สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โครงสร้างของวัสดุนาโน	6
2.2 สารกึ่งตัวนำ	8
2.3 ทินไดออกไซด์ (Tin dioxide; SnO_2)	17
2.4 เทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า	20
2.5 เฟลมสเปรย์ไพโรลิซีส (Flame Spray Pyrolysis: FSP)	21
2.6 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงกระจาย	24
2.7 แก๊สเซนเซอร์	27
2.8 คุณสมบัติของแก๊สเซนเซอร์	41

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.9 การพัฒนาเซนเซอร์ในทางอุตสาหกรรม 47

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 50

2.11 หลักการและเครื่องมือวิเคราะห์ชนิดต่างๆ 65

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 การศึกษากระบวนการการสังเคราะห์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ โดยวิธีตกสะสมด้วยกระแสไฟฟ้าสูง 89

3.2 การศึกษากระบวนการการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซีสเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อแก๊ส 93

3.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ 98

3.4 ทำการเตรียมตัวอย่างเซ็นเซอร์โดยใช้วิธีสปินโคตติง (spin coating) 105

3.5 การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ 109

3.6 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเซนเซอร์หลังการทดสอบ 113

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการเตรียมทินไดออกไซด์โดยวิธีต่างๆ 115

4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของทินไดออกไซด์ 117

4.3 สมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสภาวะแวดล้อมของเซนเซอร์ 138

4.4 สัณฐานวิทยาของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบ 154

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง 160

5.2 ข้อเสนอแนะ 166

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอกสารอ้างอิง 167

ภาคผนวก 173

ภาคผนวก ก 174

ภาคผนวก ข 175

ภาคผนวก ค 178

ภาคผนวก ง 179

ภาคผนวก จ 182

ภาคผนวก ฉ 185

ประวัติผู้เขียน 188

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของอิเล็กตรอน โปรตอน และ นิวตรอน	8
2.2	ประเภทต่าง ๆ ของโครงสร้างสามัญของสารประกอบไอออนิก	19
2.3	ประเภทและหลักการวัดแก๊ส รวมถึงวัสดุที่ใช้ทำ	29
2.4	การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของแก๊สเซนเซอร์แต่ละชนิด	37
3.1	แสดงถึงการเตรียมสารละลายตั้งต้นและผลการสังเกตลักษณะของเปลวไฟ	98
4.1	แสดงเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์	115
4.2	แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของทินไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่อง สเปกโตรสโคปีของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์	133

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป	หน้า
2.1 ลำดับขนาดโครงสร้างของวัสดุนาโนที่มีรูปร่างแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular)	6
2.2 ลำดับขนาดโครงสร้างของวัสดุนาโนที่มีรูปร่างแบบโค้งมน (curvilinear)	6
2.3 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์กับเส้นใยนาโนเมื่อปริมาตรเท่ากัน	7
2.4 จำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น	9
2.5 ผลึกของสารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (*n*-type semiconductor)	12
2.6 ผลึกของสารกึ่งตัวนำประเภทพี (*p*-type semiconductor)	12
2.7 การไหลของกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำประเภทพี (*p*-type semiconductor)	13
2.8 พาหะข้างน้อยและพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ พี	13
2.9 (a)ระดับพลังงานในอะตอมโซเดียม(Na), (b) การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอม	14
2.10 (a)อิเล็กตรอนวงนอกที่ไม่อยู่กับที่,(b)แถบพลังงานอิเล็กตรอนวงนอกในโลหะโซเดียม	14
2.11 แถบพลังงานของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	15
2.12 แถบพลังงานของของซิลิกอนบริสุทธิ์	15
2.13 แถบพลังงานของ เยอรมันเนียมบริสุทธิ์	16
2.14 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เทียบกับเพชร ซึ่งเป็นฉนวน	16
2.15 อุปกรณ์การตรวจจับแก๊สที่พบในอุตสาหกรรมระดับโลก	18
2.16 โครงสร้างในหน่วยเซลล์ และ supercell ของ Rutile SnO_2	19
2.17 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ในเทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า	20

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.18 กระบวนการการก่อตัวของอนุภาคในขั้นตอนต่าง ๆ จากสถานะแก๊ส ไปเป็นผงอนุภาคละเอียดโดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซีส 23

2.19 กระบวนการการก่อตัวของอนุภาคในขั้นตอนต่าง ๆ จากลักษณะ ละอองฝอยไปเป็นผงอนุภาคละเอียดโดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซีส 23

2.20 แสดงการหยดสารละลายลงบนแผ่นรองรับในการทำฟิล์มบาง 24

2.21 ทิศทางการแผ่ของหยดของเหลวเมื่อหยดลงบนซับสเตรต 25

2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วในการหมุน 26

2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับเวลาที่ใช้ในการหมุน 26

2.24 แสดงการให้ความร้อนในขณะทำการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงกระจาย 27

2.25 ส่วนประกอบหลักของแก๊สเซนเซอร์ 29

2.26 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ 31

2.27 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบเผาไหม้ผ่านสารเร่งปฏิกิริยา 31

2.28 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบโพเทนทิโอสเตติกและแบบเซลล์กัลวานิก 32

2.29 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบอิเล็กโตรไลต์ของแข็ง 33

2.30 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบพิโซอิเล็กทริก 34

2.31 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบพิโซอิเล็กทริก 35

2.32 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบใช้อิออนอิเล็กโทรดที่มีเมมเบรน 35

2.33 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบใช้พอลิเมอร์ 36

2.34 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบใช้แสง 36

2.35 โครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์แบบไพโรอิเล็กทริก 37

2.36 ลักษณะของกำแพงศักย์บริเวณ grain boundary และพื้นผิว 39

2.37 แสดงความแตกต่างของกราฟความไวในการตอบสนอง (S) 43

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.38 แสดงการหาสภาพความไวในการตอบสนอง (S) และเวลาการตอบสนอง (t_{res}) 44

2.39 การหาเวลาการตอบสนอง และ เวลาการคืนกลับสู่สภาพเดิม 46

2.40 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานที่เกิดการทดสอบของแก๊สหลายชนิด 46

2.41 เครื่องตรวจวัดแก๊สที่มีขายในเชิงพาณิชย์ 47

2.42 แผนภูมิแสดงส่วนของ SnO_2 พรุนที่มีขั้วไฟฟ้าพรุน 48

2.43 เครื่องตรวจวัดแก๊สประเภทออกไซด์ที่มีการผลิตทางการค้า 49

2.44 เครื่องตรวจวัดแก๊ส CO 50

2.45 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศนอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) 51

2.46 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศนอิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงนาโนทินไดออกไซด์ 52

2.47 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศนอิเล็กตรอนโดยใช้กระบวนการขงคลื่นไมโครเวฟ 52

2.48 ภาพอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูง 53

2.49 ลักษณะความหนาของฟิล์มบางนาโนทินไดออกไซด์ 54

2.50 ภาพถ่ายทินไดออกไซด์จากกล้องจุลทรรศนอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) 55

2.51 ภาพถ่าย FESEM ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ 56

2.52 ภาพถ่าย FESEM ของรูปทรงแบบ nanowire โดยใช้แบบพิมพ์ชนิด AAO 56

2.53 ภาพถ่าย FESEM ของรูปทรงแบบ nanowire โดยใช้แบบพิมพ์ชนิด AAO ปราศจากการเชื่อมประสานโดยอนุภาคทองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 57

2.54 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศนอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารตัวอย่าง (a) ที่ความเข้มข้นก่อนทำการผสมระหว่าง $SnCl_4$ กับ ยูเรีย 58

2.55 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศนอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มทิน 59

2.56 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่ถูกเตรียมที่อัตราส่วนระหว่างน้ำกับเอทานอลต่างกัน 60

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.57 ภาพถ่าย SEM ของผงทิน ที่ทำการบดเป็นเวลาที่ต่าง ๆ กัน 61

2.58 ภาพถ่าย SEM ที่แสดงโครงสร้างเป็นรูปทรงดอกไม้ที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่เป็นลักษณะท่อระดับไมโครเมตรที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 62

2.59 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ผิวของทองแดงบริสุทธิ์ตำแหน่งพีค(Peak) ต่างๆ 66

2.60 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อตกกระทบระนาบผลึก 67

2.61 แสดงส่วนประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 70

2.62 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 73

2.63 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับของพลังงาน 74

2.64 ภาพตัวอย่างของการสั่นแบบ symmetric vibration เป็น Raman active 75

2.65 ตัวอย่างกราฟแสดงผลโดยเส้นสเปกตรัมรามานของสารต่าง ๆ 77

2.66 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของบรูนัวร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ 79

2.67 หลักการทำงานของเครื่องวัดพื้นที่ผิวรุ่น FlowSorb II 2300 80

2.68 แสดงทิศทางของแสงที่ทะลุผ่านสาร 82

2.69 แสดง Electromagnetic spectrum 85

2.70 แสดง Block Diagram of a Spectrophotometer 85

3.1 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 89

3.2 แท่งสารที่ได้หลังจากการอัดขึ้นรูป 90

3.3 ผลิตภัณฑ์เกิดการบวมขณะการเผาและเริ่มเกิดเส้นใยฟู 92

3.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผา 92

3.5 สารละลายตั้งต้นชนิด Tin (II) 2-ethylethanoate ละลายในตัวทำละลาย Xylene ในขวดที่ใช้เตรียมสารละลายตั้งต้น 94

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.6 แผนภาพแสดงถึงกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซีส 97

3.7 แสดงเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 99

3.8 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 100

3.9 แสดงเครื่องทดสอบ XPS 100

3.10 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 101

3.11 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer VARIAN รุ่น Cary 50 Conc 102

3.12 แสดงรูปแบบชั้นการเคลือบของแผ่นรองรับ 105

3.13 ตัวอย่างลวดลายมาร์กสำหรับใช้สร้างหัววัดก๊าซ (gas sensor) 106

3.14 แสดงรูปแผนผังอุปกรณ์การชุบเคลือบทางไฟฟ้า 108

3.15 แผนภาพไดอะแกรมขั้นตอนการสร้างมาร์ก เพื่อประดิษฐ์หัววัดก๊าซ 108

3.16 (ก) เครื่องสปัตเตอริง (ข) แผ่นรองรับ (substrate) หลังการสปัตเตอริงด้วยทอง 109

3.17 แสดงแผนผังการทำงานของระบบทดสอบแก๊ส 110

3.18 แสดงเครื่องทดสอบก๊าซ 110

3.19 (a) แสดงรูปถังแก๊สที่ใช้ทดสอบเซนเซอร์ (b) ฐานวางเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ 111

3.20 แสดงรูปแบบของโปรแกรม Lab View 8.5 113

4.1 ขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการพ่นสารละลายตั้งต้น Tin (II) ethylhexanoate ละลายในตัวทำละลายไซลีน (xylene) 117

4.2 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากการสังเคราะห์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ 118

4.3 กราฟผลการวิเคราะห์จากเครื่องรามาน 119

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.4 กราฟผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ BET ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส 120

4.5 กราฟการวัดปริมาณการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการบีอีที(BET) ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง 121

4.6 กราฟการวัดปริมาณการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการบีอีที(BET) ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 122

4.7 แสดงภาพรูปร่างและองค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส โดยศึกษาจากกล้องSEM และ EDS 123

4.8 แสดงภาพรูปร่างและองค์ประกอบธาตุของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ ที่สังเคราะห์โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง โดยศึกษาจากกล้องSEM และ EDS 124

4.9 แสดงภาพรูปร่างและองค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 โดยศึกษาจากกล้อง SEM และ EDS 125

4.10 ภาพการศึกษาสัณฐานวิทยาแบบละเอียดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส 128

4.11 ภาพการศึกษาสัณฐานวิทยาแบบละเอียดของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง 128

4.12 ภาพการศึกษาสัณฐานวิทยาแบบละเอียดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 129

4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ 130

4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ 131

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่าย ทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657ของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูก ปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ 132

4.16 แสดงการวิเคราะห์พื้นผิวแบบ 3 มิติ ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 134

4.17 แสดงขนาดและรูปร่างแบบสามมิติของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้โดย การตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 135

4.18 แสดงการวิเคราะห์พื้นผิวแบบ 3 มิติ ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 135

4.19 แสดงสมบัติเชิงแสงของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยการตกสะสมแบบ ให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง 137

4.20 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของ เซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัย ในการวัดช่วง 50-2000 ppm ของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ 139

4.21 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนอง ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของ เซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 140

4.22 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของ เซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัย ในการวัดช่วง 0.1-3 ppm ของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ 142

4.23 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนอง ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ 143

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.24 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 0.2-10 ppm ของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 145

4.25 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 146

4.26 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 0.1-3 vol% ของแก๊สไฮโดรเจน 148

4.27 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจน 149

4.28 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 50-2000 ppm ของแก๊สเอทานอล 151

4.29 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอล 152

4.30 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสภาวะแวดล้อมของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์แต่ละประเภท 153

4.31 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มทินไดออกไซด์ 155

4.32 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส 156

4.33 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง 156

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.34 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 157

4.35 แสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของซับสเตรทที่ใช้ และธาตุของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส 157

4.36 แสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของซับสเตรทที่ใช้ และธาตุของเซนเซอร์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง 158

4.37 แสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของซับสเตรทที่ใช้ และธาตุของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 158

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved