

ผลของกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุต่อโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมด้วยเทคนิค

อาร์เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอรริง

The effects of RF power on crystal structure and electrical
properties of aluminum-doped zinc oxide films prepared by
RF magnetron sputtering technique

สุธิษา เละเซ็น^{1*} และ ณรงค์ชัย บุญโยปกรณ์²

Suthisa Leasen^{1*} and Narongchai Boonyopakorn²

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียม (AZO) ถูกเตรียมจากเป้าสารเคลือบออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยออกไซด์ของอลูมิเนียม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยโดยเทคนิคอาร์เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอรริง ที่กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุหลายค่าได้แก่ 100, 150 และ 200 วัตต์ เพื่อที่จะศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุต่อโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม AZO ที่เตรียมได้โดยฟิล์ม AZO ถูกเคลือบลงบนกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้องและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในสุญญากาศนาน 1 ชั่วโมง จากการวัด XRD พบว่า ระนาบ (002) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นกับค่ากำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุที่เพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง 150 วัตต์ แต่มีค่าลดลงที่ 200 วัตต์ ในทำนองเดียวกัน สำหรับสภาพความคล่องตัว จะพบว่าสภาพความคล่องตัวมีค่าสอดคล้องกับความเป็นผลึก กล่าวคือจะมีค่าต่ำหรือสูงตามค่าความเป็นผลึกที่ต่ำและสูงตามลำดับ ความหนาแน่นพาหะนำประจุในฟิล์ม AZO ที่เตรียมที่ กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 100 และ 150 วัตต์ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่มีค่าลดลงที่ กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 200 วัตต์ การลดลงของความหนาแน่นพาหะนำประจุแสดงโดยนัยว่าการแทนที่ของอลูมิเนียมแทนอะตอมสังกะสีมีค่าลดลง แต่อลูมิเนียมจะแยกไปอยู่ในช่องว่างของโครงผลึก และแสดงบทบาทเป็นตัวจับอิเล็กตรอนส่งผลให้ความหนาแน่นพาหะนำประจุมีค่าลดลง และเนื่องจากความคล่องตัวที่มีค่าสูงกว่าทำให้ค่าความต้านทานแผ่นต่ำสุดที่ทำได้มีค่าเท่ากับ 63.69 Ω/sq สำหรับฟิล์ม AZO ที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 150 วัตต์

คำสำคัญ: เป้าสารเคลือบออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยออกไซด์ของอลูมิเนียม ฟิล์ม AZO กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ
อาร์เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอรริง

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี 11000

¹ Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi 11000, Thailand

² โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

² Program of Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

* Corresponding author. E-mail: nb_narongk@yahoo.com

Abstract

In this research, aluminum-doped zinc oxide (AZO) films were prepared from 2 weight percentage (wt.%) of aluminum oxide (Al_2O_3) doped zinc oxide (ZnO) by RF magnetron sputtering technique at various RF powers of 100, 150 and 200 W. In order to study the effect of RF power on crystal structure and electrical properties of deposited AZO films. The AZO films were deposited on glass slides at room temperature and post-annealed at 500 °C in vacuum for 1 hour. From XRD measurements, it was found that (002) plane increased with higher RF power from 100 to 150 W, however it became smaller at 200 W. In the same way, for mobility, it was consistent with the XRD spectra in which it was low or high for low and high crystallinity respectively. Carrier concentration of the AZO film deposited at 100 and 150 W were not different while it decreased for that deposited at 200 W. Decrease of carrier concentration implied that, at higher RF power, Al substitution for Zn atom was decreased but it segregated into interstitial sites, which was consistent with shifted (002) peak to lower 2θ angle as can be seen in XRD spectra. Al atoms in the interstitial sites played a role of electron trap resulting in decrease of carrier concentration. Because of higher mobility, the lowest sheet resistance of 63.69 Ω/sq can be achieved for the AZO films deposited at the RF power of 150 W.

Keyword: Al_2O_3 -doped ZnO targets, AZO films, RF power, RF magnetron sputtering

บทนำ

ฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงมีคุณสมบัติในการยอมให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นผ่านได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งโดยปกติมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{-4} โอห์ม·เซนติเมตร มีการนำมาประยุกต์ใช้งานหลายอย่าง ได้แก่ จอแสดงผล (Agashe *et al.*, 2003) โซลาร์เซลล์ (Muiva *et al.*, 2011) และเซนเซอร์ตรวจจับแก๊ส (Shishiyau *et al.*, 2005) เป็นต้น ฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานมาอยู่หลายชนิดได้แก่ ฟิล์มบางออกไซด์ของอินเดียมเจือด้วยดีบุก ฟิล์มบางออกไซด์ของดีบุกเจือด้วยฟลูออรีน และฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียม เป็นต้น ซึ่งในบรรดาฟิล์มบางตัวนำโปร่งดังกล่าวพบว่าฟิล์มบางออกไซด์ของอินเดียมเจือด้วยดีบุกมีการนำมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงในช่วงที่ตามองเห็นสูง

และมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำ เมื่อเทียบกับฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงอื่นอย่างไรก็ตามอินเดียมเป็นธาตุที่หายากมีราคาสูง ดังนั้นจึงเป็นความท้าทายสำหรับนักวิจัยทั่วโลกในการเตรียมฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงอื่นเพื่อให้มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงที่ทำจากออกไซด์ของอินเดียมเจือด้วยดีบุก โดยฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมถือเป็นฟิล์มบางตัวนำโปร่งแสงที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากสังกะสีและอลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีราคาถูก นอกจากนั้นยังมีปริมาณมากบนเปลือกโลกอีกด้วย ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับธาตุอินเดียม

การเตรียมฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการทางเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมด้วยวิธีการทางฟิสิกส์เทคนิคอาร์เอฟ

แมกนีตรอน สเป็คโตรริง ซึ่งสามารถเตรียมฟิล์มบาง ออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่มีคุณภาพดี ฟิล์มมีความสม่ำเสมอบนพื้นที่ที่กว้าง โดยจะศึกษา ผลของกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุต่างๆ กันต่อโครงสร้าง ผลึกและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางออกไซด์ ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้

วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การเตรียมเป้าสารเคลือบออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยออกไซด์ของอลูมิเนียม 2 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก

การเตรียมเป้าสารเคลือบทำได้โดยการผสมสารตั้งต้นได้แก่ ออกไซด์ของสังกะสีความบริสุทธิ์ 99.7 เปอร์เซนต์ และออกไซด์ของอลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซนต์ ด้วยเครื่องผสมนาน 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอัดให้เป็นแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 87.2 มิลลิเมตร หนาประมาณ 10 มิลลิเมตร ด้วยความดันประมาณ 2.1 เมกะปาสคาล หลังจากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ หลังจากการเผาทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและพื้นผิวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) และการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope) ตามลำดับ

2. การเตรียมฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียม ด้วยเทคนิคอาร์เอฟ แมกนีตรอน สเป็คโตรริงลงบนกระจกใส

เริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดกระจกใสได้โดยการแช่กระจกใสในน้ำยาล้างจานและทำ

ความสะอาดกระจกใสโดยใช้การสั่นด้วยคลื่นความถี่เหนือความถี่วิทยุเป็นเวลานาน 10 นาที หลังจากนั้นแช่กระจกใสในอะซิโตนและเอทานอล แล้วทำความสะอาดกระจกใสโดยใช้การสั่นด้วยคลื่นความถี่เหนือความถี่วิทยุ (ultrasonic) เป็นเวลานานอย่างละ 10 นาที ตามลำดับ

หลังจากนั้นนำกระจกใสที่ทำความสะอาดแล้วใส่ในถังสุญญากาศโดยมีระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับกระจกใสเท่ากับ 8 เซนติเมตร แล้วปั๊มอากาศภายในถังสุญญากาศออกด้วยปั๊มโรตารีและปั๊มกระจายไอน้ำตามลำดับ จนกระทั่งได้ความดันพื้นที่ประมาณ 6×10^{-6} มิลลิบาร์ จากนั้นใส่แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.995 เปอร์เซนต์) จงความดันในถังสุญญากาศเพิ่มขึ้นมาที่ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ จึงทำการใส่กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ (13.56 เมกะเฮิรตซ์) ให้กับระบบเคลือบฟิล์มบางเพื่อทำให้แก๊สอาร์กอนในถังสุญญากาศแตกตัวเป็นไอออนและวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบและเกิดกระบวนการเคลือบฟิล์มขึ้นภายในถังสุญญากาศ โดยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุที่จ่ายให้กับระบบเคลือบฟิล์มบางมีค่าเท่ากับ 100, 150 และ 200 วัตต์ และทำการเคลือบฟิล์มเป็นเวลานาน 30 นาที ที่ความดันสุญญากาศเท่ากับ 4.0×10^{-3} มิลลิบาร์ สำหรับทุกค่ากำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ เพื่อศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุต่อโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้ เมื่อโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ (hall measurement) ตามลำดับ

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. โครงสร้างผลึกและพื้นผิวของเป้าสารเคลือบออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยออกไซด์ของอลูมิเนียม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

โครงสร้างผลึกและพื้นผิวของเป้าสารเคลือบออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยออกไซด์ของอลูมิเนียม 2

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติแสดงใน (Figure 1 (a), (b)) ตามลำดับและจาก (Figure 1) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างผลึกของเป้าสารเคลือบเป็นแบบเฮกซะโกนอลของออกไซด์ของสังกะสี (JCPDS 36-1451) และมีขนาดเกรนประมาณ 10 ไมโครเมตร

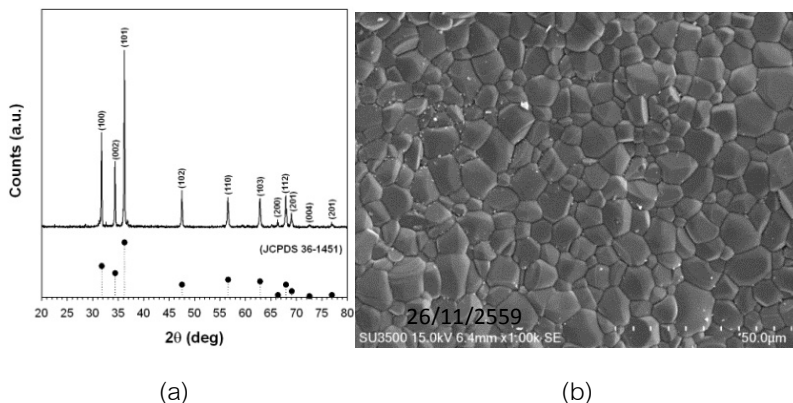


Figure 1 The crystal structure and surface morphology of 2 wt.% Al_2O_3 doped ZnO target.

2. โครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียม

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุมีค่าเท่ากับ 100, 150 และ 200 วัตต์แสดงใน (Figure 2) ซึ่งจะเห็นได้ว่า โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมเป็นแบบเฮกซะโกนอล เช่นเดียวกับเป้าสารเคลือบที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์ม และมีระนาบที่สังเกตจากการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้แก่ ระนาบ (100), (002) และ (101) เป็นต้น โดยระนาบ (002) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100 วัตต์ ไปเป็น 150 วัตต์ และมีค่าลดลงอีกครั้งเมื่อ

กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 200 วัตต์ ซึ่งตำแหน่งของพีค (002) ที่ได้จากการวัดมีค่าเป็น 34.64, 34.61 และ 34.53 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อตำแหน่งของพีค (002) มาตรฐานมีค่าเท่ากับ 34.45 องศาเซลเซียส

การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของตำแหน่งระนาบ (002) เป็นผลมาจากการแทนที่อะตอมสังกะสีในโครงสร้างผลึกด้วยอะตอมอลูมิเนียมที่เจือลงในโครงสร้างผลึกถูกอภิปรายโดย Muiva *et al.* (2011) โดยถ้าการแทนที่ที่เกิดขึ้นมากจะทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบ (002) มีค่าลดลง เนื่องจากความแตกต่างของรัศมีไอออน Zn^{2+} และ Al^{3+} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 72 และ 53 พิโคเมตร ตามลำดับ และจะสังเกตได้จากการเลื่อนไป

ทางขวาของตำแหน่งพีคของระนาบ (002) เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยสังเกตได้ว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 100 และ 150 วัตต์ มีการเลื่อนของพีคไปทางขวาของค่ามาตรฐานใกล้เคียงกันและมากกว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุเท่ากับ 200 วัตต์ ซึ่งการแทนที่อะตอมสังกะสีด้วยอลูมิเนียมถ้ามีการแทนที่มากจะส่งผลให้จำนวนพาหะนำประจุในฟิล์มมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งความหนาแน่นของพาหะนำประจุ (carrier concentration, n) ในฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 100, 150 และ 200 วัตต์ แสดงใน (Table 1) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะนำประจุในฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 100 และ 150 วัตต์ มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 200 วัตต์ จะมีค่าความหนาแน่นของพาหะนำประจุน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดสอดคล้องกับการเลื่อนของฟิล์มที่น้อยกว่า

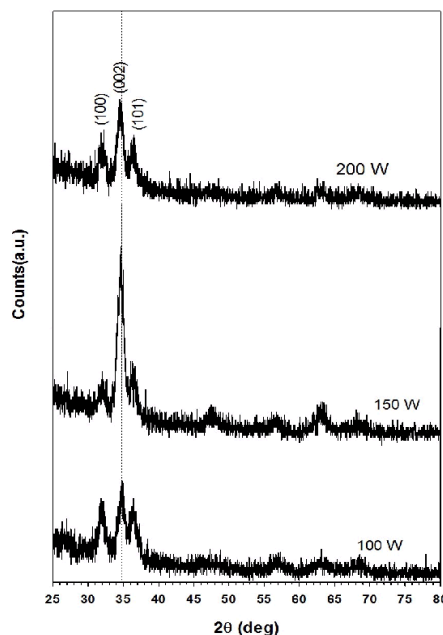


Figure 2 The crystal structure of Al-doped ZnO thin films prepared at RF powers of 100, 150 and 200 W.

Table 1 The electrical properties of 2 wt. % Al-doped ZnO prepared at different RF powers.

RF power (W)	carrier concentration, n ($\times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)	mobility, μ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	sheet resistance (Ω/sq)
100	7.918	8.575	91.94
150	8.128	13.35	63.69
200	2.571	6.231	389.7

อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่า การลดลงอย่างมากของความหนาแน่นของพาหะนำประจุสำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 200 วัตต์ เป็นผลมาจากการที่อะตอมอลูมิเนียมที่เจือลงในโครงสร้างผลึกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่เป็นช่องว่าง (interstitial sites) และไม่ช่วยในการเพิ่มจำนวนพาหะ

นำประจุในฟิล์มและอาจจะแสดงบทบาทเป็นตัวจับอิเล็กตรอน ส่งผลให้จำนวนพาหะนำประจุในฟิล์มลดลงอย่างมากซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kuo *et al.* (2006) นอกจากนี้ผลของโครงสร้างผลึกยังมีผลต่อความคล่องตัว (mobility, μ) ในการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุด้วยกล่าวคือ เมื่อโครงสร้างผลึกดี

ความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุจะดีตามไปด้วย ในทางกลับกันถ้าโครงสร้างผลึกไม่ดีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุจะไม่ดีตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการกระเจิงที่ขอบเกรน (grain boundary scattering) ซึ่งจะโดดเด่นมากขึ้นเมื่อโครงสร้างผลึกไม่ดี ดังนั้นจะสังเกตได้จาก (Table 1) ค่าความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุสำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 150 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 13.35 (เซนติเมตร)²/โวลต์·วินาที ในขณะที่ค่าความคล่องตัวสำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 100 และ 200 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 8.575 และ 6.231 (เซนติเมตร)²/โวลต์·วินาที ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างมีความเป็นผลึกต่ำกว่า

เนื่องจากผลของความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุสำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 150 วัตต์ ที่มากกว่า ส่งผลให้ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 63.69 Ω/sq ซึ่งต่ำกว่าฟิล์มบางที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุ 100 และ 200 วัตต์ เนื่องจากสภาพต้านทานไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นพาหะนำประจุและความคล่องตัวตามสมการ $1/\rho = ne\mu$ ดังนั้นเมื่อความคล่องตัวของพาหะนำประจุเพิ่มขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานแผ่นมีค่าลดลงตามไปด้วย

สรุป

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกับโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ของฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่เตรียมได้ โดยถ้ากำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุต่ำหรือสูงเกินไปจะส่งผลให้โครงสร้างผลึกไม่ดีทำให้ความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุในฟิล์มมีค่าต่ำ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มมีค่าสูง ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มบางออกไซด์ของสังกะสีเจือด้วยอลูมิเนียมที่มีโครงสร้างผลึกที่ดี มีความหนาแน่นพาหะนำประจุสูง และมีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุสูง จะต้องเลือกใช้กำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุที่เหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้พบว่ากำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 150 วัตต์

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ธนากร โสภธจันทร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์และการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.รัฐพล รังกุพันธ์ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

เอกสารอ้างอิง

- Agashe, C., O. Kluth, G. Schöpe, H. Siekmann, J. Hüpkens and B. Rech. 2003. Optimization of the electrical properties of magnetron sputtered aluminum-doped zinc oxide films for opto-electronic applications. *Thin Solid Films*. 442(1-2): 167-172.
- Kuo, S.Y., W.C. Chen, F.I. Lai, C.P. Cheng, H.C. Kuo, S.C. Wang and W.F. Hsieh. 2006. Effects of doping concentration and annealing temperature on

properties of highly-oriented Al-doped ZnO films.

Journal of Crystal Growth 287(1): 78-84.

Muiva, C.M., T.S. Sathiaraj and K. Maabong. 2011.

Effect of doping concentration on the properties of aluminium doped zinc oxide thin films prepared by spray pyrolysis for transparent electrode applications. *Ceramics International* 37: 555-560.

Shishiyanu, S.T., T.S. Shishiyanu and O.I. Lupan. 2005.

Sensing characteristics of tin-doped ZnO thin films as NO₂ gas sensor. *Sensors and Actuators B* 107: 379-386.