วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ
การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผลของแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอนต่อสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

Effect of O2/Ar Ratio on Optical Properties of Indium Tin Oxide Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering

ศุภเดช สุจินพรัหม[1] ชวลิต ภู่มณี[2,4] สุภาพ ชูพันธ์[3,4] สุชีวัน กรอบทอง[1] และ สุทธิพจน์ สุทธนะ[1*]

[1]อาจารย์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140
[2]นักศึกษา [3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200
[4]นักวิจัย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50202

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide; ITO) เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงจากเป้าสารอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) ที่เจือด้วยทินออกไซด์ (SnO_2) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ฟิล์มจะถูกเตรียมภายใต้เงื่อนไขคงที่คือ ความดันสปัตเตอร์ $2x10^{-3}$ ทอรร์ ความหนาแน่นกำลังสปัตเตอร์ 1.23 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิแผ่นรองรับ 200 องศาเซลเซียส วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยการแปรค่าอัตราส่วนแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอน (O_2/Ar) จาก 0.0 ถึง 0.5 ในกระบวนการสปัตเตอร์ พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนแก๊สออกซิเจนต่ออาร์กอนเป็น 0.2 สมบัติเชิงแสงในย่านแสงขาวมีค่าดีที่สุด โดยค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงสูงสุดและค่าเฉลี่ยการสะท้อนแสงต่ำสุดมีค่าร้อยละ 90.68 และ 9.42 ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดการสะท้อนแสงได้ร้อยละ 5.52 เมื่อเทียบกับฟิล์มที่สปัตเตอร์ด้วยเพียงแก๊สอาร์กอน

Abstract

Indium tin oxide thin films were deposited by DC magnetron sputtering from In_2O_3 and SnO_2 as a ceramic target with 10 wt% of SnO_2. The films were sputtered under pressure of 2×10^{-3} torr, power density of 1.23 W/cm^2 and substrate temperature of 200 $^{\circ}$C. The main goal is to improve the optical properties of ITO thin films by using a mixture of oxygen and argon gasses with O_2/Ar ratios varies from 0.0 to 0.5. The best average values of optical properties in the visible light region were found at the O_2/Ar ratio of 0.2. The highest transmittance was 90.68% and the lowest reflectance was 9.42%. The result showed reflectance decreased by 5.52% compared to the films sputtered with only Ar.

คำสำคัญ : อินเดียมทินออกไซด์ สมบัติเชิงแสง ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง
Keywords : Indium tin oxide, optical properties, DC magnetron sputtering

[*]ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ sutthipoj.s@ku.ac.th โทร. 0 3428 1105 ต่อ 7620

1. บทนำ

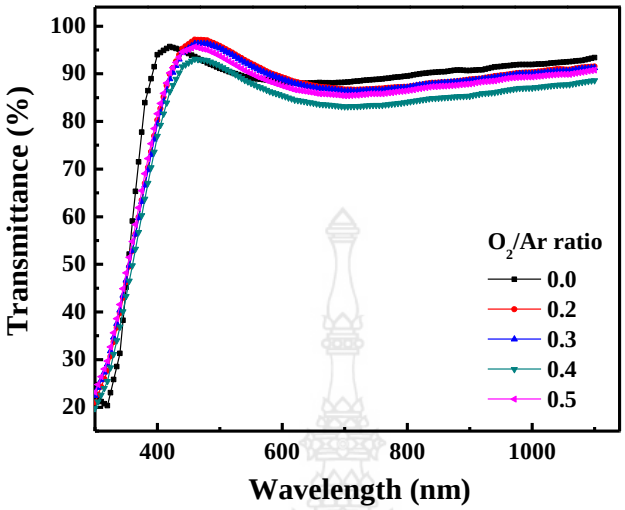
ฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมออกไซด์ซึ่งนิยมเรียกว่า “อินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide; ITO)” มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญสองประการคือนำไฟฟ้าและส่งผ่านแสงได้ดี จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้าเชิงแสง (optoelectronics) อย่างหลากหลาย เช่น จอภาพระนาบ (flat panel displays) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หน้าต่างละลายน้ำแข็ง (defrosting windows) ฟิล์มป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic shielding) โดยกระบวนการเตรียมฟิล์มให้มีเสถียรรูปที่ดีและเป็นที่นิยมคือกระบวนการสปัตเตอร์เนื่องจากอนุภาคของฟิล์มบางที่หลุดจากเป้าสารนั้นจะมีขนาดที่เล็กมากใกล้เคียงในระดับอะตอม ทำให้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับที่ต้องการได้ อย่างไรก็ดีกระบวนการสปัตเตอร์โดยทั่วไปภายใต้สภาวะแก๊สอาร์กอนจะมีขีดจำกัดด้านขนาดอะตอมของอาร์กอนซึ่งมีรัศมีอะตอมขนาดใหญ่ และเมื่ออาร์กอนเข้าชนกับเป้าสารจะทำให้อนุภาคเป้าสารที่หลุดออกมามีขนาดใหญ่ด้วย แต่หากใช้แก๊สชนิดอื่นที่มีขนาดอะตอมที่เล็กกว่าอาร์กอนก็จะสามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางที่มีความเรียบมากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาออกซิเจนซึ่งมีรัศมีอะตอมเล็กกว่าอาร์กอนที่อาจนำมาใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์ได้ (Van Gompel *et al*., 2013; Ooi *et al*., 2013) ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยการปล่อยแก๊สออกซิเจนเข้าสู่กระบวนการสปัตเตอร์ โดยคาดหวังให้อะตอมของออกซิเจนเข้าชนเป้าสารแล้วทำให้อนุภาคเป้าสารที่หลุดออกมามีขนาดเล็กลงเพื่อช่วยปรับพื้นผิวของฟิล์มบางให้เรียบขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าการสะท้อนแสงลดลงและส่งผลให้การส่งผ่านแสงเพิ่มในที่สุด

2. วิธีการทดลอง

ฟิล์มบาง ITO จะเตรียมจากเป้าสารอินเดียมทินออกไซด์ซึ่งเตรียมจากอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) ที่เจือด้วยทินออกไซด์ (SnO_2) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แผ่นรองรับที่ใช้คือแผ่นกระจก (eagle 2000, Corning) สำหรับศึกษาสมบัติทางแสงและซิลิกอนเวเฟอร์ (silicon wafer) สำหรับวัดความหนาของฟิล์ม แผ่นรองรับกระจกจะทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (acetone) ไอโซโพรพิล อัลกอฮอร์ (isopropyl alcohol) และน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ด้วยเครื่องอัลตราโซนิคอย่างละ 10 นาที ตามลำดับ ส่วนแผ่นรองรับซิลิกอนเวเฟอร์จะทำความสะอาดด้วยอะซิโตน เมทานัล (methanol) และน้ำปราศจากไอออน ด้วยเครื่องอัลตราโซนิคภายใต้เงื่อนไขเดียวกับแผ่นรองรับกระจก จากนั้นนำเป้าสารและแผ่นรองรับเข้ากระบวนการสปัตเตอร์ภายใต้เงื่อนไขคงที่คือ ความดันพื้น $1x10^{-6}$ ทอรร์ ความดันสปัตเตอร์ $2x10^{-3}$ ทอรร์ ความหนาแน่นกำลังสปัตเตอร์ 1.23 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิแผ่นรองรับ 200 องศาเซลเซียส ควบคุมความหนาของฟิล์มประมาณ 100 $\pm$ 5 นาโนเมตร และทำการแปรค่าแก๊สออกซิเจนเข้าสู่กระบวนการสปัตเตอร์ด้วยอัตราส่วน O_2/Ar จาก 0.0 ถึง 0.5 เพื่อศึกษาอัตราส่วน O_2/Ar ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ วัดความหนาของฟิล์มด้วยเครื่อง spectroscopic ellipsometer และศึกษาสมบัติเชิงแสงจากการวัดค่าการส่งผ่านแสงและการสะท้อนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการวัดความหนาของฟิล์มพบว่ามีค่าเป็น 101.2, 104.8, 102.3, 98.8 และ 97.7 นาโนเมตร เมื่อใช้อัตราส่วน O_2/Ar เป็น 0.0, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับค่าความหนาที่ควบคุม 100 นาโนเมตร และเมื่อศึกษาการส่งผ่านแสงดังรูปที่ 1 พบว่าเมื่อเติมแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ระบบสปัตเตอร์ค่าการส่งผ่านแสงจะเกิดการเลื่อนไปในย่านแสงสีแดง (red shift) ทำให้การส่งผ่านแสงในย่านแสงขาว (visible light region) โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

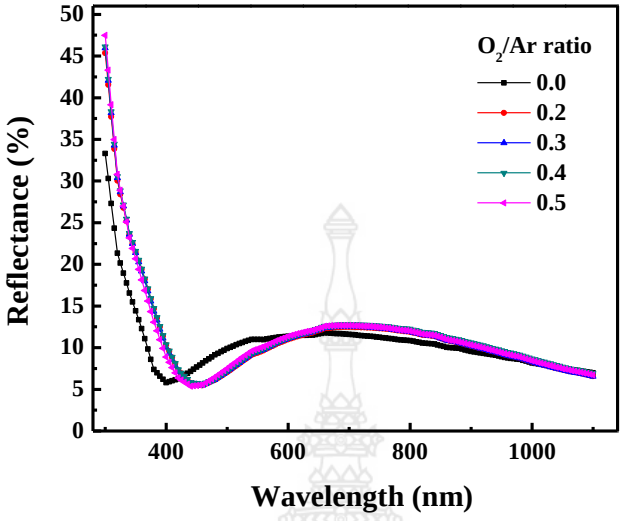


รูปที่ 1 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

พิจารณาในช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางซึ่งสปัตเตอร์ภายใต้แก๊สอาร์กอนเพียงอย่างเดียว (O_2/Ar = 0.0) มีการส่งผ่านแสงเฉลี่ยร้อยละ 90.46 และการส่งผ่านแสงปรากฏพีคสูงสุดที่ร้อยละ 95.72 แต่เมื่อเพิ่มแก๊สออกซิเจนเข้าไปในอัตราส่วน O_2/Ar เป็น 0.2 การส่งผ่านแสงเฉลี่ยมีค่าร้อยละ 90.68 และการส่งผ่านแสงปรากฏพีคสูงสุดที่ร้อยละ 97.15 แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งสูงขึ้นอย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วน O_2/Ar เพิ่มขึ้นเป็น 0.3 – 0.5 กลับพบว่าปรากฏว่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยกลับลดลง ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาการสะท้อนแสงดังรูปที่ 2 เมื่อมีการเพิ่มแก๊สออกซิเจนเข้าสู่กระบวนการสปัตเตอร์พบว่าการสะท้อนแสงของฟิล์มบางลดลงอย่างเด่นชัดในช่วงความยาวคลื่น 425 – 575 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับฟิล์มบางซึ่งสปัตเตอร์ภายใต้แก๊สอาร์กอนเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาในย่านแสงขาวความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตรพบว่าฟิล์มบางซึ่งสปัตเตอร์ภายใต้แก๊สอาร์กอนเพียงอย่างเดียวมีการสะท้อนแสงเฉลี่ยร้อยละ 9.97 และฟิล์มบางซึ่งเพิ่มแก๊สออกซิเจนเข้าไปในอัตราส่วน O_2/Ar เป็น 0.2 มีการสะท้อนแสงเฉลี่ยร้อยละ 9.42 ซึ่งพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วน O_2/Ar เป็น 0.2 สามารถลดการสะท้อนแสงได้ร้อยละ 5.52 เปรียบเทียบกับฟิล์มบางซึ่งสปัตเตอร์ภายใต้แก๊สอาร์กอนเพียงอย่างเดียว และเมื่อพิจารณาสมการสเปกตรัมแสง

$$T + R + A = 1 \qquad (1)$$

เมื่อ *T* คือการส่งผ่านแสง *R* คือการสะท้อนแสง และ *A* คือการดูดกลืนแสง อย่างไรก็ดีจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มแก๊สออกซิเจนเข้าไปในกระบวนสปัตเตอร์ด้วยอัตราส่วน O_2/Ar เป็น 0.2 สามารถลดการสะท้อนแสงเฉลี่ยได้มากที่สุดถึงร้อยละ 5.52 แต่การส่งผ่านแสงเฉลี่ยกลับเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.24 แสดงว่ามีแสงส่วนมากหายไปและน่าจะอยู่ในรูปของการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง ซึ่งการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางนั้นอาจแปรผันกับสมบัติบางประการของฟิล์มบาง เช่น ความหนาแน่นพาหะ ฮอลล์โมบิลิตี้ เป็นต้น



รูปที่ 2 การสะท้อนแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

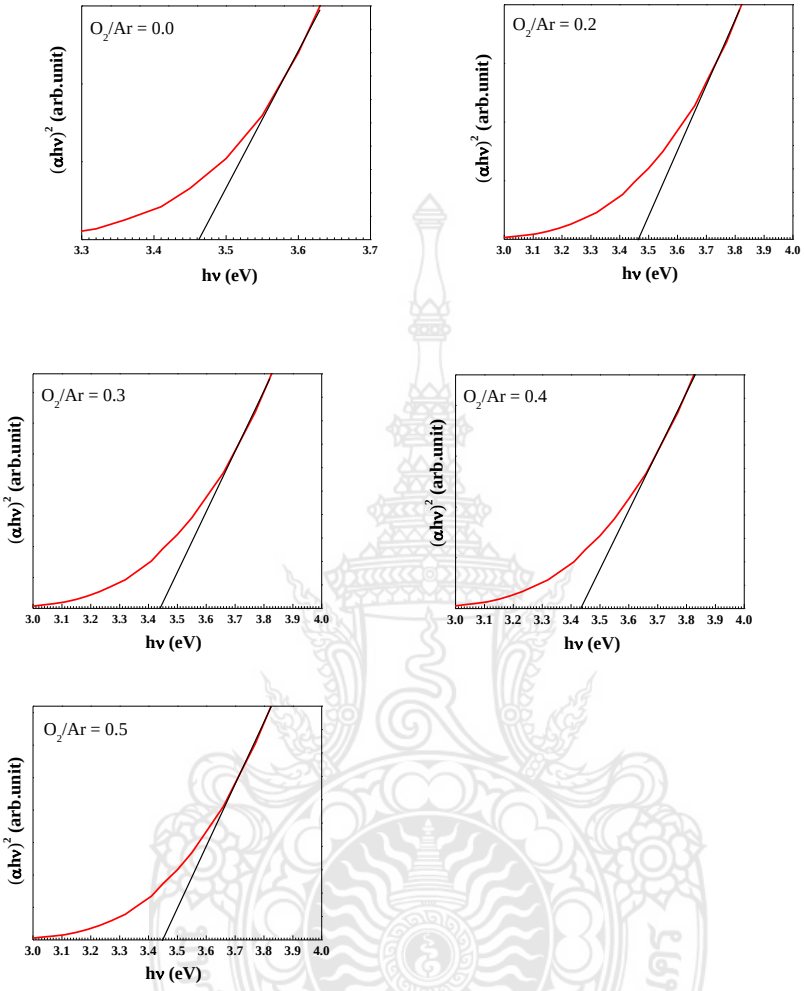
ตารางที่ 1 การส่งผ่านแสงและการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร

อัตราส่วน O_2/Ar	การส่งผ่านแสง (ร้อยละ)		การสะท้อนแสง (ร้อยละ)	
	เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	ต่ำสุด
0.0	90.46	95.72	9.97	5.79
0.2	90.68	97.15	9.42	5.49
0.3	90.11	96.29	9.45	5.49
0.4	86.83	93.12	9.64	5.62
0.5	89.29	95.65	9.52	5.36

พิจารณาช่องว่างแถบพลังงาน (optical band gap) ของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์จากความสัมพันธ์ (Mohammadi et al., 2013)

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2)$$

เมื่อ $h\nu$ คือพลังงานโฟตอน A คือค่าคงที่ และ E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อพิจารณาตามรูปแบบสมการเชิงเส้น ณ จุดตัดแกน $h\nu$ จะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g ดังรูปที่ 3 โดยเมื่อใช้อัตราส่วน O_2/Ar เป็น 0.0, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางมีค่าเป็น 3.46, 3.46, 3.44, 3.43 และ 3.45 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อเติมแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ระบบสปัตเตอร์จะทำให้ช่องว่างแถบพลังงานเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยโดยไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน



รูปที่ 3 ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

4. สรุป

จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มแก๊สออกซิเจนในกระบวนการสปัตเตอร์ด้วยอัตราส่วน O_2/Ar เป็น 0.2 มีผลต่อการลดการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ได้ร้อยละ 5.52 เมื่อเทียบกับฟิล์มบางซึ่งสปัตเตอร์ภายใต้แก๊สอาร์กอนเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ดีกลับพบว่าการสะท้อนแสงที่ลดลงไม่ได้เปลี่ยนไปเป็นการส่งผ่านแสงทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางอาจจะเป็นสมบัติบางประการของฟิล์มบาง เช่น ความหนาแน่นพาหะ โมบิลิตี้ เป็นต้น และค่าช่องว่างแถบพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มแก๊สออกซิเจนเข้าสู่กระบวนการสปัตเตอร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสาขาฟิสิกส์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ชวลิต ภู่มณี ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

6. เอกสารอ้างอิง

Mohammadi, S., Abdizadeh, H. and Golobostanfard, M.R. 2013. Opto-electronic properties of molybdenum doped indium tin oxide nanostructured thin films prepared via sol-gel spin coating. Ceramics International 39 (6) 6953-6961.

Ooi, P.K., Ng, S.S., Abdullah, M.J., Abu Hassan, H. and Hassan, Z. 2013. Effects of oxygen percentage on the growth of copper oxide thin films by reactive radio frequency sputtering. Materials Chemistry and Physics 140, 243-248.

Van Gompel, M., Conings, B., Jiménez Monroy, K.L., D'Haen, J., Gilissen, K., D'Olieslaeger, M., Van Bael, M.K. and Wagner, P. 2013. Preparation of epitaxial films of the transparent conductive oxide Al:ZnO by reactive high-pressure sputtering in Ar/O_2 mixtures. Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science 210 (5) 1013-1018.