# สารบาญ


หน้า

**กิตติกรรมประกาศ** ค

**บทคัดย่อ** ง

**บทคัดย่อภาษาอังกฤษ** จ

**สารบาญตาราง** ฌ

**สารบาญภาพประกอบ** ญ

**บทที่ 1 บทนำ** 1

**บทที่ 2 ทฤษฎี** 6

2.1 สารตัวนำยวดยิ่ง 6

2.2 ทฤษฎี BCS 6

2.3 อุณหภูมิวิกฤต ($T_c$) ในสารตัวนำยวดยิ่ง 8

2.4 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต ($J_c$) ในสารตัวนำยวดยิ่ง 9

2.5 โครงสร้างผลึกของสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงระบบ Bi-Sr-Ca-Cu-O 11

2.6 Whiskers 14

2.7 การปลูก whiskers ตัวนำยวดยิ่งของ Bi-Sr-Ca-Cu-O 16

2.7.1 อัตราส่วนของสารเริ่มต้น 17

2.7.2 สารที่ใช้ปลูก whiskers 17

2.7.3 อุณหภูมิ 18

2.7.4 บรรยากาศของการปลูก whiskers 18

2.7.5 เวลาที่ใช้ในการปลูก whiskers 19

2.8 กระบวนการ Heat treatment 19

2.8.1 การเผาผง 19

2.8.2 การอัดเม็ด 19

2.8.3 กระบวนการ sinter 19

2.9 การ transition ของสาร 20

**บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ วิธีทดลอง** 21

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการปลูก whiskers 21


มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

หน้า

3.1.1 สารเคมี 22
3.1.2 เครื่องชั่งสาร 22
3.1.3 ครกบดสาร และ Alumina boat 23
3.1.4 อุปกรณ์ quench 23
3.1.5 เตาเผาสารและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 24
3.1.6 เครื่องอัดเม็ดสาร 27
3.1.7 เครื่องตัดแต่งเม็ดสาร 28
3.2 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพพื้นผิวของ whiskers 28
3.2.1 กล้องจุลทรรศน์ 28
3.2.2 กล้อง Optical microscope 29
3.2.3 กล้อง Scanning Electron Microscope 31
3.2.4 อุปกรณ์สำหรับวัดความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ 32
3.2.5 อุปกรณ์สำหรับวัดความหนาแน่นกระแสวิกฤติ ($J_c$) 33
3.3 วิธีทดลอง 34
3.3.1 วิธีปลูก whiskers $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ (2212) 35
3.3.2 วิธีเตรียมผงของสาร $Bi_2Sr_2Ca_4Cu_6Pb_yO_{10+x}$ (y = 0.5 และ 0 ) 37
3.3.3 วิธีปลูก whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_yO_{10+x}$ (y = 0.5 และ 0 ) ด้วยวิธี CAP 37
3.3.4 วิธีตรวจสอบการเกิดของ whiskers 40
3.3.5 วิธีตรวจสอบพื้นผิวของ whiskers 41
3.3.6 วิธีวัดขนาดของ whiskers 41
3.3.7 วิธีการติด contact 42
3.3.8 วิธีหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers 43
3.3.9 วิธีวัดความหนาแน่นกระแสวิกฤต ($J_c$) ของ whiskers 44

หน้า

**บทที่4 ผลการทดลอง** 45

4.1 ผลการศึกษาลักษณะ ขนาด และพื้นผิวของ whiskers(2212) 45

4.1.1 ลักษณะการเกิดของ whiskers (2212) 46

4.1.2 ผลการวัดขนาดของ whiskers (2212) 47

4.1.3 ลักษณะพื้นผิวของ whiskers(2212) 47

4.1.4 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers (2212) 48

4.2 ผลการศึกษาลักษณะ ขนาด และพื้นผิวของ whiskers (2223) 50

4.2.1 ผลการวัดขนาดของ whiskers (2223) 51

4.2.2 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers (2223) 53

4.3 ผลการวัดความหนาแน่นกระแสวิกฤต ($J_c$) ของ whiskers 58

4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของ whiskers โดยการ X-ray ผ่านกล้อง SEM 61

4.5 ผลการวิเคราะห์ whiskers โดยใช้เครื่อง x-ray diffraction 68

**บทที่ 5 สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง** 72

5.1 ลักษณะ ขนาด และ พื้นผิวของ whiskers (2212) 72

5.2 ลักษณะ ขนาด และ พื้นผิวของ whiskers (2223) 73

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers 73

5.4 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต($J_c$)ของwhiskers 74

5.5 ผลการวิเคราะห์ XRD 74

5.6 สรุปผลการทดลอง 75

5.7 ข้อเสนอแนะ 76

**เอกสารอ้างอิง** 77

**ภาคผนวก** 79

ภาคผนวก ก 80

ภาคผนวก ข 82

**ประวัติผู้เขียน** 85

# สารบาญตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | แสดงองค์ประกอบของสารตัวนำยวดยิ่งระบบ Bi-Sr-Ca-Cu-O เฟส 2212 และ 2223 | 12 |
| 2.2 | แสดงการเจริญเติบโตของ whiskers โดยวิธี VLS | 15 |
| 2.3 | แสดงวิธีการปลูก whiskers ของสารตัวนำยวดยิ่งBSCCO | 17 |
| 4.1 | แสดงอุณหภูมิวิกฤตของ whiskers ตัวอย่างที่เตรียมได้ | 58 |
| 4.2 | แสดงพื้นที่หน้าตัดและความหนาแน่นกระแสวิกฤตของ whiskers ตัวอย่าง | 60 |
| 5.1 | แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับของ Matsubara | 72 |
| 5.2 | แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับของ Matsubara | 73 |


มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

# สารบาญภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1.1 | แสดงวิวัฒนาการของการค้นพบสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง | 2 |
| 1.2 | แสดงโครงสร้างผลึกของ $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_x$ ที่มีค่า n = 2 และ 3 | 3 |
| 2.1 | แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ | 8 |
| 2.2 | แสดงสารตัวนำยวดยิ่ง type I ที่มีรูปร่างทรงกระบอก ซึ่งกระแสจะหนาแน่นที่บริเวณผิว | 10 |
| 2.3 | แสดงการนำกระแสของตัวนำธรรมดากับตัวนำยวดยิ่ง type I และ type II | 11 |
| 2.4 | แสดงโครงสร้างผลึกของสารตัวนำยวดยิ่งของระบบ Bi-Sr-Ca-Cu-O เฟส 2223, 2212 และ 2201 | 13 |
| 2.5 | แสดงไดอะแกรมการปลูกwhiskersด้วยวิธี Vapour-Liquid-Solid (VLS) ของสาร InAs wire nucleated โดยอะตอมของ As | 14 |
| 2.6 | แสดงลักษณะการเกิดของ whiskers ตามโมเดล Tip Growth | 16 |
| 2.7 | แสดงลักษณะการเกิดของ whiskers ตามโมเดลของ End Growth | 16 |
| 2.8 | แสดงกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าของ y ใน $Bi_2Pb_y$ | 18 |
| 2.9 | แสดงการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการ transition | 20 |
| 3.1 | แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 22 |
| 3.2 | แสดงเครื่องชั่งสาร | 22 |
| 3.3 | แสดงครกบดสารและอุปกรณ์ | 23 |
| 3.4 | แสดงลักษณะของแผ่นทองแดงที่ใช้ในการ Quench สาร | 23 |
| 3.5 | แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการหลอมเหลวสารตัวอย่าง และช่วยในการ quench สาร | 24 |
| 3.6 | แสดงลักษณะรูปร่างภายนอกและขนาดของเตาเผาสาร | 24 |
| 3.7 | แสดงส่วนประกอบภายในของเตาเผาสาร | 25 |
| 3.8 | แสดงส่วนประกอบของไส้เตาเผาสาร | 25 |
| 3.9 | แสดง Temperature controller | 26 |
| 3.10 | แสดง Maxthermo temperature controller | 26 |
| 3.11 | แสดงส่วนประกอบของระบบเตาเผาสารและวงจรที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ | 26 |

# สารบาญภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.12 | แสดงอุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปสารเป็นเม็ด | 27 |
| 3.13 | แสดงเครื่องตัดแต่งเม็ดสาร | 28 |
| 3.14 | แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา กำลังขยาย 40 เท่า | 28 |
| 3.15 | แสดงกล้อง Optical microscope กำลังขยาย 50, 100 และ 500 เท่า | 29 |
| 3.16 | แสดงไดอะแกรมการทำงานของกล้อง Optical microscope | 30 |
| 3.18 | แสดงกล้อง Scanning Electron Microscope | 31 |
| 3.19 | แสดงไดอะแกรมการทำงานของกล้อง Scanning Electron Microscope | 31 |
| 3.20 | แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานไฟฟ้า กับ อุณหภูมิของ whiskers | 33 |
| 3.21 | แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความหนาแน่นกระแสวิกฤตของ whiskers | 34 |
| 3.22 | แสดงการ set อุณหภูมิเตา | 36 |
| 3.23 | แสดงการ set ตำแหน่งการวาง ท่อกาซออกซิเจน | 36 |
| 3.24 | แสดงขั้นตอนการปลูก whiskers (2223) | 38 |
| 3.25 | เงื่อนไขการ quench สาร $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ (2212) | 39 |
| 3.26 | เงื่อนไขการ growth whiskers $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ (2212) | 39 |
| 3.27 | เงื่อนไขการ calcine สาร $Bi_2Sr_2Ca_4Cu_6Pb_yO_x$ ( y = 0.5 และ 0 ) | 39 |
| 3.28 | เงื่อนไขการเผาเม็ด(sintering) สาร $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_yO_{10+x}$ ( y = 0.5 และ 0 ) | 40 |
| 3.29 | เงื่อนไขการanneal whiskers(2212) ในผงสาร $Bi_2Sr_2Ca_4Cu_6Pb_yO_x$ (y =0.5และ0 ) | 40 |
| 3.30 | แสดงการติด contact | 42 |
| 3.31 | แสดงไดอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์วัดความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน ไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers | 43 |
| 3.32 | แสดงไดอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์วัดความหนาแน่นกระแสวิกฤตของ whiskers | 44 |

# สารบาญภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 4.1 | แสดงผงของสาร $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ ที่บรรจุอยู่ใน alumina boat ก่อนทำการหลอมเหลว | 45 |
| 4.2 | แสดงลักษณะของ glassy plate ที่ได้หลังทำการ quench | 45 |
| 4.3 | แสดงลักษณะพื้นผิวของ glassy plate ที่เกิด whiskers ซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron microscope | 46 |
| 4.4 | แสดงลักษณะการเกิดของ whiskers ซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้อง Scanning Electron microscope | 46 |
| 4.5 | แสดงลักษณะการเกิดของ whiskers ถ่ายภาพด้วยกล้อง Scanning electron microscope | 47 |
| 4.6 | แสดงลักษณะพื้นผิวของ whiskers(2212) ถ่ายภาพด้วยกล้อง Scanning Electron microscope ตัวอย่างที่ 1 | 48 |
| 4.7 | แสดงลักษณะพื้นผิวของ whiskers(2212) ถ่ายภาพด้วยกล้อง Scanning Electron microscope ตัวอย่างที่ 2 | 48 |
| 4.8 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers (2212) ตัวอย่างที่ 1 | 49 |
| 4.9 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers (2212) ตัวอย่างที่ 2 | 49 |
| 4.10 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers (2212) ตัวอย่างที่ 3 | 49 |
| 4.11 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers (2212) ตัวอย่างที่ 4 | 50 |
| 4.12 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers (2212) ตัวอย่างที่ 5 | 50 |
| 4.13 | แสดงลักษณะการวางwhiskers(2212)ในผงสาร $Bi_2Sr_2Ca_4Cu_6Pb_yO_{10+x}$(y = 0.5 และ 0) | 51 |
| 4.14 | แสดงผงของสาร $Bi_2Sr_2Ca_4Cu_6Pb_yO_{10+x}$(y = 0.5 และ 0)โดย calcine ผงที่ 820 °C | 51 |
| 4.15 | แสดงลักษณะพื้นผิวของ whiskers(2223) ถ่ายภาพด้วยกล้อง Scanning | 52 |

# สารบาญภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 4.16 | แสดงลักษณะพื้นผิวของ whiskers(2223) ถ่ายภาพด้วยกล้อง Scanning Electron microscope ตัวอย่างที่ 2 | 52 |
| 4.17 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 1 | 53 |
| 4.18 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 2 | 53 |
| 4.19 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 3 | 54 |
| 4.20 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 4 | 54 |
| 4.21 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 5 | 54 |
| 4.22 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 6 | 55 |
| 4.23 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 7 | 55 |
| 4.24 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 1 | 56 |
| 4.25 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 2 | 56 |
| 4.26 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 3 | 56 |
| 4.27 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 4 | 57 |
| 4.28 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 5 | 57 |
| 4.29 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 6 | 57 |

# สารบาญภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 4.30 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ ตัวอย่างที่ 7 | 58 |
| 4.31 | แสดงความหนาแน่นกระแสวิกฤตของ whiskers $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ | 59 |
| 4.32 | แสดงความหนาแน่นกระแสวิกฤตของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ | 60 |
| 4.33 | แสดงความหนาแน่นกระแสวิกฤตของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ | 60 |
| 4.34 | แสดง X-ray ด้วยกล้อง SEM ของ whiskers $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ | 61 |
| 4.35 | แสดง X-ray ด้วยกล้อง SEM ของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ | 62 |
| 4.36 | แสดง X-ray ด้วยกล้อง SEM ของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ | 63 |
| 4.37 | แสดงภาพตัดขวางของผิวของ glassy plate ที่เกิด whiskers ซึ่งถ่ายด้วยกล้อง SEM | 64 |
| 4.38 | แสดง X-ray ด้วยกล้อง SEM ที่บริเวณ A | 65 |
| 4.39 | แสดง X-ray ด้วยกล้อง SEM ที่บริเวณ B | 66 |
| 4.40 | แสดง X-ray ด้วยกล้อง SEM ที่บริเวณ C | 67 |
| 4.41 | แสดง XRD ของ whiskers $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ | 69 |
| 4.42 | แสดง XRD ของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3Pb_{0.5}O_{10+x}$ | 70 |
| 4.43 | แสดง XRD ของ whiskers $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ | 71 |


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University