

การสร้างโฟโตดีเทคเตอร์แบบเลเยอร์เซมิคอนดักเตอร์  
โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

FABRICATION OF METAL-SEMICONDUCTOR-METAL  
GaAsP PHOTODETECTORS

อภิชาติ สังข์ทอง  
APICHART SUNGTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ท.ศ. 2545  
ISBN 974-9546-75-X

การสร้างโฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์  
โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

FABRICATION OF METAL-SEMICONDUCTOR-METAL  
GaAsP PHOTODETECTORS

อภิชาติ สังข์ทอง

APICHART SUNGTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2545  
ISBN 974-9546-75-X

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 49653  
วัน, เดือน, ปี 2.5 ก.พ. 2547

FABRICATION OF METAL-SEMICONDUCTOR-METAL  
GaAsP PHOTODETECTORS

APICHART SUNGTHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2002  
ISBN 974-9546-75-X

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างโฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์พอสไฟด์ โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
นักศึกษา	นายอภิชาติ สังข์ทอง
รหัสประจำตัว	42065010
	ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. จิติ หนูแก้ว

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างและการศึกษาสมบัติสมบัติของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์พอสไฟด์ที่ได้จากการปลูกผลึกด้วยวิธี Molecular Beam Epitaxy โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะสร้างโดยวิธีการลิโทกราฟีและสร้างขั้วโลหะทองโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ขนาดความกว้างของขั้วโลหะและช่องว่างระหว่างขั้วเท่ากับ 30 ไมครอน 50 ไมครอน และ 100 ไมครอน ตามลำดับ ผลจากการวัดสมบัติกระแสกับค่าแรงดันไบแอส ได้ค่ากระแสมีต่ออยู่ในระดับนาโนแอมแปร์ และกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของโครงสร้างขั้วเล็กลง จากการวัดสมบัติค่าความจุกับแรงดันไบแอส ค่าความจุอยู่ในระดับพิโกฟารัดและค่าความจุเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของโครงสร้างขั้วเล็กลง โฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดีเทคเตอร์ในงานวัดคาบการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกและตัวดีเทคเตอร์ในระบบสื่อสารทางแสงได้

<b>Thesis Title</b>	Fabrication of Metal-Semiconductor-Metal GaAsP Photodetectors
<b>Student</b>	Apichart Sungthong
<b>Student ID.</b>	42065010
	Department of Applied Physics, Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assist.Prof. Dr. Jiti Nukeaw

### ABSTRACT

We present the fabrication and characterization of metal-semiconductor-metal (MSM) GaAsP photodetector grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE). Metal-Semiconductor-Metal structure is fabricated using lithography technique. A thermal evaporator is used for growing gold electrodes. The electrode width and gap spacing of this device are in the same value of 30 micron, 50 micron, and 100 micron, respectively. Dark current of devices is in order of nanoampere, and the capacitance of devices are in order of picofarad. The values of dark current and capacitance increase with decreasing electrode width and gap spacing. The photodetector can be used for a simple harmonic experiment and optical communication devices.

# กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของงานวิจัยนี้ เกิดจากความร่วมมือของหลายๆ ฝ่าย เริ่มจากแนวความคิดของอาจารย์ที่ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว ในการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ รวมทั้งเป็นผู้ออกแบบโปรแกรมสำหรับศึกษาสมบัติกระแส-แรงดัน และโปรแกรมสำหรับประยุกต์ใช้งานโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ขอขอบคุณพี่ๆ ในศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ทางด้านลิโทกราฟี และให้คำปรึกษาในการทำลิโทกราฟีเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่นิศพร (พี่หน่อง) ที่ให้คำปรึกษาและช่วยจัดหาอุปกรณ์ในการทำวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสงที่คอยช่วยเหลือทั้งทางด้านกำลังกาย กำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดเวลา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ปริญญาโททุกคน ที่คอยให้กำลังใจและให้ความรู้ทางด้านวิชาการจนได้มีโอกาสทำงานวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันราชภัฏราชชนครินทร์ที่สนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณบุคคลที่ข้าพเจ้าไม่ได้เอ่ยนามทุกท่าน ความช่วยเหลือเล็กๆ น้อยๆ จากท่านช่วยแต่งเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คุณค่าและคุณประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอบอบแต่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อภิชาติ สังข์ทอง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 รอยต่อของวัสดุ.....	3
2.2 รอยต่อสารกึ่งตัวนำแบบพีเอ็น.....	4
2.2.1 หลักการทำงาน.....	6
2.2.2 เขตปลอดพาหะของรอยต่อพีเอ็น.....	6
2.2.3 ค่าความจุของรอยต่อพีเอ็น.....	8
2.3 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.3.1 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	10
2.3.2 สมบัติการนำไฟฟ้าของรอยต่อขอตติ์ภายใต้การไบแอส.....	12
2.3.3 สมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อขอตติ์.....	14
2.4 โฟโตดีเทคเตอร์.....	16
2.5 โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็น.....	17
2.5.1 หลักการทำงาน.....	17
2.5.2 กลไกการดูดกลืนแสง.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ไฟโตดีเทคโนโลยีร่อยต่อพีไอเอ็น.....	19
2.7 ไฟโตดีเทคโนโลยีโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	22
2.7.1 โครงสร้าง.....	22
2.7.2 สมบัติทางแสงของไฟโตดีเทคโนโลยี.....	25
2.8 กระบวนการลิโทกราฟี.....	30
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>36</b>
3.1 การสร้างต้นแบบไฟโตดีเทคโนโลยีโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	36
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการลิโทกราฟี.....	36
3.1.2 การออกแบบ.....	41
3.1.3 กระบวนการสร้างไฟโตดีเทคโนโลยีโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	42
3.2 การวัดสมบัติทางแสงของไฟโตดีเทคโนโลยีโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	48
3.2.1 การศึกษาสมบัติกระแส-แรงดัน.....	48
3.2.2 การศึกษาสมบัติค่าความจุ-แรงดัน.....	53
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....</b>	<b>56</b>
4.1 ผลจากกระบวนการลิโทกราฟี.....	56
4.2 ผลการศึกษาสมบัติกระแส-แรงดัน.....	58
4.3 ผลการศึกษาสมบัติค่าความจุ-แรงดัน.....	61
4.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	64
4.4.1 การประยุกต์ใช้ไฟโตดีเทคโนโลยีแกแลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ในงานทดลองวัดคาบการ แกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก วิชาฟิสิกส์ระดับมัธยมปลาย.....	64
4.4.2 การประยุกต์ใช้ไฟโตดีเทคโนโลยีแกแลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ในงานสื่อสารทางแสง.....	69

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	77

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดคุณลักษณะของลิโทกราฟี.....	33
2.2 ตัวแปรในกระบวนการทางเคมีและทางฟิสิกส์ที่กำหนดประสิทธิภาพ ของลิโทกราฟี.....	34
4.1 การเปลี่ยนแปลงของกระจกกับกำลังแสงของเลเซอร์เมื่อแรงดันไปแอตคองที่.....	60
4.2 ค่าความจุของโฟโตดีเทคเตอร์ที่กำลังแสงของเลเซอร์ค่าต่างๆ.....	61
4.3 ผลการวัดคาบการแกว่งของซิมเปลฮาร์โมนิก.....	68

# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1(ก) รอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิต่างกัน.....	3
2.1(ข) แถบพลังงานที่รอยต่อในสภาวะสมดุล.....	3
2.1(ค) ศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อ.....	3
2.2(ก) การเกิดประจุว่างบริเวณรอยต่อพีเอ็น.....	5
2.2(ข) ความหนาแน่นของการเจือแต่ละด้านของรอยต่อพีเอ็น.....	5
2.2(ค) สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพีเอ็น.....	5
2.2(ง) ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็น.....	5
2.2(จ) แถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็น.....	5
2.3 องค์ประกอบของกระแสที่รอยต่อพีเอ็น.....	6
2.4(ก) ประจุว่างในชั้นปลอดพาหะ.....	8
2.4(ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุกับแรงดัน.....	8
2.5(ก) ระดับพลังงานในโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	11
2.5(ข) รูปแบบพลังงานในโลหะและสารกึ่งตัวนำที่สภาวะสมดุล.....	11
2.5(ค) ศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่สภาวะสมดุล.....	11
2.6 การเกิดแรงดันตกคร่อมบริเวณชั้นปลอดพาหะ.....	12
2.7(ก) รูปแบบพลังงานของรอยต่อขอตติ์เมื่อไบแอสตรง.....	13
2.7(ข) รูปแบบพลังงานของรอยต่อขอตติ์เมื่อไบแอสผั้กลับ.....	13
2.8 สมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อขอตติ์.....	16
2.9 โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็น.....	17
2.10 การลดทอนกำลังแสงตามระยะทางความลึกจากผิวของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็น.....	17
2.11 สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็น.....	18
2.12 กลไกการเกิดกระแสโฟโตบริเวณต่างของรอยต่อพีเอ็น.....	18
2.13(ก) โครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็น.....	20
2.13(ข) โครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็น.....	20
2.13(ค) แถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็นเมื่อไบแอสย้อนกลับ.....	20
2.13 (ง) การลดทอนของกำลังแสงตามระยะความลึกในโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็น.....	20
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของพาหะและสนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ.....	21
2.15 ตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็นที่มีการผลิตจริง.....	22

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะแบบทั่วไปและวงจรสมมูล.....	23
2.17 กราฟสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	23
2.18 การตอบสนองทางกระแส-แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	24
2.19 ไดอะแกรมแถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	24
2.20 การเกิดสนามไฟฟ้าภายในตัวโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	25
2.21 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี.....	31
2.22(ก) ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบกัดผิว.....	32
2.22(ข) ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบปลูกผิว.....	32
2.23 การเกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆ บนโครงสร้างขั้วโลหะแบบอินเตอดีจีเตจ.....	35
3.1 ตู้ทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ.....	36
3.2 เครื่องอัลตราโซนิคส์.....	37
3.3 ตู้อบ.....	37
3.4 เครื่องหมุนแผ่นสาร.....	38
3.5 เครื่องเขียนลายด้วยเลเซอร์.....	38
3.6 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	39
3.7 น้ำยาไวแสง.....	40
3.8 น้ำยาล้างฟิล์มไวแสง.....	40
3.9 แผ่นสารกึ่งตัวนำกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์.....	41
3.10 โครงสร้างขั้วโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีความกว้างขั้วและระยะระหว่างขั้วเท่ากัน.....	41
3.11 กระบวนการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์.....	42
3.12 ไดอะแกรมการทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ.....	43
3.13 วิธีทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ.....	44
3.14 วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสง.....	44
3.15 การอบเบื้องต้น.....	45
3.16 ลักษณะลำแสงขณะเขียนลายด้วยเลเซอร์.....	45
3.17 การกำจัดฟิล์มไวแสงส่วนที่โดนแสง.....	46

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 หน้ากากที่ได้จากกระบวนการลิโทกราฟี.....	46
3.19 กระบวนการเคลือบขั้วโลหะ.....	47
3.20(ก) ชิ้นงานที่ยังไม่ได้ต่อขา.....	47
3.20(ข) ชิ้นงานที่ต่อขาเรียบร้อยแล้ว.....	47
3.21 ต้นแบบโฟโตดีเทคเตอร์.....	48
3.22 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์.....	48
3.23 อุปกรณ์ปรับความเข้มแสง.....	49
3.24 เครื่องวัดความเข้มแสงของเลเซอร์.....	49
3.25 หลักการของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน.....	50
3.26(ก) เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินด้านหน้า.....	50
3.26(ข) เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินด้านหลัง.....	50
3.27 คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน.....	51
3.28 แสดงไดอะแกรมระบบวัดสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์.....	52
3.29 ระบบการวัดสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์.....	52
3.30 ส่วนของการป้อนพารามิเตอร์ต่างๆ.....	53
3.31 จอมอนิเตอร์แสดงผลจากการวัด.....	53
3.32 เครื่องมือวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนย่านอาร์เอฟ.....	54
3.33 แสดงไดอะแกรมระบบวัดค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์.....	55
3.34 ระบบการวัดสมบัติค่าความจุ-แรงดัน.....	55
4.1(ก) โครงสร้างขั้วโลหะขนาด 30 ไมครอน เมื่อขยาย 1000 เท่า.....	56
4.1(ข) โครงสร้างขั้วโลหะขนาด 50 ไมครอน เมื่อขยาย 1000 เท่า.....	56
4.1(ค) โครงสร้างขั้วโลหะขนาด 100 ไมครอน เมื่อขยาย 1000 เท่า.....	56
4.2(ก) จุดบกพร่องจากการตกค้างของฟิล์มไวแสง.....	57
4.2(ข) จุดบกพร่องจากการหลุดลอกของขั้วโลหะ.....	57
4.2(ค) จุดบกพร่องในลักษณะรอยขีดข่วนบนขั้วโลหะ.....	57
4.2(ง) จุดบกพร่องในลักษณะโครงสร้างขั้วโลหะต่อกัน.....	57
4.3 กระแสมีดที่เกิดขึ้นในโฟโตดีเทคเตอร์ขนาดต่างๆ.....	58

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4(ก) สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอน.....	59
4.4(ข) สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 50 ไมครอน.....	59
4.4(ค) สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 100 ไมครอน.....	59
4.5 การเปลี่ยนแปลงกระแสโฟโตกับกำลังของแสงเลเซอร์เมื่อแรงดันไบแอสคงที่.....	60
4.6(ก) สมบัติค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอน.....	62
4.6(ข) สมบัติค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 50 ไมครอน.....	62
4.6(ค) สมบัติค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 100 ไมครอน.....	62
4.7(ก) สมบัติค่าความจุกับกำลังแสงของเลเซอร์ของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอน เมื่อแรงดันไบแอสคงที่.....	63
4.7(ข) สมบัติค่าความจุกับกำลังแสงของเลเซอร์ของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 50 ไมครอน เมื่อแรงดันไบแอสคงที่.....	63
4.7(ค) สมบัติค่าความจุกับกำลังแสงของเลเซอร์ของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 100 ไมครอน เมื่อแรงดันไบแอสคงที่.....	63
4.8 การแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก.....	64
4.9 ไตอะแกรมระบบการวัดคาบการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก.....	65
4.10 การจัดชุดทดลองการวัดคาบการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก.....	66
4.11(ก) วงจรส่งแสง.....	66
4.11(ข) วงจรตรวจจับแสง.....	66
4.12 รูปแบบของสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับแสง.....	67
4.13 คาบเวลาของการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกที่วัดได้เปรียบเทียบกับการคำนวณ.....	68
4.14 วงจรรับส่งข้อมูลผ่านแสงด้านต้นทาง.....	69
4.15 วงจรรับส่งข้อมูลผ่านแสงด้านปลายทาง.....	69
4.16 ชุดทดลองรับส่งข้อมูลผ่านแสง.....	70
4.17 ผลการรับส่งข้อมูลผ่านแสง.....	70

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

หลังจากได้มีการพัฒนาโฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) ที่เป็นโครงสร้างที่เย็นได้ระยะหนึ่ง พบว่าเกิดปัญหาในการพัฒนาให้มีการตอบสนองต่อการสื่อสารที่เพิ่มขึ้น จึงได้มีการพัฒนาโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างใหม่ๆ เรื่อยมา อาทิ พินโฟโตดีเทคเตอร์ (pin photodetector) อวาลานซ์โฟโตดีเทคเตอร์ (avalanche photodetector) เป็นต้น รวมทั้งมีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ แทนซิลิกอน (Si) หรือเจอร์มาเนียม (Ge) เพื่อให้มีการตอบสนองต่อสัญญาณแสงได้ดี สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ ได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) แกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP) หรือแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ (GaAsP) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้พัฒนาขั้นตอนและวิธีการประดิษฐ์ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตลง โดยในปี 1979 ได้มีการเริ่มประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal) โดยอาศัยแนวคิดของโครงสร้างที่มีกำแพงแบบชอตต์กีสองข้าง (two schottky barriers) โดยมีโครงสร้างทางกายภาพแบบโคพแลนาร์ (coplanar) [1] โครงสร้างชนิดนี้ง่ายต่อการประดิษฐ์และสามารถลดค่าเวลาเคลื่อนย้ายพาหะ (carrier transit time) และค่าคงที่เวลาอาร์ซี (RC time constant) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ปัจจุบันได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานสื่อสารทางแสง

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงกระบวนการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ด้วยวิธีการลิโทกราฟี (lithography)

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีขนาดโครงสร้างขั้วแตกต่างกัน

1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติค่าความจุ-แรงดัน ของโฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีขนาดโครงสร้างขั้วแตกต่างกัน

1.2.5 เพื่อศึกษาถึงแนวทางพัฒนาโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ใน การประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารทางแสง

### 1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ- สารกึ่งตัวนำ-โลหะ รวมทั้งศึกษาวิธีการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ บนสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ ทำการออกแบบโครงสร้างโดยกำหนดเงื่อนไขพารา มิเตอร์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดำเนินการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะบนสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ด้วยกระบวนการ ลิโทกราฟี จากนั้นนำโฟโตดีเทคเตอร์ที่ได้มาศึกษาสมบัติกระแส-แรงดัน สมบัติค่าความจุ-แรงดัน ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้เป็นโฟโตดีเทคเตอร์ในงานตรวจจับทางแสงและ งานด้านการสื่อสารทางแสง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 เข้าใจหลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

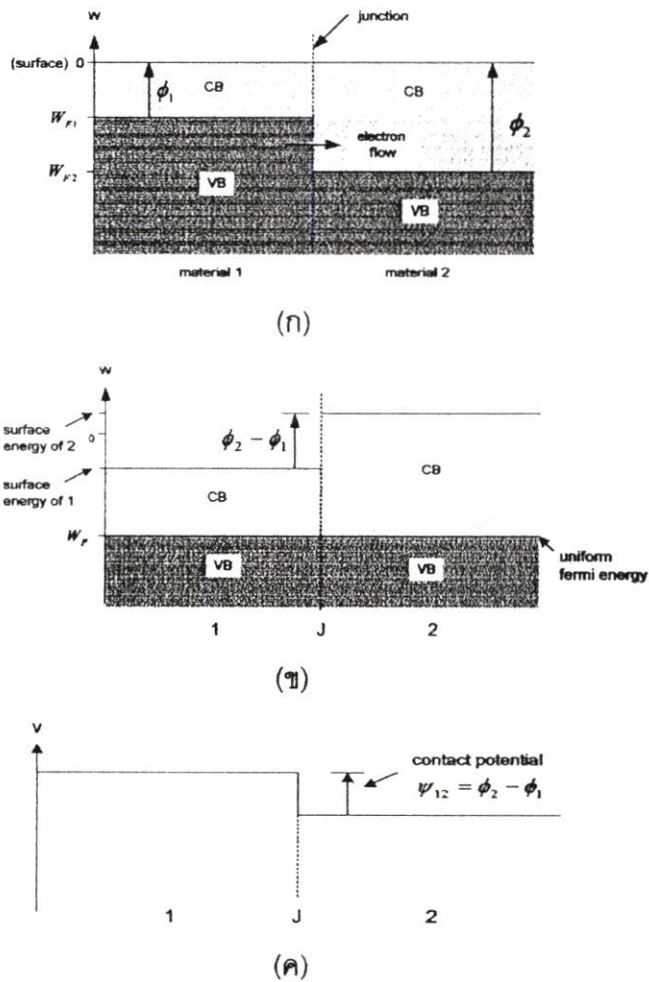
1.4.2 ได้เรียนรู้ถึงกระบวนการในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กและแนวทางการแก้ปัญหาในกระบวนการต่างๆ

1.4.3 สามารถนำสิ่งประดิษฐ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นโฟโตดีเทคเตอร์ในงานตรวจจับทาง แสงและงานด้านการสื่อสารทางแสง

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 รอยต่อของวัสดุ (material junction)

วัสดุที่ขึ้นอยู่กับการสภาวะของพลังงานความร้อนนั้น พันธะระหว่างอิเล็กตรอน (ที่วงโคจรนอกสุด) กับนิวเคลียสจะหมดไปกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เกิดการนำในวัสดุขึ้นและอิเล็กตรอนจะกลับเข้าสู่พันธะอีกครั้งในเวลาต่อมา พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนเหล่านี้ก็คือระดับเฟอร์มิในวัสดุ ความแตกต่างระหว่างพลังงานที่พื้นผิว (surface energy) ของวัสดุซึ่งเป็นศูนย์และระดับเฟอร์มิ (fermi level;  $E_f$ ) เป็นพลังงานเฉลี่ยที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากพื้นผิวของวัสดุ ความแตกต่างของพลังงานนี้เราเรียกว่าฟังก์ชันงาน (work function ;  $\phi$ ) ของวัสดุ



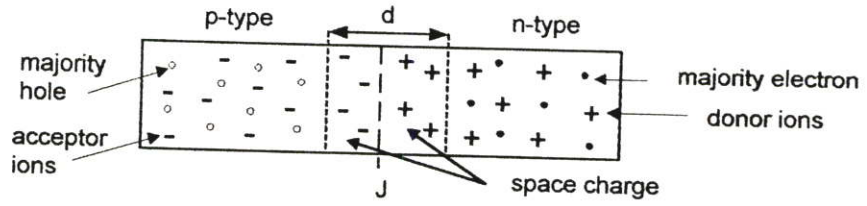
รูปที่ 2.1 เส้นไขพลังงานที่รอยต่อ (ก) รอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิต่างกัน  
(ข) แถบพลังงานที่รอยต่อในสภาวะสมดุล (ค) ศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อ

จากรูปที่ 2.1(ก) เมื่อมีการต่อกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิด ซึ่งมีระดับพลังงานเฟอร์มิต่างกัน ทำให้อิเล็กตรอนไหลจากวัสดุที่ระดับพลังงานสูงกว่า (วัสดุที่ 1) ไปยังวัสดุที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า (วัสดุที่ 2) อิเล็กตรอนบางส่วนจากแถบวาเลนซ์ในวัสดุที่ 1 มีพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ไปยังแถบนำของวัสดุที่ 2 ซึ่งทำให้เกิดการไหล  $W_{F_1}$  ลดลงขณะที่  $W_{F_2}$  เพิ่มขึ้น และการเคลื่อนที่ของประจุ จะมีการแทนที่กันจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อระดับเฟอร์มิทั้งสองด้านของรอยต่อเท่ากัน ดังรูปที่ 2.1(ข) ทางด้านวัสดุที่ 1 จะสูญเสียอิเล็กตรอนขณะที่ทางด้านวัสดุที่ 2 มีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น การสูญเสียอิเล็กตรอนในวัสดุที่ 1 ทำให้เกิดประจุเชิงบวกที่สัมพันธ์กับวัสดุที่ 2 และเกิดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อ  $\Psi_{12}$  ซึ่งเรียกว่าศักย์ไฟฟ้าของรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.18(ค) ความต่างศักย์นี้จะต้านการไหลของอิเล็กตรอนจากวัสดุที่ 1 ไปยังวัสดุที่ 2 เราเรียกว่ากำแพงศักย์ (potential barrier) อิเล็กตรอนจะต้องไต่ข้ามกำแพงศักย์เพื่อให้เกิดการไหลของกระแส ฟังก์ชันงานมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และความแตกต่างของพลังงานในแต่ละด้านของวัสดุที่ทำให้เกิดศักย์ตรงรอยต่อเท่ากับ  $e(\phi_1 - \phi_2)$  แรงดันระหว่างจุดคือการเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อหนึ่งหน่วยประจุ ซึ่งหาได้จาก [2]

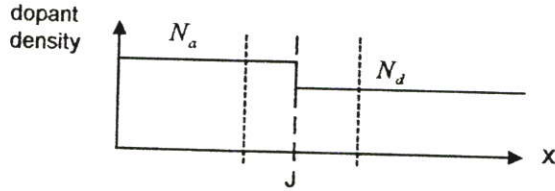
$$\Psi_{12} = \frac{-e(\phi_1 - \phi_2)}{e} = \phi_2 - \phi_1 \quad (2.1)$$

## 2.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบพีเอ็น (pn junction)

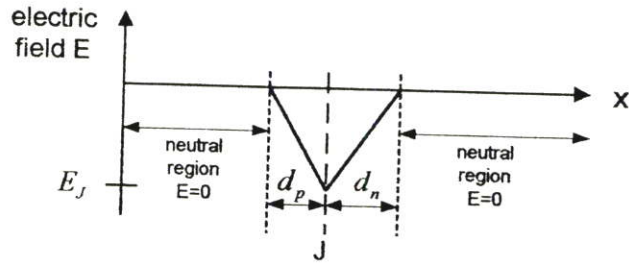
การทำรอยต่อพีเอ็นจะนำเอาสารบริสุทธิ์ (intrinsic material) มาทำการเจือ สาร (dope) บางชนิดเพื่อให้แต่ละด้านของรอยต่อมีความหนาแน่นของพาหะชนิดหนึ่งมากกว่าอีกชนิดหนึ่ง ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมผลิตไดโอดหรือโฟโตไดโอดการเตรียมรอยต่อจะเริ่มจากการเตรียมชั้นเอ็นก่อน จากนั้นจะทำการเจือสารบางตัวเข้าไปในชั้นเอ็นเพื่อให้เกิดเป็นชั้นพีขึ้น ในกรณีของรอยต่อที่ทำมาจากวัสดุซิลิกอนนั้น ชั้นเอ็นเตรียมได้จากการเจือธาตุอาร์เซนิก (As) ซึ่งทำให้พาหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน ส่วนชั้นพีเตรียมได้จากการเจือธาตุโบรอน (B) ซึ่งทำให้พาหะส่วนใหญ่เป็นโฮล ในการผลิตจริงจะมีการควบคุมความหนาและปริมาณการเจือของชั้นพีและชั้นเอ็นให้เหมาะสมซึ่งเมื่อทำเป็นโฟโตดีเทคเตอร์จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการรับแสงดีขึ้น



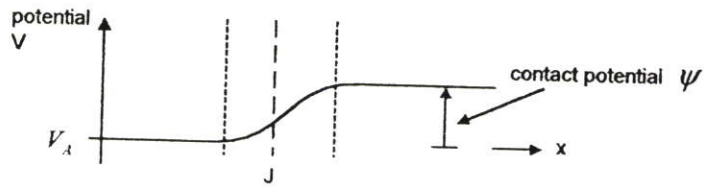
(ก)



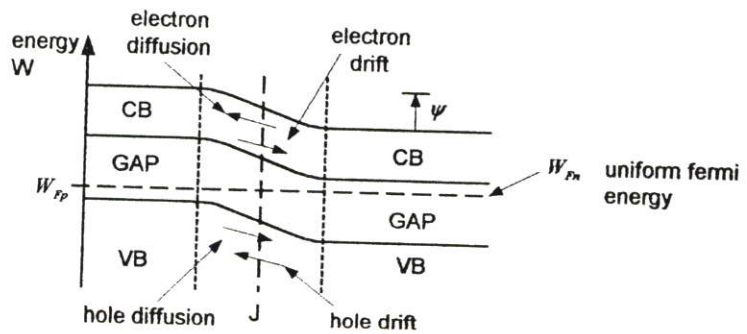
(ข)



(ค)



(ง)

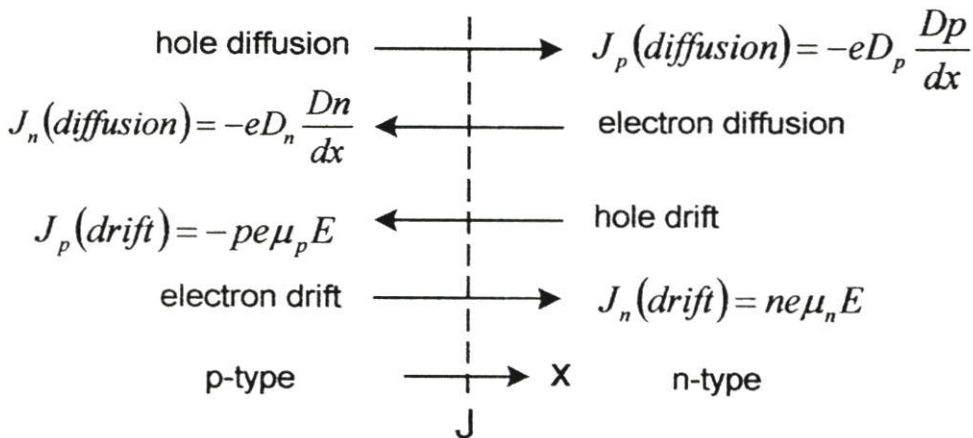


(จ)

รูปที่ 2.2 (ก) การเกิดประจุว่างบริเวณรอยต่อพีเอ็น (ข) ความหนาแน่นของการเจือแต่ละด้านของรอยต่อพีเอ็น (ค) สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพีเอ็น (ง) ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อพีเอ็น (จ) แถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็น

### 2.2.1 หลักการทำงาน

จากรูปที่ 2.2 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงตรงบริเวณรอยต่อ ที่สภาวะเริ่มต้นโวลจะแพร่จากชั้นพีไปยังชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนจะแพร่จากชั้นเอ็นไปยังชั้นพีเนื่องจากความแตกต่างของพาหะตรงรอยต่อ การเคลื่อนที่ของพาหะทำให้เกิดการไหลของกระแสซึ่งเรียกว่า กระแสแพร่ (diffuse current) บริเวณแต่ละข้างของรอยต่อกลายเป็นเขตปลอดพาหะอิสระ (depletion region) โดยการสูญเสียโวลทางด้านพีทำให้เกิดโฮออนลบ และการสูญเสียอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นทำให้เกิดโฮออนบวก ซึ่งโฮออนทั้งสองชนิดเรียกว่า ประจุว่าง (space charge) การสะสมของประจุว่างทั้งสองด้านของรอยต่อทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางจากเอ็นไปยังพี ซึ่งทำให้โวลทางด้านเอ็นเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าไปยังด้านพี และอิเล็กตรอนทางด้านพีเคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็นเกิดการไหลของกระแสที่เรียกว่า กระแสพัดพา (drift current) ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสแพร่ ที่สภาวะสมดุล กระแสพัดพาจะเท่ากับกระแสแพร่ ในรูปที่ 2.3 แสดงทิศทางกระแสไหลของกระแสทั้งสอง



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของกระแสที่รอยต่อพีเอ็น

### 2.2.2 เขตปลอดพาหะของรอยต่อพีเอ็น

ความกว้างของชั้นปลอดพาหะในแต่ละด้านของรอยต่อเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณการเจือ กรณีที่ปริมาณความเข้มข้นของการเจือในสารชั้นพีและชั้นเอ็นเท่ากัน ความกว้างของชั้นปลอดพาหะจะเท่ากันทั้งสองด้าน กรณีที่ไม่มีการไบแอส สามารถคำนวณหาความกว้างของชั้นปลอดพาหะได้จาก

$$d = \sqrt{\left[ \frac{2\varepsilon}{e} \left( \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \psi \right]} \quad (2.2)$$

โดย  $N_a$  และ  $N_d$  เป็นความเข้มข้นของอะตอมผู้ให้อิออนในชั้นเอ็นและอะตอมผู้รับในชั้นพี ตามลำดับ  $\epsilon$  ค่าความยินยอมสัมบูรณ์ (absolute permittivity) ศักย์ไฟฟ้า  $\psi$  ตรงรอยต่อหาได้จาก

$$\psi = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (2.3)$$

ตัวอย่างรอยต่อซิลิกอน มี  $N_a$  เท่ากับ  $10^{23}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เมตร และ  $N_d$  เท่ากับ  $10^{21}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงว่า  $\psi$  เท่ากับ 0.7 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  เมื่อ  $\epsilon_0$  เป็นค่าความยินยอมในสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-12}$  ฟารัดต่อเมตร) และ  $\epsilon_r$  เป็นค่าความยินยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ (มีค่าประมาณ 12 สำหรับซิลิกอน) จากสมการ (2.2) ความกว้างของชั้นปลอดพาหะกรณีที่ไม่มีการไบแอสมีค่าประมาณ 1 ไมครอน

สำหรับรอยต่อที่มีการเจือสารด้านใดด้านหนึ่งในปริมาณมาก (heavy dope) ซึ่งได้แก่รอยต่อแบบ  $p^+n$  เมื่อ  $N_a \gg N_d$  หรือ รอยต่อแบบ  $pn^+$  เมื่อ  $N_d \ll N_a$  ในเทอม  $(N_a + N_d) / N_a N_d$  ในสมการ (2.2) ลดลงเป็น  $1/N_d$  สำหรับ  $p^+n$  และ  $1/N_a$  สำหรับ  $pn^+$  ดังนั้น ความกว้างของชั้นปลอดพาหะสำหรับรอยต่อแบบ  $p^+n$  มีค่าเท่ากับ

$$d = \sqrt{\left( \frac{2\epsilon\psi}{eN_d} \right)} \quad (2.4)$$

ขณะที่ความกว้างของชั้นปลอดพาหะสำหรับรอยต่อแบบ  $pn^+$  มีค่าเท่ากับ

$$d = \sqrt{\left( \frac{2\epsilon\psi}{eN_a} \right)} \quad (2.5)$$

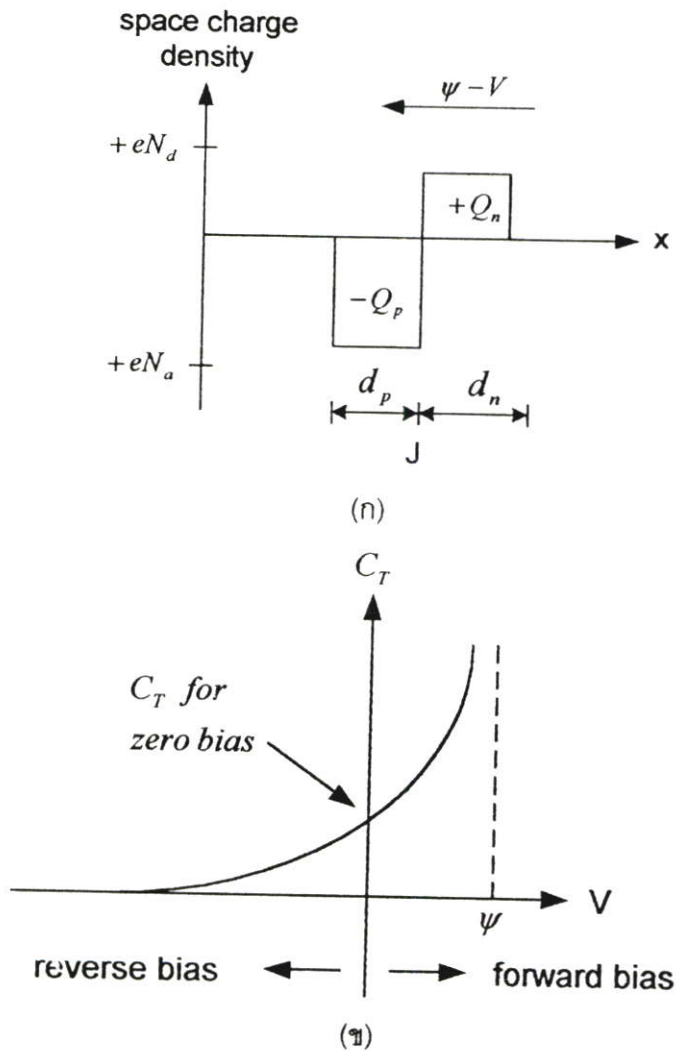
เมื่อมีแรงดันไบแอส ศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อจะมีการเปลี่ยนแปลงจาก  $\psi$  เป็น  $\psi - V$  โดย  $V$  เป็นบวกเมื่อไบแอสตรง และ  $V$  เป็นลบเมื่อไบแอสย้อนกลับ การเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมทำให้ประจุว่างมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งส่งผลให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ความกว้างของชั้นปลอดพาหะกรณีไบแอสมีค่าเท่ากับ

$$d = \sqrt{\left[ \frac{2\epsilon}{e} \left( \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) (\psi - V) \right]} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $V = \psi$  ทำให้  $d = 0$  แสดงว่า เมื่อจ่ายแรงดันไบแอสตรงเท่ากับศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อ ทำให้ชั้นปลอดพาหะหมดไป

### 2.2.3 ค่าความจุของรอยต่อพีเอ็น

ค่าความจุของรอยต่อพีเอ็น มีอยู่สององค์ประกอบ [1] ได้แก่ ค่าความจุบริเวณชั้นปลอดพาหะ (depletion layer capacitance,  $C_T$ ) เนื่องจากการสะสมของประจุว่างที่รอยต่อ และค่าความจุจากการแพร่ (diffusion capacitance,  $C_D$ ) เนื่องจากการสะสมของประจุอิสระในแต่ละข้างของรอยต่อ



รูปที่ 2.4 (ก) ประจุว่างในชั้นปลอดพาหะ

(ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุกับแรงดัน

ในแต่ละด้านของรอยต่อการสะสมของประจุเนื่องจากไอออนของผู้รับทางด้านพีและไอออนของผู้ให้ทางด้านเอ็นเกิดขึ้นของไดโพลโดยมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ  $\psi - V$  เมื่อ  $V$  มีการกลับทิศทางไปมา ความกว้างของชั้นปลอดพาหะจะเปลี่ยนแปลงตาม ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.6) ดังนั้นปริมาณของประจุที่สะสมจะเป็นฟังก์ชันกับไบแอส แต่การเปลี่ยนแปลงของประจุไม่เป็นไปโดยทันทีทันใด ซึ่งส่งผลต่อความเร็วในการนำของรอยต่อ ข้อจำกัดของความเร็วนี้อธิบายในเทอมของค่าความจุของชั้นปลอดพาหะ เวลาที่สูญเสียไปเป็นเวลาที่ใช้ในการเก็บหรือคายประจุ  $C_T$  ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มหรือลดความกว้างของชั้นปลอดพาหะ จากรูปที่ 2.4(ก) ขนาดของประจุว่างที่รอยต่อ หาได้จาก

$$Q = A \sqrt{\left[ 2\epsilon e \left( \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) (\psi - V) \right]} \quad (2.7)$$

ภายใต้เงื่อนไขสถิต (static condition) ค่าความจุเป็นอัตราส่วนของประจุที่สะสมต่อแรงดันตกคร่อม นั่นคือ  $C=Q/V$  ในกรณีเงื่อนไขทางพลวัต (dynamic condition) เมื่อแรงดันเปลี่ยนแปลงตามเวลา การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้อยๆ ทำให้ประจุเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จากสมการ (2.6) กรณีของพีเอ็น เมื่อแรงดันเพิ่มขนาดของประจุจะลดลง ดังนั้น ค่าความจุที่ชั้นปลอดพาหะคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} C_T &= -\frac{dQ}{dV} \\ &= A \sqrt{\left[ \frac{\epsilon e}{2} \left( \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) \frac{1}{\psi - V} \right]} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ส่วนค่าความจุเนื่องจากการแพร่ของพาหะอิสระ  $C_D$  ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการเจือ ซึ่งทำให้ระยะการแพร่ซึมของโฮลและอิเล็กตรอนเปลี่ยนไป โดยคำนวณได้จาก

$$C_D = \frac{e^2}{2kT} A(L_p p_n + L_n n_p) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (2.9)$$

โดย  $L_p$  และ  $L_n$  เป็นระยะการแพร่ซึมของโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการไบแอสเป็นสำคัญ

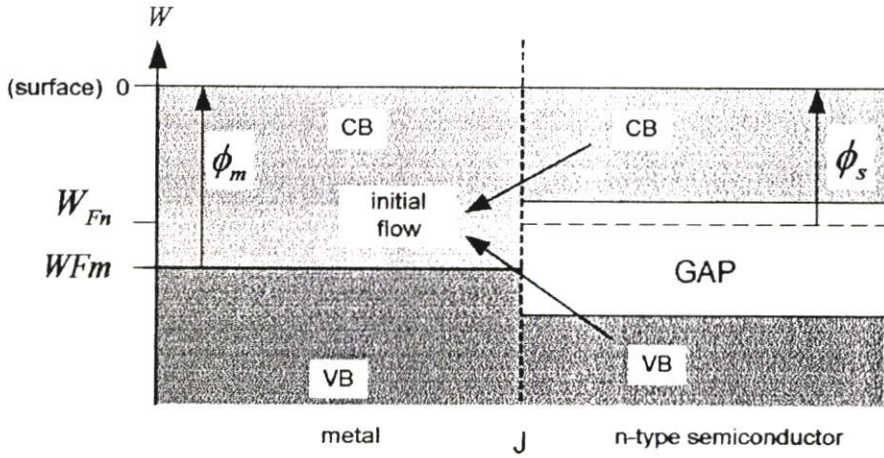
## 2.3 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor junction)

สมบัติการนำ (conduction property) ของรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำและค่าฟังก์ชันงานของโลหะ ( $\phi_m$ ) กับสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_s$ ) ถ้า  $\phi_m > \phi_s$  กรณีรอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือ  $\phi_m < \phi_s$  กรณีรอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี การกระจายของประจุบริเวณรอยต่อเกิดบริเวณปลอดประจุอิสระทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อเป็นผลทำให้สมบัติการนำกระแสไม่เป็นเชิงเส้น [2,3] โดยสามารถนำกระแสได้ดีในทิศทางเดียวเท่านั้น ซึ่งนำมาออกแบบเป็นไดโอดแบบขอตติ์กีเพื่อใช้ในวงจรสวิตชิงความเร็วสูง ในทางกลับกัน ถ้า  $\phi_m < \phi_s$  (ชนิดเอ็น) หรือ  $\phi_m > \phi_s$  (ชนิดพี) เกิดการไหลของประจุในแถบนำทั้งสองด้านของรอยต่อ ซึ่งเรียกว่ารอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างวงจรรายในชิพ (chip) กับวงจรรายนอก

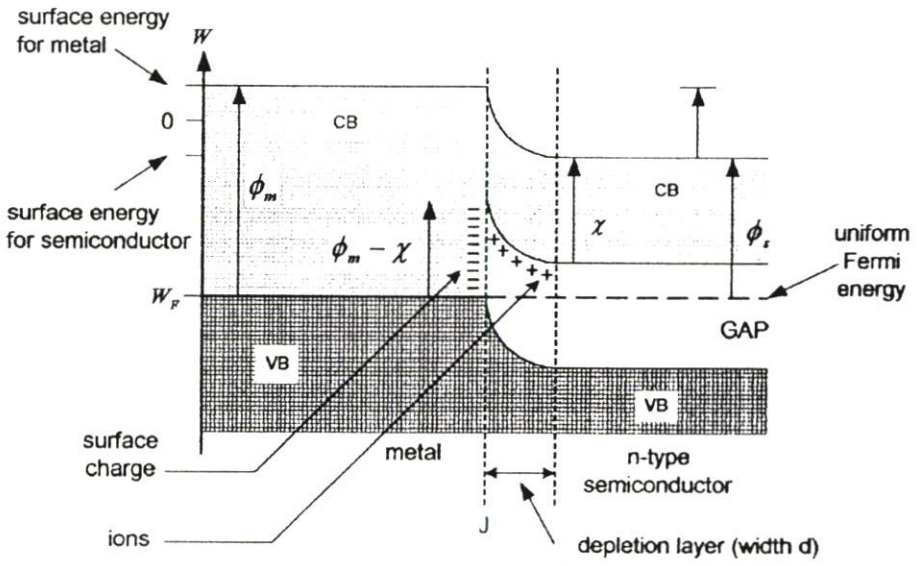
### 2.3.1 รอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

รอยต่อลักษณะนี้มีโครงสร้างแถบพลังงานดังรูป 2.5(ก) [3] พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะสูงกว่าในโลหะ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะซึ่งทำให้ระดับเฟอร์มิโนโลหะสูงขึ้นในขณะที่ในสารกึ่งตัวนำลดลงจนเข้าสู่ระดับสมดุลงรูป 2.5(ข) การไหลของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อเรียกว่าชั้นปลอดพาหะ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะคือระยะจากรอยต่อถึงจุดที่บริเวณปลอดพาหะแผ่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับระดับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจนถึงจุดสมดุลง โดยความกว้างของชั้นนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของฟังก์ชันงาน ( $\phi_m - \phi_s$ ) และความหนาแน่นของการเจือในสารกึ่งตัวนำ

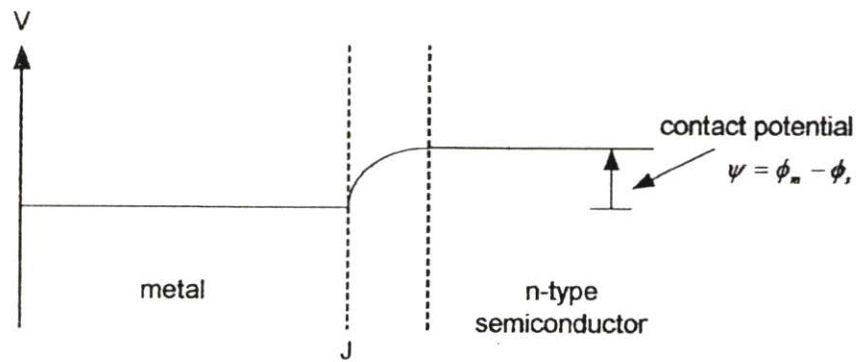
บริเวณปลอดพาหะประกอบด้วยไอออนบวกซึ่งเรียกว่าประจุว่าง ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังโลหะและฟอร์มตัวเป็นประจุเชิงผิว (negative surface charge) สนามไฟฟ้าในชั้นนี้สัมพันธ์กับศักย์ตรงรอยต่อ  $\psi$  ( $\phi_m - \phi_s$ ) ดังรูป 2.5(ค) อิเล็กตรอนที่ไปยังโลหะจะต้องมีพลังงานมากกว่า  $\psi$  จากระดับพลังงานเฉลี่ยในสารกึ่งตัวนำ โลหะจะกลายเป็นลบสัมพันธ์กับสารกึ่งตัวนำ เพื่อที่จะข้ามรอยต่อในทิศทางตรงข้ามอิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานมากกว่า  $\phi_m - \chi$  จากระดับพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในโลหะเพื่อที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่สร้างโดยสนามไฟฟ้า พารามิเตอร์  $\chi$  เรียกว่าค่าสัมพรรคภาพ (affinity) เป็นพลังงานที่เพิ่มเข้าไปจากระดับต่ำสุดของแถบนำเพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวของสารกึ่งตัวนำ



(ก) ระดับพลังงานในโลหะและสารกึ่งตัวนำ



(ข) รูปแบบพลังงานในโลหะและสารกึ่งตัวนำที่สภาวะสมดุล

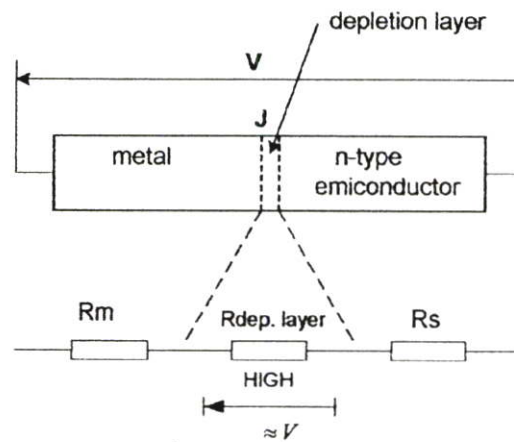


(ค) ศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่สภาวะสมดุล

รูปที่ 2.5 เส้นไขพลังงานของรอยต่อขอตติ (phi\_m > phi\_s)

### 2.3.2 สมบัติการนำไฟฟ้าของรอยต่อชอตต์กีภายใต้การไบแอส

เนื่องจากบริเวณชั้นปลอดพาหะไม่มีพาหะอิสระอยู่ จึงมีความต้านทานมากกว่าบริเวณอื่น เมื่อทำการไบแอส แรงดันส่วนใหญ่จะตกคร่อมในชั้นปลอดพาหะแสดงในรูป 2.6 แรงดันที่จ่ายจากภายนอกสัมพันธ์กับพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละข้างของรอยต่อ เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งทำให้มีการไหลของกระแสข้ามรอยต่อ กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะจ่ายศักย์ไฟฟ้าบวกทางด้านโลหะเทียบกับทางด้านสารกึ่งตัวนำ ส่วนกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีทิศทางการไบแอสตรงกันข้าม

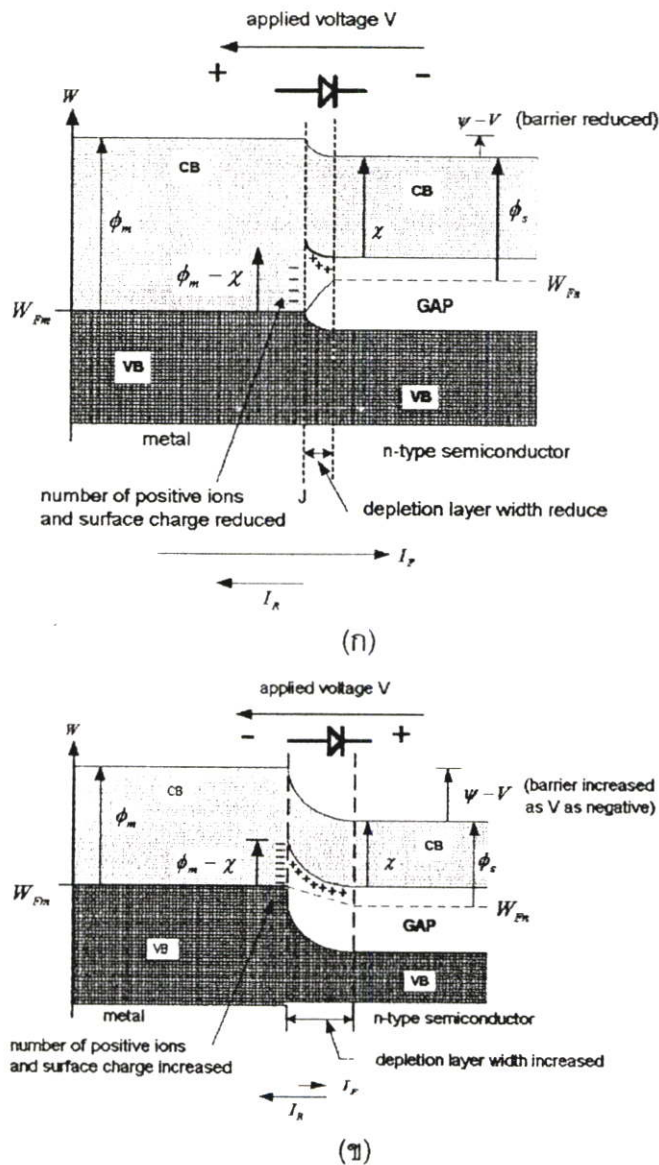


รูปที่ 2.6 การเกิดแรงดันตกคร่อมบริเวณชั้นปลอดพาหะ

ในรูป 2.7 ถ้า  $V$  เป็นบวก ทางด้านสารกึ่งตัวนำจะเป็นลบมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ยังไม่ไบแอส พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมากพอที่จะข้ามรอยต่อไปยังโลหะ การเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงในรูป 2.7(ก) โดย  $W_{Fn} > W_{Fm}$  กำแพงศักย์จะลดลงจากค่า  $\psi$  (กรณีไม่ไบแอส) เป็น  $\psi - V$  จากเงื่อนไขการไหลของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ เป็นการเพิ่มปริมาณการไหลของกระแสนิยม (จากศักย์บวกไปศักย์ลบ) จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นเทอมของกระแสตรง (forward current ;  $I_F$ ) สัมพันธ์กับการให้ศักย์แบบไบแอสตรง (forward bias) การกั้นการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำเรียกว่ากระแสย้อนกลับ (reverse current :  $I_R$ ) มีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับไบแอส เมื่อค่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อลดลงจาก  $\psi$  เป็น  $\psi - V$  ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้ลดลงสัมพันธ์กับการลดลงของประจุว่าง เมื่อการกระจายของประจุว่างถูกกำหนดให้คงที่ด้วยปริมาณการเจือ ดังนั้นสนามไฟฟ้าลดลงสัมพันธ์กับความกว้างของชั้นปลอดพาหะที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ไบแอส

กรณีที่  $V$  เป็นลบ แสดงในรูป 2.7(ข) สารกึ่งตัวนำจะเป็นบวกมากขึ้นพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนลดลง ซึ่ง  $W_{Fn} < W_{Fm}$  อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจำนวนน้อยที่เคยมีพลังงานมากพอที่

จะข้ามรอยต่อไปยังโลหะแล้วเกิดกระแสตรงก็จะลดลงตามค่าการไบแอสย้อนกลับ ส่วนกำแพงที่กั้นการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำกำหนดโดยค่า  $\phi_m - \chi$  ซึ่งไม่ขึ้นกับแรงดันไบแอส ดังนั้นกระแสนย้อนกลับไม่เปลี่ยนแปลง กรณีไบแอสย้อนกลับนี้แรงดันตกคร่อมชั้นปลอดพาหะจะเพิ่มจาก  $\psi$  เป็น  $\psi - V$  เมื่อ  $V$  เป็นลบ เป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นและประจุพาหะในบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้น เมื่อประจุพาหะถูกกำหนดให้คงที่ด้วยปริมาณการเจือ ผลของการไบแอสย้อนกลับเป็นการเพิ่มความกว้างของชั้นปลอดพาหะ ตามรูป 2.7(ข)



รูปที่ 2.7 (ก) รูปแบบพลังงานของรอยต่อขอตติ์เมื่อไบแอสตรง

(ข) รูปแบบพลังงานของรอยต่อขอตติ์เมื่อไบแอสย้อนกลับ

กระแสที่ไหลข้ามรอยต่อในกรณีไบแอสตรงมีค่าเท่ากับ  $I_F - I_R$  สำหรับการไบแอสที่เหมาะสม จะทำให้  $I_F \gg I_R$  และ  $I \approx I_F$  ขณะที่การไบแอสย้อนกลับที่เหมาะสม  $I_F \rightarrow 0$  และ  $I \approx I_R$  สมบัติการนำกระแสของรอยต่อชนิดนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางของการไบแอสเรียกว่ารอยต่อเรกติไฟาย (rectifying junction) ตัวอย่างเช่น รอยต่อทองแดงกับทองแดงออกไซด์ (copper-copper oxide junction) และรอยต่อโลหะผสมกับซีลีเนียม (metal alloy-selenium junction) ใช้สำหรับการเปลี่ยนสัญญาณสลับเป็นสัญญาณในทิศทางเดียว

### 2.3.3 สมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อชอตต์กี

ความสัมพันธ์ทางปริมาณระหว่างกระแสไหลของกระแสข้ามรอยต่อกับไบแอสหาได้จากความน่าจะเป็นของพาหะอิสระที่มีพลังงานมากพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ โดยอาศัยฟังก์ชันการกระจายของเฟอร์มิดิเรก (Fermi-Dirac Distribution Function) [1]

$$P(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)} \quad (2.10)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์และที่มีการเจือปนน้อยๆ ความแตกต่างของพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนที่แถบนำ และพลังงานเฟอร์มิ  $W - W_F$  มีค่ามากกว่า  $kT$  มากๆ ทำให้เทอมเอกซ์โพเนนเชียลมากกว่า 1 ในกรณีนี้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นกำหนดโดย

$$P(W) = \exp\left(\frac{W_F - W}{kT}\right) \quad (2.11)$$

กระแสตรงเนื่องจากการไหลของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะเป็นสัดส่วนกับ  $\exp(-W/kT)$  ที่การไบแอสเป็นศูนย์กระแสทั้งสองทิศทางมีค่าเท่ากันและพลังงานที่กั้นการไหลในทิศทางตรงเท่ากับ  $e\psi$  ดังนั้น

$$I_F = I_R = K \exp\left(-\frac{e\psi}{kT}\right) \quad (2.12)$$

ภายใต้เงื่อนไขของการไบแอส กำแพงพลังงานมีค่าเท่ากับ  $e(\psi - V)$  โดย  $V$  เป็นบวกเมื่อไบแอสตรง และ  $V$  เป็นลบเมื่อไบแอสย้อนกลับ จะได้

$$\begin{aligned}
 I_F &= K \exp\left[-\frac{e(\psi - V)}{kT}\right] \\
 &= K \exp\left(-\frac{e\psi}{kT}\right) \times \exp\left(\frac{eV}{kT}\right)
 \end{aligned}$$

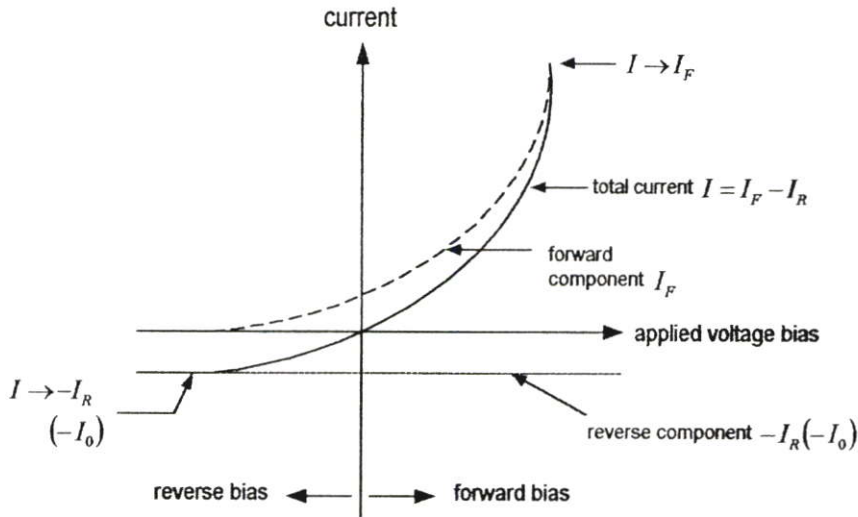
จากสมการ (2.12) จะได้

$$I_F = I_R \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (2.13)$$

กระแสรวมที่ไหลในทิศทางตรงคือ

$$\begin{aligned}
 I &= I_F - I_R \\
 &= I_R \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]
 \end{aligned} \quad (2.14)$$

กรณีไบแอสย้อนกลับที่เหมาะสม เทอมเอกซ์โพเนนเชียลสามารถตัดทิ้งได้และกระแสจะเข้าสู่ค่าคงที่ อิเล็กตรอนที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำซึ่งก็คือ  $I_R$  มีค่าคงที่เนื่องจากไม่ขึ้นอยู่กับกำแพงศักย์  $\phi_m - \chi$  ภายใต้ไบแอสตรง เมื่อ  $V$  มากกว่า 100 มิลลิโวลต์ เทอมเอกซ์โพเนนเชียลจะมีค่ามาก และ  $I \rightarrow I_R \exp(eV/kT)$  แสดงในรูป 2.8 กระแสย้อนกลับ  $I_R$  เป็นส่วนของกระแสรั่วไหลกำหนดด้วยสัญลักษณ์  $I_0$



รูปที่ 2.8 สมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อชอตต์กี

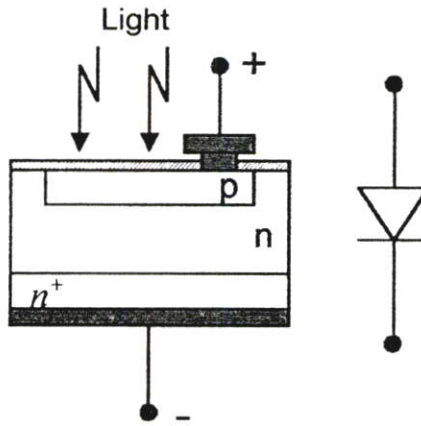
## 2.4 โฟโตดีเทคเตอร์ (photodetectors)

โฟโตดีเทคเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน[4] มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพีเอ็น เมื่อมีแสงตกกระทบที่รอยต่อพีเอ็นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ แล้วอาจรวมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงโฟโตดีเทคเตอร์จะหมายถึงสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจวัดความเข้มของแสง ปัจจุบันโฟโตดีเทคเตอร์แบบรอยต่อพีเอ็นมีราคาไม่แพงและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และมีการผลิตโฟโตดีเทคเตอร์จากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น ซิลิกอน แกลเลียมอาร์เซไนด์ แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์หรือแกลเลียมฟอสไฟด์ ซึ่งไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นที่ต่างกัน สำหรับในระบบการสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโตดีเทคเตอร์ชนิดพิเศษที่ทำงานได้รวดเร็วมากคือ พินโฟโตไดโอด อะวาลานซ์โฟโตไดโอด และปัจจุบันได้ประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ที่เป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะที่เรียกว่าโฟโตดีเทคเตอร์ชนิดรอยต่อชอตต์กี (schottky diode) ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงโฟโตดีเทคเตอร์ชนิดต่างๆ เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างรวมทั้งข้อดีข้อเสียของโฟโตดีเทคเตอร์แต่ละชนิด

## 2.5 โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็น (pn photodetector)

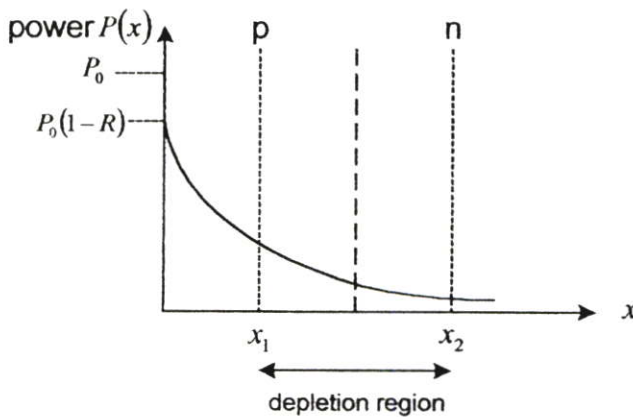
### 2.5.1 หลักการทำงาน

โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็นอาศัยหลักการทำงานของรอยต่อแบบพีเอ็น โครงสร้างพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยแสงจะตกกระทบชั้นพีก่อนถึงชั้นปลดลวดพาหะ



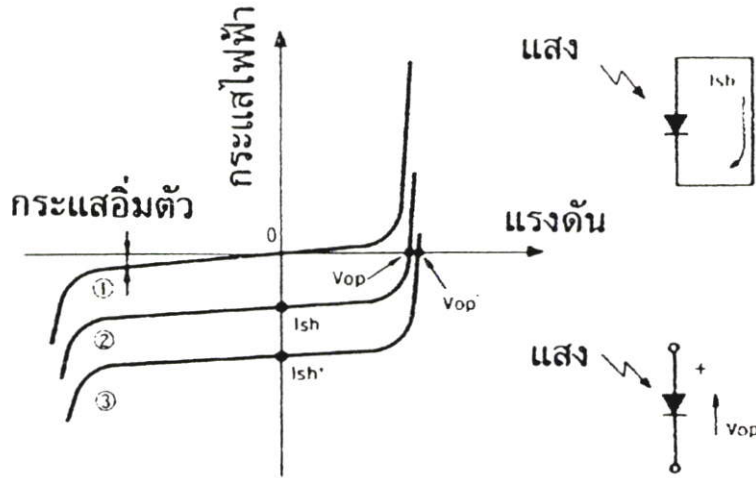
รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็น

ชั้นปลดลวดพาหะเป็นชั้นที่ทำให้เกิดกระแสมากที่สุด ดังนั้นการที่จะทำให้แสงผ่านไปยังชั้นปลดลวดพาหะมากที่สุดจะต้องสร้างชั้นพีให้บางมาก ในรูปที่ 2.10 แสดงการดูดกลืนแสงผ่านชั้นต่างๆ ของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็น



รูปที่ 2.10 การลดทอนกำลังแสงตามระยะทางความลึกจากผิวของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีเอ็น

ในรูปที่ 2.11 แสดงสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีโอดที่ต่อที่เอ็นในการใช้งานจะจ่ายแรงดันไบแอสแบบย้อนกลับ

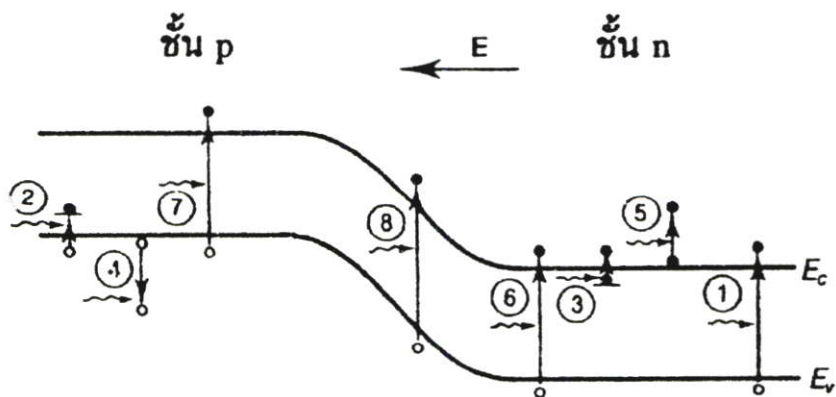


รูปที่ 2.11 สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีโอดที่ต่อที่เอ็น

2.5.2 กลไกการดูดกลืนแสง

การพิจารณากลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตพาหะที่ส่วนใดของโฟโตดีโอดเตอร์ เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและผลิตโฟโตดีโอดเตอร์ให้มีประสิทธิภาพ

รูปที่ 2.12 แสดงสภาพกำลังมีแสงส่องเข้าทางด้านชั้นพี และกำลังมีการไบแอสแบบย้อนกลับที่รอยต่อพีเอ็น หมายเลขต่างๆ ในรูปแสดงกลไกการดูดกลืนแสงในลักษณะต่างๆ โดยหมายเลขต่างๆ มีความหมายดังต่อไปนี้ [3]



รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดกระแสโฟโตบริเวณต่างๆ ของรอยต่อพีเอ็น

1) เป็นการดูดกลืนแสงด้วยสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่เข้าไปด้านหลังและห่างไกลจากชั้นปลดอดพาหะ ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลได้แต่เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าในชั้นนี้ดังนั้นพาหะที่เกิดจากหมายเลข (1) นี้ จะเคลื่อนที่ได้ด้วยวิธีการแพร่เท่านั้น ซึ่งพาหะอิเล็กตรอนและโฮลส่วนใหญ่จะรวมตัวกันมากกว่าจึงไม่มีบทบาทต่อการเกิดกระแสมากนัก

2) การดูดกลืนแสงในชั้นพีระหว่างแถบวาเลนซ์และระดับแอกเซ็ปเตอร์ แต่ในที่สุดพาหะอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ก็จะตกลงมารวมตัวกับโฮลจึงไม่มีบทบาทต่อการเกิดกระแสเช่นกัน

3) เหมือนกรณีหมายเลข (2) แต่เป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างระดับโดเนอร์และแถบนำและไม่มีผลต่อการเกิดกระแส

4) เป็นการดูดกลืนแสงโดยโฮลอิสระในแถบวาเลนซ์ของชั้นพีและเพียงแต่ระดับพลังงานของโฮลลดลงและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นจึงไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า

5) เหมือนกรณีหมายเลข (4) แต่เป็นการดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและไม่มีผลต่อการเกิดกระแสไฟฟ้า

6) เป็นการดูดกลืนแสงในชั้นเอ็นที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลดอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างมากจะแพร่เข้าไปสู่ชั้นเอ็นด้านหลังและพาหะโฮลข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่เข้ามาไปในชั้นปลดอดพาหะและโฮลจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลดอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านไปสู่ชั้นพีและโฮลเหล่านี้จะมีผลต่อการเกิดกระแส

7) เหมือนกรณีหมายเลข (6) เป็นการดูดกลืนแสงในชั้นพีที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลดอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่เข้ามาไปในชั้นปลดอดพาหะและอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลดอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านไปยังชั้นเอ็นและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีผลต่อการเกิดกระแส

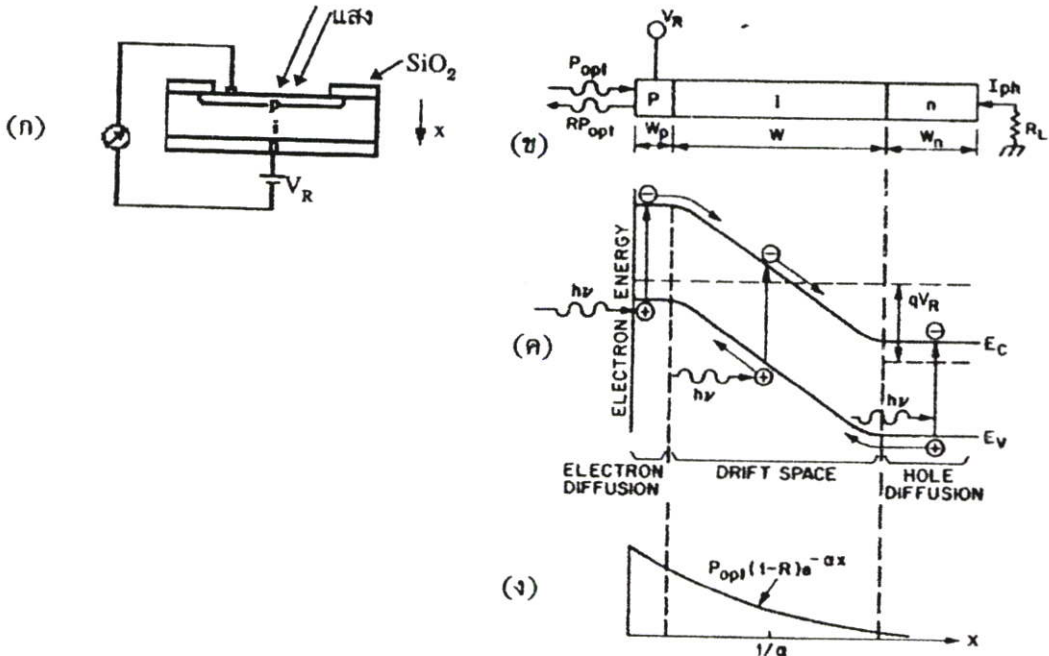
8) เป็นการดูดกลืนแสงและผลิตคู่อิเล็กตรอนโฮลในชั้นปลดอดพาหะ พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลดอดพาหะกวาดและแยกออกจากกันให้ไหลไปสู่ชั้นเอ็นและชั้นพีตามลำดับจะมีผลต่อการเกิดกระแสมากที่สุด

จากที่กล่าวมาข้างต้น กลไกหมายเลข (6) – (8) โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมายเลข (8) จะมีผลในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากที่สุด

## 2.6 โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็น (pin photodetector)

โฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็นมีโครงสร้างแตกต่างจากโฟโตไดโอดธรรมดาตรงที่ระหว่างชั้นพีและชั้น n จะมีชั้น i คั่นอยู่ ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ หรือมีการเจือปนน้อยมาก

ลักษณะเด่นของโฟโตดีเทคเตอร์ชนิดนี้คือ จากการที่มีชั้น  $i$  จึงทำให้ค่าความจุของรอยต่อมีค่าน้อย จึงทำให้ผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ถึงระดับพิโกวินาที ปัจจุบันมีการใช้งานมีการใช้งานโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็นเป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสงกันอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) โครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็น

(ค) แถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็นเมื่อไบแอสย้อนกลับ

(ง) การลดทอนของกำลังแสงตามระยะความลึกในโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็น

รูปที่ 2.13(ก) แสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็น รูปที่ 2.13(ข) แสดงความหมายของชั้นต่างๆ รูปที่ 2.13(ค) แสดงแผนภาพแถบพลังงานขณะไบแอส และรูปที่ 2.13(ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังของแสงที่ลดลงตามระยะทางความลึกในโฟโตดีเทคเตอร์

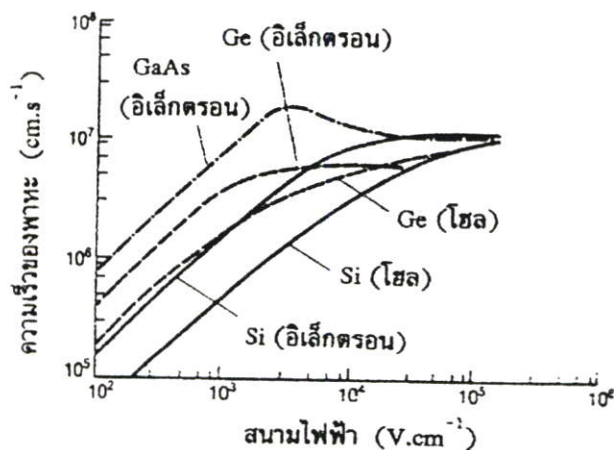
หลักการทำงานพื้นฐานของพินโฟโตไดโอดนั้นคล้ายกับกรณีของโฟโตไดโอดแบบพีเอ็น เพียงแต่แตกต่างกันตรงจุดที่ในโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็นจะมีชั้น  $i$  อยู่ระหว่างชั้นพีกับชั้นเอ็น และผู้ผลิตสามารถสร้างชั้น  $i$  ซึ่งเป็นชั้นปลอดพาหะจากวัสดุต่างๆ และให้ความหนาต่างๆ ได้ตามความต้องการซึ่งกรณีโฟโตไดโอดธรรมดา นั้น ความหนาของชั้นปลอดพาหะจะถูกกำหนดแต่เพียงปริมาณและวิธีการเจือสารของรอยต่อพีเอ็น อย่างไรก็ตามสมการต่างๆ สำหรับอธิบายการทำงานของพินโฟโตไดโอดก็สามารถเขียนแบบได้จากกรณีของพีเอ็นโฟโตไดโอดดังจะได้กล่าวต่อไป

ในรูปที่ 2.13 เมื่อแสงส่องเข้าสู่โฟโตดีเทคเตอร์ทางด้านชั้นพี จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในชั้นต่าง ทั้งในชั้นพีและชั้นเอ็น พานะที่เกิดขึ้นจากแสงจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าด้วยกลไก 2 ชนิดดังนี้คือ

1) ถ้าพานะอิสระเหล่านี้สามารถไหลออกสู่วงจรภายนอกได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไหลพานะอิสระที่เกิดขึ้นในชั้น  $i$  จะมีบทบาทในการกลายเป็นกระแสไฟฟ้าได้มากที่สุด โดยพานะจากชั้น  $i$  จะถูกพัดพาให้ไหลออกสู่วงจรภายนอกด้วยปรากฏการพัดพาด้วยศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) โดยอิเล็กตรอนไหลออกทางชั้นเอ็น และโฮลจะไหลออกทางชั้นพี กระแสที่ได้ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่ากระแสไฟฟ้าพัดพา ชั้น  $i$  นี้เรียกว่าชั้นปลอดพานะ

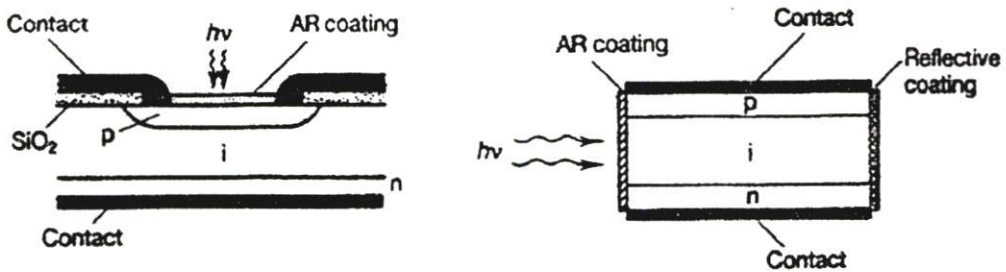
2) โฮลที่เกิดขึ้นในชั้นเอ็นนั้น ถ้ามีระยะทางการแพร่ที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่จากชั้นเอ็นผ่านเข้าสู่ชั้น  $i$  และไหลไปสู่ชั้นพีได้ และกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแพร่ ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในชั้นพี ถ้ามีระยะทางการแพร่ที่เพียงพอ ก็จะแพร่จากชั้นพีเข้าสู่ชั้น  $i$  และชั้นเอ็นได้ และจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแพร่ด้วย

เวลาที่พานะใช้ในการเดินทางในชั้น  $i$  นั้นมีความเกี่ยวข้องกับค่าความคล่องตัวของพานะด้วย ดังนั้นถ้าต้องการใช้งานที่ความถี่สูงมากๆ จึงควรเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีความคล่องตัวสูง และการไบแอสย้อนกลับให้โฟโตดีเทคเตอร์ก็ควรใช้แรงดันที่ทำให้ความเร็วของพานะสูงกว่าค่าอิ่มตัว รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของพานะของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ พบว่า อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ดีกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เนื่องจากมีค่าความคล่องตัว (mobility) สูง



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของพานะและสนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

ในรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็นที่มีการผลิตจริง ในรูปที่ 2.15(ก) แผ่นฐานได้แก่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นต่อนั้นมีการปลูกผลึกชนิด  $i$  ช้อนทับและที่ผิวบนทำการเจือสารให้เป็นชนิดพี ชั้นพีด้านบนนี้จะบางมาก ที่ผิวบนจะมีชั้นฉนวนของซิลิกอน ออกไซด์เพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าด้านบนลักษณะของขั้วไฟฟ้าด้านบนนั้นจะเปิดช่องออก เพื่อให้แสงเข้าสู่ชั้นพีได้โดยตรง อย่างไรก็ตามสามารถเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำกลับให้ด้านบน เป็นสารชนิดเอ็นก็ได้เช่นกัน ส่วนในรูปที่ 2.15(ข) เป็นกรณีที่ออกแบบเพื่อให้แสงเข้าทางด้านข้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ต้องการให้การดูดกลืนแสงด้วยชั้นพีก่อนที่จะเข้าถึงชั้น  $i$  และที่ด้านหลังมีการเคลือบวัสดุสะท้อนแสง แต่โครงสร้างนี้ต้องใช้แรงดันไบแอสสูงมาก เพราะชั้น  $i$  มีความหนา มากเป็นพิเศษ



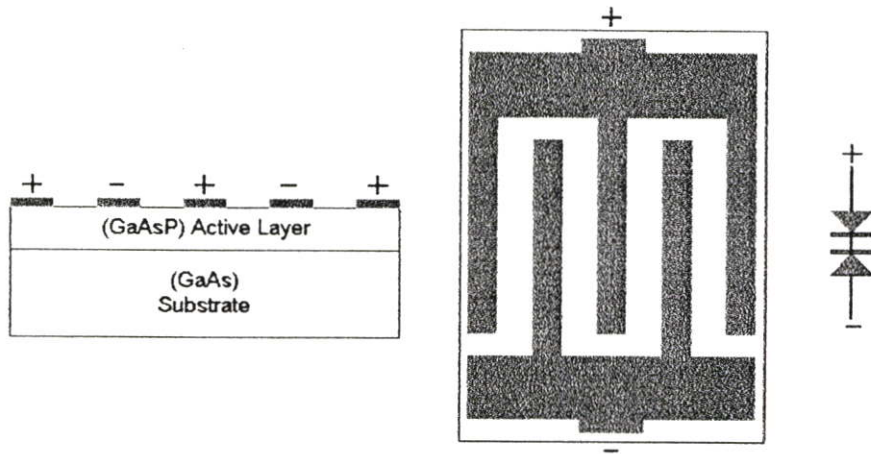
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์รอยต่อพีไอเอ็นที่มีการผลิตจริง

## 2.7 โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

(metal-semiconductor-metal (MSM) photodetector)

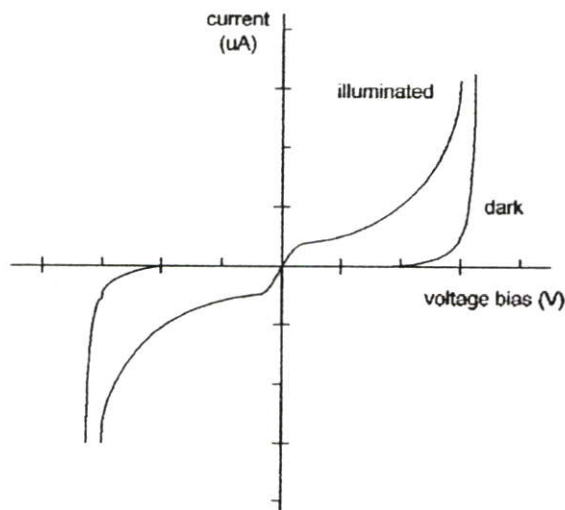
### 2.7.1 โครงสร้าง

ลักษณะทั่วไปของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) แสดงในรูปที่ 2.16 ประกอบด้วยแผ่นฐานรองที่เป็นสารกึ่งฉนวน (semi-insulating substrate) บนแผ่นรองเป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นแอคทีฟ (active layer) ซึ่งได้จากการปลูกด้วยวิธีต่างๆ เช่น MBE (Molecular Beam Epitaxy) OMCVD (Organo-Metal Chemical Vapor Deposition) หรือระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ เป็นต้น ด้านบนสุดเป็นขั้วโลหะที่มีโครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิทเต็ดอิเล็กโทรด (interdigitated electrode) รอยต่อระหว่างขั้วโลหะกับชั้นแอคทีฟเกิดกำแพงศักย์แบบชอตต์กี (schottky barrier) ในลักษณะ back-to-back พื้นที่รับแสงจะอยู่ระหว่างช่องว่างของขั้วโลหะ การสร้างขั้วโลหะจะใช้วิธีการลิโทกราฟี (optical lithography) ซึ่งสามารถทำขั้วให้มีขนาดเล็กระดับไมครอนได้

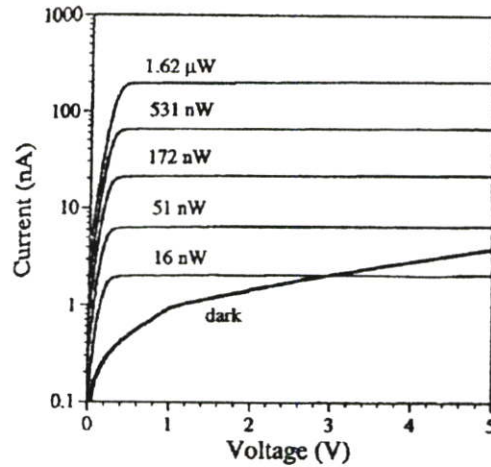


รูปที่ 2.16 โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะแบบทั่วไปและวงจรมุมล

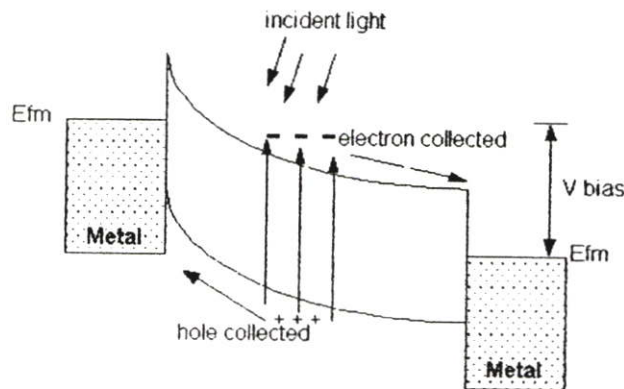
เนื่องจากโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ กำแพงศักย์แบบขอตติก็ประกบกันแบบ back-to-back เมื่อทำการไบแอสไม่ว่าจะเป็นกรณีไบแอสตรง (forward bias) หรือไบแอสกลับ (reverse bias) จะมีผลทำให้กำแพงศักย์ด้านหนึ่งมีทิศไปข้างหน้า (forward direction) และอีกด้านหนึ่งมีทิศย้อนกลับ (reverse direction) พิจารณาเป็นไดโอด 2 ตัวต่อกับด้านกัน[5] ซึ่งได้กราฟคุณสมบัติทางกระแส-แรงดัน ดังรูปที่ 2.17 สังเกตว่าไดโอดตัวหนึ่งจะต่อแบบไบแอสย้อนกลับเสมอ



รูปที่ 2.17 กราฟสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ



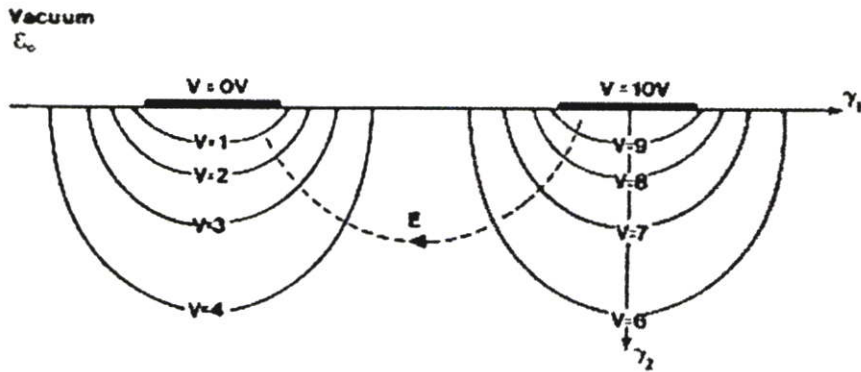
รูปที่ 2.18 การตอบสนองทางกระแส-แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ



รูปที่ 2.19 ไดอะแกรมแถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

การศึกษาคูณสมบัติกระแส-แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ จะพิจารณาทั้งในส่วนของกระแสมืด (dark current) และในส่วนของการแผ่โฟโต (photo current) ในรูปที่ 2.18 แสดงสมบัติของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะภายใต้ค่าความเข้มแสงค่าต่างๆ ในส่วนของกระแสมืดจะขึ้นอยู่กับกลไกสองอย่าง อย่างแรกคือการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลแบบสุ่ม (spontaneous electron-hole pairs) ภายในบริเวณแอคทีฟ (active region) เนื่องจากพลังงานความร้อน (thermal energy) อีกอย่างหนึ่งเกิดจากพาหะที่สามารถข้ามกำแพงชอตต์กีได้ ไดอะแกรมของแถบพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะภายใต้การไบแอสแสดงในรูปที่ 2.19 ประกอบด้วยตำแหน่งระดับเฟอร์มิของโลหะ ( $E_{fm}$ ) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำ (conduction band) ของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบบโฟโตดีเทคเตอร์ เกิดการดูดกลืนแสงที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลภายในบริเวณแอกทีฟ ถ้าระหว่างขั้ว 2 ขั้วถูกไบแอส ขั้วหนึ่งเป็นลบ (cathode) อีกขั้วเป็นบวก (anode) คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกแยกออกจากกันโดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก (ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า) แสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การเกิดสนามไฟฟ้าภายใต้ขั้วโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ในรูปที่ 2.20 แสดงเส้นสนามไฟฟ้า (electric field lines) ภายใต้ขั้วโลหะ เมื่อพาหะที่เกิดจากแสงเคลื่อนที่ไปยังขั้ว เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสที่วงจรรภายนอก กระแสไฟโต้นี้จะเพิ่มตามความเข้มแสงที่ตกกระทบบ (ตามรูปที่ 2.18)

## 2.7.2 สมบัติทางแสงของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

การศึกษาคุณสมบัติทางแสงประกอบด้วย

- 1) ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency)
- 2) แบนด์วิดท์ (bandwidth)
- 3) ความเร็ว (speed)

สำหรับประสิทธิภาพควอนตัม ( $\eta$ ) นั้นเป็นการวัดจำนวนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลต่อโฟตอนที่ตกกระทบบ ประสิทธิภาพควอนตัมวัดในเทอมของเปอร์เซ็นต์ โดยแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency;  $\eta_{int}$ ) และประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency;  $\eta_{ext}$ ) สำหรับประสิทธิภาพควอนตัมภายในเป็นประสิทธิภาพของการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ขั้ว ขณะที่ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกเป็นการเปรียบเทียบโฟตอนที่ตกกระทบบต่อกระแสไฟโต้นที่ขั้ว โดยทั่วไปประสิทธิภาพควอนตัมภายในจะ

มากกว่า 90% ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกจะน้อยกว่า 70% เนื่องจากการสะท้อนออกจากผิวของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากความแตกต่างของดัชนีหักเหระหว่างสารกึ่งตัวนำกับอากาศ

สำหรับแบนด์วิดท์ของดีเทคเตอร์พิจารณาจากความถี่ที่ 3 เดซิเบล (dB) เป็นการวัดความเร็วในการตอบสนองของดีเทคเตอร์ที่มีต่ออนุกรมของพัลส์แสง โดยการวัดกำลังเอาท์พุทของดีเทคเตอร์เมื่อเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณแสงที่เข้ามา ที่ความถี่ต่ำกำลังเอาท์พุทจะมีค่าคงที่ เมื่อความถี่สูงขึ้นการตอบสนองของดีเทคเตอร์จะลดลง เมื่อการตอบสนองลดลงจากค่าสูงสุด 3 เดซิเบล ทำให้กำลังเอาท์พุทลดลง 50% ความถี่ที่จุดนี้เรียกว่า ความถี่ 3 เดซิเบล หรือแบนด์วิดท์ของดีเทคเตอร์

สำหรับความเร็วของดีเทคเตอร์กำหนดโดยค่าคงที่เวลาสองตัว คือ เวลาในการเคลื่อนย้าย (transit time) และค่าคงที่เวลาอาร์ซี (RC time constant)

ค่าเวลาเคลื่อนย้ายเป็นเวลาที่เกิดจากโฟตอนใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณแอกทีฟไปรวมที่ขั้วของดีเทคเตอร์ [6] โดยทั่วไปอิเล็กตรอนและโฮลจะมีค่าความคล่องตัวต่างกัน กรณีสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรงต่างกันประมาณ 4 เท่าขึ้นไป เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งสามารถรวมและแพร่กระจายโฟตอนได้ประสิทธิภาพดีกว่าสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานต้องห้ามแบบอ้อม เช่น ซิลิกอนหรือเจอร์มาเนียม ดังนั้นโฮลใช้เวลาเคลื่อนที่ผ่านชั้นแอกทีฟนานกว่าอิเล็กตรอน จึงเป็นตัวจำกัดความเร็วของโฟโตรีเซคเตอร์

ตัวอย่างชั้นของแอกทีฟหนา 1 ไมครอน ความเร็วของพาหะ  $v_{sat}$  เท่ากับ  $1 \times 10^7$  เซนติเมตรต่อวินาที หาเวลาการเคลื่อนย้ายได้เท่ากับ 10 พิโกวินาที (psec) โดยใช้สมการดังนี้[5]

$$t_{tr} = d/v_{sat} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $d$  เป็นระยะทางที่พาหะเดินทาง ซึ่งกำหนดโดยความหนาของชั้นแอกทีฟ สำหรับความถี่ที่ 3 เดซิเบล คำนวณได้จาก

$$f_{3dB} = \frac{\Gamma_d}{2\pi t_{tr}} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\Gamma_d$  มีค่าตั้งแต่ 2.4 (สำหรับการดูดกลืนโฟตอนเฉพาะที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ) ถึง 3.4 (สำหรับการดูดกลืนโฟตอนที่สม่ำเสมอ) ค่า  $\Gamma_d$  ที่ค่า 2.8 จะใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด จากตัวอย่างนี้สามารถคำนวณหาแบนด์วิดท์ได้เท่ากับ 45 จิกะเฮิรต

ค่าคงที่เวลาที่เป็นตัวจำกัดความเร็วอีกค่าหนึ่งได้แก่ ค่าคงที่อาร์ซี ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างค่าความจุที่รอยต่อของดีเทคเตอร์ ( $C_j$ ) กับความต้านทานสมมูลที่ขนานกับ  $C_j$  (ส่วนใหญ่ใช้ค่า 50 โอห์ม ซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์ของเครื่องมือนัดและสายเคเบิล)

ตัวอย่างดีเทคเตอร์มีชั้นแยกที่หนา 1 ไมครอน เส้นผ่าศูนย์กลาง 100 ไมครอน ค่าความจุสามารถคำนวณได้จาก

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  เป็นสภาพยอม (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำระหว่างชั้นที่ถูกเจือ (ประมาณ 12)  $\epsilon_0$  เป็นสภาพยอมของสารในสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-14}$  F/cm)  $A$  เป็นพื้นที่รับแสงของดีเทคเตอร์ ส่วน  $d$  เป็นความหนาของชั้นแยกที่พ จากตัวอย่างคำนวณค่าความจุได้เท่ากับ 0.83 พิโกฟาราด ซึ่งเมื่อคูณกับความต้านทาน 50 โอห์มจะได้ค่าคงที่ RC เท่ากับ 40 พิโกวินาที ค่าที่ได้เมื่อนำไปคำนวณหาแบนด์วิดท์จะได้เท่ากับ 3.8 จิกะเฮิรต ดังนั้นค่าคงที่ RC ตามตัวอย่างนี้จะเป็นตัวกำหนดการตอบสนองของดีเทคเตอร์ไม่ใช่ค่าคงที่การเคลื่อนย้าย เราสามารถที่จะลดค่า  $C_j$  โดยการลดขนาดพื้นที่ของดีเทคเตอร์ลงซึ่งจะทำให้ได้แบนด์วิดท์สูงขึ้นแต่วิธีดังกล่าวจะทำให้การรวมแสงยากขึ้น

การคำนวณค่าความจุจากสมการ (2.17) เป็นการคำนวณใน 1 มิติซึ่งเหมาะสำหรับโฟโตรีเซคเตอร์ชนิดพีเอ็นเท่านั้น ในกรณีของโฟโตรีเซคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ จะใช้วิธีการคำนวณแบบสอง มิติที่เรียกว่าเทคนิคคอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) [7,8] เป็นวิธีการประมาณค่าความจุที่เกิดจากเซตปลอดพาหะที่พิจารณาใน 2 มิติ โดยโครงสร้างที่เป็นแบบอินเตอร์ดิเจิตท สามารถคำนวณค่าความจุได้จาก

$$C = \frac{K(k)}{K(k')} \epsilon_0 (1 + \epsilon_r) \frac{A}{\text{finger period}} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  เป็นสภาพยอมในสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-14}$  F/cm)

$\epsilon_r$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ประมาณ 12 สำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์)

$A$  เป็นพื้นที่รับแสง

คาบของนิ้ว (finger period) คือขนาดความกว้างของนิ้วรวมกับระยะระหว่างนิ้ว

สำหรับ  $K(k)$  เป็นฟังก์ชันการอินทิกรัลเชิงวงรี (complete elliptic integral of the first kind) ซึ่งหาได้จาก [8]

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{(1-k^2 \sin^2 \phi)}} \quad (2.19)$$

โดย  $k$  เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับ ความกว้างและระยะระหว่างขั้ว ซึ่งหาได้จาก

$$k = \tan^2 \frac{\pi}{4} \frac{L}{W+L} \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$K(k') = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{(1-k'^2 \sin^2 \phi)}} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$k' = \sqrt{(1-k^2)} \quad (2.22)$$

โดยที่  $L$  เป็นระยะระหว่างขั้วโลหะ และ  $W$  เป็นความกว้างของขั้วโลหะ ฟังก์ชัน  $K(k)$  สามารถกระจายในรูปอนุกรมกำลังได้ว่า [9]

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{(1-k^2 \sin^2 \phi)}} \quad (2.23)$$

$$K(k) = \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 k^6 + \dots \right]$$

ในทำนองเดียวกัน

$$K(k') = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{(1-k'^2 \sin^2 \phi)}} \quad (2.24)$$

$$K(k') = \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k'^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k'^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 k'^6 + \dots \right]$$

จากสมการของ  $k$  จะเห็นว่าถ้าอัตราส่วนระหว่างความกว้างขั้วโลหะกับระยะระหว่างขั้วโลหะเท่ากันแล้ว ค่า  $k$  ที่ได้จะเท่ากัน จากสมการ (2.18) ค่าความจุจึงขึ้นอยู่กับพื้นที่รับแสงและระยะคาบของขั้วโลหะเท่านั้น ดังนั้นสมการ (2.18) สามารถลดรูปได้เป็น

$$C = C_0 \frac{A}{\text{finger period}} \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$C_0 = \frac{K(k)}{K(k')} \varepsilon_0 (1 + \varepsilon_r) \quad (2.26)$$

ตัวอย่างโฟโตรีเฟคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนต์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มีขนาดความกว้างขั้วและช่องว่างระหว่างขั้วเท่ากับ 10 ไมครอน ค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของแกลเลียมอาร์เซไนต์เท่ากับ 12

$$\begin{aligned} k &= \tan^2 \frac{\pi}{4} \frac{L}{W+L} \\ &= \tan^2 \frac{\pi}{4} \frac{10}{10+10} = 0.17 \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} k' &= \sqrt{(1-k^2)} = \sqrt{1-0.17^2} \\ &= 0.985 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 K(k) &= \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 k^6 + \dots \right] \\
 &= \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 (0.17)^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 (0.17)^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 (0.17)^6 + \dots \right] \\
 &= 1.582
 \end{aligned}$$

และ

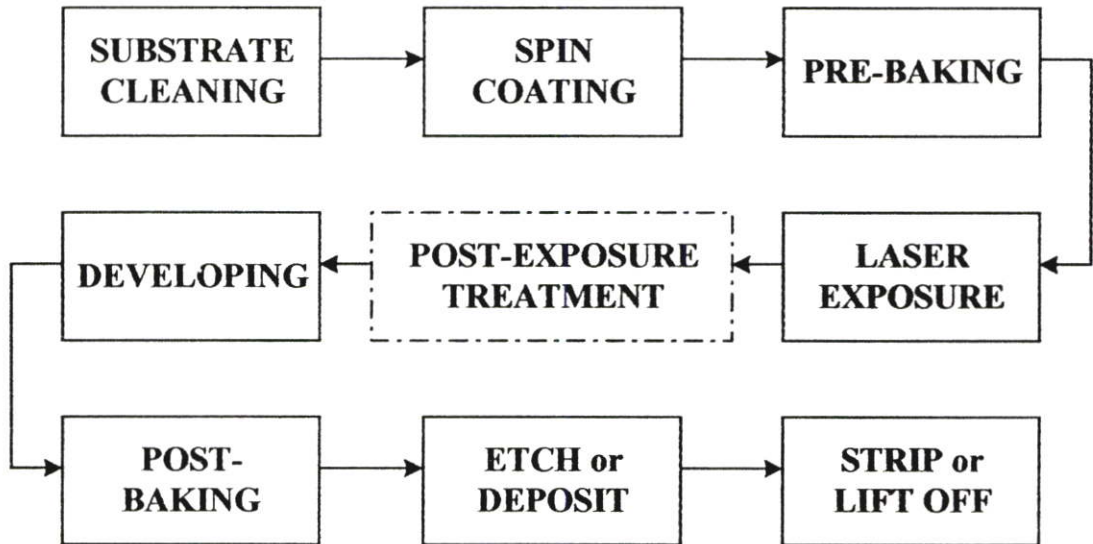
$$\begin{aligned}
 K(k') &= \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k'^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k'^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 k'^6 + \dots \right] \\
 &= \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 (0.985)^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 (0.985)^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 (0.985)^6 + \dots \right] \\
 &= 2.298
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.25) ถ้าพื้นที่รับแสงเท่ากับ  $100 \times 100$  ตารางไมครอนและคาบของขั้วเท่ากับ 20 ไมครอน ดังนั้น คำนวณค่าความจุได้เท่ากับ 5 พิโกฟารัด

## 2.8 กระบวนการลิโทกราฟี (lithography processing)

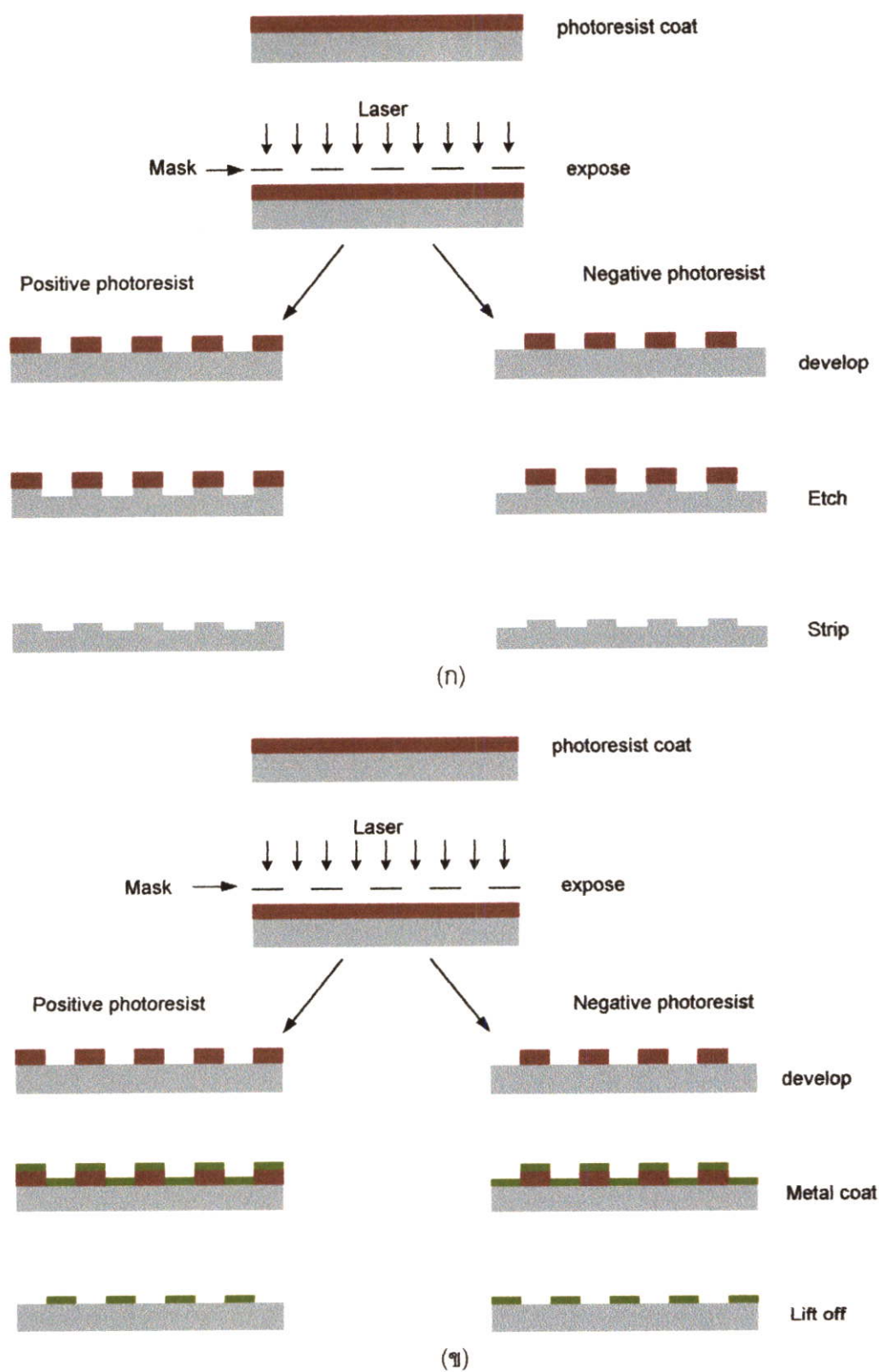
กระบวนการทางลิโทกราฟี[10] เป็นวิธีการสร้างรูปแบบในลักษณะสามมิติที่มีความละเอียดสูงสำหรับสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยอาศัยหลักการทางเคมีและหลักการทางฟิสิกส์ เทคโนโลยีลิโทกราฟีมีหลายแบบด้วยกันโดยเรียกชื่อตามแหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้ในการสร้างรูปแบบ ได้แก่ โฟโตลิโทกราฟี (photolithography) อิเล็กตรอนบีมลิโทกราฟี (electron-beam lithography) เอ็กซ์เรย์ลิโทกราฟี (X-ray Lithography) เป็นต้น แบบที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่ โฟโตลิโทกราฟี โดยใช้แหล่งกำเนิดพลังงานแสงในย่านความยาวคลื่นสั้น ได้แก่ เลเซอร์ย่านอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet (UV) laser) เลเซอร์สีน้ำเงิน (blue laser) หลักการของโฟโตลิโทกราฟีประกอบด้วยสองขั้นตอน ได้แก่

- 1) การสร้างภาพแฝง (latent image) โดยการฉายแสงบนโฟโตเรซิสต์
- 2) การพัฒนาภาพแฝงมาเป็นโครงสร้างของภาพ 3 มิติ



รูปที่ 2.21 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแสดงในรูปที่ 2.21 เริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ (substrate cleaning) จากนั้นทำการเคลือบ (coating) น้ำยาไวแสงและทำการอบ (pre-bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ในขั้นตอนนี้จะได้ฟิล์มไวแสงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการสร้างรูปแบบในลักษณะภาพแฝงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำด้วยแสงเลเซอร์ (laser exposure) เมื่อได้รูปแบบของภาพแฝงแล้วนำมาล้าง (develop) ด้วยน้ำยาล้างฟิล์มไวแสง (developer) และทำการอบ (pos-bake) ในขั้นตอนนี้จะได้รูปแบบบนแผ่นฐานรองรับในลักษณะ 3 มิติ จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนกัดผิว (etching) หรือปลูกผิว (deposit) ซึ่งขึ้นอยู่กับสิ่งประดิษฐ์ที่ได้ ออกแบบไว้ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการกำจัดน้ำยาไวแสงที่เหลือออก (lift off) ซึ่งจะได้โครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ตามต้องการ โคอะแกรมรูปที่ 2.22 แสดงกระบวนการในแต่ละขั้นตอน โดยรูปที่ 2.22 (ก) เป็นกระบวนการลิโทกราฟีโดยวิธีกัดผิวส่วนรูปที่ 2.20(ข) แสดงกระบวนการลิโทกราฟีโดยวิธีปลูกผิว



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (ก)แบบกัดผิว (ข) แบบปลูกผิว

โดยทั่วไป น้ำยาไวแสงมือยู่สองชนิด[11] คือ น้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive photoresist) และน้ำยาไวแสงชนิดลบ (negative photoresist) น้ำยาไวแสงชนิดบวกเป็นชนิดที่โดนแสงยูวีแล้วน้ำยามีการเปลี่ยนโครงสร้างที่สามารถละลายได้ในน้ำยาล้างฟิล์มไวแสง ขั้นตอนการเกิดภาพเมื่อนำน้ำยาไวแสงชนิดบวกแสดงไดอะแกรมทางด้านซ้ายมือของรูปที่ 2.22 ส่วนน้ำยาไวแสงชนิดลบเป็นชนิดที่โดนแสงแล้วโครงสร้างกลายเป็นพอลิเมอร์ (polymer) ซึ่งไม่ละลายในน้ำยาล้างฟิล์มไวแสง ขั้นตอนการเกิดภาพเมื่อนำน้ำยาไวแสงชนิดลบแสดงไดอะแกรมทางด้านขวามือของรูปที่ 2.22 สำหรับน้ำยาล้างฟิล์มไวแสงต้องทำให้ตรงกับชนิดของน้ำยาไวแสงจึงจะได้รูปแบบตามที่ต้องการ

คุณภาพหรือความสมบูรณ์ของลิโทกราฟีขึ้นอยู่กับหลักการทางเคมีและทางฟิสิกส์ ขั้นตอนการฉายแสง โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ 5 ประการในการกำหนดลักษณะของลิโทกราฟี แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดคุณลักษณะของลิโทกราฟี

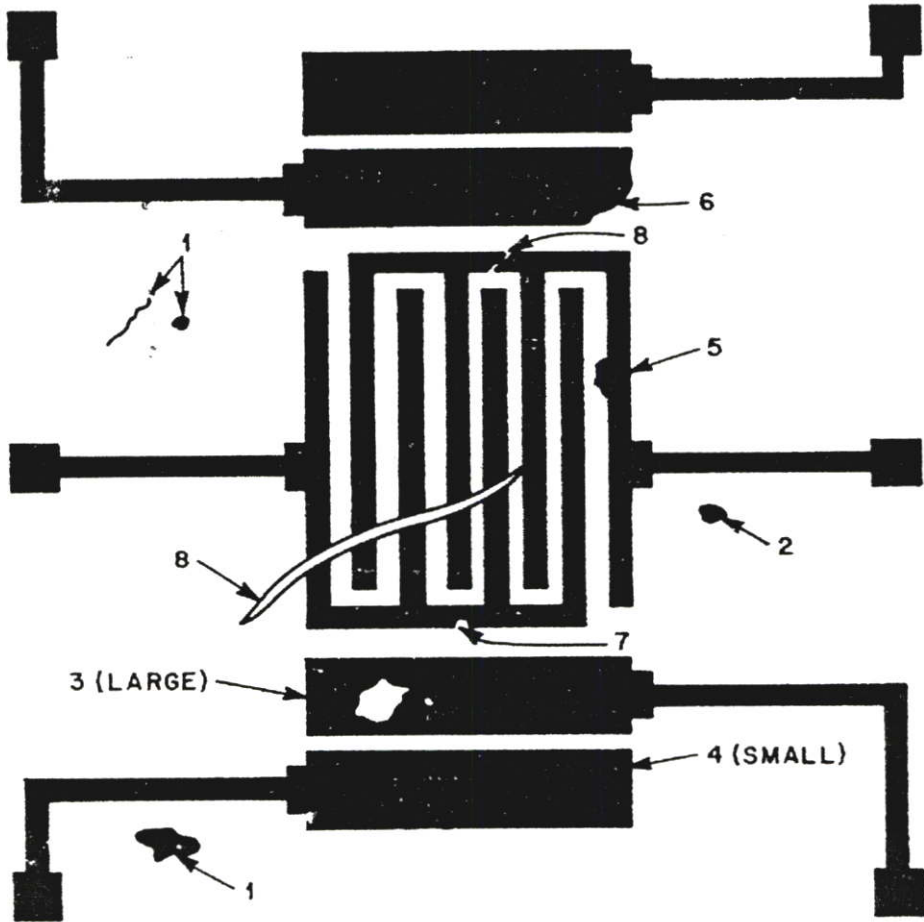
Performance Criteria	Hardware Parameters	Process Parameters	Material Parameters
SENSITIVITY	Energy density Exposure rate Exposure environment	Developing Post-exposure treatment	Radiation Efficiency Molecular weight
RESOLUTION	Scattering Size Mechanical stability	Developing Baking Etching	Contrast Glass transition temperature ( $T_g$ )
ETCH RESISTANCE	-	Type of etch Baking	Composition Stability
LINewidth CONTROL	Lens imperfections Mask dimensions Beam shape	Developing Etching Plasma descum	Swelling
DEFECTS	Mask defects Hardware Contamination	Cleanliness Number of process steps	Filtering Gelling

ในตารางที่ 2.2 แสดงตัวแปรทางเคมีและทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการในแต่ละขั้นตอน การควบคุมตัวแปรให้เหมาะสมกับกระบวนการทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของลิโทกราฟี

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรในกระบวนการทางเคมีและทางฟิสิกส์ที่กำหนดประสิทธิภาพของลิโทกราฟี

STEP	VARIABLES	
	CHEMICAL	PHYSICAL
CLEANING	Type of reagent	Cleaning time
	Surface composition	Temperature Equipment condition
SPIN-COATING	Polymer composition	Spinning speed
	Molecular weight	Acceleration
	Solvent boiling point	Temperature
	Solvent vapor pressure	Humidity
PREBAKING	Polymer $T_g$ and $T_m$	Temperature
	Polymer stability	Time
	Solvent composition	Atmosphere
EXPOSURE	Ambient gas in exposure chamber	Energy density
	Time after exposure	Exposure time
		Time after exposure
POST-EXPOSING	Gas composition	Time
		Temperature
DEVELOPING	Developer composition	Spray : pressure and flow rate
	Rinse composition	Temperature
	Humidity	Time of developer, rinse
	Developer age (for dip)	
ETCHING	Ambient gas in etching chamber	Etching energy
	Time after etching	Etching time
		Mechanical stability
		Time after etching

ในการทำโฟโตลิโทกราฟีในแต่ละครั้งแม้ว่าใช้กระบวนการเดียวกัน ผลที่ได้อาจไม่เหมือนกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ในแต่ละครั้ง ในรูปที่ 2.23 แสดงจุดบกพร่อง (defect) บนวงจรถูกที่เกิดจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี[10]



รูปที่ 2.23 การเกิดจุดบกพร่องแบบต่างๆ บนโครงสร้างขั้วโลหะแบบอินเตอดิเจต

ในแต่ละจุดคือ (1) เป็นการปนเปื้อนของวัสดุ (2) เป็นจุดที่ทึบแสง (3) เป็นหลุมขนาดใหญ่ (4) หลุมขนาดเล็ก (5) เป็นวัสดุส่วนเกิน (6) เป็นรอยหลุดลอก (7) เป็นรอยหลุดขนาดเล็ก และ (8) เป็นรอยขาดหรือรอยขีดข่วน โดยในจุดที่ (8) มีผลต่อการทำงานของวงจรมากที่สุด

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การสร้างต้นแบบโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการลิโทกราฟี

###### 1. ตู้ทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ (cleaning carbinet)

เป็นบริเวณสำหรับทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ ภายในตู้ประกอบด้วย ตู้เก็บสารเคมี อ่างน้ำสำหรับล้างอุปกรณ์ หลอดไฟให้ความสว่างและพัดลมดูดอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตู้ทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ

###### 2. เครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonics tank)

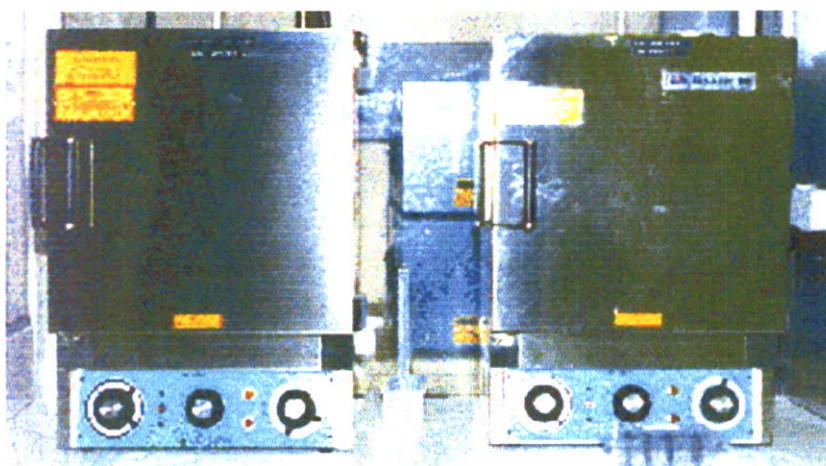
เป็นอุปกรณ์สำหรับใส่แผ่นสารกึ่งตัวนำที่ต้องการทำความสะอาด โดยจะผลิตคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อเร่งให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวหน้าของแผ่นสารกึ่งตัวนำเร็วยิ่งขึ้น สามารถตั้งค่าอุณหภูมิเวลาในการล้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องอัลตราโซนิกส์

### 3. ตู้อบ (oven)

สำหรับอบแผ่นสารกึ่งตัวนำหลังจากขั้นตอนทำความสะอาด สามารถตั้งค่าอุณหภูมิและตั้งค่าเวลาในการอบได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตู้อบ

### 4. เครื่องหมุนแผ่นสาร (spinner)

ใช้ในขั้นตอนการเคลือบน้ำยาไวแสงเพื่อให้น้ำยากระจายบนแผ่นสารกึ่งตัวนำอย่างสม่ำเสมอ สามารถควบคุมความเร็วรอบในการหมุนเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของน้ำยาไวแสง การยึดจับแผ่นสารใช้ระบบสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องหมุนแผ่นสาร

5. เครื่องเขียนลายด้วยเลเซอร์ (laser direct writer)

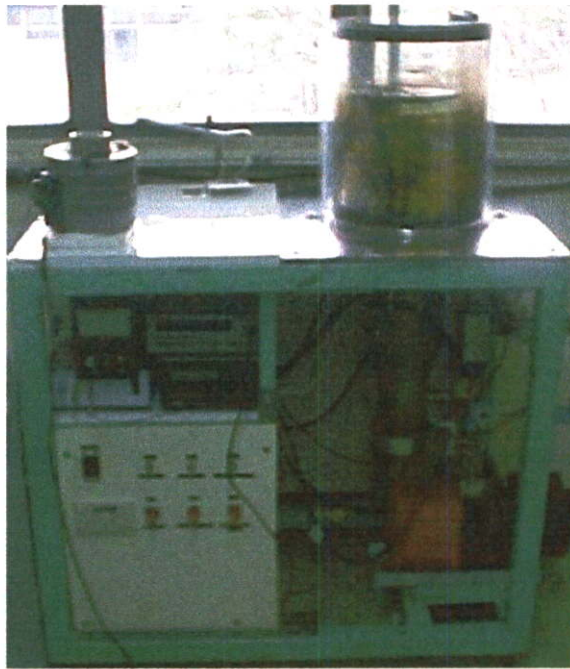
ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องเขียนเลเซอร์ รุ่น DWL200 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ผลิตโดยไฮเดิลเบอร์กอินสตรูเมนต์ (Heidelberg Instruments) ฐานวางแผ่นสารกึ่งตัวนำสามารถเลื่อนได้ 2 มิติ ในแนวนอน สามารถวางแผ่นสารกึ่งตัวนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด 4 นิ้ว เลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์สีน้ำเงิน ลำแสงที่ออกมาแบ่งออกเป็น 4 ลำปี่ม ขนาดของแต่ละลำปี่มเท่ากับ 0.8 ไมครอน การเปิดปิดลำปี่มแสงควบคุมโดยเพียโซไฟฟ้า (piezoelectric)



รูปที่ 3.5 เครื่องเขียนลายด้วยเลเซอร์

## 6. ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ (Thermal Evaporator)

สำหรับระเหยหัวโลหะทองลงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการทำรูปแบบหน้าากแล้ว ระบบที่ใช้แสดงในรูปที่ 3.6 ประกอบด้วย ปั๊มโรตารี (rotary pump) ปั๊มแบบแพร่ไอน้ำมัน (diffusion pump) ห้องสุญญากาศ (chamber) เบ้าหลอมสาร (crucible) ชนิดทังสเตน และแหล่งจ่ายกระแสให้กับเบ้าหลอมสาร



รูปที่ 3.6 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

## 7. สารเคลือบชั้นต้น (primer)

เป็นสารสำหรับเคลือบผิวแผ่นสารกึ่งตัวนำก่อนเคลือบนำยาไวแสง เพื่อให้หน้ายาไวแสงยึดติดบนแผ่นสารกึ่งตัวนำได้ดี

## 8. นำยาไวแสง (photoresist)

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้นำยาไวแสงชนิดบวก ซึ่งส่วนที่โดนแสงจะหลุดออก ลักษณะของนำยาไวแสงจะเก็บอยู่ในภาชนะที่สามารถป้องกันแสงส่องผ่านทะลุเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 น้ำยาไวแสง

9. น้ำยาล้างฟิล์มไวแสง (developer)

สำหรับล้างฟิล์มไวแสงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก เพื่อให้ตรงกับชนิดของน้ำยาไวแสงที่ใช้เคลือบทำฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 น้ำยาล้างฟิล์มไวแสง

10. แผ่นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor wafer)

แผ่นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ สารกึ่งตัวนำแกดเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ ( $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ) แสดงในรูปที่ 3.9 ทำมาจากสารกึ่งตัวนำแกดเลียมอาร์เซไนด์ แล้วทำการเจือฟอสฟอรัสลงไป โดยมีสมบัติต่างๆ ดังนี้

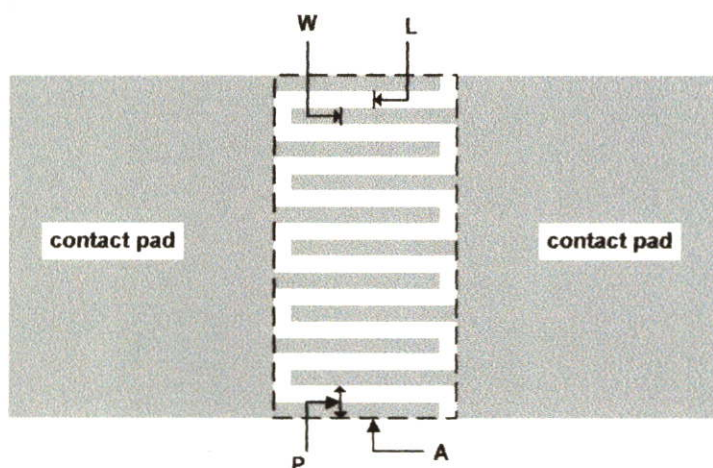
ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	$\mu_n$	=	8500 $\text{cm}^2 / \text{V-s}$
มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน	$m_n^*$	=	0.067 $m_0$
ค่าคงที่แลตทิซ	a	=	5.653 Angstrom
ค่าสัมพรรคภาพ	$\chi$	=	4.07 Volt
ปริมาณฟอสฟอรัส	x	=	1%



รูปที่ 3.9 แผ่นสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์โพสไฟต์

### 3.1.2 การออกแบบ

สมบัติเฉพาะของโฟโตดีเทคเตอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างขั้วโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ดังนั้นในการออกแบบจะพิจารณาตัวแปรที่จะต้องเปลี่ยน สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนตัวแปร 2 ตัว คือ ขนาดของขั้ว (finger) และช่องว่างระหว่างขั้ว (gap space) แล้วทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสและค่าความจุของตัวอุปกรณ์ โดยขนาดของโครงสร้างที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างขั้วโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีความกว้างขั้วและระยะระหว่างขั้วเท่ากัน

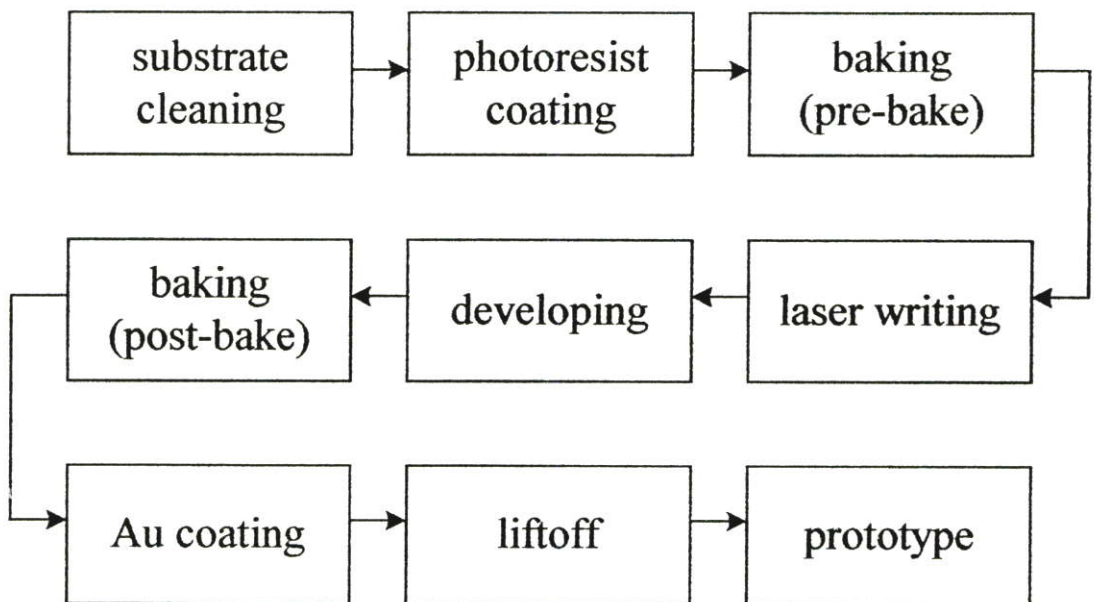
ในการออกแบบโครงสร้างขั้วโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เป็นการออกแบบหน้ากาก (mask) ในกระบวนการลิโทกราฟี ดังนั้นขนาดของแบบจึงเท่ากับโครงสร้างจริงที่เกิดขึ้นบนแผ่นสารกึ่งตัวนำ การออกแบบโครงสร้างขั้วใช้โปรแกรม Ledit ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้สำหรับงานออกแบบวงจรรวม (integrate circuit) โครงสร้างขั้วโลหะที่ได้ออกแบบไว้ในงานวิจัยนี้กำหนดให้อัตราส่วนของความกว้างขั้ว  $W$  และระยะระหว่างขั้ว  $L$  เท่ากัน โดยทำการออกแบบไว้ 3 ขนาด ได้แก่

- $L = W = 30$  ไมครอน
- $L = W = 50$  ไมครอน
- $L = W = 100$  ไมครอน

ข้อมูลที่ออกแบบไว้จะเก็บไว้ในไฟล์ตระกูล tdb (tdb file) ซึ่งจะนำไปใช้ในขั้นตอนการทำลิโทกราฟีต่อไป

### 3.1.3 กระบวนการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

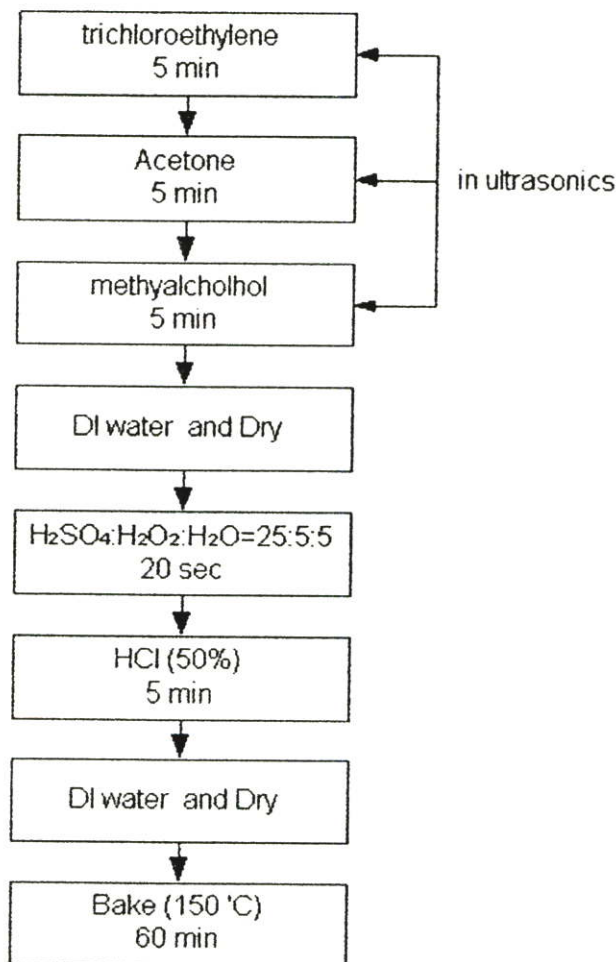
การสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์

### 1. ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ (cleaning)

ในการทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีขั้นตอนที่แตกต่างกัน สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์จะมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.12 [12] โดยทำการล้างไขมันบนแผ่นสารกึ่งตัวนำด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำยาอะซิโตน จากนั้นล้างด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดไขมันที่เหลือ ในขั้นตอนทั้งสามจะทำในเครื่องอัลตราโซนิคส์ จากนั้นล้างด้วยน้ำไร้ไอออน (de-ionnozed water : DI water) และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ทำการกัดชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นสารกึ่งตัวนำด้วยกรดซัลฟูริกเจือจางโดยใช้กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) 5 ส่วน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ 1 ส่วน และน้ำไร้ไอออน 1 ส่วน ใช้เวลา 20 วินาที จากนั้นล้างด้วยน้ำไร้ไอออน กัดชั้นออกไซด์ที่เหลือด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลา 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำไร้ไอออนและเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนเข้าสู่กระบวนการทางลิโทกราฟี



รูปที่ 3.12 ไตอะแกรมการทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ



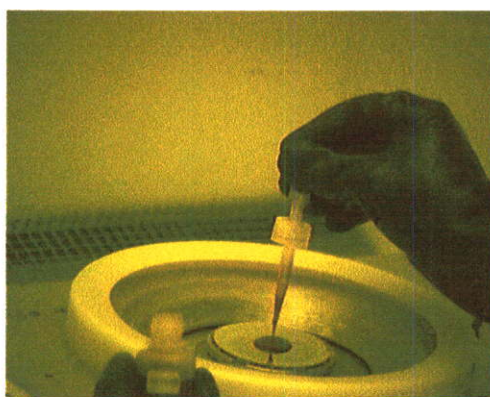
รูปที่ 3.13 วิธีทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ

2. ขั้นตอนการเคลือบสารชั้นต้น (primer coating)

หลังจากทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว เคลือบผิวด้วยสารชั้นต้นโดยวิธีระเหยไอ เป็นเวลา 10 นาที ไอของสารชั้นต้นจะกักผิวของแผ่นสารกึ่งตัวนำเล็กน้อยเพื่อให้น้ำยาไวแสงเคลือบติดกับแผ่นสารกึ่งตัวนำดีขึ้น

3. ขั้นตอนการเคลือบน้ำยาไวแสง (photoresist coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสง แสดงในรูปที่ 3.14 ทำได้โดยการวางแผ่นสารกึ่งตัวนำบนแท่นหมุนแผ่นสารแล้วทำการหยดน้ำยาไวแสงบนแผ่นสาร ตั้งค่าความเร็วรอบของการหมุน 3000 รอบต่อนาที จากนั้นเปิดเครื่องหมุนแผ่นสารเป็นเวลา 30 วินาที น้ำยาจะกระจายบนแผ่นสารอย่างสม่ำเสมอ

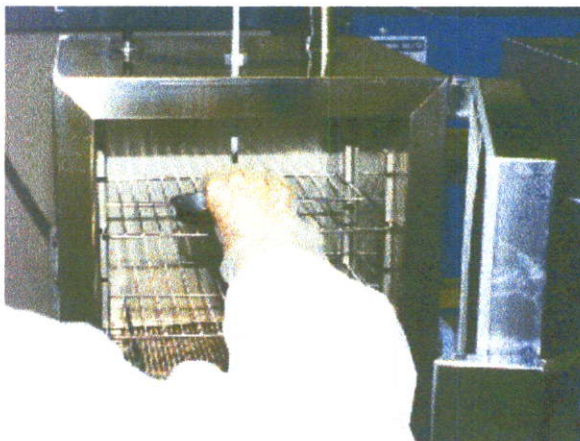


รูปที่ 3.14 วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสง

หลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสง น้ำยาจะกลายเป็นฟิล์มไวแสง โดยทั่วไปความหนาของฟิล์มไวแสงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำประมาณ 1 ไมครอน

#### 4. ขั้นตอนการอบ (pre-bake)

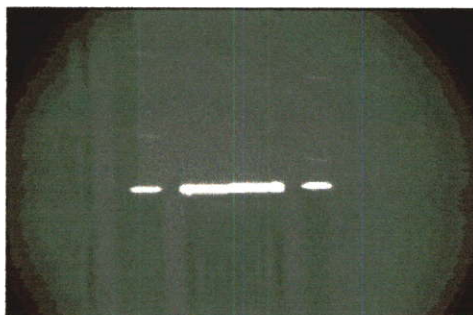
นำแผ่นสารกึ่งตัวนำมาอบเบื้องต้น (pre-bake) ดังรูปที่ 13.15 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้หน้ายาไวแสงแห้ง



รูปที่ 13.15 การอบเบื้องต้น

#### 5. ขั้นตอนการเขียนลายด้วยเลเซอร์ (laser writing)

เป็นขั้นตอนการฉายแสง (exposure) โดยนำแผ่นสารมาวางในเครื่องเขียนเลเซอร์ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ การควบคุมการเขียนลายเริ่มจากการนำเอาไฟล์ที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม Ledit มาแปลงเป็นไฟล์ข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมการเขียนซึ่งเป็นไฟล์นามสกุล lic (lic file) ก่อนการเขียนลายจะกำหนดว่าในแบบๆ หนึ่งต้องการกี่ตัวเพื่อประหยัดเวลาในการทำแต่ละครั้ง โดยทั่วไปจะขยายจนเต็มแผ่น นอกจากนี้จะกำหนดขนาดกำลังของเลเซอร์ที่ใช้ ระยะระหว่างตัวอุปกรณ์ รวมทั้งจุดเริ่มต้นของการเขียน



รูปที่ 13.16 ลักษณะลำแสงขณะเขียนลายด้วยเลเซอร์

### 6. ขั้นตอนการล้างฟิล์มไวแสง (developing)

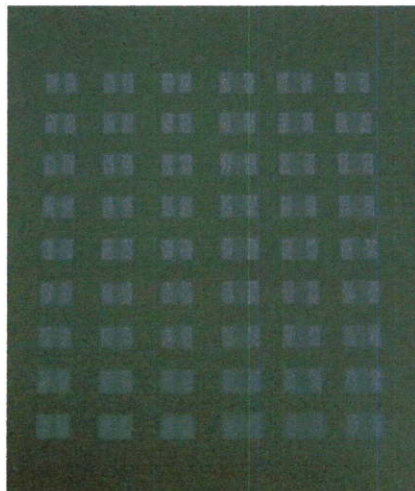
เป็นขั้นตอนการกำจัดฟิล์มไวแสงส่วนที่ไม่ต้องการออกในน้ำยาล้างฟิล์มดังรูปที่ 3.17 ใช้เวลา 40 วินาที แล้วเป่าให้แห้ง



รูปที่ 13.17 การกำจัดฟิล์มไวแสงส่วนที่โดนแสง

### 7. ขั้นตอนการอบแห้ง (post-bake)

เป็นการอบครั้งสุดท้ายก่อนการนำไปเคลือบขั้วโลหะ โดยอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้ไอน้ำที่เกาะบนแผ่นสารกึ่งตัวนำหมดไป มิฉะนั้นจะเกิดปัญหาตรงรอยต่อระหว่างขั้วโลหะกับพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ



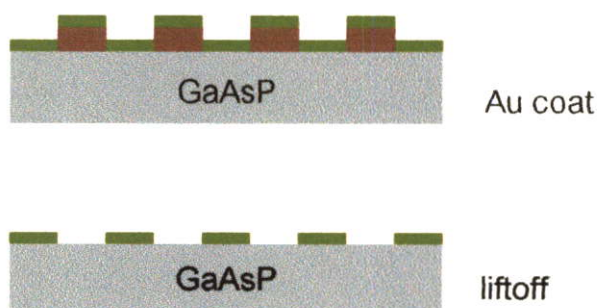
รูปที่ 3.18 หน้ากากที่ได้จากกระบวนการลิโทกราฟี

### 8. ขั้นตอนการเคลือบขั้วโลหะทอง (Au coating)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดขั้วโลหะบนแผ่นสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ความหนาของขั้วโลหะทองประมาณ 200 นาโนเมตร

### 9. ขั้นตอนการลิฟออฟ (liftoff)

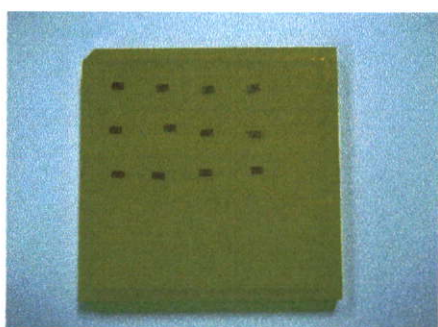
เป็นขั้นตอนการกำจัดฟิล์มไวแสงส่วนที่เหลือออกไป โดยใช้อะซิโตน ฟิล์มไวแสงส่วนที่เหลืออยู่จะหลุดออกไปซึ่งทำให้ทองที่เกาะบนฟิล์มไวแสงหลุดออกไปด้วย คงเหลือเฉพาะทองที่เกาะบนแผ่นสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ซึ่งมีไดอะแกรมดังรูปที่ 3.19



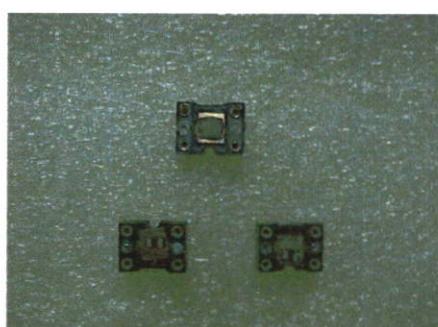
รูปที่ 3.19 กระบวนการเคลือบขั้วโลหะ

### 10. การเตรียมต้นแบบ (prototype)

การตัดชิ้นงานจากแผ่นสารกึ่งตัวนำใช้เครื่องมือชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในโรงงาน ผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รูปที่ 3.20(ก) แสดงชิ้นงานที่ทำการตัดเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการต่อขา โดยใช้กาวเงิน (Ag-adhesive) เป็นตัวประสาน ซึ่งจะได้โฟโตดีเทคเตอร์พร้อมนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.20(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.20 (ก) ชิ้นงานที่ยังไม่ได้ต่อขา (ข) ชิ้นงานที่ต่อขาเรียบร้อยแล้ว

### 3.2 การวัดสมบัติทางแสงของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

#### 3.2.1 การศึกษาสมบัติกระแส-แรงดัน

ระบบที่ใช้ในการศึกษาสมบัติกระแส-แรงดัน ประกอบด้วย

##### 1. ต้นแบบโฟโตดีเทคเตอร์



รูปที่ 3.21 ต้นแบบโฟโตดีเทคเตอร์

##### 2. แหล่งกำเนิดแสง

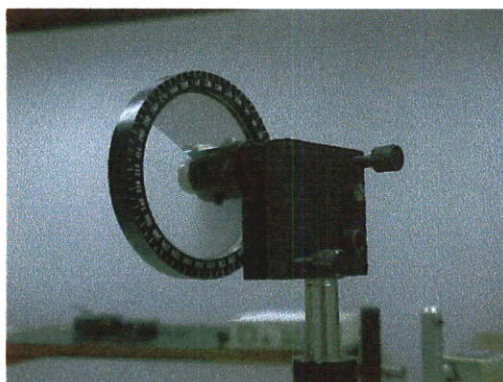
ได้แก่เลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He-Ne laser) ดังรูปที่ 3.22 เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานโฟตอนให้กับโฟโตดีเทคเตอร์ ซึ่งให้พลังงานโฟตอนสูงกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ที่ใช้ทำโฟโตดีเทคเตอร์



รูปที่ 3.22 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

### 3. อุปกรณ์ปรับกำลังแสง (attenuator)

ทำหน้าที่ปรับกำลังแสงที่ตกกระทบโฟโตดีเทคเตอร์เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 3.23 เป็นอุปกรณ์ปรับกำลังแสงสำหรับการทดลอง การปรับกำลังแสงทำได้โดยการปรับมุมของอุปกรณ์



รูปที่ 3.23 อุปกรณ์ปรับกำลังแสง

### 4. เครื่องวัดกำลังแสงเลเซอร์ (laser powermeter)

สำหรับวัดกำลังแสงของเลเซอร์ที่ผ่านอุปกรณ์ปรับกำลังแสงซึ่งเป็นกำลังแสงจริงที่ตกกระทบโฟโตดีเทคเตอร์ แสดงในรูปที่ 3.24



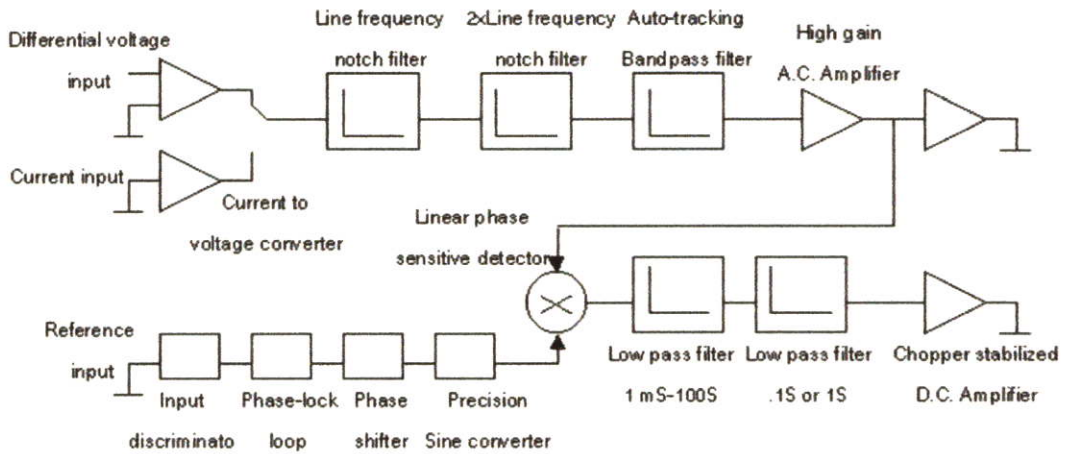
รูปที่ 3.24 เครื่องวัดกำลังแสงของเลเซอร์

### 5. เลนส์ (lens)

ใช้สำหรับรวมแสงให้ตกกระทบเฉพาะพื้นที่รับแสงของโฟโตดีเทคเตอร์ รวมทั้งควบคุมให้ลำแสงตกกระทบโฟโตดีเทคเตอร์ขนาดต่างๆ เท่าๆ กัน

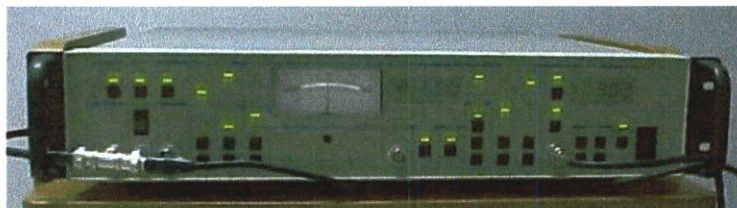
## 6. เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (lock-in amplifier)

วัดค่ากระแสที่ได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่จ่ายแรงดันไบแอสให้กับโฟโตดีเทคเตอร์โดยควบคุมแรงดันไบแอสด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 3.25 อาศัยหลักการเทียบเฟสของสัญญาณอินพุทกับสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 3.25 หลักการของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน

ในรูปที่ 3.26 แสดงเครื่องขยายแบบล็อกอินรุ่น SR 510 ผลิตโดย STANFORD RESEARCH SYSTEM ภาพ (ก) และ (ข) แสดงด้านหน้าและด้านหลังของเครื่องตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.26 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (ก)ด้านหน้า (ข)ด้านหลัง

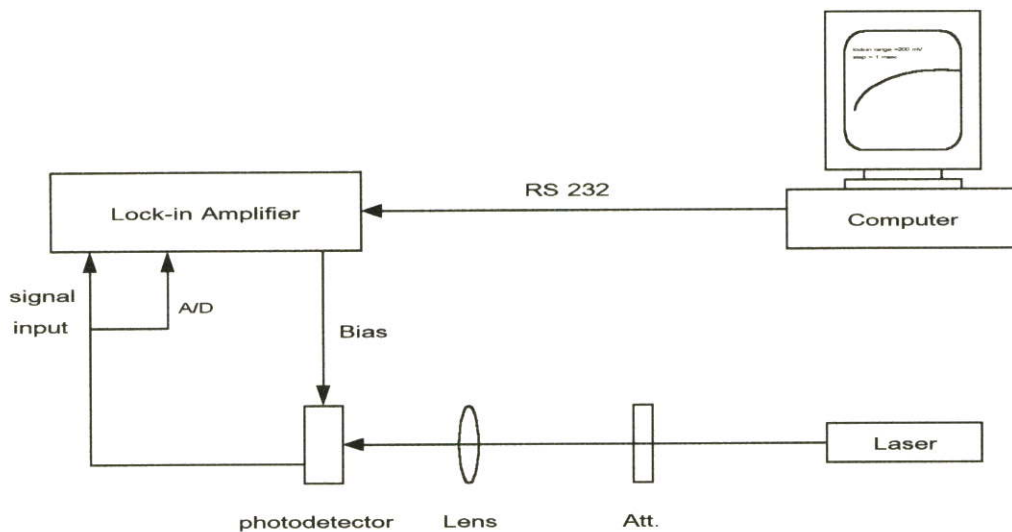
## 7. คอมพิวเตอร์ (computer)

ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินในการจ่ายแรงดันไบแอสให้กับโฟโตดีเทคเตอร์ และทำหน้าที่รับข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินเพื่อมาวิเคราะห์และแสดงผล แสดงดังรูป 3.27

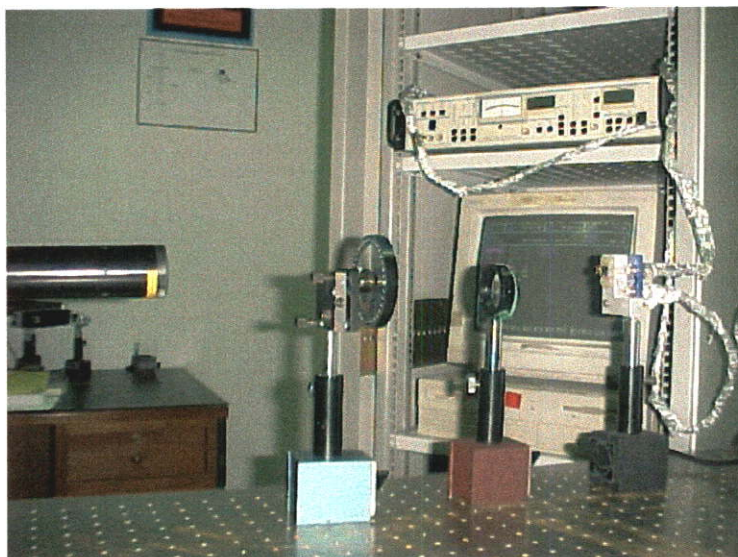


รูปที่ 3.27 คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน

รูปที่ 3.28 แสดงไดอะแกรมระบบวัดสมบัติกระแส-แรงดัน แสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ผ่านอุปกรณ์ปรับกำลังแสงของเลเซอร์และเลนส์ทำหน้าที่รวมแสงให้ตกกระทบเฉพาะพื้นที่รับแสงเท่านั้น ต่อแรงดันไบแอสจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินให้กับวงจรโฟโตดีเทคเตอร์และต่อสัญญาณจากโฟโตดีเทคเตอร์เข้าอินพุทของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน ในส่วนของคอมพิวเตอร์มีโปรแกรมในการควบคุมการจ่ายแรงดันจาก 0 ถึง 10 โวลต์ โดยเพิ่มค่าแรงดันครั้งละ 1 มิลลิโวลต์ แล้วอ่านค่ากระแสที่ได้มาแสดงผลในลักษณะเวลาจริง (real time) เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดโปรแกรมจะทำการเก็บข้อมูลโดยอัตโนมัติ สำหรับการจัดระบบวัดจริง แสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.28 แสดงไดอะแกรมระบบวัดสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์



รูปที่ 3.29 ระบบการวัดสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์

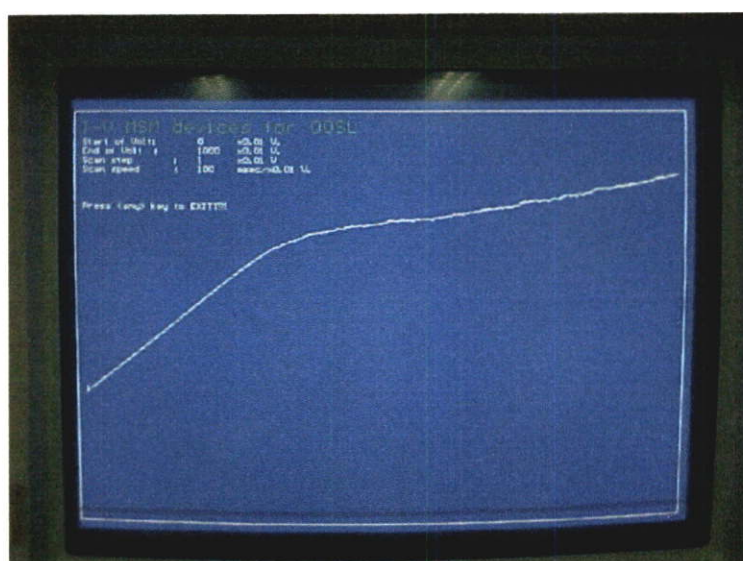
เริ่มต้นการวัดโดยเปิดโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.30 ทำการตั้งค่าเริ่มต้น ได้แก่ ชื่อไฟล์สำหรับเก็บพารามิเตอร์ ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูล ช่วงของการวัด ย่านการวัดของล็อกอิน และกำลังแสงของเลเซอร์ พารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกเก็บไว้ในไฟล์ .prm เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงาน โปรแกรมจะสั่งให้ล็อกอินจ่ายแรงดันให้กับวงจร จากนั้นทำการอ่านค่าที่ล็อกอินวัดได้ พร้อมทั้งแสดงผลผ่านจอมอนิเตอร์ ข้อมูลที่อ่านได้แต่ละครั้งจะจัดเก็บไว้ในไฟล์ .dat ลักษณะการแสดงผลจากการวัดแสดงในรูปที่ 3.31

```

***** SET UP SYSTEM *****
1 .Parameter file name:msm.prm
2 .Data file name:msm.dat
3 .Start of Volt (U):0
4 .End of Volt (U):1000
5 .Not used :
6 .scan speed(msec/x0.01 U) :100
7 .scan step (x0.01 U) :1
8 .data number :1000
9 .lockin range : 2.0000000000E-02
10 .Not used :
11 .laser power :1mW
12 .time constant :1sec
13 .comment :MSM thin film
*****
@Press <number> key to change parameter.
Press key <s> to start, and <H>alt to EXIT !!!

```

รูปที่ 3.30 ส่วนของการป้อนพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 3.31 จอมอนิเตอร์แสดงผลจากการวัด

### 3.2.2 การศึกษาสมบัติค่าความจุ-แรงดัน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าค่าความจุในโครงสร้าง MSM สามารถพิจารณาได้สองกรณี [13] ได้แก่ ค่าความจุที่เกิดขึ้นในบริเวณเขตปลอดพาหะซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการเจือ และค่าความจุที่เกิดจากโพลาริเซชันของพาหะเนื่องจากแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นในการทดลองจะทำการวัดค่าความจุทั้งกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบและกรณีที่มีแสงตกกระทบ โดยเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองประกอบด้วย เครื่องวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนย่านอาร์เอฟ (RF IMPEDENCE

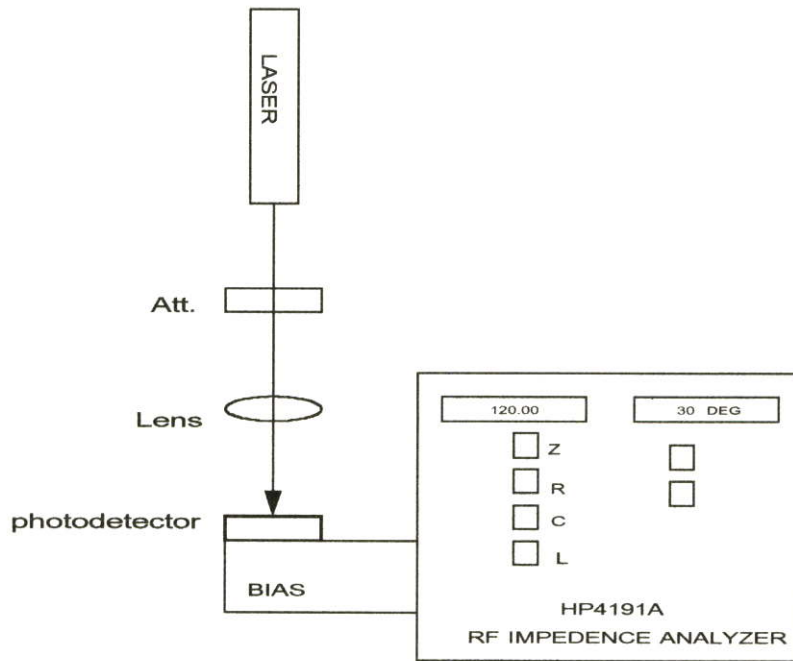
ANALYZER) รุ่น HP4191A แสดงในรูปที่ 3.32 เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ เช่น ค่าความต้านทาน ค่าความจุ ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความนำของอุปกรณ์ เป็นต้น สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 1 เมกะเฮิร์ตถึง 1 จิกะเฮิร์ต รวมทั้งสามารถปรับแรงดันไบแอสจาก -40 โวลต์ ถึง +40 โวลต์



รูปที่ 3.32 เครื่องมือวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อนย่านอาร์เอฟ

รูปที่ 3.33 แสดงไดอะแกรมระบบวัดค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ โดยให้แสงเลเซอร์ส่องผ่านอุปกรณ์ปรับกำลังแสงของเลเซอร์และเลนส์ แล้ววัดกกระทบโฟโตดีเทคเตอร์ ในการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขดังนี้

- 1) วัดค่าความจุของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาดต่างๆ ที่ค่าแรงดันไบแอสระหว่าง 0-10 โวลต์ ในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบ
- 2) วัดค่าความจุของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาดต่างๆ ที่ค่าแรงดันไบแอสระหว่าง 0-10 โวลต์ ในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบ
- 3) วัดค่าความจุของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาดต่างๆ ที่กำลังแสงระหว่าง 0-1.2 มิลลิวัตต์ ในกรณีที่แรงดันไบแอสคงที่



รูปที่ 3.33 แสดงไดอะแกรมระบบวัดค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์

จากชุดการทดลองในรูปที่ 3.34 กำหนดค่าเริ่มต้นก่อนทำการวัดโดยค่าแรงดันไบแอสระหว่าง 0-10 โวลต์ โดยเพิ่มค่าครั้งละ 1 โวลต์ ตั้งค่าความถี่ไว้ที่ 1 เมกะเฮิร์ต เลื่อนปุ่มการวัดไว้ที่ค่า C เริ่มทำการวัดที่แรงดันไบแอสค่าต่างๆ บันทึกค่าความจุที่อ่านได้



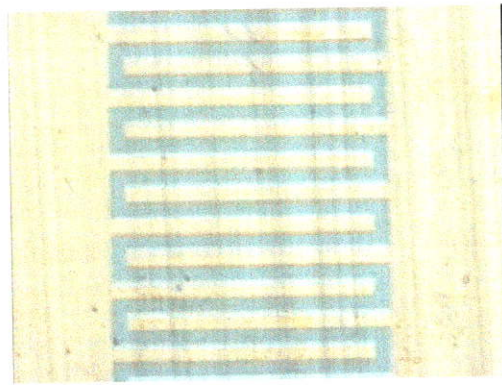
รูปที่ 3.34 ระบบการวัดสมบัติค่าความจุ-แรงดัน

## บทที่ 4

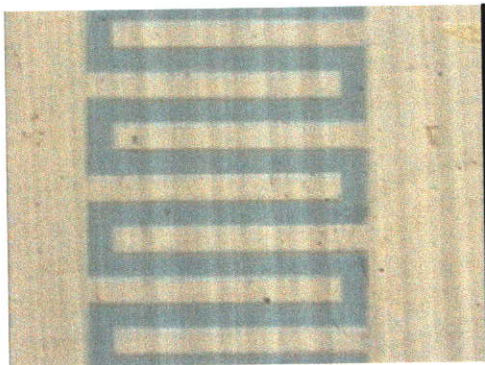
# ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

### 4.1 ผลจากกระบวนการลิโทกราฟี

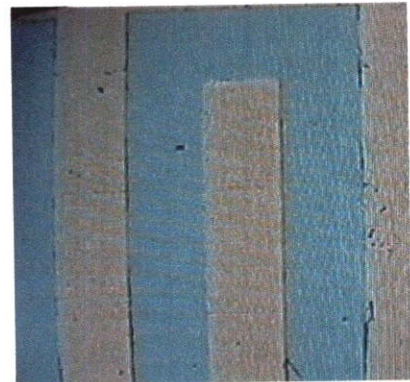
ผลที่ได้จากการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ด้วยวิธีลิโทกราฟี แสดงดังรูปที่ 4.1 โครงสร้างขั้วมีขนาดเท่ากับ 30 ไมครอน 50 ไมครอน และ 100 ไมครอน ตามลำดับ แสดงการขยายภาพ 1000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) เพื่อตรวจดูลักษณะขั้วที่ได้



(ก) 30 ไมครอน



(ข) 50 ไมครอน



(ค) 100 ไมครอน

**รูปที่ 4.1** (ก) โครงสร้างขั้วโลหะขนาด 30 ไมครอน เมื่อขยาย 1000 เท่า

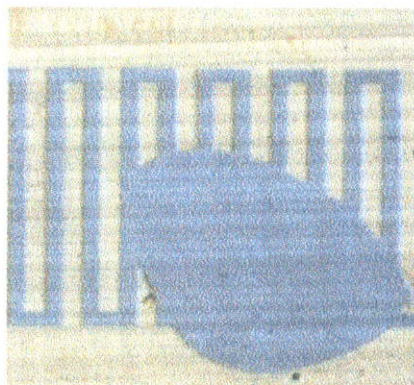
(ข) โครงสร้างขั้วโลหะขนาด 50 ไมครอน เมื่อขยาย 1000 เท่า

(ค) โครงสร้างขั้วโลหะขนาด 100 ไมครอน เมื่อขยาย 1000 เท่า

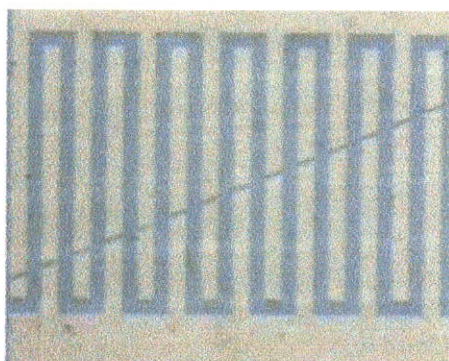
ในการเคลือบขั้วโลหะทอง ความหนาของขั้วมีผลโดยตรงต่อการนำกระแสของโฟโตดีเทคเตอร์ กรณีที่ขั้วโลหะหนาเกินไป ค่าความต้านทานเชิงแผ่น (sheet resistance) จะต่ำทำให้นำกระแสได้ดี แต่แสงไม่สามารถผ่านทะลุส่วนที่เป็นขั้วโลหะได้ ทำให้พาหะลดลงซึ่งทำให้กระแสลดลงด้วย ส่วนกรณีที่ขั้วบางเกินไป แสงสามารถทะลุผ่านได้ดี แต่ความต้านทานเชิงแผ่นจะสูง ดังนั้นความหนาของขั้วจึงคำนึงถึงพารามิเตอร์ทั้งสองเท่าๆ กัน โดยในงานวิจัยนี้ ความหนาของขั้วโลหะประมาณ 200 นาโนเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานเชิงแผ่นต่ำและแสงสามารถทะลุผ่านได้ดี



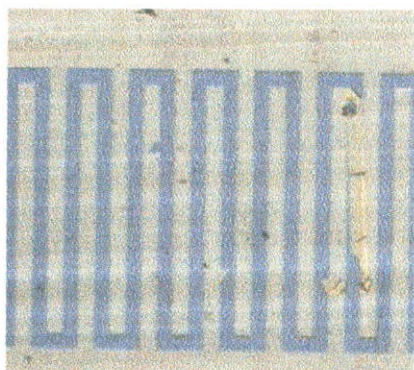
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2 (ก) จุดบกพร่องจากการตกค้างของฟิล์มไวแสง

(ข) จุดบกพร่องจากการหลุดลอกของขั้วโลหะ

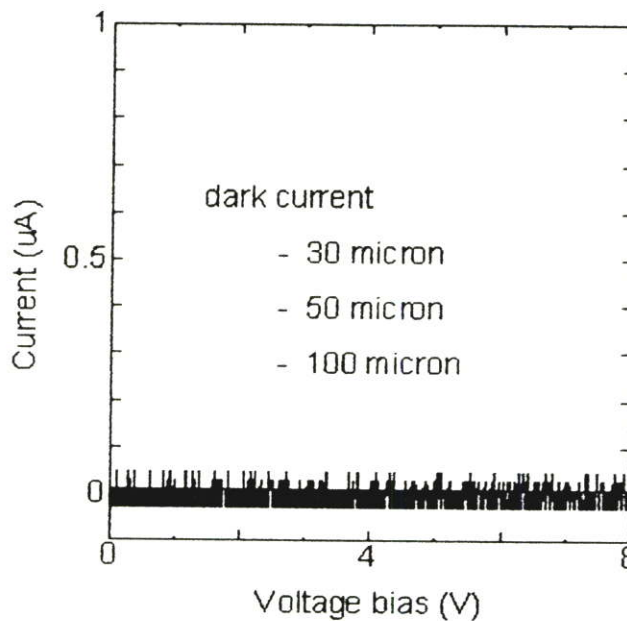
(ค) จุดบกพร่องในลักษณะรอยขีดข่วนบนขั้วโลหะ

(ง) จุดบกพร่องในลักษณะโครงสร้างขั้วโลหะต่อถึงกัน

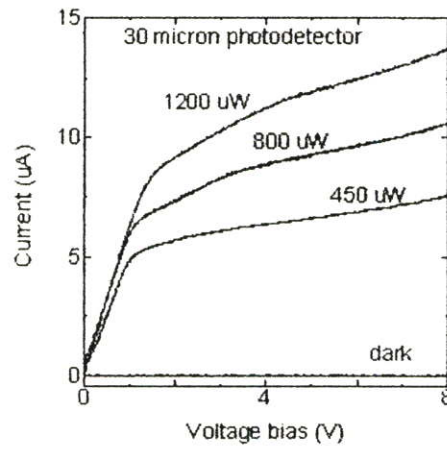
โครงสร้างขั้วโลหะที่ได้จากวิธีการลิโทกราฟี บางส่วนมีจุดบกพร่องในลักษณะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.2 จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นมีผลต่อการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์ต่างกัน ในรูปที่ 4.2(ก) เป็นลักษณะของการกำจัดฟิล์มไวแสงที่ไม่สมบูรณ์ มีผลต่อการทะลุผ่านของแสง ในรูปที่ 4.2 (ข) และ (ค) เป็นรอยหลุดและรอยขาดของขั้วโลหะ ตามลำดับ ซึ่งมีผลต่อสนามไฟฟ้าภายใต้ขั้วโลหะ ส่วนรูปที่ 4.2 (ง) ขั้วโลหะในบางตำแหน่งไม่ขาดกัน ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้งานได้

#### 4.2 ผลการศึกษาสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V characteristics)

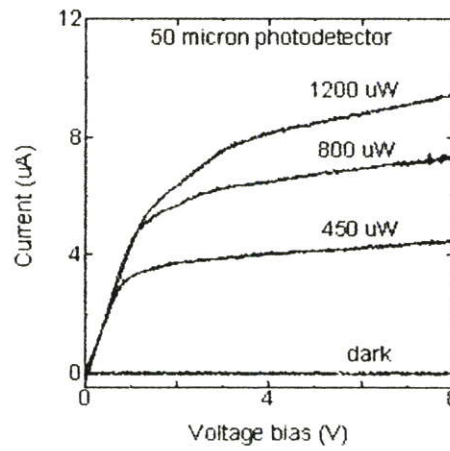
จากระบบวัดสมบัติกระแส-แรงดัน ทำการวัดกระแสมืดของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาดต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่ากระแสมืดมีค่าน้อยมากซึ่งอยู่ในระดับนาโนแอมแปร์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ สามารถลดค่ากระแสมืดได้ดีกว่าโครงสร้างแบบพีเอ็น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ากำแพงศักย์ที่เกิดจากรอยต่อแบบฮอตสปีก็จะกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ยกเว้นกรณีที่มีการไบแอสแบบตรงซึ่งทำให้กำแพงศักย์ลดลง



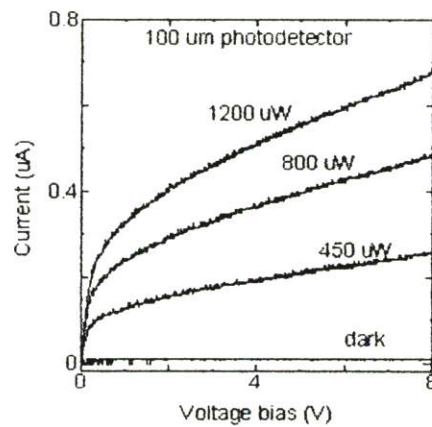
รูปที่ 4.3 กระแสมืดที่เกิดขึ้นในโฟโตดีเทคเตอร์ขนาดต่างๆ



(ก)



(ข)



(ค)

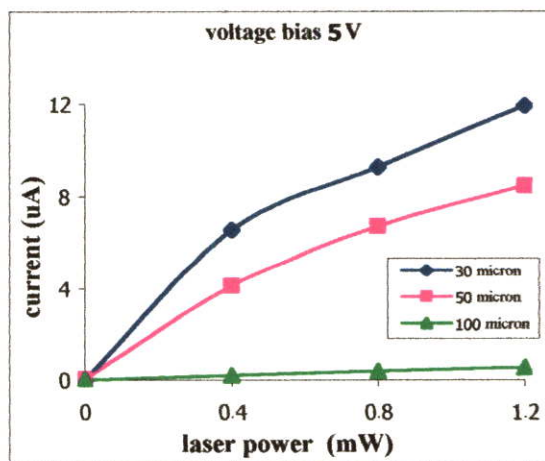
รูปที่ 4.4 (ก) สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอน  
 (ข) สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 50 ไมครอน  
 (ค) สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 100 ไมครอน

จากรูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของกระแสพิจารณาเป็น 3 กรณี คือกรณีแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดันไบแอส กรณีที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับกำลังแสงของเลเซอร์ที่ตกกระทบ และกรณีที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ขึ้นกับขนาดของโครงสร้างขั้วโลหะ โดยกรณีแรกอธิบายได้ว่า สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสทำให้พาหะที่เกิดจากแสงซึ่งได้แก่อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วได้เร็วขึ้นก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกัน นั่นคือปริมาณกระแสเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีที่สองอธิบายได้ว่า พาหะจะเพิ่มขึ้นตามกำลังแสงที่ตกกระทบส่งผลให้เกิดกระแสเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนพาหะ และกรณีสุดท้ายอธิบายได้ว่า ที่แรงดันไบแอสเท่ากันการลดขนาดของโครงสร้างขั้วทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้กระแสเพิ่มขึ้นตามสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับกรณีแรก

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับกำลังแสงของโฟโตนิกเด็คเตอร์ขนาดต่างๆ เมื่อแรงดันไบแอสคงที่ นำข้อมูลที่ได้ไปพลอตกราฟซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า กระแสมากขึ้นเมื่อขนาดของโครงสร้างลดลง

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของกระแสกับกำลังแสงของเลเซอร์เมื่อแรงดันไบแอสคงที่

laser power (mW)	current (uA) at 5V		
	100 micron	50 micron	30 micron
0	0.01	0.05	0.01
0.4	0.21	4.13	6.58
0.8	0.396	6.75	9.30
1.2	0.56	8.50	11.93



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงกระแสโฟโตนิกกับกำลังแสงของเลเซอร์ที่แรงดันไบแอสคงที่

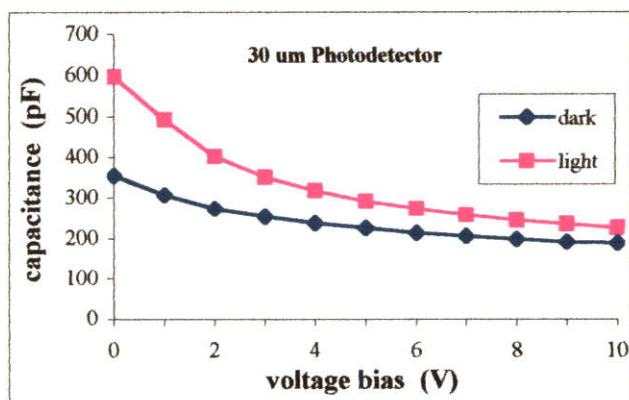
### 4.3 การศึกษาสมบัติค่าความจุ-แรงดัน (C-V characteristics)

จากระบบวัดสมบัติค่าความจุ-แรงดัน ทำการวัดค่าความจุของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาดต่างๆ โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสระหว่าง 0 ถึง 10 โวลต์ ทำการทดลองทั้งกรณีไม่มีแสงตกกระทบและกรณีมีแสงตกกระทบ ค่ากำลังแสงของเลเซอร์อยู่ในช่วง 0 ถึง 1.2 มิลลิวัตต์ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2

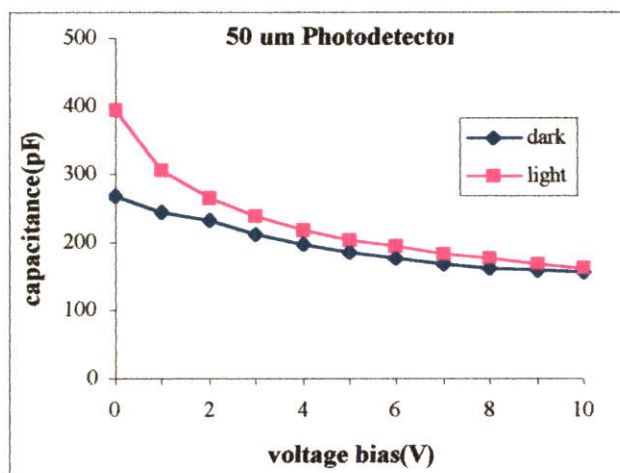
ตารางที่ 4.2 ค่าความจุของโฟโตดีเทคเตอร์ที่กำลังแสงของเลเซอร์ค่าต่างๆ

Voltage bias (V)	Capacitance (pF) at difference laser power								
	MSM 100 micron			MSM 50 micron			MSM 30 micron		
	dark	100uW	1mW	dark	100uW	1mW	dark	100uW	1mW
0	218	233	258	267	361	395	342	407	597
1	174	185	201	242	284	307	379	384	493
2	152	161	170	234	243	264	333	333	402
3	138	146	152	212	218	237	301	300	351
4	128	136	140	196	200	218	277	276	317
5	120	127	130	184	186	204	259	257	291
6	114	120	123	175	175	195	245	243	273
7	108	114	116	168	166	183	234	231	257
8	104	108	111	163	159	175	224	221	244
9	100	104	106	159	154	168	216	213	234
10	96	100	102	155	150	162	209	206	225

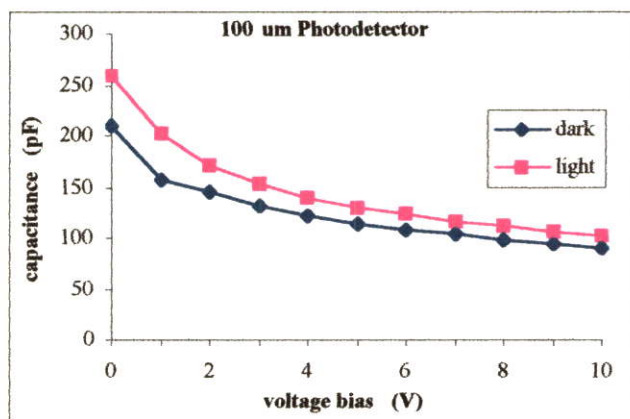
ค่าในตารางที่ 4.2 นำมาเขียนกราฟซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 ผลที่ได้สามารถพิจารณาเป็น 3 กรณีคือ กรณีแรก ค่าความจุลดลงเมื่อแรงดันไบแอสมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสทำให้เขตปลอดพาหะกว้างมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความจุลดลง กรณีที่สอง ค่าความจุเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสงโดยค่าความจุที่เพิ่มเข้ามาเกิดจากการโฟลวไรเซชันของพาหะทางแสง และกรณีที่สาม ค่าความจุเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดโครงสร้างเล็กลงเนื่องจากค่าความจุแปรผกผันกับระยะระหว่างขั้ว



(ก)



(ข)



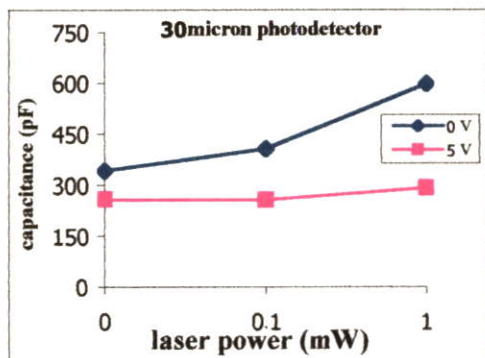
(ค)

รูปที่ 4.6 (ก) สมบัติค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอน

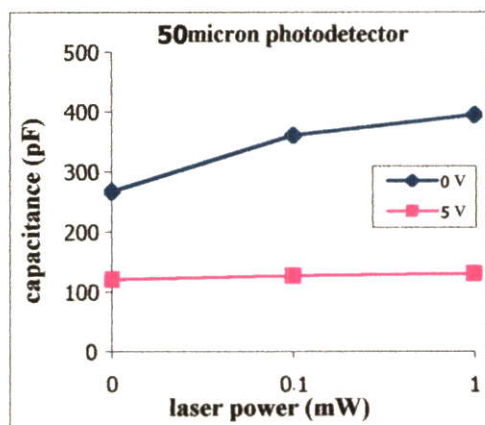
(ข) สมบัติค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 50 ไมครอน

(ค) สมบัติค่าความจุ-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 100 ไมครอน

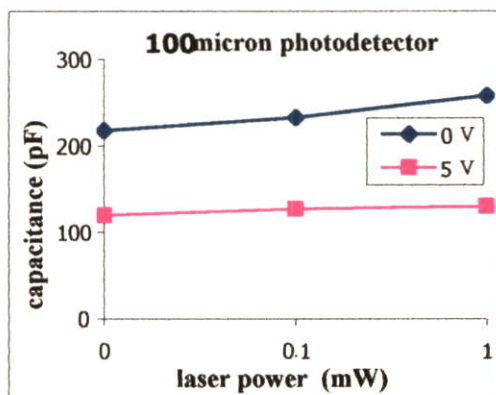
เมื่อทำการคงที่ค่าแรงดันไบแอส แล้วทำการวัดค่าความจุที่กำลังแสงของเลเซอร์ค่าต่างๆ นำค่าที่ได้มาพลอต ได้ผลดังรูปที่ 4.7



(ก)



(ข)



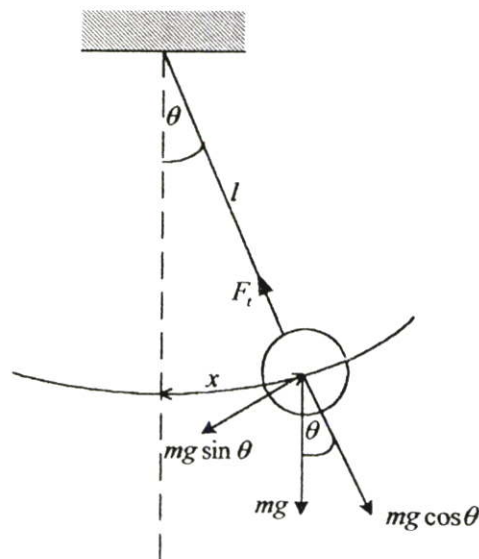
(ค)

รูปที่ 4.7 (ก) สมบัติค่าความจุกับกำลังแสงของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอนที่ไบแอสคงที่  
 (ข) สมบัติค่าความจุกับกำลังแสงของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 50 ไมครอน ที่ไบแอสคงที่  
 (ค) สมบัติค่าความจุกับกำลังแสงของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 100 ไมครอน ที่ไบแอสคงที่

#### 4.4 การประยุกต์ใช้งาน (Applications)

##### 4.4.1 การประยุกต์ใช้โฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ในงานทดลองวัดคาบการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก วิชาฟิสิกส์ระดับมัธยมปลาย

การแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก (simple harmonic) เป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย ได้แก่ การแกว่งของลูกตุ้มดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก

จากรูป 4.8 ลูกตุ้มมวล  $m$  ผูกติดกับเชือกเบาบาง  $l$  ทำมุม  $\theta$  กับแนวตั้ง แรงที่กระทำต่อมวล  $m$  มีสองแรงคือ แรง  $mg$  (แรงโน้มถ่วงของโลก) และแรงตึงในเส้นเชือก  $F_t$  ทำการตั้งแกน 2 แกน ให้อยู่ในแนวรัศมีแกนหนึ่ง อีกแกนอยู่ในแนวสัมผัสกับเส้นโค้ง แยกแรง  $mg$  ในแนวรัศมีและแนวสัมผัสได้เป็น  $mg \cos \theta$  และ  $mg \sin \theta$  ตามลำดับ

แรง  $mg \cos \theta$  และแรง  $F_t$  จะรวมกันเป็นแรงสู่ศูนย์กลาง ทำให้มวล  $m$  เคลื่อนที่ทางโค้งของวงกลม ส่วน  $mg \sin \theta$  ทำให้มวล  $m$  มีความเร่งตามแนวสัมผัส และจุดให้มวล  $m$  ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล ดังนั้น  $F = -mg \sin \theta$  ถ้าในกรณีที่การแกว่งเป็นมุมเล็กๆ ค่า  $\sin \theta \approx \theta$  จะได้ว่า  $F = -mg\theta = -mg \cdot \frac{x}{l}$  ฉะนั้นคาบ (T) ของการแกว่งจะเป็นไปตามสมการ

$$F = -kx \quad \text{เมื่อ} \quad k = -\frac{mg}{l}$$

คาบของการแกว่งคือ

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{k}{m}}$$

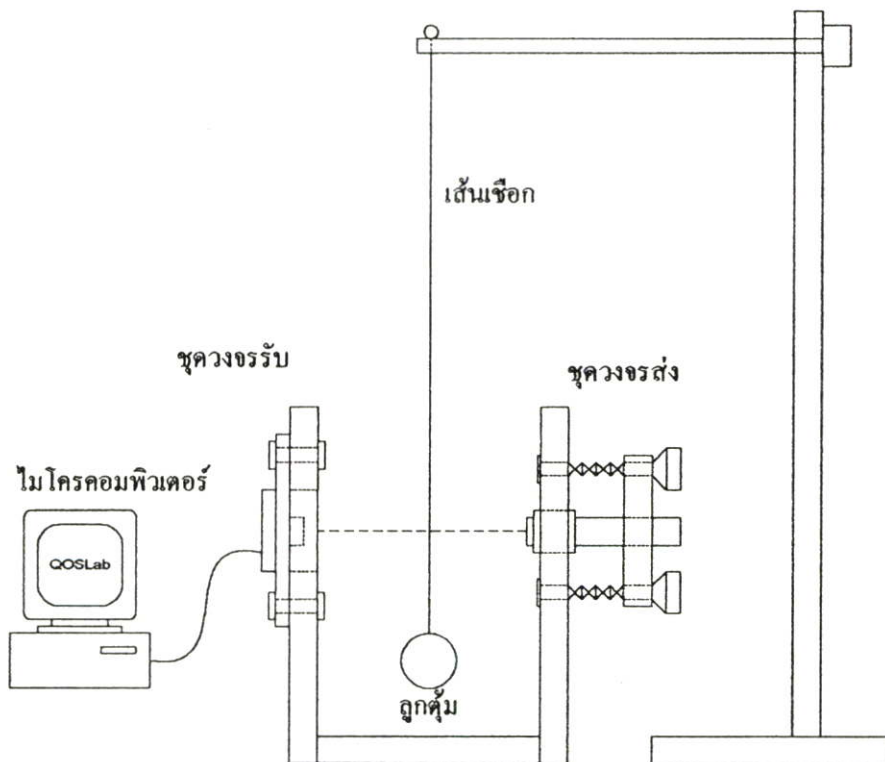
แทนค่า  $k$  จะได้

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{mg/l}}$$

จะได้ว่า

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (4.1)$$

ซึ่งพบว่าคาบ ( $T$ ) ของการแกว่งไม่ขึ้นกับมวล ( $m$ ) และจะขึ้นอยู่กับค่าความยาวของเชือก ( $l$ ) เท่านั้น ไดอะแกรมระบบการวัดคาบการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกแสดงดังรูปที่ 4.9 และการจัดชุดทดลองแสดงในรูปที่ 4.10

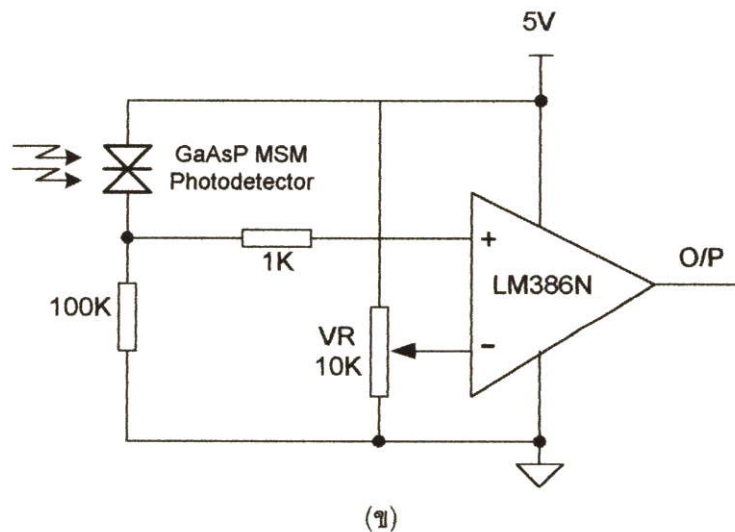
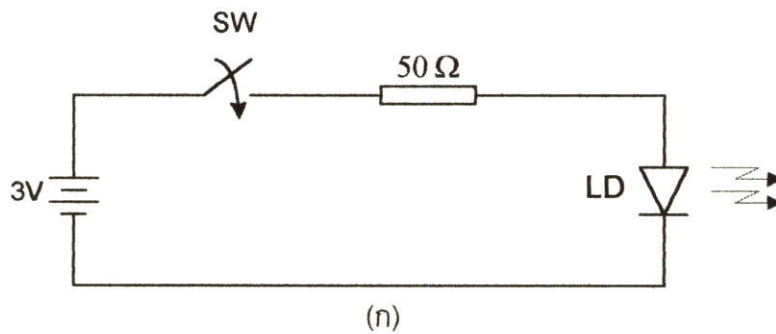


รูปที่ 4.9 ไดอะแกรมระบบการวัดคาบการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก



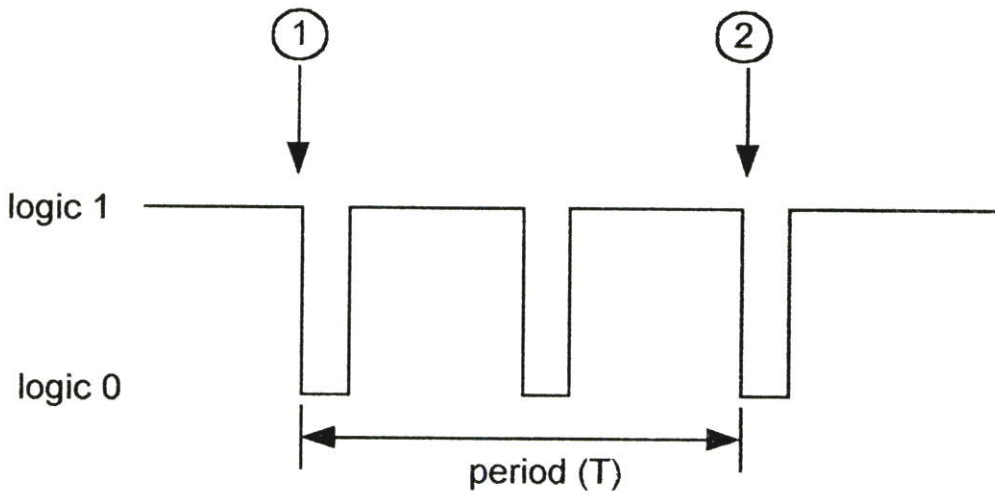
รูปที่ 4.10 การจัตุตทดลองการวัดคาบการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก

รายละเอียดของวงจรส่งแสงและวงจรตรวจจับแสงโดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 (n) วงจรส่งแสง (ข) วงจรตรวจจับแสง

สัญญาณไฟฟ้าจากวงจรตรวจจับแสงสามารถนำสู่ไมโครคอมพิวเตอร์พีซีได้ทางพริ้นเตอร์พอร์ท (printer port) สัญญาณที่ได้ขณะมีการแกว่งของลูกตุ้มโดยที่เส้นเชือกตัดทางเดินของแสงจะมีรูปแบบของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 4.12



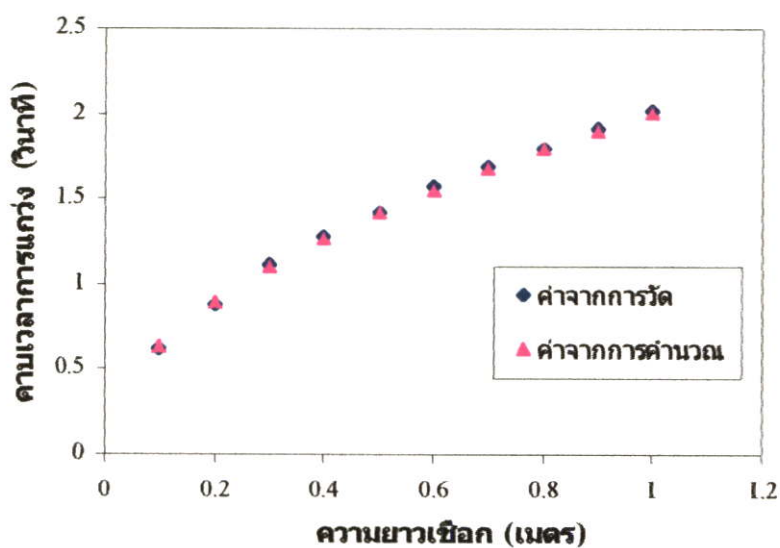
รูปที่ 4.12 รูปแบบของสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับแสง

ฉะนั้น เราสามารถเขียนโปรแกรมสร้างฐานเวลา (time base) จับเวลาเมื่อมีการตัดแสงที่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เราจะได้ค่าเวลาที่เป็นคาบ  $T$  ของการแกว่งของลูกตุ้มออกมา สามารถนำค่าจากการทดลองนี้เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณทางทฤษฎีจากสมการ (4.1)

การเขียนโปรแกรมอ่านข้อมูลเข้าและฐานเวลา ได้ใช้ภาษาปาสคาลโดยอาศัยโพธิ์ซีเอร์ที่มีให้ในยูนิทดอส (unit dos) คือ Gettime (hour, min, sec, sec100 : integer) ผลจากการวัดคาบการแกว่งแสดงดังตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้นำไปพลอตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยเปรียบเทียบกับการคำนวณซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดคาบการแกว่งของซิมเปิลฮาร์โมนิก (โดยใช้ค่า  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ )

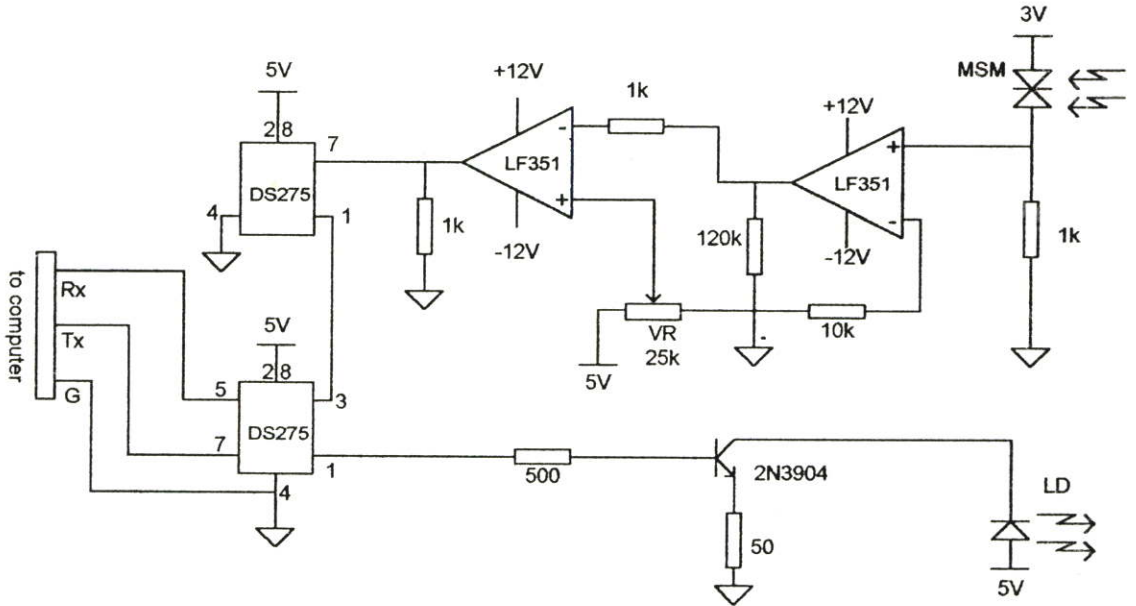
ความยาวเชือก (เมตร)	คาบเวลา (การวัด) (วินาที)	คาบเวลา (การคำนวณ) (วินาที)
0.1	0.62	0.63
0.2	0.88	0.89
0.3	1.12	1.10
0.4	1.28	1.27
0.5	1.42	1.42
0.6	1.57	1.55
0.7	1.69	1.68
0.8	1.80	1.79
0.9	1.91	1.90
1.0	2.02	2.01



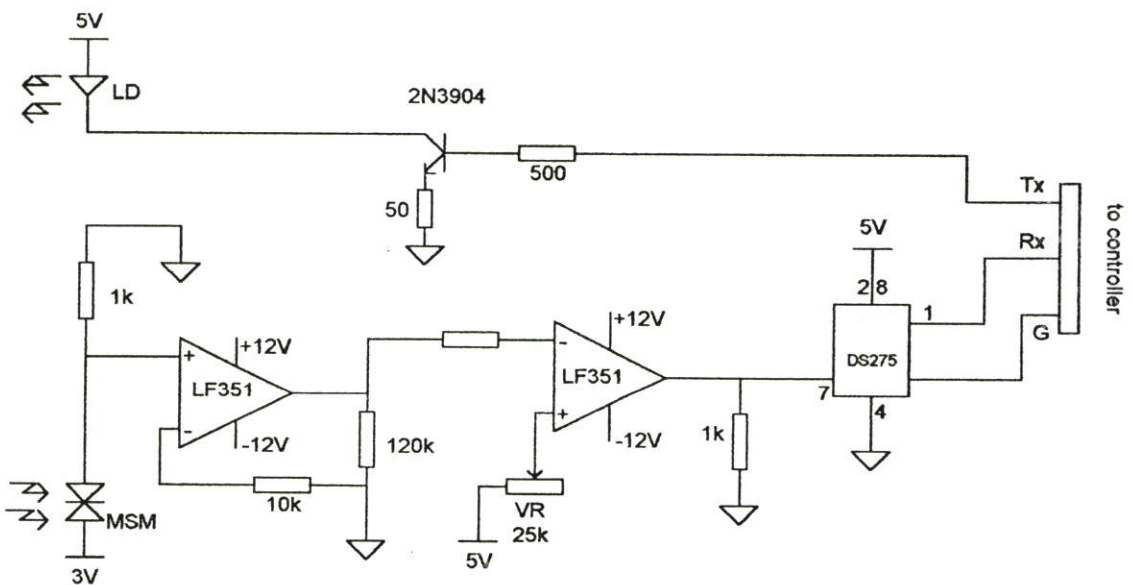
รูปที่ 4.13 คาบเวลาของการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าคำนวณ

#### 4.4.2 การประยุกต์ใช้โฟโตดีเทคเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์โครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ในงานสื่อสารทางแสง

จากสมบัติของโฟโตดีเทคเตอร์ที่ได้ ทำการออกแบบชุดทดลองรับส่งข้อมูลผ่านแสงโดยใช้  
ต้นแบบโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นเป็นตัวรับแสง รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดงวงจรรับส่งข้อมูล  
แสงด้านต้นทางและปลายทาง ตามลำดับ

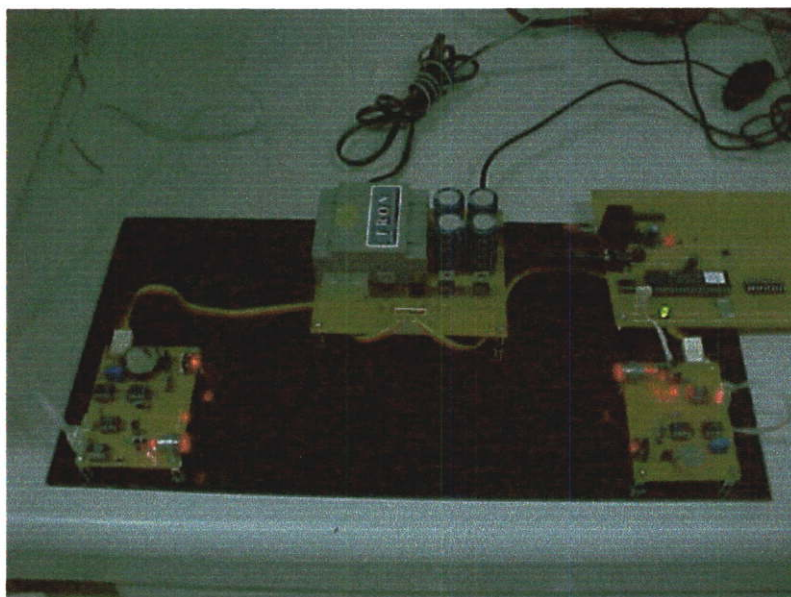


รูปที่ 4.14 วงจรรับส่งข้อมูลผ่านแสงด้านต้นทาง

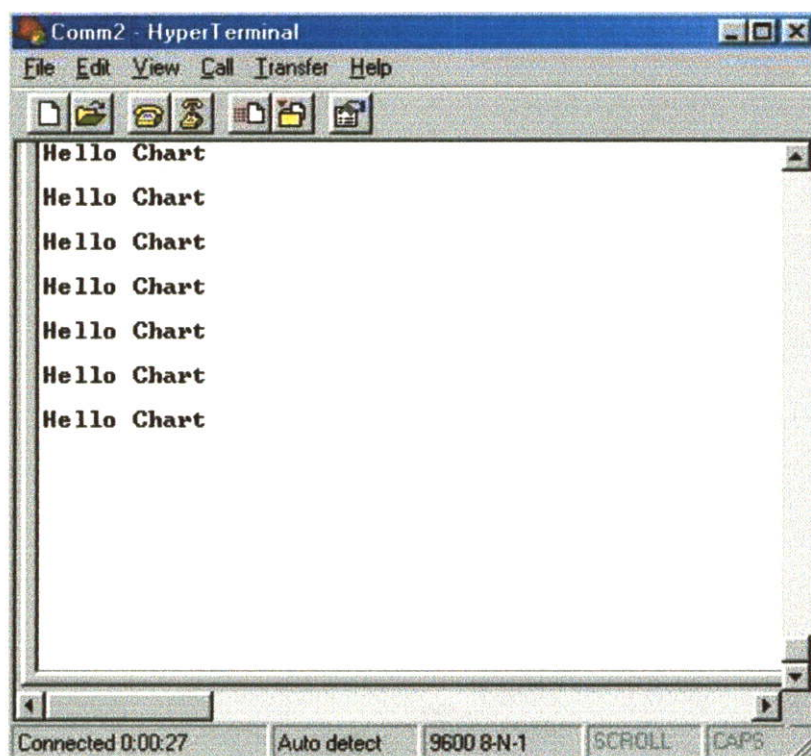


รูปที่ 4.15 วงจรรับส่งข้อมูลผ่านแสงด้านปลายทาง

ในรูปที่ 4.16 แสดงชุดทดลองรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่าน RS 232 ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ชุดทดลองรับส่งข้อมูลผ่านแสง



รูปที่ 4.17 ผลการรับส่งข้อมูลผ่านแสง

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ไฟโอดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มีขั้นตอนที่ง่ายต่อการประดิษฐ์เมื่อเปรียบเทียบกับไฟโอดีเทคเตอร์แบบพีเอ็น รวมทั้งสามารถลดค่าเวลาเคลื่อนย้ายพาหะและค่าคงที่เวลาอาร์ซีโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดโครงสร้างขั้วโลหะ ในการออกแบบอาศัยหลักการของรอยต่อชอตตีก็แบบ 2 รอยต่อ มีโครงสร้างขั้วแบบโคพลานาร์ แสงสามารถตกกระทบพื้นที่รับแสงได้โดยตรงซึ่งมีผลต่อการเกิดกระแสทำให้ประสิทธิภาพทางควอนตัมสูง ในงานวิจัยนี้ใช้สารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์เนื่องจากมีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง ปริมาณการเจือฟอสฟอรัสในแกเลียมอาร์เซไนด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 1.55 อิเล็กตรอนโวลท์

ในงานวิจัย ได้ทำการออกแบบไฟโอดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีความกว้างขั้วโลหะและระยะระหว่างขั้วโลหะเท่ากันสามขนาด ได้แก่ 30 ไมครอน 50 ไมครอน และ 100 ไมครอน ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม LEDIT ซึ่งนิยมใช้แพร่หลายในการออกแบบซีมอดขั้นตอนการสร้างไฟโอดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ใช้วิธีการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้แสงเลเซอร์สีน้ำเงินความยาวคลื่น 442 นาโนเมตรในการสร้างหน้ากากของโครงสร้างขั้วบนฟิล์มไวแสง ปลุกขั้วโลหะทองโดยใช้ระบบระเหยสารในสุญญากาศ ความหนาของขั้วโลหะทองเท่ากับ 200 นาโนเมตร กรรมวิธีในการต่อขาอุปกรณ์ใช้การเงินเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างโครงสร้างขั้วโลหะทองกับขาอุปกรณ์ภายนอก

การศึกษสมบัติกระแส-แรงดัน ของไฟโอดีเทคเตอร์ที่มีโครงสร้างขั้วขนาดต่างๆ ได้ค่ากระแสมีคอยู่ในระดับนาโนแอมแปร์ทั้งสามขนาด ค่ากระแสกระดิมิตที่ต่ำเนื่องจากกำบังศักยภาพของรอยต่อชอตตีก็ การวัดสมบัติกระแส-แรงดันที่กำลังแสงของเลเซอร์ค่าต่างๆ ได้ค่ากระแสต่างๆ ในแต่ละโครงสร้าง โดยกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดโครงสร้างขั้วโลหะลดลงเนื่องจากพาหะที่เกิดจากแสงเคลื่อนที่ไปถึงขั้วก่อนที่จะรวมตัวกันใหม่และเนื่องจากขนาดโครงสร้างขั้วที่เล็กลงทำให้ในพื้นที่รับแสงขนาดเท่ากันมีจำนวนขั้วโลหะมากขึ้น นั่นคือจำนวนกระแสเท่ากับผลรวมของกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้ว

การศึกษสมบัติค่าความจุ-แรงดัน ของไฟโอดีเทคเตอร์ที่มีโครงสร้างขั้วขนาดต่างๆ ได้ค่าความจุอยู่ในระดับพิโกฟารัด ค่าความจุลดลงเมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นเนื่องจากการไบแอสทำให้เขตปลอดพาหะกว้างมากขึ้น ค่าความจุเพิ่มขึ้นตามกำลังแสงของเลเซอร์ที่ตกกระทบเนื่องจากโฟลาโรเซชันของพาหะที่เกิดจากแสง ซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้โดยการไบแอสแรงดันให้พาหะเคลื่อน

ที่ด้วยความเร็วอิมพัลส์ และค่าความจุจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดโครงสร้างเล็กลง เนื่องจากค่าความจุแปรผกผันกับระยะระหว่างขั้ว

โฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการตรวจจับแสงได้แก่ การวัดคาบการแกว่งแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก รวมทั้งการประยุกต์ใช้ในงานด้านการสื่อสารทางแสงเช่น การสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์โดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะเป็นตัวรับแสง

### ข้อเสนอแนะ

โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ สามารถประดิษฐ์ได้บนสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกชนิดของขั้วโลหะให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดรอยต่อแบบชอตต์กี ขนาดของโครงสร้างสามารถทำให้เล็กลงได้ ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเครื่องมือในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับขนาดลำแสงของเลเซอร์

## เอกสารอ้างอิง

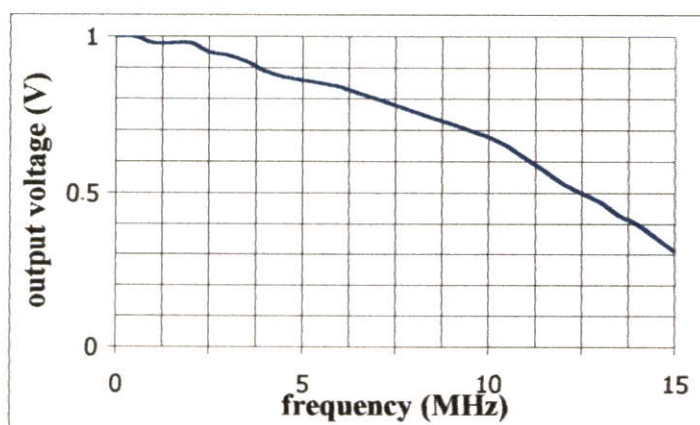
1. Yu Chin Lim and Robert A. Moore, **Properties of Alternatively charged Coplanar Parallel Strips by Conformal Mappings**, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-15, No. 3, March 1968, pp. 173-187
2. Malcolm Goodge, **semiconductor Device Technology**, Howard W.Sams &Co.,Inc., Indiana, USA, pp. 41-43
3. Richard S.Muller and Theodore I.Kamins, **Device Electronics for Integrated Circuits**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986, pp. 126-160
4. ดร. ดุสิต เครื่องงาม, **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม1**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2542 หน้า 339-388
5. Paul R. Berger, **MSM photodiodes**, IEEE Potential, April/May 1996, pp. 25-29
6. Julian B., D. Soole and Hermann Schumacher, **Transit-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodetectors**, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 37, No. 11, November 1990, pp. 2285-2291
7. Sybil P.Parker, **McGraw-Hill Encyclopedia of Physics**, Second Edition, McGraw-Hill, inc., 1993, pp. 212-214
8. Julian B., D. Soole and Hermann Schumacher, **InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors for Long Wavelength Optical Communications**, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 27, No. 3, March 1991, pp. 737-752
9. Murry R. Spiegel, **Theoretical Mechanics**, McGraw-Hill book Company, 1989, pp 106
10. L.F. Thopson, C.G. Willson, and M.J.Bowden, **Introduction to Microlithography**, American Chemical Society, Washington, D.C., 1983, pp. 161-214
11. W.S. DeForest, **Photoresist**, McGraw-Hill Book Company, 1975, pp. 89-162
12. ดร. ดุสิต เครื่องงาม, **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม2**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2542 หน้า 339-388
13. Jian Lu, R. Surridge, G. Pakulski, H. Van Driel, and J. M. Xu, **Studies of High-Speed Metal-Semiconductor-Metal Photodetector with a GaAs/AlGaAs/GaAs Heterostructure**, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 40, No. 6, June 1993, pp. 1087-1092
14. ผศ.ดร. ดุสิต เครื่องงาม, **โซลิดสเตตฟิสิกส์**, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2521

15. Jasplit Singh, **Physics of Semiconductors and Their Heterostructures**, McGraw-Hill, Inc., Newyork, 1993
16. Anthony W. Sarto and Bart J. Van Zeghbroeck, **Photocurrents in a Metal-Semiconductor-Metal Photodetector**, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 33, No. 12, December 1997, pp. 2188-2194
17. Jinwook Burn, Kerry I. Litvin, William J. Schaff, and Lester F. Eastman, **Optimization of High-Speed Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors**, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, No. 6, June 1994, pp. 722-724

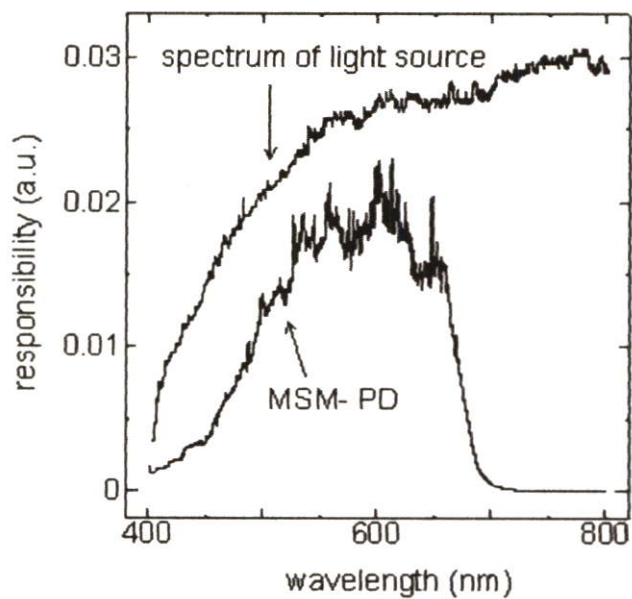
## ภาคผนวก

ตารางที่ 1 การตอบสนองต่อความถี่ของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอน

Frequency (MHz)	Output voltage (V)	Frequency (MHz)	Output voltage (V)
0	1.00	8.0	0.76
0.5	1.00	8.5	0.74
1.0	0.98	9.0	0.72
1.5	0.98	9.5	0.70
2.0	0.98	10.0	0.68
2.5	0.95	10.5	0.65
3.0	0.94	11.0	0.61
3.5	0.92	11.5	0.57
4.0	0.89	12.0	0.53
4.5	0.87	12.5	0.50
5.0	0.86	13.0	0.47
5.5	0.85	13.5	0.43
6.0	0.84	14.0	0.40
6.5	0.82	14.5	0.36
7.0	0.80	15.0	0.31
7.5	0.78	15.5	0.27



รูปที่ 1 สเปกตรัมการตอบสนองต่อความถี่ของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอน



รูปที่ 2 สเปกตรัมการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของโฟโตดีเทคเตอร์ขนาด 30 ไมครอน

## ประวัติผู้เขียน

นายอภิชาติ สังข์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ ในปีการศึกษา 2537 สำเร็จการศึกษาวศวกกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2540 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542