ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247014

อิทธิพลของธาตุเจือบางชนิดต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์

นายธนกฤต น่วมชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พ.ศ. 2554

อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ และสารเติมที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของ $ZnO-Bi_2O_3$-CoO วาริสเตอร์

b00251696

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247014

นายธนกฤต น่วมจาด (วท.บ. ฟิสิกส์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา
คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.วันดี อ่อนเรียบร้อย)

..... กรรมการ
(ดร.ปณิตา ชินเวชกิจวานิชย์)

..... กรรมการ
(ดร.เนติมา สว่างวรรณ)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ และสารเติมที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายธนกฤต น่วมจาด
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วันดี อ่อนเรียบร้อย
หลักสูตร	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ศึกษา
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
พ.ศ.	2554

247014

บทคัดย่อ

วาริสเตอร์ตัวอย่างถูกเตรียมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเซรามิกแบบดั้งเดิม ผงสังกะสีออกไซด์ (ZnO, บริสุทธิ์ 99.9%), ผงบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3, บริสุทธิ์ 99.9%) และผงโคบอลท์ออกไซด์ (CoO, บริสุทธิ์ 99.5%) เป็นวัสดุตั้งต้น ผงของ ZnO ถูกเติมด้วย Bi_2O_3 และ CoO ด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกันจาก 0.5-2.0 โมลเปอร์เซ็นต์ และ 0.75-10.0 โมลเปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผงผสมถูกนำมาบดด้วยเม็ดบดเซอร์โคเนียร่วมกับแอลกอฮอล์ในกระบอกโพลีเอททิลลีนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากทำให้แห้งและร่อน ผงผสมที่ได้ถูกนำมาอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นจานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตรความหนา 2 มิลลิเมตร ตัวอย่างหลังอัดขึ้นรูปถูกนำมาเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิช่วงตั้งแต่ 1050 ถึง 1150 ^{o}C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โครงสร้างผลึกในตัวอย่างเซรามิกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง (OM) สำหรับการวัดทางไฟฟ้าตัวอย่างถูกนำมาเคลือบด้วยกาวเงิน และวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดกระแส-ศักย์ไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่า ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ที่มีความหนาแน่นที่สูงมีค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) ที่สูง สามารถทำได้โดยการเผาผนึกในสภาวะแวดล้อมของผง ZnO-Bi_2O_3-CoO จากลักษณะเฉพาะ J-E ของตัวอย่างที่เติมด้วย Bi_2O_3 1.0 โมลเปอร์เซ็นต์ และเปลี่ยนปริมาณ CoO จาก 0.75 ถึง 10.0 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุดประมาณ 17.6 และความต่างศักย์เบรกดาวน์สูงสุดที่ 980 V/cm กับ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ที่เติมด้วย Bi_2O_3 1.0 โมลเปอร์เซ็นต์ และ CoO 10.0 โมลเปอร์เซ็นต์ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1100 ^{o}C จากงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เตรียมฟิล์มบาง ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น และความต่างศักย์เบรกดาวน์สูงได้

247014

คำสำคัญ : เซรามิกส์สังกะสีออกไซด์/ สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น/ การเผาซินเตอร์/
โครงสร้างทางจุลภาค

Thesis Title	The Effect of Sintering Temperature, and Additives on the Microstructure and Electrical Properties of ZnO-Bi_2O_3-CoO Varistor
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Tanakrit Nuamjad
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Wandee Onreabroy
Program	Master of Science
Field of Study	Physics Education
Department	Physics
Faculty	Science
B.E.	2554

247014

Abstract

The varistor samples were fabricated using the conventional electroceramic process. Zinc oxide powder (99.9% purity), bismuth oxide powder (99.9% purity) and cobalt oxide powder (99.5% purity) were used as starting materials. ZnO powder was added with Bi_2O_3 and CoO for various concentrations from 0.5-2.0 mol% and 0.75-10 mol% respectively. The powder mixture was milled in a polyethylene bottle with zirconia grinding media and ethanol for 24 hours. After drying and sieving, the mixture was pressed into a disk-shape mold with a diameter of 15 mm and a thickness of 2 mm. The green specimens were sintered at temperatures ranging from 1050 to 1150 ^{o}C for 4 hours. The crystal structures within the ceramic samples were determined by X-ray diffraction (XRD). The microstructure of the samples was investigated using the scanning electron microscope (SEM) and optical microscope (OM). For electrical measurement, specimens were coated with silver paste and then measured with I-V instrument. The result shows that high nonlinear coefficient (α) of ZnO-Bi_2O_3-CoO varistors with high density can be achieved by sintered in the ZnO-Bi_2O_3-CoO powders surrounding. From the J–E characteristics, the specimens added with 1.0 mol% Bi_2O_3 and various CoO concentrations ranging from 0.75 to 10 mol% promotes the nonlinear coefficient of ZnO-Bi_2O_3-CoO varistors. We found that the highest nonlinear coefficient of about 17.6 and highest breakdown electric field at 980 V/cm were obtained from the ZnO-Bi_2O_3-CoO varistors added with 1.0 mol% Bi_2O_3 and 10 mol% CoO sintered at 1,100 ^{o}C. From this research, it is possible to prepare the ZnO-Bi_2O_3-CoO varistors thin film of higher nonlinear coefficient and breakdown voltage.

Keywords: Zinc Oxide Ceramic/ Nonlinear Coefficient/ Sintering/ Microstructure

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันดี อ่อนเรียบร้อย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ การค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม อันเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งการแก้ไขงานให้สมบูรณ์เป็นอย่างยิ่ง และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ปณิตา ชินเวชกิจวานิชย์, ดร.เนติมา สว่างวรรณ ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้อุดหนุนทุนการศึกษา “ทุนส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษด้านวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเทคโนโลยี (สควค.)” จากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเทคโนโลยี (สสวท.)

ขอขอบคุณแรงสนับสนุนและกำลังใจที่ได้รับจากครอบครัวตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องภาควิชาฟิสิกส์ทุกคน ที่คอยถามไถ่ด้วยความห่วงใยว่าเมื่อไหร่จะสำเร็จการศึกษา และรวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มิได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ คุณความดีหรือประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บุพการี ผู้มีพระคุณทุกท่านและครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค

กิตติกรรมประกาศ ง

สารบัญ จ

รายการตาราง ซ

รายการรูปประกอบ ฌ

รายการสัญลักษณ์ ฐ

ประมวลศัพท์และคำย่อ ฒ

บทที่

1. บทนำ **1**

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 2

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 3

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **4**

2.1 วาริสเตอร์ (Varistor) 4

2.2 โครงสร้างของเกรน (Grains Microstructure) 5

2.3 โครงสร้างของสังกะสีออกไซด์วาริสเตอร์ 8

2.4 โครงสร้างของ ZnO - Bi_2O_3 -CoO วาริสเตอร์ 9

2.5 ขบวนการเผาซินเตอร์ (Sintering Process) 13

2.6 ลักษณะของบ่อศักย์ไฟฟ้า (Potential) ที่รอยต่อระหว่าง Bi_2O_3 และ ZnO 14

2.7 การนำไฟฟ้าแบบเทอร์มิออนิค อิมิชชั่น 17

2.8 สนามไฟฟ้าทะลุผ่าน 18

2.9 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractrometer) 20

2.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน 26

2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

3. วิธีการทดลอง **31**

3.1 สารเคมี และสารละลาย 31

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 31

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการ 39

3.4 การเตรียมสารตัวอย่าง 40

3.5 การวัดความหนาแน่น 43

3.6 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์ 45

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล **47**

4.1 ศึกษาอิทธิพลของการกลบตัวอย่างด้วยผง ZnO-Bi_2O_3-CoO ระหว่างการเผาที่มีต่อความหนาแน่น 47

4.2 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อความหนาแน่น 50

4.3 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า 53

4.4 ศึกษาผลของความหนาของเม็ดสารตัวอย่างที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์ 56

4.5 ศึกษาอิทธิพลปริมาณการเติม CoO และ Bi_2O_3 ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์ 57

4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคจากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 65

4.7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมโคบอลต์ออกไซด์ 69

5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง **76**

5.1 สรุปผลการทดลอง 76

5.2 ข้อเสนอแนะ 77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง 79

ภาคผนวก JCPDS (Joint Committee on Power Diffraction Standard) 83

ประวัติผู้วิจัย 87

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	แสดงส่วนผสมของ ZnO Bi_2O_3 และ CoO จากการทดลอง	41
4.1	ค่าความหนาแน่นของวาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์ที่มีส่วนผสม Bi_2O_3 และ CoO เป็น 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมลตามลำดับ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1100 °C ที่บรรยากาศการเผาต่างกัน	47
4.2	สมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ ที่สัดส่วนของ Bi_2O_3 : CoO เป็น 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เมื่ออุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C และมีบรรยากาศการเผาสารตัวอย่างโดยวางบนผง ZnO-Bi_2O_3-CoO และกลบด้วยผง ZnO-Bi_2O_3-CoO	49
4.3	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์กับความหนาแน่นของสารตัวอย่างและสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นที่สัดส่วน Bi_2O_3 : CoO เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล)	50
4.4	ขนาดเกรนเฉลี่ย จำนวนเกรน และความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนของ ZnO- Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ที่สัดส่วนผสม Bi_2O_3 : CoO เท่ากับ 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C ตามลำดับ	55
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นจากกราฟลักษณะเฉพาะ J–E ของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ ที่ปริมาณการเติม CoO และ Bi_2O_3 ต่างกัน เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C	59
4.6	ขนาดเกรนเฉลี่ย จำนวนเกรน และความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C ที่สัดส่วนของบิสมัทออกไซด์ต่างกัน	60
4.7	ขนาดเกรนเฉลี่ย จำนวนเกรน และความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรนของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C ที่สัดส่วนของโคบอลต์ออกไซด์ต่างกัน 1 – 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล	62

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	การใช้วาริสเตอร์ (VDR) ในการปกป้องวงจรจากภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงชั่วขณะ	4
2.2	โครงสร้างทางจุลภาคของวาริสเตอร์ (ก) โครงสร้างจริง และ (ข) โครงสร้างอุดมคติ	5
2.3	ภาพแสดงลักษณะเกรนของสารตัวอย่างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า	6
2.4	(ก) แบบจำลองแสดงลักษณะเกรนและค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรน และ (ข) โครงสร้างทางจุลภาคของสังกะสีออกไซด์วาริสเตอร์	6
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าของสังกะสีออกไซด์วาริสเตอร์	9
2.6	โครงสร้างของ ZnO - Bi_2O_3 วาริสเตอร์	9
2.7	แสดงโครงสร้างผลึกของสังกะสีออกไซด์	10
2.8	แสดงโครงสร้างผลึกของบิสมัทออกไซด์	12
2.9	แสดงโครงสร้างผลึกของโคบอลต์ออกไซด์	12
2.10	การหลอมตัวรวมกันของผลึกคู่หนึ่ง	13
2.11	ลักษณะของบ่อศักย์ไฟฟ้า (Potential) ที่รอยต่อระหว่าง Bi_2O_3 และZnO กรณีที่ยังไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำ (ก) ก่อนการเผาซินเตอร์ และ (ข) หลังการเผาซินเตอร์	14
2.12	ลักษณะของบ่อศักย์ไฟฟ้า (Potential) ที่รอยต่อระหว่าง Bi_2O_3 และZnO กรณีมีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำ	15
2.13	ลักษณะของบ่อศักย์ไฟฟ้า (Potential) ที่รอยต่อระหว่าง Bi_2O_3 และ ZnO (ก) ก่อนจ่ายสนามไฟฟ้า (ข) ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อจ่ายสนามไฟฟ้า และ (ค) แสดงช่อง depletion layer เกิดการแคบลง	16
2.14	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายของอิเล็กตรอน (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับจำนวนอิเล็กตรอน และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้	17
2.15	เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	20
2.16	หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกจากกฎของแบรกก์ (Bragg 's Law)	21
2.17	หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์	23
2.18	การเกิดรังสีเอกซ์	24

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
2.19	กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ (ก) การเกิดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (ข) อนุกรมของรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะที่เป็นผลจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน และ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง	25
2.20	กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Model : MX4300L, Japan)	27
2.21	แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM	28
2.22	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
2.23	(ก) ตัวอย่างภาพที่ได้จาก SE เรียกว่า Secondary Electron Image (SEI) และ (ข) ตัวอย่างภาพที่ได้จาก BSE เรียกว่า Back Scattered Electron Image (BEI) หรือ Primary Electron Image	30
3.1	วัสดุอุปกรณ์พื้นฐานทั่วไปที่ใช้ในการทดลอง	32
3.2	เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง Sartorius รุ่น ED224S และชุดอุปกรณ์สำหรับชั่งวัตถุในของเหลว ของ Scientific Promotion Co., LTD ประเทศเยอรมันนี	32
3.3	กระบอกพลาสติก และเม็ดบดเซอร์โคเนีย สำหรับ Ball Mill	33
3.4	เครื่องผสมสารตัวอย่าง Ball Milling	33
3.5	แม่พิมพ์สำหรับอัดสารตัวอย่าง [โกเมน ปาปะโถ]	34
3.6	เครื่องอัดสารตัวอย่าง	34
3.7	ถ้วยเผาอลูมินา	35
3.8	เตาแผ่นความร้อน (Hot Plate) บริษัท IKA C-MAG รุ่น HS7	35
3.9	เตาอบสารตัวอย่าง BINDER ของบริษัท Scientific Promotion Co., LTD รุ่น ED115	36
3.10	เตาเผาสาร CARBOLITE บริษัท Thermal Engineering, English รุ่น 3508	36
3.11	เครื่องขัดชิ้นงาน MECAPOL บริษัทเอ็กเทรด อินสทรูเม้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น P262	37
3.12	กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน บริษัท Meiji Techno Co., LTD. รุ่น MX4300L	37
3.13	ไดอะแกรม พร้อมเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า (KEITHLEY รุ่น 2410 1100V Source Meter)	38
3.14	ขั้นตอนการเตรียม ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์	39
3.15	การผสมสาร (Ball milling) โดยวิธี Rolling	41
3.16	ไดอะแกรมแสดงการอัดขึ้นรูปของเม็ดสารตัวอย่าง	42
3.17	การเผาซินเตอร์โดยการกลบผง ZnO-Bi_2O_3-CoO รอบๆ ชิ้นงาน	42

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.18	แสดงอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิระหว่างการเผาซินเตอร์	43
3.19	สารตัวอย่าง (Sample) หลังการขัดผิวให้เรียบ	43
4.1	ลักษณะเฉพาะ J-E ของวาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์ที่มีส่วนผสม Bi_2O_3 และ CoO เป็น 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมลตามลำดับ เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1100 °C ที่บรรยากาศการเผาต่างกัน	48
4.2	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์กับความหนาแน่นของสาร ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 : CoO เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล)	51
4.3	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์กับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 : CoO เท่ากับ 1 : 3 และ 2 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล)	51
4.4	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ของวาริสเตอร์ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 : CoO เป็น 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เผาซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C	52
4.5	ลักษณะเกรนที่กำลังขยาย 20 เท่า ส่วนผสม Bi_2O_3 : CoO เท่ากับ 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1,050 °C, 1,100 °C และ 1,150 °C ตามลำดับ	54
4.6	เปรียบเทียบปริมาณทางไฟฟ้าของวาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 และ CoO เป็น 1 และ 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C ที่ความหนาเม็ดสารต่างกัน	56
4.7	ลักษณะเฉพาะกราฟ J–E ของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ ที่ปริมาณการเติม CoO และ Bi_2O_3 ต่างกัน เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C	58
4.8	วาริสเตอร์ตัวอย่างที่การเติม CoO 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และเพิ่มปริมาณ Bi_2O_3 เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C	60
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เบรกดาวน์กับสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ที่ปริมาณ CoO คงที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และมีปริมาณบิสมัทออกไซด์ 0.5, 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยโมลตามลำดับ เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 °C	61
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของวาริสเตอร์ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่การเติม CoO ต่างกัน เมื่อเผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C	63
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์กับค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของวาริสเตอร์ที่ปริมาณ Bi_2O_3 คงที่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยโมลและเพิ่มปริมาณสารเติมโคบอลต์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C	63

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.12	กราฟขยายสเกลความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของวาริสเตอร์ที่ส่วนผสม Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ที่การเติม CoO ต่างกัน	64
4.13	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ที่สัดส่วน Bi_2O_3 : CoO เท่ากับ 1 : 3 (เปอร์เซ็นต์โดยโมล) เมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,050 °C , 1,100 °C และ 1,150 °C	66
4.14	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 °C ที่ปริมาณการเติม CoO 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ Bi_2O_3 ต่างกัน	67
4.15	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO-Bi_2O_3-CoO วาริสเตอร์ ที่ Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ปริมาณการเติม CoO ต่างกัน เผาซินเตอร์ที่ 1,100 °C	68
4.16	ภาพบริเวณพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C สัดส่วน Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมลกับ (ก) สัดส่วน CoO 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ข) สัดส่วน CoO 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ค) สัดส่วน CoO 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ง) สัดส่วน CoO 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล	70
4.17	ภาพแสดงรูพรุนภายในเม็ดสารจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1,100 °C สัดส่วน Bi_2O_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมลกับ (ก) สัดส่วน CoO 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ข) สัดส่วน CoO 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (ค) สัดส่วน CoO 5 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และ (ง) สัดส่วน CoO 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล	73

รายการสัญลักษณ์

A_0	=	ค่าคงที่ (A/m^2K^2)
$^\circ C$	=	องศาเซลเซียส
D	=	ความหนาของวาริสเตอร์ (cm)
d	=	ระยะห่างระหว่างระนาบภายในอะตอม (μm)
d_g	=	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
e	=	อิเล็กตรอน
E_b	=	สนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ (V/cm)
E_F	=	พลังงานเฟอร์มี
E_0	=	พลังงานเริ่มต้น
E_S	=	Switching Electric
E_W	=	ฟังก์ชันงาน (eV)
E_{Weff}	=	สนามไฟฟ้าภายนอก (V/cm)
G	=	แรงลอยตัว (N)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ($9.8\ m/s^2$)
I	=	กระแสไฟฟ้า (A)
I_{th}	=	กระแสเทอร์มิออนิค (A)
J	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm^2)
k	=	ค่าคงที่การแปรผัน
k_B	=	ค่าคงที่ของโบล์ทมาน (eV/K)
M	=	มวลของของแข็ง (kg)
M(fl)	=	มวลของของเหลว (kg)
n	=	จำนวนเกรนต่อความหนาของวาริสเตอร์
S	=	พื้นที่ของใส้หลอดที่ให้ความร้อน (m^2)
T	=	อุณหภูมิ (K)
V_b	=	ความต่างศักย์เบรกดาวน์ (V)
V(fl)	=	ปริมาตรของของเหลว (cm^3)
V_g	=	ความต่างศักย์เบรกดาวน์ต่อเกรน (V)

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$V(s)$	=	ปริมาตรของของแข็ง (m^3)
$W(a)$	=	น้ำหนักสารที่ชั่งในอากาศ (kg)
$W(fl)$	=	น้ำหนักสารที่ชั่งในของเหลว (kg)
α	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น
θ	=	มุมที่รังสีเอกซ์กวาดตามแนวระนาบ
λ	=	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (m)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg/m^3)
$\rho(fl)$	=	ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

ประมวลศัพท์และคำย่อ

$\mathring{A}$	=	Angstrom ($=10^{-10}$ m)
AlAs	=	Aluminum Arsenide
A/m^2K^2	=	Ampere per square metre and square kelvin
a.u.	=	Arbitrary unit
BEI	=	Back Scattered Electrons Image
Bi_2O_3	=	Bismuth Oxide
BM	=	Biological Microscope
BSE	=	Back Scattered Electrons
CdS	=	Cadmium Sulfide
C_2H_5OH	=	Ethanol
CoO	=	Cobalt Oxide
eV	=	Electron Volt
eV/K	=	Electron Volt per kelvin
exp	=	Exponential
g	=	Gram
GaAs	=	Gallium Arsenide
g/cm^3	=	Gram per cubic centimetre
g/mol	=	Gram per mole
IGL	=	Inter Granular Layer
JCPDS	=	Joint Committee on Power Diffraction Standard
K	=	Kelvin
m^2	=	Square metre
mA/cm^2	=	Milliampere per square centimetre
NA	=	Numerical aperture of objective lens
O_2	=	Oxygen gas
PSI	=	Pond square inch
SE	=	Secondary Electrons
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SiC	=	Silicon Carbide

ประมวลศัพท์และคำย่อ (ต่อ)

$SrTiO_3$	=	Strontium Titanium (III) Oxide
TEM	=	Transmission Electron Microscope
TiO_2	=	Titanium (II) Oxide
UV	=	Ultra Violet
V/cm	=	Volt per centimetre
VDR	=	Voltage Dependent Resistor
XRD	=	X-Ray Diffractometor
ZnO	=	Zinc Oxide
ZnS	=	Zinc Sulfide