

การศึกษาผลของการเจือทองคำขาวลงบนชั้น
ซิงค์ออกไซด์ของตัวตรวจวัดก๊าซ

STUDY OF EFFECT OF DOPING PLATINUM ON ZINC OXIDE GAS SENSOR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF EFFECT OF DOPING PLATINUM ON
ZINC OXIDE GAS SENSOR



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาผลของการเจือทองคำขาวลงบนชั้นซิงค์ออกไซด์ของ
ตัวตรวจวัดก๊าซ

Special Project Title STUDY OF EFFECT OF DOPING PLATINUM ON ZINC OXIDE
GAS SENSOR

นักศึกษา นาย ธนโชติ ศักดิ์อากาศ
รหัสประจำตัว 55110021
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2558
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อติเรก แรงกสิกรณ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร. กรกช อ่อนละอ	
ดร. อติเรก แรงกสิกรณ์	
ดร. กิตติพงศ์ อานวยสวัสดิ์	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ศธ ชุตติไพจิตร
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชุตติไพจิตร)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่..... เดือน..... พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาผลของการเจือทองคำขาวลงบนชั้นซิงค์ออกไซด์ของตัวตรวจวัดก๊าซ
นักศึกษา	นาย ธนโชติ ศักดิ์อำภา
รหัสประจำตัว	55110021
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อติเรก แรงกลีกรรม

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษชิ้นนี้ได้ศึกษาผลของการเจือทองคำขาวลงบนชั้นซิงค์ออกไซด์ของตัวตรวจวัดก๊าซ จากสารละลายแพลทินัมคลอไรด์ และ ทำการหาความแตกต่างของพื้นผิวจากการนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือตรวจวัดที่สร้างขึ้นเองจากระบบสุญญากาศด้วยการวัดค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีก๊าซไฮโดรเจนในระบบเทียบกับตอนที่ไม่มีก๊าซในระบบ ในอุณหภูมิต่างๆคือ 140, 160, 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส โดยผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมพบว่าตัวตรวจวัดแบบที่เจือด้วยทองคำขาวมีพื้นผิวที่ขรุขระเฉลี่ยมากกว่าคือ 8.6 โดยที่แบบที่ไม่เจืออยู่ที่ 8.3 และผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าพบว่าได้ค่าการตอบสนองที่เพิ่มขึ้นในทุกอุณหภูมิ โดยเพิ่มได้มากที่สุดที่อุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส คือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 29 และ แบบที่เจือด้วยทองคำขาวใช้ระยะเวลาการฟื้นตัว (recovery time) เร็วกว่าแบบที่ไม่เจือด้วยเช่นกัน โดยลดลงมากที่สุด 32 วินาทีที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

Special Project Title	Study of Effect of Doping Platinum on Zinc oxide Gas Sensor
Student	Mr. Tanachote Sakdiarpa
Student ID	55110021
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Dr. Adirek Rangkasikorn

Abstract

In special project, enhancing the efficiency of gas sensor made from thin film zinc oxide by using platinum from platinum chloride solution. The physical properties were characterized by atomic force microscopy (AFM). The electrical properties were characterized by analyzer in the vacuum chamber that using measurement from the difference of resistance of the gas sensor when sense hydrogen gas at temperature of 140, 160, 180, 200 and 240 degree Celsius. The sensor's roughness is 8.6 and the platinum doped sensor's average roughness is 8.3 by using atomic force microscopy. In the electrical characterization the response magnitude increase at all temperature. The response magnitude greatest increase is 29 percent at 160 degree Celsius. The recovery time was decrease. The recovery time greatest decrease is 32 seconds at 160 degree Celsius also.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษครั้งนี้ดำเนินการสำเร็จไปได้ด้วยดีจากความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อติเรก แรงกสิกรณ ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆรวมทั้งช่วยเหลือในการปฏิบัติตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษและรายงานชิ้นนี้ขึ้นมาด้วย ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ และ อาจารย์ ดร.กรกช อ่อนละอ ผู้เป็นกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษครั้งนี้ที่คอยช่วยให้คำปรึกษาในการแก้ไขส่วนต่างๆของโครงการชิ้นนี้ด้วย ขอขอบพระคุณอาจารย์และบุคลากรทุกท่านในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่คอยให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ และเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำโครงการพิเศษชิ้นนี้ให้เป็นไปได้อย่างราบรื่น และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษชิ้นนี้จะมีประโยชน์ต่อตัวข้าพเจ้าเอง ณ ปัจจุบันหรือในอนาคต และหวังให้โครงการพิเศษของข้าพเจ้านี้สามารถให้ผู้อื่นได้มาเรียนรู้เพื่อนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในการพัฒนาหรือประยุกต์ให้เพื่อให้เป็นประโยชน์ต่อส่วนรวมต่อไปในอนาคต

ธนโชติ ศักดิ์อำภา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและแผนการดำเนินงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ก๊าซและสมบัติต่างๆของก๊าซ.....	5
2.1.1 ก๊าซที่มีความสำคัญต่อมนุษย์.....	5
2.1.1.1 ออกซิเจน.....	5
2.1.1.2 ก๊าซตระกูลคาร์บอน.....	5
2.1.1.3 มีเทน.....	6
2.1.1.4 เบนซีน.....	6
2.1.1.5 เมทานอล.....	6
2.1.1.6 ไฮโดรเจน.....	7
2.2 สารประกอบซิงค์ออกไซด์.....	7
2.2.1 สมบัติของสารซิงค์ออกไซด์.....	7
2.2.2 ผลึกเชิงเดี่ยวและการปลูกผลึกเชิงเดี่ยว.....	10
2.2.2.1 การปลูกผลึกจากสารละลาย.....	10
2.2.2.2 การปลูกผลึกจากไอ.....	10
2.2.2.2 การปลูกผลึกจากสารหลอมเหลว.....	10
2.2.3 การเกิดวิสเกอร์ของสารซิงค์ออกไซด์.....	11
2.2.3.1 Vapor-solid phase mechanism.....	11
2.2.3.2 Vapor-liquid-solid phase mechanism.....	11
2.2.4 เทคนิคการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวของสารซิงค์ออกไซด์.....	12

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2.4.1 เทคนิค Pulsed Laser Deposition.....	12
2.2.4.2 เทคนิค Thermal evaporation.....	12
2.2.4.3 เทคนิค Metal Organic Chemical Vapor Deposition.....	13
2.2.4.4 เทคนิคการสปัตเตอร์จริง.....	14
2.2.4.5 เทคนิคการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการพาดเคลือบ.....	14
2.3 ตัวตรวจวัดก๊าซชนิดต่างๆ.....	15
2.3.1 ตัวตรวจวัดก๊าซที่ใช้คลื่นแสงอินฟราเรด.....	15
2.3.2 ตัวตรวจวัดก๊าซสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์.....	16
2.3.2.1 ปริมาณการตอบสนองของตัวตรวจวัดก๊าซ.....	17
2.3.2.2 เวลาการตอบสนอง.....	17
2.3.2.3 เวลาการคืนตัว.....	17
2.4 การปลูกชั้นซิลิกอนบนแผ่นซิลิกอน.....	18
2.4.1 การใช้อุณหภูมิทำให้เกิดการออกซิเดชัน.....	18
2.4.1.1 กระบวนการแบบแห้ง.....	18
2.4.1.1 กระบวนการแบบเปียก.....	18
2.4.2 การใช้ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการออกซิเดชัน.....	18
2.5 การเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเจือโลหะชั้นสูง.....	19
2.6 อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	19
2.6.2 เครื่องมือตรวจสอบค่าความต้านทาน.....	20
2.7 ทบทวนวรรณกรรม.....	22
2.7.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดก๊าซมีเทนด้วยโลหะพลาตาเดียม.....	22
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	25
3.1 การสร้างตัวตรวจวัดและการตรวจสอบสมบัติต่างๆของตัวตรวจวัด.....	25
3.1.1 การเตรียมแผ่นซิลิกอน.....	26
3.1.2 การปลูกชั้นซิลิกา.....	26
3.1.3 การปลูกชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	27
3.1.4 การเจือโลหะทองคำขาวลงบนชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	28
3.2 การสร้างเครื่องมือตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดก๊าซ.....	28

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การตรวจวัดสมบัติต่างๆของตัวตรวจวัดก๊าซ.....	33
3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ.....	33
3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	35
4.1 ผลการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ.....	35
4.2 ผลการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า.....	36
4.3 อภิปรายผลการทดลอง.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	47
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	49
ประวัติผู้เขียน.....	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินการวิจัย.....	3
2.1 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของก๊าซในอากาศ.....	4
2.2 แสดงสมบัติบางประการของสารซิงค์ออกไซด์.....	9
2.3 ตารางแสดงค่าต่างๆ ของตัวตรวจวัดก๊าซมีเทน.....	23
2.4 ตารางแสดงค่าต่างๆ ของตัวตรวจวัดก๊าซมีเทนที่เจือขึ้นซิงค์ออกไซด์ด้วยพลาสมาเดี่ยว.....	24
4.1 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส.....	37
4.2 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส.....	37
4.3 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	38
4.4 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	38
4.5 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส.....	39
4.6 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวเมื่อเจือที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส.....	40
4.7 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวเมื่อเจือที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส.....	40
4.8 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวเมื่อเจือที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส.....	41
4.9 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวเมื่อเจือที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	41
4.10 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวเมื่อเจือที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส.....	42
4.11 เปรียบเทียบค่าการตอบสนองของตัวตรวจวัด ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	43
4.12 เปรียบเทียบระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัด ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	45

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างสารซิงค์ออกไซด์.....	8
2.2 แสดงแบบจำลองเทคนิค PLD.....	12
2.3 แสดงแบบจำลองเทคนิค thermal evaporation.....	13
2.4 แสดงแบบจำลองเทคนิค MOCVD.....	13
2.5 แสดงแบบจำลองเทคนิคการสเป็คเตอริง.....	14
2.6 แสดงพลังงานที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา.....	19
2.7 แสดงหลักการทำงานของเครื่องAFM.....	20
2.8 แสดงระบบการตรวจสอบความต้านทาน.....	20
2.9 แสดงระบบวงจรการควบคุมอุณหภูมิ.....	22
3.1 แสดงแผนผังการดำเนินการทดลอง.....	25
3.2 แสดงส่วนประกอบของตัวตรวจวัดแบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว.....	26
3.3 แสดงการจัดระบบในวิธีการ anodic oxidation.....	27
3.4 แสดงการต่อระบบตรวจสอบทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดก๊าซ.....	39
3.5 แสดงภาพระบบด้านข้างระบบตรวจสอบทางไฟฟ้า.....	30
3.6 แสดงภาพระบบด้านบนระบบตรวจสอบทางไฟฟ้า.....	30
3.7 เครื่องดูดอากาศ.....	31
3.8 เกจวัดความดัน.....	31
3.9 PID controller.....	32
3.10 SSR.....	32
3.11 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม(AFM).....	33
4.1 แสดงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์แบบปกติ.....	35
4.2 แสดงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์แบบที่เจือด้วยทองคำขาว.....	36
4.3 กราฟแสดงค่าความต้านทานเฉลี่ยของตัวตรวจวัดก๊าซซิงค์ออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไป.....	39
4.4 กราฟแสดงค่าความต้านทานเฉลี่ยของตัวตรวจวัดก๊าซซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำขาวที่เปลี่ยนแปลงไป.....	42
4.5 กราฟแสดงค่าการตอบสนองของตัวตรวจวัดแบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว.....	45
4.6 กราฟแสดงระยะเวลาฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซแบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว.....	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในการวัดปริมาณทางกายภาพต่างๆ เช่น แสง เสียง อุณหภูมิ การสัมผัส ความเข้มข้นของสาร ฯลฯ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือตรวจวัดเฉพาะทางของการตรวจวัดนั้นยกตัวอย่าง เช่น การวัดอุณหภูมิที่ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ (thermometer) ในการวัด การวัดความดังของเสียงโดยใช้เครื่องตรวจวัดเสียง (sound level meter) ในการวัด หรือการวัดความเข้มข้นของก๊าซต่างๆที่ใช้ตัวตรวจวัดก๊าซ (gas sensor) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์

ธาตุไฮโดรเจน (hydrogen) เป็นธาตุที่มีอยู่มากที่สุดเป็นอันดับแรกในเอกภพโดยมีปริมาณมากถึงร้อยละ 75 ของธาตุทั้งหมดในเอกภพ [1] ซึ่งส่วนมากอยู่ในภาพของโมเลกุลก๊าซไฮโดรเจน (hydrogen gas; H_2) หรือ สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ เช่น ก๊าซมีเทน (methane; CH_4), เมทานอล (methanol; CH_3OH), กรดน้ำส้ม (acetic acid; CH_3COOH) เป็นต้น

การตรวจวัดธาตุไฮโดรเจนที่อยู่ในภาพของโมเลกุลก๊าซไฮโดรเจนหรือสารประกอบต่างๆ ในปัจจุบัน สามารถทำได้หลากหลายวิธีโดยที่งานวิจัยนี้สนใจในส่วนของ การใช้ตัวตรวจวัดก๊าซ (gas sensor) ซึ่งตัวตรวจวัดก๊าซมีหลากหลายรูปแบบ เช่น ตัวตรวจวัดก๊าซที่ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical gas sensor), ตัวตรวจวัดก๊าซที่ใช้คลื่นความถี่สูง (ultrasonic gas sensor), ตัวตรวจวัดก๊าซที่ใช้คลื่นแสงอินฟราเรด (infrared gas sensor) หรือ ตัวตรวจวัดก๊าซที่ใช้สารกึ่งตัวนำ (semiconductor gas sensor) เป็นต้น โดยที่งานวิจัยนี้สนใจศึกษาตัวตรวจวัดก๊าซประเภทสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากสารประกอบซิงค์ออกไซด์ เพราะสามารถผลิตเองได้โดยใช้ต้นทุนค่อนข้างถูก และใช้กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน

ตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำนั้นได้รับความสนใจและศึกษาเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้ มีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยการทำงานอาศัยการการเปลี่ยนแปลงของ สภาพนำไฟฟ้าตามความเข้มข้นก๊าซที่ตรวจวัด โดยสารที่นำมาทำเป็นเซนเซอร์ก๊าซจะต้องมีการ ตอบสนองกับก๊าซได้สูงเพียงพอที่จะแยกแยะความเข้มข้นของก๊าซซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นค้น พบว่าสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์บางตัว เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีความสามารถในการตรวจก๊าซมีเทน (CH_4) ได้

สารประกอบซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาทำ ก๊าซตัวตรวจวัดชนิดสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากมีความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง มีความเสถียรต่อ สารเคมีและความร้อนภายใต้สภาวะแวดล้อมในการใช้งานสูง และเนื่องจากสารซิงค์ออกไซด์เป็นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีข้ออยู่ในชีวิตประจำวันไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เช่น แป้งทาหน้า หรือครีมกันแดด เป็นต้น แต่จากการศึกษาความสามารถในการตอบสนอง เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง และอุณหภูมิที่ในสภาวะแวดล้อมที่ใช้วัดพบว่าความสามารถในการตอบสนองค่อนข้างน้อย ใช้เวลาการตอบสนองนาน และใช้เวลาฟื้นตัวในการวัดครั้งต่อไปนานเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำ

โลหะชั้นสูง (noble metal) เช่น ทองคำขาว (platinum), เงิน (silver) และ พาลาเดียม (palladium) เป็นโลหะที่สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง และไวต่อออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา [2]

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเจือทองคำขาว (platinum) ลงบนชั้นซิงค์ออกไซด์ เพื่อศึกษาผลที่เปลี่ยนแปลงไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาค่าการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเจือชั้นซิงค์ออกไซด์ด้วยทองคำขาว
- 1.2.2 เพื่อลดเวลาที่ใช้การฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซในการวัดครั้งต่อไป
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของตัวตรวจวัดก๊าซชนิดสารกึ่งตัวนำ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการปลูกชั้นซิลิกา และ ซิงค์ออกไซด์
- 1.2.5 เพื่อศึกษาวิธีการเจือทองคำขาวลงบนซิงค์ออกไซด์
- 1.2.6 เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเจือชั้นซิงค์ออกไซด์ด้วยทองคำขาว
- 1.2.7 เพื่อศึกษาการสร้างระบบตรวจสอบทางไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซ

1.3 ขอบเขตและแผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งแผนการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลักดังนี้

- 1.3.1 การสร้างตัวตรวจวัดและการตรวจสอบสมบัติต่างๆของตัวตรวจวัด
- 1.3.2 การสร้างระบบตรวจสอบตัวตรวจวัดก๊าซ
- 1.3.3 การวิเคราะห์ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้า โดยสามารถเขียนแผนการตามระยะเวลาได้ในตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการทำวิจัย									
	ปี 2558					ปี 2559				
	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
1. ศึกษาหลักการ ทำงานและ การสร้างตัว ตรวจวัดก๊าซ	→									
2. ออกแบบ การทดลอง	→									
3. สร้างตัว ตรวจวัดก๊าซ			→							
4. สร้าง ระบบ ตรวจสอบตัว ตรวจวัดก๊าซ				→						
5. ตรวจสอบสมบัติ ต่างๆของตัว ตรวจวัด							→			
6. วิเคราะห์ ข้อมูลและ สรุปผล									→	
7. จัดพิมพ์ ภาพเล่ม									→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซและสมบัติต่างๆของก๊าซ

ก๊าซ คือชื่อเรียกของสารที่มีสถานะเป็นไอซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดธรรมชาติของก๊าซได้ถูกค้นพบมาเป็นเวลากว่า 300 ปี ซึ่งพบว่าอากาศที่ไม่มีมลภาวะที่ระดับน้ำทะเลจะมีก๊าซ (หรือธาตุ) ต่างๆ มากมาย ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งพบว่าจะมีไนโตรเจน (N_2) อยู่ราว ร้อยละ 78 ก๊าซออกซิเจน (O_2) อยู่ประมาณ ร้อยละ 21 ที่เหลือเป็นก๊าซอาร์กอนส่วนใหญ่ราวร้อยละ 1 และก็มีจำนวนของก๊าซต่าง ๆ เช่น CO_2 และ H_2O (ในภาพของไอน้ำ) อยู่เล็กน้อย [2]

ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของก๊าซในอากาศ

ก๊าซ	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร	ก๊าซ	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร	ก๊าซ	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร
N_2	78.09	CH_4	0.00015	O_3	0.000002
O_2	20.94	Kr	0.0001	NH_3	0.000002
Ar	0.93	H_2	0.00005	NO_2	0.00001
CO_2	0.032	N_2O	0.000025	SO_2	0.00000002
Ne	0.0018	CO	0.00001		
He	0.00052	Xe	0.000008		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ออกซิเจน (Oxygen)

ออกซิเจนเป็นธาตุที่มีอยู่มากบริเวณเปลือกโลกแม้กระทั่งน้ำประกอบด้วยออกซิเจนถึงร้อยละ 88.9 ของมวล แร่ส่วนใหญ่ก็ประกอบด้วยออกซิเจนที่อยู่ในภาพของสารประกอบออกซิเจนซึ่งเมื่อรวมกับธาตุอื่นๆแล้วก่อให้เกิดภาพสารประกอบใหม่ที่เรียกว่า “ออกไซด์” ก๊าซออกไซด์ได้แก่ CO_2 , CO , N_2O_4 , N_2O_3 , NO_2 , NO , N_2O , SO_2 , F_2O , Cl_2O_2 , ClO_2 และ Cl_2O (อยู่ที่ตำแหน่งด้านขวาบนของตารางธาตุ)

ออกซิเจนในอากาศจะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ตัวมันเองจะไม่ติดไฟ แต่ช่วยให้ไฟติด ออกซิเจนในเชิงพาณิชย์ทำได้โดยการกลั่นจากอากาศแต่ก็มีจำนวนน้อย หรือไม่ก็หาจากสถานะที่บริสุทธิ์มากนั่นคือการแยกด้วยไฟฟ้าของสารละลายที่เป็นของเหลว หรือโดยการใช้ความร้อนแยก Oxynian, Peroxide ส่วนบทบาทของก๊าซออกซิเจนเบื้องต้นในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำเหล็ก งานเชื่อม งานรักษาสิ่งแวตล้อม และ การบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.1.2 ก๊าซตระกูลคาร์บอน (Carbon Species)

คาร์บอน มีอยู่ด้วยกันสองภาพที่เป็นก๊าซออกไซด์ซึ่งมีความเสถียรคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส นอกจากนี้มันยังมีพิษอีกด้วยเพราะว่าจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในฮีโมโกลบิน (Hb) ในเส้นเลือดของมนุษย์คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นฐาน ประมาณ ร้อยละ 80 ของคาร์บอนโมโนออกไซด์ ในบรรยากาศมาจากรถยนต์ ส่วนการใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้ลดออกซิเจนในการถลุงเหล็กจากแร่ เป็นต้น คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่ช่วยให้ติดไฟ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า -78 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1 บรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นของแข็งมากกว่าจะเป็นของเหลว

2.1.3 มีเทน (Methane)

เป็นภาพแบบหนึ่งของสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไฮโดรเจน (ไฮโดรคาร์บอน) เป็นส่วนประกอบ มีสูตรเคมีเป็น CH_4 เกิดจากธรรมชาติจากการเน่าหมักหมมในหนองบึง หรือการสลายตัวของโปรตีน มีเทนเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ แต่ติดไฟได้ ให้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง เช่นเดียวกับ อีเทน โพรเพน และบิวเทน

2.1.4 เบนซีน (Benzene)

มีสูตรเคมีคือ C_6H_6 เป็นไฮโดรคาร์บอนแบบอะโรมาติกที่มีกลิ่นและติดไฟง่าย ใช้ละลายไขมันและสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้สังเคราะห์สารเคมีมากมายหลายชนิด

2.1.5 เมทานอลและเอทานอล (Methanol and Ethanol)

เมทานอล หรือเรียกว่า เมทิลแอลกอฮอล์ หรือ คาร์บินอลเป็นของเหลวที่ไม่มีสี ติดไฟง่าย ผสมกับน้ำได้ดี เป็นพิษต่อประสาทโดยตรง เมื่อเป็นของเหลวจะเดือดกลายเป็นไอที่ 65 องศาเซลเซียส เมทานอลใช้เป็นตัวทำละลายของสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเบนซินได้เป็นตัวทำละลายวัสดุอินทรีย์ เช่น เซลลูลอสและวานิชใช้ทำพลาสติก กาวเรซิน และกรตอเซติก เป็นต้น

เอทานอล หรือเอทิลแอลกอฮอล์ ระเหยกลายเป็นไอที่ 78 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟไม่เป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากรับประทานเข้าไปมากๆ ใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในการเตรียมสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเอทานอลได้แก่ การเจือจางในส่วนผสมของยา ทำพลาสติก สุรา แล็กเกอร์ และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงรถได้อีกด้วย โดยในก๊าซโซลีนจะผสมเอทานอลประมาณ ร้อยละ 10 แอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ ร้อยละ 100 จะถูกเรียกว่า “แอลกอฮอล์สัมบูรณ์”(absolute alcohol)

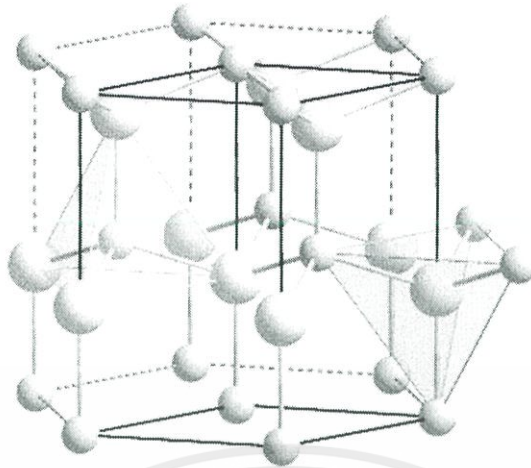
2.1.6 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ส่วนประกอบที่เห็นส่วนใหญ่ของไฮโดรเจนคือ น้ำ พบอยู่ในน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ในอนาคต จะถูกนำมาใช้ทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนมีอยู่ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนสามารถนำมาทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ ไฮโดรเจนนั้นสามารถติดไฟได้ง่าย และได้ถูกเลือกเป็นเชื้อเพลิงในอนาคตสำหรับรถยนต์และอากาศยาน เพราะของเสียที่ได้จากปฏิกิริยาคือน้ำ เป็นผลให้ไม่เกิดมลภาวะ

2.2 สารประกอบเชิงซ้อนออกไซด์

2.2.1 สมบัติของสารเชิงซ้อนออกไซด์

เนื่องจากสารเชิงซ้อนออกไซด์มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอลในบางครั้งการอธิบายระนาบของสารเชิงซ้อนออกไซด์ด้วยระบบ (hkl) นั้น ไม่สามารถอธิบายได้ดีเพราะเวกเตอร์ a และเวกเตอร์ b ในการบอกทิศทางในผลึกไม่อยู่ในทิศของแกน x หรือ y โดยที่ a และ b ทำมุมกัน 120 องศา ดังนั้นจึงเป็นเหตุทำให้การอธิบายระนาบในโครงสร้างเฮกซะโกนอลจำเป็นต้องใช้ตัวแปรถึง 4 ตัวคือเพิ่มตัวแปร i โดยที่ $i = -(h+k)$ ซึ่งจะเขียนเป็นระบบ (hkil) ยกตัวอย่างเช่น ระนาบ (110) เป็น (11-20) เป็นต้น ซึ่งระบบ (hkil) จะมีประโยชน์อย่างมากในการใช้อธิบายโครงสร้างของผลึก เกี่ยวกับการวิเคราะห์หา ระนาบที่เท่ากันแต่ระบบ (hkl) ต่างกัน ยกตัวอย่างระนาบ (110) เมื่อใช้ระบบ (hkl) จะสามารถหา ระนาบอื่นๆ ได้คือ (110) และ (-1-10) แต่เมื่อใช้ระบบ (hkil) แล้วจะได้ระนาบ (11-20) (-1-120) (2-1-10) (-2110) (-12-10) (1-210) เป็นต้น จะเห็นว่า ระบบ (hkil) ใช้อธิบายได้หลากหลายกว่า ซึ่งจะ ใช้วิเคราะห์โครงสร้างรนาโนเชิงซ้อนออกไซด์



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างสารซิงค์ออกไซด์ [3]

เนื่องจากซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำมีค่าพลังงานของแถบพลังงาน 3.3 eV ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานกว้าง (Wide band gap semiconductor) นี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก ในงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงๆ (High temperature) และกำลังสูงๆ (High power) เนื่องจากมี ช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างจึงสามารถประยุกต์ใช้ในอุณหภูมิที่สูงๆดีกว่าสารกึ่งตัวนำ ที่ไม่ใช่แถบพลังงานกว้าง(Wide band gap) ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่น (λ) ตามสมการดังนี้

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

เมื่อ	E_g	=	พลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน (eV)
	C	=	ความเร็วของแสง (299,792,458 m/s)
	h	=	ค่าคงที่ของพลังค์ (4.136 eV·s)
	λ	=	ค่าความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติบางประการของสารซิงค์ออกไซด์ [4]

Properties of Wurtzite ZnO	Value
a_0	0.32495 nm
c_0	0.52069 nm
a_0/c_0	1.602 (ideal hexagonal structure shows 1.633)
u	0.345
Density	5.606 g cm^{-3}
Stable phase at 300 K	Wurtzite
Melting point	1975 องศาเซลเซียส
Thermal conductivity	0.6, 1-1.2
Linear expansion coefficient ($^{\circ}\text{C}$)	$a_0: 6.5 \times 10^{-6}$ $c_0: 3.0 \times 10^{-6}$
Static dielectric constant	8.656
Refractive index	2.008, 2.029
Energy gap	3.4 eV, direct
Intrinsic carrier concentration	$<10^6 \text{ cm}^{-3}$
Exciton binding energy	60 meV
Electron effective mass	0.24
Electron Hall mobility at 300 K for low n-type conductivity	$200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Hall effective mass	0.59
Hole Hall mobility at 300 K for low p-type conductivity	$5-50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

สารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานกว้างจะเปล่งแสงในช่วง ความยาวคลื่นสั้น เช่น แสงสีฟ้า เป็นต้น ซึ่งสารซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ทำให้เปล่งแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่นสั้น ดังนั้น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จึงได้รับความสนใจ ในการนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ที่เปล่งแสงความยาวคลื่นสั้น นอกจากนี้แล้วสาร ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ อีก เช่น ทางด้านแสง (Optical) และ อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) เช่นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าจากแสง (Solar cells), ตัวนำโปร่งใส (Transparent conductor), จอแสดง (Displays), Varistors, UV Detectors และอุปกรณ์ปล่อยแสง (Light emitters) เป็นต้น

2.2.2 ผลึกเชิงเดี่ยวและการปลูกผลึกเชิงเดี่ยว

ผลึกเชิงเดี่ยว (Single crystal) คือผลึกที่ประกอบด้วยหน่วยเซลล์ (Unit cell) ที่มี การเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลในลักษณะเดียวกันทั้งผลึก การปลูกผลึกเชิงเดี่ยวอาจทำได้ หลายวิธีขึ้นกับธรรมชาติของสาร จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

2.2.2.1 การปลูกผลึกจากสารละลาย (Crystal growth from solution)

เป็นการนำสารที่ต้องการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวไปละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม แล้ว ปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยไปอย่างช้าๆเมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยยิ่ง (Supersaturated) สารละลายจะเกิดการตกตะกอน ผลึกที่ได้มักจะเป็นผลึกเล็ก ๆ ที่ตกตะกอนอยู่ ได้ภาชนะ อาจจะใช้ผลึกเม็ดเล็ก (Seed crystal) เป็นเหยื่อล่อ โดยแขวนเชือกบริเวณจุดกึ่งกลาง ของสารละลาย ผลึกจะมาเกาะอยู่รอบ ๆ ผลึกเม็ดเล็กจะได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

2.2.2.2 การปลูกผลึกจากไอ (Crystal growth from vapor)

เป็นวิธีการปลูกผลึกที่นิยมใช้กับสารที่ระเหิดได้ และไม่ต้องใช้ผลึกเม็ดเล็กมาเป็น เหยื่อล่อ โดยการนำสารที่ต้องการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวไปใส่ไว้ในภาชนะปิดแล้วให้ความร้อนที่ เพียงพอจนทำให้สารนั้นกลายเป็นไอ แล้วไอจะไปควบแน่นเป็นผลึกภายในภาชนะในบริเวณที่มี อุณหภูมิต่ำกว่าจุดระเหิด (Sublime point)

2.2.2.3 การปลูกผลึกจากสารหลอมเหลว (Crystal growth from melt)

เป็นการทำให้สารที่ใช้ในการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวหลอมเหลวแล้วให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ เป็นอีกวิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน และมีหลายแบบเช่นการหลอมเหลวสารที่จะปลูกผลึกใหม่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวแล้วเทลงในหลอดแก้วปลายแหลม จากนั้นทำให้บริเวณ ปลาย แหลมเย็นตัวลงจนทำให้เกิดการแข็งตัว ที่บริเวณปลายแหลมของหลอดแก้วซึ่งมีเนื้อที่จำกัดนี้จะเป็นที่เกิดนิวเคลียสของผลึกอันแรกและโมเลกุลของของเหลวจะมาเกาะแล้วแข็งตัวทำให้เกิดผลึก ขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ

วิธี Crystal pulling เป็นการใช้ผลึกเม็ดเล็ก (Seed crystal) จุ่มลงไปในช่วงของเหลวที่ เกิดจากการหลอมละลาย (Molten liquid) แล้วค่อย ๆ ยกเม็ดผลึกนี้ขึ้น แล้วรอให้ของเหลวที่ติด ขึ้นมากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เม็ดผลึกแข็งตัวติดกับเม็ดผลึกทำให้ได้ผลึกขนาดใหญ่ขึ้น แล้วทำเช่นนี้ซ้ำต่อไปจนกว่า จะได้ผลึกแข็งเดี่ยวขนาดที่ต้องการ

วิธี Zone refining เป็นการปลูกผลึกแข็งเดี่ยวจากแท่งของ Polycrystalline โดยผ่าน ความร้อนให้กับแท่ง Polycrystalline ให้หลอมเหลวเป็นบางส่วนโดยการปรับอุณหภูมิให้ พอเหมาะ และอาศัยแรงดึงผิวของสารส่วนที่หลอมละลายทำให้แท่ง Polycrystalline ไม่ขาดออก จากกันแล้วค่อย ๆ ดึงแท่งสารขึ้นอย่างช้า ๆ เพื่อเลื่อนบริเวณที่หลอมเหลวให้แท่งสารผ่านความ ร้อนในช่วงแคบโดยทั่วกัน ถ้าอุณหภูมิที่ใช้หลอมเหลวและความเร็วในการดึงแท่งสารเหมาะสมจะ ทำให้แท่งสารกลายเป็นผลึกเดี่ยวได้ในงานวิจัยนี้จะปลูกวิสเกอร์ซิงค์ออกไซด์โดยวิธีปลูกผลึกจาก ไอ (growth from vapor) เพราะว่าซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่ระเหิดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จึง เหมาะสมที่จะปลูกผลึกโดยวิธีปลูกผลึกจากไอ

2.2.3 การเกิดวิสเกอร์ของสารซิงค์ออกไซด์

เนื่องจากการเตรียมวิสเกอร์ของซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการปลูกผลึกเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดวิสเกอร์ซิงค์ออกไซด์มีสมมุติฐานว่าน่าจะเกิดในลักษณะเดียวกันกับการเกิดผลึกโดยทั่วไป ซึ่งสมมุติฐานของการเกิดวิสเกอร์ซิงค์ออกไซด์มี 2 แบบ ดังนี้คือ

2.2.3.1 Vapor-solid phase (VS) mechanism

เส้นวิสเกอร์ของซิงค์ออกไซด์เกิดจากไอของสาร (Vapor phase) จากนั้นไอของสาร เหล่านั้น จะเกิดการควบแน่นและตกตะกอนลงบนผิวภายนอกของสาร โดยการควบแน่นจะเกิดขึ้น ส่วนบนสุด และทับถมกันสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เส้นวิสเกอร์ซิงค์ออกไซด์มีความยาวเพิ่มขึ้น

2.2.3.2 Vapor-liquid-solid phase(VLS) mechanism

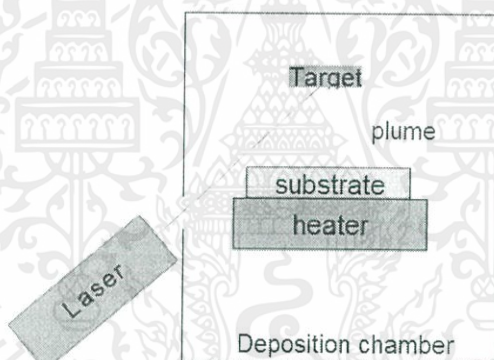
เส้นวิสเกอร์ของซิงค์ออกไซด์เกิดขึ้นจากบางส่วนของสารหลอมเหลวแล้วระเหย กลายเป็นไอ (Vapor phase) จากนั้นเกิดการควบแน่นและตกตะกอนลงบนผิวภายนอกของสารซึ่งอยู่ในสถานะระหว่างของแข็งและของเหลว โดยการระเหยจะเกิดขึ้นส่วนบนสุดและทับถมกัน สูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เส้นวิสเกอร์ของซิงค์ออกไซด์มีความยาวเพิ่มขึ้น

2.2.4 เทคนิคการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวของสารซิงค์ออกไซด์

ผลึกเชิงเดี่ยว(Single crystal) คือผลึกที่ประกอบด้วยหน่วยเซลล์(Unit cell) ที่มีการเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลในลักษณะเดียวกันทั้งก้อนผลึกโดยที่เทคนิคการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวของสารซิงค์ออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้และธรรมชาติของสาร

2.2.4.1 เทคนิค Pulsed Laser Deposition (PLD)

PLD เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจากเลเซอร์ความเข้มสูงกระตุ้นให้อะตอมหรือโมเลกุลหลุดออกจากเป้าสาร (target) ทำให้เกิดไอของสารที่ต้องการสังเคราะห์ เมื่อไอของสารมีมากเพียงพอจะทำให้เกิดการควบแน่นเป็นผลึกเชิงเดี่ยวบนแผ่นรองรับที่ต้องการ โดยที่การยิงลำเลเซอร์ลงบนเป้าสารจะให้ป็นจังหวะ

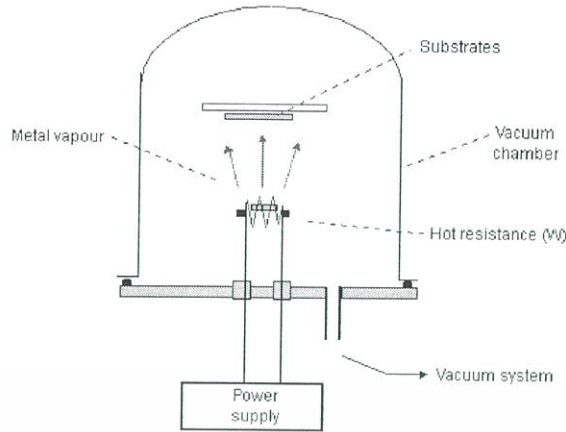


ภาพที่ 2.2 แสดงแบบจำลองเทคนิค PLD [5]

2.2.4.2 เทคนิค Thermal evaporation

Thermal evaporation เป็นเทคนิคที่ง่ายคือการให้พลังงานความร้อนแก่ก้อนสารจนทำให้อัตอมหรือโมเลกุลระเหยกลายเป็นไอ เมื่อไอของสารมีมากเพียงพอจะทำให้เกิดการควบแน่นเป็นผลึกเชิงเดี่ยวบนแผ่นรองรับที่ต้องการ หรือควบแน่นลงบนก้อนสารนั้นๆ โดยสามารถเผาผลาญในบรรยากาศของก๊าซต่างๆ ตามที่ต้องการได้ ยกตัวอย่างเช่น เผาผลาญซิงค์ออกไซด์ในบรรยากาศของออกซิเจน เป็นต้น

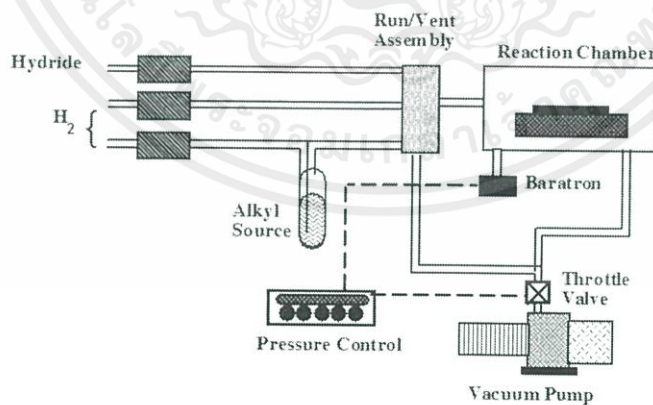
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 แสดงแบบจำลองเทคนิค thermal evaporation [6]

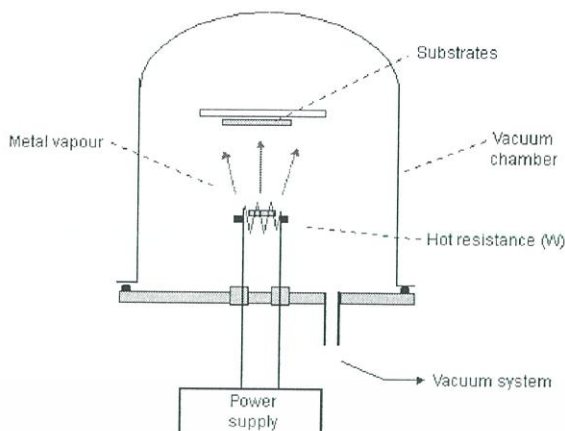
2.2.4.3 เทคนิค Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)

MOCVD เป็นเทคนิคที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารโลหะอินทรีย์ยกตัวอย่างเช่น diethyl zinc [$\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$] ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน เกิดเป็นสารซิงค์ออกไซด์ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้น ที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 475 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องให้ความร้อนแก่แผ่นรองรับ หรือที่ ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาดังนั้นสารซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวก็จะรวมตัวกัน กลายเป็นผลึกเชิงเดี่ยว บนแผ่นรองรับ



ภาพที่ 2.4 แสดงแบบจำลองเทคนิค MOCVD [7]

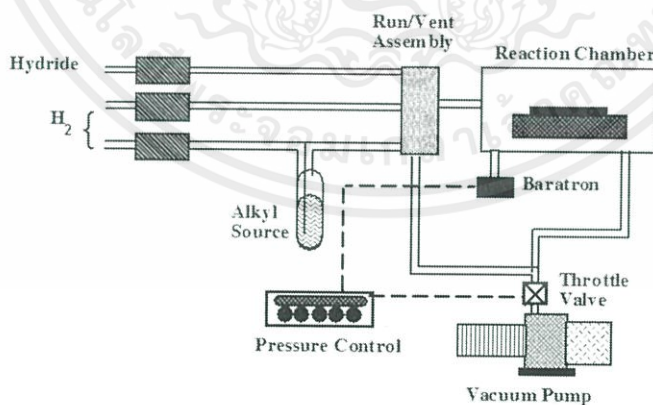
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 แสดงแบบจำลองเทคนิค thermal evaporation [6]

2.2.4.3 เทคนิค Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)

MOCVD เป็นเทคนิคที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารโลหะอินทรีย์ยกตัวอย่างเช่น diethyl zinc $[Zn(C_2H_5)_2]$ ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน เกิดเป็นสารซิงค์ออกไซด์ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้น ที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 475 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องให้ความร้อนแก่แผ่นรองรับ หรือที่ ต้องการให้เกิดปฏิกิริยาดังนั้นสารซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวก็จะรวมตัวกัน กลายเป็นผลึกเชิงเดี่ยว บนแผ่นรองรับ

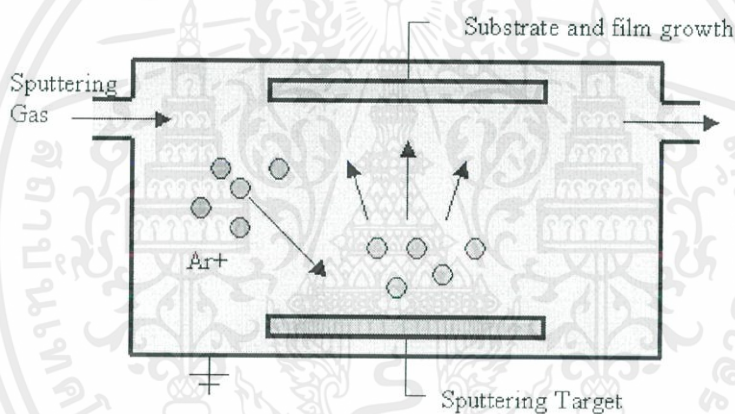


ภาพที่ 2.4 แสดงแบบจำลองเทคนิค MOCVD [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.4 เทคนิคการสปัตเตอริง (Sputtering technique)

วิธีการสปัตเตอริง เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมที่ผิวหน้าของสาร (Target) หลุด ออกมา โดยการเคลื่อนที่เข้าไปชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง ในระหว่างการชนหรือการกระทบกันจะเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ถูกรบกวน และอะตอมใกล้เคียงการที่อะตอมที่ผิวหน้าของสารสามารถที่จะเคลื่อนที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของสารนั้นได้จะต้องมีพลังงานที่เพียงพอที่จะชนะแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีกับอะตอมใกล้เคียง และเป็นพลังงานจลน์ให้กับอะตอมที่หลุดออกมา และอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวสาร ส่วนมากจะสามารถเคลื่อนที่ภายใต้ สนามไฟฟ้า เนื่องจากอะตอมที่หลุดออกมาจะมีสถานะเป็นไอออนหรือบางครั้งการชนของอนุภาค พลังงานสูงอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าก็ได้



ภาพที่ 2.5 แสดงแบบจำลองเทคนิคการสปัตเตอริง [8]

2.2.4.5 เทคนิคการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการปาดเคลือบ (Doctor Blade)

Doctor blade เป็นเทคนิคการปลูกให้ได้เป็นแผ่นฟิล์มที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ด้วยการใช้ใบมีดปาดสารละลายลงบนแผ่นรองรับ โดยสามารถควบคุมความหนาได้จากระยะห่างระหว่างใบมีดและแผ่นรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวตรวจวัดก๊าซชนิดต่างๆ

ตัวตรวจวัดก๊าซในปัจจุบันมีหลากหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้กันมีอยู่สองชนิดคือ ตัวตรวจวัดก๊าซที่ใช้คลื่นแสงอินฟราเรด และตัวตรวจวัดก๊าซที่ใช้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

2.3.1 ตัวตรวจวัดก๊าซที่ใช้คลื่นแสงอินฟราเรด

คุณสมบัติของก๊าซต่อการสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) การวิเคราะห์คลื่นแสง เป็นการวัดและศึกษาผลกระทบของพลังงานที่อยู่ในสารใดๆ ซึ่งทำให้เราสามารถวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของอินทรีย์เคมีได้ [9]

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนของแสง และความถี่ สมการพื้นฐานของพลังงานโฟตอนที่สัมพันธ์กับความถี่ f (ภาพคลื่น / วินาที หรือ เฮิรตซ์) กำหนดได้เป็น

$$E = hf \quad (2.2)$$

เมื่อ h = ค่าคงที่ของพลังค์ = 6.6242×10^{-34} J.s
 f = ความถี่ของแสง (s^{-1})

หรือความสัมพันธ์อีกสมการจะได้ว่า

$$\lambda f = c \quad (2.3)$$

เมื่อ λ = ความยาวคลื่น (m)
 c = ความเร็วแสง = 2.998×10^8 m/s

หากแทนค่า $f = \frac{c}{\lambda}$ ลงในสมการที่ 2.2 จะได้

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hc\sigma \quad (2.4)$$

เมื่อ σ = จำนวนคลื่น (ภาพคลื่น / ซม. หรือ cm^{-1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่ได้จะอยู่ในภาพของ จูลน์ / โฟตอน หรือ จูลน์ / โมล สมการนี้สามารถปรับปรุงใหม่ได้ดังนี้

$$E = Nh\nu \quad (2.5)$$

เมื่อ $N = 6.023 \times 10^{23} \text{ J/mol}$

2.3.2 ตัวตรวจวัดก๊าซสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

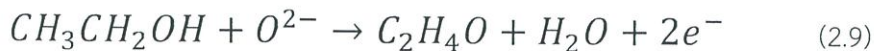
สารประกอบโลหะออกไซด์เป็นสารที่มีกระบวนการตอบสนองต่อก๊าซได้โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการตรวจวัดก๊าซคือการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่ผ่านเข้ามาที่ออกซิเจนไอออนหรือรีแอคทีฟออกซิเจน (reactive oxygen) คือ O_2 , O^{2-} และ O^- ที่มาจับบนพื้นผิวของโครงสร้างโลหะออกไซด์หรือตัวตรวจวัดโดยเฉพาะที่บริเวณ grain boundary และพื้นผิวของตัวตรวจวัดโดยมีตัวช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายคืออุณหภูมิที่สูงขึ้นของตัวตรวจวัดแสดงว่าออกซิเจนไอออนที่เกาะบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวตรวจวัด และเมื่ออุณหภูมิลดลงออกซิเจนที่เกาะบนพื้นผิวเป็น O_2 - แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ออกซิเจนไอออน O_2 ที่เกาะบนพื้นผิวจะแตกตัวเป็น O^{2-} หรือ O^- โดยจะดึงอิเล็กตรอนพาหะหรืออิเล็กตรอนในแถบนำ (conduction band) จากผิวหน้าของสารโลหะออกไซด์ แล้วเปลี่ยนสภาพเป็นไอออน O^{2-} หรือ O^- ไปยึดติดที่พื้นผิว ดังสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8 ตามลำดับ



จากสมการไอออนลบจะเข้ามายึดติดที่ผิวหน้าของสารประกอบโลหะออกไซด์ในบริเวณที่มี oxygen vacancies โดยการดึงเอาอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดบริเวณปลดประจุ (depletion region) ขึ้นบนพื้นผิวของสารประกอบโลหะออกไซด์มีผลทำให้กำแพงศักย์บริเวณผิวหน้าสูงขึ้นซึ่งจะขัดขวางการนำไฟฟ้าส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าของสารมีค่าต่ำลง และเมื่อปล่อยก๊าซเข้าไปโมเลกุลของออกซิเจนไอออนที่เกาะอยู่ที่ผิวของสารโลหะออกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลก๊าซ เช่น การเกิดปฏิกิริยาของของโมเลกุลเอทานอล ดังสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้สภาพต้านทานของสารโลหะออกไซด์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซและอุณหภูมิของสารโลหะออกไซด์ และเมื่อหยุดให้ก๊าซกับสารโลหะออกไซด์ สภาพความต้านทานก็จะกลับไปสู่สภาวะเดิมอีกครั้ง

2.3.2.1 ปริมาณการตอบสนองของตัวตรวจวัดก๊าซ (Response magnitude)

เมื่อทราบค่าความต้านทานเริ่มต้นซึ่งเป็นความต้านทานในอากาศและค่าความต้านทานสุดท้ายในบรรยากาศของก๊าซที่นำมาวัด สามารถหาปริมาณการตอบสนองของหัววัดได้จากสมการ [10]

$$\text{Response magnitude} = \frac{R_a - R_g}{R_a} \quad (2.10)$$

2.3.2.2 เวลาการตอบสนอง (Response time, τ_{90}^-)

เวลาการตอบสนองเป็นตัวแปรที่แสดงถึงความไวหรือความรวดเร็วในการตอบสนองต่อก๊าซของตัวตรวจวัดโลหะออกไซด์ โดยที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวตรวจวัดจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (transient response) แล้วจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง (steady state response) เวลาที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับร้อยละ 90 ของผลต่างของค่าความต้านทานเดิมกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่คงที่แล้วในบรรยากาศของก๊าซ

2.3.2.3 เวลาการคืนตัว (Recovery time, τ_{90}^+)

เวลาการคืนตัวเป็นตัวแปรที่แสดงถึงความไวหรือความรวดเร็วในการคืนตัวของตัววัดก๊าซโดยที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวตรวจวัดจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจนมีค่าคงที่ที่เท่ากับค่าความต้านทานเริ่มต้นก่อนการปล่อยก๊าซเข้าไป

2.4 การปลูกชั้นซิลิกา (SiO₂) บนแผ่นซิลิกอน

ในการปลูกชั้นซิลิกาบนแผ่นซิลิกอนสามารถทำได้โดยการทำให้มีชั้นของออกไซด์มาเกิดบนซิลิกอนซึ่งมีวิธีทำได้สองแบบคือการใช้อุณหภูมิทำให้เกิดชั้นออกไซด์ (thermal oxidation) และการใช้ไฟฟ้า (anodic oxidation)

2.4.1 การใช้อุณหภูมิทำให้เกิดการออกซิเดชัน (thermal oxidation)

Thermal oxidation คือการใช้อุณหภูมิสูงทำให้โลหะเกิดการออกซิเดชันเพื่อทำให้เกิดชั้นออกไซด์แบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ

2.4.1.2 กระบวนการแบบแห้ง (dry process)

คือการใช้ก๊าซออกซิเจนในอากาศในปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส - 1250 องศาเซลเซียส ตามสมการ



2.4.1.3 กระบวนการแบบเปียก (wet process)

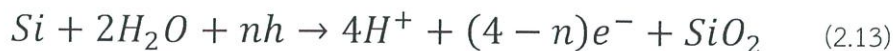
คือการใช้ไอน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส - 1250 องศาเซลเซียส ตามสมการ



2.4.2 การใช้ไฟฟ้าทำให้เกิดการออกซิเดชัน (anodic oxidation)

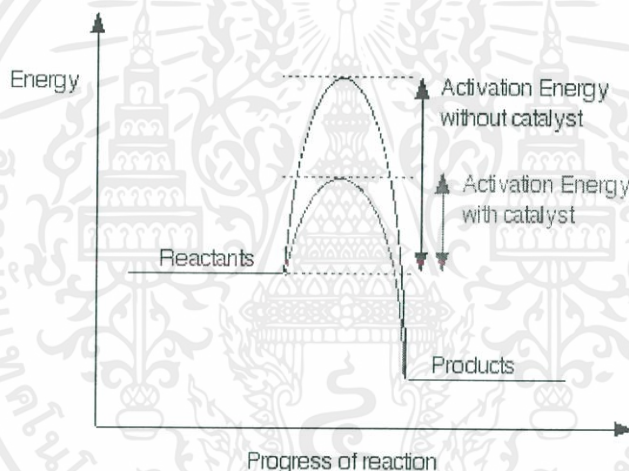
Anodic oxidation คือการใช้ไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตามสมการ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.5 การเพิ่มค่าการตอบสนองและลดระยะเวลาการฟื้นตัวด้วยการเจือโลหะชั้นสูง (Noble metal)

โลหะชั้นสูง เช่น พลาตินั่ม (Pd) และทองคำขาว (Pt) มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลของก๊าซได้ดีจึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดบนผิวหน้าของตัวตรวจวัดได้เนื่องจากไปลดพลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงทำให้ตัวตรวจวัดก๊าซสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิที่ต่ำลง



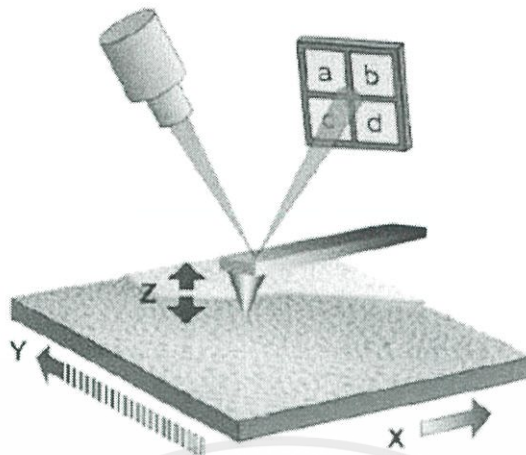
ภาพที่ 2.6 แสดงพลังงานที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา [12]

2.6 อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM)

AFM เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดพื้นผิวของวัตถุในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตรเพื่อศึกษาพื้นผิวของวัตถุในระดับอะตอม สามารถหาความขรุขระและลักษณะของพื้นผิวได้โดยหลักการทำงานอาศัยเข็มที่มีความเล็กขนาดอะตอมลากผ่านไปบนผิวของวัตถุและใช้แรงระหว่างอะตอมของหัวเข็มและพื้นผิวมาประมวลผลเป็นภาพภาพพื้นผิว ดังภาพที่ 2.10

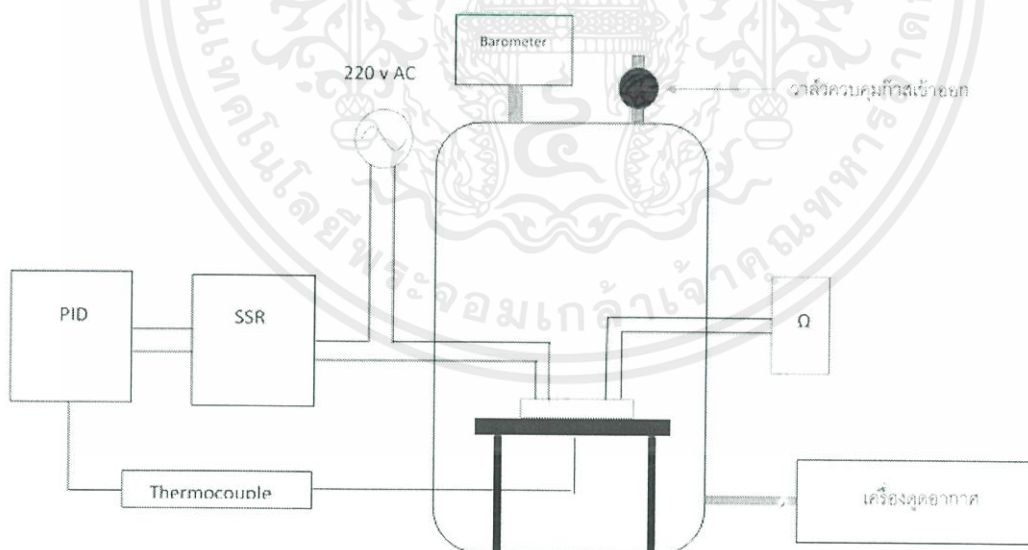
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 แสดงหลักการทำงานของเครื่องAFM [13]

2.6.2 เครื่องมือตรวจสอบความต้านทาน

ในการสร้างเครื่องมือตรวจสอบความต้านของตัวตรวจวัดสร้างขึ้นเพื่อนำค่าความต้านทานที่ได้มาหาค่าการตอบสนองตามสมการที่ 2.10 มีระบบดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดงระบบการตรวจสอบความต้านทาน

ซึ่งเครื่องมือตรวจสอบความต้านทานนั้นแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.1 ส่วนควบคุมก๊าซ

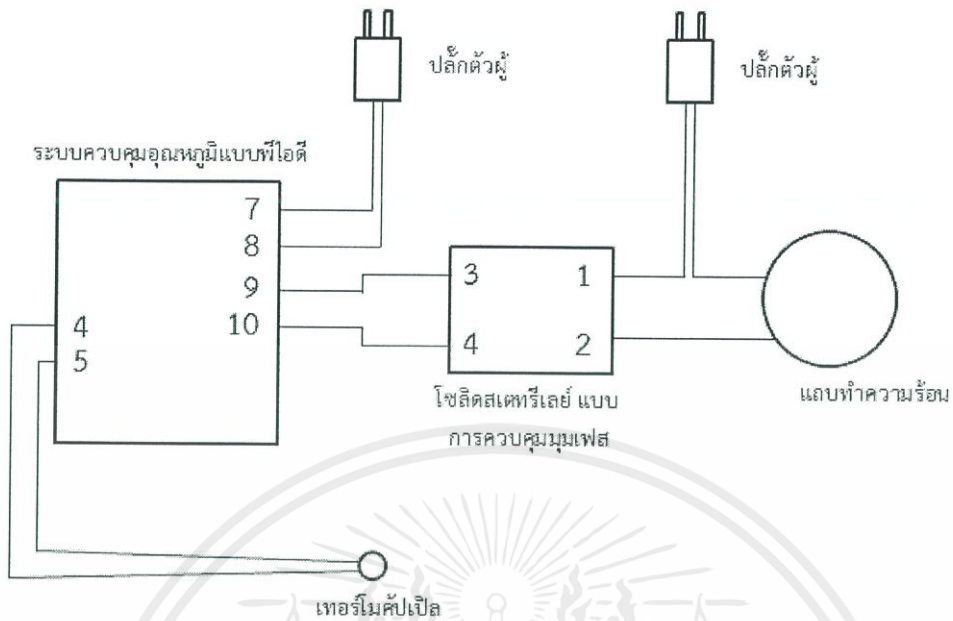
ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลเข้าออกของก๊าซ ประกอบไปด้วย

- (1) ถังสุญญากาศ มีหน้าที่เก็บก๊าซให้อยู่ในระบบไม่ให้ไหลออก และป้องกันไม่ให้อากาศไหลเข้าระบบ เพื่อให้การทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น
- (2) เครื่องดูดอากาศ คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการดูดอากาศเพื่อให้ภายในระบบเป็นสุญญากาศ เพื่อให้สามารถปล่อยก๊าซเข้าสู่ตัวถังได้
- (3) เกจวัดความดัน คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความดันภายในตัวถัง
- (4) วาล์วก๊าซ มีหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของก๊าซ

2.6.2.2 ส่วนควบคุมอุณหภูมิ

ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของฐานรองตัวตรวจวัดเพื่อปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

- (1) แล่นำความร้อน มีหน้าที่เป็นฐานรองตัวตรวจวัด
- (2) ระบบควบคุมอุณหภูมิ PID (proportional integral derivative controller) มีหน้าที่ในการควบคุมความร้อนให้มีอุณหภูมิตามที่กำหนดผ่านสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ร่วมกับเครื่อง solid state relay เพื่อควบคุมขนาดของสัญญาณไฟฟ้าไปยังแล่นำความร้อน
- (3) เครื่อง solid state relay มีหน้าที่ควบคุมขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้มาจากเครื่อง PID เพื่อให้แล่นำความร้อนมีอุณหภูมิตามที่กำหนด
- (4) เทอร์โมคูเปิล (thermocouple) มีหน้าที่แสดงอุณหภูมิของแล่นำความร้อนผ่านหน้าจอแบบดิจิทัล



ภาพที่ 2.9 แสดงระบบวงจรการควบคุมอุณหภูมิ [14]

2.6.2.3 ส่วนการวัดค่าความต้านทาน

ประกอบไปด้วย เครื่องมัลติมิเตอร์ (multi meter) ใช้วัดค่าความต้านทานของตัวตรวจวัด

2.7 ทบทวนวรรณกรรม

2.7.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดก๊าซมีเทนด้วยโลหะพลาตาเดียม

ในวรรณกรรมชิ้นนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าการตอบสนอง, เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง และ เวลาฟื้นตัว ของตัวตรวจวัดก๊าซมีเทนที่ทำมาจากฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์และตัวตรวจวัดก๊าซมีเทนที่ทำมาจากฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์ที่เจือผิวหน้าด้วยโลหะพลาตาเดียม ได้ผลดังตารางที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่าต่างๆ ของตัวตรวจวัดก๊าซมีเทน [15]

อุณหภูมิแวดล้อม(องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น(%)	ค่าการตอบสนอง(%)	เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง(s)	เวลาฟื้นตัวของ(s)
<150	No response			
200	0.1	74	75	116
	0.5	74.28	66	126
	1	75	61	134
250	0.1	80.24	64	91
	0.5	82.5	58	99
	1	83.9	49	101
300	0.1	95.0	48	59
	0.5	96.74	44	64
	1	98.48	40	71
350	0.1	92.2	57	102
	0.5	93.23	48	106
	1	94.1	39	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงค่าต่างๆ ของตัวตรวจวัดก๊าซมีเทนที่เจอชั้นซิงค์ออกไซด์ด้วยพลาสมาเดียม
[15]

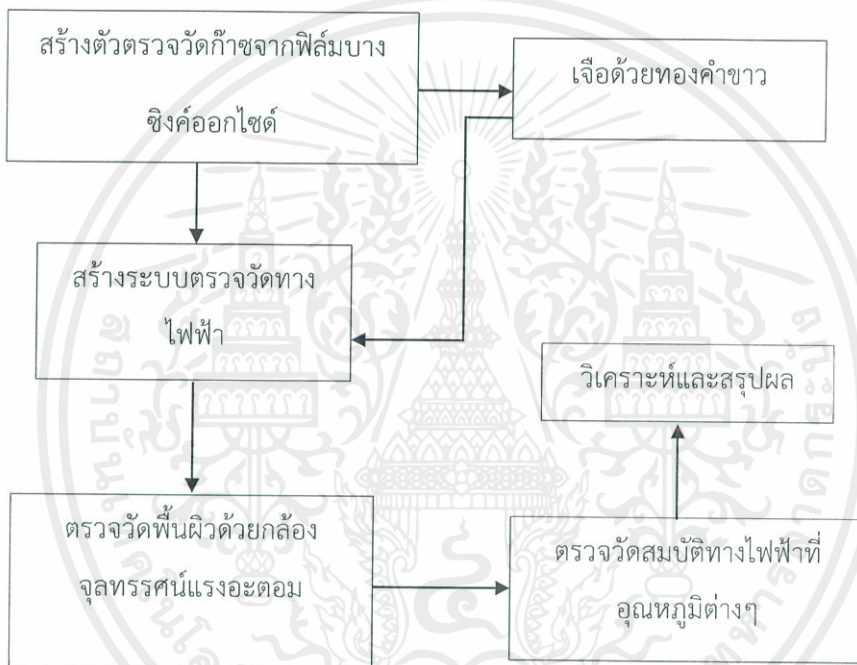
อุณหภูมิแวดล้อม(องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น (%)	ค่าการตอบสนอง (%)	เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง(s)	เวลาฟื้นตัวของ (s)
130	0.1	84.3	74	104
	0.5	88.1	68	112
	1	89.3	66	121
150	0.1	90.52	61	82
	0.5	93.23	57	89
	1	94.24	54	96
200	0.1	98.8	47	70
	0.5	99.26	42	83
	1	99.76	39	85
250	0.1	93.54	58	84
	0.5	95	54	91
	1	83.9	51	93

จากตารางที่ 2.4 และ 2.5 สรุปได้ว่าการเจอโลหะพลาสมาเดียมลงไปบนชั้นผิวของซิงค์ออกไซด์ จะสามารถลดอุณหภูมิในการทำงานของตัวตรวจวัดได้, มีค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้น, เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง และเวลาฟื้นตัวลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

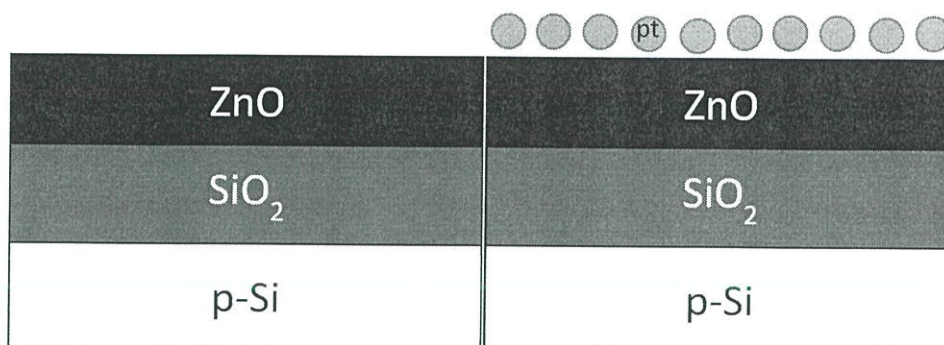
ในขั้นตอนทำงานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือการสร้างตัวตรวจวัดก๊าซ, การสร้างระบบตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า และการตรวจสอบตัวตรวจวัด โดยมีแผนผังการดำเนินงานตามภาพที่ 3.1 ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แสดงแผนผังการดำเนินการทดลอง

3.1 การสร้างตัวตรวจวัดก๊าซ

ในการสร้างตัวตรวจวัดนั้นได้ออกแบบให้มีส่วนประกอบเป็นแผ่นบาง 3 ชั้น คือชั้นฐานซึ่งใช้แผ่นซิลิกอนชนิดพีไทป์, ชั้นซิลิกา และ ชั้นซิงค์ออกไซด์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของตัวตรวจวัดแบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว

โดยใช้วิธีการปลูกชั้นซิลิกอนบนแผ่นซิลิกอนชนิดพีโตนี, ปลูกชั้นซิงค์ออกไซด์บนชั้นซิลิกาและเจือชั้นซิงค์ออกไซด์ด้วยทองคำขาวดังนี้

3.1.1 การเตรียมแผ่นซิลิกอน

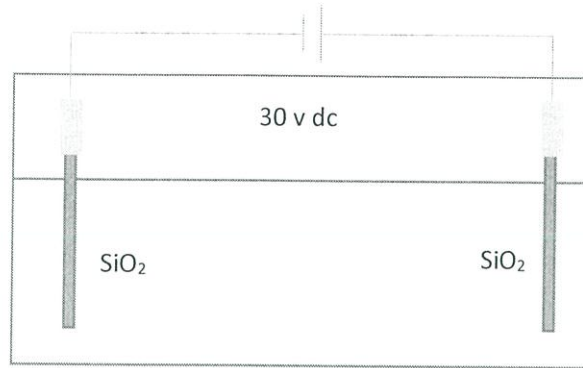
เตรียมแผ่นซิลิกอนชนิดพีโตนีขนาด 0.8x0.8 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดผิวหน้า โดยใช้ที่เป่าฝุ่น

3.1.2 การปลูกชั้นซิลิกา

ใช้การปลูกชั้นออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนชนิดพีโตนีให้เกิดเป็นซิลิกาด้วยวิธีการใช้ขั้วไฟฟ้า (anodic oxidation) โดยเตรียมอุปกรณ์ทั้งหมดดังนี้

1. แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
2. สารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 20 โมลลาร์(เจือจากจากกรดไนตริกเข้มข้น ความเข้มข้น 70 โมลลาร์)
3. สายไฟที่มีที่หนีบสำหรับต่อขั้วไฟฟ้ากับแผ่นซิลิกอน

โดยเตรียมระบบการทำงานโดยการต่อขั้วไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสองขั้วกับแผ่นซิลิกอนชนิดพีโตนี(แผ่นละขั้ว) จุ่มแผ่นซิลิกอนทั้งสองชิ้นลงในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 20 โมลลาร์โดยให้ด้านที่เรียบของแผ่นซิลิกอนทั้งสองหันหน้าเข้าหากันและขนานกันโดยที่ให้ระยะห่างระหว่างแผ่นทั้งสองเท่ากับ 5 เซนติเมตร และให้ห่างจากฐานของภาชนะที่ใส่กรดเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 3.2

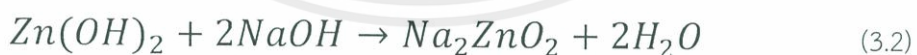


ภาพที่ 3.3 แสดงการจัดระบบในวิธีการ anodic oxidation

เปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้จ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์ 30 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

3.1.3 การปลูกชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ในการปลูกชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นั้นได้ใช้สารละลายโซเดียมซิงเคต(sodium zincate, Na_2ZnO_2) ความเข้มข้น 0.1 โมลลาร์เป็นแหล่งของซิงค์ออกไซด์ ซึ่งสารละลายโซเดียมซิงเคตเตรียมได้จากการผสมสารละลายซิงค์ซัลเฟต(Zinc sulfate, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 0.1 โมลลาร์และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์(Sodium hydroxide, NaOH) ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเข้าด้วยกันในอัตราผสม 1:1 จะเกิดสารที่ขาวขุ่นขึ้นมาและคนให้เข้ากันในอุณหภูมิห้องจนสารเกิดเป็นสารละลายที่ใสจะได้สารละลายซิงค์ซิงเคตพร้อมสำหรับใช้งาน ดังสมการที่ 3.1, 3.2 และ 3.3



เมื่อได้สารละลายซิงค์ซิงเคตเป็นที่เรียบร้อยแล้วทำการเตรียมน้ำดีไอออนไนเซชัน(DI water) ต้มในอ่างหรือบีกเกอร์ให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 90 องศาเซลเซียส ตลอดเวลาจากนั้นทำการปลูกชั้นซิงค์ออกไซด์บนลงชั้นของซิลิกาที่ได้ปลูกในขั้นตอนก่อนหน้าด้วยการใช้ตัวอย่างตัวตรวจวัดจุ่มไปใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายโซเดียมซิงค์เคตโดยจุ่มในแนวระนาบของตัวตรวจวัดโดยหันข้างที่เป็นซิลิกาเข้าหาสารละลายเป็นเวลา 1 วินาทีและนำมาจุ่มในน้ำดีไออีก 1 วินาทีในขั้นตอนนี้จะเกิดฟองสีขาวฟูขึ้นจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดเป็นสารซิงค์ออกไซด์ตามสมการที่ 3.4 คือ



จุ่มในสารละลายโซเดียมซิงค์เคตและน้ำดีไอสลับกันไปทั้งหมด 100 ครั้งจากนั้นนำมาให้ความร้อนบนเตาด้วยความร้อน 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้น้ำระเหยออกไปจะเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ความหนาประมาณ 1.5 ไมโครเมตรบนชั้นของซิลิกา [16]

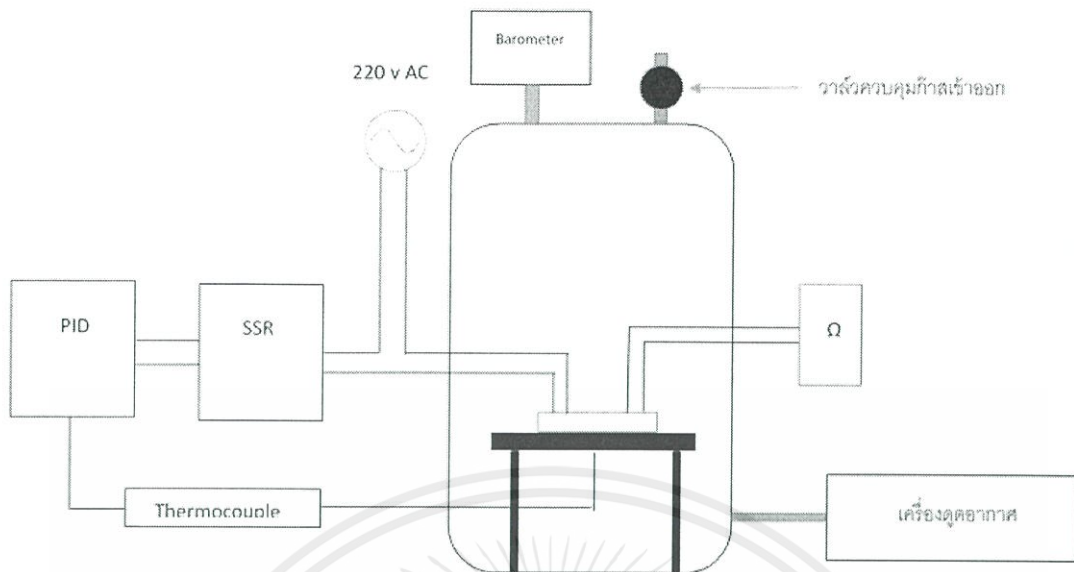
3.1.4 การเจือโลหะทองคำขาวลงบนชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ในการเจือโลหะทองคำขาวลงบนชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นั้นเตรียมได้จากการนำตัวอย่างมาจุ่มลงในสารละลายแพลทตินัมคลอไรด์(platinum chloride, PtCl_2) ความเข้มข้น 0.01 โมลลาร์เป็นเวลา 5 วินาทีซึ่งซิงค์ออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งโลหะชนิดเอนโทปีจะดูดซับทองคำขาวไอออน (Pt^{2+}) ได้ดีทำให้เกิดการเจือของแพลทตินัมบนชั้นของซิงค์ออกไซด์ จากนั้นทำตัวอย่างไปให้ความร้อนบนเตาด้วยความร้อน 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีเพื่อให้น้ำจากสารละลายระเหยออก

3.2 การสร้างเครื่องมือตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดก๊าซ

เครื่องมือในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดก๊าซในการทดลองนั้นเป็นการสร้างเครื่องมือเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อตัวตรวจวัดสัมผัสกับก๊าซโดยทำการต่อระบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

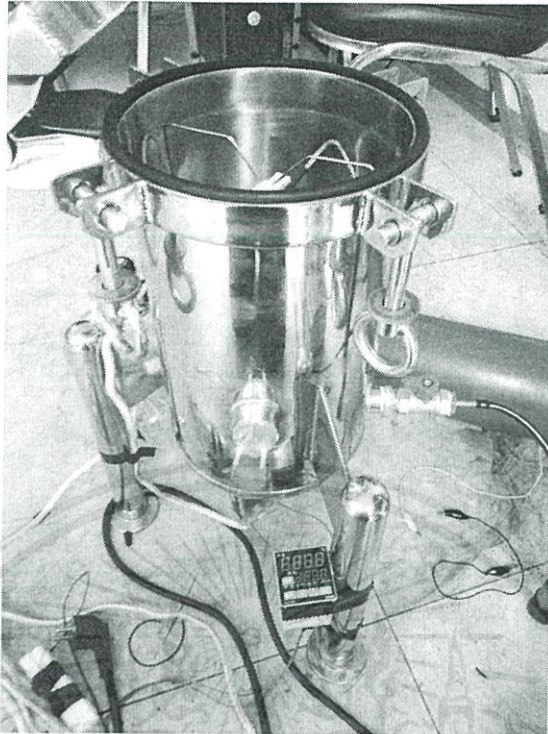


ภาพที่ 3.4 แสดงการต่อระบบตรวจสอบทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดก๊าซ

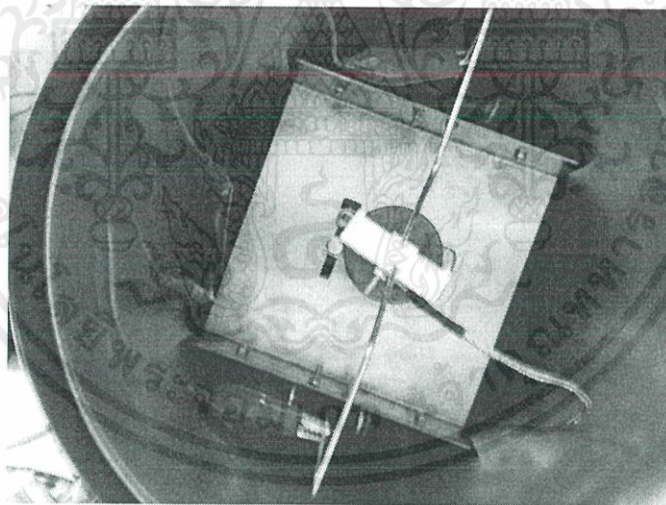
ขั้นตอนในการประกอบเครื่องตรวจวัดทางไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

- (1) เตรียมโถสุญญากาศที่มีฝาปิดที่แน่นหนา เพื่อป้องกันอากาศไหลเข้า และเตรียมฐานเพื่อใช้เป็นที่ยางแถบนำความร้อน
- (2) ติดตั้งระบบสุญญากาศจากติดเครื่องดูดอากาศ และเกจวัดความดันเข้ากับตัวถังผ่านท่ออย่าง จากนั้นทดลองดูดอากาศให้ค่าความดันลดลงไปที่ -28 มิลลิเมตรปรอท
- (3) ติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิ ติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิตามหัวข้อที่ 2.6.2.2 พร้อมติดเข้ากับแถบนำความร้อนที่ยางไว้บนตัวฐาน
- (4) ติดตั้งเครื่องมัลติมิเตอร์ให้เข็มชี้ยื่นออกมาในโถเพื่อวัดค่าความต้านทาน
- (5) เจาะรูเพื่อติดตั้งวาล์วสำหรับควบคุมการเข้า-ออก ของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

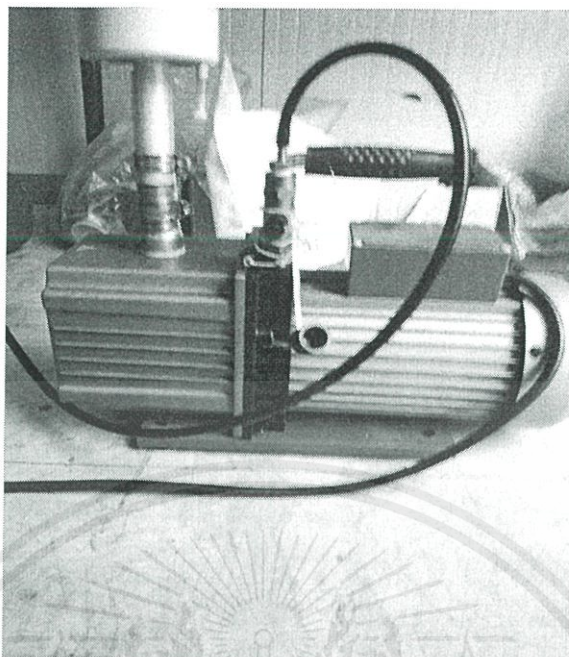


ภาพที่ 3.5 แสดงภาพระบบด้านข้าง

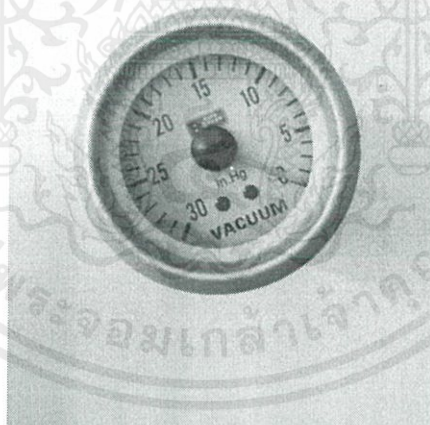


ภาพที่ 3.6 แสดงภาพระบบด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 เครื่องดูดอากาศ

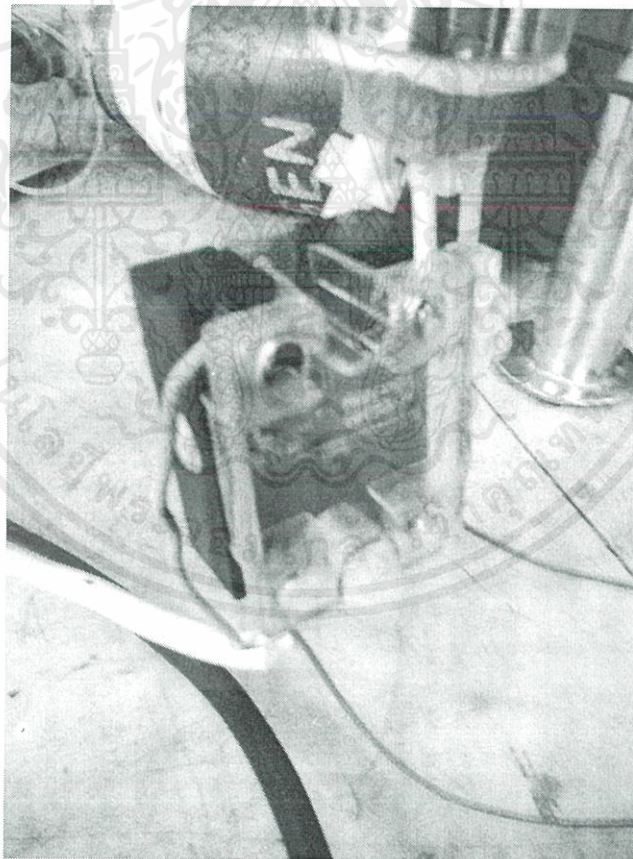


ภาพที่ 3.8 เกจวัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 PID controller



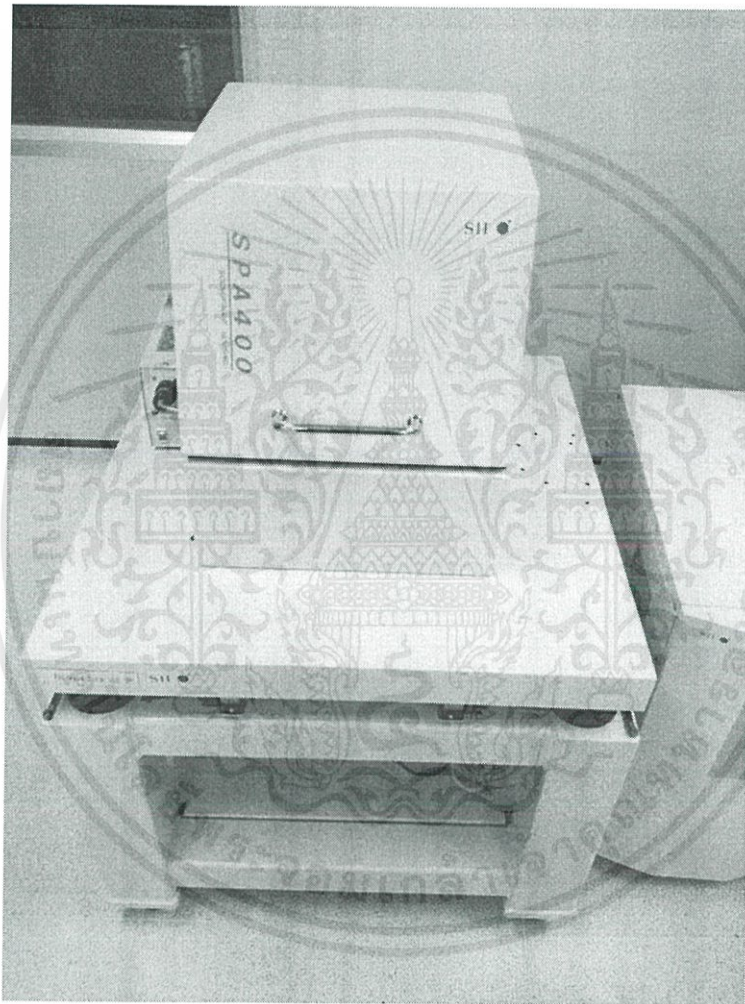
ภาพที่ 3.10 SSR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของตัวตรวจวัดก๊าซ

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

ตรวจวัดพื้นผิวของตัวตรวจวัดก๊าซด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม(AFM)เพื่อหาวิเคราะห์ความแตกต่างของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ปกติและแบบที่เจือทองคำขาว



ภาพที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า

ใช้ระบบตรวจวัดทางไฟฟ้าจากหัวข้อที่ 3.2 โดยการวางตัวตรวจวัดก๊าซบนแผ่นตัวนำความร้อนและให้ความร้อนแก่แผ่นตัวนำความร้อนผ่านระบบ PDI-SSR controller ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและทำการไล่อากาศออกจากระบบจนได้ค่าความดันภายในระบบที่ -28 มิลลิเมตรปรอท จากนั้นเปิดวาล์วก๊าซเพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปในระบบจนความดันในถังมีค่าคงที่และจดบันทึกค่าความต้านทานที่ได้ ไล่อากาศออกและจับเวลาที่ตัวตรวจวัดใช้ในการคืนค่าความต้านทานสู่ค่าเดิมเพื่อวัดเวลาในการฟื้นตัวให้ใช้ได้ในครั้งต่อไปทำซ้ำ 5 รอบเพื่อหาค่าเฉลี่ย ทำการทดลองซ้ำที่อุณหภูมิ 160, 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส และทำการทดลองเช่นเดียวกันกับตัวตรวจวัดที่เจือทองคำขาว นำค่าความต้านทานที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและทำการคำนวณค่าการตอบสนอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการวัดการวัดสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดก๊าซเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แบบปกติและแบบที่เจือทองคำขาว ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

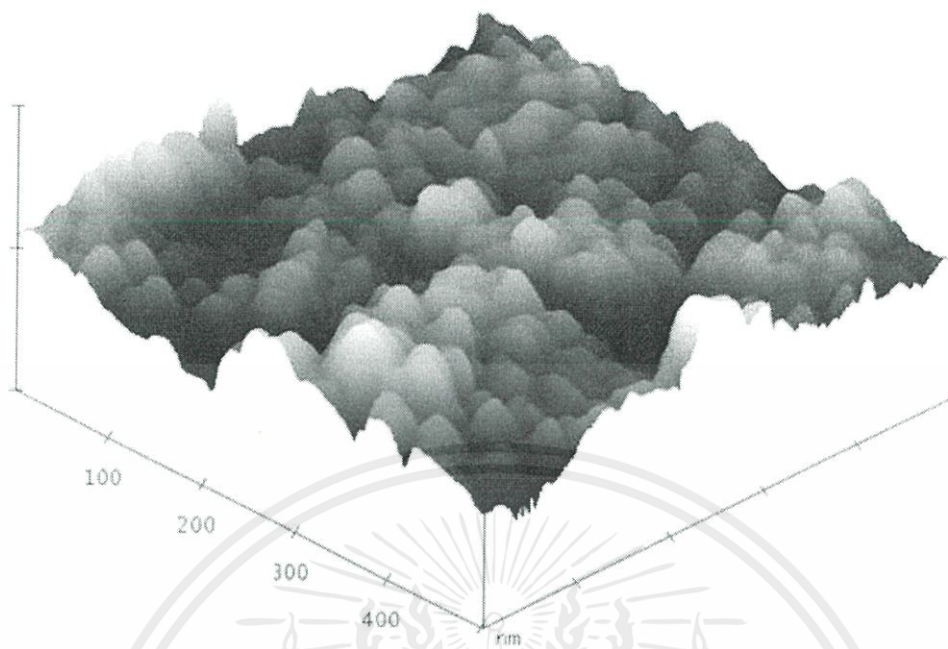
4.1 ผลการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ

ผลการตรวจวัดพื้นผิวของชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม(AFM) ในพื้นที่ 0.5×0.5 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.1 แสดงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์แบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 แสดงพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์หลังจากการด้วยทองคำขาว

จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นความแตกต่างของพื้นผิวของตัวตรวจวัดก๊าซที่เป็นซิงค์ออกไซด์แบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาวว่า แบบที่เจือด้วยทองคำขาวจะมีความขรุขระเฉลี่ยมากกว่าโดยแบบที่ไม่เจือมีค่าความขรุขระเฉลี่ยอยู่ที่ 8.3 และแบบที่เจือด้วยทองคำขาวมีค่าความขรุขระเฉลี่ยอยู่ที่ 8.6 ซึ่งผลที่ได้คือการมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระมากขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์มากขึ้น

4.2 ผลการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า

ผลการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าคือค่าการตอบสนองจากการใช้โอห์มมิเตอร์วัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดเมื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปในระบบในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิต่างๆคือ 140, 160, 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียสของตัวตรวจวัดฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แบบปกติและแบบที่เจือทองคำขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงโครไดออกไซด์
เมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	36.2	36.2	-
2	36.2	36.2	-
3	36.2	36.2	-
4	36.2	36.2	-
5	36.2	36.2	-
เฉลี่ย	36.2	36.2	-

ไม่เกิดการตอบสนองต่อก๊าซไฮโดรเจน

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงโครไดออกไซด์
เมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	28.43	17.41	132
2	28.43	17.22	136
3	28.43	17.64	136
4	28.43	17.55	128
5	28.43	17.46	134
เฉลี่ย	28.43	17.46	133

ได้ค่าการตอบสนอง 39%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์
เมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	21.56	10.44	128
2	21.56	10.24	125
3	21.56	10.43	127
4	21.56	9.98	122
5	21.56	10.42	124
เฉลี่ย	21.56	10.30	125

ได้ค่าการตอบสนอง 52%

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์
เมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	16.93	5.48	115
2	16.93	5.26	115
3	16.93	4.95	113
4	16.93	5.34	114
5	16.93	5.07	117
เฉลี่ย	16.93	5.22	115

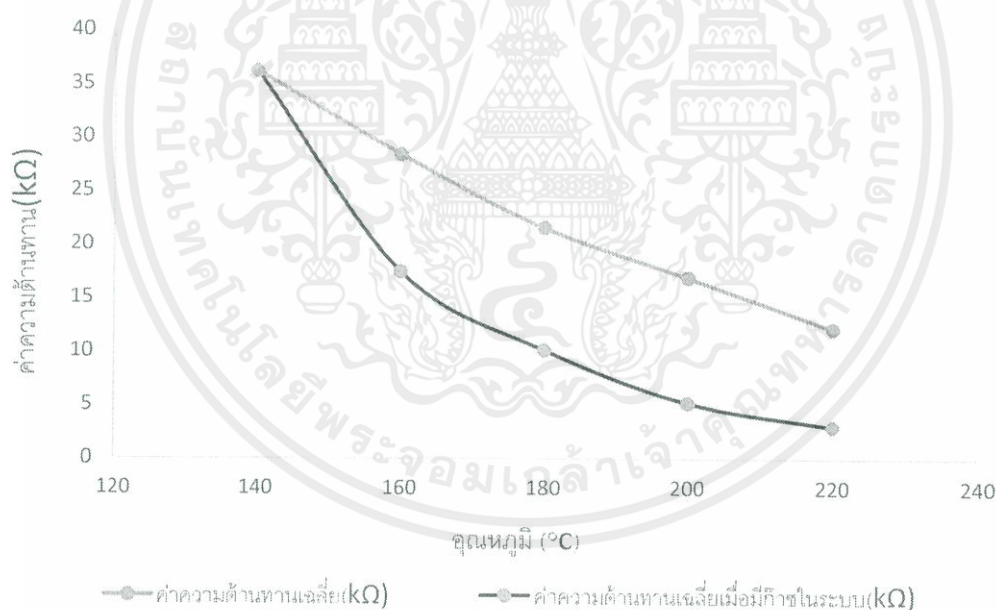
ได้ค่าการตอบสนอง 69%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ เมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	12.16	3.14	103
2	12.16	2.75	102
3	12.16	3.06	106
4	12.16	3.14	103
5	12.16	2.93	105
เฉลี่ย	12.16	3.00	104

ได้ค่าการตอบสนอง 75%



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความต้านทานเฉลี่ยของตัวตรวจวัดก๊าซซิงค์ออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากมีก๊าซในระบบ

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดตอบสนองต่อก๊าซเนื่องจากมีค่าความต้านทานที่ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำขาวเมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	42.60	16.82	110
2	42.60	16.48	111
3	42.60	16.65	106
4	42.60	17.02	111
5	42.60	16.08	110
เฉลี่ย	42.60	16.61	110

ได้ค่าการตอบสนอง 61%

ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำขาวเมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	34.57	10.88	104
2	34.57	11.85	99
3	34.57	11.27	103
4	34.57	11.21	100
5	34.57	10.09	99
เฉลี่ย	34.57	11.06	101

ได้ค่าการตอบสนอง 68%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำขาวเมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	29.57	7.38	95
2	29.57	7.52	94
3	29.57	7.30	93
4	29.57	7.30	93
5	29.57	7.45	93
เฉลี่ย	29.57	7.39	94

ได้ค่าการตอบสนอง 75%

ตารางที่ 4.9 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำขาวเมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	24.05	4.34	88
2	24.05	4.28	89
3	24.05	4.39	85
4	24.05	4.28	86
5	24.05	4.36	86
เฉลี่ย	24.05	4.33	87

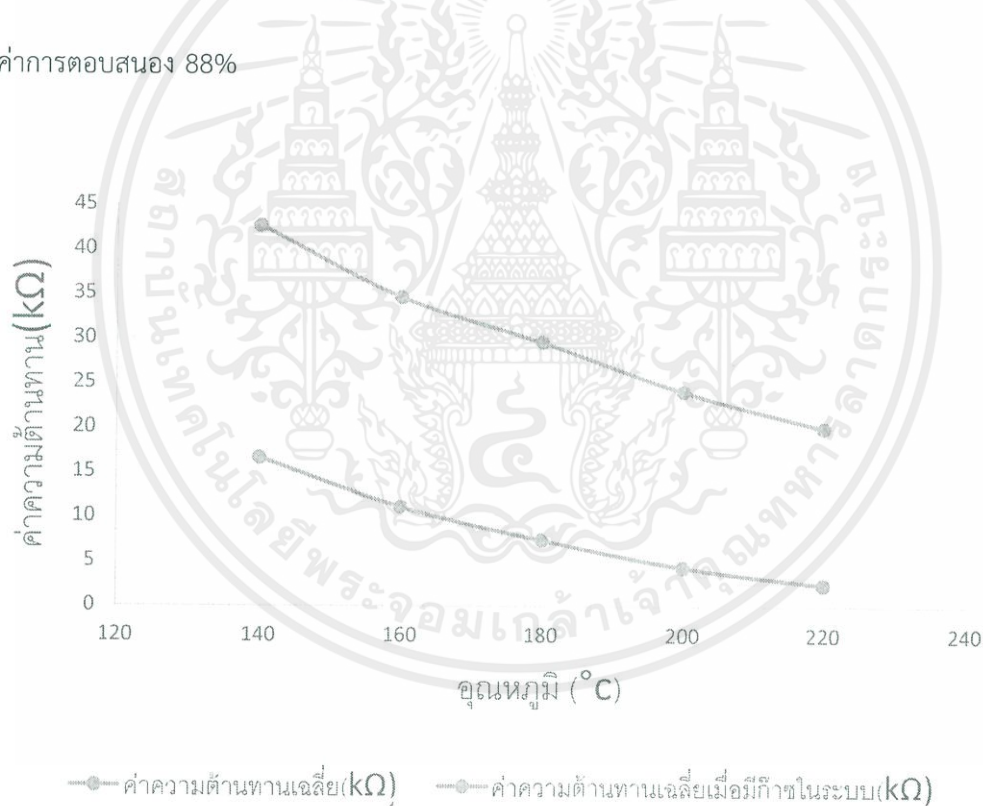
ได้ค่าการตอบสนอง 82%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านทานและระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำขาวเมื่อมีก๊าซในระบบที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส

การทดลองครั้งที่	ค่าความต้านทานก่อนให้ก๊าซ (K Ω)	ค่าความต้านทานหลังให้ ก๊าซ(K Ω)	ระยะเวลาการ ฟื้นตัว(s)
1	19.98	2.40	81
2	19.98	2,45	81
3	19.98	2.38	83
4	19.98	2.34	80
5	19.98	2.43	81
เฉลี่ย	19.98	2.40	81

ได้ค่าการตอบสนอง 88%



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความต้านทานเฉลี่ยของตัวตรวจวัดก๊าซซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำขาวที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากมีก๊าซในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

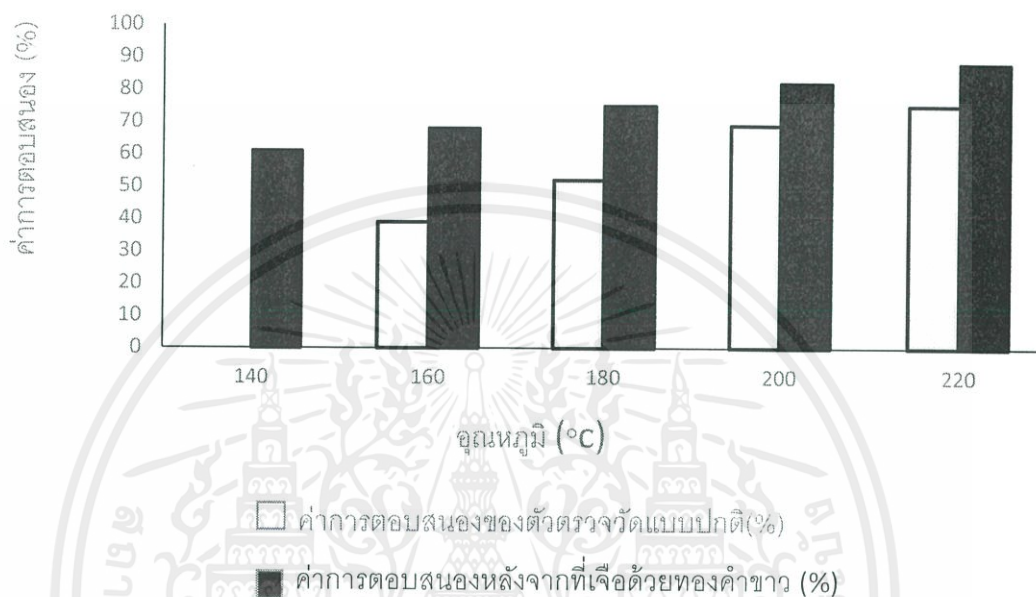
จากภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดก๊าซสามารถตอบสนองต่อก๊าซได้เนื่องจากค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดที่เจือด้วยทองคำขาวหลังจากมีก๊าซในระบบยังคงลดลง

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าการตอบสนองของตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว ณ อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ค่าการตอบสนองของตัวตรวจวัดแบบปกติ(%)	ค่าการตอบสนองของตัวตรวจวัดแบบที่เจือด้วยทองคำขาว(%)	ค่าการตอบสนองที่เพิ่มขึ้น(%)
140	ไม่มีการตอบสนอง	61	-
160	39	68	29
180	52	75	23
200	69	82	13
220	75	88	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.11 สามารถนำมาพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการตอบสนองของตัวตรวจวัดแบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว

จากภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดก๊าซแบบที่เจือทองคำขาวมีค่าการตอบสนองที่มากกว่าแบบปกติในทุกๆอุณหภูมิ และตัวตรวจวัดก๊าซแบบปกติไม่สามารถทำงานได้ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียสเนื่องจากมีพลังงานไม่พอในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวของตัวตรวจวัดก๊าซ

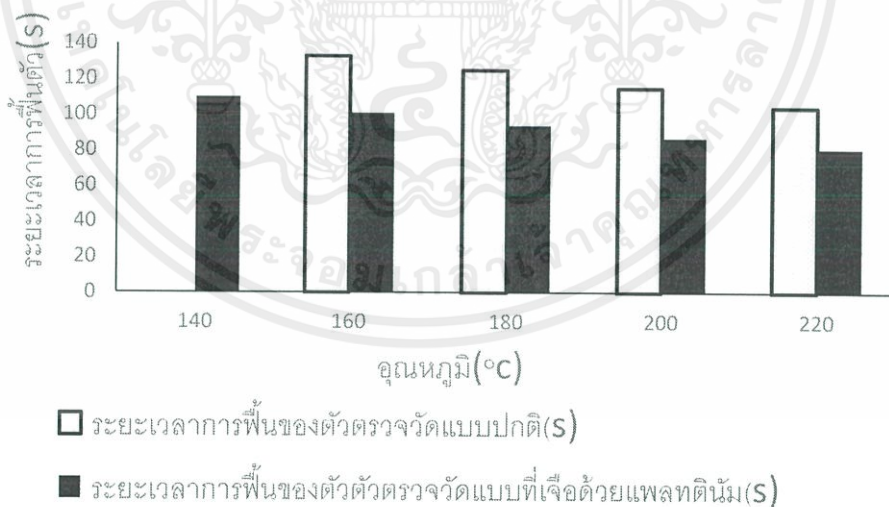
ค่าการตอบสนองที่เพิ่มมากขึ้นนั้นเริ่มลดลงจนคงที่เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มค่าการตอบสนองด้วยการเจือทองคำขาวนั้นให้ผลดีในช่วงอุณหภูมิ 140-200 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบระยะเวลาในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซแบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว

อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลาการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดแบบปกติ(s)	ระยะเวลาการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดแบบที่เจือด้วยทองคำขาว(s)	ระยะเวลาการฟื้นตัวที่ลดลง(s)
140	-	110	-
160	133	101	32
180	125	94	31
200	115	87	28
220	104	81	23

จากตารางที่ 4.12 สามารถนำมาพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบได้ดังนี้



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงระยะเวลาฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซแบบปกติและแบบที่เจือด้วยทองคำขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดก๊าซแบบที่เจือด้วยทองคำขาวมีค่าระยะเวลาการฟื้นตัวที่เร็วกว่าแบบปกติซึ่งดีกว่าเมื่อนำไปใช้งาน

ระยะเวลาการฟื้นตัวที่ลดลงนั้นจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกับค่าการตอบสนอง

4.3 อภิปรายผลการทดลอง

จากหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ที่ผ่านมาเห็นได้ว่าการเจือตัวตรวจวัดก๊าซฟิล์มบางซึ่งคอกไซด์ด้วยทองคำขาวนั้นทำให้ตัวตรวจวัดมีค่าการตอบสนองเพิ่มมากขึ้น และทำให้มีระยะเวลาการฟื้นตัวที่ลดลง เนื่องจากการเจือชั้นซึ่งคอกไซด์ด้วยทองคำขาวนั้นทำให้พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้นและทองคำขาวเป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีตามสมการ $Pt + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow Pt:O$ Pt:O สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ตามสมการ $Pt:O \leftrightarrow Pt + O$ ทำให้เกิดออกซิเจนอิสระและแตกตัวเป็นออกซิเจนไอออนเพื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนได้มากขึ้นด้วย

การเพิ่มค่าการตอบสนอง และ การลดระยะเวลาการฟื้นตัวนั้นให้ผลดีที่อุณหภูมิ 140-200 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำมาและข้อเสนอแนะต่างๆที่เกี่ยวกับการทดลองนี้ซึ่งมีดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ พื้นผิวที่ได้จากการเจือด้วยทองคำขาวมีความขรุขระมากขึ้นทำให้ความคล่องตัวของประจุลดลงส่งผลให้หลังเจือด้วยทองคำขาวตัวตรวจวัดมีความต้านทานมากขึ้น

ในส่วนของการตอบสนอง, ระยะเวลาในการฟื้นตัว และอุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้ของตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำมาจากฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยทองคำขาวสามารถทำได้จากการนำทองคำขาวไปเจือด้วยวิธีการใช้ชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จุ่มลงในสารละลายแพลทตินัมคลอไรด์และนำไปให้ความร้อนเนื่องจากทองคำขาวจากสารละลายแพลทตินัมคลอไรด์ ช่วยให้พื้นผิวก็ออกซิเจนไอออนได้มากขึ้นเนื่องจากทองคำขาวทำให้เกิดออกซิเจนไอออนได้มากขึ้นในระบบ

การเพิ่มค่าการตอบสนองจะสามารถเพิ่มได้น้อยลงตามอุณหภูมิแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ที่อุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส ซึ่งการเพิ่มค่าการตอบสนองที่ดีที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้นมาได้ ร้อยละ 29

ระยะเวลาที่ใช้ในการฟื้นตัวของตัวตรวจวัดก๊าซลดลงแต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะลดลงน้อยกว่าเดิมเช่นเดียวกันกับค่าการตอบสนอง

ทองคำขาวสามารถช่วยในตัวตรวจวัดก๊าซทำงานได้ในอุณหภูมิที่ต่ำลงเนื่องจากทองคำขาวสามารถเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 หากนำการทดลองนี้ไปใช้งานจริงวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการทำเพราะทองคำขาวนั้นมีราคาที่ค่อนข้างแพงอาจไม่คุ้มต่อการนำไปใช้

5.2.2 ควรระวังเรื่องความปลอดภัยจากการทดลองเนื่องจากไฮโดรเจนเป็นก๊าซไวไฟและสามารถติดไฟได้เองที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] สืบค้นจาก <http://scienceblogs.com/startswithabang/2013/07/05/why-did-the-universe-start-off-with-hydrogen-helium-and-not-much-else/>
- [2] Shawn D. Lid and Chunshan Song, NOBLE METAL CATALYSTS FOR LOW-TEMPERATURE NAPHTHALENE HYDROGENATION IN THE PRESENCE OF BENZOTHIOPHENE
- [3] สืบค้นจาก <http://whatiszincoxide.weebly.com/structure.html>
- [4] สืบค้นจาก <http://www.edn.com/Home/PrintView?contentItemId=4391796>
- [5] สืบค้นจาก <http://npl-web.stanford.edu/archive/energy/micro-fuel-cell/sofc/electrode/pld>
- [6] สืบค้นจาก http://www.icmm.csic.es/fis/english/evaporacion_resistencia.html
- [7] สืบค้นจาก https://en.wikipedia.org/wiki/Metalorganic_vapour_phase_epitaxy
- [8] สืบค้นจาก https://en.wikipedia.org/wiki/Sputter_deposition
- [9] สืบค้นจาก <http://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- [10] สืบค้นจาก <http://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/catalyst.html>
- [11] สืบค้นจาก <http://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- [12] สืบค้นจาก <http://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/catalyst.html>
- [13] สืบค้นจาก <http://www.physik.uni-greifswald.de/arbeitsgruppen/helm/methoden/afm-atomic-force-microscope.html>
- [14] นาย เผ่าภูมิ เกิดคง, การผลิตเส้นพลาสติกคอมโพสิตโดยระบบอัดรีดเส้นพลาสติกเพื่อประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติ, page 38
- [15] Sunipa Roy, H.Saha, C. K. Sarkar, HIGH SENSITIVITY METHANE SENSOR BY CHEMICALLY DEPOSITED NANOCRYSTALLINE ZNO THIN FILM, INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS, VOL. 3, NO. 4, DECEMBER 2010, page 615
- [16] Sunipa Roy, H.Saha, C. K. Sarkar, HIGH SENSITIVITY METHANE SENSOR BY CHEMICALLY DEPOSITED NANOCRYSTALLINE ZNO THIN FILM, INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS, VOL. 3, NO. 4, DECEMBER 2010, page 608

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย ธนโชติ ศักดิ์อาภา
นามสกุล	ศักดิ์อาภา
วัน เดือน ปี เกิด	6 สิงหาคม พ.ศ. 2536
ที่อยู่	428 หมู่ 1 ถ. มิตรภาพ ต. มิตรภาพ อ. มวกเหล็ก จ.สระบุรี 18180
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย จาก โรงเรียนสระบุรีวิทยาคม ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรม วัสดุฯ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้