ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมินัมที่เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยโหมดโลหะ โหมดทรานซิชัน และโหมดออกไซด์

Aluminum-doped zinc oxide thin films prepared by reactive dc magnetron sputtering with metal, transition, and oxide modes

อัญธิกา ละครไชย[1] อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน[2*] และ พิษณุ พูลเจริญศิลป์[2]

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

[2] หน่วยวิจัยเทคโนโลยีพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

[*]Corresponding Author, E-mail: artit.c@msu.ac.th

Received: 22 August 2018 | Revised: 8 January 2019 | Accepted: 8 March 2019

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมินัม (AZO) ด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้เป้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว (inch) ของโลหะผสมซิงค์เจืออะลูมินัมในสัดส่วน 2 wt% ฟิล์มบาง AZO ถูกเคลือบลงบนกระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ที่กำลังไฟฟ้า 150 W เวลา 5 นาที และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 sccm ฟิล์มถูกเคลือบโดยใช้โหมดโลหะ โหมดทรานซิชัน และโหมดออกไซด์ ซึ่งถูกควบคุมโดยการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคหัววัดสี่จุดและคุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิควิเคราะห์การดูดกลืนแสงในย่านยูวีถึงอินฟราเรดของฟิล์ม AZO พบว่าฟิล์มที่ถูกเตรียมโดยใช้โหมดออกไซด์ที่เงื่อนไขศักย์ไฟฟ้า 370 ถึง 380 V และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 4.32 ถึง 4.42 sccm มีค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริทหรืออัตราส่วนการส่งผ่านแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ยกกำลังสิบต่อค่าความต้านทานเชิงแผ่นสูงที่สุด ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบพีคของระนาบ (002) ของผลึก ZnO อย่างเด่นชัด ซึ่งแสดงถึงฟิล์มมีความเป็นผลึกที่ดีและมีการจัดเรียงตัวตามแนวแกน c อย่างเป็นระเบียบ

ABSTRACT

In this work, the aluminum-doped zinc oxide (AZO) thin films were prepared using the reactive direct current (DC) magnetron sputtering. The Zn/Al alloy with 2 wt% of aluminum and 2 inch of diameter was used as a target. The glass slide and p-type Si (100) wafer were used as a substrate. The deposition time of 5 min, power of 150 W, and argon flow rate of 10 sccm were used as the controlled parameter. While the discharge voltage and the oxygen flow rate were adjusted corresponding to the metal, transition, and oxide modes. The electrical and optical properties of AZO thin films were characterized by Hall effect measurement and ultraviolet-visible-infrared spectroscopy, respectively. It is found that the AZO thin films prepared by the discharge voltage of 370-380 V and the oxygen flow rate of 4.32-4.42 sccm which is corresponding to oxide mode gives the highest value of figure of merit. This result shows that the film has the highest ratio of the optical transmission and sheet resistance. The

structural property of the AZO thin films was characterized by X-ray Diffraction (XRD). It is observed that the AZO thin films are predominantly oriented at c-axis (002) and achieved high crystalline quality.

คำสำคัญ: ฟิกเกอร์ออฟเมอริท ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมินัม รีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
Keywords: Figure of merit, Aluminum-doped zinc oxide thin films, Reactive dc magnetron sputtering

บทนำ

ในปัจจุบันฟิล์มออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent conductive oxides, TCOs) ถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง (Optoelectronic devices) หลายชนิด เช่น จอแสดงผลแบบบาง (Flat panel display) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และอุปกรณ์เปล่งแสงชนิดอินทรีย์ (Organic light-emitting devices) เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่น คือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ ($\rho \approx 10^{-3}$ ถึง $10^{-4}\ \Omega \cdot$ cm) และสามารถส่งผ่านแสงได้ดีในช่วงที่ตามองเห็นได้ ($\%T_{av} > 80\%$) (Ko, 2005) ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็น ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ได้แก่ Indium doped tin oxide (ITO), Fluorine doped tin oxide (FTO) และ Zinc oxide (ZnO) แต่เนื่องจากอินเดียม (In) และดีบุก (Sn) เริ่มขาดแคลนในธรรมชาติ จึงทำให้วัสดุที่ใช้ในการผลิต ITO และ FTO มีราคาแพงขึ้น นอกจากนั้นอินเดียม และดีบุกยังเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุที่สามารถใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงทดแทน ITO และ FTO ทำให้ฟิล์มบาง ZnO ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถส่งผ่านแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ดี และเมื่อเจือธาตุโลหะบางชนิด (Metal-doped zinc oxide) เข้าไป สามารถทำให้ฟิล์มมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น อีกทั้งฟิล์มบาง ZnO เป็นวัสดุที่มีอยู่มากในธรรมชาติ จึงมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ฟิล์มมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ฟิล์มบาง ZnO เป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) โดยธรรมชาติที่มีขนาดช่องว่างพลังงานกว้างประมาณ 3.37 eV การเจืออะตอมของธาตุโลหะอะลูมินัม (Al) ถูกเรียกย่อๆ ว่า ฟิล์มบาง AZO (Aluminum-doped zinc oxide) สามารถทำให้ค่าสภาพต้านทานลดลงไปได้ในระดับ $10^{-4}\ \Omega \cdot$ cm และสามารถส่งผ่านแสงในย่านที่ตามองเห็นได้มากกว่า 90% (Liu et al., 2013) อีกทั้งธาตุโลหะอะลูมินัมมีราคาถูก จึงทำให้มีงานวิจัยจำนวนมากสนใจศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง AZO ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคโซเจล (Sol-gel) (Shahid et al., 2016) การตกสะสมโดยใช้เลเซอร์แบบพัลซ์ (Pulsed laser deposition) (Sibiński et al., 2014) การพ่นร้อน (Spray pyrolysis) (Ajili et al., 2012) การตกสะสมด้วยไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition) (Kim et al., 2010) และแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Magnetron sputtering) (Nomoto et al., 2011) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงถือเป็นเทคนิคที่ใช้ในการกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมทางด้านการเตรียมฟิล์ม เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อน ฟิล์มที่เตรียมได้มีความเป็นระเบียบสูง และสามารถเตรียมลงบนพื้นที่ขนาดใหญ่ได้

เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง สามารถทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC) แหล่งจ่ายไฟแบบไบโพลาร์พัลส์ (Bipolar-pulsed) และแหล่งจ่ายไฟความถี่วิทยุ (RF) การเลือกใช้ชนิดของแหล่งจ่ายไฟที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของเป้าสารเคลือบ เช่น เป้าเซรามิคของซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมินา (ZnO/Al_2O_3 ceramic target) ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า การเตรียมฟิล์มบาง AZO จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟแบบไบโพลาร์พัลส์ หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่วิทยุ แต่ข้อเสียของการใช้เป้าเซรามิค AZO คือ เป้ามีอัตราการถูกสปัตเตอร์ต่ำ จึงทำให้ฟิล์มบาง AZO ที่เตรียมได้มีอัตราการตกสะสมต่ำไปด้วย นอกจากนั้นเป้าเซรามิค AZO ยังง่ายต่อการแตกร้าวระหว่างการใช้งานอีกด้วย ในขณะที่เป้าโลหะผสมซิงค์เจืออะลูมินัม (Zn/Al alloy target) มีราคาถูกกว่าเป้าเซรามิค และยังสามารถทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ซึ่งมีราคาที่ถูกกว่าแหล่งจ่ายไฟแบบไบโพลาร์พัลส์หรือความถี่วิทยุ อีกทั้งการใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงในการเตรียมฟิล์ม ยังให้ฟิล์มที่มีอัตราการตกสะสมสูงกว่าอีกด้วย

แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมฟิล์มบาง AZO โดยใช้เป้าโลหะผสมซิงค์เจืออะลูมินัม จำเป็นต้องใช้แก๊สออกซิเจนในสัดส่วนที่เหมาะสมช่วยในการก่อตัวของฟิล์ม ซึ่งเทคนิคนี้เรียกว่า รีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Reactive magnetron sputtering) เนื่องจากแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้การควบคุมอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน

เพื่อหาจุดที่เหมาะสมต่อการสปัตเตอร์ และเพื่อให้ได้ฟิล์มบาง AZO ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและส่งผ่านแสงที่ดีทำได้ยาก ในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาวงฮีสเตอรีซีสของศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน เพื่อหาโหมดที่เหมาะสมต่อการเตรียมฟิล์มบาง AZO จากเป้าโลหะผสมซิงค์เจืออะลูมินัม และศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง ทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มที่เตรียมได้

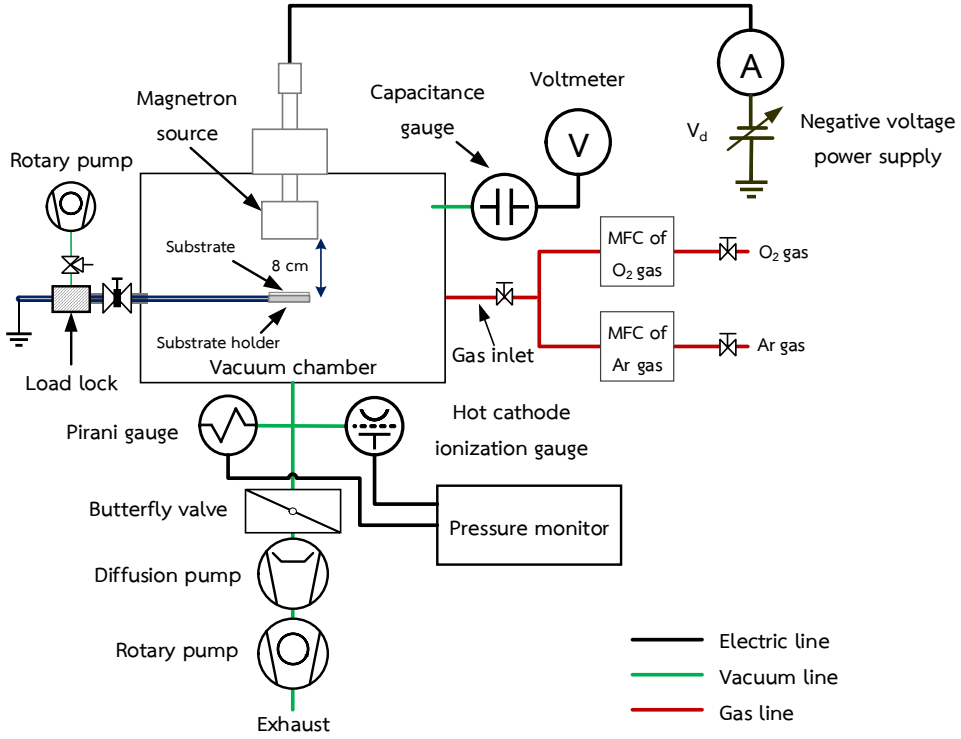
วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการเคลือบฟิล์มบาง AZO เริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดแผ่นฐาน กระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ถูกทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิกที่สั่นด้วยความถี่สูง ในสารละลายอะซิโตน (C_3H_6O) เมทานอล (CH_3OH) และน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) เป็นเวลานานอย่างละ 10 นาที ตามลำดับ แล้วนำไปเป่าให้แห้ง จากนั้นติดตั้งลงบนฐานรองแผ่นฐาน (Substrate holder) แล้วนำไปติดตั้งเข้ากับระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง ภายในภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) ดังแสดงตามรูปที่ 1 โดยผ่านอุปกรณ์เคลื่อนส่งชิ้นงาน (Load lock) สำหรับเงื่อนไขในการเคลือบได้ใช้ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับแผ่นฐานประมาณ 8 cm ภายใต้กำลังไฟฟ้าในการดิสชาร์จ 150 W ใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที เป้าโลหะผสมซิงค์เจืออะลูมินัม ในสัดส่วน 98 ต่อ 2 wt% มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 inch และมีความบริสุทธิ์ 99.99 % ซึ่งถูกติดตั้งเข้ากับหัวแมกนีตรอนที่อยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ปั๊มโรตารี (Rotary pump) ทำงานร่วมกับปั๊มไอแพร่ (Diffusion pump) เพื่อให้ได้ความดันฐาน (Base pressure) ประมาณ 10^{-6} torr ก่อนทำการเคลือบฟิล์ม จากนั้นจ่ายแก๊สอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 % ที่อัตราการไหลของแก๊ส 10 sccm เพื่อทำหน้าที่ในการสปัตเตอร์

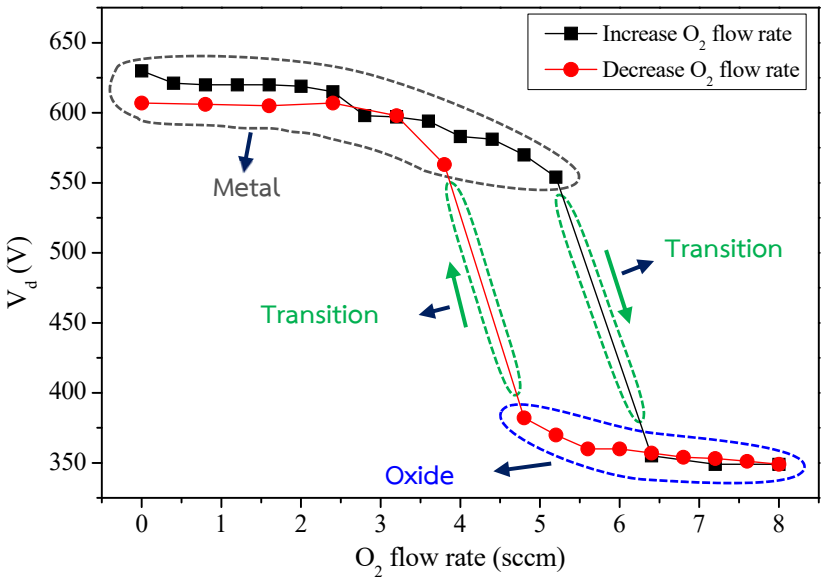
การหาโหมดการเคลือบฟิล์มบาง AZO ที่เหมาะสม ทำได้จากการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จ (Discharge voltage, V_d) ที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ซึ่งทำให้ได้กราฟวงฮีสเตอรีซีส (Hysteresis loop) ที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบของการเคลือบฟิล์มว่าอยู่ในโหมดโลหะ โหมดทรานซิชัน หรือโหมดออกไซด์ และฟิล์มบาง AZO ที่ถูกเตรียมด้วยโหมดต่างๆ กัน ถูกนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวและวัดความหนาโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในย่านยูวีถึงอินฟราเรด (UV-Vis-IR spectroscopy) และสุดท้ายศึกษาคุณสมบัติการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการวัดแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect measurement) และเทคนิคหัววัดสี่จุด (Four-point probe)

รูปที่ 2 แสดงวงฮีสเตอรีซีสของความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จกับอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ช่วงที่เพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน (เส้น -■-) จาก 0 ถึง 5 sccm ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จมีค่าสูงสุดและมีค่าค่อยๆ ลดลง ในช่วง 650 ถึง 550 V แต่ไม่มากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวของเป้าสารเคลือบยังมีความเป็นโลหะที่ดีอยู่ ยังไม่มีการก่อตัวเป็นชั้นออกไซด์บนผิวเป้ามากนัก จึงทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้ในช่วงนี้เป็นฟิล์มโลหะผสมของซิงค์เจืออะลูมินัม เรียกพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ว่า โหมดโลหะ (Metal mode) ต่อมาเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนจนถึงจุดวิกฤตที่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมบนผิวของเป้าสารเคลือบอันเนื่องมาจากผิวของเป้าสารเคลือบมีการก่อตัวของชั้นออกไซด์แบบอิ่มตัว ซึ่งอัตราการก่อตัวของชั้นออกไซด์บนผิวของเป้าสารเคลือบกับอัตราการสปัตเตอร์ที่ทำให้สารประกอบออกไซด์บนผิวของเป้าสารเคลือบหลุดออกมีค่าคงที่ เรียกพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ว่า โหมดออกไซด์ (Oxide mode) และฟิล์มที่เคลือบได้ในช่วงนี้ก็เป็นฟิล์มของสารประกอบซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมินัม ต่อมาเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนสูงขึ้นจนถึง 8 sccm ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จก็ค่อยๆ ลดลงจนเกือบคงที่ ซึ่งในช่วงนี้ก็ยังถือว่าเป็นโหมดออกไซด์ โดยในโหมดออกไซด์นี้มีค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จอยู่ในช่วง 380 ถึง 340 V เหตุผลที่ศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จลดลงจากโหมดโลหะเป็นเพราะว่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron emission yield) ของโหมดออกไซด์มีค่าสูงกว่าโหมดโลหะนั่นเอง (Jang et al., 2012; Mickan, 2017) และพฤติกรรมที่อยู่ในช่วงระหว่างโหมดโลหะกับโหมดออกไซด์ ถูกเรียกว่าโหมดทรานซิชัน (Transition mode) โดยในช่วงนี้เป็นช่วงที่ศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด ซึ่งเป็นผลมาจากการก่อตัวของชั้นออกไซด์ที่ผิวของเป้าสารเคลือบกับอัตรา

การสปัตเตอร์ที่ทำให้สารประกอบออกไซด์บนผิวของเป้าสารเคลือบหลุดออกมีค่าไม่คงที่ และเมื่อทำการลดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนลง (เส้น -●-) จาก 8 ถึง 0 sccm ศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้น จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน และเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ ผลจากการเก็บข้อมูลค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนข้างต้นทำให้ได้รูปแบบของกราฟวงฮีสเตอรีซีส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโหมดการเคลือบต่างๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2 ซึ่งลักษณะดังกล่าวพบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ May และคณะ (May et al., 2003) ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของกราฟวงฮีสเตอรีซีสและศึกษาผลของการเคลือบฟิล์ม AZO ด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากเป้าโลหะผสมซิงค์เจืออะลูมินัม



รูปที่ 1 แผนผังระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 2 วงฮีสเตอรีซีสของศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ที่กำลังไฟฟ้า 150 W

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดจุดในการเคลือบฟิล์มบาง AZO จำนวน 5 จุดที่อยู่บนวงฮีสเตอรีซีสข้างต้น แต่ละจุดมีรายละเอียดดังนี้

จุดที่ 1 โหมดโลหะ (M1) ได้ทำการปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนจาก 0 sccm เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จที่ 550 V ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดก่อนที่จะลดลงอย่างฉับพลันไปยังโหมดออกไซด์

จุดที่ 2 โหมดทรานซิชัน (T1) การเคลือบฟิล์มในโหมดนี้จำเป็นต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จให้เป็นช่วงกว้างๆ เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนได้ง่าย และได้กำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จไว้ในช่วง 440 ถึง 450 V โดยขั้นตอนการเคลือบได้ทำการปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนไปที่ 8 sccm เพื่อให้อยู่ในโหมดออกไซด์ก่อน แล้วค่อยๆ ปรับลดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ให้มาอยู่ในโหมดทรานซิชันตามค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จที่กำหนดไว้ จากนั้นก็ควบคุมศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จด้วยการค่อยๆ เพิ่มหรือ ลด อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน หากศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น ให้ปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน แต่ถ้าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จลดลง ให้ปรับลดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน

จุดที่ 3 โหมดออกไซด์ช่วงที่ 1 (O1) เกิดจากการปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนไปที่ 8 sccm แล้วค่อยๆ ปรับลดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนลงจนได้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จที่ตำแหน่ง 380 V ซึ่งเป็นจุดก่อนที่ศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จจะเปลี่ยนจากโหมดออกไซด์ไปเป็นโหมดโลหะ

จุดที่ 4 โหมดออกไซด์ช่วงที่ 2 (O2) เกิดจากการปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนไปที่ 8 sccm แล้วค่อยๆ ปรับลดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนลงจนได้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จอยู่ที่ตำแหน่ง 370 V

จุดที่ 5 โหมดออกไซด์ช่วงที่ 3 (O3) เกิดจากการปรับเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนไปที่ 8 sccm แล้วค่อยๆ ปรับลดอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนลงจนได้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จอยู่ที่ตำแหน่ง 360 V

การเคลือบฟิล์มบาง AZO ตามจุดที่ 3 4 และ 5 ดังกล่าวเป็นการศึกษาผลของแก๊สออกซิเจนที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง AZO เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและส่งผ่านแสงที่เหมาะสมที่สุด โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มทั้งหมดได้สรุปไว้ดังตารางที่ 1

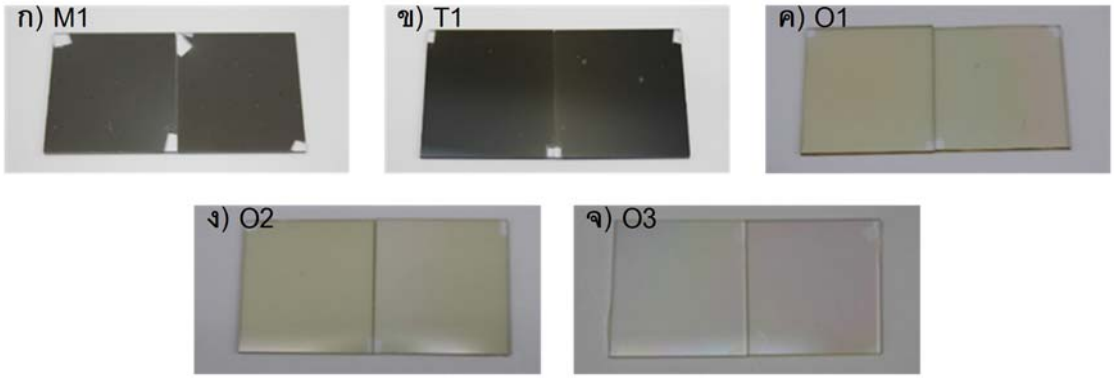
ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการเคลือบฟิล์ม AZO ที่โหมดการเคลือบต่างๆ

Sample	Mode	Controlled parameters			V_d	O_2 flow rate
		Power (W)	Time (min)	Ar flow rate (sccm)	(V)	(sccm)
M1	Metal mode	150	5	10	550	5
T1	Transition mode				440-450	4.76
O1	Oxide mode				380	4.32
O2	Oxide mode				370	4.42
O3	Oxide mode				360	4.52

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

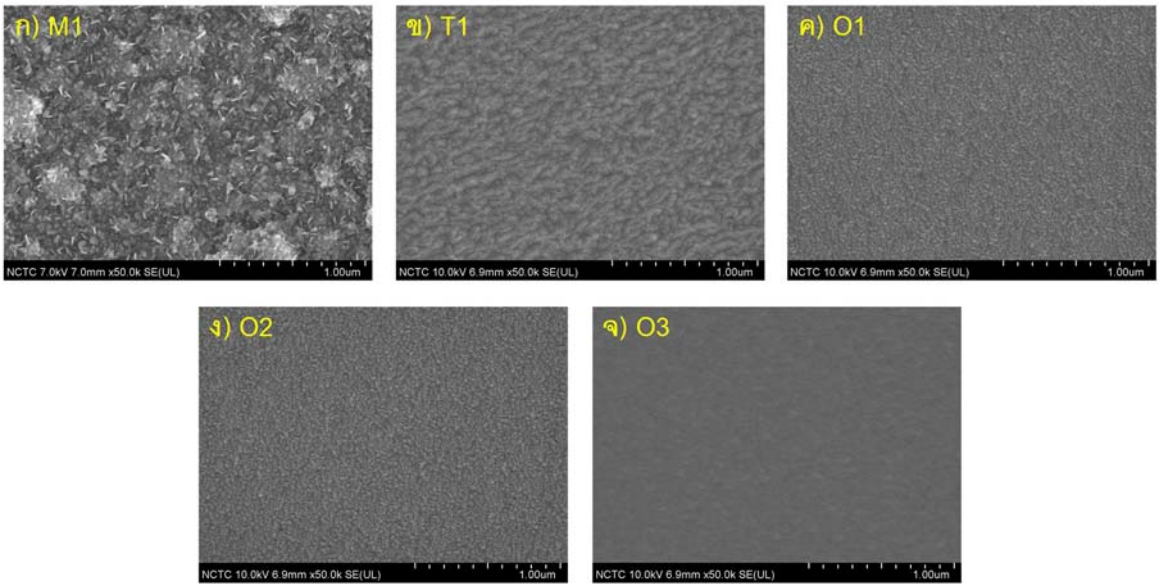
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

ลักษณะภาพถ่ายทางกายภาพของฟิล์ม AZO แสดงได้ดังรูปที่ 3 พบว่าฟิล์ม M1 และ T1 ที่ถูกเคลือบในโหมดโลหะและโหมดทรานซิชัน ฟิล์มมีสีดำ ทึบแสง ส่วนฟิล์มที่ถูกเคลือบในโหมดออกไซด์ O1 และ O2 ฟิล์มมีลักษณะโปร่งแสงและสีของฟิล์มเป็นสีน้ำตาลอ่อนอมเขียว ขณะที่ฟิล์ม O3 ฟิล์มมีลักษณะใสและโปร่งแสงมากกว่าฟิล์ม O1 และ O2 ซึ่งเห็นได้ว่าการเคลือบฟิล์มด้วยโหมดการเคลือบที่แตกต่างกันมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของฟิล์มอย่างชัดเจน นอกจากนี้การเคลือบฟิล์มในโหมดออกไซด์ด้วยศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จที่แตกต่างกัน ก็ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของฟิล์มต่อไป

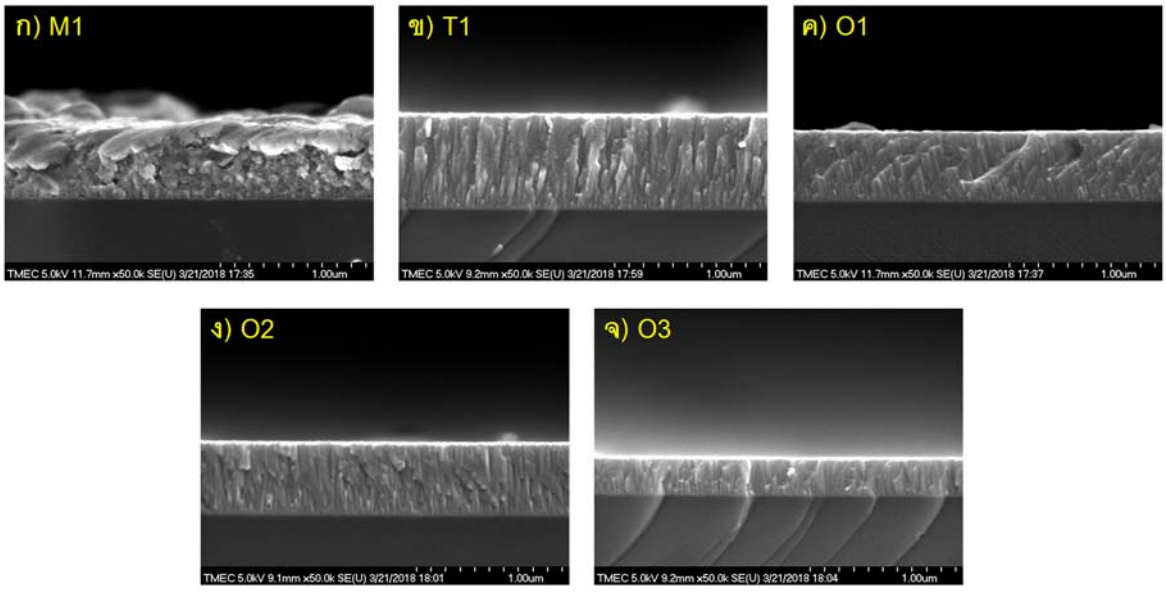


รูปที่ 3 ภาพถ่ายลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบนกระจกสไลด์ ที่โหมดการเคลือบต่างกัน ก) M1 ข) T1 ค) O1 ง) O2 และ จ) O3 ตามลำดับ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มถูกตรวจสอบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM ยี่ห้อ HITACHI รุ่น SU-8030) แสดงได้ดังรูปที่ 4 ในขณะที่ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์ม แสดงได้ดังรูปที่ 5 และได้ทำการวัดความหนาของฟิล์มที่ตำแหน่งต่างกันแบบสุ่มจำนวน 20 จุด โดยใช้โปรแกรม ImageJ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่าฟิล์ม M1 ที่เคลือบภายใต้เงื่อนไขของโหมดโลหะ พื้นผิวมีลักษณะการก่อตัวที่หนาแน่น ในขณะที่ภาพตัดขวางของฟิล์มมีลักษณะการก่อตัวที่ยังไม่เป็นระเบียบ มีความหนาของฟิล์มอยู่ที่ประมาณ 509.51 nm ในขณะที่ฟิล์ม T1 ฟิล์มเริ่มมีการก่อตัวเป็นคอลัมนาร์ (Columnar) ที่จัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นฐาน ซึ่งถือเป็นลักษณะโครงสร้างเฮกซะโกนอลของผลึก ZnO และพบว่าฟิล์มมีความหนาประมาณ 656.92 nm ซึ่งหนามากกว่าฟิล์มในโหมดโลหะ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้อะตอมของออกซิเจนสามารถเข้าไปสร้างพันธะกับอะตอมของซิงค์ให้เป็นแบบเตตระฮีดรอล จนส่งผลให้ฟิล์มสามารถก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึก ZnO ได้สมบูรณ์มากขึ้น หรือมีจัดเรียงตัวในทิศทางแกน c ตั้งฉากกับแผ่นฐานได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มมีความหนามากขึ้นนั้นเอง ต่อมาฟิล์ม O1 ที่เคลือบภายใต้เงื่อนไขของโหมดออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จ 380 V พบว่าฟิล์มมีการก่อตัวเป็นระเบียบและสม่ำเสมอมากขึ้น และจากภาพถ่ายภาคตัดขวางพบว่าฟิล์มมีการก่อตัวเป็นแท่งเรียวที่หนาแน่นและสม่ำเสมอ มีการก่อตัวเป็นคอลัมนาร์ที่ดีขึ้นและมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 481.86 nm ความหนาที่ลดลงไปจากโหมดโลหะและโหมดการทรานซิชันนี้ เป็นผลมาจากการเคลือบฟิล์มที่เป็นสารประกอบออกไซด์มีค่าสปัตเตอริงยีลด์ที่ต่ำ เนื่องจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของสารประกอบออกไซด์ที่พื้นผิวของเป้าสารเคลือบมีค่าสูงกว่าโลหะ (Mickan, 2017) นอกจากนี้จากภาพถ่ายพื้นผิวยังพบว่าเกรนมีขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ฟิล์ม O2 มีการก่อตัวเป็นระเบียบและสม่ำเสมอคล้ายกับฟิล์ม O1 และจากภาพตัดขวางฟิล์มมีการก่อตัวเป็นคอลัมนาร์ที่หนาแน่นและมีความสม่ำเสมอ และฟิล์มมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 502.17 nm ซึ่งหนามากกว่าฟิล์ม O1 เล็กน้อย และสุดท้ายฟิล์ม O3 พื้นผิวของฟิล์มมีความเรียบแตกต่างจากพื้นผิวของฟิล์มที่เงื่อนไขก่อนหน้านี้ เป็นผลมาจากปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่มากเกินไป จึงส่งผลให้ความเร็วและพลังงานของอนุภาคที่เข้าชนกับเป้าสารเคลือบลดลง เนื่องจากการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของเป้าสารเคลือบมากขึ้น (Kim et al., 2013) ผลจากภาพถ่ายภาคตัดขวาง พบว่าฟิล์มมีการก่อตัวเป็นคอลัมนาร์และมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 248.95 nm ซึ่งลดลงมาอย่างมากจากเงื่อนไข O2 ทั้งที่ศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จต่างกันเพียง 10 V โดยเกิดจากปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่มากขึ้นจนเกินจุดวิกฤติ ดังนั้นความเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ผิวเป้าสารเคลือบก็มากขึ้นตามไปด้วยและจนส่งผลให้ค่าสปัตเตอริงยีลด์ลดลงอย่างมาก



รูปที่ 4 ภาพถ่าย FESEM แสดงพื้นผิวของฟิล์มบนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ที่โหมดการเคลือบต่างกัน ก) M1 ข) T1 ค) O1 ง) O2 และ จ) O3 ตามลำดับ

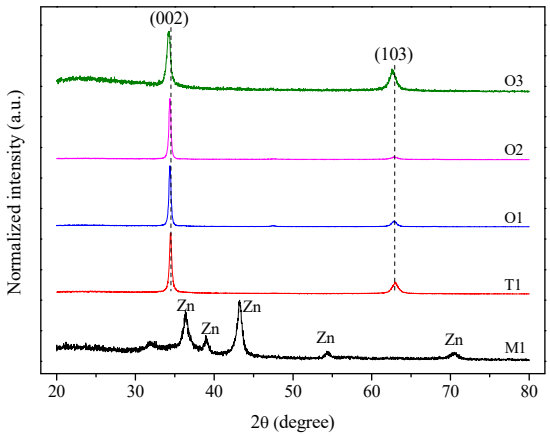


รูปที่ 5 ภาพถ่าย FESEM แสดงภาคตัดขวางและความหนาของฟิล์มบนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ที่โหมดการเคลือบต่างกัน ก) M1 ข) T1 ค) O1 ง) O2 และ จ) O3 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์ม

ในการตรวจสอบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างได้นำฟิล์มบาง AZO ที่เตรียมได้ไปตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ที่ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จากเป้าทองแดง (Cu-K_α) ที่มีความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เท่ากับ 1.5485 Å ทำการกวาดมุม 2θ ตั้งแต่ 20 ถึง 80 องศา ใช้ความละเอียดในการสแกน 0.04 องศาต่อวินาที ซึ่งริ้วรอยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ผ่านโครงสร้างผลึกทำให้เกิดมุมของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกมา โดยเป็นรูปแบบเฉพาะของโครงสร้างผลึกแต่ละชนิด จึงสามารถระบุชนิดของโครงสร้างผลึก และดัชนีมิลเลอร์ของผลึกได้ (Cullity, 1978) ตามรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าฟิล์ม M1 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดโลหะ ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของ Zn ซึ่งทำ

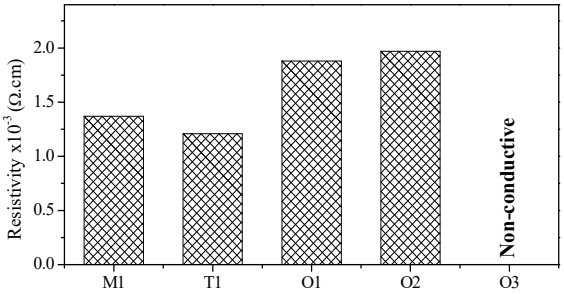
ให้ฟิล์ม M1 จัดเป็นฟิล์มประเภทฟิล์มโลหะ ไม่ใช่ฟิล์ม AZO ในขณะที่ฟิล์ม T1 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดทรานซิชันและฟิล์ม O1 O2 และ O3 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดออกไซด์ พบว่ามีพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์หลักๆ อยู่ 2 พีคที่คล้ายกันที่ตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 34 และ 62 องศา และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับไฟล์ข้อมูลมาตรฐานของ PDF หมายเลข 30-1451 พบว่าพีคเหล่านั้นสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบนของโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ของผลึก ZnO ที่ระนาบ (002) และ (103) ตามลำดับ จึงทำให้ฟิล์มดังกล่าวนี้จัดเป็นฟิล์มบาง AZO และยังสังเกตเห็นได้ว่าที่ระนาบ (002) พีคมีความสูงกว่าที่ระนาบ (103) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบาง AZO สามารถจัดเรียงตัวตามระนาบ (002) ของผลึก ZnO ตามแกน c ที่ตั้งฉากกับแผ่นฐานได้ดี (c-axis preferred orientation)



รูปที่ 6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม M1 T1 O1 O2 และ O3

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม

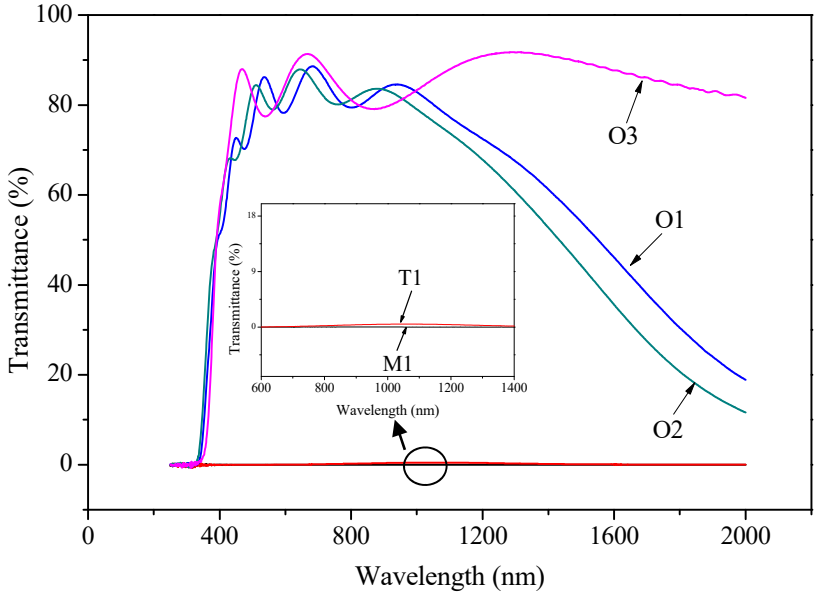
คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง AZO ถูกตรวจวิเคราะห์โดยใช้การวัดแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (ยี่ห้อ ECOPIA รุ่น 3000) ผลการทดลองพบว่าฟิล์ม M1 T1 O1 และ O2 มีค่าสภาพต้านทานอยู่ในช่วง $1.21\text{x}10^{-3}$ ถึง $1.97\text{x}10^{-3}$ $\Omega \cdot \text{cm}$ ขณะที่ฟิล์ม O3 ไม่นำไฟฟ้า (Non-conductive) ดังแสดงตามรูปที่ 7 จะเห็นว่าฟิล์ม T1 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดทรานซิชัน มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะฟิล์มมีความเป็นผลึก ZnO ที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ในขณะที่ฟิล์ม M1 ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มโลหะผสมของซิงค์เจืออะลูมินัม แต่ด้วยความไม่เป็นระเบียบของฟิล์ม จึงทำให้ฟิล์ม M1 นำไฟฟ้าได้น้อยกว่าฟิล์ม T1 ส่วนฟิล์ม O1 และ O2 มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เกิดจากการเคลือบฟิล์มที่อยู่ในโหมดออกไซด์ที่มีปริมาณออกซิเจนมากขึ้น ส่งผลให้อะตอมของออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะตอมของอะลูมินัมมากขึ้น เกิดเป็นโครงสร้างผลึก Al_2O_3 ซึ่งไม่นำไฟฟ้า ปะปนอยู่ในฟิล์มบาง AZO และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนมากขึ้นถึงจุดวิกฤติ จนทำให้สัดส่วนของอะตอมของซิงค์ที่ถูกแทนที่ (Zn interstitial atoms) ลดลง (Li et al., 2012) นั่นคืออะตอมของอะลูมินัมเกือบทั้งหมดไม่ได้เข้าไปแทนที่อะตอมของซิงค์ แต่จะไปก่อตัวเป็นฟิล์ม Al_2O_3 จึงทำให้ฟิล์ม O3 มีความเป็นผลึก ZnO น้อยลง และไม่นำไฟฟ้าในที่สุด



รูปที่ 7 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม M1 T1 O1 O2 และ O3

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม

คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง AZO ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงในย่านยูวีถึงอินฟราเรด โดยใช้เครื่อง Universal measurement spectrophotometer (ยี่ห้อ CARY รุ่น 7000) ซึ่งได้ทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง $(\%T)$ ของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 2000 nm แสดงดังรูปที่ 8 จากกราฟพบว่าฟิล์ม M1 และ T1 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดโลหะและโหมดทรานซิชัน (ภาพเล็ก) ฟิล์มไม่สามารถส่งผ่านแสงได้ ในขณะที่ฟิล์ม O1 O2 และ O3 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดออกไซด์ด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ 380 370 และ 360 V ตามลำดับ ฟิล์มสามารถส่งผ่านแสงได้และพบขอบการดูดกลืนในย่านยูวี



รูปที่ 8 สเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์ม M1 T1 O1 O2 และ O3

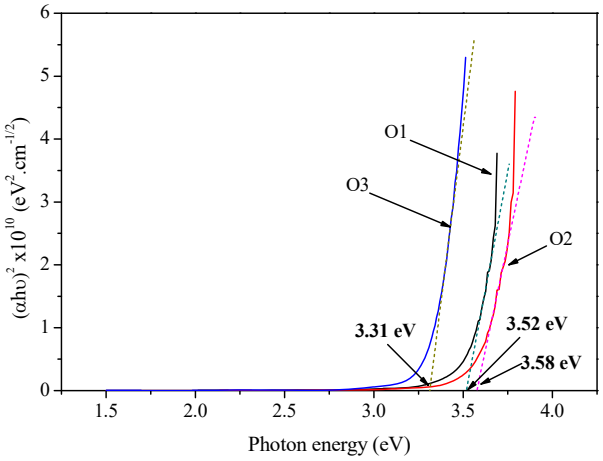
เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มในย่านที่ตามองเห็นได้ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 nm พบว่าฟิล์ม M1 และ T1 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดโลหะและโหมดทรานซิชันมีค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงเป็นศูนย์ นั่นแสดงว่าฟิล์มไม่สามารถส่งผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้เลย จึงไม่สามารถนำมาเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงได้ ส่วนฟิล์ม O1 O2 และ O3 ที่เคลือบด้วยโหมดออกไซด์ มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเท่ากับ 79 80 และ 83 % ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์มเข้าสู่โหมดออกไซด์มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากฟิล์ม O3 ไม่นำไฟฟ้า จึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงได้

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap, E_g) ของฟิล์มบาง AZO ที่มีลักษณะช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง (Direct band gap) ได้จากความสัมพันธ์ของการพล็อตกราฟแบบทังค์ (Tauc plot method) โดยใช้สมการที่ 1

$$\alpha h\nu = A\left(h\nu - E_g\right)^{1/2} \qquad (1)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) $h\nu$ คือพลังงานของโฟตอน (Photon energy) และ A คือค่าคงที่ จากสมการที่ 1 เมื่อพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ โดยกำหนดให้แกน $y=(\alpha h\nu)^2$ และแกน $x=h\nu$ ทำให้สามารถประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงได้ โดยทำการลากเส้นตรงตัดกับแกน x ซึ่งเป็นแกนของพลังงานโฟตอน และจากการวิเคราะห์ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มพบว่าฟิล์ม M1 และ T1 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดโลหะและโหมดทรานซิชัน ไม่สามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ เนื่องจากฟิล์มไม่สามารถส่งผ่านแสง ในขณะที่ฟิล์ม O1 O2 และ O3 ที่ถูกเคลือบด้วยโหมดออกไซด์ พบว่ามีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.31 ถึง 3.58 eV ดังแสดงตามรูปที่ 9 จะเห็นว่าฟิล์ม O3 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานน้อยที่สุด ซึ่งผลนี้มีความสอดคล้องกับผลของคุณสมบัติเชิงโครงสร้างจากเทคนิค XRD ที่ว่าฟิล์ม O3 มีความเป็นผลึกของโครงสร้าง ZnO ที่น้อย

ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม O1 และ O2 หรือฟิล์ม O3 มีค่า FWHM มากที่สุดนั่นเอง ในขณะที่ฟิล์ม O2 จากผล XRD ก็พบว่ามีค่า FWHM ที่น้อยที่สุดหรือฟิล์มมีความเป็นผลึกที่ดีที่สุด จึงพบว่าฟิล์มมีค่าช่องว่างพลังงานมากที่สุดที่ 3.58 eV



รูปที่ 9 การพล็อตกราฟแบบทังค์ ที่แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มที่ถูกเคลือบในโหมดออกไซด์ต่างกัน

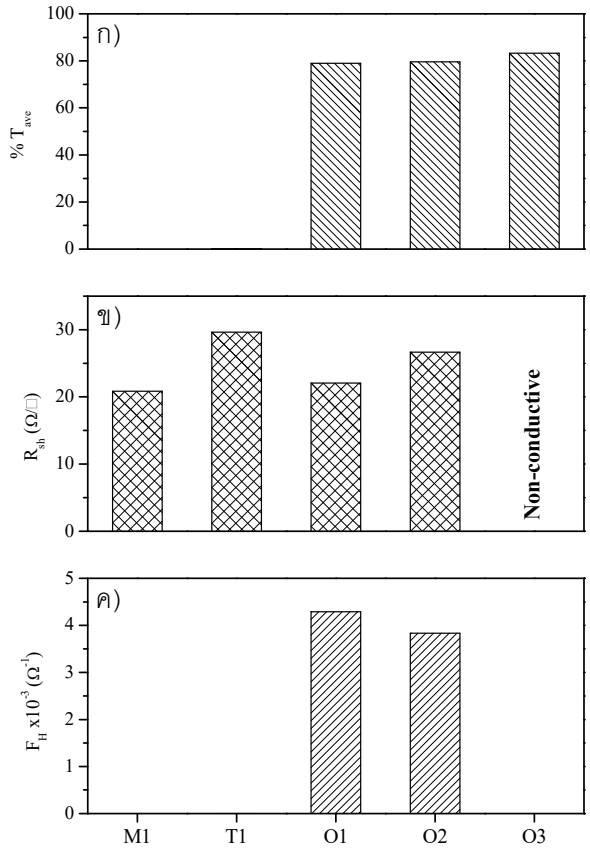
ผลการคำนวณค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริท

ค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริท (Figure of merit, F_H) นิยามมาจากค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ยกกำลังสิบ (T^{10}) ต่อค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance, R_{sh}) ของฟิล์ม ดังแสดงในสมการที่ 2 (Haacke, 1976) โดยทั่วไปมักนำมาใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง ถ้าค่าฟิกเกอร์ออฟ-เมอริทมากที่สุด แสดงว่าฟิล์มมีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ พบว่าฟิล์ม M1 และ T1 มีค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริทเป็นศูนย์ เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็นเท่ากับศูนย์ ในขณะฟิล์ม O3 ไม่สามารถหาค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริทได้ เนื่องจากฟิล์มไม่นำไฟฟ้า ส่วนฟิล์ม O1 และฟิล์ม O2 มีค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริทสูงใกล้เคียงกัน ดังแสดงตามรูปที่ 10 ซึ่งมีค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริทสูงสุดเท่ากับ $4.29 \times 10^{-3}\ \Omega^{-1}$ และยังมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Lin (Lin et al., 2015) ที่มีค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริทสูงสุดเท่ากับ $3.22 \times 10^{-3}\ \Omega^{-1}$ จึงสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์ม AZO ที่เหมาะสมคือเคลือบด้วยโหมดออกไซด์ที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนในช่วง 4.32 ถึง 4.42 sccm ซึ่งทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จอยู่ในช่วง 370 ถึง 380 V และไม่ควรเคลือบในช่วงที่เข้าสู่โหมดออกไซด์มากเกินไป เพราะจะทำให้ฟิล์ม AZO ที่เตรียมได้ไม่นำไฟฟ้า

$$F_H = \frac{T^{10}}{R_{sh}} \qquad (2)$$

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจืออะลูมินัม โดยใช้เป้าโลหะผสมซิงค์เจืออะลูมินัมด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง การปรับค่าอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนจะส่งผลโดยตรงต่อโหมดการเคลือบฟิล์ม ถ้าเคลือบฟิล์มในโหมดโลหะและโหมดทรานซิชัน ฟิล์มสามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่ไม่สามารถส่งผ่านแสงได้ โหมดดังกล่าวนี้จึงไม่เหมาะสมต่อการเคลือบฟิล์มที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ในขณะที่ฟิล์มที่เคลือบด้วยโหมดออกไซด์สามารถส่งผ่านแสงได้ในช่วง 79 ถึง 83 % มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.31 ถึง 3.58 eV และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนมากขึ้นถึงจุดวิกฤติ จะทำให้ฟิล์ม AZO มีความเป็นผลึกน้อยลงและไม่นำไฟฟ้าในที่สุด โดยฟิล์มที่มีค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริทมากที่สุด คือ ฟิล์มที่เคลือบในโหมดออกไซด์ที่ใช้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนในช่วง 4.32 ถึง 4.42 sccm ซึ่งทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการดิสชาร์จอยู่ในช่วง 370 ถึง 380 V



รูปที่ 10 ก) ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ข) ค่าความต้านทานเชิงแผ่น และ ค) ค่าฟิกเกอร์ออฟเมอริทของฟิล์ม M1 T1 O1 O2 และ O3

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (National Electronics and Computer Technology Center, NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือด้านการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Ajili, M., Jebbari, N., Turki, N.K., and Castagné, M. (2012). Effect of Al- doped on physical properties of ZnO Thin films grown by spray pyrolysis on SnO_2: F/glass. EPJ Web of Conferences 29: 1-9.

Bindu, P. and Thomas, S. (2014). Estimation of lattice strain of ZnO nanoparticles: X-ray peak profile analysis. Journal Theory Apply Physics 8: 123-134.

Cullity, B.D. (1978). Element of X-ray diffraction. United States of America: Addison-.

Haacke, G. (1976). New figure of merit for transparent conductors. Journal of Applied physics 47: 4086-4089.

Jang, D.S., Jung, S.J., and Lee, J.J. (2012). Al doped zinc oxide thin films on polymer substrates deposited by inductively coupled plasma assisted reactive sputtering. Current Applied Physics 12: S118-S122.

Kim, D., Yun, I., and Kim, H. (2010). Fabrication of rough Al doped ZnO films deposited by low pressure chemical vapor deposition for high efficiency thin film solar cells. Current Applied Physics 10(3): 459-462.

Kim, D.S., Park, J.H., Lee, S.J., Ahn, K.J., Lee, M.S., Ham, M.H., Lee, W., and Myoung, J.M. (2013). Effects of oxygen concntration on the properties of Al-doped ZnO transparent conductive films deposited by pulsed DC magnetron sputtering. Materials Science in Seemiconductor Processing 16: 997-1001.

Ko, H., Tai, W.P., Kim, K.C., Kim, S.H., Suh, S.J., and Kim, Y.S. (2005). Growth of Al- doped ZnO thin films by pulsed DC magnetron sputtering. Journal of Crystal Grown 277: 352-358.

Li, L.N., Zhao, Y., Chen, X.L., Sun, J., and Zhang, X.D. (2012). Effect of oxygen flux on the aluminum doped zinc oxide thin

films by direct current manetron sputtering. Physics Procedia 32: 687-695.

Lin, Y.M., Chu, C.H., Wu H.W., and Huang J.L. (2015). Study of AZO Thin Films Under Different Annealing Atmosphere on Structural, Optical and Electrical Properties by rf Magnetron Sputtering. International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. 18 – 20 March 2015. Hong Kong.

Liu, Y., Li, Y., and Zeng, H. (2013). ZnO-based transparent conductive thin films: Doping, performance, and processing. Journal of Nanomaterials 1-9.

May, C., Menner, R., Strumpfel, J., Oertel, M., and Sprecher, B. (2003). Deposition of TCO films by reactive magnetron sputtering from metallic Zn:Al alloy target. Surface and coatings technology 169: 512-516.

Mickan, M. (2017). Deposition of Al-doped ZnO films by high power impulse magnetron sputtering. Linköping University, Sweden: LiU-Tryck. 85.

Nomoto, J.I., Hirano, T., Miyata, T., and Minami, T. (2011). Preparation of Al-doped ZnO transparent electrodes suitable for thin-film solar cell applications by various types of magnetron sputtering depositions. Thin Solid Films 520: 1400-1406.

Shahid, M.U., Deen K.M., Ahmad, A., Akram, M.A., Aslam, M., and Akhtar, W. (2016). Formation of Al-doped ZnO thin films on glass by sol– gel process and characterization. Applied Nanoscience 6(2): 235-241.

Sibiński, M., Znajdek, K., Sawczak, M., and Górski, M. (2014). AZO layers deposited by PLD method as flexible transparent emitter electrodes for solar cells. Microelectronic Engineering 127: 57-60.

❑❑❑❑❑