

การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้ อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วโลหะโปร่งใส

Optical Response of MSM Structure Photodetector Using Indium Tin Oxide as Transparent Electrodes

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวัดการตอบสนองทางแสงแบบกระแสสลับ (ac) ในช่วงความถี่ต่ำ (1 kHz-2 MHz) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น โดยใช้อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิต จากการศึกษาการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO จะมีย่านลดลง เมื่อให้ความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น เนื่องจากความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่มีค่ามากขึ้น โดยพบว่า ตัวตรวจวัดแสงที่มีความกว้างของขั้วไฟฟ้าเป็น 20, 40, 60 และ 80 μm จะทำให้ความถี่คutoffมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz และ 90 kHz ตามลำดับ

คำสำคัญ : ตัวตรวจวัดแสงแบบสารกึ่งตัวนำ; ซิลิคอน โฟโตไดโอด; โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ; อินเดียมทินออกไซด์/เอ็น-ซิลิคอน/อินเดียมทินออกไซด์; ซีออตต์กีโฟโตไดโอด

Abstract

This paper reported the alternating current (ac) characteristics on low frequency (1 kHz-2 MHz) optical response of the n-silicon based metal-semiconductor-metal (MSM) structure photodetectors using indium tin oxide (ITO) as the interdigitated transparent electrodes. The experimental results showed that as the electrode width increased, the optical response of ITO/n-Si/ITO was reduced because the contact capacitance increased. The changing electrode widths of ITO/n-Si/ITO photodetectors were 20, 40, 60 and 80 μm , the cutoff frequencies were 650 kHz, 350 kHz, 250 kHz and 90 kHz, respectively.

Key words : Semiconductor photodetector; Silicon Photodetector; Metal-semiconductor-metal; ITO/n-Si/ITO; Schottky Photodiode

1. บทนำ

ฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide) หรือฟิล์ม ITO เป็นสารกึ่งตัวนำแบบดีเจเนอเรต ชนิดเอ็น (n-type degenerate semiconductor) ที่มีช่องว่างแถบ

พลังงานกว้าง (~ 3.8 eV) [1] และด้วยการเจือทินุก (tin: Sn) เข้าไปในอินเดียมออกไซด์ ทำให้ฟิล์ม ITO มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ($\approx 10^{-3}$ - 10^{-4} $\Omega\text{-cm}$) [2, 3] และมีความโปร่งใสสูง แสงสามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์ม ITO ได้ดี

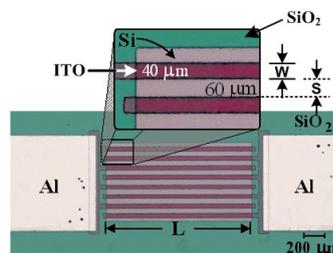
(มากกว่า 85% [2]) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด ดังเช่น ใช้สร้างในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronic devices), ทรานซิสเตอร์แบบฟิล์มบางที่สร้างส่วนเกตด้วยสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric-gate thin film transistor) และอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic devices) [4-6] เป็นต้น ถึงแม้ว่าวัสดุที่ใช้สร้างขั้วโลหะโปร่งใสจะมีหลายชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), แคดเมียมออกไซด์ (CdO) และแกเลียมอินเดียมออกไซด์ (GaInO₃) เป็นต้น แต่วัสดุโปร่งใส ITO กลับได้รับความสนใจมากกว่าวัสดุโปร่งใสชนิดอื่น ๆ เพราะว่า แสงในช่วงที่ตามองเห็นสามารถทะลุผ่านได้ดี, มีราคาถูก และสามารถยึดเกาะกับซิลิคอน หรือซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี ส่วนกระบวนการสร้างฟิล์ม ITO สามารถสร้างได้หลายวิธี เช่น การระเหยในสุญญากาศ, การสปัตเตอร์, การจุ่ม และการพ่น เป็นต้น นอกจากนี้รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างซิลิคอนกับฟิล์มบาง ITO ยังเป็นรอยสัมผัสแบบช็อดต์กี ทำให้สามารถสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้หลายชนิด ดังเช่น โซลาร์เซลล์ [6], ตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ [7] และตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ [8]

ในบทความนี้นำเสนอการศึกษาการตอบสนองทางแสงแบบกระแสสลับ (ac optical response) ในช่วงความถี่ ตั้งแต่ 1 kHz ถึง 2 MHz ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตที่สร้างขึ้นบนแผ่นฐานรองซิลิคอน ชนิด n โดยใช้ฟิล์มบาง ITO ทำหน้าที่เป็นขั้วโลหะโปร่งใส

2. การเตรียมชิ้นงาน

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO เริ่มต้นโดยนำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด n ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) 5-10 Ω -cm หนาผิวหน้าผลึก (100) ความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400 μm มาทำความสะอาด จากนั้นนำไปสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) หนา 400 nm แล้วเปิดชั้น SiO₂ เพื่อสร้างเป็นส่วนรับแสง และรอยสัมผัสระหว่างชั้น ITO กับแผ่นซิลิคอน (ITO/n-Si) ด้วยกระบวนการโฟโตลิ

โกราฟี สำหรับฟิล์มบาง ITO สร้างจากเครื่องอาร์เอฟสปัตเตอร์ (SPF-210 RF sputtering system ของบริษัท Anelva Corporation โดยใช้ความถี่วิทยุ 13.56 MHz) ที่ใช้กำลังไฟฟ้า 100 W ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่มีความดันภายในห้องสปัตเตอร์ 4×10^{-3} Pa โดยฟิล์มบาง ITO มีความหนาประมาณ 500 nm (อัตราการเกิดฟิล์ม ITO 16 nm/นาที่) จากแผ่นอินเดียมทินออกไซด์บริสุทธิ์ (99.99% ของบริษัท Kurt J. Leskar) ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง 90 wt% In₂O₃ กับ 10 wt% SnO₂ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 cm (ฟิล์มบาง ITO จากการสปัตเตอร์ไม่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนระหว่างการสร้าง และหลังจากการสร้างฟิล์ม) จากนั้นสร้างลวดลายโลหะอลูมิเนียม (Al) ด้วยเทคนิคการระเหยในสุญญากาศ เพื่อสร้างเป็นส่วนเชื่อมต่อภายนอก ในรูปที่ 1 เป็นตัวอย่างชิ้นงานของ MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สร้างเสร็จแล้ว จากนั้นจึงนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว ไปวัดสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงต่อไป การทดลองในบทความนี้ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง



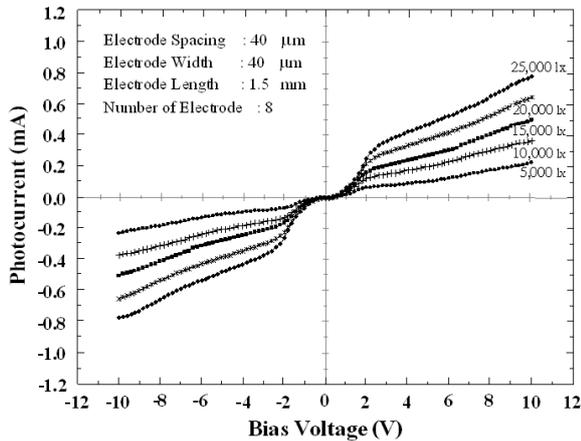
รูปที่ 1 ตัวตรวจวัดแสงแบบอินเตอร์ดิจิต ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่สร้างเสร็จแล้ว โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) = 60 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) = 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้า (L) = 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า หรือ ฟิงเกอร์ (N) = 8 ขั้ว

3. การทดลอง และผลการทดลอง

3.1 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันกับความเข้มแสง

ในรูปที่ 2 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน (I-V) เพื่อหากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ (จากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO นั้น สามารถตอบสนองต่อแสงแบบกระแสตรงได้เป็นอย่างดี [8] โดย

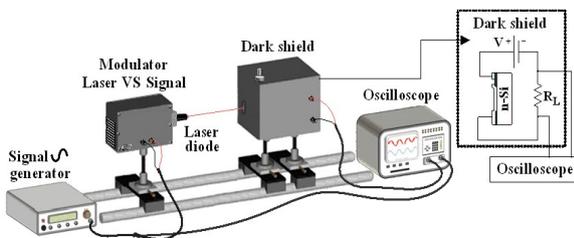
กระแสมีค่าน้อย (ประมาณ $1.5 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$) กระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น สำหรับอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมีค่าค่อนข้างสูง ($I_{\text{photo}}/I_{\text{dark}}$) ดังเช่น ที่ความเข้มแสง $25,000 \text{ lux}$ ให้แรงดันไบอัส 5 V กระแสแสงต่อกระแสมีค่าประมาณ $1,400$ เท่า



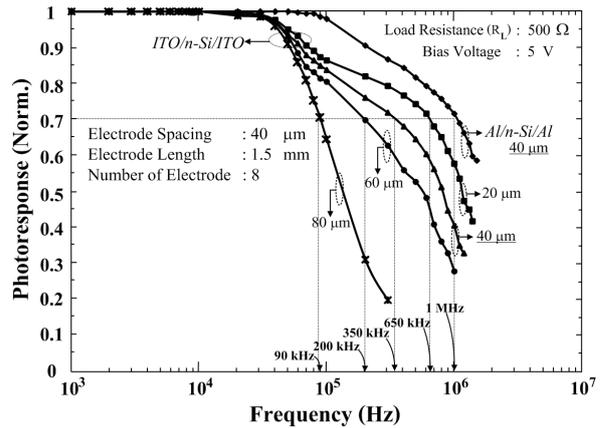
รูปที่ 2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO ที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ

3.2 การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง

เพื่อหาการตอบสนองทางแสง ทำการต่อวงจรดังในรูปที่ 3 โดยใช้แหล่งจ่ายแสงจากเลเซอร์ไดโอด ความยาวคลื่น 670 nm กำลังงาน 2.67 mW และทำการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์เข้ากับเลเซอร์ไดโอดด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ จากนั้นฉายแสงไปยังตัวตรวจวัดแสงที่ถูกต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน 500Ω และบ่อนแรงดันไบอัสเท่ากับ 5 V แล้ววัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป ขณะบ่อนสัญญาณความถี่ต่าง ๆ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 3 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาการตอบสนองทางแสง โดยให้ความต้านทาน โหลด (R_L) เป็น 500Ω และแรงดันไบอัส (V) กับอุปกรณ์ MSM เท่ากับ 5 V

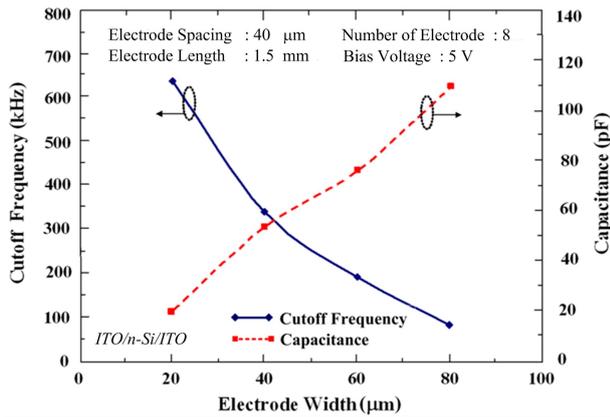


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสง (ซึ่งถูกนอร์มอลไรซ์) กับความถี่ ในช่วง 1 kHz - 2 MHz ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่เปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ $20 - 80 \mu\text{m}$

ในบทความที่แนะนำให้เสนอไว้ก่อนหน้านี้ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) มีค่ามาก (ระยะ $S > 20 \mu\text{m}$) เมื่อให้ความเข้มแสง และแรงดันไบอัสแก่ MSM คงที่ค่าหนึ่ง (ยังคงเหลือบริเวณนิวทรัล) ถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนแปลงระยะ S เพิ่มขึ้น กระแสแสง [9, 10] และการตอบสนองทางแสง [9] ยังคงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบกับการตอบสนองความถี่จึงเป็นความกว้างของขั้วไฟฟ้า (โดยให้ความยาวและจำนวนของขั้วไฟฟ้ามีค่าคงที่) ดังแสดงในรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่า เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น $20, 40, 60$ และ $80 \mu\text{m}$ จะทำให้ความถี่คัทออฟมีการเปลี่ยนแปลงจาก $650 \text{ kHz}, 350 \text{ kHz}, 250 \text{ kHz}$ และ 90 kHz ตามลำดับ กล่าวคือความถี่คัทออฟของตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าลดลง เมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความจุไฟฟ้ามีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่ของรอยสัมผัส ดังนั้นเมื่อความกว้างของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้น จากการวัดความจุไฟฟ้าของ ITO/n-Si/ITO ด้วยเครื่อง HP 4284A (ที่แรงดันไบอัส 5 V) ความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าเป็น $19, 55, 79$ และ 114 pF ที่ความกว้างของขั้วไฟฟ้า $20, 40, 60$ และ $80 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสนั้นมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับการ

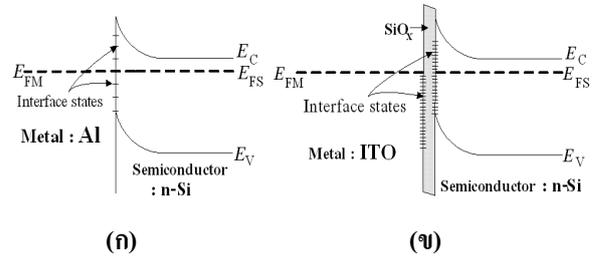
ตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง กล่าวคือเป็นส่วนหนึ่งของค่าเวลาคงตัว (RC time constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความต้านทานโหลด (R_L) กับค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสต่าง ๆ ของตัวตรวจวัดแสง MSM (รวมถึงที่บริเวณขั้วเชื่อมต่อสาย) ดังนั้นเมื่อความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คutoff และความจุไฟฟ้ากับความกว้างของขั้วไฟฟ้า ในช่วง 20 - 80 μm

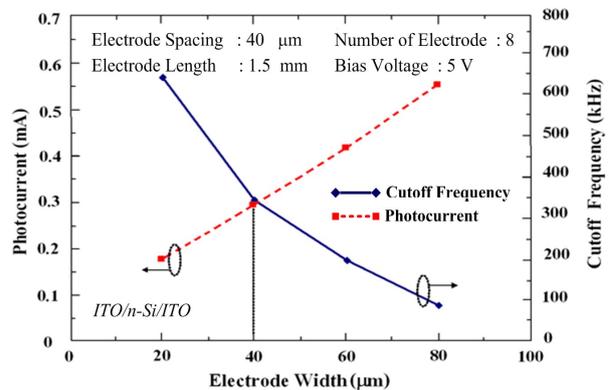
เมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO กับตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al (ขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง) ที่มีขนาดเดียวกัน (ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40 μm, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า 40 μm, ความยาวของขั้วไฟฟ้า 1.5 mm และมีจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว) และสร้างขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 เห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าความถี่คutoff เท่ากับ 350 kHz โดยมีความถี่คutoff เท่ากับ 1 MHz เนื่องจากความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al เนื่องจากที่รอยสัมผัสระหว่าง ITO/n-Si เกิดชั้นออกไซด์บาง ๆ (interface oxide: SiO₂) ขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างซิลิคอนกับออกซิเจนส่วนเกิน (excess oxygen) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคเตอร์ [11-13] โดยแสดงด้วยลักษณะของแถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดออร์ทิคัล ดังในรูปที่ 6 ส่งผลให้ค่าเวลาคงตัว ซึ่งเป็นตัวแปรที่

มีอิทธิพลต่อการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง มีค่าเพิ่มขึ้น (ความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น) จึงทำให้ตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำกว่า



รูปที่ 6 แถบพลังงานของรอยสัมผัสชนิดออร์ทิคัลในภาวะสมดุลความร้อนของ (ก) รอยสัมผัส Al/n-Si (ข) รอยสัมผัส ITO/n-Si

ในรูปที่ 7 เป็นลักษณะสมบัติของกระแสแสง และความถี่คutoffกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะขั้วไฟฟ้าไปรงไซของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ให้มีความกว้างของขั้วไฟฟ้ามากขึ้น จะได้กระแสแสงมากขึ้น แต่กลับทำให้การตอบสนองทางความถี่ลดต่ำลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าขนาดของความกว้างของขั้วไฟฟ้าไปรงไซ ITO ที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทั้งสอง (กระแสแสง ที่ความเข้มแสง 15,000 lux และการตอบสนองทางความถี่) ได้จากจุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองที่ลากลงไปตัดแกนความกว้างของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 40 μm



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และความถี่คutoffกับความกว้างของขั้วไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้า ตั้งแต่ 20-80 μm

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว ที่ได้รับแรงดันไบอัส 5 V

MSM Photodetectors	Barrier Height (eV) [8]	Dark current ($\text{pA}/\mu\text{m}^2$) [8]	Photocurrent [15,000 lux] (mA)	Capacitance (pF)	Cut off frequency (MHz)
ITO/n-Si/ITO	0.74	1.5	0.30	55	0.35
Al/n-Si/Al	0.72	1.3	0.05	26	1.00

ในตารางที่ 1 เป็นตารางสรุป เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงระหว่างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO และ Al/n-Si/Al พบว่าตัวตรวจวัดแสงทั้งสองชนิดมีสมบัติพื้นฐาน (ความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสชนิดดีและกรรไกร) ที่ใกล้เคียงกัน กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO มีค่ามากกว่า Al/n-Si/Al (โดยมีค่าเป็น 6 เท่าของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al) ในขณะที่การตอบสนองทางความถี่ตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al มีค่ามากกว่า โดยมีค่าประมาณ 3 เท่า เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ ITO/n-Si/ITO เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีค่ามากกว่า

4. สรุป

การสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO จากขั้วไฟฟ้าโปร่งใสอินเดียมทินออกไซด์ ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล พบว่าการตอบสนองสัญญาณทางแสงแบบกระแสกลับมาจากตัวแปรที่มีนัยสำคัญในโครงสร้าง คือ การเปลี่ยนแปลงความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของ ITO ซึ่งความกว้างของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ITO ที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้การตอบสนองทางความถี่มีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ระหว่างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO กับชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเดียวกัน (ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า, ความกว้างของขั้วไฟฟ้า, ความยาวของขั้วไฟฟ้า และจำนวนขั้วไฟฟ้ามีค่าเป็น 40 μm , 40

μm , 1.5 mm และ 8 ขั้ว ตามลำดับ) ความถี่คutoff ของ ITO/n-Si/ITO จะมีค่าน้อยกว่า เพราะว่าความจุไฟฟ้าแฝงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่านั่นเอง (รวมถึงผลของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนเชื่อมต่อสายด้วย) ความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมากกว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al เกิดจากชั้นออกไซด์บาง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ และจากผลการทดลองยังพบอีกด้วย ถ้าพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงกับการตอบสนองทางความถี่ที่ลดลง จะได้ความกว้างของขั้วไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นในบทความนี้มีค่าเท่ากับ 40 μm

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณกุลวรงค์ นุตะมาน และคุณ อิศระ ศรีธนชัยที่ช่วยวัดผลการทดลอง และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อบทความนี้

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2554

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech, S. Ueamanapong and N. Atiwongsangthong, "Analysis The Suitable Indium

- Tin Oxide Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), หน้า 1213-1216, 2551
- [2] I. Srithanachai, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen, S. Supadech, “Preparation and Properties Indium Tin-Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photodetectors”, *Advanced Materials Research*, Vol. 55-57, pp. 769-772, 2008
- [3] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กุลวรางค์ นุตะมาน และ อิศระ ศรีธนชัย, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วโปร่งแสงของตัวตรวจจับแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31), หน้า 1201-1204, 2551
- [4] Y. Daghan Gokdel, Ali Osman Sevim, Senol Mutlu and Arda D. Yalcinkaya, “Polymer-MEMS-Based Optoelectronic Display”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 57, No. 1, pp. 145-152, 2010
- [5] Eisuke Tokumitsu, “ITO-Channel Ferroelectric-Gate Thin Film Transistor with Large On-Current”, *International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT’ 06)*, pp. 717-720, 2006
- [6] Tiberiu Mizrah and David Adler, “Operation of ITO/Si Heterojunction Solar Cells”, *Applied Physics Letters*, Vol. 29, No. 10, pp. 682-684, 1976
- [7] Surada Ueamanapong, Itsara Srithanachai, Narin Atiwongsangthong, Putapon Pengpad, Surasak Niemcharoen, Amporn Poyai and Somkiet Supadech, “Fabrication, Characterization and Analysis of ITO/n-Si Schottky Photodetector”, *The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON 2010)*, pp. 776-779, 2010
- [8] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ตัวตรวจจับแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีกระแสสูง โดยใช้ขั้วโลหะโปร่งใส”, *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 27 ฉบับที่ 1, หน้า 25-30, 2553
- [9] ธเนศ โชะเหม, มานิดา ดิวแสง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาตาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง”, *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 22 ฉบับที่ 1, หน้า 13-18, 2548
- [10] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สุรชาติ เมืองอ้อ, “อุปกรณ์ตรวจจับแสง Cr/n-Si/Cr แบบสลิตเดี่ยวในแนวระนาบ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), หน้า 560-563, 2550
- [11] 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”, *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 105, No. 3, pp. 324 -330, 1983
- [12] H. Kobayashi, T. Lshida, K. Nakamura, Y. Nakato, 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, pp. 5288, 1992
- [13] 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. 73, pp. 4344, 1993