

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ถ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งใส	5
2.2 फिल्मบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งใส	6
2.2.1 วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 2 ชนิด	7
2.3 แนวทางการออกแบบวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งใส	8
2.4 อุปกรณ์ที่มีการใช้วัสดุออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งใส	9
2.5 กระบวนการผลิตวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสสำหรับการใช้งาน	10
2.6 สารประกอบอินเดียมออกไซด์	12
2.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มออกไซด์ นำไฟฟ้าโปร่งแสง	13
2.8 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์ม อินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียม	23
2.9 สารกึ่งตัวนำ	29
2.9.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	29
2.9.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์	31
2.9.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	31

2.9.2.2	สารกึ่งตัวนำชนิดพี	32
2.10	สมบัติทางแสง	33
2.10.1	สมบัติการดูดกลืนแสง	33
2.10.2	การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	36
2.11	การเคลือบฟิล์มบาง	38
2.11.1	หลักการของการพ่นเคลือบวิธีแยกสลายด้วยความร้อนหรือสเปรย์ไพโรไลซิส	39
2.11.2	ตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิก	43
บทที่ 3	วิธีการทดลอง	45
3.1	สารเคมี	45
3.2	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	45
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	46
3.4	การทำความสะอาดซัพสเตรตแก้วก่อนการเคลือบฟิล์ม	47
3.5	การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์	48
3.6	การเตรียมฟิล์มอินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียม	50
3.7	การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	55
3.8	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	57
3.9	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม	59
3.10	การตรวจสอบสมบัติทางแสง	60
3.10.1	การตรวจสอบร้อยละการส่องผ่านแสง	60
3.10.2	การประมาณค่าแถบช่องว่างพลังงาน	61
3.11	การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	62
บทที่ 4	ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง	66
4.1	การเตรียมฟิล์มอินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียมโดยมีเงื่อนไขการเจือไทเทเนียมแตกต่างกัน	66

4.1.1	ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	66
4.1.2	ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	68
4.1.3	ขนาดเกรน	71
4.1.4	ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม	72
4.1.5	ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มอินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียม	74
4.1.5.1	สภาพต้านทานไฟฟ้า	74
4.1.6	ผลการตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มอินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียม	77
4.1.6.1	ร้อยละการส่องผ่านแสง	77
4.1.6.2	การประมาณค่าแถบช่องว่างพลังงาน	79
4.2	การเตรียมฟิล์มอินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียมโดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิอบอ่อนต่างกัน	80
4.2.1	ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	81
4.2.2	ขนาดเกรน	82
4.2.3	ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม	83
4.2.4	ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	85
4.2.4.1	สภาพต้านทานไฟฟ้า	85
4.2.5	ผลการตรวจสอบสมบัติทางแสง	87
4.2.5.1	ร้อยละการส่องผ่านแสง	87
4.2.5.2	การประมาณค่าแถบช่องว่างพลังงาน	88
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	90
5.1	สรุปผลการทดลอง	90

5.1.1 ผลการเตรียมฟิล์มอินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียมที่เงื่อนไข  
การเจือไทเทเนียมแตกต่างกัน 90

5.1.2 การเตรียมฟิล์มอินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียมที่มีเงื่อนไข  
ของอุณหภูมิอบอ่อนแตกต่างกัน 91

5.2 ข้อเสนอแนะ 92

เอกสารอ้างอิง 93

ภาคผนวก เพิ่มข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 98

ประวัติผู้เขียน 100

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 กระบวนการเตรียมฟิล์มออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งใสในอดีตที่ผ่านมา	11
2.2 สมบัติต่างๆ ของอินเดียมออกไซด์	13
3.1 อัตราส่วนผสมของสารตั้งต้นฟิล์มอินเดียมออกไซด์เจือไทเทเนียม	49
4.1 ขนาดเกรนโดยเฉลี่ยของฟิล์ม ITiO ที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C	72
4.2 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ITiO ที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 □°C	76
4.3 ขนาดเกรนโดยเฉลี่ยของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.% อบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 □□°C	83
4.4 ค่าสภาพต้านไฟฟ้าของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 250-400 □□□°C	86

## สารบัญภาพ

รูป		หน้า
2.1	การรายงานสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งใสแบบ สารประกอบ 2 ชนิด ในปี ค.ศ. 1970-2000: ฟิล์มดีบุกออกไซด์และดีบุก ออกไซด์ที่มีสารเจือ ( $\text{SnO}_2$ ) อินเดียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ที่มีสาร เจือ ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) และซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่มีสารเจือ ( $\text{ZnO}$ )	8
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานกับวัสดุออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งใส แบบสารประกอบ 2 ชนิด แบบสารประกอบออกไซด์ 3 ชนิดและแบบสาร ประกอบออกไซด์หลายชนิดผสมกัน (เส้น)	9
2.3	ลักษณะ โครงสร้างของอินเดียมออกไซด์แบบ cubic bixyite-type ( $\text{C-In}_2\text{O}_3$ )	8
2.4	อัตราส่วนของ Al/Zn (at.%) ที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ความหนาแน่น ประจุพาหะ (n) และสภาพคล่องของประจุพาหะ ( $\mu$ ) ของฟิล์ม AZO	
2.5	(ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง ZnO: F ตกสะสมบน ชั้นสเตรตอณูหุ้ม 500 °C ที่อัตราส่วนของการเติมกรดอะซีติกแตกต่างกัน (ข) ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอมของฟิล์มบาง ZnO: F ตกสะสมบนชั้นสเตรตอณูหุ้ม 500 °C ที่อัตราส่วนของการเติมกรดอะซีติก (a) 7/100, (b) 10/100, (c) 20/100, (d) 30/100 และ (e) 40/100 (ค) แสดงวงวนฮิสเทอร์ซิซของ $\text{BiFeO}_3$ ที่อุณหภูมิต่างๆ (ข) แสดงสเปกตรัมของ การเปลี่ยนสถานะประจุในวัสดุเซรามิก $\text{BiFeO}_3$ โดยเทคนิค XPS (1) 800 องศา เซลเซียส (RPLS) (2) 820 องศาเซลเซียส (RPLS) (3) 880 องศาเซลเซียส (SSR)	15
2.6	ปริมาณการเจือ Ga (at.%) ที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นประจุพาหะ และสภาพคล่องของประจุพาหะของฟิล์ม GZO	16
2.7	(ก) อัตราส่วนความเข้มของพลังงานระหว่างระนาบ (400) และระนาบ (222) ( $I_{400}/I_{222}$ ) ของฟิล์มบาง ITO ที่อุณหภูมิชั้นสเตรตแตกต่างกัน (ข) ความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณ การเจือดีบุกในสารละลายที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของ ฟิล์มบาง ITO	17
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือโมลิบดีนัมที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของประจุพาหะของฟิล์ม IMO	18

- 2.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือฟลูออรีนที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของประจุพาหะของฟิล์ม FTO ที่อุณหภูมิยับยั้งที่เท่ากับ 400 °C และความหนาฟิล์มเท่ากับ 550 nm (ข) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม FTO (ปริมาณการเจือฟลูออรีน 0.5 M) ที่อุณหภูมิต่างกัน 20
- 2.10 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์ม FTO (ปริมาณการเจือฟลูออรีน 0.5 M) ที่อุณหภูมิต่างกัน (a) 360 °C, (b) 400 °C (c) 500 °C และ (d) ขนาดเกรนฟิล์ม FTO ที่เคลือบบนซับสเตรตที่อุณหภูมิต่างกัน 21
- 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของซับสเตรตที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพคล่องของประจุพาหะของฟิล์ม FTO (ปริมาณการเจือฟลูออรีนเท่ากับ 0.5 M) 21
- 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือไทเทเนียมที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นประจุและสภาพคล่องของประจุพาหะของฟิล์ม ITiO ที่เคลือบภายใต้ความดันของก๊าซ 0.6 Pa ปริมาณของออกซิเจนในก๊าซสปีดเตอริง 1 vol% ตกสะสมบนซับสเตรตที่อุณหภูมิต่างกันและ 300 °C และความหนาฟิล์ม 500 nm 23
- 2.13 สเปกตรัมการส่องผ่านและการสะท้อนของฟิล์ม ITiO เจือไทเทเนียม 0.8 at.% และ 1.6 at.% และฟิล์ม ITO ในช่วงความยาวคลื่น 200-2600 nm ภายใต้ความดันของก๊าซ 0.6 Pa ปริมาณของออกซิเจนในก๊าซสปีดเตอริง: 1 vol% ตกสะสมบนซับสเตรตที่อุณหภูมิต่างกันและ 300 °C และความหนาฟิล์ม ITiO เจือไทเทเนียม 0.8 at.%, 1.6 at.% และฟิล์ม ITO เท่ากับ 204, 212 และ 158 nm ตามลำดับ 24
- 2.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม ITiO ก่อนและหลังอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกัน 25
- 2.15 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ITiO ที่ความหนาฟิล์มแตกต่างกัน 25
- 2.16 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ITiO ก่อนและหลังอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกัน 300 °C ที่ความหนาฟิล์มแตกต่างกัน 26
- 2.17 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงของฟิล์ม ITiO ก่อนและหลังอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกัน 300 °C 26
- 2.18 สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงของฟิล์ม ITiO, ITO และ FTO หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกัน 500 °C 10 นาที 28
- 2.19 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ITiO, ITO และ FTO หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกัน 500 °C 10 นาที 28



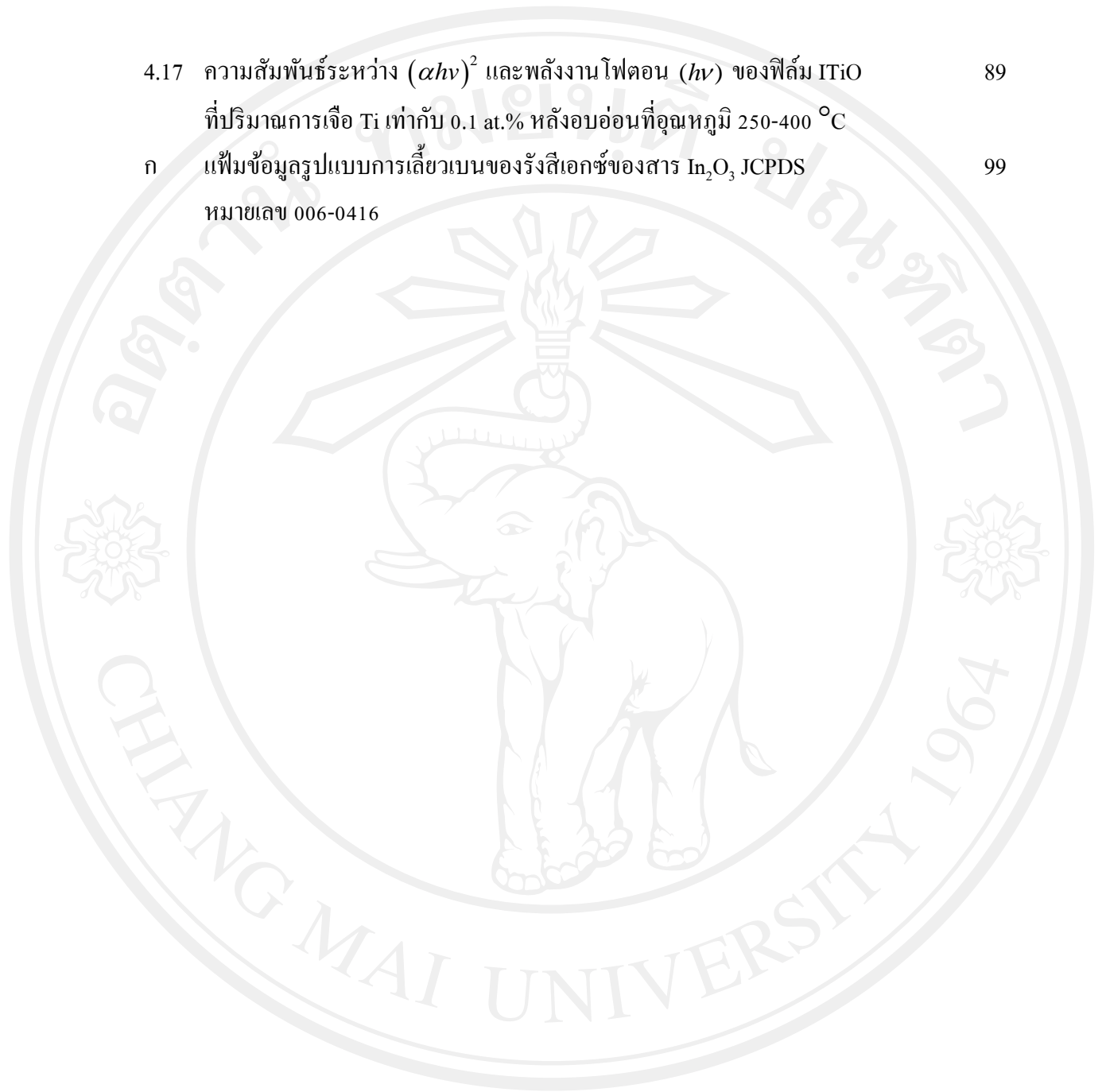
2.20	แสดงช่องว่างแถบพลังงานของสาร ไดอิเล็กทริก สารกึ่งตัวนำและโลหะ	29
2.21	แสดงการนำไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล ขณะอยู่ในสนามไฟฟ้า	30
2.22	แสดงตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอนในพันธะ โควาเลนซ์ของผลึกซิลิกอน	31
2.23	แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น	32
2.24	แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพี	34
2.25	ลักษณะของการย้ายสถานะพลังงานของสาร (a) การย้ายสถานะแบบตรง (b) การย้ายสถานะแบบไม่ตรง	35
2.26	การทดลองการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	36
2.27	สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงของฟิล์ม ZnO (a) สเปกตรัมการส่องผ่าน ของแสงของฟิล์ม ZnO (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ $hv$ ซึ่งจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานจากส่วนตัดของแกนของพลังงานโฟตอน	38
2.28	ประเภทของกระบวนการเคลื่อนที่ฟิล์มบาง	39
2.29	ไดอะแกรมเปรียบเทียบกลไกต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ในกระบวนการพ่นเคลือบ วิธีแยกสลายด้วยความร้อนเมื่อละอองสารมีขนาดต่างๆ	40
2.30	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วการปลูก (growth rate) ฟิล์มกับส่วนกลับ ของอุณหภูมิ	41
2.31	ส่วนประกอบของตัวทำละอองอัลตราโซนิก	44
2.32	ลักษณะการเกิดละอองจากตัวทำละอองอัลตราโซนิก	44
3.1	(a) เครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) รุ่น UP 200S และ (b) เตาอบสารอุณหภูมิ 120 °C	47
3.2	แผนผังขั้นตอนการทำความสะอาดสเตรตแก้ว (กระจกสไลด์)	48
3.3	(a) ผงอินเดียมไตรคลอไรด์ (InCl <sub>3</sub> ) ความบริสุทธิ์ 99.999% (b) ไทเทเนียม เตตระไฮโดรโพพรอกไซด์ (C <sub>12</sub> H <sub>28</sub> O <sub>4</sub> Ti) ความบริสุทธิ์ 97% (c) เอทานอล (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH) ความบริสุทธิ์ 99.99% และ (d) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความบริสุทธิ์ 37%	50
3.4	บีกเกอร์ ขวดแก้วพร้อมฝาปิด ขวดแก้วรูปชมพู่ เข็มฉีดยาทำจากแก้วโบโรซิลิเกต กระบอกตวงและปิเปตขนาดต่างๆ	50
3.5	ระบบการทำงานสำหรับการพ่นเคลือบฟิล์มด้วยระบบอัลตราโซนิก สเปรย์ไพโรไลซิส	51



3.6	แผนผังขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ $C_{12}H_{28}O_4Ti$ เท่ากับ 0.01-0.045 M	52
3.7	แผนผังการอบอ่อนฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ $C_{12}H_{28}O_4Ti$ เท่ากับ 0.01-0.045 M	53
3.8	แผนผังขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ $C_{12}H_{28}O_4Ti$ เท่ากับ n M อบอ่อนที่อุณหภูมิต่างกัน	54
3.9	แผนผังการอบอ่อนฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ $C_{12}H_{28}O_4Ti$ เท่ากับ n M	58
3.10	การวิเคราะห์ผลึกโดยใช้เครื่องมือการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	56
3.11	เครื่องสปีดเตอร์ รุ่น JFC-1100E	57
3.12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด FE-SEM (JEOL JSM 5910LV) รุ่น 7274	58
3.13	ส่วนประกอบและการทำงานพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม	59
3.14	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม Nanoscope III Digital instrument	60
3.15	เครื่อง UV-Vis-NIR spectrophotometer รุ่น UV-Vis Lamda 35 ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer	62
3.16	เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ Van der Pauw method รุ่น B1500A ผลิตโดยบริษัท Agilent Technologies	63
3.17	การติดคอนแทกส์เพื่อวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	64
3.18	การวางหัววัดทั้ง 4 ลงบนกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์ม ITiO เพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค Four Point Probe	65
3.19	เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ Four point probe ใช้ power supply รุ่น 3458A Multimeter ผลิตโดยบริษัท Hewlett Packard; HP	65
4.1	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม ITiO ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.01-0.1 at.% อบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C เมื่อเปรียบเทียบกับแฟ้มข้อมูล JCPDS	68
4.2	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวฟิล์ม ITiO เมื่อเจือ Ti ในปริมาณ (a) 0.01, (b) 0.03, (c) 0.05, (d) 0.07 และ (e) 0.1 at.% อบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า	69
4.3	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของภาคตัดขวางฟิล์ม ITiO เมื่อเจือ Ti ในปริมาณ (a) 0.01, (b) 0.03, (c) 0.05, (d) 0.07 และ (e) 0.1 at.% อบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า	70

4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือ Ti ที่มีต่อขนาดเกรนเฉลี่ยของฟิล์ม ITiO หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C	71
4.5	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอมของฟิล์ม ITiO เมื่อเจือ Ti ในปริมาณ (a) 0.01, (b) 0.03, (c) 0.05, (d) 0.07 และ (e) 0.1 at.% อบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C ที่ขนาดการส่องกราด 5×5 μm	73
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือ Ti ที่มีต่อค่าเฉลี่ยกำลังสองความหยาบผิวของฟิล์ม ITiO หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C	74
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือ Ti ที่มีต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ITiO หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C	76
4.8	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.01-0.1 at.% ก่อนอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C	78
4.9	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.01-0.1 at.% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C	78
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.01-0.1 at.% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 450 °C	80
4.11	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม ITiO ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.% อบอ่อนที่อุณหภูมิ 250-400 °C เมื่อเปรียบเทียบกับแฟ้มข้อมูล JCPDS	82
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อขนาดเกรนเฉลี่ยของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.%	83
4.13	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอมของฟิล์ม ITiO เมื่อปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.% อบอ่อนที่อุณหภูมิ (a) 250, (b) 300, (c) 350 และ (e) 400 °C ที่ขนาดการส่องกราด 5×5 μm	84
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อค่าเฉลี่ยกำลังสองความหยาบผิวของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.%	85
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบอ่อนที่มีต่อค่าสภาพต้านไฟฟ้าของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.%	86
4.16	สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์ม ITiO ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 250-400 °C	88

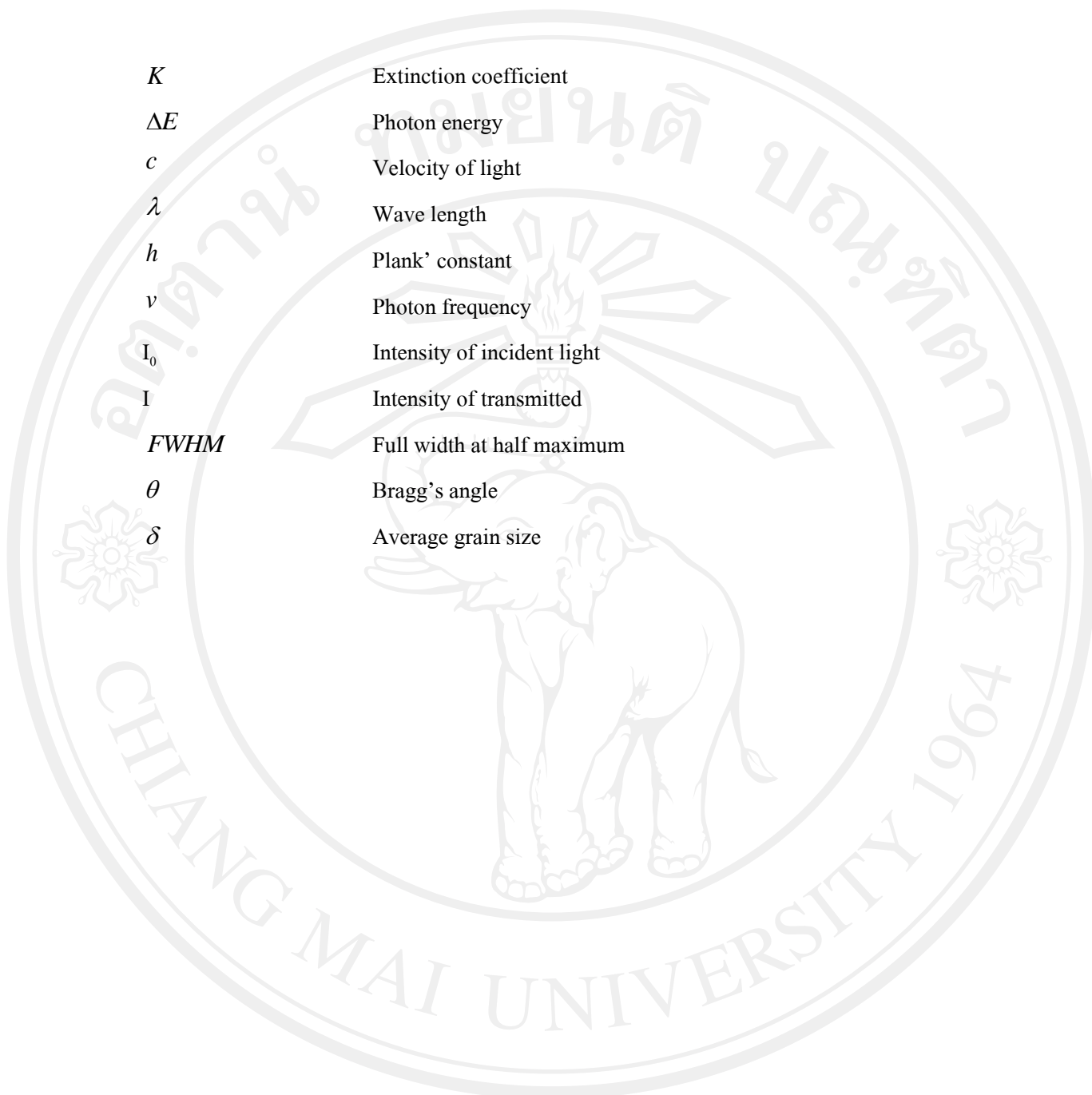
- 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^2$  และพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) ของฟิล์ม ITiO<sub>2</sub> ที่ปริมาณการเจือ Ti เท่ากับ 0.1 at.% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 250-400 °C 89
- ก. เพิ่มข้อมูลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสาร In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, JCPDS หมายเลข 006-0416 99



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

ITiO	Titanium doped indium oxide
TCO	Transparent Conducting Oxide
ITO	Tin doped indium oxide
FTO	Fluorine dope indium oxide
AZO	Aluminum dope zinc oxide
FZO	Fluorine dope zinc oxide
GZO	Gallium dope zinc oxide
SZO	Silicon dope zinc oxide
IMO	Molybdenum dope indium oxide
IZO	Zinc dope indium oxide
InCl <sub>3</sub>	Indium (III) chloride
C <sub>12</sub> H <sub>28</sub> O <sub>4</sub> Ti	Titanium (III) isopropoxide
HCl	Hydrochloric acid
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	Ethanol
HNO <sub>3</sub>	Nitric acid
BCC	Body center cubic
CVD	Chemical vapor deposition
XRD	X-Ray Diffraction
SEM	Scanning Electron Microscopy
AFM	Atomic Force Microscopy
UV-Vis-NIR	Ultraviolet-Visible Near Infrared Spectrophotometer
$\rho$	Resistivity
$\mu$	hall mobility
R	Resistance
$R_s$	Sheet resistance
$E_g$	Energy gap
$E_a$	Acceptor level
$\alpha$	Absorption coefficient

The background of the page features a large, light gray watermark of the Chiang Mai University logo. The logo is circular and contains an elephant in the center, with Thai text at the top and 'CHIANG MAI UNIVERSITY 1964' at the bottom. There are also decorative floral motifs on the sides.

$K$	Extinction coefficient
$\Delta E$	Photon energy
$c$	Velocity of light
$\lambda$	Wave length
$h$	Plank' constant
$\nu$	Photon frequency
$I_0$	Intensity of incident light
$I$	Intensity of transmitted
$FWHM$	Full width at half maximum
$\theta$	Bragg's angle
$\delta$	Average grain size