ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248005

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของซิงก์ออกไซด์วิสเกอร์ สำหรับเอพาแอคเซนเซอร์

เกียรติภูมิ กองอาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

b00252161

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248005

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของซิงก์ออกไซด์วิสเกอร์สำหรับเอทานอลเซนเซอร์

เกียรติภูมิ กองจาย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของซิงก์ออกไซด์วิสเกอร์สำหรับเอทานอลเซนเซอร์

เกียรติภูมิ กองจาย

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ดร. นิยม โฮ่งสิทธิ์

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงมณี ว่องรัตนะไพศาล

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาพ ชูพันธ์

.....กรรมการ
ดร. อัจฉราวรรณ กาศเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
ดร. อัจฉราวรรณ กาศเจริญ

3 ตุลาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การสนับสนุน ส่งเสริมในทุกๆ ด้านแก่ผู้เขียนอย่างเต็มที่เต็มกำลังความสามารถมาโดยตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบนมัสการขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งในเมตตาธรรมแห่งพ่อแม่ครูบาอาจารย์ หลวงพ่อปาน สุเมโธ แห่งวัดสวนดอก จังหวัดเชียงใหม่ ที่ได้เมตตา กรุณาให้ความช่วยเหลือทั้งทางโลกและทางธรรมมาโดยตลอดจนสำเร็จจบการศึกษานี้ได้ รวมถึงพ่อแม่ครูบาอาจารย์ทุกรูปนาม ท่านผู้มีพระคุณทั้งหลายที่คอยเมตตาประคับประคองและชี้นำทางปัญญาให้น้อมมาใช้ในการดำเนินชีวิตให้เป็นปกติ สมดุล จนชีวิตประสบความสำเร็จไปอีกก้าวหนึ่ง

อานิสงส์แห่งกุศลผลบุญใดของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จักเกิดมีขึ้น ขออำนาจพลานิสงส์ทั้งหลายเหล่านั้นจงบังเกิดแก่ ท่านผู้มีพระคุณทั้งหลาย เจ้ากรรมนายเวรทั้งหลาย บุพการีชนทั้งหลาย พ่อแม่ครูบาอาจารย์ทั้งหลาย ตลอดจนฝูงสรรพสัตว์น้อยใหญ่ทุกรูปนาม นั้นเทอญ

สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและกราบขออภัยอย่างยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้ และผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่มากก็น้อย

เกียรติภูมิ กองจาย

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของ
ซิงก์ออกไซด์วิสเกอร์สำหรับเอทานอลเซนเซอร์

ผู้เขียน นายเกียรติภูมิ กองจาย

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.อัจฉราวรรณ กาศเจริญ

บทคัดย่อ

248005

ซิงก์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ประโยชน์กัน ซึ่งได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ก๊าซเซนเซอร์ชนิดฟิล์มบาง และทรานซิสเตอร์สนาม เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอเทคนิควิธีต่างๆ ในการสังเคราะห์รูปแบบต่างๆ ของโครงสร้างซิงก์ออกไซด์ แต่การศึกษาวิจัยในวัสดุกลุ่มนี้ยังคงเปิดกว้างอยู่

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์โครงสร้างซิงก์ออกไซด์วิสเกอร์ (*W*-ZnO และ *T*-ZnO) ภายในท่อควอตซ์โดยใช้วิธีการเกิดปฏิกิริยาเทอร์มอลออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศปกติ โดยการเผาผงซิงก์ภายในท่อควอตซ์ในเตาที่อุณหภูมิ 700^{O}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ขึ้น 3 ชนิด ชนิดที่ 1 จะมีลักษณะเป็นวิสเกอร์ใสๆ เกิดขึ้นที่ก้นของท่อควอตซ์ ส่วนที่ 2 ถัดมามีลักษณะเป็นก้อนสีขาวๆ และส่วนที่เหลือจะมีลักษณะคล้ายปุยนิ่มสีขาว ผลการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน และการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยวิสเกอร์(*W*-ZnO) และเตตระพอดวิสเกอร์ (*T*-ZnO) ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของ *W*-ZnO อยู่ในช่วง 10-240 ไมโครเมตร และ 0.20 - 4.60 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตผลที่ได้สูงที่สุดประมาณ 20% โดยน้ำหนัก สำหรับความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของ *T*-ZnO อยู่ในช่วง 3.6-11.7 ไมโครเมตร และ 0.1- 2.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตผลที่ได้สูงที่สุดประมาณ 68% โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองที่ได้พบว่ารูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นขึ้นอยู่

248005

กับอัตราการอิ่มตัวของซิงก์ออกไซด์ในสถานะก๊าซที่บริเวณต่างๆ ในท่อควอตซ์ ซึ่งอัตราการอิ่มตัวที่ต่ำๆ จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบ *W*-ZnO ในทางตรงกันข้ามอัตราการอิ่มตัวที่สูงๆ จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบ *T*-ZnO

เอทานอลเอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก *W*-ZnO และ *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1% โมล (0.25% น้ำหนัก) และทดสอบการตรวจจับไอเอทานอล พบว่า เอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจากซิงก์ออกไซด์เตตระพอดเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ มีค่าความไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบเอทานอลเซนเซอร์ที่ไม่ได้เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำทุกค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ทดสอบ ด้วยอุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดอยู่ที่ 340°C การตอบสนองต่อไอเอทานอลที่สูงนี้อธิบายได้ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนในอากาศ (n_0) และค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_{Eth}) ระหว่างชนิดของออกซิเจนที่ถูกยึดจับกับไอเอทานอลที่บริเวณผิวของเอทานอลเซนเซอร์ โดยอนุภาคนาโนของทองคำซึ่งปกติเป็นตัวกระตุ้นหรือเร่งปฏิกิริยาที่ดี แต่เนื่องจากการที่อนุภาคนาโนของทองคำไปเกาะบนเซนเซอร์ทำให้พื้นที่ที่จะทำปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้แล้วความต้านทานของเซนเซอร์ในอากาศนั้นมีค่าที่ต่ำมากๆ ด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก *W*-ZnO เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1% โมล สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเอทานอลเซนเซอร์ได้

Thesis Title	Preparation and Characterization of Zinc Oxide Whiskers for Ethanol Sensors
Author	Mr. Kiattipoom Kongjai
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Thesis Advisor	Dr. Atchrawon Gardchareon

ABSTRACT

Zinc oxide (ZnO) is a versatile semiconductor material, which has attracted attention for usage in optoelectronic devices, like solar cells, thin-film gas sensors, field-effect transistors, etc. Despite significant research efforts, methods or techniques to synthesize various morphologies of ZnO structures, still open for challenge.

In this work, zinc oxide whiskers (*W*-ZnO and *T*-ZnO) were synthesized in quartz tube by using thermal oxidation technique. It starts with Zn powders were heated in a horizontal quartz tube with a furnace at a temperature of 700 ^{o}C for 2 hr, under normal atmosphere. Three different kinds of the products can be obtained after the oxidation process. One is transparent whiskers located at the bottom of the quartz tube. Next is cotton-like bulk and the other is white, fluffy product. The products were characterized by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and x-ray diffraction (XRD). It was found that the products composed of *W*-ZnO and *T*-ZnO. The lengths and the diameter of whiskers were in the range of 10-240 μm and 0.20 - 4.60 mm, respectively while the percent of yield was up to 20% by weight. The lengths and the diameter of tetrapod whiskers were in the range of 3.6-11.7 μm and 0.1- 2.6 μm while the percent of yield was up to 68% by weight. This result suggested that the shape of products depend on the supersaturation ratio of ZnO vapor's zone in the quartz tube.

248005

248005

Smaller supersaturation ratio promotes the growth of *W*-ZnO. In contrast, larger supersaturation ratio promotes the growth of *T*-ZnO.

The ethanol sensors, based on the *W*-ZnO and the *W*-ZnO doped with gold nanoparticles of 0.1 %mol (0.25%wt), were fabricated and investigated for the ethanol sensing properties. The results showed that the sensitivity of *W*-ZnO doped with gold sensors dropped little than that of the pure *W*-ZnO sensors for entire ethanol concentration with optimum temperature of 340°C. This enhancement can be explained in terms of the electron concentration of sensor in air, n_0 and the reaction rate constant, k_{Eth} between the adsorbed oxygen species and the ethanol vapor. With an excellent catalytic ability, the Au doping should result in the higher reaction rate constant in contrast, it decreases the effective surface for adsorption of ethanol on the surface moreover, their extremely low resistivity in air. However, the *W*-ZnO doped with gold nanoparticles of 0.1% mol, has a potential application as an ethanol sensor.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
สารบาญตาราง	ฐ
สารบาญภาพ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 ความเป็นมาของการสังเคราะห์ ZnO whiskers	3
1.3 ความเป็นมาของหัวตรวจจับก๊าซ	8
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	11
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	11
บทที่ 2 ทฤษฎี	12
2.1 สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)	12
2.2 สมบัติของสารซิงก์ออกไซด์ (ZnO properties)	13
2.3 จลนศาสตร์การโตของ ZnO whiskers (Growth mechanism of ZnO whiskers)	15
2.4 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)	18
2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)	20
2.6 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectroscope, EDS)	22
2.7 สมบัติบางประการของทองคำ (Au properties)	24

2.8 สมบัติการตอบสนองไอเอทานอลของสารซิงก์ออกไซด์ 26
2.8.1 สภาพไว (Sensitivity, S) 29
2.8.2 เวลาการตอบสนอง (Response time, τ_{90}^{-}) 31
2.8.3 เวลาการคืนตัว (Recovery time, τ_{90}^{+}) 31
2.8.4 ปริมาณการตอบสนองของเซนเซอร์ก๊าซ (Response %) 32
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 33
3.1 กระบวนการสังเคราะห์โครงสร้าง *W*-ZnO 33
3.2 กระบวนการออกซิเดชันของ *W*-ZnO 35
3.3 กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ของโครงสร้าง *W*-ZnO ที่สังเคราะห์ได้ 37
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้าง ทางกายภาพด้วยกล้อง Stereo microscope 37
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์โครง สร้างทางกายภาพด้วย SEM 37
3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วย EDS 39
3.3.4 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างเชิงผลึกด้วย XRD 39
3.4 กระบวนการเตรียมเอทานอลเซนเซอร์ที่เตรียมจาก *W*-ZnO 40
3.4.1 การเตรียมเอทานอลเซนเซอร์ 40
3.4.2 การประกอบเอทานอลเซนเซอร์ 41
3.5 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติในการตรวจจับไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ ที่เตรียมได้ 43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 48
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้อง Stereo Microscope 48
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้อง SEM 49
4.2.1 การศึกษาผลของเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียม ZnO whiskers โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศ 51

4.2.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของ ZnO whiskers ที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศ 53
4.2.3 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเอทานอลเซนเซอร์ ที่ประยุกต์มาจาก *W*-ZnO เมื่อเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 54
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง EDS 55
4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกด้วย XRD 58
4.5 ผลการศึกษาสมบัติการตรวจจับก๊าซของเซนเซอร์เอทานอล ที่ใช้ *W*-ZnO เป็นฐาน 61
4.5.1 ผลการทดสอบไอเอทานอลของเซนเซอร์เอทานอลที่ใช้ *W*-ZnO เป็นฐาน 61
4.5.2 ผลการทดสอบไอเอทานอลของเซนเซอร์เอทานอลที่ใช้ *W*-ZnO เจือด้วยอนุภาค นาโนของทองคำเป็นฐาน 63
4.5.3 ผลการทดสอบไอเอทานอลที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ กัน 66
บทที่ 5 สรุป วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 77
5.1 สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง 77
5.1.1 ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง ZnO whiskers 77
5.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้าง ZnO whiskers 79
5.1.3 โครงสร้างทางผลึกของโครงสร้าง ZnO whiskers 79
5.1.4 สมบัติการตรวจจับไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ 80
5.2 ข้อเสนอแนะ และงานที่สามารถทำต่อไป 82
5.2.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง 82
5.2.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลองที่สามารถทำต่อไปได้ 83
บรรณานุกรม 85
ภาคผนวก 89
ภาคผนวก ก 90
เทคนิคการเตรียมสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ 90
ภาคผนวก ข 92
ผลการทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอล 92

ภาคผนวก ค 98
การตรวจสอบโครงสร้างทางผลึกด้วย XRD เทียบกับฐานข้อมูล JCPDS 98
ภาคผนวก ง 101
ผลงานทางวิชาการ 101
ประวัติผู้เขียน 115

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ลักษณะโครงสร้างของ ZnO whiskers จากการทดลองของ Egashira และคณะ	8
2.1 สมบัติกายภาพบางประการของสารซิงก์ออกไซด์	14
2.2 สมบัติกายภาพบางประการของทองคำ	24
4.1 ขนาดความยาวขาและเส้นผ่านศูนย์กลางของ ZnO whiskers บริเวณต่าง ๆ เผาที่อุณหภูมิ 700°C	51
4.2 ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตผลที่ได้จากเงื่อนไขต่างๆ	52
4.3 น้ำหนักของสารที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์เอทานอล	55
4.4 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้าง ZnO whiskers และโครงสร้าง ZnO whiskers ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ	57
4.5 ค่า lattice parameter จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของ *W*-ZnO	59
4.6 ค่า lattice parameter จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของ *T*-ZnO	59
4.7 ค่า lattice parameter จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของ Au/*W*-ZnO	60
4.8 สภาพไว เวลาในการตอบสนอง และเวลาในการคืนตัวกลับที่ไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้ *W*-ZnO เป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ	62
4.9 ค่าความไว เวลาในการตอบสนอง และเวลาในการคืนตัวกลับที่ไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้ *W*-ZnO เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ	64
4.10 ปริมาณการตอบสนองของเอทานอลเซนเซอร์ต่ออุณหภูมิทดสอบต่างๆ ที่ความเข้มข้นไอเอทานอล 1000 ppm	73
4.11 ปริมาณการตอบสนองของเอทานอลเซนเซอร์ต่อความเข้มข้นไอเอทานอลต่างๆ ที่อุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข	73
4.12 ค่า b ของเอทานอลเซนเซอร์ตามเงื่อนไขต่างๆ	75

5.1 การสังเคราะห์โครงสร้าง *W*-ZnO ของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับรายงานผลการทดลองของคณะนักวิจัยอื่น 78

5.2 ทดสอบไอเอทานอลที่อุณหภูมิทดสอบและค่าสภาพไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลของงานวิจัยนี้กับรายงานวิจัยอื่น 81

ข-1 ผลการทดสอบไอเอทานอลที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ ของเอทานอลเซนเซอร์ที่สร้างจาก *W*-ZnO 92

ข-2 ผลการทดสอบไอเอทานอลที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ ของเอทานอลเซนเซอร์ที่สร้างจาก *W*-ZnO เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol 95

ค-1 ผลการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{hkl}) ของ *T*-ZnO กับฐานข้อมูล JCPDS no. 89-0510 98

ค-2 ผลการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{hkl}) ของ *W*-ZnO กับฐานข้อมูล JCPDS no. 89-0510 99

ค-3 ผลการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{hkl}) ของ *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol กับฐานข้อมูล JCPDS no. 89-0510 99

สารบาญภาพ

รูป	หน้า
1.1 โครงสร้างในระดับไมโครเมตรและระดับนาโนเมตร (a) thin films (b) nanobelts (c) nanowires (d) nanoneedles (e) nanotubes (f) nanorods (g) nanocombs และ (h) nanonails	2
1.2 โครงสร้างของ *T*-ZnO ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองของ Zhou และคณะ	4
1.3 โครงสร้างของ *W*-ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปัตเตอริง จากการทดลองของ Chang และคณะ	4
1.4 โครงสร้างของ *W*-ZnO จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี Catalyst- free thermal evaporation ที่ได้จากการทดลองของ Wang และคณะ	5
1.5 โครงสร้างของ *W*-ZnO จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี catalyst as sisted flux method ที่ได้จากการทดลองของ Kong และ Li	5
1.6 โครงสร้างของ *W*-ZnO ที่อุณหภูมิของแผ่นรองรับเท่ากับ 550°C (a) ด้านข้าง (b) ด้านบน ที่ได้จากการทดลองของ Yuan และ Zhang	6
1.7 โครงสร้างของ *W*-ZnO ที่อุณหภูมิของแผ่นรองรับเท่ากับ 600°C (a) ด้านข้าง (b) ด้านบน ที่ได้จากการทดลองของ Yuan และ Zhang	6
1.8 โครงสร้างของ *W*-ZnO โดยวิธีการระเหยทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 145°C ที่ได้จากการทดลองของ Hou และคณะ (a) A large quantity of group whiskers. (b) A group whiskers.(c) One single pencil-like whisker.	7
1.9 โครงสร้างของ ZnO whiskers ที่เกิดขึ้นในบริเวณต่าง ๆของเตา ที่ได้จากการทดลองของ Lyapina และคณะ	7
1.10 การทดสอบสมบัติเซนเซอร์ Li^{+}-doped (ribbon) whiskers (สีขาว = doped ; สีดำ= undoped) จากการทดลองของ Egashira และคณะ	9
1.11 โครงสร้างลักษณะทางกายภาพของ *W*-ZnO ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลอง ของ Xu และคณะ	9
1.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพไวและความเข้มข้นของไอแอลกอฮอล์ จากการทดลองของ Li และคณะ	10

1.13 โครงสร้าง *W*-ZnO โดยใช้กล้อง Optical micrograph เมื่อเผาที่ (a) 600°C (b) 700°C และ(c) 800°C นาน 2 ชั่วโมง ที่ได้จากการทดลองของภาณุพัฒน์ ชัยวร 10

1.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพไวและความเข้มข้นของไอเอทานอล ของหัววัด A, B และ C ที่ได้จากการทดลองของภาณุพัฒน์ ชัยวร 11

2.1 โครงสร้างสารซิงก์ออกไซด์ 13

2.2 (a) unit cell ของโครงสร้าง ZnO (b) tetrahedral construction ของ Zn atom (c) grain edges และ grain boundaries ของ tetrapod nucleation (d) ขาทั้งสี่ของ *T*-ZnO ลักษณะเป็น wedge-shape แยกออกจาก grain boundary ทั้งสี่ (e) stereographic projection ทิศทาง 0001 โครงสร้างเฮกซะโกนอล (f) ระนาบสามเหลี่ยมด้านข้าง (g) edges ของ tetrapod nucleation (h) projection จากรูป (g) 16

2.3 ภาพ TEM ของ *T*-ZnO (a) Y shape (b) X shape (c) and (d) H shape 18

2.4 องค์ประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 19

2.5 โพรบอิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวแกนนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่าง 19

2.6 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกที่ขนานกันและระยะห่างของระนาบเท่ากับ d 21

2.7 การวัดมุมจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ 22

2.8 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน 23

2.9 การเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมส่งผลให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 23

2.10 โครงสร้างทองคำ 24

2.11 อนุภาคนาโนทองคำที่เกาะตามผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ 25

2.12 อนุภาคนาโนทองคำที่เกาะตามผิวของซิงก์ออกไซด์ 26

2.13 กำแพงศักย์บริเวณ grain boundary และพื้นผิวเมื่อเกิดการยึดติดของออกซิเจน และหลังจากที่ก๊าซเข้ามาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออนแล้ว 28

2.14 ความไวในการตอบสนอง และการคืนตัวของเอทานอลเซนเซอร์ 29

3.1 เครื่องชั่งสาร CESCO 0101-31 ผลิตโดยบริษัท A&D ประเทศญี่ปุ่น 33

3.2 ผงซิงก์ที่ใช้ในการทดลอง 34

3.3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดสาร 34

3.4 แสดงท่อควอตซ์ที่ใช้ในการเผาสาร 34

3.5 เตาเผาและ controller ควบคุมอุณหภูมิ ณ ห้องวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 35

3.6 แผนผังการศึกษาปริมาณผงซิงก์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์โครงสร้าง *W*-ZnO เพื่อใช้ในการเตรียมเอทานอลเซนเซอร์ 36
3.7 แสดงกล้อง Stereo microscope รุ่น C-01 ของบริษัท OLYMPUS 37
3.8 การติดตัวอย่างลงบน stub เพื่อเตรียมนำไปวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วย SEM 38
3.9 กล้อง SEM ณ ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 38
3.10 กล้องจุลทรรศน์ SEM และอุปกรณ์ EDS ณ ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอน (EMRSc) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 39
3.11 x-ray diffractometer, XRD 40
3.12 (a) gold paste ที่ใช้ในการทำขั้วอิเลกโทรดและติด contact
(b) ลักษณะเอทานอลเซนเซอร์ที่เตรียมได้จาก *W*-ZnO 40
3.13 ลักษณะ (a) ด้านบน (b) ด้านข้างของเอทานอลเซนเซอร์ที่เตรียมได้จาก *W*-ZnO เมื่อติดขั้วอิเล็กโทรด 41
3.14 องค์ประกอบของเอทานอลเซนเซอร์ที่พร้อมสำหรับการทดสอบ 41
3.15 แผนผังขั้นตอนการเตรียมเอทานอลเซนเซอร์เพื่อใช้ทดสอบการตรวจจับไอเอทานอล 42
3.16 ชุดทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ ณ ห้องวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 43
3.17 ลักษณะของ chamber ที่ใช้ในการทดสอบการตรวจจับไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ 44
3.18 แผนผังวงจรการทำงานของชุดทดสอบสมบัติการตรวจจับไอเอทานอล 44
3.19 เครื่อง alcohol simulator 45
3.20 เครื่องปั๊มอากาศที่ใช้สำหรับตู้เลี้ยงปลาทั่วไป เพื่อผ่านก๊าซไปยัง chamber ในการทดลอง และเกจ (gauge) ควบคุมระดับการไหลของก๊าซ 46
3.21 การวัดอุณหภูมิของเอทานอลเซนเซอร์โดยใช้ thermocouple แบบ digital 46
3.22 แผนผังการศึกษาสมบัติการตรวจจับไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ *W*-ZnO และ *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol (0.25%wt) 47
4.1 แผนผังของ ZnO whiskers ที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของท่อควอตซ์ 48
4.2 แสดง ZnO whiskers ที่เกิดขึ้นบริเวณ (a) ส่วนที่ 1, (b) ส่วนที่ 2 และ(c) ส่วนที่ 3 49

4.3 ลักษณะของนาโน ZnO whiskers ที่ได้บริเวณส่วนต่าง ๆ ของสารที่เผาได้ตาม เงื่อนไขที่อุณหภูมิ 700°C (a) ส่วนที่ 1 (b) ส่วนที่ 2 (c) ส่วนที่ 3 ชั้นนอก (d) ส่วนที่ 3 ชั้นใน 50

4.4 ผลกระทบของปริมาณผงซิงก์ต่อปริมาณร้อยละของ ZnO whiskers ที่เกิดขึ้น 52

4.5 แสดงลักษณะของ *W*-ZnO ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณผงซิงก์ที่น้ำหนักต่างๆ (a) ผงซิงก์ 3.5 กรัม (b) ผงซิงก์ 5.0 กรัม 53

4.6 ตำแหน่งและสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ของโครงสร้าง *W*-ZnO ที่สังเคราะห์ได้ 56

4.7 ตำแหน่งและสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ของโครงสร้าง *W*-ZnO ที่สังเคราะห์ได้ 56

4.8 ตำแหน่งและสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ของโครงสร้าง *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 57

4.9 *T*-ZnO เทียบกับ ZnO no. 89-0510 JCPDS 58

4.10 การตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ ที่ใช้ *W*-ZnO เป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ 61

4.11 ค่าสภาพไวต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ ที่ใช้ *W*-ZnO เป็นฐาน 63

4.12 การตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ ที่ใช้ *W*-ZnO เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ 64

4.13 ค่าสภาพไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้ *W*-ZnO เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเป็นฐาน 65

4.14 ค่าสภาพไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ ที่ใช้ *W*-ZnO เป็นฐานที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ 66

4.15 ค่าสภาพไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ ที่ใช้ *W*-ZnO เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol เป็นฐาน ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่าง 67

4.16 การตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของเอทานอลเซนเซอร์ (a) ที่ใช้ *W*-ZnO เป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบ 340°C (b) ที่ใช้ *W*-ZnO เจือด้วย อนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol เป็นฐาน ที่อุณหภูมิทดสอบ 340°C 68

4.17 (a) การตอบสนองต่อไอเอทานอลสูงสุดที่ความเข้มข้น 1000 ppm 69
(b) เปรียบเทียบค่าความไวของเอทานอลเซนเซอร์ความเข้มข้นไอเอทานอล 1000 ppm
4.18 เวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวกลับของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้ 71
(a) *W*-ZnO เป็นฐานที่ 340°C (b) *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol เป็นฐาน ที่ 340°C
4.19 สมบัติการตรวจจับไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของอุณหภูมิทดสอบ 72
ที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข
4.20 ค่า b ของเอทานอลเซนเซอร์ที่สร้างจาก (a) *W*-ZnO เป็นฐาน และ 74
(b) เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol
4.21 ค่า b ของเอทานอลเซนเซอร์ที่สร้างจาก *W*-ZnO เป็นฐาน และเจือด้วย 75
อนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol ที่อุณหภูมิที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข
4.22 ค่าความต้านทานของเอทานอลเซนเซอร์ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ 76