
โฟนอน
โฟโตลิโธกราฟี
โฟโตไดโอด
โฟโตไดโอดทั่วไป
ไมโครเวฟออสซิลเลชัน
วงจรรวมตัวรับทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์
รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

ภาษาอังกฤษ

quantum efficiency
external quantum efficiency
internal quantum efficiency
photovoltaic effect
image force effect
spurious effect
iris effect
single crystalline
bonding pad
planar
excess carriers
photocarriers
majority carriers
wave number
work function
finger
fit curve
noise factor
photon
phonon
photolithography
photodiode
conventional photodiode
microwave oscillation
optoelectronic receiver integrated circuits
metal-semiconductor contact

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
รอยสัมผัสแบบโอมิก	ohmic contact
ระยะการแพร่	diffusion length
เรกติไฟร์	rectifier
แรงดันภายใน	built in voltage
แรงดันรีช-ทรูธ	reach-through voltage
แรงดันแฟลต-แบนด์	flat-band voltage
ลักษณะเฉพาะเวลา	characteristic time
เลนซ์ขยาย	expander len
โลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง	refractory metal
วงจรเปลี่ยนสัญญาณจากแบบอุปมานเป็น- แบบเชิงเลข	analog to digital circuit
เวลาการแพร่	diffusion time
เวลาที่สัมพันธ์ร่วมกัน	correlation time
เวลายังผลของการแพร่	effective diffusion time
เวลาส่งผ่าน	transit time
ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่	recombination center
สถานะผิว	surface state
สนามแสง	optical field
สภาพการตอบสนอง	responsivity
สภาพการสะท้อนแสงของสารกึ่งตัวนำ	reflectivity of semiconductor
สปูเรียสมอดูเลชัน	spurious modulation
สัญญาณคลื่นรูปไซน์	sinusoidally waveform
สัญญาณรบกวนแบบช็อต	shot noise
สัญญาณรบกวนของช็อตแบบเต็มระดับ	full shot noise
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	light absorption coefficient
ค่าสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์ร่วมกัน	correlation coefficient

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง

สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง

สารซีลีเนียม

หลอดซีนอน

แหล่งจ่ายแสง

อะวาลานช์

อัตราขยาย

อินเตอร์ดิจิตัล

อิเล็กตรอน

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี

อิเล็กทรอนิกส์ไอริส

โฮล

ภาษาอังกฤษ

semiconductor

direct band gap semiconductor

indirect band gap semiconductor

selenium

xenon lamp

light source

avalanche

gain

interdigitated

electron

secondary electron

electron affinity

electronic iris

hole

บทที่ 1

บทนำ

โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal structure) หรือโครงสร้าง MSM เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานทางด้านทรานซิสเตอร์ มีคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ คือ มีกระแสมีดต่ำ [1] สภาพการตอบสนองที่ดี [2] การทำงานด้วยความเร็วสูง [3]-[5] สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวม [6]-[8] ได้ง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนรี (planar) และกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟต (Field Effect Transistor : FET) จึงเป็นอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับความสนใจอย่างมากตัวหนึ่ง และคาดว่าจะมีบทบาทมากในอนาคต

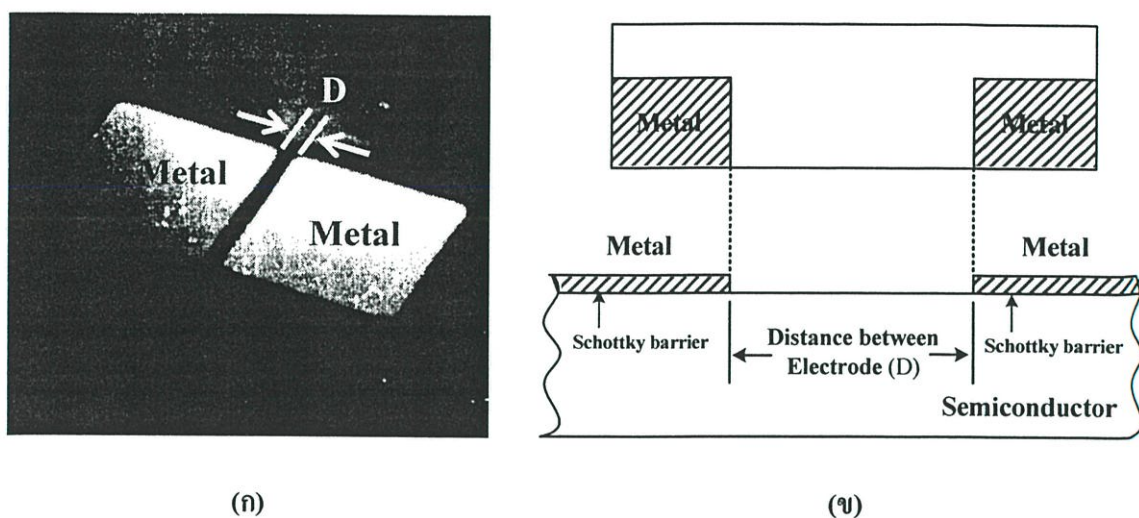
ในบทนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตของการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้มีการนำตัวตรวจจับแสงไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสามารถของอุปกรณ์ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และมีการพัฒนาให้สามารถจัดการข้อมูลทางแสงได้หลายรูปแบบ ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้จึงถูกนำมาใช้งานในเครื่องมือวัดหลายชนิด ในชุดควบคุมการเปิด-ปิดแบบไร้สาย ใช้ตรวจนับจำนวนและตรวจสอบคุณภาพของสินค้าในทางอุตสาหกรรม ใช้เป็นตัวรับสัญญาณทางไกลในระบบสื่อสารความเร็วสูง และเป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับระบบคอมพิวเตอร์ [3]

ตัวตรวจจับแสงที่ใช้งานในปัจจุบันนี้มีหลายชนิด [9]-[12] เช่น โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด (metal-semiconductor photodiode) และอะวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche PhotoDiode : APD) เป็นต้น

ตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM จัดอยู่ในกลุ่มของโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด และเป็นอุปกรณ์ที่สร้างได้ง่าย เพราะว่ามีชั้นโลหะเพียงชั้นเดียวเท่านั้นที่ถูกสร้างบนสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ก) ซึ่งเป็นภาพถ่ายด้านบนของโครงสร้าง MSM แสดงให้เห็นโลหะ 2 ข้างทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า และมีพื้นที่ที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองทำหน้าที่เป็นส่วนรับแสง ส่วนรูปที่ 1.1 (ข) แสดงภาพด้านบนและภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM โดยที่รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำทั้งสองข้าง จะแสดงพฤติกรรมในลักษณะ



รูปที่ 1.1 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของโครงสร้าง MSM แบบพลาแนร์ ซึ่งสร้างขั้วโลหะ 2 ข้างบนสารกึ่งตัวนำ และมีส่วนรับแสงอยู่ที่บริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (Distance between electrode:D)
 (ข) ภาพด้านบน และภาคตัดขวางโครงสร้าง MSM แบบพลาแนร์

ของข้อต่อกึ่งตัวนำ (Schottky barrier) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว สำหรับรายละเอียดจะกล่าวอีกครั้งหนึ่งในบทที่ 3

1.1.1 ความเป็นมา

โครงสร้าง MSM เริ่มต้นศึกษาในช่วงต้นของทศวรรษที่ 70 โดยในปี ค.ศ. 1971 Sze, Coleman และ Loya สร้างโครงสร้าง MSM แบบแนวตั้ง (vertical structure) [13] ทำการวัดลักษณะเฉพาะกระแสแรงดัน และอธิบายการไหลของกระแสไฟฟ้าของโครงสร้างด้วยทฤษฎีเทอร์มิโอนิก อิมิสชัน (thermionic emission theory) โครงสร้าง MSM แบบแนวตั้งนี้ ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านไมโครเวฟออสซิลเลชัน (microwave oscillation) [9], [14] ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้รู้จักกันในชื่อของ บารีตไทม์ไดโอด (BARrier Injection Transit Time diode : BARITT)

ต่อมาโครงสร้าง MSM ถูกสร้างเป็นแบบพลาแนร์ ซึ่งเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสง และสามารถสร้างเป็นวงจรรวมทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย ในปี ค.ศ. 1975 Lawton และ Scavannec ศึกษาถึงการจำกัดเวลาการรวมตัว (recombination-time-limited) ของโครงสร้าง MSM ของโลหะโครเมียม (Cr) ที่แพร่ซึมเป็น GaAsCr [15] ในปี ค.ศ. 1979 Sugeta และ Urisu ศึกษาถึงอัตราการขยายของกระแสแสง เนื่องจากกระแสทันเนล (tunneling current) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM และพบว่ามีความเร็วในการสวิตช์น้อยกว่า 200 ps [16]

ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1980 มีการศึกษาโครงสร้าง MSM บนอะมอร์ฟิซิลิคอน (amorphous silicon) และสามารถตอบสนองของความเร็วในระดับพิโควินาที [17] จากนั้นได้มีการศึกษาการจำกัดเวลาการส่งผ่าน (transit-time-limited) และการจำกัดเวลาการรวมตัวของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ (GaAs) [17] และอะลูมิเนียมแกลเลียมอะเซไนด์/อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์ (AlGaAs/InGaAs) [18] เป็นต้น และในช่วงปลายทศวรรษนี้มีรายงานว่า โครงสร้าง MSM มีแบนด์วิทกว้างถึง 105 GHz [19] ในช่วงเวลาเดียวกันนี้ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ถูกนำไปสร้างร่วมกับเฟททรานซิสเตอร์เป็นวงจรรวมของตัววัดสัญญาณทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [6]-[8]

หลังจากปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา จะพบเห็นรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM อย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ใช้งานทางด้านความเร็วสูงมากขึ้นในระดับหลายร้อยกิกะเฮิรต [20]-[22] เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของอุปกรณ์ที่มีค่าความจุไฟฟ้าภายในโครงสร้างต่ำกว่าอุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดอื่นๆ [11], [23]-[25] และในปี ค.ศ. 1992 มีการรายงานผลการตอบสนองของความเร็วของอุปกรณ์ได้สูงถึง 510 GHz [22]

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำอุปกรณ์โครงสร้าง MSM ไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยจำนวนมากล้วนแต่มุ่งพัฒนาโครงสร้าง MSM เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบการสื่อสารความเร็วสูง ในขณะที่การประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่นๆ โครงสร้าง MSM สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดีเช่นกัน ดังเช่น ใช้ในระบบเก็บข้อมูล [26] หรือใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อิริส (electronic iris) [27]-[29] เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงถึงคุณสมบัติที่สำคัญประการอื่นๆ ของโครงสร้าง MSM แทนที่จะเป็นคุณสมบัติทางด้านความเร็วเหมือนกับงานวิจัยทั่วไป ดังจะได้กล่าวต่อไป

1.1.2 ความสำคัญของปัญหา

หัวใจสำคัญของเครื่องรับทางแสง (optical receiver) คืออุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาจเป็นตัวตรวจวัดแสงเดี่ยวๆ หรือมีตัวตรวจวัดแสงอยู่ร่วมกับส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ส่วนขยายสัญญาณและ/หรือส่วนฟิลเตอร์ เป็นต้น โดยตัวตรวจวัดแสงจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับแสงหรือพลังงานโฟตอนของแสงที่ตกกระทบ เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ในทางอุดมคติตัวตรวจวัดแสงจะต้องตอบสนองการเปลี่ยนสัญญาณที่รับมาให้เร็วที่สุด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากและต้องไม่เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นกับสัญญาณที่รับเข้ามา นอกจากนี้ยังต้องเพิ่มคุณสมบัติที่พึงประสงค์สำหรับตัวตรวจวัดแสงอีกหลายประการ ดังเช่น ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทาน มีอายุการทำงานนาน ความเชื่อถือสูง ราคาต่ำ และระบบสิ่งแวดล้อมภายนอกต้องไม่มีผลกระทบต่อการทำงานด้วย เป็นต้น

แต่ตัวตรวจวัดแสงในทางปฏิบัติกลับพบว่า มีข้อจำกัดหลายประการ และไม่สามารถสร้างให้ตรงกับความต้องการทางอุดมคติได้ เช่น ข้อจำกัดในเรื่องแบนด์วิธ หรือเวลาในการตอบสนองของสัญญาณ เป็นต้น นอกจากนี้ความสามารถในการตรวจจับโฟตอนมีค่าเพียง 60 - 80 % เท่านั้น และยังรวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้สร้างตัวตรวจวัดแสงบางประเภทมีความเปราะบาง เป็นผลให้สิ่งแวดล้อมภายนอกสามารถส่งผลกระทบต่อตัวอุปกรณ์ได้ง่าย เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้จึงจำเป็นต้องปรับปรุงทั้งในส่วนของวัสดุกระบวนการสร้างและเทคโนโลยีในการสร้างให้ก้าวหน้ามากขึ้น จึงทำให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีราคาแพงมาก จนอาจไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์

จากข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้ รวมทั้งหาวิธีการลดต้นทุนให้ต่ำลง จึงเป็นสาเหตุให้มีการศึกษา การวิจัย การพัฒนา และการสร้างตัวตรวจวัดแสงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการสร้างตัวตรวจวัดแสงขึ้นมาหลายชนิด ประกอบด้วยวัสดุที่แตกต่างกันทำให้อุปกรณ์มีช่วงการใช้งานที่มีความหลากหลาย และเป็นไปตามความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน จากตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ และประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงหลายชนิดที่ทำงานด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) [12] พบว่า ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอน (Si) จะให้การตอบสนองในช่วงของแสงที่ตามองเห็น และช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared : 800-1600 nm) ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 400-1110 nm ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากเยอรมันเนียม (Ge) หรือสารประกอบ InGaAs ให้การตอบสนองอยู่ในช่วงแสงใกล้อินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 900-1700 nm เมื่อพิจารณาในเรื่องของอัตราการขยาย (gain) ทางแสง ตัวตรวจวัดแสงแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด หรือ APD จะได้รับความสนใจมากกว่า ทำให้สามารถตอบสนองความเข้มแสงในระดับต่างๆ ได้ดี ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงชนิดอื่นๆ ไม่มีอัตราการขยายทางแสง แต่มีข้อด้อยตรงที่ต้องใช้แรงดันไบแอสสูงกว่าตัวตรวจวัดแสงทั่วไป ในกรณีของพินโฟโตไดโอดจะมีข้อเด่นในเรื่องกระแสมืดที่มีค่าต่ำ และมีประสิทธิภาพควอนตัมสูง

สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM มีจุดเด่นอยู่ที่ความจุไฟฟ้ามีค่าต่ำ ทำให้ใช้เวลาในการตอบสนองสัญญาณมีค่าน้อย และมีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ ซึ่งเหมาะสำหรับสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย นอกจากนี้มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนจึงมีราคาถูก อุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM จึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่ง โดยเฉพาะการเลือกใช้ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถตอบสนองทางแสงในช่วงของแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมากมาย

จากการศึกษาความเป็นมา (literature review) ของงานวิจัยเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM พบว่าบทความที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่จำนวนมากกว่า 95 % ทำการศึกษาโครงสร้าง MSM บนสารกึ่งตัวนำในกลุ่มสารประกอบ III-V ดังเช่น GaAs และ InGaAs เป็นต้น ในขณะที่สร้างบนซิลิคอนมีบทความ

ที่ตีพิมพ์น้อยมาก [4], [26], [30], [31] ทั้งที่เทคโนโลยีของซิลิคอนในปัจจุบันมีความก้าวหน้ามากกว่าเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบกลุ่ม III-V และราคาของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นยังมีราคาถูกกว่ามาก จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดความสนใจศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุเริ่มต้น ในการสร้างอุปกรณ์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

อย่างไรก็ตาม สำหรับเหตุผลที่สำคัญที่นักวิจัยส่วนใหญ่เลือกสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบกลุ่ม III-V คาดว่ามาจากการพัฒนาระบบการสื่อสารความเร็วสูงด้วยสายไฟเบอร์ออปติกในยุคที่สอง ซึ่งต้องใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1300-1600 nm [11] ซึ่งจะทำให้การสูญเสียสัญญาณภายในเส้นไฟเบอร์ออปติกมีค่าต่ำที่สุด แต่ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจากซิลิคอนจะไม่ตอบสนองสัญญาณแสงในช่วงความยาวคลื่นนี้

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ และทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ

Detector Type	p-i-n	APD	MSM	APD	p-i-n	APD	MSM
Semiconductor	Si	Si	Si	Ge	InGaAs	InGaAs	InGaAs
Structure	vertical	vertical	planar	vertical	vertical	vertical	planar
Useful λ Region (nm)	400-1110	400-1110	400-1110	800-1850	900-1700	900-1700	900-1700
Quantum Efficiency (%)	60-90	70-80	50-70	50-80	70 - 90	60-90	50-75
Gain	1	50-300	1	10-100	1	10-40	1
Carrier ionization ratio	-	0.01-0.1	-	0.6-0.9	-	0.20-0.5	-
Unmultiplied dark current (nA)	1	0.1	0.3-10	1-50	1 -10	0.5-5	2.5-20
Multiplied dark current (nA)	-	0.1-1	-	5-100	-	0.5-5	-
Detector Capacitance (pF)	1-5	1-5	0.2-0.7	1-5	0.2-2	0.2-2	0.01-0.4
Response Time (ns)	0.3-3	0.5-5	0.1-1	0.3-3	0.05-1	0.1-1	0.05-0.8
Cost	medium	medium	cheap	medium	expensive	expensive	medium

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาดัชนีตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำ และซิลิคอนที่ใช้เป็นผลึกเชิงเดี่ยว (single crystalline) สำหรับโลหะที่ใช้เป็นส่วนของขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างจะใช้โลหะโมลิบดีนัม เนื่องจากเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง (refractory metal) [32]-[34] ซึ่งคาดได้ว่าจะมีความยืดหยุ่นมาก เมื่อมีการใช้ความร้อน (heat treatment) กับกระบวนการสร้างถัดไป หลังจากที่ได้สร้างฟิล์มโลหะแล้ว นอกจากนี้โมลิบดีนัมยังมีเสถียรภาพในการทำงานที่อุณหภูมิสูงได้มากกว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากโลหะทองคำบนซิลิคอน [35] จึงอาจกล่าวได้ว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นเป็นชนิดโมลิบดีนัม/เงิน-ซิลิคอน/โมลิบดีนัม หรือชนิด Mo/n-Si/Mo

จุดมุ่งหมายหลักของการศึกษานี้จะเกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ที่ออกแบบให้มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า D ดังแสดงในรูปที่ 1.1 (ข) มีขนาดกว้าง¹ ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้าง MSM ที่นิยมสร้างกันโดยทั่วไปที่ต้องการให้ระยะห่าง D สั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อได้รับผลการตอบสนองของสัญญาณที่รวดเร็วและกระแสแสงของอุปกรณ์เกิดจากส่วนประกอบของโฟโตไดโอดเท่านั้น แต่ในกรณีของโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่าง D กว้าง จะได้รับกระแสแสงจากส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ กระแสแสงจากส่วนประกอบของ (1) โฟโตไดโอด และ (2) โฟโตคอนดักเตอร์ [36], [37] ทำให้โครงสร้างนี้มีจุดเด่นที่สามารถควบคุมกระแสแสงได้ 2 ลักษณะจาก (1) การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ซึ่งเหมือนกับตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตไดโอดทั่วไป และ (2) การเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอิเล็กทรอนิกส์ไอริสได้ ซึ่งในกรณีนี้ยังไม่เคยมีการรายงานการศึกษาเรื่องนี้มาก่อนเลย จากนั้นได้อธิบายถึงกลไกการเกิดและการทำงานของพาหะในโครงสร้างของ Mo/n-Si/Mo ซึ่งอาจกล่าวได้อย่างง่ายว่าเป็นการศึกษาเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo

สรุปโดยรวมแล้วในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาไว้ดังนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาดัชนีตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM โดยเลือกใช้สารกึ่งตัวนำราคาถูก หาได้ง่าย เครื่องมือที่ใช้สร้างไม่ซับซ้อน ไม่มีอันตรายในกระบวนการผลิต และใช้เทคโนโลยีของซิลิคอน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ในโอกาสต่อไป และมีกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างมอสทรานซิสเตอร์
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างที่ง่าย ซึ่งทำให้ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo มีราคาถูก

¹ หมายถึง โครงสร้าง MSM ที่ได้รับแรงดันไบแอสมากพอ แต่ส่วนระยะห่าง D ยังคงประกอบด้วยบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล [หรือบริเวณที่ไม่ใช่ปลอดพาหะ (undepletion region)]

3. เพื่อศึกษาหาลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่าง D กว้าง ซึ่งสามารถตอบสนองสัญญาณแสงในลักษณะของสัญญาณกระแสตรง (dc optical signal) และสัญญาณกระแสสลับ (ac optical signal) ที่ความถี่ต่ำ
4. เพื่อสร้างแบบจำลองอย่างง่าย สำหรับอธิบายถึงกลไกการเกิดกระแสแสงและการตอบสนองสัญญาณแสงแบบ dc และ ac ที่ความถี่ต่ำ
5. เพื่อศึกษาการควบคุมปริมาณของกระแสแสง จากลดความยาวทางเรขาคณิต และการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอส

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo น่าจะทำงานเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณทางแสงที่ดี และมีลักษณะเฉพาะทางกระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้า-แรงดันในลักษณะที่มีความสมมาตรกัน เป็นไปตามลักษณะของโครงสร้าง MSM ทั่วๆ ไป ซึ่งประกอบด้วย 2 ข้อตักแบริเออร์ที่เชื่อมต่อบนหลังชนกัน (back to back Schottky barriers) ความสูงของกำแพงศักย์ (barrier height : ϕ_{bn}) ที่เกิดจากผลต่างของฟังก์ชันงาน (work function) ของโมลิบดีนัมกับซิลิคอนชนิดเอ็นมีค่าเหมาะสมจึงทำให้กระแสรั่วไหล (leakage current) หรือที่เรียกว่า กระแสมืด (dark current) มีค่าต่ำ จากนั้นทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้าง เพื่อศึกษาถึงกลไกการไหลของกระแสแสง (photocurrent) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ หลังจากให้แสงตกกระทบบนผิวหน้าอุปกรณ์ ซึ่งผลจากการศึกษานี้จะแตกต่างจากการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ของนักวิจัยอื่นๆ พบว่าในกรณีของนักวิจัยอื่นๆ กระแสแสงเกิดจากพาหะอิสระของอิเล็กตรอน (electron) และโฮล (hole) เนื่องจากการออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นมาก โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า $3 \mu\text{m}$ [3], [19], [38] และถ้าให้แรงดันไบแอสแก่อุปกรณ์ จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) อย่างสมบูรณ์คลุมบริเวณของระยะห่าง D ทั้งหมด จึงทำให้อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างรวดเร็วจากผลของสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ

แต่ในกรณีของเรา ตัวตรวจวัดแสงจะมีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง เมื่อให้แรงดันไบแอสแก่อุปกรณ์จะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งยังคงมีบริเวณนิวทรัล (neutral region) เหลืออยู่ด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.3 ของบทที่ 5 และถ้าให้แสงตกกระทบบนตัวอุปกรณ์ พบว่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากพาหะอิสระโฮลมากกว่าอิเล็กตรอน จากสมมติฐานของการศึกษานี้ ทำให้เราสามารถสร้างแบบจำลองอย่างง่ายขึ้น เพื่ออธิบายการเกิดกระแสแสงจากตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้างได้อย่างถูกต้อง และสามารถนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้ไปประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมได้ในโอกาสต่อไป

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

จากข้อความที่กล่าวไว้ในหัวข้อสมมติฐานของการศึกษา ซึ่งโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง ภายหลังจากให้ไบแอสแล้ว ในส่วนระยะห่าง D จะปรากฏบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นหลังจากให้แสงตกกระทบที่ผิวหน้าของตัวอุปกรณ์แล้ว จะเกิดส่วนประกอบของกระแสแสง 2 ชนิด คือ ส่วนประกอบของกระแสแสงส่วนแรกเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเกิดกระแสแสงของตัวตรวจจับแสงแบบโฟโตไดโอดทั่วไป และมีสนามไฟฟ้าเป็นส่วนช่วยในการเคลื่อนที่ของพาหะแสง (photocarriers) ดังนั้นจึงเรียกระแสแสงในส่วนแรกนี้ว่า กระแสแสงโฟโตไดโอด และสำหรับส่วนประกอบของกระแสแสงในส่วนที่สองเกิดขึ้นที่บริเวณนิวทรัล ซึ่งอยู่นอกสนามไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่คล้ายกับกระแสแสงของตัวตรวจจับแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์ เกิดขึ้นในระยะที่ไม่ไกลจากขอบของบริเวณปลอดพาหะมากนัก และควรอยู่ภายในระยะการแพร่ (diffusion length) ของประจุพาหะโฮล ส่วนประจุพาหะโฮลที่เกิดขึ้นนอกระยะการแพร่จะเกิดการรวมตัวจนหมด และไม่มีผลต่อกระแสแสงรวม ดังนั้นส่วนประกอบกระแสแสงที่เกิดขึ้นที่บริเวณนิวทรัลและอยู่ภายในระยะการแพร่นี้ จึงถูกเรียกว่า กระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์

ดังนั้นกระแสแสงรวม (I_p) ของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo ซึ่งมีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้างจะประกอบด้วยกระแสแสงสองส่วน คือ กระแสแสงโฟโตไดโอด (I_d) กับกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ (I_c) เป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (1.1) คือ

$$I_p = I_d + I_c \quad (1.1)$$

ความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดส่วนประกอบกระแสแสงทั้งสองมีความสำคัญอย่างยิ่ง จะทำให้สามารถควบคุมปริมาณกระแสแสง ซึ่งเป็นตัวคุณสมบัติที่สำคัญของตัวตรวจจับแสง และนำไปสู่การอธิบายถึงผลการตอบสนองสัญญาณแสงของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังนั้นขอบเขตของงานวิจัยจึงเริ่มต้นจากการศึกษาโครงสร้าง MSM ทั่วไปจากบทความต่างๆ แล้วกำหนดให้โลหะโมลิบดีนัมเป็นส่วนหนึ่งของขั้วไฟฟ้า จากนั้นทำการสร้างต้นแบบขนาดของขั้วไฟฟ้าแต่ละข้างมีขนาด $3 \times 3 \text{ mm}^2$ และระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20-2000 μm ต้นแบบมีลักษณะเป็นแบบช่องเดี่ยวและอินเตอร์ดิจิต (interdigitated) หลังจากได้ต้นแบบแล้วจึงนำไปสร้างเป็นตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo และเมื่อได้ตัวอุปกรณ์แล้วจึงนำมาทดสอบคุณสมบัติ

ทางแสงในลักษณะของสัญญาณแสงแบบ dc และ ac สำหรับสัญญาณทางแสงแบบ dc เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน และ/หรือ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm ส่วนสัญญาณแสงแบบ ac จะเลือกแหล่งกำเนิดแสง He-Ne เลเซอร์และมอดูเลตสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ในช่วง 100 Hz-1 MHz เข้ากับ He-Ne เลเซอร์ โดยใช้เครื่องอคูสติกออปติกมอดูเลเตอร์ (Acousto Optic Modulator : AOM) แล้วหาความสัมพันธ์ของส่วนประกอบกระแสไฟโตไดโอดและกระแสไฟโตคอนดัคเตอร์ ซึ่งขึ้นกับค่าความถี่ ขึ้นกับค่าความต้านทานโหลดภายนอก (load resistance : R_L) และขึ้นกับค่าแรงดันไบแอส จากนั้นพยายามอธิบายถึงความหมายทางกายภาพของผลการทดลองในรูปกลไกการเกิดกระแสแสง และชนิดของพาหะ แล้วนำไปหาแบบจำลองอย่างง่าย เพื่อยืนยันความถูกต้องของแนวความคิดที่เสนอไว้ตั้งแต่แรก นอกจากนี้ยังออกแบบให้อุปกรณ์มีความไวต่อแสงที่ตกกระทบมากขึ้น โดยใช้วัสดุหลายแบบอินเตอร์ดิคิเทท ทำให้ได้รับกระแสแสงเพิ่มขึ้น จึงมีความเหมาะสมกับการนำไปตรวจวัดแสงที่มีความเข้มน้อยๆ ได้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัยของโครงสร้าง MSM ที่ผ่านมาพอประมาณ โดยเริ่มต้นราวปี ค.ศ. 1970 จนถึงปัจจุบัน จากนั้นได้กล่าวถึงความสำคัญของงานวิจัยโครงสร้าง MSM รวมทั้งแสดงภาพโครงสร้าง MSM เพื่อเป็นการกล่าวนำให้ผู้อ่านได้ทราบถึงลักษณะพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แล้วกล่าวถึงมูลเหตุที่ทำให้เกิดความสนใจศึกษาโครงสร้าง MSM โดยเสนอเป็นตารางเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ ในหัวข้อถัดมากล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการศึกษาและการเลือกศึกษาโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo จากนั้นกล่าวถึงสมมติฐานของการศึกษาแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย และในตอนท้ายของบทได้กล่าวถึงขอบเขตของการวิจัย รวมถึงรายละเอียดของเนื้อหาเพื่อให้อ่านได้ทราบถึงขอบเขตของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดทางแสงและตัวตรวจวัดแสง ภายในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานของตัวตรวจวัดแสง กระบวนการทางแสง ดังเช่น กลไกการดูดกลืนแสง และการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล การรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล และปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น จากนั้นกล่าวถึง คุณสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสง และในหัวข้อสุดท้ายกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ พอสังเขป

บทที่ 3 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยเริ่มต้นจะอธิบายเกี่ยวกับรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิด n ซึ่งสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในลักษณะของซีดกั๊แบริเออร์ จาก

นั้นอธิบายถึงโครงสร้าง แถบพลังงาน การให้ไบแอส ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน และลักษณะเฉพาะ ความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในหัวข้อถัดมากล่าวถึงทฤษฎีโครงสร้าง MSM เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างของซอติกั๊เบริเออร์ 2 ตัวต่อกันแบบหันหลังชนกัน จากนั้นกล่าวถึง โครงสร้าง MSM ทั่วไปที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าสั้นๆ แล้วอธิบายถึงที่สัมพันธ์ทางแสงกับโครงสร้าง MSM และ ในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึง แบบจำลองที่ใช้อธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

บทที่ 4 เป็นบทที่กล่าวถึงการเตรียมชิ้นงาน โดยกล่าวถึงลวดลายต้นแบบ กระบวนการสร้าง และ บล็อกไดอะแกรมของการทดสอบทางไฟฟ้า ส่วนการทดสอบทางแสงจะแสดงในลักษณะของสัญญาณ แสงแบบ dc และ ac

บทที่ 5 เป็นผลการทดลอง ในช่วงต้นจะเป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางพื้นฐาน ผลของความจุไฟฟ้า ภายในโครงสร้างกับแรงดัน จากนั้นจึงเสนอผลการทดลองทางแสงเพื่อหาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันใน ลักษณะสัญญาณแบบ dc ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ในการ ตรวจวัดแสงที่ความเข้มต่างๆ ได้ดี การทดลองในหัวข้อถัดมาแสดงถึงกระแสแสงที่ได้จากการตอบสนอง สัญญาณแบบ ac ที่ความถี่ต่ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโหนดความต้านทานภายนอก และหัวข้อสุดท้าย กล่าวถึงผลการทดลองของอุปกรณ์ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิคิต ทำให้อุปกรณ์ได้รับกระแสแสงเพิ่มขึ้น

บทที่ 6 เป็นการวิเคราะห์และอภิปราย ซึ่งเป็นส่วนต่อเนื่องจากผลการทดลอง โดยได้ทำการวิเคราะห์ หาแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้อธิบายกับผลการทดลอง ซึ่งให้ผลการยอมรับที่ดีระหว่างการจำลองแบบกับ ผลการทดลอง จากนั้นกล่าวถึงการวิเคราะห์ของกระแสแสงกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสที่ป้อนให้แก่ อุปกรณ์ และหัวข้อสุดท้ายได้กล่าวถึงการวิเคราะห์อุปกรณ์ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิคิต

บทที่ 7 เป็นบทสรุป และข้อเสนอแนะของงานที่ทำทั้งหมด ซึ่งผลที่ได้จากการสรุป และข้อเสนอแนะ ทั้งหลายเหล่านี้จะเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาและการพัฒนาโครงสร้าง MSM ในโอกาสต่อไป

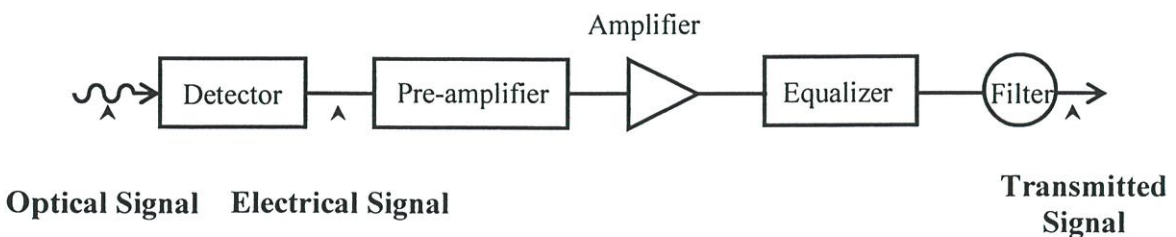
บทที่ 2 การตรวจวัดทางแสงและตัวตรวจวัดแสง

วัตถุประสงค์ของบทนี้ เพื่อแนะนำพื้นฐานของการตรวจวัดทางแสงและหลักการการทำงานของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ดังเช่น โฟโตคอนดักเตอร์ โฟโตไดโอดประเภทรอยต่อ และประเภทโลหะ-สารกึ่งตัวนำ เป็นต้น ดังนั้นเนื้อหาของบทนี้จึงกล่าวถึงทฤษฎีทางแสงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตรวจวัดทางแสง จากนั้นกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญของการตรวจวัดทางแสง และในตอนท้ายของบทจะอธิบายถึงตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ เหล่านี้

2.1 บทนำ

ในรูปที่ 2.1 เป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแสงแบบเชิงเลข (digital optical receiver) แสดงให้เห็นส่วนของตัวตรวจวัดแสงที่อยู่หน้าสุดของเครื่องรับ จะเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าจะถูกขยายให้ใหญ่ขึ้น และสามารถเลือกสัญญาณในช่วงที่ต้องการจากส่วนของอิกวอลไลเซอร์ และฟิลเตอร์ แล้วจึงนำสัญญาณไปประยุกต์ใช้งานต่อไป จากรูปที่ 2.1 นี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นหัวใจของเครื่องรับสัญญาณแสง

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสง แล้วเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปกติจะแสดงออกมาในรูปของกระแสแสง โดยทั่วไปกระบวนการตรวจวัดทางแสงจะมีอยู่ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนของการดูดกลืนพลังงานแสงหรือโฟตอนจากแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pairs) ขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดูดกลืนแสง ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจเกิดกลไกการเพิ่มจำนวนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากขึ้น (gain) หรือไม่มีการเพิ่มขึ้นของคู่อิเล็กตรอน-โฮลก็ได้ ในขั้นตอนที่ 3 คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมที่ขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ และเกิดเป็นกระแสไหลไปยังวงจรภายนอก ในบางครั้งกระบวนการตรวจวัดทางแสงสามารถเพิ่มเติมส่วนของการแยกสัญญาณ (demodulation) เมื่อสัญญาณความถี่สูงทางแสงถูกเปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา



รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแสงแบบเชิงเลข

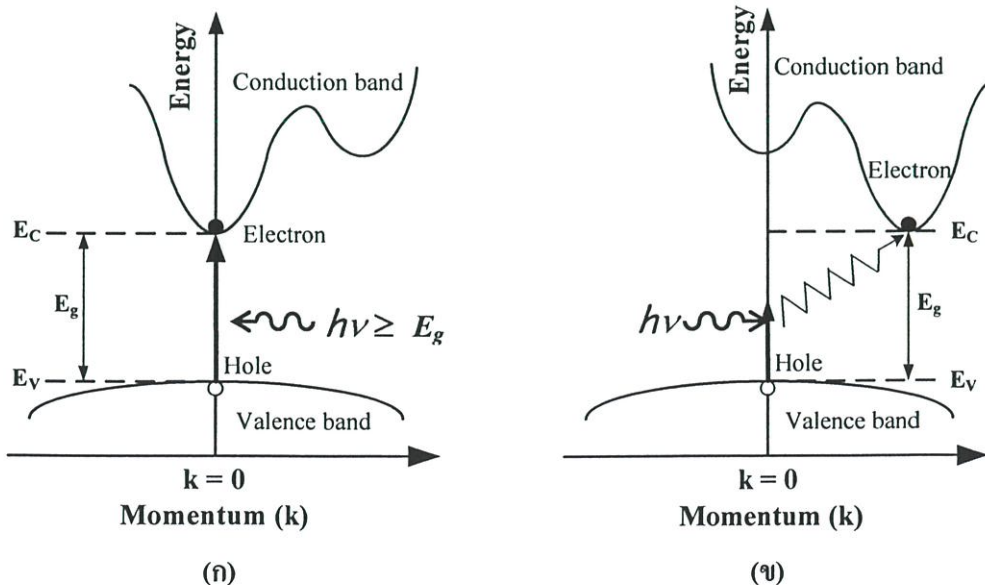
2.2 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

การเกิดอันตรกิริยาของแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญของตัวตรวจวัดแสง ดังนั้นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำจะนำไปสู่ความเข้าใจในการทำงานของอุปกรณ์ทางแสง รวมถึงความเหมาะสมในการเลือกชนิดของวัสดุสารกึ่งตัวนำ และเพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดของอุปกรณ์ทางแสงเหล่านี้ การแนะนำคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกล่าวถึงเป็นลำดับแรก

2.2.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง [12], [39]

กระบวนการทางแสงของสารกึ่งตัวนำจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดกลืนแสง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าเป็นการดูดกลืนแสงพื้นฐาน และเรียกตำแหน่งที่มีการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงนี้ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (absorption edge) การดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ในบางครั้งจำเป็นต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานในลักษณะของฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number : k) ของอิเล็กตรอน ซึ่งก็คือโมเมนตัม เพราะว่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$ และเมื่อเขียนลักษณะแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ k แถบพลังงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งของ $k = 0$ พอดี สารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะของแถบพลังงานเช่นนี้ จะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) เช่น GaAs, InP และ InGaAs เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แผนภาพของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่แสดงในรูปของฟังก์ชันเลขคลื่น (k)

(ก) กรณีช่องแถบตรง (ข) กรณีช่องแถบไม่ตรง

ส่วนกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบเวเลนซ์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ดังในรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะของแถบพลังงานเช่นนี้ จะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor) ดังเช่น Si, Ge และ GaP เป็นต้น

ในการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นจะต้องสอดคล้องกับกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของพลังงานอิเล็กตรอน แต่ค่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอนจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ค่า k จะต้องไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกันจึงเป็นการรักษาค่าของโมเมนตัมโดยปริยาย แต่การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง ซึ่งมีจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกันกับจุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์ จึงไม่มีสถานะพลังงานใดๆ ที่จะรองรับอิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง ดังนั้นอิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม โดยการมีอันตรกิริยากับโครงร่างผลึก ทำให้มีการรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมกับโครงร่างผลึกที่กำลังสั่นอยู่นั่นเอง ในปรากฏการณ์นี้ค่าโมเมนตัมของระบบจะยังคงถูกรักษาให้คงที่ไว้ จึงทำให้การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงเกิดขึ้นได้ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงจึงมีคุณสมบัติทางแสงไม่ค่อยดี เช่น การเปล่งแสงไม่ดี หรือดูดกลืนแสงได้น้อย จึงไม่เหมาะสมที่จะนำสารกึ่งตัวนำชนิดนี้มาผลิตเป็นไดโอดเปล่งแสงหรือเลเซอร์ไดโอด แต่ในกรณีของตัวตรวจจับแสงหรือเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้กันมาก เพราะว่ามีราคาถูกและวัสดุมีจำนวนมาก โดยเฉพาะกับซิลิคอน

2.2.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

2.2.2.1 กลไกการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การทำงานของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกชนิดอยู่บนพื้นฐานของการเกิดขึ้น หรือหายไปของคู่อิเล็กตรอน-โฮล กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอนจะนำไปสู่กระบวนการให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์แล้ว ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์กระโดดไปสู่อิเล็กตรอนที่แถบนำไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันจะทิ้งโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์ วิธีการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ง่ายที่สุด คือ การแผ่รังสีให้แก่สารกึ่งตัวนำ ดังเช่น แสงหรือโฟตอนที่มีพลังงานมากพอ เมื่อตกกระทบสารกึ่งตัวนำแล้วจะถูกดูดกลืนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ จากนั้นถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนจนสามารถกระโดดไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงถูกเรียกว่า กระบวนการดูดกลืนแสง (absorption process) ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าเกิดการสูญเสียพลังงานไป แล้วตกกลับมาที่แถบเวเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอน-โฮลหายไป เรียกกระบวนการเช่นนี้ว่า กระบวนการรวมตัวใหม่ (recombination process)

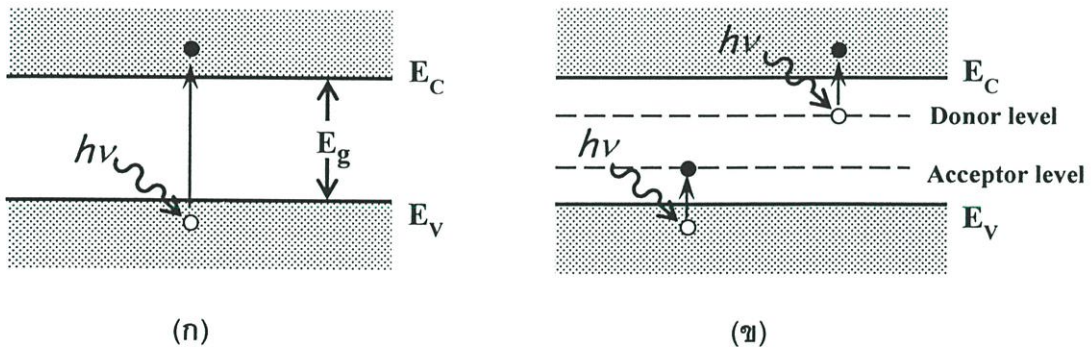
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำมีอยู่หลายชนิด ซึ่งในที่นี้จะขอล่าวเพียง 2 ชนิดหลักๆ [9] ที่พบเห็นกันโดยทั่วไป คือ (1) การดูดกลืนแบบอินทรินซิกจากแถบถึงแถบ (intrinsic band to band absorption) และ (2) การดูดกลืนแบบแถบและระดับสารเจือ (band and impurity absorption) ดังมีรายละเอียดดังนี้

(1) การดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิกจากแถบถึงแถบ ที่แสดงในรูปที่ 2.3 (ก) เกิดขึ้นเมื่อพลังงานแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ และแสงนี้สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์กระโดดไปยังแถบนำไฟฟ้า การดูดกลืนแสงแบบนี้จะพบเห็นกันมากในตัวตรวจวัดแสงเกือบทุกชนิด เนื่องจากพลังงานของโฟตอน $E = h\nu$ (ν คือ ความถี่ของแสง) ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งสามารถหาได้ในเทอมของ $h\nu \geq E_g$ หรือ $hc/\lambda \geq E_g$ และถ้าจัดให้อยู่ในรูปของความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{\max}) ที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะได้เป็น

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_g} \quad (2.1)$$

โดยที่ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (J.s)

c คือ ความเร็วแสง (m/s)



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดพาหะจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

(ก) การดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิกจากแถบถึงแถบ

(ข) การดูดกลืนแสงแบบแถบและระดับสารเจือ

ในกรณีของซิลิคอนแสงจะต้องมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นจากสมการที่ (2.1) ความยาวคลื่นของแสงจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1110 nm ดังในตารางที่ 2.1 และที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ (long wavelength cutoff : λ_{\max})

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

วัสดุ	ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)	ความยาวคลื่นคัทออฟ (nm)	ความยาวคลื่นที่ใช้โดยทั่วไป (nm)
Si	1.12	1110	500 - 900
Ge	0.67	1850	900 - 1300
GaAs	1.43	870	750 - 850

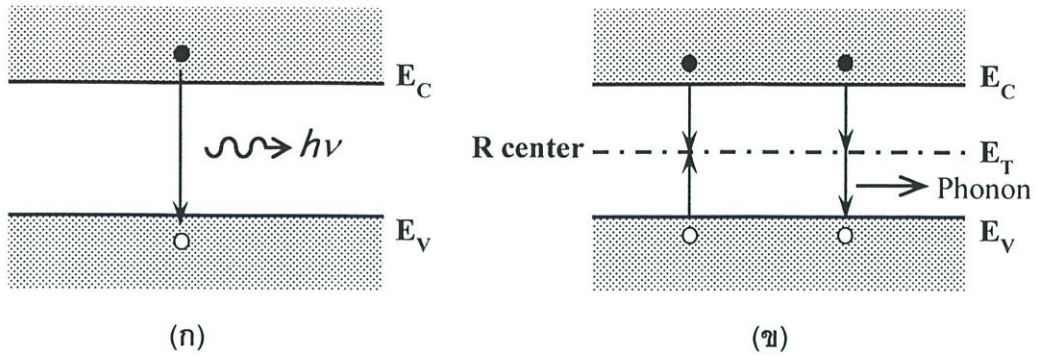
(2) การดูดกลืนแสงแบบแถบและระดับสารเจือ เกิดเนื่องจากมีระดับพลังงานอะตอมสารเจือเกิดขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานอาจเกิดจากความบกพร่องของผลึก ที่เรียกว่า ระดับโลคอลลൈส์สเตต (localized state level) หรือตั้งใจแพร่สารเจือเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) จึงทำให้แสงที่ตกกระทบที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน แต่สามารถทำให้เกิดพาหะขึ้นได้ โดยพาหะที่เกิดขึ้นอาจเป็นอิเล็กตรอนจากชั้นระดับสารเจือผู้ให้ (donor level) ไปยังแถบนำไฟฟ้า หรือเกิดอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังชั้นระดับสารเจือผู้รับ (acceptor level)

2.2.2.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

เมื่อให้แสงตกกระทบที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ จะมีพาหะอิสระหรือคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการดูดกลืนแสง ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ในเวลาเดียวกันกับที่เกิดพาหะอิสระขึ้นนั้นก็มีปรากฏการณ์การรวมตัวใหม่ (Recombination) [39] ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดขึ้นด้วย กล่าวคือ จะมีอิเล็กตรอนบางส่วนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลที่แถบเวเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลมีจำนวนลดลง พลังงานของอิเล็กตรอนที่ลดลงหรือหายไป คือ พลังงานที่สูญเสียไป เนื่องจากการชนกับโครงร่างผลึก แต่ก็ยังเกิดพาหะส่วนเกิน (excess carriers : Δn และ Δp) ขึ้นด้วย และดำเนินาแหล่งจ่ายแสงออกไป พาหะส่วนเกินจะรวมตัวกันจนหมดคงเหลือเฉพาะความเข้มข้นพาหะที่สภาวะสมดุลของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเป็น n_0 และ p_0 [10] ตามลำดับ

ในหัวข้อนี้จะแนะนำกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนเกินเพียง 2 กระบวนการหลัก คือ (1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) หรือแบบแถบถึงแถบ (band to band recombination process) และ (2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) หรือแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination process) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง คือ กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง ซึ่งทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอนได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบเวเลนซ์โดยตรง



รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ

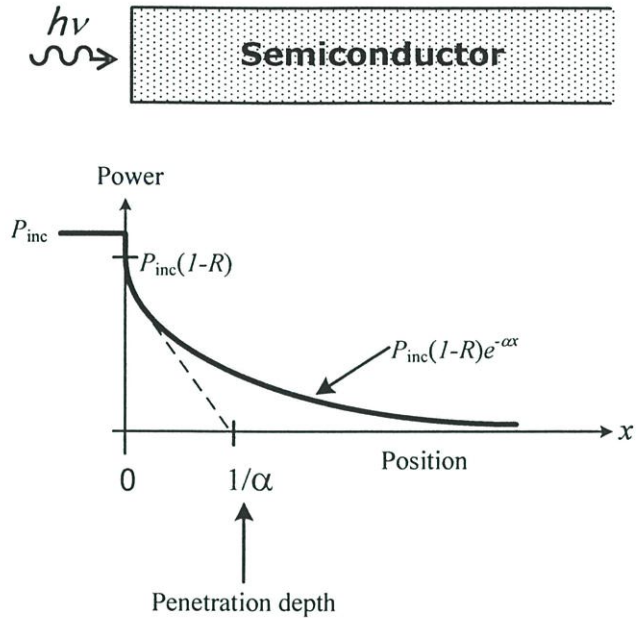
(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม คือ กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับลงมายังระดับพลังงานหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างแถบ พลังงานก่อนที่จะตกลงมายังแถบเวเลนซ์ในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดจากความเสียหายของโครงสร้างผลึก จึงเรียกการรวมตัวใหม่แบบนี้เป็น ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ ซึ่งในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้จะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาและมีผลทำให้เกิดการสั่นตัวของโครงร่างผลึกขึ้น และการสั่นตัวนี้จะปลดปล่อยพลังงานที่เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

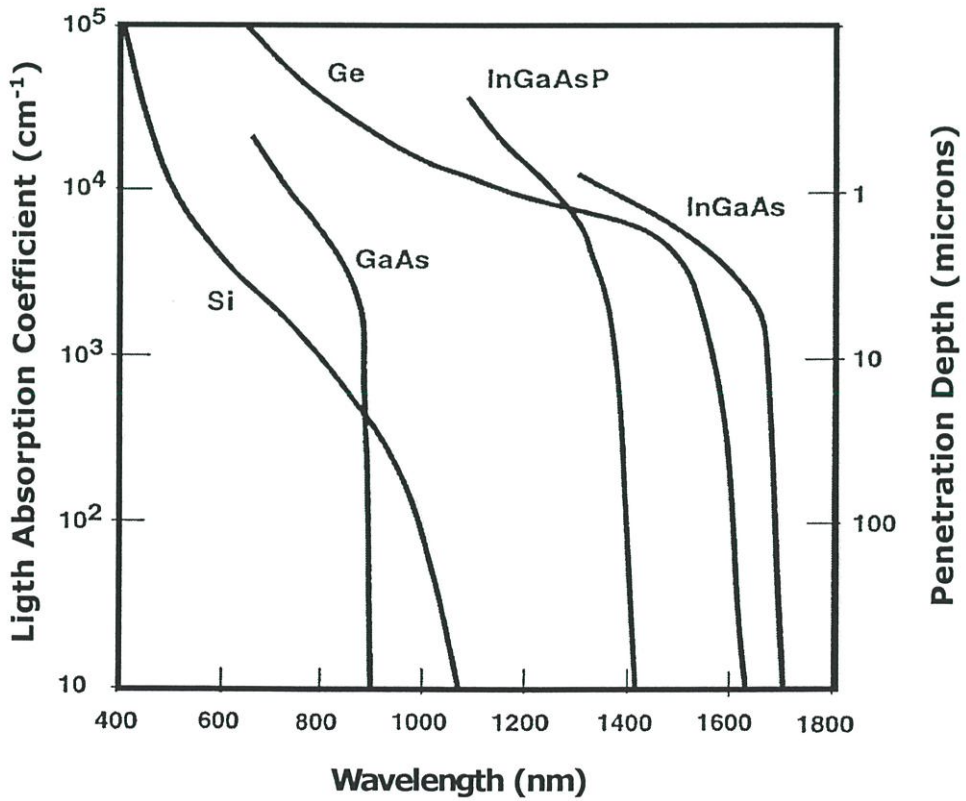
โดยทั่วไปแล้วสถานะพลังงานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ (Recombination center : R-center) มักจะปรากฏอยู่ที่ระดับใกล้เคียงกับบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน ทั้งนี้เนื่องจากโอกาสของการรวมตัวใหม่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานพอดี ซึ่งจะเห็นว่าการแตกต่างจากระดับสารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับ โดยในทางปฏิบัติจะมีการเติมอะตอมของธาตุบางชนิดลงไปในสารกึ่งตัวนำ

2.2.2.3 ปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงจากผิวหน้าเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ถ้าพลังงานแสงตกกระทบมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดพาหะขึ้น และพลังงานแสงนี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องกับโครงร่างผลึกของสารกึ่งตัวนำในลักษณะของสนามแสง (optical field) ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสนามนี้จะลดลงในลักษณะของเอกโปเนนเชียลในรูปของพลังงานที่ถูกส่งผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการดูดกลืนของแสงที่ถูกส่งผ่านในเนื้อสารกึ่งตัวนำจะมีค่าลดลงกับระยะทาง ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.2) [11] คือ



รูปที่ 2.5 การดูดกลืนแสงภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง

$$P_{\text{abs}}(x) = P_{\text{inc}}(1-R)(1-e^{-\alpha x}) \quad (2.2)$$

โดยที่ $P_{\text{abs}}(x)$ คือ กำลังการดูดกลืนของแสงที่ขึ้นกับระยะทาง (x) ของสารกึ่งตัวนำ (W)

P_{inc} คือ กำลังของแสงตกกระทบ (W)

R คือ สภาพการสะท้อนแสงของสารกึ่งตัวนำ (reflectivity of semiconductor)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (light absorption coefficient) (cm^{-1})

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของซิลิคอน เยอรมันเนียม และสารประกอบกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InGaAs เป็นต้น แสดงดังในรูปที่ 2.6 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ในการพิจารณาเลือกวัสดุสารกึ่งตัวนำของตัวตรวจวัดแสง

2.3 คุณสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสง

เนื่องจากการนำเอาตัวตรวจวัดแสงหลายชนิดมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งตัวตรวจวัดแสงแต่ละแบบจะมีขีดความสามารถที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับโครงสร้างและวัสดุที่นำมาใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาถึงคุณสมบัติหลักๆ ทั่วไปของตัวตรวจวัดแสง เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เปรียบเทียบหรือตัดสินใจนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างเหมาะสม คุณสมบัติหลักเหล่านี้ คือ

2.3.1 ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency : η) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างจำนวนของพาหะอิสระที่เกิดขึ้น (คู่อิเล็กตรอน-โฮล) และทำให้เกิดเป็นกระแสแสง¹ (I_p) กับจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ [10], [11], [40] นั่นคือ

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{\text{inc}} / h\nu} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{\text{inc}}} \quad (2.3)$$

โดยที่ P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)

ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ สำหรับสมการที่ (2.3) ได้ถูกนิยามว่าเป็นประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency : η_{ext}) ซึ่งประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ และความหนาของส่วนดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูป

¹ กระแสแสง หมายถึง กระแสรวมที่วัดจากตัวตรวจวัดแสงลบด้วยกระแสมืด ($I_p = I - I_{\text{dark}}$)

ที่ 2.6 และเป็นไปตามสมการที่ (2.4) คือ

$$\eta_{\text{ext}} = (1 - R)(1 - e^{-\alpha x}) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) แสดงให้เห็นว่า ถ้าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกมีค่าสูง การเกิดพาหะแสงจะมาก ซึ่งทำให้ตัวตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 0.7-0.8 (หรือ $\approx 70-80\%$) เพราะว่าแสงส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนออกไป ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency : η_{int}) คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนพาหะที่เกิดขึ้นกับจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนภายในสารกึ่งตัวนำ โดยปกติจะมีค่าสูงมากจนอาจใกล้เคียงหนึ่ง

2.3.2 สภาพการตอบสนอง

สภาพการตอบสนอง (responsivity ; \mathfrak{R}) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงที่เกิดขึ้นกับกำลังของแสงที่ตกกระทบ [9], [10] นั่นคือ

$$\mathfrak{R} = \frac{I_p}{P_{\text{inc}}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta\lambda}{hc} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจวัดแสง

2.3.3 ความเร็วในการตอบสนอง

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

ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นกับแพ็คเกจของ

- (1) เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ
- (2) เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ
- (3) ค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกับค่าไหลลดความต้านทานภายนอก

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูงๆ จะต้องพิจารณาถึงแพ็คเกจทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มีพื้นที่ขนาดเล็กๆ เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น

2.3.4 สัญญาณรบกวนแบบช็อต

ตัวตรวจวัดแสงจะมีความสามารถในการวัดแสงที่มีความเข้มต่ำมากๆ หรือมีความไว (sensitivity) สูงเพียงไรจะขึ้นกับขนาดของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น และสัญญาณรบกวนแบบช็อต (shot noise) [9], [11], [41] ก็เป็นสัญญาณรบกวนชนิดหนึ่งที่มีผลอย่างมากกับตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสมืดและกระแสแสง ในกรณีของโฟโตไดโอดที่ไม่มีอัตรายายภายใน ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสของสัญญาณรบกวนแบบช็อตนี้ จะเป็นไปตามสมการที่ (2.6) คือ

$$\langle i_n^2 \rangle = 2q\bar{I}B = 2q(I_p + I_{\text{dark}})B \quad (2.6)$$

โดยที่ \bar{I} คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสเอาท์พุท (A)
 I_p คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสแสง (A)
 I_{dark} คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสมืด (A)
 B คือ แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง (Hz)

ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงที่ดีควรมีสัญญาณรบกวนแบบช็อตให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นั่นคือ ควรจะสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีกระแสมืดต่ำๆ

2.4 ชนิดของตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำที่ใช้งานกันมากในปัจจุบันมีอยู่ 2 กลุ่ม คือ โฟโตคอนดักเตอร์ และโฟโตไดโอด ในกรณีของโฟโตไดโอดยังสามารถแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างได้หลายชนิด เช่น p-n โฟโตไดโอด p-i-n โฟโตไดโอด อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด และโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด เป็นต้น

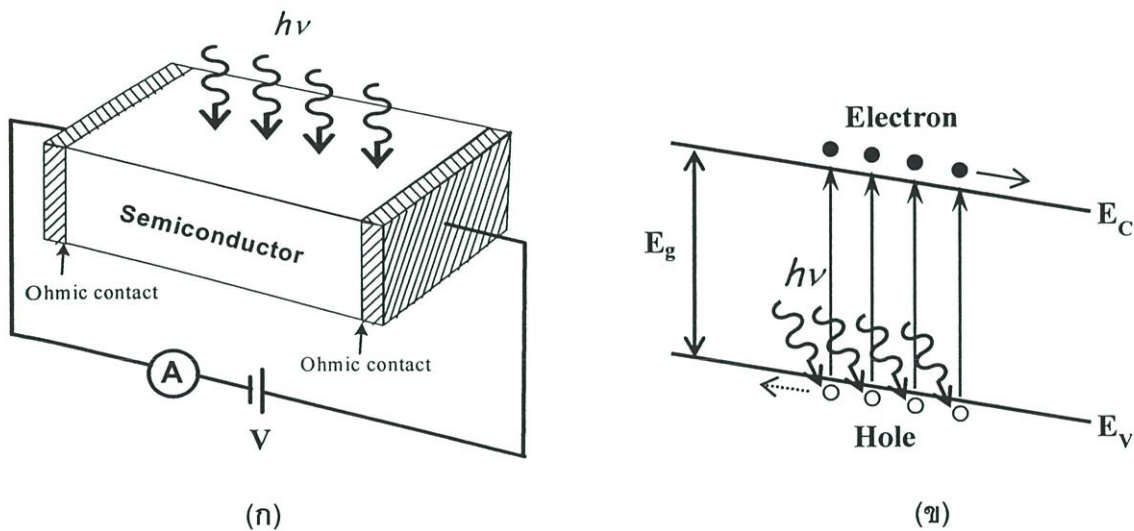
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ พอสังเขป เพื่อให้เข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้

2.4.1 โฟโตคอนดักเตอร์

โฟโตคอนดักเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดแสงที่ง่ายที่สุดเพราะว่าเพียงใช้สารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียว เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่โฟโตคอนดักเตอร์จะทำให้ค่าความต้านทานมีค่าลดลง ดังนั้นในการใช้งานจะป้อนแรงดันไบแอสให้แก่โฟโตคอนดักเตอร์ แล้วทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ขณะที่ได้รับแสง

โฟโตคอนดักเตอร์มีการศึกษา และนำมาประยุกต์ใช้งานมากกว่า 100 ปี โดยเริ่มต้นสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่สร้างขึ้นจากสารซีลีเนียม (selenium) ที่ขึ้นกับความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนตัวต้านทาน โดยทั่วไปโฟโตคอนดักเตอร์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว โดยที่

รอยสัมผัสของขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะแสดงคุณสมบัติแบบโอห์มิก ในรูปที่ 2.7 (ก) แสดงหลักการทำงานของโฟโตคอนดักเตอร์ในขณะที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านขั้วโอห์มิกทั้ง 2 ขั้ว และเมื่อฉายแสงแก่โฟโตคอนดักเตอร์ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์จะได้รับพลังงานจากแสงและถูกกระตุ้นให้กระโดดขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข)



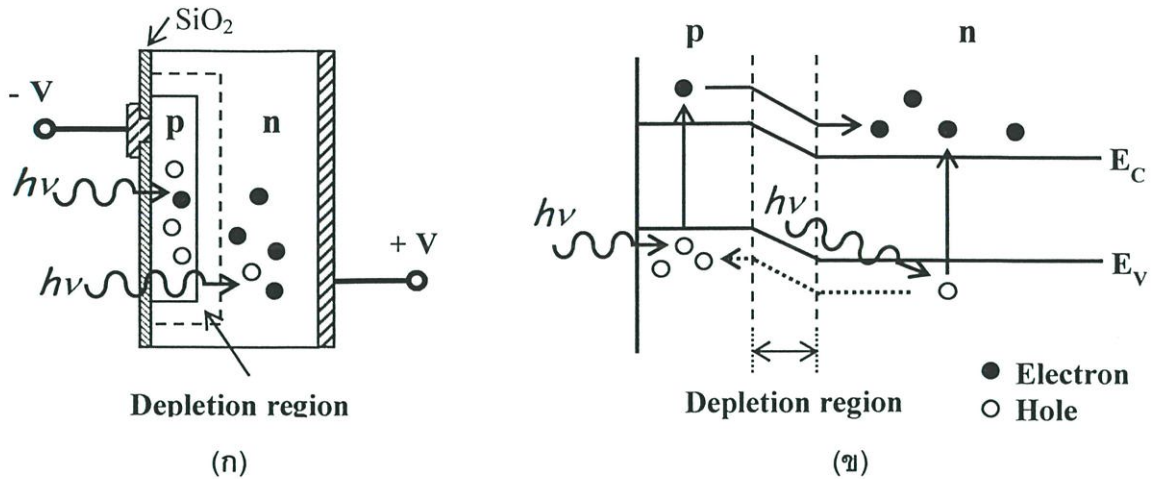
รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตคอนดักเตอร์ และการให้แรงดันไบแอส
 (ข) กลไกการเกิดพาหะในโฟโตคอนดักเตอร์ เมื่อได้รับการฉายแสง

คุณสมบัติเด่นของตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์มีโครงสร้างที่สร้างได้ง่ายและทำให้มีราคาถูก แต่ข้อเสียเปรียบของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ คือ การตอบสนองเวลาที่ล่าช้า ซึ่งโดยทั่วไปใช้เวลาในในระดับ ms ถึง μs ทั้งนี้เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของสภาพการนำไฟฟ้าถูกกำหนดด้วยผลคูณของสภาพคล่องและเวลาอายุของพาหะนั้นคือ $\mu\tau$

2.4.2 โฟโตไดโอด

2.4.2.1 p-n และ p-i-n โฟโตไดโอด

โครงสร้างโฟโตไดโอดอย่างง่ายที่สุดแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) เป็นภาพภาคตัดขวางของ p-n โฟโตไดโอดที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิด n เกิดเป็นรอยต่อ p-n และที่รอยต่อ p-n นี้จะทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิกที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ p-n จะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ในการสร้างโฟโตไดโอดจะต้องมีการควบคุมปริมาณของสารเจือ และความหนาของชั้น p และชั้น n ให้เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้โฟโตไดโอดมีความไวต่อแสงในช่วงที่ต้องการได้ รวมถึงความสามารถในการทำงานที่ความถี่สูงด้วย



รูปที่ 2.8 (ก) ภาคตัดขวางโครงสร้างพื้นฐานของ p-n โฟโตไดโอด

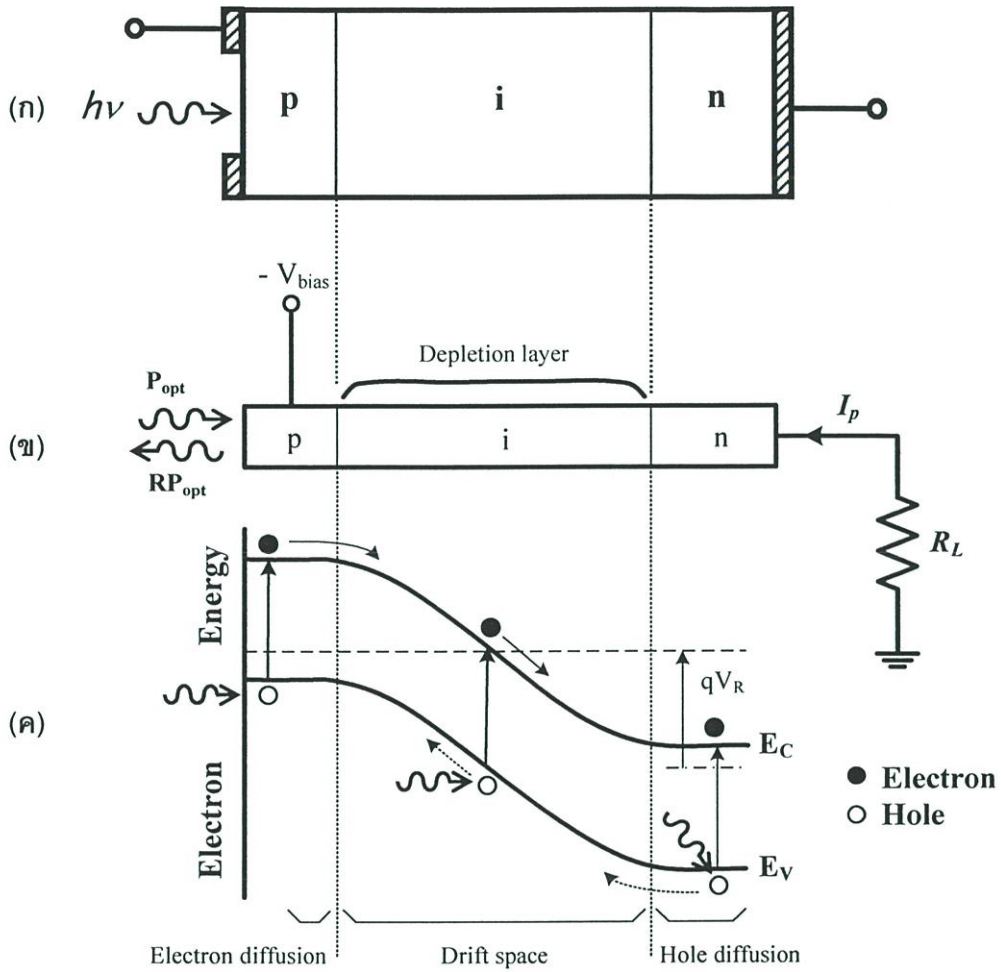
(ข) การเกิดพาหะของ p-n โฟโตไดโอด เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อมีแสงมาตกกระทบ p-n โฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ไปสูแถบนำไฟฟ้า และที่แถบเวเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) ซึ่งแสดงลักษณะของแถบพลังงานของ p-n โฟโตไดโอด การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p บริเวณปลอดพาหะ และชั้น n ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าในชั้น p จะแพร่ไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายใน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น n ส่วนโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลแปรโดยตรงกับจำนวนของแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน และถ้าต่อ p-n โฟโตไดโอดเข้ากับวงจรภายนอกแล้ว อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลจะไหลออกจากชั้น p เป็นกระแสไฟฟ้าไปสู่วงจรภายนอก

คุณสมบัติเด่นของ p-n โฟโตไดโอด พบว่าจะทำงานได้เร็วกว่าโฟโตคอนดักเตอร์ และมีสัญญาณรบกวนต่ำ อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท ซึ่งต้องทำงานด้วยความเร็วสูงมากๆ แต่ p-n โฟโตไดโอดไม่สามารถตอบสนองได้ ในขณะที่ตัวตรวจจับแสงชนิด p-i-n โฟโตไดโอดจะมีความเหมาะสมมากกว่า

ในรูปที่ 2.9 (ก) และ (ข) เป็นโครงสร้างของ p-i-n โฟโตไดโอด ซึ่งจะแตกต่างจาก p-n โฟโตไดโอดตรงที่มีชั้นอินทรินซิก (i)¹ คั่นอยู่ระหว่างชั้น p และชั้น n จากการที่มีชั้น i นี้ จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้า

¹ ชั้นอินทรินซิก หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการโด๊ปสารเจือด้วยปริมาณที่น้อยมาก



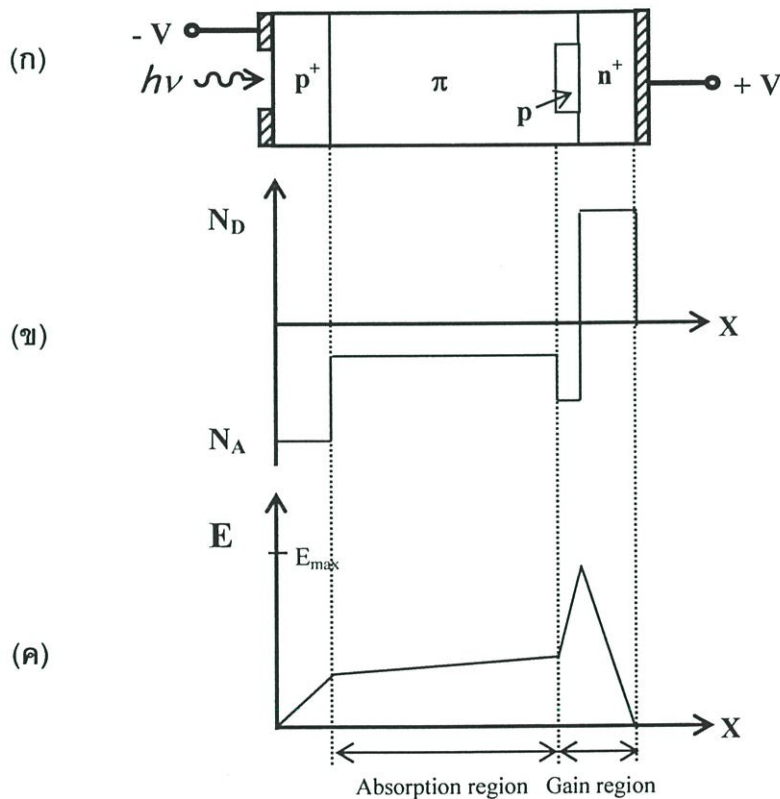
รูปที่ 2.9 ตัวตรวจวัดแสงชนิด p-i-n โฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างพื้นฐาน (ข) การให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ (ค) แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ

ของรอยต่อมีค่าน้อย ส่งผลให้มีการตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก (ultra-fast response speed) ถึงระดับพิโควินาที (ps) ส่วนรูปที่ 2.9 (ค) แสดงแผนภาพแถบพลังงานขณะได้รับการไบแอสย้อนกลับ

นอกจากการตอบสนองเวลาได้รวดเร็วแล้ว โครงสร้าง p-i-n โฟโตไดโอดยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่า p-n โฟโตไดโอด เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสง (i) กว้าง ดังนั้นปัจจุบันนี้จึงมีการใช้งาน p-i-n โฟโตไดโอดกันอย่างแพร่หลายทั้งในระบบการสื่อสารความเร็วสูงด้วยแสงเลเซอร์และงานทั่วไป อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของโครงสร้าง p-i-n โฟโตไดโอด คือถ้าสร้างให้มีพื้นที่ใหญ่จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดต่ำลง [42] และกระบวนการสร้างของ p-i-n โฟโตไดโอดมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องสร้างชั้น i ให้มีความบริสุทธิ์ และต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วย

2.4.2.2 อะวาลานซ์โฟโตไดโอด

อะวาลานซ์โฟโตไดโอด หรือ APD คือ โฟโตไดโอดที่ทำงานด้วยปรากฏการณ์อะวาลานซ์ (Avalanche effect) ซึ่งทำงานภายใต้การไบแอสย้อนกลับด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากจนสามารถเร่งพาหะที่เกิดจากแสงให้วิ่งไปชนอะตอมในผลึกจนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน และเกิดอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้น APD จึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่สามารถขยายสัญญาณกระแสแสงได้ ทำให้สามารถตรวจวัดสัญญาณแสงที่มีกำลังต่ำมากๆ ได้ดี อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างที่มีความจุไฟฟ้าต่ำด้วย ดังนั้นจึงสามารถตอบสนองต่อสัญญาณแสงได้รวดเร็วมาก



รูปที่ 2.10 (ก) โครงสร้างของอะวาลานซ์โฟโตไดโอดชนิดรีซทรู (reach-through APD) (ข) ความเข้มข้นของสารเจือในชั้นต่างๆ (ค) สนามไฟฟ้าในชั้นต่างๆ

ในรูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของ APD [9], [11], [12] ซึ่งคล้ายกับกรณีของ p-i-n โฟโตไดโอด ซึ่งมีส่วนแตกต่างกันตรงที่ APD จะมีการขยายสัญญาณอยู่ด้วย ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามาชั้น p⁺ แสงจะถูกดูดกลืนในชั้นบริเวณปลอดพาหะ และเมื่อให้แรงดันไบแอสแบบย้อนกลับแก่อุปกรณ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น n⁺ และโฮลจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น p⁺ ในการสร้างอุปกรณ์ชั้น π¹ จะมี

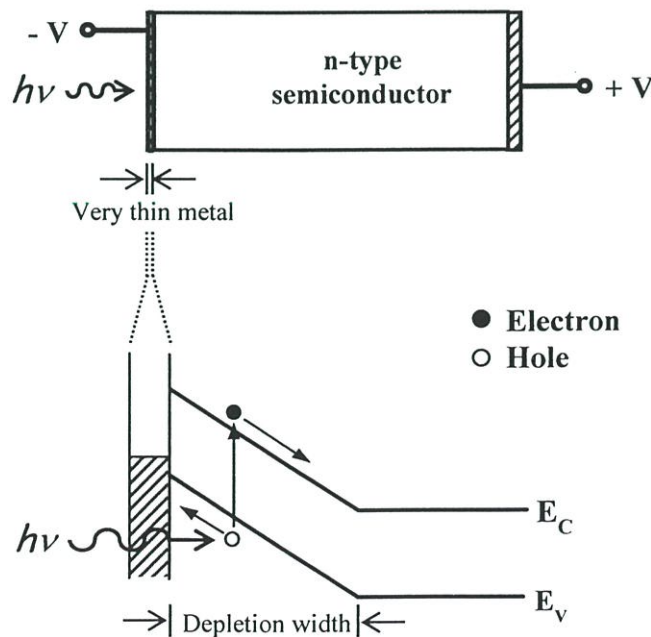
¹ ชั้น π หมายถึงสารกึ่งตัวนำชนิด p ที่ถูกโดปอย่างเจือจาง (lightly doped semiconductor)

ความต้านทานสูงกว่าชั้น p และชั้น p⁺ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะไปตกคร่อมที่ชั้น p มากที่สุด เป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดให้เข้ามาสู่ชั้น p จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้ และวิ่งไปชนกับ โครงร่างผลึก และทำให้ผลึกแตกตัวเกิดเป็นไอออน ซึ่งจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นสู่แถบนำไฟฟ้า และเกิดโฮลขึ้นใหม่ในแถบเวเลนซ์ และจะเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำๆ ตลอดเวลาที่ป้อนแรงดันไบแอส ย้อนกลับ จึงทำให้เกิดพาหะอิสระเป็นจำนวนมากมาย จึงทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น

APD มีข้อเสียเปรียบตรงที่ต้องใช้แรงดันไบแอสย้อนกลับที่สูงมาก และสัญญาณเอาพุทมี ลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับกำลังของแสงอินพุทและสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบแอส นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูง เนื่องจากความสามารถในการขยายสัญญาณภายในตัวเอง

2.4.2.3 โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด

โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด หรือชื่ออีกแบริเออร์โฟโตไดโอด สร้างมาจากส่วนประกอบของ รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างทั่วไปของโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด แสดงดังในรูปที่ 2.11 ส่วนของสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงภายใต้แรงดันไบแอสย้อนกลับจะอยู่ที่ส่วนของชั้น n ถ้าเปรียบเทียบกับ p-i-n โฟโตไดโอดแล้ว โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดจะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า เพื่อให้ค่าเวลาส่งผ่านมี ค่าน้อย นอกจากนี้จากโครงสร้างของโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดยังมีค่าของความต้านทานและความจุ ไฟฟ้าในโครงสร้างมีค่าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่มากกว่า 100 GHz [19], [22]



รูปที่ 2.11 (ก) โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด

(ข) การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลแบบแถบถึงแถบ เมื่อได้รับการฉายแสง

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าต่ำ ในส่วนของฟิล์มโลหะด้านหน้าต้องมีความบางมาก ($\approx 100 \text{ \AA}$) [9] เพื่อให้แสงสามารถผ่านชั้นโลหะลงไปได้หรืออาจใช้ฟิล์มโลหะโปร่งแสงก็ได้ ซึ่งจะทำให้มีกระบวนการสร้างมีความซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว (surface state) ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอน และระดับจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป [43]

ตัวตรวจวัดแสงประเภทโฟโตไดโอดที่กล่าวมาข้างต้นมีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง (vertical structure) ทำให้นำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ยากกว่าโครงสร้างแบบพลาแนร์ ซึ่งถ้าสร้างเป็นวงจรรวมแล้วจะทำให้อุปกรณ์มีเสถียรภาพในการทำงานดีขึ้น ราคาลดต่ำลง และอาจมีส่วนประกอบอื่นๆ ที่สำคัญรวมอยู่ด้วย เช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรเปลี่ยนสัญญาณจากแบบอนุมาณเป็นแบบเชิงเลข (analog to digital circuit) วงจรฟิลเตอร์ และวงจรประมวลผลสัญญาณ เป็นต้น ดังนั้นการพิจารณาโฟโตไดโอดที่มีความเหมาะสมกับกระบวนการสร้างแบบพลาแนร์ จึงได้รับความสนใจเป็นพิเศษ และพบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะเป็นโฟโตไดโอดชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสม ดังจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

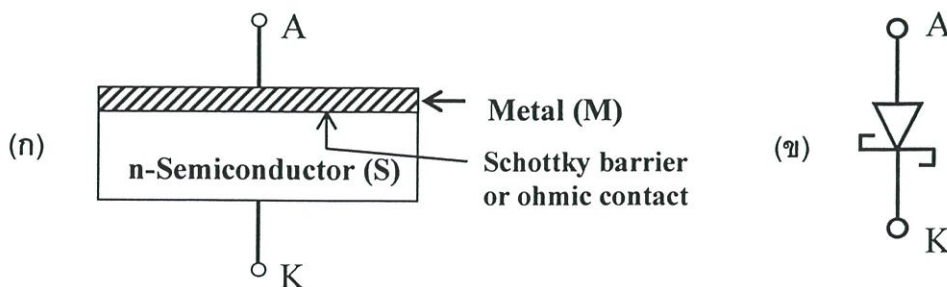
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM)

โครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำในลักษณะของซีดทีแบริเออร์ 2 รอยสัมผัสที่ต่อแบบหันหลังชนกัน ดังนั้นก่อนจะอธิบายถึงโครงสร้าง และการทำงานของโครงสร้าง MSM ซึ่งเป็นเนื้อหาหลักของบทนี้ จะขอกล่าวถึงทฤษฎีของซีดทีแบริเออร์ไว้ในช่วงแรก เพื่อทำความเข้าใจหลักการเบื้องต้นของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับโครงสร้าง MSM ต่อไป

3.1 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิด n

รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (Metal-Semiconductor contact) หรือรอยสัมผัสแบบ M-S เป็นรอยสัมผัส หรือรอยต่อที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ซีดทีแบริเออร์ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเรกติไฟร์ (rectifier) และรอยสัมผัสแบบโอห์มิก (ohmic contact) [9], [35], [43], [44] เพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อส่วนต่างๆ ภายในอุปกรณ์เข้าด้วยกันหรือเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์กับตัวถังภายนอก โดยสร้างร่วมกับแผ่นเชื่อมต่อขา (bonding pad) สำหรับรอยสัมผัสที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ (ϕ_m) ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำ (χ_s) ที่นำมาสร้างเป็นรอยสัมผัส นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของรอยสัมผัสยังขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำด้วย (ชนิด n หรือชนิด p) อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิด n และทำหน้าที่เป็นตัวเรกติไฟร์เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในบทที่ 5

ในรูปที่ 3.1 (ข) เป็นสัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของซีดทีแบริเออร์ โดยที่ขั้วแอนอด (A) คือ ขั้วด้านโลหะ และขั้วคาโทด (K) คือ ขั้วด้านสารกึ่งตัวนำ

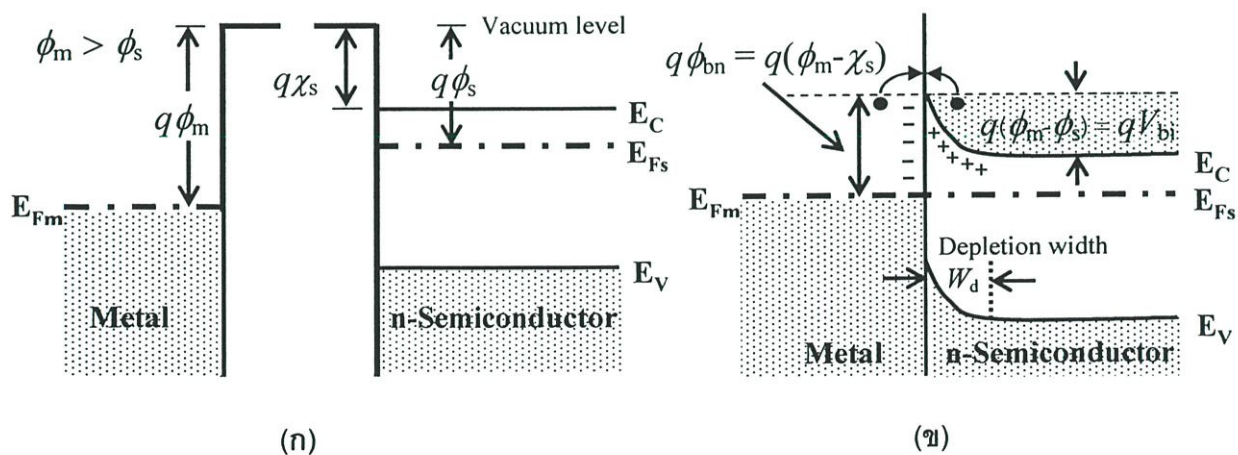


รูปที่ 3.1 (ก) โลหะที่สร้างขึ้นบนสารกึ่งตัวนำชนิด n แล้วเกิดเป็นซีดทีแบริเออร์หรือรอยสัมผัสแบบโอห์มิก
(ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของซีดทีแบริเออร์

ซีดทีแบริเออร์เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์เหมือนรอยต่อ p-n แต่มีคุณสมบัติบางประการที่ได้เปรียบกว่า กล่าวคือ (1) แรงดันภายใน (built in voltage : V_{bi}) มีค่าต่ำกว่า (2) ทำงานด้วยพาหะส่วนมาก (majority carriers) และ (3) ความจุไฟฟ้าแฝงภายในโครงสร้างมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงนิยมนำซีดทีแบริเออร์ไปประยุกต์ใช้งานที่ความถี่สูง

3.1.1 การเกิดซีดทีแบริเออร์ในภาวะสมดุล

รูปที่ 3.2 แสดงการเกิดซีดทีแบริเออร์ โดยในรูปที่ 3.2 (ก) เป็นแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิด n ก่อนเกิดรอยสัมผัส ซึ่งฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำและเมื่อนำโลหะกับสารกึ่งตัวนำดังกล่าวมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล และพบว่าที่ภาวะสมดุลนี้ ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) อธิบายได้ว่าอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะ ทำให้เกิดไอออนบวกของสารเจือผู้ให้ขึ้นที่สารกึ่งตัวนำ และเกิดประจุลบขึ้นที่โลหะ เป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้มีทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสามารถหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งแสดงได้อย่างชัดเจนจากการโค้งขึ้นของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ หมายความว่าเกิดกำแพงศักย์ภายในสารกึ่งตัวนำใกล้กับโลหะ ซึ่งป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังโลหะ โดยกำแพงศักย์ (qV_{bi}) นี้ มีค่าเท่ากับ $q(\phi_m - \phi_s)$ โดยที่ q คือ ประจุอิเล็กตรอน และในภาวะสมดุลจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยสัมผัสนี้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแถบพลังงานของโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิด n ซึ่งเกิดเป็นซีดทีแบริเออร์

(ก) ก่อนการสัมผัส (ข) ภายหลังจากการสัมผัสที่ภาวะสมดุล

ถ้าพิจารณาทางด้านโลหะ พบว่าความสูงของกำแพงศักย์ (barrier height : ϕ_{bn}) ที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด n มีค่าเท่ากับ

$$q\phi_{bn} = q\phi_m - q\chi_s = q(\phi_m - \chi_s) \quad (3.1)$$

โดยที่ χ_s คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ (eV)

3.1.2 การทำงานของซีดตีแบริเออร์

รูปที่ 3.3 (ก) เป็นการให้แรงดันไบแอสตรง (V_F) แก่ซีดตีแบริเออร์ โดยให้แรงดันไฟฟ้าบวกเข้าที่ขั้วแอนโนดและแรงดันไฟฟ้าลบเข้าที่ขั้วคาโทด ส่วนรูปที่ 3.3 (ข) แสดงแถบพลังงานเมื่อให้ไบแอสตรงแก่ซีดตีแบริเออร์ กำแพงศักย์มีค่าลดลงเท่ากับ $q(V_{bn}-V_F)$ และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นไปตามทฤษฎีของเทอร์โมไอออไนคิมิสชัน [9] ดังนั้นความหนาแน่นกระแสของการให้แรงดันไบแอสตรง (J_F) จะมีค่าเท่ากับ

$$J_F = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{qV_F}{k_B T}\right) \quad (3.2)$$

และ
$$A^* = \left(\frac{4\pi q m^* k_B^2}{h^3}\right) \quad (3.3)$$

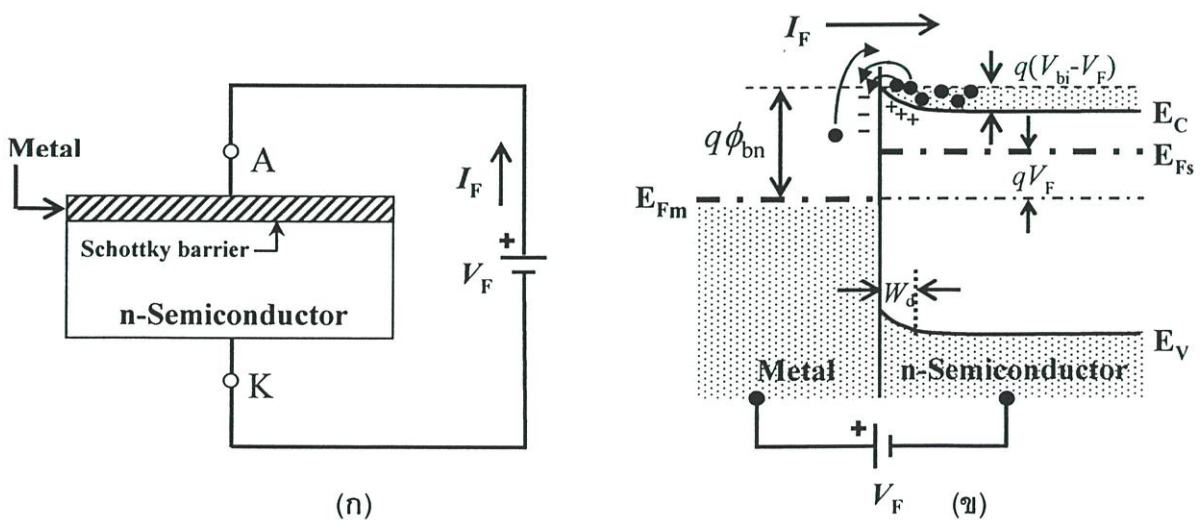
โดยที่ A^* คือ ค่าคงที่รีดชาร์ดสัน มีค่าเท่ากับ $120 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$ [45] ของอิเล็กตรอนอิสระในซิลิคอน

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

k_B คือ ค่าคงที่ของโบสท์มานต์ มีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

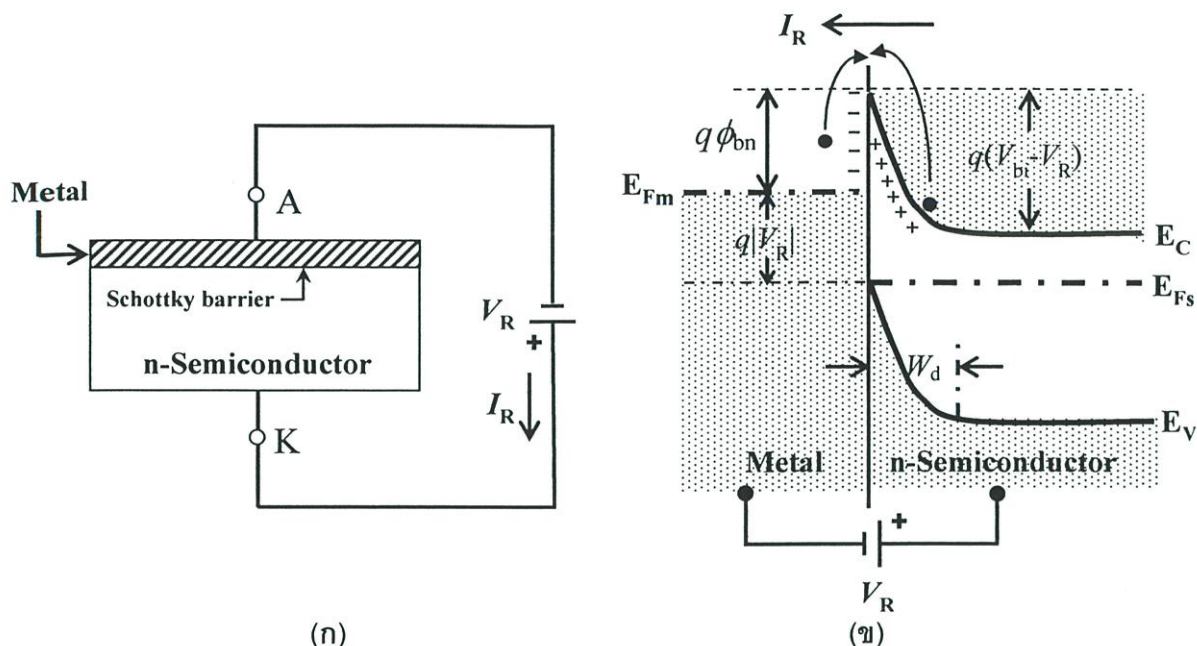
m^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ (kg)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ $6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$



รูปที่ 3.3 (ก) การให้แรงดันไบแอสตรงแก่ซีดตีแบริเออร์

(ข) แถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เมื่อให้แรงดันไบแอสตรงแก่ซีดตีแบริเออร์



รูปที่ 3.4 (ก) การให้แรงดันไบแอสย้อนกลับแก่ช็อคกี้แบริเออร์ (ข) แถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เมื่อให้แรงดันไบแอสย้อนกลับแก่ช็อคกี้แบริเออร์

แต่ถ้าให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ (V_R) แก่ช็อคกี้แบริเออร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) โดยให้แรงดันไฟฟ้าบวกเข้าที่ขั้วคาโทด และแรงดันไฟฟ้าลบเข้าที่ขั้วแอโนด พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านช็อคกี้แบริเออร์มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งพิจารณาได้จากแถบพลังงานในรูปที่ 3.4 (ข) แรงดันไบแอสย้อนกลับทำให้สนามไฟฟ้าในส่วนของสารกึ่งตัวนำใกล้กับโลหะมีค่าสูง ส่งผลให้กำแพงศักย์มีค่าสูงขึ้นเท่ากับ $q(V_{bi} - V_R)$ และจะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามไปได้ อย่างไรก็ตามในการให้แรงดันไบแอสย้อนกลับนี้จะพบกระแสไฟฟ้าน้อยๆ ไหลได้ ซึ่งเรียกว่า กระแสไฟฟ้าวรั่วไหล (leakage current : I_R หรือ I_0) ดังนั้นความหนาแน่นกระแสของการไบแอสย้อนกลับ (J_R) เป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.4) คือ

$$J_R = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{k_B T}\right) \tag{3.4}$$

จากรูปที่ 3.4 (ก) สามารถคำนวณหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width : W_d) และความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะ (C_d) ได้ จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) ตามลำดับ ดังนี้

$$W_d = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V_A)}{qN_d} \right]^{1/2} \tag{3.5}$$

$$C_d = \frac{\epsilon_s}{W_d} = \left[\frac{q\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} - V_A)} \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

โดยที่ ϵ_s คือ เปรอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ กรณีของซิลิคอนจะมีค่าเท่ากับ $\epsilon_0\epsilon_{Si}$ (F/cm)

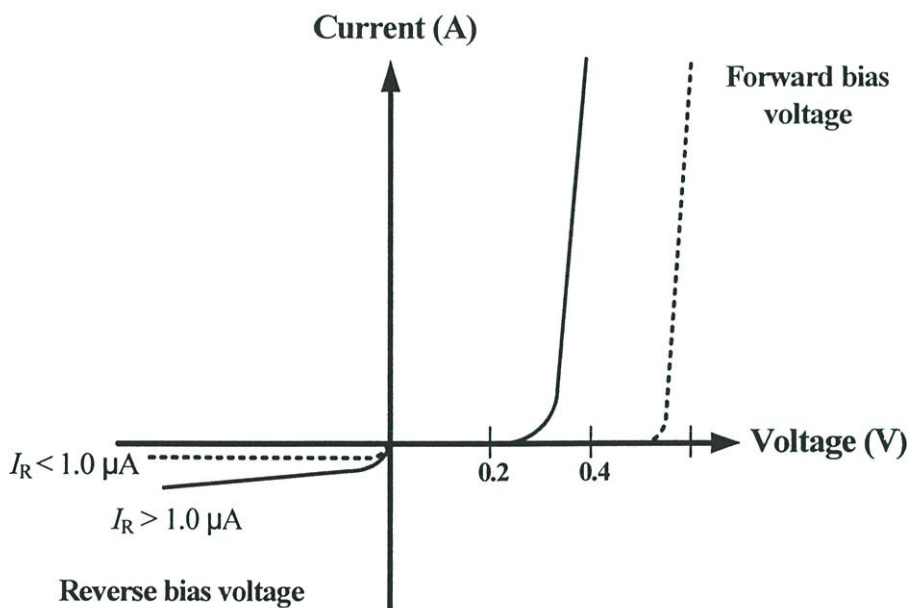
ϵ_0 คือ เปรอร์มิติวิตีในสุญญากาศ ($= 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm)

V_A คือ แรงดันไบแอส (V) ; เมื่อพิจารณาในกรณีการให้แรงดันไบแอสย้อนกลับจะได้ว่า $V_A \equiv V_R$

N_d คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})

3.1.3 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีแบริเออร์

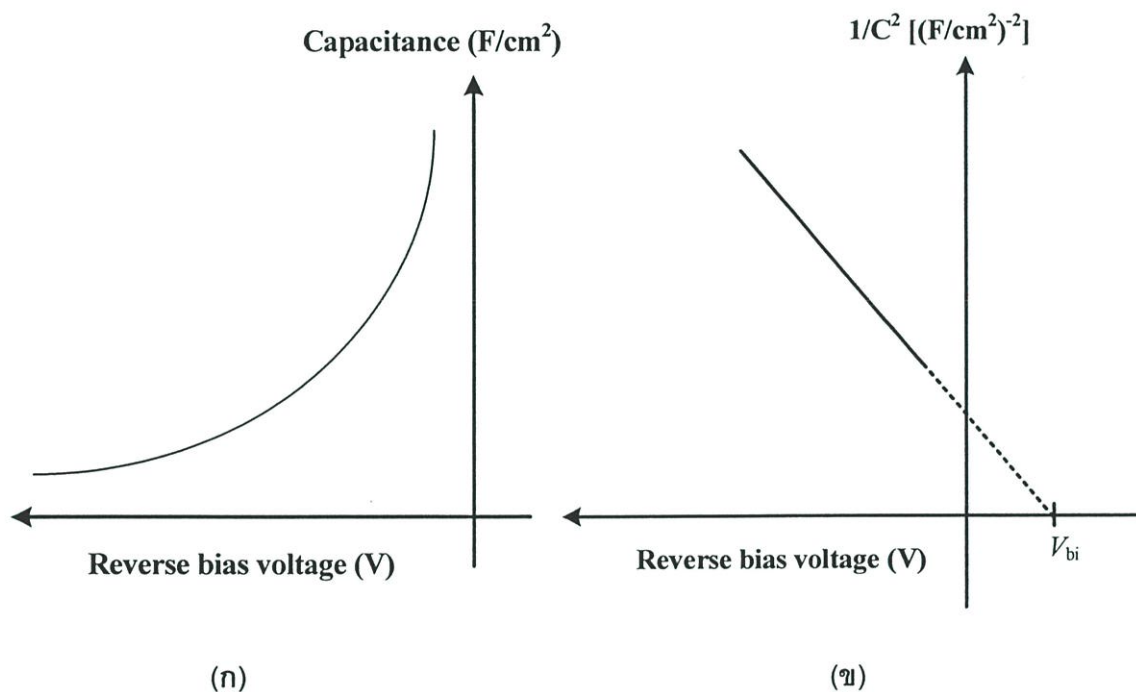
ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของซีดทีแบริเออร์ที่สำคัญ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อนี้มี 2 ลักษณะเฉพาะ คือ (1) ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน และ (2) ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของซีดทีแบริเออร์ (เส้นทึบ) และรอยต่อ p-n (เส้นประ)

จากลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ในรูปที่ 3.5 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างซีดทีแบริเออร์ และรอยต่อ p-n พบว่าแรงดันภายในของซีดทีแบริเออร์จะมีค่าต่ำกว่าของรอยต่อ p-n โดยปกติแล้วแรงดันภายในของซีดทีแบริเออร์มีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ในขณะที่แรงดันภายในของรอยต่อ p-n มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V

เมื่อพิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสย้อนกลับ กระแสรั่วไหลของซีดทีแบริเออร์จะมีค่าสูงกว่ารอยต่อ p-n จากในรูปที่ 3.5 กระแสรั่วไหลของซีดทีแบริเออร์จะมีค่ามากกว่า $1.0 \mu\text{A}$ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากบริเวณรอยสัมผัสของโลหะกับผิวสารกึ่งตัวนำ ส่วนกรณีของรอยต่อ p-n มีค่าต่ำกว่า $1.0 \mu\text{A}$ เพราะเป็นส่วนของรอยต่อที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ลึกลงไปเนื้อสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.6 (ก) ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีแบริเออร์ (ข) ลักษณะเฉพาะจากรูป (ก) เมื่อนำมาเขียนใหม่ในเทอม $1/C^2$ กับแรงดัน และเมื่อลากเส้นต่อจุดจนตัดแกนแรงดัน ($1/C^2=0$) จะทราบค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) ของซีดทีแบริเออร์

ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของซีดทีแบริเออร์ แสดงดังในรูปที่ 3.6 (ก) ซึ่งวัดในช่วงการให้แรงดันไบแอสย้อนกลับ พบว่าเมื่อให้แรงดันแรงดันไบแอสย้อนกลับมากขึ้น ความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และเมื่อนำกราฟนี้มาเขียนใหม่ในเทอมของ $1/C^2$ กับแรงดันไบแอสย้อนกลับ จะสามารถหาค่าแรงดันภายในได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข) และเมื่อแทนค่าแรงดันภายในลงในสมการที่ (3.7) จะสามารถหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้ได้ ดังในสมการที่ (3.8)

$$\frac{1}{C_d^2} = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{q\epsilon_s N_d} \quad (3.7)$$

หรือ

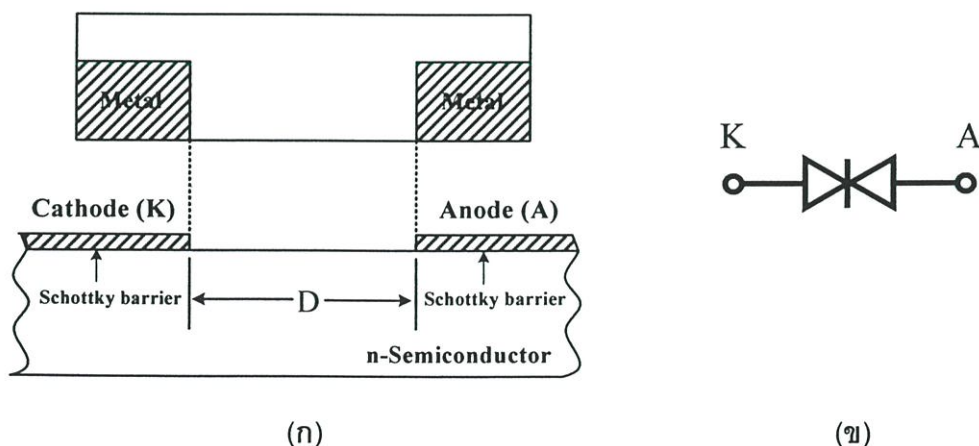
$$N_d = \frac{2(V_{bi} - V_A)}{q\epsilon_s C_d^2} \quad (3.8)$$

3.2 ตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ดังที่เคยกล่าวไว้เบื้องต้นในบทที่ 1 แล้วว่า โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้าง หลักการทำงาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง MSM ซึ่งสามารถนำทฤษฎีของชอตทิแบรีเออร์มาประยุกต์ใช้อธิบายกับโครงสร้าง MSM ได้ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM แบบพลาแนร์ ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในระนาบเดียวกัน ที่แสดงในรูปที่ 3.7 (ก) ประกอบด้วยขั้วโลหะ 2 ขั้ว ที่สร้างขึ้นบนสารกึ่งตัวนำชนิด n และแยกออกจากกัน ด้วยระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) รอยสัมผัสของโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นจะแสดงคุณสมบัติของชอตทิแบรีเออร์ และเมื่อพิจารณาจากรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำทั้งสองแล้ว จึงอาจกล่าวได้ว่า โครงสร้าง MSM เสมือนกับรอยสัมผัสแบบชอตทิแบรีเออร์ 2 รอยสัมผัส เชื่อมต่อแบบหันหลังชนกันและถ้านำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงแล้ว ระยะห่าง D จะถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่รับแสง ซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องสร้างขั้วโลหะให้มีความบางมากๆ เหมือนกับโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด ส่วนในรูปที่ 3.7 (ข) เป็นสัญลักษณ์ทางวงจรที่ใช้แทนโครงสร้าง MSM

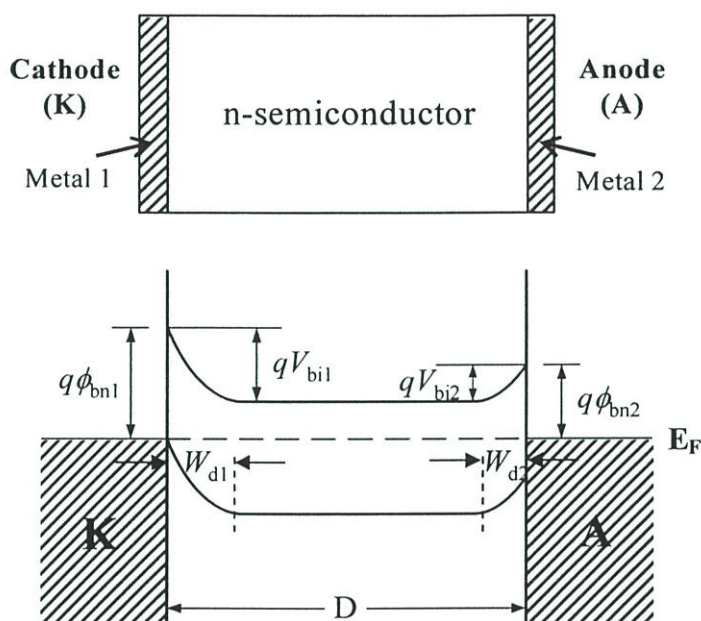


รูปที่ 3.7 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM ที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะพลาแนร์ ซึ่งมีความเหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้สร้างร่วมกับวงจรรวมทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์

(ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM

3.2.1.1 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล

ในรูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพของโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล โดยรูปที่ 3.8 (ก) เป็นรอยสัมผัสของซีดทีแบริเออร์ โดยรอยสัมผัสทางด้านซ้ายมือกำหนดให้เป็นขั้วคาโทด และรอยสัมผัสทางด้านขวามือให้เป็นขั้วแอโนด การแสดงโครงสร้าง MSM ในลักษณะนี้ เพื่อให้ง่ายในการอธิบายแผนภาพแถบพลังงาน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.8 (ข)



รูปที่ 3.8 (ก) โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล

(ข) แผนภาพแถบพลังงานในภาวะสมดุล เมื่อ ϕ_{bn1} และ ϕ_{bn2} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ และ V_{bi1} และ V_{bi2} คือ แรงดันภายใน สำหรับรอยสัมผัสด้านคาโทด และด้านแอโนด ตามลำดับ

จากแผนภาพแถบพลังงานในภาวะสมดุล ที่แสดงในรูปที่ 3.8 (ข) เป็นกรณีที่ขั้วคาโทดและแอโนดสร้างจากโลหะต่างชนิดกัน ซึ่งทำให้ $\phi_{bn1} \neq \phi_{bn2}$ และ $V_{bi1} \neq V_{bi2}$ แต่โดยทั่วไปแล้ว เพื่อลดจำนวนต้นแบบและขั้นตอนการสร้างลง ดังนั้นขั้วคาโทดและแอโนดจะสร้างจากโลหะชนิดเดียวกัน จึงทำให้ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ และ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า โครงสร้าง MSM ที่สร้างจากโลหะชนิดเดียวกันนี้จะมีลักษณะเป็นแบบสมมาตร

ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของขั้วคาโทด และแอโนดในภาวะสมดุลจะมีขนาดเท่ากับ W_{d1} และ W_{d2} ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับสมการที่ (3.5) เมื่อให้ $V_A = 0$ และถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกันแล้ว $W_{d1} = W_{d2} = W_d$

3.2.1.2 โครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้าง MSM มักจะสร้างให้ระยะห่าง D มีขนาดสั้นมากๆ เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานด้วยความเร็วสูง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว อีกทั้งโครงสร้างยังมีลักษณะเป็นข้อต่อกึ่งแบริเออร์ที่เชื่อมต่อแบบหันหลังชนกัน เมื่อให้แรงดันไบแอสแก่อุปกรณ์รอยสัมผัสด้านหนึ่งจะแสดงคุณสมบัติของการไบแอสตรงและรอยสัมผัสที่เหลือจะแสดงคุณสมบัติของไบแอสย้อนกลับ ในที่นี้จะให้แรงดันไบแอสบวกเข้าที่ขั้ววาโนด และแรงดันไบแอสลบเข้าที่ขั้วคาโทด ดังนั้นที่ขั้ววาโนดจะถูกต่อในลักษณะของไบแอสตรง ส่วนที่ขั้วคาโทดจะเป็นไบแอสย้อนกลับ ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการทำงานได้เป็น 3 ช่วง [13] ดังนี้ คือ

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงแรงดันต่ำ ($V \leq V_{RT}$) โดยให้แรงดันไบแอสมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะทั้งสองมีค่ากว้างขึ้น จนในที่สุดมาอยู่ที่แรงดันรีช-ทรูธ (reach-through voltage : V_{RT}) บริเวณปลอดพาหะทั้งสองข้างจะสัมผัสซึ่งกันและกัน และผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเท่ากับระยะห่าง D ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงแรงดันระหว่างแรงดันรีช-ทรูธถึงแรงดันแฟลต-แบนด์ ($V_{RT} < V \leq V_{FB}$) โดยให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นอีกจนทำให้สนามไฟฟ้า $x = D$ มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้แถบพลังงานที่ $x = D$ แบนราบที่จุดนี้ คือ เงื่อนไขของแฟลต-แบนด์ ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันแฟลต-แบนด์ (flat-band voltage : V_{FB}) แสดงในรูปที่ 3.9 (ข)

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงแรงดันที่มากกว่า V_{FB} ($V > V_{FB}$) เมื่อให้แรงดันไบแอสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์พบว่า แถบพลังงานจะโค้งงอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ค)

3.2.1.3 การนำกระแสไฟฟ้าในโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส

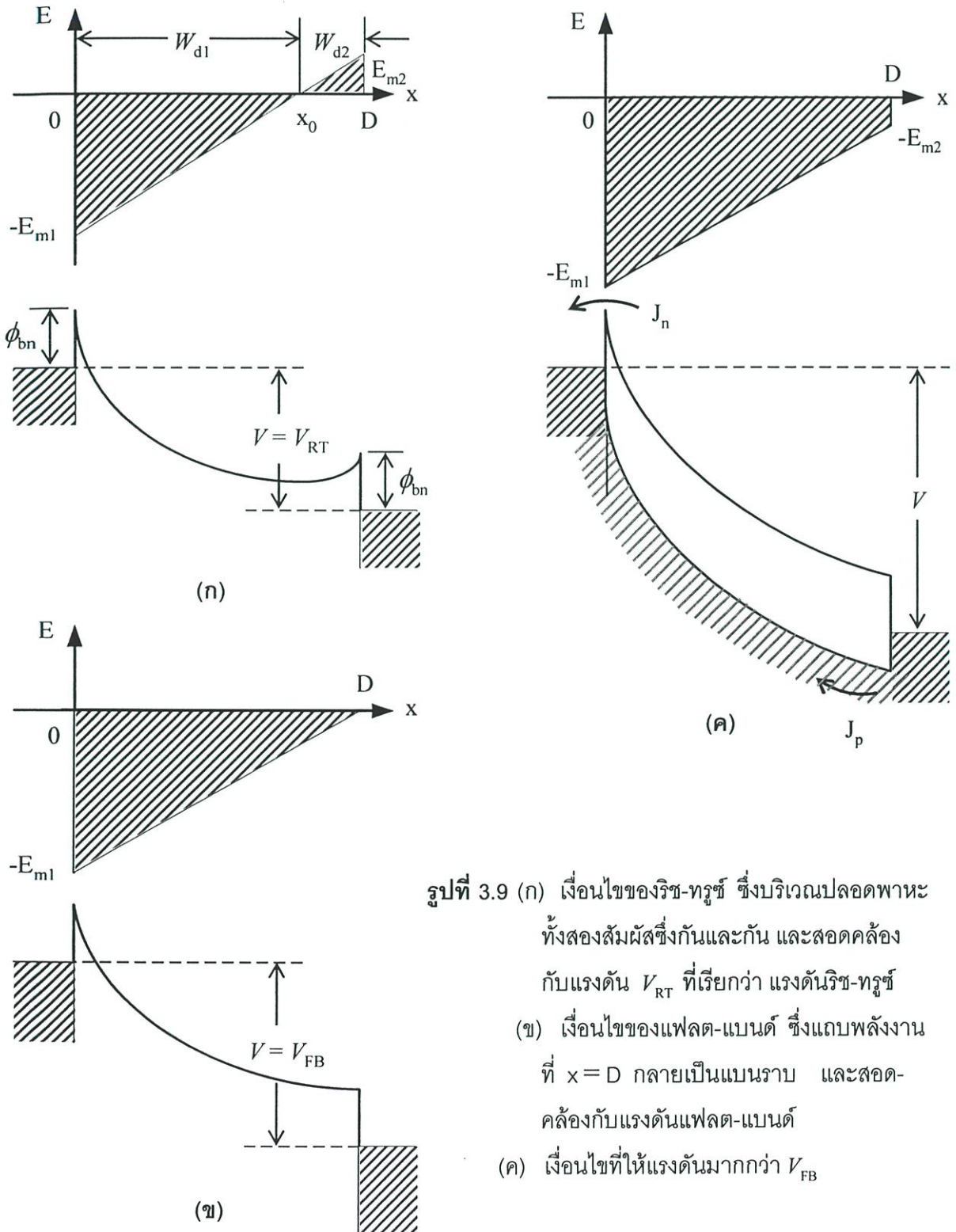
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงสร้าง MSM จะถูกหาได้จากทฤษฎีของเทอร์โมอิเล็กทริกสมิตชันเหนือความสูงกำแพงศักย์ โดยถ้าแรงดันไบแอสมีค่าน้อยๆ พบว่ากระแสอิเล็กตรอนที่รอยสัมผัสที่ถูกไบแอสย้อนกลับ (ขั้วคาโทด) จะเป็นกลไกที่เด่นในการนำกระแสไฟฟ้า เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้นกระแสโฮล จากรอยสัมผัสที่ถูกไบแอสตรง (ขั้ววาโนด) จะเริ่มนำกระแสได้มากขึ้น [10], [13] และเมื่อให้แรงดันไบแอสจนทำให้บริเวณปลอดพาหะทั้งสองด้านมาพบกัน ความหนาแน่นกระแสจะเกิดขึ้นจากกระแสอิเล็กตรอน (J_n) และกระแสโฮล (J_p) รวมกัน ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.9) คือ

$$J = J_n + J_p = A_n^* T^2 e^{-q(\phi_{bn} - \Delta\phi_{bn})/k_B T} + A_p^* T^2 e^{-q(\phi_{bp} - \Delta\phi_{bp})/k_B T} \quad (3.9)$$

โดยที่ A_n^* และ A_p^* คือ ค่าคงที่ริดชาร์ดสันของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระในซิลิคอนตามลำดับ [$A/(cm^2 \cdot K^2)$]

ϕ_p คือ ความสูงกำแพงศักย์ของโฮล โดยที่ $q\phi_p = E_g - q\phi_n$

$\Delta\phi_{bn}$ และ $\Delta\phi_{bp}$ คือ ซีดตกีแบริเออร์โวลเวอริง (Schottky barrier lowering) ของความสูงกำแพงศักย์ อิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ เนื่องจากผลกระทบของแรงอิมเมจ (image force effect) [9], [44]



รูปที่ 3.9 (ก) เส้นไขของริช-ทรูทซ์ ซึ่งบริเวณปลอดพาหะ ทั้งสองสัมผัสซึ่งกันและกัน และสอดคล้อง กับแรงดัน V_{RT} ที่เรียกว่า แรงดันริช-ทรูทซ์
 (ข) เส้นไขของแฟลต-แบนด์ ซึ่งแถบพลังงาน ที่ $x = D$ กลายเป็นแบนราบ และสอดคล้องกับแรงดันแฟลต-แบนด์
 (ค) เส้นไขที่ให้แรงดันมากกว่า V_{FB}

3.2.1.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส

เมื่อให้แรงดันไบแอส ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม (W_T) มีค่าเท่ากับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ขั้วคาโทด (W_{d1}) รวมกับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ขั้วแอโนด (W_{d2}) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ก) นั่นคือ

$$W_T = W_{d1} + W_{d2} \quad (3.10)$$

$$W_{d1} = \left[\frac{2\varepsilon_s (V_{bi} - V_1)}{qN_d} \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

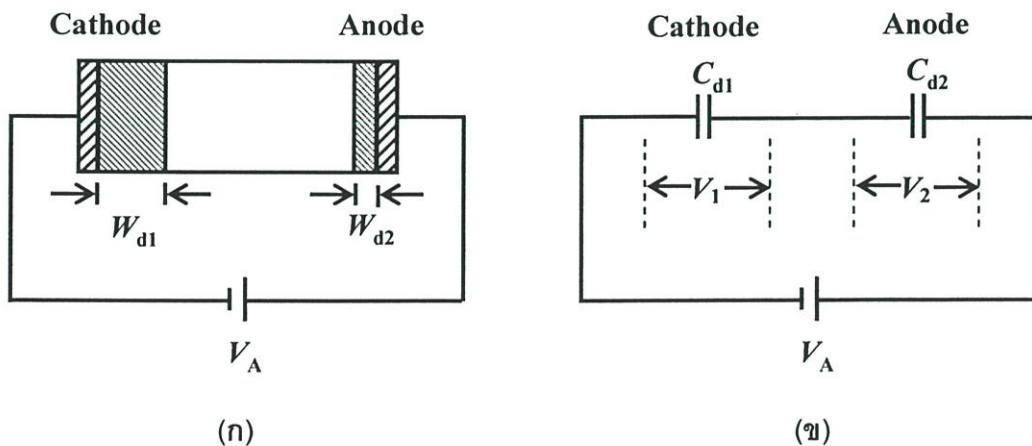
และ

$$W_{d2} = \left[\frac{2\varepsilon_s (V_{bi} + V_2)}{qN_d} \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

โดยที่ V_1 และ V_2 คือ แรงดันที่ตกคร่อมที่รอยสัมผัสของขั้วคาโทดและแอโนด ตามลำดับ (V)

3.2.1.5 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอส

ความจุไฟฟ้าภายในโครงสร้าง MSM ในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอสแสดงในรูปที่ 3.10 (ข) พบว่า จะมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าแฝงในโครงสร้างสองตัวที่ต่ออนุกรมกัน ดังนั้นความจุไฟฟ้าแฝงรวม (C_T) จะมีค่าเป็น [13]



รูปที่ 3.10 (ก) โครงสร้าง MSM เมื่อให้แรงดันไบแอส V_A แล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะ W_{d1} และ W_{d2}
(ข) บริเวณปลอดพาหะ W_{d1} และ W_{d2} แทนด้วยความจุไฟฟ้าแฝง C_{d1} และ C_{d2}

$$C_T = \frac{C_{d1} C_{d2}}{C_{d1} + C_{d2}} \quad (3.13)$$

โดยที่ C_{d1} คือ ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ขั้วคาโทด (F)

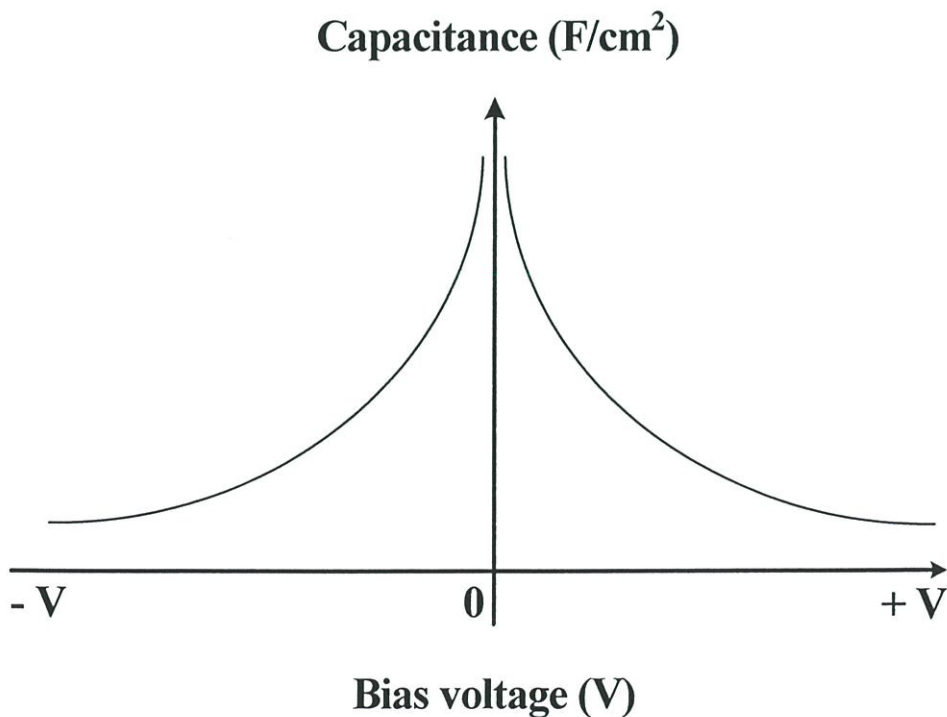
C_{d2} คือ ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ขั้วแอโนด (F)

$$C_{d1} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} - V_1)}} \quad \text{และ} \quad C_{d2} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_2)}} \quad (3.14)$$

แทนค่า C_{d1} และ C_{d2} ลงในสมการที่ (3.13) ดังนั้นความจุไฟฟ้ารวม เท่ากับ

$$C_T = \sqrt{\left(\frac{q\epsilon_s N_d}{2}\right)} \left[\frac{1}{\sqrt{(V_{bi} - V_1)} + \sqrt{(V_{bi} + V_2)}} \right] \quad (3.15)$$

ในรูปที่ 3.11 เป็นลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความจุไฟฟ้าที่สมมาตรกันและมีค่าลดลง เมื่อให้แรงดันมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.11 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM

3.2.2 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบบ

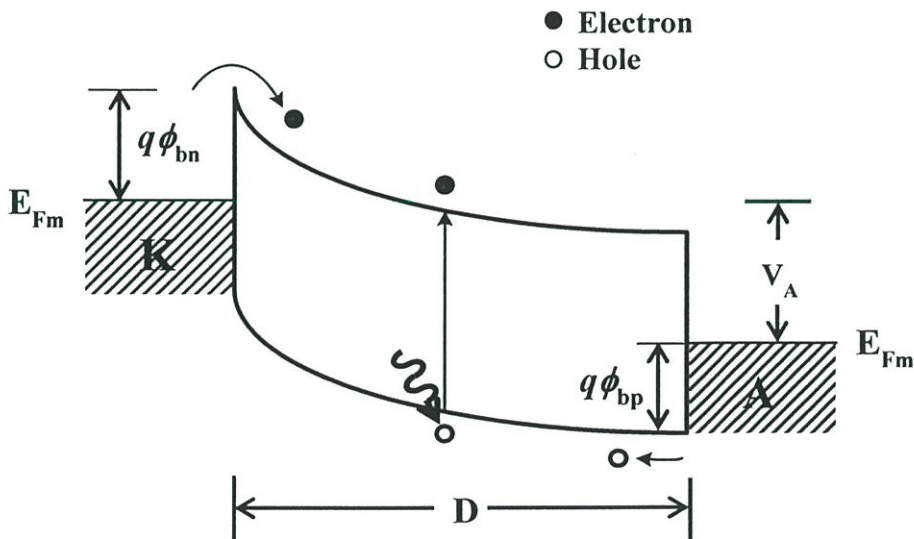
โครงสร้าง MSM สามารถนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับแสงได้เป็นอย่างดี ในทำนองเดียวกับ p-i-n โฟโตไดโอดหรือโฟโตไดโอดทั่วๆ ไป ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้าง MSM

จากรูปที่ 3.7 (ก) เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบบ บริเวณที่รับแสงของอุปกรณ์จะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง สำหรับในรูปที่ 3.12 แสดงแถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ภายใต้การให้แรงดันไบแอส เมื่อให้แสงตกกระทบบจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่จากขั้วคาโทดไปยังขั้วแอโนด ส่วนโฮลจะมีทิศทางการเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วคาโทด เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงตกกระทบบ หรือกระแสแสง (I_p) ของโครงสร้าง MSM จึงมีค่าเท่ากับ

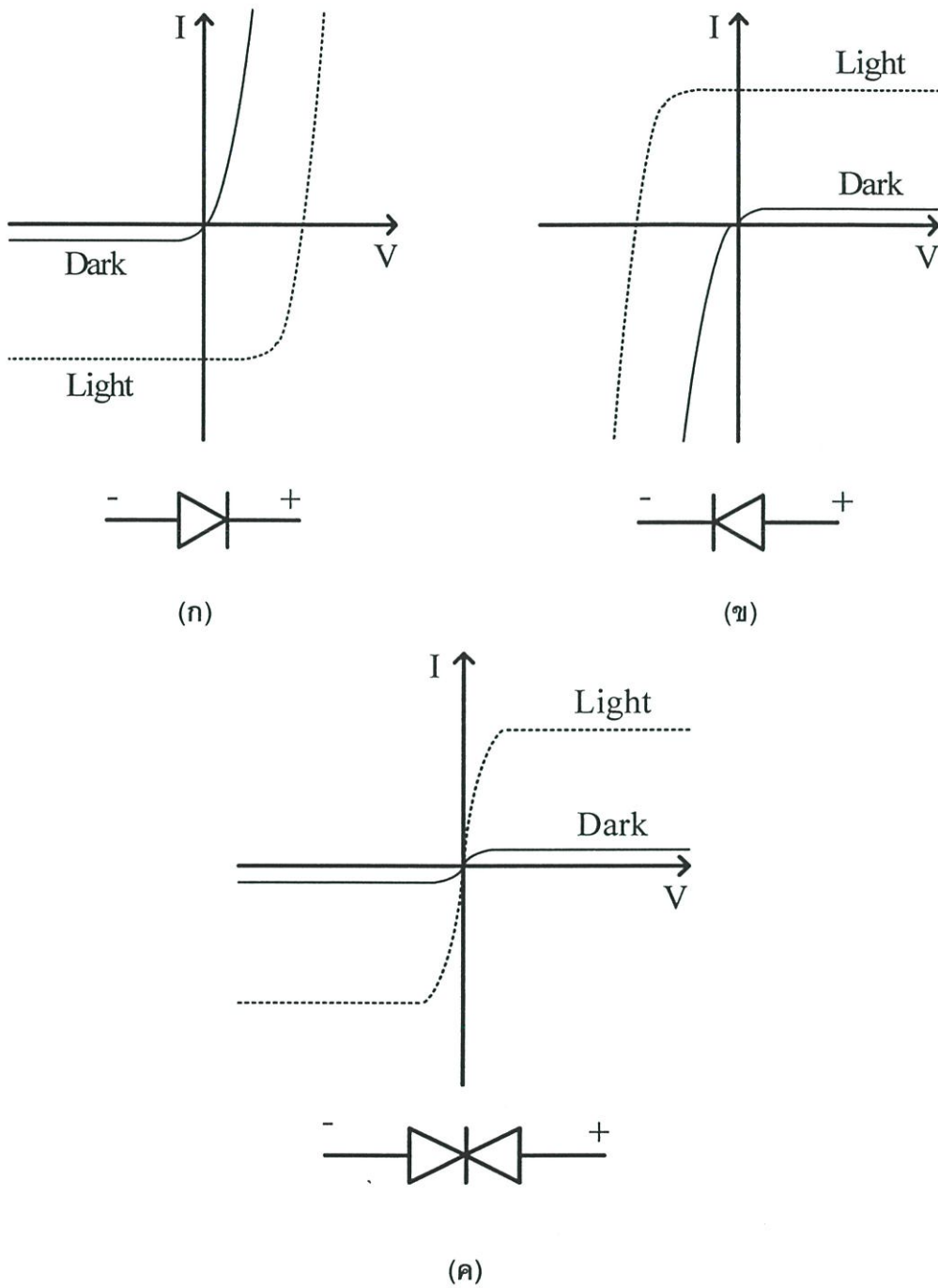
$$I_p = I - I_{\text{dark}} \quad (3.16)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ทั้งหมด (A)

I_{dark} คือ กระแสมืด (A) มีค่าเท่ากับความหนาแน่นกระแสจากสมการที่ (3.9) คูณกับพื้นที่รอยสัมผัส



รูปที่ 3.12 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ได้รับแรงดันไบแอสแล้วจะเกิดบริเวณปลอดพาหะคลุ่มตลอดระยะห่าง D และเมื่อให้แสงตกกระทบบแล้วจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทำให้เกิดเป็นกระแสแสงไหลออกไปภายนอกตัวอุปกรณ์



รูปที่ 3.13 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน เมื่อไม่ให้แสง และให้แสงตกกระทบบนของโครงสร้าง

(ก) โครงสร้างเหมือนโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดตัวที่ 1

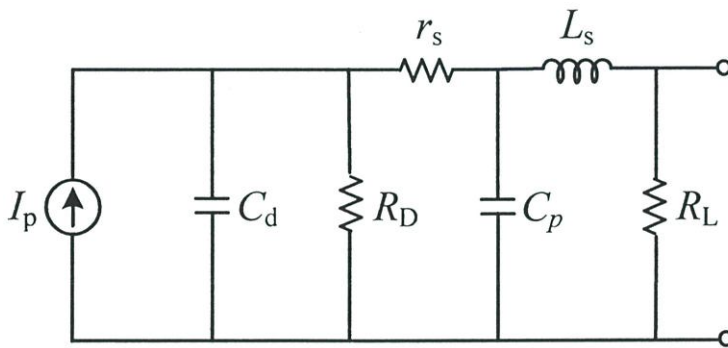
(ข) โครงสร้างเหมือนโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดตัวที่ 2

(ค) โครงสร้าง MSM ที่รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำทั้งสองเชื่อมต่อแบบหันหลังชนกัน

ในรูปที่ 3.13 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM เมื่ออุปกรณ์ได้รับแสงแล้ว ทำให้ได้รับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รูปที่ 3.13 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโลหะ-สารกึ่งตัวนำในแต่ละขั้วไฟฟ้าที่แยกออกจากกัน ซึ่งลักษณะเฉพาะที่แสดงเหมือนกับลักษณะเฉพาะของโฟโตไดโอดทั่วไปและเมื่อนำรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำทั้งสองมาเชื่อมต่อแบบหันหลังชนกันในลักษณะของโครงสร้าง MSM จะได้ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่สมมาตรกันทั้งแรงดันไบแอสด้านบวก และลบ ดังในรูปที่ 3.13 (ค) ทำให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะเมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

3.2.3 แบบจำลองทางแสงของโครงสร้าง MSM

การตอบสนองทางความถี่ และแบนด์วิธของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM หาได้จากเวลาส่งผ่านของพาหะที่เกิดขึ้น เนื่องจากแสงและเวลาการเก็บประจุของตัวไดโอด วงจรสมมูลของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM แสดงดังในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM ภายใต้การให้แสงตกกระทบ

จากรูปที่ 3.14 C_d คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะ ในกรณีนี้ระยะห่าง D จะมีขนาดแคบๆ ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายคลุมระยะห่าง D ทั้งหมด ทำให้ C_d จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง สำหรับ C_p คือ ความจุไฟฟ้าของแผ่นเชื่อมต่อขา โดยทั่วไปทั้ง C_d และ C_p มักจะมีค่าน้อยกว่า 0.1 pF ส่วน r_s , R_D , R_L และ L_s คือ ความต้านทานอนุกรม, ความต้านทานไดโอด, โหลดความต้านทาน และ ความเหนี่ยวนำของลวดเชื่อมต่อขา ตามลำดับ เมื่อใช้วงจรสมมูลนี้ หาค่าแบนด์วิธของตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้าง MSM ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล ซึ่งมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้าน้อยกว่า 1 μm พบว่าแบนด์วิธจะมีค่าประมาณ 20-50 GHz [10]

บทที่ 4

การเตรียมชิ้นงานและการทดลอง

โครงสร้าง MSM แบบพลาเนอร์สามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อเด่นประการหนึ่ง ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว โดยใช้กระจกต้นแบบเพียง 1-2 แผ่นเท่านั้น ลวดลายต้นแบบที่ใช้อาจเป็นแบบช่องเดี่ยว (single slit) [4], [37] ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด หรือแบบอินเตอร์ดิจิท (interdigitated) [2], [3], [15], [28] ที่นิยมใช้สร้างกันอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้กระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อนและสอดคล้องกับกระบวนการสร้างเฟท จึงได้รับความสนใจนำไปสร้างเป็นวงจรรวมที่ไว้รับและขยายสัญญาณแสง

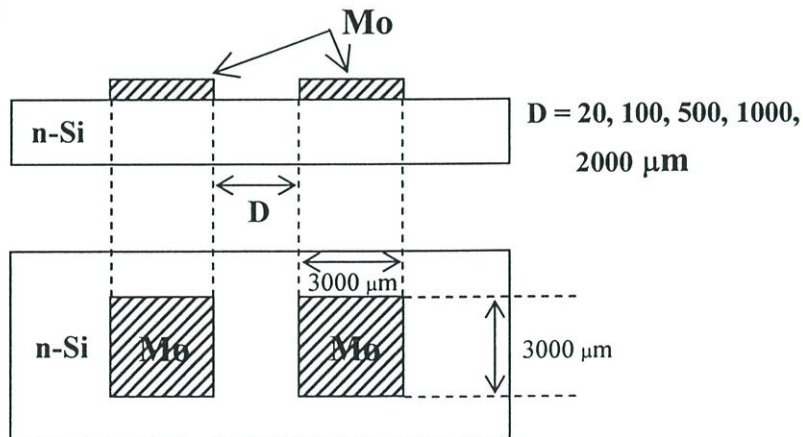
ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะและขนาดของลวดลายต้นแบบ จากต้นแบบนี้้นำไปสร้างโครงสร้าง MSM ซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองของชิ้นงานสร้างจากโลหะโมลิบดีนัม (Mo) ส่วนสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิด n ดังนั้นจึงได้โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นเป็นชนิด Mo/n-Si/Mo จากนั้นกล่าวถึงการทดลองต่างๆ เพื่อให้ทดสอบอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ทางฟิสิกส์ ทางไฟฟ้าและทางแสง

4.1 ลวดลายสำหรับการสร้างชิ้นงาน

กระจกต้นแบบที่ใช้สร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เพียงลวดลายละ 1 แผ่น ซึ่งมีลวดลายเป็นแบบช่องเดี่ยวและอินเตอร์ดิจิท เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าบนแผ่นซิลิคอน มีรายละเอียด คือ

4.1.1 ลวดลายแบบช่องเดี่ยว

รูปที่ 4.1 เป็นลวดลายแบบช่องเดี่ยว โดยออกแบบให้มีขนาดของขั้วไฟฟ้าทั้งสองเป็น $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ($3000 \mu\text{m} \times 3000 \mu\text{m}$) ส่วนระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) มีค่าเป็น $20 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$ และ $2000 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

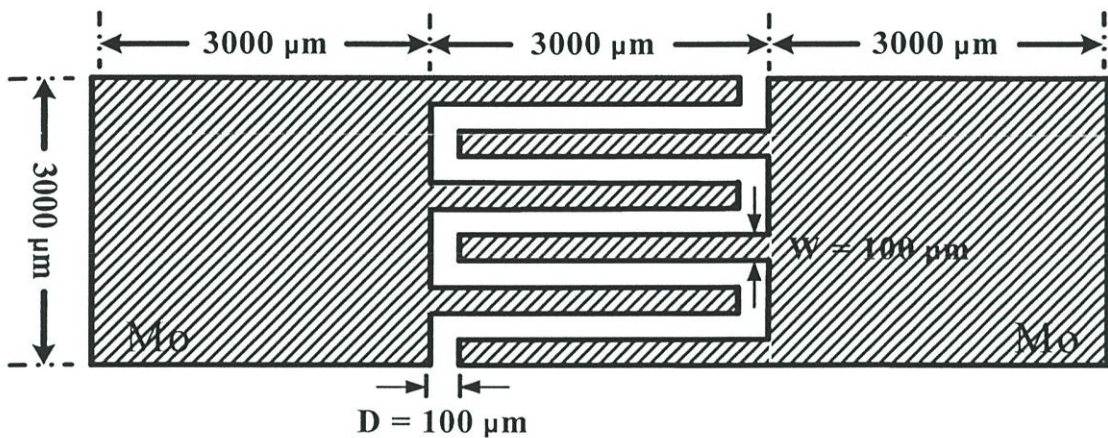


รูปที่ 4.1 ลวดลายต้นแบบที่มีลักษณะเป็นช่องเดี่ยว เพื่อสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด

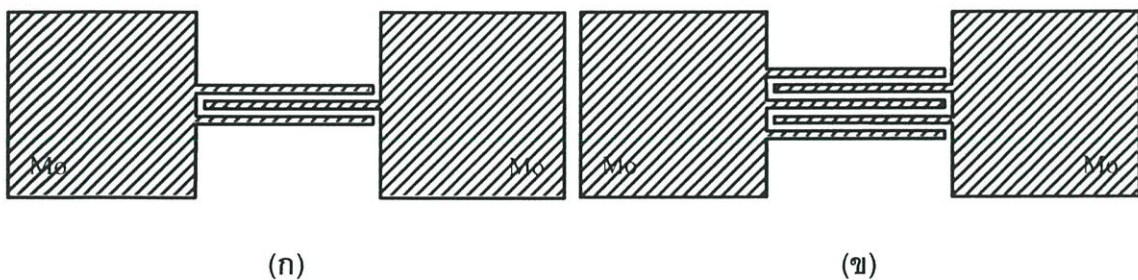
Mo/n-Si/Mo

4.1.2 ลวดลายแบบอินเตอร์ดิคิต

รูปที่ 4.2 เป็นลวดลายแบบอินเตอร์ดิคิต โดยออกแบบให้มีขนาดของขั้วไฟฟ้าทั้งสองเป็น $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ($3000 \text{ } \mu\text{m} \times 3000 \text{ } \mu\text{m}$) ส่วนระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) มีค่าเป็น $100 \text{ } \mu\text{m}$ ตามลำดับ ความกว้างของโลหะในบริเวณรับแสง (W) เท่ากับ $100 \text{ } \mu\text{m}$ สำหรับรูปที่ 4.3 แสดงลวดลายของอินเตอร์ดิคิตแบบ 3 แถบ และแบบ 5 แถบ



รูปที่ 4.2 ลวดลายของต้นแบบที่มีลักษณะเป็นอินเตอร์ดิคิต เพื่อสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo



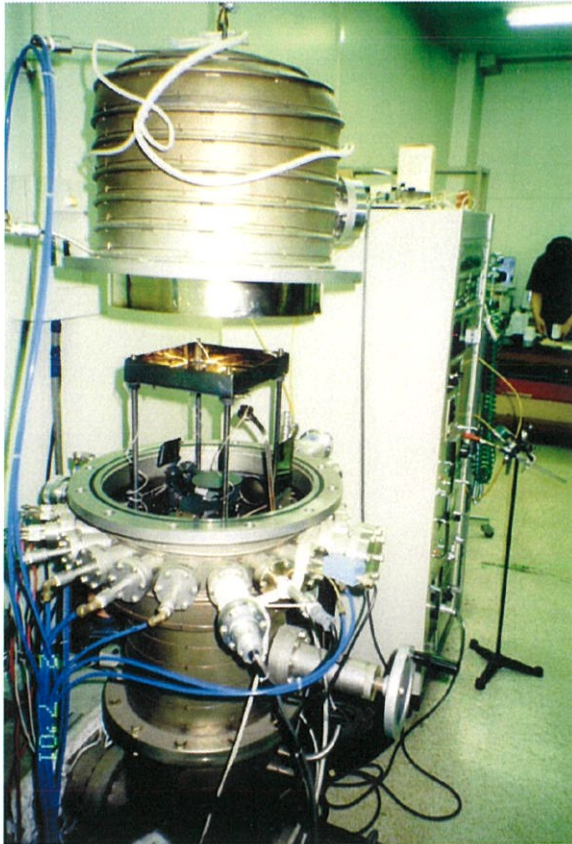
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างลวดลายของต้นแบบที่มีลักษณะเป็นอินเตอร์ดิคิต ซึ่ง $D = 100 \text{ } \mu\text{m}$ และ $W = 100 \text{ } \mu\text{m}$
(ก) แบบ 3 แถบ และ (ข) แบบ 5 แถบ

4.2 กระบวนการสร้าง

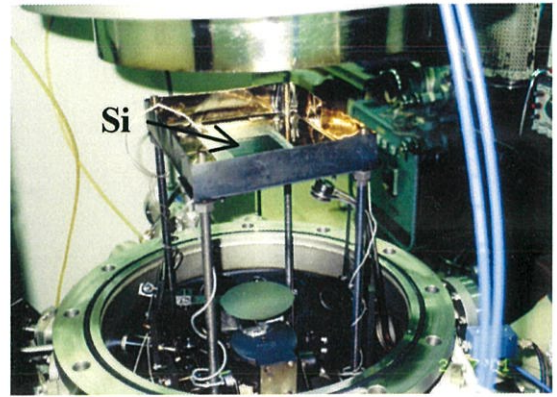
กระบวนการสร้างโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo นี้ จะใช้เทคโนโลยีของซิลิคอนเป็นหลัก ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในปัจจุบันนี้ การสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าจะใช้เทคนิคของโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) แบบมาตรฐานที่ใช้กันโดยทั่วไปในการสร้างวงจรรวม

หลังจากได้กระจกต้นแบบแล้ว ขั้นตอนต่อมาเลือกแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดผลึกเชิงเดี่ยว ระบาย (100) ที่มีค่าสภาพต้านทาน (resistivity) 40-50 Ω -cm และแผ่นผลึกซิลิคอนมีความหนาประมาณ 400 μ m นำมาสร้างเป็นโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo มีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

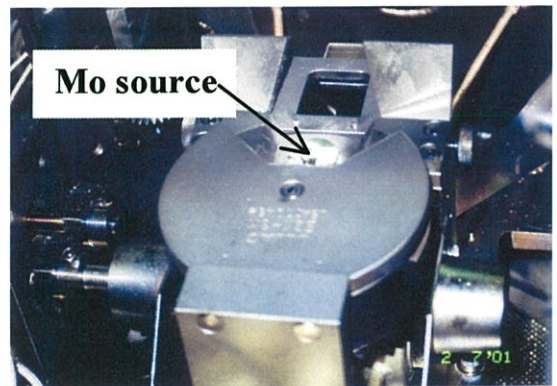
1. ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และไขมัน
2. กำจัดซิลิคอนไดออกไซด์บางที่เกิดขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอน
3. นำแผ่นผลึกซิลิคอนมาเคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม ด้วยเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporator) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ด้วยอัตราการเกิดฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมประมาณ 1.6 $\text{\AA}/\text{s}$ โดยให้มีความหนาของฟิล์มประมาณ 1000 - 1200 \AA



(ก)



(ข)



(ค)

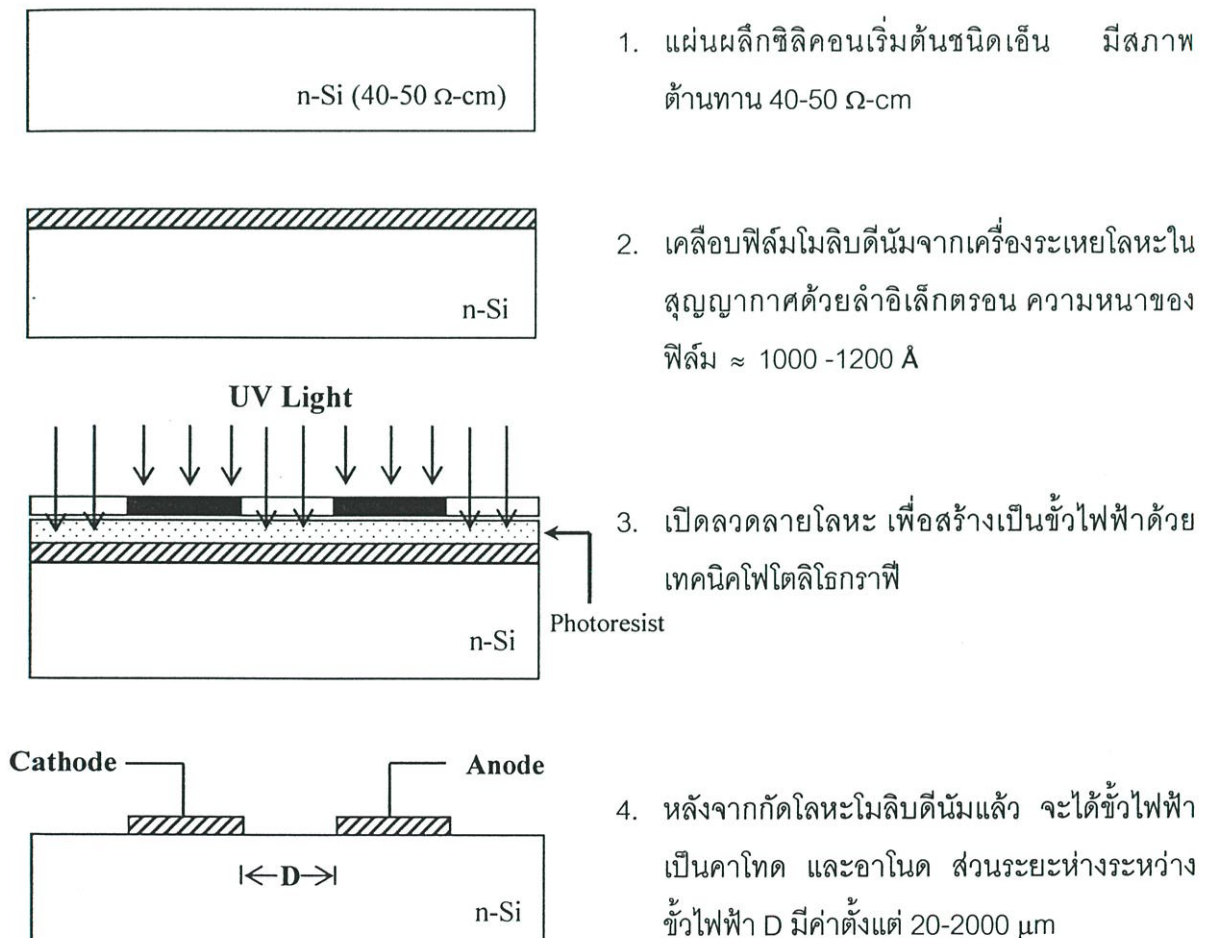
รูปที่ 4.4 (ก) เครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน

(ข) การวางแผ่นผลึกซิลิคอนในเครื่องระเหยโลหะในสุญญากาศแบบใช้ลำอิเล็กตรอน

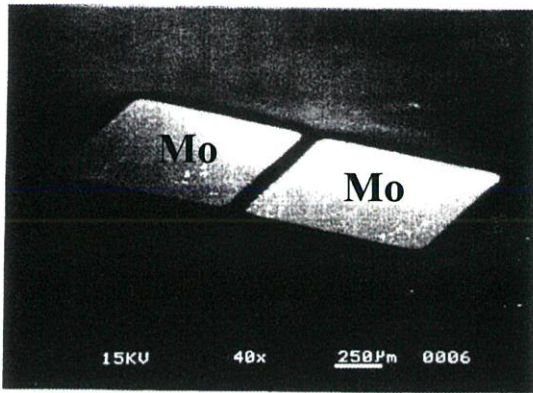
(ค) โลหะโมลิบดีนัม (Mo) ที่ใช้สร้างเป็นขั้วไฟฟ้า

4. นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่เคลือบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมแล้ว มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก เบอร์ AZ P1350
5. หลังจากได้ลวดลายของขั้วไฟฟ้าแล้ว จึงนำมากัดโลหะโมลิบดีนัมในส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ด้วย น้ำยา $\text{HNO}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 : \text{DI}$ ในอัตราส่วน 1 : 5 : 4 จึงเสร็จสิ้นกระบวนการสร้าง

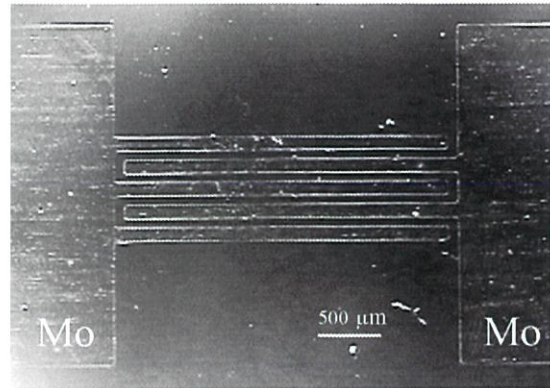
ในรูปที่ 4.5 แสดงภาพวาดภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo และในรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) เป็นภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว ส่วนรูปที่ 4.6 (ค) เป็นชิ้นงานที่เชื่อมต่อขาดด้วยกาวเงิน เพื่อทำการทดสอบต่อไป



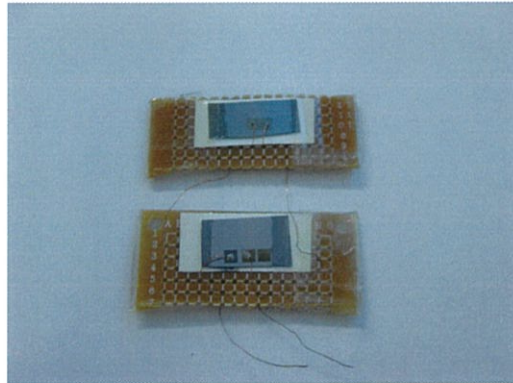
รูปที่ 4.5 กระบวนการสร้างของโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนรี



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมาที่สร้างเสร็จแล้ว

(ก) แบบช่องเดี่ยว

(ข) แบบอินเตอร์ดิจิต 5 แถบ

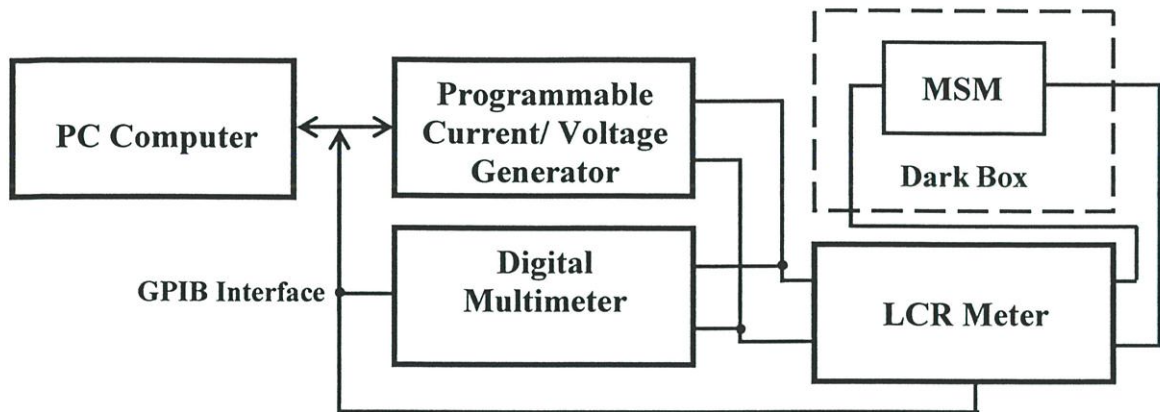
(ค) ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงิน

4.3 การทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo สำหรับผลการทดลองจะกล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป

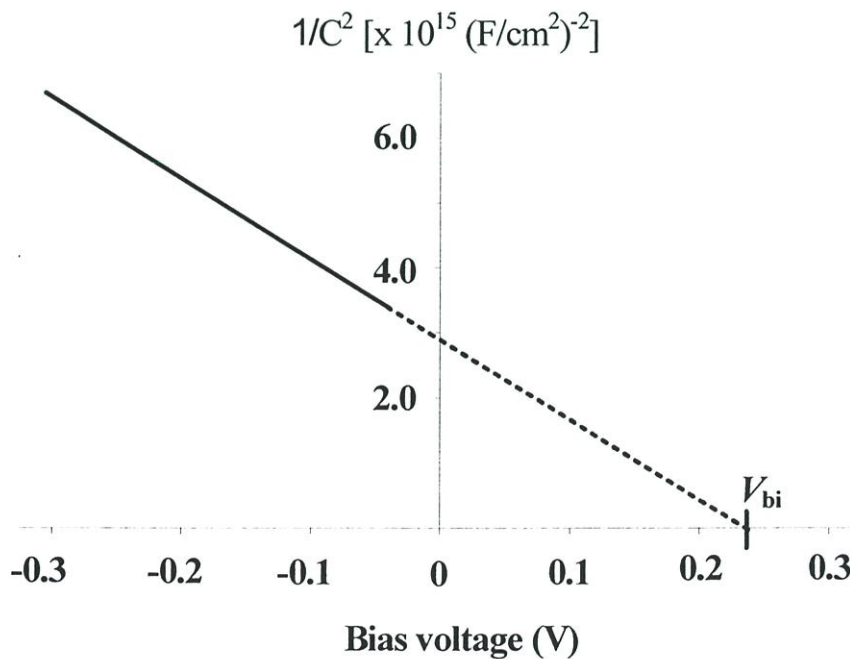
4.3.1 การหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน

นำชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว มาทำการทดลองวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในรูปที่ 4.7 เป็นบล็อกไดอะแกรม แสดงการวัดหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันที่เงื่อนไขไม่ให้แสงแก่ตัวตรวจวัดแสง (dark condition)



รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมของการหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน

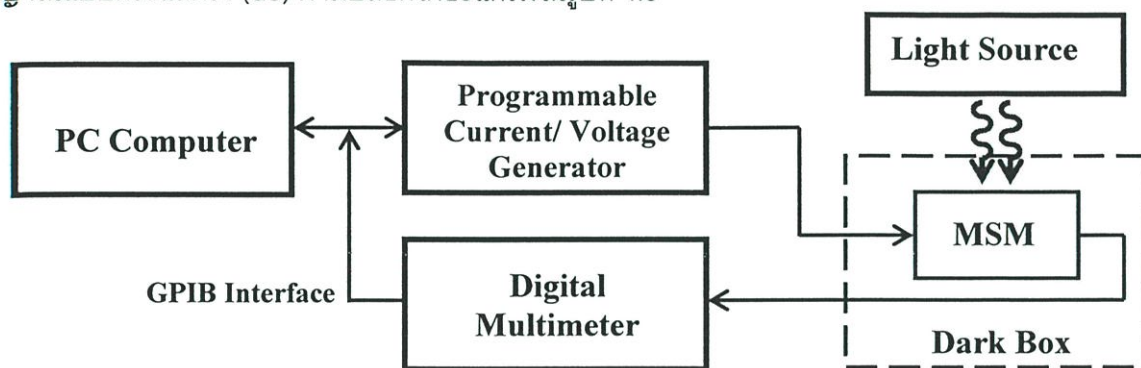
จากนั้นนำค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ทางด้านแรงดันไบแอสบวก หรือลบก็ได้ (เนื่องจากกราฟความจุไฟฟ้า-แรงดันสมมาตรซึ่งกันและกัน) มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อลากเส้นกราฟที่เป็นเส้นตรงไปจนตัดแกนแรงดัน ณ ตำแหน่งที่ตัดแกนแรงดันนั้น จะได้ค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัส และจากค่าแรงดันภายในนี้ สามารถนำไปหาคำนวนหาค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้ต่อไป



รูปที่ 4.8 การหาค่าแรงดันภายในจากลักษณะเฉพาะระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบแอส

4.3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแสงแบบกระแสตรง

นำเอาชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว มาทำการทดลองวัดการตอบสนองทางแสงในลักษณะของสัญญาณแบบกระแสตรง (dc) ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.9

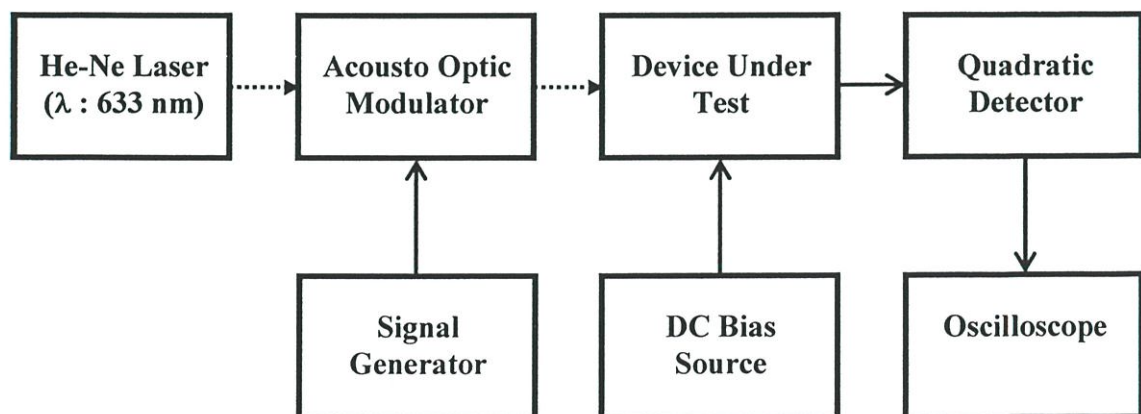


รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมของการวัดสัญญาณทางแสงในลักษณะสัญญาณแบบกระแสตรง

แหล่งจ่ายแสง (light source) ที่ให้แก่ตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo สามารถใช้แสงฮาโลเจนหรือแสงเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ที่มีความยาวคลื่น 633 nm จากนั้นนำความเข้มของกระแสที่วัดได้ไปเขียนเป็นลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันต่อไป

4.3.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแสงแบบกระแสสลับ

นำเอาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo จากหัวข้อการวัดที่ผ่านมา นำมาทำการทดลองวัดการตอบสนองทางแสงในลักษณะของสัญญาณแบบกระแสสลับ (ac) ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมของการวัดสัญญาณทางแสงในลักษณะสัญญาณแบบกระแสสลับ

ในที่นี้แหล่งจ่ายแสงที่ให้แก่ตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo จะใช้ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm และมีมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาดประมาณ 200-400 mV_{p-p} เข้ากับแสง He-Ne เลเซอร์ โดยผ่านอะคูสติกออปติกมอดูเลเตอร์ (Acousto Optic Modulator : AOM) และความถี่ของคลื่นรูปไซน์จะเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 100 Hz-1 MHz จากนั้นนำความสัมพันธ์ของกระแสที่วัดได้ไปเขียนลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันต่อไป ในการทดลองนี้นอกจากเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณรูปไซน์แล้ว ยังมีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานเป็น 200 Ω , 2 k Ω , 20 k Ω และ 200 k Ω ตามลำดับ ด้วย

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากโครงสร้าง MSM แบบพลาแนรี ชนิด Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง [27], [28], [36], [37] โดยผลการทดลองจะนำเสนอการวัดคุณสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ การศึกษาความจุไฟฟ้ากับแรงดัน การวัดคุณสมบัติทางแสงแบบกระแสตรง (dc) การวัดคุณสมบัติทางแสงแบบกระแสสลับ (ac) ด้วยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ต่ำ (จากความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz) การศึกษากระแสแสงกับการเปลี่ยนแปลงโหนดความต้านทานและแรงดันไบแอส และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงการเพิ่มปริมาณกระแสแสงของอุปกรณ์ โดยการออกแบบลวดลายให้เป็นแบบอินเตอร์ดิคทีฟ [28]

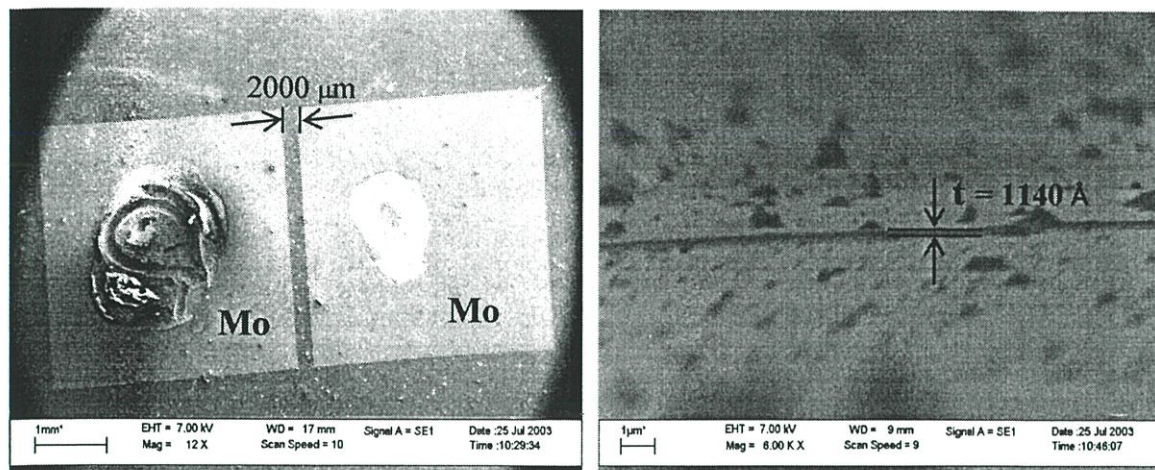
การทดลองทั้งหมดในบทนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ส่วนอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดลองนั้นในการทดลองหัวข้อ 5.1, 5.2, 5.3 และ 5.4 จะใช้อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบช่องเดี่ยวและการทดลองในหัวข้อที่ 5.5 เป็นลวดลายแบบอินเตอร์ดิคทีฟ เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับสัญญาณแสง การทดลองทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การหาความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบกวาด

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของโครงสร้าง MSM

จากกระบวนการสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ดังที่กล่าวในบทที่ 4 แล้วนั้น โลหะโมลิบดีนัมได้ถูกเลือกเป็นขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ดังนั้นฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมจึงมีความแข็งแรงมาก และมีความเชื่อถือในการทำงานสูง [32]-[34] นอกจากนี้ยังสามารถยึดเกาะผิวซิลิคอนได้เป็นอย่างดี ถึงแม้จะไม่ผ่านกระบวนการซินเทอริง (sintering) ซึ่งต่างจากกรณีรอยสัมผัสของอลูมิเนียมกับซิลิคอนจะต้องใช้กระบวนการซินเทอริงเสมอ [46], [47] ส่วนความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมได้ถูกกำหนดให้มีความหนาประมาณ 1000 - 1200 Å และหลังจากสร้างชิ้นงานเสร็จแล้ว จึงนำชิ้นงานไปหาความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning Electron Microscopy : SEM) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.1



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.1 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะ $D = 2000 \mu\text{m}$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด

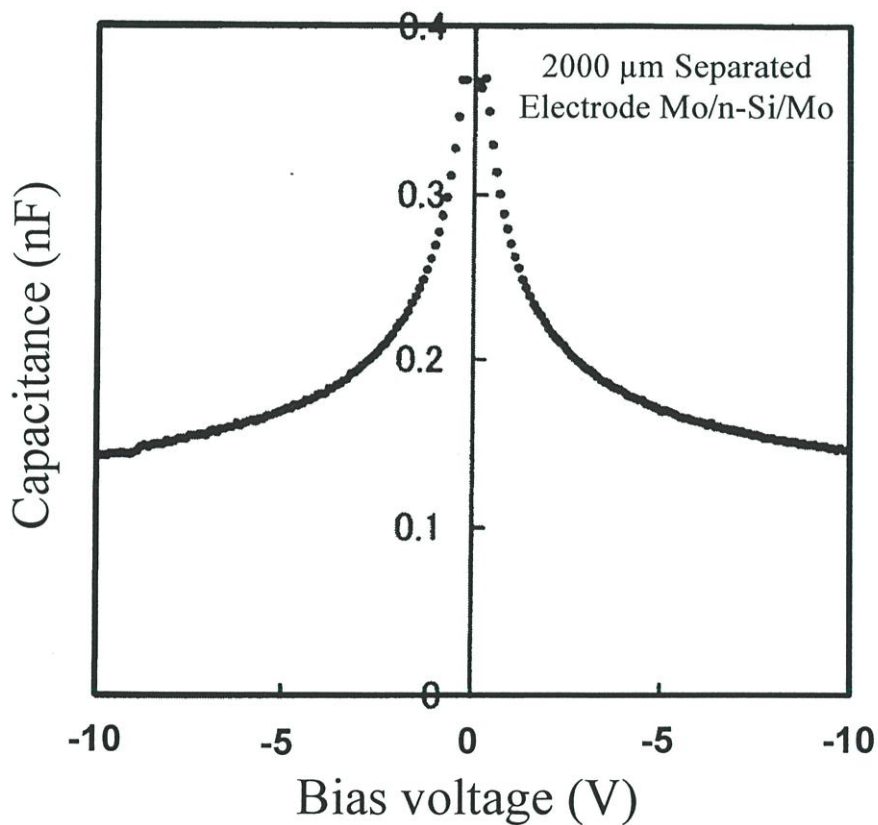
(ข) ความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมประมาณ 1140 \AA

รูปที่ 5.1 (ก) เป็นภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า (D) เท่ากับ $2000 \mu\text{m}$ ส่วนความหนาของฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม แสดงดังในรูปที่ 5 (ข) จากภาพถ่าย SEM ความหนา (t) มีค่าประมาณ 1140 \AA ซึ่งความหนาของโลหะโมลิบดีนัมนี้มีความเหมาะสมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ได้เป็นอย่างดี เพราะเป็นความหนาที่นิยมใช้สร้างตัวตรวจจับแสงต่างๆ ไป ซึ่งจะมีค่าประมาณ $1000\text{-}2000 \text{ \AA}$ [48] และเมื่อนำอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ไปทดสอบด้วยแสงฮาโลเจน โดยสร้างส่วนหน้ากากป้องกันแสงไม่ให้กระทบกับผิวซิลิคอน แต่ให้แสงฮาโลเจนตกกระทบเฉพาะที่บริเวณของขั้วโลหะโมลิบดีนัมเท่านั้น แล้วทำการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน พบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับกระแสมืด หมายความว่าความหนาของขั้วโลหะโมลิบดีนัมที่สร้างขึ้นนี้มีความหนาเพียงพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่ออาการเกิดกระแสไฟฟ้าภายใต้ขั้วไฟฟ้า ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่ออธิบายผลการทดลองในหัวข้อถัดไปได้ โดยทั่วไปแล้วจะเรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า "โครงสร้าง MSM ที่ตอบสนองสัญญาณแสงที่ผิวซิลิคอน ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า (blocking MSM structure)"

5.2 การหาลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเปลี่ยนแรงดันไบแอส ที่สภาวะมืด (dark condition) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบบตัวอุปกรณ์

นำเอาอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะ $D = 2000 \mu\text{m}$ มาทำการทดลอง เพื่อหาความจุไฟฟ้าแฝง (จากบริเวณปลอดภัย) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แสดงให้เห็นถึงความสมมาตรกัน และความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส

จากรูปที่ 5.2 แสดงว่าลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันมีความสมมาตรกัน ความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส ซึ่งลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันนี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดโดย Sze et al. [13] ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.13) และ (3.14) และจากกราฟในรูปที่ 5.2 ที่แรงดันไบแอสประมาณ 10 V ซึ่งเป็นแรงดัน

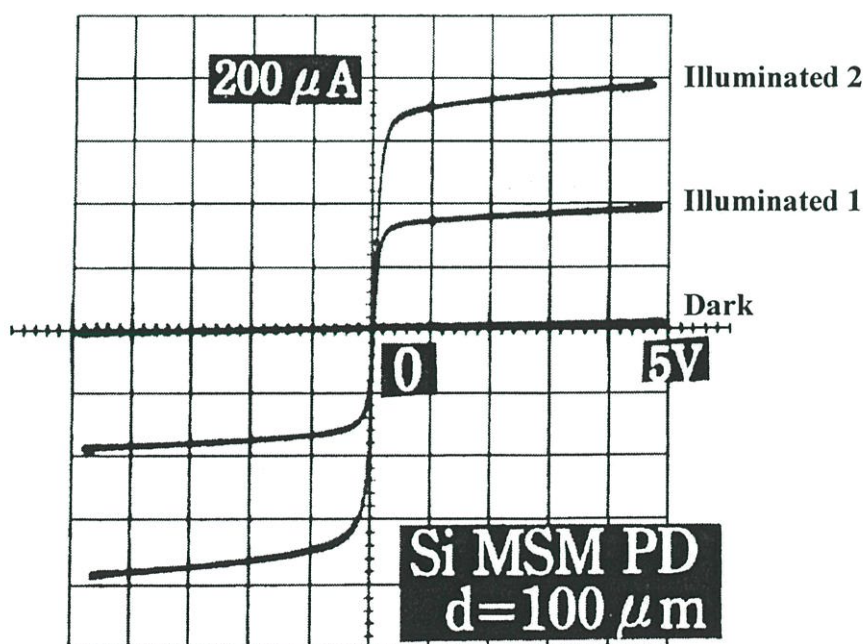
ที่บ่อนให้แก่อุปกรณ์ในระหว่างที่นำไปทำการทดลอง ความจุไฟฟ้ามีค่าประมาณ 140 pF อย่างไรก็ตาม จากลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันนี้ สามารถนำไปวิเคราะห์ เพื่อหาค่าแรงดันภายใน และความหนาแน่นอะตอมสารเจือของแผ่นซิลิคอนเริ่มต้นได้ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 6.3 ของบทที่ 6

5.3 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแสตรง (dc)

วัตถุประสงค์ของการทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อทราบถึงเทคนิคการตรวจวัดแสงในลักษณะสัญญาณแบบ dc ซึ่งทำให้ทราบถึงขีดความสามารถในการตรวจวัดความเข้มแสงอย่างง่าย ๆ เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันสองชนิด คือ (1) หลอดฮาโลเจน และ (2) He-Ne เลเซอร์

5.3.1 การหาลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์

นำตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการทดสอบ เพื่อวัดความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งจ่ายแสงและใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องแสดงผลการทดลอง ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน แสดงในรูปที่ 5.3

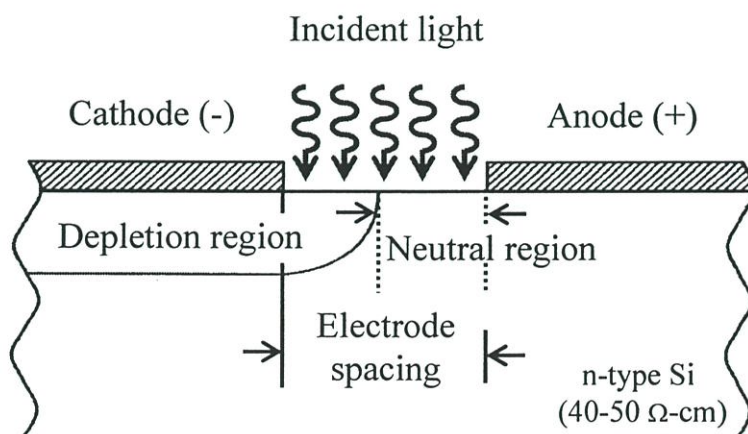


รูปที่ 5.3 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ซึ่งได้จากเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.3 เป็นอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $100\ \mu\text{m}$ พบว่าลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันเป็นแบบสมมาตร ซึ่งเป็นมาผลจากโครงสร้างของขีตก็แบริเออร์สองตัวที่เชื่อมต่อกันในลักษณะหันหลังชนกันและเป็นข้อดีข้อหนึ่งของโครงสร้าง MSM ที่ไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับขั้วของแรงดันไบแอส กระแสมีค่าต่ำอยู่ในระดับ 1 - 2 ไมโครแอมแปร์ ความสูงของกำแพงศักย์ของขีตก็แบริเออร์ (Mo/n-Si) จะมีค่าระหว่าง $0.65 - 0.68\ \text{eV}$ [34] และเมื่อฉายแสงฮาโลเจนตกกระทบกับตัว Mo/n-Si/Mo อุปกรณ์สามารถเปลี่ยนความเข้มแสงของ Illuminated I ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ $100\ \mu\text{A}$ ($V_{\text{bias}} \approx 5\text{V}$) และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงเป็น Illuminated II จะได้กระแสไฟฟ้าประมาณ $200\ \mu\text{A}$ ($V_{\text{bias}} \approx 5\text{V}$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถนำโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo มาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงได้

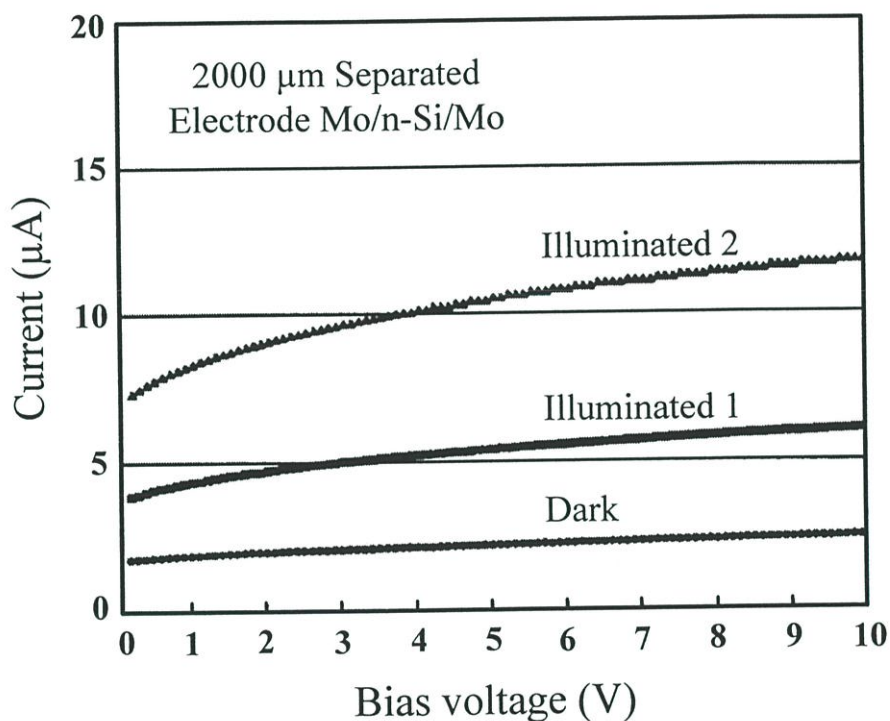
5.3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้าง หมายถึงโครงสร้าง MSM เมื่อให้แรงดันไบแอสแล้วบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นไม่ขยายไปครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมด และยังมีส่วนของบริเวณนิวทรัลเหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ซึ่งจะต่างกับโครงสร้าง MSM โดยทั่วไปที่ต้องการสร้างให้ระยะห่างขั้วไฟฟ้าแคบมากๆ และเมื่อให้แรงดันไบแอสแล้วจะมีส่วนของบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าไว้ทั้งหมด (fully depleted between electrodes)



รูปที่ 5.4 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง หลังจากให้แรงดันไบแอสที่ขั้วคาโทดเป็นลบ และขั้วแอโนดเป็นบวก และยังมีพบส่วนของบริเวณนิวทรัลเหลืออยู่

นำอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2000 μm มาทำการทดลองตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.2 โดยใช้ He-Ne เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ และเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงค่าต่างๆ ด้วยกระจก ND ฟิลเตอร์ (ND filter mirror) ซึ่งวางไว้ระหว่าง He-Ne เลเซอร์กับกล่องป้องกันแสง (dark box) สำหรับลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของความเข้มแสงค่าต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันไบแอส เมื่อให้ความเข้มแสงที่แตกต่างกันตดกกระทบบนอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2000 μm

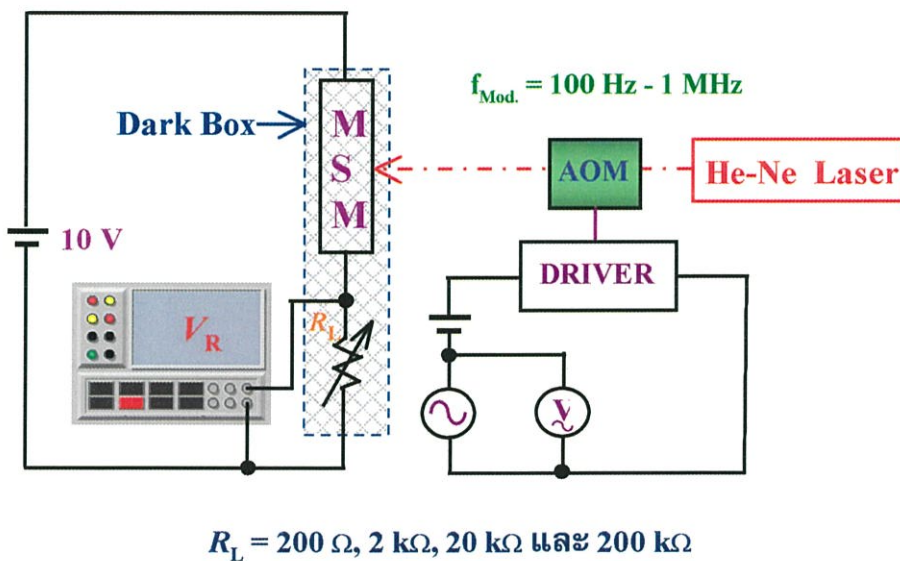
กราฟลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่แสดงในรูปที่ 5.5 พบว่าเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้นจะได้รับกระแสไฟฟ้ามากขึ้น และถ้าให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเข้มแสงมีค่าคงที่กระแสไฟฟ้าที่ได้รับจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ในการทดลองนี้ พบว่าถึงแม้ว่าจะใช้แสงตดกกระทบบจาก He-Ne เลเซอร์ (0.6 mW) ซึ่งมีกำลังงานต่ำกว่าแสงจากฮาโลเจนมาก (ระดับหลายสิบลวัตต์ และเครื่องสามารถจ่ายกำลังได้สูงสุดถึง 150 W) แต่ยังสามารถตรวจวัดความเข้มแสงได้ดี ซึ่งคาดได้ว่าถ้าให้สัญญาณ ac มอดูเลทเข้ากับแสงของ He-Ne เลเซอร์แล้ว ตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo น่าจะทำงานตรวจวัดสัญญาณ ac นี้ได้เป็นอย่างดีด้วย สำหรับข้อมูลที่ได้จากกราฟในรูปที่ 5.5 จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป

5.4 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ในลักษณะสัญญาณแบบกระแสสลับ (ac)

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ทราบถึงเทคนิคการตรวจวัดแสงในลักษณะสัญญาณแบบ ac โดยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sinusoidally waveform) เข้ากับแสงของ He-Ne เลเซอร์ แล้วนำไปทดสอบกับอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่สร้างขึ้นมา ซึ่งได้ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปกับความถี่ของคลื่นรูปไซน์

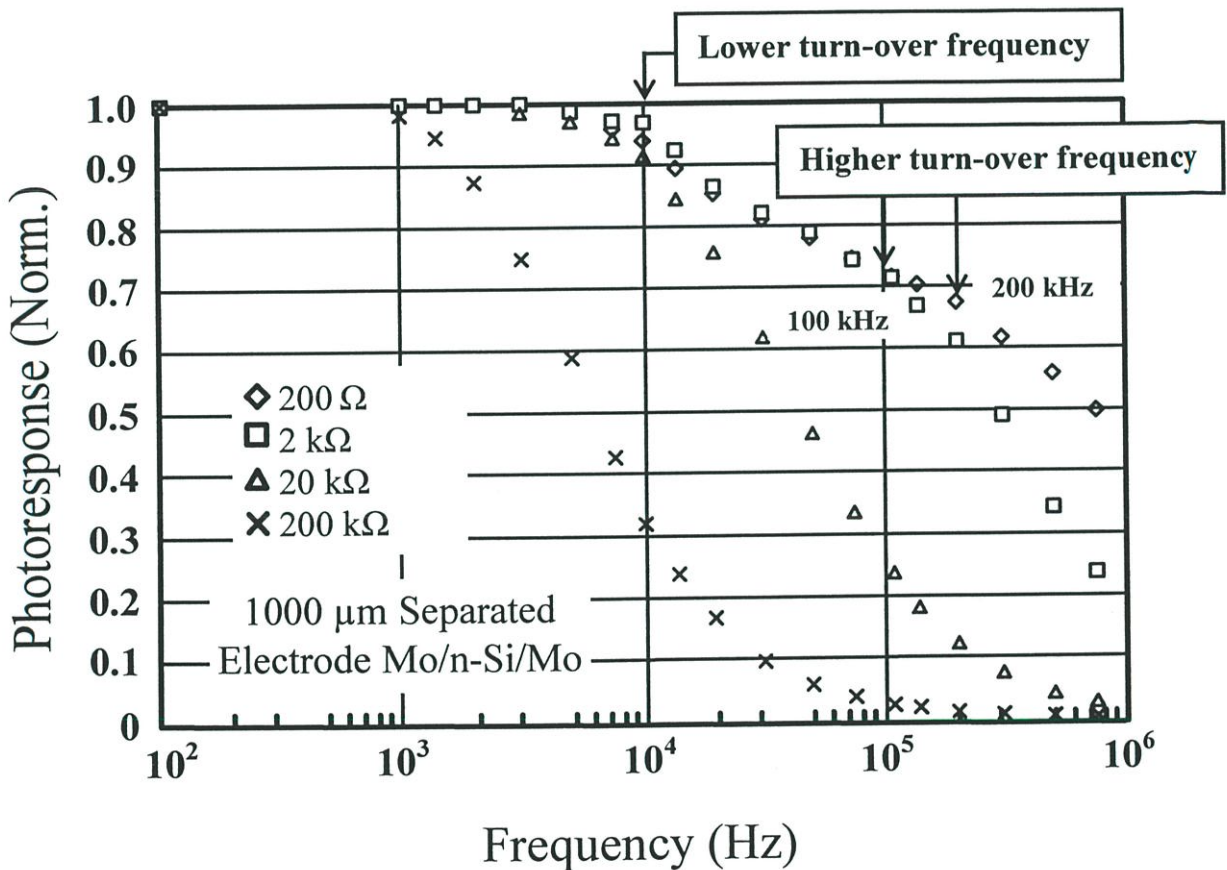
การตอบสนองสัญญาณแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง นำอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo มาทำการทดลองสัญญาณแสงในลักษณะสัญญาณแบบ ac โดยต่อชุดทดลองตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.10 ของหัวข้อ 4.3.3 เพื่อหาการตอบสนองสัญญาณแสงของ He-Ne เลเซอร์ที่มีการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยผ่านอะคูสโตออปติกมอดูเลเตอร์ (AOM) สำหรับความถี่ของคลื่นรูปไซน์จะเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 100 Hz-1 MHz ดังแผนภาพในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แผนภาพชุดเครื่องมือทดลองเพื่อหาการตอบสนองสัญญาณทางแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.7 แสดงการตอบสนองทางแสง สำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1000 μm และนำโหนดความต้านทานมาต่อเชื่อมกับอุปกรณ์แบบอนุกรม โดยให้โหนดความต้านทานเป็นตัวพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจาก 200 Ω ถึง 200 k Ω โดยให้แกนตั้งของกราฟเป็นสัญญาณการตอบสนองของโหนดความต้านทานที่ถูกระบุโดยนอร์มอลไรซ์ (normalized) เนื่องจากสัญญาณแสง ส่วนแกนนอนเป็นแกนของความถี่ตั้งแต่ 100 Hz-1 MHz ในรูปที่ 5.7 นี้เส้นกราฟของโหนดความต้านทานที่มีค่าน้อย

ความถี่เทิร์นโอเวอร์ (turn-over frequency)¹ จะมี 2 ค่า กล่าวคือ ในกรณีของเส้นกราฟที่มีโหลดความต้านทานเป็น 200 Ω ความถี่เทิร์นโอเวอร์อยู่ที่ประมาณ 10 และ 200 kHz โดยความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่าน้อยจะถูกเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าต่ำ (Lower Turn-over Frequency : LTF) ในที่นี้มีค่าประมาณ 10 kHz ในส่วนความถี่เทิร์นโอเวอร์ที่มีค่ามากจะเรียกว่า ความถี่เทิร์นโอเวอร์ค่าสูง (Higher Turn-over Frequency : HTF) และมีค่าประมาณ 200 kHz ส่วนกราฟของโหลดความต้านทาน 2 $k\Omega$ จะพบความถี่ LTF อยู่ที่ประมาณ 10 kHz และความถี่ HTF มีค่าประมาณ 100 kHz



รูปที่ 5.7 การตอบสนองสัญญาณแสงของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่มีขนาดของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1000 μm และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดความต้านทาน (R_L) ระหว่าง 200 Ω , 2 $k\Omega$, 20 $k\Omega$ และ 200 $k\Omega$

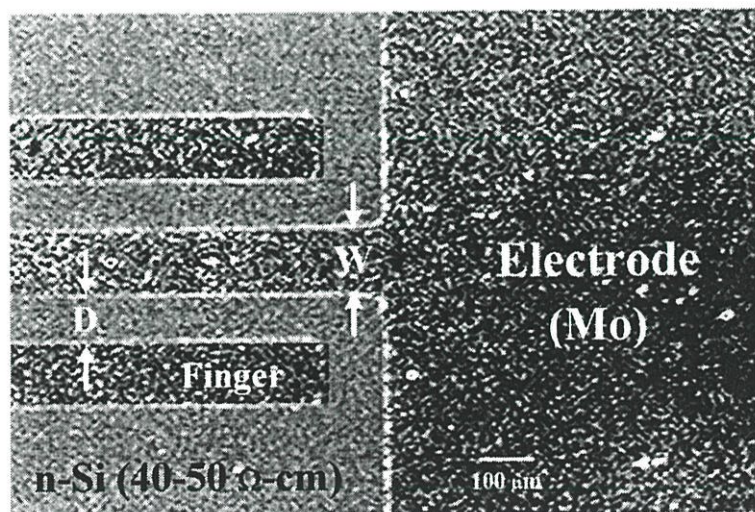
¹ ความถี่เทิร์นโอเวอร์ หมายถึง ความถี่ที่ทำให้สัญญาณการตอบสนองทางแสง (กระแสแสง หรือแรงดัน) มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจนสามารถสังเกตได้

ผลการทดลองที่อธิบายไว้ข้างต้นทำให้ทราบว่า ในกรณีความถี่ LTF จะมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าโหลดความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปจาก 200 Ω เป็น 2 k Ω ก็ตาม จะแตกต่างกับกรณีของความถี่ HTF โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 200 kHz เป็น 100 kHz เมื่อโหลดความต้านทานมีค่าเป็น 200 Ω และ 2 k Ω ตามลำดับ

แต่ถ้าให้โหลดความต้านทานมีค่ามากขึ้นเป็น 20 k Ω และ 200 k Ω พบว่าสัญญาณการตอบสนองทางแสงที่ได้จะแตกต่างออกไป จะมีความถี่เทิร์นโอเวอร์เพียงค่าเดียวเท่านั้น และขนาดสัญญาณที่ได้จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าให้โหลดความต้านทานมีค่าสูงมากๆ

5.5 การวัดสัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต

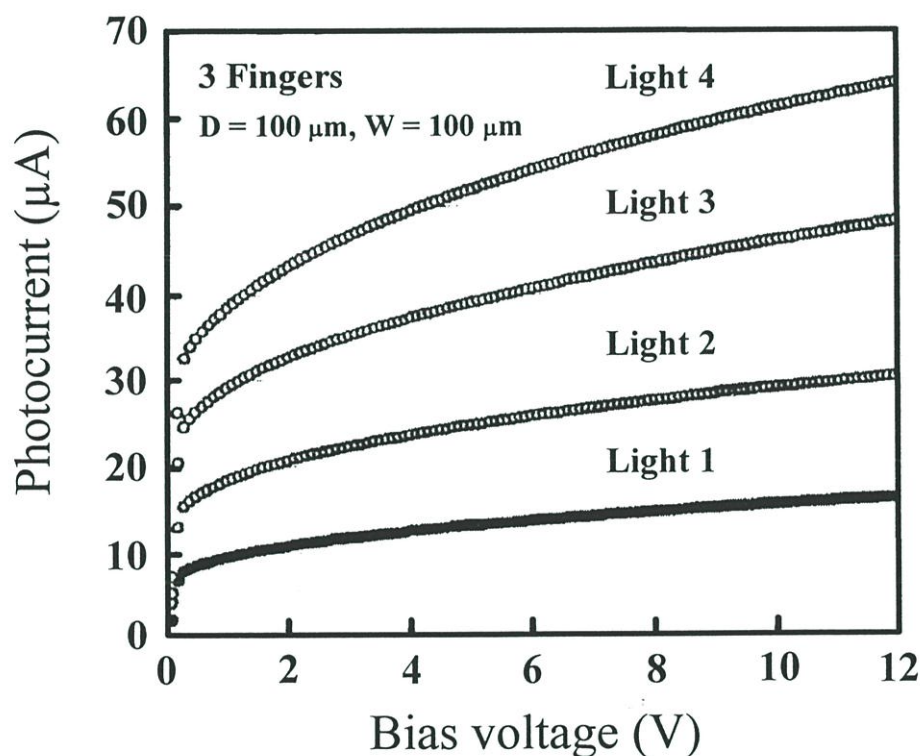
การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรับสัญญาณแสง ทำให้ได้รับกระแสแสงเพิ่มขึ้น โดยการสร้างตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ให้มีลักษณะลวดลายเป็นแบบอินเตอร์ดิจิต ในกรณีนี้จะมีปริมาณของพื้นที่รับแสงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นภาพถ่ายที่ขยายให้เห็นส่วนของพื้นที่รับแสง (D) มีความกว้าง 100 μm และส่วนระยะความกว้าง (W) ของแถบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม หรืออาจเรียกว่า ฟิงเกอร์ (finger) มีความกว้าง 100 μm เท่ากัน และในภาพนี้แสดงให้เห็นแถบฟิล์มโลหะโมลิบดีนัมจำนวน 3 แถบ



รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตแบบ 3 แถบ (หรือ 3 ฟิงเกอร์)

5.5.1 ลักษณะเฉพาะแบบกระแสตรง

นำอุปกรณ์มาทำการทดลองตามบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 4.9 ในหัวข้อที่ 4.3.2 ซึ่งเป็นการทดลองแบบ dc เนื่องจากส่วนรับแสงของตัวอุปกรณ์มีขนาดใหญ่กว่าแบบช่องเดี่ยว ดังนั้นจึงเพิ่มเติมส่วนของ ND ฟิลเตอร์ (Neutral Density filter : ND filter) เพื่อเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของแสง และเลนส์ขยาย (expander len) เพื่อให้แสงตกกระทบคลุมบริเวณพื้นที่รับแสงทั้งหมด

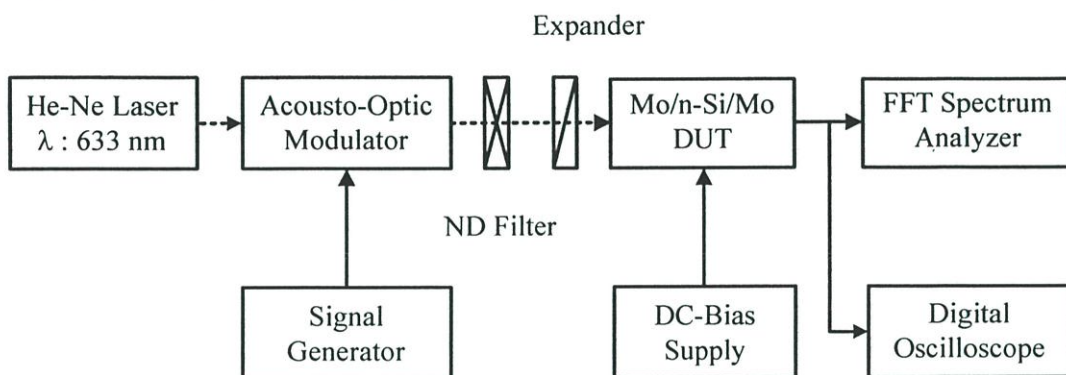


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบอินเตอร์ดิคทีฟที่มี 3 แถบ ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

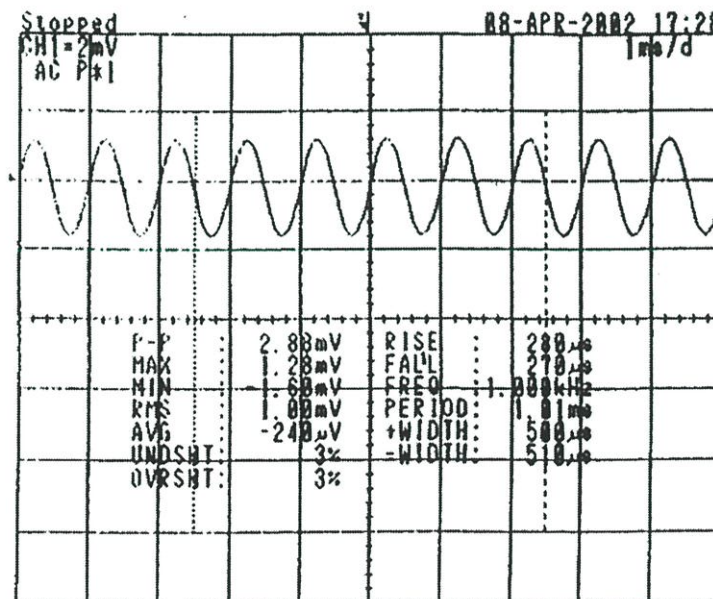
ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.9 เป็นลักษณะเฉพาะของกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์แบบอินเตอร์ดิคทีฟที่มี 3 แถบ ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันในรูปนี้มีลักษณะในการทำงานเหมือนกับลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของหลอดลายแบบช่องเดี่ยวที่แสดงในรูปที่ 5.5 อย่างไรก็ตามกระแสแสงที่แสดงในรูปที่ 5.9 จะมีค่ามากกว่า เพราะว่ามีส่วนของพื้นที่รับแสงมากกว่านั่นเอง และเพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดของผลการทดลองให้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นเราจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองของกราฟรูปนี้อีกครั้งในหัวข้อที่ 6.4 ของบทที่ 6

5.5.2 ลักษณะเฉพาะแบบกระแสลับ

นำอุปกรณ์มาทำการทดลองคล้ายกับบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 4.10 ในหัวข้อที่ 4.3.3 ซึ่งเป็นการทดลองแบบ ac แต่เพิ่มเติมส่วนของ ND ฟิลเตอร์ (Neutral Density filter : ND filter) และเลนซ์ขยาย (expander len) ดังแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.10 ส่วนการวิเคราะห์ผลจะใช้ฮอสทิลโลสโคปแบบดิจิตอล และเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการเปลี่ยนแปลงแบบ FFT (FFT spectrum analyzer) สำหรับช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 1-20 kHz

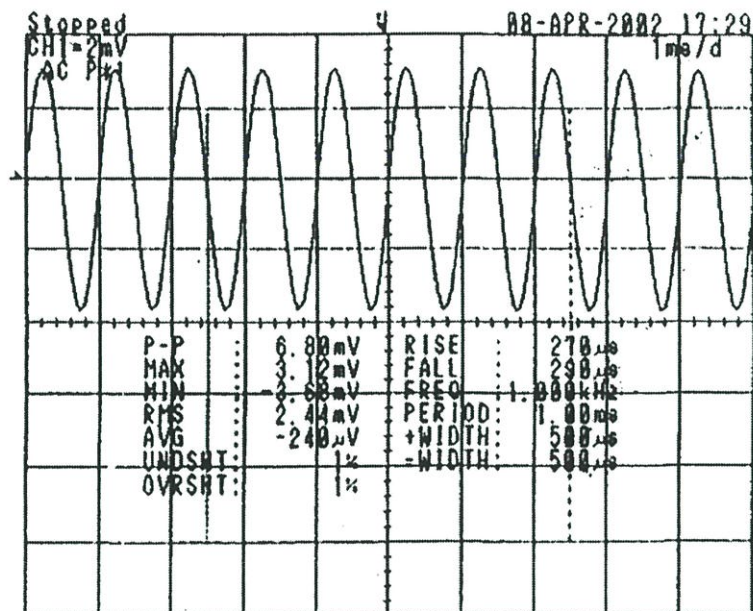


รูปที่ 5.10 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองการตอบสนองของความถี่ต่ำที่อยู่ระหว่าง 1-20 kHz ของ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต



(ก) $V = 1 \text{ V}$

รูปที่ 5.11 เส้นกราฟจากฮอสทิลโลสโคปของการตีמודเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 1 kHz ในโดเมนเวลาของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ ที่แรงดันไบแอส (ก) 1 V และ (ข) 20 V

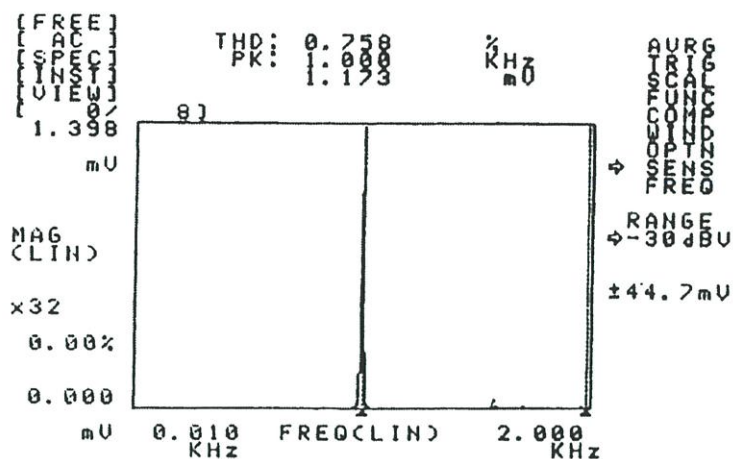
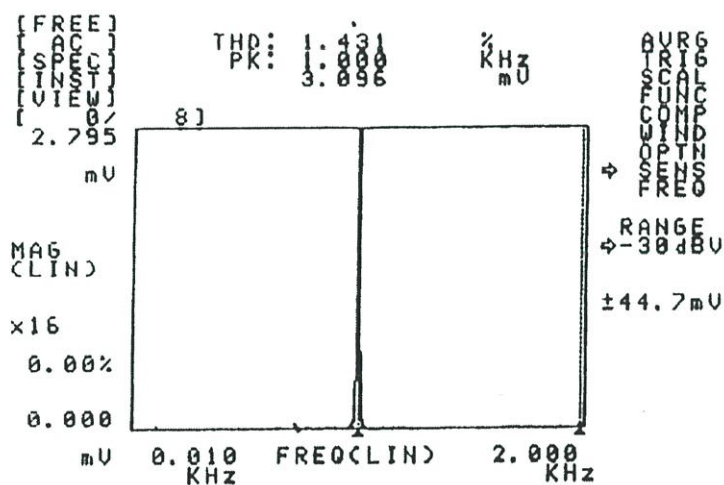
(ข) $V = 20\text{ V}$

รูปที่ 5.11 (ต่อ) เส้นกราฟจากออสซิลโลสโคปของการดีมอดูเลทของสัญญาณรูปคลื่นที่ 1 kHz ในโดเมนเวลาของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ ที่แรงดันไบแอส (ก) 1 V และ (ข) 20 V

ในรูปที่ 5.11 (ก) และ (ข) แสดงสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป (ที่ความถี่ : 1 kHz) ของอุปกรณ์ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ และให้แรงดันไบแอส 2 ค่า คือ 1 V และ 20 V ตามลำดับ ในรูปที่ 5.11 ขนาดของสัญญาณดีมอดูเลท (demodulate) เพิ่มขึ้นจาก 2.88 mV_{p-p} ที่แรงดันไบแอส $V = 1\text{ V}$ เป็น 6.80 mV_{p-p} ที่แรงดันไบแอส $V = 20\text{ V}$ เป็นผลกระทบในลักษณะของไอริส (iris effect) ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2 ของบทที่ 6

เพื่อทดสอบถึงผลกระทบของสปูริยัส¹ (spurious effect) ของกระบวนการดีมอดูเลท เราจะสังเกตจากการกระจายความถี่ของสัญญาณของรูปคลื่นของเริ่มต้น และสัญญาณจากการดีมอดูเลท โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบ FFT ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.12 (ก) และ (ข) เป็นเส้นสเปกตรัมจากอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ สำหรับแรงดันไบแอส 1 V และ 20 V ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงเฉพาะขนาด จากข้อมูลที่ได้เสนอนี้ไม่พบผลกระทบของสปูริยัส เนื่องจากการ

¹ ผลกระทบของสปูริยัส หรือสปูริยัสมอดูเลชัน (spurious modulation) หมายถึง การมอดูเลทที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในวงจรออสซิลเลเตอร์ เช่น การมอดูเลทแบบความถี่ที่มีสาเหตุจากการสั่นทางกล [49]

(ก) $V = 1 \text{ V}$ (ข) $V = 20 \text{ V}$

รูปที่ 5.12 เส้นสเปกตรัมของสัญญาณติมอดูเลทที่แรงดันไบแอส (ก) $V = 1 \text{ V}$ และ (ข) $V = 20 \text{ V}$ ที่ความถี่ 1 kHz ของอุปกรณ์ตัวเดียวกันกับที่แสดงผลในรูปที่ 5.11 ในโดเมนความถี่ ซึ่งวัดจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบ FFT

เปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส จึงอาจกล่าวได้ว่า เส้นสเปกตรัมที่ได้ไม่มีผลกระทบของสปูเรียสจากกระบวนการติมอดูเลทของสัญญาณมอดูเลทคลื่นรูปไซน์ จากการสังเกตทั้งโดเมนเวลาและความถี่

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ ทำให้เราเข้าใจถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ด้วยการเพิ่มกระแสแสงจากหลอดลายแบบอินเตอร์ดิฟิเรต อย่างไรก็ตามจากการสร้างหลอดลายแบบนี้จะทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อบางอย่างเกิดขึ้น ดังเช่น ในการทดลองต้องใช้เลนส์ขยาย

ช่วย เพื่อให้แสงตกกระทบบนตัวอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ เป็นต้น และจากผลการทดลองยังช่วยยืนยันถึง ผลกระทบของคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ไอริส ถึงแม้ว่าจะออกแบบให้มีโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิฟิเรกซ์ก็ตาม นอกจากนี้จากการทดลองยังไม่พบผลกระทบของความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากกระบวนการตีมอดูเลท เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมของการตีมอดูเลทของอุปกรณ์ที่ถูก ทดสอบ

บทที่ 6

การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง

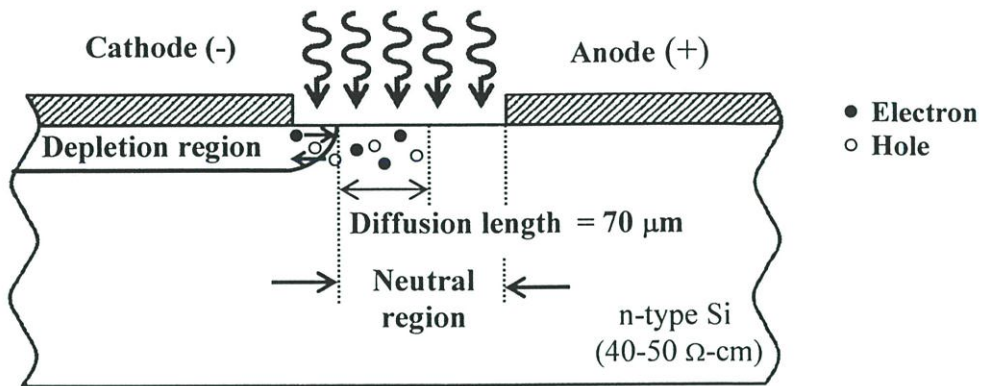
ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองที่แสดงไว้ในบทที่ 5 ของโครงสร้าง MSM แบบพลาแนร์ ชนิด Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ผลจากการวิเคราะห์นี้ทำให้เราได้แบบจำลองอย่างง่าย เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ ซึ่งทำให้เข้าใจถึงกลไกการทำงานของพาหะอิสระที่เกิดขึ้นในขณะที่อุปกรณ์ได้รับแสงตกกระทบ และผลจากการวิเคราะห์ที่ยืนยันถึงความถูกต้องของแนวความคิดริเริ่มนี้ด้วย การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองทั้งหมดในบทนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 การวิเคราะห์สัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo จากลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันแบบกระแสสลับ เพื่อหาวงจรมูลอย่างง่าย สำหรับอธิบายการตอบสนองสัญญาณแสงความถี่ต่ำของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง [27], [36], [37], [41]

จากการทดลองที่ 5.4 ซึ่งแสดงการวัดการตอบสนองสัญญาณแสงในลักษณะสัญญาณแบบกระแสสลับ เส้นสเปกตรัมจากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.7 (หน้าที่ 57) ทำให้สามารถสันนิษฐานได้ว่า อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง น่าจะมีส่วนประกอบของกระแสแสง 2 ชนิด คือ กระแสแสงแบบโฟโตไดโอด และแบบโฟโตคอนดักเตอร์ [27], [36], [37] และเพื่อจะอธิบายถึงพฤติกรรมของส่วนประกอบของกระแสแสงทั้งสองแบบนี้ ขอให้พิจารณาในรูปที่ 6.1 เมื่อให้แรงดันไบแอสกับรอยสัมผัสโลหะโมลิบดีนัมและซิลิคอนด้านที่ถูกไบแอสย้อนกลับ (ขั้วคาโทด) จะเกิดบริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไบแอส¹ แต่ในกรณีของด้านที่ได้รับไบแอสตรง (ขั้วแอโนด) ประเมินได้ว่ามีบริเวณปลอดพาหะที่แคบมาก ซึ่งในกรณีของเราจะไม่นำมาพิจารณาด้วย ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นกับรอยสัมผัสที่ขั้วคาโทดเท่านั้น

เมื่อพิจารณาที่ผิวของซิลิคอนที่บริเวณระยะห่างขั้วไฟฟ้าพบว่านอกจากเกิดบริเวณปลอดพาหะแล้ว ยังมีบริเวณนิวทรัล ซึ่งอยู่ถัดจากขอบบริเวณปลอดพาหะไปจนกระทั่งถึงขอบโลหะโมลิบดีนัมของรอยสัมผัสที่ขั้วแอโนด ซึ่งมีความกว้างมากกว่าบริเวณปลอดพาหะ และเมื่อฉายแสงลงบนผิวหน้าของอุปกรณ์

¹ ในการทดลองนี้ให้แรงดันไบแอสคงที่ 10 V

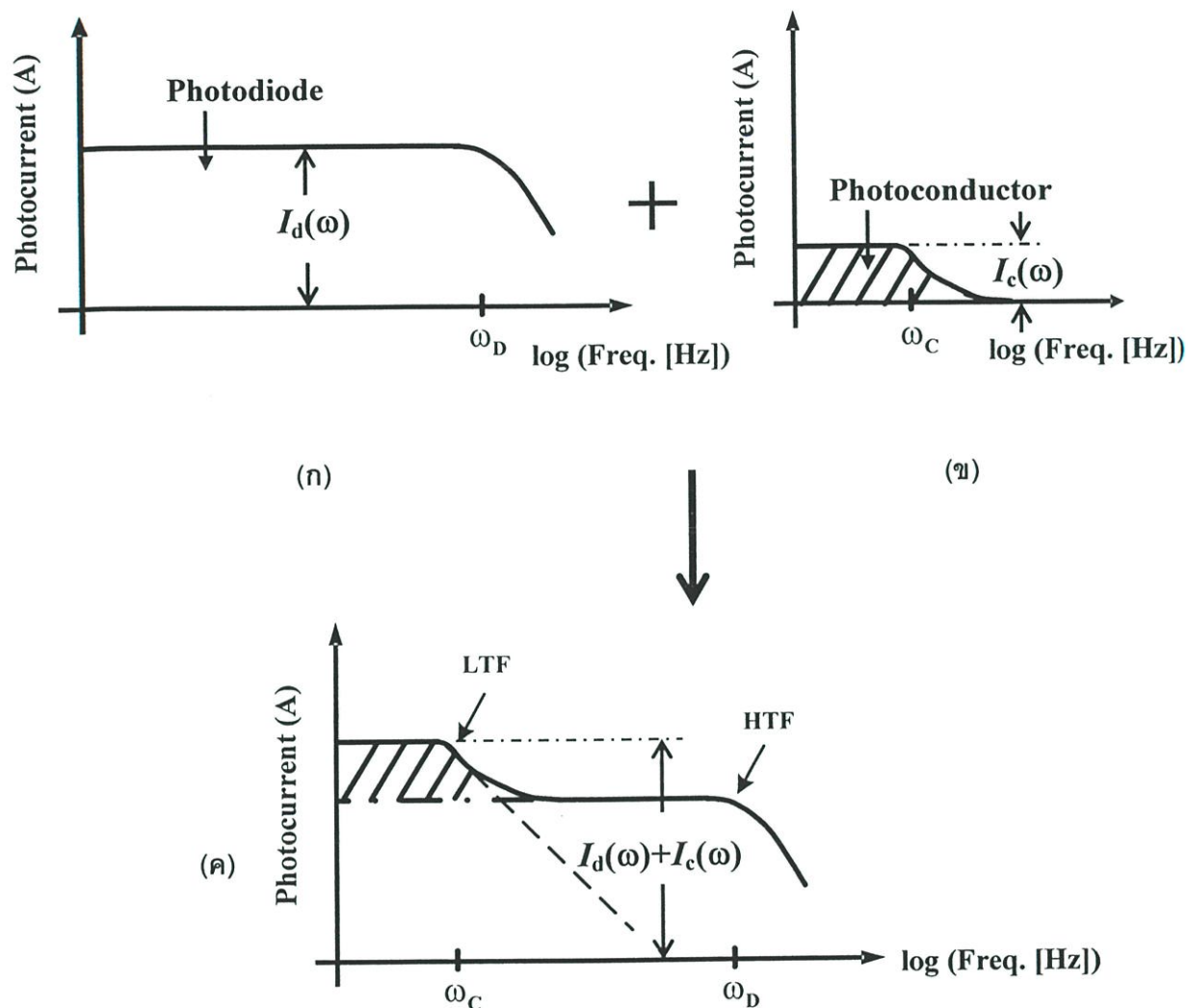


รูปที่ 6.1 การเกิดพาหะอิสระของโครงสร้าง Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง จากแสงตกกระทบบน ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลของอุปกรณ์

จะทำให้เกิดพาหะอิสระขึ้นและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลไปยังวงจรรภายนอก พาหะอิสระที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงตกกระทบบนสามารถพิจารณาการเกิดได้ 2 แบบ ซึ่งต่างจากที่เคยกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2 โดยแบบที่ (1) เกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ พาหะอิสระที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนกับการเกิดในตัวตรวจวัดแสงแบบ p-i-n โฟโตไดโอด ซึ่งพาหะอิสระนี้จะเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วจากผลของสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ จึงเรียกระแสแสงที่เกิดขึ้นจากกรณีนี้ว่า “กระแสโฟโตไดโอด [$I_D(\omega)$]” ส่วนแบบที่ (2) เกิดขึ้นที่บริเวณนิวทรัล พาหะอิสระที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่เหมือนกับการเกิดในตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์ ซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าแบบแรกด้วยกลไกการเคลื่อนแบบการแพร่ (diffusion mechanism) และเรียกระแสแสงที่เกิดขึ้นแบบนี้ว่า “กระแสโฟโตคอนดักเตอร์ [$I_C(\omega)$]”

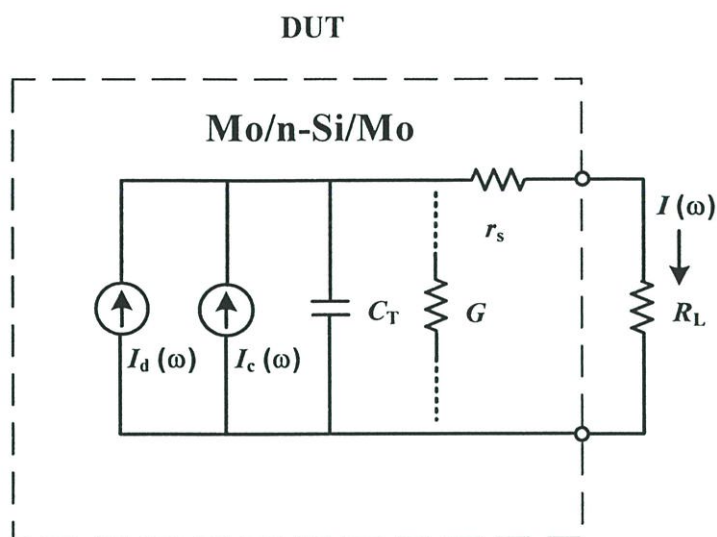
นอกจากนี้ยังพบอีกว่าขนาด (ในที่นี้ คือ กระแสแสง) ของสัญญาณตอบสนองยังขึ้นกับความถี่ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะกระแสแสง-ความถี่ โดยในรูปที่ 6.2 (ก) แสดงให้เห็นเฉพาะกระแสแสงที่เกิดจากส่วนของโฟโตไดโอด ซึ่งมีทั้งขนาดและการตอบสนองของความถี่มากกว่ากระแสแสงที่เกิดจากส่วนโฟโตคอนดักเตอร์ ดังที่แสดงในรูปที่ 6.2 (ข) สำหรับในรูปที่ 6.2 (ค) เป็นลักษณะเฉพาะกระแสแสง-ความถี่ที่รวมกระแสแสงทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งพบว่าจะให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.7

¹ $I_D(\omega)$ และ $I_C(\omega)$ หมายถึง กระแสแสงโฟโตไดโอดและกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ตามลำดับ ที่ขึ้นกับค่าความถี่



รูปที่ 6.2 การเกิดกระแสแสงจาก (ก) กระแสโฟโตไดโอด (ข) กระแสโฟโตคอนดักเตอร์ และ (ค) กระแสแสงรวมของกระแสโฟโตไดโอดและกระแสโฟโตคอนดักเตอร์ เพื่อนำไปอธิบายการตอบสนองสัญญาณแสงความถี่ต่ำของ Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

เพื่ออธิบายการเกิดส่วนประกอบกระแสแสงทั้งสองส่วน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ดังนั้นจึงได้นำเสนอวงจรสมมูลอย่างง่าย [36] โดยรวมวงจรสมมูลของโฟโตไดโอด [9] และโฟโตคอนดักเตอร์ [9], [50] เข้าด้วยกัน โดยให้ส่วนประกอบของกระแสทั้งสองขนานกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 6.3 โดยที่ DUT ซึ่งย่อมาจากคำว่า Device Under Test หมายถึง อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo



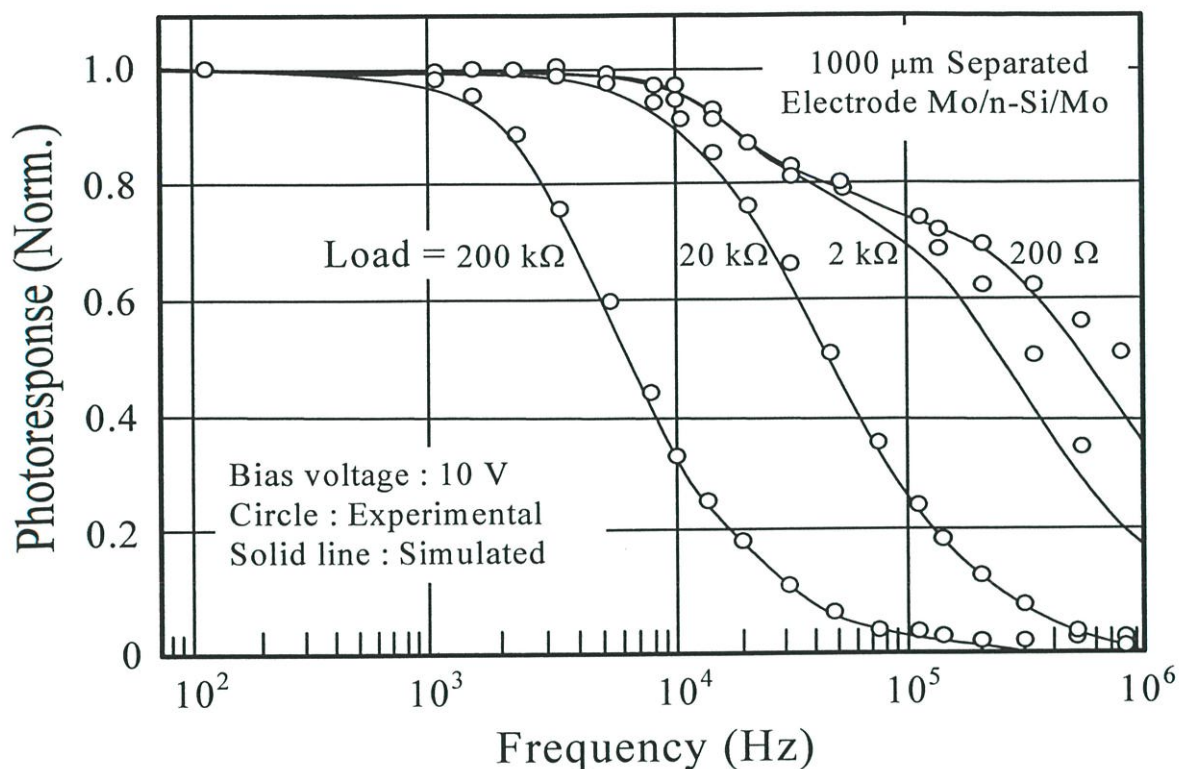
รูปที่ 6.3 วงจรสมมูลความถี่ต่ำของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo เมื่อฉายแสงตกกระทบด้านบน

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $1000 \mu\text{m}$ ที่แรงดันไบแอส 10 V

Normalized ที่ low frequencies ($I_d + I_c = 1$)		C_T (pF)	r_s (Ω)	G (S)	τ (μs)
$I_d(\omega)$	$I_c(\omega)$				
0.81	0.19	208	1250	0	10

ความจุไฟฟ้า (C_T) เป็นผลรวมของอุปกรณ์ และระบบเครื่องมือวัด

ในตารางที่ 6.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ในวงจรมูลความถี่ต่ำที่แสดงในรูปที่ 6.3 โดยที่กระแส $I_d(\omega)$ และ $I_c(\omega)$ ได้มาจากกราฟในรูปที่ 5.7 จากเส้นโหลดความต้านทาน $2 \text{ k}\Omega$ สำหรับค่า C_T , r_s และ τ เป็นค่าที่ได้จากการแทนค่าที่เหมาะสมในการจำลองแบบ แล้วทำให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด [ค่า C_T เป็นความจุไฟฟ้ารวม ซึ่งได้พิจารณาในเทอมของความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์รวมเข้ากับความจุไฟฟ้าที่เกิดจากระบบเครื่องมือวัด]



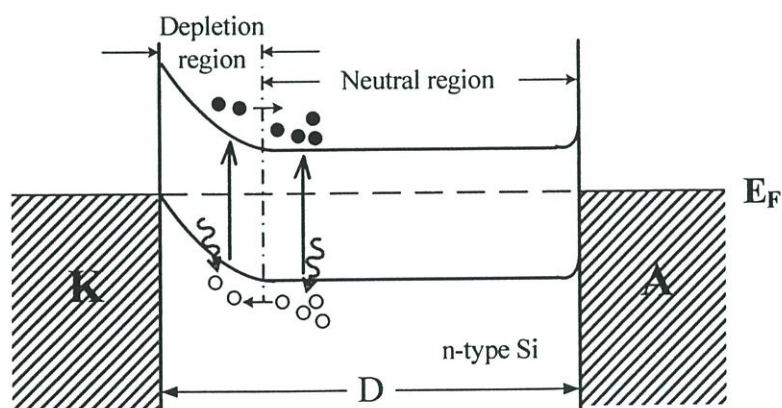
รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองแบบของการตอบสนองสัญญาณแสงความถี่ต่ำที่ถูกนอร์มอลไรซ์กับความถี่ของสัญญาณที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 1000 μm ของโหนดความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเป็น 200 Ω , 2 k Ω , 20 k Ω และ 200 k Ω โดยใช้ตัวแปรในการจำลองแบบ ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 6.4 โดยผลการทดลอง (ในรูปที่ 5.7) แสดงด้วยวงกลมเปิด และผลจากการจำลองแบบแสดงด้วยเส้นทึบ ซึ่งเส้นสเปกตรัมของการตอบสนองความถี่นี้ เป็นผลเนื่องจากส่วนประกอบกระแสแสงที่มาจากบริเวณปลอดพาหะและส่วนที่มาจากบริเวณนิวทรัล โดยส่วนแรกเกิดจากโฟโตไดโอด และส่วนหลังเกิดจากโฟโตคอนดักเตอร์ ดังนั้นกระแสแสงรวม $I_p(\omega)$ ที่วัดได้ (เมื่อ ω คือความถี่เชิงมุม) จึงเป็นผลรวมของกระแสโฟโตไดโอดและกระแสโฟโตคอนดักเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ของ

$$I_p(\omega) = I_d(\omega) + I_c(\omega) \quad (6.1)$$

โดยที่ กระแส $I_c(\omega)$ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$

ในกรณีแหล่งจ่ายกระแส $I_d(\omega)$ คาดได้ว่าจะสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงมากถึงระดับกิกะเฮิรต์ หรือสูงกว่าเป็นผลการตอบสนองเนื่องจากเวลาส่งผ่านจำกัดในบริเวณปลอดพาหะ [51]-[55] ดังนั้น $I_d(\omega)$ จึงถูกแทนด้วยความเป็นอิสระของความถี่ในการวิเคราะห์นี้ ผลของการจำลองแบบในรูปที่ 6.4 อธิบายได้ว่า $I_d(\omega)$ เกิดจากผลกระทบของความจุไฟฟ้า (C_T) ความต้านทานอนุกรม (r_s) ความนำไฟฟ้า (G) และไหลลดความต้านทาน ในทางปฏิบัติค่า G มีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์นี้จึงไม่พิจารณาผลของค่า G สำหรับส่วนประกอบกระแสไฟฟ้า $I_c(\omega)$ ดูเหมือนว่ามีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความถี่เหนือ LTF และถ้าพิจารณาแถบพลังงานในส่วนนิวทรัล พบว่ามีลักษณะแบนราบ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 (ไม่มีผลของสนามไฟฟ้าในบริเวณนิวทรัล) ดังนั้นส่วนประกอบกระแสนี้จึงหาได้จากเวลาการแพร่ (diffusion time) เฉลี่ยหรือเวลาอายุของพาหะโฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ และถ้าบริเวณนิวทรัลมีความกว้างมากพอ [มากกว่า ระยะการแพร่ (diffusion length : L)] ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งระยะการแพร่มีค่าประมาณ $70 \mu\text{m}$ (เมื่อ $\tau = 10 \mu\text{s}$ จากตารางที่ 6.1 และ $D_p = 5 \text{ cm}^2/\text{s}$ [56]) สำหรับโฮลที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแสงแล้วแพร่อย่างอิสระไปที่ขอบบริเวณปลอดพาหะ เวลาที่ยังผลของการแพร่ (effective diffusion time) พิจารณาได้จากการเกิดพาหะโฮลในตำแหน่งใกล้เคียงกับบริเวณปลอดพาหะ และเวลาที่ยังผลนี้จะสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะเวลา (characteristic time : τ) ของตารางที่ 6.1 ดังนั้นเวลาที่แสดงในตารางที่ 6.1 จึงมีความเป็นไปได้ เนื่องจากเวลาชีวิตของโฮลมีค่าประมาณ $35 \mu\text{s}$ [56] ในซิลิคอนชนิด n ที่มีค่าสภาพต้านทาน $40\text{-}50 \Omega\text{-cm}$ ดังนั้นจึงสังเกตได้ว่าส่วนประกอบกระแสแสง เนื่องจากการแพร่ของพาหะโฮลขึ้นกับความถี่ และเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์หรือในสวนอินทรีนซิค ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมความถี่ LTF จึงไม่เปลี่ยนแปลงในกรณีไหลลดความต้านทานมีค่าน้อย



รูปที่ 6.5 แผนภาพแถบพลังงานของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่ได้รับแรงดันไบแอสแล้วสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่บริเวณปลอดพาหะเกือบทั้งหมด ในขณะที่บริเวณนิวทรัลแถบพลังงานจะแบนราบ

ในกรณีของพาหะอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณนิวทรัลที่มีอิเล็กตรอนเป็นประจุพาหะส่วนมาก ซึ่งจะไม่เกิดกลไกการแพร่กับอิเล็กตรอน ในบริเวณนิวทรัลไม่มีสนามไฟฟ้าที่จะช่วยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ และระยะห่างจากขอบบริเวณปลอดพาหะไปยังข้อวโนดมีระยะห่างกันมาก นอกจากนี้การรวมตัวใหม่ภายในซิลิคอนก็อาจส่งผลกระทบด้วยเช่นกัน จึงทำให้ส่วนประกอบกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนกรณีของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo นี้มีผลกระทบบ้างเพียงเล็กน้อยและไม่เด่นเท่ากับกรณีของพาหะโฮล

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในหัวข้อที่ 6.1 นี้ ทำให้เราเข้าใจถึงกลไกการเกิดกระแสแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo นี้ และนำเอาวงจรสมมูลอย่างง่ายมาใช้อธิบายผลการทดลอง ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

6.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของกระแสแสงกับแรงดันไบแอสของตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่ระยะห่างข้อวโนดมีขนาดกว้าง

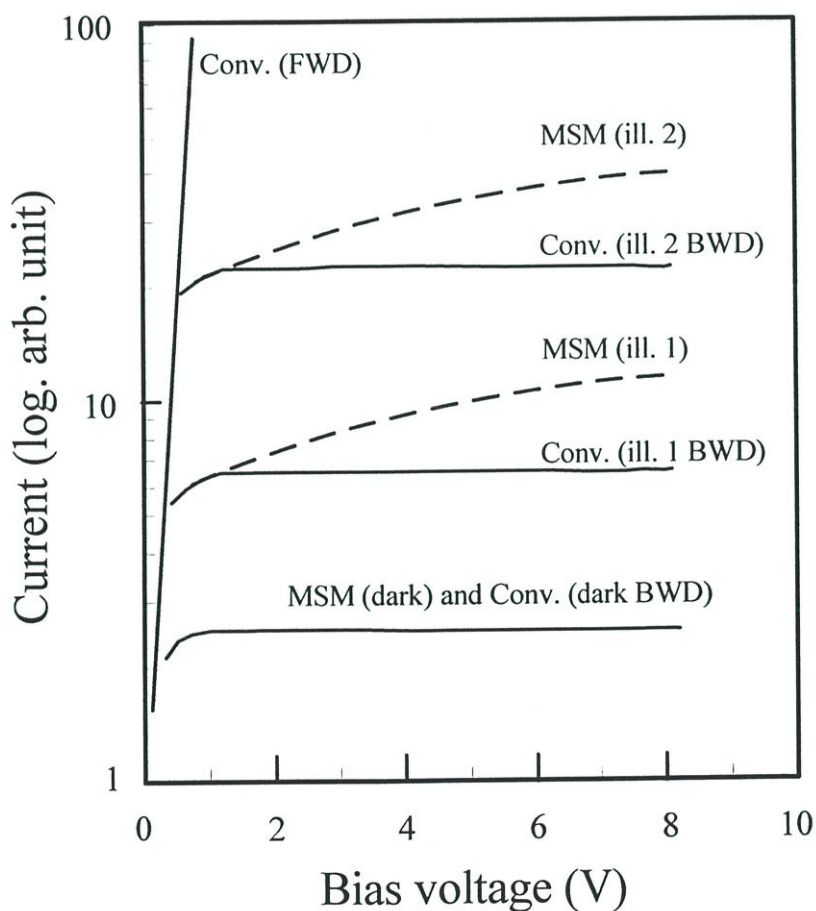
ในการวิเคราะห์นี้ เพื่อแสดงถึงความสามารถในการควบคุมปริมาณของกระแสแสง ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส ในขณะที่ความเข้มแสงมีค่าคงที่ เป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของโครงสร้าง MSM และยังช่วยยืนยันถึงความถูกต้องของแนวความคิดของกระแสโฟโตไดโอดและโฟโตคอนดักเตอร์อีกด้วย

6.2.1 ผลกระทบของกระแสแสงกับแรงดันไบแอสของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo

ในการวิเคราะห์นี้ แสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของอุปกรณ์ที่แตกต่างจากตัวตรวจวัดแสงทั่วไป คือ การควบคุมปริมาณกระแสด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอส [27] ในรูปที่ 6.6 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดทั่วไป (conventional photodiode) ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง ซึ่งอาจเป็น p-n โฟโตไดโอด หรือ p-i-n โฟโตไดโอดก็ได้ และลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกัน คือ (1) กรณีของโฟโตไดโอดทั่วไป แสดงลักษณะเฉพาะของกระแสได้ทั้งไบแอสตรง (forward direction : FWD) และไบแอสย้อนกลับ (backward direction : BWD) แต่ในขณะที่ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงจะถูกใช้ในช่วงการไบแอสย้อนกลับเท่านั้น ซึ่งต้องใช้ความระมัดระวังในการให้แรงดันไบแอสแก่อุปกรณ์ แต่สำหรับโครงสร้าง MSM จะมีแต่การไบแอสย้อนกลับเท่านั้น (2) เมื่อให้แสงตกกระทบบนที่ค่าหนึ่ง ในกรณีของโฟโตไดโอดทั่วไป กระแสแสงจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบแอส (กราฟเส้นทึบ ที่ให้แรงดันไบแอสแบบ BWD) ในขณะที่โครงสร้าง MSM กระแสแสงจะมีค่า

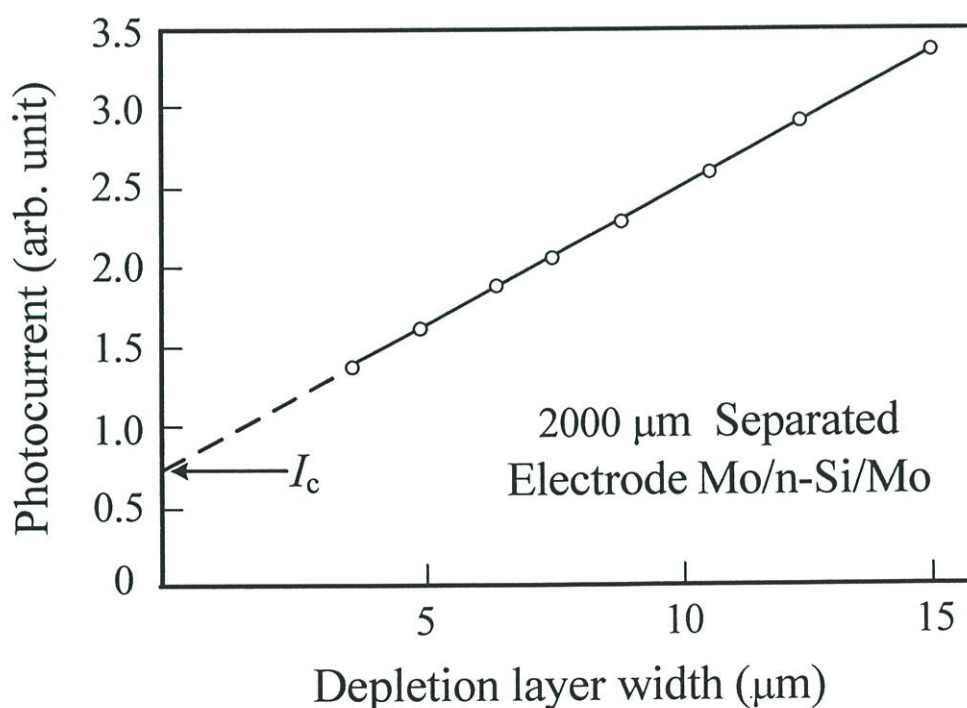
เปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น (กราฟเส้นประ) นั้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง MSM มีความสามารถในการควบคุมกระแสแสงด้วยแรงดันไบแอส สำหรับเหตุผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสแสงนี้จะได้อธิบายต่อไป

นำผลการทดลองรูปที่ 5.5 จากหัวข้อที่ 5.3.2 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W_d) โดยแกนตั้งเป็นกระแสแสง และให้แกนนอนเป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะคำนวณได้จากสมการที่ (3.5) ผลการคำนวณแสดงดังในรูปที่ 6.7



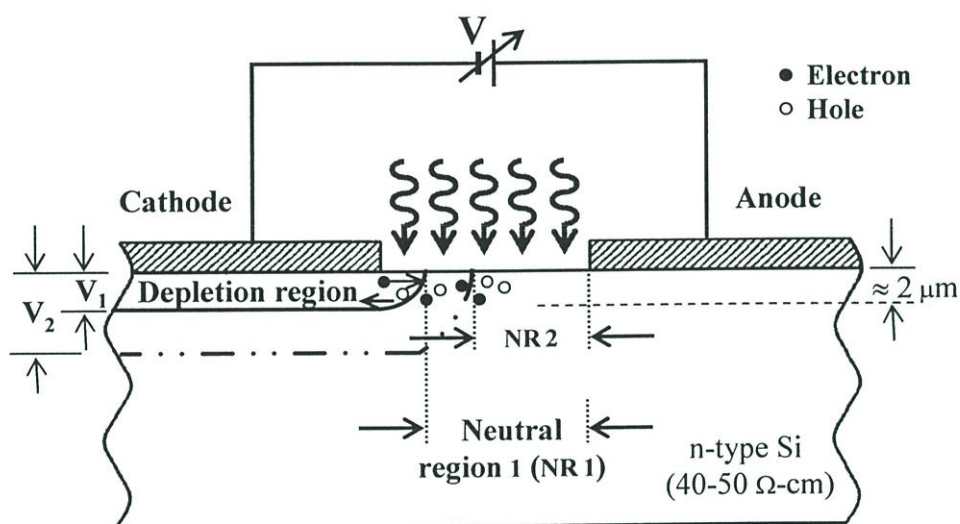
รูปที่ 6.6 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดทั่วไป (Conv.) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง ซึ่งแสดงกระแสมืดและกระแสแสงที่ความเข้มแสง (ill.) ค่าต่างๆ แสดงด้วยเส้นทึบ ส่วนกรณีของโครงสร้าง MSM กระแสแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ แสดงด้วยเส้นประ

จากกราฟในรูปที่ 6.7 กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีขนาดกว้างขึ้น แต่เนื่องจากความกว้างของปลอดพาหะจะขึ้นกับแรงดันไบแอส ดังในสมการที่ (3.5) จึงอาจกล่าวได้ว่า กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.8 จึงมีความเป็นไปได้ว่าบริเวณปลอดพาหะจะมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสมากกว่าสวอนิวทริล เนื่องจากชั้นงานนี้มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามากกว่าผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะและความยาวการแพร่ของพาหะ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ได้รับแสงตกกระทบอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นกระแสจากบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างมากขึ้น (เมื่อได้รับแรงดันไบแอสสูงขึ้น) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสที่เกิดจากบริเวณนิวทริลไม่เปลี่ยนแปลง จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของชั้นงานในรูปที่ 6.7 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบของความลึกของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งมีผลต่อกระแสแสงด้วย ในขณะที่ให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะขยายตัวออกไปทั้งทางข้างและทางด้านใต้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6.8 และเพื่อให้ง่ายเราจะสรุปว่าบริเวณปลอดพาหะที่อยู่ถัดจากขอบโลหะจะมีรูปร่างเป็นส่วนโค้งของวงกลม ทำให้ความสัมพันธ์ของกระแสแสงกับความกว้างของปลอดพาหะที่แปรผันอย่างเชิงเส้นดูเหมือน



รูปที่ 6.7 กระแสแสงที่ขึ้นกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของชั้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2000 μm

ว่าจะผิดปกติ แต่เนื่องจากลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่ได้จากแสง He-Ne เลเซอร์ (ความยาวคลื่น : 633 nm) มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนี้สำหรับซิลิคอนมีค่า $3.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ [56] ดังนั้นความลึกของแสง He-Ne เลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนจึงมีค่าคงที่ประมาณ $2 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 6.8 ซึ่งระยะความลึกของการดูดกลืนแสงนี้มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะในขณะที่ได้รับแรงดันไบแอสมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้การแปรผันตรงของกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะเป็นไปได้



รูปที่ 6.8 ความกว้างปลอดพาหะที่เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับแรงดันไบแอสสูงขึ้น ทำให้กระแสแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo นี้มีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับกระแสแสงอีกส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นภายในระยะการแพร่ ($70 \mu\text{m}$) ของบริเวณนิวทรัล ซึ่งยังคงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง จากกราฟในรูปที่ 6.7 จึงสามารถประมาณค่ากระแสแสงส่วนนี้ (I_c) ได้จากการลากเส้นตรงของกราฟนี้ไปตัดแกนของกระแสแสง ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นประ กระแสแสงที่จุดนี้จึงเสมือนว่าเป็นกระแสแสงที่เกิดขึ้นเฉพาะในบริเวณนิวทรัล ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันไบแอสค่าใดๆ มีค่าเท่ากับกระแสแสงลบด้วยกระแสแสงจากบริเวณนิวทรัล ($I_d = I_p - I_c$) หรือกระแสรวมเท่ากับกระแสทั้งสองส่วนรวมกัน ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.1

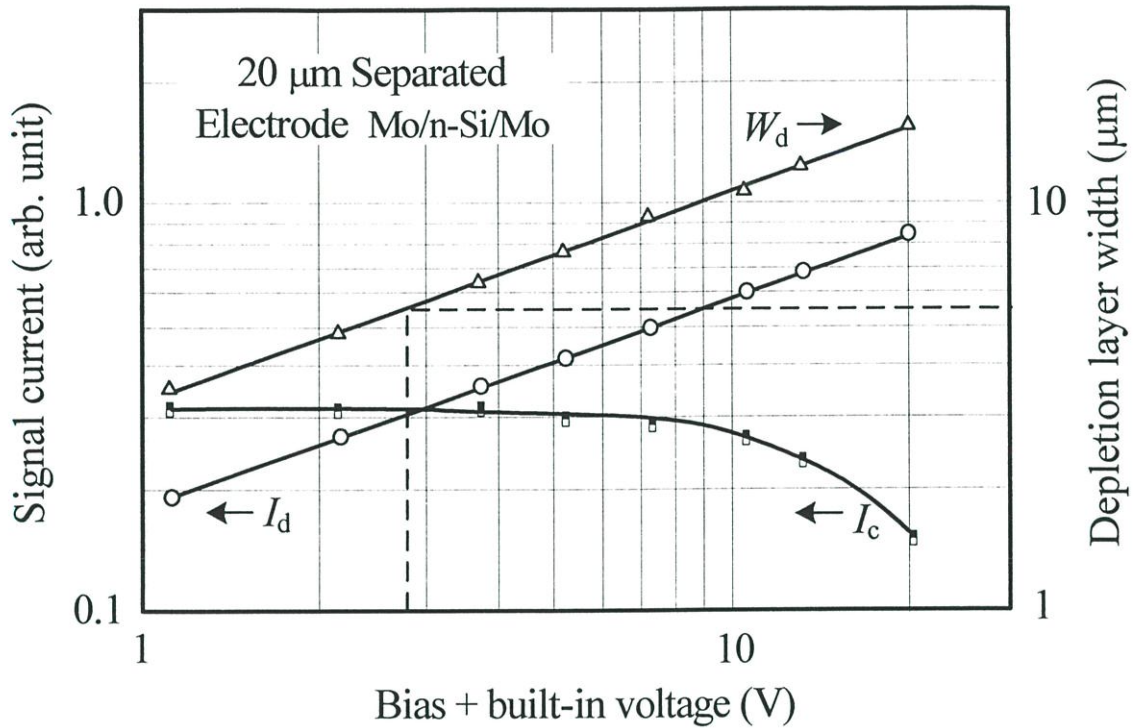
กรณีของโฟโตไดโอดทั่วไป ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้งและมีพื้นที่รับแสงในเนื้อสารกึ่งตัวนำบริเวณใกล้กับรอยต่อ p-n เมื่อให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น บริเวณปลอดพาหะจะขยายตัวลงไปทางด้านข้างและด้านใต้เหมือนกับโครงสร้าง MSM แต่ที่ขอบด้านข้างของโฟโตไดโอดทั่วไปส่วนมากมักจะเป็นส่วนของซิลิคอนไดออกไซด์หรือโลหะเป็นบริเวณที่ไม่ได้ใช้งาน และเมื่อฉายแสง He-Ne เลเซอร์ที่ผิวหน้าของโฟโต-

ไดโอดแล้ว ความลึกของแสง He-Ne เลเซอร์ที่ถูกดูกลืนมีค่าประมาณ $2 \mu\text{m}$ ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อบริเวณปลอดพาหะที่ขยายลงไปทางด้านใต้ นั่นจึงเป็นเหตุผลว่าเมื่อให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น แต่โฟโตไดโอดทั่วไปกลับไม่ได้รับกระแสเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันที่แสดงในรูปที่ 6.6

ถ้าพิจารณาในกรณีที่ขึ้นงานมีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $20 \mu\text{m}$ เมื่อให้แรงดันไบแอสมากขึ้น ความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะกว้างขึ้นด้วย ทำให้บางส่วนของระยะการแพร่ที่อยู่ภายในบริเวณนิวทรัลเกิดการช้อนทับกับขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกระแสที่เกิดจากบริเวณนี้จะคล้ายตามกับแรงดันไบแอสเป็นผลให้มีค่าลดลงจากเดิมที่มีค่าคงที่ แต่กระนั้นการเพิ่มขึ้นของกระแสจากบริเวณปลอดพาหะจะช่วยชดเชยกระแสส่วนที่ลดลงจากบริเวณนิวทรัล ดังนั้นจึงเห็นได้ว่ากระแสรวมภายในอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น และนี่คือเหตุผลว่าทำไมกระแสภายในอุปกรณ์ภายใต้การฉายแสงยังคงเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบแอสที่มากขึ้น

เพื่อยืนยันถึงความถูกต้องของคำอธิบายที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จึงทำการทดสอบการตอบสนองสัญญาณแสงความถี่ต่ำ ($100 \text{ Hz} - 100 \text{ kHz}$) โดยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์เข้ากับแสงความถี่เดียว (He-Ne เลเซอร์) แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วงจรมูลอย่างง่ายที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น ผลที่ได้รับเหมือนกับผลที่คาดการณ์จากลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ในตารางที่ 6.2 แสดงกระแสแสงที่ถูกลดลงหรือมอดูเลต ซึ่งขึ้นกับกระแสที่เกิดขึ้นจากบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลของขึ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $20 \mu\text{m}$ จากตารางปรากฏว่ากระแส I_d จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสในขณะที่กระแส I_c จะมีค่าลดลง ดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.10 ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 6.2.2

กราฟในรูปที่ 6.9 เป็นกราฟแบบ log-log ที่แสดงค่าของกระแส I_d , I_c และ W_d โดยที่แกนตั้งด้านซ้ายมือเป็นแกนกระแส ส่วนทางด้านขวามือเป็นความกว้างบริเวณปลอดพาหะ สำหรับแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบแอสที่รวมค่าของศักย์ไฟฟ้าภายในไว้ด้วย เส้นกราฟของ I_d มีค่าความชัน (slope) เป็น 0.5 เท่ากับของ W_d ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระแสที่เกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะจะเป็นปฏิภาคตรงกับพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะ ในขณะที่ความชันของกระแส I_c จากบริเวณนิวทรัลมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจากระดับเดิมที่คงที่ แสดงให้เห็นถึงผลกระทบเนื่องจากการช้อนทับบางส่วนของระยะการแพร่กับขั้วไฟฟ้า จุดตัดกันของกระแส I_d และ I_c เกิดขึ้นที่ความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีค่าเท่ากับ $5.6 \mu\text{m}$ ในขณะที่ความกว้างของบริเวณนิวทรัลมีค่าเป็น $14.4 \mu\text{m}$ ที่ตำแหน่งของ I_d เท่ากับ I_c นี้ สามารถสรุปได้ว่าที่บริเวณปลอดพาหะจะมีประสิทธิภาพในการเกิดกระแสแสงได้มากกว่าบริเวณนิวทรัลถึง 2.6 เท่า หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเนื่องจากกระบวนการเกิดกระแสในขึ้นงานของเรา ซึ่งหลักนี้ไม่พ้นกระบวนการแพร่ของพาหะจากบริเวณนิวทรัล ดังนั้นการตอบสนองทางแสงของกระแส I_c จึงถูกจำกัด โดยลักษณะเวลาของการแพร่สำหรับพาหะเหล่านี้ในการเคลื่อนที่มาจากขอบบริเวณปลอดพาหะ ลักษณะเวลาของการแพร่ที่ได้จากการวัดการตอบสนองของสัญญาณมีค่าอยู่ในช่วง $5.2 - 9.8 \mu\text{s}$ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.9 กระแสแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสที่มาจากบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลของชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $20 \mu\text{m}$ (Δ คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ, \circ คือ กระแส I_d และ \blacksquare คือ กระแส I_c)

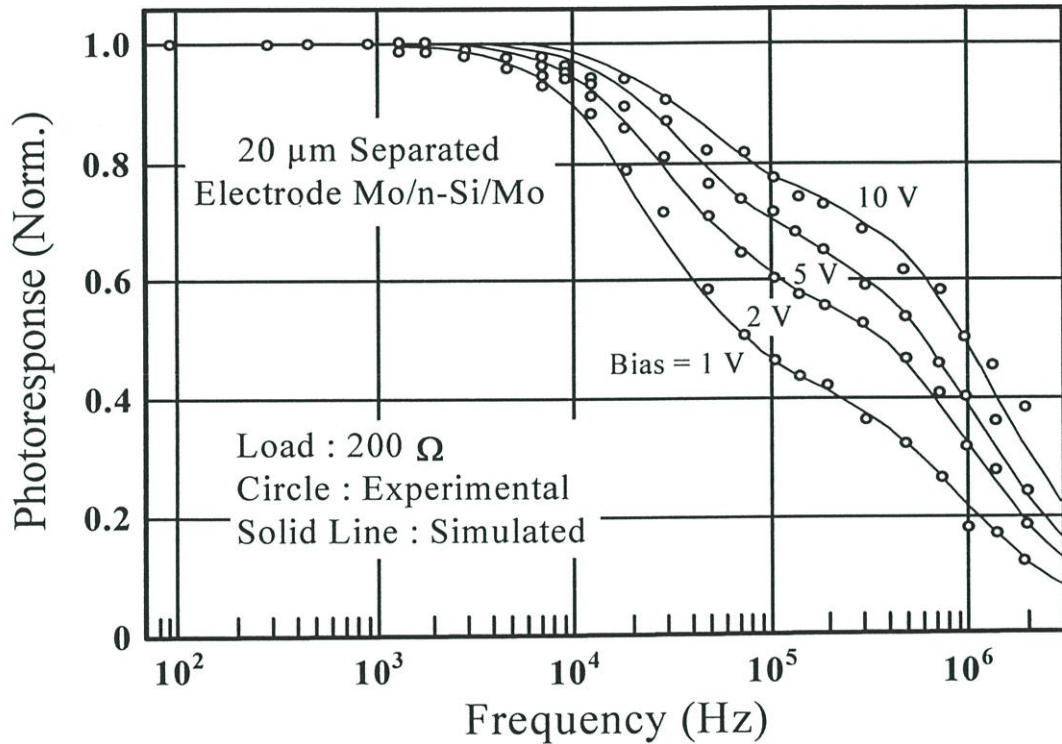
ตารางที่ 6.2 กระแสแสง ความจุไฟฟ้า และความกว้างปลอดพาหะที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสของชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $20 \mu\text{m}$

Applied bias (V)	Normalized ที่ low frequencies ($I_d + I_c = 1$)		C_T (pF)	W_d (μm)
	$I_d(\omega)$	$I_c(\omega)$		
1	0.37	0.63	330	3.5
2	0.52	0.48	300	4.2
5	0.61	0.39	280	5.1
10	0.70	0.30	230	6.0

ความจุไฟฟ้า (C_T) เป็นผลรวมของอุปกรณ์ และระบบเครื่องมือวัด

6.2.2 ผลกระทบของการตอบสนองของสัญญาณกับแรงดันไบแอส

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลกระทบของการตอบสนองของสัญญาณแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส โดยการเปลี่ยนแรงดันไบแอสเป็น 1, 2, 5 และ 10 V ตาม ลำดับ



รูปที่ 6.10 การตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสของชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm และใช้โหลดความต้านทาน 200 Ω ต่ออนุกรมเข้ากับชิ้นงาน

ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ สำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 μm

Applied bias (V)	Normalized ที่ low frequencies ($I_d + I_c = 1$)		C_T (pF)	r_s (Ω)	G (S)	τ (μs)
	$I_d(\omega)$	$I_c(\omega)$				
10	0.70	0.30	230	500	0	5.2
5	0.61	0.39	280	500	0	6.0
2	0.52	0.48	300	500	0	7.6
1	0.37	0.63	330	500	0	9.8

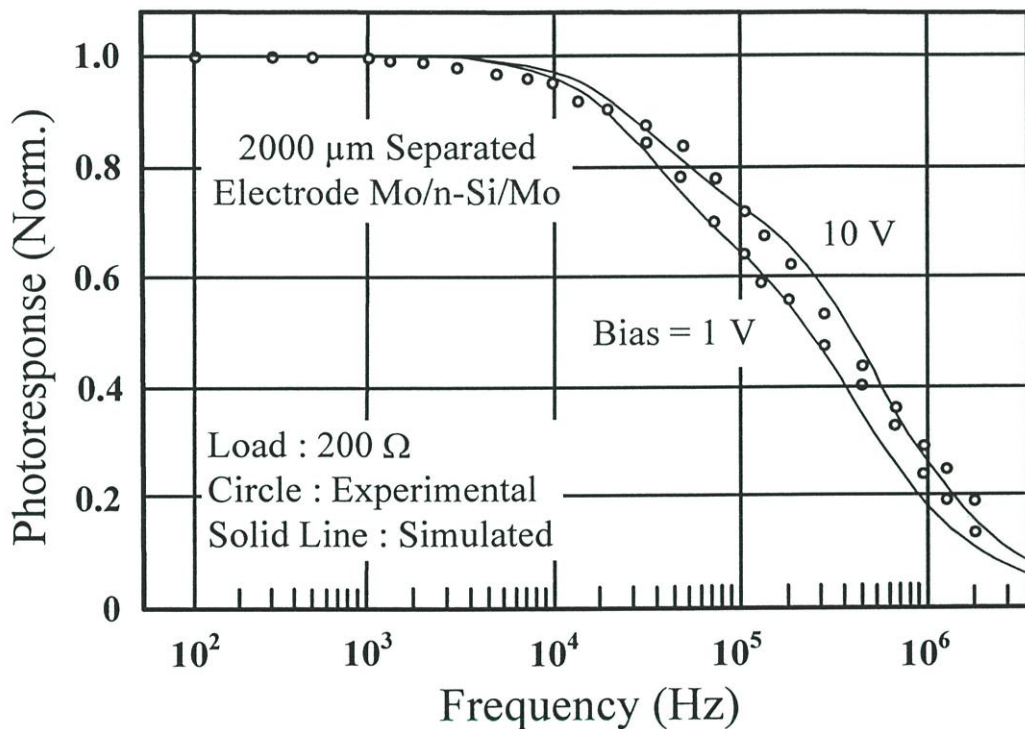
ความจุไฟฟ้า, C_T เป็นผลรวมของอุปกรณ์ และระบบเครื่องมือวัด

ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วว่า ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเป็นผลสะท้อนโดยตรงของการให้แรงดันไบแอส ทำให้กระแสแสงที่เกิดขึ้นจากบริเวณปลอดพาหะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบแอสที่ให้ เพื่อที่จะยืนยันความถูกต้องของแนวความคิดนี้ ดังนั้นเราจึงทำการวัดการตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส ในรูปที่ 6.10 แสดงการตอบสนองสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันกับความถี่ของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $20\ \mu\text{m}$ และมีการเปลี่ยนแรงดันไบแอสเป็น 10, 5, 2 และ 1 V ตามลำดับ ในรูปนี้กราฟเส้นทึบแสดงผลลัพธ์จากการจำลองแบบ โดยใช้วงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 6.3 และใช้พารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 6.3 กราฟจากการทดลองและผลลัพธ์จากการจำลองแบบให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ผลจากการจำลองแบบแสดงว่าภายใต้ความถี่ LTF ส่วนประกอบกระแสแสงจากการแพร่สามารถเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากลักษณะเฉพาะเวลา คือ เวลาของโฮลที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงในบริเวณนิวทรัล แล้วเคลื่อนที่เป็นกระแสของอุปกรณ์ เวลานี้ควรจะมีค่าน้อยกว่าเวลาชีวิต เนื่องจากผลของการจำลองแบบของเรา ลักษณะเฉพาะเวลาเพิ่มขึ้นจาก $5.2\ \mu\text{s}$ เป็น $9.8\ \mu\text{s}$ กับแรงดันไบแอสที่ให้จาก 10 V ไปยัง 1 V ตามลำดับ

จากผลเหล่านี้กล่าวได้ว่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีขนาดลดลง เมื่อลดค่าแรงดันไบแอส ดังนั้นในบริเวณนี้จึงเกิดกระแสแสงลดลง แต่กระนั้นสามารถคาดการณ์ได้ว่าลักษณะเฉพาะเวลาจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความกว้างของบริเวณนิวทรัลมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าลักษณะเฉพาะเวลาที่ได้มีค่าน้อยกว่าเวลาชีวิตของโฮล (ราวๆ $35\ \mu\text{s}$) เวลา $5.2\text{--}9.8\ \mu\text{s}$ น่าจะเป็นค่าเฉลี่ยของเวลาแพร่ไปที่ขอบบริเวณปลอดพาหะมากกว่าที่จะเป็นเวลาชีวิตของพาหะ เพราะฉะนั้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่ลดลงจากการลดแรงดันไบแอส ในขณะที่ความกว้างบริเวณนิวทรัลที่ถูกฉายแสงมีความกว้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของกระแสแสง (เนื่องจากการแพร่) กับกระแสแสงของอุปกรณ์ ด้วยการจำลองแบบของเราแสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงนี้ ดังแสดงในตารางที่ 6.3 ส่วนความจุไฟฟ้า (C_T) ที่ใช้ในการจำลองแบบมีค่าลดลงกับแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ถึงแม้ว่าจะรวมผลความจุไฟฟ้าแฝงของระบบเครื่องมือวัดด้วยก็ตาม

ถึงแม้ว่าความกว้างบริเวณนิวทรัลจะเปลี่ยนแปลงไปกับแรงดันไบแอส สำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $20\ \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตามถ้าชิ้นงานมีความกว้างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากๆ ผลกระทบจากบริเวณนิวทรัลยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกระแสแสงกับแรงดันไบแอสมีค่าน้อย ส่งผลให้ความไวในการตอบสนองสเปกตรัมต่อแรงดันไบแอสน้อยลงมาก เพื่อยืนยันเหตุผลนี้ จึงทำการวัดการตอบสนองทางแสงของชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าเป็น $2000\ \mu\text{m}$ สเปกตรัมของการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ที่แสดงในรูปที่ 6.11 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมที่วัดจากแรงดันไบแอส 10 V และ 1 V ค่อนข้างน้อย ซึ่งหมายความว่าอัตราส่วนของส่วนประกอบของกระแสแสง

ทั้งสองไม่มีความไวมาก เมื่อเทียบกับกรณีชิ้นงานที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $20\ \mu\text{m}$ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการตอบสนองทางแสงของโครงสร้าง MSM แบบพลาแนร์ภายใต้การฉายแสงจะแสดงลักษณะเฉพาะทั้งในส่วนอินทรีนซิคและเอกทรีนซิค¹ ผลเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยส่วนประกอบของกระแสแสงจากบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล ภายใต้การฉายแสงที่ความถี่ต่ำ และความถี่ LTF สามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการแพร่ของพาหะ อย่างไรก็ตามการพิจารณาที่ความถี่นี้หาได้ด้วยเวลายังผลของพาหะหรือด้วยเวลาชีวิตเฉลี่ยของพาหะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่สั้นกว่าระยะการแพร่ของพาหะโฮล



รูปที่ 6.11 เปรียบเทียบสเปกตรัมของการตอบสนองแสงที่แรงดันไบแอส 1 V และ 10 V ของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ซึ่งมีระยะห่างขั้วไฟฟ้า $2000\ \mu\text{m}$

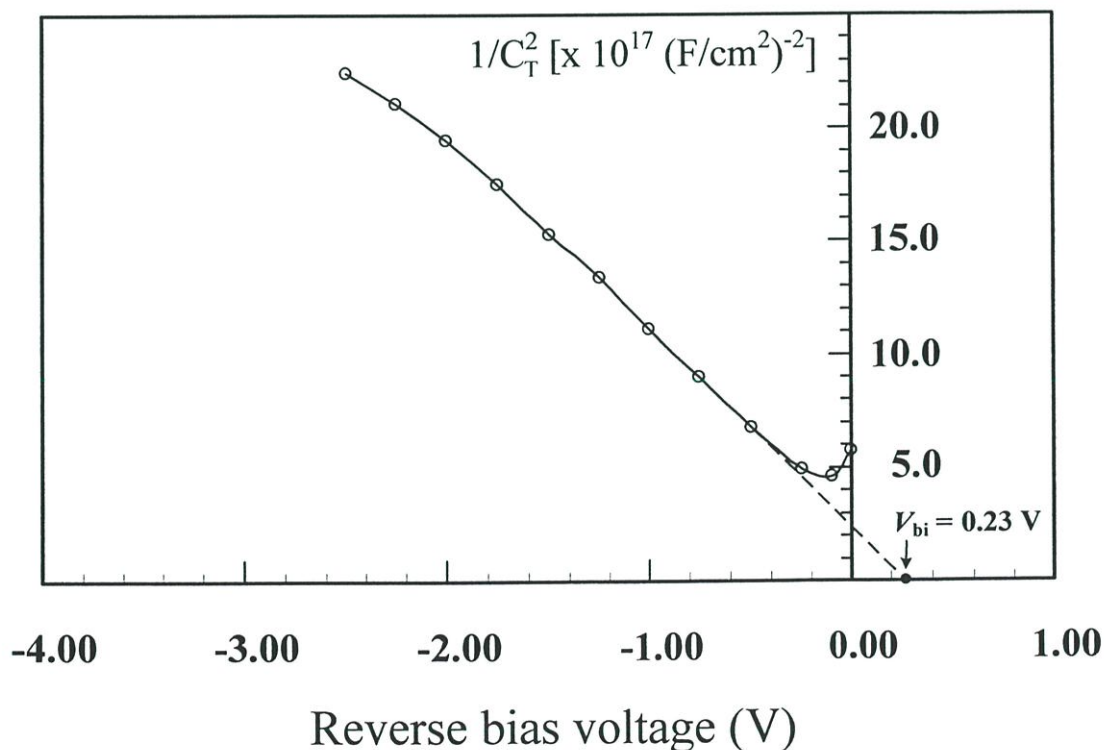
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.2 ทำให้เราเข้าใจถึงกลไกการควบคุมกระแสแสงจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอส การอธิบายที่นำเสนอข้างต้นสามารถนำไปอธิบายได้กับโครงสร้าง MSM ที่เกิดบริเวณปลอดพาหะแบบไม่สมมาตร และถึงแม้ว่าจะเกิดบริเวณปลอดพาหะอย่างสมมาตรยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้อธิบายได้เป็นอย่างดีด้วย นอกจากนี้ลักษณะการควบคุมกระแสแสงด้วยแรงดันไบแอสนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอิเล็กทรอนิกส์ไอริส [27] ได้

¹ ส่วนเอกทรีนซิค หมายถึงส่วนที่อยู่ภายนอกตัวอุปกรณ์ ซึ่งในที่นี้ คือ โหลดความต้านทานภายนอก

6.3 การวิเคราะห์หาแรงดันภายในและความหนาแน่นอะตอมสารเจือจากลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดัน

จากกราฟในรูปที่ 5.2 (ในบทที่ 5) แสดงว่าลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันมีความสมมาตรกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากโครงสร้าง MSM จะเกิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าแฝงในโครงสร้างสองตัวที่ต่อกันแบบอนุกรม ดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.2.1.5 ซึ่งความจุไฟฟ้าแฝงรวม (C_T) จากสมการที่ (3.13) เท่ากับ $C_{d1}C_{d2}/(C_{d1} + C_{d2})$ และเนื่องจากความจุไฟฟ้า C_{d1} เกิดจากการให้แรงดันไบแอสย้อนกลับของขั้วคาโทด และแรงดันไบแอสย้อนกลับนี้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไบแอส (V_A) ของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo จึงทำให้ $C_{d1} \ll C_{d2}$ ซึ่งสามารถประมาณค่าอย่างง่ายได้ว่า $C_T \approx C_{d1}$ และเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ให้อยู่ในเทอมของ $1/C_T^2$ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\frac{1}{C_T^2} \cong \frac{2(V_{bi} - V_A)}{q\epsilon_s N_d} \quad (6.2)$$



รูปที่ 6.12 ลักษณะเฉพาะของ $1/C^2$ กับแรงดันไบแอส เมื่อลากเส้นต่อจนตัดแกนแรงดันจะได้แรงดันภายในประมาณ 0.23 V

เมื่อนำเอาความจุไฟฟ้าแฉงรวมมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_T^2$ กับแรงดันไบแอส (ในที่นี้จะเลือกกราฟในช่วงไบแอสลบ และถ้าพิจารณาทางด้านไบแอสบวกจะให้ผลในการทำงานเดียวกัน) ซึ่งจะได้เส้นกราฟเป็นเชิงเส้น จากนั้นลากเส้นตรงไปตัดแกนแรงดัน ($1/C_T^2 = 0 \text{ F}^{-2}$) ณ ที่ตำแหน่งตัดแกนแรงดันที่จุดนี้ คือ ค่าแรงดันภายในของอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 6.12

จากกราฟลักษณะเฉพาะที่แสดงในรูปที่ 6.12 พบว่าแรงดันภายในมีค่าประมาณ 0.23 V และเมื่อนำไปคำนวณหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_d) ของแผ่นผลึกซิลิคอน พบว่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือจะมีค่าประมาณ $7.9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ และใกล้เคียงกับค่าสภาพต้านทาน (40-50 $\Omega\text{-cm}$) ของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้นชนิด n ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทาน และความหนาแน่นอะตอมสารเจือ [56] (ดังแสดงในภาคผนวก ข) มีค่าประมาณ $(7-9) \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

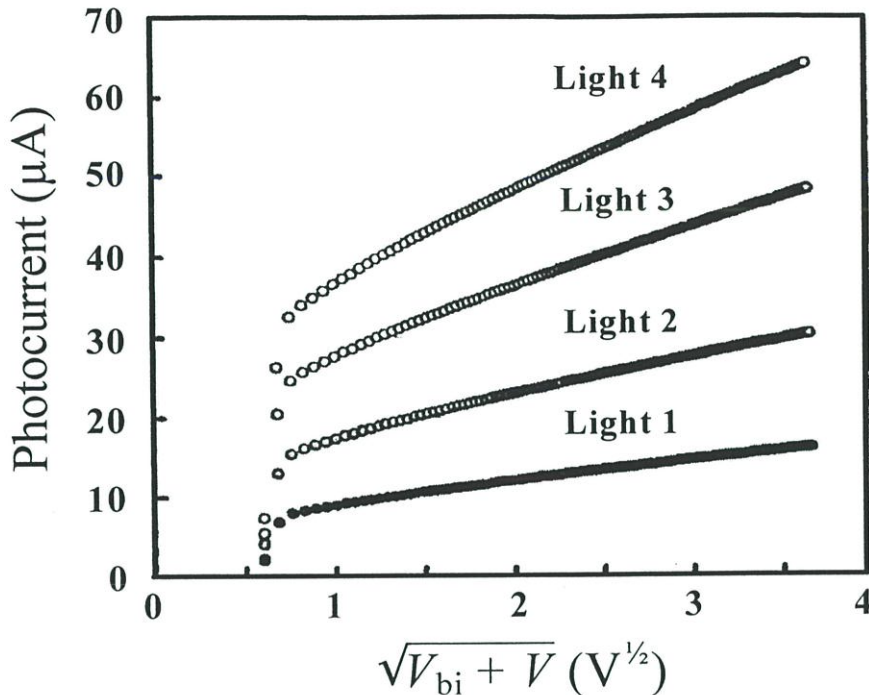
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.3 นี้ ทำให้ทราบค่าแรงดันภายในและความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อถัดไป

6.4 การวิเคราะห์สัญญาณแสงของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์กระแสแสงที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันไบแอสของอุปกรณ์ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต ซึ่งได้เปรียบเทียบกับกระแสแสงระหว่างอุปกรณ์ที่มีลวดลายแบบช่องเดียวกับอุปกรณ์ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตที่มี 3 และ 5 แถบ ตามลำดับ

ในรูปที่ 6.13 เป็นการนำกราฟในรูปที่ 5.9 (บทที่ 5) มาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของรอกกำลังที่ 2 ของแรงดันไบแอส ในรูปที่ 6.13 นี้ ค่าของแรงดันภายใน ซึ่งมีค่าประมาณ 0.23 V ได้ถูกพิจารณารวมเข้ากับแกนแรงดันไบแอสด้วย แสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ค่อนข้างเป็นเชิงเส้นของกราฟทุกเส้น ถึงแม้ว่าลักษณะเฉพาะของกระแสแสง (I_p) สำหรับแบบ 5 แถบไม่ได้แสดงไว้ในที่นี้ด้วย แต่กระแส I_p ของแบบ 5 แถบ จะมีปริมาณของกระแสมากกว่าแบบ 3 แถบ และแบบช่องเดียว ซึ่งลักษณะเฉพาะเหล่านี้ขึ้นกับแรงดันไบแอสและจำนวนของแถบ กระนั้นการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงในรูปฟังก์ชันการเพิ่มแรงดันไบแอสจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะ ในรูปที่ 6.13 เส้นกราฟที่ลากมาตัดแกนกระแสจะประมาณได้ว่าเป็นส่วนประกอบของกระแสจากการแพร่ดังที่เคยกล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งขึ้นกับความเข้มแสงระดับต่างๆ กันด้วย

จากแบบจำลองอย่างง่ายสามารถคำนวณค่าของกระแสแสงที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันไบแอสและความกว้างบริเวณปลอดพาหะได้ พารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 6.4 ในที่นี้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ $W_d(V)$ เพิ่มขึ้นกับแรงดันไบแอส โดยเริ่มจากความกว้างที่สอดคล้องกับแรงดันภายใน (V_{bi}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.3) คือ



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับเทอมรากกำลังที่ 2 ของแรงดันไบแอสของอุปกรณ์เดียวกับที่แสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน

$$W_d(V) = \sqrt{\beta(V_{bi} + V)} \quad (6.3)$$

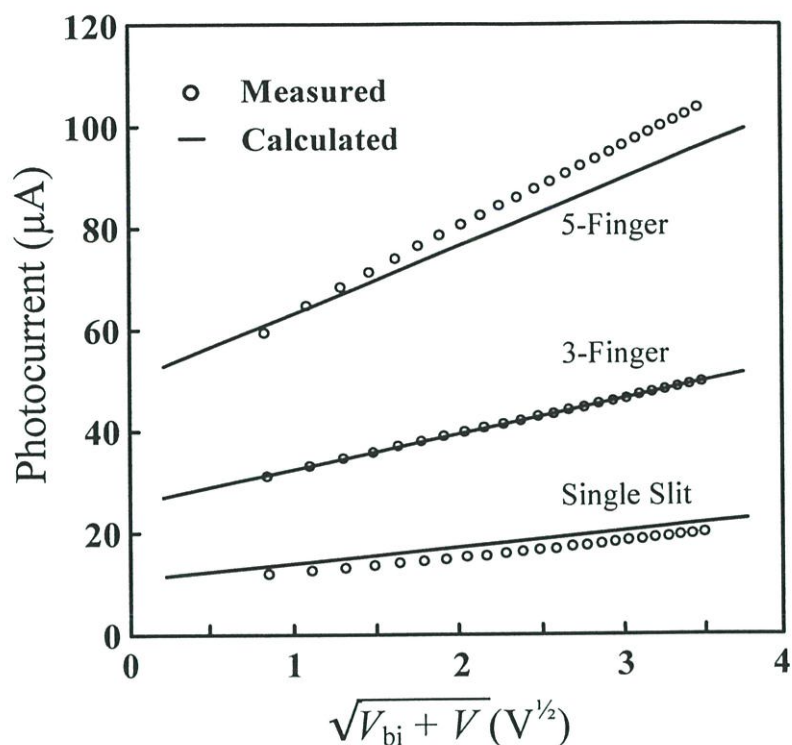
โดยที่ β คือ พารามิเตอร์ของ $2\epsilon_s/qN_d = 16.5 \mu\text{m}^2/V$

สมมติว่ากระแสแสงแปรผันตรงกับส่วนรับแสง ดังนั้นกระแสแสงจะหาได้ในเทอมของ

$$I_p = \eta'[kW_d(V) + L] \quad (6.4)$$

โดยที่ η' คือ แฟคเตอร์ของการแปรผันตรงที่รวมส่วนของความยาวของแถบโลหะและผลกระทบบที่ส่วนปลายแถบ และแฟคเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ประสิทธิภาพควอนตัม เป็นต้น

เพื่อทราบค่ากระแสแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสค่า η' ถูกหาค่าจากการฟิตกราฟ (fit curve) ข้อมูลจากอุปกรณ์ที่มี 3 แถบ จากสมการที่ (6.4) ส่วนสนับสนุนจากบริเวณนิวทรัลจะถูกพิจารณาโดยใช้ระยะการแพร่ของพาหะ (L) เนื่องจาก L คือ ระยะการแพร่ของพาหะส่วนน้อย ดังนั้นส่วนสนับสนุนจากเทอมนี้ โดย



รูปที่ 6.14 ลักษณะเฉพาะกระแสแสง-แรงดันจากการทดลองและการคำนวณ โดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 สัญลักษณ์ และค่าคงที่ ซึ่งใช้คำนวณในสมการที่ (6.3) และ (6.4)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	ค่า	หน่วย
I_p	กระแสแสง	-	μA
V	แรงดันไบแอสระหว่างขั้วอานอดและคาโทด	1 - 20	V
V_{bi}	แรงดันภายในของ Mo/n-Si	0.23	V
$W_d(V)$	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	-	μm
β	พารามิเตอร์ของ $2\epsilon_s/qN_d$	16.5	μm ² /V
ϵ_s	เปอร์มิตทิวิตีของซิลิคอน	1.054×10^{-10}	F/m
q	ประจุอิเล็กตรอน	1.6×10^{-19}	C
N_d	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือปนผู้ให้ของซิลิคอน	8×10^{13}	cm ⁻³
L	ระยะการแพร่ของพาหะ	70	μm
k	อัตราส่วนในการเกิดกระแสแสงของบริเวณปลอดพาหะต่อบริเวณนิวทรัล	2.6	เท่า

พื้นฐานแล้วจะเป็นอิสระจากแรงดันไบแอสตรงเท่าที่แถบพลังงานของส่วนนิวทรัลยังคงแบนราบ แต่ กระนั้นในสมการที่ (6.4) พบว่า ที่บริเวณปลอดพาหะจะมีประสิทธิภาพในการเกิดกระแสมากกว่าส่วน นิวทรัลเป็น k เท่า ซึ่งในสมการนี้จะใช้ค่า $k = 2.6$ เท่า เพื่อหาลักษณะเฉพาะกระแสแสงกับแรงดันไบ- แอสสำหรับอุปกรณ์ที่มีแถบโลหะ 3 แถบ ดังแสดงในรูปที่ 6.14 ส่วนกราฟอีกสองเส้นในรูปเป็นอุปกรณ์ แบบช่องเดี่ยว และแบบแถบโลหะ 5 แถบ ในรูปสัญลักษณ์วงกลมเปิดหมายถึงผลการทดลอง ส่วนการ คำนวณแสดงด้วยเส้นทึบ จากผลลัพธ์แสดงว่ากระแสที่ได้จากอุปกรณ์แบบโลหะ 3 แถบ มีค่าประมาณ ครึ่งหนึ่งของแบบโลหะ 5 แถบ ซึ่งสามารถยอมรับได้จากการพิจารณาจำนวนของแถบโลหะของแต่ละ อุปกรณ์ นั่นคือ แบบจำลองที่นำเสนอไว้ข้างต้นสามารถนำมาใช้อธิบายผลการทดลองของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีสวิตช์ทั้งแบบช่องเดี่ยวและแบบอินเตอร์ดิจิตัลได้ และยังทำให้เราสามารถเปลี่ยนแปลง กระแสแสงจากแสงที่ตกกระทบได้ทั้งในรูปของความเข้มแสงและแรงดันไบแอส

บทที่ 7

สรุป

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยมีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้ถูกกำหนดไว้แต่แรก (ในบทที่ 1) และด้วยโครงสร้างที่เป็นแบบพลาสมาสามารถสร้างได้ง่ายด้วยกระจกต้นแบบเพียง 1 แผ่นและยังสอดคล้องกับกระบวนการสร้างวงจรรวม ดังนั้น ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM นี้ จึงมีจุดเด่นที่ทำให้นักวิจัยจำนวนมากสนใจที่จะเรียนรู้ และเร่งพัฒนา เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในอนาคตอันใกล้นี้ โดยเฉพาะถ้าเลือกสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอน ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูก และสามารถทำการศึกษาได้ในห้องวิจัยที่มีอุปกรณ์ไม่มากนัก กระบวนการสร้างมีความปลอดภัยสูง จึงเป็นมูลเหตุให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้นมา ซึ่งสรุปสาระสำคัญได้ดังต่อไปนี้

โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้เป็นชนิด Mo/n-Si/Mo ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ซึ่งสร้างบนแผ่นซิลิคอนชนิดผลึกเชิงเดี่ยวที่มีค่าสภาพต้านทาน 40-50 Ω -cm โดยมีลวดลายของอุปกรณ์ 2 แบบ คือ (1) ลวดลายแบบช่องเดี่ยว และ (2) แบบอินเตอร์ดิจิตท จากนั้นจึงนำอุปกรณ์ไปทำการทดสอบ เพื่อหาลักษณะเฉพาะทั้งทางไฟฟ้าและแสง

จากการตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานและลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของโครงสร้าง ซึ่งให้คุณสมบัติที่ดีเป็นที่น่าพอใจ และสอดคล้องกับข้อดีที่แบริเออร์ทั่วไป ส่วนกระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดก็มีค่าต่ำ และเมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติทางแสงทั้งจากแสงฮาโลเจนและแสง He-Ne เลเซอร์ ผลการทดลองยังยืนยันถึงการนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงที่ดีมาก ถึงแม้ว่าความเข้มแสงจะมีค่าต่ำในระดับ 0.6 mW (He-Ne เลเซอร์) ยังสามารถให้กระแสแสงมากพอสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี

เนื่องจากโครงสร้างของ MSM ที่สร้างขึ้นนี้มีความแตกต่างจากของนักวิจัยอื่นๆ โดยออกแบบให้มีระยะห่างของขั้วไฟฟ้ากว้าง จึงทำให้ได้คุณสมบัติบางประการที่เด่นและน่าสนใจ นอกเหนือจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมามีมุ่งเน้นแต่เรื่องความเร็วในการตอบสนองสัญญาณเท่านั้น ซึ่งคุณสมบัตินี้ถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ คือ การควบคุมกระแสแสงด้วยแรงดันไฟฟ้า นอกเหนือจากการควบคุมกระแสแสงจากความเข้มแสงที่ตกกระทบบัวอุปกรณ์ ดังที่พบเห็นกันในตัวตรวจวัดแสงทั่วไป

กระแสแสงที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างของขั้วไฟฟ้ากว้าง เกิดขึ้นจากพาหะอิสระ 2 บริเวณ คือ (1) ในบริเวณปลอดพาหะ เรียกกระแสแสงนี้ว่า กระแสโฟโตไดโอด พาหะอิสระที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเหมือนกับตัวตรวจวัดแสงโฟโตไดโอดทั่วไป ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ และ (2) ในบริเวณนิวทรัล ซึ่งเรียกกระแสแสงนี้ว่า

กระแสไฟโตคอนดักเตอร์ พาหะอิสระ (โฮล) ที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าแบบแรก เนื่องจากเป็นการเคลื่อนที่แบบกลไกการแพร่ ซึ่งเกิดขึ้นภายในระยะการแพร่ที่มีค่าประมาณ $70 \mu\text{m}$ ดังนั้นถ้าสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้ให้ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีค่ามากกว่าผลรวมของบริเวณปลอดพาหะและระยะการแพร่แล้ว จะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณของกระแสแสงที่เกิดขึ้น

กระแสแสงไฟโตคอนดักเตอร์ที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้อย่างเด่นชัดด้วยความถี่เทอราเฮิรตซ์ต่ำ เนื่องจากพาหะอิสระที่เกิดจากแสงตกกระทบในบริเวณนิวทรัลจะเคลื่อนที่สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะเวลา (τ) และเมื่อนำพารามิเตอร์ดังกล่าวมาจำลองแบบด้วยวงจรสมมูลความถี่ต่ำอย่างง่าย ซึ่งได้ผลของการจำลองแบบและผลของการทดลองที่สอดคล้องกัน จึงแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของแนวความคิดเกี่ยวกับกระแสแสงไฟโตคอนดักเตอร์

การควบคุมกระแสแสงด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เป็นคุณสมบัติเด่นที่แตกต่างจากตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตไดโอดทั่วๆ ไป เมื่อให้แรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นจะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่บริเวณผิวหน้าของซิลิคอน (ในส่วนบริเวณรับแสง) มีค่ามากขึ้น และจากการทดลองพบว่า ที่บริเวณปลอดพาหะจะมีประสิทธิภาพในการเกิดกระแสแสงได้มากกว่าบริเวณนิวทรัลถึง 2.6 เท่า หรืออาจกล่าวอย่างง่าย ๆ ได้ว่า เมื่อให้แรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้กระแสแสงที่ได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตเป็นลวดลายที่นิยมใช้สร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ทั้งนี้เนื่องจากสามารถเพิ่มบริเวณส่วนรับแสงให้มากขึ้นได้ จึงทำให้มีความไวในการรับแสงที่ความเข้มต่ำๆ ได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ตัวแปรที่จะกำหนดถึงความเข้มแสงต่ำสุดที่รับได้ก็คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากตัวตรวจวัดแสงนั่นเอง แต่กระนั้นจากลวดลายแบบนี้ทำให้เราสามารถได้รับกระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของลวดลายแบบช่องเดี่ยว และจากผลการทดลองการตีมอดูเลทของสัญญาณและการหาความผิดพลาดของสัญญาณที่ได้จากการตีมอดูเลทในขณะที่ให้แรงดันไบแอสเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งไม่พบความผิดพลาดของสัญญาณที่ได้รับ แสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนี้ทำหน้าที่ในการตีมอดูเลทสัญญาณได้ดีเยี่ยม อย่างไรก็ตาม สำหรับลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงขนาดของลวดลายที่ดีที่สุด [57] ซึ่งจะช่วยให้ตัวตรวจวัดแสงแบบนี้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

การตอบสนองความถี่ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างของขั้วไฟฟ้ากว้างนี้มีค่าไม่สูงมากนัก แต่ถ้าต้องการให้อุปกรณ์นี้ทำงานที่ความถี่สูงในระดับกิกะเฮิรตซ์จะต้องลดขนาดของระยะห่างขั้วไฟฟ้าให้มีค่าน้อยมากๆ (น้อยกว่า $3 \mu\text{m}$) อย่างไรก็ตาม ด้วยขีดจำกัดของอุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการทำให้ไม่สามารถลดขนาดเล็กลงนี้ได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจึงตอบสนองความถี่ของสัญญาณอยู่ในช่วงของความถี่ต่ำ

เนื่องจากจุดเด่นของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้เป็นการควบคุมกระแสแสงด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอส ดังนั้นแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมควรนำมาใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไอริสซึ่งไม่จำเป็นต้องทำงานด้วยความเร็วสูง

จากการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างของขั้วไฟฟ้ากว้าง ซึ่งได้กล่าวไว้ทั้งหมดนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นจากโลหะชนิดอื่นๆ ได้ ดังเช่น โลหะอลูมิเนียม [47] และโลหะทองแดง เป็นต้น นอกจากนี้การพิจารณาถึงผลกระทบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกัน ดังเช่น สร้างส่วนป้องกันการสะท้อน (antireflection) [11] หรือการใช้ขั้วโลหะไฟฟ้าแบบโปร่งแสง [58] เป็นต้น จะนำไปสู่การพัฒนาให้ตัวตรวจวัดแสงนี้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chyi J.-I., Wei T.-S., Hong J.-W., Lin W. and Tu Y.-K., "Low Dark Current and High Linearity InGaAs MSM photodetectors", *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 4, February 1994, pp. 355-356.
- [2] Yuang R.-H., Chyi J.-I., Chan Y.-J., Lin W. and Tu Y.-K., "High-Responsivity MSM photodetectors with Semi-Transparent Schottky Contacts", *Photonics Technology Letters*, Vol. 7, No. 11, November 1995, pp. 1333-1335.
- [3] Harder Ch. S., Van Zeghbroeck B. J., Kesler M. P., Meier H. P., Vettiger P., Webb D. J. and Wolf P., "High-Speed GaAs/AlGaAs Optoelectronic Devices for Computer Applications", *IBM Journal Develop*, Vol. 34, No. 4, July 1990, pp. 568-584.
- [4] Mullins B. W., Soares S. F., McArdle K. A., Wilson C. M. and Brueck S. R. J., "A Simple High-Speed Si Schottky Photodiodes", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 3, No. 4, April 1991, pp. 360-362.
- [5] Jagannath C., Masum Choudhury A. N. M., Negri A., Elman B., and Haugsjaa P., "High-Speed 1.3 μm InGaAs/GaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetector", *Journal of Applied Physics Letters*, Vol. 58, No. 4, January 1991, pp. 325-327.
- [6] Makiuchi M., Hamaguchi H., Kumai T., Ito M., Wada O., and Sakurai T., "A Monolithic Four-Channel Photoreceiver Integrated on a GaAs Substrate Using Metal-Semiconductor-Metal Photodiodes and FET's", *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-6, No.12, December 1985, pp. 634-635.
- [7] Rogers D. L., "Monolithic Integration of a 3-GHz Detector/Preamplifier Using a Refractory-Gate, Ion-Implanted MESFET Process", *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-7, No. 11, November 1986, pp. 600-602.
- [8] Hamaguchi H., Makiuchi M., Kumai T., and Wada O., "GaAs Optoelectronic Integrated Receiver with High-Output Fast-Response Characteristics", *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-8, No.1, January 1987, pp. 39-41.
- [9] Sze S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981.

- [10] Bhattacharya P., *Semiconductor Optoelectronic Devices*, 2nd Ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1997.
- [11] Alexander S. B., *Optical Communication Receiver Design*, SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1997.
- [12] ดุสิต เครื่องงาม., *สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน*, เล่ม 1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2542.
- [13] Sze S.M., Coleman D. J., Jr. and Loya A., "Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structures", *Solid-State Electronics*, Vol. 14, 1971, pp. 1209-1218.
- [14] Sze S. M., and Coleman D. J., Jr., "A Low-Noise Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Micro-Wave Oscillator", *The Bell System Technical Journal*, Vol. 50, May-June 1971, pp. 1695-1699.
- [15] Chou S. Y., and Liu M. Y., "Nanoscale Tera-Hertz Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 28, No. 10, October 1992, pp. 2358-2368.
- [16] Sugeta T., and Urisu T., "High Gain Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors for High-Speed Optoelectronic Circuits", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 26, No. 11, November 1979, pp. 1855-1856.
- [17] Auston D. H., Johnson P. R., and Betan J. C., "Picosecond Optoelectronic Detection, Sampling, and Correlation Measurements in Amorphous Semiconductors", *Journal of Applied Physics Letters*, Vol. 37, No. 4, August 1980, pp. 371-373.
- [18] Hong W.-P., Chang G.-K., and Bhat R., "High-Performance $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MSM Photodetectors Grown by OMCVD", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 36, No. 4, April 1989, pp. 659-662.
- [19] Van Zeghbroeck B. J., Patrik W., Halbout J.-M., and Vettiger P., "105 GHz Bandwidth Metal-Semiconductor-Metal Photodiodes", *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 9, No. 10, October 1988, pp. 527-529.
- [20] Chou S. Y., Williamson S., Brock T., Smith F. W., and Calawa A. R., "375 GHz Photodiode on Low-Temperature GaAs", *Journal of Applied Physics Letters*, Vol. 59, No. 16, October 1991, pp. 1984-1986.

- [21] Klingenstein M., Khul J., Notzel R., Ploog K., Rosenzweig J., Moglestue C., Hulsmann A., Schneider J., and Kohler K., "Ultrafast Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors Fabricated on Low-Temperature GaAs", *Journal of Applied Physics Letters*, Vol. 60, No. 5, February 1992, pp. 627-629.
- [22] 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.
- [23] Ito M., and Wada O., "Low Dark Current GaAs Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Photodiodes Using WSi_x Contacts", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-22, No. 7, July 1986, pp. 1073-1077.
- [24] Soole J. B. D., and Schumacher H., "InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors for Long Wavelength Optical Communications", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 27, No. 3, March 1991, pp. 737-752.
- [25] Lim Y. C., and Moore R. A., "Properties of Alternately Charged Coplanar Parallel Strips by Conformal Mappings", *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol. ED-15, No. 3, March 1968, pp.173-180.
- [26] Seto M., Leduc V.-J., and Lammers A. M. F., "Al-n-Si Double Schottky Photodiodes for Optical Storage Systems", 27th European Solid-State Device Research Conference, Stuttgart, September 1997.
- [27] Niemcharoen S., Kobayashi K., Kimura M., and Sato K., "Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Conditions", *Solid-State Electronics*, Vol. 45, No. 10, October 2001, pp. 1815-1819.
- [28] Masui T., Khunkhao S., Kobayashi K., Niemcharoen S., Supadech S., and Sato K., "Photosensing Properties of Interdigitated Metal-Semiconductor-Metal Structures with Undepleted Region", *Solid-State Electronics*, Vol. 47, No. 8, August 2003, pp. 1385-1390.
- [29] Khunkhao S., Yasumura Y., Kitagawa K., Masui T., and Sato K., "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.
- [30] Sharma A. K., Scott K. A. M., Brueck S. R. J., Zolper J. C., and Myers D. R., "Ion Implantation Enhanced Metal-Si-Metal Photodiodes", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 6, No. 5, May 1994, pp. 635-638.

- [31] Jacob Y. L., and Wong K. S., "Bandwidth Enhancement in Silicon Metal-Semiconductor-Metal Photodetector by Trench Formation", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 8, August 1996, pp. 1064-1066.
- [32] Kano G., Inoue M., Matsuno J., and Takayanagi S., "Molybdenum-Silicon Schottky Barrier", Journal of Applied Physics, Vol. 37, No. 8, July 1966, pp. 2985-2987.
- [33] Zettler R. A., and Cowley A. M., "p-n Junction-Schottky Barrier Hybrid Diode", IEEE Transactions Electron Devices, Vol. ED-16, No. 1, January 1969, pp. 58-63.
- [34] Sato K., and Yasumura Y., "Study to Forward I-V Plot for Schottky Diode with High Series Resistance", Journal of Applied Physics, Vol. 58, No. 9, November 1985, pp. 3655-3657.
- [35] Milnes A. G., and Feucht D. L., *Metal-Semiconductor Junctions*, McGrath Academic Press, New York, 1973.
- [36] Takano H., Kimura M., Ando T., Niemcharoen S., Yasumura Y. and Sato K., "Optical Response of Planar Mo/n-Si/Mo Structures with Long Neutral Region and Schottky Barriers at Both Ends", Solid-State Electronics, Vol. 44, No. 12, December 2000, pp. 2161-2164.
- [37] Kobayashi K., Niemcharoen S., Supadech S., Yasumura Y., and Sato K., "Intrinsic and Extrinsic Photoresponse of Mo/n-Si/Mo Structures with Wide Electrode Gap", Solid-State Electronics, Vol. 46, No. 9, September 2002, pp. 1411-1416.
- [38] Chen J.-W., Kim D.-K., and Das M. B., "Transit-Time Limited High-Frequency Response Characteristics of MSM Photodetectors", IEEE Transactions on Electron Devices Vol. 43, No. 11, November 1996, pp. 1838-1843.
- [39] สมเกียรติ ศุภเดช., *เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.*
- [40] Fukuda M., *Optical Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- [41] Niemcharoen S., Ando T., Supadech S., Yasumura Y., and Sato K., "Observation of Photoinduced Shot Noise in Planar Mo/n-Si/Mo Structures with Undepleted Regions", Solid-State Electronics, Vol. 46, April 2002, pp. 481-485.

- [42] Berger P. R., "MSM Photodiodes", IEEE Potentials, Vol. 15, No. 2, April/May 1996, pp. 25-29.
- [43] สมเกียรติ ศุภเดช., **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545.
- [44] Rhoderick E. H., and Williams R. H., **Metal-Semiconductor Contacts**, 2nd Ed., Oxford University Press, New York, 1988.
- [45] Yu A. Y. C., and Mead C. A., "Characteristics of Aluminum-Silicon Schottky Barrier Diode", Solid-State Electronics, Vol. 13, February 1970, pp. 97-104.
- [46] สรยุทธ์ วิชาแสงสุข., **การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/Si/Al**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [47] Khunkhao S., Niemcharoen S., Supadech S., and Sato K., "White Noise Due to Photocurrents in Planar MSM on Low-resistivity Si", Solid-State Electronics, Vol. 47, October 2003, pp. 1869-1874.
- [48] Ristova M., Kuo Y., and Lee S., "Influence of the Roughness of Molybdenum Back Electrode on the Photodiode Characteristics under He-Ne Illumination", Semiconductor Science and Technology, Vol. 18, No.8, August 2003, pp. 788-793.
- [49] สุริยัน ศรีสวัสดิ์กุล., **ศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์**, สกายบุ๊กส์ จำกัด, ปทุมธานี, 2539, หน้า 690.
- [50] DiDomenico M. Jr., and Svelto O., "Solid-State Photodetection : A comparison between Photodiodes and Photoconductors", Proceeding of the IEEE, Vol. 52, No. 1, January 1964, pp. 136-144.
- [51] Moglestue C., Rosenzweig J., Kuhl J., Klingenstein M., Lamsdorff L., Axmann A., Schneider J., and Hulsmann A., "Picosecond Pulse Response Characteristics of GaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetector", Journal of Applied Physics, Vol. 70, No. 4, August 1991, pp. 2435-2448.
- [52] Koscielniak W. C., Pelouard J-L., and Littlejohn M. A., "Intrinsic and Extrinsic Response of GaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 2, No. 2, February 1990, pp. 125-127.

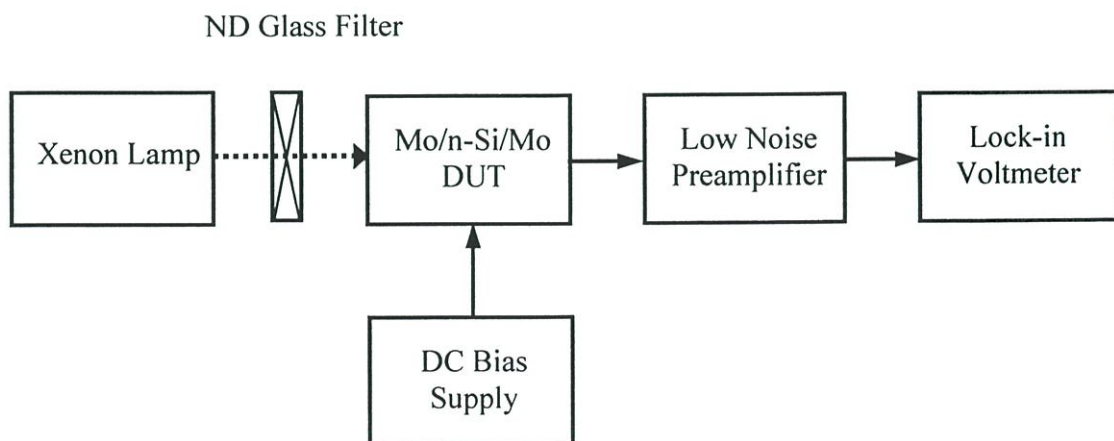
- [53] Soole J. B. D., and Schumacher H., "Transit-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodetectors", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 37, No. 11, November 1990, pp. 2285-2291.
- [54] Schumacher H., Leblanc H. P., Soole J., and Bhat R., "An Investigation of the Optoelectronic Response of GaAs/InGaAs MSM Photodetectors", IEEE Electron Device Letters, Vol. 9, No.11, November 1988, pp. 607-609.
- [55] Sato Y., Miyagi H., Takano H., Taguchi S., Matsumoto T., and Sato K., "Transit-Time-Limited Shot Noise Due to Carrier Generation in Semiconductors : A new Approach", Solid-State Electronics, Vol. 42, 1998, pp. 660-662.
- [56] Wolf L. F., *Silicon Semiconductor Data Book*, Pergamon, Oxford, 1969.
- [57] Averine S. V., Chan Y. C., and Lam Y. L., "Geometry Optimization of Interdigitated Schottky-Barrier Metal-Semiconductor-Metal Photodiode Structures", Solid-State Electronics, Vol. 45, March 2001, pp. 441-446.
- [58] Gao W., Khan A.-S., Berger P. R., Hunsperger R., Zydzik G., O'Bryan H. M., Sivco D., and Cho A. Y., "In_{0.53}Ga_{0.47}As Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors with Transparent Cadmium Tin Oxide Schottky Contacts", Journal of Applied Physics Letters, Vol. 65, No. 15, October 1994, pp. 1930-1932.
- [59] Ziel A. V. D., *Noise in Solid State Devices and Circuits*, John Wiley, New York, 1986.
- [60] Keyes R. J., Editor., *Optical and Infrared Detectors*, Springer, Berlin, 1980.

ภาคผนวก ก

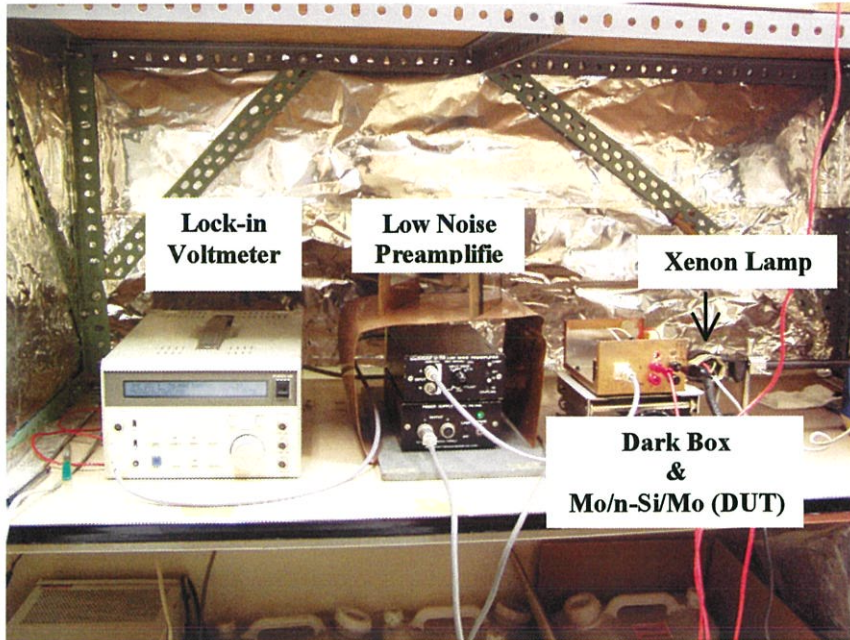
สัญญาณรบกวนแบบซีดในตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo

สัญญาณรบกวนเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ซึ่งเป็นตัวกำหนดถึงความไวในการตรวจวัดแสงที่มีความเข้มต่ำๆ และสัญญาณรบกวนแบบซีด (หัวข้อ 2.3.4) เป็นสัญญาณรบกวนชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจวัดแสง เพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบของสัญญาณรบกวนแบบซีดในตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง [41] (เป็นส่วนเพิ่มเติมนอกเหนือจากเนื้อหาหลักของวิทยานิพนธ์) ดังนั้นในภาคผนวกนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการหาสัญญาณรบกวนแบบซีด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสโฟโตไดโอดและกระแสโฟโตคอนดักเตอร์

การทดลองเพื่อหาสัญญาณรบกวนแบบซีด แสดงดังในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ ก1 โดยให้แสงจากหลอดซีนอน (xenon lamp) ตกกระทบไปที่ตัวตรวจวัดแสง Mo/n-Si/Mo ที่อยู่ภายในกล่องป้องกันแสงภายนอก และให้แรงดันไบแอสแก่อุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo เท่ากับ 12 V ส่วนโหลดความต้านทานที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์มีค่า 1 k Ω สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise preamplifier) จากนั้นสัญญาณที่ออกจากเครื่องขยายสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดแรงดันแบบล็อก-อิน (lock-in voltmeter) สำหรับช่วงความถี่ที่ใช้ในการวัดสัญญาณรบกวนแบบซีดนี้อยู่ในช่วง 1 ถึง 200 kHz ส่วนในรูปที่ ก2 เป็นภาพถ่ายของชุดทดลองที่ตรงกับบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูป ก1



รูปที่ ก1 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองการหาสัญญาณรบกวนแบบซีดของ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง



รูปที่ ก2 ภาพถ่ายชุดทดลอง เพื่อทดลองหาสัญญาณรบกวนแบบช็อคของ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง

กระแสสัญญาณรบกวน (current noise spectrum ; $S(\omega)$) เป็นไปตามความสัมพันธ์ คือ

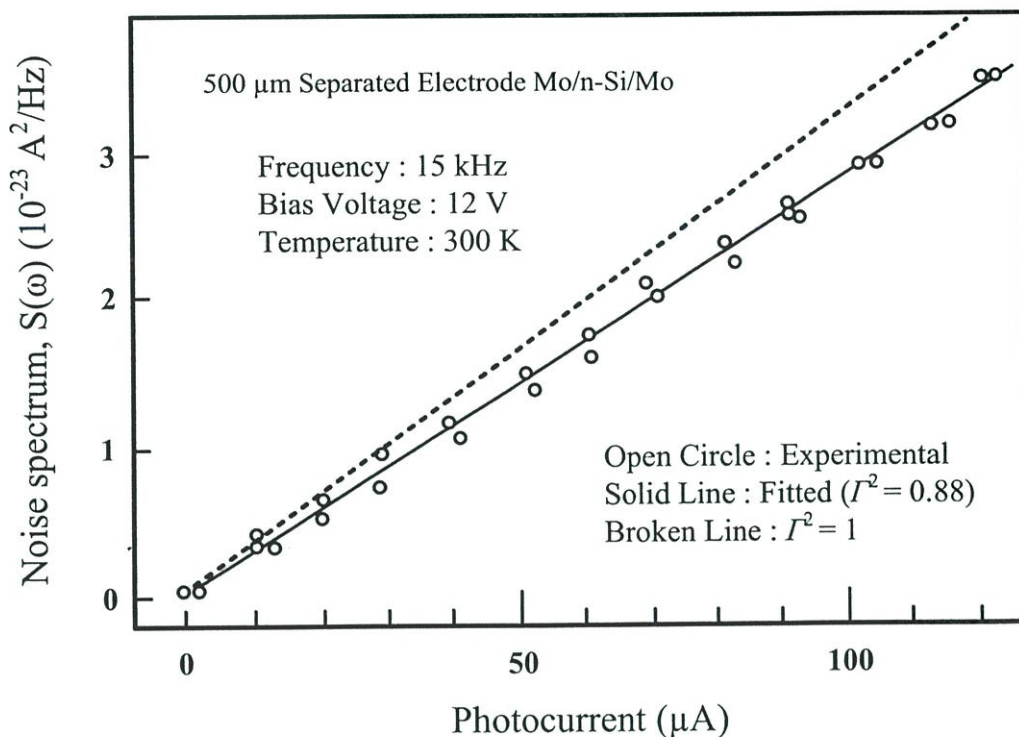
$$S(\omega) = 2qI\Gamma^2 \quad (ก1)$$

โดยที่ q คือ ประจุไฟฟ้าพื้นฐาน (C)

I คือ กระแสของอุปกรณ์ (A)

Γ^2 คือ แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวน (noise factor) [59]

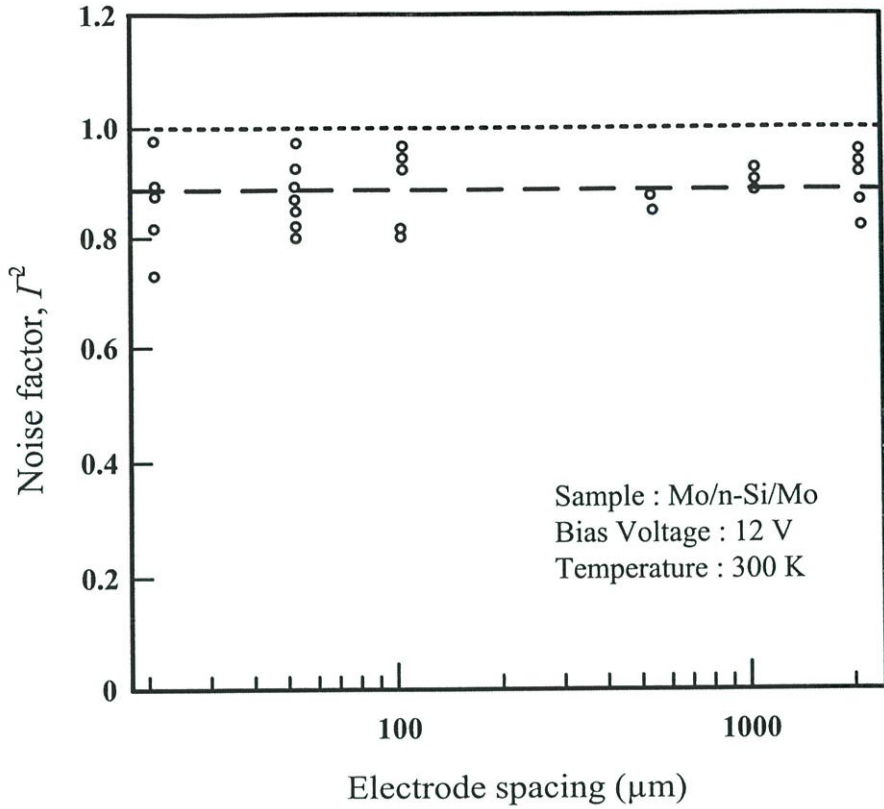
สำหรับความสัมพันธ์ของเทอม $\Gamma^2 = 1$ เป็นเทอมที่ยอมรับกันโดยทั่วไปทางทฤษฎี สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสองขั้ว ดังเช่น โฟโตไดโอด [9] และโฟโตคอนดักเตอร์ [9], [60] ในรูปที่ ก3 แสดงถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนกับกระแสของอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 500 μm โดยวัดที่ความถี่ 15 kHz ในรูปนี้พบว่าสัญญาณรบกวนจะแปรโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านในตัวอุปกรณ์ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (ก1) เส้นทึบในรูปได้จากการการหาด้วยเทคนิคเทอมกำลังสองน้อยที่สุด (method of least squares) เส้นประจะแสดงค่าของเทอม $\Gamma^2 = 1$ ส่วนแฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนจากชิ้นงานที่ถูกทดสอบนี้ (กราฟเส้นทึบ) สอดคล้องกับค่า $\Gamma^2 = 0.88$ ด้วยวิธีการหาแบบเดียวกันนี้เราสามารถหาแฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนของชิ้นงานอื่นๆ ได้ ในรูปที่ ก4 แสดงถึงแฟคเตอร์ของสัญญาณ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนกับกระแสของตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ภายใต้แสงตกกระทบบ โดยวัดที่ความถี่ 15 kHz

รบกวนของชิ้นงานทั้งหมดที่ถูกทดสอบ ถึงแม้ว่าจะมีการกระจายของข้อมูลที่ทำให้การทดลอง แต่อาจกล่าวได้ว่าแฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งคาดได้จากทฤษฎีของสัญญาณรบกวนแบบช็อค [59] และดูเหมือนว่าแฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนจะไม่ขึ้นกับระยะห่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งกราฟเส้นประยาวจะสอดคล้องกับค่า $R^2 = 0.89$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งหมด และจากที่เคยได้ทำการทดลองไว้จากการตอบสนองสัญญาณที่ความถี่ต่ำ [36] พบว่ากระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงตกกระทบบประกอบด้วยส่วน ประกอบของกระแส 2 ส่วน คือ จากบริเวณปลอดพาหะในลักษณะเหมือนกับกระแสโฟโตไดโอด และจากบริเวณนิวทรัลในลักษณะของกระแสโฟโตคอนดักเตอร์

พาหะอิสระ (โฮล) ที่เกิดขึ้นจากแสงตกกระทบบในบริเวณนิวทรัลจะแพร่ไปยังบริเวณปลอดพาหะและสนับสนุนให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากแถบพลังงานในบริเวณนิวทรัลแบนราบองค์ประกอบของกระแสจึงเกิดขึ้นจากกระบวนการแพร่ [36] ดังนั้นพาหะที่ทำให้เกิดกระแสจึงขึ้นกับเวลาในการเคลื่อนที่ภายในบริเวณนิวทรัลมากกว่าในบริเวณปลอดพาหะ นั่นคือ เวลาการแพร่จะถูกจำกัดด้วยเวลาชีวิตเฉลี่ย หรือความยาวการแพร่ของพาหะ และมีสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์ร่วมกัน (correlation coefficient), $c(s)$, [36], [59] คือ



รูปที่ ก4 แพลคเตอร์ของสัญญาณรบกวนของตัวตรวจวัดชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20 ถึง 2000 μm เส้นประยาวแสดงแพลคเตอร์ของสัญญาณรบกวนเฉลี่ย สำหรับชิ้นงานที่ถูกทดสอบ ($\Gamma^2=0.98$) ส่วนเส้นประสั้นแสดงถึงสัญญาณรบกวนแบบช็อตแบบเต็มระดับ (full shot noise)

$$c(s) = \exp(-s/\tau) \tag{ก2}$$

โดยที่ s คือ เวลาที่สัมพันธ์ร่วมกัน (correlation time) (s)

τ คือ เวลาชีวิตเฉลี่ย (s)

เนื่องจากกระแสของอุปกรณ์ประกอบด้วยกระแส 2 ส่วน ซึ่งเกิดจากบริเวณที่แตกต่างกัน ดังที่กล่าวข้างต้น ในการวิเคราะห์นี้ จึงสรุปว่า จากมุมมองของสัญญาณรบกวนกระแสทั้งสองจะไม่มี ความสัมพันธ์กัน ดังนั้นผลรวมของสัญญาณรบกวน $S(\omega)$ จึงแสดงได้ในรูปของ

$$S(\omega) = S_d(\omega) + S_c(\omega) \tag{ก3}$$

โดยที่ $S_d(\omega)$ คือ สัญญาณรบกวน เนื่องจากกระแสจากบริเวณปลอดพาหะ (A^2/Hz)

$S_c(\omega)$ คือ สัญญาณรบกวน เนื่องจากกระแสจากบริเวณนิวทรัล (A^2/Hz)

เทอม $S_d(\omega)$ และ $S_c(\omega)$ มีค่าเท่ากับ

$$S_d(\omega) = 2qI_d\Gamma_d^2 \quad (n4)$$

$$S_c(\omega) = 2qI_c\Gamma_c^2 \quad (n5)$$

โดยที่ I_d และ I_c คือ ส่วนประกอบกระแสจากบริเวณปลอดพาหะและจากบริเวณนิวทรัล ตามลำดับ

Γ_d^2 และ Γ_c^2 คือ แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนของส่วนประกอบกระแสจากบริเวณปลอดพาหะ และจากบริเวณนิวทรัล ตามลำดับ

จากทฤษฎีของสัญญาณรบกวนแบบช็อต [9], [59], [60] Γ_d^2 อาจมีค่าเป็นหนึ่ง เมื่อสเปกตรัมเป็นอิสระกับความถี่ และเพื่อยืนยันในข้อนี้ จึงทำการวัดสัญญาณรบกวนแบบช็อตของตัวตรวจวัดแสงแบบช็อตกึ่งแบริเออร์ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งที่มีขายกันทั่วไป ซึ่งมีบริเวณนิวทรัลสั้นมาก ดังนั้นกระแสจากบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเด่น ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ก1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนใกล้เคียงหนึ่ง ผลลัพธ์นี้หมายความว่าสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนแบบช็อต สำหรับเหล่านี้ไดโอดเป็นผลให้ $\Gamma_d^2 = 1$ ดังนั้นสมการที่ (n4) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$S_d(\omega) = 2qI_d \quad (n6)$$

จากสมการที่ (n3), (n5) และ (n6) จะได้ว่า

$$S(\omega) = 2qI_d + 2qI_c\Gamma_c^2 = 2qI\Gamma^2 \quad (n7)$$

โดยที่ I คือ กระแสแสงรวม ซึ่งเป็นผลรวมของ $I_d + I_c$

ตารางที่ ก1 แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวนของโฟโตไดโอดแบบ GaP ช็อตกึ่ง และ GaAsP ช็อตกึ่ง ที่มีขายทั่วไป (อุณหภูมิ : 300 K)

วัสดุ	พื้นที่ (mm ²)	ความสูงกำแพงศักย์* (eV)	แฟคเตอร์ของสัญญาณรบกวน, Γ^2
GaP	1.21	1.43	1.04
GaP	5.29	1.41	1.02
GaP	21.20	1.48	1.01
GaAsP	5.29	1.36	0.99
GaAsP	5.29	1.51	1.03

* ความสูงกำแพงศักย์ หาได้จากลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน

ข้อมูลที่น่ามาพิจารณาแสดงในตารางที่ 6.1 ซึ่ง $I_d = 0.81$ และ $I_c = 0.19$ และจากสมการ (ก2) และ (ก7) ทำให้สามารถประมาณค่าของ Γ_c^2 ได้ คือ

$$\begin{aligned} S(\omega) &= 2q \times 0.81I + 2q \times 0.19I\Gamma_c^2 \\ &= 2qI(0.81 + 0.19\Gamma_c^2) = 2qI \times 0.89 \end{aligned} \quad (\text{ก8})$$

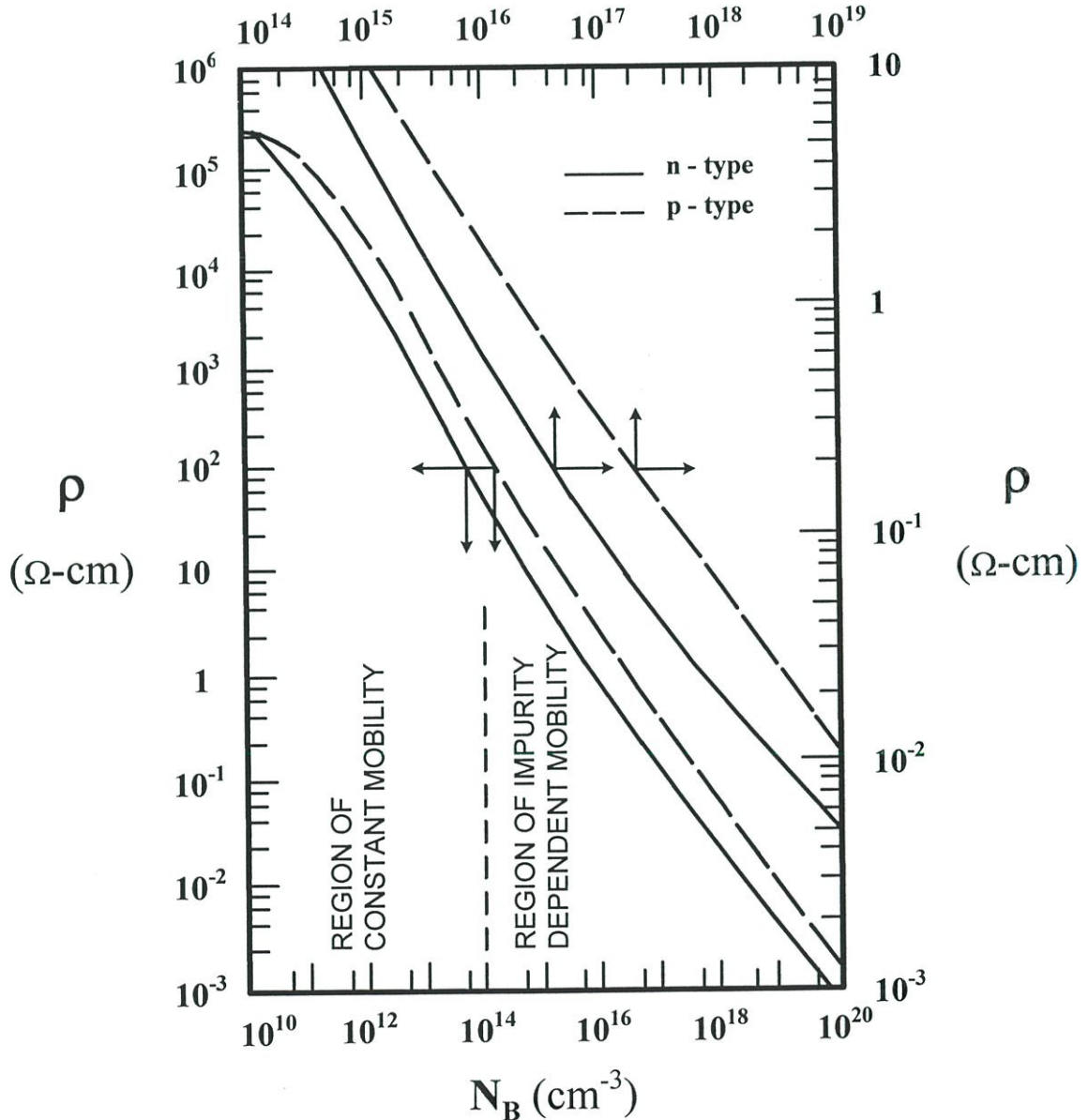
นั่นคือ $\Gamma_c^2 = 0.42$ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าสัญญาณรบกวนที่ลดลงมีส่วนสนับสนุนมาจากเทอมของ $\exp(-s/\tau)$ ซึ่งประมาณค่าอัตราส่วนของ s/τ โดย $s = 0.61\tau$ ส่งผลให้สัญญาณรบกวนแสดงเพียง 89% ของสัญญาณรบกวนของช็อตแบบเต็มระดับ (full shot noise, $\Gamma^2 = 1$) หรืออาจจะกล่าวอีกทางได้ว่า 61% ของเวลาชีวิตเฉลี่ยหรือเวลาการแพร่ของพาหะ ทำให้สัญญาณรบกวนจากส่วนประกอบกระแสจากบริเวณนิวทรัลมีค่าประมาณ 42% ของช็อตแบบเต็มระดับ เป็นผลให้สัญญาณรบกวนที่วัดได้ลดลงประมาณ 10%

จากผลการทดลองนี้ทำให้เราเข้าใจถึงสัญญาณรบกวนแบบช็อตที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจวัดแสงชนิด Mo/n-Si/Mo ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้าง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ต่อไป

ภาคผนวก ข

การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอะตอมสารเจือ (N_B) กับสภาพต้านทาน (ρ) ดังแสดงในรูปที่ ข1



รูปที่ ข1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอะตอมสารเจือกับสภาพต้านทาน[56] ซึ่ง

- $N_B < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ จะเป็นบริเวณที่ความเข้มข้นสารเจือไม่ขึ้นกับค่าสภาพคล่องของพาหะ
- $N_B > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ จะเป็นบริเวณที่ความเข้มข้นสารเจือขึ้นกับค่าสภาพคล่องของพาหะ

ภาคผนวก ค
ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ค1 ค่าคงที่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ มีดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	c	3.00×10^{10}	cm/s
ค่าคงที่ของพลังค์	h	6.63×10^{-34}	J.s
ประจุอิเล็กตรอน	q	1.60×10^{-19}	C
ค่าคงที่ของโบสท์มันต์	k_B	1.38×10^{-23}	J/K
เปอิมิตีวิตีในสุญญากาศ	ϵ_0	8.85×10^{-14}	F/cm

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	10 เมษายน พ.ศ. 2506
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2528 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2535 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	- สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ - เทคโนโลยีของซิลิคอน

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2528 - 2529	พนักงานควบคุมการผลิต บริษัทอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคัลไทย จำกัด
พ.ศ. 2529 - 2530	ผู้ช่วยวิศวกร บริษัทอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคัลไทย จำกัด
พ.ศ. 2532 - 2535	เจ้าหน้าที่วิจัย ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
พ.ศ. 2536 - ปัจจุบัน	อาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารต่างประเทศในวิทยานิพนธ์นี้

- [1] Takano H., Kimura M., Ando T., Niemcharoen S., Yasumura Y. and Sato K., "Optical Response of Planar Mo/n-Si/Mo Structures with Long Neutral Region and Schottky Barriers at Both Ends", Solid-State Electronics, Vol. 44, No. 12, December 2000, pp. 2161-2164.
- [2] Niemcharoen S., Kobayashi K., Kimura M., and Sato K., "Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Conditions", Solid-State Electronics, Vol. 45, No. 10, October 2001, pp. 1815-1819.
- [3] Niemcharoen S., Ando T., Supadech S., Yasumura Y., and Sato K., "Observation of Photoinduced Shot Noise in Planar Mo/n-Si/Mo Structures with Undepleted Regions", Solid-State Electronics, Vol. 46, April 2002, pp. 481-485.

- [4] Kobayashi K., Niemcharoen S., Supadech S., Yasumura Y., and Sato K., "Intrinsic and Extrinsic Photoresponse of Mo/n-Si/Mo Structures with Wide Electrode Gap", *Solid-State Electronics*, Vol. 46, No. 9, September 2002, pp. 1411-1416.
- [5] Masui T., Khunkhao S., Kobayashi K., Niemcharoen S., Supadech S., and Sato K., "Photosensing Properties of Interdigitated Metal-Semiconductor-Metal Structures with Undepleted Region", *Solid-State Electronics*, Vol. 47, No. 8, August 2003, pp. 1385-1390.