บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

โครงสร้างนาโนของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธี อาร์เอฟ สปัตเตอริง ตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 ลงบนแผ่นรองรับ (Substrates) ต่างๆ โดยได้นำมาวิเคราะห์ลักษณะสภาพพื้นผิว ขนาด และรูปร่างต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน (TEM), เทคนิคสเปกโทรสโคปีพลังงานกระจาย (EDS), รวมถึงการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าสภาพต้านทานและการวัดฮอลล์เพื่อหาความหนาแน่นของพาหะและค่าโมบิลิตี้ รวมถึงการบ่งบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี สุดท้ายศึกษาสมบัติทางแสงเมื่อเกิดการสั่นด้วยการใช้เทคนิค รามาน สเปกโตรสโคปี ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เมื่อทำการสปัตเตอสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมลงบนแผ่นรองรับต่าง ๆ แล้ว ปรากฏว่าส่วนใหญ่จะเป็นการเคลือบสารที่เป็นฟิล์มบางที่โปร่งใส หรือมีสีดำ แต่ว่าเมื่อทดลองด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ปรากฏว่าสารที่สปัตเตอได้จะปรากฏเป็นฟิล์มหนา มีลักษณะเป็นสีขาว บางครั้งอาจจะเป็นสีขาวปนเทาดังรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข)

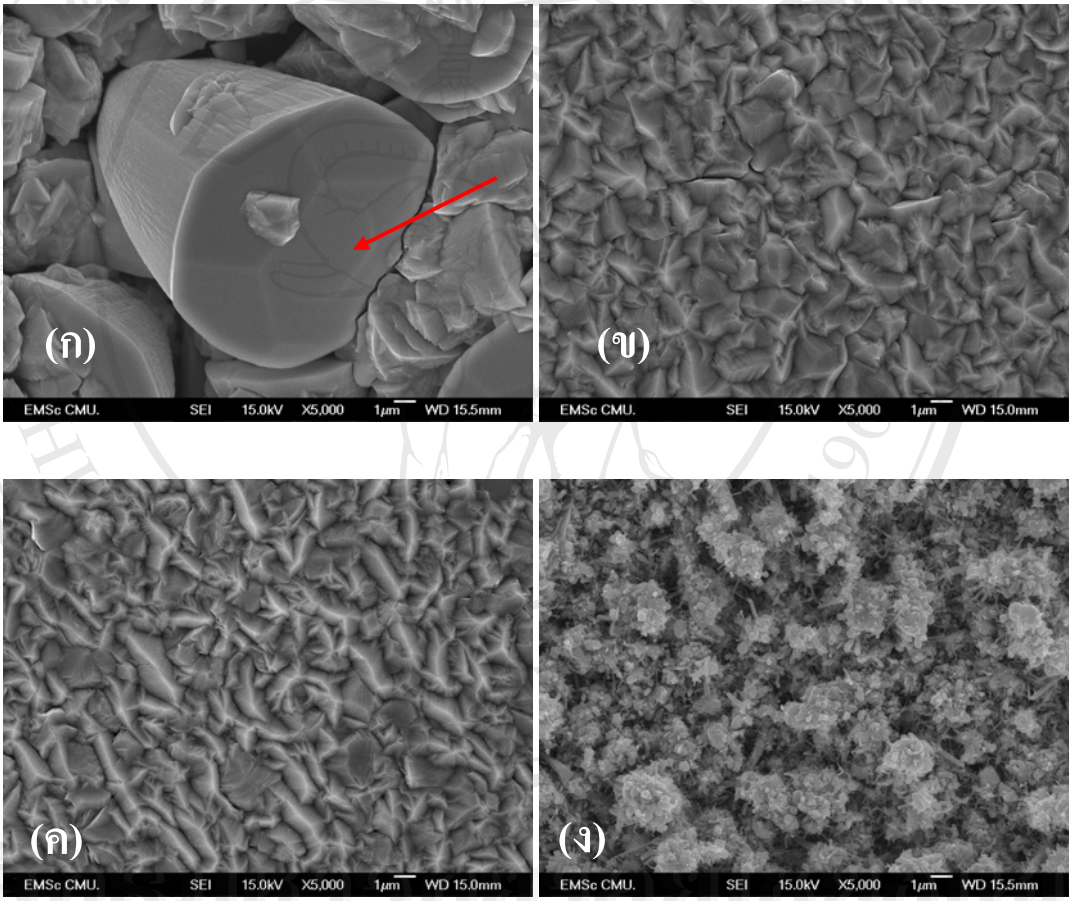
(ก) (ข)

รูปที่ 4.1 แสดงสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมซึ่งเคลือบลงบนแผ่นรองรับต่างๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ซึ่งเมื่อนำสารที่เคลือบบนแผ่นรองรับต่างๆ ไปวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายจากกล้อง SEM ได้ผลการทดลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ด้วยเงื่อนไขของการสปัตเตอริงที่แตกต่างไปจากวิธีการทดลองในบทที่ 3 ซึ่งเมื่อดูจากรูปที่ 4.1 (ก) มีลักษณะเป็นสีออกทองแดงและมีสีดำ โดยเกิดจากการใช้ กำลังของการ สปัตเตอริง หรือความดันที่ใช้ในการสปัตเตอริงที่ไม่เหมาะสม ซึ่งลักษณะพื้นผิวประกอบไปด้วยผลึกของสารที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรซ้อนทับกันอยู่อย่างหนาแน่น แสดงดังรูปที่ 4.2 (ก)-(ง)



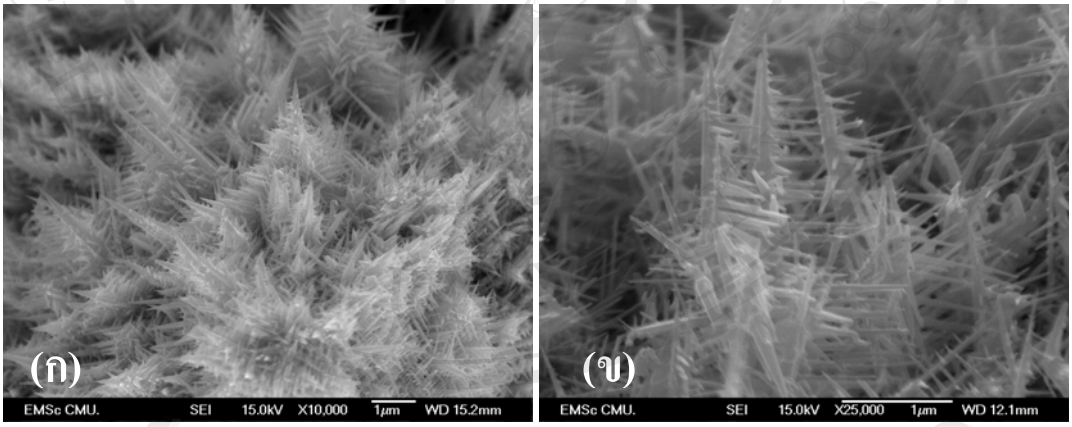
รูปที่ 4.2 (ก)-(ง) แสดงลักษณะพื้นผิวของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากรูปที่ 4.2 (ก)-(ค) เป็นพื้นผิวของสารตัวอย่างที่มองจากภายนอกเป็นลักษณะสีทองแดงเหมือนกันหมดแต่จะมีขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสปัตเตอริง เช่น เวลา และกำลัง โดยในรูป 4.2 (ก) ถ้าสังเกตตรงส่วนปลายมีลักษณะเป็นเฮกซะโกนอลของสารซิงค์ออกไซด์อยู่และขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่วนในรูป 4.2 (ง) เป็นรูปของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมซึ่ง

เมื่อมองจากภายนอกมีลักษณะเป็นสีดำ รูปที่ถ่ายได้จะแตกต่างจากในส่วนของสีทองแดง โดยมีลักษณะเริ่มก่อตัวเป็นโครงสร้างที่ชัดเจน แต่ยังมีขนาดใหญ่

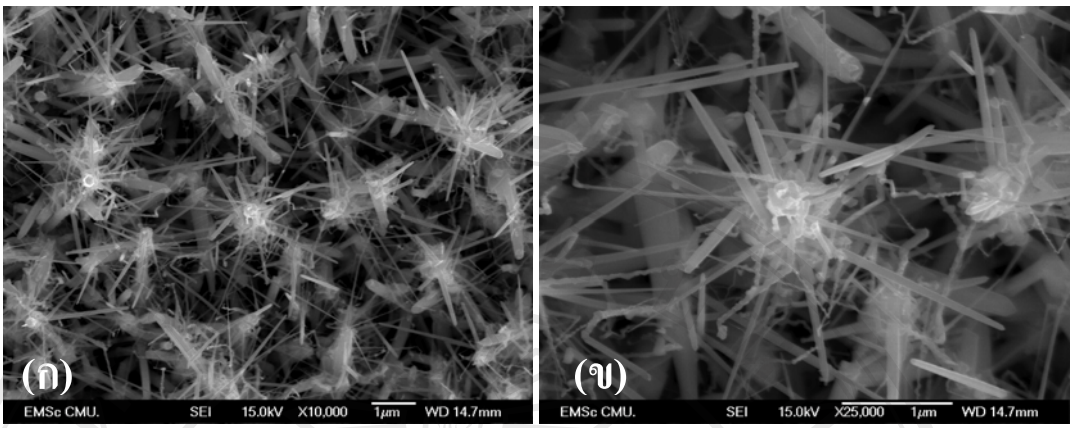
แต่ด้วยเงื่อนไขการสปัตเตอริงที่เหมาะสม สำหรับการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม คือ ที่กำลังการสปัตเตอริง 300 วัตต์ ในความดันก๊าซอาร์กอน 40 มิลลิทอร์ ความดันสุญญากาศต่ำกว่า 5×10^{-6} ทอร์ โดยใช้แผ่นรองรับคือ ทองแดง ควอทซ์ และแผ่นอะลูมินา โดยในส่วนของแผ่นทองแดงนั้นหลังการสปัตเตอริงเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าปรากฏสองลักษณะคือเป็นสีขาวทั้งด้านหน้าแผ่นรองรับและด้านหลังแผ่นรองรับ โดยผลที่อยู่หลังแผ่นรองรับอาจจะเป็นโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม เมื่อวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย SEM ปรากฏว่า ด้านหลังแผ่นรองรับก็มีลักษณะเป็นโครงสร้างนาโนเช่นเดียวกับที่อยู่ด้านหน้าแผ่นรองรับ โดยผล SEM ด้านหน้าแผ่นรองรับทองแดง แสดงในรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ซึ่งโครงสร้างนาโนที่สังเคราะห์ได้เป็นลักษณะคล้ายต้นสนอยู่รวมกันอย่างหนาแน่น มีความยาวในระดับหลายไมโครเมตร จากนั้นมีปลายแหลมยื่นออกมาโดยมีความยาวประมาณ 100 นาโนเมตร ถึง ในระดับ 1 ไมโครเมตร ส่วนขนาดนั้นอยู่ในช่วง 30-100 นาโนเมตร



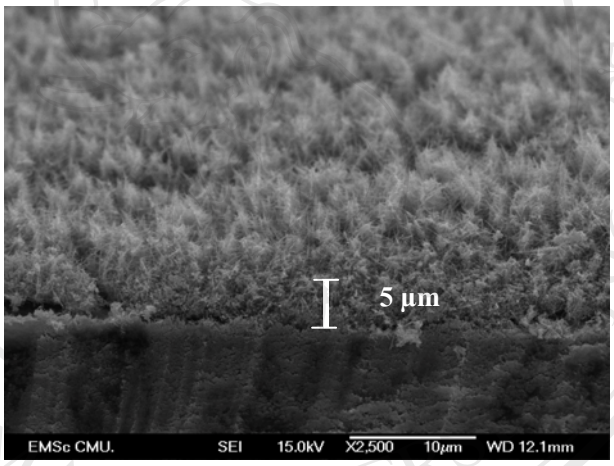
รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างนาโนที่อยู่ด้านหน้าแผ่นรองรับทองแดง

ในส่วนของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมที่อยู่หลังแผ่นรองรับนั้นแสดงผล SEM ในรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) ผลที่ได้ปรากฏว่ามีโครงสร้างเล็กอยู่ในระดับนาโนเหมือนกับด้านหน้าแผ่นรองรับ มีลักษณะเป็นเส้นและมีความยาวหลายไมโครเมตรอยู่รวมกันเป็นกลุ่มไม่ค่อยแน่นอน เมื่อวิเคราะห์หาขนาดปรากฏว่าอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตร โดยจะเล็กกว่าที่อยู่ด้านหน้าแผ่นรองรับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



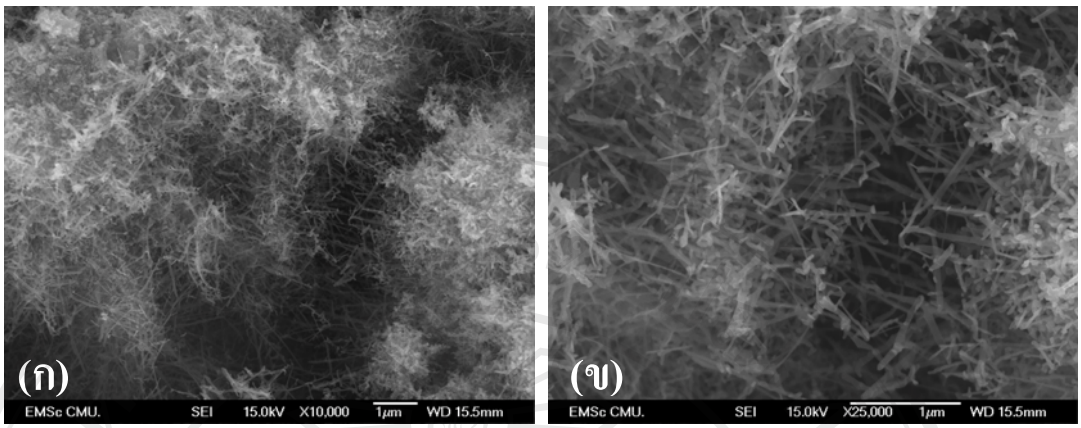
รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างนาโนที่อยู่ด้านหลังแผ่นรองรับทองแดง



รูปที่ 4.5 แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้างนาโนบนแผ่นรองรับทองแดง

เมื่อวิเคราะห์ด้วยภาพตัดขวางของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับทองแดงเพื่อวิเคราะห์ความหนา ซึ่งสารซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบอยู่มีความหนาประมาณ 5 ไมโครเมตร โดยที่ส่วนล่างสุด เป็นสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ก่อนที่จะก่อตัวเป็นโครงสร้างในระดับนาโนโดยจะทับถมซ้อนทับกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งส่วนบนสุดเป็นโครงสร้างนาโนที่มีลักษณะคล้ายต้นสน แสดงดังรูปที่ 4.5

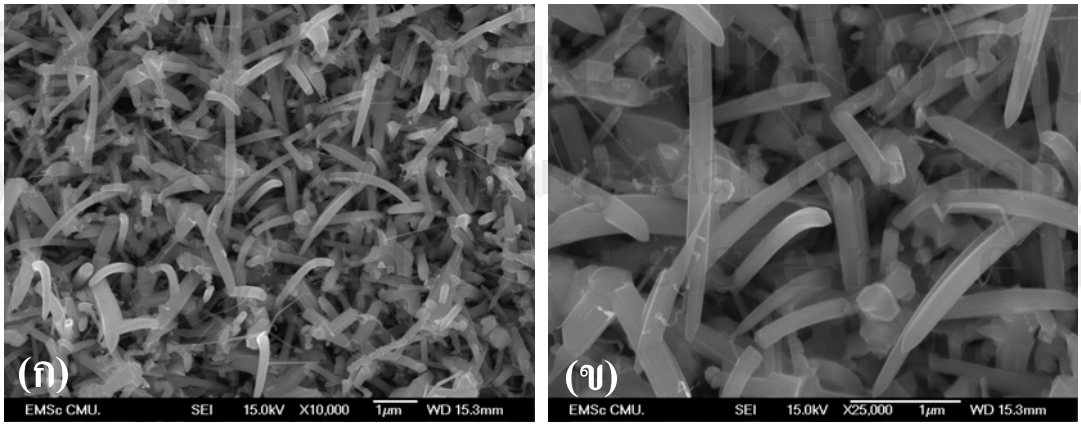
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างนาโนที่อยู่บนแผ่นรองรับอะลูมินา

เมื่อวิเคราะห์ผลจากแผ่นรองรับอะลูมินาซึ่งมีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโน แต่มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างจากแผ่นรองรับทองแดง โดยในส่วนของแผ่นรองรับอะลูมินามีลักษณะคล้ายเป็นเส้นซึ่งมีขนาด 20-80 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) มีความยาวในระดับไมโครเมตรเหมือนกัน และมีความหนาแน่นของสารมาก

และสุดท้ายเป็นแผ่นรองรับควอทซ์ซึ่งแสดงภาพ SEM ในรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) มีลักษณะเป็นเส้นแต่มีขนาดใหญ่ โดยมีขนาดประมาณ 200 นาโนเมตร มีความยาวในระดับไมโครเมตร โดยโครงสร้างและการวางตัวมีความไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เน้นไปทางสารที่สปัตเตออยู่ด้านหน้าแผ่นรองรับทองแดงและแผ่นรองรับควอทซ์ โดยในส่วนของแผ่นรองรับควอทซ์นั้นนำไปวัดสมบัติทางไฟฟ้า เนื่องจากแผ่นรองรับทองแดงนำไฟฟ้าได้ดีทำให้ไม่สามารถนำไปวัดค่าสภาพต้านทานและวัดฮอลล์ได้



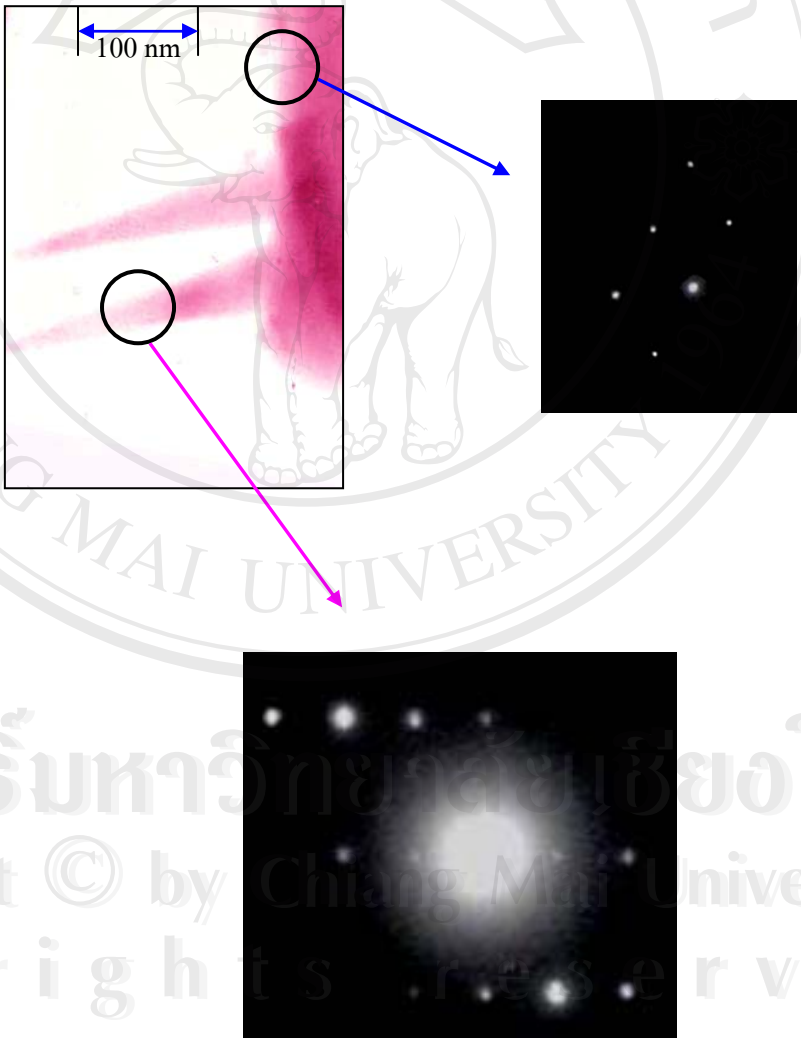
รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างนาโนที่อยู่บนแผ่นรองรับควอทซ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

โครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมบนแผ่นรองรับทองแดง ได้ถูกแยกออกมาเพื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ซึ่งผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

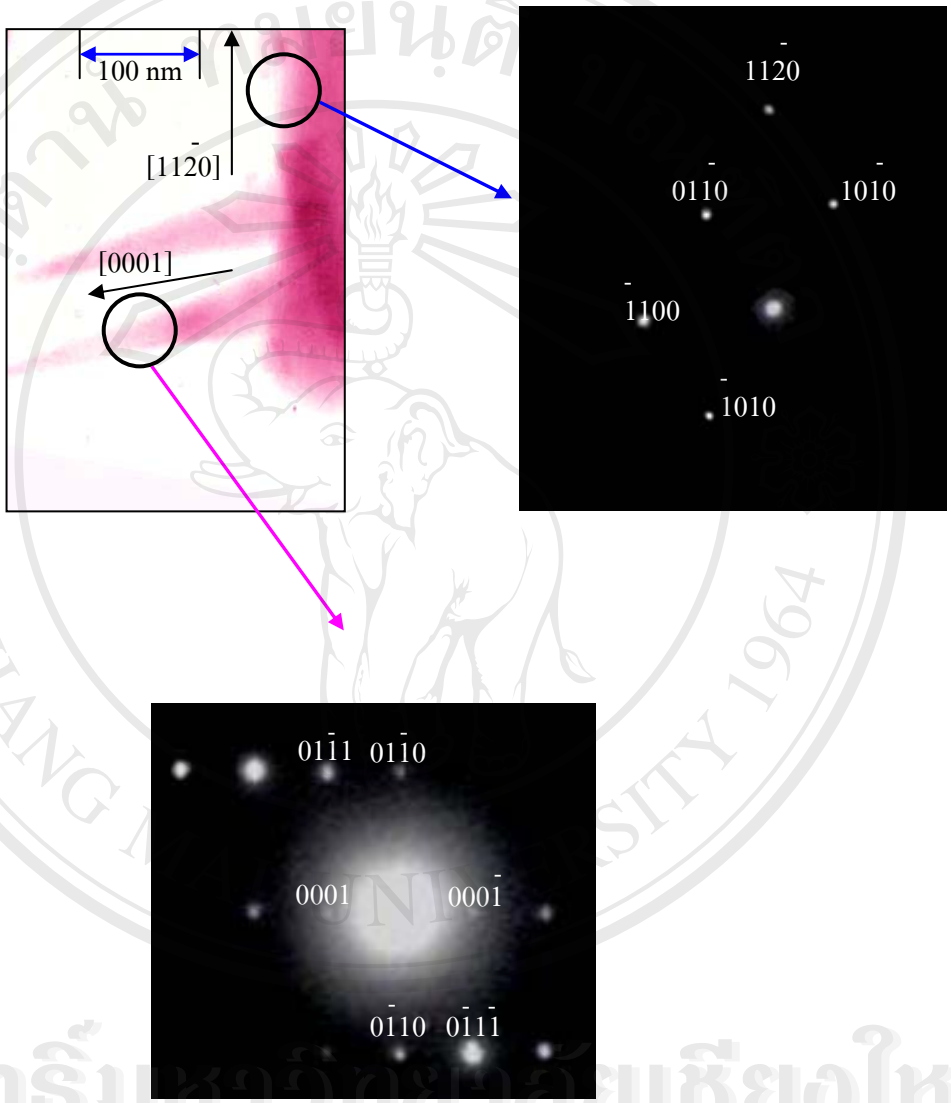
การวิเคราะห์ด้วย TEM ภาพที่ได้จะมี 2 ลักษณะคือ ภาพถ่ายของสารตัวอย่าง (bright field image) และ อิเล็กตรอนดิฟแฟรกชัน (Selected Area electron Diffraction Pattern, SADP) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายจาก TEM พร้อมทั้งอิเล็กตรอนดิฟแฟรกชัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากภาพถ่ายอิเล็กตรอนดิฟแฟรกชันของสารตัวอย่างในรูปที่ 4.8 นำมาวิเคราะห์หาทิศของผลึกได้แสดงดังรูปที่ 4.9 (รายละเอียดการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก)

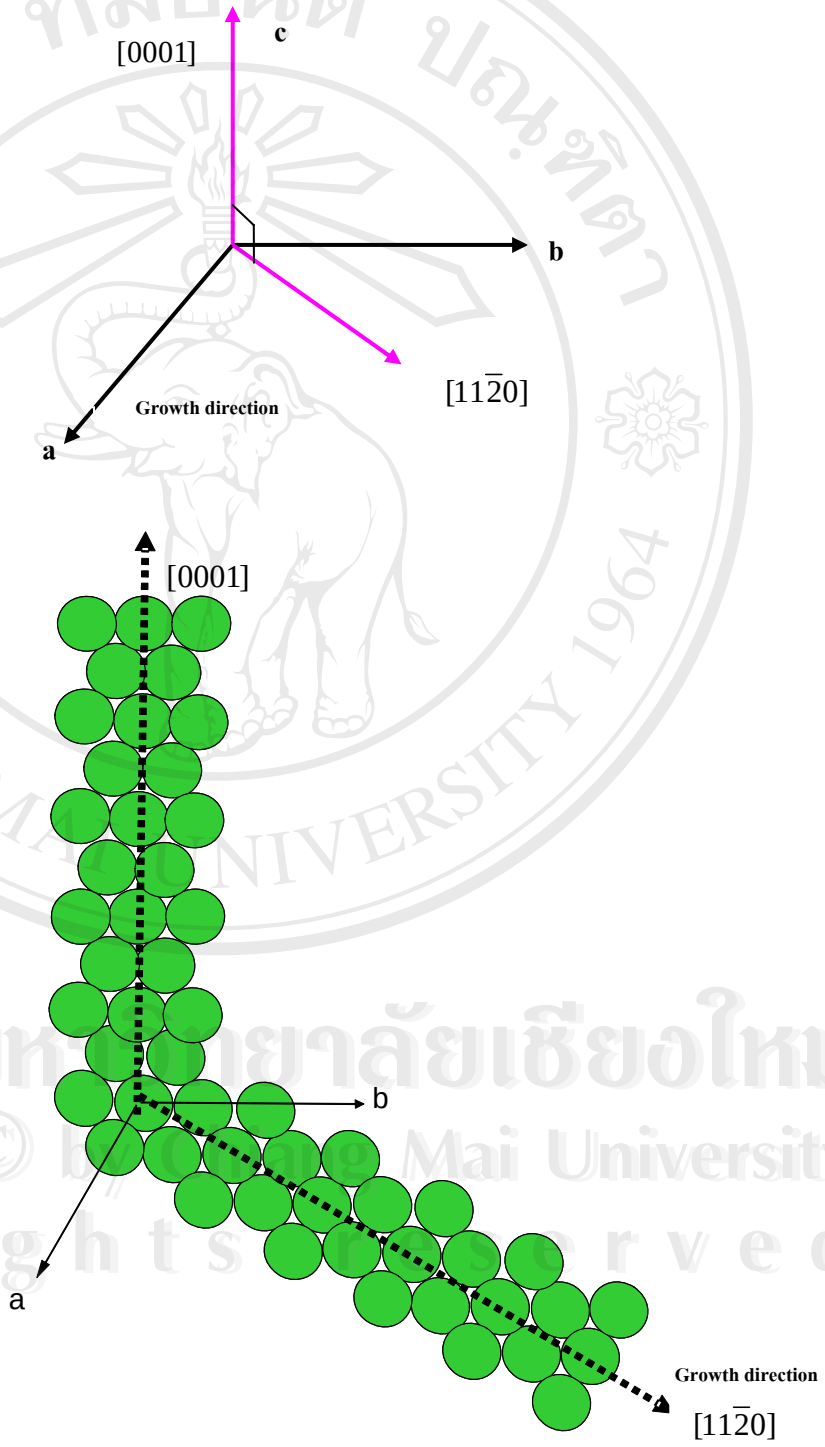


รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ระนาบของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมจากอิเล็กตรอนดิฟแฟรกชัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลึกที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งทิศการโตของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมหาได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ โดยจะได้แบบจำลองทิศการโตโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมซึ่งที่เรียกว่า Stereo Graphic ดังนั้นเมื่อนำมาเทียบกับรูป

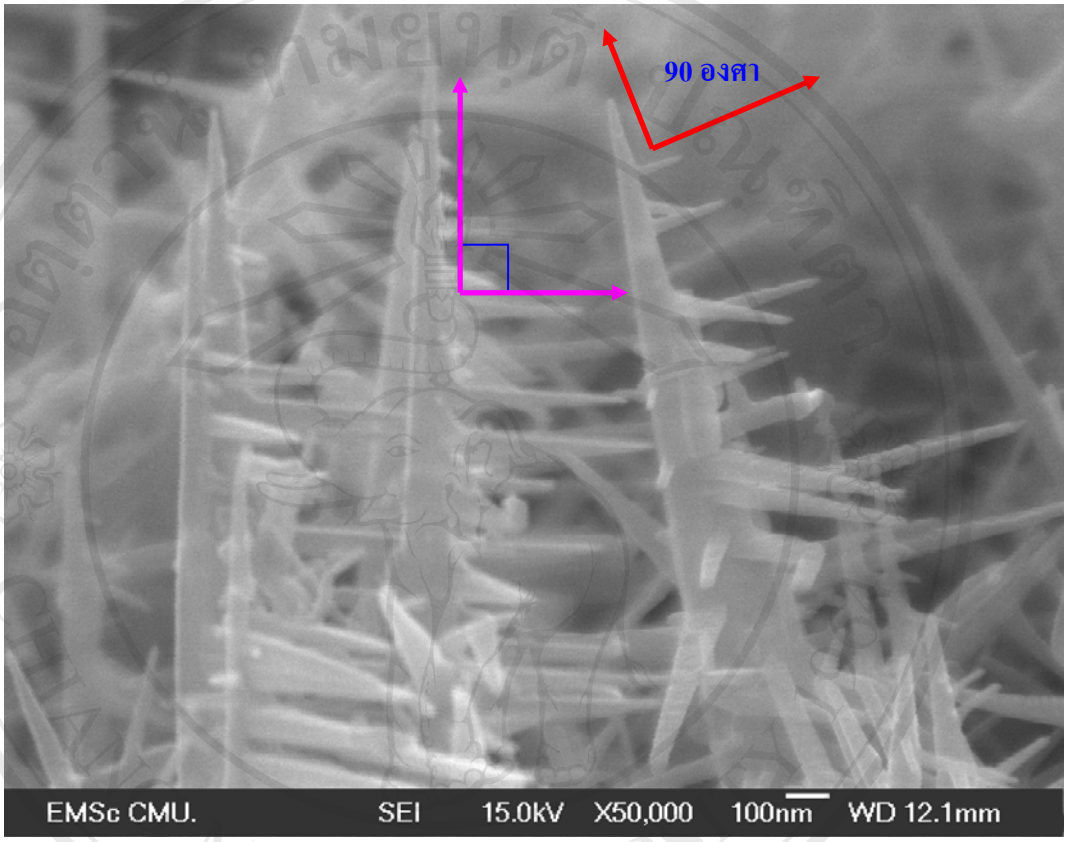
ถ่าย TEM ก็จะได้ทิศการโตของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม คือ [11$\bar{2}$0] และ [0001] แสดงในรูปที่ 4.9 ทิศการโตของโครงสร้างทั้งสองแบบจะไม่เหมือนกัน โดยจะตั้งฉากกัน ทิศการโตในระนาบ [11$\bar{2}$0] อยู่ในแนวระนาบ ab ส่วนทิศการโตในระนาบ [0001] อยู่ในแนวแกน c ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงแบบจำลองการเรียงตัวของอะตอมของในทิศ [11$\bar{2}$0] และ [0001]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ด้วย TEM ไปเทียบกับผลของ SEM ซึ่งการโตของผลึกในทิศทาง [0001] และ $[11\bar{2}0]$ แสดงดังรูปที่ 4.11



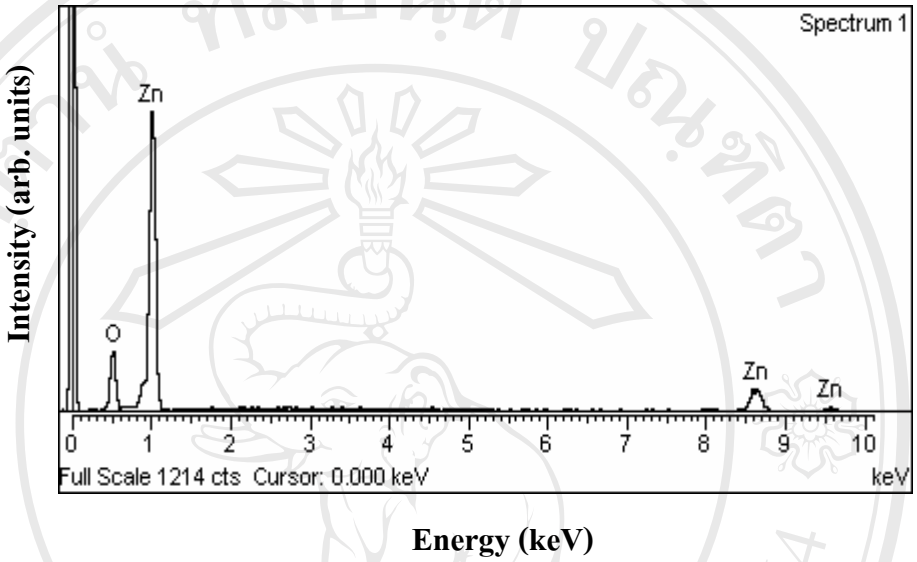
รูปที่ 4.11 แสดงทิศการโตของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมเมื่อพิจารณาจากภาพ SEM

เมื่อพิจารณาจากภาพ SEM ปรากฏว่ามุมของโครงสร้างตรงกลางกับส่วนที่ยื่นออกมาทำมุม 90 องศา พอดี ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองทิศการโตของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่แสดงในรูปที่ 4.10

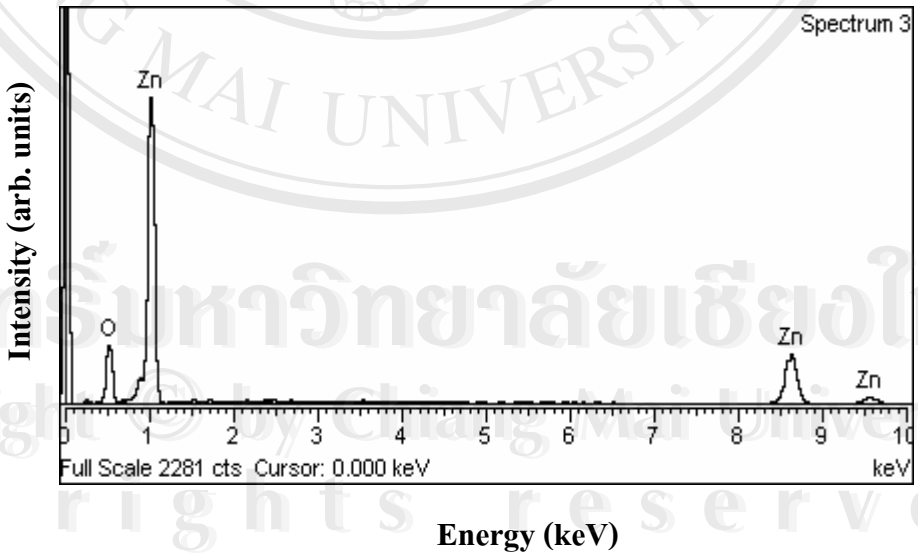
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (EDS)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้วย EDS มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่4.12 แสดงกราฟ EDS สเปกตรัมของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้านหน้าแผ่นรองรับ



รูปที่4.13 แสดงกราฟ EDS สเปกตรัมของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นรองรับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม

	Atomic %	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง
ออกซิเจน (O)	49.79	49.30
สังกะสี (Zn)	50.21	50.70

จากกราฟ 4.12, 4.13 และตารางที่ 4.1 เป็นผลการวิเคราะห์ EDS และองค์ประกอบของธาตุจากเครื่อง SEM พบว่าโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมมีองค์ประกอบของธาตุสังกะสี (Zn), ออกซิเจน (O) แต่ไม่ปรากฏธาตุอะลูมิเนียม (Al) ทำให้ได้สมมติฐาน 2 ประเด็นคือ 1. อาจจะเป็นเพราะว่าสารเจืออะลูมิเนียมที่เติมลงไปอาจจะมีปริมาณน้อยเกินไป โดยในงานวิจัยนี้เติมไป 1% โดยโมล ทำให้ผล EDS ไม่สามารถจะพบธาตุอะลูมิเนียม 2. ธาตุอะลูมิเนียมอาจจะไม่ได้เข้าไปแทนที่สังกะสีจริง ดังนั้นต้องนำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อเป็นการทดสอบสมมติฐานที่สอง เพราะถ้าธาตุอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่สังกะสีได้ สารตัวอย่างจะต้องมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าสารซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์ รวมทั้งค่าความหนาแน่นพาหะที่ต้องสูงกว่าเมื่อมีการเติมสารเจือลงไป

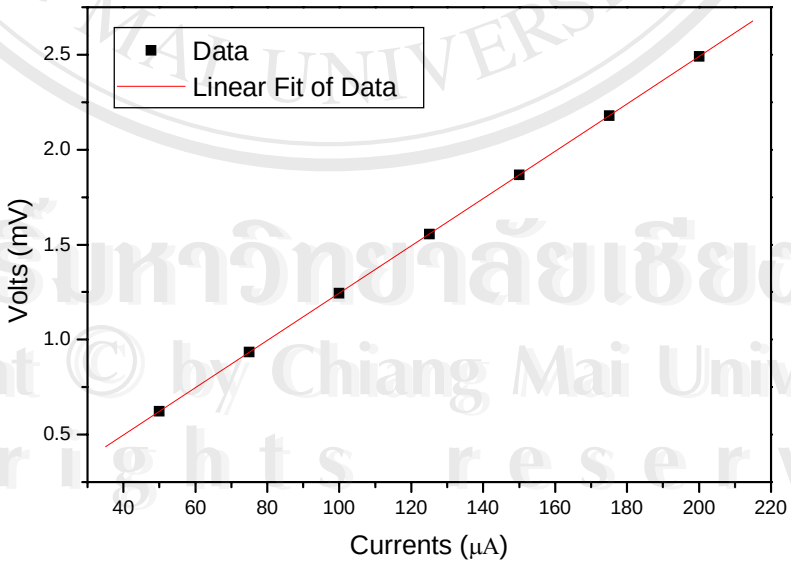
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่าสภาพต้านทานเมื่อจ่ายกระแสและวัดความต่างศักย์ดังรูปที่ 2.3 จะได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 แสดงผลการวัดความต้านทานที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

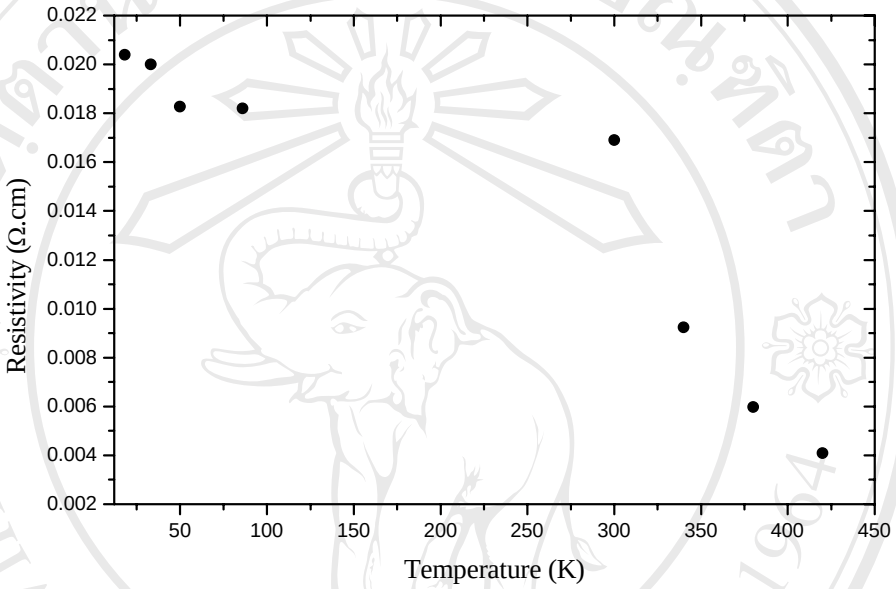
กระแส (μA)	ความต่างศักย์ (mV)
50	0.54532
75	0.81766
100	1.08995
125	1.36315
150	1.6352
175	1.90848
200	2.18116



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

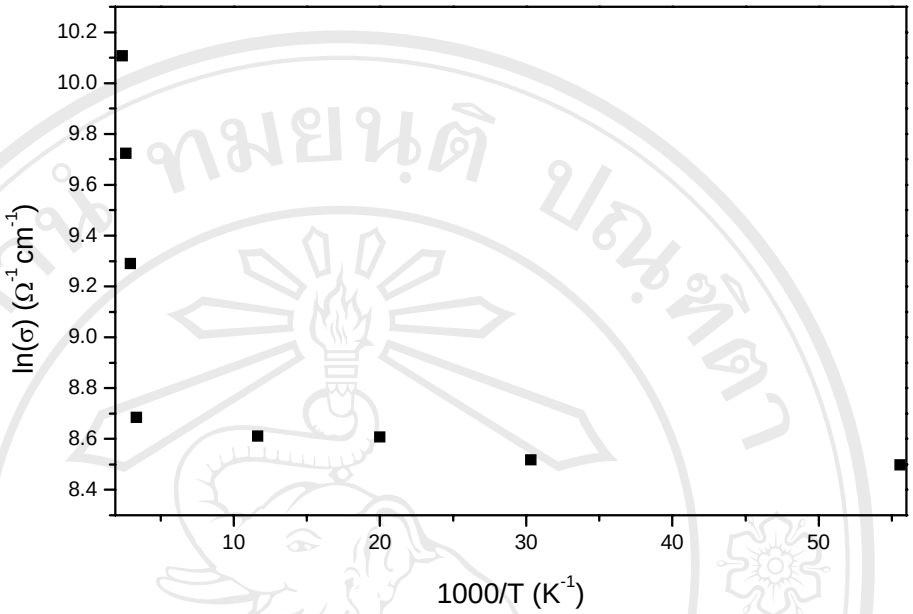
เมื่อเขียนกราฟระหว่างกระแสและความต่างศักย์ดังรูปที่ 4.14 จะได้ความสัมพันธ์เป็น $V = 0.01245I$ โดย V เป็นความต่างศักย์ และ I เป็นกระแส ทำให้ได้ความต้านทานเป็น 0.01245 $k\Omega$ จากนั้นคำนวณค่าสภาพต้านทานและ Sheet resistance จากสมการที่ 2.14 และ 2.15 โดยสารตัวอย่างมีความหนา 3 ไมโครเมตร เมื่อวัดหลายๆ อุณหภูมิ จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.15



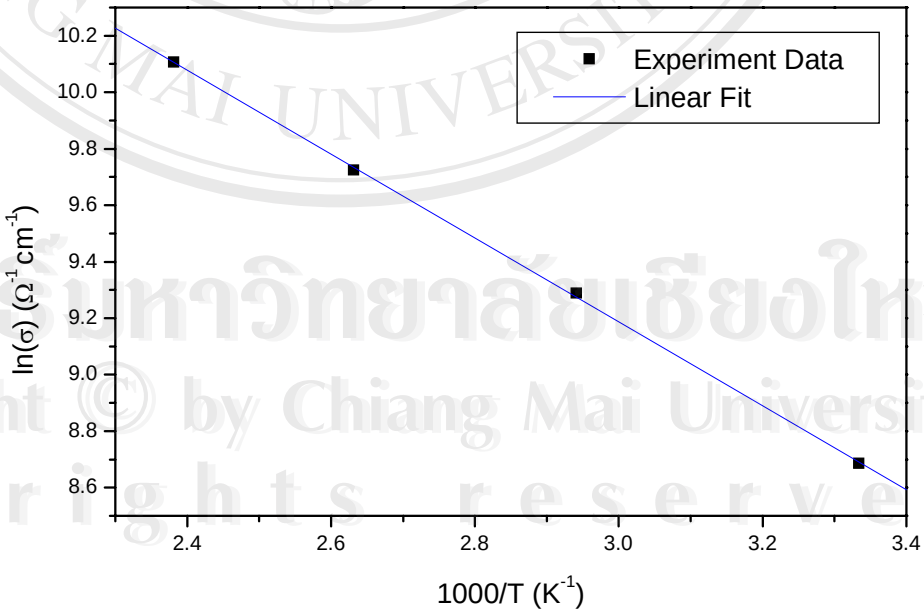
รูปที่ 4.15 แสดงผลการวัดค่าสภาพต้านทานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าสภาพต้านทานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่าสภาพต้านทานที่อุณหภูมิห้องมีค่า 1.69×10^{-2} $\Omega\cdot cm$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสาร ZnO ที่ยังไม่ได้เติมสารเจือที่มีค่า 1 $\Omega\cdot cm$ และมีค่า Sheet resistance เท่ากับ 56 $\Omega/Square$ แสดงว่ามีอะตอมของธาตุอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่ในอะตอมของสังกะสี (Zn) ทำให้ค่าสภาพต้านมีค่าลดลงจากเดิมและยิ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพต้านทานยิ่งมีค่าลดลง ซึ่งเป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 4.15 ค่าสภาพต้านทานที่เตรียมได้อาจจะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่าวิธีที่ใช้วัดค่าสภาพต้านทานเป็นวิธีที่เหมาะกับการวัดสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์ม ดังนั้นค่าที่ได้อาจจะสูงกว่าความเป็นจริง จากค่าสภาพต้านทานที่หาได้ถ้านำมาเขียนกราฟระหว่าง $\ln(\sigma)$ (เมื่อ σ คือค่าสภาพนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น $(\Omega\cdot cm)^{-1}$) กับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ



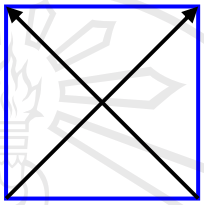
รูปที่ 4.17 แสดง Linear Fit ที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากกราฟในรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะหาพลังงานกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงได้โดยมีค่าเท่ากับ 0.128 eV ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเดิมเมื่อเทียบกับสาร ZnO ที่ยังไม่ได้เติมสารเจือที่มีค่า 0.94 eV[53]

จากผลการวัดฮอลล์โดยวิธี Van der Pauw โดยการจ่ายกระแสและวัดความต่างศักย์รูปแบบต่างๆ ดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18-4..21 (ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน)

กรณีที่ 1



รูปที่ 4.18 แสดงการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 1

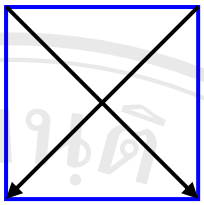
ตาราง 4.3 แสดงผลการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 1

	I(mA)	B(kG)	V(mV)
1	+1	+6	30.102
2	-1	+6	-30.104
3	+1	-6	30.124
4	-1	-6	-30.124

$$V_H = (V_1 - V_2 - V_3 + V_4)\frac{1}{4} = -0.0105 \quad mV$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

กรณีที่ 2



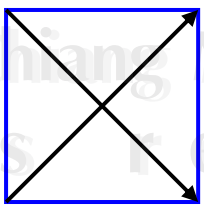
รูปที่ 4.19 แสดงการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 2

ตาราง 4.4 แสดงผลการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 2

	I(mA)	B(kG)	V(mV)
1	+1	+6	28.321
2	-1	+6	-28.323
3	+1	-6	28.345
4	-1	-6	-28.342

$$V_H = (V_1 - V_2 - V_3 + V_4)\frac{1}{4} = -0.01075 \quad mV$$

กรณีที่ 3



รูปที่ 4.20 แสดงการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 3

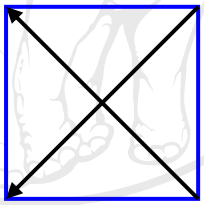
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.5 แสดงผลการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 3

	I(mA)	B(kG)	V(mV)
1	+1	+6	-35.624
2	-1	+6	35.625
3	+1	-6	-35.603
4	-1	-6	35.601

$$V_H = \left(V_1 - V_2 - V_3 + V_4\right)\frac{1}{4} = -0.01125 \quad mV$$

กรณีที่ 4



I V

รูปที่ 4.21 แสดงการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 4

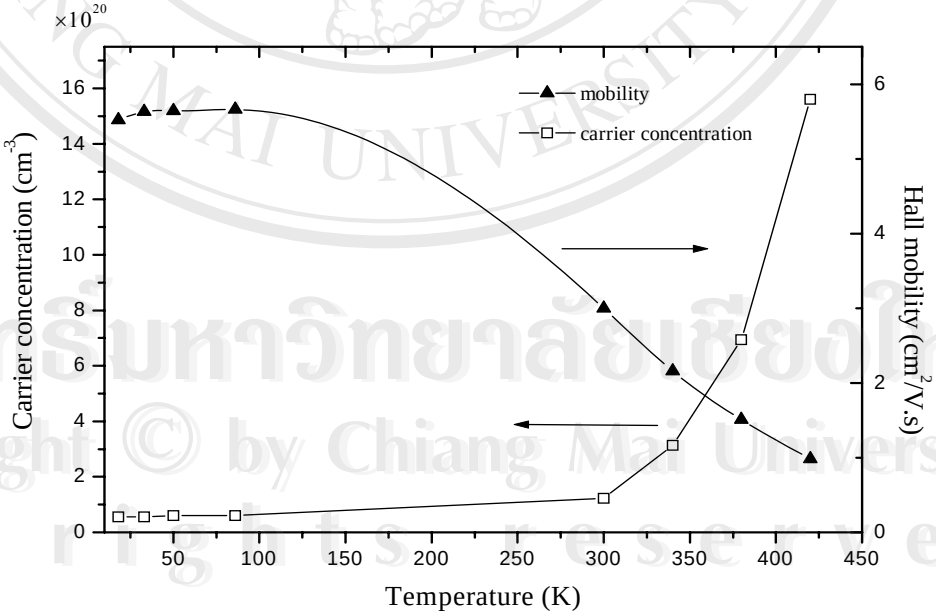
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.6 แสดงผลการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 4

	I(mA)	B(kG)	V(mV)
1	+1	+6	-33.830
2	-1	+6	33.832
3	+1	-6	-33.811
4	-1	-6	33.807

$$V_H = (V_1 - V_2 - V_3 + V_4)\frac{1}{4} = -0.011 \quad mV$$

ปรากฏว่าได้ค่าความต่างศักย์ฮอลล์เป็นเครื่องหมายลบ แสดงว่าสารตัวอย่างที่ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) เมื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าโมบิลิตี้โดยวัดหลายๆ อุณหภูมิและนำไปเขียนกราฟ จะได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าฮอลล์โมบิลิตี้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

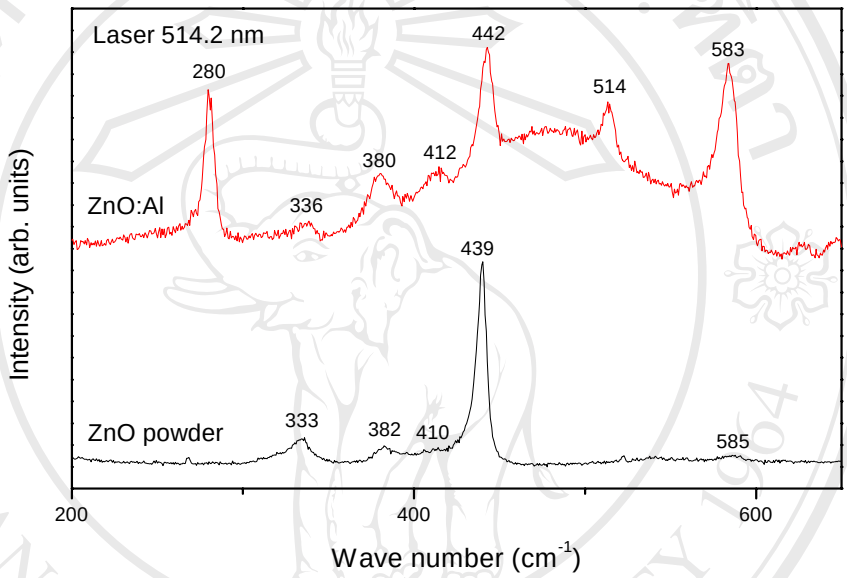
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ที่อุณหภูมิต่ำค่าความหนาแน่นของพาหะจะคงที่เนื่องจากว่า พลังงานที่ให้จากภายนอกไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานในระดับโดเนอร์ ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในชั้นคอนดักชันได้ ที่อุณหภูมิสูงความหนาแน่นของพาหะจะเพิ่มขึ้นแบบ Exponential เนื่องจากว่าอิเล็กตรอนที่มีพลังงานในระดับโดเนอร์ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในแถบคอนดักชันได้ โดยมีความสัมพันธ์เป็น $\exp(-E_g / 2k_B T)$ [8] และค่าความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิห้องคือ 1.23×10^{20} cm^{-3} นอกจากนี้เมื่อคำนวณค่าโมบิลิตี้ปรากฏว่ามีค่า 3 $cm^2/V\cdot s$ และค่าโมบิลิตี้จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิต่ำค่าโมบิลิตี้จะคงที่อันเป็นผลเนื่องมาจาก การกระจัดกระจายของแลตทิซที่เรียกว่า Lattice scattering โดยที่ Lattice scattering เกี่ยวข้องกับการสั่นของแลตทิซที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ ที่อุณหภูมิต่ำแลตทิซสั่นได้น้อยมากทำให้ค่าโมบิลิตี้จะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการสั่นของแลตทิซจะแรงขึ้น ทำให้ค่าโมบิลิตี้มีค่าลดลง[8] นอกจากนี้ค่าโมบิลิตี้ยังเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของพาหะอีกด้วยกล่าวคือ ในสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมนั้นจะมีความหนาแน่นของพาหะที่มาก ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดการ Scatter ของพาหะก็มีมากด้วยเช่นกัน ซึ่งส่งผลต่อ Mean time (τ) ของพาหะ ถ้าความหนาแน่นของพาหะมาก Mean time จะมีค่าน้อยดังสมการ[54] $\sigma = (ne\mu_e + pe\mu_h)$ โดยที่ $\mu_e = e\tau_e / m_e$ และ $\mu_h = e\tau_h / m_h$ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ $\tau_e \propto 1/n$ และ $\tau_h \propto 1/p$ จึงทำให้ค่าโมบิลิตี้ลดลงเมื่อความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.5 ผลการวิเคราะห์ รามานสเปกโตรสโคปี

จากผลของรามานสเปกโตรสโคปี ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยผลที่ได้จะเทียบกับ ZnO powder เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจากการเติมสารเจือหรือจากการที่โครงสร้างมีขนาดเล็กลงในระดับนาโน



รูปที่ 4.23 แสดง รามานสเปกตรัม ของสาร ZnO powder และ ZnO:Al

จากที่กล่าวมาว่า สาร ZnO มีโครงสร้างเป็นแบบ Wurtzite hexagonal ด้วยเหตุนี้ทำให้มี Space group เป็นแบบ C_{6v}^4 หรือ $6mm$ โดยมี 4 อะตอมต่อ Primitive cell เมื่อโหมดการสั่นที่เป็นไปได้ทั้งหมดของสารที่มี s อะตอมต่อ Primitive cell มีค่าเป็น 3s แบ่งเป็นโหมด Acoustic phonon เท่ากับ 3 โหมดและโหมด Optical phonon เท่ากับ 3s-3 โหมด ดังนั้นสาร ZnO มีโหมดการสั่นที่เป็นไปได้ทั้งหมด 12 โหมด แยกเป็น 3 โหมด สำหรับ Acoustic phonon และ 9 โหมดสำหรับ Optical phonon กลุ่มทฤษฎีที่จะอธิบายโหมดการสั่นของ Optical phonon คือ $A_1 + 2E_2 + E_1 + 2B_1$ โดยที่โหมดของ A_1 และ E_1 เป็น Polar phonon สามารถแยกเป็น TO และ LO ทั้งสองจะแอคทีฟกับทั้งรามานและอินฟราเรด ส่วน E_2 เป็น Non-polar phonon จะแอคทีฟเฉพาะกับรามานเท่านั้น และสุดท้าย B_1 โดยปกติจะไม่แอคทีฟกับทั้งรามานและอินฟราเรด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โหมดการสั่นของสาร ZnO แสดงดังตารางที่ 4.7 เมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ทำให้กล่าวได้ว่าสาร ZnO powder ที่ปรากฏตรงตำแหน่ง 333 cm^{-1} เป็นโหมดที่เกิดจาก E_2 (high)-E_2 (low), 382 cm^{-1} เป็นโหมด A_1 (TO), 410 cm^{-1} เป็นโหมด E_1 (TO), 439 cm^{-1} เป็นโหมด E_2 (high) และที่ 585 cm^{-1} เป็นโหมด E_1 (LO)

ตาราง 4.7 แสดงตำแหน่งเส้นสเปกตรัมของสาร ZnO และ ZnO:Al

ZnO powder	ZnO:Al	Symmetry	อ้างอิง[55]	อ้างอิง[56]
-	280	B_1	-	-
333	336	E_2(High)-E_2(Low)	331	331
382	380	A_1(TO)	383	382
410	412	E_1(TO)	410	414
439	442	E_2(High)	438	439
-	514	-	-	-
-	-	A_1(LO)	540	574
585	583	E_1(LO)	584	580

ในส่วนของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมนั้นปรากฏ E_2 (high)-E_2 (low) ที่ตำแหน่ง 336 cm^{-1}, A_1(TO) ที่ 380 cm^{-1}, E_1 (TO) ที่ 412 cm^{-1}, E_2 (high) ที่ 412 cm^{-1} และ E_1 (LO) ที่ 583 cm^{-1} นอกจากนี้สารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมยังปรากฏเส้นสเปกตรัมที่ตำแหน่ง 280 cm^{-1} และ 514 cm^{-1} โดยสองตำแหน่งนี้แสดงถึง Defect ที่เกิดจากสิ่งที่เจือปนเข้าไป[57] แสดงว่ามีอะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปอยู่ในสาร ZnO ทำให้ปรากฏตำแหน่งที่ว่านี้ เมื่อพิจารณาตำแหน่ง E_2 (high) จะสังเกตว่าในกรณีของสารซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมนั้นจะเกิดการ Shift ไปในความถี่ที่มากกว่าคือ 442 cm^{-1} ซึ่งเรียกว่า Blue shift นอกจากนี้ตำแหน่งที่ 583 cm^{-1} หรือ E_1 (LO)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โหมด ซึ่งโหมดนี้จะแสดงถึง Oxygen vacancy หรือ Oxygen deficiency รวมถึงยังเกี่ยวข้องกับขนาดของสารที่สังเคราะห์ได้ ถ้าขนาดเล็กลงสเปกตรัมที่ตำแหน่งนี้จะเด่นจากเดิม[55] ดังนั้นจากการวิเคราะห์ รามาน สเปกโตรสโคปี ทำให้ทราบว่าสารเจือที่เติมเข้าไปสามารถที่จะเข้าไปแทนที่อะตอมได้ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ถึงสมบัติทางแสงที่น่าสนใจหลังจากเติมสารเจือแล้วทำให้เกิดการ Shift ของโหมดการสั่น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved