ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190942

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การออกแบบ และการสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO แบบเชิงราบ

จัดทำโดย

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2554

b00256050

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190942

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การออกแบบ และการสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO แบบเชิงราบ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

จัดทำโดย

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2554

บทคัดย่อ

190942

รายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาการออกแบบ การสร้าง และวัดลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้า แบบอินเตอร์ดิจิเตท โดยมีความมุ่งหมายที่ต้องการเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ให้มากขึ้น โดยนำวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส ITO มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าลงบนซิลิคอนชนิดเอ็นด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริ่ง ให้ ITO มีความหนาที่เหมาะสม กล่าวคือ มีสภาพการนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่สูง โดยออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) มีค่าอยู่ระหว่าง 20-80 μm เมื่อศึกษาถึงลักษณะสมบัติการตอบสนองทางแสงกระแสตรง และกระแสสลับของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO พบว่าลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขณะที่การตอบสนองทางความถี่มีค่าลดลง เมื่อขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ITO เพิ่มขึ้น โดยจากผลการทดลองพบว่าที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm นั้นมีลักษณะสมบัติการตอบสนองทางแสง กระแสตรงและกระแสสลับเหมาะสมกันมากที่สุด โดยมีอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง 25,000 lux ภายใต้แรงดันไบอัส 10 V เท่ากับ 1,900 เท่า ประสิทธิภาพควอนตัม 6.3% สภาพการตอบสนองทางแสง 0.042 A/W และการตอบสนองทางความถี่ 350 kHz

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO สามารถนำไปใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงที่ความเข้มแสงต่ำได้เป็นอย่างดี มีกระแสรั่วไหลต่ำ มีค่ากระแสแสงที่สูง และมีผลการตอบสนองทางความถี่ที่อยู่ในระดับที่น่าพอใจ

ABSTRACT

190942

This report is a study on design, fabrication and characteristics of interdigitated ITO/n-Si/ITO photodetectors. The purpose of this report is to increase the photocurrent of MSM structure. By using transparent conducting oxide (ITO) as electrode, the transparent electrodes were deposited on the n-type silicon by R.F. sputtering. The thickness conditions for ITO film were optimized to get both high conductivity and transmission. In this report, ITO/n-Si/ITO photodetectors were designed to have electrode widths (W) and electrode spacings (S) between 20 and 80 μm. The optical response characteristics in both direct current and alternating current of the ITO/n-Si/ITO photodetector found that the current-voltage characteristics, quantum efficiency and responsivity were increased while the frequency response was decreased, where increasing the electrode width. The experimental results showed that the optimized between optical response direct current and alternating current of electrode width and electrode spacing was 40 μm. The photo/dark current, at illuminance 25,000 lux under 10 V bias voltage, quantum efficiency, responsivity and cutoff frequency were 1,900 times, 6.3%, 0.042 A/W and 350 kHz, respectively.

Experimental results indicated that the interdigitated ITO/n-Si/ITO photodetector can be used as good detector in lower light intensity. Because of low leakage current, high photocurrent and satisfying frequency response.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีงบประมาณ 2554

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ดังนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ศุภเดช รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง จากสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ดร. สัญญา คูณขาว จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีปทุม และ ดร. อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกุลวรางค์ นุตะมาน และคุณอิสระ ศรีธนชัย นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ที่ช่วยจัดเตรียมชิ้นงาน และวัดผลการทดลอง ขอขอบคุณ คุณอวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ และคุณรัตนาวรรณ สันบุญตัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือวัดการทดลองบางส่วนด้วยเครื่องมือวัดของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

30 กันยายน พ.ศ. 2554

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

รายการสัญลักษณ์.....XIV

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....4

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....5

1.4 ขอบเขตการวิจัย.....6

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย และวิธีดำเนินงาน.....6

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....7

1.7 เอกสารอ้างอิง.....7

บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแสง และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM.....10

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ.....10

2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง.....10

2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง.....11

2.1.3 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....12

2.1.4 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....14

2.2 อินเดียมทินออกไซด์.....15

2.2.1 สมบัติทั่วไปของอินเดียมทินออกไซด์.....15

2.2.2 สมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์.....16

2.3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM.....17

2.3.1 โครงสร้าง MSM ในสภาวะสมดุล.....18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส....19
2.3.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ....20
2.3.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM....21
2.3.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM....22
2.3.6 ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพตอบสนอง และผลตอบสนองต่อสเปกตรัม....23
2.3.7 ความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์....25
2.4 เอกสารอ้างอิง....26

บทที่ 3 การออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO....28
3.1 การออกแบบลวดลาย และการสร้างกระจกต้นแบบ....28
3.1.1 ลวดลายที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO....29
3.1.1.1 ลวดลายการวัดระยะการส่งผ่าน หรือการวัดแบบ TLM....30
3.1.1.2 ลวดลายการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์....31
3.1.2 ลวดลายตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตทชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al....32
3.2 กระบวนการสร้าง....35
3.3 เอกสารอ้างอิง....42

บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง....44
4.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO....44
4.1.1 สภาพต้านทานของ ITO ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม....44
4.1.2 ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของ ITO เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม....47
4.2 การทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์....53
4.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิเตท....55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสงกระแสตรง....58

4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิเตท....58

4.4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสง....59

4.4.1.2 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน....61

4.4.1.3 ผลของจำนวนขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน....64

4.4.1.4 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน....65

4.4.1.5 ผลของความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน....68

4.4.2 สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท....71

4.5 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสงกระแสสลับ เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่....76

4.6 เอกสารอ้างอิง....80

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย....84

ภาคผนวก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์....86

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีสปัตเตอริ่งต่างๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 50

4.2 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริ่ง.....52

4.3 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ที่ได้รับแรงดันไบอัส 5 V.....79

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit) ซึ่งสร้างขั้วโลหะ 2 ข้างบนสารกึ่งตัวนำ และมีส่วนรับแสงอยู่ที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ (หรือขั้วไฟฟ้า) ทั้งสอง (Electrode Spacing: S) และ (ข) ภาพแสดงด้านบน และภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ.....2

1.2 (ก) ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท โดยใช้ Al เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโลหะทึบแสง บริเวณรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบนี้จะอยู่ระหว่างซี่ของขั้วโลหะ Al (หรือระหว่างฟิงเกอร์) และ (ข) ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิเตท และบริเวณรับแสงของโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสของ ITO.....5

2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่าง ๆ (ก) ช่องแถบตรง และ (ข) ช่องแถบไม่ตรง.....12

2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ..... 13

2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ (ก) ชนิดเอ็น และ (ข) ชนิดพี.....13

2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบโดยตรง และ (ข) แบบโดยอ้อม.....14

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพาหะ และเปอร์เซ็นต์การเจือดีบุก ลงในอินเดียมออกไซด์ จากการทดลอง [2.8-2.10].....16

2.6 แผนภาพแถบพลังงานของอินเดียมออกไซด์ และ อินเดียมทินออกไซด์.....17

2.7 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM และ (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน..... 18

2.8 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....20

2.9 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ..... 20

2.10 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส..... 22

2.11 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM.....22

2.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....23

2.13 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของตัวตรวจวัดแสงตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอน.....24

2.14 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ.....25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.1 ลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง และลวดลายที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO
(ก) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (ข) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้น ITO
(ค) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นอลูมิเนียม และ (ง) ภาพถ่ายกระจกต้นแบบ.....29

3.2 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM
(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ
(ข) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการสร้าง ตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....30

3.3 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์
(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ
(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....31

3.4 ลักษณะโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท และตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาดต่าง ๆ.....32

3.5 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท
(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ
(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....33

3.6 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท
(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ
(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า.....34

3.7 ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) สภาพต้านทาน 10 Ω-cm.....35

3.8 แผนผังกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO.....35

3.9 ความแตกต่างระหว่างกระบวนการกัดชั้นฟิล์มแบบลิฟออฟและการกัดชั้นฟิล์มทั่วไป.....40

3.10 ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่เคลือบบนฐานรองที่เป็นกระจกโดยมีความหนาประมาณ 500 nm.....40

3.11 ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่มีการกัดชั้นฟิล์มด้วยวิธีต่างกันที่กำลังขยาย 100 เท่า
(ก) การกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ และ (ข) การกัดชั้นฟิล์มแบบทั่วไป..... 41

3.12 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO.....41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.13 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท (ก) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน และ (ข) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 100 เท่า.....42

4.1 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนชั้นฟิล์ม ITO ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทาน (ก) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี TLM และตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง.....45

4.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาค่าสภาพต้านทานโดยเทคนิค TLM.....46

4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานกับความหนาของฟิล์ม ITO..... 46

4.4 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ (ก) แสดงขั้วโลหะอลูมิเนียมของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัด.....47

4.5 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1324})$ กับค่าสนามแม่เหล็กที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ.....49

4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทาน, ความหนาแน่นของพาหะและ สภาพคล่องของพาหะ กับ ความหนาของฟิล์ม ITO.....49

4.7 แผนภาพแสดงสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ, สารกึ่งตัวนำ และฉนวน.....51

4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความหนาฟิล์ม ITO.....52

4.9 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์.....53

4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอน ชนิดเอ็น.....53

4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งล็อกกับแรงดันไบอัส เพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ.....54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิเตท โดยมี ITO หนา 500 nm, ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 60 μm, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm, ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และ จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว โดย (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน 56

4.13 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิเตทโดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20 μm, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm, ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และ จำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว โดย (ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน 56

4.14 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM 56

4.15 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si./ITO และ Al/n-Si/Al 57

4.16 แถบพลังงานของรอยสัมผัสช็อตกีย์ในภาวะสมดุลความร้อน โดย (ก) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็น และ (ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิดเอ็น 58

4.17 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ 59

4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า 59

4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง 61

4.20 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM 61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.21 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในช่วง 5,000-25,000 lux 62

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V 63

4.23 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al 63

4.24 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ตั้งแต่ 2, 4 และ 8 ขั้ว 65

4.25 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 65

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 66

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัส และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ 67

4.28 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าต่างกัน ขณะให้แรงดันไบอัส โดย (ก) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง และ (ข) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น 68

4.29 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20-80 μm. 68

4.30 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20 -80 μm 69

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความกว้างของขั้วไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al 69

4.32 การสะท้อน และทะลุผ่านของแสงที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM (ก) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะโปร่งใสชนิด ITO/n-Si/ITO และ (ข) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะทึบแสงชนิด Al/n-Si/Al 71

4.33 แผนภาพการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500 Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V 72

4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่นในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20-80 μm 73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ 73

4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัม กับความยาวคลื่นในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20-80 μm 74

4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่น เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al 75

4.38 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500 Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V 76

4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เพื่อหาความถี่คัทออฟ ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al 78

4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัทออฟและความจุไฟฟ้า กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ... 78

4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความถี่คัทออฟ กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า 80

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	หมายถึง	กล่าวถึงครั้งแรกในหัวข้อ
A	พื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ	4.2
B	สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	4.1.2
c	ความเร็วแสงในสุญญากาศ	2.1.1
C_A	ความจุไฟฟ้าด้านแอโนด	2.3.4
C_C	ความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด	2.3.4
C_T	ความจุไฟฟ้ารวม	2.3.4
d	ความหนาของฟิล์ม ITO	3.1.1.1
E	พลังงาน	2.1.3
E_A	ระดับผู้รับ	2.1.3
E_C	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า	2.1.3
E_D	ระดับผู้ให้	2.1.3
E_{FM}	ระดับเฟอร์มิของโลหะ	2.3.1
E_{FS}	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ	2.3.1
E_g	ช่องว่างพลังงาน	2.1.2
E_{photon}	พลังงานของโฟตอน	2.1.1
E_v	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์	2.1.3
f_c	ความถี่คัทออฟ	2.3.7
F	แรงกระทำ	4.1.2
h	ค่าคงที่ของแพลง	2.1.1
I_0	กระแสรั่วไหล	4.4.11
I_c	กระแสคอนดักเตอร์	2.3
I_d	กระแสไดโอด	2.3
I_{dark}	กระแสมืด	2.3.2
I_{mea}	กระแสรวมที่วัดได้จากวงจรที่ใช้ในการทดลอง	4.4.1.2
I_{MS}	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ	2.3.2
I_{SM}	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ	2.3.2
I_p	กระแสแสง	2.3.6
I_{photo}	กระแสแสง	2.3.3

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	หมายถึง	กล่าวถึงครั้งแรกในหัวข้อ
J	ความหนาแน่นกระแส	4.2
k	เลขคลื่น	2.1.2
k	ค่าคงที่โบสต์มันน์	4.2
L	ความยาวของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท	3.1.2
L	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM	3.1.1.1
n	ความหนาแน่นของพาหะ	4.1.2
N	จำนวนขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท	3.1.2
N_D	อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si	2.3.2
P_{in}	กำลังไฟฟ้าอินพุท	2.3.6
q	ประจุอิเล็กตรอน	2.1.1
R	ความต้านทาน	4.1.1
R	ค่าคงที่ของริชาร์ดสัน	4.2
R_c	ความต้านทานที่รอยต่อ	4.1.1
R_H	สัมประสิทธิ์ของฮอลล์	4.1.2
R_L	ความต้านทานโหลด	4.4.2
R_s	ความต้านทานในเนื้อสาร	4.1.1
S	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท	1.1
S	ความกว้างของขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM	3.1.1.1
v	ความเร็ว	4.1.2
V_A	แรงดันไบอัส	2.3.4
V_{bi}	แรงดันภายใน	2.3.2
V_{bi1}	แรงดันภายในด้านขั้วแคโทด	2.3.1
V_{bi2}	แรงดันภายในด้านขั้วแอโนด	2.3.1
V_H	แรงดันฮอลล์	4.1.2
V_1	แรงดันไบอัสขั้วแคโทด	2.3.2
V_2	แรงดันไบอัสขั้วแอโนด	2.3.2
t_f	ช่วงเวลาขาลง	2.3.7
t_r	ช่วงเวลาขาขึ้น	2.3.7

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	หมายถึง	กล่าวถึงครั้งแรกในหัวข้อ
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์	4.2
W	ความกว้างของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิเตท	3.1.2
W	ความยาวของขั้วไฟฟ้าในการวัด TLM	3.1.1.1
W_A	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอโนด	2.3.2
W_C	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด	2.3.2
W_d	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	2.3.1
W_{d1}	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด	2.3.1
W_{d2}	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอโนด	2.3.1
α	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	2.3.6
$\Re$	สภาพการตอบสนอง	2.3.6
ε_s	เปอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ	2.3.2
η	ประสิทธิภาพควอนตัม	2.3.6
η_{ext}	ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก	2.3.6
η_{int}	ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน	2.3.6
λ	ความยาวคลื่นแสง	2.1.1
λ_P	ความยาวคลื่นคัทออฟ หรือความยาวคลื่นมากสุด	4.4.2
ν	ความถี่ของแสง	2.1.1
ϕ_{bn}	ความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอน	2.3.1
μ	สภาพคล่องของพาหะ	4.1.2
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า	4.1.1