

บทที่ 2

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแสง และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

วัสดุโปร่งใส (transparent materials) เป็นวัสดุที่มีจุดเด่นที่สามารถควบคุมปริมาณหรือความเข้มแสงให้ผ่านตัววัสดุได้ วัสดุโปร่งใสถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ดังเช่น ในอุตสาหกรรมกระจก เพื่อสร้างกระจกป้องกันความร้อน ทำให้ใช้พลังงานภายในอาคารที่อยู่อาศัย และสำนักงานทั่ว ๆ ไปน้อยลง การเคลือบวัสดุโปร่งใสในอุตสาหกรรมแว่นตา และการใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากการใช้งานของวัสดุโปร่งใสเกี่ยวข้องกับการส่งผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นย่านต่าง ๆ ดังนั้นคุณสมบัติในการทะลุผ่านของแสงในวัสดุโปร่งใสจึงเป็นเรื่องสำคัญ ที่ต้องเรียนรู้ และทำความเข้าใจ เพื่อนำวัสดุเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างถูกต้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแสง เมื่อแสงตกกระทบที่ผิวของสารกึ่งตัว จากนั้นกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของวัสดุโปร่งใส โดยเฉพาะวัสดุโปร่งใส ITO ซึ่งเป็นวัสดุที่สำคัญของงานวิจัยนี้ และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รวมทั้งสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงที่สำคัญ

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประกอบไปด้วย การดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้เรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 400-700 nm โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” โดยปรากฏการณ์ที่แสงแสดงลักษณะสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห และการแทรกสอด เป็นต้น แต่ในฟิสิกส์ควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสง ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{\lambda} \quad (\text{J}) \quad (2.1)$$

หรือ

$$E_{\text{photon}} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{q\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{eV}) \quad (2.2)$$

โดยที่	ν	คือ ความถี่ (Hz)
	λ	คือ ความยาวคลื่นแสง (μm)
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-sec
	c	คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec
	q	คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

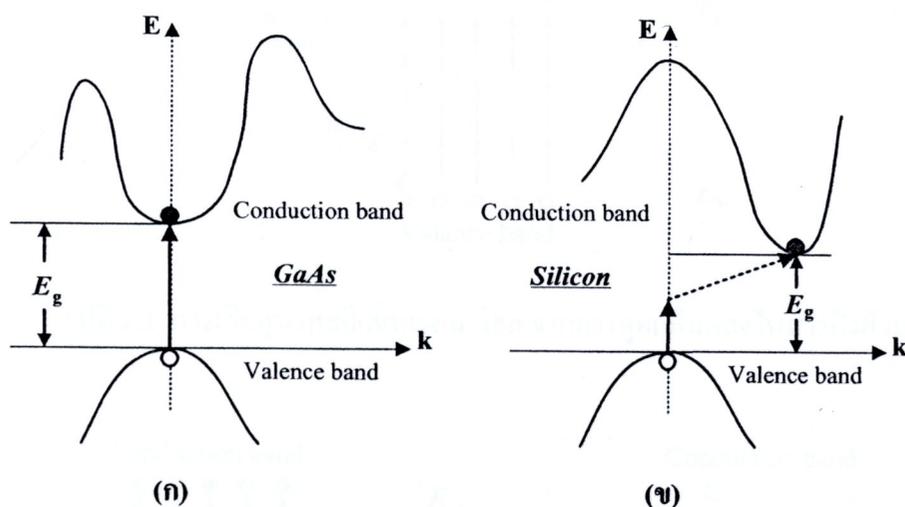
เมื่อพลังงาน โฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap ; E_g) ของสารกึ่งตัวนำ ($E_{\text{photon}} \geq E_{g(\text{semi})}$) สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{semi})}$ การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น

2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง [2.1]

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่สามารถอธิบายถึงสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) และสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor) ได้เป็นอย่างดีคือกราฟ E-k diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งของค่าพลังงานที่สำคัญ 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าหรือจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า กับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยพบว่าในสารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs), อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAs), อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์จะอยู่ตรงกัน ดังรูปที่ 2.1 (ก) เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า ช่องแถบตรง (direct band gap) และสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง ส่วนกรณีที่สารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น ซิลิคอน (Si), เยอรมันเนียม (Ge) หรือสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุอื่นๆ ซึ่งตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบ วาเลนซ์จะอยู่ไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า ช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) โดยที่สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้จะถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง โดยปกติจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง $k = 0$

แต่จากรูปที่ 2.1 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าจะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือ จุดทั้งสองนี้มีค่า k หรือค่าโมเมนตัมที่ต่างกัน ดังนั้นลักษณะสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะแตกต่างกันมาก เช่นลักษณะสมบัติทางด้านแสง (optical properties) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงโฟตอนจากแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา

เท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (E_g) และเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบนี้เกิดได้ง่ายทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดีจึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (optical devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง เลเซอร์ไดโอด และตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกกลับลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อนแล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด ในทำนองเดียวกันพลังงานโฟตอนจากแสงไม่สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรงถึงแม้ว่าพลังงานจากโฟตอนจะมีค่าเพียงพอ แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า จึงทำให้สารกึ่ง-ตัวนำช่องแถบไม่ตรงมีการดูดกลืนหรือการคายพลังงานแสงไม่คืบนัก สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงนี้จึงไม่นิยมนำมาทำเป็นไดโอดเปล่งแสง หรือเลเซอร์ไดโอด แต่สำหรับตัวตรวจวัดแสงยังคงมีการใช้งานอยู่ โดยเฉพาะซิลิคอน



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E-k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่าง ๆ

(ก) ช่องแถบตรง และ (ข) ช่องแถบไม่ตรง

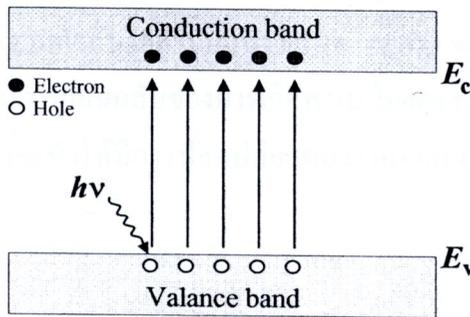
2.1.3 การดูดกลืนแสง และการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล [2.1]

กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดจากการให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ($> E_g$) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ($E = h\nu$) ที่มีพลังงานมากพอ ($> E_g$) ที่จะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อดูดกลืนแสงเข้าไปแล้วสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้น

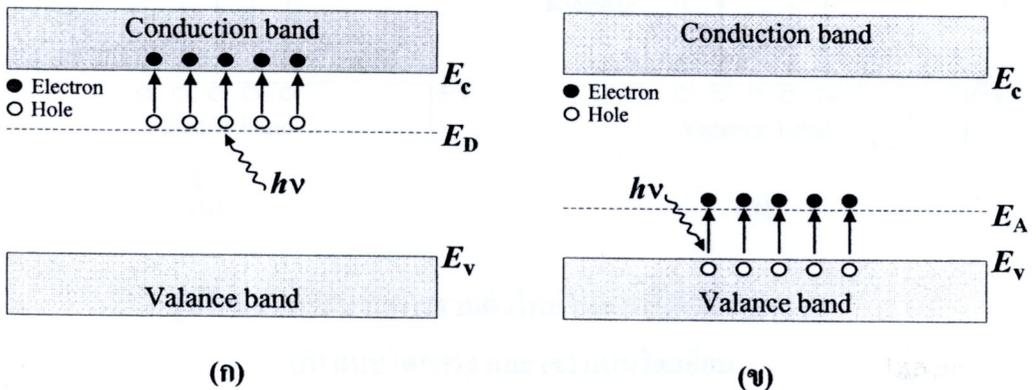


ที่แถบวาเลนซ์ซึ่งก็คือ โฮล ซึ่งการเกิดอิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป เช่น ซีลีคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส จะทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (donor level: E_D) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ในส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซีลีคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level: E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ โดย

(ก) สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น และ (ข) สารกึ่งตัวนำ ชนิดพี

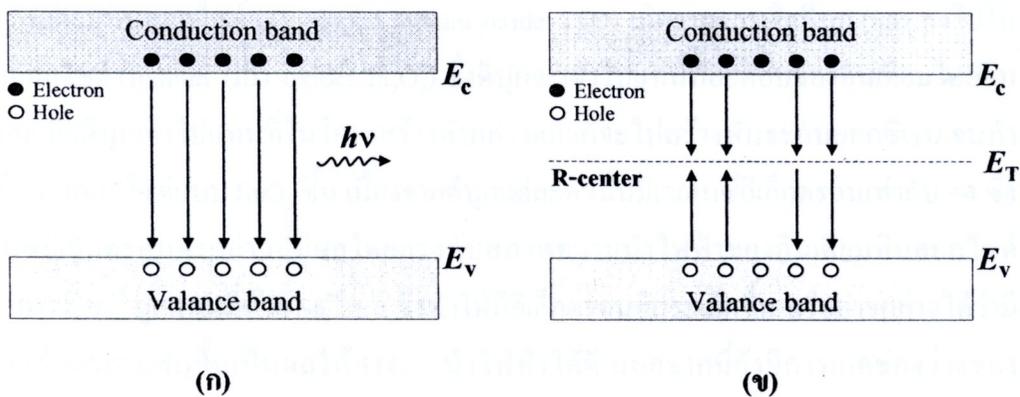
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่..... - 7 S.A. 2555
เลขทะเบียน..... 190942
เลขเรียกหนังสือ.....



2.1.4 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะ คือ โฮล และอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลตทิซ (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (recombination and generation process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใด ๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปคล้ายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือโฟตอนได้ง่าย



รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบโดยตรง และ (ข) แบบโดยอ้อม

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอม

สารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือ หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

2.2 อินเดียมทินออกไซด์ [2.2-2.6]

ตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ (transparent conducting oxide: TCO) ชนิดอินเดียมทินออกไซด์ หรือ ITO ได้ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 เป็นต้นมา โดยมีจุดประสงค์ของการกีดกันตัวนำชนิดนี้ขึ้น เพื่อต้องการได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่าฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ทั่วไป สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆ ไม่จะเป็นจอแสดงผลแบบแอลซีดี, การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแม้กระทั่งนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ดังเช่นในงานวิจัยนี้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการกีดกันวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสชนิดใหม่ๆ ขึ้นมากมาย แต่ยังไม่มียานวิจัยใดปรากฏว่ามีวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ITO โดยสามารถอธิบายถึงสมบัติโดยทั่วไปของ ITO รวมถึงสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของ ITO ได้ดังนี้

2.2.1 สมบัติทั่วไปของอินเดียมทินออกไซด์

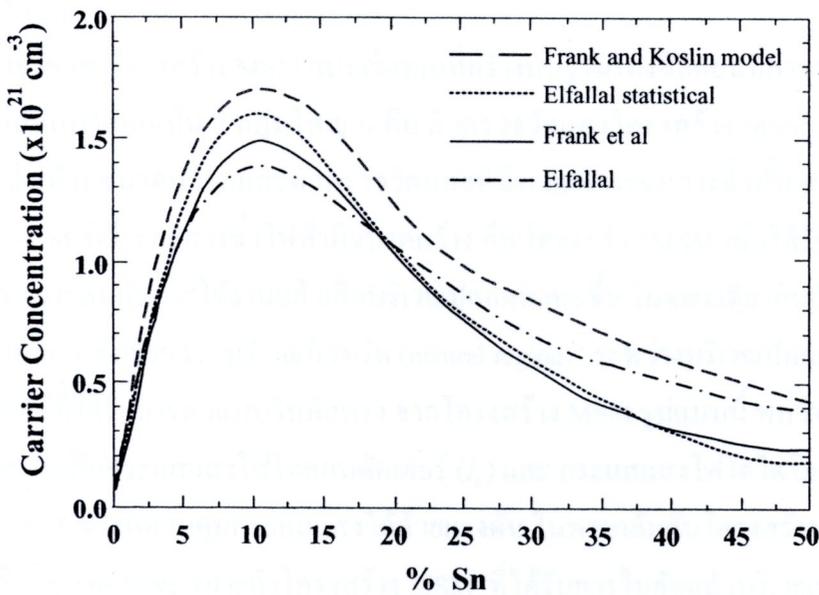
อินเดียมทินออกไซด์ (Tin-doped indium oxide: ITO) เกิดจากการเจือดีบุก (Sn) ลงไปในอินเดียมออกไซด์ (Indium (III) oxide: In_2O_3) ซึ่งดีบุกจะเข้าไปแทนที่อะตอมของอินเดียมไอออน (In^{3+}) และเมื่อดีบุกเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างดังกล่าวแล้วก็จะไปสร้างพันธะกับออกซิเจน จนทำให้เกิดเป็นทินออกไซด์แบบ SnO_2 ขึ้น เนื่องจากดีบุกแต่ละตัวนั้นมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ +4 ซึ่งค่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้มีผลโดยตรงกับสภาพความนำไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ เนื่องจากการที่ In^{3+} ถูกแทนที่ด้วย $\text{Sn}^{4+} + e^-$ จึงทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่ามีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ ITO นำไฟฟ้าได้ดี นอกจากนี้ยังมีการเกิดช่องว่างของออกซิเจนขึ้นในโครงสร้างของ ITO ด้วย โดยช่องว่างของออกซิเจนเหล่านี้ยังเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้สภาพความนำไฟฟ้าของ ITO มีค่าสูงขึ้นด้วย

จากงานวิจัยของ I. Hamberg และ C.G. Granqvist ซึ่งได้ศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีต่าง ๆ กัน ด้วยเครื่อง Transmission electron microscope (TEM) พบว่าอินเดียมทินออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างในการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบ Body Centered Cubic (BCC) โดยมีค่าคงที่ผลึก (lattice constant) ประมาณ 10.118 Å และสีของฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีสีเหลืองสว่างโดยขึ้นกับระดับการเกิดขีดชั้น [2.7]

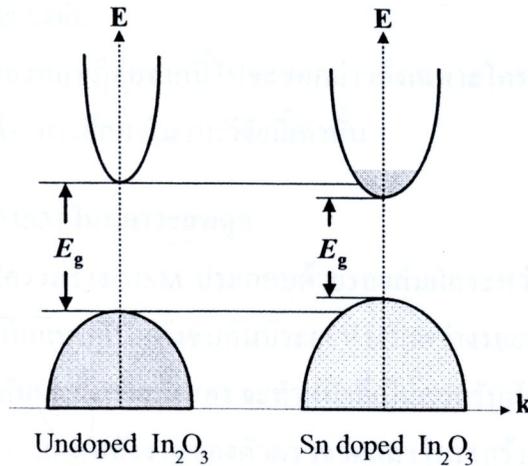
2.2.2 สมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์

อินเดียมทินออกไซด์จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานที่ค่อนข้างกว้าง มีค่าอยู่ที่ประมาณ 3.3-4.3 eV โดยมีคุณสมบัติทางแสงเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำทั่วไป กล่าวคือ มีการดูดกลืนพลังงานแสง และการส่องผ่านของแสงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 ข้างต้น โดยจากช่องว่างแถบพลังงานของอินเดียมทินออกไซด์ จึงทำให้อินเดียมทินออกไซด์สามารถให้แสงส่องผ่านได้ตั้งแต่ 380-2000 นาโนเมตร หรือตั้งแต่ความยาวคลื่นช่วงของตามองเห็นไปจนถึงแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด และมีค่าดัชนีหักเหแสงในช่วงการมองเห็นประมาณ 2

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์นั้นจะถูกกำหนดด้วยตัวแปรที่สำคัญ คือระดับความเข้มข้นในการเจือสาร ซึ่งเมื่อมีการเจือทินบุกลงในอินเดียมออกไซด์มากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวค่าหนึ่ง แล้วความหนาแน่นของพาหะเหล่านั้นก็จะมีค่าลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความน่าจะเป็นในการเข้าครอบครองของประจุบวกที่อยู่ในตำแหน่งข้างเคียงของอะตอมทินบุก ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าในอินเดียมทินออกไซด์ลดลง โดยจากรูปที่ 2.5 นั้น อินเดียมทินออกไซด์มีค่าความหนาแน่นของพาหะสูงที่สุดอยู่ที่ระดับ 10^{21} ที่ความเข้มข้นของทินบุกประมาณ 10% โดยความหนาแน่นของพาหะนี้มีความสัมพันธ์ และเกี่ยวข้องกับสภาพนำไฟฟ้าของของอินเดียมทินออกไซด์ที่มีค่ามากกว่า $10^3 (\Omega\text{-cm})^{-1}$ โดยระดับความเข้มข้นในการเจือทินบุกลงในอินเดียมออกไซด์จะทำให้ระดับพลังงานของอินเดียมออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งทำให้อินเดียมทินออกไซด์มีคุณสมบัติที่คล้ายโลหะ กล่าวคือ มีพาหะนำไฟฟ้า หรืออิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบนำไฟฟ้าพร้อมที่จะนำไฟฟ้าได้เสมอ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพาหะ และ เปอร์เซนต์การเจือทินบุก ลงในอินเดียมออกไซด์ จากการทดลอง [2.8-2.10]



รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบพลังงานของอินเดียมออกไซด์ และ อินเดียมทินออกไซด์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าในข้างต้นจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม ได้แก่ อุณหภูมิชั้นงาน, ความดันก๊าซออกซิเจนในกระบวนการเคลือบ และ อัตราการเคลือบ เป็นต้น

2.3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ จะประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ หรือรอยสัมผัสชนิดเดียวกัน 2 รอยสัมผัสที่ต่อบนพื้นหลังชนิดกัน (สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับรอยสัมผัสชนิดเดียวกัน สามารถอ่านได้จากเอกสารอ้างอิง [2.11, 2.12])

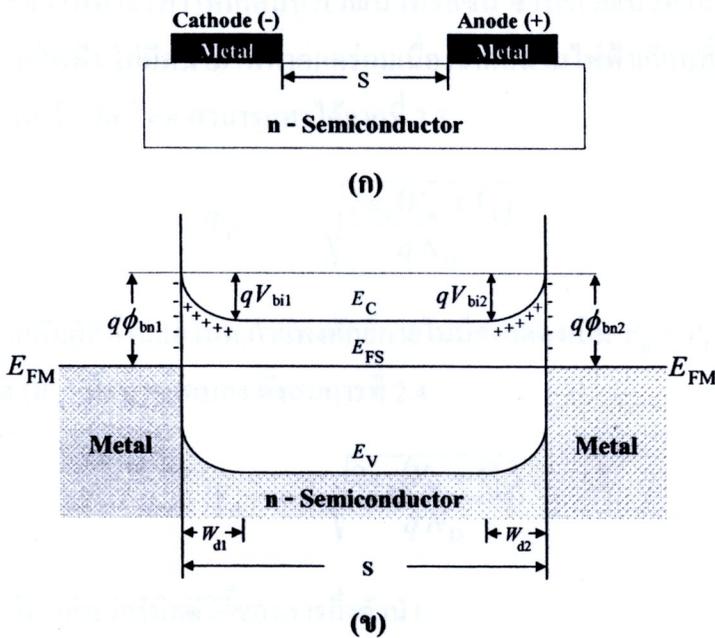
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนที่สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง และตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วสั้น ความหมายของโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง คือ โครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่เหมาะสมกับการใช้งานแล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังคงเหลือส่วนบริเวณที่เป็นกลาง ซึ่งเรียกว่า “บริเวณนิวทรัล (neutral region)” ระหว่างบริเวณปลอดพาหะกับรอยสัมผัสชนิดเดียวกันที่ได้รับการต่อแบบไบอัสตรง จากโครงสร้าง MSM รูปแบบนี้ พบว่ากระแสแสงจะเกิดขึ้นสองส่วนเป็นกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ (I_C) และ กระแสแสงโฟโตไดโอด (I_D) จึงทำให้เกิดจุดเด่น คือ สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน ในทางกลับกันโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นจะหมายถึงโครงสร้าง MSM ที่ได้รับการไบอัสแล้วบริเวณปลอดพาหะจะครอบคลุมช่องรับแสงทั้งหมดไม่มีบริเวณนิวทรัล ซึ่งทำให้มีจุดเด่นตรงที่ได้รับความเข้มแสงมากขึ้น

ในขณะที่เดียวกันจะได้รับการตอบสนองทางความถี่เพิ่มขึ้น ด้วยแต่โครงสร้างแบบนี้จะไม่สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน

สำหรับในส่วนของทฤษฎีต่อจากนี้ไปจะขอกกล่าวถึงเฉพาะโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เท่านั้น

2.3.1 โครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ จำนวนสองรอยสัมผัสต่อกันแบบหันหลังชนกันมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (S) โดยสารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองทั้งสอง จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุล ความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.7 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ชนิดกึ่งขั้วของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร



รูปที่ 2.7 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM และ (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน

2.3.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคกีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคกีย์ ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current: I_{dark}) ของโครงสร้าง MSM โดยกระแสมืดของโครงสร้าง MSM จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก [2.13]

ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้าง MSM กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง คือ มีผลรวมความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดและด้านแอโนดน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจึงทำให้เกิดมีบริเวณนิวทรัลขึ้น ซึ่งบริเวณนิวทรัลนี้จะพิจารณาว่ามีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด สามารถหาได้จากที่ 2.3

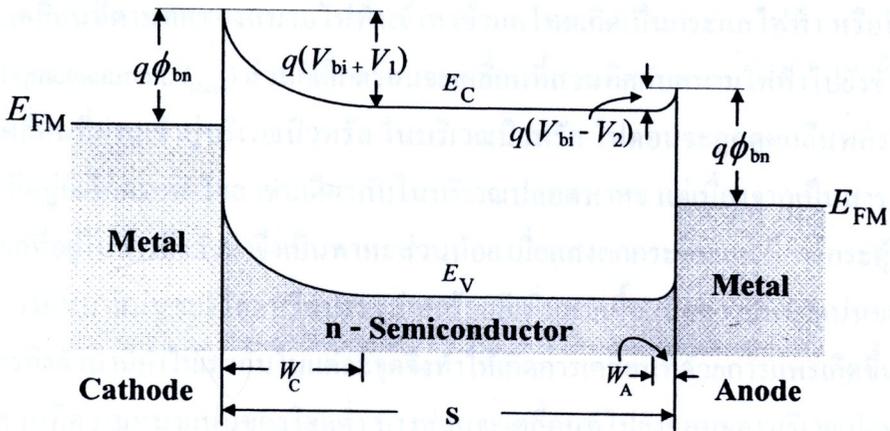
$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_1)}{qN_D}} \quad (2.3)$$

ส่วนที่รอยสัมผัสด้านแอโนด กำแพงศักย์ภายในมีค่าลดลงเป็น $V_{bi} - V_2$ และบริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด (W_A) มีขนาดแคบลง ดังสมการที่ 2.4

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_2)}{qN_D}} \quad (2.4)$$

- โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
 q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
 N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

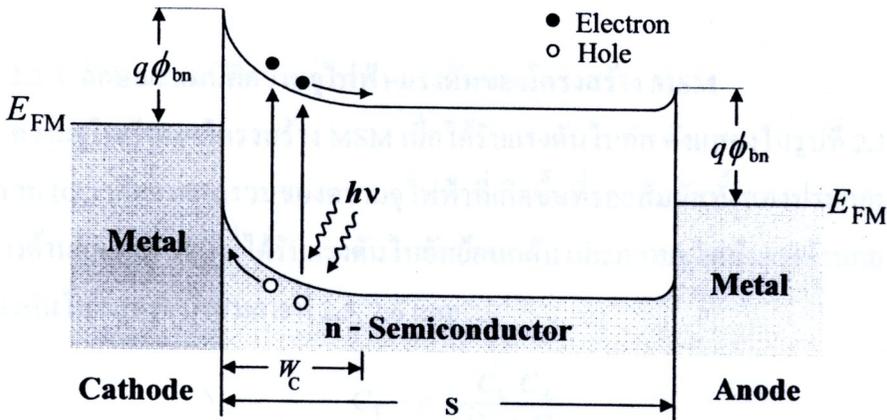
V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในคานสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

2.3.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ

โครงสร้าง MSM สามารถใช้ทำหน้าที่ตรวจจับแสงได้ดีเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสงชนิดอื่น ๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกระแสแสงในตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัส แสดงดังรูปที่ 2.9 เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่าง

พลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า กระแสแสง (photocurrent: I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะ และถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [2.14, 2.15]

2.3.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยความจุไฟฟ้ารวม (C_T) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสองประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด (C_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านแอโนด (C_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.5, 2.6 และ 2.7

$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \quad (2.5)$$

โดยที่

$$C_C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.6)$$

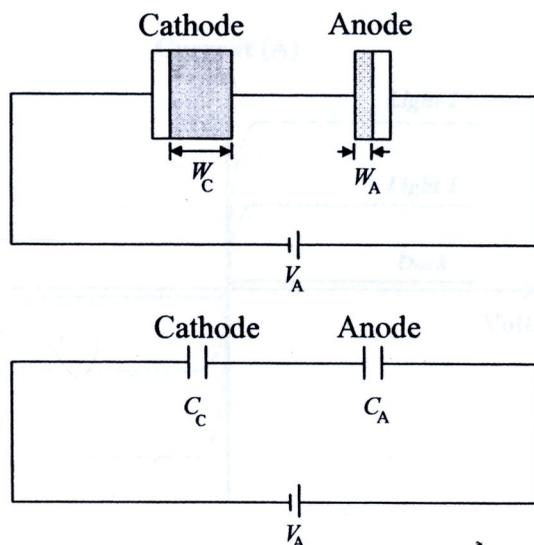
$$C_A = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.7)$$

โดย ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

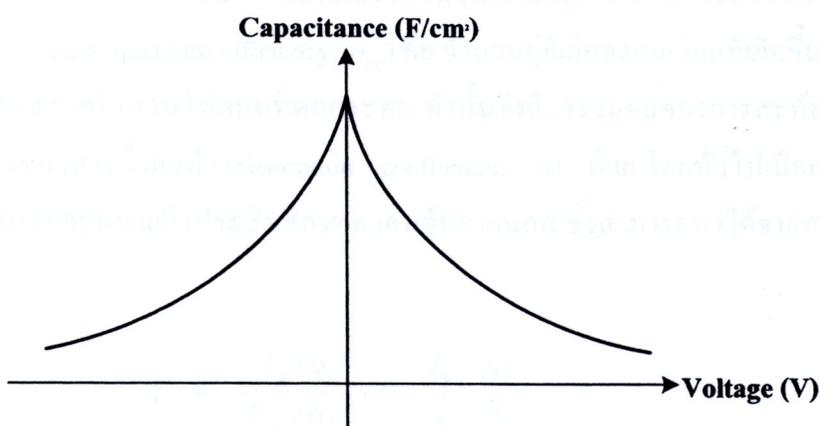
V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

V_A คือ แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสด้านแคโทด



รูปที่ 2.10 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัส

จากรูปที่ 2.11 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัส โดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ

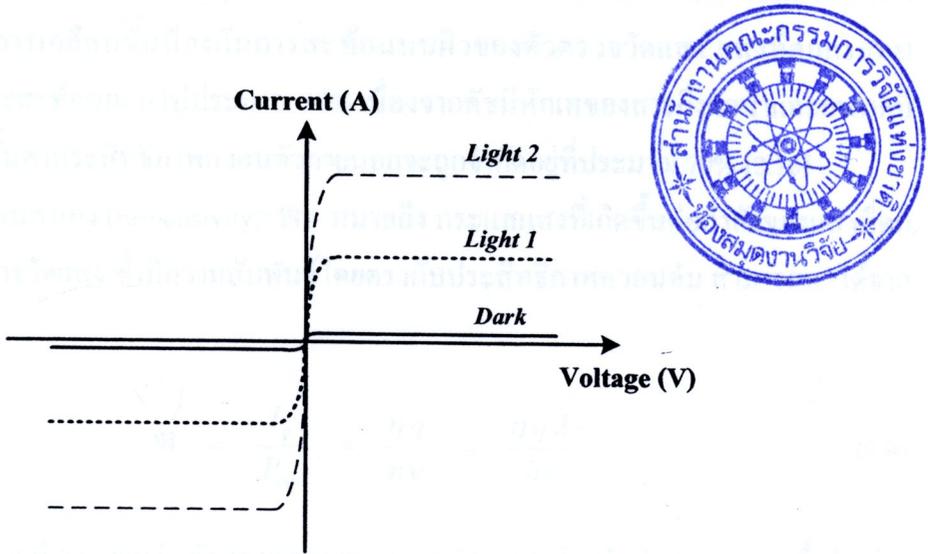


รูปที่ 2.11 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

2.3.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ในรูปที่ 2.12 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่อง รัับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของ

MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่ ได้รับ โฟตอนตรงและด้านที่ ได้รับ โฟตอนย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบบมีความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 2.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบ

2.3.6 ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพตอบสนอง และผลตอบสนองต่อสเปกตรัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency: η) หมายถึง จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบสารกึ่งตัวนำก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสออกสู่วงจรภายนอก แบ่งได้เป็น ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency: η_{int}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบ ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency: η_{ext}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบ ดังนั้นจึงต้องรวมผลของการสะท้อน และค่าคงที่การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ (absorption coefficient: α) ด้วย โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพควอนตัมจะหมายถึงประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.8 คือ

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / hv} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{hv}{P_{inc}} \tag{2.8}$$

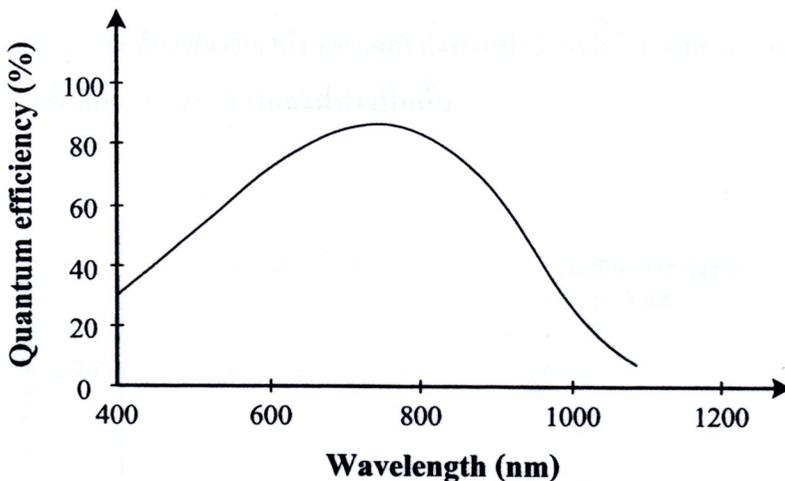
- โดยที่ P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบบ (W)
- q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
- I_p คือ กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง
- h คือ ค่าคงที่ของพลังค์
- ν คือ ความถี่ของคลื่น

ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในโดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 90% แต่ถ้าไม่มีการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนบนผิวของตัวตรวจวัดแสง แสงที่ตกกระทบชั้นสารกึ่งตัวนำจะสะท้อนออกไปประมาณ 30% เนื่องจากดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำและอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกจะถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 70% [2.16]

สภาพตอบสนอง (responsivity; \mathcal{R}) หมายถึง กระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสง ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม สามารถหาได้จากสมการที่ 2.9 คือ

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 พบว่า ค่าสภาพตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของตัวตรวจวัดแสงตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอน

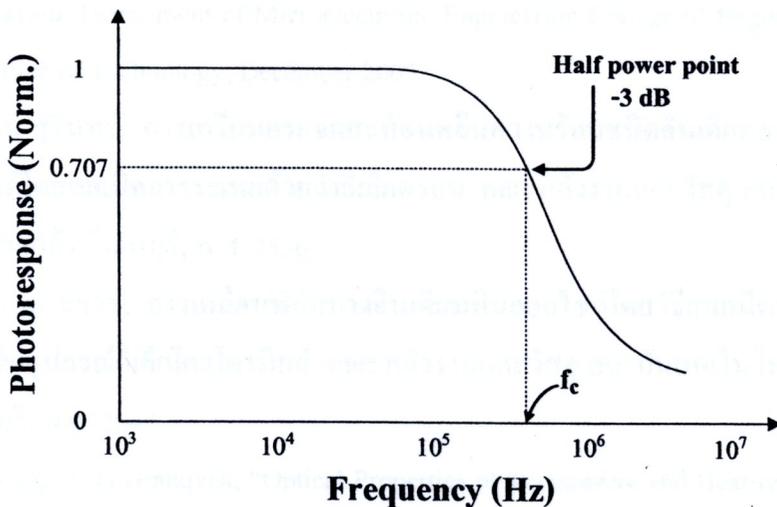
ผลตอบสนองของสเปกตรัมของแสง หมายถึง คุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืนโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นมากขึ้นและมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้า เมื่อความยาวคลื่นลดลงค่าคงที่ในการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดการดูดกลืนโฟตอนเฉพาะบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์รวมตัวที่ผิวทำให้ผลตอบสนองตัวตรวจวัดแสงลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ผลตอบสนองต่อ

สเปกตรัมของแสงในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน สำหรับตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอนจะมีผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงดังรูปที่ 2.13

จากรูปที่ 2.13 จะพบว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น โดยมีผลตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared) และการตอบสนองจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นความยาวคลื่นสูงสุดที่สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถตอบสนองได้ คือ 1110 nm

2.3.7 ความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอกตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น (t_r) และช่วงเวลาขาลง (t_f) โดยช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นกับแพ็คเกจต่าง ๆ คือ เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ, เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ และค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงกับค่าโหลด ความต้านทานภายนอก ดังนั้นถ้าต้องการให้ตัวตรวจวัดแสงตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูง ๆ จะต้องพิจารณาถึงแพ็คเกจทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มีพื้นที่ขนาดเล็กๆ เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

แบนด์วิดท์ (bandwidth) คือ อัตราความเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณความถี่ค่าต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบาง

ประการของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.14 ในทางปฏิบัติการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency: f_c) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (half power point) หรือมีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงมีความหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่ตัวตรวจวัดแสงสามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานตัวตรวจวัดแสงมีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ

2.4 เอกสารอ้างอิง

- [2.1] สมเกียรติ สุขเกษ, **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544
- [2.2] อรรถพล คล้าชื่น, **การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองรับพลาสติกโดยอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอรืงแบบควบคุมเวลาก๊าซ**, คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [2.3] จิร โชติ อินทร์เนตร, **การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีการระเหยสารแบบใช้ไอออนช่วย**, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2544
- [2.4] 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
- [2.5] ไชยรัตน์ สุรินทร์, **การเตรียมกระจกสะท้อนคลื่นความร้อนอินเดียมออกไซด์เจือดีบุกออกไซด์โดยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน**, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2536
- [2.6] พิรินทร พลายเวช, **การเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีแมกนีตรอนสเปคเตอรืงเพื่อให้ได้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์**, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [2.7] I. Hamberg, C.G.Granqvist, "Optical Properties of Transparent and Heat-reflecting Indium Tin Oxide Films: The Role of Ionized Impurity Scattering", *Appl. Phys. Letters*, Vol. 44, No. 8, 1984, pp. 721-723
- [2.8] I. Elfallal, R. D. Rilkington, A. E. Hill. "Formation of a statistical thermodynamic model for the electron concentration in heavily doped metal oxide semiconductor applied to the tin-doped indium oxide system", *Thin solid films*, Vol.223, No.2, Feb. 1993, pp.303-310

- [2.9] Joseph Ederth, **Electrical Transport in Nanoparticle Thin Films of Gold and Indium Tin Oxide**, doctoral degree dissertation, Uppsala University, 2003, pp. 4-6
- [2.10] L. Gupta, A. Mansingh and P. K. Srivastava, "Band Gap Narrowing and the Band Structure of Tin Doped Indium Oxide Films", *Thin Solid Films*, 176, 1989, pp. 33-44
- [2.11] สมเกียรติ สุขเกษ, **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2545
- [2.12] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของโครงสร้างอุปกรณ์ Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนร์**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [2.13] S. M.Sze, D.J. Coleman, Jr. and A.Loya, "Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structure", *Solid-State Electronics*, Vol. 14, 1971, pp. 1209-1218
- [2.14] 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, October 2003, pp. 1811-1816
- [2.15] 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, October 2001, pp. 1815-1819
- [2.16] P. R. Berger, "MSM photodiodes", *IEEE Potentials*, Vol. 15, No. 2, 1996, pp. 25-29