

## บทที่ 3

### การออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO

เพื่อให้สอดคล้องกับการดำเนินงานที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ดังนั้นในบทที่ 3 นี้จะได้กล่าวถึง การออกแบบ และการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่ใช้ ITO เป็นขั้วโลหะโปร่งแสง โดยทำการออกแบบลวดลายทางเรขาคณิตของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ให้มีลวดลายเป็นแบบ อินเทอร์เน็ต ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

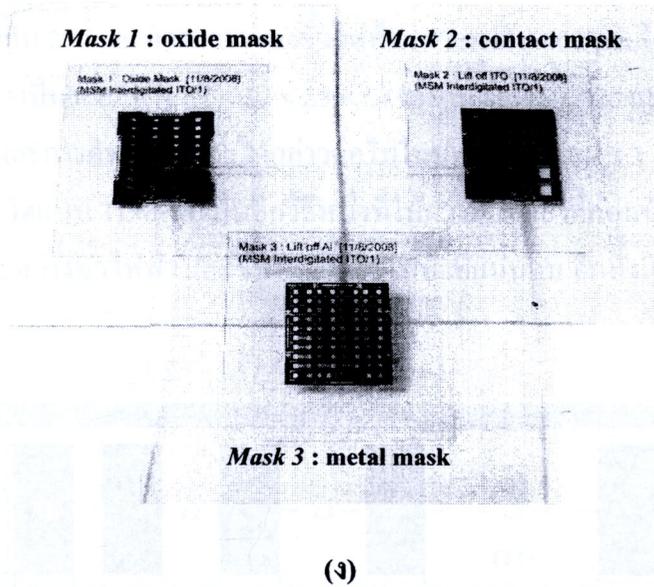
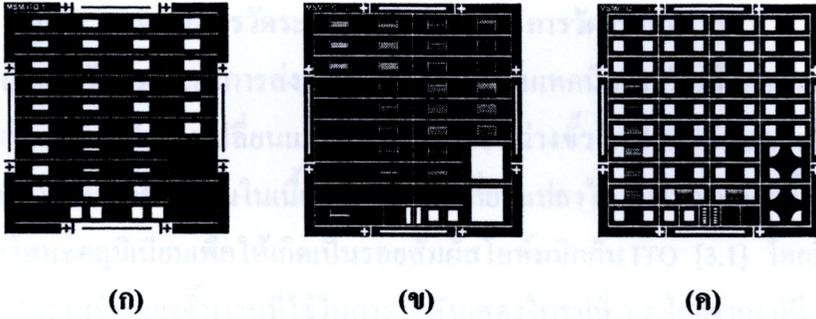
#### 3.1 การออกแบบลวดลาย และการสร้างกระจกต้นแบบ

การออกแบบลวดลาย ถือเป็นขั้นตอนแรกสำหรับกระบวนการสร้างทั้งหมด เนื่องจากในการ ออกแบบนั้น จะต้องเริ่มจากการศึกษาถึงข้อจำกัดต่างๆ ของลวดลายที่จะทำการออกแบบ รวมถึง ข้อจำกัดในกระบวนการสร้างที่แตกต่างกันของแต่ละห้องปฏิบัติการ โดยหลังจากการออกแบบ ลวดลายแล้ว ยังจะต้องทำการจัดวางลวดลายให้อยู่ในตำแหน่งที่มีความเหมาะสมสำหรับใน กระบวนการสร้าง และให้สามารถบรรจุอยู่ในพื้นที่ของฐานรองที่จำกัดได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำ การออกแบบลวดลายโดยใช้โปรแกรม CorelDRAW X4 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ออกแบบ ทั่วไปไปทำการสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์มป้องกันแสง แล้วนำไปติดลงบน กระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างต่อไป

โดยลวดลายทั้งหมดที่ได้ทำการออกแบบในงานวิจัยนี้จะ ได้ทำการออกแบบให้รวมอยู่ใน กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์เน็ตชนิด ITO/n-Si/ITO ทั้งหมด เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองที่มีเงื่อนไขในการสร้างเดียวกันได้ ซึ่งใน กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้นั้น จะต้องมีการออกแบบจำนวน 3 แผ่นด้วยกัน ดัง แสดงในรูปที่ 3.1 คือ

- 1 กระจกต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (oxide mask) ใช้ในการลอกชั้นออกไซด์เพื่อให้เกิด พื้นที่รับแสง และให้มีบริเวณที่ยังคงเป็นชั้นป้องกันไม่ให้เกิดรอยสัมผัสที่ไม่ต้องการ
- 2 กระจกต้นแบบสำหรับชั้น ITO (contact mask) ใช้เป็นต้นแบบในการสร้างลวดลายชั้น ITO เพื่อให้เกิดรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ
- 3 กระจกต้นแบบสำหรับใช้สร้างลวดลายของชั้นอลูมิเนียม (metal mask) เพื่อสร้างเป็น ขั้วไฟฟ้าของชิ้นงาน

โดยมีลวดลายที่ได้ทำการออกแบบไว้ เพื่อใช้ในการทดลองต่าง ๆ ดังนี้



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

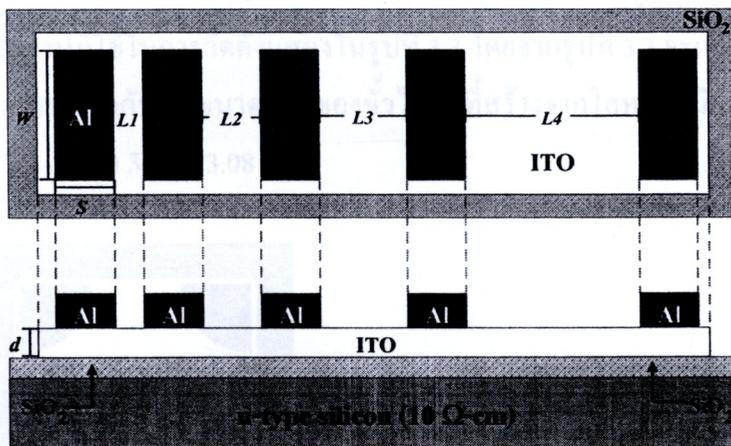
**3.1.1 ลวดลายที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO**

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาถึงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำไปพิจารณาเลือกความหนาของฟิล์ม ITO ที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส และพิจารณาเลือกอุณหภูมิในการปรับปรุงคุณภาพของ ITO และ รอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนชนิดเอ็น โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษานั้นประกอบไปด้วยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ และ สภาพคล่องของพาหะ ซึ่งลักษณะสมบัติของ ITO ต่างๆ เหล่านี้สามารถหาได้ด้วยการวัดจากระยะการส่งผ่าน (transmission line method; TLM) และ การวัด โดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) โดยรูปแบบของลวดลายที่ใช้ในการวัด และสิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบสำหรับเทคนิคการวัดด้วยวิธี TLM และ ปรากฏการณ์ของฮอลล์มีดังต่อไปนี้

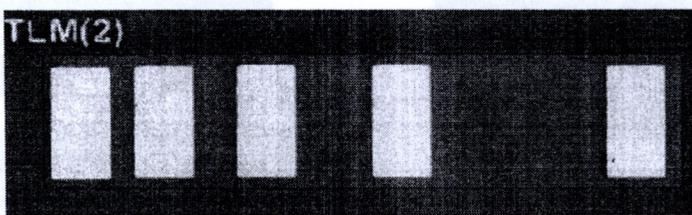
### 3.1.1.1 สวดลายการวัดระยะการส่งผ่าน หรือ การวัดแบบ TLM

เทคนิคการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM เป็นเทคนิคการวัดเพื่อหาค่าความต้านทานภายในเนื้อสาร โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก เพื่อหาค่าความต้านทานในเนื้อสารที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าจากโลหะอลูมิเนียมเพื่อให้เกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกกับ ITO [3.1] โดยมีรูปแบบของลวดลาย และโครงสร้างของชิ้นงานที่ใช้ในการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยจากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า ITO จะถูกกำหนดให้มีความหนาเท่ากับ  $d$  ขนาดความกว้างของขั้วไฟฟ้า ( $S$ ) ที่สร้างจากโลหะอลูมิเนียมเท่ากับ  $200\ \mu\text{m}$  ความยาวของขั้วไฟฟ้า ( $W$ ) เท่ากับ  $400\ \mu\text{m}$  โดยจะต้องมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ( $L$ ) เป็นระยะทาง  $L1 < L2 < L3 < L4$  เท่ากับ  $80, 160, 320$  และ  $640\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ โดยวิธีการทดลอง และการคำนวณผลจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.1

เทคนิคการวัดแบบ TLM ถือเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ความแม่นยำที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และขนาดของขั้วไฟฟ้าที่แน่นอน อีกทั้งมีขนาดของลวดลายที่ค่อนข้างเล็ก



(ก)



(ข)

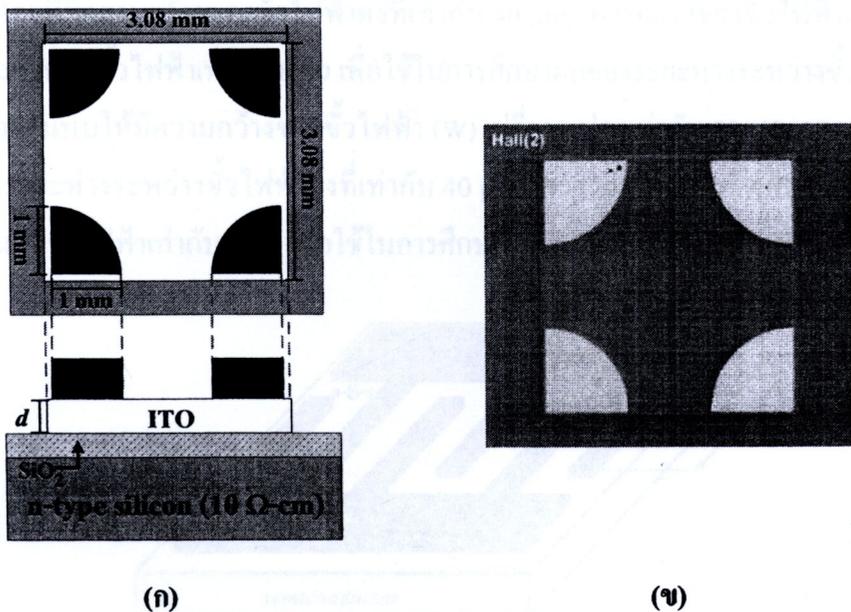
รูปที่ 3.2 ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน หรือ TLM

- (ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ  
 (ข) ภาพชั้นฟิล์ม ITO ที่สร้างลงบนซิลิคอนไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

### 3.1.1.2 ลวดลายการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์

ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นเทคนิคการวัดที่มีความสำคัญ และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการทดลองนี้สามารถหาพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของวัสดุ หรือสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดได้ เช่น ค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยมีหลักการง่ายๆคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุ หรือแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ขณะให้สนามแม่เหล็กตัดผ่านวัสดุ หรือแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับทิศของกระแส จะทำให้มีสนามไฟฟ้า หรือความต่างศักย์ทางด้านขวางเกิดขึ้น โดยมีทิศตั้งฉากกับทิศของกระแส และทิศของสนามแม่เหล็ก ซึ่งความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะได้ [3.2] โดยวิธีการทดลอง และการคำนวณผลจะได้อีกต่อไปในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1.2

จากหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าจะต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า และวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในแนวขวาง ดังนั้นการออกแบบชิ้นงานที่จะนำมาทำการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์นี้ จะต้องทำการออกแบบใช้ชิ้นงานมีขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ในการทดลองทั้งหมด 4 ขั้ว และเพื่อให้ค่าที่ทำการวัดได้มีความถูกต้อง ขั้วไฟฟ้าทั้งหมดจะต้องมีระยะห่างที่เท่ากัน และมีขนาดที่เล็กที่สุดเพื่อลดผลของความต้านทานที่บริเวณขั้วไฟฟ้า โดยมีรูปแบบของลวดลาย และโครงสร้างของชิ้นงานที่ใช้ในการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยจากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า ITO จะถูกกำหนดให้มีความหนาเท่ากับ  $d$  ขนาดรัศมีของขั้วไฟฟ้าที่สร้างจากโลหะอลูมิเนียมเท่ากับ 1 mm และขนาดของ ITO เท่ากับ  $3.08 \times 3.08$  mm



รูปที่ 3.3 ลักษณะ โครงสร้าง และลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์

(ก) ลักษณะ โครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

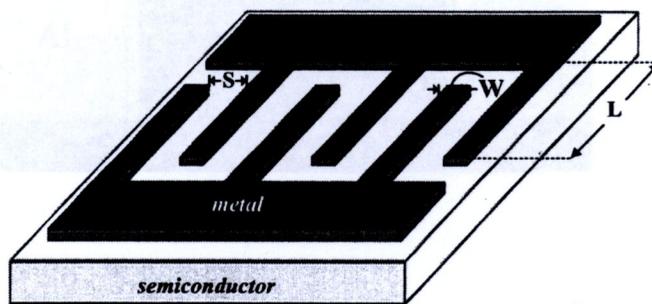


### 3.1.2 ลวดลายตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al

โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเท นั้นจะมีลักษณะคล้ายส้อม (fork shape) หรือ นิ้วมือ (finger shape) สลับกัน 2 ด้านดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตเทนั้นมีตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาดที่สำคัญ 3 ตัวแปรด้วยกัน คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) และความยาวของขั้วไฟฟ้า (L) ซึ่งการออกแบบขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทให้มีขนาด และจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) ที่เหมาะสมจะทำให้ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแสงได้สูงที่สุด [3.3, 3.4]

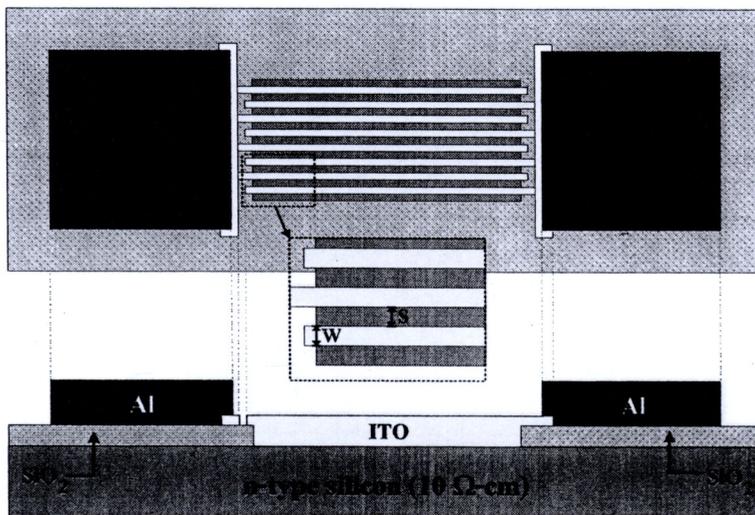
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al โดยให้มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาด และจำนวนขั้วไฟฟ้าต่างๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสง ดังนี้

- (1) ออกแบบให้มีจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) เปลี่ยนแปลง เท่ากับ 2, 4 และ 8 ขั้ว โดยที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าคงที่เท่ากับ  $40\ \mu\text{m}$  และความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1.5\ \text{mm}$  เพื่อใช้ในการศึกษาผลของจำนวนขั้วไฟฟ้า
- (2) ออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) เปลี่ยนแปลง เท่ากับ 20, 40, 60 และ  $80\ \mu\text{m}$  โดยที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าคงที่เท่ากับ  $40\ \mu\text{m}$ , ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1.5\ \text{mm}$  และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว เพื่อใช้ในการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า
- (3) ออกแบบให้มีความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 20, 40, 60 และ  $80\ \mu\text{m}$  โดยที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าคงที่เท่ากับ  $40\ \mu\text{m}$ , ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1.5\ \text{mm}$  และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 8 ขั้ว เพื่อใช้ในการศึกษาผลของความกว้างของขั้วไฟฟ้า

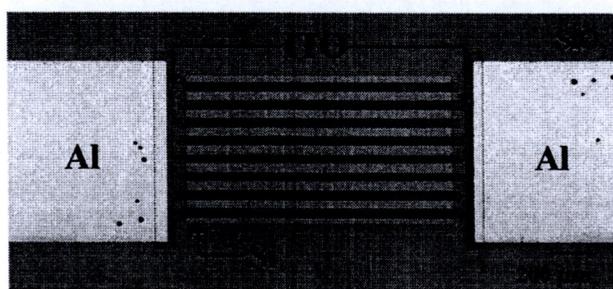


รูปที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเท และตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดขนาดต่าง ๆ

โดยโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้นจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่าง ITO กับ ซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นชั้นที่ใช้ในการกำหนดขนาดของพื้นที่รับแสง (active area) และมีโลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (bonding pad) อยู่บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีขนาด  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้จะต้องทำการออกแบบลวดลายต้นแบบด้วยกัน 3 ลวดลาย ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 โดยจากลวดลายดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหนึ่งในนั้นเป็นลวดลายของโลหะอลูมิเนียม ซึ่งทำให้ในงานวิจัยนี้สามารถออกแบบตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิตให้อยู่ในลวดลายต้นแบบเดียวกันกับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ได้



(ก)



(ข)

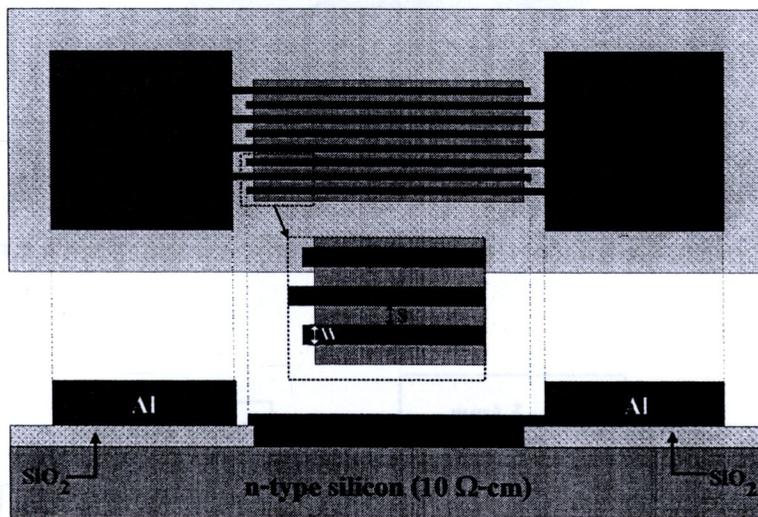
รูปที่ 3.5 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิต

(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ

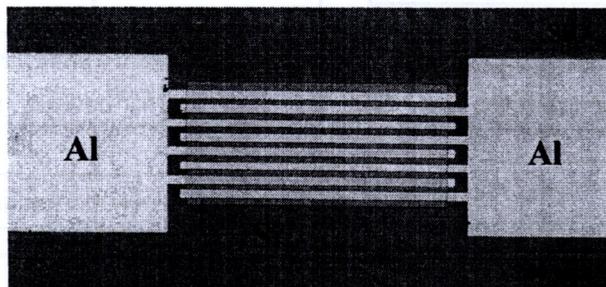
(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al นั้นจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนชนิดเอ็น โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นที่ใช้ในการกำหนดขนาดของพื้นที่รับแสงเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และมีส่วนของขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ภายนอกอยู่บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีรูปร่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ดังแสดงในรูปที่ 3.6

หลังจากทำการออกแบบลวดลายทั้งหมด และทำการสแกนลวดลายดังกล่าวลงบนแผ่นฟิล์มป้องกันแสงแล้ว จากนั้นได้ทำการตรวจสอบลวดลายบนกระจกต้นแบบด้วยกล้องไมโครสโคป พบว่าลวดลายที่ได้มีความคมชัด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นกระจกต้นแบบสำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงต่อไป



(ก)



(ข)

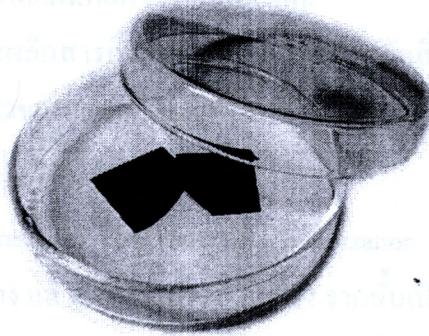
รูปที่ 3.6 ลักษณะโครงสร้าง และลวดลายของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต

(ก) ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ และ

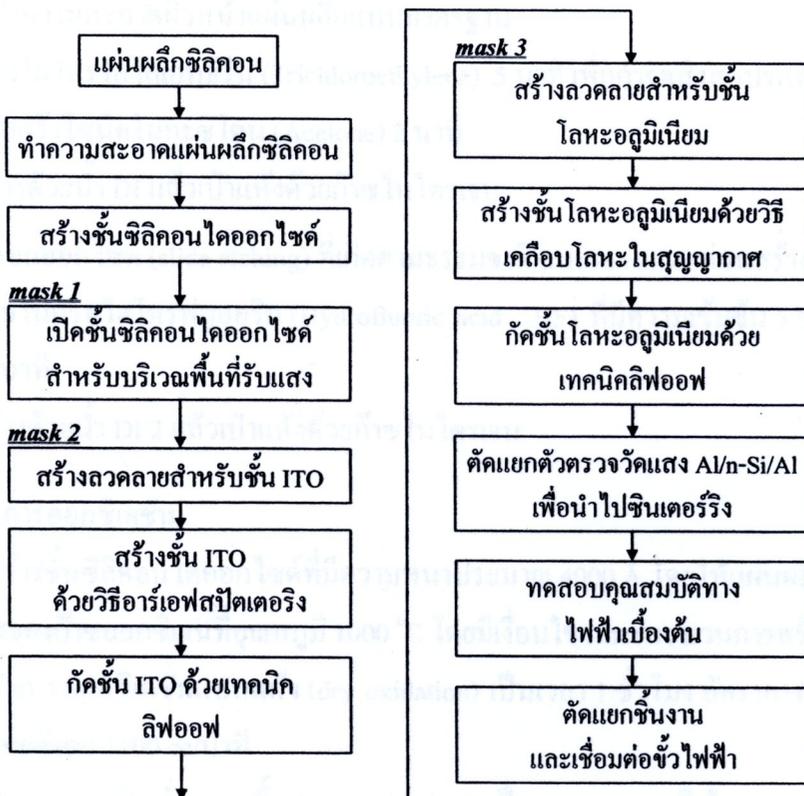
(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

### 3.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM แบบอินเตอร์ดิจิตทในงานวิจัยนี้ จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวม ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยหลังจากขั้นตอนการออกแบบ และการสร้างกระจกต้นแบบแล้วจึงจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการสร้าง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฐานรองเป็นแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) สภาพต้านทาน  $10 \Omega\text{-cm}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7 มาเข้าสู่กระบวนการสร้าง โดยมีขั้นตอนทั้งหมดแสดงดังแผนผังในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระบาย (100) สภาพต้านทาน  $10 \Omega\text{-cm}$



รูปที่ 3.8 แผนผังกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างนี้จะได้กล่าวถึงลำดับ และขั้นตอนรวมถึงเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 5 กระบวนการ คือ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน กระบวนการออกซิเดชัน กระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงาน ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีพื้นฐาน หรือกระบวนการลิฟออฟ กระบวนการเคลือบโลหะด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง หรือวิธีเคลือบโลหะด้วยความร้อนในสุญญากาศ และกระบวนการซินเตอร์ริง ดังต่อไปนี้

### 1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนเบื้องต้น

การทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันที่ผิวของแผ่นผลึกออก โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อัลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water ; DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง แล้วล้างด้วยน้ำ DI อีกครั้ง จากนั้นเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดไนตริก (nitric acid :  $\text{HNO}_3$ ) จำนวน 2 แก้วๆ ละ 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- ล้างในน้ำ DI 1 แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึกแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรโคโลเอทรีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน (Acetone) 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ (slide etching) ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนสร้างชั้นออกไซด์

- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ที่มีความเข้มข้น 5 % ใช้เวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำ DI 2 แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 2. กระบวนการออกซิเดชัน

ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 4000 Å โดยให้แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1000 °C โดยมีเงื่อนไข และกระบวนการสร้างดังนี้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้น (wet oxidation) เป็นเวลา 30 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที

### 3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 1

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 1 (oxide mask) เป็นการเปิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้น เพื่อให้เกิดบริเวณรับแสง หรือเปิดช่องให้เกิดพื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (ITO/n-Si, Al/n-Si) โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบที่ 1 ด้วยเครื่องปรับชั้นมาสก์ (mask aligner)
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer) เป็นเวลา 30 วินาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- กัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสง โดยการจุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์ ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ 1000 Å/นาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยการจุ่มในอะซิโตนจนไม่มีน้ำยาไวแสง
- ล้างในน้ำ DI 2 แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 2 สำหรับเทคนิคลิฟออฟ (lift off technique)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 2 (contact mask) เป็นการสร้างลวดลายสำหรับ ITO ที่จะทำการสร้างในขั้นตอนต่อไป โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ลวดลายต้นแบบที่ 2 นี้ จะมีเงื่อนไขของกระบวนการที่สอดคล้องสำหรับการสกัดชั้นฟิล์ม ITO ด้วยเทคนิคลิฟออฟ โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (PFI 34 A ) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงมีความหนาประมาณ 1.5  $\mu\text{m}$
- อบแผ่นครั้งแรก ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 45 นาที

- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ที่ 2 ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาส์ค
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย เป็นเวลา 40 วินาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- รอบครั้งที่สอง ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

#### 5. กระบวนการเคลือบฟิล์ม ITO

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยฟิล์ม ITO โดยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง (r.f. sputtering) ด้วยสารเคลือบ (target) อินเดียมทินออกไซด์บริสุทธิ์ 99.99% เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 นิ้ว มีอัตราส่วนระหว่าง  $\text{In}_2\text{O}_3$  90 wt% กับ  $\text{SnO}_2$  10 wt% ด้วยกำลังอาร์เอฟ (r.f. power) 100 W เป็นเวลา 30 นาที ให้มีความหนาประมาณ 500 nm

#### 6. กระบวนการสกัดชั้นฟิล์ม ITO ด้วยเทคนิคลิฟออฟ

- จุ่มในอะซิโตน 2 แก้ว เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

#### 7. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 สำหรับเทคนิคการลิฟออฟ

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 (metal mask) เป็นการสร้างลวดลายสำหรับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมที่จะทำการสร้างในขั้นตอนต่อไป โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลวดลายต้นแบบที่ 3 นี้ จะมีเงื่อนไขของกระบวนการที่สอดคล้องสำหรับการกัดชั้นฟิล์มอลูมิเนียมด้วยเทคนิคลิฟออฟ โดยมีเงื่อนไข และขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (PFI 34 A) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงมีความหนาประมาณ 1.5  $\mu\text{m}$
- อบแผ่นครั้งแรก ให้ น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 45 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ที่ 2 ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาส์ค ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย เป็นเวลา 40 วินาที
- ล้างในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- รอบครั้งที่สอง ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที

#### 8. กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

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

### 9. กระบวนการกัดชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม ด้วยเทคนิคลิฟออฟ

- จุ่มในอะซิโตน
- ล้างในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ตัดแยกเฉพาะตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al เพื่อเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริงต่อไป

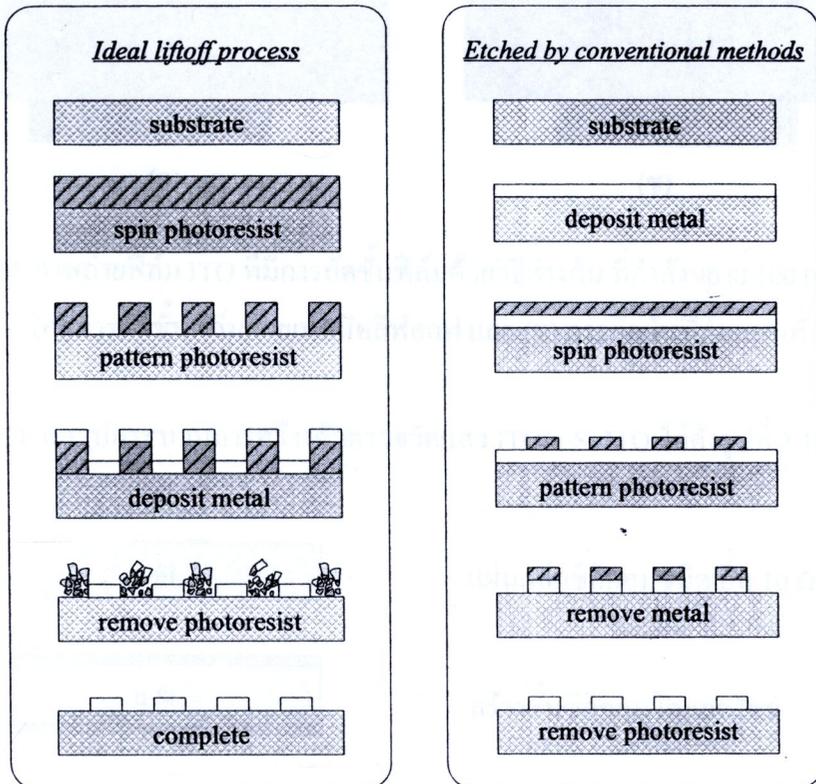
### 10. กระบวนการซินเตอร์ริงสำหรับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al

กระบวนการซินเตอร์ริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  โดยให้มีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน  $1000\text{ cc/นาท}$  เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดี และมีกระแสรั่วไหลต่ำที่สุด [3.5]

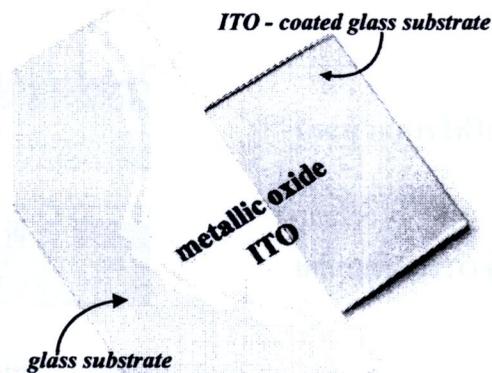
จากกระบวนการสร้างในหัวข้อที่ 3.2.1 จะเห็นได้ว่าในขั้นตอนของการกัดชั้นฟิล์ม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ ซึ่งแตกต่างไปจากการกัดชั้นฟิล์มโลหะในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่ห้องปฏิบัติการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [3.6-3.9] กล่าวคือ ในกระบวนการกัดชั้นฟิล์มโดยทั่วไป (etched by conventional methods) นั้น จะมีการเคลือบฟิล์มที่ทำการสร้างลวดลายก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี แต่ในกรณีของกระบวนการลิฟออฟนั้น จะทำการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคต่าง ๆ กัน โดยสามารถเปรียบเทียบกระบวนการสร้างสำหรับการกัดชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคลิฟออฟ และกระบวนการกัดชั้นฟิล์มโดยทั่วไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 [3.10, 3.11]

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่ากระบวนการลิฟออฟนั้นเป็นกระบวนการสร้างลวดลายของชั้นฟิล์มโลหะที่ง่าย และไม่ซับซ้อน ซึ่งมีฟิล์มโลหะจำนวนมากที่มักใช้การสร้างลวดลายด้วยวิธีนี้ เช่น แพลทินัม (Pt), แทนทาลัม (Ta), นิกเกิล (Ni) หรือ ฟิล์มบางอื่นๆ ที่มีความยุ่งยากในการกัดชั้นฟิล์มด้วยวิธีทั่วไป โดยกระบวนการลิฟออฟแบบพื้นฐานนั้น ลวดลายจะถูกสร้างลงบนฐานรองด้วยน้ำยาไวแสง โดยชั้นฟิล์มโลหะ หรือฟิล์มบางอื่นๆ จะถูกเคลือบลงบนชั้นของน้ำยาไวแสง และบางส่วนจะครอบคลุมลงมายังบริเวณที่เปิดลวดลายของน้ำยาไวแสงไว้ ดังนั้นเมื่อทำการล้างน้ำยาไวแสงออกจึงจะเหลือเพียงชั้นฟิล์มที่ต้องการเท่านั้น [3.10-3.12] และเนื่องจากตัวตรวจวัดแสง MSM ที่จะได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสจากฟิล์ม ITO ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟิล์ม ITO ที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์นั้นมีลักษณะโปร่งใสนจนกระทั่งสามารถมองเห็นตัวอักษรที่อยู่ด้านหลังของฟิล์ม ITO ได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของ ITO ในขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์ม ITO แบบทั่วไปได้ค่อนข้างยาก จึงทำให้มีการกัดชั้นฟิล์มเกินจากลวดลายต้นแบบ (over etched) เป็นเหตุให้ลวดลายของชิ้นงานที่ได้ไม่คมชัดดังแสดงในรูปที่ 3.10

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้กระบวนการลิฟออฟในการสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง  
นั่นเอง



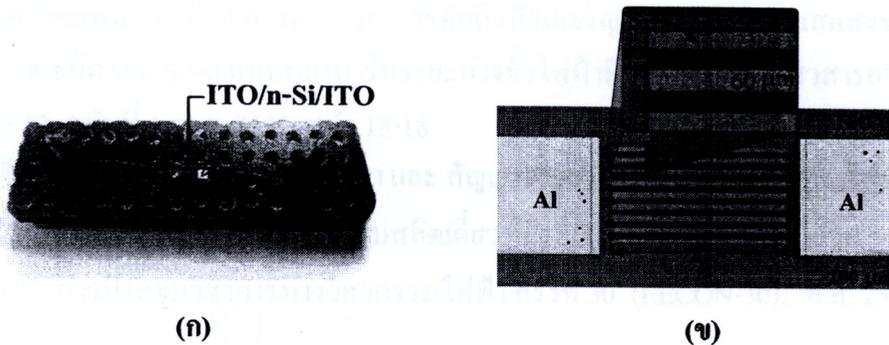
รูปที่ 3.9 ความแตกต่างระหว่างกระบวนการกัดชั้นฟิล์มแบบลิฟออฟ และการกัดชั้นฟิล์มทั่วไป



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายฟิล์ม ITO ที่เคลือบบนฐานรองที่เป็นกระจก โดยมีความหนาประมาณ 500 nm



หลังกระบวนการในรูปที่ 3.12 แผ่นผลึกซิลิคอนจะถูกนำไปเคลือบโลหะอลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า และนำไปตัดแยกชิ้นงานออกจากกัน โดยชิ้นงานจะถูกนำไปเชื่อมต่อขาเพื่อใช้ในการทดสอบวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไปดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต (ก) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน และ (ข) ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 100 เท่า

### 3.3 เอกสารอ้างอิง

- [3.1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กุลวรางค์ นุตะมาน และ อิศระ ศรีธนะชัย, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโปรงแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), พ.ศ. 2551, หน้า 1201-1204
- [3.2] สมเกียรติ สุขเกษ, **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544
- [3.3] มานิดา ค้วงแสง, **การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเทอร์ดิเจิต**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2548
- [3.4] A. Müller, G. Konstantinidis, M. Dragoman, D. Neculoiu, A. Dinescu, M. Androulidaki, M. Kayambaki, A. Stavrinidis, D. Vasilache, C. Buiculescu, I. Petrini, C. Anton, D. Dascalu and A. Kostopoulos, “Ultraviolet MSM Photodetector Based on GaN Micromachining”, *Microelectronics Journal*, 2008
- [3.5] Chino K, “Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment”, *Solid State Electronics*, Vol. 16, 1973, pp. 119-121
- [3.6] สราวุธ วิศวกรรมสุข, **การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2545

- [3.7] ธเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สรายุทธ์ วิศวแสงสุข “ผลกระทบของอุณหภูมิซินเดอริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิดAl/n-Si/Al แบบพลาเนียร์”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, พ.ศ. 2547, หน้า 14-19
- [3.8] ธเนศ โชะเหม, มานิตา ค้วงแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด ชนิดAl/n-Si/Al แบบพลาเนียร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, พ.ศ. 2548, หน้า 13-18
- [3.9] 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
- [3.10] Biren Patel, Akil Sutton and Leslie George, “Liftoff Process Using Positive Photoresist”, March 6, 2003
- [3.11] P. Carlberg, M Graczyk, E.-L. Sarwe, I. Maximov, M. Beck and L. Montelius, “Lift-off process for nanoimprint lithography”, Microelectronic Engineering, Vol. 67-68, 2003, pp. 203-207
- [3.12] D. Monsma and I. Applebaum, “A reliable lift-off process”, Marcuslab Harvard University, 2002