สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค

บทคัดย่อภาษาไทย ง

ABSTRACT ฉ

สารบัญตาราง ฎ

สารบัญรูปภาพ ฐ

รายการอักษรย่อและสัญลักษณ์ บ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ประวัติความเป็นมา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา เชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุนาโนทินออกไซด์ 5

2.2 ธาตุอินเดียม (Indium) 7

2.3 อินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) 8

2.4 กราฟีน (Graphene) 9

2.5 สารละลายของแข็งสององค์ประกอบ (Solids solution) 11

2.6 กระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส 13

2.7 วิธีเคลือบหมุนเหวี่ยงกระจาย (Spin Coating) 18

2.8 การทบทวนวรรณกรรม 21

2.9 เครื่องมือวิเคราะห์อนุภาคผงนาโนและฟิล์มตอบสนอง 33

2.10 ชนิดของแก๊สสภาวะแวดล้อม 52

2.11 ตัวรับรู้ (Gas Sensors) 54

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 3 วิธีการทดลอง 65
3.1 การศึกษากระบวนการการสังเคราะห์อนุภาคผง 66
3.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม โดยวิธีเฟรมสเปรย์ไพโรลิซิส 66
3.1.2 การสังเคราะห์กราฟีนโดยวิธีการลอกผิวด้วยไฟฟ้าเคมี 70
3.2 การเตรียมตัวรับรู้เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้แก๊ส 71
3.2.1 การสร้างแผ่นรองรับที่ใช้เป็นอุปกรณ์หัววัดแก๊ส 71
3.2.2 การเตรียมตัวรับรู้แก๊ส 76
3.3 การนำฟิล์มตอบสนองมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส 77
3.3.1 การปรับเปลี่ยนเงื่อนไขอุณหภูมิขณะการทดสอบ 79
3.4 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของฟิล์มตอบสนอง 81
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์
4.1 สมบัติของอนุภาคนาโนและผงคอมโพสิต 83
4.1.1 ผลจากการเตรียมอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส 83
4.1.2 การก่อตัวระหว่างตัวรองรับและตัวเจือ 85
4.1.3 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 86
4.1.4 สเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ 89
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 94
4.1.6 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 99
4.2 คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสภาวะแวดล้อมผลการทดสอบแก๊ส 101
4.2.1 ผลของการเจืออินเดียม (Effect of In-doping) 101
(1) ผลการทดสอบแก๊สเอทานอล (C_2H_5OH) 101
(2) ผลการทดสอบแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 106
(3) ผลการทดสอบแก๊สมีเทน (CH_4) 110
4.2.2 ผลของการโหลดกราฟีน (Effect of graphene loading) 114
(1) ผลการทดสอบแก๊สเอทานอล (C_2H_5OH) 114

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(2) ผลการทดสอบแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 119
(3) ผลการทดสอบแก๊สมีเทน (CH_4) 123
4.2.3 การคัดสรรจำเพาะ (Selectivity) 126
4.3 สัณฐานวิทยาของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบเซนเซอร์ 129
4.3.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 129
4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 131
4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ 133
4.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน 135
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 137
5.1 คุณสมบัติอนุภาคนาโนก่อนและหลังทดสอบแก๊ส 137
5.2 คุณสมบัติการตรวจจับแก๊ส 138
5.3 การพัฒนาตัวรับรู้ในอนาคต 139

เอกสารอ้างอิง 141
ภาคผนวก 152
ภาคผนวก ก รูปเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 152
ภาคผนวก ข ตารางการคำนวณ 155

ประวัติผู้เขียน 160

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ส่วนประกอบหลักที่สำคัญและหน้าที่ของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน	34
ตารางที่ 2.2	การกระเจิงพันธะแบบรามานของฟังก์ชันนัลกรุ๊ปต่างๆ	51
ตารางที่ 4.1	ค่าต่างๆประกอบการพิจารณาการก่อตัวของตัวรองรับและตัวเจือ	85
ตารางที่ 4.2	สรุปการคำนวณระนาบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์	155
ตารางที่ 4.3	สรุปการคำนวณระนาบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	156
ตารางที่ 4.4	สรุปการคำนวณระนาบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ของอนุภาคกราฟีน	156
ตารางที่ 4.5	สรุปการคำนวณระนาบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่เจือด้วยอินเดียมปริมาณ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักผสมกราฟีนในปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก	156
ตารางที่ 4.6	สรุปการคำนวณระนาบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักผสมกราฟีนในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก	157
ตารางที่ 4.7	สรุปการคำนวณระนาบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักผสมกราฟีนในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก	157
ตารางที่ 4.8	สรุปการคำนวณระนาบรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักผสมกราฟีนในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	158
ตารางที่ 4.9	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือ ด้วยอินเดียม ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสและหลัง จากผ่านการทดสอบแก๊สแล้วที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปก โทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์	158

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.10 ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว ของตัวรับรู้อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและโหลดด้วยกราฟีนหลังจากผ่านการทดสอบแก๊สทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ 159

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

		หน้า
รูป 2.1	โครงสร้างในหน่วยเซลล์และ Super cell ของทินไดออกไซด์โครงสร้างรูไทล์	6
รูป 2.2	อุปกรณ์การตรวจจับแก๊สหรือใช้ทำงานเกี่ยวกับแก๊สโดยตรงที่พบในอุตสาหกรรมระดับโลก	7
รูป 2.3	โครงสร้างอินเดียมออกไซด์	8
รูป 2.4	โครงสร้างกราฟีนในแนวระนาบ 2 มิติ	10
รูป 2.5	สารละลายของแข็งแบบแทนที่อะตอมตัวถูกละลายเข้าไปแทนที่บางส่วนของอะตอมตัวทำลาย	11
รูป 2.6	สารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรก	12
รูป 2.7	เครื่องผลิตอนุภาคนาโนความบริสุทธิ์สูงเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส จัดตั้งที่คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัย เชียงใหม่	15
รูป 2.8	ขั้นตอนการก่อตัวเป็นอนุภาคนาโนจากกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส	16
รูป 2.9	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส	17
รูป 2.10	การหยดสารละลายลงบนแผ่นรองรับในการทำฟิล์มบางโดยวิธีเคลือบหมุนเหวี่ยงกระจาย	18
รูป 2.11	ทิศทางการแผ่ของหยดของเหลวเมื่อหยดลงบนแผ่นรองรับขณะกำลังหมุน	18
รูป 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วเวลาและปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการหมุนเหวี่ยง	19
รูป 2.13	การให้ความร้อนในขณะทำการเคลือบหมุนเหวี่ยงกระจายเพื่อเร่งการระเหยของสารละลาย	20
รูป 2.14	กระบวนการเตรียมเซนเซอร์โดยวิธีเคลือบหมุนเหวี่ยงกระจาย	21
รูป 2.15	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์	22

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 2.16 (a) ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นรูปท่อ ภาพที่แทรกอยู่แสดงถึงสัณฐานวิทยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคทอง โดยใช้แบบพิมพ์ชนิด Anodicaluminum oxide ก่อนทำการเคลือบ (b) ภาพถ่ายลักษณะท่อนาโนกับอนุภาคทองที่ปลายเข็ม (c) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของท่อนาโนเดี่ยว และ (d) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเป็นผลึกของรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (c) 23

รูป 2.17 (a) ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของรูปทรงแบบลวดนาโนโดยใช้แบบพิมพ์ชนิด Anodic aluminum oxide กับการเชื่อมประสานโดยใช้อนุภาคทองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมประมาณ 850 องศาเซลเซียส (b) ภาพถ่ายของท่อนาโนที่มีปลายท่อเป็นรูปธง 23

รูป 2.18 (a) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบเปล่งสนามไฟฟ้าของรูปทรงแบบลวดนาโน โดยใช้แบบพิมพ์ชนิด Anodic aluminum oxide ปราศจากการเชื่อมประสานโดยอนุภาคทองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่อุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมประมาณ 850 องศาเซลเซียสภาพที่แทรกอยู่แสดงถึงสัณฐานวิทยาที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคทองโดยใช้แบบพิมพ์ชนิด Anodic aluminum oxide ก่อนทำการเคลือบ 24

รูป 2.19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มทินที่เตรียมได้จากการถูกเคลือบทางอิเล็กทรอนิกส์ บนซับสเตรทชนิดเหล็กสเตนเลส (a) และ (b) จากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ของ $SnCl_2$และ 0.5 โมลาร์ของ $NaNO_3$ โดยใช้แผ่นตัวกลางชนิด DMSOและ (c) สารละลายที่ถูกใช้ในการเคลือบทินประมาณ 50 มิลลิลิตรหลังจากผ่านที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (d-f) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์ม ที่ถูกเคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไข ดังรูป (c) แต่มีการเข้าร่วมทำปฏิกิริยาของออกซิเจนโดยระบบบับเบิล (0.011 m^3/min) 25

รูป 2.20 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงทินที่ทำการบดเป็นเวลาต่างกัน 26

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 2.21	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อตกกระทบระนาบผลึก	33
รูป 2.22	หลักการทำงานของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (Philips Analytical X-Ray B.V. X-Ray Diffraction Course.The Netherlands)	35
รูป 2.23	ส่วนประกอบของหลอดผลิตรังสีเอกซ์ (Philips Analytical X-Ray B.V. X-Ray Diffraction Course.The Netherlands)	36
รูป 2.24	การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง	37
รูป 2.25	ส่วนประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	38
รูป 2.26	รูปแบบการวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (Mapping)	39
รูป 2.27	รูปแบบการวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (Line-scan)	39
รูป 2.28	ส่วนประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	40
รูป 2.29	(ก) อุปกรณ์ยึดติดชิ้นงาน (ข) แผ่นวางชิ้นงานที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	43
รูป 2.30	การเลี้ยวเบนของวัสดุผลึกเดี่ยว	43
รูป 2.31	(ซ้าย) รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุหลายผลึกที่มีขนาดเกรนใหญ่ (ขวา) รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุหลายผลึกที่มีขนาดเกรนเล็ก	44
รูป 2.32	รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุอสัณฐาน	44
รูป 2.33	หลักการเกิดอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์	46
รูป 2.34	หลักการทำงานของเครื่องสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์	47
รูป 2.35	ตัวอย่างของการวิเคราะห์ผิวของทองแดงบริสุทธิ์ตำแหน่งของพีกต่างๆ ในสเปกตรัม	47
รูป 2.36	การเปลี่ยนแปลงของระดับของพลังงาน	48
รูป 2.37	ภาพตัวอย่างของการสั่นแบบสมมาตรของ Raman active	49
รูป 2.38	ตัวอย่างกราฟแสดงผลโดยเส้นสเปกตรัมรามานของสารต่างๆ	52
รูป 2.39	การจำแนกการประยุกต์ใช้ของตัวตรวจจับตามประเภท/ชนิดของแก๊ส	53
รูป 2.40	กระบวนการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างสารกึ่งตัวนำกับไอเอทานอล	58
รูป 2.41	ความแตกต่างของกราฟความไวในการตอบสนอง (*S*) (ก) ต่อแก๊สออกซิไดซ์ซิง และ (ข) แก๊สรีดิวซิง	60

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 2.42 การหาสภาพความไวในการตอบสนอง (S) และเวลาการตอบสนอง (t_{res}) จากกราฟความต้านทานกับเวลา 61
รูป 2.43 การหาเวลาการตอบสนอง (Response time) และเวลาการคืนสู่สภาพเดิม (Recovery time) 62
รูป 3.1 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 65
รูป 3.2 ภาพถ่ายกระบวนการการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (ซ้าย) และลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ (ขวา) 69
รูป 3.3 ไดอะแกรมการสังเคราะห์กราฟีนโดยวิธีลอกผิวด้วยไฟฟ้าเคมี 70
รูป 3.4 อนุภาคผงกราฟีนที่สังเคราะห์โดยการลอกผิวด้วยไฟฟ้าเคมี 70
รูป 3.5 รูปแบบชั้นการเคลือบของแผ่นรองรับ 71
รูป 3.6 ตัวอย่างลวดลายมาร์กสำหรับใช้สร้างหัววัดแก๊สมาร์กสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้าและมาร์กสำหรับปิดขั้วไฟฟ้าขณะเคลือบฟิล์ม 71
รูป 3.7 รูปแผนผังอุปกรณ์การชุบเคลือบทางไฟฟ้า 73
รูป 3.8 แผนภาพไดอะแกรมขั้นตอนการสร้างมาร์ก เพื่อประดิษฐ์หัววัดแก๊ส 74
รูป 3.9 (ก) เครื่องสปัตเตอริง (ข) แผ่นรองรับซับสเตรทหลังการสปัตเตอริงด้วยทอง 75
รูป 3.10 (ก) กระบวนการเตรียมเซนเซอร์โดยวิธิสปินโคตรติง 76
รูป 3.11 เตาเผาชนิดท่อ 77
รูป 3.12 ระบบการทดสอบแก๊ส 78
รูป 3.13 แผนผังการทำงานของระบบทดสอบแก๊ส 79
รูป 3.14 รูปแบบของโปรแกรม Lab View 8.5 ที่ใช้ในการทดสอบ 80
รูป 4.1 ขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการพ่น สารละลายตั้งต้นทินทูเอทิลเฮกซะโนเอทละลายในตัวทำละลายไซลีน 84
รูป 4.2 ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการการพ่น (a) ตัวทำละลายชนิดไซลีนบริสุทธิ์และสารละลายตั้งต้นทินทูเอทิลเฮกซะโนเอทผสมกับสารเจือชนิดอินเดียมไนเตรทในตัวทำละลายไซลีนเพื่อสังเคราะห์(b) ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมความเข้มข้นร้อยละ (c) 0.2 (d) 0.5 และ (e) 1 โดยน้ำหนัก 84

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.3 ผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยอินเดียมในปริมาณการเจือร้อยละ 0.2, 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก 85

รูป 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (a) ผงนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมในระดับการเจือแตกต่างกัน (P-0 ถึง P-In1) และ (b) ผงนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักโหลดด้วยกราฟีนในปริมาณที่แตกต่างกัน (P -In0.5/G0.1 ถึง P-In0.5/G5) 88

รูป 4.5 สเปคตรัมของผงนาโนและฟิล์มตอบสนองทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก หลังจากผ่านการอบอ่อนและทดสอบแก๊ส (a) Sn 3d (b) In 3d และ (c) O 1s 91

รูป 4.6 สเปกตรัมของผงกราฟีนและตัวรับรู้ S-In0.5/G5 หลังจากการอบอ่อนและการทดสอบแก๊ส (a) การสแกนแบบสำรวจ (b) C 1s และ (c) O 1s 93

รูป 4.7 (a) ภาพไบร์ทฟิลล์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงนาโนทินไดออกไซด์ (b) ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูงของผงนาโนทินไดออกไซด์ (c) ภาพไบร์ทฟิลด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและ (d) ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูงของผงนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ตัวแทรก: รูปแบบที่สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบน 96

รูป 4.8 (a) ภาพไบร์ทฟิลด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของกราฟีนโดยวิธีการลอกผิวด้วยไฟฟ้าเคมี(c) ภาพไบร์ทฟิลด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของ P-In0.5/G0.5 และ (d) P-In0.5/G5 98

รูป 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิว (a) กราฟีน (b) ตัวรับรู้S-In0.5 (c) S-In0.5/G0.1(d) S-In0.5/G0.5 (e) S-In0.5/G2 และ (f) ตัวรับรู้ S-In0.5/G5 บนแผ่นรองรับชนิดอะลูมิเนียมพิมพ์ลายอิเล็กโทรดด้วยทอง หลังการอบอ่อนและการทดสอบแก๊ส 100

รูป 4.10 กราฟแสดงค่าการตอบสนองของตัวรับรู้ต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 1,000ppm ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมปริมาณร้อยละ 0–1 โดยน้ำหนัก (S-0 ถึง S-In1) ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 150–350 องศาเซลเซียส 101

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.11 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2—1 โดยน้ำหนักต่อแก็สเอทานอลที่อุณหภูมิ 150 และ 200 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก็สที่แตกต่างกัน 103

รูป 4.12 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2—1 โดยน้ำหนัก ต่อแก็สเอทานอลที่อุณหภูมิ 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของแก็สที่แตกต่างกัน 104

รูป 4.13 กราฟแสดงค่าการตอบสนองของตัวรับรู้ ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ 10 ppm ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (S-0 ถึง S-In1)ที่แตกต่างกันสังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสที่อุณหภูมิการทดสอบตั้งแต่ 150—350 องศาเซลเซียส 106

รูป 4.14 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2—1 โดยน้ำหนักต่อแก็สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก็สที่แตกต่างกัน 108

รูป 4.15 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2—1 โดยน้ำหนักต่อแก็สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก็สที่แตกต่างกัน 109

รูป 4.16 กราฟแสดงค่าการตอบสนองของตัวรับรู้ต่อแก๊สมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตรของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0—1 โดยน้ำหนัก (S-0 ถึง S-In1) ที่แตกต่างกันสังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 200—350 องศาเซลเซียส 110

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.17	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพ สภาพความไว (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2─1 โดยน้ำหนัก ต่อแก็สมีเทนที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก็สที่แตกต่างกัน	112
รูป 4.18	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพ สภาพความไว (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2─1 โดยน้ำหนักต่อแก็สมีเทนที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก็สที่แตกต่างกัน	113
รูป 4.19	รูปแบบของอุณหภูมิในการตอบสนองของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักโหลดด้วยกราฟีนในระดับการโหลดกราฟีนที่แตกต่างกัน (S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5) ที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 150─350 องศาเซลเซียสต่อไอเอทานอล	114
รูป 4.20	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) กับความเข้มข้นเอทานอลของตัวรับรู้ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 150 องศาเซลเซียส	116
รูป 4.21	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) กับความเข้มข้นเอทานอลของตัวรับรู้ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส	117
รูป 4.22	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) กับความเข้มข้นเอทานอลของตัวรับรู้ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 350 องศาเซลเซียส	118

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.23	รูปแบบของอุณหภูมิในการตอบสนองของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักโหลดด้วยกราฟีนในระดับการโหลดกราฟีนที่แตกต่างกันคือร้อยละ 0.1─5 โดยน้ำหนัก (S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5) ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 150─350 องศาเซลเซียส	119
รูป 4.24	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, ─■─) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) กับความเข้มข้นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวรับรู้ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส	121
รูป 4.25	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, ─■─) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) กับความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวรับรู้ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 300 และ 350 องศาเซลเซียส	122
รูป 4.26	รูปแบบของอุณหภูมิในการตอบสนองของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักโหลดด้วยกราฟีนในระดับการโหลดกราฟีนที่แตกต่างกันคือร้อยละ 0.1─5 โดยน้ำหนัก (S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5) ต่อแก๊สมีเทนที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 200─350 องศาเซลเซียส	123
รูป 4.27	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, ─■─) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) กับความเข้มข้นแก๊สมีเทนของตัวรับรู้ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส	125
รูป 4.28	(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, ─■─) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) กับความเข้มข้นแก๊สมีเทนของตัวรับรู้ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 350 องศาเซลเซียส	126

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.29 กราฟแสดงค่าการคัดสรรจำเพาะของการตอบสนองตัวรับรู้ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 1,000 ppm, ไนโตรเจนไดออกไซด์ความเข้มข้น 5 ppm, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 10 ppm, ไฮโดรเจนความเข้มข้น 1vol% และมีเทนความเข้มข้น 1Vol% ของตัวรับรู้ S-0, S-In0.5, S-In0.5/G0.5 และ S–In0.5/G5 ที่อุณหภูมิการทดสอบที่ดีที่สุดคือ 350 องศาเซลเซียส 128

รูป 4.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตอบสนองบนพื้นฐานของ (a) อนุภาคนาโน ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0—1 โดยน้ำหนัก (S-0 ถึง S-In1) และ (b) ทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักโหลดด้วยกราฟีนร้อยละ 0.1—5 โดยน้ำหนัก (S-In0.5/G0.1 S-In0.5/G5) บนซับสเตรทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายอิเล็กโทรดด้วยทองหลังจากการอบอ่อนและการทดสอบแก๊ส 130

รูป 4.31 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาคตัดขวาง) ของตัวรับรู้ (a) S-0, (b) S-In0.5 (c) S-In0.5/G0.1, (d) S-In0.5/G0.5 (e) S-In0.5/G2 และ (f) S-In0.5/G5 บนซับสเตรทอะลูมินาพิมพ์ลายอิเล็กโทรดด้วยทองหลังจากการอบอ่อนและการทดสอบแก๊ส 132

รูป 4.32 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก 134

รูป 4.33 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักผสมกราฟีนในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 135

รูป 4.34 สเปกตรัมรามานของกราฟีนโดยวิธีลอกผิวด้วยไฟฟ้าเคมีและผงนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักที่มีระดับการโหลดกราฟีนแตกต่างกัน (P-In0.5 และP-In0.5/G0.1 ถึง P-In0.5/G5) 136

รูป 4.35 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 152

รูป 4.36 เครื่องทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ 152

รูป 4.37 ฉาบผิวด้วยทอง (Sputter) รุ่น SPI-MODULE™ Sputter Coater 153

รูป 4.38 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 153

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.39 เครื่องทดสอบสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ 154

อตฺตานํ ทมยนฺติ ปณฺฑิตา
CHIANG MAI UNIVERSITY 1964
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายการอักษรย่อและสัญลักษณ์

C_2H_2	Acetylene gas
CH_4	Methane gas
C_2H_5OH	Ethanol gas
H_2S	Hydrogen Sulfide
NO_2	Nitrogen dioxide
d_{BET}	particle diameter calculated from BET theory
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectrometry
FSP	Flame Spray Pyrolysis
HR-TEM	High Resolution-Transmission Electron Microscopy
JCPDS	Joint Committee for Powder Diffraction Standards
S	Sensitivity, Sensor response
SEM	Scanning Electron Microscopy
SnO_2	Tin dioxide, tin oxide
TEM	Transmission Electron Microscopy
t_{res}	Response time
t_{ec}	Recovery time
XRD	X-ray Diffraction
XPS	X-ray Photo Spectrometry

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved