รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
เรื่อง

การสังเคราะห์และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกระบบ
$(Bi_{1/2}K_{1/2})TiO_3 - LiSbO_3$

จัดทำโดย

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2553

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยในโครงการนี้ ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และ สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ นักวิจัย อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในทุกด้านของการดำเนินงานของโครงการ

ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกระบบทวิภาคบิสมัทโพแทสเซียมสตรอนเทียมไททาเนต (BKT-ST) ที่ x = 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80 และ 0.90 ซึ่งเตรียมได้จากเทคนิคปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้สารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีการควบคุมบรรยากาศในการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ วัดค่าไดอิเล็กทริก ทำการตรวจสอบสัณฐานทางวิทยา จากผลการทดลองพบว่าสามารถสังเคราะห์ผง BKT-ST ได้ทุกสัดส่วนองค์ประกอบเนื่องจากไม่พบเฟสแปลกปลอมใดและได้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากเททระโกนอลไปเป็นซูโดคิวบิคที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x \geq 0.10$ ผลของค่าไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของ ST เพิ่มมากขึ้นแต่ที่สัดส่วนองค์ประกอบ x = 0.20 เซรามิกมีค่าไดอิเล็กทริกสูงสุดที่ประมาณ 3059 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกลดลงเมื่อปริมาณของ ST เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันอีกทั้งอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสนั้นก็ลดลงด้วยเช่นเดียวกัน แต่พีคของค่าไดอิเล็กทริกนั้นมีแนวโน้มที่จะมีฐานกว้างมากขึ้นซึ่งสามารถใช้งานได้หลากหลายช่วงอุณหภูมิ

Abstract

This aim of study is to investigate the electrical property of ceramics in the binary system of bismuth – potassium strontium titanate ($Bi_{0.5}K_{0.5}TiO_3$- $SrTiO_3$) in terms of perovskite phase formation, morphology and electrical properties. The polycrystalline samples of (*1-x*) $Bi_{0.5}K_{0.5}TiO_3$ - *x*$SrTiO_3$ when x = 0.0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 and 0.9 were prepared by the solid state reaction involving the use of high-purity starting oxides and controlled atmosphere sintering. Phase development of calcined powders, the crystal structure and phase transitions of sintered ceramics were analyzed by X-ray diffraction (XRD), thermal and dielectric measurements. The morphology analyses were undertaken by scanning electron microscopy (SEM). For XRD result, it can be seen that all the ceramics were detected as single perovskite structure. The ceramics with a perovskite structure showed an tetragonal phase at $0.00 \leq x \leq 0.010$ and became pseudo cubic at $x \geq 0.10$ but $x = 0.20$ has maximum dielectric at around 3059. However, Dielectric results showed that dielectric constant and phase transition temperature of and tetragonal–cubic (T_C) decreased when a small amount of ST was added. The ceramic decreased with increasing ST concentration . BKT-ST ceramics exhibited a very broad curve over a wide temperature range.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุน

1. **Prapapim Phetnoi**, Surasak Niemcharoen, Rangson Muanghlua, Manoon Sutapun and Naratip Vittayakorn "Praparation of Bismuth Potassium Titanate – Strontium Titanate Ceramics" **The 27th Annual Conference of the Microscopy Society of Thailand**, Thailand, 2010, 22-23
2. **Prapapim Phetnoi**, Surasak Niemcharoen, Rangson Muanghlua, Manoon Sutapun and Naratip Vittayakorn "Electrical properties of Bismuth Potassium Titanate – Strontium Titanate Ferroelectric Ceramics" **The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology** , Chiangmai, Thailand, 2010 , 962-965
3. Anucha Ruangphanit, **Prapapim Phetnoi**, Surasak Niemcharoen and Rangson Muanghlua "Structure and dielectric properties of $Bi_{0.5}K_{0.5}TiO_3$-$SrTiO_3$ lead-free ceramics"**Proceeding of the 12th ISEPD Conference,** Chaingmai, Thailand, 2010

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....III

กิตติกรรมประกาศ.....V

สารบัญ.....VI

สารบัญตาราง.....IX

สารบัญรูปภาพ.....X

สัญลักษณ์และคำย่อ.....XVI

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....2

1.5 ขอบเขตการวิจัย.....3

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....5

2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....5

2.2 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก.....9

2.2.1 การเกิดโพลาไรเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก.....9

2.2.1.1 การเกิดโพลาไรเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก.....9

2.2.1.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส.....10

2.2.1.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซีส.....11

2.2.2 แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก.....13

สารบัญ (ต่อ)

2.2.2.1 การเกิดโพลาไรเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก ……..13

2.2.2.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส ……..14

2.2.2.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซีส…….....14

2.2.3 รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก ……...17

2.2.3.1 การเกิดโพลาไรเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก……...13

2.2.3.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส……...18

2.2.3.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซีส…….……..20

2.3 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์……...……23

2.4 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก……....26

2.5 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว ……29

2.6 บิสมัทโพแทสเซียมไททาเนต ($Bi_{0.5}K_{0.5}TiO_3$; BKT)……...31

2.7 สตรอนเทียมไททาเนต ($SrTiO_3$; ST)……....36

2.8 สารละลายของแข็ง…….....41

2.8.1 สารละลายของแข็งชนิดแทนที่…….……41

2.8.2 สารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว……...……..42

2.9 กระบวนการเตรียมผงด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง……..…..42

2.9.1 กระบวนการบดย่อย ผสมด้วยลูกบอล……..…43

2.9.2 ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ……....……...…43

บทที่ 3 วิธีการทดลอง……45

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง……45

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง……...45

3.3 กระบวนการเตรียมผงผลึก BKT-ST.……46

3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก.....48

3.5 การตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดเฟสด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์……49

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าความหนาแน่นและ
ความหนาแน่นสัมพัทธ์.....51

3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา……...52

3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยสมบัติทางไดอิเล็กทริก…….……....5**2**

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....54
4.1 ผลการตรวจสอบโครงผลึกของเซรามิก... BKT-ST…….. 54
4.2 ผลการหาลักษณะเฉพาะของเซรามิกในระบบ BKT-ST...…….57
4.2.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก...…….……57
4.2.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเซรามิก...……..59
4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก……...64

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....77
5.1 สรุปผล.....77
5.2 ข้อเสนอแนะ.....78

เอกสารอ้างอิง.....79

ภาคผนวก.....84

ประวัติผู้เขียน.....91

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อแตกต่างระหว่างสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก……...22

2.2 ลำดับเหตุการณ์ที่สำคัญในการศึกษา ค้นคว้าและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....27

2.3 สมบัติต่างๆของสารเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วชนิดต่างๆ ……..30

4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิก BKT-ST...…….58

4.2 ค่าพารามิเตอร์ของการกระจายกับสัดส่วนองค์ประกอบ ST……75

4.3 ตารางพารามิเตอร์ต่างๆที่ความถี่ 1 MHz ของเซรามิก BKT-ST……..76

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 (ก) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรงและ
(ข) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม……5

2.2 ทิศทางของโพลาไรเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่
วัสดุเพียโซอิเล็กทริก……7

2.3 การจัดแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก.....8

2.4 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการเกิดโพลาไรเซชัน
ของผลึก $BaTiO_3$……10

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิของผลึก
แบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$)……...11

2.6 ลักษณะโดเมนของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ……..……...12

2.7 โดเมนบนผิวผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกของ PT-BT……...12

2.8 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ……...13

2.9 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึก PZ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง……....14

2.10 ลักษณะโดเมนของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก…….……15

2.11 โดเมนบนผิวผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกของ PZST.....15

2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก…….16

2.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาไรเซชันเทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก
และเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ……...……..…….....18

2.14 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสาร PMN.....19

2.15 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาไรเซชันและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เทียบอุณหภูมิของ
รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก.....19

2.16 นาโนโดเมนบนผิวผลึกรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกของ PZN-PZT.....20

2.17 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก.....21

2.18 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก
และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ……..…...21

2.19 โครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์…….……23

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.20 ภาพตัดขวางของหน่วยเซลล์เพอรอฟสไกต์ในอุดมคติ (ABO_3) ในระนาบ (100) และ (200)……...24

2.21 การเกิดโพลาไรเซชันในหน่วยเซลล์เนื่องจากการเลื่อนตำแหน่งของไอออน Ti^{4+} ในผลึกเพอรอฟสไกต์ของ BaTiO……..……...25

2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของไอออน Ti^{4+} ในผลึกเพอรอฟสไกต์ของ $BaTiO_3$ กับพลังงาน……...……..……...26

2.23 รูปแบบเฟสไดอะแกรมของสารในระบบ $PbZrO_3 – PbTiO_3$ ……..……....28

2.24 วงวนฮิสเทอรีซิสของ BKT จากเทคนิคการกดร้อนที่อุณหภูมิ 1060 °C และ 1080 °C.....32

2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรีกับปริมาณ $(Bi_{½}K_{½})TiO_3$ ของเซรามิกส์ในระบบ BTBK ที่ความถี่ 1 MHz……..……..…….....32

2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan\delta$ กับ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบ BTBK ที่ความถี่ 1 MHz.....33

2.27 แผนภาพแสดงค่าโพลาไรเซชันคงเหลือ……...……33

2.28 ความสัมพันธ์ของ d_{33} , K_p , ε_r และ $\tan\delta$ ที่เปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการซินเตอร์ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.18$ 34

2.29 อุณหภูมิสภาพการสูญเสียขั้วของเซรามิกBNLKT0 – 100z, BNLKT4 – 100z และ BNLKT8-100z ……..……..35

2.30 ความสัมพันธ์ของ $\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$, K_{33}, และ d_{33} ที่เปรียบเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ…….……...35

2.31 ขนาดเกรนโดยเฉลี่ยและค่าความหนาแน่นเปรียบเทียบกับปริมาณ ของสารเจือ ST……....……...36

2.32 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง, กราฟค่าไดอิเล็กทริกสูงสุด , ค่าประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก และอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส…….……...37

2.33 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก *(1-x)*NKN-*x*ST…...……...38

2.34 ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกระบบ *(1-x)*NKN-*x*ST ที่ความถี่ 10 kHz…….....38

2.35 ความสัมพันธ์ $\log(1/\varepsilon - 1/\varepsilon_m)$ และฟังก์ชันของ $\log(T-T_m)$ ของเซรามิก *(1-x)*NKN-*x*ST……...……39

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.36 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณสารเจือ ST ต่างๆ……40

2.37 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิที่ปริมาณสารเจือ ST ต่างๆ……40

2.38 สารละลายของแข็งชนิดแทนที่……41

2.39 ภาพของสารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว……...42

2.40 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดย่อยด้วยลูกบอล ……..……..…..44

3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงผลึก BKT-ST โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง…….……...47

3.2 แผนผังการเผาแคลไซน์…….....48

3.3 การจัดเรียงชิ้นงานในถ้วยอลูมินาแบบสองชั้น……..……...49

3.4 แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์……49

3.5 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเซรามิกส์……...……52

4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ *(1-x)*BKT-*(x)*ST..……...….54

4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ *(1-x)*BKT-*(x)*ST ที่มีการเลื่อนของพีค……...……...……55

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแลตทิซพารามิเตอร์กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ *(1-x)*BKT-*(x)*ST……....56

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของหน่วยเซลล์กับสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิกในระบบ *(1-x)*BKT-*(x)*ST……57

4.5 ความหนาแน่นและสัดส่วนองค์ประกอบของเซรามิก *(1-x)*BKT-*x*ST……..…...58

4.6 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก BKT…….……...60

4.7 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.98BKT-0.02ST…….……...61

4.8 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.96BKT-0.04ST…….……...61

4.9 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.94BKT-0.06ST……62

4.10 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.92BKT-0.08ST…….…...62

4.11 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกหักของเซรามิก 0.9BKT-0.1ST……..……...……...63

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนเฉลี่ยของเซรามิกในระบบ *(1-x)*BKT-*x*ST……63

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซรามิก BKT-ST……64

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ เซรามิก 0.98BKT-0.02ST……64

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ เซรามิก 0.96BKT-0.04ST……65

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.94BKT-0.06ST……65

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.92BKT-0.08ST……66

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.9BKT-0.1ST ……66

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.8BKT-0.2ST ……67

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.7BKT-0.3ST ……67

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.6BKT-0.4ST ……68

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.5BKT-0.5ST……68

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.4BKT-0.6ST……69

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.3BKT-0.7ST……69

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.2BKT-0.8ST……70

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของเซรามิก 0.1BKT-0.9ST……70

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของ เซรามิก เมื่อ x = 0-0.10 ที่ความถี่ 1 MHz……71

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของ เซรามิก เมื่อ x = 0.20-0.90 ที่ความถี่ 1 MHz……..……..72

4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับสัดส่วนองค์ประกอบ ของเซรามิก BKT-ST……...……72

4.30 ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสที่วัดได้ และค่า T_m ทางทฤษฎี เมื่อเทียบกับสัดส่วน ที่ความถี่ 1 MHz…….……..……73

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (K_m/K_{(f,T)})$ กับ $(T-T_m)^2$ ……..….....74

4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (T-T_m)$ กับ $\log [(\varepsilon_m / \varepsilon)-1]$ ที่ความถี่ 1 MHz……..……74

สัญลักษณ์และคำย่อ

BKT	บิสมัทโพแทสเซียมไททาเนต ($Bi_{0.5}K_{0.5}TiO_3$)
BLT	บิสมัทลิเทียมไททาเนต ($Bi_{0.5}Li_{0.5}TiO_3$)
BNT	บิสมัทโซเดียมไททาเนต ($Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$)
BT	แบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$)
c/a	อัตราส่วนของโครงสร้างความเป็นเททระโกนอล
C	ค่าความจุไฟฟ้า
E	สนามไฟฟ้า
E_C	สนามไฟฟ้าบังคับ (Coercive field)
HP	การกดร้อน (Hot pressed)
k_p	สัมประสิทธิ์เชิงกลคู่ควบ
KN	โพแทสเซียมไนโอเบต ($KNbO_3$)
KNN	โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ($K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$)
NN	โซเดียมไนโอเบต ($NaNbO_3$)
MPB	รอยต่อระหว่างเฟส
PLZT	เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต
PMN	เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$)
PNN	เลดนิเกิลไนโอเบต ($PbNi_{1/3}Nb_{2/3}O_3$)
PZN	เลดซิงค์ไนโอเบต ($PbZn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$)
P_C	เฟสพาราอิเล็กทริก
P_r	โพลาไรเซชันคงเหลือ
P_S	โพลาไรเซชันอิ่มตัว
PT	เลดไททาเนต ($PbTiO_3$)
PVA	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
PZT	เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($Pb(Zr_{1-x}Ti_x)$)
RoHS	ระเบียบว่าด้วยการควบคุมการนำเข้าสินค้าในประเทศสมาชิก
s	การหดตัวเชิงปริมาตร
SEM	กล้องจุลทรรศอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ST	สตรอนเทียมไททาเนต
t	ทอลอแรนซ์แฟคเตอร์

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\tan \delta$	ค่าตัวประกอบการสูญเสียด้วยความร้อน
T	อุณหภูมิ
T_C	อุณหภูมิคูรีย์
WEEE	ระเบียบว่าด้วยการกำจัดซากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
XRD	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
π	ค่าสัมประสิทธิ์ของไพโรอิเล็กทริก
ε_O	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสุญญากาศ (มีค่า 8.854×10^{-12} Fm^{-1})
σ	ความหนาแน่น
ε_r	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
%TD	ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์