

การปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย เทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบสองขั้วไม่สมมาตร

Growth of ZnO Thin Film for Solar Cell Electrode Deposited by Asymmetric Bipolar of DC Magnetron Sputtering Technique

ธนชัย พลเคน*, พรนภา ขั้วนา, สูดารัตน์ กระแสโสม, พรชัย ชินสา และ วิเชษฐ์ พลหาญ
Tanachai Ponken*, Pornnapa Khuana, Sudarat Krasaesom, Pornchai Chinnasa
and Wichaid Ponhan

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University

*Corresponding author. E-mail: tanachai.po@rmu.ac.th

(Received: 10 February 2023; Revised: 11 April 2023; Accepted: 18 April 2023)

บทคัดย่อ

การปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบสองขั้วไม่สมมาตร เงื่อนไขที่ศึกษาไฟฟ้าลบเท่ากับ 500 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าบวกเท่ากับ 100 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 80 มิลลิแอมแปร์ ภายใต้ก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ถูกเคลือบที่เวลา 10 20 30 40 และ 50 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ถูกปลูกที่เวลา 30 นาที โดยเจือก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ สมบัติเชิงโครงสร้าง ทางสัณฐานวิทยา เชิงแสง และสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เทคนิคอีดีเอ็ม 4 จุด แบบเชิงเส้น และการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ผลการทดลองสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางมีความเป็นผลึกสูง และมีขนาดผลึกของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 16 นาโนเมตร ที่ระนาบ (002) ที่มุม 2θ เท่ากับ 34.34 องศา สำหรับฟิล์มที่เคลือบภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มมีความเป็นผลึกสูง และขนาดของเกรนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 264 ถึง 358 นาโนเมตร ค่าการส่องผ่านแสงอยู่ในช่วง 67 ถึง 83 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฟิล์มที่ไม่เจือก๊าซไนโตรเจน และ 55 ถึง 77 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฟิล์มเจือก๊าซไนโตรเจน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 6.99×10^2 , 5.55×10^4 , 2.26×10^4 และ 6.21×10^4 โอห์ม-เซนติเมตร รวมทั้งค่าความหนาแน่นของพาหะอยู่ในช่วง 1.61×10^{14} ถึง 1.16×10^{18} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และสภาพคล่องตัว

ของพาหะเท่ากับ 2.03×10^{-3} ถึง 6.96×10^{-1} ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที ซึ่งพบว่ามีค่าความหนาแน่นของพาหะค่อนข้างสูงและมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังนั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ไม่เจือก๊าซไนโตรเจนจึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ทำเป็นขั้วไฟฟ้าชั้นโปร่งแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ: ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์; ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง; ขั้วไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

ZnO thin film for solar cell electrode deposited by asymmetric bipolar of DC magnetron sputtering technique. The ZnO thin film were prepared by asymmetric bipolar of DC magnetron sputtering technique which the negative electric potential of 480 V, the positive electric potential of 100 V, the current of 80 mA under Ar gas atmosphere at room temperature. ZnO thin films were grown by the deposition time of 10, 20, 30, 40 and 50 minutes, respectively. Moreover, growth of ZnO thin film the deposition time for 30 minutes was doped by N₂ gas the flow rate of 5, 10 and 15 sccm, respectively. Structural, morphological, optical and electrical properties of ZnO thin film were analyzed by X-Ray diffraction (XRD), Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM), UV-vis spectrophotometer, Linear four-point probe and Hall effect measurement. The results found that, structural properties of thin films found that has high crystal and ZnO crystalline size of 16 nm at 002 plane on 2θ of 34.34° for film coated under N₂ gas the flow rate of 5 sccm. Surface characteristic of film show a high crystal and the average grain sizes are approximately of 264 – 358 nm. ZnO thin films are in range of 67% - 83% and 55% - 77% for the film growth under a without N₂ gas and a doped N₂ gas. The resistivity values of ZnO thin films are 6.99×10^2 , 5.55×10^4 , 2.26×10^4 and 6.21×10^4 Ω.m. Addition, the carrier concentration (n) are 1.61×10^{14} - 1.16×10^{18} cm⁻³ which found that the carrier concentration somewhat highly and behaviors n-type semiconductor-like. Thus, ZnO thin film deposited non-doped N₂ gas which the suitable for application to fabrication of transparent electrode for solar cell windows layer.

Keywords: ZnO thin film, DC magnetron sputtering, Electrode solar cell

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนแหล่งพลังงานที่นำมาผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ดังนั้นมนุษย์จึงหาหนทางเพื่อให้มีพลังงานไฟฟ้าใช้อย่างเพียงพอ จึงมีงานวิจัยและพัฒนาด้านอุตสาหกรรมในการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทน เช่น คลื่น ลม และแสงอาทิตย์ มาผ่านกระบวนการแปลงไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด และเป็นพลังงานที่ไม่หมดสิ้น ดังนั้นจึงมีการนิยมใช้เซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าโดยตรง จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญของแหล่งพลังงานในอนาคต และเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายชนิดโดยใช้วัสดุในการผลิตที่แตกต่างกัน โดยแสงอาทิตย์ที่นิยมใช้คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน ซึ่งมีข้อเสียคือ ราคาแพงและแตกหักง่าย แต่ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางก็มีความสำคัญไม่น้อยกว่ากัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพการทำงานสูง ใช้สารตั้งต้นในการผลิตที่น้อยกว่า และสามารถบิดงอได้ ซึ่งสามารถนำสารกึ่งตัวนำมาใช้สร้างเป็นส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ผลงานของ สิทธิวัฒน์ อุ่นจิตร, อดิศร บุรณวงศ์ และสุรสิงห์ ไชยคุณ (2557) เช่น สารกึ่งตัวนำ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยมีการสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ซึ่งมีคุณสมบัติโปร่งแสงและนำไฟฟ้าได้ ซึ่งมีการพัฒนาการของขั้วไฟฟ้าจากผลงานของ Ohmuka et al. (2016) ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนกระจกด้วยวิธีดีซีสเป็คเตอริง พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกตามแนวแกนซีเพิ่มขึ้นโดยประมาณ 1.27 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคำนวณได้จากการเลื่อนขึ้นของพีคในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การอบหลังการเคลือบในอากาศที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียสทำให้โครงสร้างผลึกคงที่ สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงจาก 500 โอห์มเซนติเมตร ลงไปที่ 0.6 โอห์มเซนติเมตร โดยการอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และผลงานของ Pathak & Purohit (2016) ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และซิงค์ ออกไซด์เจือไนโตรเจนบนกระจกด้วยวิธีอาร์เอฟสเป็คเตอริง การศึกษาโครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีการจัดเรียงตัวของผลึกกว้างในระนาบ (002) และแสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ไรต์ (wurtzite) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ มีลักษณะของเกรนแบบอัดแน่นโดยไม่มีรอยแตก แสดงถึงการกระจายของเกรนสม่ำเสมอ มีช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 3.26 อิเล็กตรอนโวลต์ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์เจือไนโตรเจนบนกระจกด้วยวิธีอาร์เอฟสเป็คเตอริง สามารถนำมาใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีการส่งผ่านแสงสูงในช่วงแสงที่ตามองเห็น ช่องว่างแถบพลังงานกว้างและนำไฟฟ้าได้ดี จากงานวิจัยที่กล่าวมาทำให้พบว่าสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์สามารถพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าและส่วนประกอบของชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางได้ นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างผลงานวิจัยเกี่ยวกับการปลูก

ฟิล์มบางสำหรับทำเซลล์แสงอาทิตย์ของฐิตินัย แก้วแดง และคณะ (2554) ผลงานวิจัยของดลลักษณ์ มาณพ และคณะ (2555) ผลงานวิจัยของนันทนัช วัฒนสุภิญญา (2553) ผลงานวิจัยของนิรันดร์ วิทิตอนันต์ และคณะ (2557) ผลงานวิจัยของภาณุวัฒน์ ครองอารมณ์ (2556) ผลงานวิจัยของราชศักดิ์ ศักดานุกา (2558) และผลงานวิจัยของ Ding et al. (2009) ซึ่งการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคสเปตเตอริงสามารถที่จะทำให้ได้ฟิล์มที่สม่ำเสมอ มีความคงทนต่อการกัดกร่อน มีความเป็นผลึกสูงตามหลักการพื้นฐานของ อรุณี หลักคำ และคณะ (2557) และ Chapman (1980)

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยทำการปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงแบบสองขั้วไม่สมมาตร (Asymmetric bipolar DC magnetron sputtering technique) เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง โดยหาเงื่อนไขที่ทำให้มีคุณสมบัติโปร่งแสง และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ โดยการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติเชิงไฟฟ้า ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) เครื่อง X-ray diffraction (XRD) เครื่อง UV-vis spectrophotometer และเครื่อง Versa Lab ตามลำดับ

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การเตรียมแผ่นรองรับขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตรที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว นำมาวางที่แท่นวางแผ่นรองรับ ซึ่งอยู่ด้านบนของภาชนะสุญญากาศ และเป็นขั้วบวก โดยมีเป้าซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ด้านล่างและเป็นขั้วลบ ในระยะห่าง 6 เซนติเมตร ปิดเป้าด้วยชัตเตอร์ (Shutter) แล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศให้สนิท เปิดสวิตช์ระบบน้ำหล่อเย็น เพื่อระบายความร้อนของเครื่องสเปตเตอริงขณะทำการสเปตเตอริง เปิดสวิตช์ควบคุมเครื่องสเปตเตอริง เปิดระบบปั๊มเริ่มจากเปิดสวิตช์เครื่องสุบล (Rotary pump : RP) เปิดเครื่องสเปตเตอริง จนปั๊มได้ความดันที่ 30 มิลลิทอร์ เปิดระบบก๊าซอาร์กอนให้ได้ความดันก๊าซที่ต้องการตามเงื่อนไข เปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หมุนปรับเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าแล้วปรับกระแสไฟฟ้าให้เท่ากับ 80 มิลลิแอมป์ ทำการพรีสเปตเตอริง (Pre-sputter) เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นรองรับ โดยฟิล์มตัวอย่างที่ 1 - 5 โดยกำหนดเวลาในการเคลือบตามเงื่อนไขดังตารางที่ 1 และการศึกษาผลของสัดส่วนก๊าซไนโตรเจนที่เจือในสัดส่วนที่ต่างกันของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นรองรับตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ตัวอย่าง	ความดัน (mTorr)	อุณหภูมิ(°C)	กระแสไฟฟ้า (mA)	Variac 1 V+(V)	Variac 2 V-(V)	เวลา(นาที)
ZnO_10 min	80	25	80	100	500	10
ZnO_20 min	80	25	80	100	500	20
ZnO_30 min	80	24	80	100	500	30
ZnO_40 min	80	21	80	100	500	40
ZnO_50 min	80	25	80	100	500	50

ตารางที่2 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยการเติมก๊าซไนโตรเจน

ตัวอย่าง	ความดัน (mTorr)	อุณหภูมิ(°C)	กระแสไฟฟ้า (mA)	Variac 1 V+(V)	Variac 2 V-(V)	เวลา (นาที)	ความดันก๊าซ ไนโตรเจน (SCCM)
ZnON2_5	80	21	80	100	500	30	5
ZnON2_10	80	22	80	100	500	30	10
ZnON2_15	80	21	80	100	500	30	15

ศึกษาสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction , XRD) ผลิตโดยบริษัท Empyrean รุ่น PANalytical ตั้งอยู่ที่ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สามารถคำนวณหาขนาดของผลึกเฉลี่ยจากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาขนาดของผลึกดังนี้

$$D = \frac{\kappa \lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ D คือ ขนาดผลึก (นาโนเมตร)
 κ คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับรูปร่างของผลึก
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (นาโนเมตร)
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (เรเดียน)
 θ คือ มุมเลี้ยวเบนของระนาบผลึกหรือพีค (องศา)

ตามหลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุหาลงกรณ์ (2555)

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ถูกตัดเป็นชิ้นที่มีขนาด 1.25 x 1.25 เซนติเมตร แล้วนำไปยึดกับแก้วสำหรับวัด ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะถูกนำเข้าช่องยึดสำหรับการวัดการส่องผ่านและการดูดกลืนของแสง

เทียบกับแผ่นรองรับที่ไม่มีฟิล์มเคลือบ ทำการวัดตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตรตามหลักการใน Hartnagel (1995). (เครื่องทดสอบการส่งผ่านแสง (UV-VIS spectrophotometer) รุ่น UV-1800 ตั้งอยู่ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น) ศึกษาสมบัติเชิงสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Focused Ion Beam Scanning Electron Microscopes, FIB-SEM) ผลิตโดยบริษัท FEI รุ่น Helios NanoLab G3 CX ตั้งอยู่ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เป็นไปตามหลักการทฤษฎีใน สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล (2555) นำฟิล์มบางตัดเป็นชิ้นที่มีขนาด 1.25×1.25 เซนติเมตร จากนั้นนำไปติดเทปคาร์บอนเพื่อยึดกับสตัปของที่ยึดสารตัวอย่างเพื่อทำการนำเข้าเครื่องวัดศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า ด้วยเครื่อง Versa Lab ผลิตโดยบริษัท Quantum Design ตั้งอยู่ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) และการวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ดังทฤษฎีหลักการของ เจริญชัย เหลืองอ่อน (2554) ที่ส่งผลต่อชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี นอกจากนี้ยังสามารถใช้ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเทคนิคต่างที่กล่าวข้างต้นจาก Milton (1997) Smith (2015) และ Streetman, Ben G. (1995).

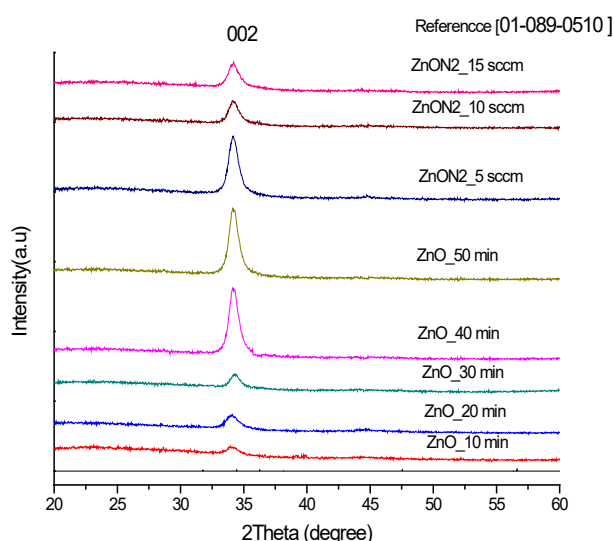
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

สมบัติทางโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังแสดงในภาพที่ 1 ใช้เวลาในการเคลือบ 10 20 30 40 และ 50 นาที พบว่าฟิล์มบางทั้งหมดแสดงการเกิดระนาบของซิงค์ออกไซด์ตรงกันที่ (002) ที่มีการจัดโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล (Hexagonal) โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง (Ref. code. 01-089-0510) ที่มุม 2θ ประมาณ 34.43 องศา พบว่าฟิล์มที่ใช้เวลาในการเคลือบ 40 ถึง 50 นาที ความสูงของพีคมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามเวลาเคลือบที่เพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เวลามากขึ้นทำให้ความเข้มของสัญญาณการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Intensity) ของพีคสูงขึ้นฟิล์มมีความเป็นผลึกสูง และเวลาในการเคลือบมากขึ้นจะส่งผลต่อโครงสร้างผลึก

เมื่อวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือไนโตรเจนในสัดส่วน 5, 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที่ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 30 นาที ฟิล์มบางทั้งหมดพบการเกิดระนาบของซิงค์ออกไซด์ตรงกันที่ (002) ที่มีการจัดโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง (Ref. code. 01-089-0510) ที่มุม 2θ ประมาณ 34.43 องศา พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที่ แสดงความเข้มของสัญญาณการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Intensity) ของพีคสูงขึ้น ส่วนฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที่ มีพีคที่ลดลงอาจเป็นเพราะสัดส่วนการเจือก๊าซไนโตรเจนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นส่งผลให้มี

ความเป็นผลึกลดลง จะเห็นได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแปรผันตามสัดส่วนการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้สัดส่วนการไหลของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้นความสูงของพีคจะมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พีคที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่สูงกว่าฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่เจือปริมาณก๊าซไนโตรเจนมีผลต่อความเป็นผลึกของฟิล์มบางที่ลดลง ค่าขนาดผลึก (Grain Size) ซิงโครไดต์อยู่ในช่วง 12.98 ถึง 18.4 นาโนเมตร และค่าขนาดผลึกซิงโครไดต์เจือก๊าซไนโตรเจนอยู่ในช่วง 10 ถึง 16 นาโนเมตร ขนาดผลึกอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Abdelkrim et al. (2009) ทำการเคลือบฟิล์มบางซิงโครไดต์ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงพบว่า การเจือก๊าซไนโตรเจนมีผลต่อโครงสร้างผลึก เมื่อเจือก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ขนาดผลึกลดลง

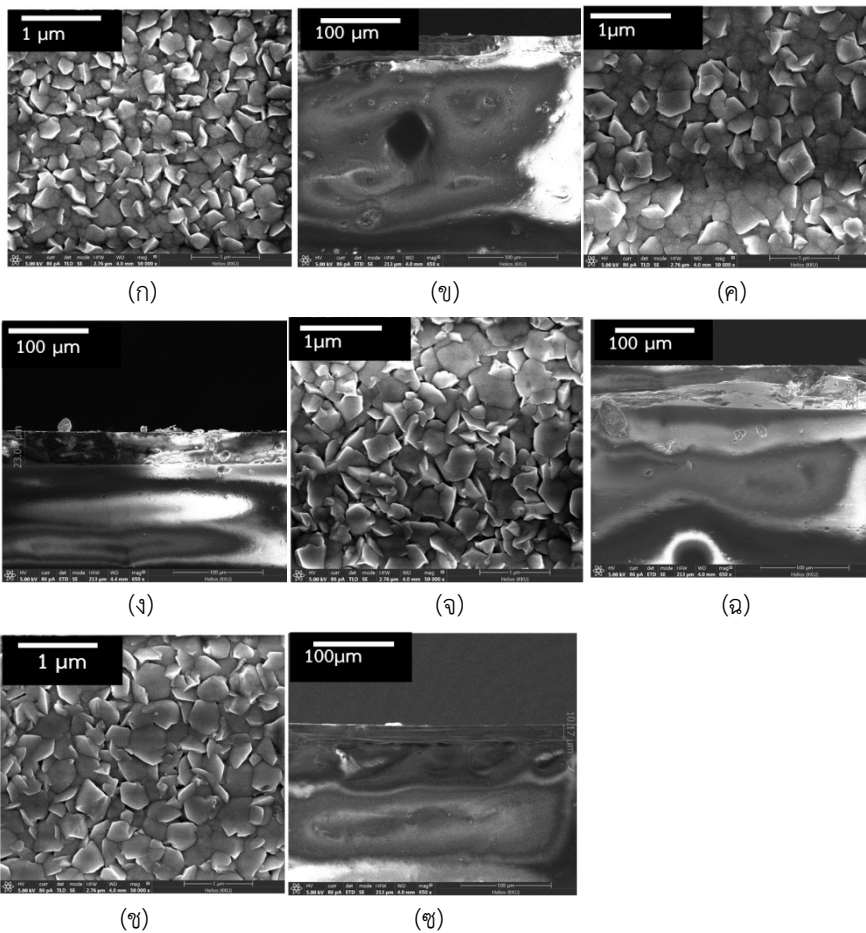


ภาพที่ 1 แสดงภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 10 20 30 40 และ 50 นาที และฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนที่เจือในสัดส่วน 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เคลือบเป็นเวลา 30 นาที

สมบัติทางสัณฐานวิทยา

แสดงลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เคลือบในเงื่อนไขต่าง ๆ จากการศึกษาด้วยเทคนิค FE-SEM แสดงดังภาพที่ 2 พบว่าฟิล์มที่ใช้เวลาในการเคลือบ 30 นาที เกรนมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมแหลมที่มีขนาดเล็กกระจายอย่างหนาแน่นทั่วผิวน้ำของฟิล์ม ส่วนฟิล์มที่เจือก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วนต่าง ๆ เกรนของฟิล์มมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมแหลมขนาดใหญ่กระจายอย่างหนาแน่นที่ผิวน้ำของฟิล์ม จากผลการศึกษา พบว่าลักษณะเกรนของฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เจือก๊าซ

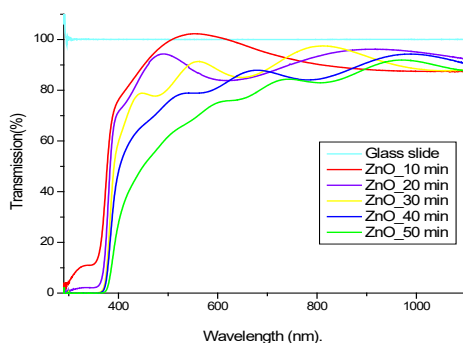
ไนโตรเจน 0 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เคลือบเป็นเวลา 30 นาทีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 264 – 358 นาโนเมตร มีค่าความหนาของฟิล์มจะอยู่ในช่วง 10 - 30 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มสัดส่วนของก๊าซไนโตรเจนส่งผลทำให้ความหนาและขนาดเกรนลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอะตอมของก๊าซไนโตรเจนมีโอกาสเข้าไปรวมตัวกับอะตอมของซิงค์ออกไซด์ที่หน้าเป้าสารเคลือบทำให้เกิดชั้นบาง ๆ ของซิงค์ออกไซด์ซึ่งไม่นำไฟฟ้าบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบ ทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มลดลง ซึ่งส่งผลต่อขนาดเกรนและความหนาของฟิล์มที่เคลือบลดลงด้วย



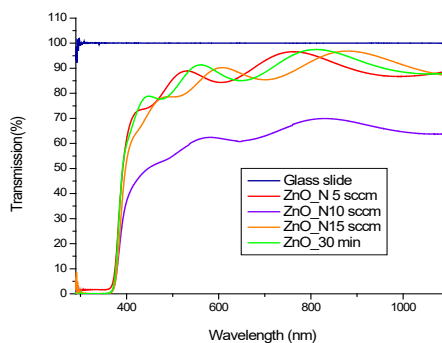
ภาพที่ 2 แสดงลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือก๊าซไนโตรเจนในเงื่อนไขต่าง ๆ เคลือบเป็นเวลา 30 นาที วิเคราะห์จากเทคนิค FE-SEM (ก), (ค), (ง), (จ), (ซ) ลักษณะพื้นผิวที่ใช้เวลาในการเคลือบ 30 นาที, เจือก๊าซไนโตรเจน 5, 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที(ข), (ง), (ฉ), (ซ) ภาคตัดขวางที่เคลือบ 30 นาที, เจือก๊าซไนโตรเจน 5, 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีตามลำดับ

สมบัติทางแสง

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่เป็นเวลา 30 นาที ในงานวิจัยนี้ พบว่าฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน และโปร่งแสงสำหรับฟิล์มเคลือบที่มีการเจือไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สีของฟิล์มบางจะมีลักษณะที่ทึบแสงมากขึ้นตามสัดส่วนการเจือก๊าซไนโตรเจนที่มากขึ้น เมื่อวัดค่าการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าการส่องผ่านแสง (UV-vis Spectrophotometer) แบบลำแสงคู่ จะได้กราฟดังภาพที่ 3 (ก) โดยพบว่าฟิล์มที่เคลือบทั้งหมดมีการส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1100 นาโนเมตร และฟิล์มที่เคลือบทั้งหมดมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงอยู่ในช่วง 67 – 83 เปอร์เซ็นต์ มีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 3.26 – 2.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงมีค่าลดลง เนื่องจากฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยอธิบายได้ดังนี้ เมื่อใช้เวลาในการเคลือบมากขึ้นจึงทำให้ห่อหุ้มของเป้าถูกสปีดเตอร์ออกมายึดติดกับแผ่นรองรับมากขึ้น ทำให้อัตราการเคลือบสูงขึ้น ความหนาของฟิล์มจึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อวัดค่าการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วน 5, 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ใช้เวลาในการเคลือบ 30 นาที ได้กราฟดังภาพที่ 3 (ข) พบว่าฟิล์มที่เคลือบทั้งหมดมีการส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1100 นาโนเมตร และมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงอยู่ในช่วง 55 – 77 เปอร์เซ็นต์ ค่าแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.26 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าฟิล์มมีการส่องผ่านของแสงได้ดี



(ก)

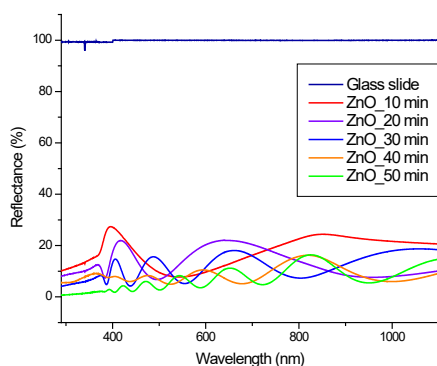


(ข)

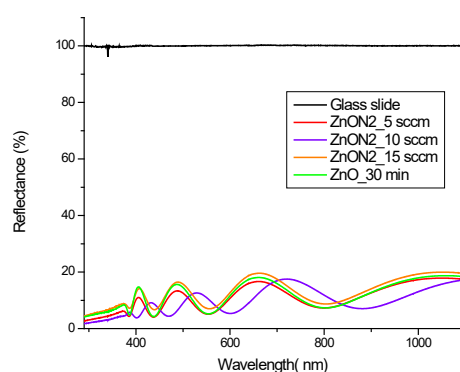
ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (ก) ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 10 20 30 40 และ 50 นาที (ข) ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ก๊าซเจือไนโตรเจนในสัดส่วน 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่เคลือบเป็นเวลา 30 นาที

จากข้อมูลในกราฟดังภาพที่ 4 (ก) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางซิงโครไดออกไซด์ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที พบว่าฟิล์มที่เตรียมไว้ทั้งหมดมีการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1100 นาโนเมตร และฟิล์มที่เตรียมทั้งหมดมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 7 – 18 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงมีค่าลดลง

ข้อมูลจากกราฟดังภาพที่ 4 (ข) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางซิงโครไดออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วน 5, 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีที่ใช้เวลาในการเคลือบ 30 นาที พบว่าฟิล์มที่เตรียมไว้ทั้งหมดมีการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 1100 นาโนเมตร และฟิล์มที่เตรียมทั้งหมดมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสะท้อนแสงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากใช้เวลาในการเคลือบเท่ากัน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง (ก) ฟิล์มบางซิงโครไดออกไซด์ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 10 20 30 40 และ 50 นาที (ข) ฟิล์มบางซิงโครไดออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วน 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเคลือบเป็นเวลา 30 นาที

สมบัติเชิงไฟฟ้า

ผลจากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุดเชิงเส้น

จากตารางที่ 3 หาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยใช้ผลจากการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) เพื่อคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จากการคำนวณฟิล์มบางซิงโครไดออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วนที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 30 นาที พบว่าฟิล์มบางที่ไม่เจือก๊าซไนโตรเจน มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ 6.99×10^2 โอห์ม-เซนติเมตร ฟิล์มบางที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ

นาที่ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ 5.55×10^4 , 2.26×10^4 และ 6.21×10^4 โอห์ม-เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเจือก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในฟิล์มบาง ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่ 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนก๊าซไนโตรเจนที่เพิ่มมากขึ้น และฟิล์มบางไม่ที่เจือก๊าซไนโตรเจน มีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 6.99×10^2 โอห์ม-เซนติเมตร

วัดสภาพคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะ

จากตารางที่ 4 วัดความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ โดยคำนวณจากค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) เพื่อคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะ ของฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วนที่แตกต่างกัน เป็นเวลา 30 นาที พบว่าฟิล์มฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่ไม่เจือก๊าซไนโตรเจน ที่ปลูกไว้เป็นเวลา 30 นาที มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ 6.99×10^2 โอห์ม-เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นของพาหะ 1.16×10^{18} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความคล่องตัวของพาหะ 7.72×10^{-3} ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที ฟิล์มบางที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ 5.55×10^4 โอห์ม-เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นของพาหะ 1.62×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความคล่องตัวของพาหะ 6.96 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที ฟิล์มบางที่เจือก๊าซไนโตรเจน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ 2.26×10^4 โอห์ม-เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นของพาหะ 8.39×10^{16} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความคล่องตัวของพาหะ 3.29 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที และฟิล์มบางตัวที่เจือก๊าซไนโตรเจน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ 6.21×10^4 โอห์ม-เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นของพาหะ 4.96×10^{16} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความคล่องตัวของพาหะ 2.03 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที จะพบว่าการเจือก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มบางมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าความคล่องตัวลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเจือก๊าซไนโตรเจนมากขึ้นจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าคล่องตัวของพาหะ ฟิล์มบางที่เหมาะสมกับการนำไปทำเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์คือ ฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนที่ 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ที่ 5.55×10^4 โอห์ม-เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นของพาหะ 1.62×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความคล่องตัวของพาหะ 6.96 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์ต่อวินาที ส่งผลให้ฟิล์มบางซิงโครไดต์ด้วยเงื่อนไขการเจือก๊าซไนโตรเจนมีค่าสภาพคล่องตัวของพาหะค่อนข้างสูง ทำให้ฟิล์มบางมีการนำไฟฟ้าที่ดี

ตารางที่ 3 แสดงผลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคเข็มวัดสี่จุดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วนต่าง ๆ

Sample	Resistance (R) (Ω)	Thickness (cm)	Cross-sectional area (cm ²)	Resistivity (ρ) (Ω -cm)
ZnO_30min	1.14×10^5	2.46×10^{-3}	3.08×10^{-3}	6.99×10^2
ZnON2_5sccm	1.00×10^7	2.22×10^{-3}	2.78×10^{-3}	5.55×10^4
ZnON2_10sccm	3.33×10^6	2.72×10^{-3}	3.40×10^{-3}	2.26×10^4
ZnON2_15sccm	2.44×10^7	1.02×10^{-3}	1.27×10^{-3}	6.21×10^4

ตารางที่ 4 แสดงผลการวัดสภาพคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะด้วยเทคนิค Hall effect ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนในสัดส่วนต่าง ๆ

Sample	Resistivity (ρ) (Ω -cm)	Hall coefficient (R_H) (m ³ /c)	Carrier Concentration (n) (cm ⁻³)	Hall Mobility (μ_p) (cm ² /Vs)
ZnO_30min	6.99×10^2	5.39×10^1	-1.16×10^{18}	7.72×10^{-3}
ZnON2_5sccm	5.55×10^4	3.86×10^4	-1.62×10^{14}	6.96×10^{-1}
ZnON2_10sccm	2.26×10^4	7.45×10^1	-8.39×10^{16}	3.29×10^{-3}
ZnON2_15sccm	6.21×10^4	1.26×10^2	-4.96×10^{16}	2.03×10^{-3}

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ถูกเคลือบทั้งหมด แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับ zincite (ZnO) (Ref. code. 01-089-0510) มีโครงสร้างแบบ Hexagonal wurtzite และพบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เกิดการเรียงตัวตามแนวแกนซีของผลึก โดยพีคที่ระนาบ (002) มีความเข้มของสัญญาณการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Intensity) สูงขึ้น ขนาดผลึกใหญ่กว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที สมบัติทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนมีลักษณะเป็นแท่งสามเหลี่ยมกระจายอยู่อย่างหนาแน่น สำหรับฟิล์มที่เจือก๊าซไนโตรเจน 0 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีขนาดของเกรนอยู่ในช่วง 264 – 358 นาโนเมตร ซึ่งพบว่าขนาดเกรนและความหนาลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอะตอมของก๊าซไนโตรเจนมีโอกาสเข้าไปรวมตัวกับอะตอมของซิงค์ออกไซด์ที่หน้าปัสสารเคลือบ ทำให้เกิดชั้นบาง ๆ ของซิงค์ออกไซด์ซึ่งไม่นำไฟฟ้าบริเวณผิวหน้าปัสสารเคลือบ ทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มลดลง นอกจากนี้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ถูกเคลือบเป็นเวลา 10 20 30 40 และ 50 นาที จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเฉลี่ย 63 – 83 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโน

เมตร ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการเคลือบ ส่วนฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5, 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงอยู่ในช่วง 55 – 77 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ถูกเคลือบทั้งหมดมีการส่องผ่านแสงได้ดี จากการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจนมีลักษณะเป็นแท่งสามเหลี่ยมกระจายอยู่อย่างหนาแน่น สำหรับฟิล์มที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5, 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ มีขนาดของเกรนอยู่ในช่วง 264 – 358 นาโนเมตร ซึ่งพบว่าขนาดเกรนและความหนาลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น อะตอมของก๊าซไนโตรเจนมีโอกาสเข้าไปรวมตัวกับอะตอมของซิงค์ออกไซด์ที่หน้าปัสการเคลือบ ทำให้เกิดชั้นบาง ๆ ของซิงค์ออกไซด์ซึ่งไม่นำไฟฟ้าบริเวณผิวหน้าปัสการเคลือบ ทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มลดลง และสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือก๊าซไนโตรเจน 5 10 และ 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ เคลือบเป็นเวลา 30 นาที โดยพบว่าเมื่อเจือก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าสภาพคล่องตัวของพาหะและค่าความหนาแน่นของพาหะมีอิทธิพลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง การเพิ่มอัตราการเคลือบของก๊าซไนโตรเจนทำให้มีปริมาณอะตอมของก๊าซไนโตรเจนในพลาสมามาก เมื่อสเปกโตรอะตอมซิงค์ออกไซด์ที่หลุดจากเป้าจึงมีโอกาสสูญเสียพลังงานจากการชนกับอะตอมของก๊าซไนโตรเจนก่อนเคลือบบนกระจกสไลด์ ส่งผลให้มีอัตราการเคลือบต่ำและทำให้โครงสร้างผลึกมีความหนาแน่นน้อย ส่งผลให้ฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ขณะที่การลดอัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน อะตอมมีพลังงานในการเคลือบสูง เนื่องจากมีอะตอมก๊าซไนโตรเจนน้อยลงจึงทำให้อะตอมซิงค์ออกไซด์เคลื่อนที่ไปได้ทุกทิศทางทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ ส่งผลให้ได้สภาพต้านไฟฟ้าต่ำ โดยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือก๊าซไนโตรเจน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ เหมาะที่จะนำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะมีการส่องผ่านแสงได้ดี มีความเป็นผลึกสูง ขนาดเกรนโต และสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ

ข้อเสนอแนะ

1. การเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบสองขั้วไม่สมมาตร อย่างไรก็ตาม ฟิล์มในกลุ่มนี้ยังสามารถเคลือบด้วยเทคนิคอื่น ๆ ได้และงานวิจัยต่อไปควรศึกษาเปรียบเทียบฟิล์มที่ได้จากเทคนิคต่าง ๆ สารเคลือบที่ต่างกัน .
2. ในงานวิจัยนี้ใช้กระจกสไลด์เป็นวัสดุรองรับ อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างผลึก และสมบัติบางประการมีส่วนเกี่ยวข้องกับวัสดุรองรับ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางบนวัสดุรองรับประเภทต่าง ๆ
3. การเคลือบฟิล์มบางของสารประกอบต่างๆ ด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบสองขั้วไม่สมมาตรนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องควบคุมหลายตัวแปร ทั้งนี้เมื่อแปรค่าหรือเงื่อนไขในกระบวนการเคลือบมักส่งผลโดยตรงต่อลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างและสมบัติต่าง

ๆ ของฟิล์มที่เคลือบได้ ดังนั้นจึงควรศึกษา เงื่อนไขต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่เคลือบได้ เช่น เวลาในการเคลือบ ตำแหน่ง ระยะห่างจากหน้าปัสสาวเคลือบถึงวัสดุรองรับ การไบแอสชิ้นงาน การให้ความร้อนขณะเคลือบ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ทุกท่าน รวมทั้งเจ้าหน้าที่สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการให้ความรู้ และด้านวัสดุอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยขอขอบพระคุณ หน่วยงาน และผู้รับผิดชอบดูแลเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องVersa Lab และเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และเครื่อง UV-vis spectrophotometer พร้อมนี้ขอระลึกถึงคุณบิดามารดาและญาติพี่น้อง ซึ่งคอยให้กำลังใจให้การอบรม สั่งสอน และสนับสนุนการทำวิจัยจนสำเร็จตามความมุ่งหมาย คุณงามความดี และคุณประโยชน์ของงานวิจัยนี้ขอน้อมให้แก่คุณบิดา มารดา อาจารย์ อีกทั้งผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่านที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน และให้ความอนุเคราะห์ สนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จตามความมุ่งหมาย

เอกสารอ้างอิง

- เจริญชัย เหลืองอ่อน. (2554). *การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด*. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิธย์ วงษ์เจริญ, และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. (2554). *การประดิษฐ์หัวไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง Cds/CdTe* [รายงานการวิจัยประจำปี 2553]. พุนอุตสาหกรรมวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดลลักษณ์ มานพ, สุรีย์ ทองวณนิขนิม, วิเชียร ศิริพรม, อติศร บุรณวงศ์, สุรสิงห์ ไชยคุณ, และ นิรันดร์ วิทิตอนันต์ (2555). การเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยการฉายแสง. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 15(3) ฉบับพิเศษ, 259-267.
- นันทน์ช วัฒนสุภิญญา. (2553). *สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียมเตรียมโดยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริง* [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

- นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สุรสิงห์ ไชยคุณ, และ อติศร บุรณวงศ์. (2557). *ผลของกระแสโครเมียมคาโทดที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมโครเมียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยเทคนิคอีแอกทีฟแมกนีตรอนโคสสเปตเตอริง* [รายงานการวิจัยประจำปี 2557]. พุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ภาณุวัฒน์ ครอบอารมณ์. (2556). *การพัฒนาฟิล์มบางซิงโครไครต์ที่เจือด้วยอะตอมบัสมีต์โดยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์* [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ราชศักดิ์ ศักดานุภา. (2558). *การศึกษาฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์โดยวิธีดีซีอีแอกทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอริงเพื่อความแข็งแรงและป้องกันไฟฟ้าสถิตย์* [รายงานการวิจัยประจำปี 2558]. พุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์. (2555). *เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. (2555). *กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด*. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สิทธิวัฒน์ อุ่นจิตร, อติศร บุรณวงศ์ และ สุรสิงห์ ไชยคุณ. (2557). การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีอีแอกทีฟแมกนีตรอนโคสสเปตเตอริง. *วิทยาศาสตร์บูรพา*, 6(2), 78–86.
- อรุณี หลีกคำ, วิทวิช วงศ์พิศาล และ สินธุ จันทพันธ์. (2557). *กระบวนการสร้างฟิล์มด้วยไอเคมีและไอกายภาพภายใต้สภาวะสุญญากาศ*. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- Chapman, B. (1980). *Glow discharge processes, Sputtering and plasma etching*. John Wiley & Son.
- Ding, J. J., Ma, S. Y., Chen, H. X., Shi, X. F., Zhou, T. T., & Mao, L. M. (2009). Influence of Al-doping on the structure and optical properties of ZnO films. *PhysicaB: Condensed Matter*, 404(16), 2439–2443.
- Hartnagel, H. (1995). *Semiconducting Transparent Thin Films*. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.
- Milton, O. (1997). *The Materials Science of Thin Film: Thin Film Technology Handbook*. McGraw-Hill Companies international.
- Ohmukai, M., Nakagawa, T., & Matsumoto, A. (2016). ZnO Films Deposited on Glass by Means of DC Sputtering. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4, 1–7.

- Pathak, K., & Purohit, L. P. (2016). Optical property and AC conductivity RF sputtered N-doped N-doped ZnO thin films. *Advanced Materials proceeding*, 2(1), 06-09.
- Smith, D. L. (2015). *Thin Film Deposition: Principle and Practice*. McGraw-Hill Companies international.
- Streetman, B. G. (1995). *Solid State Electronic Devices*. Prentice-hall international.