



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)
และการประยุกต์

Non-Linear Electrical Properties of In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) Semiconducting
Ceramic and Application

นางงานฉัตร วงษ์เจริญ

นายสุทินัย แก้วแดง

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

งานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)
และการประยุกต์

Non-Linear Electrical Properties of In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) Semiconducting
Ceramic and Application

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1269762X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3
($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557
หัวหน้าโครงการวิจัย

นางงามนิษฐ์ วงษ์เจริญ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: kwngamni@kmitl.ac.th

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นายฐิตินัย แก้วแดง สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: kgthitin@kmitl.ac.th
นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ อ.
คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, E-mail: tiparatana.w@bu.ac.th

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารประกอบ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธี
ปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โครงสร้าง
ผลึกของเซรามิก In_xWO_3 เป็นแบบโมโนคลินิกแต่เมื่อ x มีค่าสูงกว่า 0.02 จะมีเฟสของสารประกอบ
 $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ ผงอยู่ด้วย เมื่อปริมาณสารเจือ In เพิ่มขึ้นความเข้มฟลักของเฟส WO_3 จะลดลงส่วนความเข้ม
ฟลักของเฟส $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ จะเพิ่มขึ้น จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเกรน
มีขนาดโตขึ้นจาก 5 ไมโครเมตรเป็น 20 ไมโครเมตรเมื่อ x เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 0.02 อย่างไรก็ตาม เมื่อ x มี
ค่ามากกว่า 0.02 ขนาดของเกรนกลับมีค่าลดลงเป็น 15 ไมโครเมตร สัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของ
วาริสเตอร์ In_xWO_3 มีค่าลดลงจาก 4.76 สู่อันดับที่ต่ำสุดคือ 1.43 และกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.28 เมื่อ x เท่ากับ
0.05 เซรามิกของ WO_3 ที่เจือด้วย In จึงเป็นวัสดุชนิดวาริสเตอร์-คาปาซิเตอร์ชนิดใหม่ ได้ทำการศึกษา
สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีซิสของเซรามิก In_xWO_3 พบว่าสภาพนำไฟฟ้าทั้งขาขึ้นที่เกิดขึ้นเมื่อทำการการ
เปิดแสงและสภาพนำไฟฟ้าขาลงหลังจากการปิดแสงจะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้า การสลายตัวของสภาพ
นำไฟฟ้าเชิงแสงขาลงสามารถอธิบายได้ด้วยมัลติเพล็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชันที่มีหนึ่งพจน์เป็นสเตท
เอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชันเสมอที่ทุกค่าของ x

คำสำคัญ: เซรามิก In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$), XRD, SEM, สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Non-Linear Electrical Properties of In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) Semiconducting

Ceramic and Application

Researcher: Mrs. Ngamnit Wongcharoen, Mr. Thitinai Gaewdang, Mrs. Tiparatana

..... Wongcharoen

Faculty: Science **Department:** Physics

ABSTRACT

In this research, In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ceramics were fabricated by solid state reaction at $1,000^\circ\text{C}$ for 48 h. The crystal structure of In_xWO_3 samples is monoclinic along with a small amount of $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ when stoichiometry x higher than 0.02. As the amount of In in In_xWO_3 samples increases, the intensity of the WO_3 peaks decreases whereas that of the $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ increases. From SEM micrographs, the grain size slightly increases from 5 to $20 \mu\text{m}$ when the stoichiometry x increases from 0 to 0.02. However, when $x > 0.2$ smaller grain size, around $15 \mu\text{m}$, was observed. The non-linear coefficient of In_xWO_3 varistor decreases from 4.76 to minimum value about 1.43 and then increases upto 2.28 at $x=0.05$. In doped- WO_3 ceramic is a new kind of low voltage varistor – capacitor materials. Persistent photoconductivity of In_xWO_3 ceramics was also investigated. Both the conductivity build-up after turning on the light and its decay after turning off the light exhibit slow kinetics. The decay in photoconductivity after turning off the illumination is well described by multiple exponential function along with a stretched exponential function at all of stoichiometry x .

Keywords : In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ceramics, XRD, SEM, persistent photoconductivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้นำปลอดประจวบมาใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นางสาวปทุมทิพย์ บุญเสริม นางสาวปานจรี แจงบำรุง นายทศพร ชันตยาภรณ์ นาย นพณัฐ เดชะคำภู และนายจักรพงษ์ สวัสดิวงศ์ นักศึกษาของห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสทิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He λ ios α ที่ใช้ในการศึกษาคูสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นางงามนิศย์ วงษ์เจริญ

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทั้งสเดนออกไซด์	5
2.2 โครงสร้างผลึกของอินเดียมทั้งสเดนบรอนซ์	7
2.3 โครงสร้างผลึกของ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$	8
2.4 เฟสโคอะแกรมของระบบ In_2O_3 - WO_3	9
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	10
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	12
2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	14
2.7.1 อินพีแดนซ์ของวงจรร C ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	14
2.7.1.1 วงจรร C ต่อแบบอนุกรม	14
2.7.1.2 วงจรร C ต่อแบบขนาน	15
2.7.1.3 กราฟของ โบด	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.2 การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ เพื่อประยุกต์เป็นวาริสเตอร์	21
2.7.2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม	21
2.7.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบชอตต์กี	27
2.7.2.3 กลไกการนำไฟฟ้าแบบ พูล – เฟรนเคิล	29
2.8 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	40
3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	40
3.2 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสาร ตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	42
3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	43
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	43
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	43
3.3.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิห้อง	44
3.3.4 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	44
3.3.5 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	45
4.1 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการ การเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	45
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยว เบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3:(0.01)\text{WO}_3$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	48
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	49
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	52
4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	52
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54
4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	63
4.3.4 ผลการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	70
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการวิจัย	72
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	77
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	78
6.1 ชื่อบทความวิจัย “Fabrication and Electrical Characterization of ZnTe/ WO_3 :In Heterojunction”	78
6.2 ชื่อบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ “Influence of In_2O_3 on the Microstructure and Electrical Properties of WO_3 -Based Varistor”	85
เอกสารอ้างอิง	97
ภาคผนวก	101
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	109
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	13
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	42
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างและขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	47
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	53
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
ตารางที่ 6.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{b0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- WO_3 :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	81

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของ WO_3 ในกรณีอุณหภูมิต่ำ	5
ภาพที่ 2.2 แสดงการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยม และอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน	5
ภาพที่ 2.3 แสดงเฟสของ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำในระดับ 5 องศาเคลวิน	6
ภาพที่ 2.4 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ในอาณาบริเวณที่เกิดเป็นสารประกอบ WO_3	7
ภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลอินเดียมทั้งสเดนบรอนซ์	8
ภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลอินเดียมทั้งสเดนบรอนซ์	8
ภาพที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกของ In_6WO_{12} ในระบบรอมโบฮีดรัล	9
ภาพที่ 2.8 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ In_2O_3 - WO_3 ในช่วงอุณหภูมิ 700-1400 องศาเซลเซียส จุดวงกลมที่บ่งชี้แสดงเฟสเดี่ยว ส่วนจุดวงกลมโปร่งแสดงเฟสผสม	10
ภาพที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	11
ภาพที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบในระบบ In_2O_3 - WO_3	12
ภาพที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
ภาพที่ 2.12 แสดงกราฟของ โนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	15
ภาพที่ 2.13 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	15
ภาพที่ 2.14 แสดงกราฟของ โนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	16
ภาพที่ 2.15 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรโคปี (ข,จ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรโคปี (ค,ฉ)	17
ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว	19
ภาพที่ 2.17 ก. แสดงกราฟโนควิสต์และกราฟของโบด ข. แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มี ตัวเก็บประจุของบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	20
ภาพที่ 2.18 แสดงพื้นที่และความหนาของเม็ดเซรามิกส์	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.19 กราฟแสดงคุณสมบัติของวาริสเตอร์	23
ภาพที่ 2.20 แสดงขนาดของเกรน	23
ภาพที่ 2.21 แสดงรอยต่อแบบขอตัก 2 อันหันหน้าชนกัน	24
ภาพที่ 2.22 แสดงกราฟความจุไฟฟ้าที่ตกคร่อมขอบเกรนและแรงดันไบแอส ที่แต่ละขอบเกรน	25
ภาพที่ 2.23 แสดงการหาจำนวนของเกรนของเม็ดเซรามิกส์	26
ภาพที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบขอตัก	26
ภาพที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J_0$ กับอุณหภูมิ	28
ภาพที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่	28
ภาพที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับ $E^{1/2}$	29
ภาพที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{WO}_{12}$ ที่เจือด้วยอะตอม ของธาตุ Tb ในปริมาณต่างๆ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธี ปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง	37
ภาพที่ 3.2 รูปแสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ด เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_{(1-x)}\text{Tb}_x\text{WO}_{12}$ ($0 \leq x \leq 0.10$) จากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึกที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	37
ภาพที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3 : (0.01)\text{WO}_3$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสาร ละลายของแข็งเมื่อผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง	39
ภาพที่ 3.4 รูปแสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผา เม็ดเซรามิกส์ $\text{In}_2\text{O}_3 : (0.01)\text{WO}_3$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	40
ภาพที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 จากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึกที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 3.6	44
แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผา เม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่ เป็นผงผลึกที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	
ภาพที่ 4.1	46
แสดงพืดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของเม็ดเซรามิกส์ของ สารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	
ภาพที่ 4.2	48
แสดงพืดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกส์ของ สารกึ่งตัวนำ $\text{In}_{(1-x)}\text{Tb}_{6x}\text{WO}_{12}$ ($0 \leq x \leq 0.10$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	
ภาพที่ 4.3	49
แสดงพืดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกส์ของ สารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3:(0.01)\text{WO}_3$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	
ภาพที่ 4.4	51
แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณผิว หน้าของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียม จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	
ภาพที่ 4.5	52
แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ด เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็น ผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	
ภาพที่ 4.6	52
แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัด ที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ด เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	
ภาพที่ 4.7	53
แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ด เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	53
ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54
ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	54
ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าที่สัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	55
ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ไฟฟ้า-แรงดัน ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส ไฟฟ้า กับสนามไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	56
ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอคาลิทีมของความหนาแน่นกระแส ไฟฟ้ากับค่าลอคาลิทีมของสนาม ไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอคาลิตีทิมธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	57
ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	59
ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	59
ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	60
ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	60
ภาพที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	61
ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	62
ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	62
ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	63
ภาพที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	63
ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	64
ภาพที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	65
ภาพที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	65
ภาพที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียความเป็นไดอิเล็กตริกกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	66
ภาพที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	66
ภาพที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	67
ภาพที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกส์ที่ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	67
ภาพที่ 4.34 แสดงวงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.35 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	68
ภาพที่ 4.36 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	69
ภาพที่ 4.37 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	69
ภาพที่ 4.38 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	70
ภาพที่ 4.39 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	70
ภาพที่ 4.40 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	71
ภาพที่ 6.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-ZnTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 6.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\{I/(1-\exp(-qV/(kT)))\}$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	79
ภาพที่ 6.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	79
ภาพที่ 6.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับกระแสไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
ภาพที่ 6.5 แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
ภาพที่ 6.6 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	82
ภาพที่ 6.7 แสดงแผนภาพการขูดดู โมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลแล้วเกิดการรวมตัวของโฮล กับอิเล็กตรอนที่บริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	83
ภาพที่ 6.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I/C^2 กับ V ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารประกอบในระบบ $\text{In}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ ได้รับความสนใจกันอย่างมาก เนื่องจากมีศักยภาพสูงในการประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้าและทางแสง ตัวอย่างเช่น WO_3 เป็นวัสดุอิเล็กโตรโครมิก (electro chromic) ที่โดดเด่น สามารถประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะ (smart windows) สำหรับบ้านและรถยนต์เพื่อการประหยัดพลังงาน (Richard and Edwards, 2003; Ramana et.al., 2006) นอกจากนี้ฟิล์มบางของ WO_3 ยังมีสมบัติตรวจวัดไอสารเคมี เช่น NO_x , NH_3 , CH_4 และ CO เป็นต้น (Khatko, 2005) ซึ่งสามารถประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี ส่วน In_2O_3 เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับประดิษฐ์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ในจอแสดงผลชนิดแบน สารประกอบ $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าชนิดแคตไอออนประจุ +3 (trivalent cation conductor) ส่วน $\text{In}_8\text{WO}_{12}$ มีศักยภาพที่จะประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตัวตรวจวัดอนุภาคนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ได้ (Gaewdang et.al., 1993)

ทั้งสแตนบรอนซ์ (tungsten bronzes) มีสูตรเคมีคือ M_xWO_3 เมื่อ M คือ อะตอมของโลหะ สารประกอบนี้เกิดจากแต่ละออกตะฮีดรอลของ WO_3 จับกันในแบบใช้มุมติดกัน (corner sharing) เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายอุโมงค์ (tunnel network) ในสามมิติ เนื่องจากในอุโมงค์เป็นที่ว่าง ดังนั้นจึงสามารถเติมอะตอมโลหะ M เข้าไปได้ รู้อุโมงค์อาจจะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือเป็นหกเหลี่ยมก็ได้ สำหรับ $\text{In}_{0.02}\text{WO}_3$ และ $\text{In}_{0.03}\text{WO}_3$ จะมีรู้อุโมงค์แบบรูปสามเหลี่ยม แต่ถ้าปริมาณของไอออน In^{3+} เพิ่มขึ้น รู้อุโมงค์จะกลายเป็นรูปหกเหลี่ยมซึ่งจะมีชื่อเรียกว่า HTB (hexagonal tungsten bronzes) เอกลักษณะของ HTB คือ จะมีสีน้ำเงินเข้มแต่ถ้าไอออน In^{3+} เพิ่มขึ้นอีก สารประกอบนี้จะมีสะท้อนแสงแวววาวคล้ายโลหะ ในแง่ของโครงสร้างเรขาคณิต สัดส่วนโมล x ของไอออนโลหะจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.33 แต่อย่างไรก็ตามมีผู้รายงานว่า สัดส่วนโมล x มีค่าเท่ากับ 0.4 (Richard, A.P., 2003)

รากาแวน (Raghavan, 1976) ได้เสนอวิธีการใหม่ในการตรวจวัดนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ โดยผ่านปฏิกิริยานิวเคลียร์ $\nu (E > 128 \text{ กิโลอิเล็กตรอนโวลต์}) + {}^{115}\text{In} \rightarrow e^- + {}^{115}\text{Sn}^* + \gamma$ จากนั้นนิวเคลียสของธาตุ ${}^{115}\text{Sn}^*$ จะปล่อยรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 116 และ 496 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ ${}^{115}\text{Sn}^*$ มีช่วงชีวิต 3.2 ไมโครวินาที ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างตัวตรวจวัดนิวตริโนที่เป็นวัสดุของแข็ง InBO_3 เป็นสารประกอบที่มีเปอร์เซ็นต์ของ In^{3+} ในปริมาณที่สูงจึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดนิวตริโน (Messous et.al., 1995) โดยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของ InBO_3 เป็นแถบกว้างที่มีจุดสูงสุดที่พลังงาน 3.10 อิเล็กตรอน โวลต์ ค่าเลื่อนไปของสโตก (Stoke shift) มีค่าประมาณ 1.26 อิเล็กตรอน โวลต์ ค่าเลื่อนไปของสโตกนี้มีค่ามากกว่าค่าที่พบในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}$ ขามินาดและผู้ร่วมงาน (Chaminade, et.al.,1990) ได้ทำการศึกษาสมบัติเรืองแสงของผลึกเดี่ยว $\text{InBO}_3:\text{Tb}^{3+}$ ซึ่งการเรืองแสงจะอยู่ในย่านสีเขียวนอกจากนั้นยังมีการเจือด้วย Cr^{3+} ลงใน InBO_3 ซึ่งแถบการเรืองแสงจะเกิดจากระดับพลังงาน ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ ซึ่งสามารถนำไปทำเป็นตัวเพิ่มความเข้มแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งได้มีการศึกษาการเรืองแสงของ Ce^{3+} ในสารประกอบ $\text{In}_x\text{Sc}_{1-x}\text{BO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) การเปล่งแสงจะอยู่ในย่านสีม่วง (Gaewdang et.al.,1994) $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ สามารถเปล่งแสงได้ในย่านสีน้ำเงิน - เขียว ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 เคลวิน

เซรามิกของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็น WO_3 ได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถประยุกต์เป็นวาริสเตอร์แรงดันต่ำ (low voltage varistor) เพื่อประโยชน์ในการป้องกันแรงดันไฟเกินชั่วขณะ (transient overvoltage) ได้มีการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า (non-linear electrical properties) ของสารประกอบในระบบ $\text{WO}_3\text{-Na}_2\text{O}$, $\text{WO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{WO}_3\text{-Co}_3\text{O}_4$, $\text{WO}_3\text{-MnO}_2$ วัสดุตั้งแต่ปี ค.ศ.1996 (Makarov, and Trontelj, 1996) ส่วนเซรามิก WO_3 ที่เจือด้วย Li_2O , V_2O_5 , Co_2O_3 และ La_2O_3 ในปริมาณเล็กน้อยก็ได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1976 (Kaneki, et al.,1976) เซรามิกส์ของ WO_3 ที่เจือด้วย Gd_2O_3 (Yang, et al., 2004) และ Sb_2O_3 (Zang, et al., 2004) จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเท่ากับ 2.56 และ 4.1 ตามลำดับ

ฟิล์มบางของ WO_3 ที่เจือด้วยอะตอม In ได้มีการเตรียมและศึกษาสมบัติการตรวจวัดก๊าซ NO และ CO (Khatko, 2005) แต่เซรามิก WO_3 ที่เจือด้วย In ยังไม่ได้มีผู้ศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้จะศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 และ WO_3 เพื่อเป็นประโยชน์ในการประยุกต์เป็นวาริสเตอร์ชนิดแรงดันต่ำและสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเพื่อประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)
- 1.2.2 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)
- 1.2.3 ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อการประยุกต์เป็นตัวตรวจทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 และ WO_3 โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.3.2 ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.3 ทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำและศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิห้องของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)
- 1.3.4 ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิห้อง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลผลการวิจัยผ่านฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์
- 1.4.2 ทำการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 , WO_3 โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.4.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์คิฟแฟรกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV
- 1.4.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)
- 1.4.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ที่อุณหภูมิห้อง และศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.4.7 ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบเงื่อนไขการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ In_2O_3 และ WO_3 โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 5.2 ทำให้ทราบถึงผลของอะตอมสารเจือ In ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)
- 1.5.3 ทำให้ทราบถึงผลของอะตอมสารเจือ In ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ และสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$)
- 1.5.4 ได้ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่อุณหภูมิห้อง

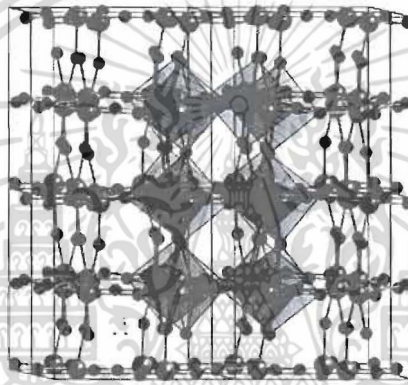


บทที่ 2

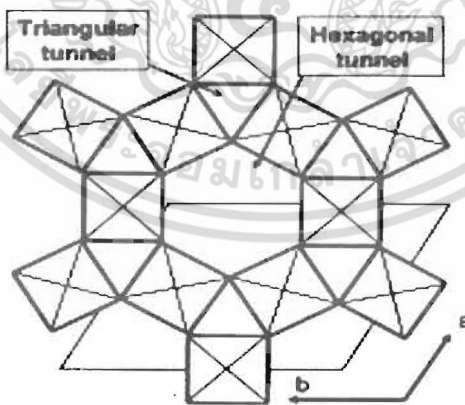
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทั้งสเดนออกไซด์ (WO_3)

โครงสร้างผลึกของทั้งสเดนออกไซด์ในอุดมคติประกอบไปด้วยออกตะฮีดรัลจำนวนมาก ซึ่งแต่ละออกตะฮีดรัลจะใช้มุมเชื่อมต่อกันกลายเป็นโครงข่ายสามมิติดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยแต่ละออกตะฮีดรัลจะมีอะตอม W เป็นศูนย์กลางและมีอะตอม O จำนวน 6 อะตอมอยู่ล้อมรอบ การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดรัลจะก่อให้เกิดเป็นอุโมงค์แนวยาวในหลายรูปแบบเช่นอุโมงค์รูปสามเหลี่ยม อุโมงค์รูปสี่เหลี่ยม ภาพที่ 2.2 แสดงให้เห็นอุโมงค์สามเหลี่ยมและอุโมงค์หกเหลี่ยมที่เกิดขึ้นร่วมกัน



ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของ WO_3 ในกรณีอุดมคติ

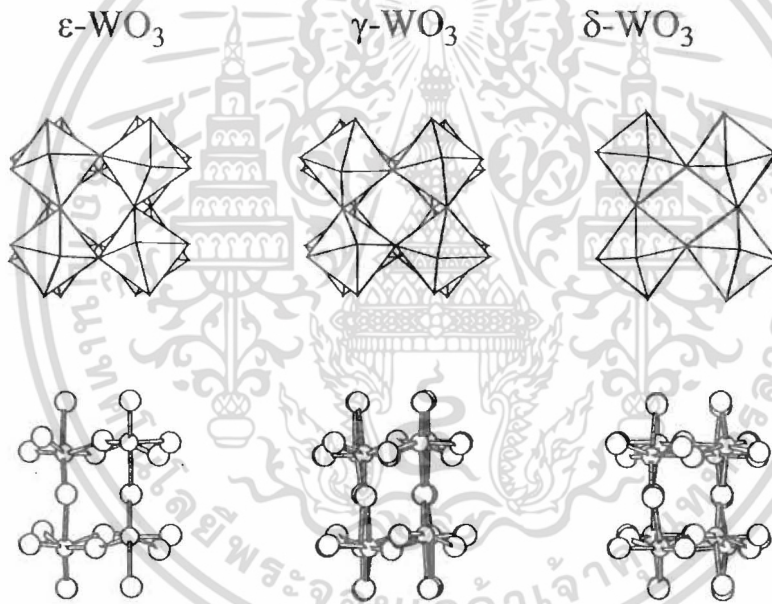


ภาพที่ 2.2 แสดงการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยม และอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน

สารประกอบ WO_3 ในอุดมคติจะมีปริมาณของอะตอม O เท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แต่การเกิดแวนแวนซีของออกซิเจน จะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดเฟสต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนมาก เช่น α - WO_x ($2.98 < x < 3.0$), β - WO_x ($2.83 < x < 2.90$), γ - WO_x ($2.66 < x < 2.72$) และ WO_2 โครงผลึกของเฟสของสารประกอบ WO_3 ในอุดมคติที่ไม่มีแวนแวนซีของอะตอมออกซิเจนจะมีโครงสร้างผลึกในระบบโมโนคลีนิก (สเปซกรุป $P2_{1/n}$) ที่อุณหภูมิห้อง $a=7.297$ อังสตรอม, $b = 7.539$ อังสตรอม, $c = 7.688$ อังสตรอม, $\beta = 90.91$ แต่มีผู้พบว่าที่อุณหภูมิห้องสารประกอบ WO_3 มักจะเกิดเป็นเฟส โมโนคลีนิกร่วมกับไตรคลีนิก (triclinic) (Yang et al., 2004)

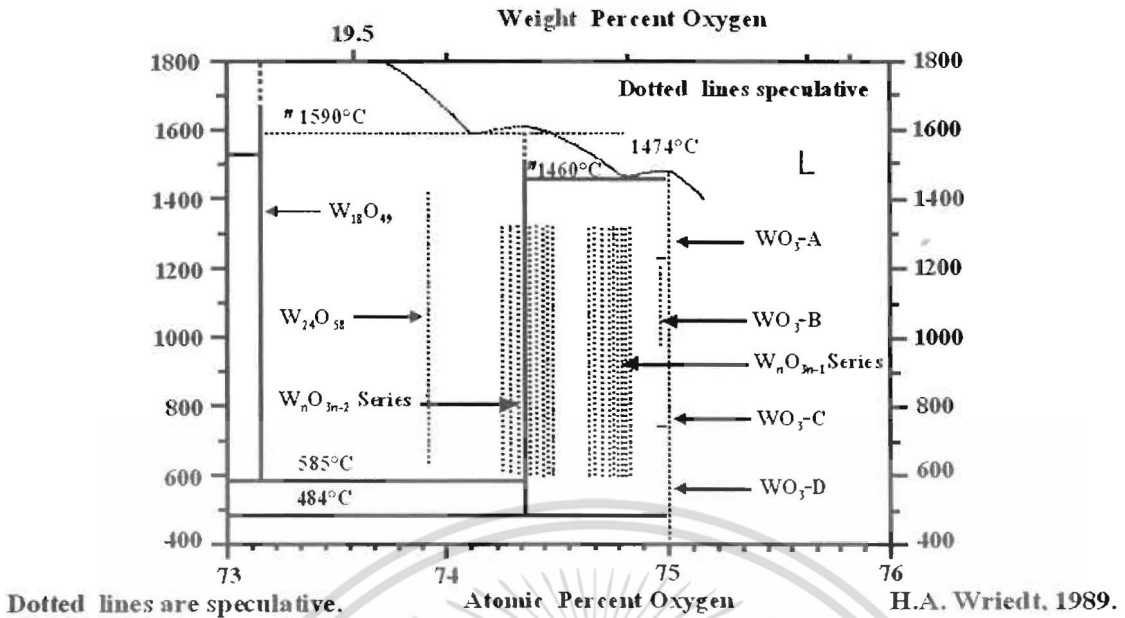
อย่างไรก็ตามโครงสร้างผลึกของ WO_3 ยังเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิอีกด้วย กล่าวคือในช่วงอุณหภูมิต่ำ 50 ถึง 17 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกในระบบไตรคลีนิก ในช่วงอุณหภูมิ 17-330 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบโมโนคลีนิก ในช่วงอุณหภูมิ 330-740 องศาเซลเซียสจะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 740 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบเตตระโกนัลจากข้อมูลล่าสุด (Salje et. al., 1997) พบว่าโครงสร้างผลึกของ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำระดับ 5 องศาเซลวิน เป็นไปได้ 3 แบบคือ ϵ - WO_3 , γ - WO_3 และ δ - WO_3 ซึ่งเกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลเอียงไปจากแนวแกนผลึก ดังแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงเฟสของ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำในระดับ 5 องศาเซลวิน

จากการที่อะตอมออกซิเจนขาดหายไปจากโครงสร้างผลึก แต่ละออกตะฮีดรัลของ WO_3 ที่เคยใช้มุมเชื่อมต่อกันจะเปลี่ยนเป็นใช้ขอบของออกตะฮีดรัลเชื่อมต่อกันจึงส่งผลให้เกิดเฟสอนสโตยคิโอมเมตริกจำนวนมากดังแสดงในภาพที่ 2.4

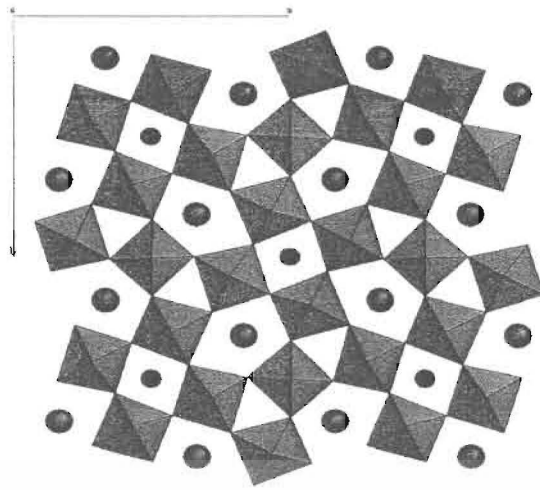
Assessed W-O Phase Diagram from 73 to 75 at.% O



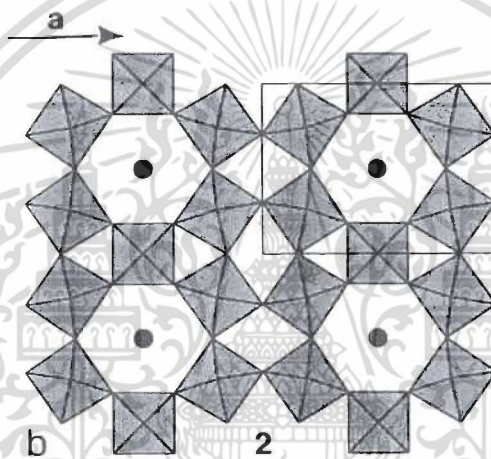
ภาพที่ 2.4 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ในอาณาบริเวณที่เกิดเป็นสารประกอบ WO_3

2.2 โครงสร้างผลึกของอินเดียมทั้งสแตนบรอนซ์

จากการที่แต่ละออกไซด์คริสตัล WO_3 ใช้มุมเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นโครงข่ายของอูโมงค์ในรูปแบบต่างๆ ที่วางภายในอูโมงค์สามารถที่จะใส่อะตอมธาตุโลหะต่างๆ เข้าไปได้ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าทั้งสแตนบรอนซ์มีสูตรเคมีคือ M_xWO_3 การแทรกอะตอมโลหะเข้าไปในอูโมงค์ทำให้อูโมงค์มีสมมาตรต่างออกไปจากเดิมกลายเป็นสมมาตรแบบเตตระโกนัลกับเฮกซะโกนัล สารประกอบ $In_{0.02}WO_3$ และ $In_{0.03}WO_3$ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนัลทั้งสแตนบรอนซ์ ลักษณะพิเศษของเตตระโกนัลทั้งสแตนบรอนซ์คือ อูโมงค์จะมี 3 แบบคือ สามเหลี่ยมสี่เหลี่ยมและห้าเหลี่ยมผสมผสานกันดังรูปที่ 2.5 แต่เมื่อปริมาณของโลหะ In เพิ่มขึ้นสารประกอบจะมีสี่แฉกวาวคล้ายโลหะและโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นเฮกซะโกนัลทั้งสแตนบรอนซ์ บูชาร์ดและกิลสัน (Bouchard and Gillson, 1968) พบว่าสัดส่วนโมล x สูงถึง 0.33 โครงสร้างยังคงเป็นเฮกซะโกนัลทั้งสแตนบรอนซ์ เอกลักษณะของเฮกซะโกนัลทั้งสแตนบรอนซ์คืออูโมงค์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยมผสมผสานกัน แต่ละอะตอมของ In จะเข้าไปอยู่ในอูโมงค์รูปหกเหลี่ยม ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลอินเดียมทังสเตนบรอนซ์



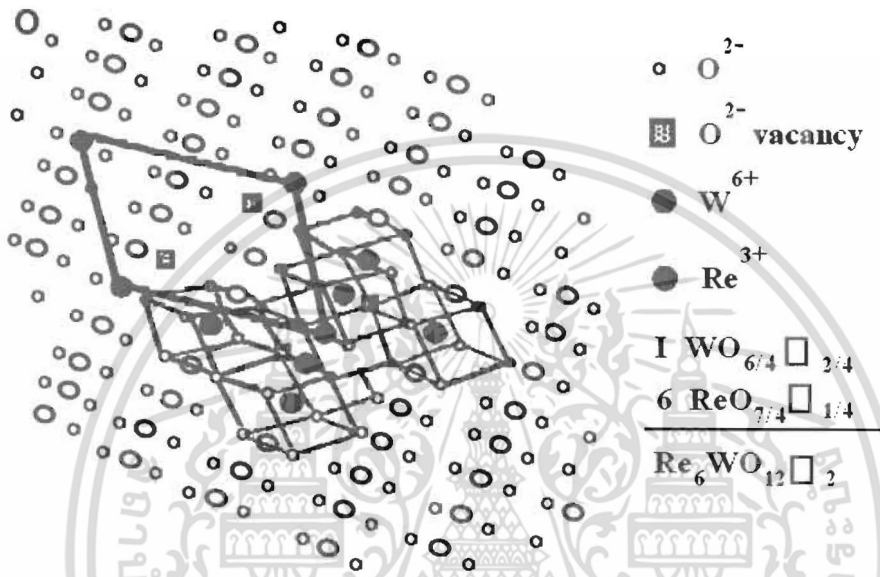
ภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลอินเดียมทังสเตนบรอนซ์

2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ (Diot et. al., 2001)

สารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ มีโครงสร้างผลึกสัมพันธ์กับสารประกอบเชิงสอง (binary compounds) ที่อะตอมโลหะมีวาเลนซ์ผสมผสานหลายค่า (mixed valency) ตัวอย่างเช่น สารประกอบที่มีสูตรเคมีว่า M_7O_{12} เมื่อ M คือ อะตอมโลหะ โครงสร้างผลึก M_7O_{12} อาจเขียนให้สัมพันธ์กับโครงสร้างแบบฟลูออไรท์ที่บกพร่อง (defect fluorite structure) ได้เป็น $\text{M}_7\text{O}_{12}\text{V}_2$ เมื่อ V คือ แวแคนซีของอะตอมออกซิเจน นั่นคือ หนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) จะมีแวแคนซี 2 แวแคนซี โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จะแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งหนึ่งหน่วยเซลล์จะประกอบไปด้วยลูกบาศก์ย่อย (cubic) จำนวน 7 ลูกบาศก์ที่มีขอบของลูกบาศก์ร่วมกัน (edge sharing) ลูกบาศก์ตรงกลางจะมีอะตอม W ปรากฏอยู่และมีแวแคนซีของอะตอมออกซิเจนจำนวน 2 แวแคนซี อยู่ที่มุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของลูกบาศก์ในแนวทะแยงมุม (ในทิศทาง $\langle 111 \rangle$) ซึ่งลูกบาศก์ศูนย์กลางนี้ สามารถเขียนเป็นสูตรเคมีว่า (WO_2V_2) ส่วนลูกบาศก์ย่อยอีก 6 อัน ที่ล้อมรอบลูกบาศก์ศูนย์กลาง (WO_2V_2) จะมีอะตอม In ปรากฏอยู่ ซึ่งแต่ละลูกบาศก์ย่อย 6 อันนี้จะมีแวนเดอวาล์วของอะตอมออกซิเจนอยู่ที่มุมอันละ 1 แวนเดอวาล์ว (Diot et. al., 2001) และหนึ่งหน่วยเซลล์จะอยู่ในระบบบรอมโบฮีดรัล (rhombohedral) ซึ่งจะแสดงด้วยเส้นที่บดงภาพที่ 2.7 โดยที่พันธะของ In จะมี 7 แขน ส่วนอะตอม W จะมี 6 แขน โครงสร้างผลึกของ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จะเหมือนกับ Y_6WO_{12} และ $\text{Ho}_6\text{WO}_{12}$



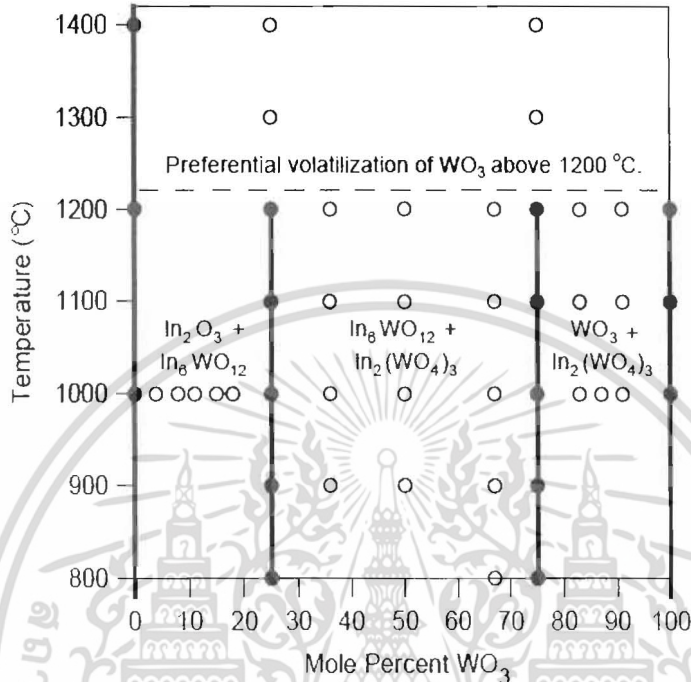
ภาพที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกของ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ ในระบบบรอมโบฮีดรัล (Diot et. al., 2001)

2.4 เฟสไดอะแกรมของระบบ In_2O_3 - WO_3

ริชาร์ดและเอ็ดเวิร์ด (Richard and Edwards, 2004) ได้ทำการศึกษาเฟสไดอะแกรมระหว่าง In_2O_3 - WO_3 ดังแสดงในภาพที่ 2.8 พบว่ามีสารประกอบที่เสถียร คือ $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ และ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ สารประกอบ $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ สามารถนำไปเป็นตัวนำไฟฟ้าชนิดแคดไอออนประจุ +3 ส่วน $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ มีศักยภาพที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นตัวตรวจวัดนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ ฟิล์มบางของ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ สามารถเตรียมไว้โดยวิธีโซล-เจล (Dabney et al., 2002) สารประกอบ In_2O_3 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) เนื่องจากแวนเดอวาล์วของอะตอมออกซิเจน แต่ถ้ามีการเจือด้วยอะตอม Sn จะทำให้นำไฟฟ้าได้ดีอย่างมาก ปัจจุบันมีการผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าโปรงแสงของสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สารประกอบอินเดียมทั้งสแตบรอนซ์ In_xWO_3 รู้จักกันมานานแล้ว (Bouchard and Gillson, 1968) ฟิล์มบางของ WO_3 ที่เจือด้วย In มีศักยภาพที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแก๊สหลายชนิด เช่น NH_3 , CH_4 และ CO เป็นต้นสารประกอบของ WO_3 ในรูปของฟิล์มบางสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะจอแบนแสดงผล ตัวตรวจจับแก๊สชนิดต่างเพื่อประโยชน์ต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งแวดล้อมและเซรามิกของ WO_3 สามารถประดิษฐ์เป็นวาริสเตอร์แรงดันไฟฟ้าต่ำ (Makarov and Trontelj, 2000) มีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าสูง ได้มีการศึกษาความเป็นวาริสเตอร์ของ WO_3 โดยการเจือด้วยอะตอมหลายชนิด เช่น Al_2O_3 , Co_3O_4 , MnO_2 , Na_2O และ Pr_6O_{12} เป็นต้น (Wang et. al., 2010; Yang et. al., 2004; Zang et. al., 2004; Makarov and Trontelj, 1996)



ภาพที่ 2.8 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ $In_2O_3 - WO_3$ ในช่วงอุณหภูมิ 700-1,400 องศาเซลเซียส จุดวงกลมที่แสดงเฟสเดี่ยว ส่วนจุดวงกลมโปร่งแสดงเฟสผสม

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; งามนิตย์, 2530, จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; งามนิตย์, 2553, จูตินัย, 2554)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่ใช้ในการจำแนกลักษณะ โครงสร้างของผลึก ซึ่งอาศัย รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวจากแหล่งกำเนิดตกกระทบกับสารตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยว หรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ซึ่งสารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสี เอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ และเมื่อรังสีเอกซ์ผ่าน โครงสร้างของผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริม โดยแบรกก์ได้เสนอว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอม ซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (path difference) เป็นจำนวนเท่าระนาบของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ซึ่งเรียกว่า กฎของแบรกก์ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.1)$$

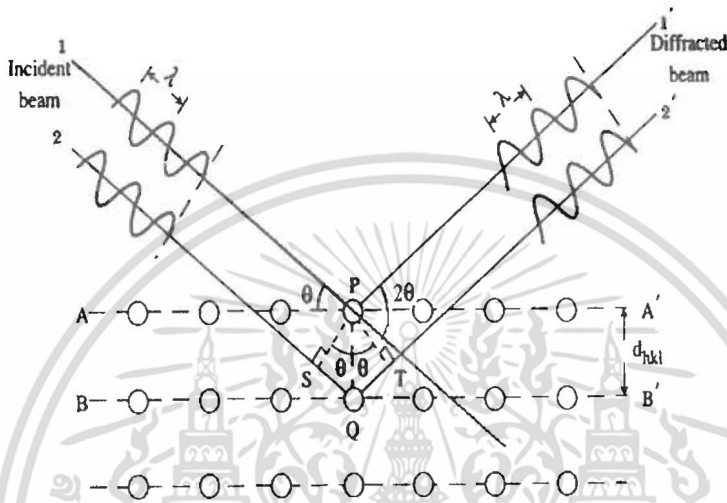
เมื่อ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์เมื่อเทียบกับระนาบของผลึก



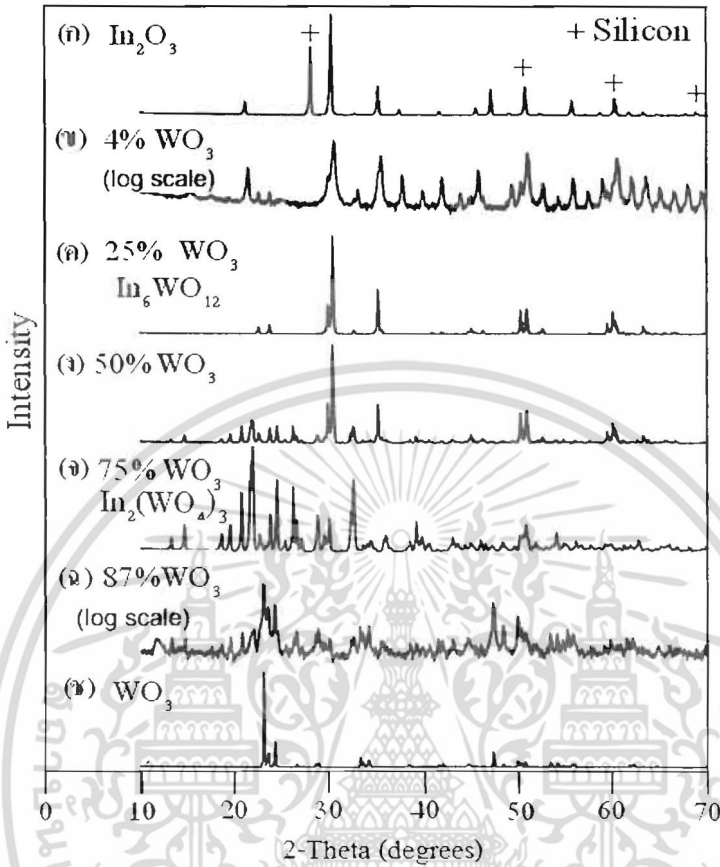
ภาพที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

โดยในระนาบที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาโดยสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ จะเรียกว่า ระนาบแบรกก์ และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบนซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุหรือสารแต่ละประเภท จากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบเสริม จะทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์มีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้จากตำแหน่งพิกัดในรูปแบบการเลี้ยวเบน และพิกัดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน และจะมีตำแหน่งของพิกัดที่มุมของการเลี้ยวเบนต่างกันสำหรับธาตุ หรือสารประกอบต่างชนิดกัน การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่างกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากไฟล์มาตรฐานนั้น ทำได้โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนออกมา โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (hkl) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า คัพซันมิลเลอร์ ซึ่งคัพซันมิลเลอร์จะเป็นส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก



ภาพที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบในระบบ In_2O_3 - WO_3

2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Kittel, 2005; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

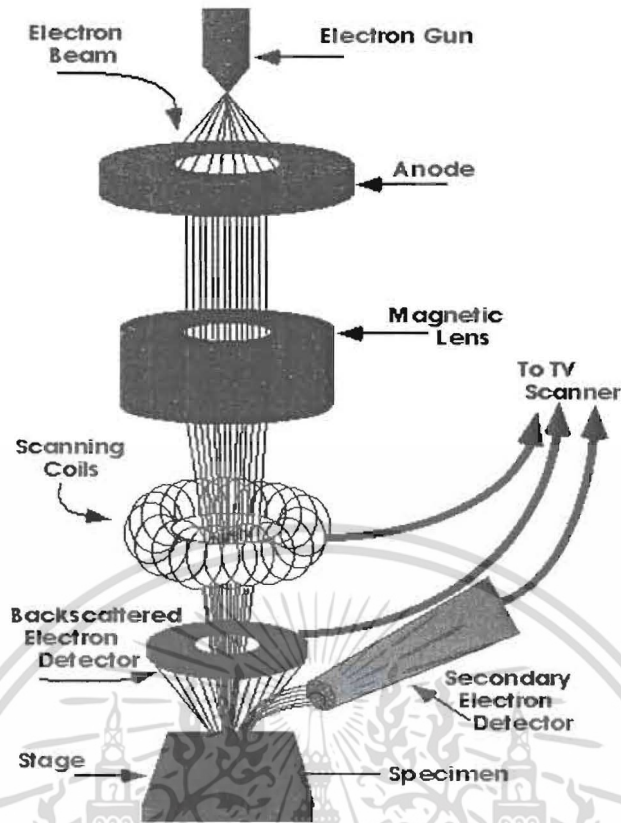
ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลด์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์วิลเลียมเอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สมบัติทางฟิสิกส์	แบบแสง	แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
Resolution		
-easy	5 μm	0-2 μm
-skilled	0-2 μm	10 nm
-special	0-1 μm	0-5 nm
Depth of focus	Poor	High
Mode		
-transmission	Yes	Yes
-refraction	Yes	Yes
-diffraction	Yes	Yes
-other	Yes	Yes
Field of view	Some	Many
Signal	Small	Large enough
Cost	Only as image Low	Available for processing High

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในภาพที่ 2.11 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวียเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับ โดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



ภาพที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551; Runyan, 1975; van der Pauw, 1958; Barsoukov and McDonald, 2005)

2.7.1 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

2.7.1.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพท์จะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

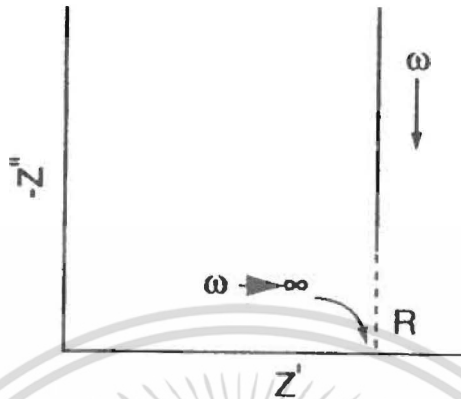
$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.2)$$

อย่างไรก็ตามค่า Z_C จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ Z_C ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่ $j = \sqrt{-1}$ ดังนั้น $Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$ และ $Z_R = R_S$ แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_S - \frac{j}{\omega C} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ R_s เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน $1/\omega C$ เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี C มีค่าใหญ่มากแล้วจะได้ว่า Z_{RC} เข้าสู่อำนาจ R_s จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน Z' จะเป็นค่าของ Z_R ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

2.7.1.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

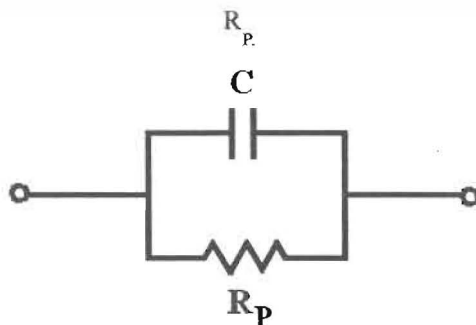
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังภาพที่ 2.13 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.4)$$

ในกรณีนี้ให้ $Z_R = R_p$ ดังภาพที่ (2.13) ดังนั้นสมการ (2.4) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.5)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.6)$$



ภาพที่ 2.13 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต $(1 - j\omega R_p C)$ คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (2.6) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{RC}} &= \frac{(j\omega R_p C + 1)(j\omega R_p C - 1)}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \\ &= - \left[\frac{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1}{R_p (j\omega R_p C - 1)} \right] \\ \text{ดังนั้น} \quad Z_{RC} &= - \left[\frac{j\omega R_p^2 C - R_p}{\omega^2 R_p^2 C + 1} \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

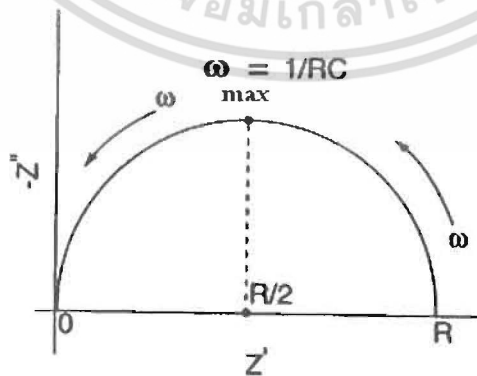
$$\begin{aligned} Z_{RC} &= \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} - j \left(\frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} \right) \\ &= Z' - jZ'' \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่ $Z' = \frac{R_p}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = \frac{R_p}{(\omega\tau)^2 + 1}$

$$\text{และ} \quad Z'' = \frac{\omega R_p^2 C}{\omega^2 R_p^2 C^2 + 1} = R_p \left[\frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ $\tau =$ ค่าคงตัวเวลา (time constant) $= R_p C$

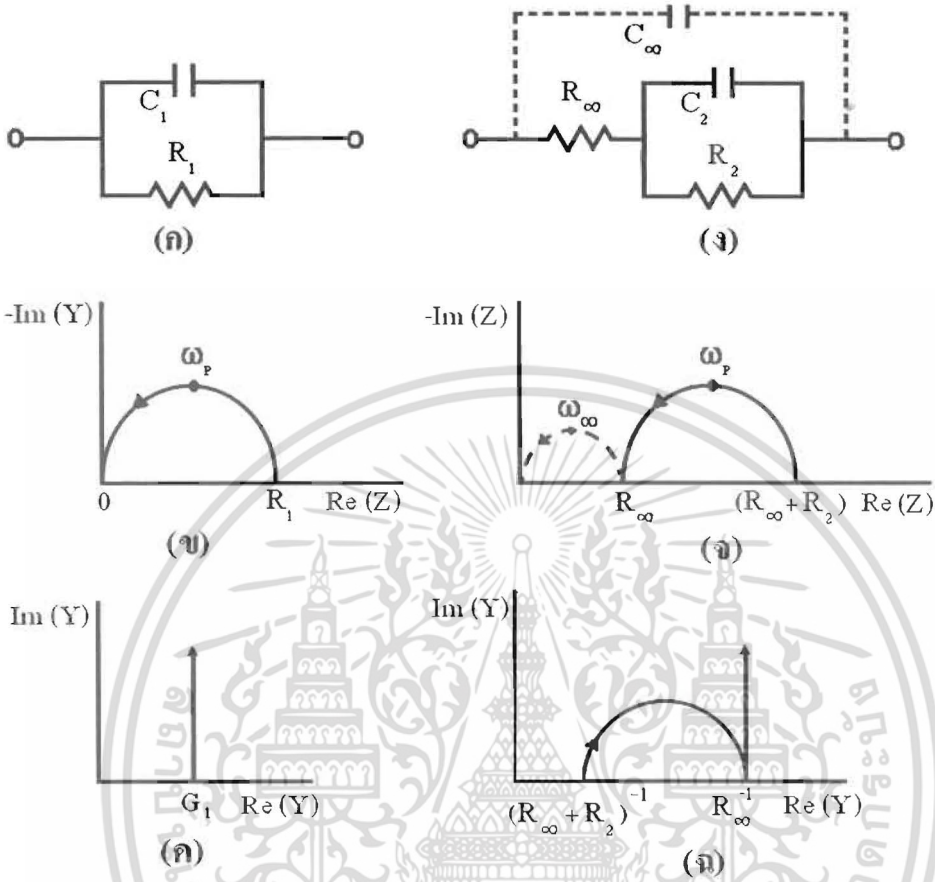
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่ากราฟของไบนารีวีสต์ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แสดงกราฟของไบนารีวีสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโกปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (ข,จ) และ แอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโกปี (ค,ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance : C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_{∞} หรือ C_1 ในรูปที่ 2.15 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance: R_b) ซึ่งก็คือ R_{∞} หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau = R_{\infty} C_{\infty} = R_1 C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุด คือ ω_p และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในภาพที่ 2.15 (ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_p \tau_D = 1$ โดยทั่วไป $\tau_D < 10^{-7}$ s ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด (ω_{max}) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max} \tau_D \leq 1$ มักจะไม่ปรากฏค่า Z'' ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว τ_D จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $\omega_{\max} \tau_D \geq 1$ แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

นอกจากกรณีที่มี $R_1 = R_\infty$ และ $C_1 = C_\infty$ ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้ $R_1 = R_R$ และ $C_1 = C_R$ เมื่อ R_R คือ ความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน C_R คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาริเซชัน (polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ติดกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของภาพที่ 2.15 (ง) ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนภาพที่ 2.15 (จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงที่ของเวลาคือ $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไขว้ปลายภาพที่ 2.15 (จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น $Z^* = Z' - jZ''$ และเขียน $\text{Im}(Z')$ แทน $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังภาพที่ 2.15 (ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพธ์ คือ ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (ωC_1) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.10)$$

กราฟของสมการที่ (2.15) จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.15 (ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรในภาพที่ 2.15 (ง) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.11)$$

ซึ่งกราฟของสมการ (2.41) จะปรากฏอยู่ในภาพที่ 2.15 (ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของภาพที่ 2.15 (ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน $\log f$ เพื่อให้เป็น 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีทั่วไปทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นกับ C และ R ซึ่งทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นอยู่กับความถี่ และพบว่าและ Z' กับ Z'' มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.12)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.13)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ $R/2$ ดังปรากฏในภาพที่ 2.15 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม (R_s) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

2.7.1.3 กราฟของโบท (Bode plot)

อิมพีแดนซ์ $Z = Z' + jZ''$ สามารถจะเขียนอยู่ในแบบโคออร์ดิเนตตั้งฉาก (rectangular coordinate) และโคออร์ดิเนตเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2.17 ดังนี้คือ

$$\text{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos \phi$$

$$\text{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z| \sin \phi$$

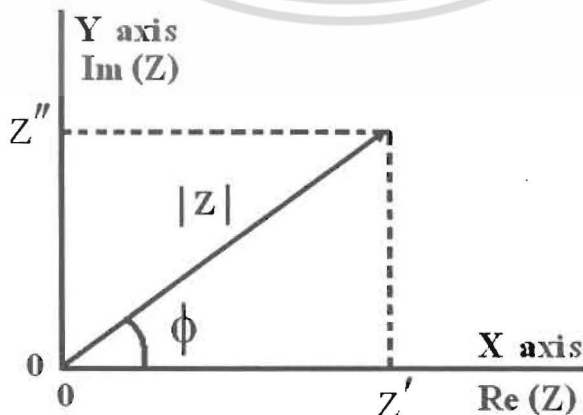
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (2.14)$$

$$\text{โดยที่โมดูลัสคือ } |Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

$$\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi$$

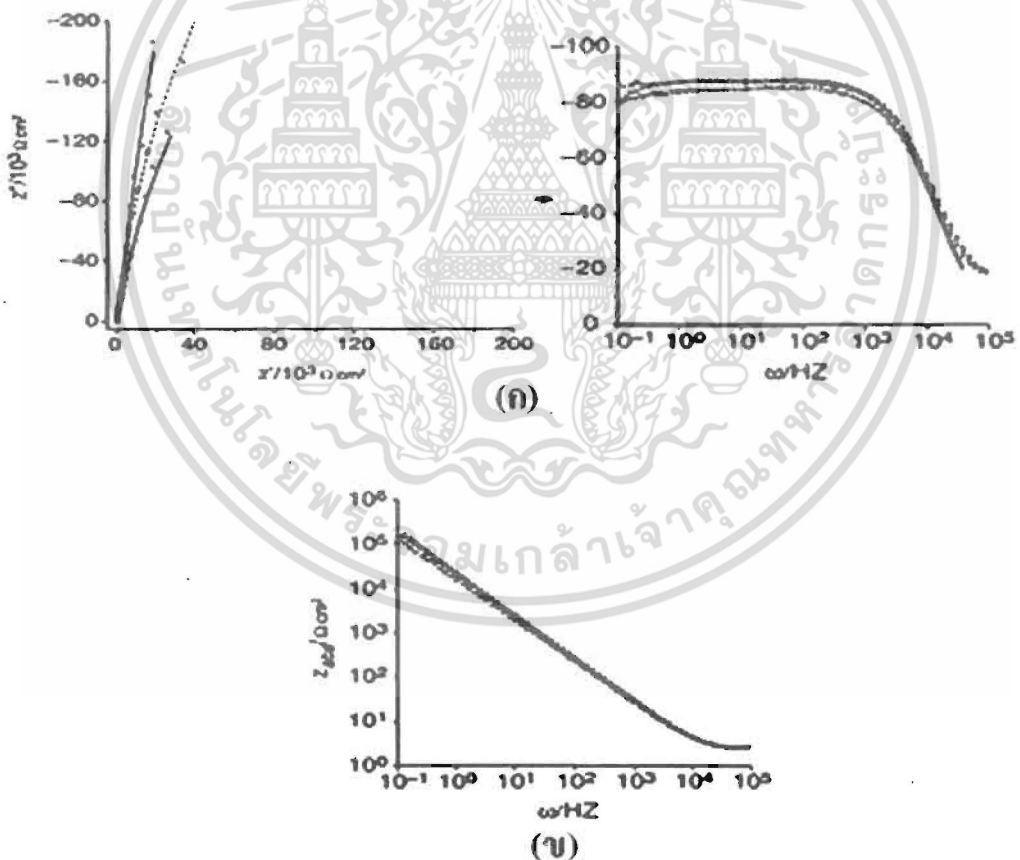
$$\text{ดังนั้น } Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.16)$$



ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเฟสระหว่างทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุสมบรูณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่โดยแกนความถี่จะเป็นลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของในควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบรูณ์ที่ความถี่เชิงมุม $\omega \rightarrow 0$ แล้วมุมเฟส $\phi = -90$ องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม -90 องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบรูณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอิลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element, CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.16 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่น ความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบรูณ์ของผลึกพหุพันธ์



ภาพที่ 2.17 ก. แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด

- ข. แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่
ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอิมพีแดนซ์ของ CPE จะนิยามโดยค่าของ P และ n เมื่อ P คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน n เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq n \leq 1$ แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ Z(CPE) จะเกี่ยวข้องกับความต้านทาน (resistance) และแปรตาม ω^{-n} ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และแปรตาม ω^{-n} ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(\text{CPE}) = \frac{1}{P(j\omega)^n} \quad (2.17)$$

ส่วนความจุเนื่องจากบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ติดกับขั้วอิเล็กโทรด(double-layer capacitance, C_{dl}) จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = n \sqrt{\frac{P}{R_s(n-1)}} \quad (2.18)$$

พารามิเตอร์ n จะสัมพันธ์กับมุมเฟส ϕ ดังนี้คือ $\phi = n \left(\frac{\pi}{2} \right)$ ถ้ามุมเฟส ϕ เข้าใกล้ 1 ก็จะประพฤติตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์โดยที่มุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

2.7.2 การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกส์เพื่อประยุกต์เป็นวาริสเตอร์ (Zang et al. 2004; Hozer, 1994)

2.7.2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุที่ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม

จะแสดงดังสมการ

$$J = kV^\alpha \quad (2.19)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear coefficient)

โดย α จะหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\log\left(\frac{J_2}{J_1}\right)}{\log\left(\frac{E_2}{E_1}\right)} \\ &= \frac{\log J_2 - \log J_1}{\log E_2 - \log E_1} \end{aligned} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $J_1 = 1$ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ $J_2 = 10$ มิลลิแอมป์ต่อตาราง

เซนติเมตร

ส่วน E_1 และ E_2 คือ สนามไฟฟ้าที่สอดคล้องกับ J_1 และ J_2 ตามลำดับ ดังนั้นสมการที่ (2.20) จะกลายเป็น

$$\alpha = \frac{1}{\log E_2 - \log E_1} \quad (2.21)$$

สนามไฟฟ้า E จะหาได้จาก

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.22)$$

เมื่อ V คือ แรงดันที่ป้อนให้ชิ้นงาน และ L คือ ความหนาของเซรามิกส์ ถ้ารัศมีของเซรามิกส์เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร แล้วพื้นที่ $A = \pi(0.5)^2$

$$A = 0.785 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$



ภาพที่ 2.18 แสดงพื้นที่และความหนาของเม็ดเซรามิกส์

ถ้า $A = 0.785$ ตารางเซนติเมตร

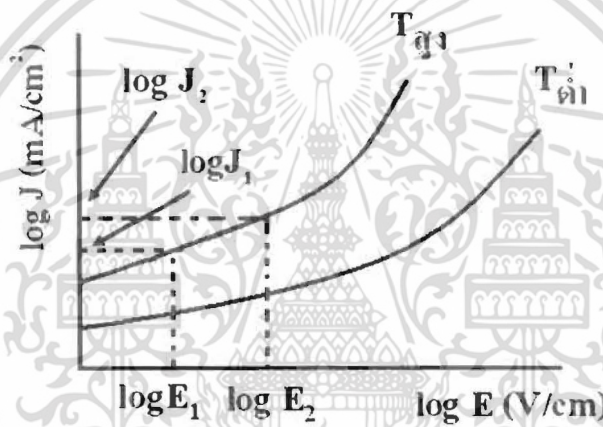
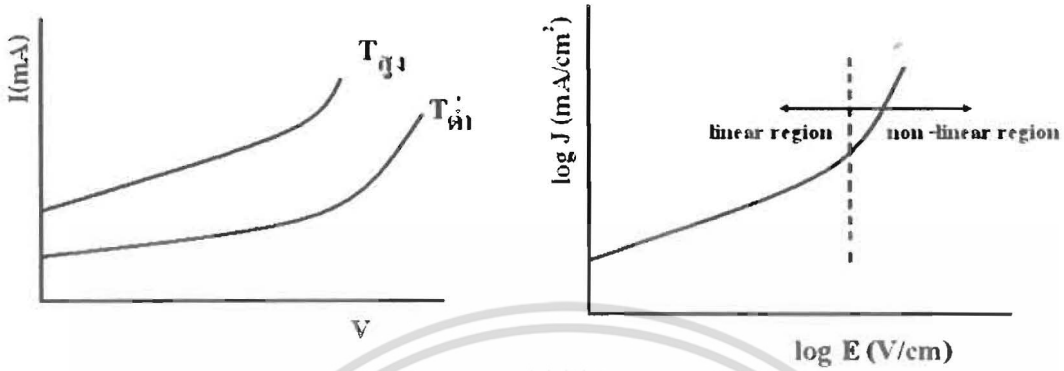
$$J_1 = \frac{I_1}{A}$$

$$I_1 = J_1 A = (1 \text{ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร})(0.785 \text{ ตารางเซนติเมตร}) = 0.785 \text{ มิลลิแอมป์}$$

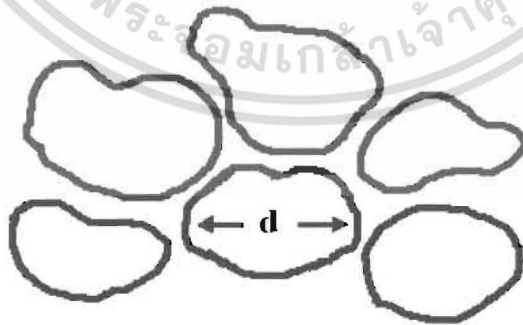
$$I_2 = J_2 A = (10 \text{ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร})(0.785 \text{ ตารางเซนติเมตร}) = 7.85 \text{ มิลลิแอมป์}$$

สนามไฟฟ้าพังทลาย (breakdown field: E_b) พิจารณาที่ $J_1 = 1$ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยที่ E_b มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเซนติเมตร หรือบางครั้งใช้ โวลต์ต่อมิลลิเมตร ส่วนกระแสรั่ว (leakage current: I_L) จะพิจารณาที่สนามไฟฟ้า เท่ากับ $0.8 E_b$ ในเนื้อเซรามิกส์จะมีขอบของเกรน (grain boundary) และเนื้อเกรน (bulk) ประมาณว่าขนาดของเกรน (grain size) มีค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ d ซึ่งหาได้จาก SEM หรือ XRD ที่บริเวณขอบของเกรน มักจะมีสถานะผิวรอยต่อ(interface state) เกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นเสมือนกับมีกำแพงศักย์เกิดขึ้นที่บริเวณขอบของเกรนคล้ายกับรอยต่อชอตต์กี 2 อันมาหันหน้าชนกันดังภาพที่ 2.21

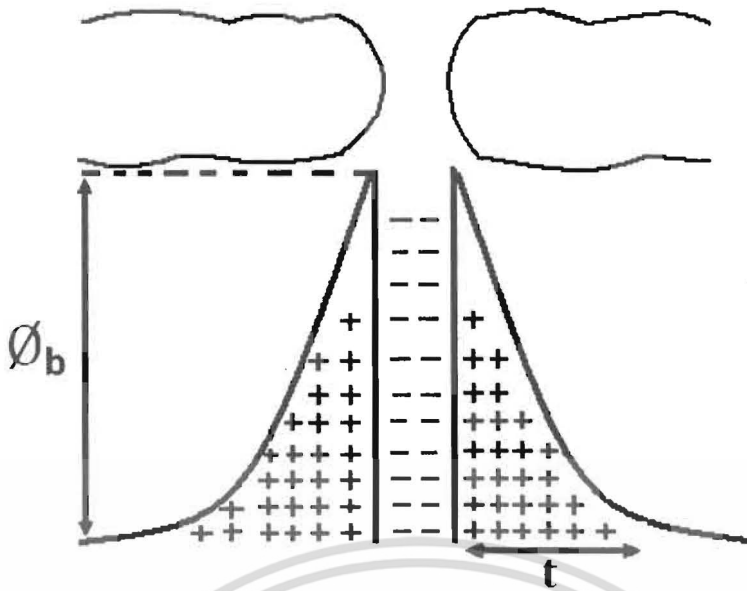


ภาพที่ 2.19 กราฟแสดงคุณสมบัติของวาริสเตอร์



ภาพที่ 2.20 แสดงขนาดของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.21 แสดงรอยต่อแบบขอตัก 2 อันหันหน้าชนกัน

ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (density of interface state: N_t) หาได้จาก
 ความสัมพันธ์

$$N_t = \left(\frac{2\epsilon_s N_d \phi_b}{q} \right)^{1/2} \quad (2.23)$$

N_t มีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อ N_d = ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (density of donor) มีหน่วยเป็น ต่อ
 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ϵ_s = permittivity ของเซรามิกส์ ($\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$)

ϵ_0 = permittivity ของสุญญากาศ = 8.85×10^{-14} ฟารัดต่อเซนติเมตร

ϵ_r = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)

t = ความหนาของชั้นพร่องพาหะ หรือความหนาของกำแพงสั๊กย์

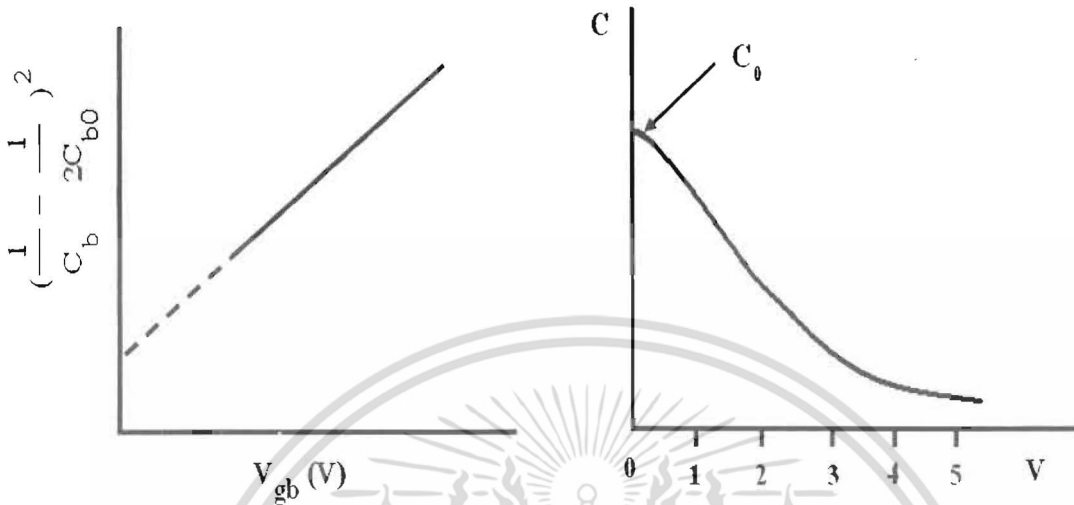
$$t = \frac{N_t}{N_d} \quad (2.24)$$

ที่บริเวณขอบของเกรนจะมีความจุไฟฟ้าปรากฏอยู่ขณะที่ทำการวัด C-V วัดที่ $f =$

1 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะเป็นดังความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{1}{C_b} - \frac{1}{2C_{b0}}\right)^2 = \frac{2(\phi_b - V_{gb})}{q\epsilon_s N_d} \tag{2.25}$$



ภาพที่ 2.22 แสดงกราฟความจุไฟฟ้าที่ตกคร่อมขอบเกรนและแรงดันไบแอสที่แต่ละขอบเกรน

C_b = ความจุไฟฟ้าที่แต่ละขอบของเกรน (capacitance per grainboundary)

C_{b0} = ความจุต่อจำนวนขอบของเกรนที่แรงดัน = 0 (มีหน่วยเป็นฟารัดต่อตารางเซนติเมตร)

V_{gb} = แรงดันไบแอสที่แต่ละขอบเกรน (applied voltage per grain boundary)

C_b จะหาได้จาก C ที่วัดได้หารด้วยจำนวนของเกรน (n) ดังสมการ

$$C_b = \frac{C}{n} \tag{2.26}$$

$$n = \frac{L}{d} \tag{2.27}$$

เมื่อ d = ขนาดของเกรน

และ $C_{b0} = \frac{C_0}{n} \tag{2.28}$

N_d จะหาได้จากความชัน

$$\text{ซึ่งความชัน} = \frac{2}{q\epsilon_s N_d} \tag{2.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ϕ_b จะหาได้จากจุดตัดแกน y

$$\text{ซึ่งจุดตัดแกน } y = \frac{2\phi_b}{q\epsilon_s N_d} \quad (2.30)$$

E_b = สนามไฟฟ้าพังทลาย (breakdown field)

V_b = แรงดันตกคร่อมขอบของเกรน (voltage barrier)

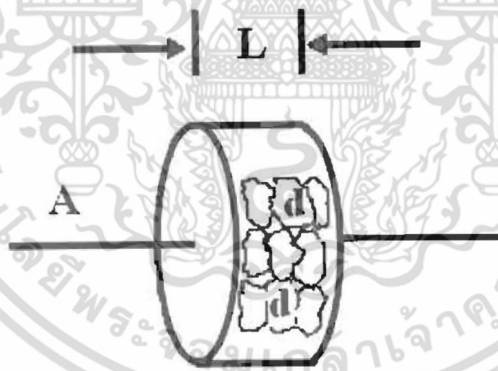
σ_o = ความนำไฟฟ้าจำเพาะ (specific conductivity: σ_o)

จะวัดที่สนามไฟฟ้า $E = 1$ โวลต์ต่อมิลลิเมตร

$$\text{โดยที่ } \sigma_o = \frac{L}{RA} \quad (2.31)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.32)$$

ซึ่ง V จะสอดคล้องกับ $E = 1$ โวลต์ต่อมิลลิเมตร

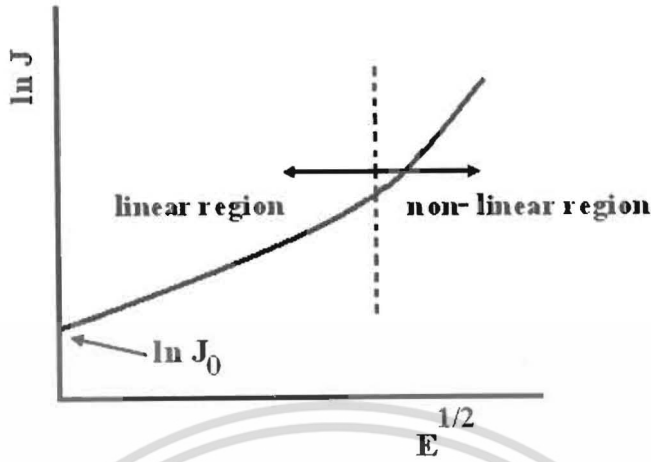


ภาพที่ 2.23 แสดงการหาจำนวนของเกรนของเม็ดเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบขอตดัก

ความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบขอตดักของวาริสเตอร์ คือ



ภาพที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ในแบบขอตดัก

$$J = A^* T^2 \exp \left[\frac{-(\phi_b - \beta E^{1/2})}{kT} \right] \quad (2.33)$$

$$J = A^* T^2 \exp \left[\frac{\beta E^{1/2} - \phi_b}{kT} \right]$$

$$\ln J = \ln A^* T^2 + \frac{\beta E^{1/2} - \phi_b}{kT}$$

$$\ln J = \left(\frac{\beta}{kT} \right) E^{1/2} + \ln A^* T^2 - \frac{\phi_b}{kT}$$

เทียบกราฟ $y = mx + c$

$$\text{slope} = \frac{\beta}{kT}$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = \ln A^* T^2 - \frac{\phi_b}{kT} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.33) จะสามารถหาค่า β ได้ซึ่ง

$$\beta = \left(\frac{1}{e} \right) \left[\left(\frac{1}{nt} \right) \left(\frac{2e^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \right) \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

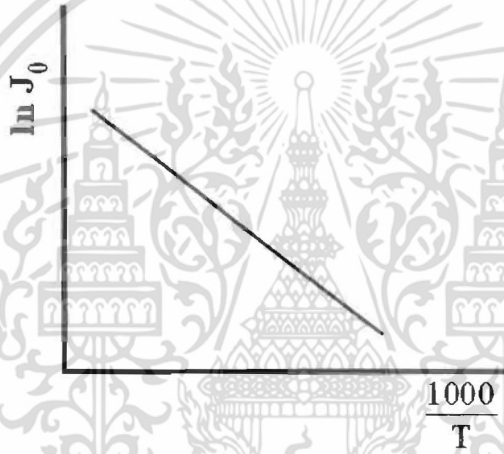
ถ้าลากเส้นส่วนต่อจากบริเวณที่เป็นเส้นตรง (linear region) ไปตัดแกน $E^{1/2}$ ก็จะได้ค่า $\ln J_0$ ซึ่งคำนวณหาค่า J_0 ได้ ซึ่งกระแส J_0 จะเกิดจากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกจะขึ้นกับอุณหภูมิดังนี้

$$J_0 = J_{\infty} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

$$\ln J_0 = \ln J_{\infty} - \frac{E}{kT}$$

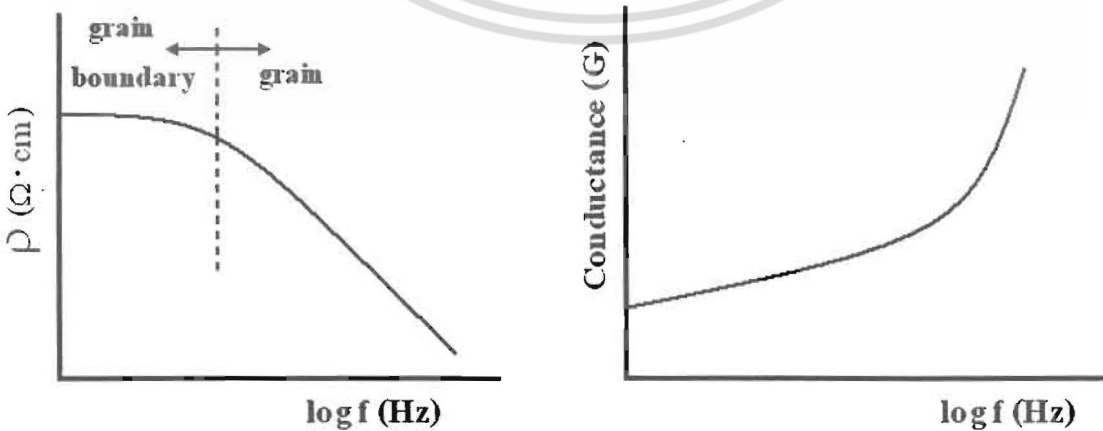
$$\ln J_0 = \ln J_{\infty} - \left(\frac{E}{1000k}\right)\left(\frac{1000}{T}\right) \tag{2.36}$$

เมื่อ $\frac{E}{a}$ = พลังงานกระตุ้น



ภาพที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J_0$ กับอุณหภูมิ

สภาพต้านทานทางไฟฟ้า (ρ) จะเปลี่ยนไปตามความถี่ดังนี้

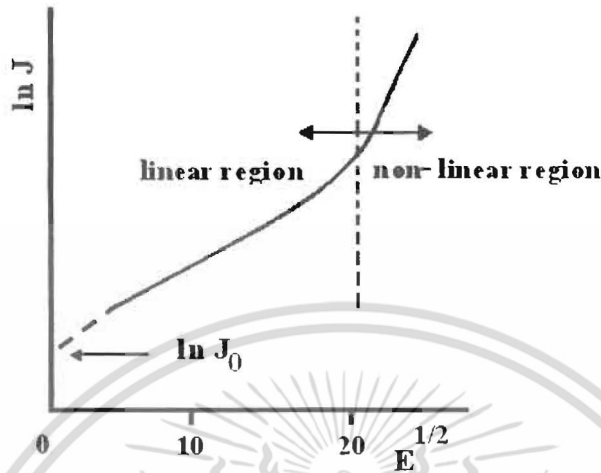


ภาพที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.3 กลไกการนำไฟฟ้าแบบ พูล-เฟรนเคิล (Poole – Frenkel type)

พลังงานความร้อนจะกระตุ้นอิเล็กตรอนจะจากสถานะพลังงานของอะตอมของ ผู้รับ (acceptor states) ที่อยู่สถานะผิวรอยต่อจะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.37)



ภาพที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับ $E^{1/2}$

$$J_{pf} = cE \exp \left[\frac{-(\phi_b - 2\beta E^{1/2})}{kT} \right] \quad (2.37)$$

$$\ln J_{pf} = \ln(cE) - \frac{\phi_b}{kT} + \left(\frac{2\beta}{kT}\right) E^{1/2}$$

$$\ln J_{pf} = \left(\frac{2\beta}{kT}\right) E^{1/2} + c \ln E - \frac{\phi_b}{kT}$$

$$\text{Slope} = \frac{2\beta}{kT} \quad (2.38)$$

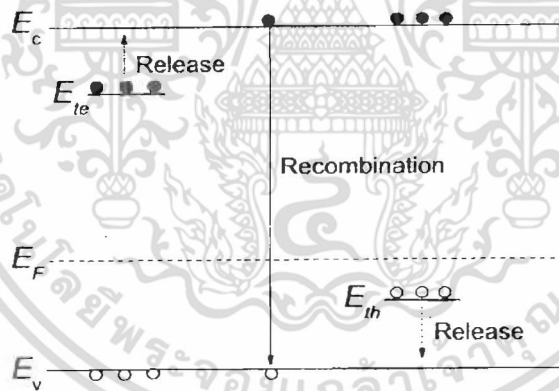
$$\text{จุดตัดแกน } y = c \ln E - \frac{\phi_b}{kT} = \frac{-\phi_b}{kT} \quad (2.39)$$

จากค่าความชันของกราฟ จะหาค่า β ได้ และจากจุดตัดแกน y จะหาค่า ได้ ϕ_b

2.8 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในภาพที่ 2.28 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{ho}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{e}) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับกักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่ให้พลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคืออัม (persistent photoconductivity)



ภาพที่ 2.28 ระดับพลังงานของกักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดที่บวมและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

กำหนดให้ชั้นสารมีความกว้าง w ความหนา d และยาว l ให้กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด wd กระแสไฟฟ้า I จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากความสัมพันธ์ $\mu = v/\xi$ และ $\xi = V_a/l$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.41)$$

แทนสมการที่ (2.41) ลงใน (2.40) จะได้

$$I = en\mu V_a \left(\frac{wd}{l} \right) \quad (2.42)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกักตักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_{ii} \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.43)$$

แทนสมการที่ (2.43) ลงใน (2.42) จะได้ว่า กระแส I_i ที่เกิดจากกักตักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l} \right) \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.44)$$

กระแสรวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left(N_{ii} \exp\left(-t/\tau_i\right) \right) \quad (2.45)$$

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(t/\tau_i\right) \quad (2.46)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.42) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 I &= e\mu\left(\frac{w}{l}\right)(nd)V_a \\
 &= e\mu\left(\frac{w}{l}\right)\sigma_t V_a
 \end{aligned}
 \tag{2.47}$$

เมื่อ σ_t คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากัมมันตภาพมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกัมมันตภาพทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a \sum_i \left(\sigma_{ii} \exp\left(-t/\tau_i\right) \right)
 \tag{2.48}$$

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จาก ความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_i\right)
 \tag{2.49}$$

โดยที่

- V_a คือ แรงดัน ไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น โวลต์
- μ คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)
- w คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- l คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- d คือ ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- I คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
- τ_r คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
- N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์

เซนติเมตร

σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้าร่วมด้วยในกระบวนการ

ทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right)
 \tag{2.50}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\ln \tau_r &= \ln \tau_{ro} + \left(\frac{E_t}{k} \right) \left(\frac{1}{T} \right) \\ &= \ln \tau_{ro} + \frac{E_t}{(1,000k)} \left(\frac{1,000}{T} \right)\end{aligned}$$

เมื่อ

$$\text{ความชัน} = \frac{E_t}{(1,000)k}$$

ดังนั้น

$$E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q}$$

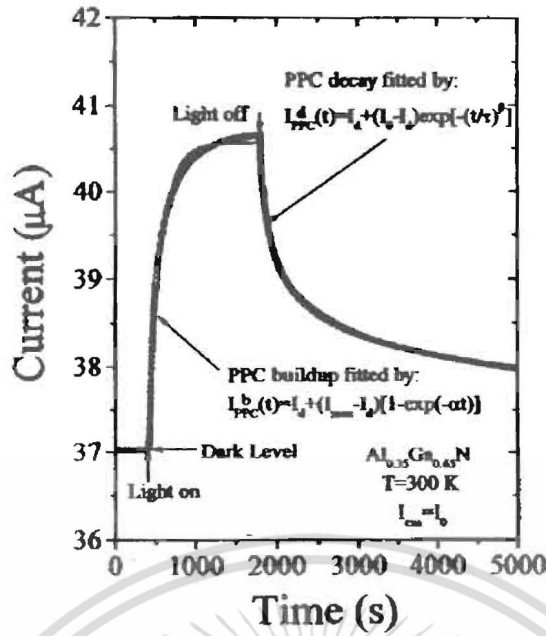
$$= (0.086)(\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอน โวลต์} \quad (2.51)$$

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังภาพที่ 2.29 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \left[1 - \exp\left(-t/\tau_r\right) \right] \quad (2.52)$$

เมื่อ I_o คือกระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \exp\left(-t/\tau_d\right) \quad (2.53)$$



ภาพที่ 2.29 กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงการสภานำไฟฟ้าเชิงแสง

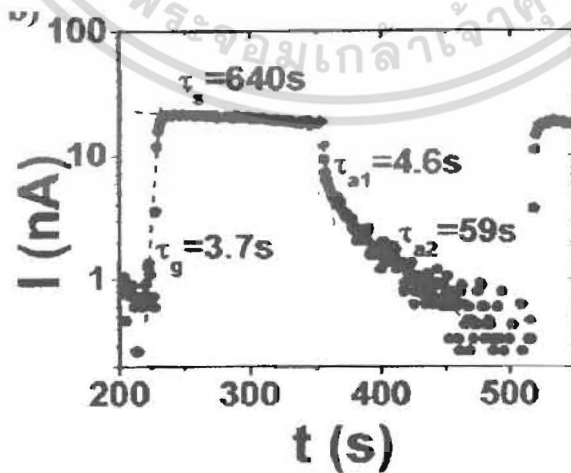
จากสมการที่ (2.52) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - \frac{t}{\tau_d} \tag{2.54}$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ

$\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ

$\ln I_p$ กับ t (ดังภาพที่ 2.30) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภานำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.48) และสมการที่ (2.52) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n2} \exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.55)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจคิดแปลงสมการที่ (2.55) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเตเรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.56) สามารถที่จะหาค่า σ_{n1} และ σ_{n2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.49) ดังนี้คือ

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.57)$$

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.58)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสค่าเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.59)$$

และ

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.60)$$

สมการที่ (2.56) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2 \exp\left[-\left(t/\tau_{d1}\right)^\beta\right] \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ A_1 และ A_2 คือ แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่ $A_1 + A_2 = 1$ (Lin, 2013; Lin, 2012; Ren, 2012) ซึ่งค่า A_1 และ A_2 สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลองและ β มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A_1' \left[1 - \exp\left(-t/\tau_{r1}\right) \right] + A_2' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(t/\tau_{r1}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.62)$$

ส่วนกรณีของชั้นสาร เช่น เซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.44) และ (2.56) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{L} \right) V_a N_{11} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{L} \right) V_a N_{12} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.63)$$

จากสมการที่ (2.46) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{11} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.64)$$

$$N_{12} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.67)$$

กับศักยพหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับศักยพหะทั้งสองตามลำดับเราจะได้ว่า

$$N_{11} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.66)$$

$$N_{12} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.63) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

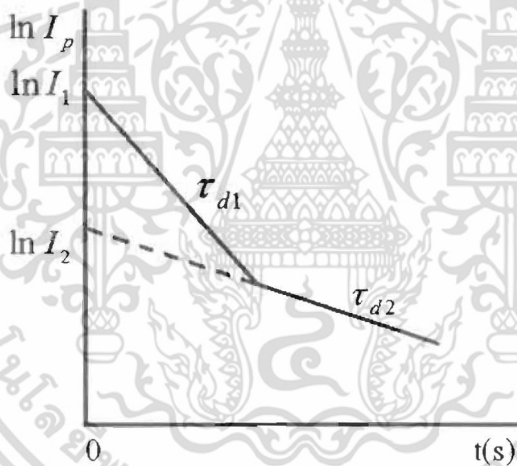
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.68)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาขึ้น ก็ สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[1 - \exp\left(-t/\tau_{d1}\right)\right] + A_2''' \left\{1 - \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right]\right\} \quad (2.69)$$

2.8.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพใน ช่วงกระแสชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสชาลงจะอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสชาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -t/\tau_{d1} + \ln I_1 \quad (2.70)$$

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพของฟิล์มบางได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.71)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ $\log I_p$ แทน $\ln I_p$ โดยที่ $\ln I_p = 2.3 \log I_p$ ในทำนองเดียวกัน τ_{d2} สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -t/\tau_{d2} + \ln I_2 \quad (2.72)$$

เราสามารถหาค่า I_2 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_2$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.73)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิกก็สามารถใช้สูตร

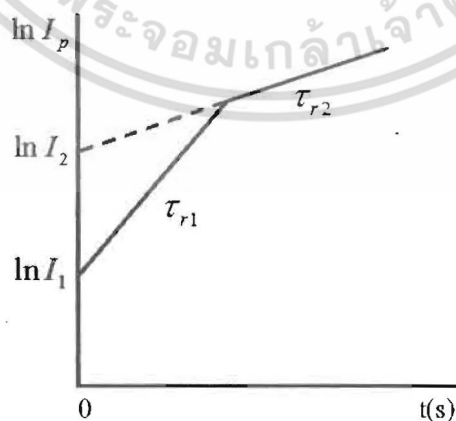
$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.74)$$

และ

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.75)$$

2.8.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (2.76)$$

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_{\max}} &= 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \\ 1 - \frac{I}{I_{\max}} &= \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \\ \ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] &= -\frac{t}{\tau_r} \end{aligned} \quad (2.77)$$

จากสูตร $\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$

ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.77) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{t}{\tau_r} \quad (2.78)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.78) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.71), (2.73), (2.74) และ (2.75) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่เป็นซึ่งจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมเม็ดเซรามิกของ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดย

วิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550)

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. สารตั้งต้น

- อินเดียม(III) ออกไซด์ (In_2O_3)
- ทังสเตน(VI) ออกไซด์ (WO_3)

2. ครกอาเกต

3. โม่ลัดอัดเม็ด

4. เครื่องอัดไฮโดรลิก

5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร

6. เตาเผาสาร

7. เตาอบ

8. ครูซิเบิลชนิดอลูมินา

3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550 ; ประธาน, 2550)

ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ต่อไปนี้

มวลโมเลกุลของผงผลึก $\text{WO}_3 = 231.8482$ กรัม

มวลโมเลกุลของผงผลึก $\text{In}_2\text{O}_3 = 277.6382$ กรัม

กรณี $x = 0.01$

ต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.005 \text{In}_2\text{O}_3$

ผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.005 \text{In}_2\text{O}_3 = 231.8482 + 0.005 (277.6382)$

$= 233.2364$ กรัม/ โม่ล

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.005 \text{In}_2\text{O}_3$ จำนวน 4 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{(0.005)(277.6382)(4)}{233.2364} \\ &= 0.0238 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{233.2364} \\ &= 3.9762 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x = 0.02

ต้องการเตรียมเม็ดผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.01 \text{ In}_2\text{O}_3$

$$\begin{aligned} \text{ผงผลึก } \text{WO}_3 : 0.01 \text{ In}_2\text{O}_3 &= 231.8482 + 0.01 (277.6382) \\ &= 234.6246 \text{ กรัม/ โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.01 \text{ In}_2\text{O}_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{(0.01)(277.6382)(4)}{234.6246} \\ &= 0.0473 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{234.6246} \\ &= 3.9527 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x = 0.03

ต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.015 \text{ In}_2\text{O}_3$

$$\begin{aligned} \text{ผงผลึก } \text{WO}_3 : 0.015 \text{ In}_2\text{O}_3 &= 231.8482 + 0.015 (277.6382) \\ &= 236.0128 \text{ กรัม/ โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.015 \text{ In}_2\text{O}_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{(0.015)(277.6382)(4)}{236.0128} \\ &= 0.0706 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{236.0128} \\ &= 3.9294 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x = 0.04

ต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.002 \text{ In}_2\text{O}_3$

$$\begin{aligned} \text{ผงผลึก } \text{WO}_3 : 0.002 \text{ In}_2\text{O}_3 &= 231.8482 + 0.002 (277.6382) \\ &= 237.4010 \text{ กรัม/ โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.002 \text{ In}_2\text{O}_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{(0.002)(277.6382)(4)}{237.4010} \\ &= 0.0936 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{237.4010} \\ &= 3.9064 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี $x = 0.05$

ต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.005 \text{ In}_2\text{O}_3$

$$\begin{aligned} \text{ผงผลึก } \text{WO}_3 : 0.025 \text{ In}_2\text{O}_3 &= 231.8482 + 0.025 (277.6382) \\ &= 238.7892 \text{ กรัม/ โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{WO}_3 : 0.025 \text{ In}_2\text{O}_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{(0.025)(277.6382)(4)}{238.7892} \\ &= 0.1163 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก } \text{WO}_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{238.7892} \\ &= 3.8837 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	In_2O_3 (g)	WO_3 (g)
0	-	4
0.01	0.0238	3.9762
0.02	0.0473	3.9527
0.03	0.0706	3.9294
0.04	0.0936	3.9064
0.05	0.1163	3.8837

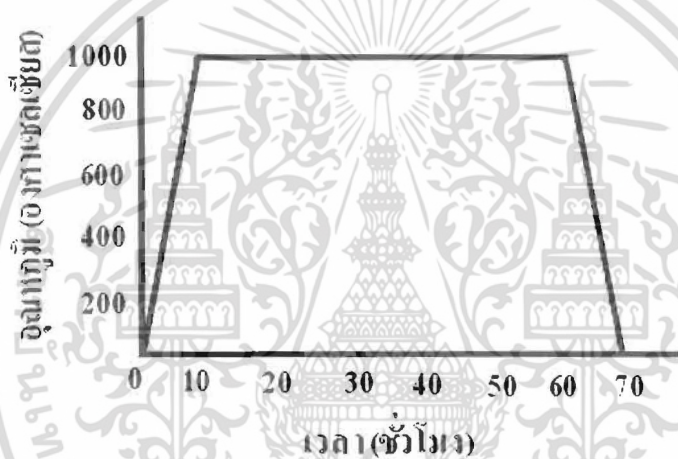
3.2 วิธีการเตรียมเม็ดเซรามิกของ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550 ; ประธาน, 2550)

- นำผงผลึก WO_3 ตามปริมาณที่ต้องการนำมาบดรวมกันในครกอาเกตให้เป็นผงละเอียดคกล้างเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- การเจืออะตอมของธาตุ In จากผงผลึก In_2O_3 จะทำการเจือในปริมาณ 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมลเปอร์เซ็นต์ แล้วอบในบรรยากาศที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3. เมื่ออบแล้วนำไปอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 4 ตันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยเพิ่มแรงอัดทีละ 1 ตัน แล้วทิ้งไว้ 10 วินาที จากนั้นจึงเพิ่มแรงอัดไปจนถึง 4 ตัน และตอนเอาเม็ดคผลึกออกจากโมลด์อัดเม็ดจะใช้แรงอัดครั้งละประมาณ 0.5 ตัน
4. นำเม็ดของสารที่ได้นำมาใส่ในครุชชีเบล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
5. ในการเผาภายใต้บรรยากาศนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1000 องศาเซลเซียส จึงแช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียส ต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา นำออกมาทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงฟิสิกส์ต่อไป



ภาพที่ 3.1 รูปแสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550)

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆดังนี้

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟกโตรมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV

3.3.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ Keithley รุ่น 236
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

3.3.4 การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

- เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ ใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และใช้อุณหภูมิห้อง
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดโดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- สายไฟ

3.3.5 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

- หลอดไฟฮาโลเจน 150 วัตต์
- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ Keithley รุ่น 236
- คอมพิวเตอร์และระบบเชื่อมต่อสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

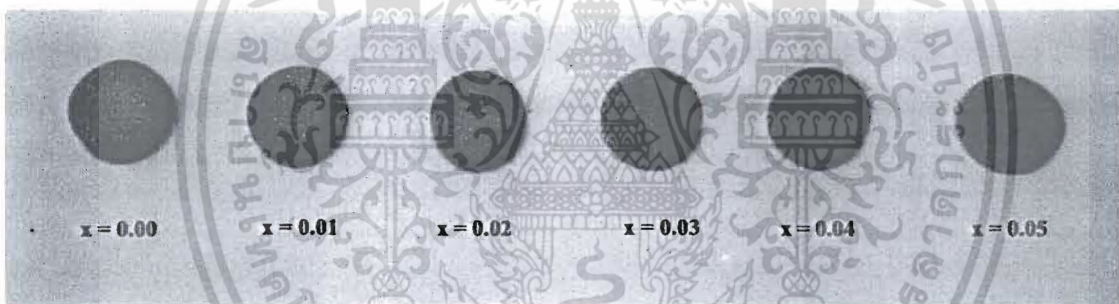
บทที่ 4

ผลการวิจัย

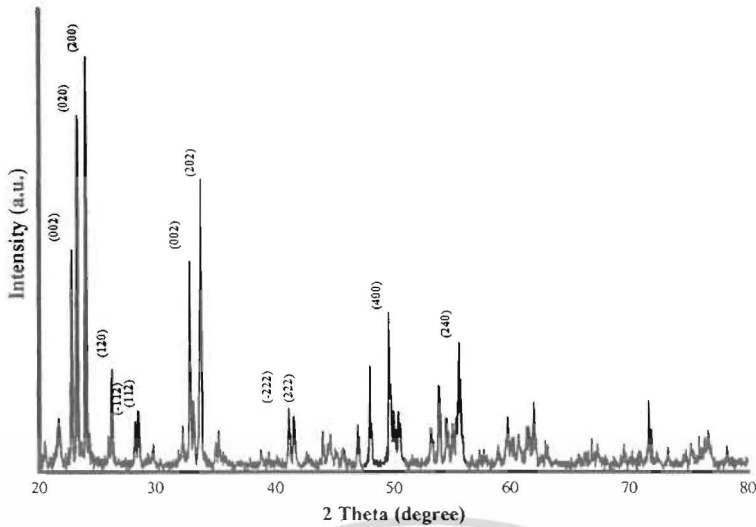
4.1 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ขณะยังไม่มี การเผาจะเป็นมีสี เขียวอ่อนๆ แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่ยังไม่มีการเผายังคงมีสีเขียวอ่อน ส่วนที่มีการ เผาอะตอมของสารเจือแล้วจะมีสีเขียวเข้ม ดังภาพที่ 4.1

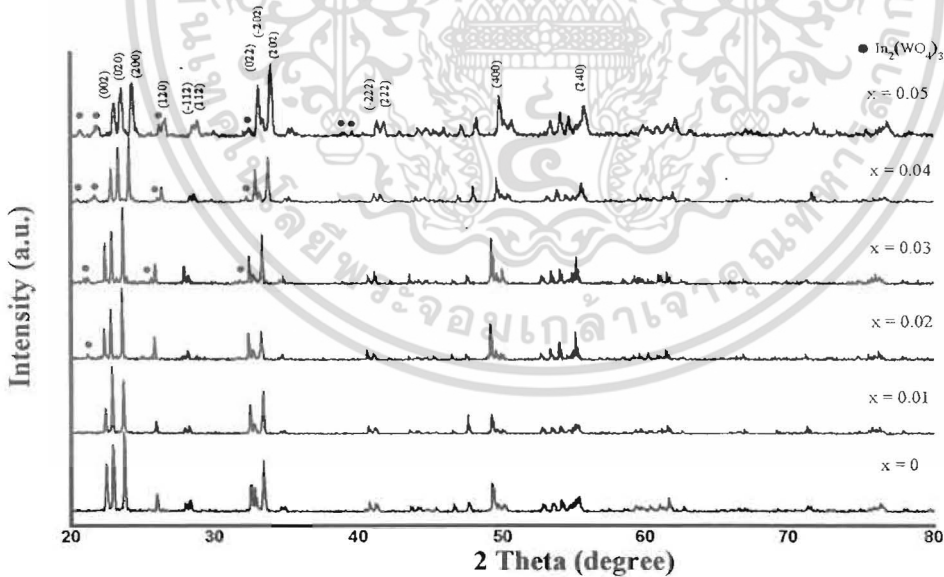


ภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.2 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากภาพที่ 4.2 นั้นแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีค่าความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ที่มุม 2θ เท่ากับ 20-80 องศา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 จะปรากฏระนาบ (200) ที่ตำแหน่งพิกัดมุม 2θ ประมาณ 23 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดของโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (200)

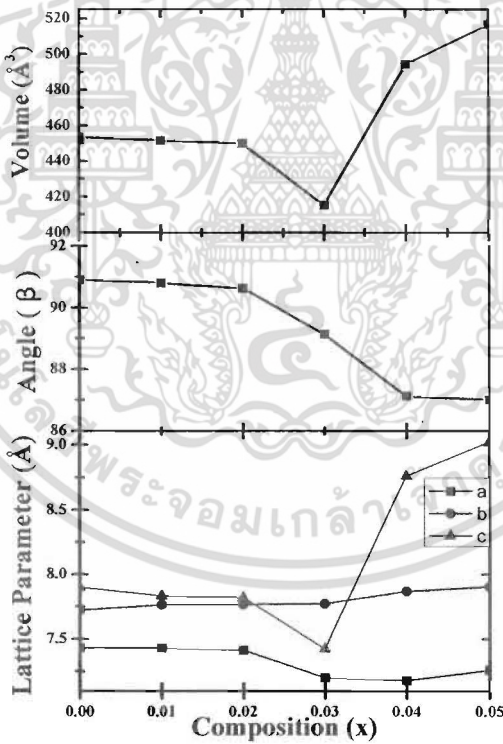


ภาพที่ 4.3 แสดงพิกัดความเข้มเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

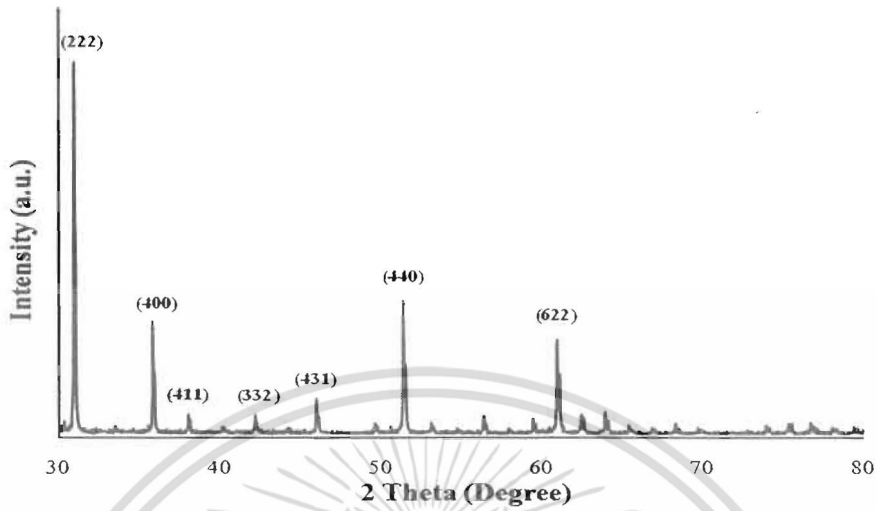
Composition (x) of $\text{WO}_3:\text{In}$	Lattice Parameter (Å)			$\beta(\theta)$	Volume (Å ³)
	a	b	c		
0	7.430	7.722	7.898	90.9	453.51
0.01	7.429	7.762	7.831	90.8	451.52
0.02	7.412	7.763	7.816	90.6	449.70
0.03	7.201	7.770	7.420	89.1	415.11
0.04	7.181	7.867	8.761	87.1	494.31
0.05	7.259	7.902	9.022	87.0	516.8



ภาพที่ 4.4 แสดงกราฟค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3:(0.01)\text{WO}_3$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



ภาพที่ 4.5 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3:(0.01)\text{WO}_3$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากภาพที่ 4.5 นั้นแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซเรย์คิฟเฟอโรโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีค่าความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ที่มุม 2θ 30-80 องศา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3:(0.01)\text{WO}_3$ ซึ่งปรากฏว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3:(0.01)\text{WO}_3$ จะปรากฏระนาบ (222) ที่ตำแหน่งพิกัดมุม 2θ ประมาณ 30.99 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดและจะปรากฏระนาบอื่นๆ คือ (400), (411), (332), (431), (440), (622) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก ตามลำดับ

สามารถคำนวณหาขนาดของเกรนได้ จากสูตร

$$D = \frac{\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.1)$$

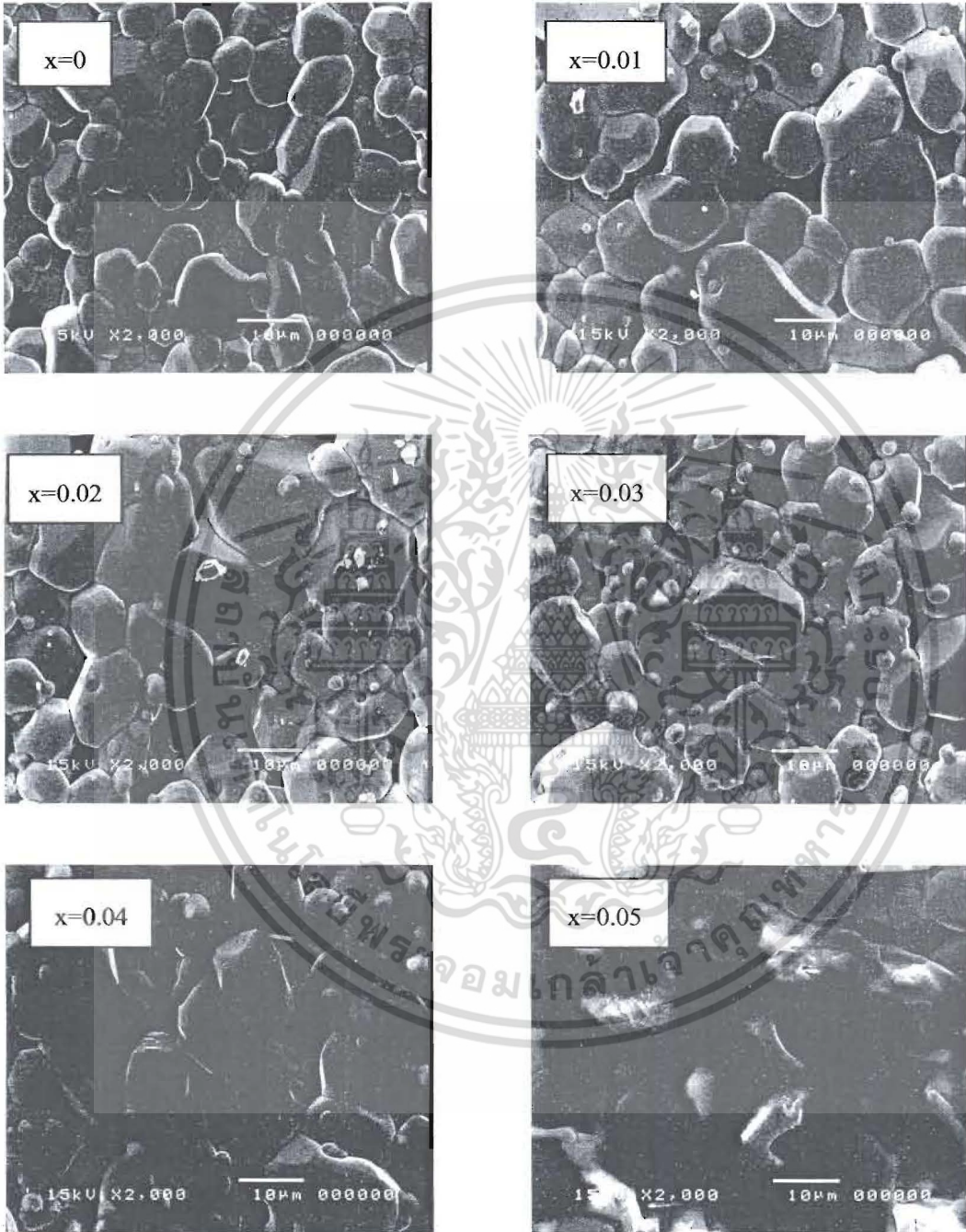
เมื่อ $\lambda = 1.5406$ อังสตรอม

β = ความกว้างของพีคที่ระยะครึ่งหนึ่งของความสูง (full width at half-maximum of the diffraction peak)

ซึ่งขนาดของเกรนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3:(0.01)\text{WO}_3$ เท่ากับ 73.3 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.10$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

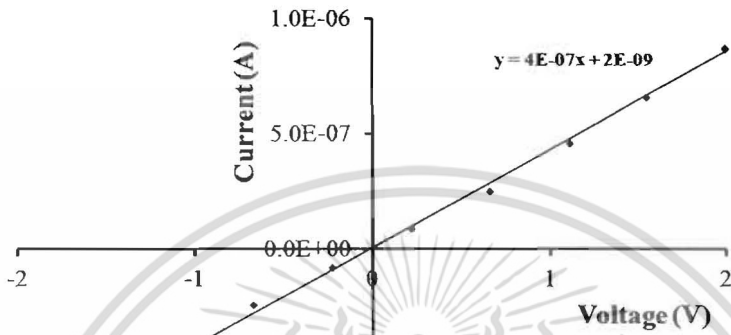


ภาพที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

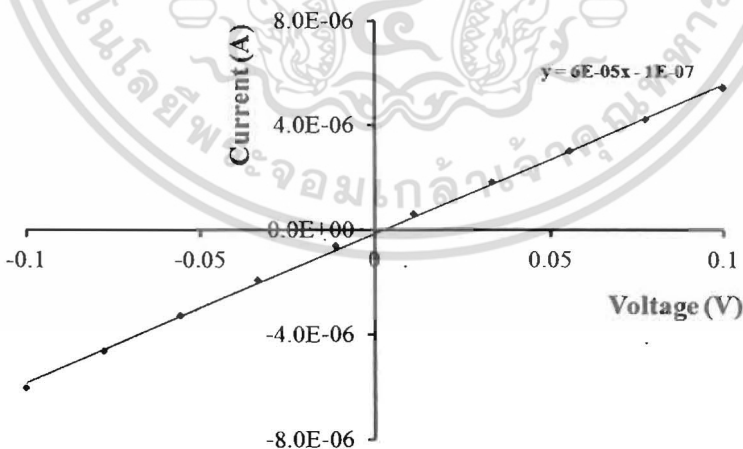
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

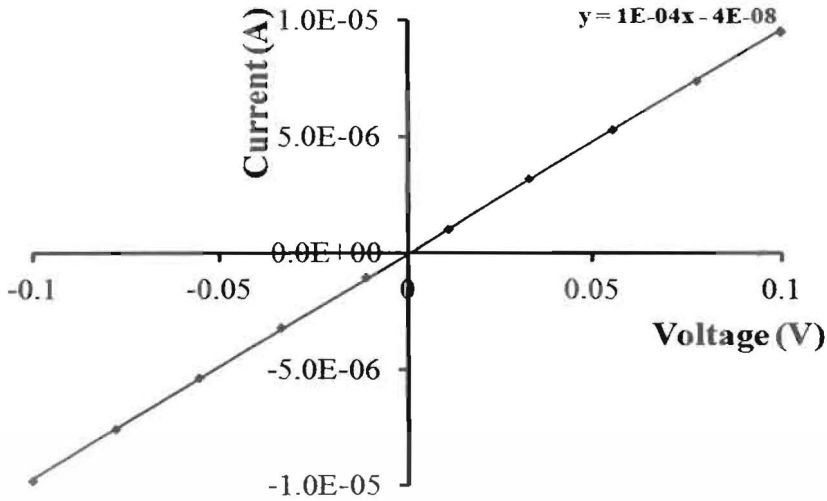


ภาพที่ 4.7แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

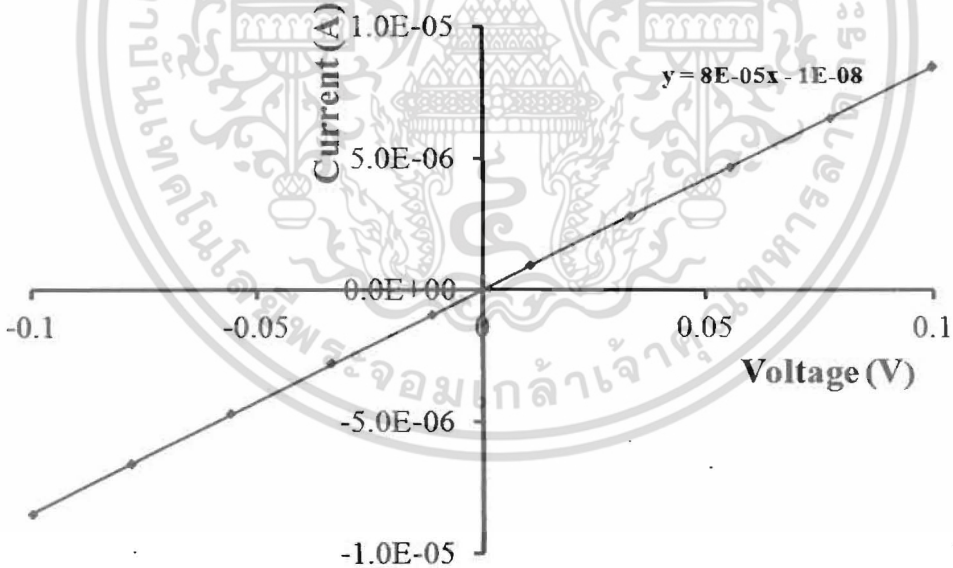


ภาพที่ 4.8แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องคำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

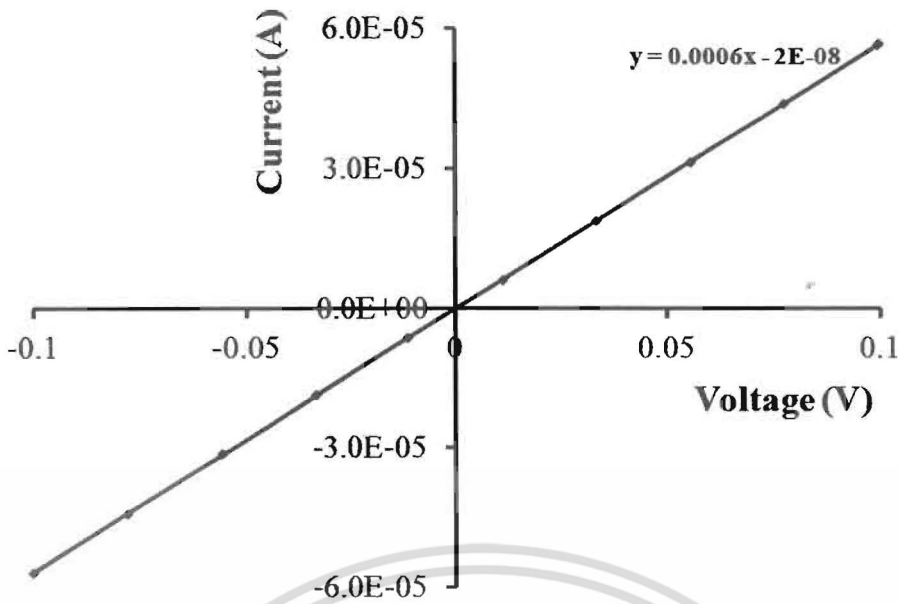
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



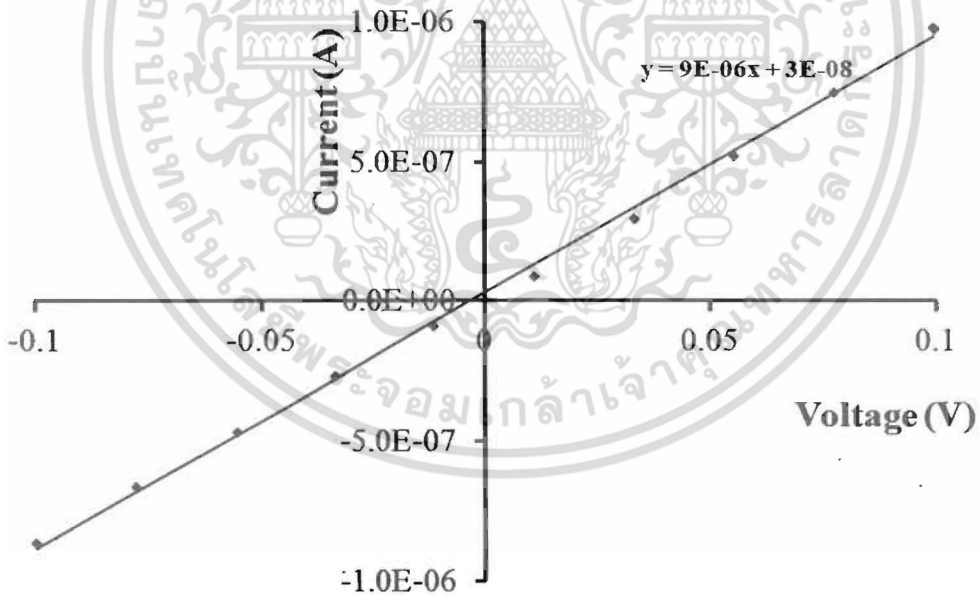
ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเมดเซอร์amikของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเมดเซอร์amikของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็คเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

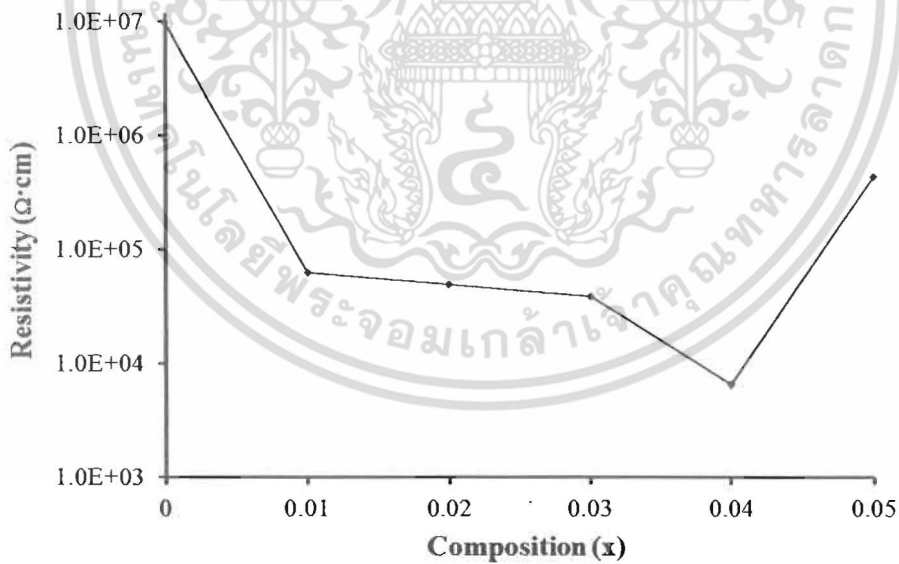


ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาความต้านทานที่วัดได้ด้วยวิธีสองขั้วของเม็คเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

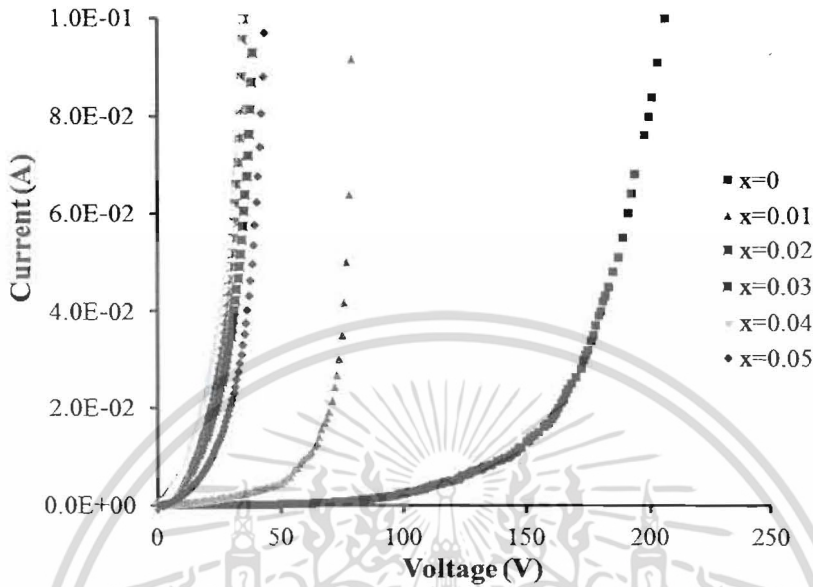
Composition (x) of In_xWO_3	R(Ω)	ρ ($\Omega\cdot\text{cm}$)
0	2.50×10^6	9.81×10^6
0.01	1.60×10^4	6.28×10^4
0.02	1.25×10^4	4.91×10^4
0.03	1.00×10^4	3.93×10^4
0.04	1.67×10^3	6.55×10^3
0.05	1.11×10^5	4.36×10^5



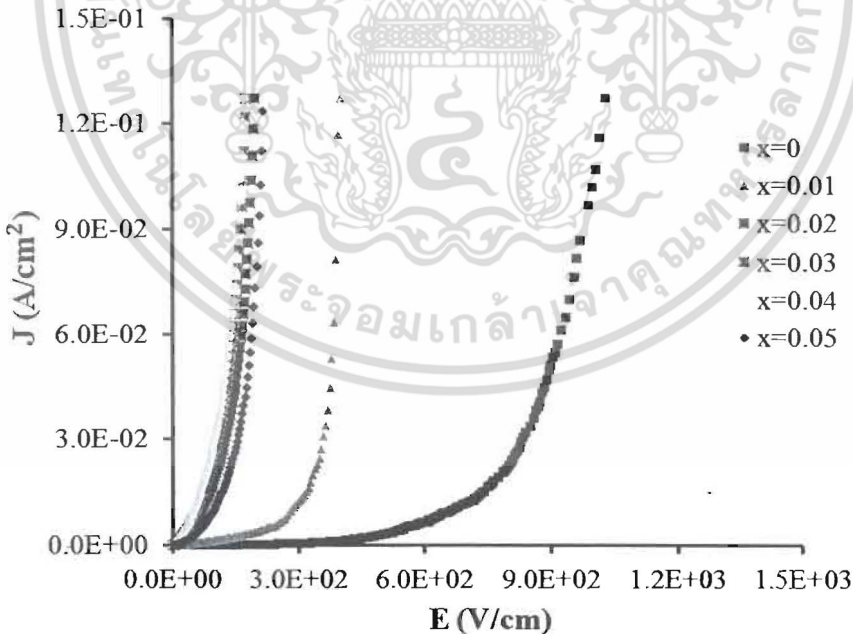
ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็น ผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

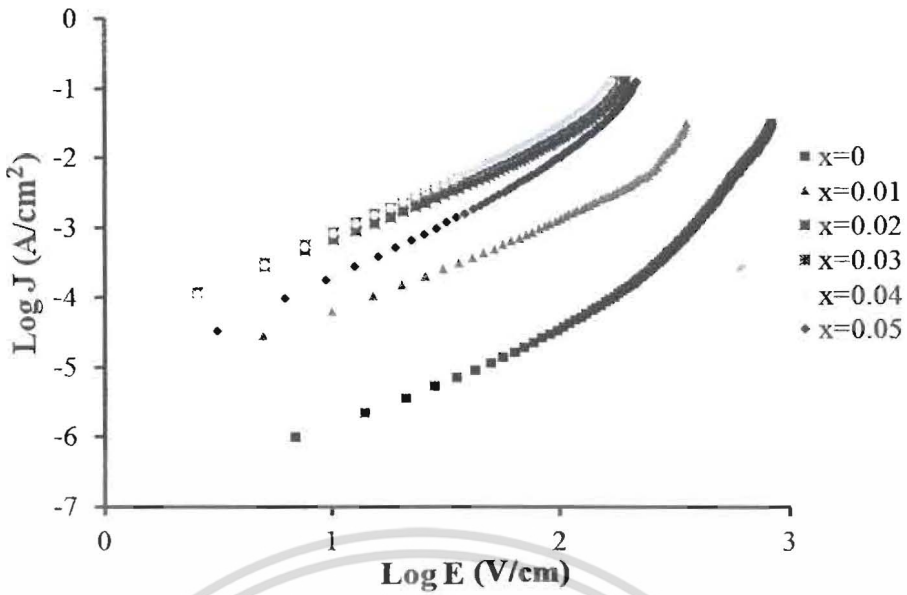


ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียม จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

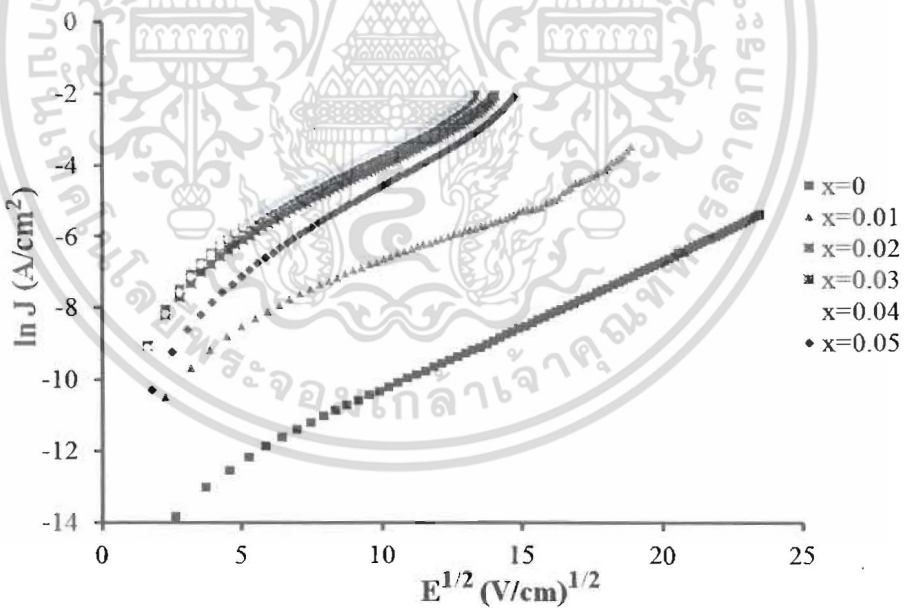


ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับสนาม ไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับค่าลอการิทึมของสนามไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

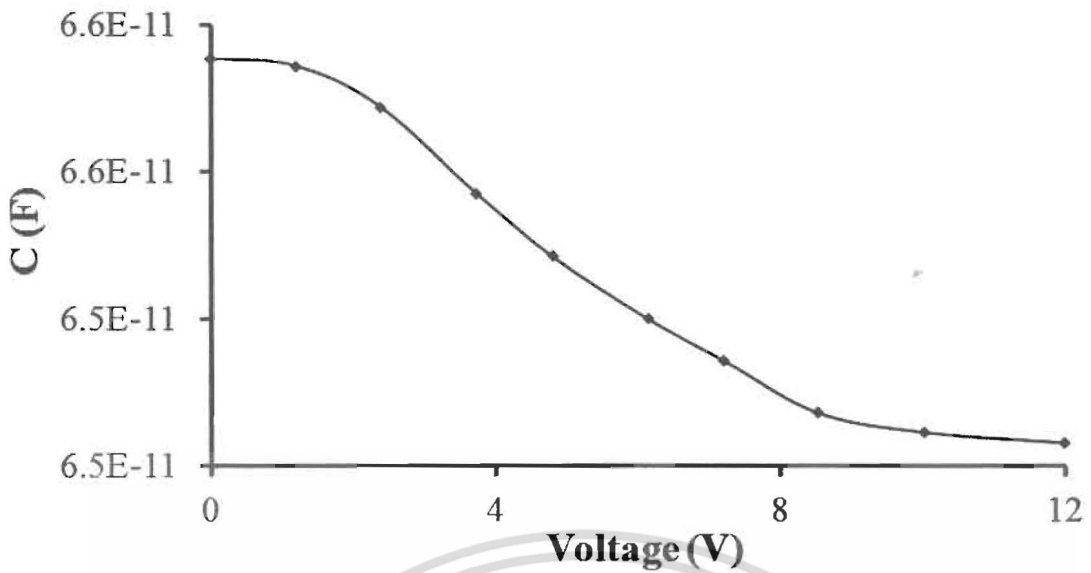
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	E_b (V/cm)	σ_0 (S/cm)	α	I_L (mA)
0	382	2.26×10^{-6}	4.76	305.60
0.01	85.12	3.69×10^{-5}	2.22	68.10
0.02	10.68	5.50×10^{-4}	1.52	8.55
0.03	14.24	2.67×10^{-4}	1.43	11.39
0.04	12.55	2.10×10^{-3}	1.52	10.04
0.05	29.28	1.17×10^{-4}	2.28	23.42

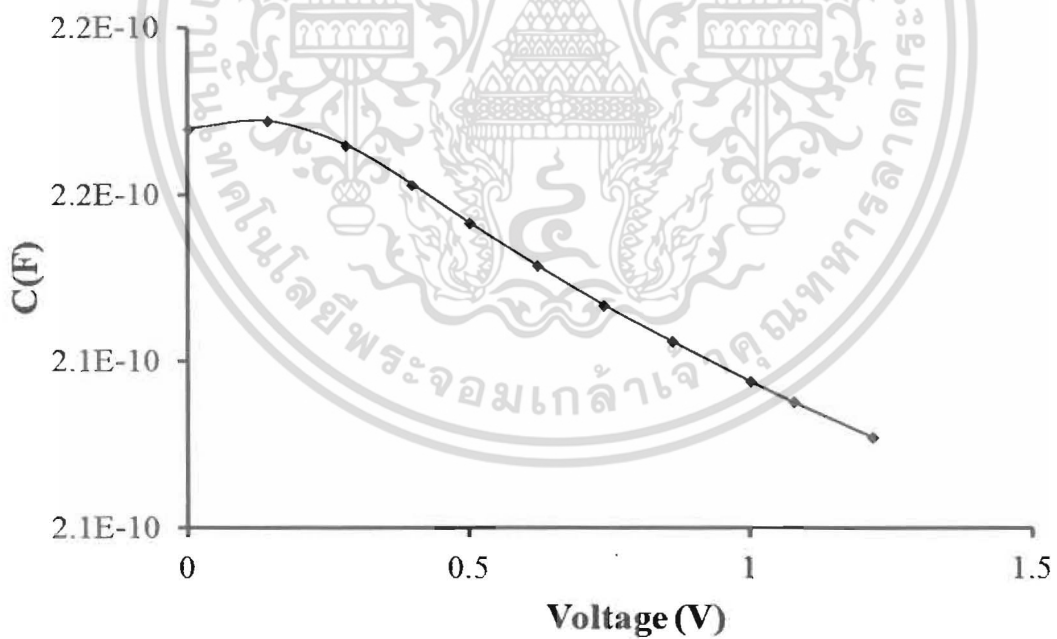
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x)	ϕ_b (eV)	N_d (cm^{-3})	N_t (cm^{-2})	t (nm)	d (μm)	β ($\text{V}^{1/2}\text{cm}^{1/2}$)
0	0.796	2.54×10^{12}	6.68×10^{10}	2.09	5.00	9.30×10^{-3}
0.01	0.685	1.14×10^{12}	4.16×10^{10}	3.00	10.00	7.74×10^{-3}
0.02	0.640	2.28×10^{12}	5.69×10^{10}	1.46	20.00	1.11×10^{-2}
0.03	0.648	1.14×10^{12}	4.04×10^{10}	1.46	15.00	1.11×10^{-2}
0.04	0.649	2.54×10^{11}	1.91×10^{10}	1.43	15.00	1.12×10^{-2}
0.05	0.681	5.72×10^{11}	2.94×10^{10}	1.08	15.00	1.29×10^{-2}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

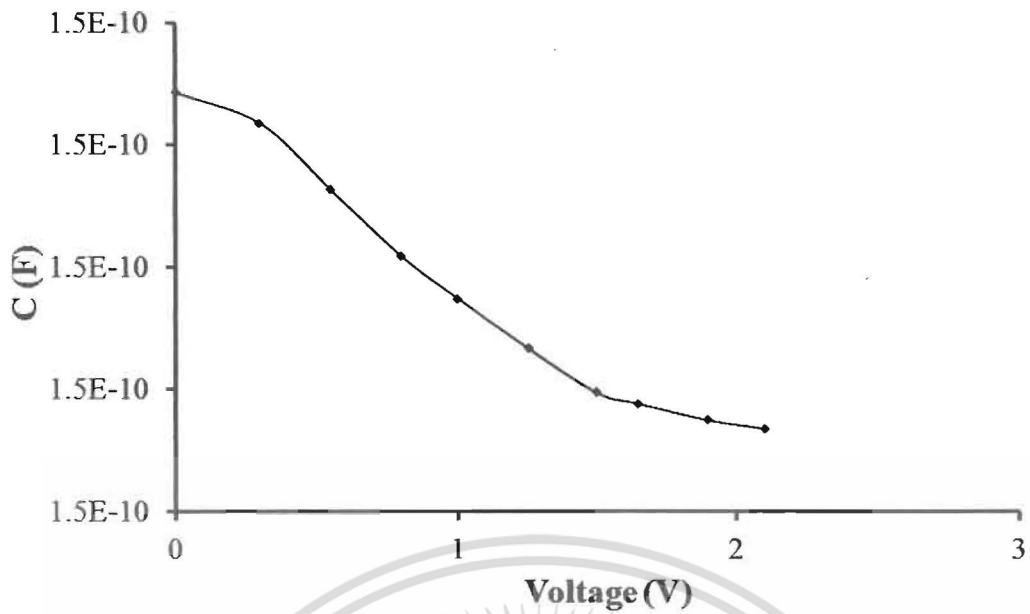


ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

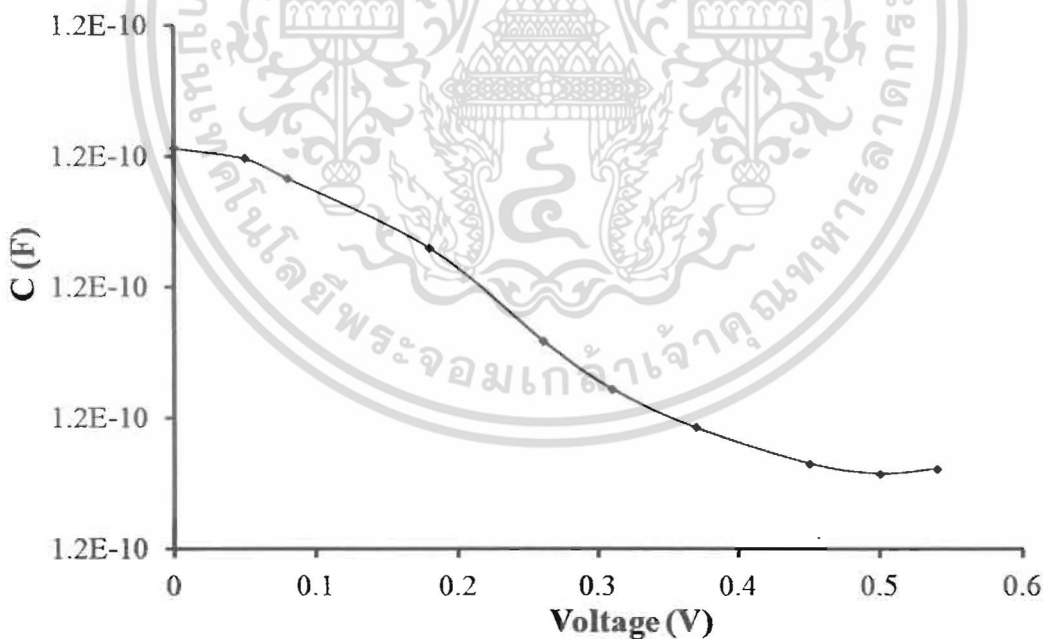


ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

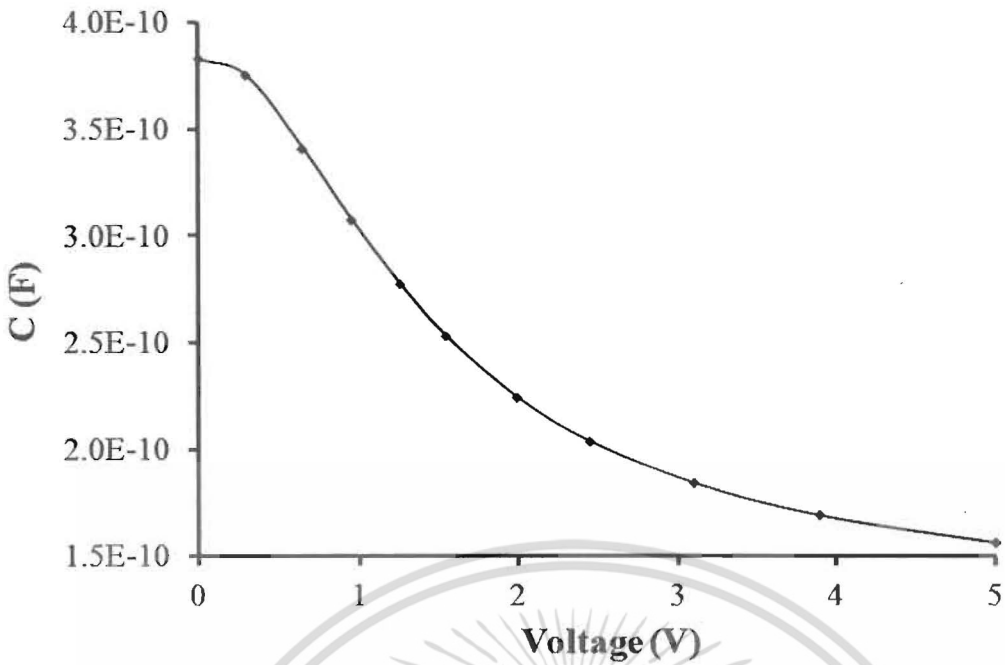


ภาพที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

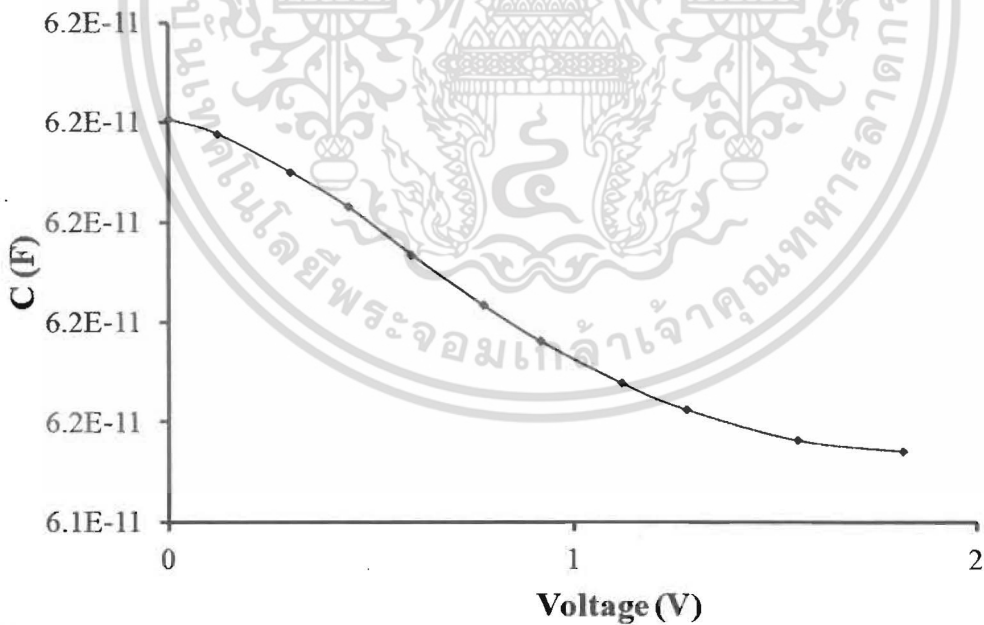


ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

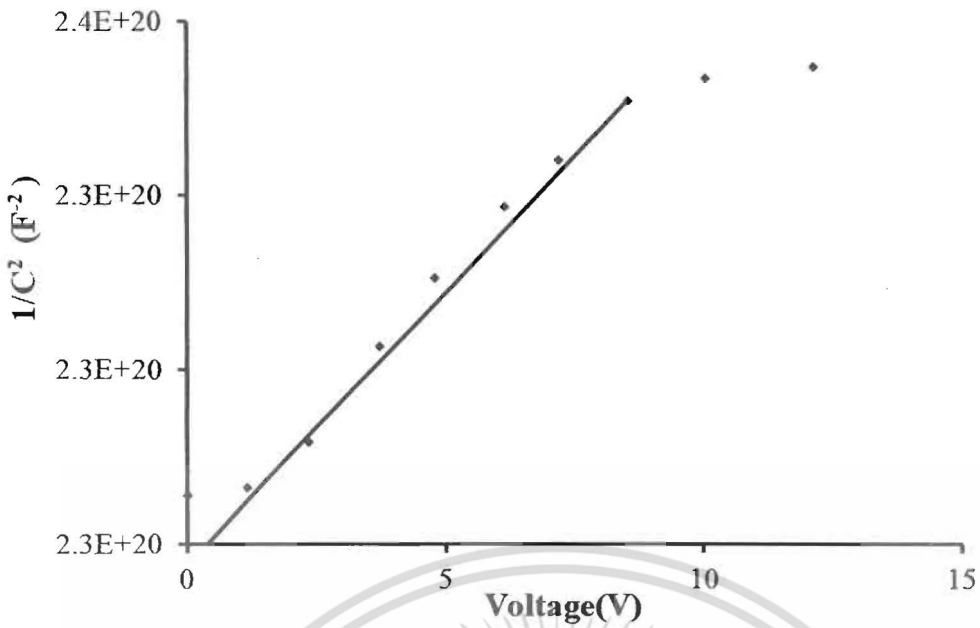


ภาพที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

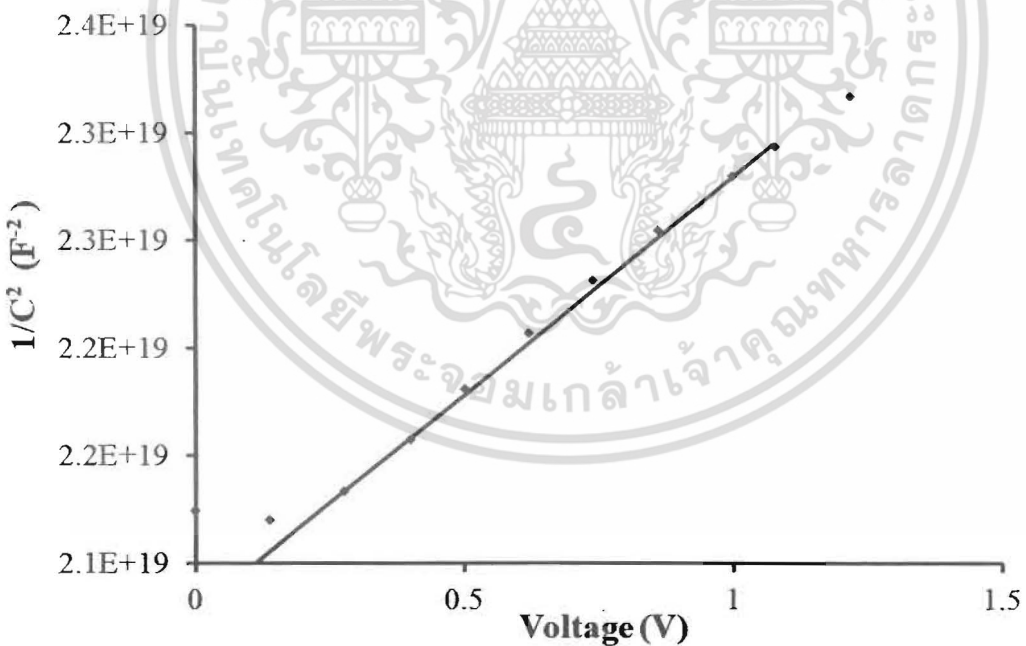


ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 900 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

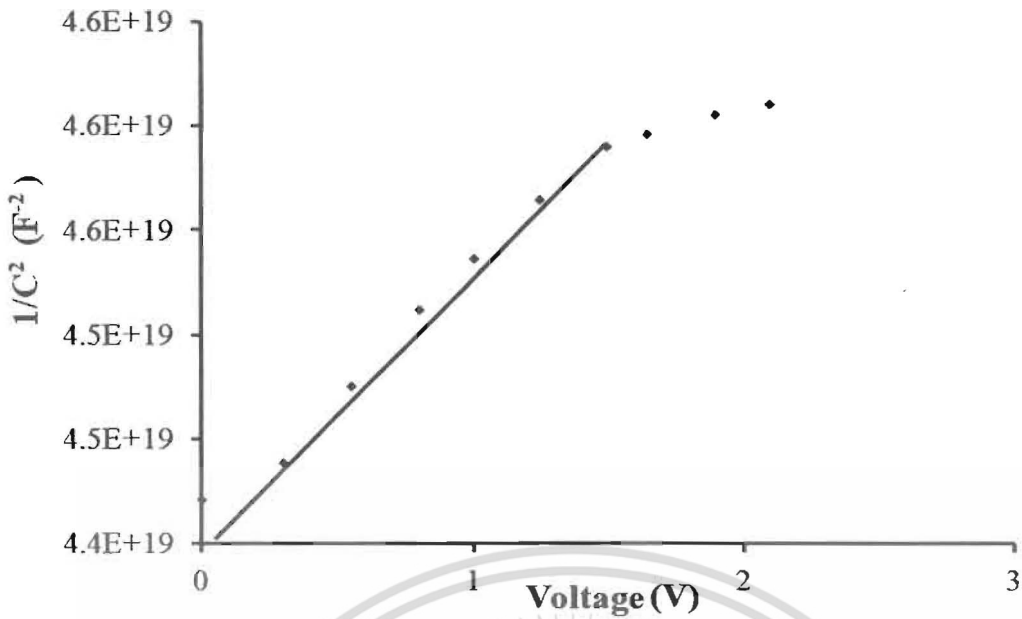


ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

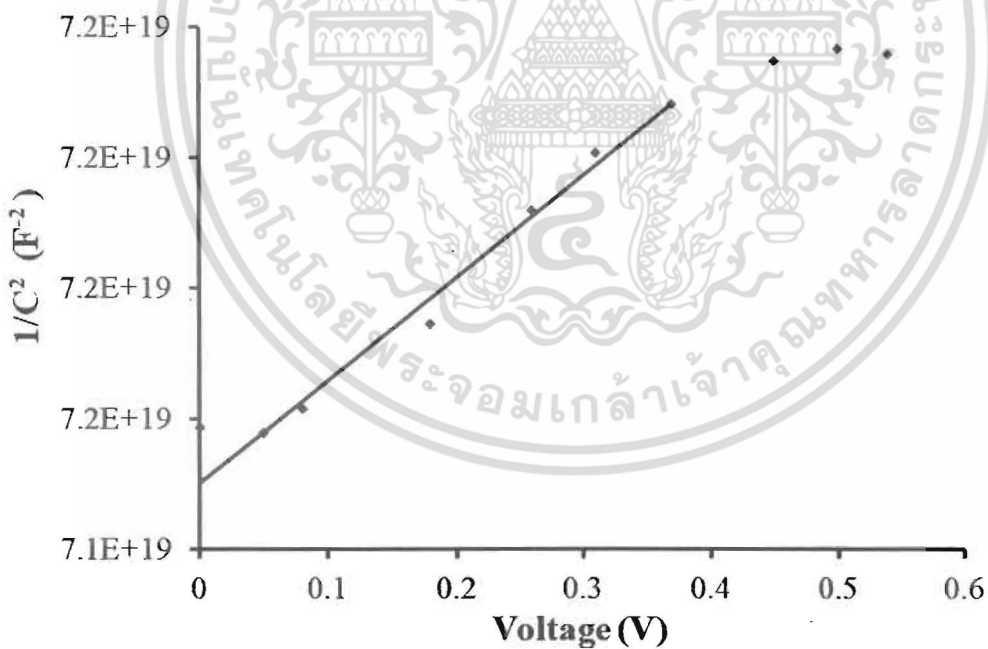


ภาพที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

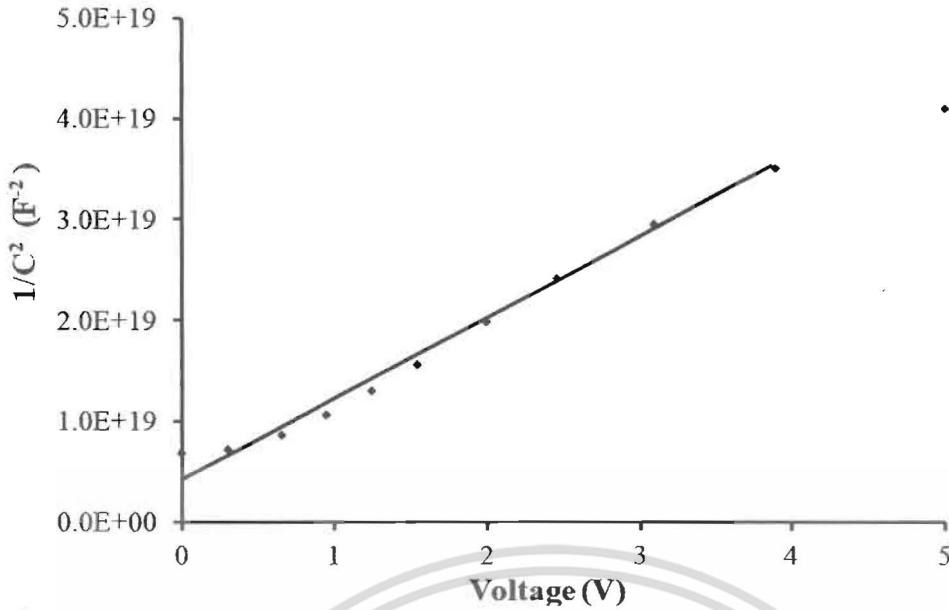


ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

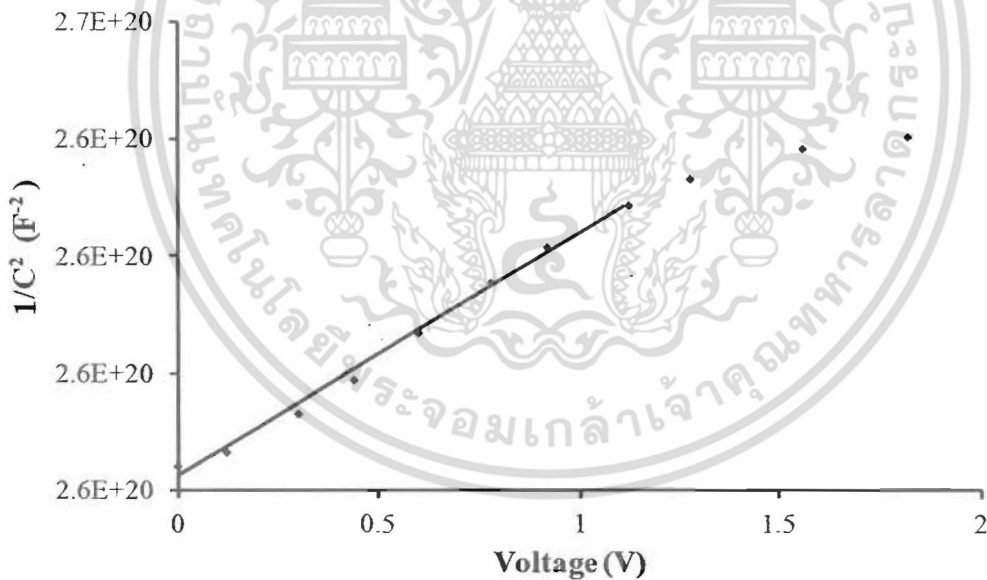


ภาพที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



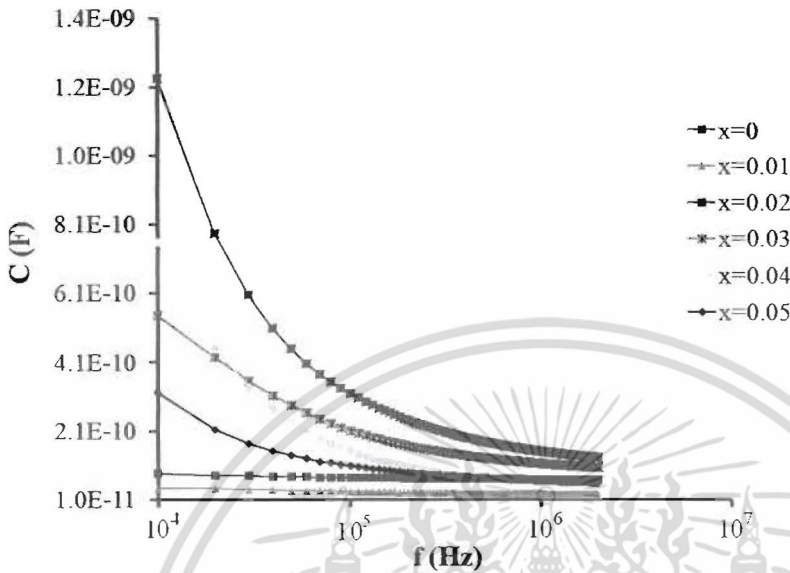
ภาพที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



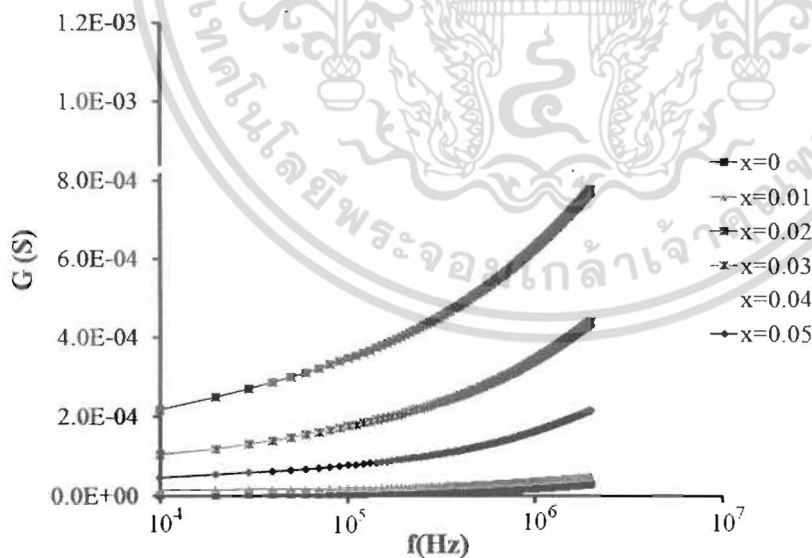
ภาพที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องเพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติทางอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



ภาพที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

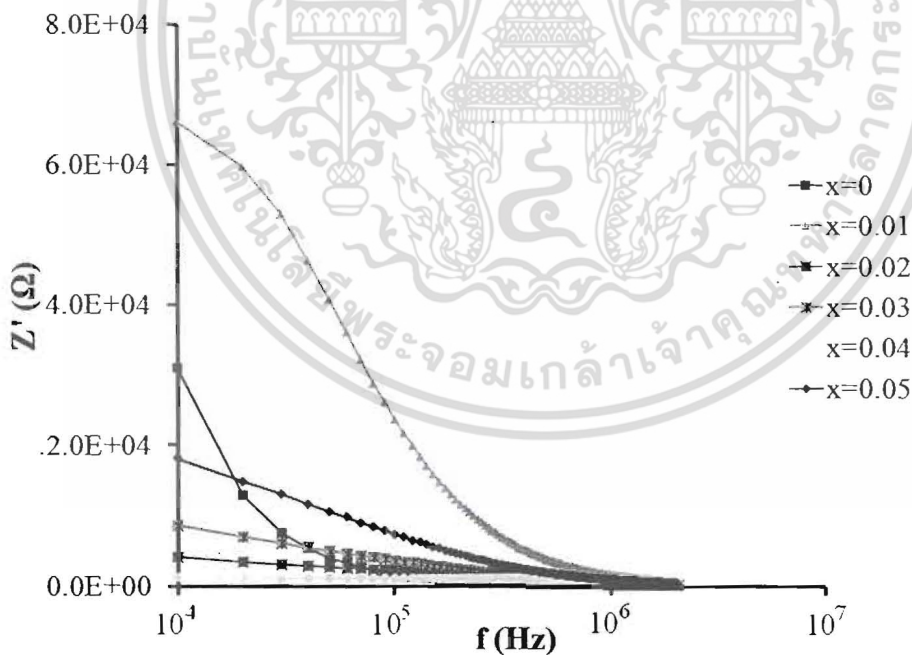


ภาพที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ - 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

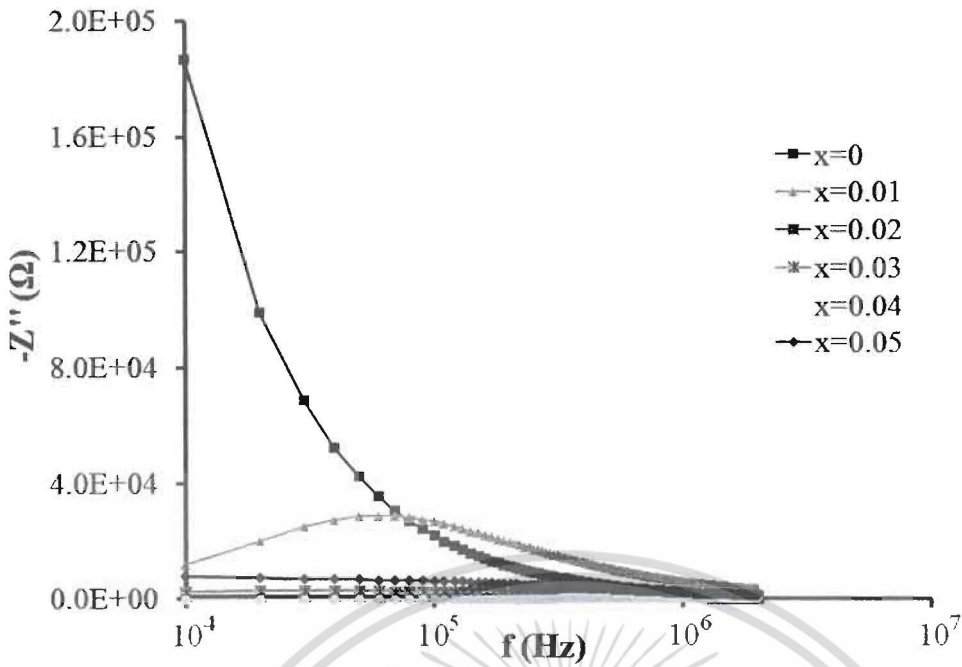


ภาพที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียความเป็นไดอิเล็กตริกกับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

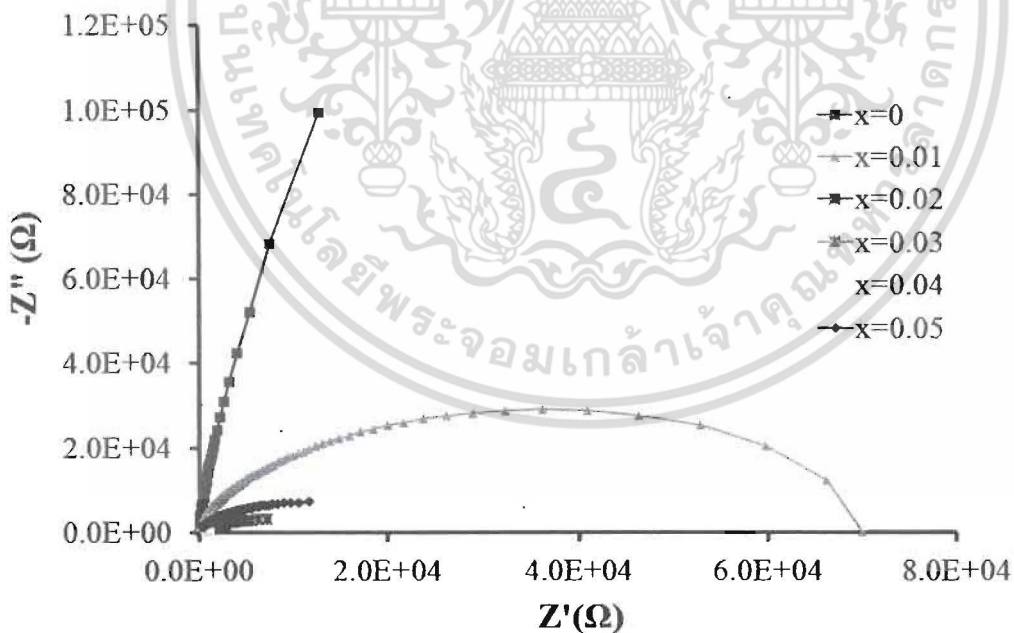


ภาพที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ – 2 เมกกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



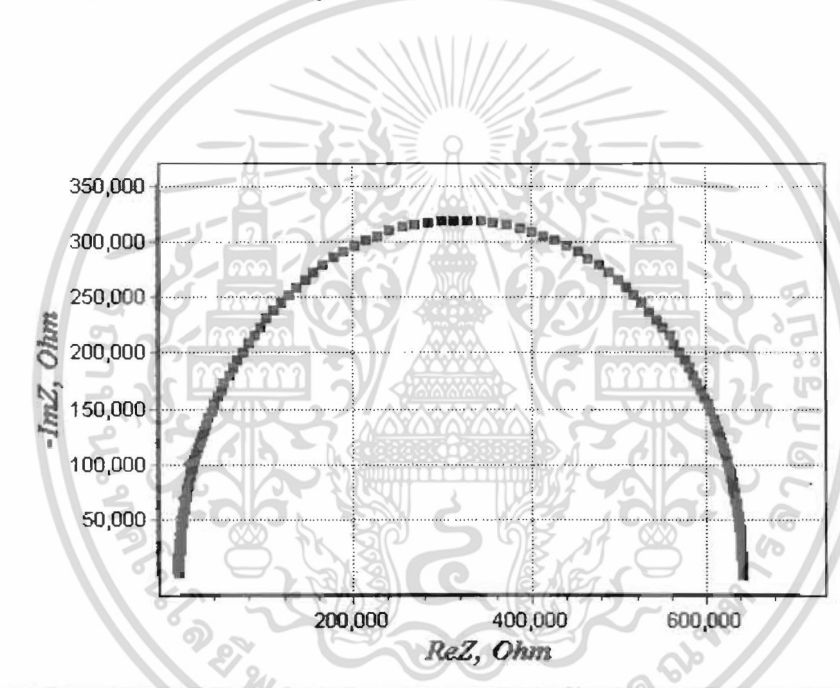
ภาพที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกส์ที่ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

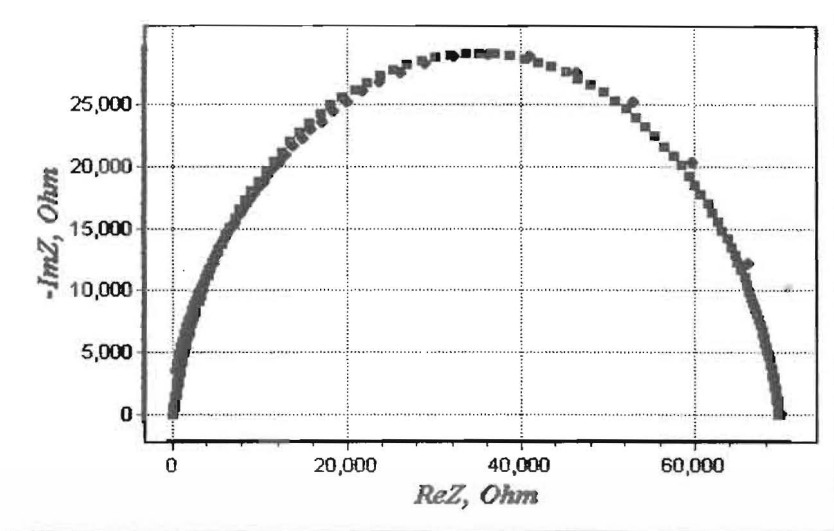
4.3.4 ผลการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 < x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



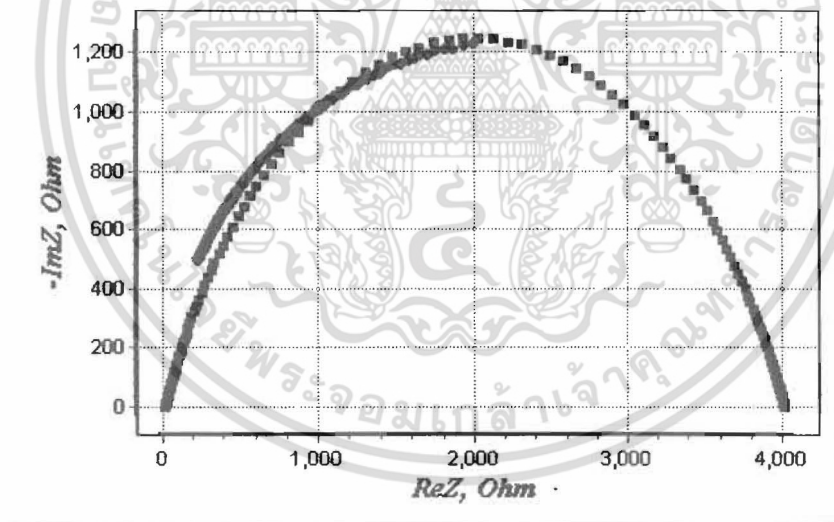
ภาพที่ 4.36 แสดงวงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน



ภาพที่ 4.37 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

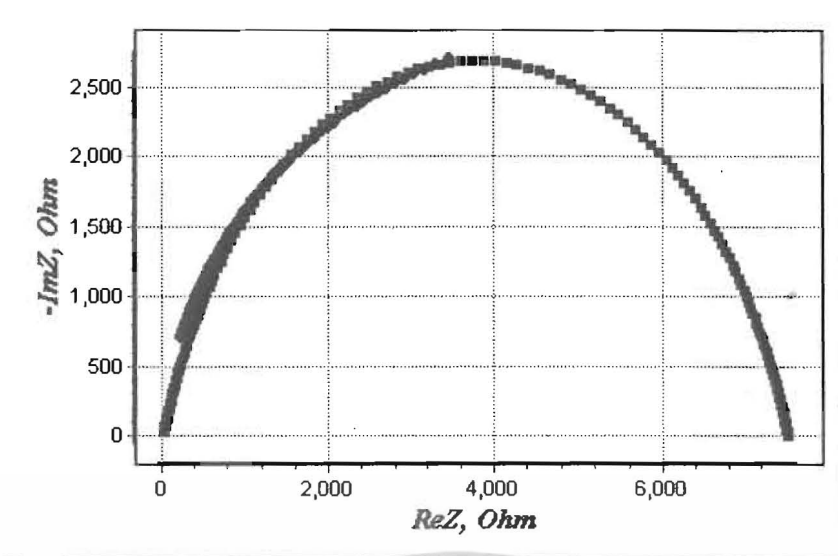


ภาพที่ 4.38 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.01$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

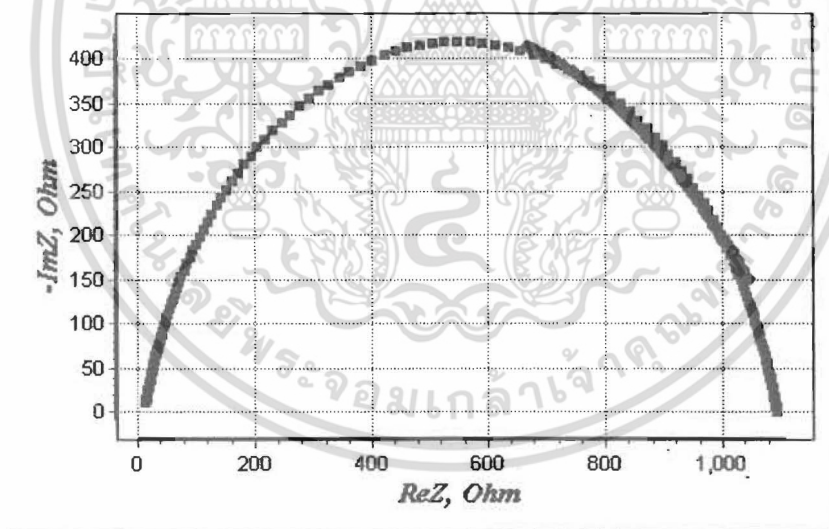


ภาพที่ 4.39 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.02$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

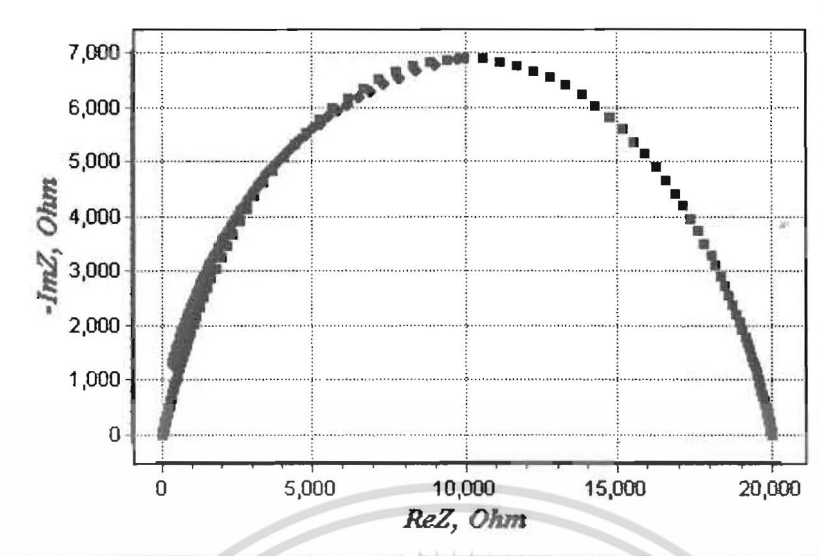


ภาพที่ 4.40 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.03$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



ภาพที่ 4.41 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.04$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.42 แสดงการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 < x < 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x) of In_xWO_3	Parameters				
	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$C_p(\text{pF})$	$f_{\max}(\text{Hz})$	$\omega_{\max} R_p C_p$
0	200	640000	1.13	20020	0.91
0.01	80	69500	4.04	60019	1.05
0.02	10	4000	31.20	120020	0.94
0.03	20	7500	17.20	110000	0.90
0.04	30	1070	8.73	1950000	1.14
0.05	100	20000	15.00	60019	1.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ในการศึกษาสภาพไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสขาลง ทั้งกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงจะเป็นไปดังสมการ

$$I = I_0(1 - e^{-t/\tau_r}) \quad (4.2)$$

$$I = I_0 e^{-t/\tau_d} \quad (4.3)$$

ส่วนใหญ่พบว่าเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงจะเขียนอยู่ในรูปมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ดังสมการ

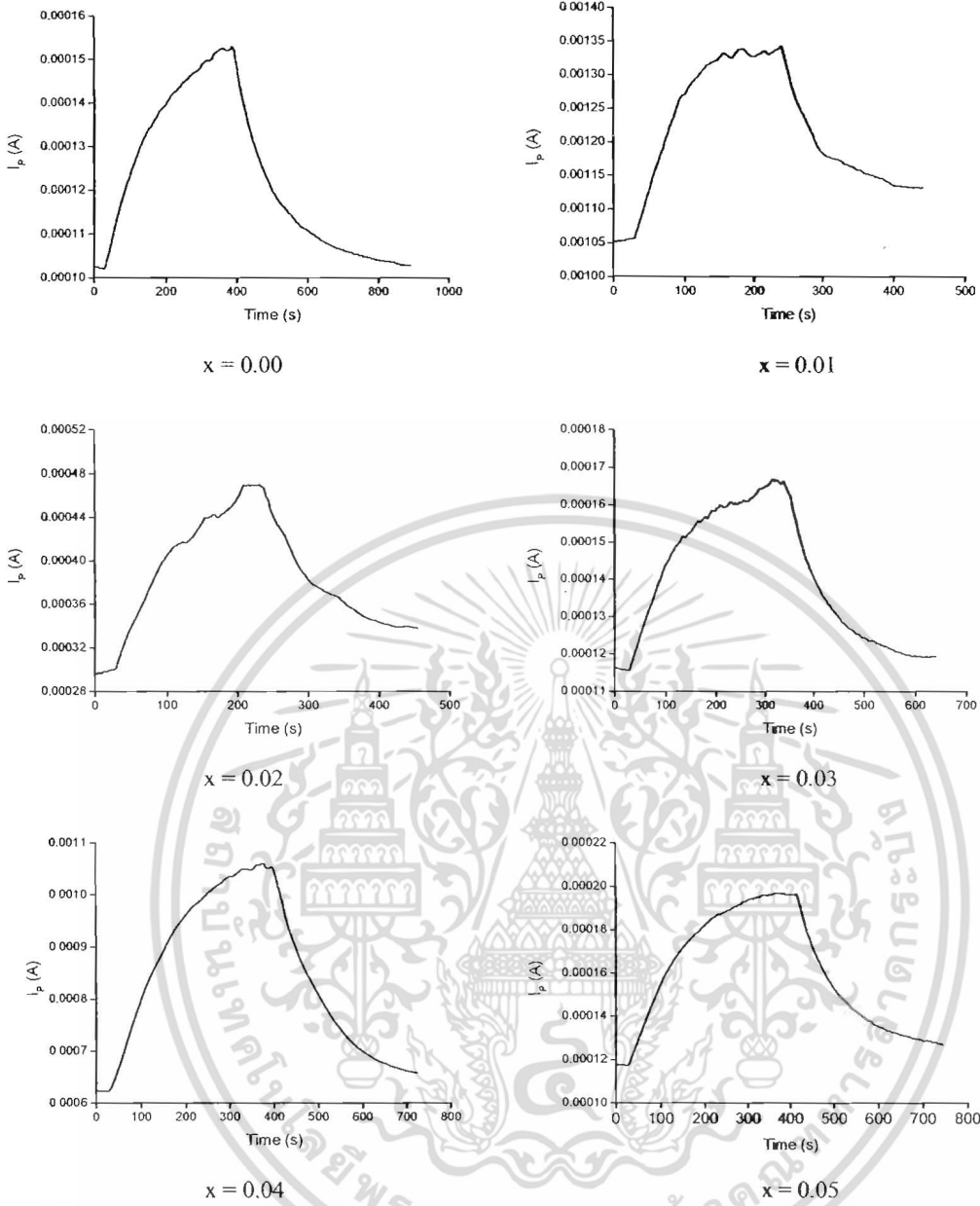
$$I = \sum_1^{n-1} A_{n-1} [1 - \exp(-t/\tau_{r(n-1)})] + A_n [1 - \exp(-(t/\tau_r)^\beta)] \quad (4.4)$$

$$I = \sum_1^{n-1} A_{n-1} [\exp(-t/\tau_{d(n-1)})] + A_n [\exp(-(t/\tau_d)^\beta)] \quad (4.5)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรันแสดงในตารางที่ 4.5 และสามารถหาค่าความหนาแน่นของประจุ ตามตารางที่ 4.6 จากสมการ

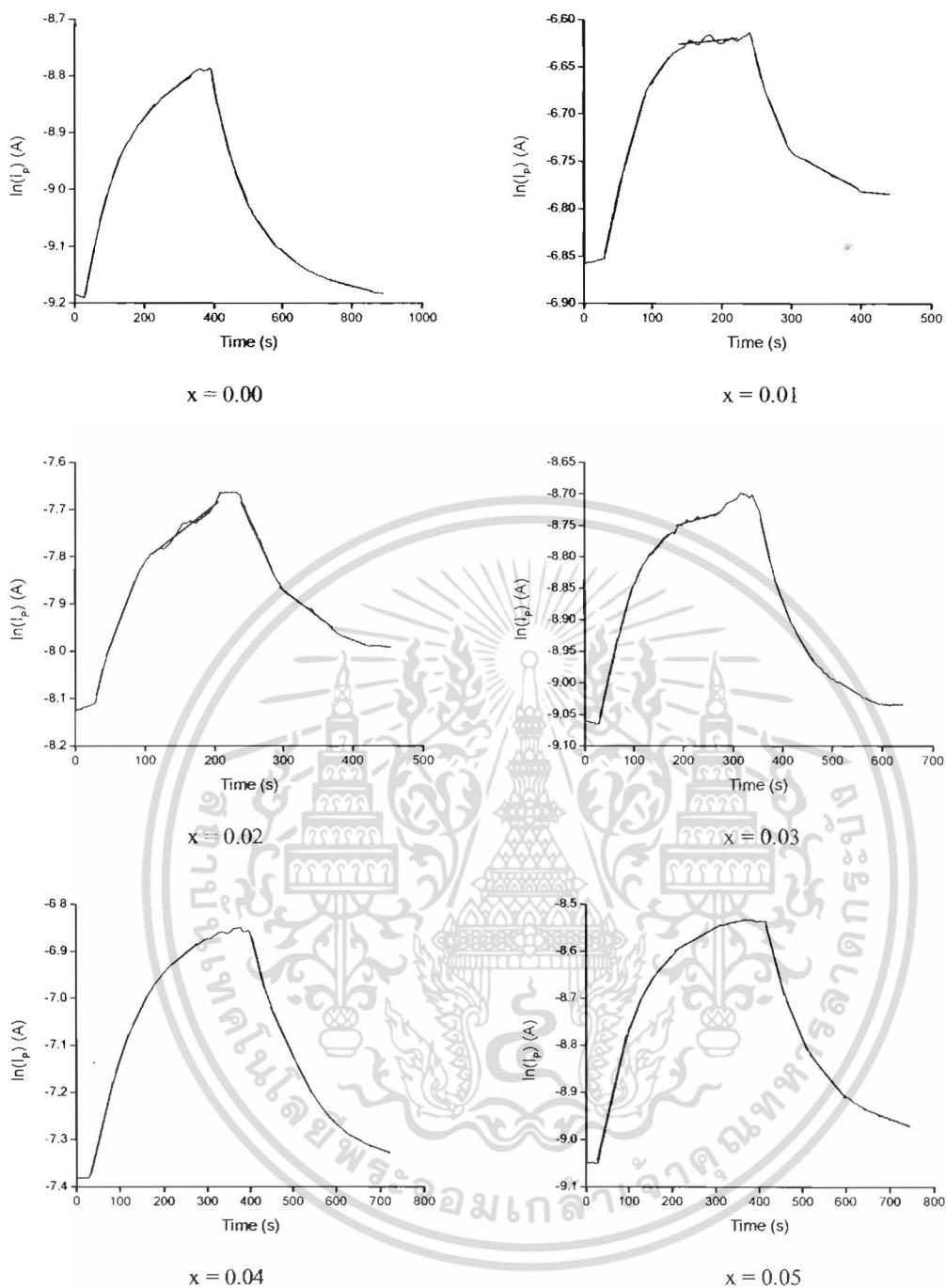
$$N_i = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



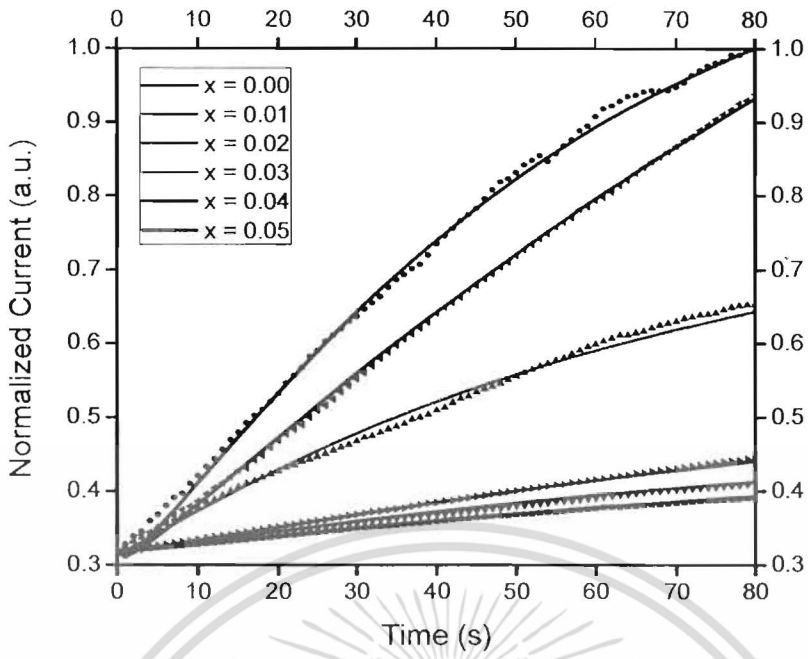
ภาพที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโตกับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

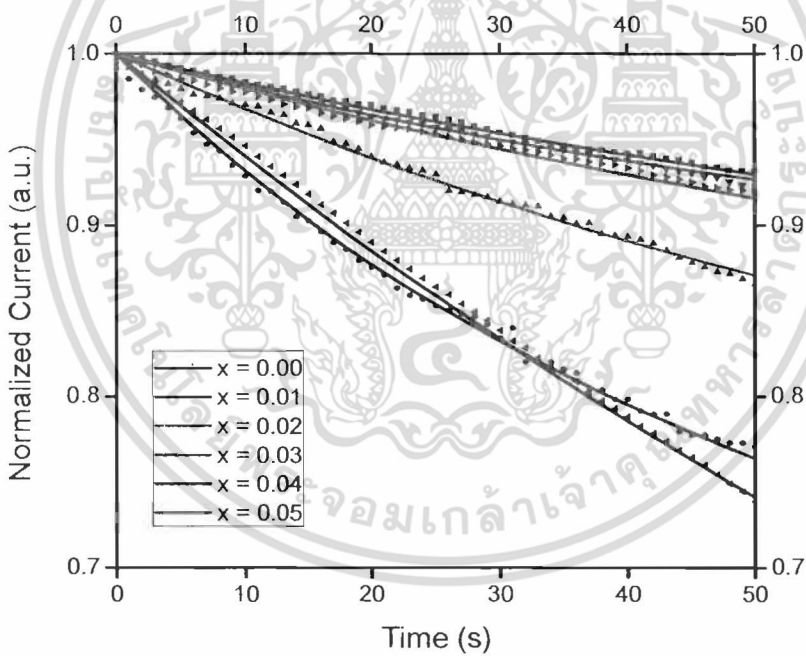


ภาพที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงสีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัต ไดซ์กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ก. กรณีขาขึ้น

ข. กรณีขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ันของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการ เป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

Composition (x)	Rise Time (s)					Decay Time (s)					
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
0.00	$\tau_{r1} = 256.41$ $A_1 = 45.47$	$\tau_{r2} = 321.54$ $A_2 = -162.3$	$\tau_{r3} = 598.80$ $A_3 = 168.2$	$\tau_{r4} = 1233.19$ $A_4 = -60.81$	$\tau_{r5} = 2075.24$ $A_5 = -0.1162$ $\beta = 0.4717$	$\tau_{d1} = 281.69$ $A_1 = 41.28$	$\tau_{d2} = 425.53$ $A_2 = -321.4$	$\tau_{d3} = 649.35$ $A_3 = 467.5$	$\tau_{d4} = 1225.51$ $A_4 = -224.9$	$\tau_{d5} = 1924.07$ $A_5 = 38.34$	$\tau_{d6} = 057.56$ $A_6 = 0.1512$ $\beta = 0.4296$
0.01	$\tau_{r1} = 312.50$ $A_1 = 18.15$	$\tau_{r2} = 386.10$ $A_2 = -20.18$	$\tau_{r3} = 943.39$ $A_3 = -1.084$ $\beta = 0.7780$	-	-	$\tau_{d1} = 328.95$ $A_1 = 66.78$	$\tau_{d2} = 480.77$ $A_2 = 871.4$	$\tau_{d3} = 510.20$ $A_3 = -910.6$	$\tau_{d4} = 2515.29$ $A_4 = -47.38$	$\tau_{d5} = 13518.48$ $A_5 = 20.76$ $\beta = 0.8237$	-
0.02	$\tau_{r1} = 161.03$ $A_1 = 10.54$	$\tau_{r2} = 261.09$ $A_2 = -30.1$	$\tau_{r3} = 454.55$ $A_3 = 26.45$	$\tau_{r4} = 862.07$ $A_4 = -1.744$ $\beta = 0.8284$	-	$\tau_{d1} = 314.47$ $A_1 = -0.8862$	$\tau_{d2} = 892.86$ $A_2 = 18.54$	$\tau_{d3} = 1682.03$ $A_3 = -35.64$	$\tau_{d4} = 7592.89$ $A_4 = 19.01$ $\beta = 0.8106$	-	-
0.03	$\tau_{r1} = 294.99$ $A_1 = -2385$	$\tau_{r2} = 364.963$ $A_2 = 6773$	$\tau_{r3} = 523.56$ $A_3 = -7279$	$\tau_{r4} = 1112.59$ $A_4 = 3819$	$\tau_{r5} = 4253.17$ $A_5 = 0.2514$ $\beta = 0.4899$	$\tau_{d1} = 284.900000000$ $A_1 = 17.31$	$\tau_{d2} = 476.19$ $A_2 = -71.34$	$\tau_{d3} = 746.27$ $A_3 = 76.16$	$\tau_{d4} = 2045.60$ $A_4 = -23.37$	$\tau_{d5} = 3027.06$ $A_5 = 2.241$ $\beta = 0.7819$	-
0.04	$\tau_{r1} = 263.16$ $A_1 = 10.17$	$\tau_{r2} = 352.11$ $A_2 = -20.34$	$\tau_{r3} = 520.83$ $A_3 = 14.5$	$\tau_{r4} = 1321.31$ $A_4 = -5.151$ $\beta = 0.8950$	-	$\tau_{d1} = 285.71$ $A_1 = -0.3151$	$\tau_{d2} = 497.51$ $A_2 = 19.46$	$\tau_{d3} = 568.18$ $A_3 = -21.32$	$\tau_{d4} = 2016.47$ $A_4 = 0.6897$	$\tau_{d5} = 3045.90$ $A_5 = 2.489$ $\beta = 0.7427$	-
0.05	$\tau_{r1} = 256.41$ $A_1 = -50.44$	$\tau_{r2} = 427.35$ $A_2 = 491.7$	$\tau_{r3} = 641.03$ $A_3 = -1125$	$\tau_{r4} = 970.87$ $A_4 = 780.9$	$\tau_{r5} = 1898.20$ $A_5 = -0.2733$ $\beta = 0.6255$	$\tau_{d1} = 240.38$ $A_1 = 41.28$	$\tau_{d2} = 363.63$ $A_2 = -321.4$	$\tau_{d3} = 462.96$ $A_3 = 467.5$	$\tau_{d4} = 719.42$ $A_4 = -224.9$	$\tau_{d5} = 2084.63$ $A_5 = 38.34$	$\tau_{d6} = 149.66$ $A_6 = 0.1512$ $\beta = 0.4296$

ตารางที่ 4.6 แสดงความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือ
 รั้นของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธี
 ปฏิกริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

position (x)	Decay Component											
	1 st Term		2 nd Term		3 rd Term		4 th Term		5 th Term		6 th Term	
	I_0 (A) (10^{-4})	N_{II} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{II} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{II} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{II} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{II} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{II} (cm^{-3}) (10^{12})
0.00	1.50	11.95	1.47	11.73	1.41	11.22	1.30	10.34	1.23	9.81	1.11	8.86
0.01	13.30	105.90	13.12	104.45	13.10	104.34	12.08	96.19	11.45	91.12	-	-
0.02	4.59	36.56	4.09	32.57	3.78	30.09	3.84	27.71	-	-	-	-
0.03	1.60	12.77	1.54	12.30	1.47	11.72	1.34	10.63	1.29	10.28	-	-
0.04	10.36	82.51	9.80	78.03	9.55	76.04	7.63	60.77	7.29	58.06	-	-
0.05	1.91	15.23	1.86	14.85	1.81	14.41	1.69	13.79	1.47	11.67	1.41	11.21

***หมายเหตุ N_t สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ $N_t = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right)$

แรงดันไฟฟ้า (V_a) = 2 โวลต์

สภาพคล่องพาหะ(μ) ของ $In_xW_{1-x}O_3 = 10$ ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)

พื้นที่หน้าตัด(wd) = $\pi r^2 = \pi(0.5)^2$ ตารางเซนติเมตร

ความหนาของเม็ดเซรามิก = 0.2 เซนติเมตร

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย In_2O_3 โดยสัดส่วนของสารตั้งต้นคือ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก WO_3 และ In_2O_3 ความบริสุทธิ์สูงโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่ อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในอากาศเม็ดเซรามิก ของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่ไม่ได้เจือ In_2O_3 มีสีเขียวอ่อนและมีความแข็ง แต่สีของเม็ดเซรามิกจะมีแนวโน้มเป็นสีเขียวเข้มขึ้นตามปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่ไม่ได้เจือและที่เจือด้วย In_2O_3 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิกโดยปรากฏระนาบ (022), (220), (202), (122), (222), (004), (040), และ (140) ตามลำดับ ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b, c มุม β และปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสารเจือ แต่สำหรับกรณีเม็ดเซรามิกที่มีปริมาณสารเจือ $x \geq 0.02$ จะปรากฏฟิสิกการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเฟส $In_2(WO_4)_3$ ผ่งร่วมอยู่ด้วย [Richard and Edwards, 2004] ซึ่งความเข้มของฟิสิกของเฟสผ่งนี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ x ที่เพิ่มขึ้น จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่ไม่ได้เจือด้วย In_2O_3 มีเกรนสองประเภทคือเกรนขนาดโตกับเกรนขนาดเล็ก เกรนขนาดโตมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร ส่วนเกรนขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 4 ไมโครเมตร แต่เมื่อมีการเจือด้วย In_2O_3 จะเกิดเกรนประเภทที่สามซึ่งมีขนาดเล็กมากในราว 1 ไมโครเมตรเกิดขึ้นโดยมักจะเกาะติดบนผิวของเกรนขนาดโตเสมอ และขนาดของเกรนประเภทที่สามนี้จะมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นตามปริมาณสารเจือ In_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันเกรนประเภทที่สองก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ส่วนเกรนประเภทที่หนึ่งกลับมีขนาดลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ $x \geq 0.03$ และเป็นที่น่าสังเกตว่าช่องว่างระหว่างเกรน (void) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ $x \geq 0.04$ และแทบไม่ปรากฏช่องว่างระหว่างเกรนเลยเมื่อปริมาณสารเจือ $x = 0.05$

จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) พบว่าเมื่อสัดส่วน โมล (x) เพิ่มขึ้นแล้วสภาพต้านทานไฟฟ้ามีขนาดลดลงจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ $x=0.04$ จากนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีก และจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าพบว่าสนามไฟฟ้าพังทลาย (E_p) และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (α) เมื่อสัดส่วน โมล (x) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลมาจากความสูงของกำแพงศักย์ (ϕ_b) มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วน โมล (x) เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระมีค่าอยู่

ในช่วง 2.54×10^{11} - 2.54×10^{12} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีที่บริเวณขอบของเกรนมีค่าอยู่ในช่วง 1.91×10^{10} - 6.68×10^{10} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากการศึกษาอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ในช่วง 100 เฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าในวงจรมมูลไม่ปรากฏว่ามีค่าความจุไฟฟ้าของขอบเกรนปรากฏอยู่อีกทั้งความสูงของขอบกำแพงศักย์ (ϕ_0) มีค่าค่อนข้างสูงดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในเม็ดเซรามิกเกิดจากกระแสอิเล็กตรอนไหลข้ามกำแพงศักย์ต่ำสุด ในกรณีที่สัดส่วนโมล $x=0.04$ จะมีค่ากำแพงศักย์และแรงดันพังทลายต่ำสุด จึงทำให้เม็ดเซรามิกที่มีสัดส่วน โมล $x=0.04$ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดด้วย และจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามแรงดันไฟฟ้า พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้คือ ความจุของเนื้อสารที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดสองอัน ไม่มีแรงดันตกคร่อมขอบของเกรนปรากฏขึ้นมา และกลไกการนำกระแสของอิเล็กตรอน อธิบายได้ดีด้วยกลไกของขอตติ่มากกว่า กลไกพอลิ-เฟรนเดิล

นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงช่วงขณะของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) พบว่ามีปรากฏการสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือร้อน กล่าวคือ ช่วงชีวิตของพาหะค่อนข้างยาว (ในระดับหลายร้อยวินาที) ซึ่งเป็นผลมาจากกัมมันตภาพรังสีมีการจับและปล่อยพาหะค่อนข้างช้ามาก ค่าช่วงชีวิตพาหะสามารถหาได้จากการพิดกราฟของผลการทดลอง โดยใช้มัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาคอร์รูชันโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ควรรับนที่การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 2 θ ในช่วง 20-60 องศา พิกซ์ของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เข้มที่สุดมักจะอยู่ที่มุม 2 θ ระหว่าง 20-30 องศา
2. จากการศึกษามบติทางอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนพบว่าผลการทดลองอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากอิเล็กโทรดที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกไม่เรียบสม่ำเสมอส่งผลให้มีประจุค้างระหว่างเนื้อสารกับอิเล็กโทรด
3. การศึกษาสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้ามีข้อจำกัดเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟให้แรงดันได้ไม่เกิน 110 โวลต์
4. ควรมีการศึกษามบติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุอื่นๆ เช่น Cd, Ti และ Al เป็นต้น
5. การวัดคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า ควรรีบทำให้เร็วที่สุดหลังจากเตรียมสารตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว เพื่อลดผลกระทบจากข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏบนผิวหน้าที่สัมผัสกับอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

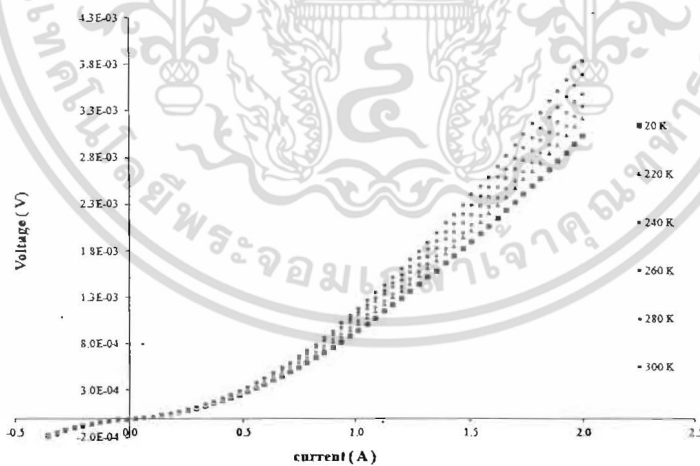
บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

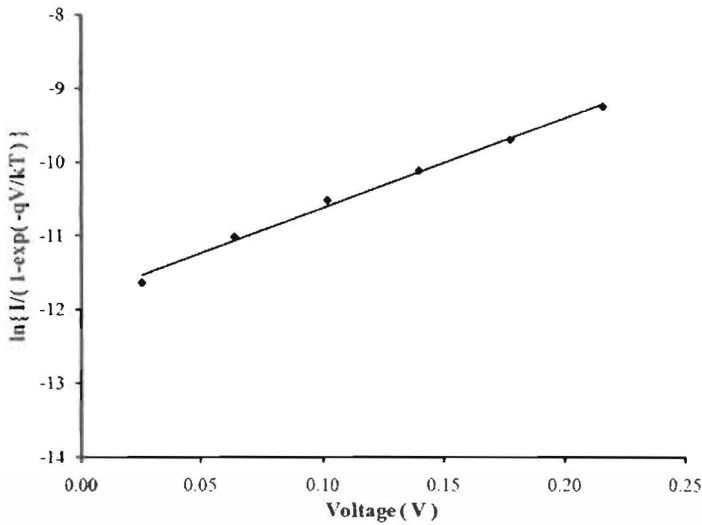
6.1 ชื่อบทความวิจัย “Fabrication and Electrical Characterization of ZnTe/WO₃:In Heterojunction”
Proceeding in The 39th Congress on Science and Technology of Thailand (STT 39) “*Innovative Science for a Better Life*” 21st-23rd October 2013, Bangkok International Trade & Exhibition Centre (BITEC) Bangkok, Thailand. โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

การประยุกต์เซรามิก WO₃:In ให้เป็นสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ZnTe ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศให้เคลือบบนเซรามิก WO₃:In จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 2.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังภาพที่ 6.1 และค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิตกลงตั้งแต่ 0.7 – 1.0 โวลต์

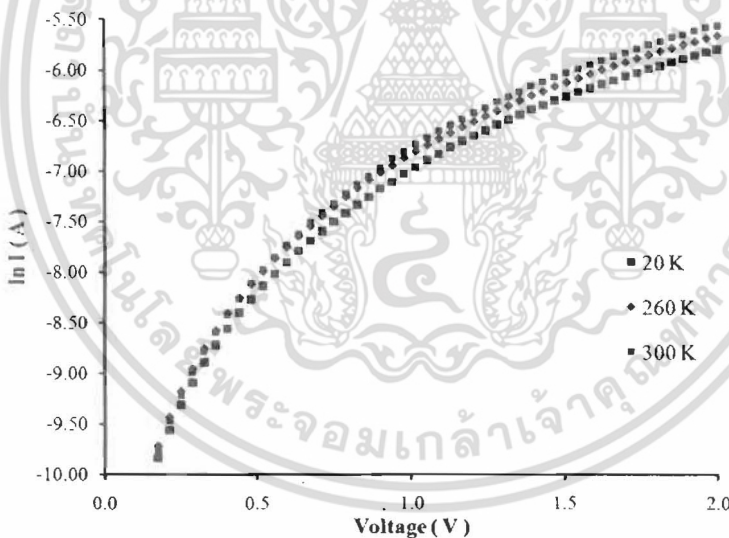


ภาพที่ 6.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

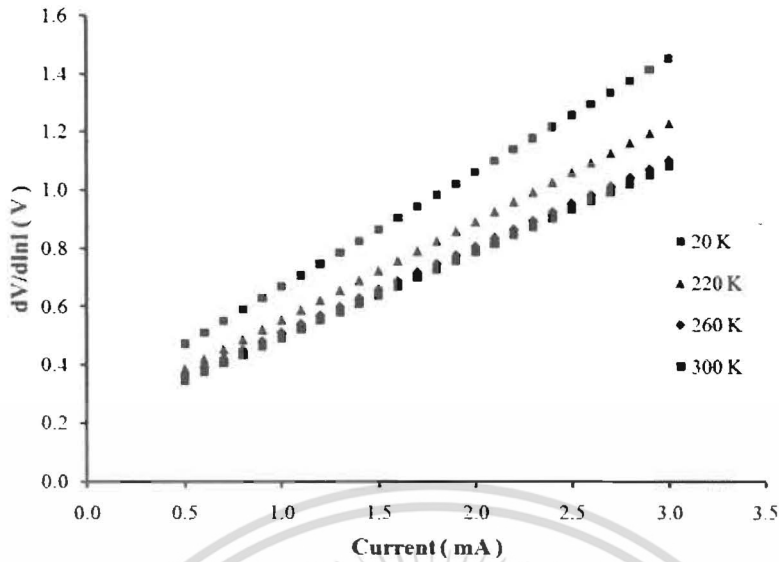


ภาพที่ 6.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\{I/(1-\exp(-qV/(kT)))\}$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

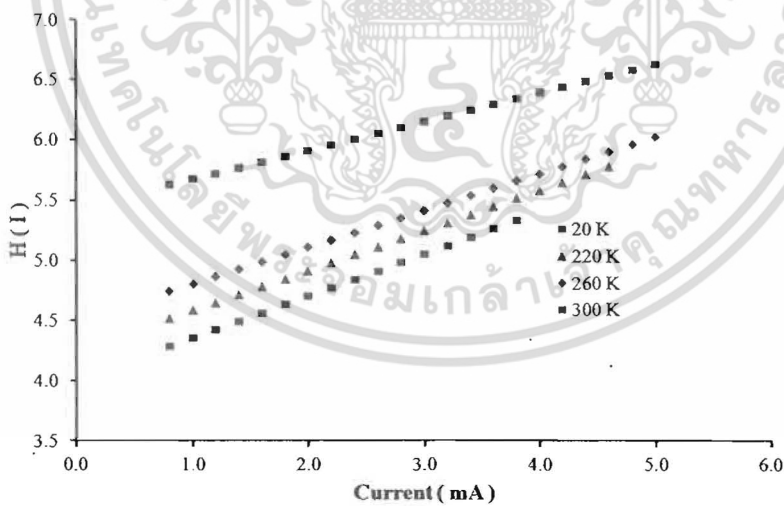


ภาพที่ 6.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dI กับกระแสไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



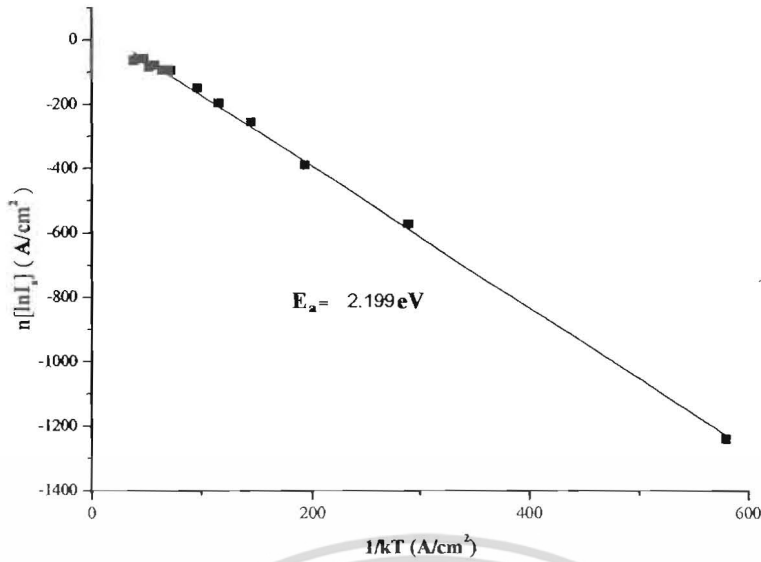
ภาพที่ 6.5 แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{B0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

T (K)	I_s ($\times 10^{-5}$ A)	Ideality Factor		Barrier Height (eV)		Series Resistance (Ω)	
		I-V	$\left(\frac{dV}{d \ln I}\right) - I$	I-V	H(I) - I	H(I) - I	$\left(\frac{dV}{d \ln I}\right) - I$
20	1.02	107.787	130.002	0.031	0.032	396.770	389.460
40	1.12	50.235	70.261	0.067	0.063	388.550	382.248
60	1.14	34.301	47.013	0.104	0.105	381.248	368.090
80	1.15	22.405	35.260	0.143	0.138	378.513	365.323
100	1.22	17.310	28.208	0.182	0.174	365.285	361.042
120	1.27	13.181	23.507	0.222	0.219	358.067	354.616
140	1.29	8.775	20.149	0.263	0.252	354.372	353.813
160	1.35	9.589	17.630	0.304	0.292	353.373	352.269
180	1.36	8.385	15.738	0.346	0.328	338.416	338.549
200	1.38	7.084	10.647	0.388	0.497	333.069	336.263
220	1.40	7.563	9.583	0.430	0.546	328.273	327.532
240	1.47	5.280	8.962	0.472	0.464	319.926	309.367
260	1.48	5.410	7.916	0.515	0.540	316.633	302.596
280	1.58	5.425	7.793	0.558	0.547	305.201	275.527
300	1.65	5.837	6.528	0.602	0.636	276.789	228.379

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.6 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับมีเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิต์ชันและวิธีของชาวกลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ไปเทียบกับสมการ 6.1 เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการชูดอโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) มีค่าเท่ากับ 0.206 อิเล็กตรอนโวลต์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (6.1)$$

และจากทฤษฎีเทอร์มิออนิกฟิลด์อิมิต์ชันจะได้ว่า

$$E_{00} = \frac{q\hbar}{2} \left[\frac{N_D}{m^* \epsilon_S} \right] \quad (6.2)$$

สามารถที่จะคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการ

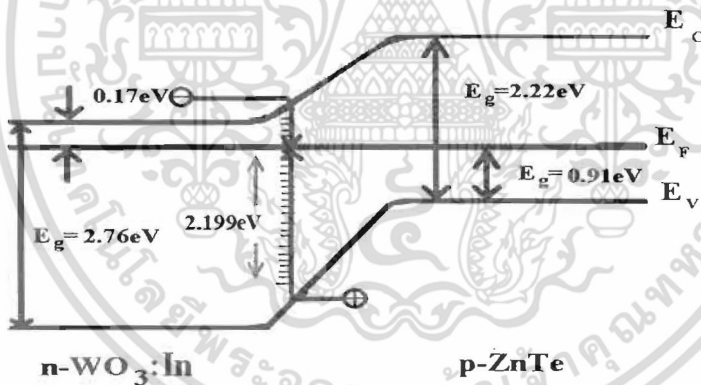
$$n \ln(J_0) = \frac{-E}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (6.3)$$

และจากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 6.6 จะทำให้ทราบถึงค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In มีค่าเท่ากับ 2.199 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วน E_{00} ที่คำนวณได้มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงกว่า 25 มิลลิว็อลต์ แสดงว่าที่อุณหภูมิตำานั้นกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮล โดคเด่นกว่ากลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน จากนั้นโฮลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันที่สถานะผิวเชื่อมต่อบริเวณพร่องพาหะ

การที่ค่าแฟกเตอร์อุณหคณิตและค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเนื่องจากใช้วัฏจักรแสงไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะกระตุ้นพาหะอิสระให้มีพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปหน้าพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มากและค่าแฟกเตอร์อุณหคณิตที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสข้างหน้าให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะ โดคเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะลดความ โดคเด่นลง และในทางกลับกัน กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะ โดคเด่นมากขึ้น จึงเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุณหคณิต (n) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันน้อยลง



ภาพที่ 6.7 แสดงแผนภาพการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลแล้วเกิดการรวมตัวของโฮลกับอิเล็กตรอนที่บริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ภาพที่ 6.8 แสดงผลของการศึกษาค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 1 โวลต์ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ภายใต้อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อแรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันเมื่อมีการไบแอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อนกลับมากขึ้น และสำหรับกรณีไบแอสไปหน้าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อ พี-เอ็นหายไปชั่วคราว

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของภาพที่ 6.8 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้า จะสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ได้จากสมการดังนี้

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{\epsilon_s q N_A A^2} \right) \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (6.4)$$

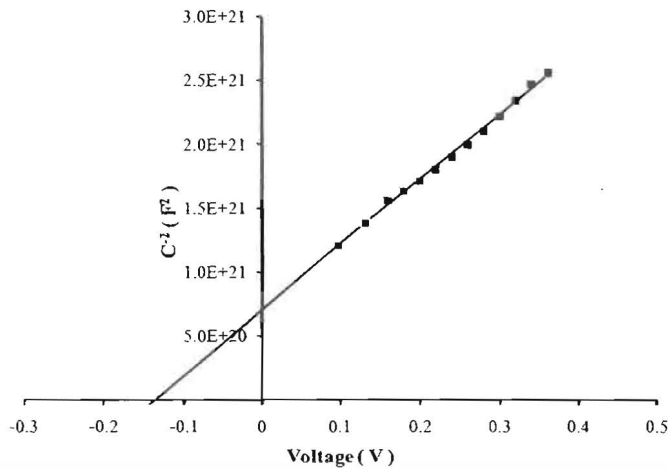
โดยจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6.4) จะเลือกเอาส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสแรงดันย้อนกลับตั้งแต่ -1 ถึงช่วง 0.3 โวลต์โดยประมาณ แล้วทำการลากเส้นตรงจนตัดผ่านแกน x จะทำให้ได้ค่า V_i แล้วนำมาหาศักย์ตกคร่อมรอยต่อจากความสัมพันธ์

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (6.5)$$

ส่วนความหนาแน่นของอะตอมผู้รับมีค่าเท่ากับ 6.87×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถคำนวณหาได้จากความชันของสมการที่ (6.4) คือ

$$\text{ความชัน} = \frac{2}{q \epsilon_s N_A A^2} \quad (6.6)$$

เมื่อ ϵ_s คือเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ สำหรับกรณีของสารกึ่งตัวนำ ZnTe จะมีค่า $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$ โดยที่ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.67



ภาพที่ 6.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-ZnTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

6.2 ชื่อบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ “Influence of In_2O_3 on the microstructure and electrical properties of WO_3 -based varistor” ดังมีรายละเอียดดังนี้

Abstract

In_2O_3 -doped WO_3 ceramics were fabricated by solid state reaction at $1,000^\circ\text{C}$ for 48 h. The crystal structure of In_2O_3 -doped WO_3 samples belongs to monoclinic along with small amount of $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ phase. From SEM micrographs, the grain size slightly increases when the amount of In_2O_3 in WO_3 samples increases. The breakdown voltage decreases with increasing In_2O_3 concentration from 0 to 4 mol %, and then increases when the concentration of In_2O_3 above 4 mol%. The defects in crystal lattice due to In_2O_3 addition were proposed to explain the nonlinear electrical behavior of In_2O_3 -doped WO_3 ceramics. WO_3 ceramic doped with In_2O_3 is a new kind of low voltage capacitor-varistor material.

Introduction

Varistors are electronic ceramic devices that show nonlinear electrical properties. They are widely used to protect electrical and electronic equipments against transient voltage surge. A typical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

example of varistor is ZnO doping small amount of Bi₂O₃ and other metal oxides that play a dominant role in either practical applications or physical interest. WO₃ has received much attention because of its potential for many applications, such as electrochromic devices, gas sensor and varistors [1]. Makarov and Trontelj [2] first reported that NaCO₃ and MnO₂-doped WO₃ ceramics exhibited nonlinear current-voltage characteristics with low breakdown voltage. Moreover, the permittivity of WO₃ is high [3]. It implied that WO₃ is a good candidate for capacitor-varistor with low breakdown voltage. Recently, WO₃ ceramics doped with Tb₄O₇ displayed improved nonlinear electrical characteristics at high temperature [4]. Many kinds of doping materials such as Y₂O₃ [5], La₂O₃ [6], Dy₂O₃ [1], Co₂O₃ [7] and Pr₆O₁₁ [8] were doped in WO₃ ceramics exhibiting varistor behavior with a low linear coefficient value. Considering both low nonlinear coefficient and high dielectric constant, they can be suitable to a new kind of low voltage varistor- capacitor material. Therefore, it is possible to improve the varistor properties of sintered WO₃ ceramics by doping another oxide. The purpose of the present work is to investigate the influence of In₂O₃ on the microstructure and electrical properties of WO₃-based varistor.

Experimental

The starting materials in the present work were analytical grades of In₂O₃ (99.99%) and WO₃ (99%). The composition investigated were (1-x)WO₃+xIn₂O₃, where x=0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 and 0.05 mol. The starting materials were weighed and blended for 2 h using an agate mortar. The mixed powders were then pressed at 100 MPa to form pellet 10 mm in diameter and 2 mm in thickness. The pellets were then sintered at 1000°C in air for 24 h. The heating rate was fixed at 100°C/h. The crystal structure of samples was checked by reading X-ray diffraction patterns on a powder X-ray diffractometer using CuK_α radiation ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$). The current- voltage (I-V) characteristic curves were measured by using a computer interfaced Keithley 236 current/voltage source. The capacitance- voltage (C-V) measurements were carried out by Agilent E4980A Precision LCR meter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The origin of the varistor action can be attributed to the existence of double Schottky barriers at the grain boundaries and the barrier height depends on the concentration of the oxygen adsorbed on the grain surface occurring interface states. The nonlinear coefficient (α) of the varistor was obtained by the following equation

$$\alpha = \frac{\log J_2 - \log J_1}{\log E_2 - \log E_1}$$

where V_1 is the voltage corresponding to $J_1 = 1 \text{ mA/cm}^2$ and V_2 to $J_2 = 10 \text{ mA/cm}^2$, respectively. The breakdown voltage (E_b) defined as the field density at current density attains 1 mA/cm^2 . The barrier voltage is defined by $V_b = E_b d$ when d is the grain size. The leakage current density (J_L) was measured at $0.8E_b$. The capacitance-voltage (C-V) was performed with Agilent E4980A Precision LCR meter at 1 MHz. According to the Schottky barrier model and the obtained parameters from C-V curves such as density of donor (N_d), barrier height (Φ_b), density of interface states (N_i) and depletion layer width (t) were determined. The N_d and Φ_b were calculated from the slope and the intercept of straight line plot of the following equation

$$\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{2C_0} \right)^2 = \frac{2(\phi_b - V_{gb})}{q\epsilon_s N_d A^2}$$

where C_0 is the capacitance value at zero bias voltage and V is applied voltage. Density of interface states (N_i) and depletion layer width (t) were determined by following equations

$$N_i = \left(\frac{2\epsilon_s N_d \phi_b}{q} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$t = \frac{N_i}{N_d}$$

where $\epsilon_s = 100$ was the dielectric constant of WO_3 [9] and q is the electron charge.

The Schottky barrier height (Φ_b) was determined from the following expression by thermionic emission mechanism in Ohmic region

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = A^* T^2 \exp \left[\frac{-(\phi_b - \beta E^{1/2})}{kT} \right]$$

$$\ln J = \left(\frac{\beta}{kT} \right) E^{1/2} + \ln A^* T^2 - \frac{\phi_b}{kT}$$

$$\text{slope} = \frac{\beta}{kT}$$

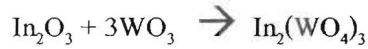
$$y = \ln A^* T^2 - \frac{\phi_b}{kT}$$

where J is the forward current density, A is Richardson current, E is the electric field, k is the Boltzmann's constant and β is constant related to the potential barrier width.

Results and Discussion

Fig.1 shows the results of XRD patterns of the sintered In_2O_3 -doped WO_3 ceramics. The major phase of the samples is a WO_3 phase (JCPDS 72-677) and there is an obvious second phase as $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ (JCPDS card no. 49-0337) in the doped samples when the In_2O_3 content exceeds 0.02 mol. The amount of $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ phase become bigger with higher In_2O_3 content. The variation of lattice parameters and volume of unit cell as a function of In_2O_3 doping is shown in Fig. 2. The lattice parameters 'a' and 'c' decreased to minimum value at $x= 0.04$ and $x= 0.03$ mol, respectively and then increased for higher concentration of In_2O_3 . In contrast, lattice parameter 'b' gradually increased with increasing in In_2O_3 content. The change in volume of unit cell as a function of In_2O_3 doping, is found similar to the behavior of lattice parameter 'c'. It decreased to minimum value at $x=0.03$ and then increased for higher concentration of In_2O_3 . The SEM micrographs of In_2O_3 -doped WO_3 ceramics with different amounts of In_2O_3 are shown in Fig. 3. It is apparent that the addition of In_2O_3 gives rise to an increase in grain size, indicating the added In_2O_3 accelerates the grain growth during sintering process [8]. The appearance of second phase as $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ suggest that the added In_2O_3 did not fully dissolve in the WO_3 crystal lattice owing to its rather low solubility. The formation of $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ expressed as follows [10]:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

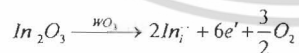


It can be seen that the samples with small amounts of In_2O_3 having various small pores and the number of pores decrease by further additions of In_2O_3 content. No more pore was observed at $x=0.05$ mol.

The electrical properties of samples characterized by I-V measurements are shown in Fig. 4. It is seen that whole I-V curves is shifted to the left side with increasing in In_2O_3 content. The important parameters extracted from I-V curves of different samples were tabulated in Table 1.

From Fig. 5, the nonlinear coefficient decreases from 4.76 to minimum value ($\alpha = 1.43$) at $x=0.03$ mol and then increases to 2.28 at $x=0.05$ mol. Breakdown field (E_b) of the doped samples decreases while the content of In_2O_3 increases up to 0.04 mol and then increases when the In_2O_3 content exceeded 0.04 mol. The E_b values of all doped sample were smaller than that of the pure WO_3 as previously observed in Pr_6O_{11} -doped WO_3 ceramics [8]. The I_L value as a function of In_2O_3 dopant shows the similar behavior of the breakdown voltage: I_L value decreases to minimum at $x=0.04$ and then increases when x higher than 0.04 mol.

The barrier heights of In_2O_3 -doped WO_3 were 0.194-0.357 eV, which were smaller than that the pure WO_3 (0.10-0.20V). The ionic radius of In^{3+} and W^{6+} is 0.82 and 0.62 Å, respectively. With rather big difference of ionic radius between In^{3+} and W^{6+} , the low limit substitution in W^{6+} site by In^{3+} ions is observed at about $x < 0.02$ mol. By further addition of In_2O_3 content, the following competing factors influencing the electrical properties as follows:



This reaction represents the occupation of In in an interstitial site of WO_3 and creates six electrons to maintain the electrical neutrality [11]. Thus, the electrical resistivity would be decreased with In_2O_3 addition if reaction above occurs. The higher In_2O_3 content, the higher the second phase $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ created. Because the $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ segregates to the grain boundaries, block the migration of the carriers and thus increase the electrical resistivity with adding In_2O_3 exceeds 0.04 mol. It is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

therefore believed that the In_2O_3 addition is fairly effective in attaining high conductivity when x less than 0.4 mol.

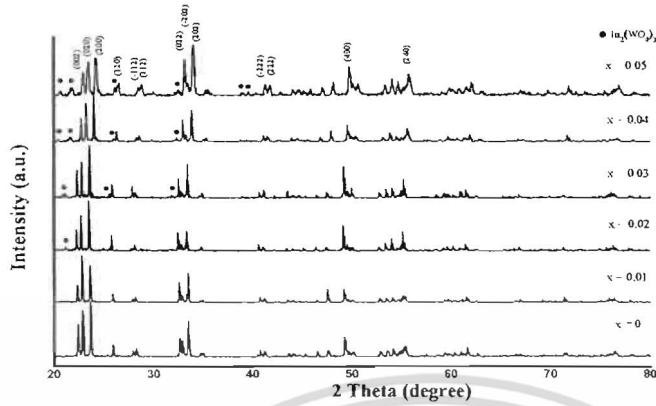


Fig. 1 XRD patterns of $(1-x)\text{WO}_3 + x\text{In}_2\text{O}_3$ ceramics.

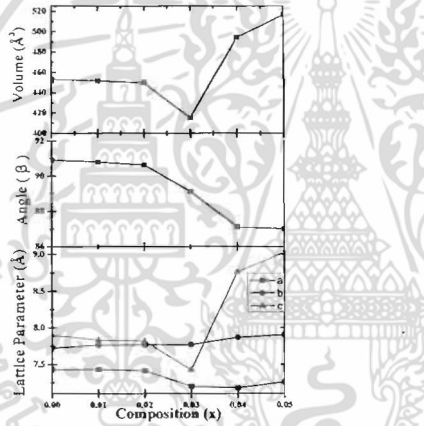


Fig. 2 Variation of lattice parameters and volume of unit cell for In_2O_3 -doped WO_3 ceramics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

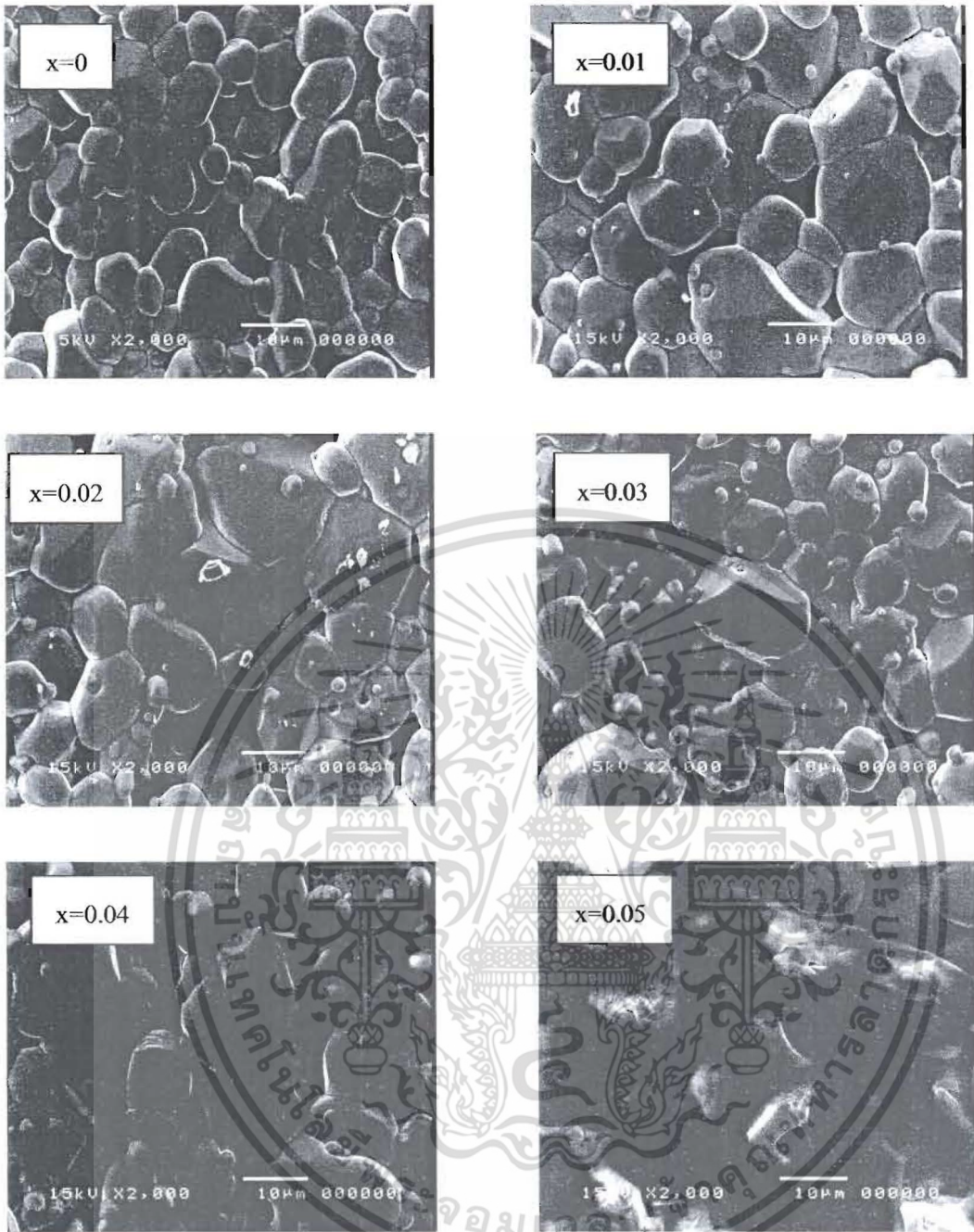


Fig. 3 SEM of In_2O_3 -doped WO_3 ceramics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

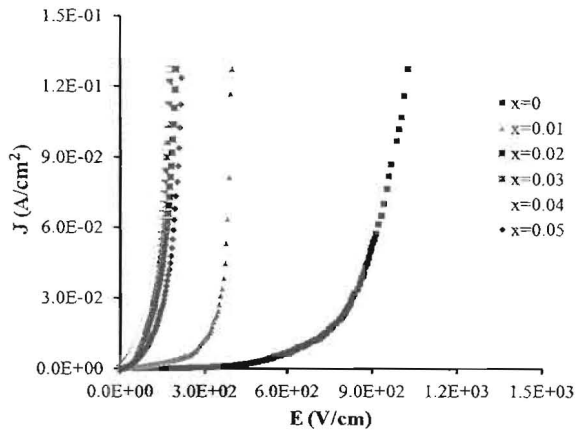


Fig. 4 J-E characteristics In_2O_3 -doped WO_3 ceramics

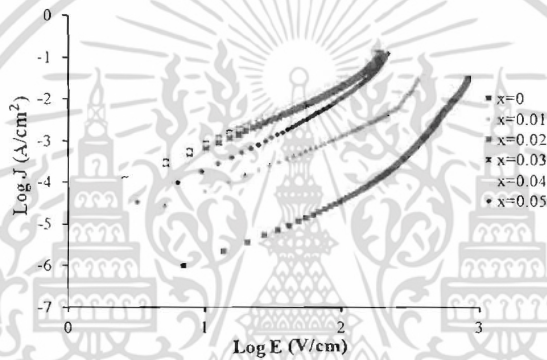


Fig. 5 Log J-Log E characteristics of In_2O_3 -doped WO_3 ceramics.

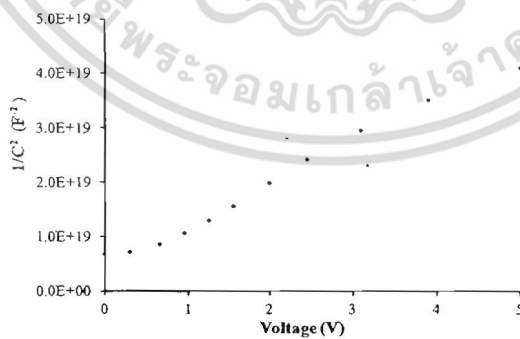


Fig. 6 The C-V characteristics of WO_3 ceramics doped with 0.03 mol In_2O_3 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 Some parameters of WO₃ ceramics doped with different mole of In₂O₃.

Composition (x)	E _b (V/cm)	σ _o (S/cm)	α	I _L (mA)
0	382.20	2.26x10 ⁻⁶	4.76	305.60
0.01	85.12	3.69x10 ⁻⁵	2.22	68.10
0.02	10.68	5.50x ⁻⁴	1.52	8.55
0.03	14.24	2.67x10 ⁻⁴	1.43	11.39
0.04	12.55	2.10x10 ⁻³	1.52	10.04
0.05	29.28	1.17x10 ⁻⁴	2.28	23.42

Composition (x)	Φ _b (eV)	N _d (cm ⁻³)	N _i (cm ⁻²)	t (nm)	d (μm)	β (V ^{1/2} cm ^{1/2})
0	0.796	2.54x10 ¹²	6.68x10 ¹⁰	2.09	5.00	9.30x10 ⁻³
0.01	0.685	1.14x10 ¹²	4.16x10 ¹⁰	3.00	10.00	7.74x10 ⁻³
0.02	0.640	2.28x10 ¹²	5.69x10 ¹⁰	1.46	20.00	1.11x10 ⁻²
0.03	0.648	1.14x10 ¹²	4.04x10 ¹⁰	1.46	15.00	1.11x10 ⁻²
0.04	0.649	2.54x10 ¹¹	1.91x10 ¹⁰	1.43	15.00	1.12x10 ⁻²
0.05	0.681	5.72x10 ¹¹	2.94x10 ¹⁰	1.08	15.00	1.29x10 ⁻²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

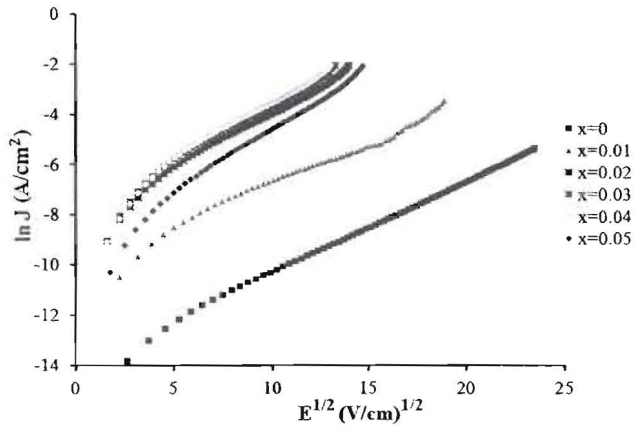


Fig. 7 $\ln J-E^{1/2}$ plot of WO_3 ceramics doped with different mole of In_2O_3 .

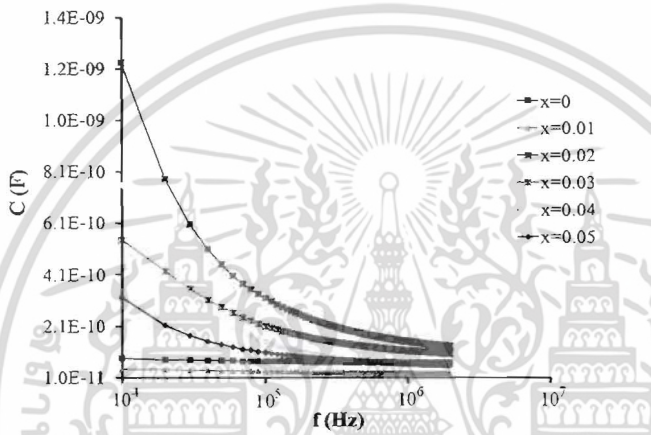


Fig. 8 $C-f$ plot of WO_3 ceramics doped with different mole of In_2O_3 .

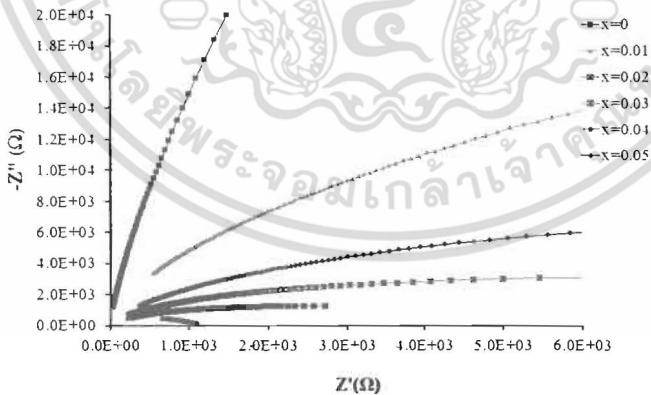


Fig. 9 Cole-Cole plot of impedance spectroscopy of WO_3 ceramics doped with different mole of In_2O_3 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 Electrical parameters of impedance spectroscopy of WO_3 ceramics doped with different mole of In_2O_3 .

Composition (x) of In_xWO_3	Parameters				
	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$C_p(\text{pF})$	$f_{\max}(\text{Hz})$	$\omega_{\max} R_p C_p$
0	200	640000	1.13	20020	0.91
0.01	80	69500	4.04	60019	1.05
0.02	10	4000	31.20	120020	0.94
0.03	20	7500	17.20	110000	0.90
0.04	30	1070	8.73	1950000	1.14
0.05	100	20000	15.00	60019	1.13

Conclusions

The effect of In_2O_3 addition on the microstructure and nonlinear electrical properties of WO_3 based varistor were studied as a function of In_2O_3 concentration. The breakdown voltage of WO_3 varistor decreases with increasing In_2O_3 content indicating In_2O_3 addition can reduce the breakdown voltage. Impedance spectroscopy was performed as a function of In_2O_3 mole concentration. Impedance spectra are well modeled in term of electrical equivalent circuit composing of a parallel resistance R_p and constant phase element (CPE) in series with another resistance (R_s). The ac conductance data of In_2O_3 -doped WO_3 ceramics, corresponding to the universal Jonscher's power law, are well explained by hopping process occurs between neighboring sites. WO_3 ceramic doped with In_2O_3 is a new kind of low voltage capacitor-varistor material.

References

- [1] X.S. Yang, Y. Wang and Y. Zhao, Effect of Dy_2O_3 and La_2O_3 on the Microstructure and Electrical Properties of WO_3 Ceramics, Mater. Chem. Phys., 98(2006), pp. 225-230.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [2] V. Makarov and M. Trontelj, Novel Varistor Material Based on Tungsten Oxide, *J. Mater. Sci. Lett.*, 13(1994), pp. 937-939.
- [3] X.S. Yang, Y. Wang and L. Dong, WO_3 Based Capacitor-Varistor Doped with Gd_2O_3 , *Mater. Chem. Phys.*, 86(2004), pp. 253-257.
- [4] Y. Wang, X.S. Yang, Z.L. Liu and K.L. Yao, Varistor Effect of WO_3 -Based Ceramics at High Temperatures, *Mater. Lett.*, 58(2004), pp. 1017-1019.
- [5] T. Wang, Q. Qin and W. Zhang, Microstructure and Electrical Properties of Y_2O_3 -Doped WO_3 Based Varistor Ceramics, *Adv. Mater. Res.*, 233-235 (2011), pp. 2499-2502.
- [6] T. Wang, Q. Qin and W. Zhang, Effect of La_2O_3 on the Electrical Properties of WO_3 -Based Varistor, *Key Engineering Materials*, 480-481(2011), pp. 137-141.
- [7] Y. Wang, Z. Aburas, K.L. Yao and Z.L. Liu, Effect of Doping and Temperature on Nonlinearity of WO_3 Varistor, *Mater. Chem. Phys.*, 58(1999), pp. 51-55.
- [8] T.G. Wang, G.Q. Shao, W.J. Zhang, X.B. Li and X.H. Yu, Electrical Properties of Pr_6O_{11} -Doped WO_3 Capacitor-Varistor Ceramics, *Ceramics International*, 36(2010), pp. 1063-1067.
- [9] H. Miyazaki, A. Nose, H. Suzuki and T. Ota, Phosphorus Solid Solution Effect of Electric and Dielectric Properties on Sintered WO_3 Ceramics, *J. of the Ceramic Society of Japan*, 119(8)(2011), 650-653.
- [10] A.P. Richard and D.D. Edwards, Subsolidus Phase Relations and Crystal Structures of the Mixed-Oxide Phases in the In_2O_3 - WO_3 System, *J. Solid Chem.*, 177(2004), pp. 2740-2748.
- [11] X. Dong, Y. Gan, Y. Wang, S. Peng and L. Dong, Effect of La_2O_3 on High Temperature Thermoelectric Properties of WO_3 , *J. Alloys Comp.*, 581(2013), pp. 52-55.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- Barsoukov, E and Macdonald, J.R. 2005. Impedance spectroscopy: theory, experimental and application, 2nd Ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. Hoboken.
- Bouchard, R. J. and Gillson, J. L., 1968. Hexagonal indium tungsten bronze, **Inorg. Chem.**, 7(5) : 969-972.
- Chaminade, J. P., Garcia, A., Pouchard, M., Fouassier, C., Jacquier, B., Perret-Gallix, D. and Gonzalez-Mestres, L. 1990, Crystal growth and characterization $\text{InBO}_3:\text{Tb}^{3+}$. **J. Cryst. Growth**, 99 : 799-801.
- Cullity, B.D. 1956. Elements of X-rays Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company Inc.; pp 9-14.
- Dabney, W. S., Antolino, N. E., Luisi, B. S., Richard, A. P. and Edwards, D. D, 2002. Sol-gel deposition and characterization of $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ thin films, **Thin Solid Films**, 411 : 192-197.
- Diot, N., Larcher, O., Marchand, R., Kempf, J. Y. and Macaudiere, P., 2001. Rare earth and tungsten oxynitrides with a defect fluorite type structure as new pigments, **J. Alloys Comp.**, 323-324 : 45-48.
- Gaewdang, T., Chaminade, J. P., Garcia, A., Fouassier, M., Pouchard, M. and Hagenmuller, P., 1993. Crystal growth properties of and luminescence $\text{In}_6\text{WO}_{12}$, **Mater. Lett.** 18 : 64-68.
- Gaewdang, T., Chaminade, J. P., Garcia, A., Pouchard, M., Hagenmuller, P. and Jacquier, B. 1994. Luminescence of Ce^{3+} in the $\text{In}_x\text{Sc}_{1-x}\text{BO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) solid solution, **J. Phys. Chem. Solids**, 55 : 501-504.
- Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors. **Appl. Phys. Lett.** 97, 143510-1- 143510-3.
- Ghosh, R. and Basak, D. 2007. Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction. **App. Phys. Lett.** 90, 243106-1-243106-3.
- Gu, G., Kane, M.G., Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors. **Appl. Phys. Lett.** 87, 243512-1-243512-3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Guo, L., Wang, X., Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Lays. **Appl. Phys. Lett.** 102, 072103-1- 072103-3.
- Hozer, L. 1994. **Semiconductor ceramics: grain boundary effects**. Ellis Horwood Limited, England.
- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2011. Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors. **Appl. Phys. Lett.** 99, 113301-1-113301-3.
- Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. Optical and Electrical Properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Film Prepared by Sulfurization Method. **J. Elec. Matter.** 41(8), 2204-2209.
- Johnson, C., Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN. **Appl. Phys. Lett.** 68(13), 1808-1810.
- Kaneki, N., Hara, H. and Shimuzu, T., 1976. Effect of atmosphere on resistivity of WO_3 ceramic, **J. Am. Ceram. Soc.**, 59 : 368-369.
- Khatho, V., Llobet, E., Vilanova, X., Brezmes, J., Hubalek, J., Malysz, K., and Correig, X., 2005. Gas sensing properties of nanoparticle indium-doped WO_3 thick films, **Sens. Actuators B**, 101 : 45-51.
- Kittel, C. 2005 **Introduction to Solid State Physics**, 8th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Lin, J.H., Zeng, J.J., Su, Y.C. and Lin, Y.J. 2012. Current Transport Mechanism of Heterojunction Diodes Based on the Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si. **Appl. Phys. Lett.** 100, 153509-1- 153509-4.
- Lin, Y.J., Luo, J. and Hung, H.C. 2013. Electronic Transport and Schottky Barrier of p- CuAlO_2 Schottky Diodes. **Appl. Phys. Lett.** 102., 193511- 1193511-3.
- Luo, J. Adler, A.U., Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis, **J. Appl. Phys.** 113, 153709-1- 153709-8.
- Makarov, V.O. and Trontelj, M., 1996. Sintering and electrical conductivity of doped WO_3 , **J. Eur. Ceram. Soc.**, 16 : 791-794.
- Messous, Y., Chambon, B., Jesus, M.D. Drain, D., Pastor, C. Garcia, A., Chaminade, J.P., Gaewdang, T. Fouassier, C. Jacquier, B. and Varrel, B. Indium Disilicate, a New Fast Scintillator, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**. Vol.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

354, 1995, pp. 527-529.

- Raghavan, R. S., 1976. High mass indium detector for low energy solar neutrinos, **Phys. Rev. Lett.** 37 : 259-261.
- Ramana, C.V., Utsunomiya, S., Ewing, C., Julien, C.M., and Becker, U., 2006, Structural stability and phase transitions in WO_3 thin films, **J. Phys. Chem. B**, 110: 10430-10435.
- Ren, S.T., Zhao, F. and Chen Q. 2012. Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra for ZnO-Nanowire Film Modulated by Water Molecules. **Chin. Phys. B**, 21(3), 038104-1- 038140-7.
- Richard, A. P. and Edwards, D. D., 2004. Subsidiary phase relations and crystal structures of the mixed-oxide phases in the In_2O_3 - WO_3 system, **J. Solid State Chem.**, 177 : 2740-2748.
- Ruyan, W.R., 1975, **Semiconductor Measurement and Instrument**, 3rd ed, Mc.Graw-Hill, New York.
- Salje, E. K. H., Rehmann, S., Pobell, F., Morris, D., Knight, K. S., Herrmannsdorfer, T. and Dove, M., 1997. Crystal structure and paramagnetic behavior of ϵ - WO_{3-x} , **J. Phys. Condens. Matter.**, 9 : 6563-6577.
- Studenikin, S.A., Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution. **J. Appl. Phys.** 83(4), 2104-2111.
- Van der Pauw, L.J., 1958. A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape, **Philips Research Reports**, 13: 1-9.
- Wang, T. G., Shao, G. Q., Zhang, W. J. Li, X. B. and Yu, X. H., 2010. Electrical properties of Pr_6O_{11} -doped WO_3 capacitor-varistor ceramics, **Ceramics International** 36 : 1063-1067.
- Yang X. S., Wang, Y. and Dong, L. 2004. WO_3 -base capacitor varistor doped with Gd_2O_3 , **Mater. Chem. Phys.** 86 : 253-257.
- Zang, G. Z., Wang, J. F., Chen, H. C., Su, W. B., Wang, C. M. and Qi, P. 2004. Nonlinear electrical behavior of the WO_3 -base capacitor system, **J. Mater. Sci.**, 39 : 4373-4374.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์-อินเดียม ซิลิไซด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. “การเตรียมและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

จูนิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เทียนดี. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

จูนิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรต และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

จูนิตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.

จูนิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นกักเก็บแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.

จูนิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูนิตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรต. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูนิตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรต. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือ ด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.

จูนิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Indexing of X-ray diffraction pattern for $\text{In}_6\text{WO}_{12}$

2θ ($^\circ$)	d (\AA)	I (%)	I_{PDF} (%)	Rhombohedral hkl	Hexagonal hkl
22.559	3.9382	8.5	7.9	$\bar{1}10$	012
23.761	3.7416	9.3	8.8	$\bar{1}11$	021
29.441	3.0313	2.3	0.9	200	202
29.881	2.9878	31.8	31.3	$\bar{1}11$	003
30.400	2.9379	100	100	$\bar{0}12$	211
32.620	2.7429	3.3	2.9	$\bar{2}11$	300
35.101	2.5544	35.5	40.1	$\bar{2}11$	122
35.441	2.5307	4.9	4.0	$\bar{0}12$	113
44.522	2.0334	54.7	2.3	$\bar{0}13$	312
46.140	1.9657	2.4	3.4	$\bar{2}20$	024
50.198	1.8159	13.9	23.1	$\bar{3}10$	214
50.844	1.7943	17.1	23.6	$\bar{1}2\bar{3}$	410
52.623	1.7378	3.5	4.6	$\bar{1}2\bar{3}$	232
59.541	1.5513	5.7	0.4	$\bar{0}2\bar{3}$	125
59.717	1.5472	3.8	8.9	$\bar{4}11$	502
60.126	1.5376	10.8	-	$\bar{0}1\bar{4}$	143
60.302	1.5336	7.5	18.6	$\bar{1}3\bar{3}$	241
60.580	1.5272	4.9	10.6	400	404
63.323	1.4675	4.0	7.1	$\bar{0}2\bar{4}$	422
63.502	1.4638	3.2	-	$\bar{1}2\bar{4}$	511

^a PDF #74-1410.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern: 32-1286		Radiation =1.540600			Quality: Not indexed	
Tb ₄ O ₇ Terbium Oxide		2th	l	h	k	l
		29.063	70	1	1	1
		33.666	40	2	0	0
		48.376	70	2	2	0
		57.559	80	3	1	1
		60.242	60	2	2	2
Lattice: Face-centered cubic		70.907	60	4	0	0
S.G.: F (0)		78.306	100	3	3	1
		80.760	90	4	2	0
a =5.31500	Z =1	Mol. Weight =747.70				
		Volume[CD] =150.14				
		Dx =8.269				
SAMPLE PREPARATION: Tb ₄ O ₇ was heid in vaccum for 6 hours at 1750 C.						
*Private Communnication, primary reference: Ferguson,I.,Hughes,Atomic Energy Authority, Springfingfield _Nuclear power Dev.Lab.,UK.						
Radiation :CrKa		Filter :Bata				
Lambda :2.29092		d-sp : Debye-				
SS/Fom :F8=11(0.1020,7)		Scherrer				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern: 72-677		Radiation =1.540600					Quality: Calculated				
WO ₃ Tungstan Oxide		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k	l
		16.451	<1	0	1	1	73.026	<1	4	1	4
		16.853	<1	1	0	1	*73.026	<1	-1	3	5
		*16.853	<1	1	1	0	73.333	1	-3	1	5
		20.581	<1	1	1	1	*73.333	1	-5	2	2
		23.110	99	0	0	2	73.548	2	-4	3	3
		23.580	96	0	2	0	*73.548	2	-3	3	4
		24.349	100	2	0	0	*73.771	1	3	4	3
		25.989	1	0	1	2	74.109	1	5	2	2
		26.306	1	0	2	1	*74.109	11	-5	0	3
		26.586	20	1	2	0	74.855	11	-2	4	4
		28.605	16	-1	1	2	*75.114	11	0	1	6
		28.915	16	1	1	2	75.516	2	2	4	4
		*28.915	16	-1	2	1	*75.516	<2	-4	2	4
		29.377	1	-2	1	1	76.199	<3	-5	3	1
		29.679	<1	2	1	1	*76.199	<3	-1	1	6
		33.253	38	0	2	2	76.399	<4	-4	4	2
		33.551	24	-2	0	2	76.658	5	-1	1	6
		34.152	56	2	0	2	76.9121	5	1	6	0
		*34.152	56	2	2	0	77.729	<1	-2	5	3
		35.381	6	-1	2	2	78.137	<1	1	6	1
		35.638	7	1	2	2	*78.137	<1	-3	2	5
		*35.638	7	-2	1	2	78.496	2	6	0	0
		36.022	<1	-2	2	1	78.661	1	-2	0	6
		36.164	1	2	1	2	*78.661	1	-0	2	6
		36.275	<1	2	2	1	*79.062	<1	-5	2	3
		37.006	<1	-1	0	3	79.488	<1	-5	3	2
		*37.006	<1	0	1	3	79.714	<1	6	1	0
		37.321	<1	1	0	3	79.879	<1	-1	2	6
		37.620	<1	0	3	1	*79.879	<1	-2	1	6
		38.579	<1	-3	0	1	*80.244	11	-5	3	2
		38.936	<1	-1	1	3	*80.244	1	-1	2	6
		*38.936	<1	3	0	1	*80.534	<1	0	4	5
		39.251	<1	1	1	3	80.654	<1	-6	1	1
		39.719	1	1	3	1	80.818	<1	2	1	6
		40.459	<1	-3	1	1	*80.818	<1	-2	6	0
		40.802	<1	3	1	1	80.958	<1	0	5	4
		41.418	13	-2	2	2	*81.218	<1	-3	4	4
		41.866	13	2	2	2	81.527	<2	-1	6	2
		42.613	<1	0	2	3	81.678	<2	-1	4	5
		42.955	1	0	3	2	*81.678	<2	1	6	2
		43.683	<1	2	3	0	81.904	<1	-2	6	1
		44.245	4	3	2	0	82.121	<1	-1	5	4
		*44.245	4	-1	2	3	*82.121	1	-3	4	4
		44.688	3	-1	3	2	*82.396	1	-1	5	4
		44.899	3	1	3	2	82.704	1	-6	0	2
		*45.361	4	-3	1	2	82.822	<1	-4	3	4
		45.713	<1	-3	2	1	*83.001	<1	4	5	0
		45.986	4	3	1	2	*83.001	1	4	4	3
		*45.986	4	3	2	1	*83.097	1	-3	3	5
		47.234	9	0	0	4	66.727	1	-2	1	5
		48.240	9	0	4	0	67.075	3	-3	4	2
		48.842	1	0	1	4	*67.075	3	1	2	5
		49.391	<1	-2	2	3	67.196	2	3	2	4
		49.895	22	4	0	0	67.559	3	3	4	2
		*49.895	22	1	4	0	*67.559	3	-4	3	2
		50.207	5	2	3	2	68.015	1	1	5	2
		*50.207	5	-3	2	2	68.230	<1	4	3	2
		50.320	12	-1	1	4	*68.230	<1	-2	5	1
		50.706	10	1	1	4	68.418	<1	2	5	1
		50.833	-6	0	3	3	68.866	1	5	2	0
		51.364	<1	-3	0	3	69.548	1	-5	1	2
		*51.364	<1	-1	4	1	69.817	2	0	4	4
		51.460	<1	4	1	0	70.340	1	5	2	1
		*51.460	<1	1	4	1	*70.340	1	5	1	2
		52.317	<1	3	3	0	70.513	2	-4	0	4
		*52.317	<1	-1	3	3	*70.513	2	-2	2	5
		52.599	<1	1	3	3	71.011	1	-1	4	4
		52.710	<1	-4	1	1	71.325	1	1	4	4
		52.823	<1	-3	1	3	*71.325	1	2	2	5
		53.083	<1	4	1	1	71.772	2	4	0	4
		53.451	11	0	2	4	*71.772	2	-4	1	4
		*53.451	11	-2	0	4	71.928	4	0	3	5
		53.660	6	-3	3	1	*71.928	4	4	4	0
		*53.660	6	3	1	3	72.161	2	2	5	2
							72.614	2	-3	3	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern:71-2194		Radiation=1.540600		Quality:Calculated		
In ₂ O ₃ Indium Oxide		2th	I	h	k	l
		17.518	<1	2	0	0
		21.497	6	2	1	1
		24.873	<1	2	2	0
		30.586	100	2	2	2
		33.104	1	3	2	1
		35.463	29	4	0	0
Lattice : Body-centered cubic		37.693	3	4	1	1
S.G. : Ia3 (206)		39.815	1	4	2	0
		41.847	2	3	3	2
		43.802	<1	4	2	2
		45.689	4	4	3	1
		49.295	1	5	2	1
		51.025	33	4	4	0
		52.715	1	4	3	3
		54.366	<1	6	0	0
		55.985	2	6	1	1
		57.573	1	0	2	6
		59.134	2	5	4	1
ICSD COLLECTION CODE : 014387		60.669	11	6	2	2
TEMPERATURE FACTOR :ITF		62.182	2	6	3	1
		63.675	4	4	4	4
		65.148	1	5	4	3
		66.603	1	0	4	6
		68.043	1	6	3	3
		69.469	1	6	4	2
		73.671	1	1	5	6
		75.050	3	8	0	0
		76.422	1	8	1	1
		77.785	1	8	2	0
		79.141	1	3	5	6
		80.491	1	8	2	2
		81.835	1	8	3	1
* Calculated From ICSD using POWD- 12++, (1997) primary reference:		83.175	3	6	6	2
		84.512	<1	7	5	2
*Acta Crystallallogr., volume 20, page 723, (1966):		85.846	4	0	4	8
Marezio,M.		87.176	<1	8	3	3
		88.505	<1	2	4	8
		89.835	1	6	5	5
Radiation :CuKa1		Fitter :Not specified				
Lambda :1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern:37-242		Radiation=1.540600			Quality:Indexed	
In _{0.02} WO ₃ Indium Tungsten Oxide		2th	l	h	k	l
		23.055	100	0	0	2
		23.861	55	0	2	0
		24.115	76	2	0	0
		26.757	2	2	0	1
		28.734	28	1	1	2
		33.492	31	0	2	2
Lattice :Orthombic		Mol. Weight=234.14				
S.G. : (0)		Volume[CD]=422.21				
a=7.36700		Dx=0.921				
b=7.44100		44.591	13	1	2	3
c=7.70200		45.122	5	1	3	2
a/b=0.99006		45.407	7	3	1	2
c/b=1.03508		47.130	15	0	0	4
		48.880	5	0	4	0
		49.406	11	4	0	0
		50.438	19	1	1	4
		53.605	10	0	2	4
		54.716	6	0	4	2
		55.216	15	4	0	2
		55.600	13	4	2	0
		57.937	3	3	3	2
		59.519	7	2	2	4
		60.638	6	2	4	2
		60.983	11	4	2	2
		62.471	11	3	1	4
SAMPLE PREPARTION :Prepared from In WO ₃ or In ₂ O ₃ , WO ₃ and WO ₂ . A preliminary for 4 days at 837 K was followed by heating to 1273K for 7 days						
GENERAL COMMENTS : Orthorhombic tungsten bronze.						
*J.Solid State Chem., volume54, page 365, (1984) primary reference: Ekstrom,t.,Parmentier,M.,Watts,K.,Tilley,R.						
Radiation :		Fitter:Not specified				
SS/FOM: F25=7(0.0340,99)		d-sp:Not Given				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 72-1465		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
WO ₃		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k	l
Tungsten Oxide		16.475	1	0	1	1	62.312	12	-3	4	0
		16.904	<1	1	0	1	*62.312	12	-3	1	4
		*16.904	<1	1	1	0	63.345	4	-4	1	3
		20.391	1	-1	1	1	*63.345	4	3	1	4
		70.609	1	1	1	1	63.479	2	-3	4	1
		23.147	100	0	0	2	64.038	<1	-4	3	1
		23.612	78	0	2	0	64.297	<1	1	5	1
		24.370	97	2	0	0	*64.297	<1	4	1	3
		26.029	1	0	1	2	64.765	<1	-5	0	1
		26.619	15	1	2	0	64.910	<1	3	3	3
		27.130	<1	2	1	0	65.026	<1	5	1	0
		28.643	16	-1	1	2	65.185	<1	5	0	1
		28.959	14	1	1	2	65.597	<1	0	2	5
		*28.959	14	-1	2	1	66.055	1	-2	3	4
		29.404	1	-2	1	1	*66.055	1	-5	1	1
		29.713	<1	2	1	1	66.310	1	-3	2	4
		33.303	50	0	2	2	66.491	<1	-2	4	3
		*33.585	24	-2	0	2	*66.491	<1	5	1	1
		34.189	47	2	0	2	66.721	2	2	3	4
		*34.189	47	2	2	0	*66.721	2	-1	2	5
		35.429	4	-1	2	2	67.161	3	-3	4	2
		35.691	5	1	2	2	*67.161	3	1	2	5
		*35.691	5	-2	1	2	67.305	2	3	2	4
		36.061	<1	-2	2	1	67.656	3	-3	4	2
		36.214	<1	2	1	2	*67.656	3	-4	3	2
		36.319	<1	2	2	1	68.120	1	1	5	2
		37.066	<1	0	1	3	68.320	<1	4	3	2
		37.382	<1	1	0	3	*68.320	<1	-2	5	1
		38.611	<1	-3	0	1	68.518	<1	2	5	1
		38.953	<1	-1	1	3	68.936	1	5	2	0
		*38.953	<1	3	0	1	69.613	1	-5	1	2
		39.315	<1	1	1	3	69.932	2	0	4	4
		39.655	<1	-1	3	1	*69.932	2	-5	2	1
		39.774	<1	1	3	1	70.424	1	5	2	1
		40.494	1	-3	1	1	*70.424	1	5	1	2
		40.845	<1	3	1	1	70.595	7	-4	0	4
		41.467	16	-2	2	2	71.124	2	-1	4	4
		41.925	17	2	2	2	71.446	1	1	4	4
		*42.679	<1	0	2	3	*71.446	1	2	2	5
		43.018	1	0	3	2	71.883	2	-4	1	4
		44.190	4	3	2	0	*71.883	2	4	0	4
		44.750	3	-1	2	3	72.017	4	-4	4	0
		*44.750	3	-1	3	2	*72.017	4	0	3	5
		44.966	3	1	3	2	72.272	2	2	5	2
		45.405	5	-3	1	2	72.714	2	-3	3	4
		46.044	3	3	1	2	73.140	<1	4	1	4
		*46.044	3	3	2	1	*73.140	<1	-3	4	3
		47.312	9	0	0	4	73.407	1	-5	2	2
		48.308	9	0	4	0	*73.407	1	-3	1	5
		48.923	<1	0	1	4	73.669	2	-4	3	3
		49.939	18	4	0	0	*73.669	2	3	3	4
		*49.939	18	1	4	0	73.886	1	3	4	3
		50.260	4	2	3	2	74.008	1	0	0	6
		*50.260	4	-3	2	2	*74.008	1	-1	5	3
		50.397	11	-1	1	4	74.201	1	5	2	2
		50.792	10	1	1	4	*74.201	1	-5	0	3
		*50.792	10	3	2	2	74.565	<1	4	3	3
		50.912	6	0	3	3	*74.565	<1	3	1	5
		*51.436	<1	-1	4	1	74.968	1	-2	4	4
		51.533	<1	1	4	1	*75.252	1	5	3	0
		52.235	<1	3	0	3	*75.252	1	0	1	6
		52.376	<1	3	3	0	75.610	3	2	4	4
		*52.376	<1	-1	3	3	*75.610	3	-4	2	4
		52.682	<1	1	3	3	75.727	1	0	6	0
		52.756	<1	-4	1	1	76.333	3	-1	1	6
		52.882	<1	-3	1	3	76.493	3	-4	4	2
		53.539	9	0	2	4	76.802	4	1	1	6
		*53.539	9	-2	0	4	*76.802	4	4	2	4
		53.737	5	3	1	3	77.041	5	1	2	0
		54.223	8	0	4	2	77.716	<1	2	3	5
		54.828	8	2	4	0	77.846	<1	-2	5	3
		*54.828	8	-1	2	4	78.182	<1	-1	6	1
		54.924	5	-1	2	4	78.260	<1	1	6	1
		*54.924	5	-2	1	4	*78.260	<1	2	5	3
		55.359	7	1	2	4	78.573	2	6	0	0
		*55.359	7	-4	0	2	78.791	1	-2	0	6
		55.689	6	-1	4	2	78.943	1	3	5	2
		55.873	10	1	4	2	*78.943	1	0	2	6
		55.952	14	4	2	0	79.148	<1	-5	2	3
		56.097	13	4	0	2	79.577	1	-5	3	2
		*56.097	13	-2	4	1	79.722	<1	2	0	6
		56.804	<1	-4	1	2	*79.794	<1	6	1	0
		56.948	<1	-2	3	3	80.012	<1	-1	2	6
		57.151	<1	-4	2	1	*80.012	<1	-2	1	6
		57.271	<1	-3	2	3	80.443	1	0	6	2
		57.492	<1	2	3	3	*80.443	1	1	2	4
		*57.492	<1	4	1	2	80.732	<1	0	4	5
		57.680	1	-3	3	2	*80.732	<1	-6	1	1
		58.219	1	3	3	2	80.942	1	2	1	6
		59.303	3	-7	2	4	*80.942	1	2	6	0
		60.009	3	2	2	4	81.097	1	0	5	4
		60.120	4	-2	4	2	81.336	1	-3	4	4
		60.471	4	2	4	2	81.657	2	-1	6	2
		60.683	3	0	3	4	*81.657	2	-4	3	4
		61.007	7	-4	2	2	81.811	2	-1	4	5
		*61.007	7	0	4	3	*81.811	2	1	6	2
		61.701	7	4	2	2	82.031	1	-2	6	1
		61.883	5	1	0	5	82.260	1	3	4	4
		61.964	4	-1	3	4	*82.260	1	-1	5	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2 รอบ 9 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2557

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน(แบบปกติ)

แหล่งเงินรายได้ (ประเภทส่งเสริมนักวิจัย)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์

(ภาษาอังกฤษ) Non-Linear Electrical Properties of In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) Semiconducting Ceramic and Application

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัย/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1/ ตุลาคม/ 2556 ถึงวันที่ 30/ มิถุนายน/ 2557

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี เดือน ตั้งแต่วันที่ 1/ ตุลาคม/ 2556 ถึงวันที่ 30/ กันยายน/ 2557

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 50,000.- บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 29 ตุลาคม 2556

งวดที่ 2 บาท % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว			
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน			
ค่าใช้สอย	10,000.00.-	0.00.-	10,000.00.-
ค่าวัสดุ	40,000.00.-	43,501.63.-	(-3,501.63.-)
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	50,000.00.-	43,501.63.-	6,498.37.-

(รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

(นางพุดทรีพย์ วิสัยเกษม)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-นามสกุล งามนิตย์ วงษ์เจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

ประวัติการศึกษา

ปีจบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
2531	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์ (ฟิสิกส์ของแข็ง)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Influence of Na Doping on the Thermoelectric Properties of CuAlO_2 Delafossite" *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 , 2014, pp. 127-131
2. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO₂ Heterojunction Diode" *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
3. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO₂ Heterojunction" *Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings*, pp. 781-788.
4. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Influence of Annealing Temperature on Microstructure, Optical and Electrical Properties of Digenite Thin Films" *Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings*, pp. 774-780.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method” *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite” *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction” *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013*, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, *Proceedings*, pp. 2078-2088.
8. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0≤x≤1) Thin Films” *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013*, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan *Proceedings*, pp. 2070-2077.
9. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination”, *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
10. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum” *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 361-370.
11. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nopparuchikun, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat “Fabrication and Characterization of Heterojunction of CdS Thin Films and CuAlO₂ Ceramic Pill Substrate” *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 22(2), 2012, pp. 125-129.
12. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang, “Thermoelectric Properties of Ni-Doped CuAlO₂” *Physics Procedia*, vol.2, 2009, pp.101-106.
13. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Siripudhaiwon and N. Promros “Influence of Substrate Temperature on Some Properties of Close-Spacing Thermal Evaporated CdTe Thin Films” *Advanced Materials Research*, Vol. 55-57, 2008, pp.881-884.

14. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Thin Films" ISES Solar World Congress 2007, September 18- 21, 2007, Beijing, China, Proceedings, pp.1299-1302.
15. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Co-existence of F and Sb Dopant in Transparent Conducting SnO₂ Thin Films Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis Method" ISES Solar World Congress 2007, September 18- 21, 2007. Beijing, China, Proceedings, pp.1269-1274.
16. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Growth and Characterization of Co-Doped Fluorine and Antimony in Tin Oxide Thin Films Obtained by Ultrasonic Spray Pyrolysis" Journal of Solid Mechanics and Material Engineering, Vol. 1, No. 4, 2007, pp.592-601. (ผู้วิจัยหลัก)
17. T. Gaewdang "Investigations on Chemically Deposited Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films With Low Zn Content" Materials Letters, Vol.59, 2005 pp. 3577- 3584.
18. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Comparative Studies of Thermally Evaporated Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films Prepared by Using Different Precursors" Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.694- 695.
19. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of B-Doped Cd_{0.6}Zn_{0.4}S Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition Method" Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.696- 697.
20. Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "Thickness Dependence of Structural, Optical and Electrical Properties of CdS and CdS:In Films Prepared by Thermal Evaporation" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.581-582.
21. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and W. Lipar "Some Characterization of Chemical Bath Co-Deposited CdS- ZnS Thin Films" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.583-584.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายจตุตินัย แก้วแดง

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

ประวัติการศึกษา

ปีจบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2530	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2536	ปริญญาเอก	Ph.D.	วัสดุศาสตร์	Bordeaux University I, France

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO₂ Heterojunction Diode" Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
2. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Influence of Na Doping on the Thermoelectric Properties of CuAlO₂ Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 127-131.
3. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO₂ Heterojunction" Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings, pp. 781-788.
4. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Influence of Annealing Temperature on Microstructure, Optical and Electrical Properties of Digenite Thin Films" Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings, pp. 774-780.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method” *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite” *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction” *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013*, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, *Proceedings*, pp. 2078-2088.
8. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0≤x≤1) Thin Films” *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013*, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan *Proceedings*, pp. 2070-2077.
9. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination”, *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
10. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum” *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 361-370.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
2529	ปริญญาโท	วท.ม.	คณิตศาสตร์ ประยุกต์	มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ
2538	ปริญญาเอก	Ph.D.	วิศวกรรมไฟฟ้า	City University London, U.K.

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
2. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite" *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
3. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction" *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings*, pp. 2078-2088.
4. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0≤x≤1) Thin Films" *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings*, pp. 2070-2077.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination”, Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum” Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 361-370.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, C. Thaisatuen, W. Bunkua, A. Ariyaratand and T. Wongcharoen “Optical and Electrical Properties of CdTe Thin Films with Different Thicknesses” Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 352-356.
8. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, W. Bunkua, C. Thaisatuen, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat “Effect of Ramp Time of Close Spaced Sublimation on Physical Properties of CdTe Thin Films” Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 349-351.
9. Ng. Wongcharoen, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang “Structural and Optical Studies of Chemical Bath Deposited Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films” The 27th Congress on Science and Technology of Thailand, Proceeding, 24-26 October 2001, pp. 200.
10. Ng. Wongcharoen, T. Wongcharoen and T. Gaewdang “Preparation and Characterization of Cadmium Sulfide Thin Films”, The 25th Congress on Science and Technology of Thailand, 1999, pp. 546-547.