

ผลกระทบจากการให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ที่ใช้ใน

ตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO

The Effects of Heat Treatment of ITO Thin Films

Using in ITO/n-Si/ITO Photodetectors

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO โดยฟิล์มบาง ITO ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ซึ่งสร้างจากการสputter ด้วยความถี่วิทยุ (RF) และหลังจากสร้างฟิล์มบาง ITO เสร็จแล้ว จึงนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยเตาแบบพาความร้อนในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนจากการทดลอง พบว่าหลังจากให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO แล้ว ตัวตรวจวัดแสงมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น กล่าวคือ ความหนาแน่นกระแสมืดและความจุไฟฟ้าในโครงสร้างมีค่าลดลง 33% และ 32% ตามลำดับ ในขณะที่กระแสแสงและการตอบสนองความถี่มีค่าสูงขึ้น 40% และ 1.3 เท่า ตามลำดับ

คำสำคัญ : โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ; ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์; อุปกรณ์ทางแสงแบบเชิงราบ; ขั้วโลหะโปร่งใส; การให้ความร้อน

Abstract

This paper reported the improvement of the electrical and optical properties of ITO/n-Si/ITO photodetectors. The indium tin oxide (ITO) thin films as transparent electrodes were deposited by radio frequency (RF) sputtering. The experimental results showed that the properties of ITO/n-Si/ITO photodetectors became better properties after ITO thin films were given by 300 °C heat treatment for 15 minute, in N₂ atmosphere convection furnace. The dark current density and capacitance decreased by 33% and 32%, respectively. While, the photocurrent and cutoff frequency of alternating current (ac) optical response increased by 40% and 1.3 times, respectively.

Keywords : Metal-semiconductor-metal; ITO thin film; Planar optical device; Transparent electrode; Heat treatment

1. บทนำ

ฟิล์มบาง ITO (indium tin oxide: ITO) ได้ถูกนำไปประยุกต์งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น การเคลือบเลนส์แว่นตาเพื่อลดแสง นำไปใช้ในอาคารประหยัดพลังงาน และการใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้

งานของฟิล์มบาง ITO ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้าต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย การนำฟิล์มบาง ITO ไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปมักจะอยู่ใน

ลักษณะของข้อไฟฟ้าโปร่งใสในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น ใช้กับจอภาพผลึกเหลว (LCD), กระดาษอิเล็กทรอนิกส์, โซลาร์เซลล์, โอแอลอีดี (OLED), และตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น เทคนิคการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีการต่าง ๆ (เช่น การสเป็คเตอร์ [1] การใช้โซล-เจล [2] วิธีหมักพิมพ์ [3] และวิธีการพ่น [4] เป็นต้น) เพื่อสร้างให้ฟิล์มบาง ITO มีคุณภาพดี และมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ มีความสำคัญอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตาม ยังมีแนวทางอื่นที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพหลังจากการสร้างฟิล์มบาง ITO (ด้วยเทคนิคที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น) นั่นคือ วิธีการให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีการนี้มีจุดเด่นตรงที่เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย ใช้เวลาน้อย และเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก แต่ได้ฟิล์มบาง ITO ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางแสง และทางไฟฟ้าดีขึ้น

บทความนี้นำเสนอสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ที่มีลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิตัล ด้วยการให้ความร้อนที่เหมาะสม (อุณหภูมิ 300 °C) กับฟิล์มบาง ITO ที่ใช้สร้างเป็นข้อไฟฟ้าโปร่งใส

2. ผลกระทบของฟิล์มบาง ITO กับอุณหภูมิ

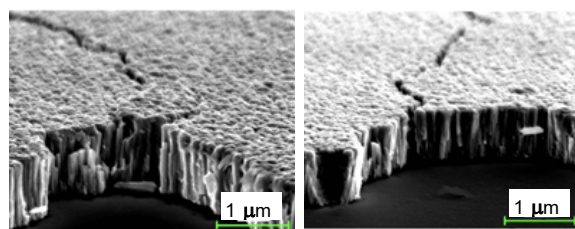
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบกับฟิล์มบาง ITO ความหนา 500 nm สร้างขึ้นจากเครื่องอาร์เอฟสเป็คเตอร์บนฐานรองกระจก (ความหนาของฟิล์มบาง ITO นี้มีความเหมาะสมที่จะใช้สร้างตัวตรวจวัดแสง [5]) เพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ สภาพคล่องของพาหะ ด้วยเทคนิคการวัดจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ และการส่องผ่านแสงของฟิล์มบาง ITO ด้วยเครื่อง UV-VIS Transmittance ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงอุณหภูมิ 200 °C ถึง 500 °C เวลา 15 นาที เปรียบเทียบกับก่อนให้ความร้อน [6] ดังแสดงในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 เมื่อให้ความร้อนมากขึ้นจะส่งผลให้คุณสมบัติด้านต่าง ๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะสภาพต้านทานไฟฟ้า มีค่าลดลง และการส่องผ่านแสงสูงขึ้น เนื่องจากขนาดเกรนของฟิล์มบาง ITO มีขนาดใหญ่ขึ้น (จาก 48 nm กลายเป็น 55 nm) ซึ่งตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างข้อไฟฟ้าโปร่งใส อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบฟิล์มบาง ITO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าที่อุณหภูมิ 400 °C (รูปที่ 1 (ก)) และ

อุณหภูมิ 500 °C (รูปที่ 1 (ข)) จะพบรอยแตกร้าว และการหลุดลอกของฟิล์มบาง ITO เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 1 พบอีกว่าที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงอาจส่งผลให้เกิดความบกพร่องขึ้นกับฟิล์มบาง ITO จึงทำให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าลดลงเหลือ 11.2 cm²/V-s ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ด้วยอุณหภูมิ 300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นข้อไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO

ตารางที่ 1 สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มบาง ITO ที่มีความหนา 500 nm ก่อนและหลังให้ความร้อน

Temp. (°C)	Carriers (cm ⁻³)	Mobility (cm ² /V-s)	Resistivity (Ω-cm)	Transmittance (%)
no heat	4.2×10 ²⁰	10.9	1.1×10 ⁻³	85
200	4.9×10 ²⁰	11.1	9.3×10 ⁻⁴	86
300	6.8×10 ²⁰	11.8	8.0×10 ⁻⁴	88
400	7.2×10 ²⁰	12.3	7.6×10 ⁻⁴	89
500	7.4×10 ²⁰	11.2	7.2×10 ⁻⁴	90



(ก)

(ข)

รูปที่ 1 รอยแตกร้าวของฟิล์มบาง ITO เกิดขึ้นหลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิ (ก) 400 °C และ (ข) 500 °C

3. การสร้างตัวตรวจวัดแสง

การสร้างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO เริ่มต้นจากแผ่นซิลิคอน ชนิด n, สภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 Ω-cm ระบายผลึก (100) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) หนา 400 nm แล้วเปิดชั้น SiO₂ เพื่อสร้างเป็นส่วนรับแสง

และรอยสัมผัสระหว่างชั้น ITO กับซิลิคอน (ITO/n-Si) โดยฟิล์มบาง ITO สร้างขึ้นจากเครื่องอาร์เอฟสปีเตอร์ (ความหนา 500 nm) สร้างจากแหล่งจ่ายอินเดียมทินออกไซด์บริสุทธิ์ 99.99% หลังจากสร้างฟิล์มบาง ITO เสร็จแล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เวลา 15 นาที (ด้วยเตาแบบพาความร้อน) แล้วจึงสร้างลวดลายอลูมิเนียมด้วยการระเหยสารในสุญญากาศ เพื่อสร้างเป็นส่วนเชื่อมต่อกับตัวถังที่ใช้เก็บบรรจุ (ตัวอย่างชิ้นงานของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว ดูได้จากเอกสารอ้างอิง [7]) จากนั้นนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้ว ไปวัดสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงต่อไป โดยทุกการทดลองในบทความนี้ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

4. การทดลอง และผลการทดลอง

4.1 สมบัติพื้นฐานของข้อต่อกึ่งไดโอดกับอุณหภูมิ

สมบัติพื้นฐานในที่นี้หมายถึงการหาตัวแปรที่สำคัญของข้อต่อกึ่งไดโอด ได้แก่ ศักย์ภายใน (qV_{bi}) และความสูงกำแพงศักย์ ($q\phi_{bn}$) จากการทดลองพบว่า ก่อนและหลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C จะได้ค่า qV_{bi} และ $q\phi_{bn}$ ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า 0.34 eV และ 0.76 eV ตามลำดับ (สำหรับเทคนิคการหาค่าดูได้จากเอกสารอ้างอิง [8])

4.2 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันกับอุณหภูมิ

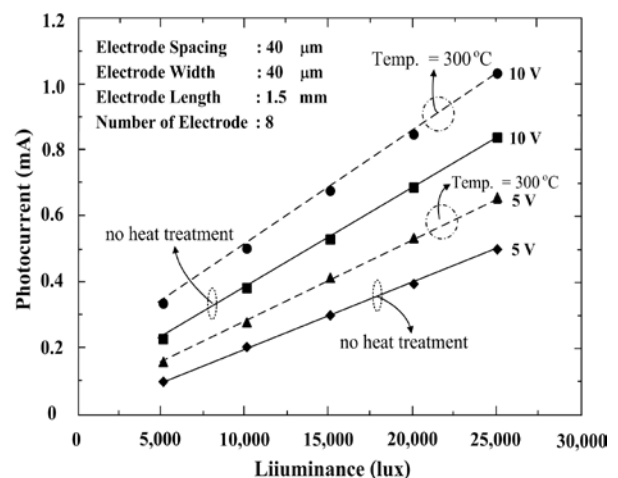
4.2.1 กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง

ความหนาแน่นกระแสมืด (ไม่ให้แสงตกกระทบกับตัวตรวจวัดแสง และวัดที่แรงดันไบอัส 5 V) ของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้น พบว่าก่อนให้ความร้อนความหนาแน่นกระแสมืดมีค่า 1.5 pA/ μm^2 หลังจากให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO แล้ว มีค่าลดลงเหลือ 1.0 pA/ μm^2 การลดลงของความหนาแน่นกระแสมืดเกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนทำให้รอยสัมผัสระหว่าง ITO กับซิลิคอนมีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้สถานะที่ผิวลดลง จึงทำให้ความหนาแน่นกระแสมืดลดลงตามไปด้วย [8]

4.2.2 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง

กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S), ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W), ความยาวของ

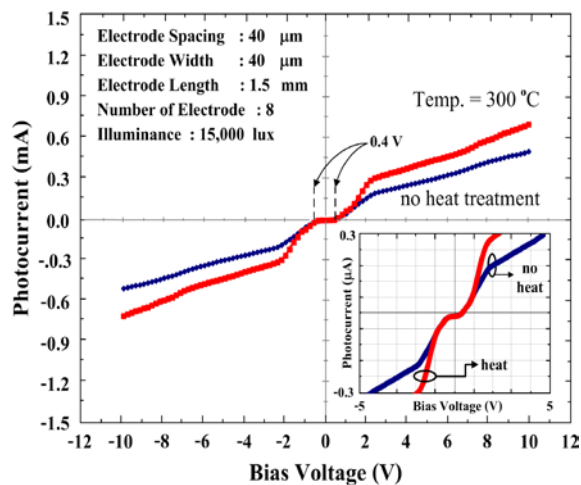
ขั้วไฟฟ้า (L) และจำนวนขั้วไฟฟ้า (N) เป็น 40 μm , 40 μm , 1.5 mm และ 8 ขั้ว ตามลำดับ [7] แสดงดังในรูปที่ 2 พบว่าหลังจากผ่านการให้ความร้อนแล้วได้กระแสแสงมากขึ้น กล่าวคือที่แรงดันไบอัส 5 V ตัวตรวจวัดแสงจะมีกระแสแสงที่ความเข้มแสง 5000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux ประมาณ 0.14, 0.26, 0.42, 0.54 และ 0.66 mA ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืด (ที่ความเข้มแสง 25,000 lux และที่แรงดัน 5 V) ประมาณ 2,750 เท่า ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ให้ความร้อนมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสงและแรงดันค่าเดียวกันประมาณ 1,400 เท่า จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่าด้วยกัน และยังพบอีกว่าถึงแม้จะให้ความร้อนแก่ตัวตรวจวัดแสง กระแสแสงที่ได้จะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น เมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้นเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้ให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ แสดงให้เห็นความเป็นเชิงเส้นที่ดีของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อนและหลังให้ความร้อน

เมื่อนำลักษณะสมบัติกระแสแสงและแรงดันของตัวตรวจวัดแสง ก่อนและหลังให้ความร้อนมาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าที่แรงดันไบอัสมีค่าต่ำ (ในช่วง 0 ถึง 0.4 V) กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง หลังจากให้ความร้อนยังคงมีค่าต่ำมากเหมือนกับตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้ให้ความร้อน ซึ่งเป็นไปได้ว่าชั้นของออกไซด์บาง ๆ เกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอนยังคง

มีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของกระแสแสงอยู่ ส่งผลให้เกิดแรงดันค่าน้อย ๆ ตกคร่อมที่บริเวณชั้นออกไซด์เหล่านั้น ถึงแม้จะให้ความร้อนแต่ก็ไม่ได้ทำให้ความหนาของออกไซด์เปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ดังนั้นถ้าจะใช้ตัวตรวจวัดแสงนี้ควรให้แรงดันไบอัสมากกว่า 0.8 V สำหรับเหตุผลหลักที่ทำให้กระแสแสงเพิ่มมากขึ้น เมื่อให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO ของตัวตรวจวัดแสง เกิดจากมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงมากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 85% เป็น 88% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

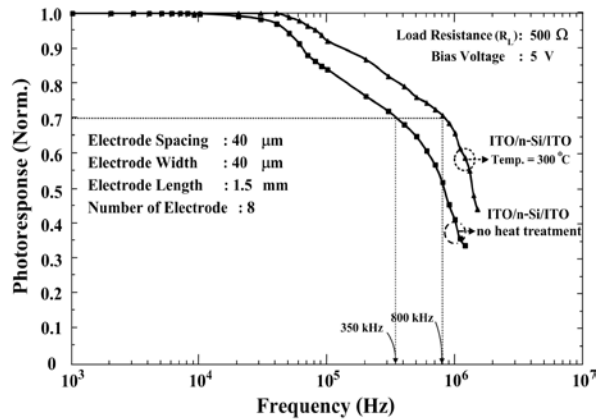


รูปที่ 3 ลักษณะสมบัติกระแสแสงและแรงดันของ ITO/n-Si/ITO เปรียบเทียบก่อนและหลังให้ความร้อน

4.3 การตอบสนองทางความถี่กับอุณหภูมิ

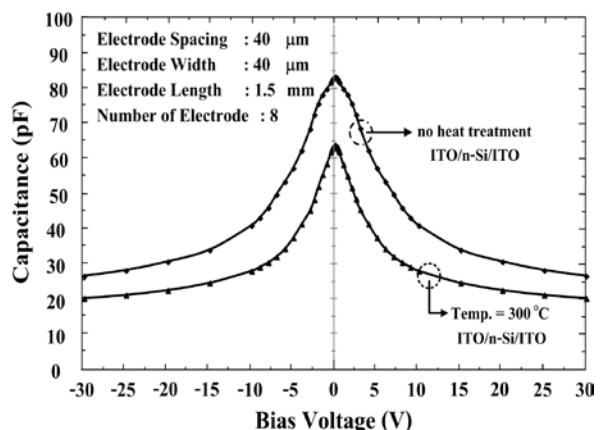
รูปที่ 4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงแบบสัญญาณกระแสสลับกับความถี่ของตัวตรวจวัดแสง (รายละเอียดของการทดลองดูได้จากเอกสารอ้างอิง [9]) ผลการทดลองก่อนและหลังให้ความร้อน พบว่าความถี่คutoff มีค่าเท่ากับ 350 kHz และ 800 kHz ตามลำดับ ความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงกับความร้อน โดยหลังจากให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 1.3 เท่า การตอบสนองทางความถี่นี้มีความสอดคล้องกับผลการวัดความจุไฟฟ้าและแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยก่อนและหลังให้ความร้อนกับตัวตรวจวัดแสงนี้ ความจุไฟฟ้าที่วัดได้ (ที่แรงดันไบอัส 5 V) มีค่า 50 pF และ 34 pF ตามลำดับ ความจุไฟฟ้าที่ได้มีความสมมาตรกันทั้งแรงดันไบอัสบวกและแรงดันไบอัสลบ หลังจากให้ความร้อนแล้วความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงประมาณ 32% เพราะว่า

ความจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่ลดลงนี้ จึงทำให้เวลาคงตัว (time constant) มีค่าลดลง ดังนั้นความถี่คutoff ของตัวตรวจวัดแสงหลังจากฟิล์มบาง ITO ได้รับความร้อนแล้ว จึงมีค่ามากขึ้นกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีฟิล์มบาง ITO ไม่ได้ให้ความร้อน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงและความถี่ในช่วง 1 kHz - 10 MHz เพื่อหาความถี่คutoff ของ ITO/n-Si/ITO ก่อนและหลังให้ความร้อน

สาเหตุที่ความจุไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง เนื่องมาจากความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสระหว่าง ITO และซิลิคอน ชนิด n มีความสมบูรณ์มากขึ้นกว่าเดิม ส่งผลให้สถานะที่ผิวมีค่าลดลง และ/หรืออาจมาจากชั้นออกไซด์บาง ๆ (SiO_x) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน ส่วนเกินจากกระบวนการสร้างฟิล์มบาง ITO ด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคเตอร์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น [10]



รูปที่ 5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าและแรงดันเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อนและหลังให้ความร้อน

การเปรียบเทียบตัวแปรที่สำคัญของตัวตรวจวัดแสงชนิด ITO/n-Si/ITO (ก่อนและหลังให้ความร้อน) ที่กล่าวไว้ข้างต้น และ Al/n-Si/Al [7] แสดงไว้ในตารางที่ 2 จากตาราง พบว่าตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO หลังจากให้ความร้อนแล้วตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้จะมีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงดีกว่า (ตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ได้ให้ความร้อนแก่ฟิล์มบาง ITO) โดยมีความหนาแน่นกระแสมีค่าน้อยลง 33%, กระแสแสงมากขึ้น 40% และความจุไฟฟ้าลดลง 32% จึงทำให้ความถี่คutoff สูงขึ้นถึง 1.3 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al กับตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO (ฟิล์มบาง ITO ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C) มีขนาดทางเรขาคณิตเท่ากัน พบว่าความหนาแน่นกระแสมีค่าน้อยลง 23%, กระแสแสงสูงขึ้น 7.4 เท่า, ความถี่คutoff น้อยกว่า 20% และความจุไฟฟ้ามากกว่าประมาณ 31%

5. สรุป

การให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO เพื่อใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งใสกับตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ทำให้ได้ตัวตรวจวัดแสงที่มีสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้นเกือบทุกด้าน เมื่อเทียบกับตัวตรวจวัดแสงที่ไม่

ให้ความร้อน โดยมีกระแสมีค่าน้อยลง กระแสแสงสูงขึ้น ความถี่คutoff มากขึ้น ในขณะที่ความจุไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลง

จากการปรับปรุงประสิทธิภาพตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ด้วยการใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อช่วยให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยรวมในด้านต่าง ๆ ดีขึ้นกว่าเดิม เป็นอีกแนวทางหนึ่งนำไปสู่การสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพสูง ด้วยการนำไปวัดความเข้มแสงที่มีค่าต่ำ ๆ ได้เป็นอย่างดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ในโอกาสต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณกุลวรงค์ นุตะมาน และคุณอิสรระ ศรีธนชัยที่ช่วยสร้างชิ้นงาน วัดข้อมูล และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในบทความนี้ และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ได้ให้อุปกรณ์ในการตรวจสอบฟิล์มบาง ITO ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ชนิด ITO/n-Si/ITO ก่อน และหลัง (อุณหภูมิ 300 °C) ให้ความร้อนกับฟิล์มบาง ITO (ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส) โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความกว้างของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm , ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1.5 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว เมื่อได้รับแรงดันไบอัส 5 V และยังได้เปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขนาดเดียวกัน

MSM Photodetectors	Dark current density ($\text{pA}/\mu\text{m}^2$)	Photocurrent [15,000 lux] (mA)	Frequency cut off (MHz)	Capacitance (pF)
ITO/n-Si/ITO (heat treatment)	1.0	0.42	0.80	34
ITO/n-Si/ITO (no heat treatment)	1.5	0.30	0.35	55
Al/n-Si/Al [7]	1.3	0.05	1.00	26

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Kurdesau, G. Khripunov, A. F. da Cunha, M. Kaelin, A. N. Tiwari, "Comparative study of ITO layers deposited by DC and RF magnetron sputtering at room temperature", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 352, pp. 1466-1470, 2006
- [2] LI Zhi-hua, KE Yu-peng and REN Dong-yan, "Effects of Heat Treatment on Morphological, Optical and Electrical Properties of ITO Films by Sol-Gel Technique", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 18, pp. 366-371, 2008
- [3] Sung-Jei Hong, Jong-Woong Kim, Jae-Won Lim, Good-Sun Choi and Minoru Isshiki, "Characteristics of Printed Thin Films Using Indium Tin Oxide (ITO) Ink", *Materials Transactions*, Vol. 51, pp. 1905-1908, 2010
- [4] Seok-In Na, Byung-Kwan Yu, Seok-Soon Kim, Doo-jin Vak, Tae-Soo Kim, Jun-Seok Yeo and Dong-Yu Kim, "Fully spray-coated ITO-free organic solar cells for low-cost power generation", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 94, pp. 1333-1337, 2010
- [5] Surasak Niemcharoen, Design and Fabrication of Planar ITO/n-Si/ITO Photodetectors, Completed Research Report, Faculty of Engineering, KMITL, pp. 44-52, 2011
- [6] Kunagone Kiddee, Thanawat Thongnak, Itsara Sri-thanachai, Surada Ueamanapong, Narin Atiwong-sangthong, Surasak Niemcharoen and Somkiat Supadech, "The Effect of Temperature to Indium Tin Oxide Thin Films for Apply to Transparent Electrode of Photodetector", 33rd Electrical Engineering Conference, pp. 1465-1468, 2010
- [7] Surasak Niemcharoen, "High Photocurrent of Metal-Semiconductor-Metal Photodetector Using Transparent Electrodes", *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 25-30, 2010
- [8] Surasak Niemcharoen, Metal and Semiconductor Contacts, Chapter 1 and Chapter 6, Mean Service Supply, Bangkok, 2015
- [9] Surasak Niemcharoen, "Optical Response of MSM Structure Photodetector Using Indium Tin Oxide as Transparent Electrodes", *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 25-30, 2011
- [10] 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 American Chemical Society*, Vol. 105, No. 3, pp. 324-330, 1983