

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	12
1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย เชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์	12
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 สภาพด้านทาน	13
2.2 การเติมสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำ	17
2.3 ปฏิกิริยาการแผ่รังสี	18
2.4 โครงสร้างนาโน มิติ และผลกระทบทางควอนตัม	26
2.5 คุณสมบัติของสารเชิงซ้อนออกไซด์	29
2.6 กระบวนการเกิดโครงสร้างนาโน	31
2.7 เทคนิคการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวของสารเชิงซ้อนออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม	32
2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	37
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	38
2.10 เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Energy Dispersive Spectroscopy	42
2.11 รามาน สเปกโตรสโกปี	43
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง	54
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	55
3.3 ขั้นตอนการเตรียมเป่าเม็ดสารเชิงซ้อนออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม	55

3.4 ขั้นตอนการสังเคราะห์โครงสร้างนาโน	
ด้วยเครื่อง อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปีดเตอริง	63
3.5 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์	
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	64
3.6 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์	
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	65
3.7 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่างเพื่อวัดค่าสภาพต้านทานและวัดฮอลล์	67
3.8 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่างและการวิเคราะห์รามาน สเปกโตรสโคปี	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	71
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	76
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเปกโตรสโกปีพลังงานกระจาย (EDS)	80
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า	82
4.5 ผลการวิเคราะห์ รามาน สเปกโตรสโคปี	90
บทที่ 5 สรุป วิจัยรณผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุป และวิจัยรณผลการทดลอง	93
5.2 ข้อเสนอแนะ และงานที่จะทำต่อไป	97
บรรณานุกรม	99
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	
ผลการวัดฮอลล์ที่อุณหภูมิต่างๆ	106
ภาคผนวก ข	
เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย TEM	108
ภาคผนวก ค	
ผลงานทางวิชาการ	113
ประวัติผู้เขียน	121

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การถ่ายกระแสและวัดความต่างศักย์	26
2.2 สมบัติกายภาพบางประการของสารซิงค์ออกไซด์	30
4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม	81
4.2 แสดงผลการวัดความต้านทานที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน	82
4.3 แสดงผลการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 1	85
4.4 แสดงผลการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 2	86
4.5 แสดงผลการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 3	87
4.6 แสดงผลการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 4	88
4.7 แสดงตำแหน่งเส้นสเปกตรัมของสาร ZnO และ ZnO:Al	91
5.1 แสดงตารางการเปรียบเทียบขนาดและรูปร่างของโครงสร้าง นาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยสารต่าง ๆ กับผลงานวิจัยของคณะทำงานอื่นๆ	93
5.2 แสดงตารางการเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าของสารซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม กับผลงานวิจัยของคณะทำงานอื่นๆ	95
5.3 แสดงตารางการเปรียบเทียบจาก รามาน สเปกโตรสโคปี ของสารซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารเจือ กับผลงานวิจัยของคณะทำงานอื่นๆ	97
ก1 ค่าที่คำนวณได้จากการวัดฮอลล์ที่อุณหภูมิต่างๆ	106
ข1 ค่าคงที่ที่กล้อง TEM	109
ข2 แสดงผลการคำนวณค่า d-spacing	110
ข3 แสดงตาราง JPCDS ของสารซิงค์ออกไซด์ (36-1451)	110
ข4 ระบายที่เป็นไปได้ทั้งหมดในแต่ละเวกเตอร์	111

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1 แบบจำลองเครื่องจักรกลขนาดจิ๋ว	2
1.2 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวเมื่อขนาดของสารเล็กลงแต่มีปริมาตรรวมเท่ากัน	6
1.3 โครงสร้าง Hexagonal ของสาร ZnO	7
1.4 แสดงการประยุกต์ใช้ของสาร ZnO:Al	8
1.5 สารซึ่งค่อออกไซด์ในโครงสร้างระดับนาโนเมตรแบบต่างๆ	8
1.6 (a) แสดงเส้นลวดนาโนซึ่งค่อออกไซด์ที่เจือด้วย Sc (b) แสดงผล XRD ซึ่งประกอบด้วยสาร ZnO และ Sc_2O_3 จากผลการทดลองของ S.M. Zhou	9
1.7 เส้นลวดนาโนซึ่งค่อออกไซด์ที่เจือด้วยกำมะถันด้วยกระบวนการ chemical solution-conversion จากการทดลองของ G. Shen	10
1.8 (a)-(f) แสดงโครงสร้างนาโนของสาร ZnO ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม จากการทดลองของ A. Rahm	11
2.1 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานแบบ Collinear probe	13
2.2 แสดงลักษณะสารตัวอย่างรูปร่างต่างๆ	15
2.3 แสดงรูปแบบการติดคอนแทกส์เพื่อวัดค่าสภาพต้านทาน	16
2.4 แสดงการเติมสารเจือ	17
2.5 แสดงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ	18
2.6 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์เมื่อพาหะบนแผ่นเป็นอิเล็กตรอน	19
2.7 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์เมื่อพาหะบนแผ่นฟิล์มเป็นโฮล	21
2.8 แสดงสารที่เป็นแผ่นยาว L, กว้าง W และหนา t	21
2.9 แสดงผลการทดลองของ Isenberg จากวิธี Hall-bar	23
2.10 แสดงการวัดฮอลล์แบบ Van der Pauw	24
2.11 แสดงการวัดฮอลล์ โดยจ่ายกระแสและความต่างศักย์ในรูปแบบต่างๆ	26
2.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสถานะของสาร	27
2.13 การเปลี่ยนแปลงสีของอนุภาคทองคำเมื่อมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร	28
2.14 การเปลี่ยนแปลงโครงของอนุภาคทองคำเมื่อมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร	29

2.15	แสดงแผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	29
2.16	โครงสร้างสารซิงค์ออกไซด์	31
2.17	แสดงการเกิดเส้นเข็มขัดนาโนซิงค์ออกไซด์ตามสมมุติฐาน VS mechanism	31
2.18	แสดงการเกิดเส้นเข็มขัดนาโนซิงค์ออกไซด์ตามสมมุติฐาน VLS mechanism	32
2.19	แสดงแบบจำลองเทคนิค PLD	33
2.20	แสดงแบบจำลองเทคนิค MOCVD	33
2.21	แสดงการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับผิวหน้าของเป้าหมาย (target)	34
2.22	แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็ก	36
2.23	แสดงระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง	36
2.24	แสดงองค์ประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	37
2.25	แสดงโปรบอิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวแกนนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่าง	38
2.26 (ก)	แสดงตัวอย่างกล้อง TEM, (ข) ตำแหน่งของเลนส์แม่เหล็ก	39
2.27	แสดงแผนภาพการเกิด (ก) ภาพไบรต์ฟิลด์ (bright field image), (ข) (dark field image) ที่ไม่ชัด, (ค) ภาพดาร์คฟิลด์ที่ชัด	41
2.28	แสดงการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสสารโดยวิธี EDS	42
2.29	การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมส่งผลให้เกิดรังสีเอ็กซ์	43
2.30	เมื่อแสงตกกระทบกับโมเลกุลแล้วเกิดการกระจัดกระจาย	44
2.31	แสดงปฏิกิริยาและเส้นสเปกตรัมที่ให้ Stokes, Anti-Stokes และ Rayleigh lines	45
2.32	แสดงเส้นรามาเนสเปกตรัม	46
2.33	แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Polarizability เมื่อ โมเลกุลเกิดการสั่น	48
2.34	แสดง First order ของการกระจัดกระจายแสงแบบรามาน	48
2.35	แสดง Second-order ของการกระจัดกระจายแสงแบบรามาน	50
2.36	แสดงโครงสร้างสาร ZnO และโหมดการสั่น	51
2.37	แสดงการแยกของโหมดการสั่น (ก) เมื่อ Long-range force เด่นกว่า (ข) เมื่อ Short-range force เด่นกว่า	52
3.1	แสดงสารซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide:ZnO) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9	56
3.2	แสดงสารอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide: Al_2O_3)	56
3.3	แสดงเครื่องซังสารระบบดิจิทัล	56
3.4	แสดงกรกบดสารไฟฟ้า	57
3.5	แสดงเตาเผา	57

3.6 แสดงแผนผังอุณหภูมิการเผาผลาญ ZnO:Al	58
3.7 แสดงเป้าอัดสาร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม รัศมีของเป้าเม็ดสารเท่ากับ 3 นิ้ว	59
3.8 แสดงเครื่องอัดแรงดันแรงดันสูงสุด 60 ตัน อยู่ที่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	59
3.9 แสดงแผนผังอุณหภูมิการเผาเม็ดสาร ZnO	60
3.10 แสดงเป้าเม็ดสารซึ่งค่อออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมพร้อมสำหรับการสปีดเตอริง	61
3.11 แสดงแผนผังขั้นตอนการเตรียมเป้าเม็ดสารซึ่งค่อออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียม	62
3.12 แสดงเครื่องอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง	63
3.13 แสดงสารตัวอย่างที่ติดบน stub	64
3.14 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	65
3.15 แสดง Nickle grid เพื่อวิเคราะห์ TEM	65
3.16 แสดง Specimen holder สำหรับกล้อง TEM	66
3.17 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	66
3.18 แสดงกล้อง Zoom stereo microscope รุ่น C-01 ของบริษัท OLYMPUS ประเทศญี่ปุ่น	67
3.19 (ก) และ (ข) แสดงที่ยึดแผ่นสารตัวอย่าง	68
3.20 แสดงการฉายกระแสเพื่อวัดค่าสภาพต้านทานและวัดฮอลล์	68
3.21 แสดงอุปกรณ์วัดฮอลล์	69
3.22 บริเวณที่วางสารตัวอย่างเพื่อปรับโฟกัส	70
3.23 แสดงอุปกรณ์การทดลอง รามาน สเปกโตรสโคปี	71
4.1 แสดงสารซึ่งค่อออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมซึ่งเคลือบลงบนแผ่นรองรับต่างๆ	71
4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวของสารซึ่งค่อออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม	72
4.3 แสดงโครงสร้างนาโนที่อยู่ด้านหน้าแผ่นรองรับทองแดง	73
4.4 แสดงโครงสร้างนาโนที่อยู่ด้านหลังแผ่นรองรับทองแดง	74
4.5 แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้างนาโนบนแผ่นรองรับทองแดง	74
4.6 แสดงโครงสร้างนาโนที่อยู่บนแผ่นรองรับอะลูมินา	75
4.7 แสดงโครงสร้างนาโนที่อยู่บนแผ่นรองรับควอตซ์	75
4.8 แสดงภาพถ่ายจาก TEM พร้อมทั้งอิเล็กตรอนดิฟแฟรกชัน	76
4.9 การวิเคราะห์ระนาบของโครงสร้างนาโนซึ่งค่อออกไซด์ ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมจากอิเล็กตรอนดิฟแฟรกชัน	77

4.10 แสดงแบบจำลองการเรียงตัวของอะตอมของในทิศ $[11\bar{2}0]$ และ $[0001]$	78
4.11 แสดงทิศการโตของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมเมื่อพิจารณาจากภาพ SEM	79
4.12 แสดงกราฟ EDS สเปกตรัมของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้านหน้าแผ่นรองรับ	80
4.13 แสดงกราฟ EDS สเปกตรัมของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นรองรับ	80
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์	82
4.15 แสดงผลการวัดค่าสภาพต้านทานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของโครงสร้างนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม	83
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าและอุณหภูมิ	84
4.17 แสดง Linear Fit ที่อุณหภูมิสูงเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy)	84
4.18 แสดงการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 1	85
4.19 แสดงการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 2	86
4.20 แสดงการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 3	86
4.21 แสดงการวัดฮอลล์ในกรณีที่ 4	87
4.22 แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าฮอลล์โมบิลิตีที่อุณหภูมิต่าง ๆ	88
4.23 แสดง รามาน สเปกตรัม ของสาร ZnO powder และ ZnO:Al	90
ข1 แสดงแบบจำลองกลืนอิเล็กตรอนที่ยิงผ่านเกรตติงแล้วเกิดการแทรกสอดที่ฉาก	108
ข2 แสดงตัวอย่างการกำหนดเวกเตอร์ R_1 , R_2 , R_3 และ R_4	109
ข3 แสดงระนาบที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนดิฟแฟรกชัน	111