



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วิธีการ และเงื่อนไขในการเตรียมเซรามิกต์ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้เตรียมฟิล์มบางสำหรับผลิตหน่วยความจำแบบตัวต้านทานแบบสุ่ม

Procedures and conditions for preparation of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics on the physical and electrical properties to be used for the production of thin film for resistance random access memory applications

ดร. วรุฒิ มรรคเจริญ

นางสาว กมลวรรณ บุญพิลา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วิธีการ และเงื่อนไขในการเตรียมเซรามิกส์ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้เตรียมฟิล์มบางสำหรับผลิตหน่วยความจำแบบตัวต้านทานแบบสุ่ม

Procedures and conditions for preparation of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics on the physical and electrical properties to be used for the production of thin film for resistance random access memory applications

ดร. วรวิทย์ มรรคเจริญ

นางสาว กมลวรรณ บุญพิลา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
๑๒๘๕๑
๒๕๕๖

๑๒๘๕๓๔๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขทะเบียน 142906 ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันเดือนปี - 6 ส.ย. 2559

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) **วิธีการ และเงื่อนไขในการเตรียมเซรามิกส์ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้เตรียมฟิล์มบางสำหรับผลิตหน่วยความจำ แบบตัวต้านทานแบบสุ่ม**

แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 75,000 บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

ดร. วรวุฒิ มรรคเจริญ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

นางสาว กมลวรรณ บุญพิลา วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

บทคัดย่อ

แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) เป็นเซรามิกส์ที่ถูกศึกษาและพัฒนาอย่างมากมาในการประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเพื่อใช้ทดแทน แบเรียมไททาเนต เพราะแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตมีค่าสภาพคงที่ทางไฟฟ้าที่สูงแต่มีค่าสภาพสูญเสียทางไฟฟ้าที่สูงตามไปด้วยที่อุณหภูมิห้อง ใน การศึกษานี้จึงได้ทดลองทำการเจือแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตด้วยธาตุโลหะของแพทตินัมไดออกไซด์ เพื่อศึกษาผลของการเจือต่อสภาพทางไฟฟ้าของแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต โดยทำการศึกษาสภาพของ โครงสร้างที่มีผลมาจากการเจือ และค่าสภาพทางไฟฟ้าที่แปรผันตามอุณหภูมิ และความถี่ในช่วง 0.1 – 500 kHz ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเจือด้วยแพทตินัมนั้นส่งผลให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยมีขนาดลดลง แต่ค่าสภาพทางไฟฟ้าที่ลดลงด้วยนั้นก็ยังมีความสูงมากพอต่อการนำไปใช้งาน โดยที่ค่าสภาพสูญเสียทาง ไฟฟ้ามีค่าลดลงตามทฤษฎีของรอยต่อระหว่างเกรนและขอบเกรนของโครงสร้าง

คำสำคัญ : ค่าไดอิเล็กทริก, แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต, ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Procedures and conditions for preparation of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics on the physical and electrical properties to be used for the production of thin film for resistance random access memory applications

Researcher: Dr. Worawut Makcharoen , Miss Kamonwan Boonpira

Faculty: College of data storage Innovation **Department:**

ABSTRACT

The $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) has the advantage for the various applications especially for capacitive elements in microelectronic devices over the ferroelectric materials including BaTiO_3 . CCTO is a ceramic compound with a high dielectric constant but it has a high loss tangent at room temperature. In this work, the Influences of PtO_2 doping on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) ceramics were investigate. The ceramics CCTO and PtO_2 doping CCTO were studied by X-ray diffraction, scanning electron microscopy. The dielectric properties have been measured as a function of temperature and frequency range 0.1 - 500 kHz. The results show that PtO_2 doped can reduce the mean grain sizes of CCTO, but the dielectric constant still remained a height. The reduced of the loss tangent could be interpreted with the internal barrier layer capacitor model (IBLC)

Keywords : dielectric constant, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, dopants

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยต้องขอแสดงความขอบคุณผู้ให้การช่วยเหลือทั้งทางด้านการทดลองและอุปกรณ์การวิเคราะห์ข้อมูลทั้ง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูลที่ให้ความช่วยเหลือทั้งโอกาสในการวิจัยแหล่งทุนและห้องทดลอง และเตรียมการทดลอง และภาควิชาฟิสิกส์ และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ช่วยเหลือในการวิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างในการวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่ง และในงานวิจัยนี้ได้รับความช่วยเหลือจากการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน เงินวิจัยเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ที่สนับสนุนงบประมาณ และให้โอกาสคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษา เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาความสามารถของผู้วิจัย และสามารถเผยแพร่งานวิจัยเพื่อพัฒนาความรู้แก่สังคมต่อไป

ดร. วรวิณี มรรคเจริญ

นางสาว กมลวรรณ บุญพิลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

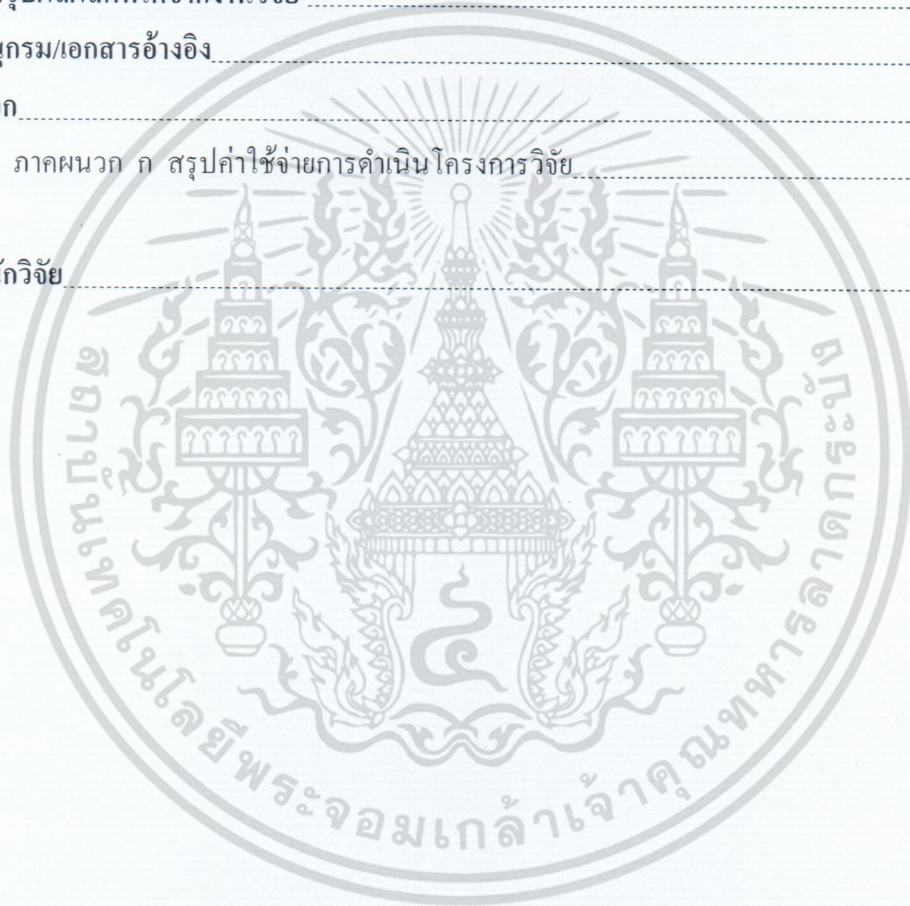
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แนวคิด ทฤษฎีหลักตามประเด็นให้ครอบคลุมเรื่องที่วิจัย.....	4
2.1.1 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties).....	4
2.1.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant).....	5
2.1.3 การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss tangent).....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม.....	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	17
3.1 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	17
3.2 การตรวจสอบสมบัติกายภาพ.....	18
3.2.1 การหาค่าการหดตัวหลังเผา (Shrinkage).....	18
3.2.2 การหาความหนาแน่น (Density).....	19
3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกส์.....	19
3.2.4 การตรวจสอบสมบัติไฟฟ้าของเซรามิกส์.....	20
3.2.4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity).....	20
3.2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและกระแสไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้า.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกส์.....	22
บทที่ 4 ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	30
4.1 ผลการวิจัย	30
4.2 ข้อเสนอแนะ.....	30
บทที่ 5 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	31
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก	33
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	34
ประวัตินักวิจัย	35



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของ CCTO	4
2.2 กระบวนการโพลาริเซชันแบบต่าง ๆ	6
2.3 ปริซึมมูลฐานของวัสดุที่มีการเกิดโพลาริเซชัน	7
2.4 บทบาทของสารไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ	7
2.5 ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นในสารไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ	9
2.6 แสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของสารเซรามิกส์ในกลุ่ม $A Cu_3Ti_4O_{12}$	11
2.7 แสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของสารเซรามิกส์ $CaCu_3Ti_4O_{12}$	12
2.8 แสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของฟิล์มเซรามิกส์ CCTO ที่ความหนาต่างๆกัน	13
2.9 แสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของฟิล์มเซรามิกส์ CCTO หนา 480 nm ที่ความถี่ต่างๆกัน	13
2.10 The resistance, RHRS and RLRS, endurance and the RHRS / RLRS ratio of CCTO films annealed at 500 °C.	14
2.11 ค่าความต่างศักย์ที่ภาวะ SET และ RESET ของ CCTO ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน	15
2.12 Turn-on voltage (VON) and turn-off voltage (VOFF) of CCTO films as the function of annealing temperature	15
2.13 Resistance ratio, RHRS/RLRS, as the function of the annealing	16
2.14 The resistance, RHRS and RLRS, endurance and the RHRS/RLRS ratio of CCTO films annealed at 800 °C.	16
3.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)	18
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM 840A ณ ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	20
3.3 แผนภาพวงจรที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและ ค่าสนามไฟฟ้า	22

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาารุ่นต่อไปของหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน (NVM) ได้ดึงดูดความสนใจของนักวิจัยอย่างกว้างขวางเนื่องจากความทรงจำแบบเดิมได้ใกล้ถึงขีดจำกัดของการพัฒนา ได้มีการทดลองและพัฒนาศึกษาหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนในหลายรูปแบบ เช่น หน่วยความจำเข้าถึงโดยเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบสุ่ม (ferroelectric random access memory (FeRAM)), หน่วยความจำเข้าถึงโดยแม่เหล็กแบบสุ่ม (magnetic random access memory (MRAM)) และหน่วยความจำเข้าถึงโดยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และความต้านทานแบบสุ่ม (organic semiconductor and resistance random access memory (RRAM)) จากการศึกษาพัฒนารูปแบบต่างๆของหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนนั้น RRAM มีความเหมาะสมในสมบัติ nonvolatility และการนำไปใช้ในหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน (NVM) ได้สูง เพราะมีความเร็วในการทำงานสูงทั้งอ่านและเขียน มีขนาดของเซลล์แต่ละเซลล์มีขนาดเล็ก, ใช้พลังงานต่ำ และมีราคาถูก โดยปรากฏการณ์การเปลี่ยนความต้านทานได้มีการศึกษาในวัสดุหลักๆสองกลุ่ม คือออกไซด์ของโลหะทรานซิชันเช่น TiO_2 , NiO , และ ZrO_2 และอีกกลุ่มคือวัสดุที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ดังกล่าวเช่น $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ และ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

วัสดุเซรามิกสัประเภทยโคอิเล็กทริก และแม่เหล็กกำลังได้รับความนิยมในการศึกษาอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสถานะของแข็ง การนำเซรามิกสัโคอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุ ในวงจรไฟฟ้า การมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์สูง ๆ สามารถนำมาเป็นสิ่งประดิษฐ์ด้านไมโครเวฟ ทั้งนี้ต้องทำให้มีขนาดที่เล็กลงเพื่อเป็นตัวกรองสัญญาณไฟฟ้าที่มีตัวประกอบเป็น $1/\sqrt{\epsilon'}$

จากการศึกษาพบว่าแม่ CCTO จะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงแต่ค่าสูญเสียทางไฟฟ้า ($\tan \delta$) สูงตามไปด้วย ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะปรับปรุงสมบัตินี้ให้ดีขึ้นด้วยการเจือธาตุโลหะเข้าไปในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อทำให้ค่าสูญเสียทางไฟฟ้าลดลงในขณะที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ยังคงมีค่ามากพอ และทำการเตรียมตัวอย่างในรูปของฟิล์มบางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นหน่วยความจำแบบตัวต้านทานแบบสุ่ม (resistance random access memory (RRAM))

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก และสมบัติทางไดอิเล็กตริกของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และตัวอย่าง CCTO ที่ทำการเจือด้วยสารเจือต่างๆ
2. เพื่อศึกษาเงื่อนไขขององค์ประกอบในการเตรียมเซรามิกส์ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$
3. เพื่อศึกษา โครงสร้างผลึก และสมบัติทางไดอิเล็กตริกของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และตัวอย่าง CCTO ที่ทำการเจือด้วยสารเจือต่างๆ ของฟิล์มบางที่เตรียมขึ้น
4. เพื่อศึกษาเงื่อนไขขององค์ประกอบในการเตรียมฟิล์มบางของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในการเป็นตัวเก็บประจุ
5. เพื่อพัฒนาความรู้ ความสามารถทางด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี เพื่อเพิ่มพูนทักษะในการทำวิจัย รวมทั้งศักยภาพ และความเป็นสากลด้านความรู้ทางวิทยาศาสตร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างผลึก และสมบัติทางไดอิเล็กตริกของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และตัวอย่าง $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ทำการเจือด้วยสารเจือต่างๆ
2. ศึกษาเงื่อนไขขององค์ประกอบในการเตรียมเซรามิกส์ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$
3. ศึกษา โครงสร้างผลึก และสมบัติทางไดอิเล็กตริกของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และตัวอย่าง $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ทำการเจือด้วยสารเจือต่างๆ ของฟิล์มบางที่เตรียมขึ้น
4. ศึกษาเงื่อนไขขององค์ประกอบในการเตรียมฟิล์มบางของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในการเป็นตัวเก็บประจุ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาวรรณกรรม ข้อมูล และบทความที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษา และออกแบบการทดลอง พร้อมทั้งติดต่อจัดซื้อสารเคมี และวัสดุที่ใช้ เครื่องมือที่ให้เครื่องมือหรือวิธีการทดสอบ
3. เลือกวิธีการเตรียมตัวอย่างทดลอง หาสภาวะการเตรียมที่ต้องการ วิธีการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางกายภาพ ของชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้
4. พัฒนาให้ได้ตัวอย่างที่มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการไปประยุกต์สำหรับการเป็นตัวเก็บประจุ พร้อมกับออกแบบและเตรียมสารตัวอย่างที่เหมาะสมที่ได้เพื่อใช้เป็นเป้าสำหรับการใช้ปลูกฟิล์มบาง ของ CCTO ต่อไป
5. ทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างที่เตรียมได้ พร้อมทั้งหาองค์ประกอบ หรือแก้ไขเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่เหมาะสม
6. เก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผลการทดลอง
7. สรุปผลการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 สมมุติฐานงานวิจัย

การเตรียม CCTO นั้นต้องคำนึงถึงวิธีการกระบวนการ และเงื่อนไขในการเตรียมเพราะจะมีผลต่อค่าทางไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัดซึ่งถ้าสามารถหาเงื่อนไขการเตรียมหรือองค์ประกอบในการเตรียมที่เหมาะสมได้จะสามารถนำ เซรามิกส์ CCTO ไปประยุกต์ใช้ในงานทดลองที่หลากหลายได้ทำให้สามารถลดขนาดหรือเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้สูงขึ้นได้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ในการเตรียมตัวอย่างเซรามิกส์ และหาองค์ประกอบในการเตรียมที่เหมาะสมได้
2. เพื่อพัฒนาการใช้เครื่องมือในการเตรียมในขั้นตอนต่างๆ และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าทางไฟฟ้า
3. เพื่อพัฒนาความรู้ในการใช้เครื่องมือ Scanning electron microscope (SEM)
4. เพื่อพัฒนาความรู้ในการใช้เครื่องมือ DC & RF Sputtering
5. เพื่อพัฒนาความรู้ในการเตรียมเซรามิกส์
6. การทดสอบสมบัติทางกายภาพ และการวัดค่าทางไฟฟ้า

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

2.1 แนวคิด ทฤษฎีหลักตามประเด็นให้ครอบคลุมเรื่องที่วิจัย

สารแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: CCTO) นั้นเป็นสารเซรามิกส์ ที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของ $\text{A Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ซึ่งเป็นกลุ่มของเซรามิกส์ที่มีค่าไดอิเล็กทริก สูง โดยที่ CCTO มีโครงสร้างเป็นคิวบิก ที่มีโครงสร้างเชิงซ้อน ซึ่งมี TiO_6 เรียงตัวแบบ Octahedra แล้วมีอะตอมของ ทองแดง (Cu) มีพันธะกับอะตอมของออกซิเจนอีก 4 อะตอม และมีอะตอมของแคลเซียมไม่มีพันธะแทรกอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งลักษณะการเรียงตัวแสดงดังรูปที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของ CCTO [3]

2.1.1 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

สารที่มีสมบัติเป็น ไดอิเล็กทริก คือ สารที่มีสมบัติเป็นฉนวนที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นค่าที่บอกความสามารถในการเก็บประจุของสารไดอิเล็กทริกนั้นๆ หรือบอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กทริกนั้นๆ จะเพิ่มเป็นกี่เท่าตัวของตัวเก็บประจุสูญญากาศ

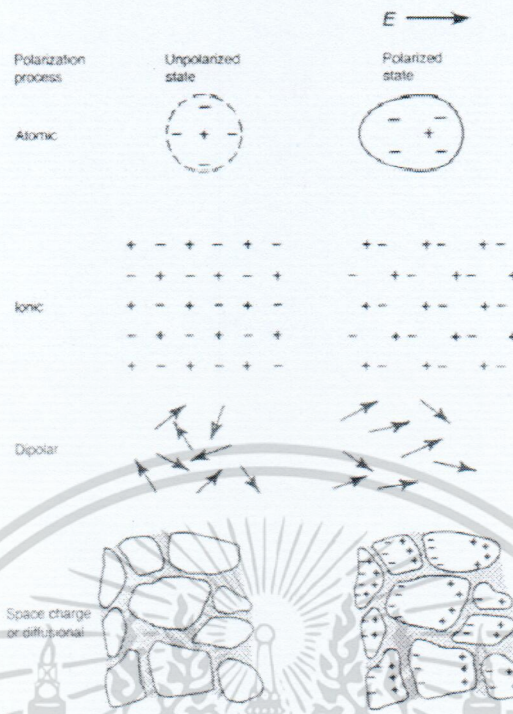
ทั้งนี้สารทุกชนิดจะประกอบด้วยส่วนย่อยที่เรียกว่าโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลปกติประกอบด้วยกลุ่มโปรตอน และกลุ่มอิเล็กตรอน โดยมีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกัน และอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอม เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับโมเลกุลจะทำให้โมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการแยกประจุ โดยกลุ่มประจุบวกจะถูกผลักไปในทิศทางตามสนามไฟฟ้า และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางสวนทางกับสนามไฟฟ้า ดังนั้น โมเลกุลทุกโมเลกุลของสารก็จะก่อตัวเป็นโมเมนต์ขั้วคู่(dipole moment) เล็กๆและชี้ในทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ซึ่งสารไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule) นอกจากนี้ยังมีสารไดอิเล็กทริกบางชนิดที่มีโมเลกุลก่อตัวเป็นโมเมนต์ขั้วคู่อยู่แล้ว แต่ทิศทางของขั้วคู่ไฟฟ้า(electric dipole) ชี้ในทิศทางไม่เป็นระเบียบและเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากกระทำต่อโมเลกุล จะทำให้ขั้วคู่เล็กๆเหล่านี้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) และเรียกโมเมนต์ประเภทนี้ว่าขั้วคู่ถาวร (permanent dipole)

2.1.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เป็นสมบัติในสนามไฟฟ้าสถิต(Dielectric in static electric fields) คือเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สนามไดอิเล็กทริกในอุดมคติ จะไม่มีการนำพาของประจุในช่วง พิสัยยาวเกิดขึ้น จะมีก็เพียงการจัดเรียงประจุกันใหม่อย่างจำกัดเท่านั้น จึงต้องอาศัยโมเมนต์ขั้วคู่(dipole moment) และเรียกว่าการเกิดขั้วหรือการโพลาไรเซชัน(polarization) การเกิดโพลาไรเซชันระดับอะตอม (ซึ่งมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด) นั้นเป็นการกระจัดของอิเล็กตรอนในอะตอมที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของนิวเคลียส สำหรับในวัสดุไอออนิกจะมีการเกิดโพลาไรเซชันแบบไอออนิกเกี่ยวข้องกับการกระจัดสัมพัทธ์ของแคตไอออนและแอนไอออนเพิ่มเติมเข้ามาอีก โดยสนามไฟฟ้าที่ใช้จะไปทำการจัดวางทิศทางของโมเลกุลภายในวัสดุเสียใหม่ ส่วนการเกิดโพลาไรเซชันแบบประจุวากาศ(space charge polarization) นั้นจะเกี่ยวข้องกับการขนส่งของพาหะนำประจุที่เป็นไปอย่างจำกัดจนกระทั่งพาหะเหล่านี้มาหยุดออกอยู่ที่บริเวณกำแพงพลังงานศักย์ ซึ่งอาจจะเป็นขอบเกรนหรือขอบเฟส(phase boundary) ก็ได้ โดยบริเวณการเกิดโพลาไรเซชันแบบต่าง ๆ นั้นได้แสดงไว้ในรูป 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการโพลาไรเซชันแบบต่าง ๆ

โดยหลักการพื้นฐานแล้วขั้วคู่ไฟฟ้าจะประกอบด้วยสองจุดประจุที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน อยู่ห่างกันเป็นระยะ $\chi\delta$ ซึ่งค่าโมเมนต์ขั้วคู่ p ของแต่ละขั้วคู่นั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$P = Q\delta x \tag{2.1}$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีความเป็นบวกอยู่ในแนวเส้นตรงที่ลากจากจุดลบไปยังจุดบวก

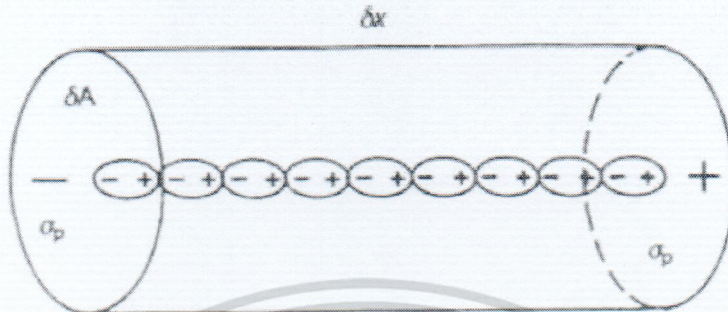
วัสดุที่มีการเกิดโพลาไรเซชันนั้นก็เปรียบเสมือนกับปริซึมขั้วคู่มูลฐาน (elementary dipole prisms) ที่มีความหนาแน่นประจุของพื้นผิวหน้าที่อยู่ตรงปลายปริซึมด้านหนึ่งเป็น $+\sigma_p$ และอีกด้านหนึ่งเป็น $-\sigma_p$ ดังในรูป 2.3 สำหรับค่าโมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยของปริมาตรของวัสดุนั้นจะเรียกว่า การเกิดขั้วหรือโพลาไรเซชัน P และสามารถมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ในแต่ละย่าน จากรูป 2.3 จะได้ขนาดของเวกเตอร์ต่างๆเป็น

$$\delta p = \sigma_p \delta A \delta x = \sigma_p \delta V$$

หรือ

$$\frac{\delta p}{\delta V} = P = \sigma_p \tag{2.2}$$

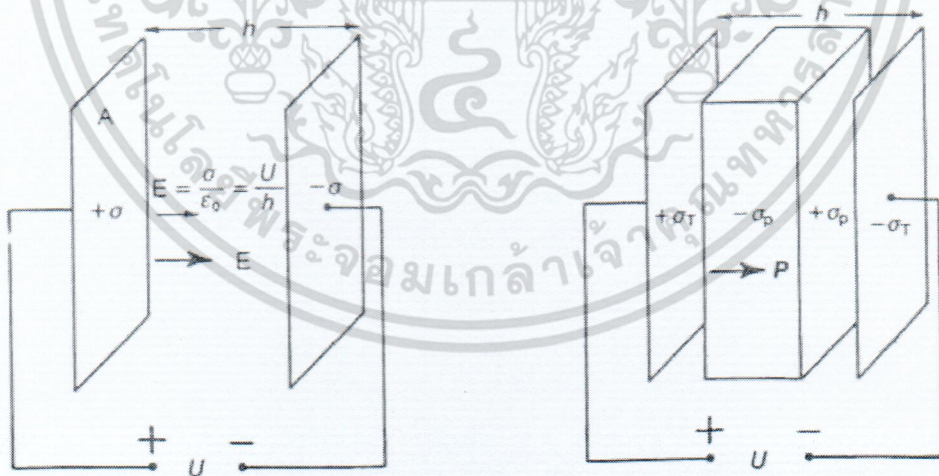
โดยทั่วไปแล้ว $\sigma_p = n \cdot P$ เมื่อ n เป็นเวกเตอร์หน่วยที่พุ่งตั้งฉากตรงออกมาจากพื้นผิวล้อมปิดของวัสดุที่มีการเกิดโพลาริเซชัน



ภาพที่ 2.3 ปริซึมมูลฐานของวัสดุที่มีการเกิดโพลาริเซชัน

ความสัมพันธ์ที่สำคัญหลายอย่างนั้น สามารถพบได้จากการพิจารณาถึงอิทธิพลของการนำสารไดอิเล็กทริกมาใส่เข้าไปในช่องว่างที่อยู่ระหว่างแผ่นระนาบคู่ของตัวเก็บประจุดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งจากทฤษฎีของเกาส์ (Gauss's theorem) นั้นสนามไฟฟ้า E ทั้งที่อยู่ระหว่างและที่ตั้งฉากอยู่กับแผ่นระนาบคู่ขนานที่มีความหนาแน่นประจุบนพื้นผิว σ และมีสูญญากาศกั้นอยู่จะมีค่าเป็น

$$E = \sigma / \epsilon_0 \quad (2.3)$$



ภาพที่ 2.4 บทบาทของสารไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ

เนื่องจากได้มีการให้ความต่างศักย์ขนาดเท่ากันของสภาวะ (ก) และ (ข) ดังนั้น E จึงเป็นเช่นเดิมในกรณี (ข) นั้น ความหนาแน่นประจุที่มาจากการเกิดโพลาริเซชัน σ_p บนพื้นผิวหน้าของสารไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กทริกจะไปหักล้างกับความหนาแน่นประจุรวม σ_T บางส่วนที่อยู่บนแผ่นระนาบ ด้วยเหตุนี้ความหนาแน่นประจุยังผลทำให้เกิด E ในกรณี(ข) จึงลดลงเหลือเพียง $\sigma_T - \sigma_p$ และจะได้ว่า

$$E = \frac{\sigma_T - \sigma_p}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

ความหนาแน่นประจุโดยรวม σ_T จะสมมูลกันกับขนาดของเวกเตอร์การกระจัดทางไดอิเล็กทริก D ดังนั้นจึงได้ว่า

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.5)$$

ถ้าสาร ไดอิเล็กทริกที่พิจารณาอยู่นั้นมีพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น การเกิดโพลาริเซชันก็จะเป็นสัดส่วนกับค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวของวัสดุ ซึ่งถือว่าเป็นกรณีแบบปรกติทั่วไป และจะได้ว่า

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (2.6)$$

เมื่อค่าคงที่ไร้หน่วยอย่างใด (χ_e) เป็นสภาพรับไว้ได้ทางไฟฟ้า (electric susceptibility) โดยปรกติแล้ว χ_e เป็นเทนเซอร์ (tensor) ลำดับที่สอง ถ้าสมมติว่า P และ E นั้นร่วมเป็นเส้นตรงกัน χ_e จะเป็นสเกลาร์ (scalar) อย่างง่ายและจาก (2.4) และ (2.5) จะได้ว่า

$$D = \epsilon_0 E + \chi_e \epsilon_0 E = (1 + \chi_e) \epsilon_0 E \quad (2.7)$$

เนื่องจาก $D = \sigma_T$,

$$\frac{Q_T}{A} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \frac{U}{h} \quad (2.8)$$

เมื่อ Q_T เป็นค่าประจุรวมบนแผ่นตัวเก็บประจุ ดังนั้นจึงได้ค่าความจุ (C) เป็น

$$C = \frac{Q_T}{U} (1 + \chi_e) \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (2.9)$$

เนื่องจากสุญญากาศนั้นมีสภาพรับไว้ได้เป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุที่เป็นเพียงแผ่นคู่ขนาดอันว่างเปล่าจึงมีค่าความจุ (C_0) เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (2.10)$$

ถ้านำสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพรับไว้ได้ χ_e มาใส่ไว้ในช่องว่างระหว่างแผ่นคู่ขนานก็จะทำให้ค่าความจุเพิ่มขึ้นด้วยค่าตัวประกอบ $1 + \chi_e$ ซึ่งสภาพยอม (permittivity) หรือ ϵ ของสารไดอิเล็กทริกนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi_e) \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = (1 + \chi_e)\epsilon_r$$

ดังนั้น ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นคู่ขนาน เป็นดังความสัมพันธ์

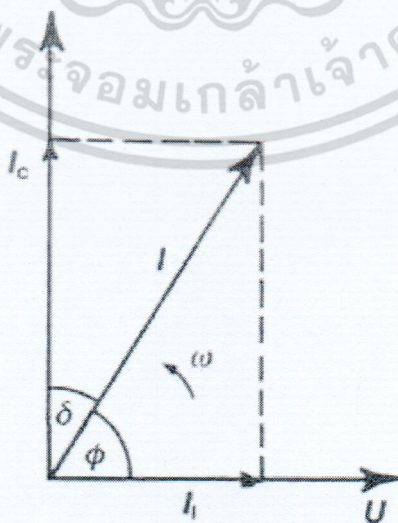
$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (2.11)$$

เมื่อ ϵ_r เป็นสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) หรือที่นิยมเรียกกันว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของสาร ไดอิเล็กทริกนั่นเอง

2.1.3 การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss tangent)

เมื่อสารไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามกระแสไฟฟ้าสลับ กระแสที่ไหลผ่านสารไดอิเล็กทริกจะมีเฟสหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา ดังรูป

2.5



ภาพที่ 2.5 ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นในสารไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการสูญเสียพลังงาน โดยการสูญเสียพลังงานเฉลี่ยสามารถหาได้โดยพิจารณา กระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสีย I

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \sin(\omega t) I_0 \cos(\omega t - \delta) dt \quad (2.12)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ(2.12) จะได้

$$P = \frac{1}{2} I_0 U_0 \sin \delta$$

เนื่องจาก $I_0 = I_c / \cos \delta$ และ $I_c = \omega U_0 C$ ดังนั้น พลังงานที่สูญเสียเฉลี่ย คือ

$$P = \frac{1}{2} U_0^2 \omega C \tan \delta$$

เมื่อ $U_0/\sqrt{2}$ และ $I_0/\sqrt{2}$ คือความต่างศักย์รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (rms voltage) และ รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (rms current) ตามลำดับ โดยที่ $\tan \delta$ เรียกว่า การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent)

จากการศึกษาผลงานการค้นคว้าที่ผ่านมาพบว่า สามารถเตรียมสารเซรามิกส์ CCTO ได้โดยวิธีการผสมออกไซด์ของสารตั้งต้น (mixed oxide method) และทำการเผาแคลไซต์เพื่อให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากัน กลายเป็นสารเซรามิกส์ CCTO ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมที่สะดวก และมีความยุ่งยากน้อยที่สุด แต่ต้องหาอุณหภูมิสำหรับเผาเพื่อทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมผงเซรามิกส์ CCTO จากสารตั้งต้น คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) , แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) , และ ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) โดยผสมกันโดยเทคนิคการผสมออกไซด์ (mixed oxide technique) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยเครื่องบดย่อยแบบสั่น จากนั้นนำผงที่ได้ไปเผาแคลไซต์ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $850 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ และใช้เวลาเผาแช่ต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X - ray deflection technique) โดยนำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล Inorganic Crystal structure Database (ICSD) หมายเลข 032002.[11] เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียม หลังจากนั้นทดลองเจือด้วยธาตุเติมแต่งต่างๆ ซึ่งเป็นการเติมสารเจือที่มีอนุภาคในระดับนาโนประเภทเซรามิกส์ทางโครงสร้าง และเป็นการเจือแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจือภายนอก มีการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสภาพการสูญเสียไดอิเล็กทริก และการวัดค่าความแข็งในระดับอนุภาคของเซรามิกส์ที่เติมสารเจือประเภทต่างๆ ลงไป เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ทำตัวเก็บประจุ ที่มีค่าความแข็งที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงเตรียมตัวอย่างที่มีค่าที่เหมาะสม

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

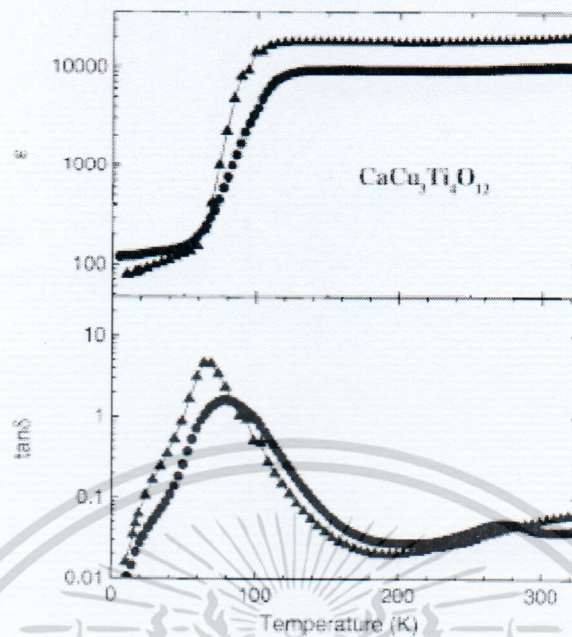
จากการศึกษาวรรณกรรมปริทัศน์ของสารเซรามิกส์ CCTO นั้นพบว่าการศึกษาที่เกี่ยวกับสารชนิดนี้มีกันยังไม่แพร่หลาย โดยสารในกลุ่ม $ACu_3Ti_4O_{12}$ เริ่มมีการค้นพบในปี ค.ศ.1967 และสามารถอธิบายโครงสร้างได้ในปี ค.ศ. 1979 [4] และเริ่มมีการศึกษาโดยนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่ม เช่น A.P. Ramirz et. al. [5], M.A. Subramanian et. al. [6], A.F.L. Almeida et. al. [7] และ W. Kobayashi et. al. [8] จากการศึกษาข้อมูลที่ได้พบว่า CCTO เป็นสารเซรามิกส์ ที่มีค่าไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ สูงที่สุดในกลุ่ม ซึ่งตารางแสดงค่าไดอิเล็กทริกแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยที่ความถี่ 1 kHz และอุณหภูมิ ในช่วง 100–300 K ค่าไดอิเล็กทริกจะมีค่าสูงขึ้นมาประมาณ 10000 และค่าการสูญเสีย ($\tan\delta$) จะลดลงต่ำกว่าค่าใน ช่วงอุณหภูมิ น้อยกว่า 100 K โดยมีกราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ($\tan\delta$) แสดงดังในรูปที่ 2.7

Dielectric and Cell Edge Data for $ACu_3M_4O_{12}$ Phases (at 25 °C)

Compound	Relative dielectric constant (K)	Loss tangent (D)	a (Å at 25 °C)
$CaCu_3Ti_4O_{12}$	10,286	0.067	7.391
$CdCu_3Ti_4O_{12}$	409	0.093	7.384
$La_{2/3}Cu_3Ti_4O_{12}$	418	0.060	7.427
$Sm_{2/3}Cu_3Ti_4O_{12}$	1,665	0.048	7.400
$Dy_{2/3}Cu_3Ti_4O_{12}$	1,633	0.040	7.386
$Y_{2/3}Cu_3Ti_4O_{12}$	1,743	0.049	7.383
$Bi_{2/3}Cu_3Ti_4O_{12}$	1,871	0.065	7.413
$BiCu_3Ti_3FeO_{12}$	692	0.082	7.445
$LaCu_3Ti_3FeO_{12}$	44	0.339	7.454
$NdCu_3Ti_3FeO_{12}$	52	0.325	7.426
$SmCu_3Ti_3FeO_{12}$	52	0.256	7.416
$GdCu_3Ti_3FeO_{12}$	94	0.327	7.409
$YCu_3Ti_3FeO_{12}$	33	0.308	7.394

ภาพที่ 2. 6 แสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของสารเซรามิกส์ในกลุ่ม $ACu_3Ti_4O_{12}$ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

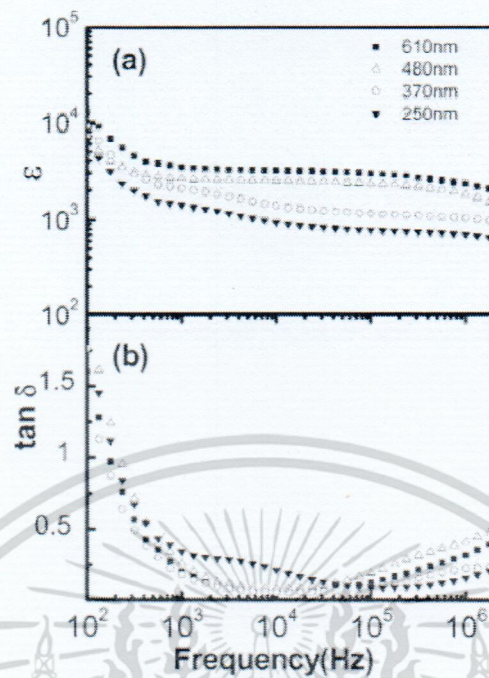


ภาพที่ 2.7 แสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของสารเซรามิกส์ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ [5]

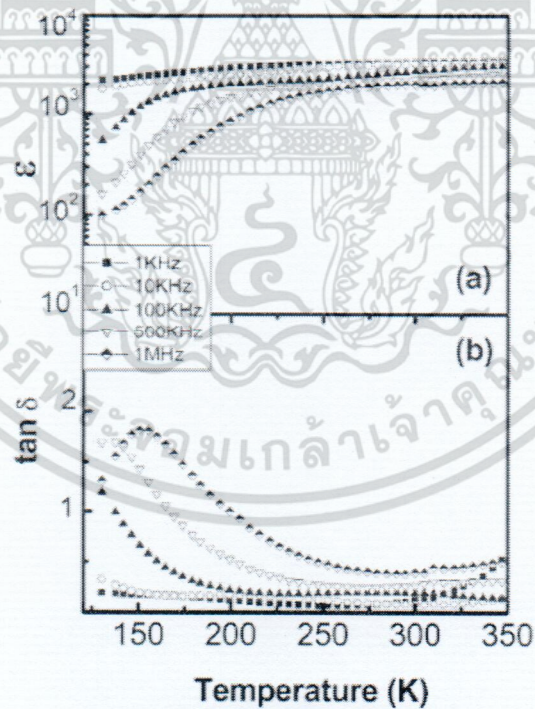
จากการศึกษางานวิจัยที่มีการตีพิมพ์เกี่ยวกับการศึกษา CCTO นั้น ก็ยังเป็นการศึกษาที่เน้นไปในทางการลดค่าสูญเสียทางไฟฟ้าลงเพราะค่าไดอิเล็กทริกของสาร CCTO มีค่าสูงจึงมีการศึกษากันมาก ซึ่งมีการศึกษาล่าสุดที่น่าสนใจดังนี้

ในปี ค.ศ. 2003 Liang Fang และคณะ [9] ประสบความสำเร็จ ในการเตรียมฟิล์มบาง CCTO ที่ค่าคงที่ฉนวนสูงบนพื้นผิว $\text{Pt}/\text{Ti}/\text{Si}_2\text{O}/\text{Si}$ (100) ด้วยเครื่อง PLD โดยโครงสร้างผลึกจุลภาคของฟิล์มบาง CCTO ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของพื้นผิวและความดันออกซิเจน (2 2 0) ซึ่งฟิล์มบางชนิดพิเศษสามารถรับอุณหภูมิพื้นผิวสูงกว่า 700°C และความดันออกซิเจนสูงกว่า 13.3 Pa คือฟิล์มบางขนาด 480 นาโนเมตรที่สามารถรับอุณหภูมิและความดันที่ต่ำกว่า 720°C และ 26.6 Pa และจะมีค่าคงที่ฉนวนค่อนข้างสูง ประมาณ 2,000 ที่ความถี่ 10 Hz ที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติฉนวนของฟิล์มบาง CCTO บนพื้นผิว $\text{Pt}/\text{Ti}/\text{Si}_2\text{O}/\text{Si}$ สามารถเทียบเคียงกับข้อสังเกตในพื้นผิวฟิล์ม CCTO บนพื้นผิวออกไซด์ได้ ซึ่งในกระบวนการเตรียมฟิล์มด้วย PLD คุณสมบัตินั้นยังขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่น ในกระบวนการสะสม (deposition) เช่นความหนาแน่นของพลังงานที่อัตราการเกิดซ้ำและความยาวคลื่นเลเซอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพลังงานเพื่อให้มีค่าสูงขึ้นเช่น ที่ความหนาแน่น 4 J cm^{-2} พบว่าพื้นผิวของฟิล์มขรุขระและคุณสมบัติฉนวนของฟิล์มแยกลง เมื่อนำไปวัดเปรียบเทียบค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่มีความหนาแตกต่างกันได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 2.8 และเปรียบเทียบค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของฟิล์มที่มีความหนาเท่ากันที่ความถี่ต่างๆกัน ได้ผลดังกราฟรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



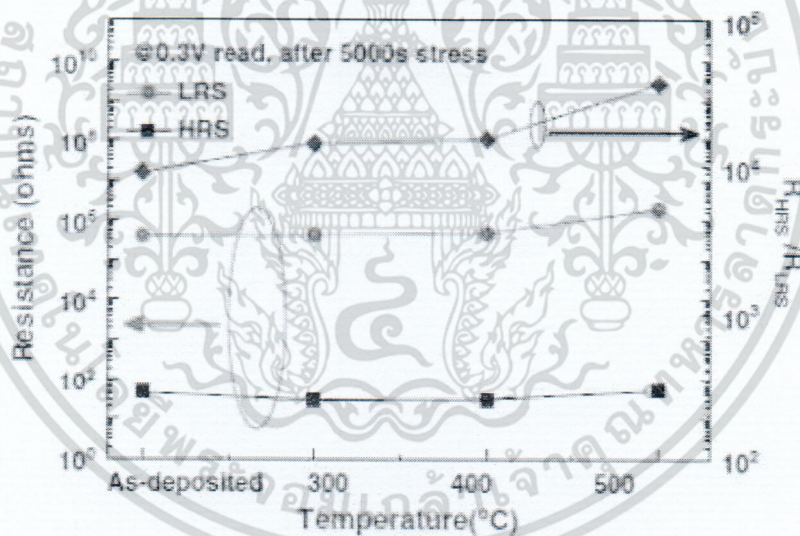
ภาพที่ 2.8 แสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของฟิล์มเซรามิกส์ CCTO ที่ความหนาต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 2.9 แสดงค่าไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสีย ของฟิล์มเซรามิกส์ CCTO หนา 480 nm ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

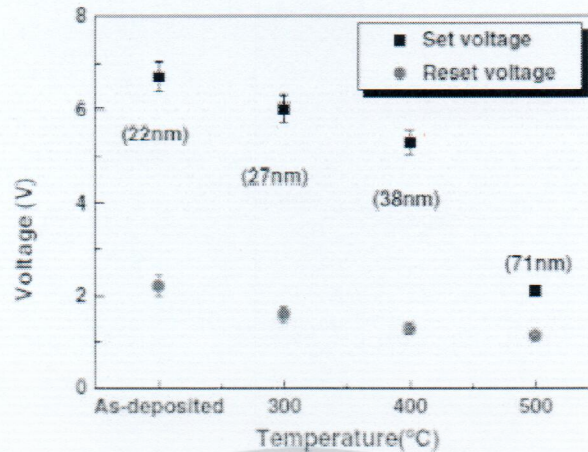
ในปี ค.ศ. 2011 Li-Chun Chang และคณะ [10] ศึกษาอิทธิพลของการฉีดอิเล็กตรอนเมื่อเปลี่ยนแปลงตัวต้านทานไฟฟ้าเหนี่ยวนำพัลส์ของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ฟิล์ม (CCTO) ที่มีโครงสร้างแบบ perovskite ได้ทำการศึกษาโดยการตรวจวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้า (IV) พบว่าการฉีดอิเล็กตรอนนั้นลดลงเมื่อการหลอมตัวอย่างในบรรยากาศออกซิเจน เพื่อให้ความต้านทานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากความต้านทานสูง (HRS) เป็นความต้านทานต่ำ (LRS) ซึ่งทำให้กลไกเส้นใยถูกระงับการฉีด เมื่อตัวนำปล่อยพลังงานแบบ Poole-Frenkel ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจะมีบทบาทที่สำคัญในการพิจารณาวิธีการฉีด ดังนั้นจึงได้ศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานและพบว่า มีผลต่อลักษณะการทำงานของฟิล์ม CCTO ที่เตรียมด้วยด้วยเครื่อง RF สปีดเตอร์ที่อุณหภูมิการหลอมต่างๆ โดยทำให้ V_{set}, V_{reset} และการรั่วไหลของความหนาแน่นกระแสของ HRS (high resistance state) ลดลงในขณะที่อุณหภูมิการหลอมเพิ่มขึ้น ซึ่งการนำไฟฟ้าของฟิล์ม CCTO annealed จะน้อยลงที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น กลไกสำหรับการนำ LRS (low resistance state) และ HRS (high resistance state) มีลักษณะการทำงานแบบ ohmic และปล่อยพลังงานแบบ Poole-Frenkel ตามลำดับ ส่วนตัวเก็บประจุ $\text{Ni} / \text{CCTO} / \text{Pt}$ แสดงความต้านทานที่สูงมากที่สุดสลับกับผลจากอัตราส่วนการเปิด / ปิดมากกว่าสามขนาด หลังการทดสอบความเครียด 5000 s



ภาพที่ 2.10 The resistance, RHRS and RLRS, endurance and the RHRS / RLRS ratio of CCTO films annealed at 500 °C.

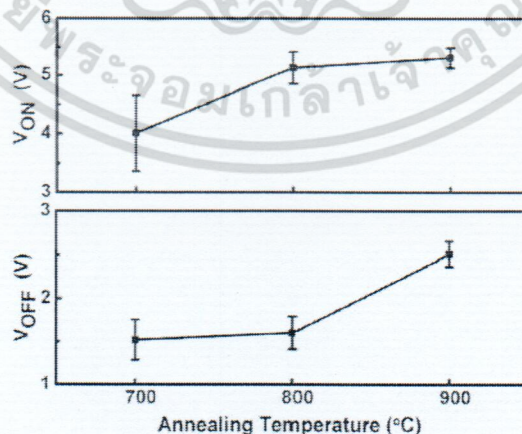
ซึ่งได้ค่าผลต่างของความต่างศักย์ภาวะทำงาน และภาวะลบกการทำงาน เพื่อนำไปใช้เป็นหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนที่ใช้หลักการเข้าถึงด้วยตัวต้านทานแบบสุ่ม (RRAM) ซึ่งได้ผลการทดลองของค่าความต่างศักย์ ภาวะ SET ภาวะ RESET เทียบกับอุณหภูมิการอบอ่อนดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



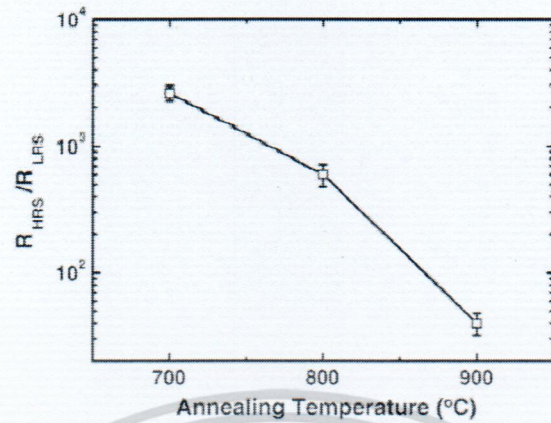
ภาพที่ 2.11 ค่าความต่างศักย์ทั้งภาวะ SET และ RESET ของ CCTO ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2008 Yu-Shu Shen และคณะ [11] ค้นพบว่า $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) เป็นวัสดุแปลกใหม่ สำหรับการทดลองความต้านทานต่อการประยุกต์เข้าถึงหน่วยความจำโดยสุ่ม ซึ่งถูกเตรียมโดยวิธีโซลเจลและการหลอม (annealed) ที่อุณหภูมิต่างๆ จึงทำการศึกษาความต้านทาน bistable แล้วพบว่าสามารถเปลี่ยนลักษณะบางประการของฟิล์ม CCTO ที่เตรียมโดยวิธีโซลเจลที่อุณหภูมิการหลอมต่างๆ โดยฟิล์ม CCTO จะแสดงปรากฏการณ์โดยความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิหลอม (annealed) อย่างน้อย 700°C ขึ้นไป ทำให้ค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการหลอม, V_{ON} , V_{OFF} , การรั่วไหลของกระแส HRS และค่าความต้านทาน LRS เพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากผลกระทบบ defect-healing มาก หรือน้อยกว่าขอบเกรนของฟิล์ม CCTO ที่อุณหภูมิหลอม (annealed) ที่สูงขึ้น ฟิล์มที่ทำการหลอม (annealed) ที่อุณหภูมิ 800°C จะมีศักยภาพสูงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับ RRAM ที่เนื่องจากเป็นวงจรที่มีขนาดใหญ่อะและทนทาน

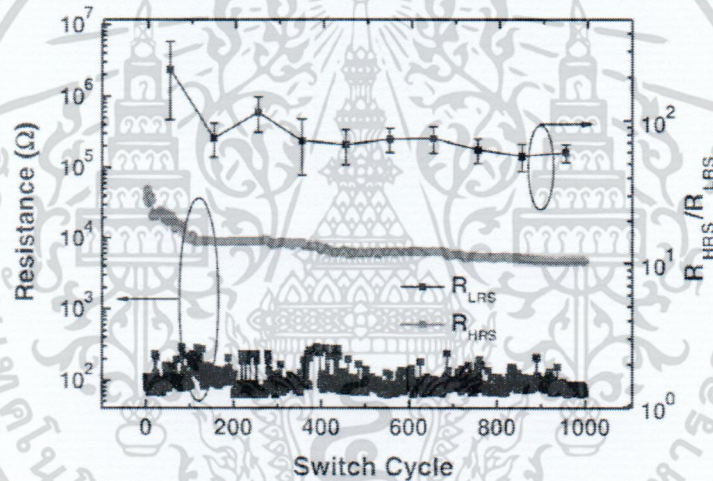


ภาพที่ 2.12 Turn-on voltage (V_{ON}) and turn-off voltage (V_{OFF}) of CCTO films as the function of annealing temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.13 Resistance ratio, R_{HRS}/R_{LRS} , as the function of the annealing temperature



ภาพที่ 2.14 The resistance, R_{HRS} and R_{LRS} , endurance and the R_{HRS}/R_{LRS} ratio of CCTO films annealed at 800 °C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและชนิดของเฟสที่เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ลงบนพื้นผิววัสดุแล้วเกิดการกระเจิง (scattering) และเลี้ยวเบน โดยมีมุมการเลี้ยวเบนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างและระนาบรังสีตกกระทบภายในวัสดุ เนื่องจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับวัสดุแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุชนิดนั้นๆ ดังนั้นเมื่อนำเครื่องตรวจวัด(detector) มารองรับรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็สามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุประเภทใด โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ค่ามุมของแบรกก์(Bragg's angle) และความเข้มพีครังสีเอ็กซ์ของรูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตรวจสอบได้ เมื่อนำมาเทียบกับข้อมูลสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลมาตรฐาน(JCPDS files) จะสามารถบอกได้ว่าสารที่นำมาตรวจสอบเป็นสารประเภทใด พร้อมทั้งบอกได้ว่าสารมีเฟสใด

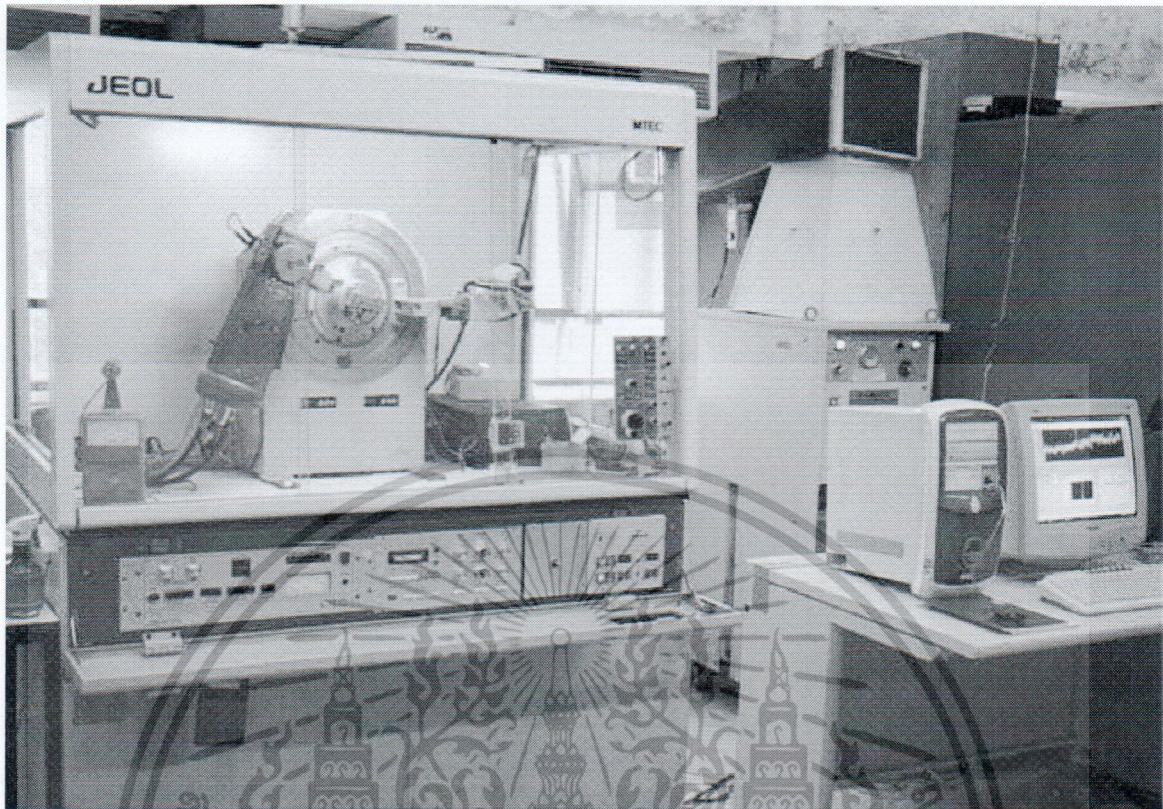
ขั้นตอนการตรวจสอบนั้นเริ่มจากนำผงหรือชิ้นงานเซรามิกที่ต้องการตรวจสอบมาบรรจุใส่ในกระจกสำหรับใส่สารตัวอย่าง จากนั้นนำไปวางที่ช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์(X-ray diffractometer) (รูปที่ 3.1) แล้วจึงเครื่องโดยใช้เป้าทองแดง($\text{CuK}\alpha$) ที่ใช้รังสีเอ็กซ์ค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.54 \AA ทำการบันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนจากค่ามุม 2θ ที่ 10 องศาไปจนถึงค่ามุม 2θ ที่ 60 องศา นำค่ามุม 2θ ที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนมาคำนวณค่า d-spacing จากกฎของแบรกก์ ดังสมการ (3.1)

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \quad (3.2)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)

3.2 การตรวจสอบสมบัติกายภาพ

3.2.1 การหาค่าการหดตัวของแห้ง (Shrinkage)

การศึกษาค่าการหดตัวของแห้งในงานวิจัยนี้จะศึกษาค่าการหดตัวเชิงเส้น (linear shrinkage) ของชิ้นงานเซรามิกส์ หลังผ่านกระบวนการเผาซินเตอร์ ด้วยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังเผาซินเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการหดตัวของเซรามิกส์ตามสมการ (3.2)

$$\text{ค่าการหดตัวเชิงเส้น (\%)} = \frac{(D_1 - D_2)}{D_1} \times 100 \% \quad (3.2)$$

เมื่อ D_1 และ D_2 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนและหลังการเผาซินเตอร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การหาความหนาแน่น(Density)

ทำการหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำของ อาร์คิมิดีส (Archimedes) เริ่มจากการนำเซรามิกที่ต้องการหาค่ามาชั่งขณะแห้ง (W_1) จากนั้นนำมา ต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ในอากาศจนเย็นจึงนำมาชั่งขณะเปียก (W_2) และชั่งใน น้ำ (W_3) บันทึกค่าต่างๆที่วัดได้แล้วนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นจากสมการ (3.3)

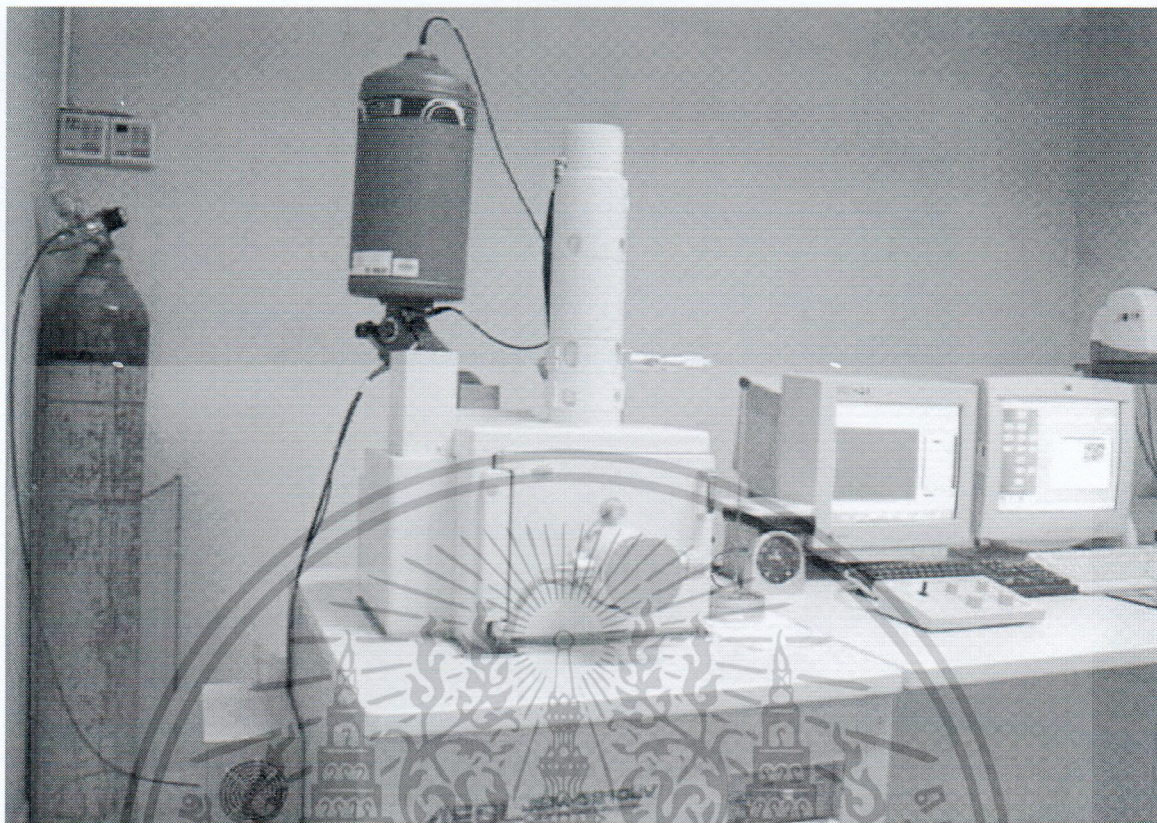
$$\rho_c = \frac{W_1}{(W_2 - W_3)} \times \rho_{H_2O} \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ_c และ ρ_{H_2O} คือ ความหนาแน่นของเซรามิก และน้ำที่ใช้ในการทดลอง

W_1, W_2 และ W_3 คือ น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งอากาศขณะแห้ง ขณะเปียก และใน น้ำ ตามลำดับ

3.2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก

การตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด(SEM) ดังแสดงในรูป 3.2 ของชิ้นงานเซรามิก $Ti_{1-x}Nb_xO_2$ ที่มีสัดส่วนต่างๆ และผ่าน กระบวนการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ เริ่มจากทำความสะอาดผิวชิ้นงาน แล้วทำการอบให้แห้ง จากนั้น หักชิ้นงานเป็นชิ้นเล็กๆ นำแต่ละชิ้นไปติดบนแท่นทองเหลือง(stub) ด้วยเทปคาร์บอนโดยจัดให้ผิวหน้า (surface) และรอยหัก (fracture) วางอยู่บนตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM จากนั้นทำการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยทองคำ โดยใช้เทคนิคสปัตเตอร์(sputtering) แล้วนำไปทำการ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM 840A ณ ศูนย์วิจัยและ
บริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3.2.4 การตรวจสอบสมบัติไฟฟ้าของเซรามิกส์

3.2.4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า(Resistivity)

ในการทำการตรวจสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า รวมทั้งสมบัติไฟฟ้าอื่นๆ และสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกส์ ที่มีสัดส่วนการเจือที่มีปริมาณต่างๆ และเผาที่อุณหภูมิซินเตอร์ต่างๆกัน ก่อนทำการตรวจสอบสมบัติ ชั้นเซรามิกส์ ต้องผ่านการทำขั้วไฟฟ้าก่อน ด้วยการสเปคเตอร์เพลตตินัมลงบนผิว โดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ประมาณ 15 มิลลิแอมแปร์ และความต่างศักย์ประมาณ 520 โวลต์ ทำเช่นนี้ทั้งสองด้าน หลังจากทำขั้วไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว นำมาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล บันทึกค่า แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสมการที่ (3.4)

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot A}{h} \quad (3.4)$$

เมื่อ ρ_s คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ ($\Omega - cm$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_s	คือ	ความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ (Ω)
h	คือ	ความหนาของชั้นเซรามิกส์ (cm)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเซรามิกส์ (cm^2) ซึ่งคำนวณจาก $\pi \frac{d^2}{4}$ เมื่อ d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิกส์

3.2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและกระแสไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้า

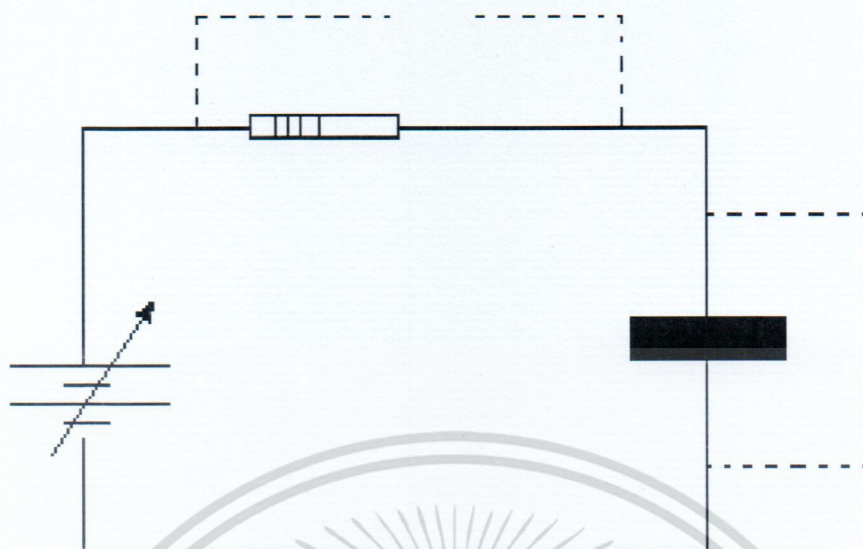
(J-E characteristics)

หลังจากทำขั้วไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว นำตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) และค่าสนามไฟฟ้า (electric field : E) โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะหาได้จากค่ากระแสไฟฟ้าและค่าสนามไฟฟ้าจะได้มาจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นงานเซรามิกส์ การหาค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์เริ่มจากการนำชิ้นงานเซรามิกส์ ที่ต้องการตรวจสอบมาต่อเข้ากับวงจรดังรูปที่ 3.3 จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่วงจร (V_{CC}) แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่คร่อมชิ้นงานเซรามิก (V_S) และค่าความต่างศักย์ที่คร่อมตัวต้านทานที่ทราบค่า (V_R) ซึ่งตัวต้านทานที่ทราบค่าที่ใช้ในวงจรสำหรับเซรามิก CCTO แต่ละสัดส่วนอาจใช้ค่าต่างกันเนื่องจากความต้านทานของเซรามิกส์แต่ละชิ้นนั้นอาจมีค่าแตกต่างกันมาก หลังทำการทดลองจ่ายกระแสไบแอสตรงเรียบร้อยแล้ว บันทึกค่าความต่างศักย์ V_S และ V_{CC} (ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า) ที่อ่านได้ในแต่ละครั้งที่ปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่าย คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นเซรามิกส์ เนื่องจากวงจรที่ใช้ทำการทดลองนั้นตัวต้านทานทราบค่าต่ออนุกรมอยู่กับชิ้นงานเซรามิกส์ซึ่งก็คือกระแสที่ไหลในวงจรมันเอง ดังนั้นสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นเซรามิกส์ได้จากสมการ (3.5)

$$I_S = I_R = \frac{V_R}{R} \quad (3.5)$$

เมื่อ	I_S และ I_R	คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นเซรามิกและตัวต้านทานตามลำดับ (A)
	V_R	คือความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานทราบค่า (V) ซึ่งหาได้จาก $V_{CC} - V_S$
	R	คือค่าความต้านทานของตัวต้านทานทราบค่า (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 แผนภาพวงจรที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และ ค่าสนามไฟฟ้า

หลังจากทราบค่า I_S และ V_S แล้ว นำค่าทั้งสองมาแทนในสมการ (3.6) และ (3.7) เพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J และค่าสนามไฟฟ้า E ตามลำดับ

$$J = I_S / A \quad (3.6)$$

$$E = V_S / h \quad (3.7)$$

เมื่อ	J	คือ	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/cm^2)
	E	คือ	สนามไฟฟ้า (V/cm)
	h	คือ	ความหนาของชั้นเซรามิกส์ (cm)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเซรามิกส์ (cm^2)

3.2.5 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกส์

ในการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกส์ *CCTO* สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent, $\tan \delta$) ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยใช้เครื่อง LCR มิเตอร์ Agilent รุ่น 38401A โดยค่าที่วัดได้คือค่าความจุไฟฟ้า (capacitance, C) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ทำการวัดเทียบในช่วงความถี่

100Hz – 1MHz การทดลองทำได้โดยนำเซรามิกส์ที่ต้องการวัดต่อเข้ากับหัววัดจากนั้นบันทึกค่าความจุไฟฟ้า และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก นำค่าความจุไฟฟ้ามาคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากสมการ(3.8)

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot h}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (3.8)$$

เมื่อ	ϵ_r	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หรือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity)
	ϵ_0	คือ	ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.8854 \times 10^{-12} \text{ F/M}$
	C	คือ	ความจุไฟฟ้า (F)
	h	คือ	ความหนาของเซรามิกส์ (m)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเซรามิกส์ (m^2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Platinum Substitution on the Microstructures and Dielectric Relaxation of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics

Worawut Makcharoen^{1, a}

¹College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Bangkok 10520, Thailand

^awarmak77@gmail.com

Keywords: CCTO, Dielectric properties, Perovskites, IBLC

Abstract. The $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) has the advantage for the various applications especially for capacitive elements in microelectronic devices over the ferroelectric materials including BaTiO_3 . CCTO is a ceramic compound with a high dielectric constant but it has a high loss tangent at room temperature. In this work, the Influences of PtO_2 doping on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) ceramics were investigate. The ceramics CCTO and PtO_2 doping CCTO were studied by X-ray diffraction, scanning electron microscopy. The dielectric properties have been measured as a function of temperature and frequency range 0.1 - 500 kHz. The XRD shows the CCTO structure does not changes after doping with platinum. The results show that PtO_2 doped can reduce the mean grain sizes of CCTO, but the dielectric constant still remained a height. The samples of 2.0 mol% Pt-doped have exhibited high dielectric constant of about 22,000 and the loss tangent about 0.7 at room temperature and frequency at 10 kHz. The reduced of the loss tangent could be interpreted with the internal barrier layer capacitor model (IBLC)

Introduction

The high dielectric material $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO), discovered by Subramanian et al. [1], exhibits high dielectric constant over 10000 at room temperature $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) has attracted a significant amount of attention base on dielectric properties [1-3]. The dielectric constant is almost temperature independent from 200 K to 400 K, with low frequency dielectric constant of CCTO can be as high as 95,000 in single crystals, and 12,000 in sintered pellets [4, 5]. For the ceramic [4] and thin-film [6] samples at room temperature, the typical value of $\tan \delta$ is about 0.2 at 10 kHz. The dielectric materials are widely used in electrical components such as capacitors as well as switching and sensing devices [3]. The CCTO has a complex cubic perovskite like structure with a lattice parameter, $a \sim 7.393 \text{ \AA}$ [7]. The explanation of high dielectric constant of CCTO was proposed in terms of local dipole moments associated with off-center displacement of Ti ions [1]. Change in dielectric constant of CCTO has been wildly related to its microstructure [8]. It is also reported that electrical properties of CCTO depends on many factors such as processing conditions, doping, and chemical stoichiometry. The partial substitution of divalent Ca^{2+} by the trivalent La^{3+} was carried out, in order to increase the conductivity of the grains [9]. The loss angle can be reduced by adding of some elements such as platinum oxide (PtO_2) [10]. L. Avalliet al. [11] reported that dielectric constant in TiO_2 thin film was improved by doping PtO_2 . In this work we extend the study on CCTO samples with substitutions of Ti ions by Pt ions. The CCTO ceramics were fabricated via a solid-state reaction. Properties of the obtained ceramics were investigated with the aim of improving its dielectric properties. Characterization of the samples was carried out using x-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Physical properties such as, density, dielectric constant and loss tangent were also investigated.

Materials and Methods

The undoped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) powder was prepared by the mixed-oxide route. High purity (> 99.9%) CaCO_3 (Riedel-de Haen), CuO (Aldrich) and TiO_2 (Riedel-de Haen) powders were weighed in an appropriate ratio, fully mixed by vibratory milling machine for 10 hour using

yttria-stabilized zirconia balls in ethanol media. After being dried, the powders were calcined at 900°C for 2 hour to form the CCTO powder. For the doping study, PtO₂ powders at various concentrations were mixed to CCTO at the calcinations stage (1.0 and 2.0 mol %). The calcined powder was granulated using polyvinyl alcohol (PVA) 3% binder and formed under a uniaxial pressure of 1,500 kg/cm² into discs, typically 10 mm in diameter and 1.5 mm in thickness. The discs were sintered in air at 1,000°C in a step of 5°C/min (with soaking time of 4 hour). During sintered oxygen gas was fed into the furnace at the rate of 100 c.c./min. The discs were polished to produce the flat uniform surfaces. The characterization of the samples was carried out using x-ray diffraction (XRD) (using Bruker D8 Discover) at room temperature using CuK_α radiation as the x-ray source and scanning electron microscopy (SEM) (using JEOL JSM-5910LV). Silver paste was used as the electrical contact. The painted samples were dried at 700 °C for 20 minutes. The dielectric constants and loss tangents against temperature were measured at the frequency of 100 Hz - 500 kHz (using Agilent 4284A LCR meter). Other physical properties such as, density, shrinkage were intensively studied.

Results and discussion

Fig. 1 illustrates the XRD patterns for the undoped CCTO and PtO₂ doped CCTO ceramics. All diffraction peaks were corresponds to the known peaks of the standard CCTO, indexed from the data in the Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) file No.032002. All samples exhibited a phase-pure perovskite within the detection limit of the XRD equipment. The crystal symmetry of the samples at room temperature was determined to be cubic. In addition, density and shrinkage slightly increased with the concentration (Fig.2), suggesting that the doping oxide slightly promoted the densification.

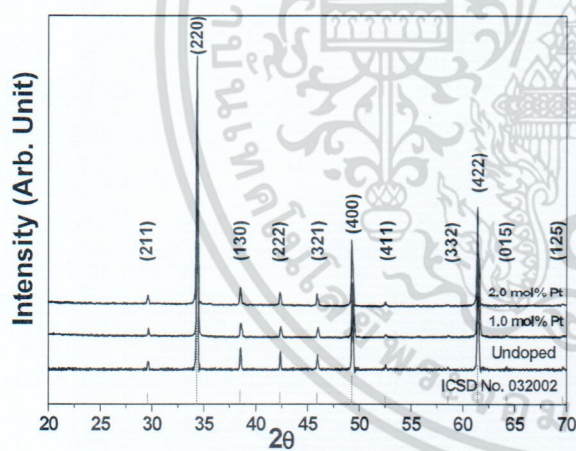


Fig. 1 XRD patterns of pure and doped CCTO: undoped CCTO, 1.0 mol% Pt doped CCTO and 2.0 mol% Pt doped CCTO.

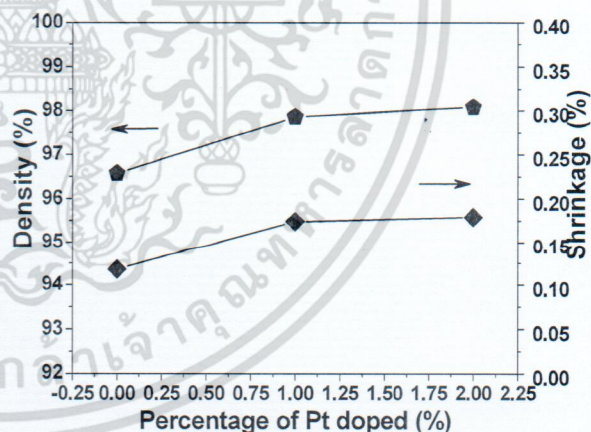


Fig. 2 Density and shrinkage of CCTO as a function of doping concentration.

Fig. 3 illustrates SEM images of the fracture surfaces of undoped and doped samples. Partial intergranular fracture was observed for the unmodified sample. After doping, the doped samples exhibited a non-uniform in grain size. The morphology of PtO₂ doped CCTO sample consists of some huge grains (3–5 μm), surrounded by small ones (~0.5 μm). The fracture mode changed to mainly intra-granular for the doped samples, suggesting a higher strengthening of the grain boundaries.

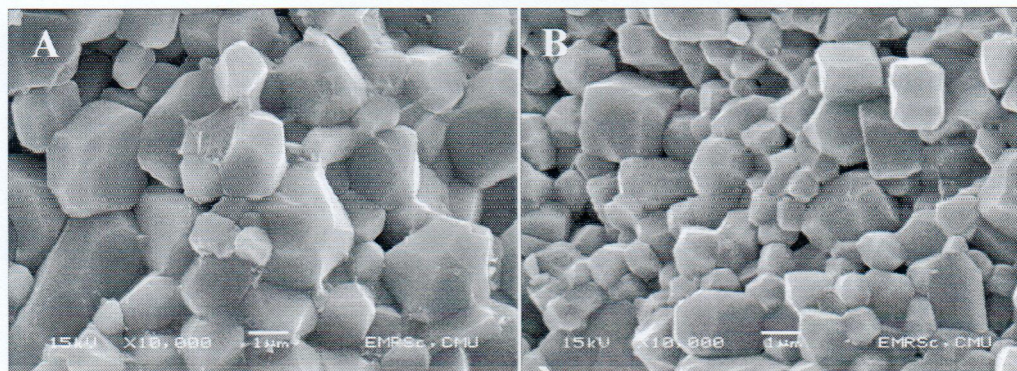


Fig. 3 Fracture surfaces of selected samples: (A) the crack of undoped CCTO ceramics and (B) the crack of 2.0 mol% Pt doped CCTO ceramics.

These results indicate a rearrangement of grain boundary structure take place due to the effect of the addition. A slightly decrease in grain size was observed after doping: grain size slightly decreased from 5 μm for unmodified sample to 1 μm for the 2.0 mol% sample. It is believe that some amount of Pt ions may go into the CCTO lattices. However, the existence of the small grains, suggested that partial Pt ions which could not go into the lattices and it produced the grain growth inhibition.

Fig. 4 illustrates the temperature dependences on dielectric constant and loss tangent at various frequencies of the undoped CCTO and 2.0 mol% Pt doped CCTO ceramic samples. For the unmodified CCTO, the dielectric constant exhibited a stronger dielectric-frequency dependent while the doped samples showed a weaker dielectric-frequency dependent. It should be noted that at a high frequency, all samples showed a dielectric independent of temperature. The dielectric constant at room temperature and at 10 kHz decreased from 35,000 for the unmodified sample to 22,000 for the 2.0 mol% Pt doped sample. However, the doping improved in the loss tangent performance (Fig.4 (D)). The loss tangent at room temperature and at 10 kHz decreased from 0.15 for the unmodified sample to 0.07 for the 2.0 mol% Pt doped sample while at 100 kHz, it decreased from 0.1 for the unmodified sample to 0.025 for the 2.0 mol% Pt doped sample. However, the lowest loss tangent was 0.01 at 500 kHz and at $\sim 55^\circ\text{C}$.

Fig.5 shows dielectric constant and loss tangent as a function of frequency at room temperature. The dielectric constant decreased with frequency. A similar result was observed for the work done by Kwon *et al.*[12]. With increasing frequency, the In doping produced a lower in loss tangent. However, at a lower frequency and a higher frequency, a higher loss tangent was observed. From the internal barrier layer capacitor model (IBLC), the equivalent circuit of CCTO system can be consisted of two parallel RC elements connected in series. The two parallel RC circuits represent to semiconducting bulk grain (which consists of grain resistor (R_g) and grain capacitor (C_g)) and insulating grain boundary (which consists of grain boundary resistor (R_{gb})) and grain boundary capacitor (C_{gb})). In case $R_{gb} \gg R_g$ and $C_{gb} \sim C \gg C_g$ and $\omega R_b C_b \ll 1$, the loss tangent can be expressed as [13,14]:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega R_{gb} C} + \omega R_g C \quad (1)$$

The first term is dominated at low frequency, therefore the loss tangent decreased with increasing frequency. However, at high frequency, the second term has a strong effect. Thus, the loss tangent increased with the frequency. This feature also consists with our result (Fig. 5).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

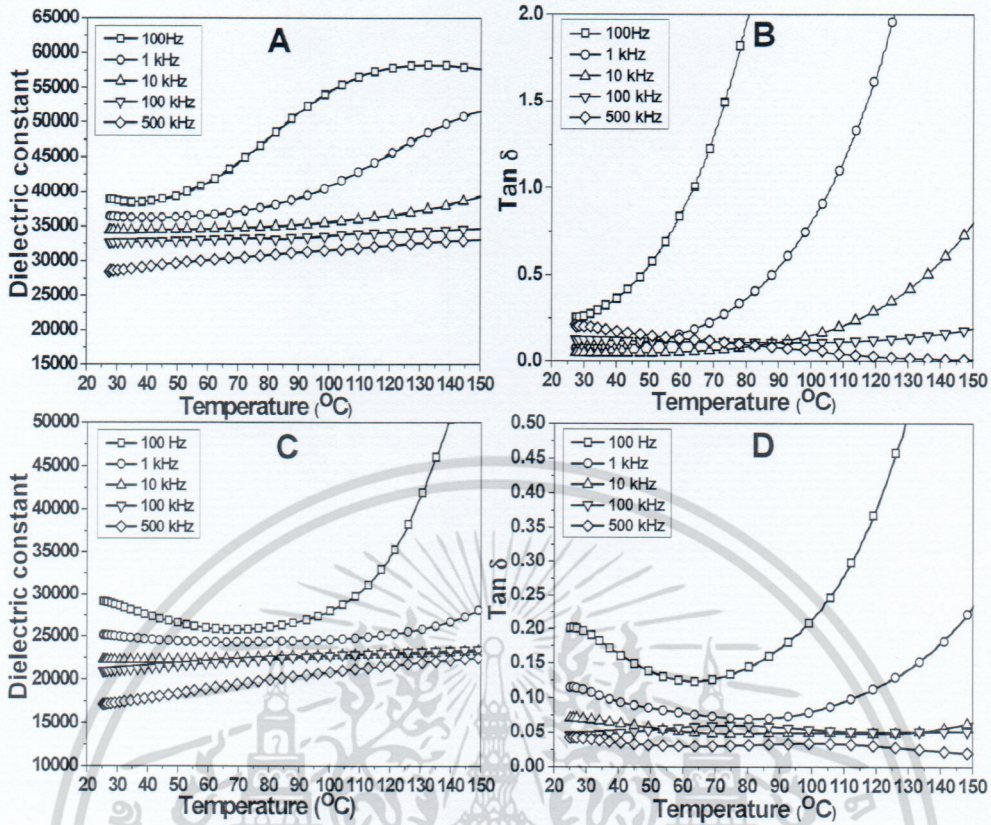


Fig. 4 Dielectric constant and Loss tangent as a function temperature of the samples: (A) the dielectric constant of undoped CCTO samples, (B) the dielectric loss of undoped CCTO samples, (C) the dielectric constant of 2.0 mol% Pt doped CCTO samples and (D) the dielectric loss of 2.0 mol% Pt doped CCTO samples.

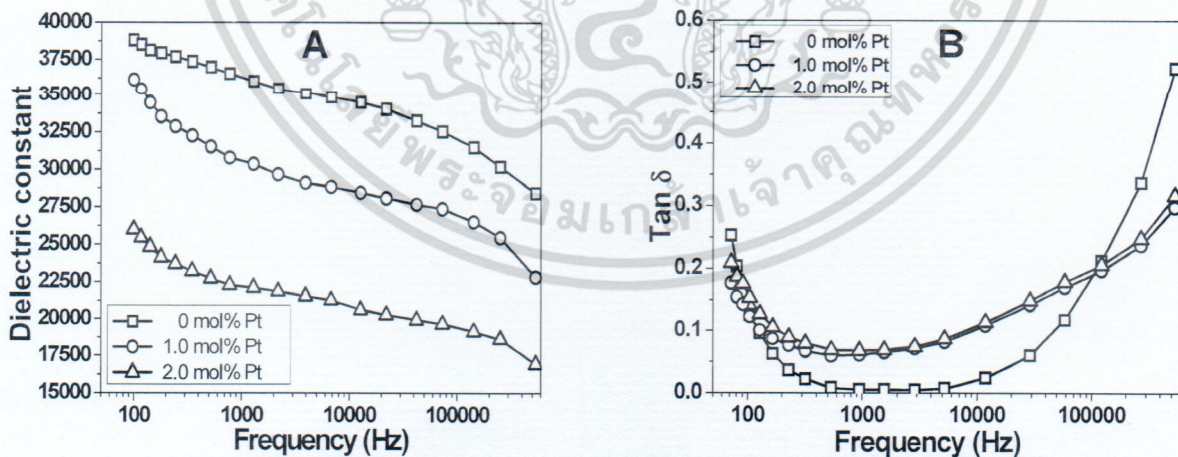


Fig. 5 Dielectric properties of the samples as a function of frequency: (A) dielectric constant and (B) loss tangent.

The characteristic of the grain (bulk grain and grain boundary) may be an important factor that effects on the dielectric properties of the samples. It is believed that the PtO₂ addition resulted in a reduction in total resistance of the grain boundary [11]. This may caused a reduction in conductivity as a result of lowered loss tangent. Further, the decrease in grain size may be a reason for the reduction of in dielectric constant for the present work. However, the microstructure of doped samples showed some small grains or doped samples had a large grain size distribution. Therefore,

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลงานวิจัย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาขอใช้

grain size distribution may be another factor to control the dielectric constant. From Fig.3, it should be noted that there were some small grains placed between the large gains. Therefore, we believed that these small grains may have more effective effects than the large grains.

CONCLUSIONS

The pure and PtO₂ doped CCTO ceramics were prepared by a conventional solid-state reaction technique. Although dopants produced the reduction in dielectric constant, the dielectric constant after doping still high especially for Pt doping. However, the better loss tangent performance was observed after doping. The loss tangent – frequency characteristic at room temperature was agreed with the IBLC model. The significant change in microstructure of the Pt doped samples shows a strong temperate and frequency independent that are a proposed from the change in microstructure can be related to the change in the dielectric properties.

Acknowledgment

This work was supported by College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

References

- [1] M. A. Subramanian, D. Li, N. Duan, B. A. Reisner, and A. W. Sleight, *J. Solid State Chem.* 151 (2000) 323-5.
- [2] A. P. Ramirez, M. A. Subramanian, M. Gardel, G. Blumberg, D. Li, T. Vogt, and S. M. Shapiro, *Solid State Commun.* 115 (2000) 217-220.
- [3] Hammoud AN, Myers IT. "Proceedings of the Annual Report Conference on electrical insulation and dielectric phenomena". 1989, p. 459.
- [4] D. C. Sinclair, T. B. Adams, F. D. Morrison, and A. R. West, *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002) 2153.
- [5] Y. Lin, Y. B. Chen, T. Garret, S. W. Liu, C. L. Chen, L. Chen, R. P. Bontchev, A. Jacobson, J. C. Jiang, E. I. Meletis, J. Horowitz, and H.-D. Wu, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 631.
- [6] W. Si, E. M. Cruz, P. D. Johnson, P. W. Barnes, P. Woodward, and A. P. Ramirez, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 2056.
- [7] B. Bochu, M.N. Deschizeaux, J.C. Joubert, *J. Solid State Chem.* 29, (1979) 291-298.
- [8] Y. Lin, Y.B. Chen, T. Garret, S.W. Liu, C.L. Chen, L. Chen, R.P. Bontchev, A. Jacobson, J.C. Jiang, E.I. Meletis, J. Horowitz, H.D. Wu, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 631-633.
- [9] B. A. Strukov and A. P. Levanyuk, "Ferroelectric Phenomena in Crystals: Physical Foundations", Chapter 1, Springer (1998).
- [10] Buchanan R.C 1986, "Ceramics materials for electronics, Processing, Properties and Applications" (New York:Marcel Dekker)p.110.
- [11] L. Avalle, E. Santos, E. Leiva, V.A. Macagno, *Thin Solid Films*, Volume 219, Issues 1–2 (1992) 7-17.
- [12] S. Kwon, C.-C. Huang, E. A. Patterson, D. P. Cann, *materials letters*, 62 (2008) 633-636.
- [13] D.C. Sinclair, T.B. Adams, F.D. Morrison, A.R. West, *Appl. Phys. Lett.* 80, (2002) 2153.
- [14] L. Feng, X. Tang, Y. Yan, X. Chen, Z. Jiao, and G. Cao, *Phys. Stat. Sol. (a)* 203, 4, (2006) R22–R24.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Platinum Substitution on the Microstructures and Dielectric Relaxation of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics

10.4028/www.scientific.net/AMR.802.134

DOI References

[1] M. A. Subramanian, D. Li, N. Duan, B. A. Reisner, and A. W. Sleight, *J. Solid State Chem.* 151 (2000) 323-5.

<http://dx.doi.org/10.1006/jssc.2000.8703>

[2] A. P. Ramirez, M. A. Subramanian, M. Gardel, G. Blumberg, D. Li, T. Vogt, and S. M. Shapiro, *Solid State Commun.* 115 (2000) 217-220.

[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1098\(00\)00182-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1098(00)00182-4)

[4] D. C. Sinclair, T. B. Adams, F. D. Morrison, and A. R. West, *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002) 2153.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.1463211>

[5] Y. Lin, Y. B. Chen, T. Garret, S. W. Liu, C. L. Chen, L. Chen, R. P. Bontchev, A. Jacobson, J. C. Jiang, E. I. Meletis, J. Horowitz, and H. -D. Wu, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 631.

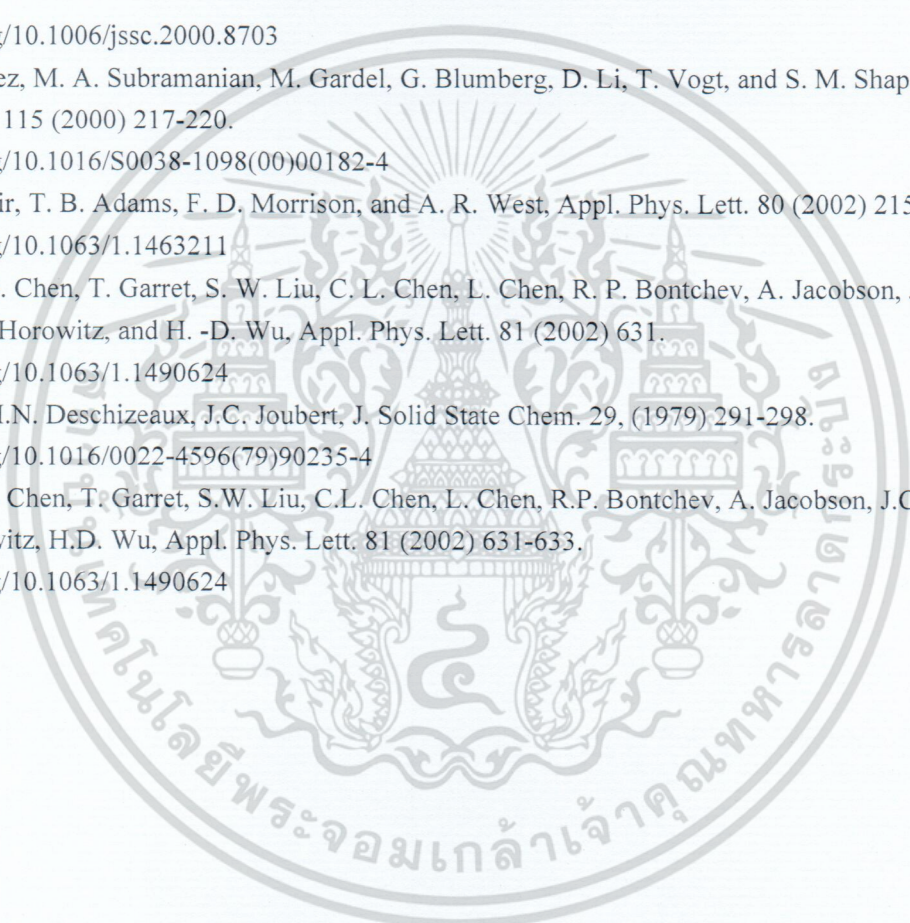
<http://dx.doi.org/10.1063/1.1490624>

[7] B. Bochu, M.N. Deschizeaux, J.C. Joubert, *J. Solid State Chem.* 29, (1979) 291-298.

[http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596\(79\)90235-4](http://dx.doi.org/10.1016/0022-4596(79)90235-4)

[8] Y. Lin, Y.B. Chen, T. Garret, S.W. Liu, C.L. Chen, L. Chen, R.P. Bontchev, A. Jacobson, J.C. Jiang, E.I. Meletis, J. Horowitz, H.D. Wu, *Appl. Phys. Lett.* 81 (2002) 631-633.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.1490624>



บทที่ 4

ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

4.1 ผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่ากระบวนการเตรียมตัวอย่างนั้นมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ CCTO เป็นอย่างมากกล่าวคือ สมบัติทางไฟฟ้าของ CCTO นั้นต้องการวิธีการเตรียม และเงื่อนไขสำหรับการเตรียมที่เหมาะสมซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถเตรียมตัวอย่างที่สามารถให้ค่าทางไฟฟ้า หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีค่าสูงแต่ก็มี ค่าสภาพสูญเสียทางไฟฟ้าที่สูงมากตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่มีการศึกษาไปแล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้ทดลองเติมธาตุโลหะบางชนิดลงไป ปริมาณเล็กน้อยโดยศึกษาถึง ปริมาณการเติมและ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นทำให้ทราบถึงปริมาณการเจือที่เหมาะสมเพื่อทำให้ค่าสภาพสูญเสียทางไฟฟ้ามีค่าลดลงในขณะที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้นยังมีค่าสูงมากพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการเป็นวัสดุ สำหรับผลิตหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนแบบสุ่มต่อไป

4.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยทำให้ทราบเงื่อนไขและปริมาณการเจือของธาตุที่เหมาะสมซึ่งทำให้ได้เซรามิกส์ CCTO ที่มีค่าทางไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับ ไปผลิตหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนแบบสุ่มต่อไปได้ ข้อเสนอแนะต่อไปของงานวิจัยนี้คือทำการวัดการอบของการบันทึกข้อมูลเพราะในการผลิตหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนแบบสุ่มนั้นจำนวนครั้งของการบันทึกข้อมูลของหน่วยความจำนั้นมีความสำคัญต่อการใช้งานเพราะจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของหน่วยความจำนั้นๆ เพราะยังมีค่าสูงก็จะสามารถใช้งานได้นานยิ่งขึ้นซึ่ง ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานนั้นก็คือค่าสภาพสูญเสียทางไฟฟ้าเพราะถ้าสามารถลดค่านี้ลงได้ก็จะส่งผลให้เกิดความร้อนหรืออุณหภูมิสูงที่ส่งผลกระทบต่อการลดลงของอายุการใช้งานของหน่วยความจำนั้นๆ

บทที่ 5

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

- นำเสนอผลงานการวิจัยในงานสัมมนาระดับนานาชาติ
International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2013)
"Integrated Solutions for Innovative Community" August 21-24, 2013
- ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ *Advanced Materials Research Vol. 802 (2013)*
pp.134-138 เรื่อง **Effect of Platinum Substitution on the Microstructures and Dielectric Relaxation of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics.**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

- [1] Bender, B.A. and Pan, M.-J. (2005). *Mat. Sci. Eng. B*, 117, 339-347.
- [2] Manik, S.K. and Pradhan, S.K. (2006). *Physica E*, 33, 160-168.
- [3] M.A. Subramanian , A.W. Sleight , *Solid State Science* 4 (2002) 347-351.
- [4] B. Bochu , M.N. Deschizeaux , and J.C. Joubert , *J.Solid State Chem.* 29,291(1979).
- [5] A.P. Ramirez , M.A. Subramanian , M. Gardel , G. Blumberg , and D. Li , *Solid State Communications* 115 (2002) 217-220.
- [6] M.A. Subramanian , Dong Li , N. Duan , and B.A. Reisner , *J.Solid State Chem.* 151 , 323-325(2000).
- [7] A.F.L. Almeida , R.S. de Oliveira , J.C. Goes , and J.S.B. Sombra , *Materials Science and Engineering B96* (2002) 275-283.
- [8] W. Kobayashi , I. Terasaki , *Physica B* 329-333 (2003) 771-772.
- [9] Liang Fang , Mingrong Shen , *Thin Solid Films* 440(2003)60-65.
- [10] Li-Chun Chang, Cheng-Huan Yang, Hsuan-Ling Kao, *Thin Solid Films* 519(2011) 5095-5098.
- [11] Yu-Shu Shen, Bi-Shiou Chiou, Chia-Cheng Ho, *Thin Solid Films* 517 (2008) 1209-1213.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ *Advanced Materials Research Vol. 802 (2013)*
pp.134-138 เรื่อง **Effect of Platinum Substitution on the Microstructures and Dielectric
Relaxation of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics.**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1 ค่าตอบแทนหัวหน้าโครงการวิจัย (5,000 *12)	60,000
2 ค่าใช้สอย เช่น	
2.1 ค่าวัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี	4,800
2.2 ค่าตอบแทนผู้ช่วยวิจัย	10,200
รวมงบประมาณที่เสนอขอ	75,000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย วรวิทย์ มรรคเจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ. (ฟิสิกส์)	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	2545
วท.ม. (วัสดุศาสตร์)	วัสดุศาสตร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2548
Ph.D. (Materials Science)	Materials Science	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2554

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

เทคโนโลยีฟิล์มบาง

การกัดกร่อนของวัสดุ

วัสดุหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2542 - 2554	ทุนพัฒนาผู้มีความสามารถทางวิทยาศาสตร์	พสวท.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ).....

1. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavornnyutikarn, David P. Cann and Tawee Tunkasiri, "Dielectric properties and microstructure of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ ceramics", *Applications of Ferroelectrics, 2008. ISAF 2008. 17th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, 1 No.4693905.*
2. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavornnyutikarn and Tawee Tunkasiri, "Dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ ceramics", **AIP Conference Proceedings, 25, (2009) 1151 p. 9-12.**
3. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, "The effect of GeO_2 and In_2O_3 doping on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics prepared via vibro-milling method", *Ferroelectric, Volume 415, Issue 1, 2011, Page 113-121.*
4. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, "Effect of Zirconium Substitution on the Dielectric Properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics Prepared via Vibro-Milling Method", *Proceeding of the 28th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand, January 2011.*
5. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, "Effect of Cesium and Cerium Substitution on the Dielectric Properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Ceramics", *Ceramics International, Volume 38, Supplement 1, January 2012, Pages S65-S68.*

การเสนอผลงานวิชาการ

International Conference:

1. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavornnyutikarn, David P. Cann and Tawee Tunkasiri, "Dielectric properties and Microstructure of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ ceramics", **IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics (ISAF 2008 Conference), Santa Fe, New Maxico, USA, 24-27 February 2008.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavornnyutikarn and Tawee Tunkasiri, "Effects of the microstructure and dielectric properties on Mn doped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics", *International Conference on Smart Materials-Smart/Intelligent Materials and Nano Technology & 2nd International Workshop on Functional Materials and Nanomaterials (SmartMat-'08 & IWOFM-2)*, The Imperial Mae Ping Hotel, Chiang Mai, Thailand, 22-25 April 2008.
3. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Prasak Thavornnyutikarn and Tawee Tunkasiri, Dielectric Properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ Ceramics, *The Advance Materials and Nanotechnology (AMN4 Conference)*, University of Otago, New Zealand, 8-12 February 2009.
4. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, The Effect of In_2O_3 doping on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics, *The 10th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-10)*, Yokohama, Japan, 20-24 June, 2010.
5. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, The Effect of GeO_2 doping on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics, *The 10th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF-10)*, Yokohama, Japan, 20-24 June, 2010.
6. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, Dielectric properties of Cs_2CO_3 dope CCTO ceramics, *The 7th Asian Meeting on Ferroelectricity and The 7th Asian Meeting on Electroceramics (AMF-AMEC-2010)*, Jeju Island, Korea, 28 June – 1 July, 2010.
7. **Worawut Makcharoen**, Jerapong Tontrakoon, Gobwute Rujijanagul and Tawee Tunkasiri, Effect of indium and cerium substitution on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics, *The 7th Asian Meeting on Ferroelectricity and The 7th Asian Meeting on Electroceramics (AMF-AMEC-2010)*, Jeju Island, Korea, 28 June – 1 July, 2010.

อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้