

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงลำดับขั้นตอนของการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย โดยในช่วงแรกจะทำการศึกษาถึงสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง ITO ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน เพื่อความเหมาะสมของฟิล์มบาง ITO ที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO แบบอินเทอร์ดิเจิต ตามที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 3 จากนั้นนำเสนอผลการทดลองการวัดสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ในลักษณะของรอยสัมผัสสี่ขั้วต่อคัลล์, ความจุไฟฟ้า, ผลกระทบของลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพตอบสนองทางแสง และผลตอบสนองทางความถี่ที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสงที่ได้มีการออกแบบไว้ เพื่อเป็นการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้

4.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ITO

ในงานวิจัยนี้ลักษณะของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิดเอ็น ซึ่ง ITO นั้นทั่วไปมีสมบัติเป็นวัสดุตัวนำที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีใกล้เคียงกับโลหะ อีกทั้งมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น คือ มีลักษณะโปร่งใส จนในบางครั้งจึงเรียก ITO ว่าเป็นโลหะโปร่งใส ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงเป็นการศึกษาสมบัติเฉพาะตัวต่าง ๆ ของ ITO เพื่อหาความเหมาะสมของฟิล์มบาง ITO ที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

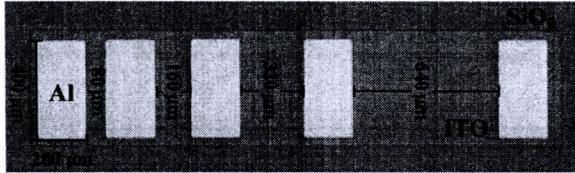
4.1.1 สภาพต้านทานของ ITO ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยลวดลายที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทาน เป็นลวดลายแบบ TLM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะอลูมิเนียม เพื่อสร้างให้เกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มิกโดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้า ($S \times W$) เท่ากับ $200 \times 400 \mu\text{m}$ และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (L) ต่างๆ กันคือ 80, 160, 320 และ $640 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) ความหนา (d) ของฟิล์ม ITO นั้นจะถูกกำหนดด้วยเวลาในการสปัตเตอร์ คือ 15, 30, 45, และ 60 นาที โดยสามารถหาความหนาของชั้นฟิล์มที่เวลาในการสปัตเตอร์ต่าง ๆ นี้ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีความหนาของฟิล์มประมาณ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ [4.1]

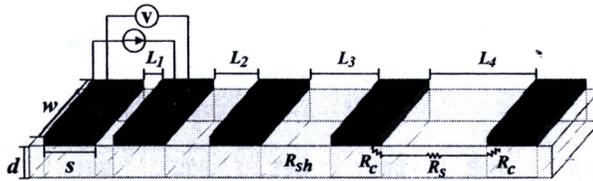
ในการทดลองได้นำชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาทำการทดสอบ เพื่อหาค่าสภาพต้านทาน ด้วยการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1 (ข) ซึ่งในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ด้วย

วิธี TLM ในการทดลองนี้จะใช้ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ และระบบวัดความต่างศักย์ (source meter) ของบริษัท Keithley รุ่น 2400 โดยจ่ายกระแสค่าคงที่เท่ากับ 10 mA

จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ นำมาคำนวณหาความต้านทาน จากนั้นนำค่าความต้านทานที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ ρ/dW ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนชั้นฟิล์ม ITO ที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทาน โดย (ก) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอน ไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัดด้วยวิธี TLM และตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

จากรูปที่ 4.1 (ข) จะได้ว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ [4.2-4.5]

$$R = 2R_c + R_s \quad (4.1)$$

โดยความต้านทานในเนื้อสาร R_s มีค่าเท่ากับ

$$R_s = \frac{\rho}{(d)(W)} L \quad (4.2)$$

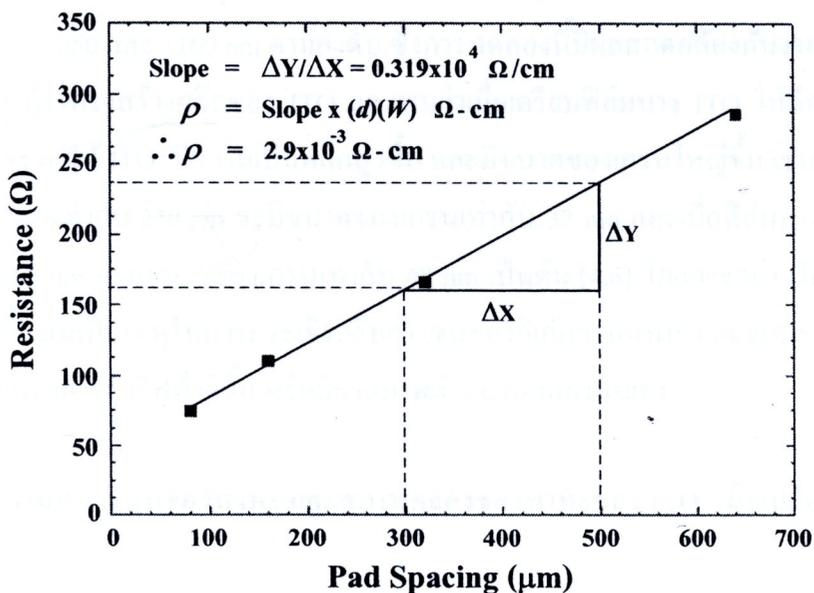
แทนสมการที่ 4.2 ลงในสมการที่ 4.1

จะได้ R อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นที่มีความชันเท่ากับ ρ/dW ดังสมการที่ 4.3

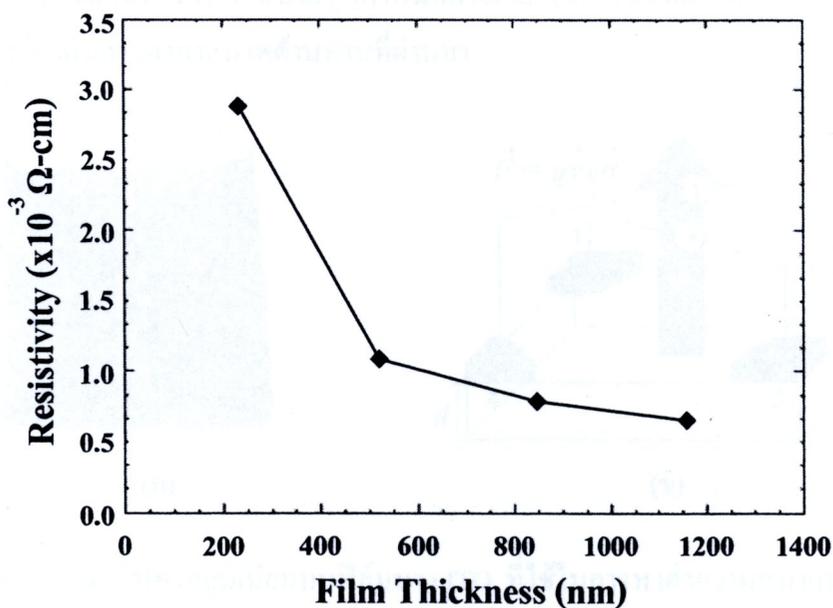
$$R = 2R_c + \frac{\rho}{(d)(W)} L \quad (4.3)$$

โดยที่ R_c คือ ความต้านทานที่รอยสัมผัส

- R_s คือ ความต้านทานในชั้นฟิล์ม ITO
 d คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม ITO
 W คือ ความกว้างของขั้วไฟฟ้า
 L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาค่าสภาพต้านทานโดยใช้เทคนิคของ TLM



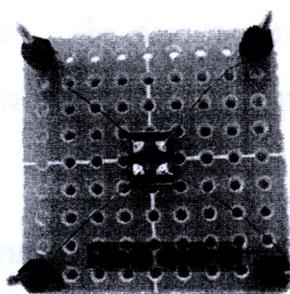
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานกับความหนาของฟิล์ม ITO



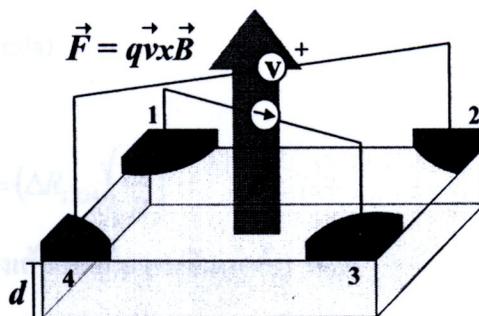
จากการพล็อตกราฟความต้านทานในรูปที่ 4.2 เพื่อหาค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง ITO ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสภาพต้านทานจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 230 nm เป็น 500 nm และมีการเปลี่ยนแปลงลดน้อยลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 500 nm เป็นต้นไป โดยมีค่าเท่ากับ 2.9×10^{-3} , 1.1×10^{-3} , 0.8×10^{-3} และ $0.6 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ ซึ่งการทดลองนี้มีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ที่ทำการศึกษาดังโครงสร้างผลึกของ ITO และพบว่าเมื่อเตรียมฟิล์มบาง ITO ให้มีความหนาของฟิล์มมากขึ้นจะทำให้ ITO มีความเป็นผลึกสูงขึ้น และมีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น เช่น เมื่อฟิล์มบาง ITO มีความหนาเท่ากับ 230 nm จะมีขนาดของเกรนเท่ากับ 32 nm และเมื่อฟิล์มบาง ITO มีความหนาเท่ากับ 500 nm จะมีขนาดของเกรนเท่ากับ 48 nm เป็นต้น [4.6] โดยอาจกล่าวได้ว่าขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นนั้นเป็นเหตุให้การกระเจิงหรือการชนของอิเล็กตรอนที่บริเวณขอบของเกรนลดลง จึงส่งผลให้สภาพการนำไฟฟ้าดีขึ้น หรือมีค่าสภาพต้านทานลดลงนั่นเอง

4.1.2 ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของ ITO เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

การหาความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพคล่องของพาหะในการทดลองนี้จะใช้การวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ การออกแบบทดลองที่ใช้ในการวัดนั้นได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยมีลักษณะของทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) คือ มีรัศมีของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมเท่ากับ 1 mm โดยความหนา (d) ของฟิล์มบาง ITO นั้นจะถูกกำหนดด้วยเวลาในการสปัตเตอร์คือ 15, 30, 45, และ 60 นาที เช่นเดียวกับการหาค่าสภาพต้านทานที่ผ่านมา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 ลักษณะขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมบนฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดย (ก) แสดงขั้วโลหะอลูมิเนียมของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อดัวยกาวเงิน และ (ข) แผนภาพแสดงลักษณะการวัด

นำชิ้นงานที่สร้างขึ้น มาทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่าง ๆ ก่อนและหลังให้สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับชิ้นงานดังในรูปที่ 4.4 (ข) โดยใช้ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ และระบบวัดความต่างศักย์ของบริษัท Keithley รุ่น 2400 และเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กของบริษัท Ohsumi Electric manufacture

จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ นำมาหาความต้านทาน ดังแสดงในสมการที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 นำค่าความต้านทานที่ได้ ($R_{13} - R_{24} = \Delta R_{1324}$) คูณกับความหนาของฟิล์ม จากนั้นทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (d) (ΔR_{1324}) กับค่าสนามแม่เหล็ก (B) ตามสมการเชิงเส้นที่ 4.9 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ R_H แทนค่า R_H ลงในสมการที่ 4.10 และ 4.11 เพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ตามลำดับ [4.2, 4.7]

ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก
$$R_{1324} = \frac{V_{24}}{I_{13}} \quad (4.4)$$

ขณะมีสนามแม่เหล็ก
$$R'_{1324} = \frac{V'_{24}}{I_{13}} \quad (4.5)$$

เมื่อ
$$V'_{24} = V_H + V_{24}$$

นำสมการที่ 4.5 ลบด้วยสมการที่ 4.4 จะได้

$$\Delta R_{1324} = R'_{1324} - R_{1324} = \frac{V'_{24} - V_{24}}{I_{13}} = \frac{V_H}{I_{13}} \quad (4.6)$$

จากสมการ
$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (4.7)$$

โดยที่ V_H คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage)

R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

B คือ ค่าสนามแม่เหล็ก (หน่วย: Tesla)

แทนสมการที่ 4.6 ลงสมการที่ 4.7 จะได้

$$R_H = (\Delta R_{1324}) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (4.8)$$

จัดรูปให้สมการที่ 4.9 อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น โดยมีความชันเท่ากับ R_H

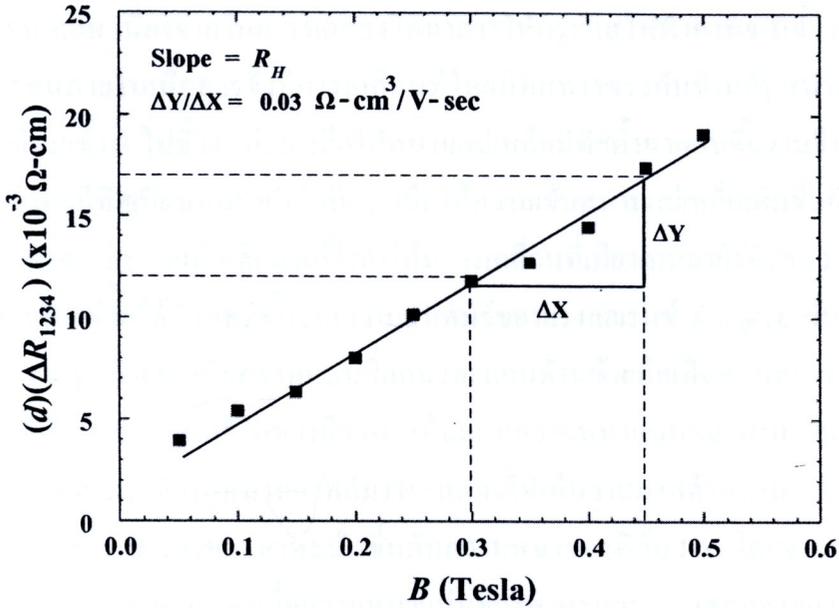
$$(d)(\Delta R_{1324}) = R_H B \quad (4.9)$$

ความหนาแน่นของพาหะสามารถหาได้จาก (เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน)

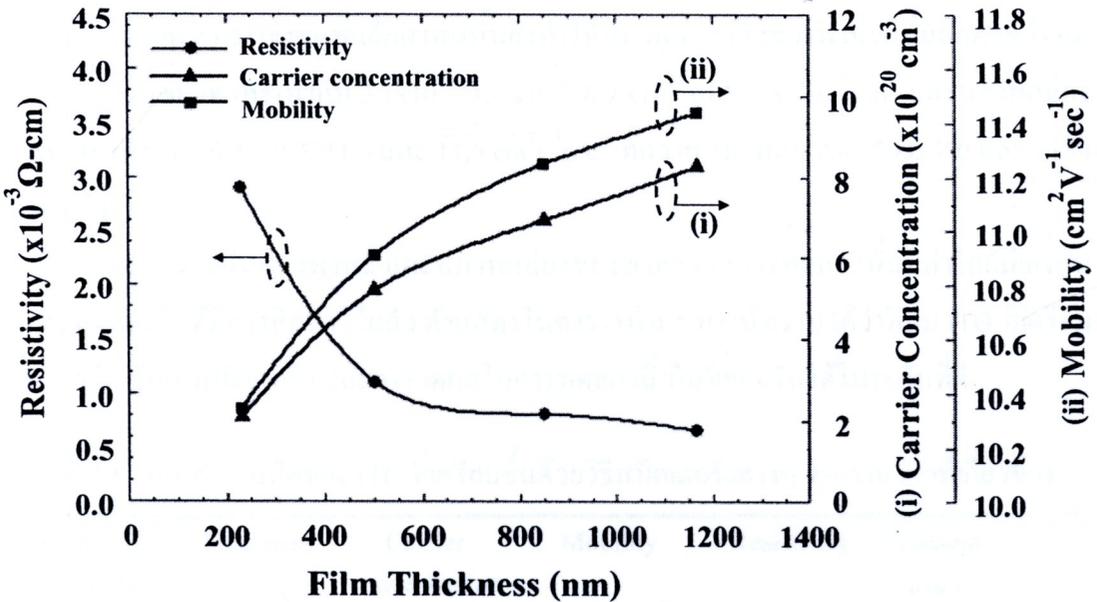
$$n = \frac{1}{R_H q} \quad (4.10)$$

สภาพคล่องของพาหะสามารถหาได้จาก (สภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากการทดลองที่ผ่านมา) นั่นคือ

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1234})$ กับค่าสนามแม่เหล็กที่ความหนาของฟิล์ม ITO เท่ากับ 230 nm เพื่อหาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทาน, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะกับความหนาของฟิล์ม ITO

จากตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(d)(\Delta R_{1234})$ กับสนามแม่เหล็กในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม หมายถึงค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก จากการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์นี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ITO ที่สร้างขึ้นในการทดลองนี้มีประจุพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน หรือเป็นสารกึ่ง

ตัวนำ ชนิดอื่น เนื่องจากการทดลองได้ทำการให้กระแสไฟฟ้าคงที่จากขั้ว 1 ไปยังขั้ว 3 ดังนั้น อิเล็กตรอนภายในเนื้อสารจึงมีการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้า คือมีการเคลื่อนที่จากขั้ว 3 ไปขั้ว 1 ต่อมาเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับชิ้นงานจึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยมีทิศเบี่ยงเบนมายังขั้วที่ 2 เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนก็จะถูกแรงกระทำของสนามแม่เหล็กมากขึ้นทำให้มีการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมายังขั้วที่ 2 มากยิ่งขึ้น จึงทำให้ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงลอเรนซ์ $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ นั่นเอง

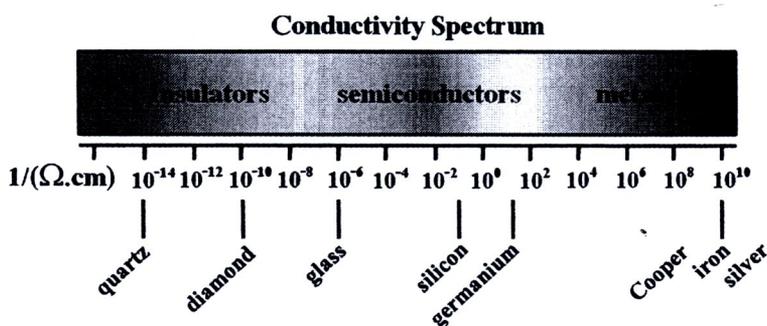
จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแบบสี่แกน โดยแกนด้านซ้ายมือเป็นแกนสภาพต้านทานจากการทดลองที่ 4.1.1 ส่วนแกนด้านขวามือ (i) เป็นแกนความหนาแน่นของพาหะ และ (ii) แกนสภาพคล่องของพาหะกับความหนาของฟิล์ม ITO แสดงให้เห็นว่าสภาพต้านทาน, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะนั้นขึ้นกับความหนาของฟิล์ม ITO โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าสภาพต้านทานจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของพาหะและ สภาพคล่องของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกันกล่าวคือ เมื่อ ITO มีความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้นจึงทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นหรือมีสภาพต้านทานมีค่าลดต่ำลง สภาพต้านทานที่ลดลงนั้นเกิดเนื่องจากขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นส่งผลทำให้การกระเจิงหรือการชนของอิเล็กตรอนที่บริเวณขอบของเกรนลดลง ซึ่งการลดการกระเจิงของอิเล็กตรอนนั้นยังทำให้สภาพคล่องตัวของพาหะดีขึ้นอีกด้วย โดยมี ความหนาแน่นของพาหะเท่ากับ 2.1×10^{20} , 4.2×10^{20} , 6.9×10^{20} และ $8.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และสภาพคล่องของพาหะ เท่ากับ 10.3, 10.9, 11.3 และ 11.5 $\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ ที่ความหนาฟิล์ม 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ

ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะจากการทดลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลองที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ทำให้ทราบได้ว่าฟิล์ม ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง และการวัดผลในการทดลองนี้เป็นที่ยอมรับได้ในระดับที่ดี

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีสปีดเตอริงต่างๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Deposition Technique	Thickness (nm)	Carrier concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	Transmittance (%)	Ref.
r.f. sputtering	750	6.0×10^{20}	34.7	3.0×10^{-4}	90	[4.8]
r.f. sputtering	500	1.2×10^{21}	13.0	4.0×10^{-4}	95	[4.9]
magnetron sputtering	80	6.0×10^{20}	26.0	4.0×10^{-4}	85	[4.10]
ion beam sputtering	60	2.0×10^{20}	26.0	1.2×10^{-3}	-	[4.11]
d.c. sputtering	100	9.0×10^{20}	34.7	2.0×10^{-4}	85	[4.12]

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการนำ ITO ไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการนำไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้ด้วย โดยสามารถหาสภาพนำไฟฟ้าของ ITO ได้จากส่วนกลับของค่าสภาพต้านทาน ($1/\rho$) จากการทดลองที่ 4.1.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.35×10^3 , 0.91×10^3 , 1.3×10^3 และ 1.5×10^3 ($\Omega\text{-cm}$)⁻¹ ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ITO มีสภาพนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง อาจจัดได้ว่าอยู่ในช่วงต้น หรือเริ่มจะมีสภาพนำไฟฟ้าเข้าใกล้การนำไฟฟ้าของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 สามารถกล่าวได้ว่า ITO ที่สร้างขึ้นในการทดลองนี้สามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแทนโลหะได้จริง



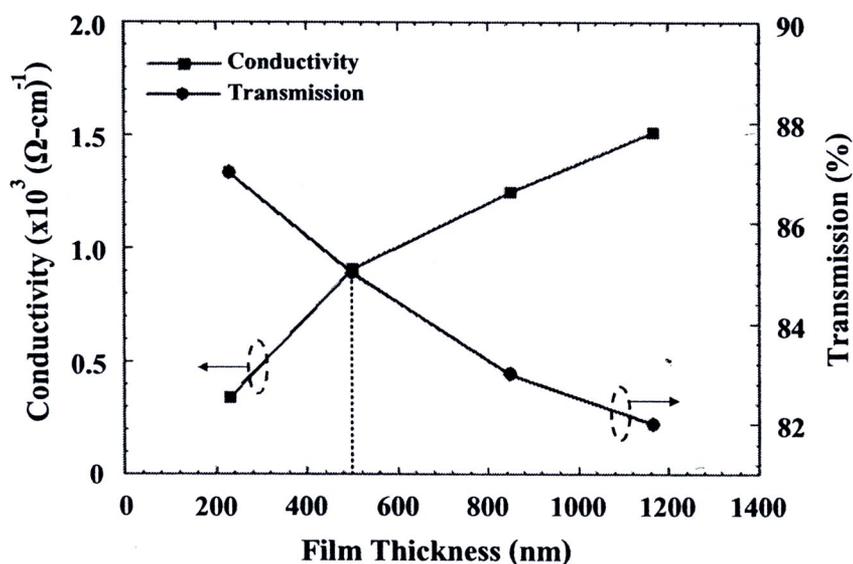
รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะ, สารกึ่งตัวนำ และฉนวน

หลังจากทำการศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานของฟิล์มบาง ITO แล้ว และพบว่า ITO ที่ทำการเตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริงที่เวลาต่าง ๆ นั้นสามารถที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงได้ เนื่องจากมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และมีค่าความหนาแน่นพาหะใกล้เคียงกับโลหะแล้ว [4.13] แต่ก็ยังคงมีอีกหนึ่งปัจจัยที่จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกเงื่อนไขที่จะใช้ในการสปัตเตอริง ITO เพื่อนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส คือ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (%T) ซึ่งมีค่าที่แปรผกผันกับการนำไฟฟ้า และความหนาของฟิล์ม กล่าวคือ เมื่อเวลาในการสปัตเตอริงเพิ่มขึ้น จะทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 87%, 85%, 83% และ 82% ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 230, 500, 850 และ 1160 nm ตามลำดับ [4.6] ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการเลือกความหนาของ ITO ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูง เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณแสงที่จะตกกระทบลงบนซิลิคอนให้มากขึ้น โดยคาดว่าจะสามารถเพิ่มกระแสแสงแก่ตัวตรวจวัดแสงได้

เพื่อเป็นการหาความหนาของฟิล์ม ITO ที่มีสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่เหมาะสมที่สุด จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความหนาของฟิล์ม ITO ดังแสดงในรูปที่ 4.8

จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ความหนาฟิล์มประมาณ 500 nm นั้น มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส เนื่องจากมีทั้งสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูง อีกทั้งความหนาของฟิล์มยังมีค่าใกล้เคียงกับความหนาของชั้นโลหะในกระบวนการสร้างตัว

ตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ผ่านมา [4.14-4.17] ดังนั้นในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในงานวิจัยนี้ จะทำการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริงที่เวลา 30 นาที เพื่อให้มีความหนาของฟิล์ม ITO ประมาณ 500 nm สภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $1.1 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ความหนาแน่นของพาหะเท่ากับ $4.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ สภาพคล่องของพาหะเท่ากับ $10.9 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ และ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเท่ากับ 85% ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความหนาฟิล์ม ITO

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง

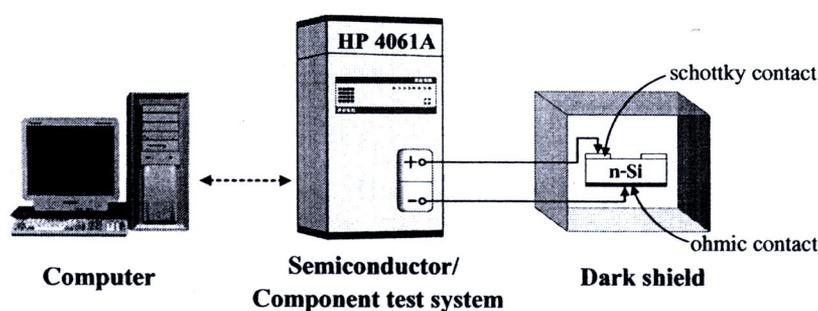
Thickness (nm)	Carrier concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	Transmittance (%) [4.6]
230	2.2×10^{20}	10.3	2.9×10^{-3}	87
500	4.2×10^{20}	10.9	1.1×10^{-3}	85
850	6.9×10^{20}	11.3	0.8×10^{-3}	83
1160	8.3×10^{20}	11.5	0.6×10^{-3}	82

ในการทดลองที่ 4.1.1 และ 4.1.2 ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์ม ITO ลงบนฐานรองที่เป็นกระจก เพื่อเป็นการประหยัด และสะดวกในการทดลอง โดยหลังจากที่ได้เงื่อนไขความหนาฟิล์มที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการทดลองอีกครั้ง โดยสร้างลวดลายรวมอยู่ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 กล่าวคือ สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 4,000 Å พบว่าผลต่าง ๆ ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

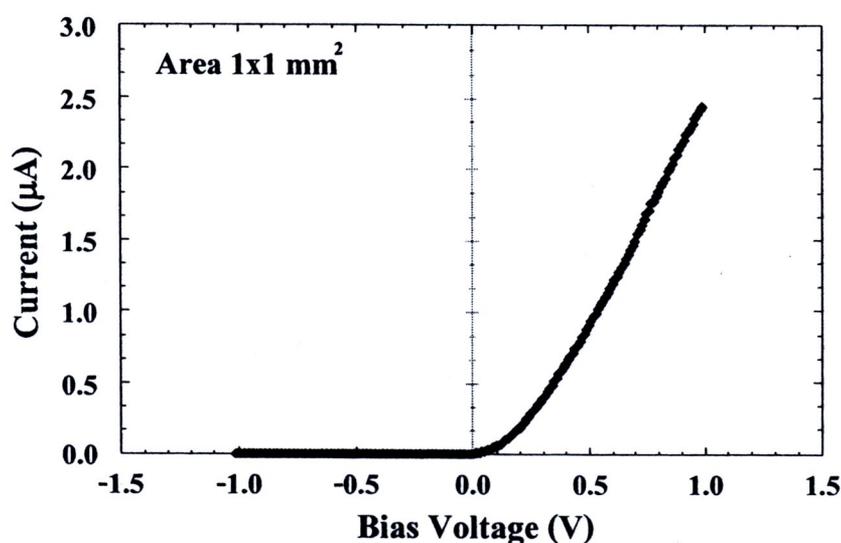
4.2 การทดสอบสมบัติของรอยสัมผัส肖ตต์กี

จากการทดลองที่ผ่านมาได้ทำการหาความหนาของฟิล์ม ITO ที่เหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM แล้ว ในการทดลองนี้จึงเป็นการกล่าวถึงตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ MSM ที่สร้างขึ้น และเนื่องจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM นั้นประกอบไปด้วยรอยสัมผัส肖ตต์กี 2 รอยสัมผัสด้วยกัน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัส肖ตต์กีที่สำคัญ ได้แก่ แรงดันภายใน (V_{bi}) และความสูงกำแพงศักย์肖ตต์กี (ϕ_{bn})

รอยสัมผัส肖ตต์กีระหว่าง ITO และ ซิลิคอนชนิดเอ็น ในการทดลองนี้มีลักษณะของลวดลายเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดของพื้นที่ (A) เท่ากับ 1 mm^2 ซึ่งการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตต์กี โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ของบริษัท Agilent ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ร่วมกับการคำนวณจะทำให้สามารถทราบถึงแรงดันภายในและความสูงกำแพงศักย์肖ตต์กีได้ ซึ่งลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตต์กีจะแสดงในรูปที่ 4.10

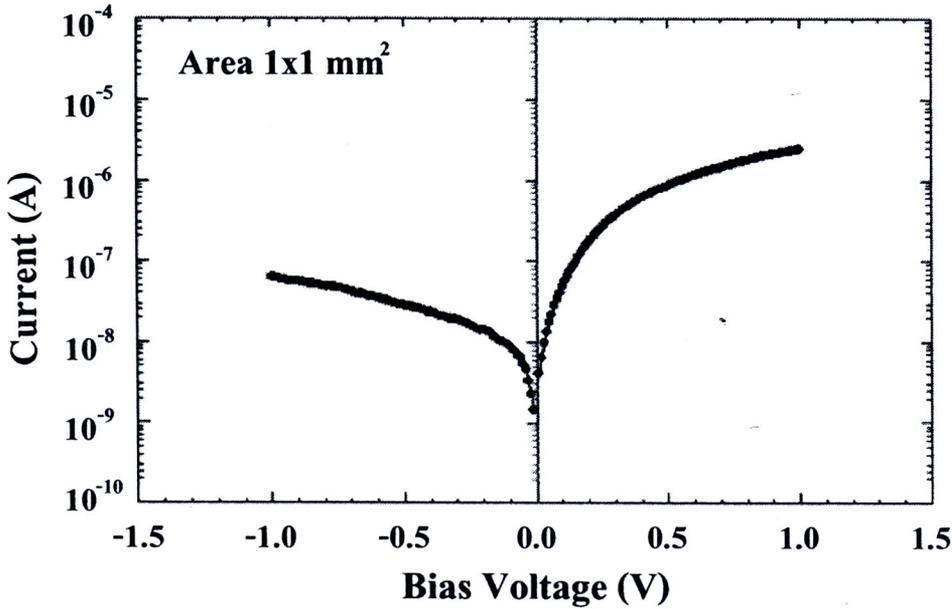


รูปที่ 4.9 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของรอยสัมผัส肖ตต์กี



รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอน ชนิดเอ็น

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าลักษณะของความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบเรกติไฟร์ หรืออาจกล่าวได้ว่ารอยสัมผัสที่เกิดขึ้นนั้นเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคติ๊กกี้นั่นเอง ซึ่งสามารถหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคติ๊กกี้นี้ได้ โดยพบว่ารอยสัมผัสช็อคติ๊กกี้นี้มีแรงดันภายในประมาณ 0.34 V ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคติ๊กกี้นี้ทั่วไปที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.2-0.4 V [4.18]



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแบบกึ่งลึอกกับแรงดัน ไบอัส เพื่อหากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

สำหรับค่าแกงศักย์ช็อคติ๊กกี้นี้สามารถหาได้ด้วยเทคนิคกระแส-แรงดันเช่นกัน [4.19] โดยการนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (แกนตั้ง) ในแบบกึ่งลึอกกับแรงดัน ไบอัส (แกนนอน) ในลักษณะเชิงเส้น ดังรูปที่ 4.11 จากนั้นทำการประมาณค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (J_0) หรือ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสที่มีขนาดพื้นที่ 1 mm^2 ที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ จากจุดตัดแกนแรงดันเท่ากับศูนย์ โวลต์ของกราฟด้าน ไบอัสตรง โดยจะได้กระแสรั่วไหลมีค่าเท่ากับ $1 \times 10^{-8} \text{ A}$ และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 จะสามารถหาค่าแกงศักย์ช็อคติ๊กกี้นี้ได้

เมื่อ $J_0 = I_0/A$ ความหนาแน่นกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$J = J_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (4.12)$$

เมื่อ $V_A = 0 \text{ V}$ เป็นผลให้ J มีค่าเท่ากับ J_0

โดย J_0 คือ ความหนาแน่นกระแสย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

$$J_0 = RT^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (4.13)$$

ดังนั้น ความสูงกำแพงศักย์ช็อคต์ก็ย์จึงสามารถหาได้จาก

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{RT^2}{J_0}\right) \quad (4.14)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

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

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ 4.14 ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อคต์ก็ย์ของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิดเอ็น โดยมีค่าเท่ากับ 0.76 V ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี และงานวิจัยอื่น ๆ [4.18, 4.20] โดยงานวิจัยนี้ในหัวข้อการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงด้วยสัญญาณแสงกระแสดตรง และกระแสกลับจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิตัล ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาสมบัติของรอยสัมผัสช็อคต์ก็ย์ระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีขนาดพื้นที่รอยสัมผัสเท่ากับ 1 mm^2 และซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาทีด้วยเช่นกัน โดยพบว่ารอยสัมผัสช็อคต์ก็ย์ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนนั้นมีค่าแรงดันภายในประมาณ 0.38 V และค่ากำแพงศักย์ช็อคต์ก็ย์เท่ากับ 0.72 V ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี และผลการทดลองที่มีมาก่อนหน้านี้ [4.14-4.17]

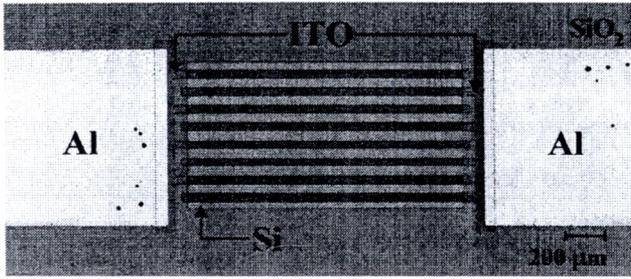
4.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล หลังจากทำการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำมาตัดแยกชิ้นงาน และเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน เพื่อใช้ในการวัดผลการทดลองด้วยเครื่องมือวัด หรือ อุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

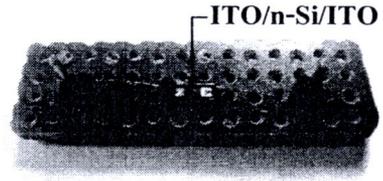
การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในการทดลองนี้ จะทำการต่อวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยใช้เครื่องมือวัด HP 4284A ของบริษัท Agilent และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นจึงได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังรูปที่ 4.15 โดยที่ตัว



ตรวจวัดแสงมีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 40 μm , ขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความยาวขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว

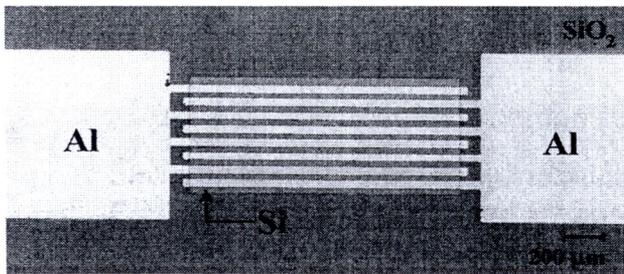


(ก)

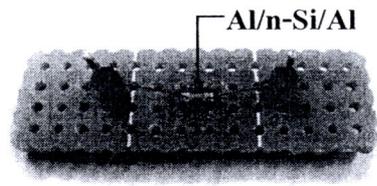


(ข)

รูปที่ 4.12 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล 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) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อดัวยกาวเงิน

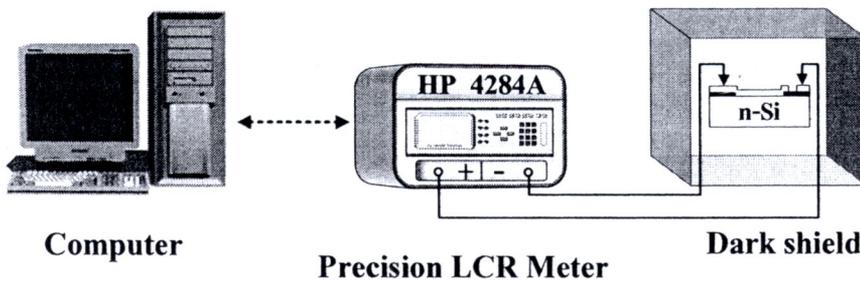


(ก)

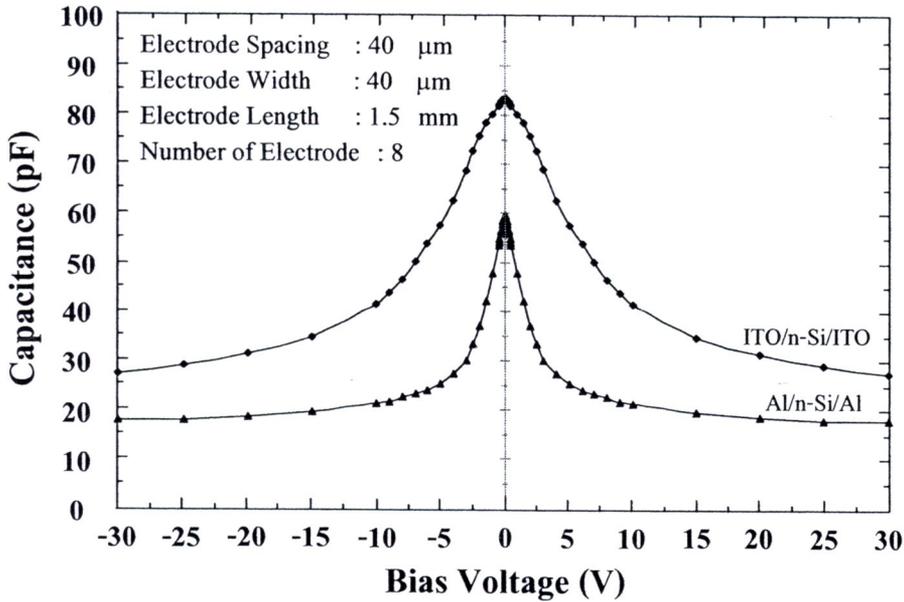


(ข)

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



รูปที่ 4.14 แผนภาพการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM



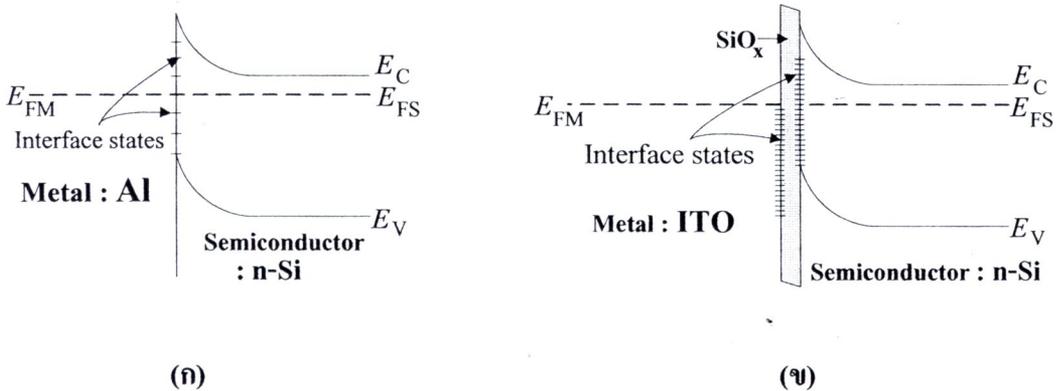
รูปที่ 4.15 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่สร้างขึ้นนั้นมีความสมมาตรกัน และมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัสตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.15 กล่าวคือ เมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มี ค่าประมาณ 40 pF และ 21 pF ตามลำดับ โดยตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO นั้นมีความจุไฟฟ้าสูงกว่า ตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ทั้งที่ตัวตรวจวัดแสงทั้งสองมีขนาดพื้นที่ (A) เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ดังเช่น การเกิดขึ้นออกไซด์บางๆ (interface oxide: SiO_x) ที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน เนื่องจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอน และออกซิเจนส่วนเกิน (excess oxygen) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเคลือบฟิล์ม ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง [4.21-4.23] หรือ เกิดขึ้นเนื่องจากผลการกระจายของสถานะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอน (interface state) มีปริมาณมาก [4.21, 4.22] เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของแถบพลังงานระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิดอื่น ได้ดังรูปที่ 4.16

$$C = \frac{A \epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (4.15)$$

โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

- q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C)
 N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
 V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำ
 V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ
 W คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ



รูปที่ 4.16 แถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดตัวนำในภาวะสมดุลความร้อน โดย (ก) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอน ชนิดเอ็น และ (ข) แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิดเอ็น

4.4 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสง กระแสตรง

การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงด้วยสัญญาณแสงกระแสตรงนี้ ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

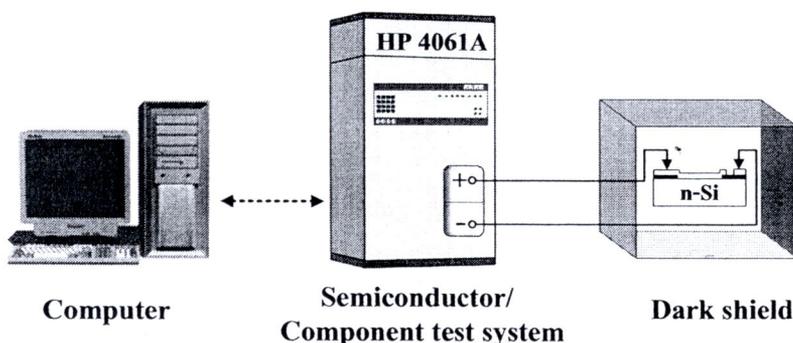
4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเทอร์ ดิจิตัล [4.24]

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ทั้งขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง เพื่อเป็นการหาค่ากระแสมืด และกระแสแสง โดยมีการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S), ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W), จำนวนขั้วไฟฟ้า (N) และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน และมีขนาด, ระยะห่าง และจำนวนของขั้วไฟฟ้าเท่ากัน

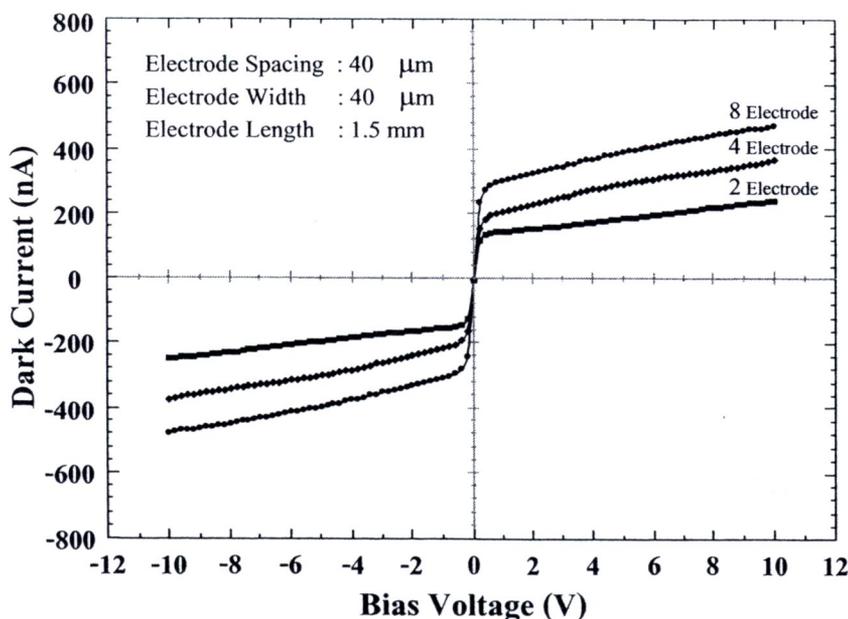
4.4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสง

การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ เพื่อหาค่ากระแสมืด (I_{dark}) ของตัวตรวจวัดแสงนั้น จะทำการต่อวงจรเพื่อใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ของบริษัท Agilent

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่ากระแสมืดมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส โดยมีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัสชนิดขั้วลบของตัวตรวจวัดแสงทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้น จึงส่งผลให้กระแสมืดที่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.17 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ



รูปที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงนั้น มีผลทำให้กระแสมีดเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับการเพิ่มแรงดันไบอัส คือกระแสมีดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีจำนวนขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้า 2, 4 และ 8 ขั้ว จะมีกระแสมีดเท่ากับ 180 nA, 290 nA, และ 380 nA ตามลำดับ ทั้งนี้การที่กระแสมีดเปลี่ยนแปลงตามจำนวนของขั้วไฟฟ้านั้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพื้นที่ของรอยสัมผัสขั้วต่อขั้ว ซึ่งจากสมการที่ 4.16 กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสขั้วต่อขั้วจะแปรผันตรงกับขนาดของพื้นที่รอยสัมผัส

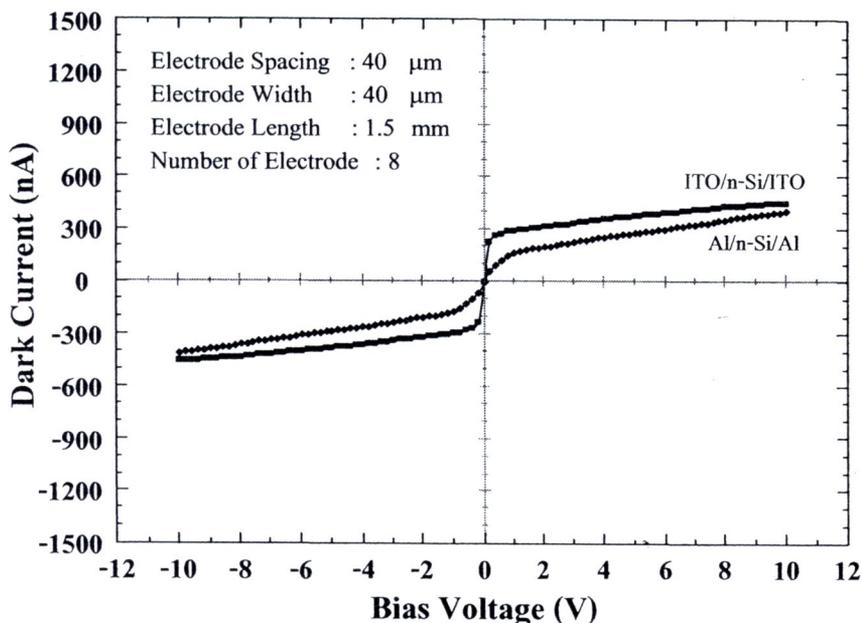
$$I_0 = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (4.16)$$

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

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล และขนาดของพื้นที่ของรอยสัมผัสจึงคาดได้ว่าการเพิ่มขนาดพื้นที่รอยสัมผัสด้วยการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้า, จำนวนขั้วไฟฟ้า และความยาวของขั้วไฟฟ้าจะทำให้มีค่ากระแสมีดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง ดังรูปที่ 4.19 โดยที่ตัวตรวจวัดแสงมีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ $40 \mu\text{m}$, ขนาดขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40 \mu\text{m}$, ความยาวขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้วตามลำดับ พบว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al นั้นมีกระแสมีดต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO โดยที่แรงดันไบอัส 5 V มีค่ากระแสมีดของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เท่ากับ 290 nA ส่วนของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าเท่ากับ 380 nA ซึ่งการที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al มีกระแสมีดต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ทั้งที่มีกำแพงศักย์ขั้วต่อขั้วต่ำกว่า อาจมีสาเหตุมาจากที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ได้ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ แล้ว ซึ่งกระบวนการซินเตอร์นี้ทำให้รอยสัมผัสขั้วต่อขั้วระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนชนิดเอ็นมีความสมบูรณ์มากขึ้น อีกทั้งช่วยลดผลของสถานะพื้นผิวอีกด้วย เป็นผลให้กระแสมีดมีค่าต่ำกว่า [4.25] ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการดังกล่าว จึงยังคงมีผลของ

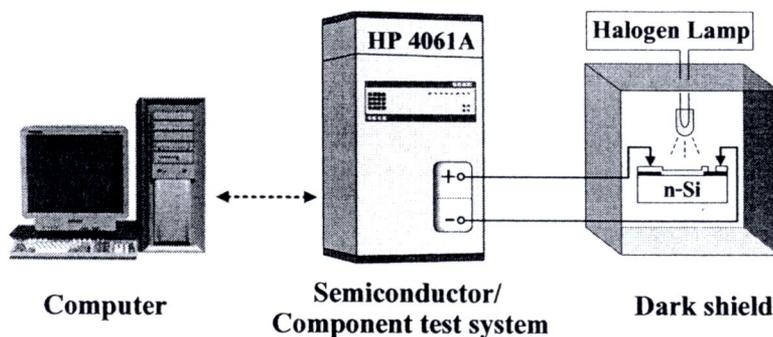
สถานะพื้นผิว ที่เกิดจากการไม่เข้ากันของ โครงสร้างผลึกระหว่างซิลิคอนชนิดเอ็น และ ITO จึงเป็น ผลให้มีกระแสมืดสูงกว่ำนั่นเอง [4.21]



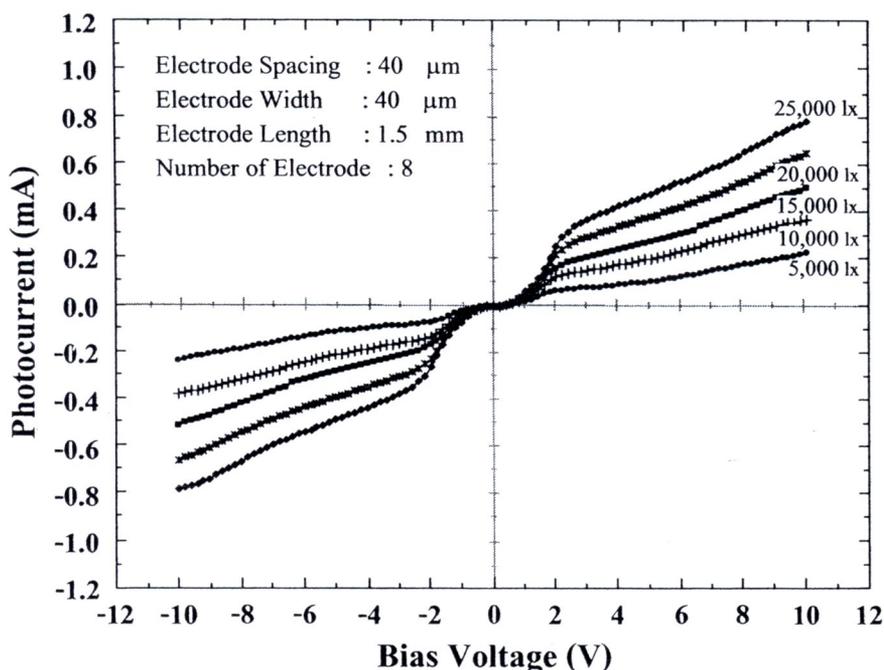
รูปที่ 4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสง

4.4.1.2 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเพื่อหาค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ และตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของกระแสแสงกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไป จะทำการต่อวงจร โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ของบริษัท Stocker & Yale รุ่น 20 Series ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM



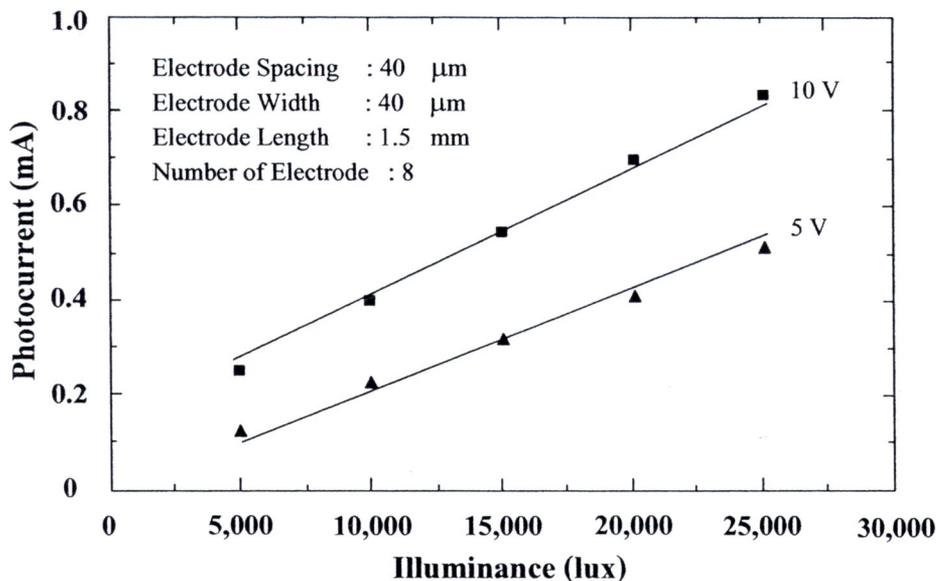
รูปที่ 4.21 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในช่วง 5,000-25,000 lux

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงค่าต่าง ๆ โดยที่กระแสแสง (I_{photo}) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.17 คือ

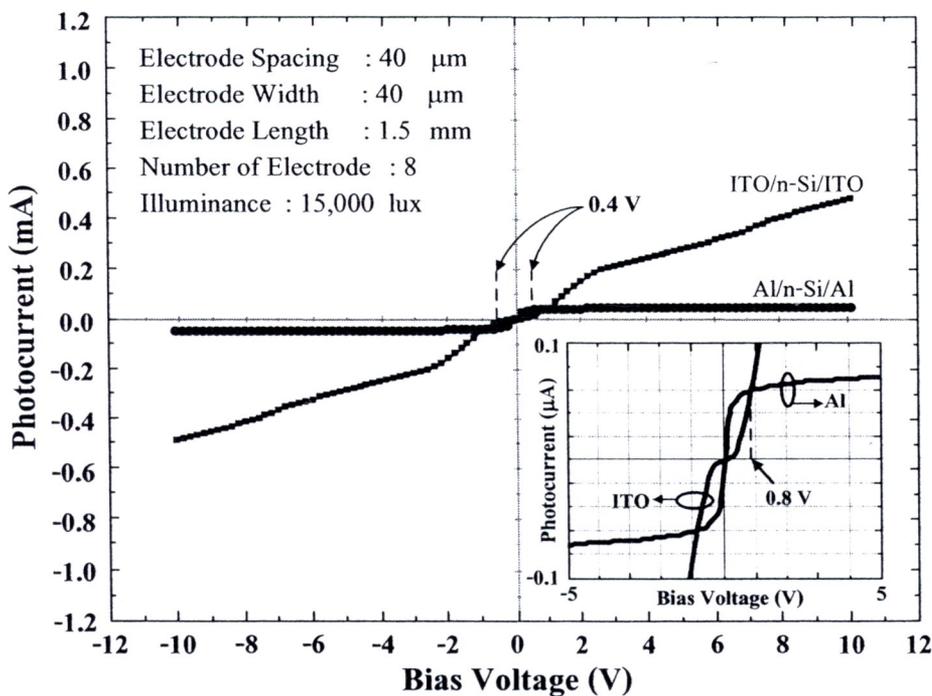
$$I_{\text{photo}} = I_{\text{mea}} - I_{\text{dark}} \quad (4.17)$$

โดยที่ I_{mea} คือ กระแสรวมที่วัดได้จากวงจรที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นสามารถตอบสนองต่อแสง กระแสตรงได้เป็นอย่างดี โดยกระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น ดังความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงได้ในรูปที่ 4.22 ซึ่งที่แรงดันไบอัส 5 V จะมีกระแสแสงที่ความเข้มแสง 5000, 10000, 15000, 20000 และ 25000 lux ประมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 mA ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ค่อนข้างสูง ($I_{\text{photo}}/I_{\text{dark}}$) กล่าวคือ ที่ความเข้มแสง 25,000 lux ให้แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V จะมีอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดประมาณ 1,400 และ 1,900 เท่า ตามลำดับ ซึ่งจากลักษณะสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสงได้ดี แม้ความเข้มแสงที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าน้อยก็ตาม



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความเข้มแสงที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V



รูปที่ 4.23 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

เมื่อเปรียบเทียบกระแสแสงที่ได้จากตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ก่อนข้างมาก โดยที่แรงดันไบอัส 5-10 V ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO จะให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ประมาณ 6-10 เท่า แต่จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-

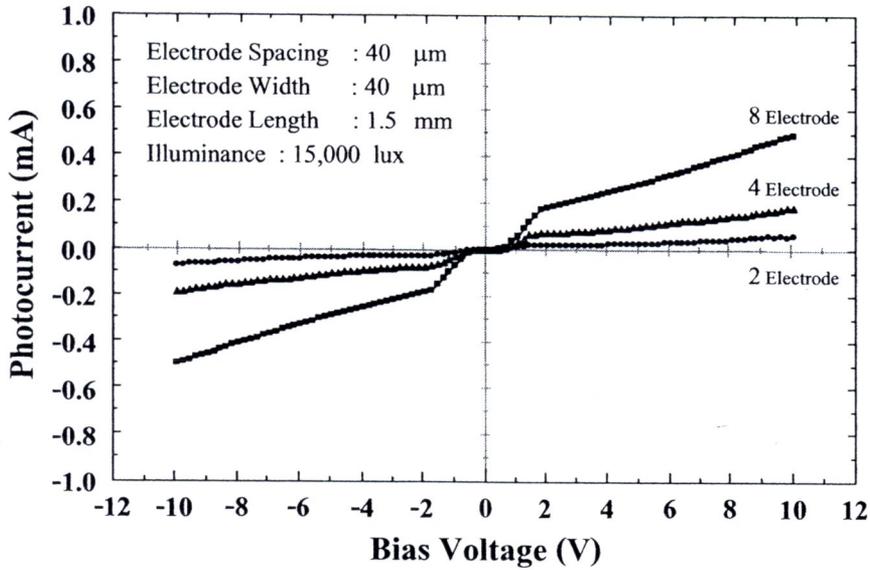
แรงดันในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัสประมาณ 0-0.4 V กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO จะมีค่าต่ำมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสง แรงดันไบอัสจะไปตกคร่อมที่บริเวณชั้นของออกไซด์บาง ๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และ ซิลิคอนตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.13 มากกว่าที่บริเวณปลอดพาหะ เนื่องจากค่าความต้านทานในชั้นออกไซด์มีค่าสูง [4.21, 4.26-4.28] ดังนั้นในช่วงแรงดันไบอัสต่ำ แรงดันไบอัสจึงมีผลต่อบริเวณปลอดพาหะค่อนข้างน้อย ทำให้ยังคงมีพื้นที่ที่เกิดกระแสแสงน้อย กระแสแสงจึงมีค่าต่ำ ต่อมาเมื่อให้แรงดันไบอัสสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่ามากพอที่จะส่งผลต่อบริเวณปลอดพาหะได้ ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างขึ้นตามแรงดันไบอัส ดังนั้นกระแสแสงที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันจะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัส 0-0.8 V กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าน้อยกว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO นั้น ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานที่แรงดันไบอัสค่าต่ำ ๆ หรือที่แรงดันไบอัสต่ำกว่า 0.8 V

4.4.1.3 ผลของจำนวนขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง ตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 ขั้วจะให้กระแสแสงต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าให้มากขึ้นเป็น 4 และ 8 ขั้วกระแสแสงจะเพิ่มสูงมากขึ้นเป็นจำนวนเท่า โดยที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้า 2, 4 และ 8 ขั้ว จะให้ค่ากระแสแสงเท่ากับ 0.045, 0.1 และ 0.2 mA ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าเป็น 2 เท่าจะทำกระแสแสงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนขั้วไฟฟ้าทำให้บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นบริเวณด้านใต้ และด้านข้างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่ามากขึ้นนั่นเอง โดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ต่างก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [4.16]

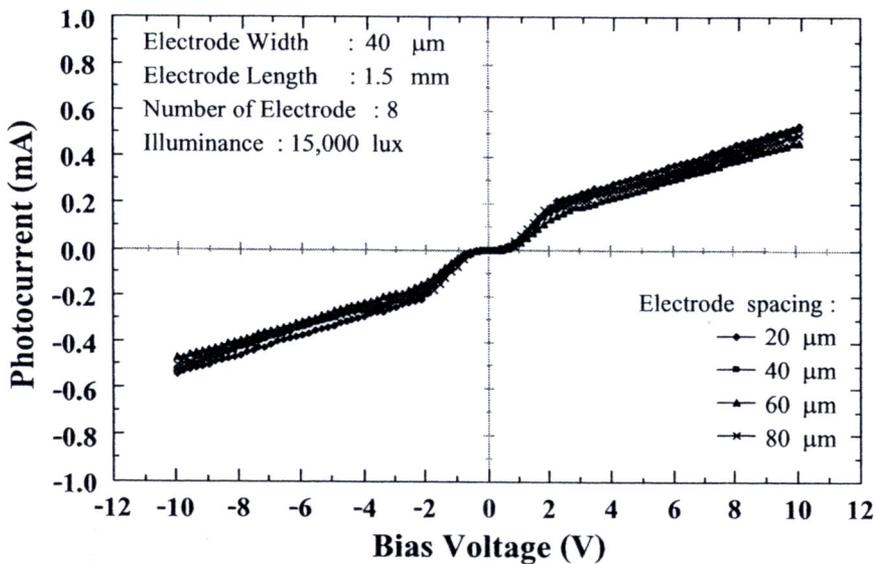
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสงมีจำนวนขั้วไฟฟ้ามากที่สุด โดยคำนึงถึงอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืด และข้อจำกัดของแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ขนาดโฟกัสของแสงที่ตกกระทบจะต้องครอบคลุมบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งหมด เพื่อให้ข้อมูลที่ได้อาจจากการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์ผลได้อย่างถูกต้อง



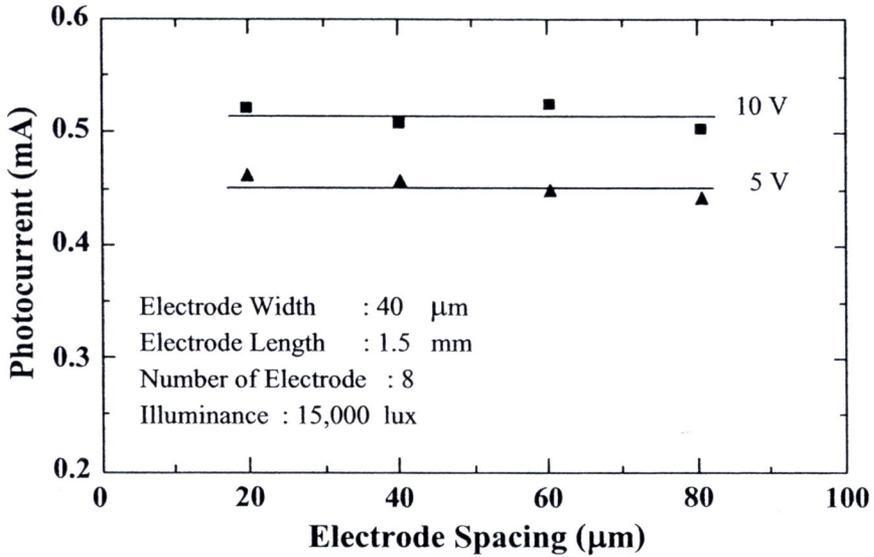
รูปที่ 4.24 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ตั้งแต่ 2, 4 และ 8 ขั้ว

4.4.1.4 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่งจะให้กระแสแสงที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันไบอัส 5 และ 10 V จะมีกระแสแสงเฉลี่ยเท่ากับ 0.45 และ 0.53 mA ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

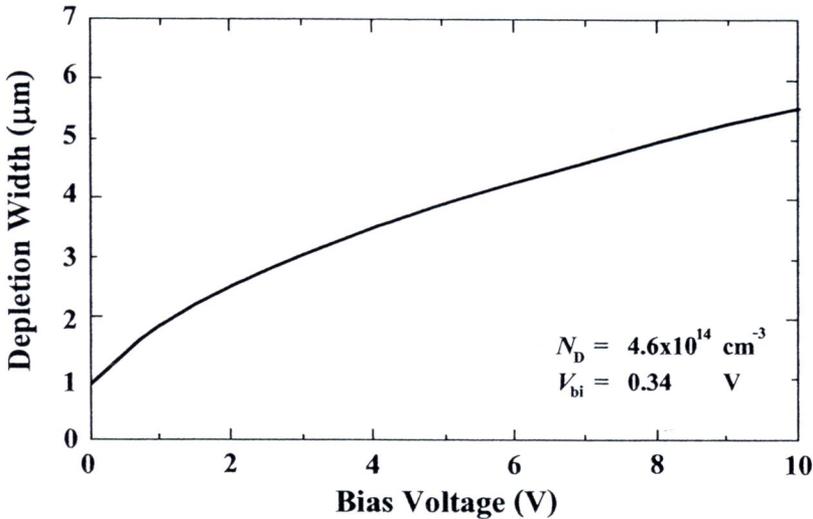


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

โดยสาเหตุที่กระแสแสงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) ที่คำนวณเทียบกับแรงดันไบอัสจากสมการที่ 4.18 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัส 10 V จะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวประมาณ $5.4 \mu\text{m}$ ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่น้อยที่สุดของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมีขนาดถึง $20 \mu\text{m}$ ดังนั้นพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วไฟฟ้าจึงประกอบไปด้วยบริเวณปลอดพาหะ และบริเวณที่เป็นกลาง หรือบริเวณนิวทรัลซึ่งแสดงสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า คือไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากพิจารณาว่าแรงดันไบอัสทั้งหมดจะตกคร่อมเฉพาะที่บริเวณปลอดพาหะ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระแสแสงส่วนมาก ดังนั้นการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งไม่ได้เป็นการเพิ่มพื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะ จึงทำให้กระแสแสงที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง [4.29-4.31] โดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al นั้นให้ผลเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา [4.16]

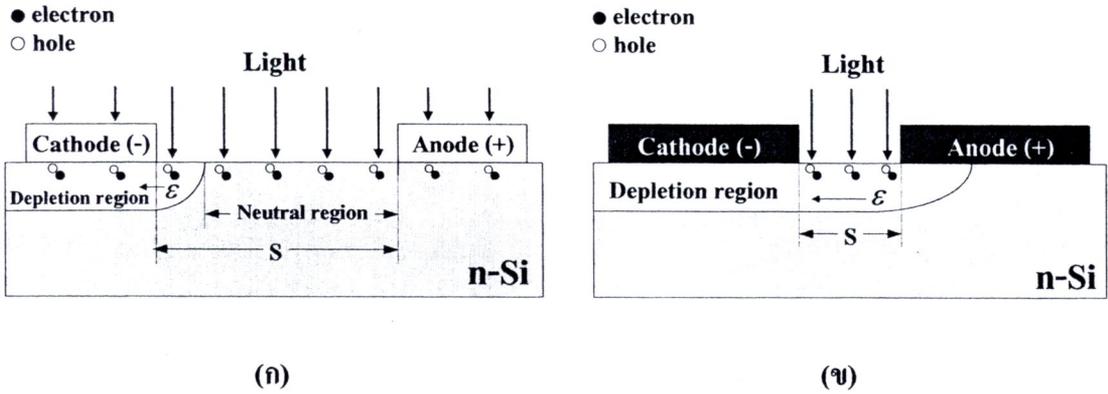
$$W = \left\{ \frac{2\varepsilon_s}{qN_D} (V_{bi} + V_A) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

- โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
 q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
 N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
 V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
 V_A คือ แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสชนิดกึ่ง



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัส และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

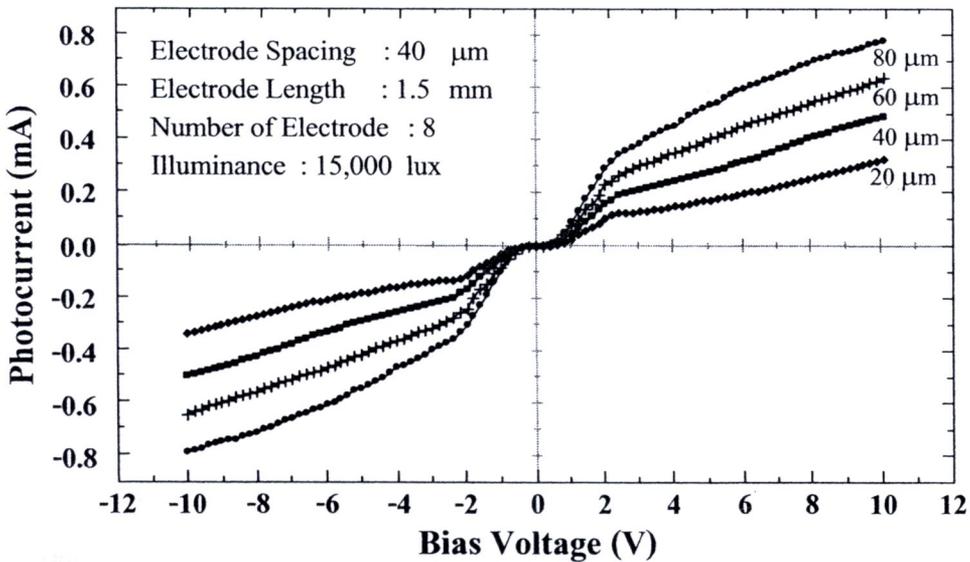
ดังนั้นในการออกแบบขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM ในลักษณะอินเตอร์ดิจิตัล จึงควรออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดไม่กว้างจนเกินไปเพื่อลดพื้นที่บริเวณนิวทรัล อีกทั้งเป็นการลดขนาดของตัวตรวจวัดแสงได้อีกด้วย แต่การลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจนกระทั่งมีบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะ S ทั้งหมดจะทำให้โครงสร้างรวมถึงหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 4.28 กล่าวคือ โครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง ที่สร้างลงบนซิลิคอนชนิดเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ก) กระแสแสงจะเกิดขึ้นเนื่องจากโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทดเป็นส่วนใหญ่ โดยเกิดขึ้นเฉพาะภายในบริเวณปลอดพาหะ ส่วนกรณีโครงสร้าง MSM ที่มีบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะ S ทั้งหมด หรือ MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ข) กระแสแสงจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของทั้งอิเล็กตรอนและโฮล โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด ดังนั้นตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้นจึงเป็นอีกหนึ่งโครงสร้างที่สามารถเพิ่มกระแสแสงของตรวจวัดแสง MSM ได้ โดยสามารถให้กระแสแสงสูงกว่า MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างมากกว่า 2 เท่า [4.32] แต่การออกแบบให้ตัวตรวจวัดแสงมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้นนั้นจำเป็นต้องใช้กระจกดันแบบโครเมียมที่มีความคมชัดสูง เนื่องจากมีขนาดลวดลายที่เล็ก ซึ่งกระจกดันแบบโครเมียมนี้มีราคาค่อนข้างสูง ต่างจากตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้างที่สามารถสร้างกระจกดันแบบได้ง่ายและมีราคาถูก อีกทั้งยังสามารถเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงได้เช่นเดียวกัน โดยการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะแบบโปร่งใสดังเช่นในงานวิจัยนี้ เป็นต้น



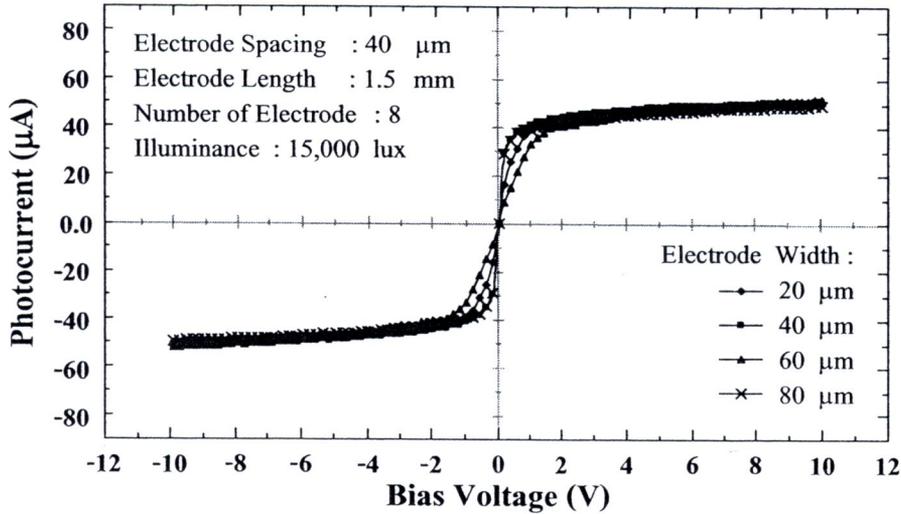
รูปที่ 4.28 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าต่างกัน ขณะให้แรงดันไบอัส โดย (ก) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง และ (ข) โครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น

4.4.1.5 ผลของความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

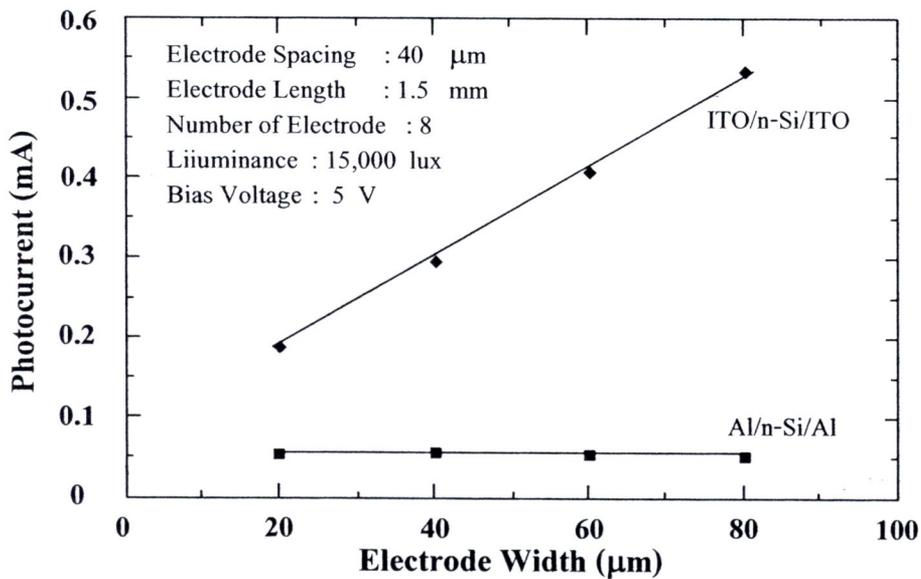
ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีลักษณะของกระแสแสงแปรผันตามขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ขณะที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al กลับมีลักษณะของกระแสแสงที่คงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.30



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



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



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

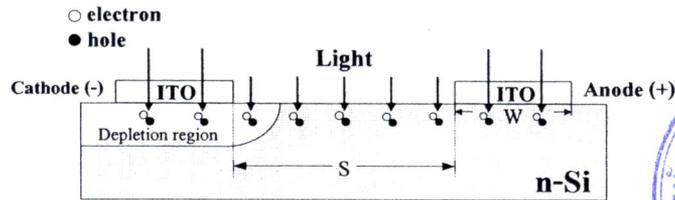
เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าต่อกระแสแสง จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความกว้างของขั้วไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังแสดงในรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่ากระแสแสงตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ต่างจากตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่กระแสแสงมีลักษณะค่อนข้างคงที่ โดยพบว่าที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO จะมีกระแสแสงประมาณ 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 mA เมื่อ

ตัวตรวจวัดแสงมีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสขึ้น 20 μm จะมีกระแสแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 0.1 mA ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al นั้นมีกระแสแสงที่แรงดันไบอัส 5 V ประมาณ 46.4, 48.4, 46.8 และ 44.7 μA เมื่อตัวตรวจวัดแสงมีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีค่ากระแสแสงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 47 μA เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสแสงระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่แรงดันไบอัส 5 V เมื่อตัวตรวจวัดแสงมีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm พบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีกระแสแสงสูงกว่า Al/n-Si/Al ประมาณ 4, 6, 9 และ 12 เท่าตามลำดับ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการนำวัสดุหน้าไฟฟ้าโปร่งใส ITO มาใช้สร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM นั้นสามารถเพิ่มปริมาณกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ได้ โดยการเพิ่มขนาดของขั้วไฟฟ้าจะยิ่งทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้นต่างจากตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าทึบแสงทั่วไป

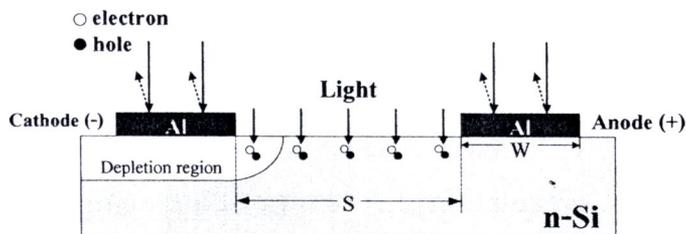
โดยปริมาณกระแสแสงที่มีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al และการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงเมื่อเพิ่มขนาดความกว้างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีผลมาจากสมบัติเฉพาะตัวทางแสงของวัสดุตัวนำโปร่งใส ITO นั้นเอง กล่าวคือ ITO มีลักษณะโปร่งใส และยอมให้แสงส่องผ่านได้ตั้งแต่ความยาวคลื่น 380-2000 nm โดย ITO ที่เตรียมขึ้นในการทดลองนี้มีความโปร่งใสมากถึง 85% ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.2 ดังนั้นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองจึงสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้า ITO จนถึงบริเวณชิลิคอนชนิดอื่น หรือบริเวณปลดคพาหะซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระแสแสงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ก) ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่แสงไม่สามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมลงไปได้ เนื่องจากอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นโลหะทึบแสง ดังนั้นเมื่อแสงตกกระทบลงบนขั้วไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนกลับ จึงไม่ทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอน และโฮลภายในบริเวณปลดคพาหะที่อยู่ใต้ขั้วไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.32 (ข) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีกระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ซึ่งการเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้านั้นทำให้มีพื้นที่ของบริเวณปลดคพาหะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

จากการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตในหัวข้อที่ 4.4.1 นั้น จะเห็นได้ว่าผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต ไม่ว่าจะเป็นระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าหรือจำนวนขั้วไฟฟ้า ต่างก็ให้ผลการทดลองในลักษณะที่ใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าเป็นแบบทึบแสงของโลหะอลูมิเนียมชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น หรือของโลหะทึบแสงชนิดอื่น ๆ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4.14-4.17] จึงทำให้ในการทดลองต่อจากนี้ไป ในงานวิจัยนี้จึงได้ให้ความสนใจศึกษาเฉพาะตัวแปรที่ให้ผลของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันแตก

ต่างไปจากผลของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะของขั้วไฟฟ้าเป็นแบบทึบแสง กล่าวคือจะทำได้ ทำการศึกษาเฉพาะผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่มีต่อสภาพการตอบสนองทางแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม และการตอบสนองทางความถี่ต่อไป ดังนี้



(ก)



(ข)

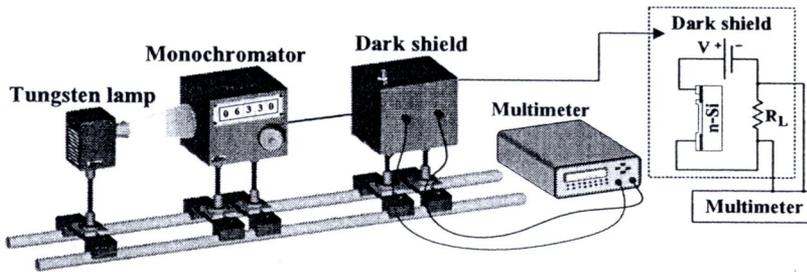
รูปที่ 4.32 การสะท้อน และทะลุผ่านของแสงที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM
(ก) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะโปร่งใสชนิด ITO/n-Si/ITO
(ข) ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะทึบแสงชนิด Al/n-Si/Al

4.4.2 สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงสภาพตอบสนองทางแสง (responsivity; \mathcal{R}) และประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency; η) ของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จากลักษณะของอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อพลังงานแสงค่าต่าง ๆ ที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสง โดยได้ทำการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสที่มีต่อสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม อีกทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา

ทำการต่อวงจรเพื่อใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.33 โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดทังสเตน (tungsten lamp) แล้วส่งผ่านไปยังเครื่องโมโนโครมาเตอร์ (monochromator) ของบริษัท Nikon รุ่น G-250 เพื่อให้แสงสามารถผ่านได้เฉพาะความยาวคลื่นแสงที่กำหนด (500-1,000 nm) โดยแสงที่ผ่านจากเครื่องโมโนโครมาเตอร์จะถูกวัดพลังงานแสง (พลังงานอินพุต: P_{in}) ด้วยเครื่องเพาเวอร์มิเตอร์ (power meter) ของบริษัท Edmund optics, Inc. รุ่น W54-018 จากนั้นแสงจะ

ไปตกกระทบยังตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ทำให้เกิดกระแสแสงขึ้น (I_p) โดยจะทำการวัดกระแสแสงที่เกิดขึ้นนี้ ด้วยเครื่องมือวัดของบริษัท Keithley รุ่น 2400



รูปที่ 4.33 แผนภาพการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V

นำค่ากระแสแสง และพลังงานอินพุตที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาสภาพตอบสนองทางแสงจากสมการที่ 4.19 โดยความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสภาพตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความยาวคลื่นแสง 830 nm จะมีสภาพตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.039, 0.042, 0.044 และ 0.046 A/W เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ

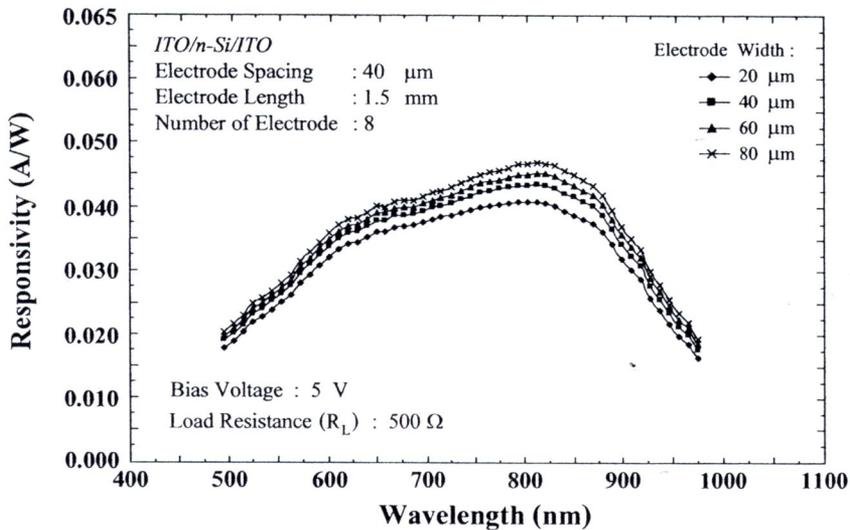
$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{in}} \quad (4.19)$$

เมื่อนำสภาพตอบสนองทางแสง มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 เห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของสภาพตอบสนองทางแสงเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.34 ร่วมกับรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าสภาพตอบสนองทางแสงยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น (λ_p) เป็น 830 nm แล้วจึงมีค่าลดลงไม่เพิ่มตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และความสัมพันธ์ของ $E = h\nu$ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3.6

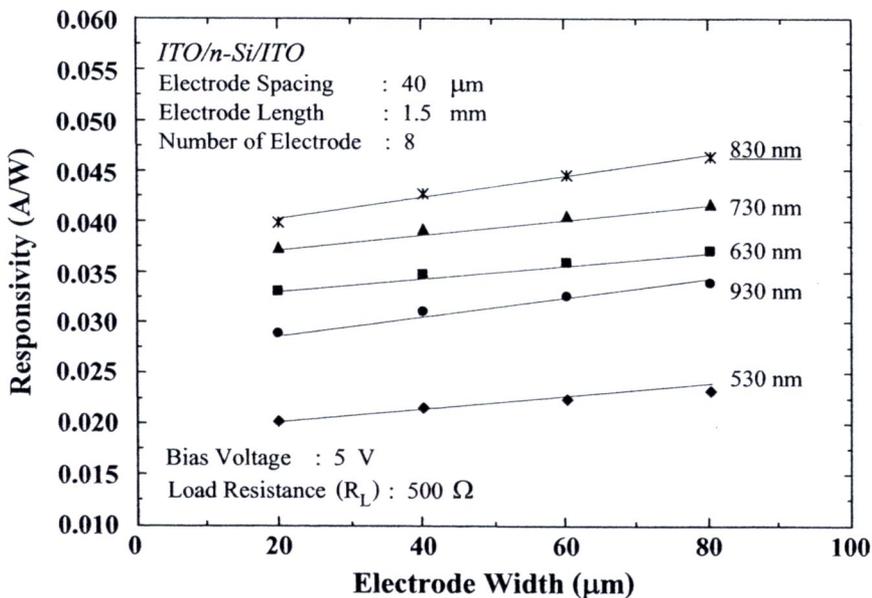
เมื่อนำค่าสภาพตอบสนองทางแสงไปคำนวณหาประสิทธิภาพควอนตัม จากสมการที่ 4.20 จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.36

$$\eta = \mathfrak{R} \cdot \frac{hc}{\lambda q} \quad (4.20)$$

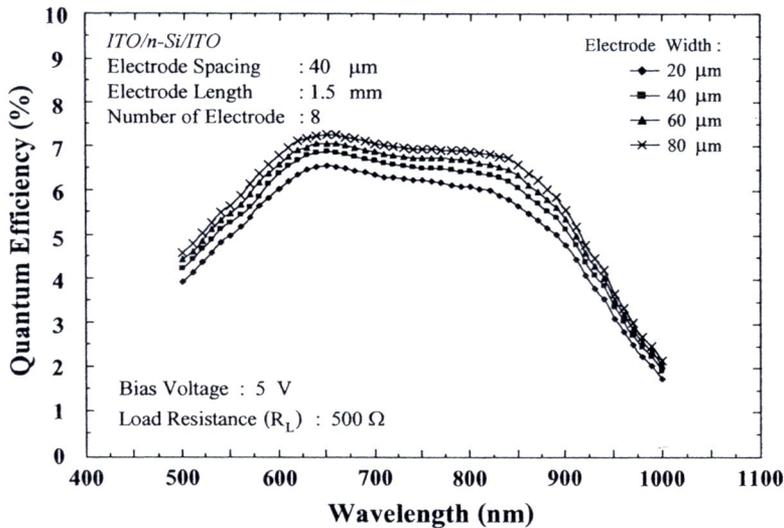
โดยที่ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์
 λ คือ ความยาวคลื่นแสง
 c คือ ความเร็วแสง



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสงกระแสดตรง กับความยาวคลื่นในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20-80 μm



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสงกระแสดตรงกับความกว้างของขั้วไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นต่างๆ



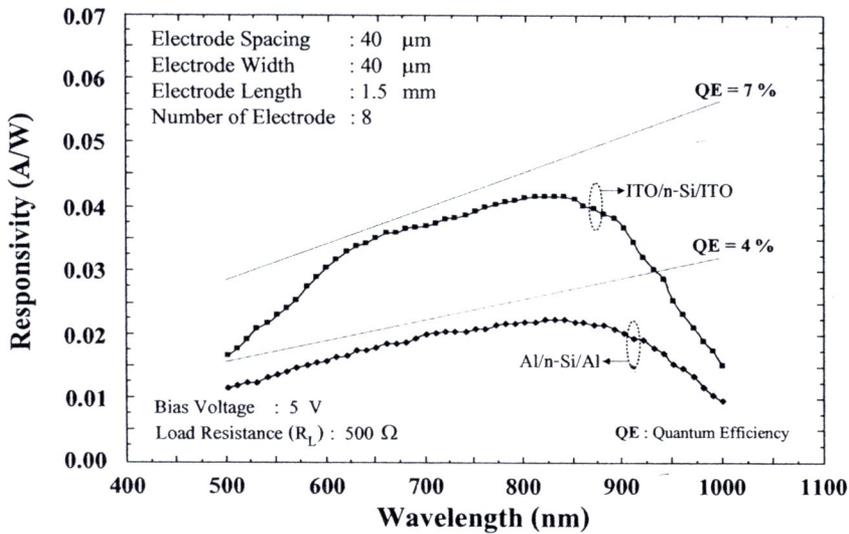
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัม กับความยาวคลื่นในช่วง 500-1000 nm เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 20-80 μm

โดยจากรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO มีขนาดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันกับสภาพตอบสนองทางแสงที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ความยาวคลื่น 830 nm จะมีประสิทธิภาพควอนตัมเท่ากับ 6.0, 6.3, 6.6 และ 6.8% เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 20, 40, 60 และ 80 μm ตามลำดับ และเมื่อทำการพิจารณาผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO สามารถตอบสนองต่อแสงกระแสดตรง โดยมีสภาพตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.046 A/W (ความยาวคลื่น 830 nm) และประสิทธิภาพควอนตัมสูงสุดเท่ากับ 7.4 % (ความยาวคลื่น 625 nm) เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 80 μm นั่นเอง

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความยาวขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว จึงได้ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสง กับความยาวคลื่นแสงในช่วง 500-1,000 nm ของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.37

จากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสง กับความยาวคลื่นเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังรูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพควอนตัมและการตอบสนองทางแสงนั้นมีลักษณะที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา โดยที่ตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al นั้นมีสภาพตอบสนองทางแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นเดียวกันคือ 830 nm ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.042 และ 0.023 A/W ตามลำดับ โดยจะ

เห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีความสามารถในการตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้ดีกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเท่ากัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงที่สุดของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิดพบว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นมีประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยมีค่าเท่ากับ 6.95 และ 3.66% ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองทางแสงกระแสตรง กับความยาวคลื่นเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al

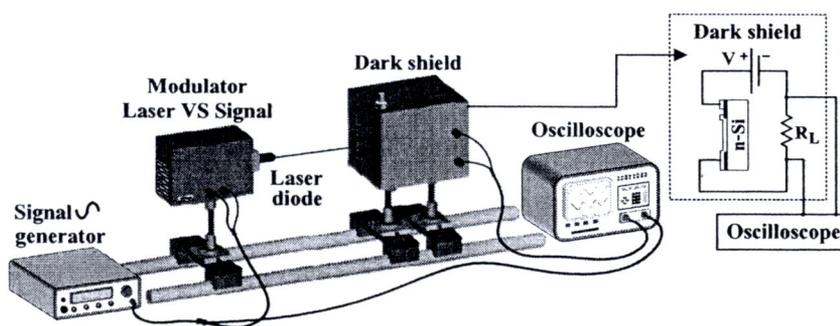
จากสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส นั้น จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับลักษณะกระแสแสง-แรงดันในหัวข้อ 4.4.1 กล่าวคือสภาพตอบสนองทางแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม และกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อขนาดของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO กว้างขึ้น และมีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งมีผลมาจากการที่สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อพลังงานแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายถึงผลของสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมได้เช่นเดียวกับผลของกระแสแสงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ตัวตรวจวัดแสงที่สามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่าในขณะที่มีพลังงานแสงค่าเดียวกันตกกระทบนั้นจะมีสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงกว่านั่นเอง

ถึงแม้ว่าตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จะมีสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แต่สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ไม่มี

ส่วนป้องกันการสะท้อน (antireflection) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน หรือจากลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นแบบกว้าง ทำให้กระแสแสงที่เกิดขึ้นนั้นส่วนมากจะเกิดมาจากประจุของพาหะส่วนน้อยหรือโฮลในบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นถ้าพิจารณาถึงประสิทธิภาพควอนตัมที่มีความหมายถึงจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ จึงจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ส่วนหนึ่งน่าจะลดลงเนื่องจากโครงสร้างดังกล่าว หรืออาจเกิดขึ้นจากการที่ชั้นออกไซด์บางๆ หรือสถานะพื้นผิวที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็นทำหน้าที่เป็นกับดักพาหะ (hole traps) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับออกไซด์ (SiO_x) ดังนั้นเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับการกระตุ้นจากแสงที่ตกกระทบและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น โฮลที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะจะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าแรงให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วแคโทดเพื่อเกิดเป็นกระแสแสง แต่ทันทีที่โฮลถูกแรงกระทำของสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่โฮลกลับถูกกับดักโฮลที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับออกไซด์จับ ทำให้กระแสแสงที่น่าจะเกิดขึ้นได้อีกส่วนหนึ่งลดลงไป ด้วยเหตุนี้จึงอาจส่งผลให้สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีค่าน้อยลงนั่นเอง [4.21, 4.26]

4.5 การทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ด้วยสัญญาณแสงกระแสลับเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ [4.33]

ในการทดสอบสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงด้วยสัญญาณแสงกระแสลับนี้ จะได้ทำการศึกษาถึงผลตอบสนองทางความถี่ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานของตัวตรวจวัดแสงในส่วนของความเร็วในการทำงาน และเชื่อมโยงไปถึงแบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ โดยจะทำการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ต่อผลตอบสนองทางความถี่ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนเดียวกัน เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา



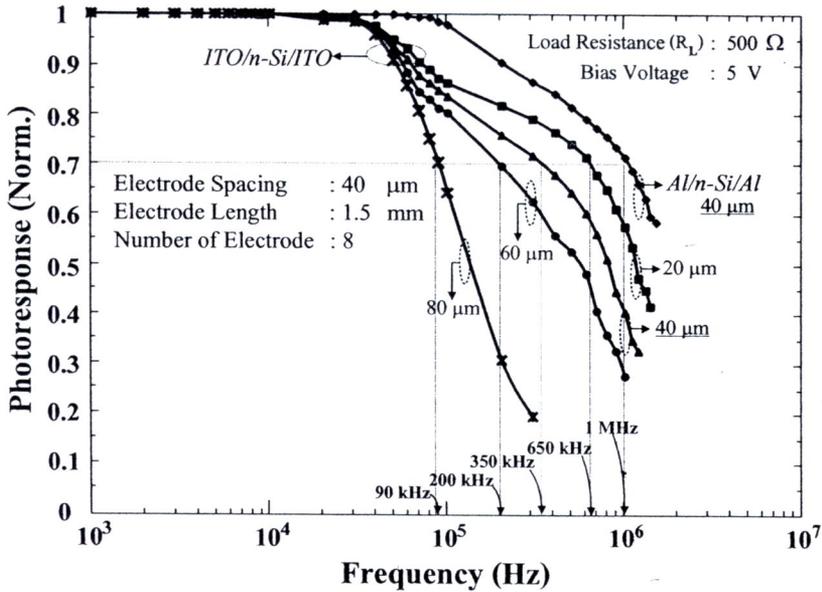
รูปที่ 4.38 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ความต้านทานโหลด (R_L) เท่ากับ 500Ω และ แรงดันไบอัส (V) เท่ากับ 5 V

ทำการต่อชุดทดลองดังรูปที่ 4.38 โดยใช้แหล่งจ่ายแสงจากเลเซอร์ไดโอด (laser diode) ของบริษัท RS components Co., Ltd. รุ่น Beta TX series no.194-004 ความยาวคลื่น 670 nm กำลังงาน 2.67 mW และทำการมอดูเลท (modulated) สัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sine wave) เข้ากับเลเซอร์ไดโอด ด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) ของบริษัท Tektronix Co., Ltd. รุ่น AFG 300 โดยปรับสัญญาณให้มีขนาด 400 mV_{pp} จากนั้นฉายแสงไปยังตัวตรวจวัดแสงที่ถูกต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน 500Ω และป้อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 5 V เพื่อวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป ขณะป้อนสัญญาณความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณค่าต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตในลักษณะนอร์มอลไลซ์ (normalize) กับความถี่ในรูปแบบกึ่งล็อก เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ที่มีค่าสูงสุด หรือความถี่คัทออฟ (cutoff frequency: f_c) ดังแสดงในรูปที่ 4.39

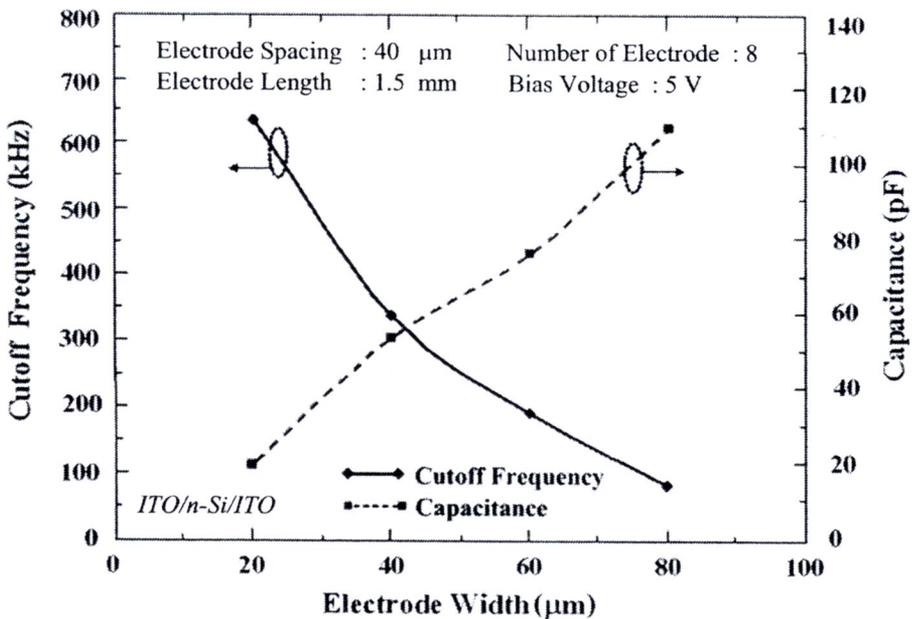
ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ต่อผลตอบสนองทางความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 20, 40, 60 และ $80 \mu\text{m}$ จะทำให้ความถี่คัทออฟมีการเปลี่ยนแปลงจาก 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz และ 90 kHz ตามลำดับ กล่าวคือความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าลดลงเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากการที่ความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่ของรอยสัมผัส ทำให้เมื่อความกว้างขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นจึงมีค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 19, 55, 79 และ 114 pF ที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20, 40, 60 และ $80 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วในการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสง กล่าวคือเป็นส่วนหนึ่งของค่าเวลาคงตัว (RC time constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความต้านทานโหลด (R_L) กับค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสง MSM รวมถึงที่บริเวณขั้วเชื่อมต่อสาย (bonding pad) ดังนั้นเมื่อความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าลดต่ำลงนั่นเองดังแสดงในรูปที่ 4.40

เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ระหว่างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO กับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40 \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40 \mu\text{m}$ ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และมีจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าความถี่คัทออฟเท่ากับ 350 kHz โดยมีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีความถี่คัทออฟเท่ากับ 1 MHz ซึ่งผลการตอบสนองทางความถี่นี้มีความสอดคล้องกับผลของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันในหัวข้อ 4.1.3 ที่ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงกว่าของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al จึงส่งผลให้ค่าเวลาคงตัวซึ่งเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเร็วของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า อีกทั้งผลตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO อาจมีค่าลดลงเนื่องมาจากผลของชั้นออกไซด์ระหว่าง ITO และซิลิคอน ทำให้เวลา

ในการส่งผ่าน (transit time) และเวลาในการแพร่ (diffusion time) ของพาหะผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นออกไซด์กับซิลิคอนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการล่าช้ากว่าจะได้รับกระแสแสง หรือกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทออกมาทำให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าต่ำนั่นเอง [4.21, 4.26]



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความถี่ในช่วง 1 kHz-10 MHz เพื่อหาความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al



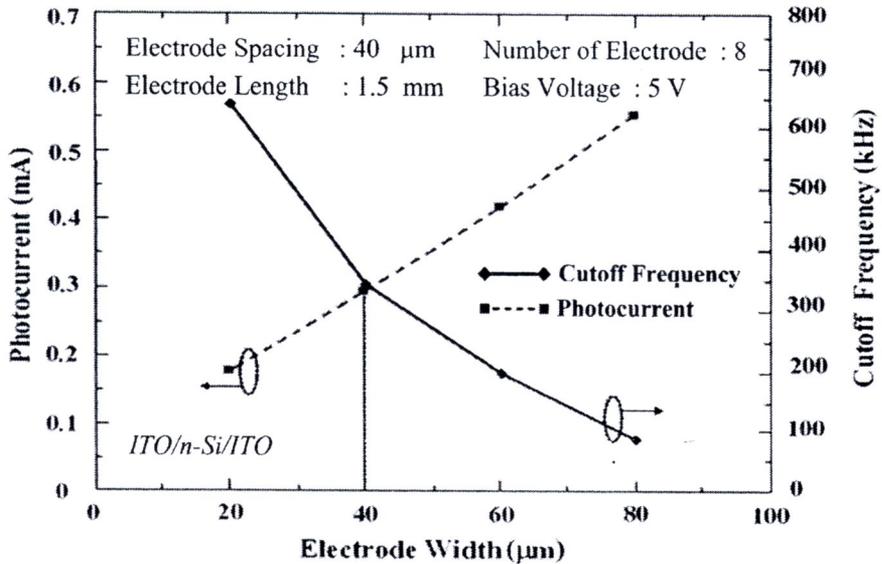
รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คutoff และความจุไฟฟ้ากับความกว้างของขั้วไฟฟ้า

จากผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า และการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ต่อสัญญาณแสงกระแสตรงและกระแสสลับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของขั้วไฟฟ้าอินทรีย์จิติท รวมถึงทำการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO สามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้เป็นอย่างดีโดยสามารถให้กระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ถึง 10 เท่าที่แรงดันไบอัส 10 V รวมถึงมีสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมมากกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al อีกด้วย และเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของ ITO จึงทำให้การเพิ่มความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีผลทำให้การตอบสนองทางแสงกระแสตรงเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งต่างจากตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าทึบแสงทั่วไป แต่ในส่วนของ การตอบสนองต่อแสงกระแสสลับนั้นจะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO สามารถให้การตอบสนองได้ต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยจะเห็นได้จากความถี่คัทออฟที่มีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ซึ่งสอดคล้องกับผลของความจุไฟฟ้าที่ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โดยสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ดังตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ให้มีความกว้างของขั้วไฟฟ้ามากขึ้นนั้นจะส่งผลให้การตอบสนองต่อแสงกระแสตรงดีขึ้น แต่กลับทำให้การตอบสนองทางความถี่ลดลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าขนาดของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ คือ ที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm เนื่องจากที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาด 20 μm การตอบสนองต่อแสงกระแสตรงจะมีค่าลดลง และถ้าความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาด 60 และ 80 μm จะทำให้มีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำนั่นเอง โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อการตอบสนองทางแสงใด ๆ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับกับความกว้างของขั้วไฟฟ้าคือ 40 μm จึงมีความเหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 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

MSM Photodetectors	Capacitance (pF)	Dark current (nA)	Photocurrent [15,000 lux] (mA)	Responsivity [$\lambda_p = 830 \text{ nm}$] (A/W)	Frequency cut off (MHz)
ITO/n-Si/ITO	55	380	0.30	0.042	0.35
Al/n-Si/Al	26	290	0.05	0.023	1.00



รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความถี่คutoffกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า

4.6 เอกสารอ้างอิง

- [4.1] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech, S. Ueamanapong and N. Atiwongsangthong, "Analysis the Suitable Indium Tin Oxide Thin Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication", 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 2007, pp. 1212-1215
- [4.2] Dieter K. Schroder, **Semiconductor Material and Device Characterization**, 2nd, 1998, pp. 147-159
- [4.3] H. Murrman and D. Widman, "Current crowding on metal contacts to planar devices", IEEE Trans. Electron. Devices, vol. ED-16, 1969, pp. 1022
- [4.4] G.K. Reeves and H.B. Harrison, "Obtaining the Specific Contact Resistance from Transmission Line Model Measurement", IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-3, No. 5, 1982, pp.111-113
- [4.5] Norman G. Einspruch, Simon S. Cohen, and Gennady Sh. Gidenblat, **VLSI Electronics Microstructure Science** 13, 1986, pp. 97-111
- [4.6] I. Srithanachaia, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen and S. Supadech, "Preparation and Properties Indium Tin-Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photo detectors", International Conference on Smart Materials-Smart/Intelligent Materials and Nano Technology & 2nd International Workshop on Functional Materials and Nanomaterials (SmartMat-08 & IWOFM 2), 2008, pp. 22-25

- [4.7] สมเกียรติ สุขเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544
- [4.8] J. C. C. Fan, F. J. Bachner and G. H. Foley, "Effect of Oxygen Partial Pressure During Deposition on Properties of r.f. Sputtered Sn-Doped In_2O_3 Films", Applied Physics Letters, Vol. 31, No. 11, 1977, pp. 773-775
- [4.9] K. Sreenivas, T. Sundarsena Rao, A. Mansnigh and S. Chandra, "Preparation and Characterization of r.f. Sputtered Indium Tin Oxide Films", Journal of Applied Physics, Vol. 57, No. 2, 1985, pp. 384-392
- [4.10] M. Buchanan, J. B. Webb and D. F. Williams, "The Influence of Target Oxidation and Growth Related Effects on the Electrical Properties of Reactively Sputtered Films of Tin-Doped Indium Oxide", Thin Solid Films, Vol. 80, 1981, pp. 373-382
- [4.11] J. Bregman, Y. Shapira and H. Aharoni, "Effects of Oxygen Partial Pressure During Deposition on the Properties of Ion-Beam-Sputtered Indium-Tin Oxide Thin Films", Journal of Applied Physics, Vol. 67, No. 8, 1990, pp. 3750-3753
- [4.12] M. Higuchi, S. Uekusa, R. Nakano and K. Yokogawa, "Post-Deposition Annealing Influence on Sputtered Indium Tin Oxide Film Characteristics", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 33, 1994, pp. 302-306
- [4.13] H. Kim, C. M. Gilmore et al., "Electrical, optical, and structural properties of indium-tin-oxide thin films for organic light-emitting devices", Journal of Applied Physics, Vol. 86, No.11, 1999
- [4.14] ธเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สราวุธ วิศวแสงสุข "ผลกระทบของอุณหภูมิขึ้นเตอริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, พ.ศ. 2547, หน้า 14-19
- [4.15] ธเนศ โชะเหม, มานิตา ค้วงแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด ชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมาที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2548, หน้า 13-18
- [4.16] มานิตา ค้วงแสง, การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิฟิเคชัน, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- [4.17] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, วรเทพ น้อยปรีชา และ สัญญา คุณขาว, "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบสลิตเดี่ยวที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก ชนิด Al/n-

Si/Al”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), พ.ศ. 2550, หน้า 592-595

- [4.18] สมเกียรติ ศุภเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545
- [4.19] Chino K, “Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment”, Solid- State Electronics, Vol. 16, 1973, pp. 119-121
- [4.20] Jianming Zhou, **Indium Tin Oxide (ITO) Deposition, Patterning and Schottky Contact Fabrication**, Department of Microelectronic Engineering College of Engineering Rochester Institute of Technology, December 2005
- [4.21] G. Hodes, L. Thompson, J. DuBow and K. Rajeshwar, “Heterojunction Silicon/Indium Tin Oxide Photoelectrodes: Development of Stable Systems in Aqueous Electrolytes and Their Applicability to Solar Energy Conversion and Storage”, J. Am. Chem. SOC., Vol. 105, No. 3, 1983, pp. 324-330
- [4.22] H. Kobayashi, T. Lshida , K. Nakamura, Y. Nakato and H.Tsubomura, “Properties of Indium Tin Oxide Films Prepared by the Electron Beam Evaporation Method in Relation to Characteristics of Indium Tin Oxide/Silicon Junction Solar Cells”, Journal of Applied Physics, Vol. 72, 1992, pp. 5288
- [4.23] T. Lshida, H Kobayashi and Y. Nakato, “Structures and Properties of Electron-Beam-Evaporated Indium Tin Oxide Films as Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy and Work-Function Measurements”, Journal of Applied Physics, Vol.72, 1993, pp. 4344
- [4.24] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีกระแสสูง โดยใช้ซิลิกอนโปร่งใส”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2553, หน้า 25-30
- [4.25] ธเนศ โชะเหม, **การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา**, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- [4.26] M. Seto, C. Rochefort, S. de Jager, Hendriks, R. F. M. Hooft and G. W. van der Mark, “Low-leakage-current metal-insulator-semiconductor-insulator-metal photodetectors on silicon with a SiO₂ barrier-enhancement layer”, Applied Physics Letters, Vol. 75, No. 13, 1999, pp. 1976-1978
- [4.27] M.-K. Lee, Y.-C Tseng and C.-H. Chu, “A high-gain Porous Silicon Metal-Semiconductor-Metal Photodetector through Rapid Thermal Oxidation and rapid Thermal Annealing”, Applied Physics A Materials Science & Processing, Vol. 66, 1998, pp. 541-543

- [4.28] D. V. Sviridov and A. I. Kulak, "Photoelectrochemical oxidation of sulphur dioxide on a polyaniline-modified n-Si/ITO electrode", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 39, 1995, pp. 49-53
- [4.29] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาเนอร์, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [4.30] S. Khunkhao, Y. Yasumura, K. Kitagawa, T. Masui and K. Sato, "On Laterally Spreading of Space-Charge-Region in Planar Metal-Semiconductor-Metal Structures", *Solid-State Electronics*, Vol. 47, No. 10, 2003, pp. 1811-1816
- [4.31] S. Niemcharoen, K. Kobayashi, M. Kimura and K. Sato, "Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Condition", *Solid-State Electronics*, Vol. 45, No. 10, 2001, pp. 1815-1819
- [4.32] วรเทพ น้อยปรีชา, การออกแบบและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552
- [4.33] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วโลหะโปร่งใส", *วิศวสารลาดกระบัง*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2554, หน้า 25-30