

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



242740

การประสิทธิ์ผู้ตรวจฉบับพิเศษพิเศษโดยเด็กหญิงเบรอนิกกากรอนบที่มี
เลขเบรอนิกกากรอนบเป็นดาวหลัก

นิพนธ์ ปุระอินทร์ศรี

วิทยาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาจิตวิทยา

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เมษายน 2554



242740

การประดิษฐ์ตัวตรวจจับชนิดเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากระบบที่มี
เลดเซอร์โคเนตไททานเนตเป็นสารหลัก



ผิวพรรณ ประจันตรศรี

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
เมษายน 2554

การประดิษฐ์ตัวตรวจจับชนิดเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากระบบที่มี
เลดเซอร์โคเนตไททานเนตเป็นสารหลัก

ผิวพรรณ ประจันทร์ศรี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


.....กรรมการ

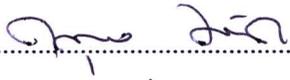
รองศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ รุจินากูล


.....

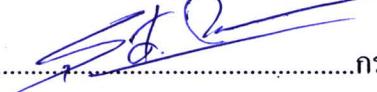
ดร.สุขุม อีสเสงี่ยม


.....กรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพรรณ เพ็งพัค


.....กรรมการ

นายพุทธพล เพ็งพัค


.....กรรมการ

ดร.สุขุม อีสเสงี่ยม

29 เมษายน 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก อ.ดร.สุชุม อิศเสงี่ยม อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา แนวทางในการวิจัยและแก้ปัญหาต่างๆ พร้อมยังกรุณาตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ รุจิณากุล ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์และชี้แนะแนวทางข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จนทำให้ วิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลพรรณ เฟื่องพัด ที่ร่วมเป็นกรรมการสอบการ วิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำต่างๆจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ นายพุทธพล เฟื่องพัด นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ร่วมเป็นกรรมการสอบพร้อมทั้งคอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่ดี รวมทั้งช่วยคิดหาแนว การทำวิจัยแบบใหม่ๆ

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยการค้นคว้าวิจัยนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องการใช้เครื่องมือและสถานที่ใน การทำวิจัย และขอขอบคุณ พี่ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก ที่ช่วยให้คำแนะนำ ให้ คำปรึกษา และช่วยให้กำลังใจ ตลอดงานวิจัยนี้สำเร็จลง

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องการ ขอใช้สถานที่ และเครื่องมือ อุปกรณ์ในระหว่างการค้าดำเนินงานวิจัย และขอขอบพระคุณ พี่ๆ นักวิจัย ศูนย์ TMEC ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา จนการทำวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว พี่ชาย ที่ได้ส่งเสริมการศึกษาและให้กำลังใจ ตลอดจนเชื่อมั่นในตัวผู้เขียนตลอดมา

สุดท้ายนี้หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง ผู้เขียนต้องขออภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่า
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจงานด้านนี้ต่อไป

ผิวพรรณ ประจันต์ศรี

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การประดิษฐ์ตัวตรวจจับชนิดเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากระบบที่มีเลดเซอร์โคเนตไททานตเป็นสารหลัก
ผู้เขียน	นางสาวพิวพรรณ ประจันทร์ศรี
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	อ. ดร.สุชุม อิศเสงี่ยม

บทคัดย่อ

242740

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการประดิษฐ์ตัวตรวจจับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากสารที่มีเลดเซอร์โคเนตไททานตเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากว่าตัวตรวจจับเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานของอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ เซรามิกในระบบที่มีเลดเซอร์โคเนตไททานตได้ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุในระบบนี้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ค่าสัมประสิทธิ์ไฟฟ้าคู่ควมเชิงกลที่ดี มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ดี สามารถทำการเหนี่ยวนำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ง่าย และมีความไวต่อการตรวจจับสูง นอกจากนี้ที่ผ่านมายังมีนักวิจัยได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของสารกลุ่มนี้ให้ดีและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ตรวจจับมากขึ้น ด้วยวิธีการต่างๆ อาทิ การเจือสารที่สามารถปรับสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกให้ตรงตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและเตรียมสารเซรามิกในระบบ $Pb_{(1-x)}Sr_x(Zr_{0.54}Ti_{0.44}Sb_{0.02})_{(1-y)} - (Zn_{1/3}Nb_{2/3})_yO_3$ (PSZT-ZN) เมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปร Sr (x) เท่ากับ 0.00 – 0.12 โดยเปลี่ยนเงื่อนไขที่ละ 0.02 เมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปร ZN (y) เท่ากับ 0.02 – 0.20 ที่เปลี่ยนเงื่อนไขที่ละ 0.02 เพื่อศึกษาผลของตัวเจือที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตัวตรวจจับ โดยวิธีการผสมออกไซด์แบบขั้นตอนเดียว (Mixed Oxide) ผสมสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำไปเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ทำการขึ้นรูปเซรามิกความหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร นำไปเผาซิน-

เตอร์ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังศึกษาการเตรียมฟิล์ม PSZT เซรามิกโดยใช้เทคนิคโซล-เจล แล้วนำสารละลายมาตกเคลือบบนแผ่นฐานรองของ $\text{Ti/SiO}_2/\text{Si}$ นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °ซ นาน 2 ชั่วโมง ทำการศึกษาโครงสร้างเฟสของ เซรามิกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ซึ่งพบว่าผลของการเจือทำให้สารเซรามิกมีการเปลี่ยนเฟสจากเฟสรวมโบฮีตรอลกลายเป็นเฟสเตตระโกนอลเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณ Sr เพิ่มขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของ ZN และทุกเงื่อนไขของเซรามิกแสดงโครงสร้างเฟส เพรร์รอสไกต์ ค่าร้อยละการหดตัวและค่าความหนาแน่นจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับปริมาณของ สารเจือที่เปลี่ยน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องมีค่าเพิ่มขึ้นกับปริมาณของสารเจือ Sr ที่เพิ่มขึ้นในทุกเงื่อนไข ZN สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) และค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) เพิ่มขึ้นเมื่อ Sr เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเท่า 778 pC/N พบในเงื่อนไข ZN = 0.20 Sr = 0.10 และ 0.78 พบในเงื่อนไข ZN = 0.18 ตามลำดับ และสมบัติ เฟอร์โรอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่การเป็นเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบอ่อนหรือเรียกว่า soft ferroelectric ผลที่ได้จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเจือสาร Sr และ ZN ในโครงสร้างของ PZT สามารถปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของสารเซรามิกให้ดีขึ้นได้ และเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ตัวตรวจจับได้

Thesis Title	Fabrication of Piezoelectric Ceramic Sensors from Lead Zirconate Titanate Based System
Author	Ms. Piewpan Parjansri
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisor	Dr. Sukum Eitssayeam

ABSTRACT

242740

The objective of this work is the fabrication of piezoelectric ceramic sensors from lead zirconate titanate based system. The sensor are electronic devices which based technology in the all equipment. Lead Zirconate Titanate (PZT) ceramic system are used for the extensively electronics devices due to these PZT ceramic have the high dielectric properties, low dielectric constant, high electromechanical coefficient and piezoelectric coefficient. Moreover, it can be induced the easy conductivity and good sensitivity on sensing. The previous work, the researcher developed and enhanced in PZT ceramics to adjust for using with the sensor devices. According to substitution of the others ion in A-site or B-site of PZT structure to improve the ceramics properties is the popular method, this work studied and prepared $Pb_{(1-x)}Sr_x(Zr_{0.54}Ti_{0.44}Sb_{0.02})_{(1-y)} - (Zn_{1/3}Nb_{2/3})_yO_3$ (PSZT-ZN) ceramics system when Sr (x) = 0.00-0.12 by step varies of 0.02 and ZN (y) = 0.02 – 0.20 by step varies of 0.02 to investigated the effect of doping on physical and electrical properties. The PSZT-ZN ceramics were prepared via a mixed oxide (solid state reaction) method. The powder was ball-milled for 24 h. Then, it was calcined at 900 °C for 2 h. Subsequently, the calcined powder was pressed into disc shape with 2 mm in thickness, 10 mm in diameter and sintering at 1250 °C for 2 h. In addition, PSZT film were prepared by sol-gel method. PSZT solution were deposited on Ti/SiO₂/Si substrates and calcined at 600 °C for 2 h.

Phase structure of PSZT-ZN ceramic was studied with an X-ray diffractometer. The shrinkage and density of ceramics were analyzed besides, the dielectric properties, dielectric loss, piezoelectric, electromechanical properties and ferroelectric properties were measured. The result of shrinkage and density depend on the Sr and Zn-Nb co-doped. The XRD pattern showed pure phase perovskite structure in all conditions. Meanwhile, the phase structure change from rhombohedral to tetragonal phase with increasing of Sr content. The dielectric properties increased with Sr and Zn-Nb co-doped increasing in all conditions. The maximum values of piezoelectric and electromechanical properties were 778 pC/N with $ZN = 0.20$, $Sr = 0.10$ condition and 0.78 with $ZN = 0.18$, $Sr = 0.04$ condition, respectively. The ferroelectric properties were changed to the soft ferroelectric ceramics. The result of this work, revealed that the doping of Sr and ZN in PZT structure could be enhance electrical properties of PZT ceramics and suitable for using the application in sensor device.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
สารบัญตาราง	๗
สารบัญภาพ	๘
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา เริงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric)	4
2.2 เฟร์โรอิเล็กทริก	8
2.2.1 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส (Curie temperature and phase transition)	10
2.2.2 โพลาริเซชัน (polarization)	10
2.3 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับเลคเซอร์โคเนตไททานต	12
2.4 ผลของตัวเจือต่อสภาพเฟร์โรอิเล็กทริก	14
2.4.1 การเจือด้วยตัวรับ (acceptor doping)	16
2.4.2 การเจือด้วยตัวให้ (donor doping)	18
2.5 สมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties)	20
2.5.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	21
2.5.2 ความทนต่อการพังทลายด้านไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก	23
2.5.3 การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก	23
2.6 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient; d_{33})	24

ญ

2.7	แฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ (electromechanical coupling factor; k)	26
2.8	แฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor; Q_M)	27
2.9	อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric devices)	27
2.9.1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generators)	27
2.9.2	แอกทูเอเตอร์ (actuators)	28
2.9.3	ทรานสดิวเซอร์ (transducer)	28
2.9.4	ตัวตรวจจับ (sensor)	28
2.9.5	อุปกรณ์ตรวจจับ surface acoustic wave sensor (SAW)	29
2.10	กระบวนการเตรียมเซรามิก	31
2.10.1	กระบวนการเตรียมสารด้วยการอาศัยปฏิกิริยาสถานะของแข็งหรือวิธีผสมแบบออกไซด์ (solid state solution หรือ mixed oxide)	32
2.10.1.1	กระบวนการเตรียมแบบผสมออกไซด์ชั้นตอนเดียว	32
2.10.1.2	กระบวนการเตรียมแบบผสมออกไซด์สองชั้นตอน	33
2.10.1.3	ข้อดีและข้อเสียจากการเตรียมผงด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	33
2.10.2	กระบวนการโซล เจล (sol-gel process)	34
2.10.2.1	ขั้นตอนหลักในการเตรียม	34
2.10.2.2	กระบวนการ โซล-เจลแบ่งตามลักษณะสารตั้งต้นที่ใช้ คือ	35
2.10.2.3	การเกิดเจล (gel formation) มี 2 แบบ	36
2.10.2.4	กระบวนการเปลี่ยนเจลเป็นเซรามิกซ์ (gel to ceramic conversion)	37
2.10.2.5	ข้อดีของการเตรียมผงโดยวิธี โซล เจล	37
2.11	การเตรียมฟิล์มบางของ PZT โดยกระบวนการทางเคมี	38
2.11.1	การตกสะสมทางไฟฟ้า (electro deposition)	38
2.11.2	การตกสะสมของไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD)	38
2.11.3	การปลูกฟิล์มด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา (Plasma-Enhance Chemical Vapor Deposition; PECVD)	39
2.11.4	ข้อดีและข้อเสียของเทคนิค PECVD	40
2.11.5	การปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (sputtering)	41
2.11.6	ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคสปัตเตอริง (sputtering)	41
2.11.7	การปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคโซล-เจล (sol gel)	42

2.12	การวิเคราะห์สารด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	44
2.13	ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	47
บทที่ 3	วิธีการทดลอง	60
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเซรามิก	60
3.2	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซรามิก	62
3.3	การเตรียมเซรามิกด้วยกระบวนการผสมแบบออกไซด์ชั้นตอนเดียว (mixed oxide)	64
3.3.1	การเตรียมผงเซรามิก	64
3.3.2	การขึ้นรูปเซรามิก	64
3.4	การเตรียมสารละลายโซล PSZT ด้วยกระบวนการโซล เจล	68
3.5	การเตรียมฟิล์ม PSZT ด้วยกระบวนการ spin coating	69
3.5.1	การเตรียมแผ่นฐานรอง (substrate)	69
3.5.2	การเตรียมฟิล์ม PSZT บนแผ่นฐานรอง	69
3.6	การตรวจสอบสมบัติของเซรามิก PSZT (bulk ceramics)	73
3.6.1	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)	73
3.6.2	การตรวจสอบร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร	74
3.6.3	การตรวจสอบความหนาแน่น	75
3.6.4	การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	76
3.6.4.1	การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ที่อุณหภูมิห้อง	76
3.6.4.2	การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (dielectric constant VS temperature)	77
3.6.4.3	การตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric measurement)	78
3.6.4.4	การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient, d_{33})	79
3.6.4.5	แฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ (electromechanical coupling factor; k)	80
3.6.4.6	แฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor; Q_M)	81
3.7	การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มเซรามิก PSZT	82

บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผล	83
4.1	ผลการตรวจสอบเซรามิก PSZT-ZN เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสตรอนเทียม (Sr) และความเข้มข้นของสารเจือร่วมระหว่างซิงค์ในโอเบต (Zn-Nb)	83
4.1.1	การตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD	84
4.1.2	การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ	90
4.1.2.1	การตรวจสอบการวิเคราะห์การหดตัวเชิงปริมาตร (% volume shrinkage)	90
4.1.2.2	การตรวจสอบค่าความหนาแน่น (density)	91
4.1.3	การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	93
4.1.3.1	การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	93
4.1.3.2	การตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริก สมบัติคู่วบไฟฟ้ากลเชิงระนาบและสมบัติความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก	101
4.1.3.3	การตรวจสอบแฟกเตอร์คุณภาพเชิงกล (Q_M) การสูญเสีย ($\tan \delta$)	110
4.1.3.4	การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง	112
4.1.3.4.1	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	112
4.1.3.4.2	อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิก PSZT-ZN	117
4.1.3.5	การตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก	118
4.1.3.6	การตรวจสอบลักษณะของกราฟ I-V curve	127
4.2	ผลการศึกษาการเตรียมแผ่นฐานรอง (substrate) ของซิลิกอนและผลการเตรียมฟิล์ม PSZT บนแผ่นฐานรอง Ti/SiO ₂ /Si	129
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	131
5.1	สรุปผลการทดลอง	131
5.1.1	การตรวจสอบโครงสร้างเฟส	131
5.1.2	การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ	132
5.1.3	การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	132
5.1.3.1	สมบัติไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	132

ฐ

5.1.3.2 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) สัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากล เชิงระนาบ (k_p) และ ค่าแฟกเตอร์เชิงคุณภาพทางกล (Q_M)	133
5.1.2.3 สมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง	133
5.1.2.4 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก	133
5.1.4 การเตรียมฟิล์มเซรามิกในระบบ PSZT	134
5.2 ข้อเสนอแนะ	134
เอกสารอ้างอิง	136
ภาคผนวก	142
ประวัติผู้เขียน	145

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สารเติมแต่งหรือตัวเจือในสาร PZT และการส่งผลกระทบต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริก	15
2.2 รัศมีของไอออนสารเจือแบบ hard	17
2.3 รัศมีของไอออนตัวเจือแบบ Soft	19
2.4 การประยุกต์ใช้งานและสมบัติของแก้วและฟิล์มเซรามิกโดยกระบวนการโซลเจล	38
2.5 ขนาดเกรน แถบพลังงาน กระแสอิมพัลส์แบบ reverse ความสูงของ barrier และ ความไวของ RH เทียบกับตัวเจือ Sr ที่ความเข้มข้นต่างกัน	52
2.6 ลักษณะและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเซรามิก	56
3.1 สารเคมีที่ใช้เตรียมเซรามิกโดยวิธี Mixed Oxide และ Sol Gel	60
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซรามิก	62
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติ	63
3.4 ปริมาณของสารตั้งต้นเพื่อเตรียมสารละลาย โซล PSZT ในตัวทำละลาย 50 ml	70
4.1 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PSZT-ZN	123
4.2 ความหนาของชั้นฟิล์ม SiO ₂ บนแผ่นซิลิกอนที่ปลูกโดยเทคนิค PECVD	129
4.3 สภาพต้านทานทางไฟฟ้าของแผ่นซิลิกอนหลังเคลือบด้วย Ti	129

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มเพียโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อยที่มีพื้นฐานของความสมมาตร	6
2.2 แสดงปรากฏการณ์ 2 แบบ คือ (ก) direct effect และ (ข) converse effect ในสารเพียโซอิเล็กทริกเมื่อ i แสดงการหดตัว และ ii แสดงการขยายตัว	7
2.3 การโพลาริเซชันของวัสดุเซรามิกเพื่อสร้างปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (ก) ก่อนทำการโพล (ข) ระหว่างการโพล (ค) ภายหลังจากการโพล	8
2.4 แสดงลักษณะของวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	9
2.5 การกระจายในโพลาริเซชันของวัสดุไดอิเล็กทริก	11
2.6 แสดงการจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อสารก่อน และภายหลังจากให้สนามไฟฟ้า	11
2.7 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ของสาร	12
2.8 แผนภาพไอโซแกรมของระบบ $Pb(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$	13
2.9 การเปลี่ยนแปลงในค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก $(Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ เมื่อเจือด้วยสารเจือต่างกัน กราฟ 1: เซรามิกที่ไม่ทำการเจือ, 2: 2 mol% $NbO_{1.5}$, 3: 4 mol% $NbO_{1.5}$, 4: 6 mol% $NbO_{1.5}$, 5: 2 mol% $NbO_{2.5}$, 6: 1.6 mol% $FeO_{1.5}$, 7: 2.5 mol% $CrO_{1.5}$	14
2.10 ความบกพร่องของผลึกใน PZT ที่เจือด้วยตัวรับ (acceptor dopants)	18
2.11 ความบกพร่องของผลึกใน PZT ที่เจือด้วยตัวให้ (donor dopants)	19
2.12 ตัวเก็บประจุแผ่นขนาน	21
2.13 แสดงการกำหนดทิศทางในสารเพียโซอิเล็กทริก	25
2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่	26
2.15 โครงสร้างของอุปกรณ์ surface acoustic wave	30
2.16 แสดงกระบวนการปลูกฟิล์มแบบ PECVD	40
2.17 แสดงกระบวนการปลูกฟิล์มแบบ sputtering	41
2.18 แสดงกระบวนการ โชล เจล	42
2.19 แสดงการเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการ spin coating	43
2.20 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	45

2.21	รูปแบบ XRD ของ PZT ที่เจือด้วย 2.4 mol% Nb เทียบกับปริมาณของ Sr ที่เพิ่มขึ้น	48
2.22	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของ PZT ที่เจือด้วย 2.4 mol% Nb (อัตราส่วนระหว่าง Zr:Ti = 1.095) เทียบกับปริมาณของ Sr	49
2.23	ค่า d_{33} เทียบกับปริมาณของ Sr ในเซรามิก PZT ที่เจือด้วย 2.4 mol% Nb (Zr:Ti = 1.095)	49
2.24	ภาพถ่ายจาก bright-field (BF) TEM ซึ่งแสดงถึงโดเมนใน โครงสร้างของชั้นงาน PZT ที่ไม่ได้เจือ Sr	50
2.25	ภาพถ่ายจาก bright-field (BF) TEM ซึ่งแสดงถึง โดเมนใน โครงสร้างของ PZT ที่เจือด้วย Sr เท่ากับ 16 mol% 2.4 mol% Nb	50
2.26	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PSZT ที่ความเข้มข้น 0.3 M เมื่ออุณหภูมิการ แคลไซน์ต่างกัน	52
2.27	กราฟ I-V ของตัวตรวจจับฟิล์มหนาที่เตรียมจากผงที่เจือด้วยสทรอนเทียม (Sr) ความเข้มข้น 0.1 - 0.5 M ทำการแคลไซน์ที่ 600 °ซ	53
2.28	รูปแบบ XRD ของเซรามิกในระบบ $Pb_{1-0.5x}(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{1-x}Nb_xO_3$	54
2.29	การขึ้นอยู่กับปริมาณตัวเจือ Nb ต่อค่า k_t และ k_p ของเซรามิก PZT	54
2.30	การขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวเจือ Nb ต่อค่า d_{33} ของเซรามิก PZT	55
2.31	การขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวเจือ Nb ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (a) และค่าการสูญเสียทาง ไดอิเล็กทริก (b) ของเซรามิก PZT	55
2.32	การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก d_{33} กับเวลาที่ใช้ในการโพล ของ เซรามิก 3b	57
2.33	ค่าอิมพีแดนซ์และมุมการเปลี่ยนเฟสเทียบกับความถี่ของแผ่นเซรามิก Nb-Mn-PZT (3b) ในช่วงความถี่ kHz (a) และในช่วงความถี่ MHz (b)	58
2.34	ค่าอิมพีแดนซ์และมุมการเปลี่ยนเฟสเทียบกับความถี่ของเซรามิกที่สัมผัสกับสารละลาย Milli-Q water และ fructose	59
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมผงเซรามิก PSZT-ZN	65
3.2	แผนผังแสดงอุณหภูมิการเผาแคลไซน์	66
3.3	แผนผังแสดงอุณหภูมิการเผาซินเตอร์	66
3.4	แผนภาพแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปเซรามิก PSZT-ZN	67
3.5	การจัดเรียงชั้นงาน ในถ้วยอะลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์	68
3.6	ขั้นตอนการเตรียมสารละลายและการเตรียมฟิล์ม PSZT	71
3.7	แสดงขั้นตอนการปลูกชั้นฟิล์มบนแผ่นฐานรองของซิลิกอน	72

3.8 เครื่อง spin coating	73
3.9 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer	74
3.10 แสดงเครื่อง E4980A 20 Hz – 2 MHz Precision LCR meter	77
3.11 แสดงชุดควบคุมและประมวลผลเพื่อทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ	78
3.12 แสดงชุดทดสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก	79
3.13 แสดงเครื่องมือในการ โพลสารเซรามิก	80
3.14 แสดงเครื่อง KCF S5865 d_{33} meter	80
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.02	84
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.04	85
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.06	85
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.08	86
4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.10	86
4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.12	87
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.14	87
4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.16	88
4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.18	88
4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PSZT-ZN เจื่อนไซ y (ZN) = 0.20	89
4.11 ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตรเทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) และ Sr (x) ของเซรามิก PSZT-ZN	91
4.12 ค่าความหนาแน่นเทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) และ Sr (x) ของเซรามิก PSZT-ZN	93
4.13 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เจื่อนไซ $y = 0.02$	95
4.14 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เจื่อนไซ $y = 0.04$	95
4.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เจื่อนไซ $y = 0.06$	96
4.16 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เจื่อนไซ $y = 0.08$	96
4.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ Sr (x) ที่เจื่อนไซ $y = 0.10$	97

4.34	ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ค่าสัมประสิทธิ์คู่อุปไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) (รูปเล็ก) ที่เงื่อนไข $y = 0.20$	107
4.35	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) PSZT-ZN เซรามิกในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า ZN (y) และ Sr (x)	108
4.36	สมบัติคู่อุปไฟฟ้ากลเชิงระนาบ (k_p) ของ PSZT-ZN เซรามิกในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า ZN (y) และ Sr (x)	108
4.37	สัมประสิทธิ์ความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริก (g_{33}) ของเซรามิก PSZT-ZN ในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า ZN (y) และ Sr (x)	109
4.38	แฟกเตอร์คุณภาพทางกล (Q_M) ของเซรามิก PSZT-ZN ในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า ZN (y) และ Sr (x)	111
4.39	ค่าการสูญเสีย ($\tan \delta$) วัดที่ 1 kHz ภายหลังการโพลของเซรามิก PSZT-ZN ในทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่า ZN (y) และ Sr (x)	111
4.40	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr = 0.10 เมื่อ (ก) ปริมาณ ZN = 0.02 - 0.10 และ (ข) ปริมาณ ZN = 0.12 - 0.20	113
4.41	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr = 0.12 เมื่อ (ก) ปริมาณ ZN = 0.02 - 0.10 และ (ข) ปริมาณ ZN = 0.12 - 0.20	114
4.42	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr = 0.10 เมื่อ (ก) ปริมาณ ZN = 0.02 - 0.10 และ (ข) ปริมาณ ZN = 0.12 - 0.20	115
4.43	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) เทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr = 0.12 เมื่อ (ก) ปริมาณ ZN = 0.02 - 0.10 และ (ข) ปริมาณ ZN = 0.12 - 0.20	116
4.44	อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr = 0.10 และ เงื่อนไข Sr = 0.12	117
4.45	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และ โพลาริเซชัน (P) (P-E loop) ของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.10	118
4.45	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และ โพลาริเซชัน (P) (P-E loop) ของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.10 (ต่อ)	119
4.46	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และ โพลาริเซชัน (P) (P-E loop) ของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.12	121
4.46	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) และ โพลาริเซชัน (P) (P-E loop) ของเซรามิก PSZT-ZN เงื่อนไข Sr (x) เท่ากับ 0.12 (ต่อ)	122

- 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันคงเหลือ (P_r) และสนามไฟฟ้าลบถ่าง (E_c) 124
เทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) ที่เจือไน Sr (x) เท่ากับ 0.10
- 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันคงเหลือ (P_r) และสนามไฟฟ้าลบถ่าง (E_c) 125
เทียบกับความเข้มข้นของ ZN (y) ที่เจือไน Sr (x) เท่ากับ 0.12
- 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{sq} และ พื้นที่ของวงฮิสเทอรีซิสเทียบกับความเข้มข้น 126
ของ ZN (y) ในเจือไน Sr (x) เท่ากับ 0.10
- 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_{sq} และ พื้นที่ของวงฮิสเทอรีซิสเทียบกับความเข้มข้น 127
ของ ZN (y) ในเจือไน Sr (x) เท่ากับ 0.12
- 4.51 ความหนาแน่นกระแสรั่วเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของเซรามิก PSZT-ZN เจือไน Sr (x) 127
เท่ากับ 0.10
- 4.52 ความหนาแน่นกระแสรั่วเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของเซรามิก PSZT-ZN เจือไน Sr (x) 128
เท่ากับ 0.12