

การพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียแบบฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์

THE DEVELOPMENT OF AMMONIA GAS SENSOR
THIN-FILM ZINC OXIDE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-951-8

การพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียแบบฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์

THE DEVELOPMENT OF AMMONIA GAS SENSOR
THIN-FILM ZINC OXIDE



สุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์

SURACHATE VATTANAPHAIROJ

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 47909
วัน, เดือน, ปี 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน พ.ศ. 2545 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-648-951-8

**THE DEVELOPMENT OF AMMONIA GAS SENSOR
THIN-FILM ZINC OXIDE**



SURACHATE VATTANAPHAIROJ

**A THESIS SUMMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 2002 มาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974 - 648 - 951 - 8



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีผู้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารที่ทำการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียแบบฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์
THE DEVELOPMENT OF AMMONIA GAS SENSOR THIN-FILM
ZINC OXIDE

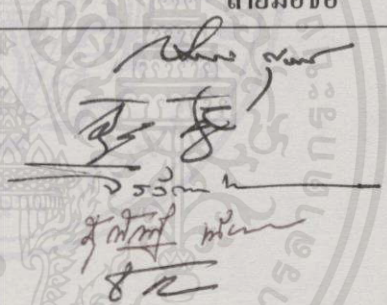
ชื่อนักศึกษา นายสุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์

รหัสประจำตัว 40061049

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.สมศักดิ์ เขียวศรีกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
รศ.ดร.วิสุทธิ	จิตติรุ่งเรือง	
รศ.จิววัฒน์	ปานกลาง	
ผศ.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
รศ.สมศักดิ์	เขียวศรีกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 21 พฤษภาคม 2545 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 20 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซแอมโมเนียแบบฟิล์มบางของ ซิงค์ออกไซด์
นักศึกษา	นายสุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์
รหัสประจำตัว	40061049
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอ การประดิษฐ์หัววัดก๊าซเซนเซอร์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยมุ่งพัฒนาและวิจัยหาเงื่อนไขในการประดิษฐ์หัววัดก๊าซที่มีความไวในการตรวจสอบก๊าซ และความจำเพาะของก๊าซที่หัววัดก๊าซสามารถตอบสนองได้ การสร้างฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยวิธีการสปีดเตอริงในบรรยากาศก๊าซผสมอาร์กอน-ออกซิเจน อัตราส่วน 85:15 ฟิล์มบางที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิเล็กตรอน ไมโครสโคป เอกซ์เรย์ คิฟแพกซ์ สเปกตรัม และวัดสภาพต้านทานผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้เมื่อนำมาทำการแอนนีกที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะโครงสร้างตั้งฉากกับพื้นผิว (C-axis) จะสามารถนำไปตรวจจับก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิการทำงาน 350 องศาเซลเซียส โดยให้ความไวสูงสุดโดยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์มีความไวประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเวลาการตอบสนองต่อก๊าซ 30 วินาที ใช้เวลาการคืนสภาพ 80 วินาที อีกทั้งทำการศึกษาการลดระยะเวลาการตรวจจับของหัววัดก๊าซโดยการเติม อลูมิเนียม, พลาตาเดียม และ แพลทินัม กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ให้ผลต่อการตอบสนองก๊าซแอมโมเนียที่แตกต่างกันของสารที่นำมาเติมสารคะตะไลต์ Al มีความไวประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการตอบสนองก๊าซ 10 วินาที ใช้เวลาการคืนสภาพ 50 วินาที ส่วนการเติมสารคะตะไลต์ Pd มีความไวประมาณ 76 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการตอบสนองก๊าซ 20 วินาที ใช้เวลาการคืนสภาพ 60วินาที และการเติมสารคะตะไลต์ Pt มีความไวประมาณ 63 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการตอบสนองก๊าซ 20 วินาที ใช้เวลาการคืนสภาพ 70วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Development of Ammonia Gas Sensor Thin-Film Zinc Oxide
Student	Mr.Surachate Vattanaphairoj
Student ID.	40061049
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Somsak Cheersirikul

ABSTRACT

This thesis present the fabrication of zinc oxide based thin film gas sensor. The main purpose of study is to investigate and to develop a gas sensor with high sensitivity and specific gravity responding on sensor operation point. The zinc oxide which is based on thin film is fabricated by using a sputtering technique under Ar-O₂ ratio 85:15 gas environment. The properties of films were characterized by a Scanning Electron Microscope (SEM), X-Ray Diffraction (XRD) and sheet resistance measurement. A group of samples was annealed at 600 degree celsius in one hour. The experiment on the effect of the film temperature was carried out by varying the vertical crystal framework (C - axis), the sensor detect ammonia gas 10 percent by volume at the temperature at 350 degree celsius. Thin film has sensitivity 55 percent, response time about 30 seconds and recovery time about 80 seconds. From the case study, it was found that the decrease in the exposure time and sensitivity of the sensor can be improved by doping aluminium, palladium and platinum into the thin film zinc oxide by sintering process at 600 degree celsius for 30 minute which responded to ammonia gas have different kind of catalyst. The catalyst Al has sensitivity about 83 percent can have response time about 10 seconds and recovery time 50 seconds. Whereas the catalyst Pd has sensitivity about 76 percent can have response time about 20 seconds and recovery time 60 seconds. And the catalyst Pt has sensitivity about 63 percent can have response time about 20 seconds and recovery time 70 seconds.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล ผู้ให้คำปรึกษาและวางแผนแนวทางในการดำเนินการวิจัยจนสามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ ที่ร่วมวิจัย และให้คำปรึกษาในขณะทำการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำชี้แนะในการทำวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่วิจัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ทางด้านเทคนิคต่าง ๆ

นอกจากนี้ ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ อาจารย์อัจฉรา แสงอรียวนิช จากกองฟิสิกส์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องเอกซเรย์ คิวแฟกซ์ สเปกตรัม ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์อนิเมโครสโคป

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ที่ให้ความอุปการะ ในด้านการเรียน ด้านงบประมาณต่าง ๆ พร้อมทั้งให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีผู้สนใจนำไปศึกษาค้นคว้า ผู้วิจัยขออุทิศให้กับบุพการีและผู้มีพระคุณต่อผู้วิจัยทุกท่าน และขอให้อำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยจงคุ้มครองทุกท่านที่กล่าวมาให้มีแต่ความสุขความเจริญตลอดไป สำหรับข้อผิดพลาด และข้อบกพร่องใดๆ ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

สุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
สัญลักษณ์.....	XIII
คำคงที่.....	XV
คำนำ.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 นิยามของเซนเซอร์.....	2
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 แนวโน้มและการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตัวตรวจจับทางเคมีในอนาคต.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการตรวจจับทางเคมีของสารกึ่งตัวนำ.....	4
2.1 การตรวจจับทางเคมีแบบสารกึ่งตัวนำ.....	4
2.1.1 วัสดุตรวจจับทางเคมี.....	4
2.1.2 การดูดกลืนก๊าซ.....	5
2.2 ปฏิกิริยาของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ.....	7
2.2.1 สถานะพื้นผิว (Surface States) ในการตรวจจับทางเคมี.....	7
2.2.2 การดูดกลืนออกซิเจน.....	12
2.2.3 อันตรกิริยาของก๊าซเผาไหม้กับการดูดกลืนออกซิเจน.....	13
2.3 กลไกในการตรวจจับก๊าซของซิงค์ออกไซด์.....	16
2.3.1 การตรวจจับของซิงค์ออกไซด์.....	17
2.4 ผลจากขอบเกรน (Grain boundary effect).....	18
2.5 ค่ะตะไลต์ (Catalysts).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่บนสื่อออนไลน์และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำมาใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	21
3.1 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์.....	21
3.2 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction).....	22
3.3 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่องSEM (Scanning Electron Microscopy).....	24
3.4 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect).....	26
บทที่ 4 การสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	29
4.1 ระบบการสร้างฟิล์มบาง.....	29
4.2 สปีดเตอร์ริง.....	29
4.2.1 ความหมายของ “สปีดเตอร์ริง”	29
4.2.2 สภาวะพลาสมา.....	33
4.2.3 โครงสร้างของระบบเคลือบฟิล์ม โดยวิธีสปีดเตอร์ริง.....	34
4.2.4 อัตราการเคลือบฟิล์ม.....	35
4.2.5 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง (microstructure of thin film).....	36
4.2.6 การสปีดเตอร์เป่าที่เป็นสารประกอบ.....	37
4.2.7 การก่อตัวเป็นฟิล์มจากการสปีดเตอร์ของสารประกอบ	38
4.2.8 ดีซี สปีดเตอร์ริง (DC Sputtering)	38
4.2.9 อาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง (RF Sputtering).....	40
4.3 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยใช้ระบบ- อาร์เอฟสปีดเตอร์ริง.....	42
4.4 ส่วนประกอบที่สำคัญของ SPF - RF Sputtering System	42
4.5 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบาง ZnO โดยใช้ระบบสปีดเตอร์ริง.....	44
4.6 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะโดยใช้ระบบดีซี สปีดเตอร์ริง.....	45
4.7 อัตราการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	46
4.8 อัตราการสร้างฟิล์มบาง Al, Pd, Pt และ Ti.....	46
บทที่ 5 การออกแบบและการสร้าง	48
5.1 การออกแบบไดอะแฟรม.....	48
5.2 กระบวนการออกแบบฮีตเตอร์.....	49
5.3 การออกแบบลวดลายหัววัดก๊าซ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

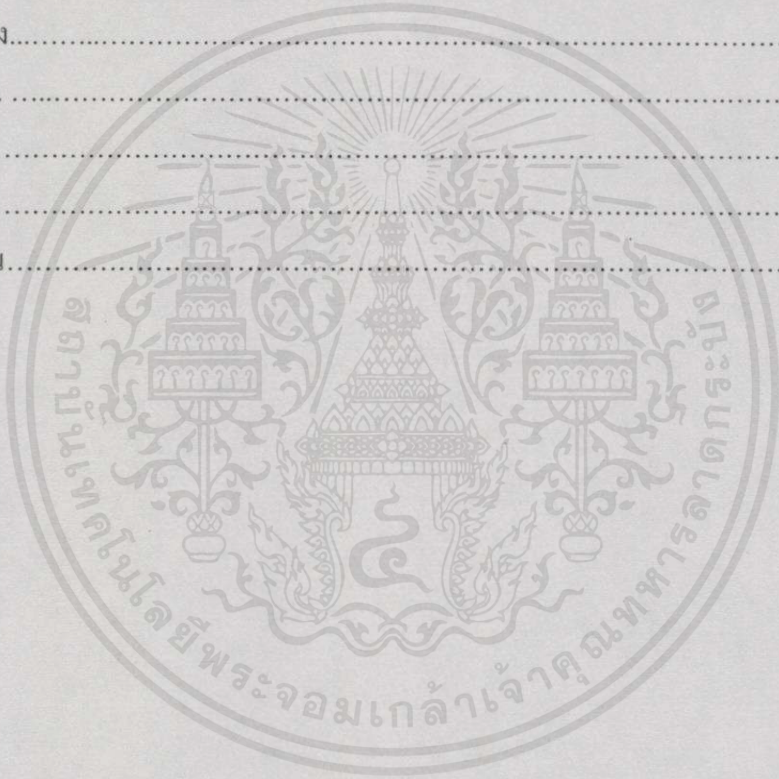
หน้า

5.4 การสร้างกระจกมาส์กต้นแบบ.....	51
5.5 ขั้นตอนการสร้างหัววัดก๊าซ.....	54
5.5.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)	54
5.5.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography).....	56
5.5.3 กระบวนการสร้างลวดลาย (Metalization).....	58
5.5.4 การสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	58
5.5.5 กระบวนการเก็บประจุ.....	58
5.6 กระบวนการสร้างหัววัดก๊าซซิงค์ออกไซด์.....	58
5.7 กระบวนการสร้างหัววัดก๊าซโดยการเติมสารละลาย.....	73
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง.....	76
6.1 การศึกษาเงื่อนไขอัตราส่วนของ Ar-O ₂	76
6.1.1 การศึกษาอัตราการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	76
6.1.2 การศึกษาความไวของหัวก๊าซ.....	77
6.2 การศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ Ar-O ₂ (85:15).....	78
6.2.1 การศึกษาอัตราการเกิดฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ระหว่างกำลัง RF กับอุณหภูมิ ฐานรอง.....	79
6.2.2 การศึกษาความต้านทานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์กับอุณหภูมิฐานรอง.....	80
6.2.3 ผลความดันก๊าซ Ar-O ₂ ต่อค่าความต้านทานผิว.....	80
6.2.4 การตรวจจับก๊าซแอมโมเนียของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	82
6.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	83
6.3.1 ผลต่อเม็ดเกรน.....	83
6.3.2 ผลต่อการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	85
6.3.3 ผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซ.....	89
6.3.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	89
6.4 ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองก๊าซ.....	91
6.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อการแอนนัลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์.....	92
6.4.2 ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียต่ออุณหภูมิแอนนัล.....	93
6.4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการตรวจจับแอมโมเนีย.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ออกทั้งนี้เพื่อให้ได้คณาจารย์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

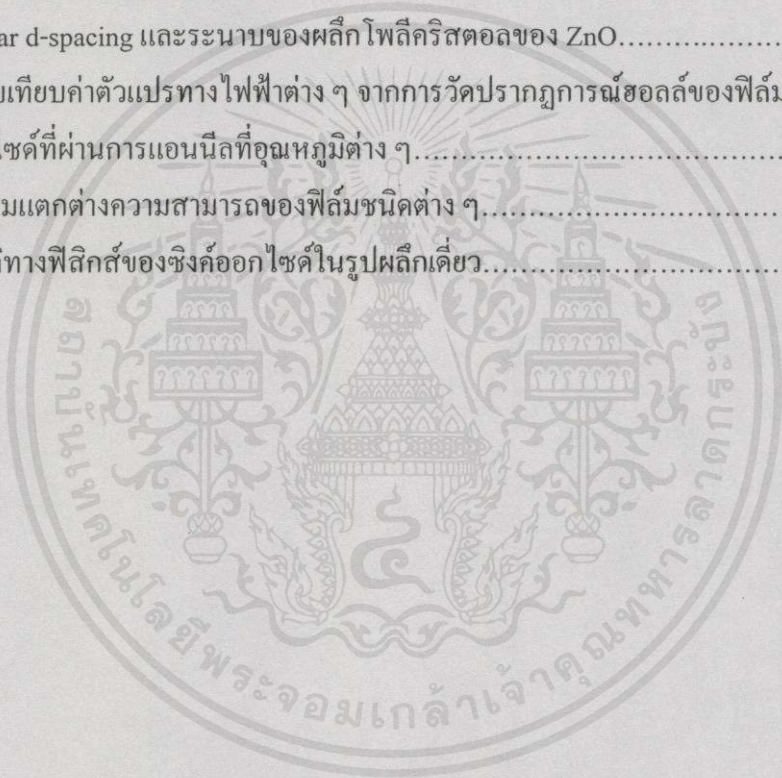
	หน้า
6.5 ผลของการเติมสารคะตะไลต์ต่อการตรวจจับก๊าซ.....	94
6.5.1 ผลการเติมสารตัวเติม Al , Pd และ Pt ต่อการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	95
6.5.2 ลักษณะพื้นผิวเมื่อเติมสารคะตะไลต์.....	96
6.5.3 การเติมสารคะตะไลต์ Al, Pd และ Pt และการตรวจจับแอมโมเนีย.....	98
6.6 การพัฒนานำไปใช้.....	100
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	103
เอกสารอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก ก.	108
ภาคผนวก ข.	110
ภาคผนวก ค.	113
ประวัติผู้เขียน.....	114



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาเติมตัวอะตอมโลหะในการทดสอบกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ	20
5.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น	59
5.2 ขั้นตอนการโฟโตลิโธกราฟีน้ำยาไวแสงชนิดลบ	60
5.3 ขั้นตอนการเตรียมช่อง	61
5.4 ขั้นตอนการโฟโตลิโธกราฟีน้ำยาไวแสงชนิดบวก	62
5.5 กระบวนการซินเตอร์ริง	73
6.1 ผลของความต้านทานผิวของซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ	81
6.2 ค่า Inplanar d-spacing และระนาบของผลึกโพลิคริสทอลของ ZnO	88
6.3 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง- ซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนیلที่อุณหภูมิต่าง ๆ	91
1 ก แสดงความแตกต่างความสามารถของฟิล์มชนิดต่าง ๆ	108
2 ก คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซิงค์ออกไซด์ในรูปผลึกเดี่ยว	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers).....	2
2.1 พลังงานการดูดกลืนทางเคมีและทางฟิสิกส์.....	6
2.2 ปริมาณการดูดกลืนก๊าซที่อุณหภูมิต่าง ๆ	6
2.3 แบบจำลองการเกิดประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ อะตอมผู้ให้ (Donor) และอะตอมผู้รับ (Acceptor) สถานะผิวจะแสดงถึงความหนาแน่นของแถบระดับพลังงาน $N(E)$	9
2.4 ลักษณะแบบจำลองแถบพลังงาน double layer ชนิดต่าง ๆ.....	10
2.5 แผนภาพพลังงานของออกซิเจนที่สถานะต่าง ๆ ในการดูดซับพลังงานที่ผิวของโลหะออกไซด์.....	14
2.6 ชั้นปลอดประจุบนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอธิบายด้วยแถบพลังงาน.....	17
2.7 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ.....	18
2.8 พลังงานศักย์ที่ทางเดินกระแส (Current path) ในซิงค์ออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ เมื่อความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางจะน้อยกว่าค่าของ Debye length.....	19
2.9 ปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัส เมื่อเติมตัวกระตุ้น.....	20
3.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์.....	21
3.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบภายในผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์.....	22
3.3 เครื่อง X-Ray Diffraction (กองฟิสิกส์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ).....	23
3.4 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กับค่ามุมแบรกก์ของ โครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite ของ ZnO จาก JCPDS	24
3.5 โครงสร้างระบบของเครื่อง SEM.....	25
3.6 ภาพถ่ายเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ของ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).....	25
3.7 สารตัวอย่างแผ่นแบนรูปทรงใด ๆ.....	26
3.8 การวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์.....	27
4.1 เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบางโดยการปลูกผลึกชนิดต่าง ๆ.....	29
4.2 กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนผิวของเป้า.....	30
4.3 การสปีดเตอร์เปรียบเทียบเหมือนกันชนด้วยลูกบิลเลียด.....	31
4.4 การถ่ายถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปีดเตอร์ริง.....	31
4.5 ลักษณะแบบฉบับของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสปีดเตอร์กับพลังงานไอออนบวก.....	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 โครงสร้างของระบบไดโอดไฟตรง.....	34
4.7 ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอร์ริง.....	34
4.8 แบบจำลองโครงสร้าง (Zone model) แสดงอิทธิพลของวัสดุรองรับและความดันก๊าซอาร์กอน ที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางที่ทำการเคลือบด้วย วิธีสปีดเตอร์ริง.....	37
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไอออนโมเลกุลคู่ (MO^+/M^++MO^+) กับพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของโลหะออกไซด์	37
4.10 แบบจำลองการเกิด DC diode sputtering.....	39
4.11 ระบบสปีดเตอร์ริงแบบ RF sputtering.....	41
4.12 รูป SPF - RF Sputtering System.....	42
4.13 ภาพแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุรุ่น 922-9502A.....	43
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์กับเวลาในการสปีดเตอร์ริงโดยใช้ก๊าซผสม Ar-O ₂ (85:15).....	46
4.15 ความสัมพันธ์อัตราการเกิดฟิล์มกับเวลาในการสปีดเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน.....	47
5.1 รายละเอียดการกัดซิติคอน โดยสารละลาย.....	48
5.2 โครงสร้างไมโครฮีเตอร์.....	49
5.3 ลวดลายไมโครฮีเตอร์.....	50
5.4 ภาพโครงสร้างหัววัดก๊าซที่มีฮีเตอร์อยู่ด้านล่าง.....	51
5.5 ภาพถ่ายโปรแกรม LEDIT ที่นำมาออกแบบลวดลายต้นแบบ.....	52
5.6 ต้นแบบมาสก์ที่ 1 ใช้สร้างจุด Alignment.....	52
5.7 ต้นแบบมาสก์ที่ 2 เปิดช่องไดอะแฟรม.....	52
5.8 ต้นแบบมาสก์ที่ 3 ใช้สำหรับสร้างฮีเตอร์.....	53
5.9 ต้นแบบมาสก์ที่ 4 สำหรับเจาะช่องขั้วของฮีเตอร์.....	53
5.10 ต้นแบบมาสก์ที่ 5 สำหรับสร้างขั้วอิเล็กโตรด.....	53
5.11 ต้นแบบมาสก์ที่ 6 สำหรับปิดช่องฟิล์มบาง ZnO ไม่ให้ถูกกัด.....	53
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของซิติคอนไดออกไซด์กับเวลา.....	55
5.13 ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	56
5.14 ขั้นตอนโฟโตลิโธกราฟีที่ใช้น้ำยาไวแสง.....	57
5.15 โครงสร้างขั้นตอนการสร้างหัววัดซิงค์ออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์.....	65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 ลักษณะโครงสร้างห้วัดก๊าซที่ใช้อุณหภูมิจนในการซินเตอร์ริง 600 องศาเซลเซียสและ เดิมสารคะตะไลต์.....	74
5.17 วงจรซิงค์ออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว.....	74
5.18 วงจรก๊าซเซนเซอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว.....	75
5.19 ภาพสารคะตะไลต์.....	75
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์กับกำลังเข้าที่พุทของความถี่วิทยุ แหล่งกำเนิดคลื่นที่ใช้ในการสปีดเตอร์ริง 150 วัตต์.....	77
6.2 ความสัมพันธ์ความไวในการตรวจจับของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์กับความเข้มข้นของ แอมโมเนียในเงื่อนไขปริมาณออกซิเจนในอาร์กอนที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	78
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์กับกำลังเข้าที่พุทของแหล่ง กำเนิดคลื่นวิทยุ 100 ถึง 200 วัตต์ ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ริงโดยใช้อุณหภูมิจนารองค่าต่าง ๆ.....	79
6.4 ความสัมพันธ์ของความต้านทานแผ่นของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิจนารองกับกำลัง เข้าที่พุทของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุค่าต่าง ๆ	80
6.5 รูปถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ความดันก๊าซผสม Ar-O ₂ (85:15).....	81
6.6 ความสัมพันธ์ของความไวการตรวจจับต่อการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนียที่ความ- เข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5 และ 10% โดยปริมาตร กับค่าสภาพความต้านทานผิวก่อนการแอนนีส และหลังการแอนนีสที่ 400 องศาเซลเซียส.....	82
6.7 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM จากการสปีดเตอร์ริงใน บรรยากาศก๊าซผสมอาร์กอน-ออกซิเจน (85:15).....	84
6.8 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ทำการแอนนีส 1 ชั่วโมงด้วยเครื่อง SEM.....	84
6.9 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง ZnO ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟกชัน (ใช้ Cu K α) ที่ผ่านการ แอนนีสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในบรรยากาศอากาศสังเคราะห์ N ₂ :O ₂ (80:20).....	86
6.10 ภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนีสที่ 600 องศาเซลเซียส.....	87
6.11 ความสัมพันธ์ของความต้านทานเปลี่ยนแปลงในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิจน โดยการแอนนีสฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิจน 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	89
6.12 ระบบวัดการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย ด้วยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิจนในช่วง 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่จําการณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13 ความสัมพันธ์ของความไวในการตรวจจับก๊าซกับอุณหภูมิการทำงานของหัววัดก๊าซที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 10 % โดยปริมาตรของฟิล์มบางที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส.....	92
6.14 ความสัมพันธ์ความต้านทานเปลี่ยนแปลงกับความเข้มข้นแอมโมเนียที่ค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส.....	93
6.15 ความไวในการตรวจจับต่อก๊าซแอมโมเนียของตัวตรวจจับก๊าซสัมพันธ์กับเวลาในการตรวจจับก๊าซ (Operating Time) โดยใช้ความเข้มข้นแอมโมเนียที่ 10 % โดยปริมาตรที่อุณหภูมิหัววัดค่าต่าง ๆ.....	94
6.16 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารตัวเติมด้วยเอ็กซ์เรย์คัลฟแพกชั้นสเปกตรัม...95	
6.17 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเติมสารตัวเติมด้วยการสปีดเตอร์ริงเป็นเวลา 5 วินาที.....	97
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 10 % โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เมื่อเติมสารตัวเติมด้วยการ สปีดเตอร์ริงเป็นเวลา ค่าต่าง ๆ.....	98
6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับกับความเข้มข้นแอมโมเนียที่ค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ	100
6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซกับเวลาที่ใช้ไปในการตรวจจับโดยใช้หัววัดก๊าซที่เติมสาร AI	101
6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวต่อเวลาของก๊าซชนิดต่าง ๆ โดยใช้หัววัดก๊าซที่เติมสาร AI, Pd และ Pt.....	102
1 ข แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้นที่นำมาสร้างไมโครฮีทเตอร์.....	110
2 ข การเคลือบชั้น โลหะแพลทินัมด้วยกระบวนการคีซีสปีดเตอร์ริง.....	110
3 ข การซินเตอร์ริงโลหะแพลทินัมบนแผ่นซิลิคอน.....	111
4 ข สวดลายบนกระจกมาส์กเพื่อสร้างสวดลายโดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	111
5 ข ผ่านกระบวนการกัดสวดลายด้วยสารละลายเคมี HCl : HNO ₃ (3:1).....	112
6 ข ก่อนและหลังการทดสอบโดยป้อนกำลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ไมโครฮีทเตอร์.....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ค่าคงที่ชั่วขณะ	-
C	ค่าความจุไฟฟ้า	ฟารัด
E_C	พลังงานระดับความนำ	อิเล็กตรอน โวลต์
E_{CD}	ความกว้างของระดับอะตอมผู้ให้	อิเล็กตรอน โวลต์
E_{CS}	พลังงานระดับความนำที่สถานะผิว	อิเล็กตรอน โวลต์
E_D	พลังงานที่ระดับอะตอมผู้ให้	อิเล็กตรอน โวลต์
E_F	ระดับพลังงานระดับเฟอร์มิ	อิเล็กตรอน โวลต์
E_{FSS}	ระดับพลังงานระดับเฟอร์มิที่สถานะผิว	อิเล็กตรอน โวลต์
E_I	พลังงานที่ระดับครึ่งของแถบพลังงาน	อิเล็กตรอน โวลต์
E_S	พลังงานที่กำแพงศักย์	อิเล็กตรอน โวลต์
E_V	พลังงานระดับวาเลนซ์	อิเล็กตรอน โวลต์
E_{VS}	พลังงานระดับวาเลนซ์ที่สถานะผิว	อิเล็กตรอน โวลต์
E_0	พลังงานที่ทำให้ เคลื่อนที่จากออกซิเจนไปใน ชั้นแถบความนำ	อิเล็กตรอน โวลต์
e	ประจุของอิเล็กตรอน	คูลอมบ์
ΔG	พลังงานที่ใช้ในการย่อยสลายโมเลกุลของออกซิเจน	อิเล็กตรอน โวลต์
I_S	กระแสดิซซาร์จ	ไมโครแอมแปร์
ρ	สภาพความต้านทาน	$\Omega\text{-cm}$
R_S	แผ่นความต้านทาน	Ω/\square
σ	สภาพความนำ	$(\Omega\text{-cm})^{-1}$
i_s	ความหนาแน่นกระแสที่เป้า	แอมป์ต่อตารางเมตร
j	ความหนาแน่นกระแสที่ขั้วคาโทด	แอมป์ต่อตารางเมตร
K	ค่าคงที่เมื่อเป็น Lattice Scattering Mode ($3\pi/8$)	-
K_I	ค่าคงที่	-
I	ระยะห่างระหว่างคู่อิเล็กโตรด	เซนติเมตร
N	ความหนาแน่นของประจุที่สถานะผิว	(cm^{-2})
$N(E)$	ความหนาแน่นของระดับพลังงาน	(cm^{-3})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
N_D	ความหนาแน่นของผู้ให้ในสาร	(cm^{-3})
N_S	ความหนาแน่นของประจุบนผิว	(cm^{-3})
n_s	ความหนาแน่นของประจุพาหะที่ผิว	(cm^{-3})
P	ความดันก๊าซ	Kg/cm^2
q	ประจุไฟฟ้า	คูลอมป์
R	ค่าความต้านทานฟิล์มที่สภาวะปกติ	โอห์ม
R_y	ค่าความต้านทานฟิล์มขณะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซ	โอห์ม
ΔR	ค่าความไวการตรวจจับ	-
R_H	ค่า Hall coefficient	cm^3/C
r_c	รัศมีคาโรต	เซนติเมตร
s	สัมประสิทธิ์ในการสปีดเตอร์	-
t	ความหนา	มิลลิเมตร
V_H	แรงดันฮอลล์	ไมโครแอมป์
V_R	ความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 1 และ 2	อ็องสตรอม
T	อุณหภูมิ	เคลวิน
t	เวลา	นาที่
X_0	ความหนาแน่นของชั้น Space charge	
ψ	ศักดาที่ double layer	โวลต์
ψ_s	ศักดาที่ผิวสัมผัสกับเนื้อสาร	โวลต์
ϵ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	-
ϵ_0	ค่าเพอร์มิติวิตีในอากาศ	F/cm
μ_H	ค่าความคล่องตัวของพาหะ	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
λ	ความยาวคลื่น	นาโนเมตร
λ_0	ค่า Mean free path	-
σ	สภาพความนำ	$(\Omega\text{-cm})^{-1}$
ρ	สภาพความต้านทาน	$(\Omega\text{-cm})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่

ϵ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	8.854×10^{-14} F/cm
ϵ_0	ค่าเพอร์มิติวิตี	$4\pi \times 10^{-7}$ henry/m
π	ไพร์	22/7
q	ประจุไฟฟ้า	1.6×10^{-19} คูลอมบ์
N	Avogadro's Number	6.02×10^{26} (k.mole) ⁻¹
k	ค่าคงที่ของโบสต์มันส์	1.38×10^{-23} JK ⁻¹



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาไปอย่างมาก และมีบทบาทสำคัญในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มากมาย ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ส่วนมากจะถูกสร้างขึ้นบนฐานรองที่เป็นผลึกซิลิคอน ทำให้ผลึกซิลิคอนกลายมาเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีความสำคัญสำหรับนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

ซึ่งในการทำโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการจัดเก็บและใช้สารเคมีและก๊าซที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและมนุษย์เป็นจำนวนมากอีกทั้งตามห้องปฏิบัติการในสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ยังมีการทดลองเกี่ยวข้องกับสารเคมีหรือก๊าซที่เป็นอันตรายซึ่งโดยมากจะไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์หรือตัวตรวจจับก๊าซเหล่านี้เพราะอุปกรณ์ในการตรวจจับเหล่านี้ยังมีราคาค่อนข้างสูงซึ่งยังไม่เหมาะสมกับสถานะเศรษฐกิจในปัจจุบัน ดังนั้น ทางศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีศักยภาพในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยสร้างบนฐานรองซิลิคอน จึงมีแนวคิดและทำการสร้างตัวตรวจจับก๊าซเพื่อที่จะรักษาความปลอดภัยและกับสิ่งแวดล้อมให้ผู้ที่ทำงานหรืออยู่โดยรอบโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งกับผู้ที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีและก๊าซอันตรายเหล่านี้อีกด้วย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนอการทำวิจัยเรื่องตัวตรวจจับก๊าซบนฐานรองซิลิคอนรวมถึงการพัฒนาการนำไปใช้ โดยหัวข้อนี้ เป็นวัสดุทำจากโลหะออกไซด์ของสังกะสีที่สร้างจากกระบวนการสปีดเตอริง ซึ่งโลหะออกไซด์นี้เมื่อได้รับก๊าซเข้ามาในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะออกไซด์ ขั้นตอนในการสร้างตัวตรวจจับก๊าซและการทดสอบในการตรวจจับจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึงความหมายของก๊าซเซนเซอร์ ชนิดของก๊าซเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ รวมถึงแนวโน้มการพัฒนาใช้หัววัดก๊าซเซนเซอร์

บทที่ 2 เนื้อหาจะกล่าวถึงทฤษฎีของอุปกรณ์ตรวจจับทางเคมี และปฏิกิริยาของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำกลไกในการตรวจจับก๊าซ และผลจากการเติมสารคะตะไลต์ลงในโลหะออกไซด์ที่ช่วยให้การตรวจจับดีขึ้น

บทที่ 3 เนื้อหาจะกล่าวถึง การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มด้วยเครื่อง อิเล็กตรอน ไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) และการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect Measurement)

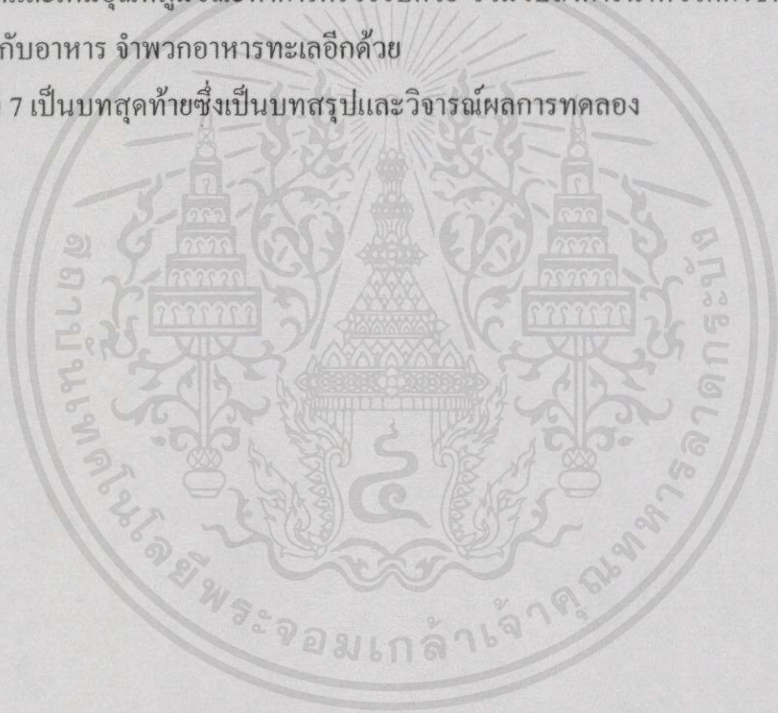
บทที่ 4 เนื้อหาจะกล่าวถึง กระบวนการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการสปีดเตอริง ความหมายของสปีดเตอริง, หลักการการสปีดเตอริง, ดิซี สปีดเตอริง, อาร์เอฟ

สปีดเทอรริ่ง, เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสปีดเทอรริ่ง, โครงสร้างของระบบสปีดเทอรริ่งและรวมถึงขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยกระบวนการสปีดเทอรริ่ง

บทที่ 5 เนื้อหาจะกล่าวถึงการออกแบบดินแบบไมโครฮีทเตอร์และหัววัดก๊าซที่มีขั้นตอนการสร้างฟิล์มชั้นต่าง ๆ ลงบนแผ่นรองซิลิคอน และการสร้างวัสดุตรวจจับก๊าซ เมื่อเติมสารคะตะไลต์

บทที่ 6 เนื้อหาจะกล่าวถึง ผลจากการวิเคราะห์ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ด้วย เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน สเปกตรัม การถ่ายผิวหน้าของฟิล์ม ในเงื่อนไขการสร้างหลายอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอาร์กอน-ออกซิเจนในขณะทำการสปีดเทอรริ่ง ความดันของอาร์กอน-ออกซิเจน อุณหภูมิแอนนิลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ขณะทำการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย นอกจากนี้ จะมีผลการทดลองเติมสารคะตะไลต์และเพิ่มอุณหภูมิขณะทำการตรวจจับด้วย รวมไปถึงการนำหัววัดก๊าซที่พัฒนาแล้วนำไปทดลองวัดกับอาหาร จำพวกอาหารทะเลอีกด้วย

บทที่ 7 เป็นบทสุดท้ายซึ่งเป็นบทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การตรวจวัดปริมาณสารในด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีจุดมุ่งหมายสำคัญคือการวิเคราะห์ตัวผลิตภัณฑ์หรือตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตทุกขั้นตอนไม่ว่าจะในระหว่างการผลิตจนถึงการสิ้นสุดของกระบวนการ ต้องใช้รูปแบบและกระบวนการวัดที่มีประสิทธิภาพซึ่งวิธีการวัดได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วโดยมีทั้งการวัดในทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี

การวัดทางด้านกายภาพนั้นได้แก่ การวัดมวล, ปริมาตร, ความหนาแน่น, อัตราการไหล, อุณหภูมิและความดัน เป็นต้น ส่วนในด้านการวัดทางเคมีนั้นต้องอาศัยองค์ประกอบและเครื่องต่าง ๆ เช่นพีเอชมิเตอร์ (pH meter) แก๊สและลิควิดโครมาโตกราฟี (Gas-Liquid chromatography), สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) และ อีออนซีเลกทีฟอิเล็กโทรด Ion-selective electrode) เป็นต้น โดยที่เครื่องมือเหล่านี้จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในการวัดตัวแปรหรือสารตัวอย่างที่ต้องการวัดนั้นได้โดยตรงอีกทั้งยังสามารถทำการวัดตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพที่ทำให้เครื่องมือหรือตัวเซนเซอร์ที่วัดตอบสนอง

การใช้วัสดุวิเคราะห์ปริมาณสารที่เรียกว่า Chemical assay^[1] เรามักใช้เวลาเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์และใช้วัสดุในการตรวจวัดจำพวกเนื้อสารที่มาจากโลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มาเป็นตัววิเคราะห์แก๊สแอมโมเนีย (NH₃) ซึ่งปัจจุบันมีหัววัดทางเคมีนำไปต่อเข้ากับเครื่องวัดทางไฟฟ้าเพื่อการวัดหาปริมาณสารตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเครื่องมือวัดนี้จะเรียกว่า เคมีเซนเซอร์ (chemsensors)

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

การพัฒนาแก๊สเซนเซอร์สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเคมีที่ยังไม่ได้สร้างบนฐานรองซิลิคอนอย่างเช่นใช้ โลหะออกไซด์, เซรามิก, โพลีเมอร์ เป็นต้น โดยโครงสร้างของแก๊สเซนเซอร์ยังมีขนาดใหญ่และจำนวนที่ทำการผลิตแต่ละครั้งยังมีจำนวนน้อย ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าถ้าผลิตตัวอุปกรณ์เซนเซอร์ด้วยเทคโนโลยีซิลิคอนแล้วย่อมสามารถสร้างให้มีขนาดที่เล็กลงและผลิตได้เป็นจำนวนมากอีกด้วยซึ่งจะทำให้ตัวอุปกรณ์นั้นมีราคาถูกลงและทั้งยังสามารถสร้างวงจรรวมอื่น ๆ เพิ่มเติมลงในตัวอุปกรณ์ได้ในอนาคตต่อไปอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 นิยามของเซนเซอร์

การควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์เป็นส่วนสำคัญที่จะแสดงผลออกมาแทนการตอบสนองของประสาทสัมผัสของมนุษย์ ทั้งจากการได้ยิน, การสัมผัส, การดมกลิ่น, การลิ้มรสและการมองเห็น โดยการตรวจจับทางเคมีนั้นต้องการความถูกต้องสูงในการวัดความเข้มข้น และควบคุมปริมาณที่ต้องการวัดได้อย่างแม่นยำและสามารถแยกแยะ มีความไวในการตอบสนองได้ดี อย่างไรก็ตามในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยอย่างกว้างขวางจนมีการผลิตเซนเซอร์ออกมาจำหน่ายออกสู่ท้องตลาดหลายชนิด

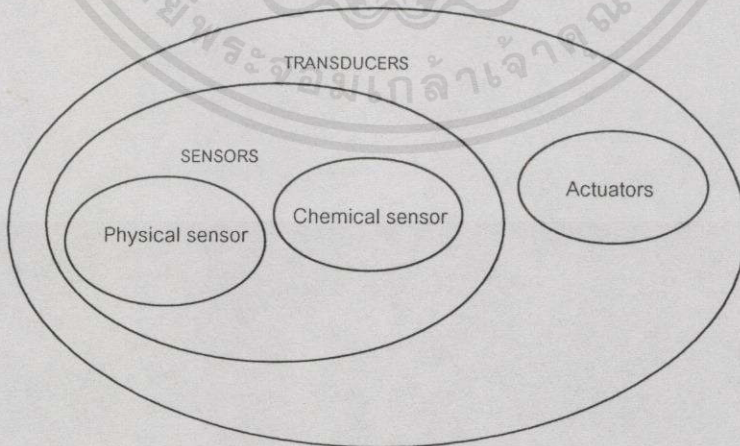
ตัวอย่างเช่น กุณโศสเซนเซอร์ซึ่งปัจจุบันสามารถสร้างได้ง่ายและมีราคาถูกซึ่งสามารถนำมาใช้แล้วทิ้งได้เลย เพื่อให้การตอบสนองและมีความถูกต้องแม่นยำที่ดี

การแยกชนิดของเซนเซอร์และอุปกรณ์ในการตรวจจับสามารถแบ่งออกเป็นหลักกว้าง ๆ คือ ทรานสดิวเซอร์ (Transducers), เซนเซอร์ (Sensors), แอคทูเอเตอร์ (Actuators)

ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) หมายถึง อุปกรณ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่ง โดยพลังงานมีอยู่หลายรูป เช่น ทางไฟฟ้า, ทางกลศาสตร์, ทางแสง, ทางความร้อน

เซนเซอร์ (Sensors) หมายถึง ทรานสดิวเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์วัดความดัน, โฟโตทรานซิสเตอร์

แอกทูเอเตอร์ (Actuators) หมายถึง ทรานสดิวเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณในรูปอื่นโดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณในรูปกลศาสตร์เช่น โซลินอยด์, เปียโซอิเล็กทริก ดังในรูปที่ 1.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 1.1 การจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers) อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ให้ได้ฟิล์มที่มีผิวเรียบสม่ำเสมอยึดติดได้แน่นกับวัสดุรองรับ
2. เพื่อศึกษาการตอบสนองของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อก๊าซแอมโมเนีย
3. เพื่อพัฒนาก๊าซเซนเซอร์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการทำงานของระบบ อาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง (RF sputtering)
2. เตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์
3. วัดและวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม
4. สรุปผลการทดลอง

1.5 แนวโน้มและการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตัวตรวจจับทางเคมีในอนาคต

ปัจจุบันอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซที่มีใช้กันซึ่งก็คือ เซนเซอร์ที่จับปริมาณออกซิเจน โดยใช้โลหะออกไซด์ของ ZnO , SnO_2 , In_2O_3 หรือ Fe_2O_3 เป็นตัวตรวจจับเซนเซอร์วัดความชื้น และเซนเซอร์วัดอัตราการเผาไหม้^[21] ที่สัดส่วนของ electrolyte สำหรับวัดประสิทธิภาพอัตราการเผาไหม้ในรถยนต์และตัวตรวจวัดอื่น ๆ แต่ในเชิงพาณิชย์แล้วตัวตรวจจับก๊าซจะต้องมีราคาไม่แพง และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป เพื่อใช้ในการตรวจจับก๊าซเผาไหม้และชนิดพิเศษที่มีความไวต่อการเผาไหม้สูง (ประมาณ 5 % ของระดับต่ำสุดที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้)

ความต้องการตัวตรวจจับที่มีราคาถูก ที่จำเป็นสำหรับสถานที่ต่าง ๆ เช่น ในโรงงานผลิตชิป ไอซีและอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, เหมืองถ่านหิน, ห้องปฏิบัติการ, บัมพ์น้ำมันและโรงงานเก็บสารเคมีต่าง ๆ และในที่ชุมชน เช่น โรงงานอุตสาหกรรม, โรงพยาบาล, บ้าน, โรงภาพยนตร์และเรือ ซึ่งจะต้องมีเครื่องตรวจจับทางเคมี เพื่อวัดค่าระดับสูงสุดที่มนุษย์จะทนได้ ซึ่งจะมีกฎหมายคุ้มครองและควบคุม สำหรับโรงงานที่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อระบบต่าง ๆ ในร่างกายและสิ่งแวดล้อม เพื่อคุ้มครองผู้อยู่อาศัยและลูกจ้างที่ปฏิบัติงานอยู่ ดังนั้น นายจ้างควรจะต้องเตรียมตัวตรวจจับ, เครื่องมือหรืออุปกรณ์เพื่อที่จะป้องกันการรั่วของปริมาณสารพิษ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายและอาจจะระเบิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการตรวจจับทางเคมีของสารกึ่งตัวนำ

2.1 การตรวจจับทางเคมีแบบสารกึ่งตัวนำ

2.1.1 วัสดุตรวจจับทางเคมี

วัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวตรวจจับทางเคมี เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), ทินไดออกไซด์ (SnO₂), เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃), ทังสเตนไดออกไซด์ (WO₃) และอินเดียมไดออกไซด์ (In₂O₃) โดยอยู่บนฐานรองอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃), ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และมีตัวเติมบางชนิด เช่น เงิน (Ag), แพลทินัม (Pt) และพลาตินัม (Pd) ซึ่งจะช่วยให้ความไวในการตรวจจับดีขึ้น วัสดุตรวจจับทางเคมีสามารถสร้างได้โดยใช้เทคโนโลยีฟิล์มหนาหรือใช้เทคโนโลยีฟิล์มบางซึ่งจะสามารถตรวจจับก๊าซได้หลายชนิด เช่น แอมโมเนีย (NH₃), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S), ออซาไนต์ (AsH₃), ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x), หมูไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) และไอน้ำ

วัสดุตรวจจับทางเคมีที่ใช้โลหะออกไซด์เป็นวัสดุตรวจจับก๊าซ เมื่อโลหะออกไซด์ตรวจจับก๊าซจะทำให้สภาพความต้านทานของโลหะออกไซด์เปลี่ยนแปลง แบบจำลองที่ใช้อธิบายการลดลงของความต้านทาน คือ โมเลกุลออกซิเจนที่ผิวของโลหะออกไซด์จะแยกออกเป็นออกซิเจนอะตอม O⁻ และเมื่อ O⁻ ได้สัมผัสกับก๊าซ H₂ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาจนได้น้ำ (H₂O) และอิเล็กตรอนอิสระ (e⁻) ที่วิ่งในสารกึ่งตัวนำซึ่งจะทำให้ความต้านทานของโลหะออกไซด์มีค่าลดลงในที่สุด โดยปฏิกิริยาทั้งหมดจะเขียนได้ดังนี้^{[3][4]}



จากปฏิกิริยาที่ (2.2) เมื่อปริมาณ H₂ มากพอเพื่อเกิดปฏิกิริยากับ O⁻ จนทำให้ความเข้มข้นของ O⁻ ลดต่ำลงแล้ว e⁻ ในสารกึ่งตัวนำจะมากขึ้นซึ่งจะเป็นผลให้ค่าสภาพความต้านทานของสารกึ่งตัวนำลดลงด้วย

แบบจำลองอื่น เช่น การเผาไหม้ของก๊าซในปฏิกิริยาทางเคมีจะเป็นการดึงเอาแลตทิซ (Lattice) ออกซิเจนออกจากที่ว่างของโลหะออกไซด์ซึ่งจะแสดงว่าเป็น donors ออกซิเจนจากอากาศจะคอยแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับโลหะออกไซด์ทำให้เกิดที่ว่างของอะตอมผู้ให้ ดังนั้นจะมีการแย่งชิงกันระหว่างออกซิเจนที่เคลื่อนที่ออกจากอะตอมผู้ให้ที่ว่าง และก๊าซเผาไหม้จะให้อะตอมผู้ให้ที่ว่างไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัลแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าง ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ที่ว่างขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซเผาไหม้เพียงอย่างเดียว เพราะว่าความดันของก๊าซออกซิเจนคงที่เมื่ออยู่ในอากาศ

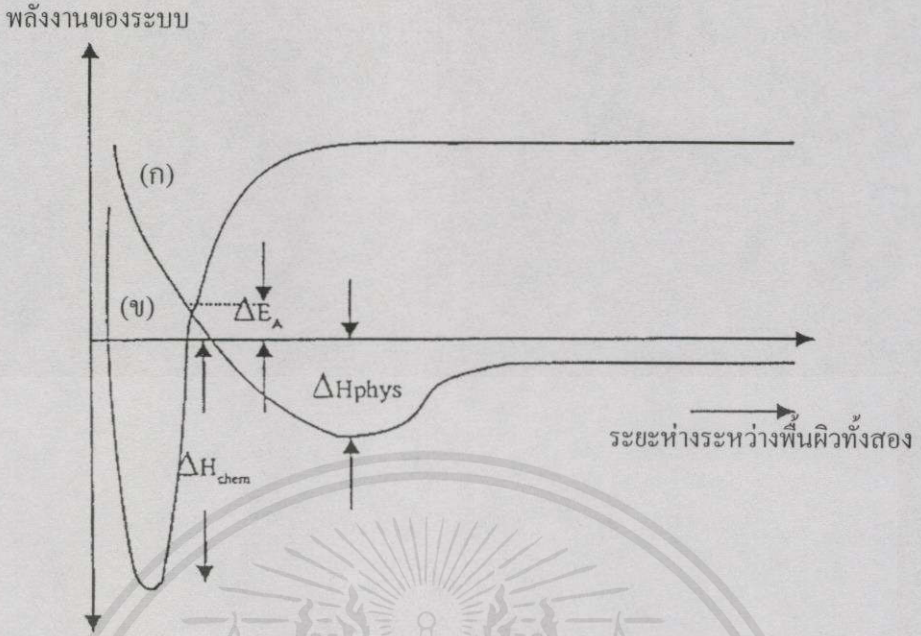
จากเหตุผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการสร้างวัสดุตรวจจับทางเคมีด้วยสารกึ่งตัวนำจะต้องรู้ว่าเมื่อสารกึ่งตัวนำได้สัมผัสกับก๊าซแล้วจะมีผลต่อสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า, การดึงเอา แลททิซออกซิเจนออกมาจะมีผลต่อสภาพความต้านทานอย่างไร, การให้ก๊าซเผาไหม้จะเป็นการดึงเอาผลึกออกซิเจนจะมีผลอย่างไร, การเติมสารคะตะไลต์ (Catalysts) จะมีผลอย่างไรต่อการทำปฏิกิริยาก๊าซเผาไหม้กับออกซิเจน และในที่สุดจะต้องรู้ว่า มีขั้นตอนทั้งหมดที่ใช้กระบวนการทางเคมี, ทางฟิสิกส์ เพื่อควบคุมการทำงานของตัวตรวจจับก๊าซ

2.1.2 การดูดกลืนก๊าซ

การดูดกลืนก๊าซที่พื้นผิวจะประกอบด้วย การดูดกลืนทางฟิสิกส์ (Physisorption) และการดูดกลืนทางเคมี (Chemisorption)

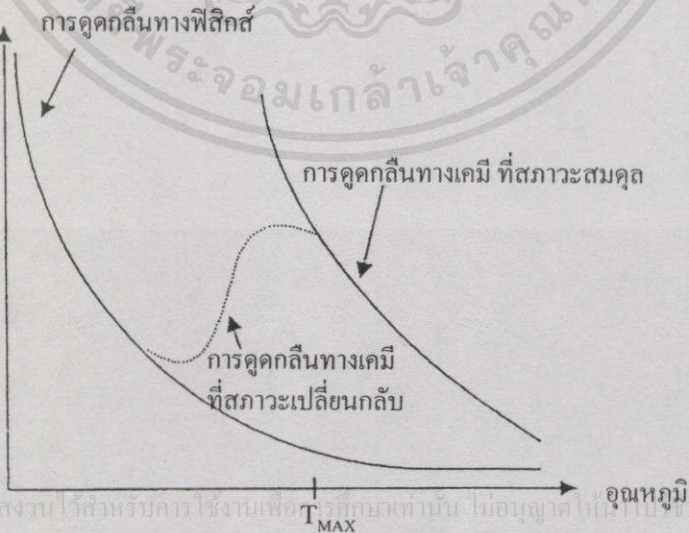
- 1) การดูดกลืนทางฟิสิกส์ จะเป็นการดูดกลืนที่ไม่แข็งแรงระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองด้วยแรงดึงดูดระหว่างขั้วไดโพล (dipole-dipole) มีพลังงานยึดเหนี่ยว 0.1 ถึง 0.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ($\Delta H_{\text{phys}} = 2$ ถึง 5 kcal mol^{-1}) พลังงานของระบบ (ΔH_{phys}) จะเป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.1 พลังงานของระบบจะมีค่ามากที่สุด เมื่อระยะห่างระหว่างพื้นผิวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ตามแบบจำลอง Lennard-Jones และเมื่อพิจารณาปริมาณการดูดกลืนทางฟิสิกส์จะมีปริมาณเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ดังในรูปที่ 2.2 ปริมาณการดูดกลืนทางฟิสิกส์จะปริมาณมากในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ
- 2) การดูดกลืนทางเคมีจะเป็นพลังงานการยึดเหนี่ยว จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการแยกโมเลกุลของก๊าซออกเป็นอะตอม พลังงานของระบบ (ΔH_{phys}) จะมีค่ามากกว่า 15 kcal mol^{-1} เมื่ออะตอมเข้าใกล้ผิวจะเกิดพันธะเคมี และพลังงานในการดูดกลืนทางเคมีจะมีค่าลบและมากกว่าพลังงานการดูดกลืนทางฟิสิกส์ ดังใน รูปที่ 2.1 และเมื่อพิจารณาปริมาณการดูดกลืนทางฟิสิกส์จะสังเกตปริมาณเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ดังในรูปที่ 2.2 ปริมาณการดูดกลืนทางเคมีจะปริมาณมากในช่วงที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 พลังงานการดูดกลืนทางเคมีและทางฟิสิกส์ โดยแบบจำลอง Lennard-Jones มีระยะห่างระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ΔE_A คือ พลังงานกระตุ้นในการดูดกลืนทางเคมี (ก) การดูดกลืนทางฟิสิกส์ (ข) การดูดกลืนทางเคมี พลังงานที่สามารถแยกโมเลกุลของอนุภาคจะอยู่ที่ตำแหน่งห่างระหว่างพื้นผิวทั้งสองมีค่าเข้าใกล้อนันต์ (∞)

ปริมาณการดูดกลืนก๊าซ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำเป็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 ปริมาณการดูดกลืนก๊าซที่อุณหภูมิต่าง ๆ

2.2 ปฏิกริยาของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ^[5,6,7]

2.2.1 สถานะพื้นผิว (Surface States) ในการตรวจจับทางเคมี

เนื่องจากโลหะออกไซด์ที่ใช้ทำวัสดุตรวจจับก๊าซจะเป็นสารชนิดเอ็น ดังนั้น จะพิจารณาที่สารกึ่งตัวชนิดเอ็นและปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัส ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีความเสถียรภาพไม่ดีเท่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในการตอบสนองที่ผิวกับก๊าซที่จะทำการทดสอบ

เมื่อพิจารณาอนุภาคที่ผิวสัมผัส อะตอมของผิวสัมผัสจะเกิดการจับพันธะที่มีระดับการเรียงอะตอมที่จับได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ จะมีการขาดหายไปของอะตอมรอบข้าง 1 หรือ 2 อะตอม จึงทำให้เกิดเป็นแขนห้อย (dangling bonds) ซึ่งจะไม่มีการชดเชยของส่วนที่หายไปและจะไม่มีการรวมกับอะตอมรอบข้างได้

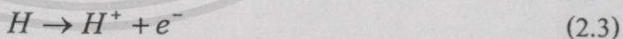
มีหลายกรณีที่ใช้โลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งทั้งอ็อนบวกและอ็อนลบจะมีการจัดเรียงอะตอมไม่เป็นระเบียบนัก ประจุบวกของสังกะสี (Zn) อ็อนจะถูกครอบคลุมด้วยประจุลบของออกซิเจนอ็อน เนื่องจากประจุที่เป็นลบรอบข้างมีอยู่น้อยมาก อ็อนของประจุบวกจึงมีความสามารถที่จะดึงเอาอิเล็กตรอนได้ ดังนั้นการจัดเรียงของแถบความนำในสภาวะนี้จะอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำกว่าแถบความนำจริงและสามารถดึงเอาอิเล็กตรอนจากเนื้อสารได้ เมื่อโลหะออกไซด์ทำปฏิกริยาเคมีกับค้างจนเกิดพันธะที่มีอนุมูล OH⁻ ซึ่งจะมีอิเล็กตรอนอิสระให้กับคู่พันธะ ซึ่งจะเหมือนกับว่าที่ผิวจะมีเฉพาะอ็อนลบ ดังนั้นจะทำให้ระดับพลังงานของประจุลบมีมากกว่าชั้นวาเลนซ์ที่เป็นจริง อ็อนเหล่านั้นจะสามารถดึงโฮลและให้อิเล็กตรอนกับเนื้อสาร แต่เมื่อเนื้อโลหะออกไซด์สัมผัสกับกรดที่มีอนุมูล H⁺ ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระจะไม่สามารถอยู่ในชั้นสถานะผิวได้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะสามารถอธิบายโดย แบบจำลองของ Madelung เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิต่ำ สารในสถานะของแข็งจะถูกครอบคลุมด้วยไอน้ำ ที่มีอนุมูล OH⁻ จะเกิดเป็นพันธะกับผิวที่เป็นอ็อนบวกและอนุมูล H⁺ จะอยู่ที่อ็อนลบ ดังนั้น อิทธิพลของน้ำในวัสดุตรวจจับก๊าซ จะทำให้เกิดความไม่ชัดเจน ถึงแม้ว่าเราพบว่า ตัวตรวจจับก๊าซหลายชนิดจะตอบสนองที่บริเวณที่มีความชื้นสูง ในขณะที่อุณหภูมิสูง น้ำที่ดูดซับอยู่นั้นสามารถจะถูกขับออกจากรอยสัมผัสของสถานะกรดหรือค้างกับอะตอมผู้ให้หรือผู้รับก็ได้

เหตุผลดังกล่าว จะอธิบายได้จากแถบพลังงานที่อยู่ในเทอมของ “surface states” ซึ่งจะมีทั้งสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับของอะตอมที่ผิว ดังรูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองแถบพลังงานที่ผิว E_C เป็นพลังงานที่แถบความนำ, E_V เป็นพลังงานที่แถบวาเลนซ์, E_i เป็นพลังงานที่ระดับครึ่งของแถบพลังงาน และ E_F เป็นแถบพลังงานที่ระดับเฟอร์มิที่สถานะผิว (surface state) สามารถเขียนได้ว่า ความหนาแน่นของแถบพลังงาน $N(E)$ เป็นฟังก์ชันกับ E ซึ่งมีเหตุผลอยู่หลายข้อที่สนับสนุนข้อเสนอนี้ เช่น ที่ชั้นของผิวที่มีอยู่หลายชั้นที่แสงสามารถทะลุผ่านผลึกได้ โดยแต่ละชั้นจะมีระดับพลังงานไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงแสดงแถบพลังงาน 2 ระดับที่อยู่ภายในสถานะผู้รับในเทอมของ A ที่เชื่อมโยงกับอ็อนลบ ที่ได้กล่าวมาแล้ว รูป 2.3(ก) คือแบบจำลองแถบพลังงาน เมื่อไม่มีการแลกเปลี่ยน

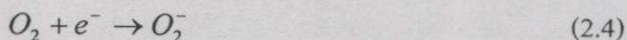
ประจําระหว่างสถานะผิวและสารกึ่งตัวนำ “flat bands” ในกรณีนี้ จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำ (E_F) จะไม่ต่อเนื่องกับระดับพลังงานเฟอร์มิที่มีสถานะผิว (E_{fs}) ส่วนในรูป 2.3(ข) จะแสดงกรณีที่สภาวะสมดุล อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขอบเขตที่ระดับเฟอร์มิ (E_F) ที่มีค่าสูงกว่า ซึ่งอยู่ใกล้ ๆ ผิวของสารกึ่งตัวนำไปยังขอบเขตที่มีพลังงานเฟอร์มิที่ระดับต่ำ (E_F) ที่บริเวณสถานะผิว การแยกกันของประจุจะทำให้เกิดเป็นสัคคาสองชั้น (double-layer) สถานะนี้ทำให้เกิดการยกระดับพลังงานที่ชั้นผิว ทั้ง E_{CS} และ E_{VS} ที่ผิว เมื่อสัคคาสองชั้น (double-layer voltage) มีค่ามากพอ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิมีค่าเท่ากันทั้งระบบ ($E_F = E_{fs}$) ระบบจะเข้าสู่สมดุล การเคลื่อนย้ายของแถบพลังงานบริเวณใกล้ ๆ ผิวนี้จะเรียกว่า band bending และทำให้ฟังก์ชันการกระจายของพลังงานเฟอร์มิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะอยู่ในระดับประมาณครึ่งหนึ่งของตำแหน่ง อะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ถ้ามีเพียง 1 ระดับพลังงาน ในทำนองเดียวกันระดับพลังงานเฟอร์มิจะเข้าระดับที่สมดุล ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่า เมื่อเข้าสู่สมดุลจะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน (band bending) ขึ้น

จุดที่น่าสนใจที่จะพิจารณา คือความสามารถในการดูดกลืนที่สถานะผิวจะเป็นการฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำหรือการรับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ (oxidizing agents) เช่น ไฮโดรเจนเมื่อถูกดูดกลืนก๊าซ จะฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำและจะได้เป็น H^+ ส่วนออกซิเจน เมื่อขณะดูดกลืนก๊าซจะจับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำและจะได้เป็น O^- ในทางคณิตศาสตร์จะสามารถแสดงกรณีที่คล้าย ๆ กับกรณีที่สถานะผิว นอกจากจะใช้เทอมของสถานะผิวในการอธิบายระดับพลังงานที่ผิวในขณะดูดกลืน

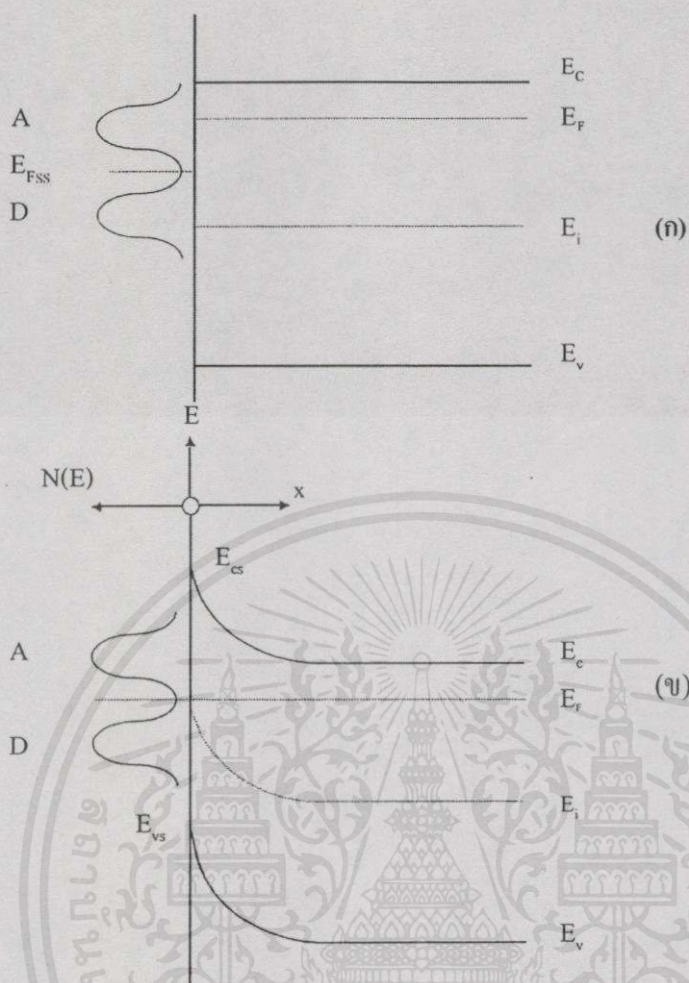
กระแสไฟฟ้าในรูปแบบ double layer ดังแสดงในรูป 2.3 (ข) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ซึ่งทั้ง 3 ชนิดสามารถสร้างแบบจำลองการดูดกลืนที่สถานะผิวโดยจะสมมุติให้มีระดับพลังงานอยู่เพียง 1 ระดับดังนั้นระดับพลังงานของผู้ให้นั้นจะเป็นกลางเมื่อไม่ถูกแรงยึดเหนี่ยว เช่น



หรืออะตอมผู้รับจะแสดงความเป็นกลางเมื่อไม่ถูกยึดเหนี่ยว เช่น

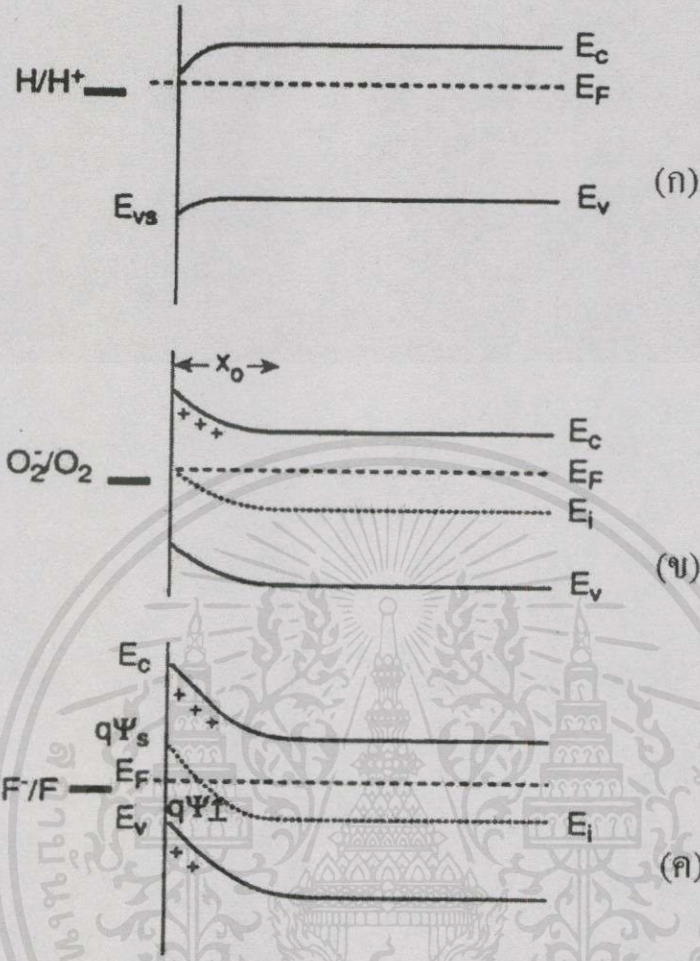


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการเกิดประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ อะตอมผู้ให้ (Donor:D) และอะตอมผู้รับ (Acceptor:A) สถานะผิวจะแสดงที่ความหนาแน่นของแถบระดับพลังงาน $N(E)$
 (ก) ในกรณีที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารกึ่งตัวนำและสถานะที่ผิว
 (ข) แถบพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนจากผิวของสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปยังสถานะที่ผิวจนถึงสถานะสมดุล

ถ้าอิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปในในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n) จะเกิดชั้นสะสมของประจุ (accumulation layer) ซึ่งแสดงในรูป 2.4(ก) การเกิดชั้น double layer ระหว่างประจุบวกที่สถานะผิวและประจุที่ฉีดเข้าไป เพราะว่าอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปจะเกิดการเคลื่อนที่จนอิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่มาปิดที่ผิวและผลทางไฟฟ้าจากชั้น double layer ที่ไม่ลึกมาก โดยอยู่ในช่วงประมาณ 10\AA ของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานเฟอร์มีที่ผิวจะเปลี่ยนไป $d\psi$ เมื่อ ψ เป็นศักดาที่ double layer ดังรูป 2.4(ก)



รูปที่ 2.4 ลักษณะแบบจำลองแถบพลังงาน double layer ชนิดต่าง ๆ

- (ก) ชั้นสะสม เมื่อที่ผิวมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวกมาก อิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดเข้าไปในแถบความนำโดยปล่อยให้บริเวณผิวมีประจุบวกและประจุลบที่สารกึ่งตัวนำ
- (ข) ชั้นปลดประจุพาหะ เมื่ออิเล็กตรอนที่แถบความนำถูกยึดไว้ที่ผิว ซึ่งจะถูกชดเชยที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ
- (ค) ชั้นกลับ (inversion layer) เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกยึดไว้มาก ซึ่งแสดงว่ามีการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นแถบความนำและชั้นวาเลนซ์

ระยะทางระหว่างประจุ d จะมีความสัมพันธ์กับค่าเก็บประจุที่ชั้น double layer (ฟารัด/พื้นที่หนึ่งหน่วย) ดังสมการ

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon\epsilon_0}{d} \cdot A \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกวดำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N เป็นความหนาแน่นของประจุที่สถานะผิวต่อพื้นที่ ε เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ε_0 เป็นค่าเพอร์มิติวิตี (permittivity) ในสุญญากาศ สำหรับชั้นสะสม ค่า d จะมีค่าน้อย ดังนั้นที่สภาวะสมดุล ค่า N จะมีค่ามาก การเคลื่อนย้ายประจุเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิโนสารกึ่งตัวนำเป็นการอธิบายการเกิดการยึดเหนี่ยวที่สถานะผิว (surface state) ชั้นสะสมจะเกิดขึ้นบนสารกึ่งตัวนำชนิด P เมื่อฟิล์มโฮลเข้าไปในชั้นวาเลนซ์ (อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากชั้นวาเลนซ์โดยตัวรับประจุที่แข็งแรง) ชั้นสะสมจะเกิดขึ้นระหว่างประจุลบที่สถานะผิวและโฮลที่ฟิล์มเข้าไปในชั้นวาเลนซ์

ถ้าอิเล็กตรอนถูกดึงออกจากชั้นแถบความนำของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n) โดยผู้รับประจุที่สถานะผิวจะเกิดเป็นชั้นปลอดประจุพาหะ (depletion layer) หรือ space-charge layer ที่ผิวซึ่งจะแสดงในรูป 2.4 (ข) หลังจากนั้นจะเกิด double layer ระหว่างประจุลบที่สถานะผิวและประจุบวกของอะตอมผู้ให้ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การดึงอิเล็กตรอนจะยังคงดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงระดับพลังงานเฟอร์มิโนสารกึ่งตัวนำซึ่งจะเป็นสถานะผิวของวัสดุตรวจจับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วประจุนี้จะมีค่า ๆ หนึ่งในชั้น double layer อย่างไรก็ตาม ในสารกึ่งตัวนำประจุจะถูกแบ่งเป็นอะตอมผู้ให้และจะมีจำนวนจำกัด การกำหนดจำนวนประจุจะแสดงถึงความหนาของชั้น double layer ที่ขยายเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ จากสมการที่ 2.5 ค่า d จะมีค่ามาก ในกรณีของ depletion layer มีความหนาแน่นของประจุที่สถานะผิวจะมีค่า ซึ่งอยู่ในช่วง 0.001 ของ monolayer ส่วนการเกิดชั้นปลอดประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิด P เมื่อโฮลถูกดึงจากแถบวาเลนซ์ โดยอะตอมผู้ให้จากชั้นสถานะออกจาก double layer ระหว่างประจุลบของไอออนผู้รับในเนื้อสารใกล้ ๆ ผิวและประจุบวกที่สถานะผิว

ชนิดที่สาม จะเรียกว่า inversion layer ซึ่งจะได้รับการสนใจในการนำมาสร้างก๊าซเซนเซอร์ชนิดมอสเฟตอยู่น้อย ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะเกิดชั้น inversion layer เมื่อมีความต้องการรับประจุอย่างรุนแรง (oxidizing agent) ที่ผิว ในรูปที่ 2.4 (ค) ตัวที่มีความสามารถ oxidizing agent สูง เช่น ฟลูออไรท์ ระดับพลังงานที่สถานะผิวมีค่าใกล้เคียงกับแถบวาเลนซ์ จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิที่ผิวจะเข้าสู่แถบวาเลนซ์ ถ้าระดับพลังงานเฟอร์มิที่ผิวจะเข้าสู่แถบวาเลนซ์มีมากกว่าแถบความนำซึ่งจะมีความหนาแน่นของโฮลมากพอ ในทางกลับกันอะตอมผู้รับที่สถานะผิวจะมีค่าน้อยในแถบความนำซึ่งแสดงว่าจะเกิดการดึงอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ในรูปที่ 2.4 (ค) ที่ผิวจะเกิด "inverted" ซึ่งในชนิดเอ็น จะเปลี่ยนเป็นชนิด P ที่ผิว ในกรณีของมอสเฟต inversion layer จะถูกการเหนี่ยวนำโดยการป้อนศักดาไฟฟ้าที่เกต การป้อนสนามไฟฟ้าด้วยค่าที่มากจะทำให้เกิดประจุบวกที่สารชนิดเอ็น ถ้าค่าสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอ บางส่วนของประจุบวกจะกลายเป็นโฮลในชั้นวาเลนซ์

เป็นที่แน่ชัดว่า ชนิดที่สำคัญที่สุดของ surface layer ในก๊าซเซนเซอร์ คือ ชนิดชั้นปลอดประจุพาหะ (depletion layer) ซึ่งในอนาคตจะได้รับการพิจารณาที่จะนำมาวิเคราะห์ โดยจะวิเคราะห์ในกรณีที่ใช้สถานะผิวง่าย ๆ เช่น ในขณะที่โมเลกุลของออกซิเจน ซึ่งเป็นตัวรับประจุในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ซึ่งเป็นวิธีที่จะหลีกเลี่ยงความยากในการหาค่าของโมเลกุลออกซิเจน) ดังจะ

วิเคราะห์ในสมการที่ 2.1) โดยกำหนดในเงื่อนไขที่สถานะผิวมีระดับพลังงานเพียงระดับเดียวและสมมุติอีกว่า ความหนาแน่นของสารที่เจือเข้าไปจะขึ้นอยู่กับระยะทาง ดังนั้น ทำให้ความสนใจจะพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดการดูดกลืนที่ทำให้สภาพความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนไป

โดย ψ แสดงศักดา (เป็นฟังก์ชันกับ x) ที่สัมพันธ์กับพลังงานศักย์ในเนื้อสาร สถานะผิวที่แสดงโดยรูปแบบง่าย ๆ ที่ single layer ถ้ามีการยึดเหนี่ยวที่ชั้นนี้ ที่ว่างจะเกิด reducing agent เช่น O_2^- แต่ถ้าไม่มีการยึดเหนี่ยวในชั้นนี้ บริเวณที่ว่างจะเกิด oxidizing agent เช่น O_2

2.2.2 การดูดกลืนออกซิเจน

แบบจำลองของแถบพลังงานที่ผิวสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็นที่ดูดกลืน O_2^- ในสถานะสมดุล ดังแสดงในรูป 2.4(ข) เมื่อเกิดชั้น double layer การเลื่อนตำแหน่งของระดับเฟอร์มิที่ผิวไปยังตำแหน่งอื่นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ O_2^-/O_2 เพราะว่า ฟังก์ชันการกระจายของระดับพลังงานเฟอร์มิที่สมดุลจะมีค่าไม่ต่างไปจากระดับพลังงานที่สถานะผิว ออกซิเจนที่ถูกดูดกลืนจะเกิดขึ้น double layer ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยที่ negative layer จะเป็นการดูดกลืนออกซิเจนและประจุบวกจะเป็นอะตอมผู้ให้ในเนื้อสารซึ่งจะให้อิเล็กตรอน ประจุทั้งหมดใน space-charge layer จะต้องเท่ากับประจุที่ดูดกลืนออกซิเจน ซึ่งจะกำหนดไว้ว่า

การพิจารณาข้างต้น ออกซิเจนจะถูกดูดกลืนจนเข้าสู่สมดุลที่ระดับพลังงานของออกซิเจนเข้าใกล้ระดับเฟอร์มิ ดังนั้นพลังงานเฟอร์มิจะหมายถึงการยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน O_2/O_2^- ที่ระดับพลังงาน E_{O_2} เนื่องจากความหนาแน่นของ O_2 คือ ความหนาแน่นของออกซิเจนที่ถูกดูดกลืน โดยความหนาแน่นนี้จะมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิและความดันของออกซิเจนมีค่าคงที่ จากหลักสถิติของพลังงานเฟอร์มิ

$$[O_2^-]/[O_2] = \exp\{-(E_F - E_{O_2})/kT\} \quad (2.6)$$

เมื่อ $[O_2] = N_s$ (ความหนาแน่นของประจุที่ผิว) และ E_{O_2} เป็น ระดับพลังงานที่สัมพันธ์กับ O_2/O_2^- ดังรูป 2.4(ข) จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) ทำให้ได้ค่า x_0 คือความหนาแน่นของชั้นปลอดประจุพาหะที่ผิวและสามารถคำนวณประจุความนำที่เกิดขึ้นได้เพราะว่าในชั้นนี้จะปลอดประจุพาหะ ความนำไฟฟ้าของฟิล์มบางจะขึ้นอยู่กับสภาพความนำ σ ความหนา t ความยาว L และความกว้าง w ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2.7)

สมมุติว่า ฟิล์มบางได้รับการสัมผัสกับอากาศเพียงด้านเดียว ถ้า x_0 เข้าใกล้ T ความนำไฟฟ้าจะตอบสนองต่อ x_0 จากสมการ (2.7) จะได้

$$dG/G = -dx_0/(t - x_0) \quad (2.8)$$

เมื่อพิจารณาผลของการลดตัวกระทำ (reducing agent) จะทำให้ค่าของ N_s เปลี่ยนแปลงกับความดันของ reducing agent และ x_0 เปลี่ยนแปลงกับ N_s

2.2.3 อันตรกิริยาของก๊าซกับการดูดกลืนออกซิเจน

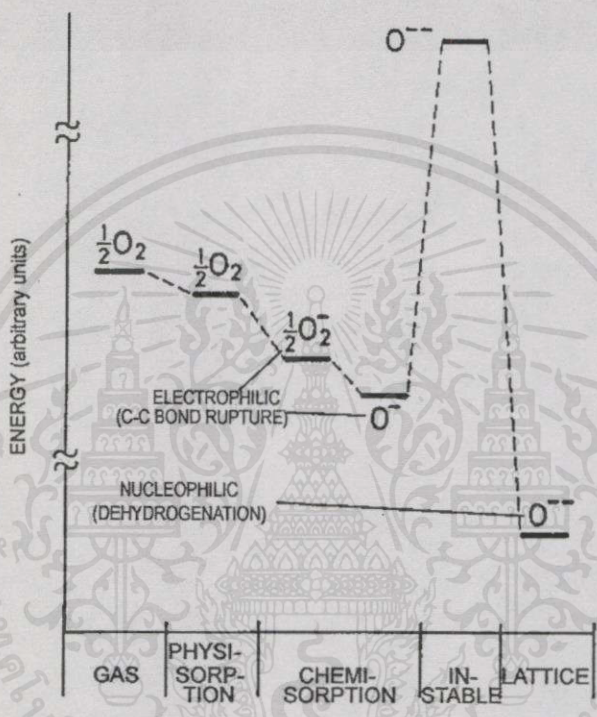
โลหะออกไซด์ทุกชนิดมีแนวโน้มที่จะมีสภาพความนำที่ผิวได้ เมื่อช่องว่างออกซิเจนมีพฤติกรรมในการเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น โดยทำให้ผิวเกิดสภาพความนำ ด้วยเหตุที่ว่าเมื่อมีการดูดกลืนเกิดขึ้น โดยที่ออกซิเจนไอออนมีพฤติกรรมเป็นตัวรับที่ผิวของโลหะออกไซด์ ทำให้ค่าความนำลดลง ดังรูปที่ 2.5 แสดงถึงออกซิเจนรูปแบบต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กันที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ผิว พลังงานที่แตกต่างระหว่าง $O^{\cdot-}$ (ads) และ $O^{\cdot-}$ (lat) มีค่าประมาณ 2,000 KJ/mole หรือ 20 eV ส่วน $\frac{1}{2} O_{2(gas)}$ และ $\frac{1}{2} O_{2(ads)}$ ประมาณ 140 KJ/mole หรือ 1.5 eV แต่ไม่แสดงถึงสถานะของพลังงานที่แตกต่างกัน

ที่อุณหภูมิห้องความสมดุลของ $O_{2(ads)}$ มีปฏิกิริยาต่อก๊าซออกซิเจนที่ช้ามาก ถึงแม้ว่าในปฏิกิริยาเคมีจะเกิดความร้อนขึ้นก็ตาม บนฟิล์มโลหะออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยา $O_{2(ads)} + e^- = 2 O^{\cdot-}_{ads}$ ทำให้อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้น โดยประมาณถึง 450 องศาเซลวิน และจะทำให้เกิด $O^{\cdot-}_{ads}$ อยู่ทั่วไป โดยข้อสรุปจะคล้ายคลึงกับการสังเกตุ ZnO เช่นเดียวกับการวัดฮอลล์ ส่วนบริเวณที่ออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงจะเป็นต้นเหตุให้เกิดความหนาแน่นประจุที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของการโค้งงอของแถบความนำที่ผิว ผลจากการวัดแถบความนำสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นช้ามาก ดังนั้นอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของตัวเซนเซอร์จะทำให้แถบความนำที่ผิวลดลง

บริเวณออกซิเจนที่จะทำให้เกิดความสมดุลทางเคมีขึ้นมาใหม่และการดูดซับออกซิเจนทั้งยังกลับไปเป็นรูปแบบอื่น ๆ ได้อีก โดยปฏิกิริยาของ $O^{\cdot-}_{ads}$ ที่มีค่าสูงและมีมากกว่า $O_{2(ads)}$ ในบริเวณนี้จะมีประจุทางลบมีค่าประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-3} โดยแถบจะโค้งถึงขั้นปอดคประจุ(ตามดังรูป 2.4) $O^{\cdot-}_{ads}$ จะไม่มีความมั่นคงและไม่มีการตอบสนองโดยที่ออกซิเจนไอออนจะตกลงสู่ช่องว่างของโครงผลึก โดยความสัมพันธ์ในช่วงก่อนหน้าที่มีการทำปฏิกิริยาการดูดซับ อิเล็กตรอนจาก O_2 และ $O^{\cdot-}$ จะเรียกว่า "Electrophilic" ก็คือเมื่อมีการสูญเสียอิเล็กตรอนเนื่องจากการแตกพันธะของไฮโดรคาร์บอน ทำให้ได้อิเล็กตรอนออกมา โดยที่ $O^{\cdot-}$ จะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึก หลังจากที่ผิวได้ดูดซับ

อิเล็กตรอนเข้ามาซึ่งอะตอมจะ ไม่มีความเสถียรเมื่อกลับเข้าสู่โครงสร้างผลึกก็จะคายพลังงานออกมา โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างนิวเคลียส ซึ่งจะเรียกว่า “Nucleophilic”

ที่ได้กล่าวมาการกระตุ้นพันธะที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ที่จะเกิดผลของการสูญเสียอิเล็กตรอนหรือการเกิดพันธะทางเคมีของอนุโมลติสระ



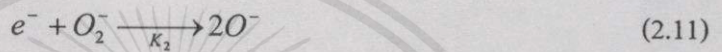
รูปที่ 2.5 แผนภาพพลังงานของออกซิเจนที่สถานะต่างๆในการดูดซับพลังงานที่ผิวของโลหะออกไซด์⁽⁸⁾

ขั้นตอนทางเคมีของกระบวนการออกซิเดชันของก๊าซเผาไหม้ เช่น CO, H₂ โดยการดูดกลืนออกซิเจนจะมีขั้นตอนที่ซับซ้อน สมมุติว่าตัวกระทำที่ถูกดูดกลืนในที่ว่างคือ O⁻ และข้อสังเกตอื่น ๆ ลักษณะที่เกิดขึ้นจะเป็นการสันของอิเล็กตรอน อย่างเช่น O₂⁻ จะมีการสัน 3 ครั้ง และ O⁻ จะมีการสัน 2 ครั้ง พบว่า H₂, CH₄, C₂H₆ และ CO ซึ่งจะจับ O⁻ ได้เร็วและจะไม่จับ O₂⁻ Lunsford ยังพบอีกว่า O⁻ จะเกิดปฏิกิริยามากกว่า O₂⁻ อย่างไรก็ตาม O₂⁻ จะไม่ทำปฏิกิริยาทั้งหมด ตัวอย่างเช่น O₂⁻ จะทำปฏิกิริยาในรูปของเอทธิลีน การเกิดปฏิกิริยาจะไม่มีการเลื่อนตำแหน่งของแขนพันธะทางเคมี เมื่ออัตราส่วนของ [O₂⁻]/[O₂] อยู่ที่

$$[O^-]/[O_2^-] = [O_2]^{-1/2} \exp[(-E_{O_2} - E_o - \Delta G/2)/kT] \tag{2.9}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E_0 เป็นพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก O อะตอมไปยังชั้นแถบความนำและ ΔG เป็นพลังงานที่ใช้ในการย่อยสลายโมเลกุลของออกซิเจนและจากการทดสอบของ ZnO , TiO_2 และ SnO_2 พบว่าที่อุณหภูมิสูง O^- จะเป็นตัวสำคัญสำหรับ ZnO ที่สัมผัสกับความดัน O_2 ทำให้ O^- จะเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิที่ 180 องศาเซลเซียส ส่วน TiO_2 จะเกิดที่ 400 องศาเซลเซียส ส่วน SnO_2 จะมีลักษณะเด่นที่อุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส สำหรับวัสดุเหล่านี้ อุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์จะตอบสนองก๊าซได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างปฏิกิริยาบนผิวจะแสดงได้ดัง สมการโดยมีตัวคะตะไลต์ที่ผิว



เมื่อ k 's มีอัตราค่าที่ R เป็นตัววัดดัชนี ให้ n_s เป็นความเข้มข้นของอิเล็กตรอน e^- ที่ผิว จะได้สมการที่สถานะผิว

$$d[O_2^-]/dt = k_1 n_s [O_2] - k_{-1} [O_2^-] - k_2 n_s [O_2^-] \quad (2.13)$$

$$d[O^-]/dt = 2k_2 n_s [O_2^-] - k_3 [R][O^-] = 0 \quad (2.14)$$

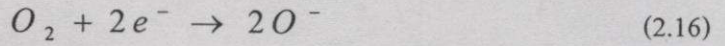
และจากสมการ (2.11) และ (2.12) จะหาประจุที่ผิว $N_s = [O^-] + [O_2^-]$ จะได้

$$N_s = \{k_1 n_s [O_2] / (k_{-1} + k_2 n_s)\} \{1 + 2k_2 n_s / k_3 [R]\} \quad (2.15)$$

ในสภาวะปกติ การดูดกลืนออกซิเจนจะเกิดขึ้นที่ผิวของโลหะออกไซด์ และเกิดการดึงอิเล็กตรอนออกจากแถบความนำ ดังนั้น ค่าสภาพความต้านทานจึงมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าสภาพความต้านทานผิวจะขึ้นอยู่กับความดันของออกซิเจน การดูดกลืนออกซิเจนที่ผิวของซิงค์ออกไซด์จะอยู่ในรูปของไอออน O_2^- , O^- และ O^{2-} โดยรูปแบบแรกจะเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่รูปแบบอื่นจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

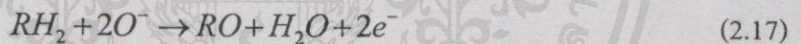
นอกจากนี้ ยังพบว่าการดูดกลืนออกซิเจนจากช่วง 100 ถึง 550 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานลดลงตามจำนวน O^- ซึ่งสังเกตได้ว่า โดยส่วนใหญ่ อีออนลบจะยังถูกดูดกลืนที่ผิว และทำให้ค่าความต้านทานมีค่ามากที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปฏิริยาที่เกิดขึ้นก็คือ



การลดลงของค่าความต้านทานจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นคุณลักษณะทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่ความต้านทานจะมีค่าลดลง (negative temperature coefficient) เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงช่วงที่ออกซิเจนอยู่ในรูปของ O^- และ O^{2-} ค่าความต้านทานจะลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอีกก็จะเกิดการแยกสลายอีออนเหล่านี้และจะเกิดการลดลงของค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำอีกครั้ง

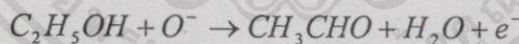
การลดลงของค่าความต้านทานของโลหะออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ เมื่อนำมาทำการตรวจก๊าซหุงต้มซึ่งจะสามารถอธิบายได้ดังนี้ ค่าความต้านทานที่สูงเพราะว่าอีออนของออกซิเจนบนผิวจะมีปริมาณลดลงในขณะที่ทำปฏิริยากับก๊าซด้วยการดูดกลืนออกซิเจน ดังนั้นจึงเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในผลึก

ตัวอย่าง ก๊าซ RH_2 ชนิดต่าง ๆ เมื่อเกิดปฏิริยากับออกซิเจน

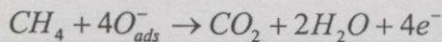


เช่น

ก๊าซแอลกอฮอล์



ก๊าซมีเทน

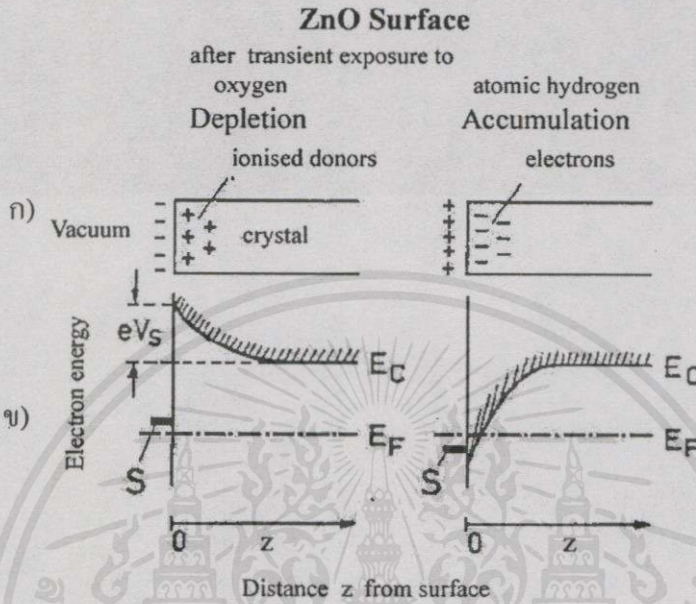


2.3 กลไกในการตรวจจับก๊าซของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จะมีการจัดเรียงผลึกเป็นแบบหกเหลี่ยม/หกมุม (hexagonal) ซึ่งมีความกว้างของแถบพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ จุดบกพร่องจำนวนมากภายในซิงค์ออกไซด์จะอยู่ในรูปของที่ว่างของออกซิเจนและโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ที่ประพืดตัวเป็นผู้ให้อิออนก่ออะตอมผู้ให้จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจน อย่างไรก็ตามถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การตรวจจับของของซิงค์ออกไซด์^[8]

การเปลี่ยนแปลงกระบวนการทั้งหมดจะทำให้ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามกลไกในการตอบสนองของซิงค์ออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์จะมีกลไกดังนี้



รูปที่ 2.6 ชั้นปลอดประจุบนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอธิบายด้วยแถบพลังงาน

- (ก) รูปแบบของประจุในซิงค์ออกไซด์
- (ข) แถบของพลังงานที่ผิวของโลหะซิงค์ออกไซด์

ส่วนของการดึงหรือการให้อิเล็กตรอน โดยผ่านพื้นผิวมีการรับและการส่งตามลำดับ โดยจะมีความต่อเนื่องกัน หรือจะเป็นไปตามความผันผวนของแถบปลอดประจุ ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่รอบพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำจะแยกออกไปตามความหนาแน่นและการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่มีการรับและการส่ง โดยค่าของตัวก๊าซเซนเซอร์นี้จะมีค่าความหนาแน่นของพื้นผิวมากขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของก๊าซที่เกิดขึ้น

ประการแรก แถบปลอดประจุที่เกิดขึ้นที่ผิวจะมีอยู่สองลักษณะดังรูปที่ 2.4 คือโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดใหญ่อยู่ใต้ของชั้นของตัวสารที่เป็นตัวให้ในเนื้อ bulk ตัวอย่างของก๊าซที่ประกอบด้วยออกซิเจนและไฮโดรเจนซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวรับและตัวส่งที่ทำปฏิกิริยากัน ถ้าออกซิเจนเกิดการรวมตัวจะได้ประจุบวก ทำให้เกิดการเร่งให้เพิ่มขึ้นเท่าตัวในประจุของผู้ให้ใน Bulk จะรวมตัวขึ้นทำให้แถบความนำโค้งขึ้นตามรูป อีก 1eV

จากตัวอย่างการคำนวณทำให้ถ้าระยะห่างอยู่ในช่วง 10^6 ถึง 10^5 เซ็นติเมตร ในกรณีที่ประจุบนพื้นผิวของตัวนำที่อยู่สูงกว่า เช่น อะตอมของไฮโดรเจนที่ถูกดูดมาหรือช่องว่างของออกซิเจนที่เกิดขึ้นโดยที่อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากตัวประจุลบที่ผิวของโลหะออกไซด์ล้วน

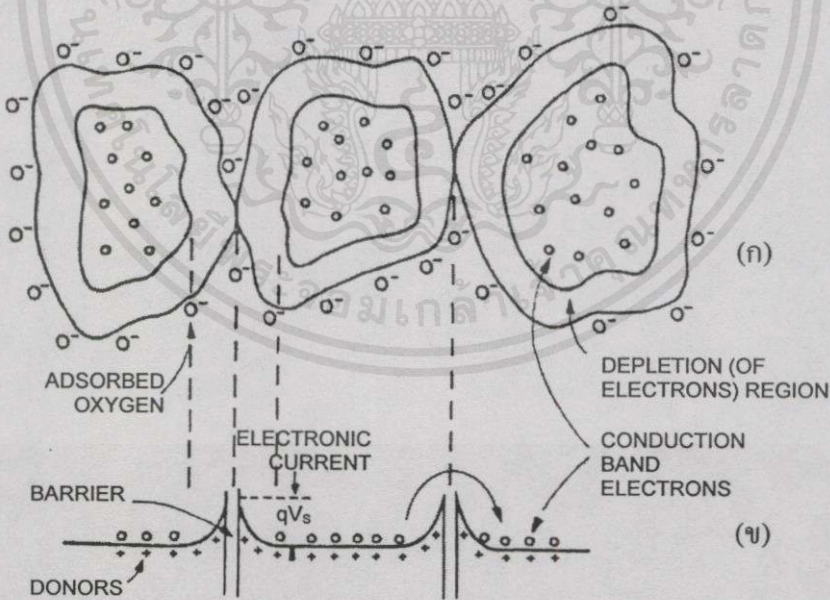
ทำให้เกิดผลของค่าความโค้งของ แถบความนำ ซึ่งในความเป็นจริงเราจะมีรูปแบบสมมุติโดย อยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้ซึ่งคือออกไซด์จะเป็นตัวแสดงให้เห็นค่าความแตกต่างของตัวส่งหลายตัว และลำดับชั้นของตัวรับใน bulk ที่ทำให้เกิดช่องความเข้มข้นของชั้นปลอดประจุ โดยการสะสมของ ตัวส่งและตัวรับซึ่งก็คือออกซิเจนไอออนซึ่งจะพบได้ที่ผิวของ โลหะออกไซด์

2.4 ผลจากขอบเกรน (Grain boundary effect)

การเปลี่ยนแปลงที่ผิวของฟิล์มบางซึ่งจะเกี่ยวเนื่องจากการดูดกลืนและคายออกซิเจนจะมีค่าไม่ มากพอที่จะทำให้ค่าสภาพความต้านทานผิวมากนัก แต่ส่วนที่จะมีผลมากต่อค่าความต้านทานผิวก็ คือ ขอบเกรน (Grain boundaries)

โดยทั่วไปแล้วผลึกของ โลหะออกไซด์จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ล้อมรอบด้วยแลทธิข ของออกซิเจนซึ่งจะประจุตัวเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน เมื่ออะตอมของออกซิเจนเคลื่อนที่อิเล็กตรอน จากอะตอมผู้ให้ที่ผิวจะถูกดูดกลืน โดยไอออนลบจะเกิดชั้นปลอดประจุพาหะขึ้นตามค่าของกำแพง ศักย์โคอะแกรมของแถบพลังงาน

แบบจำลองทางฟิสิกส์ สำหรับการจับคู่ของเกรนที่แสดงเขตปลอดประจุ (Space charge region) และผลจากการ deoxidising ก๊าซ จะดังรูป 2.7



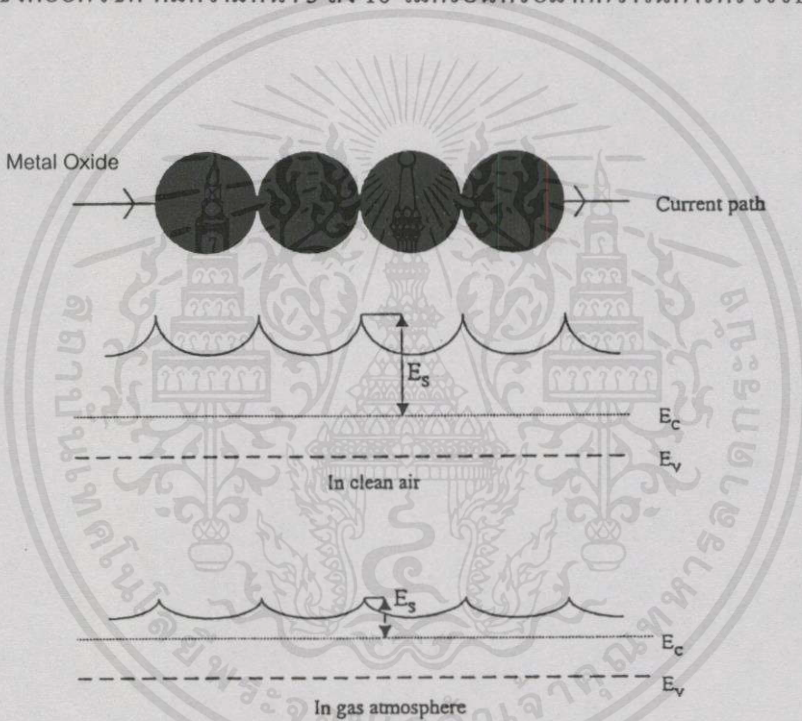
รูปที่ 2.7 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ... (กำแพงศักย์ที่เกิดจากการดูดกลืนออกซิเจนที่ผิว) ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ก) แบบจำลองทางฟิสิกส์
- (ข) แบบจำลองแถบพลังงาน

ความกว้างของเขตปลอดประจุ หมายถึง Debye length และเมื่อขนาดของผลึกมีค่ามากกว่าสองเท่าของ Debye length ค่ากำแพงศักย์ที่ขอบเกรนจะมีผลต่อค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเป็นอย่างมาก เมื่อความหนาแน่นของออกซิเจนไอออนลบมีค่ามาก ค่ากำแพงศักย์ก็จะมีค่าสูง ผลที่ได้คือ สารกึ่งตัวนำค่าความต้านทานมีค่าสูง แต่เมื่อความหนาแน่นของออกซิเจนมีค่าลดลง เมื่อให้ก๊าซเข้าสู่ระบบ ค่ากำแพงศักย์ก็จะลดลงซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานลดลง

เมื่อโครงสร้างผลึกของโลหะออกไซด์เมื่อพิจารณาถึงพลังงานศักย์ทางเดินกระแส (E_s) ที่พื้นผิวในสภาวะอากาศจะมีค่าสูงกว่าเมื่ออยู่ในสภาวะบรรยากาศของก๊าซ ดังรูปที่ 2.8

ผลของ Debye length ของโลหะออกไซด์ จะไม่สามารถอธิบายการตอบสนองต่อก๊าซได้ถ้าใช้ฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์ ที่มีความหนา 5 ถึง 10 ไมครอนหรือมากกว่าในการตรวจจับก๊าซ



รูปที่ 2.8 พลังงานศักย์ที่ทางเดินกระแส (Current path) ในซิงค์ออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์เมื่อความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางจะน้อยกว่าค่าของ Debye length

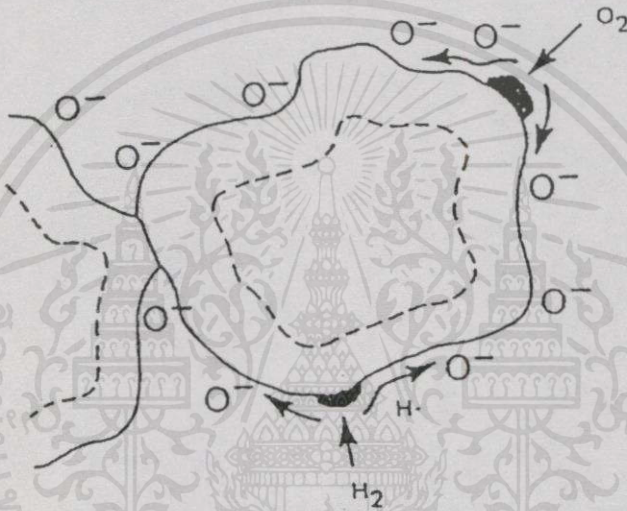
E_F : พลังงานระดับเฟอร์มิ

E_C : ระดับต่ำสุดของแถบความนำ ในชั้นปลอดประจุพาหะ

2.5 คตะไลต์ (Catalysts)

โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มความไวของก๊าซเซนเซอร์ในการตรวจจับก๊าซ มักจะใช้วิธีที่จะเติมสารบางชนิดที่เรียกว่า ตัวคตะไลต์ ตัวคตะไลต์ที่นิยมในการเพิ่มความไวในการตรวจจับก๊าซ คือ อลูมิเนียม (Al), พลาเดียม (Pd) และแพลทินัม (Pt) เป็นต้น ซึ่งตัวคตะไลต์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับก๊าซเซนเซอร์น้อยมากเพราะว่าตัวคตะไลต์จะเกิดการออกซิเดชันกับสารประกอบจำนวน

ไฮโดรคาร์บอน และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งโลหะ (ตัวคะตะไลต์) จะมีแนวโน้มกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในอากาศ ดังนั้น ทั้งอลูมิเนียม (Al) พลาเดียม (Pd) และแพลทินัม (Pt) จะเป็นเพียงตัวคะตะไลต์เพราะอาจจะเกิดการผันผวนเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในอากาศ หลายปีที่ผ่านมาได้มีการใช้อลูมิเนียมในการช่วยเพิ่มความไวในการตรวจจับแอมโมเนีย (NH_3), trimethylamine(TMA), dimethylamine(DMA) พลาเดียมในการช่วยเพิ่มความไวในการตรวจจับก๊าซโอลีฟินและมีเทน ในขณะที่แพลทินัมจะเป็นตัวคะตะไลต์เฉพาะในการตรวจจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) เท่านั้น โดยปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสจะแสดงดังรูปที่ 2.9 และตัวอย่างชนิดของตัวคะตะไลต์กับก๊าซที่ตรวจจับจะแสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.9 ปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัส เมื่อเติมตัวคะตะไลต์

ตารางที่ 2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาเติมตัวคะตะไลต์ในการทดสอบก๊าซชนิดต่าง ๆ

ชนิดสารกึ่งตัวนำ	ตัวคะตะไลต์	ก๊าซที่ทดสอบ
ZnO	Al	NH_3 , TMA, DMA
ZnO	Ag, Au, Pd	CH, R-OH
ZnO	Pt compound	CO
ZnO	Li	NO_x , CH_4 , C_3H_8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

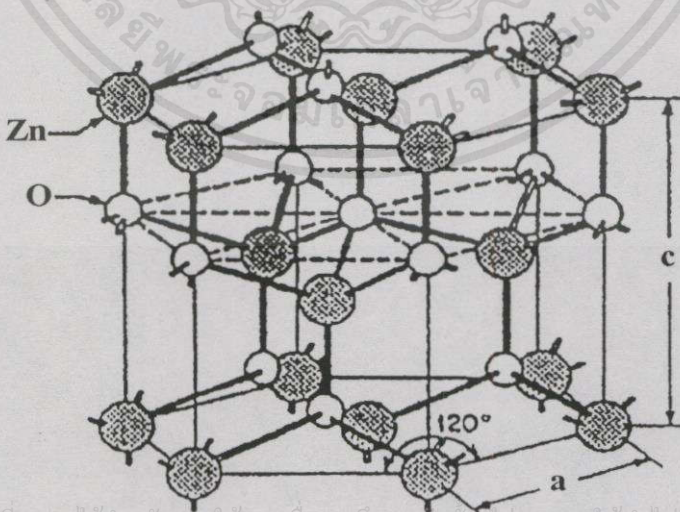
บทที่ 3

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีอยู่หลายเทคนิคด้วยกันที่ใช้หลักพื้นฐานทางเคมีหรือเทคนิคทางแสง แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการนำเสนอเทคนิคที่ใช้การวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ อันได้แก่ เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะรูปร่างของเม็ดเกรนและขนาดของเม็ดเกรนที่ได้ เทคนิคในการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ XRD (X-Ray Diffraction) และการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ZnO โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดเป็นลำดับต่อไป

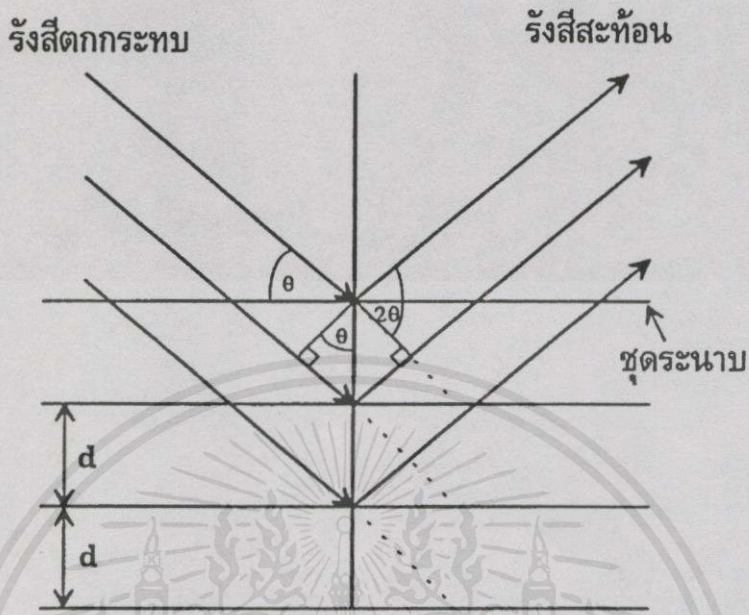
3.1 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO : Zinc Oxide) เป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเตรียมให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น (n-type) ได้ อยู่ในกลุ่มที่มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และจุดต่ำสุดของแถบนำอยู่ที่จุด Γ ดังนั้นจัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) โครงสร้างผลึกประกอบขึ้นจากโครงสร้างแบบ hcp (hexagonal closed-pack) สองโครงสร้างซ้อนกัน หรือเรียกว่าแบบ wurzite ค่าคงที่ผลึก $a = 3.235 \text{ \AA}$ และ $c = 5.213 \text{ \AA}$ [9] ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

3.2 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction)^[10]



รูปที่ 3.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบภายในผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสามารถทะลุผ่านตัวกลางได้ดี ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 3 อังสตรอม ซึ่งเป็นช่วงที่น้อยกว่าระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันของโครงสร้างผลึก เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบอะตอมซึ่งจัดเรียงตัวอยู่บนระนาบของ โครงผลึกทำมุม θ จะเกิดการเลี้ยวเบนสะท้อนออกจากโครงสร้างผลึก ทำให้เกิดริ้วแทรกสอดแบบเสริมและหักล้าง การเลี้ยวเบนที่ทำให้เกิดริ้วแทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุดเกิดจากการที่รังสีเอ็กซ์กระเจิงออกจากระนาบ โครงผลึกของแต่ละระนาบห่างเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการ^[10]

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (3.1)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน

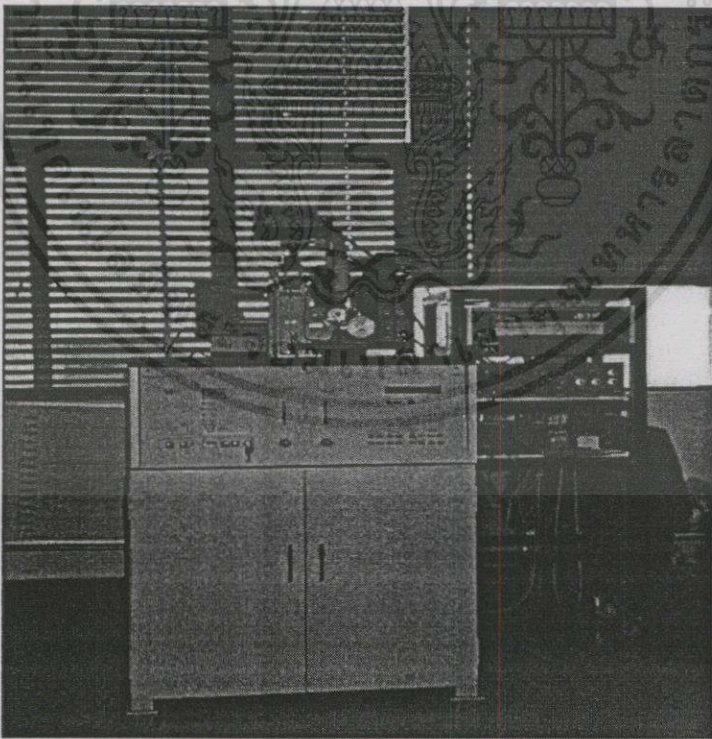
นอกจากนี้ θ ยังเป็นมุมที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบลงบนระนาบเรียกว่า มุมของแบรกก์ ะโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะตีค่าทั้งสิ้น อีก (Bragg angle) โลกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n คือ จำนวนเต็มมีค่า 1, 2, 3, ...

โดยการแทรกสอดจะสังเกตได้จากความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกบันทึกลงบนกระดาษกราฟที่ม้วนเลี้ยวเบน (มุมระหว่างแนวรังสีสะท้อนกระทำกับระนาบของแนวรังสีตกกระทบ : 2θ) ต่าง ๆ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมิลเลอร์และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันเพื่อหาค่าคงที่ผลึก สำหรับธาตุหรือสารชนิดเดียวกันจะมีการแทรกสอดสูงสุดที่มีมุมเบี่ยงเบนเดียวกันและยังสามารถทำนายระนาบที่เกิดขึ้นที่มุมเบี่ยงเบนนี้ได้อีกด้วย^[10]

ระนาบต่าง ๆ จะถูกกำหนดโดยดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์แทนระนาบแต่ละชุดคือ (hkl) ซึ่ง h, k และ l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 0, 1, 2, ... ดัชนีระนาบแบบนี้ เป็นดัชนีระนาบในระบบลูกบาศก์ (cubic system) สำหรับดัชนีระนาบอีกแบบหนึ่งคือ ดัชนีระนาบในระบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal system) เขียนแทนด้วย (hkil) ซึ่ง h, k และ l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่า 0, 1, 2, ... และ $h + k = -i$ เรียกดัชนีในระบบนี้ว่า ดัชนีมิลเลอร์-บราวเน การเรียกชื่อระนาบในระบบนี้อาจระบุเพียง (hkl)

สำหรับซิงค์ออกไซด์ ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ ($\text{Cu-K}\alpha$) มีค่าเท่ากับ 1.5405 อังสตรอม เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 3.4 แทนลงในสมการที่ 3.4 และ 3.5 จะได้ค่าคงที่ผลึก $a = 3.253$, $c = 5.213$ และ $c/a = 1.602$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.3 เครื่อง X-Ray Diffraction (กองฟิสิกส์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ) เครื่องที่มีการนำไปใช้

36-1451

ZnO		d Å	Int	hkl	d Å	Lnt	hkl
Zinc Oxide	Zincite	2.814	57	100	0.8237	2	214
		2.603	44	002	0.8125	3	220
		2.4759	100	101			
Rad. CuK α_1	λ 1.540598 Filter Mono. D-sp Diff.	1.9111	23	102			
Cut off 17.7	Int. Diffractometer I/I _{cor.}	1.6247	32	110			
Ref. <i>Nat Bur. Stand (U.S.) Monogr.</i> , 22 (1985)		1.4771	29	103			
		1.4072	4	200			
Sys. Hexagonal	S.G. P6 ₃ mc (186)	1.3782	23	112			
a 3.24982(9) b	c 5.20661(15) A C 1.6021	1.3583	11	201			
α	β γ Z 2	1.3017	2	004			
Ref. <i>Ibid.</i>		1.2380	4	202			
D _x 5.68	D _m mp	1.1816	1	104			
		1.0931	7	203			
Color Colorless		1.0638	3	210			
Peak height intensities. The approximate temperature of data collection was 26 C. References to other early patterns may be found in reference (5). The sample was obtained from the New Jersey Zinc Co.,Bethlehem, Pennsylvania, USA. CAS#:1314-13-2. The structure was determined by Bragg (1) and refined by Abrahams and Bernstein (2). $\alpha(I_{\text{obs}}) = \pm 1$. A high pressure cubic NaCl-type of ZnO is reported by Bates et al. (3) and a cubic, sphalerite-type is reported by Radezewski and Schicht (4). Wurtzite. Wurtzite group, zincite subgroup F ₂₇ = 130.8(0071,29). PSC: hP4		1.0423	6	211			
		1.0159	4	114			
		0.9846	2	212			
		0.9766	5	105			
		0.9556	1	204			
		0.9381	3	300			
		0.9069	8	213			
		0.8826	4	302			
		0.8677	1	006			
		0.8370	3	205			
		0.8293	1	106			

See following card

©JCPDS 1986

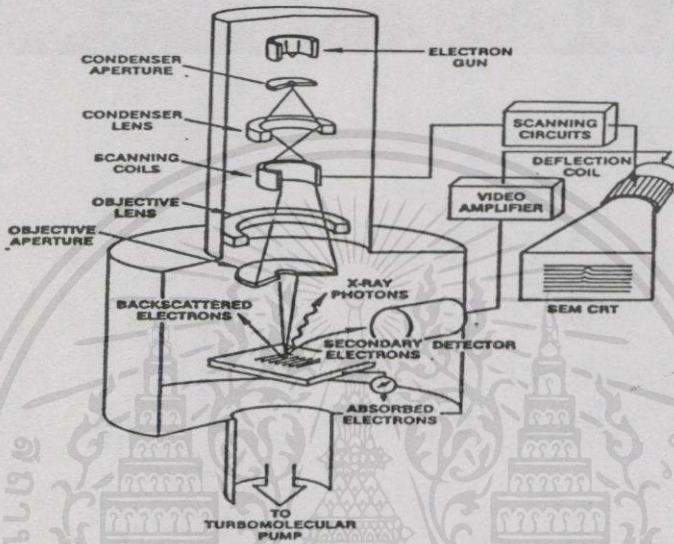
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กับความมเบรกกซ์ของโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite ของ ZnO จาก

JCPDS (Joint Committee on Power Diffraction Standards)

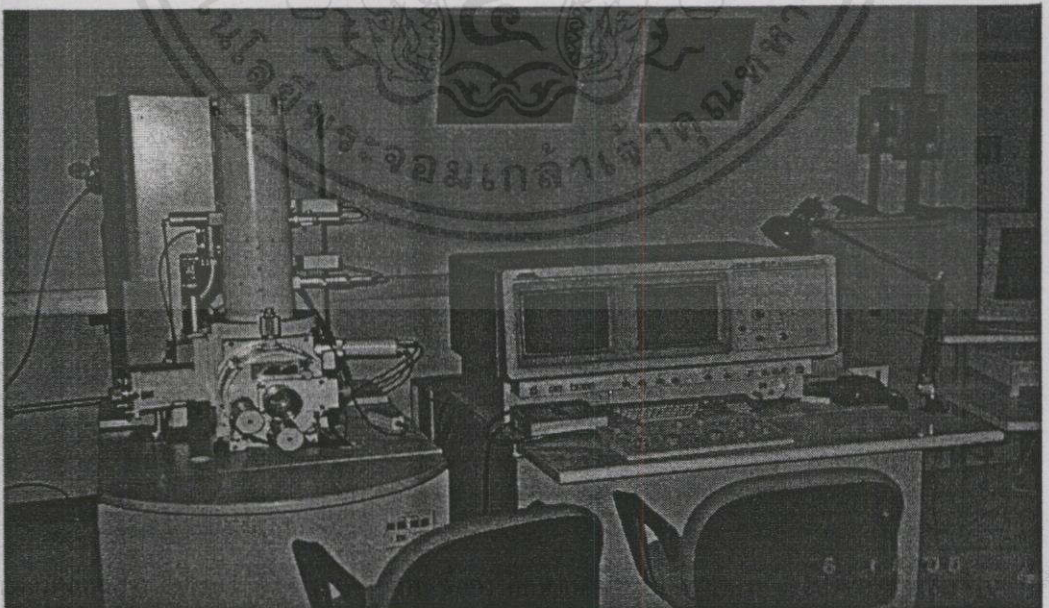
3.3 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy)

การวิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดพื้นที่ประมาณ 50 ตารางองศาตรอม ถึง 5 ตารางมิลลิเมตร หลักการทำงานของ SEM จะทำงานโดยการกวาดโฟกัสของลำแสงอิเล็กตรอนทั่วทั้งพื้นผิว และจะตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับสองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิวโดยเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงมีขนาดเพียง 10 ถึง 20 นาโนเมตร ซึ่งขนาดของลำแสงจะมีความสำคัญต่อการพิจารณาความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนอันดับสองที่มีพลังงานผ่าน specimen น้อยกว่า 50 KeV ลักษณะขององค์ประกอบของเครื่อง SEM จะแสดงดังรูปที่ 3.5 ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะแสดงบน CRT (cathode-ray tube) SEM จะเป็นกล้องที่มีกำลังขยายสูงกว่า optical microscopes เนื่องจาก SEM มีกำลังขยายตั้งแต่ 50 ถึง 300,000 เท่า ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถของแต่ละเครื่องของแต่ละบริษัท โดยขนาดเม็ดผลึกที่สามารถขยายดูได้ที่ grain size ตั้งแต่ 10 อดศาตรอม ถึง 10 ไมครอน โดยลำแสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารในระยะลึก ประมาณ 1,000 อดศาตรอม ลักษณะของสารตัวอย่างที่นำมา

พิจารณาจะเป็นของแข็งที่รวมทั้งโลหะ เซรามิกและโพลิเมอร์สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า คำนั้นสามารถจะนำไปใช้งานได้เลย โดยไม่ต้องทำการเตรียมชิ้นงานก่อน แต่โดยทั่วไปสารตัวอย่าง ที่ไม่มีความนำไฟฟ้า สารตัวอย่างในลักษณะที่ต้องทำการเคลือบชั้นบาง ๆ ของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าสูงก่อนโดยอาจจะใช้กระบวนการ สเปคเตอร์ริง โดยสารที่มักจะนำมาใช้เคลือบ คือ ทองและ คาร์บอน ตัวอย่างสารที่จะต้องนำมาทำการเคลือบทองก่อนจะทำการวัดเช่น ZnO, SiO₂



รูปที่ 3.5 โครงสร้างระบบของเครื่อง SEM^[11]



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

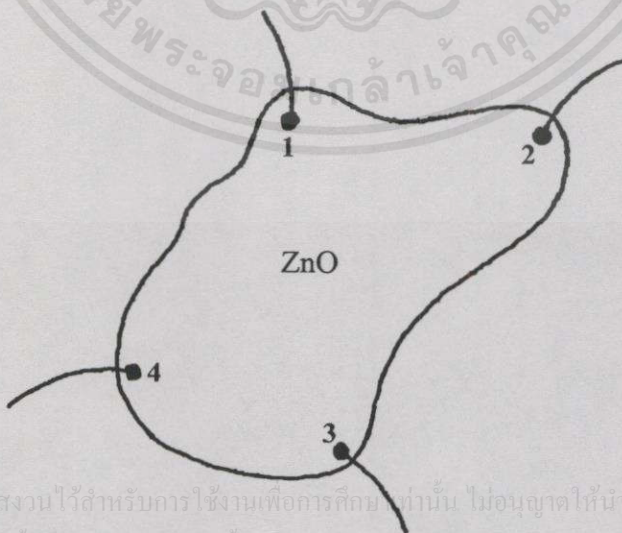
3.4 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ถ้าหากมีกระแสไหลผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศทางหนึ่ง และให้มีสนามแม่เหล็ก B ตัดผ่านตั้งฉากกับทิศทางของกระแสแล้ว จะปรากฏมีการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าขึ้น โดยมีทิศทางตั้งฉากกับกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์” (Hall effect) จากการทดลองเรื่องปรากฏการณ์ฮอลล์นี้เองทำให้เป็นที่ยืนยันได้ว่าในสารกึ่งตัวนำจะมีประจุพาหะอยู่สองชนิดที่ไม่เหมือนกัน คือ อิเล็กตรอนและโฮล และจะเห็นว่าการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient) ไม่เพียงแต่จะบอกให้ทราบว่าพาหะนั้นเป็นชนิดใดเท่านั้น หากแต่ยังสามารถบอกค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นได้อีกด้วย และนอกจากนี้จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญได้ด้วย

การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางซึ่งคือออกไซด์นี้ จะอาศัยเทคนิคของแวนเดอร์ พาาที่สามารถที่จะใช้วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลผ่านภายในแผ่นสารความถูกต้องแม่นยำขึ้นกับเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสจะต้องวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
3. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใด ๆ
4. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร

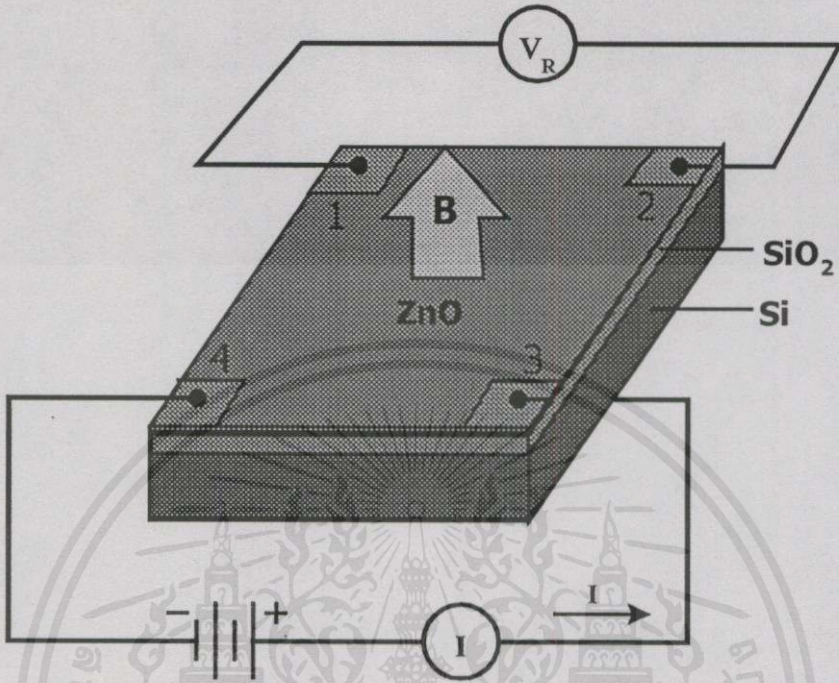
พิจารณาชิ้นสารรูปร่างแบนแบนใด ๆ ดังรูปที่ 3.7 มีขั้วสัมผัสเล็ก ๆ 1, 2, 3 และ 4 ที่กระจายอยู่ที่ขอบของแผ่น ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้อต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 สารตัวอย่างแผ่นแบนรูปทรงใด ๆ

การวัดความหนาแน่นของพาหะและสภาพเคลื่อนที่ได้ สามารถกระทำได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์^[12] โดยอาศัยเทคนิคของแวนเดอร์พาว ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์

ในวิธีการวัดแบบแวนเดอร์พาว ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมคู่อิเล็กโตรด (ในรูปที่ 3.8) ที่อยู่ภายใต้และนอกเหนือจากการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า B (3,000 เกาส์) และจ่ายกระแสคงที่ (50 μ A) ที่ไหลระหว่าง 3 และ 4 โดยค่าความแตกต่างศักย์ V_H ซึ่งจะใช้ในการคำนวณค่า Hall coefficient ค่าความต่างศักย์ V_R ที่วัดจาก 1 ถึง 2 ที่อยู่นอกเหนืออำนาจสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอยู่ในสนามแม่เหล็กที่ทำการจ่ายกระแสไหลจาก 3 ไป 4 โดยการวัดค่าความแตกต่างศักย์ที่วัดโดยเรียงลำดับโดยรอบตามทิศทางของกระแส จะทำให้ได้ค่า V_R 8 ค่า และค่า V_H ทั้งหมด 16 ค่าและนำมาเฉลี่ย ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าสภาพความต้านทาน ρ ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้ดังนี้

$$\rho = \frac{\pi t}{I} \cdot \frac{V_H}{\ln 2} \tag{3.2}$$

เอกสารนี้ เมื่อ t คือความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และค่า Hall coefficient R_H จะสามารถหาได้โดยการเฉลี่ยค่าทั้งสี่ อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{t}{B} \quad (\text{cm}^3/\text{C}) \tag{3.3}$$

ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ n และค่าความคล่องตัว μ_H สามารถหาได้จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) ดังนี้

$$n_H = \frac{1}{qR_H} \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (3.4)$$

สามารถหาค่าสภาพคล่องตัวได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}) \quad (3.5)$$



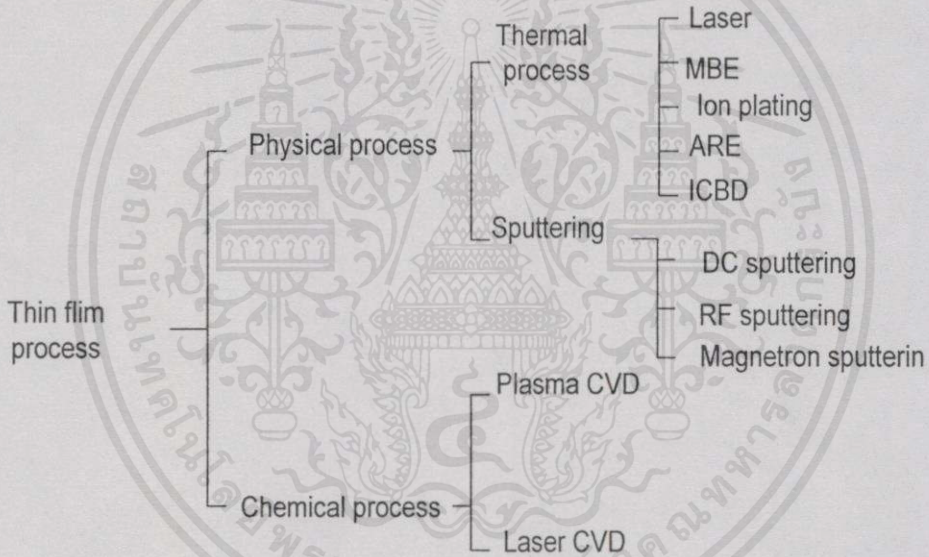
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้างฟิล์มบางซึ่งค่อออกไซด์

4.1 ระบบการสร้างฟิล์มบาง

การสร้างฟิล์มบางโดยกระบวนการพอกพูน (deposition) นั้นมีอยู่หลายเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กันแต่ ถ้าแบ่งตามกลไกการก่อตัวของชั้นฟิล์มบางแล้ว สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธีคือ 1. ก่อตัวจากการระเหยทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition : PVD) 2. ก่อตัวจากการระเหยทางเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) และในแต่ละวิธีก็ยังมีกระบวนการหรือวิธีการอื่น ๆ อีก ดังในรูป 4.1

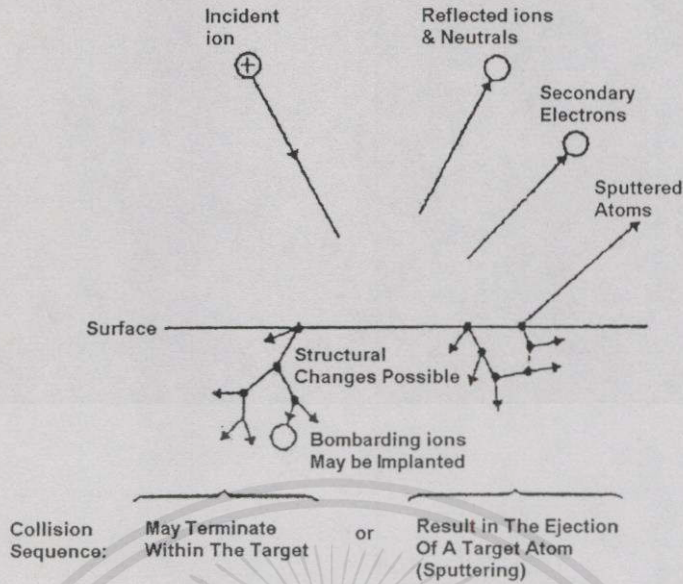


รูปที่ 4.1 เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบางโดยการปลูกผลึกชนิดต่าง ๆ

4.2 สปีตเตอร์ริง

4.2.1 ความหมายของ “สปีตเตอร์ริง”

สปีตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นคำศัพท์ที่กล่าวถึง กลไกที่ทำให้อะตอม (Atom) หลุดออกจากผิวอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งเป็นวัสดุใด ๆ อันเนื่องจากการถูกชนด้วยอนุภาคประจุที่มีพลังงานสูงก็คือเป้านั่นเอง อะตอมที่หลุดออกไปนั้นจะเกิดการพอกพูน (Deposited) ขึ้นบนฐานผลึก (Substrate) ในลักษณะของฟิล์มได้ การสปีตเตอร์นั้นสามารถทำได้กับวัสดุหลายอย่างทั้งชนิดตัวนำ (Metal) ฉนวน (Insulator) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และโลหะผสม (Alloy)



รูปที่ 4.2 กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนผิวของเป้า

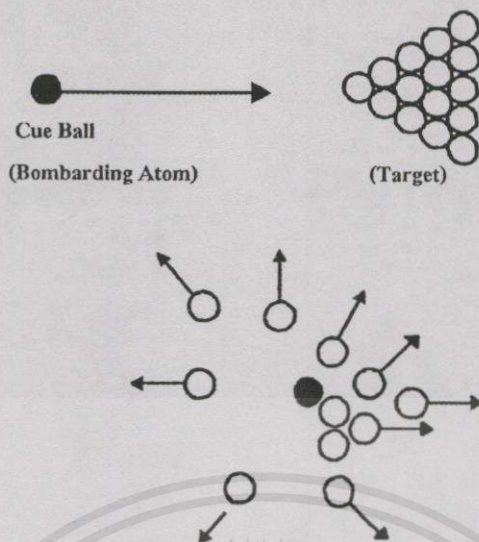
เมื่อเป้าที่เป็นของแข็งถูกชนโดยไอออนบวกจะเกิดปรากฏการณ์ดังในรูปที่ 4.2 คือ

- ไอออนบวกที่เข้าชนสะท้อนกลับ หรือถูกทำให้เป็นกลางขณะชน
- มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron emission)
- ไอออนบวกที่เข้าชนมีการฝังตัวในเป้า (ion implantation)
- มีการจัดโครงสร้างใหม่ภายในเป้า
- มีการชนกันอย่างต่อเนื่อง (collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าแล้ว จะทำให้อะตอมบริเวณผิวหน้าของเป้าถูกกระแทกหลุดออกที่เป็นปรากฏการณ์สปีดเตอร์ริง

การเกิดปรากฏการณ์ในแต่ละแบบนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชนสำหรับในกรณีการเกิดสปีดเตอร์ริงจะเกิดได้ดีในช่วงพลังงานของไอออนบวกประมาณ 100 อิเล็กตรอน โวลต์ ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์

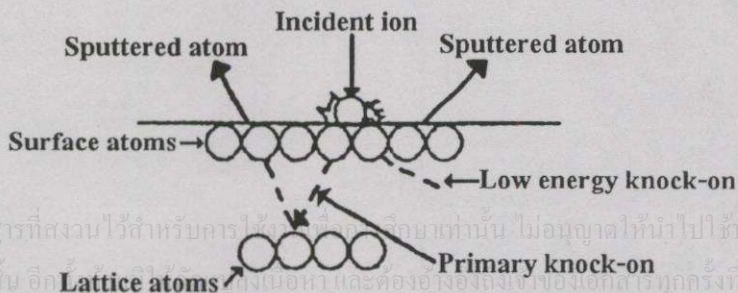
กลไกของการสปีดเตอร์ริงอาจเปรียบเทียบกับได้กับการชนของลูกบิลเลียด ดังรูปที่ 4.3 พิจารณาให้อุณหภูมิทั้งหมดเป็นทรงกลมแข็งโดยให้ไอออนบวกเป็นลูกขาว (cue ball) และให้อะตอมที่ผิวของเป้าเป็นลูกสี (colored ball) ที่เรียงกันเป็นระเบียบ การชนของลูกขาวจะทำให้ลูกสีกระทบกันเป็นทอด ๆ แล้วกระเจิงออกทุกทิศทางรวมทั้งในทิศย้อนกลับสู่ผู้เล่นด้วย ซึ่งเทียบได้กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา อุตสาหกรรม หรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏในเอกสารนี้

อะตอมถูกสปีดเตอร์ริงออกจากเป้าในความเป็นจริงจะมีแรงระหว่างอะตอมซึ่งจะแตกต่างจากกรณีของลูกบิลเลียด แต่แบบการจำลองการชนนี้ก็สามารอธิบายได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด



รูปที่ 4.3 การสปีดเตอร์เปรียบเทียบบนพื้นผิวด้วยลูกบิลเลียด

การที่ไอออนบวกชนเป้าแล้วมีการถ่ายโอนโมเมนตัมให้กับอะตอมของผิวเป้าที่อยู่หนึ่งเป็นกลไกที่นำไปสู่การสปีดเตอร์อะตอมออกจากผิวของเป้าซึ่งดังรูปที่ 4.4 ในการชนไอออนบวกจะชนผิวของเป้า 2 หรือ 3 อะตอมเกือบพร้อม ๆ กัน อะตอมที่ถูกชนตอนแรกยังไม่ถูกสปีดเตอร์แต่เป็นอะตอมข้างเคียงอะตอมที่ถูกชนการชนจะมีสองลักษณะคือ แบบแรก อะตอมถูกชนในลักษณะ low energy knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวขนานกับผิวของเป้า มีการเคลื่อนตัวในแนวเฉียงด้านข้างกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าซึ่งมีอยู่ให้หลุดออก เป็นการชนเพียงครั้งเดียว แบบที่สอง อะตอมถูกชนในลักษณะ primary knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวพุ่งเข้าสู่เป้า อะตอมจะเคลื่อนตัวลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไป ทำให้ตัวมันเองสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออก หรือมีการชนต่อไปอย่างต่อเนื่อง จนทำให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศเปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกที่เข้าชน อะตอมเหล่านี้ก็จะกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกในที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของสถาบัน ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งเนื้อหาและข้อมูลยังต้องเข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 การถ่ายถ่ายโอนโมเมนตัมในกระบวนการสปีดเตอร์จริง

พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการสปีดเตอร์ริงเชิงปริมาณ คือ อัตราสปีดเตอร์ริง (sputtering yield: S) เป็นปริมาณที่บอกถึงจำนวนอะตอมของเป้าที่หลุดออกต่อการชนของไอออนบวก 1 ตัว อัตราสปีดเตอร์ริงขึ้นกับชนิดพลังงานและทิศทางของไอออนบวกที่เข้าชนกับเป้า ในกรณีที่ไอออนบวกเข้าชนเป้าในทิศตั้งฉากกับระนาบของเป้าที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบสุ่ม จากแบบจำลองการชนแบบยืดหยุ่นอัตราสปีดเตอร์ริง ในช่วงพลังงานของไอออนบวกน้อยกว่า 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์เขียนได้ดังสมการ^[13]

$$S = \frac{3\alpha}{4\pi^2} \frac{4m_i m_t E_i}{(m_i + m_t)^2 E_b} \quad (4.1)$$

และในช่วงพลังงานของไอออนบวกสูงกว่า 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เขียนได้ดังสมการ

$$S = 3.5\alpha \frac{(z_i z_t)(m_i m_t)}{(z_i^{2/3} + z_t^{2/3})(m_i + m_t) E_b} S_n(E_i) \quad (4.2)$$

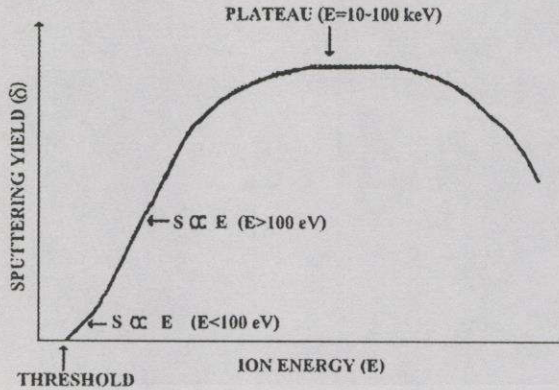
โดย m_i และ E_i เป็นมวลและพลังงานจลน์ของ ไอออนบวก

m_t และ E_t เป็นมวลของอะตอมเป้าและพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมที่ผิวของเป้าหรือพลังงานการระเหิด (heat of sublimation)

z_i และ z_t เป็นเลขอะตอมของ ไอออนบวกและอะตอมของเป้า

α เป็นพารามิเตอร์ที่วัดการส่งผ่านโมเมนตัมในขณะชน มีค่าขึ้นกับอัตราส่วน m_i / m_t โดย α จะเท่ากับ 0.17 เมื่ออัตราส่วน m_i / m_t เท่ากับ 0.1 และจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.4 เมื่ออัตราส่วน m_i / m_t เท่ากับ 10

$S_n(E_i)$ คือ reduced stopping power เป็นพารามิเตอร์ที่วัดการสูญเสียพลังงานของไอออนบวกต่อหน่วยระยะทาง และเป็นฟังก์ชันกับพลังงานของไอออนบวก รวมทั้งมวลและเลขอะตอมของอนุภาคที่เกี่ยวข้อง เมื่อไอออนบวกมีพลังงานสูงอัตราการสปีดเตอร์ริงค่อนข้างจะคงที่เนื่องจาก $S_n(E_i)$ มีแนวโน้มเป็นอิสระจากพลังงานของไอออนบวก



รูปที่ 4.5 ลักษณะแบบฉบับของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสปีดเตอร์ริงกับพลังงานไอออนบวก

สมการทั้งสองข้างต้น แสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราสปีดเตอร์ริงกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของไอออนบวกและเป้าที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสปีดเตอร์ริง รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสปีดเตอร์ริงกับพลังงานของไอออนบวก จะเห็นว่า เป้าจะเริ่มถูกสปีดเตอร์เมื่อถูกชนด้วยไอออนบวกที่มีพลังงานสูงเท่ากับพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ของการสปีดเตอร์ ในช่วงพลังงานของไอออนบวกมีค่าใกล้เคียงกับพลังงานขีดเริ่ม ($E_i < 100$ อิเล็กตรอน โวลต์) อัตราสปีดเตอร์ริงจะแปรผันตามพลังงานของไอออนบวกยกกำลังสองและจะเพิ่มแบบเชิงเส้นในช่วงพลังงานของไอออนบวกระหว่าง 0.1 ถึง 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากนั้นจะเพิ่มช้าลงและคงที่ในช่วงพลังงานของไอออนบวกระหว่าง 10 ถึง 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หากเพิ่มพลังงานไอออนบวกต่อไป อัตราสปีดเตอร์ริงจะลดลง เนื่องจากไอออนบวกมีพลังงานสูงเมื่อชนเป้าจะฝังตัวลึกและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว หากพิจารณาการใช้งานแล้วช่วงพลังงานไอออนบวกที่เหมาะสมที่สุดใน การสปีดเตอร์อยู่ในช่วงพลังงานของไอออนบวกน้อยกว่า 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

4.2.2 สภาวะพลาสมา

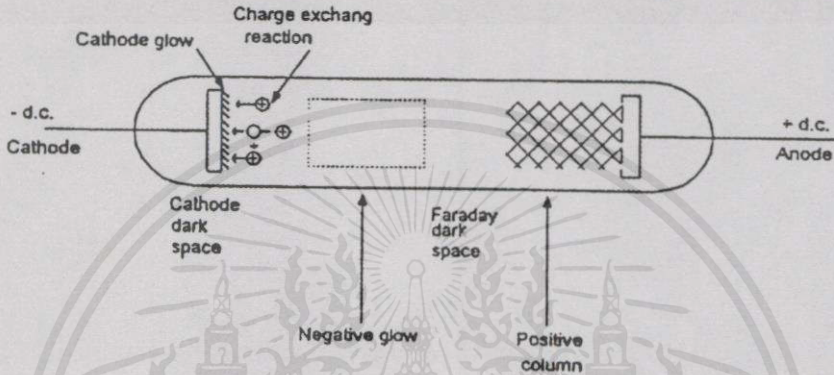
พลาสมา คือ ก๊าซที่เกิดการแตกตัว (ionized gas) ให้ประจุบวกและประจุลบในจำนวนที่เท่า ๆ กัน โดยมี neutron atom ปะปนอยู่บ้าง

Negative Charge – electrons

Positive Charge – positive ions

กรรมวิธีในการทำพลาสมานั้นมีหลายทาง แต่ทุกวิธีจะต้องจ่ายพลังงานเข้าไปซึ่งในขบวนการผลิตพลาสมานั้นมักใช้ก๊าซ (gas phase) ในการ Transition เนื่องจาก Electric Ionization ของก๊าซมักจะถูกนำมาใช้ทำก๊าซดิสชาร์จ (gas discharge) บ่อย ๆ ซึ่งก๊าซดิสชาร์จเป็นคำที่ใช้เรียกสภาวะที่ก๊าซเกิดการนำ กระแสไฟฟ้าได้พลาสมาโกลด์ดิสชาร์จ คือ Self-sustaining Plasma ในรูปที่ 4.6 ดังแสดงถึงระบบ DC diode type อย่างง่าย ๆ ที่ใช้คุณสมบัติของการก่อเกิดประจุ (Glow-

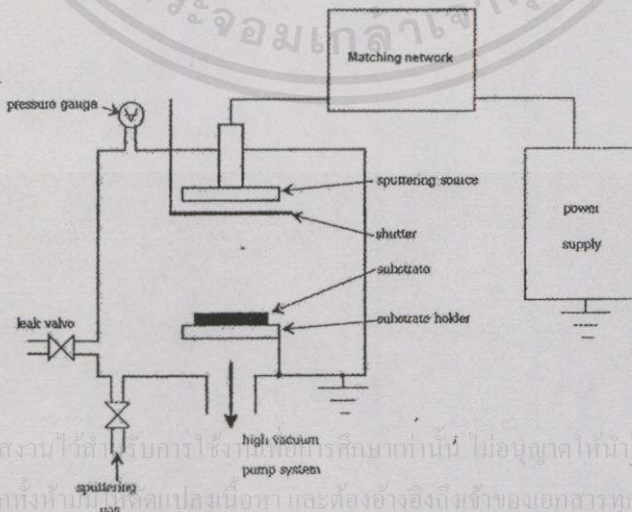
discharge) ภายในหลอดแก้วจะต้องทำสุญญากาศและเติมก๊าซเฉื่อย (Inert gas) ซึ่งก๊าซที่มีคุณสมบัติไม่ติดไฟไม่กัดกร่อนเมื่อผสมกับออกซิเจนและในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar gas) เนื่องจากมีมวลหนักเหมาะแก่การทำ Ions Bombardment เข้าไปจนเกิดแรงดันต่ำ ๆ ภายในหลอดแก้วมีอิเล็กโทรดอยู่สองอันบรรจุอยู่ภายในหลอดอันได้แก่ ขั้วที่มีไฟบวกเรียกว่า อานอด (anode) ส่วนขั้วที่มีไฟลบ เรียกว่า คาโทด (cathode) ทำให้เกิดแรงดันไฟกระแสตรงตกคร่อมเพื่อทำให้เกิดพลาสมา



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบไดโอดไฟตรง

4.2.3 โครงสร้างของระบบเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ริง

ระบบสปัตเตอร์ริงในที่ใ้ช้อยู่ในปัจจุบันนี้มีหลายรูปแบบ โดยมีชื่อแตกต่างกันไปแล้วแต่รูปแบบการดัดแปลงการใช้งานดังตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วนั้น อย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.7 ซึ่งประกอบด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

- ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) สำหรับบรรจุก๊าซของการดิสชาร์จ แล้วติดตั้งส่วนประกอบอื่น ๆ ทำจาก แก้ว เหล็กสแตนเลส หรือโลหะผสม ที่ผ่านการตรวจสอบสุญญากาศแล้ว
- ระบบปั๊มสุญญากาศ (high vacuum pump) ที่มีความสามารถปั๊มความดันลงได้ต่ำกว่า 10^{-6} ทอร์ ทั่วไปเป็นระบบผสมระหว่างปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มแพร่ไอน้ำมัน หรือปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มเทอร์โบโมเลคิวลา
- หัววัดความดันก๊าซ (pressure gauge) ในภาชนะสุญญากาศ พร้อมด้วยระบบวัดและแสดงผลทั้งในย่านความดันต่ำและความดันใช้งาน
- วาล์วปล่อย (leak valve) วาล์วที่ใช้สำหรับปล่อยให้อากาศไหลเข้าภายในภาชนะสุญญากาศ
- แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ (sputtering source) ประกอบด้วยเป้าและพร้อมแท่นยึด สำหรับระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงภายในจะบรรจุแหวนแม่เหล็กได้เป้า
- แหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) ที่ใช้งานในระบบนี้ คือ ชนิดกระแสสลับ (RF power supply) ความถี่ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ สำหรับระบบอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง
- หน้ากาก (shutter) ใช้สำหรับเปิดปิดฟลักซ์ของอะตอมที่หลุดจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์
- แท่นวางวัสดุรองรับ (substrate holder) สำหรับวางวัสดุรองรับฟิล์ม
- แหล่งก๊าซสปัตเตอร์ (sputtering gas) จะต้องเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าและฟิล์มที่เกิดขึ้น หรือส่วนประกอบอื่น ๆ ในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ ต้องไม่เป็นพิษและควรมีมวลมากพอที่จะทำให้ได้อัตราการสปัตเตอร์ริงที่สูง ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป คือ ก๊าซอาร์กอนเพราะไม่เป็นพิษ หาง่ายและราคาถูก แต่ยังไม่ใช้ก๊าซเฉื่อยที่มีมวลมากที่สุด
- วงจรแมชซิ่ง (match network) สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้า และป้องกันแหล่งกำเนิด ในกรณีของอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง
- ตัวทำความร้อน (heater) สำหรับเพิ่มอุณหภูมิวัสดุรองรับพร้อมด้วยระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิแหล่งจ่ายไฟฟ้า

4.2.4 อัตราการเคลือบฟิล์ม

อัตราการเคลือบฟิล์ม คือ ความหนาของฟิล์มต่อหน่วยเวลา ขึ้นกับปริมาณอะตอมของเป้าที่ถูกสปัตเตอร์ และสภาพการชนของอะตอมเหล่านี้ไปยังวัสดุที่รองรับ อัตราการเคลือบฟิล์มจะสัมพันธ์กับกระแส ความต่างศักย์ และความดันก๊าซ ในสภาวะการโคลดิสชาร์จ และยังขึ้นกับระยะระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับ

เนื่องจากกระแส ความต่างศักย์ และความดันก๊าซ เป็นปริมาณที่ขึ้นต่อกัน การวัดผล กระทบของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งนั้นไม่สามารถทำได้ ในทางปฏิบัติจึงละเลยตัวแปรที่มีผลน้อยที่สุด ควบคุมตัวแปรอีกตัวหนึ่งให้คงที่ แล้วจึงศึกษาผลจากตัวแปรที่สนใจ เช่น ทำการวัดความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าที่ความดันคงที่ กำลังไฟฟ้าในที่นี้เป็นการรวมผลของกระแส และความต่างศักย์ของการดิสชาร์จเข้าด้วยกัน วิธีนี้ใช้มากในระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง สามารถ เขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้า (P) ความดันก๊าซ (P') และระยะจาก เป้าถึงวัสดุรองรับ (l) ได้ในรูปของ

$$R \propto \frac{P}{P'l} \quad (4.3)$$

4.2.5 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง (microstructure of thin film)

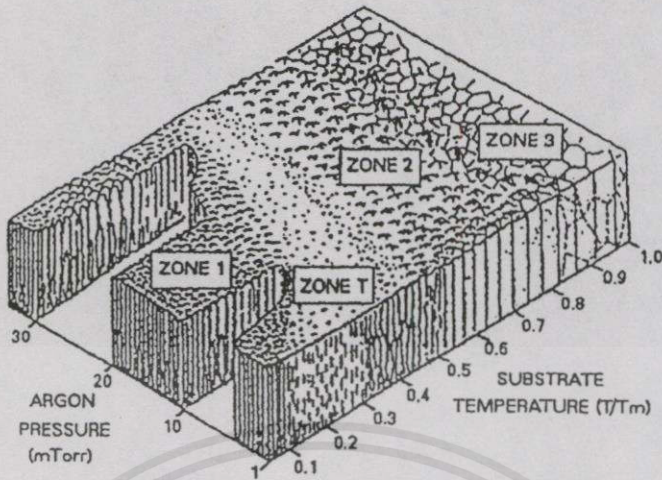
โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางที่ได้จากการสปีดเตอร์นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 4 โชนตาม อัตราส่วน T_s/T_m และความดันก๊าซ เมื่อ T_s เป็นอุณหภูมิของวัสดุรองรับ และ T_m เป็นจุดหลอมเหลว ของวัสดุต้นกำเนิดฟิล์ม^[14] ดังรูปที่ 4.8

โครงสร้างโชน 1 ประกอบด้วยแท่งเกรนเรียว (tapered column grain) เรียงกันอย่าง หลวม ๆ ระหว่างเกรนเหล่านี้มีช่องว่าง (void) ค่อนข้างมากที่มีลักษณะผิวหน้าขรุขระ เสถียรภาพต่ำ โครงสร้างภายในไม่ชัดเจน และคุณสมบัติต่างจากคุณสมบัติของ bulk มาก โครงสร้างของฟิล์ม แบบนี้เกิดจาก อัตราส่วน T_s/T_m น้อยกว่า 0.3

โครงสร้างโชน 2 ประกอบด้วย column grain อัดกันค่อนข้างแน่น เกิดจาก T_s/T_m มีค่า ระหว่าง 0.3 ถึง 0.5 อุณหภูมิวัสดุรองรับในระดับนี้ทำให้มีการเติมอะตอมในที่ว่างเกิดขึ้นอย่างมี ประสิทธิภาพความกว้างของเกรนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิวัสดุรองรับและอาจขยายได้ตลอดตามแนว ความหนาของฟิล์มโครงสร้างแบบนี้แสดงความแข็งแรงเชิงกลสูง

โครงสร้างโชน 3 เกิดขึ้นเมื่อ T_s/T_m สูงกว่า 0.5 ประกอบด้วยเกรนที่สม่ำเสมอ และมีสมบัติ ใกล้เคียงกับ bulk

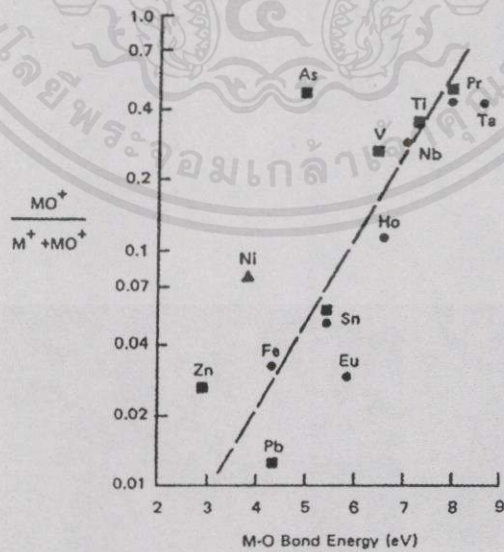
โครงสร้างโชน T เกิดขึ้นเมื่อฟิล์มในโครงสร้างโชน 1 ที่เคลือบบนวัสดุรองรับความเรียบ อนุพันธ์และ T_s/T_m เป็นศูนย์ ประกอบด้วย poorly defined fibrous grains อัดกันแน่น โดยไม่มีช่องว่าง ไม่ว่าจะตีโครงสร้างแบบนี้ขึ้นมาก็ให้ผลแปลกประหลาด และต้องอ้างอิงถึงงานของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ตรงรอยต่อ เป็นฟิล์มที่มีผิวเรียบ ความหนาแน่นสูง



รูปที่ 4.8 แบบจำลองโครงสร้าง (Zone model) แสดงอิทธิพลของวัสดุรองรับและความดันก๊าซอาร์กอนที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางที่ทำการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

4.2.6 การสปัตเตอร์เป่าที่เป็นสารประกอบ

การสปัตเตอร์เป่าที่เป็นสารประกอบเคมี เช่นในกรณีของโลหะออกไซด์ เป่ามีโอกาที่จะถูกสปัตเตอร์เป็นได้ทั้งอะตอมหรือโมเลกุล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนไอออนของอะตอมโลหะและไอออนของโมเลกุลคู่ของโลหะออกไซด์ (MO^+) ต่อไอออนทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอร์ออกมาสามารถเขียนได้เป็น^[15]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไอออนโมเลกุลคู่ ($MO^+ / M^+ + MO^+$) กับพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของโลหะออกไซด์

$$\eta = \frac{MO^+}{(M^+ + MO^+)} \quad (4.4)$$

สำหรับโลหะ M รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า η ขึ้นกับความแข็งแรงของพันธะของโลหะออกไซด์ M-O ดังจะเห็นว่าความแข็งแรงของพันธะไอออนโลหะออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจะลดการแตกตัวของโมเลกุลลง η จะเป็นตัวกำหนดและวัดสำหรับไอออนโมเลกุลที่ถูกสปัตเตอร์ออกมา ซึ่งสัมพันธ์กับโมเลกุลที่เป็นกลางที่ให้ผลไม่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้ η ยังขึ้นกับความดันที่ใช้สปัตเตอร์ เมื่อความดันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วน η ลดลง และที่ความดันเป็นศูนย์แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของไอออนที่อยู่ในบริเวณเป้าพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชนกับเป้า หากมีพลังงานมากพอที่จะส่งให้กับคู่ของโมเลกุลแล้ว จะทำให้โมเลกุลสามารถที่จะหลุดจากเป้าเป็นคู่ได้ พลังงานที่ไอออนบวกส่งให้กับคู่ของโมเลกุลจะขึ้นกับฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน ซึ่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของไอออนที่เข้าชนเท่ากับมวลของอะตอมที่ถูกชน ในรูปที่ 4.9 โลหะเบที่มีมวลเป็นสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับออกซิเจนจะเห็นได้ในบริเวณใกล้เส้นประ และยังแสดงให้เห็นว่าไอออนโมเลกุลขนาดใหญ่จะขึ้นกับพันธะของโลหะออกไซด์

4.2.7 การก่อตัวเป็นฟิล์มจากการสปัตเตอร์ของสารประกอบ¹⁶

การสปัตเตอร์เป้าที่เป็นสารประกอบที่เป็นโลหะออกไซด์หรือสารประกอบอื่น โมเลกุลของเป้าที่ถูกสปัตเตอร์ออกมาจะไม่สมบูรณ์ จึงทำให้องค์ประกอบของฟิล์มที่ได้แตกต่างจากเป้า เนื่องจากการขาดหายของอะตอมก๊าซภายในฟิล์ม และสภาพการขนส่งอะตอมไปยังวัสดุรองรับ ตัวอย่างเช่น ในการสปัตเตอร์เป้าควอทซ์ในก๊าซอาร์กอน ฟิล์มที่ได้จะมีการขาดหายของอะตอมของออกซิเจน วิธีแก้ไขการขาดหายของอะตอมก๊าซออกซิเจนทำได้โดยอย่างเช่น สปัตเตอร์ด้วยก๊าซผสมระหว่าง Ar : O₂ (85:15) ออกซิเจนที่ป้อนเข้าไปทั้งหมดจะถูกไอออไนซ์และเข้าไปจับบนฟิล์ม ทำให้องค์ประกอบของฟิล์มมีความสมบูรณ์มากขึ้น การไอออไนซ์ของออกซิเจนเกิดจากการถ่ายเทพลังงานจากอิเล็กตรอนภายในสภาพโกลด์ดิสราร์จ

4.2.8 ดีซี สปัตเตอร์ริง (DC Sputtering)¹⁷

ดีซี สปัตเตอร์ริง นั้นระบบจะประกอบไปด้วยคู่ของอิเล็กโทรดที่วางขนานกันอยู่ในระบบ โดยที่ด้านหนึ่งของอิเล็กโทรดจะเป็นขั้วคาโทดและอีกด้านหนึ่งจะเป็นด้านแอโนด ที่ด้านบนบริเวณผิวหน้าคาโทดจะมีวัสดุรอบเป้าอยู่แล้วอีกด้านหนึ่งทางด้านของขั้วแอโนดจะทำการหล่อเย็นด้วยน้ำ โดยที่บริเวณฐานรองจะอยู่ที่ขั้วแอโนด เมื่อให้ความดันของก๊าซอาร์กอนภายในระบบ (chamber) อยู่ที่ 0.1 ทอร์และป้อนไฟฟ้ากระแสตรงโดยต่ออนุกรมกับความต้านทาน 1 ถึง 10 กิโลโอห์ม สักการะหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีค่าหลายกิโลโวลต์ จะทำให้เกิดโกลด์ดิสราร์จและไอออนของ

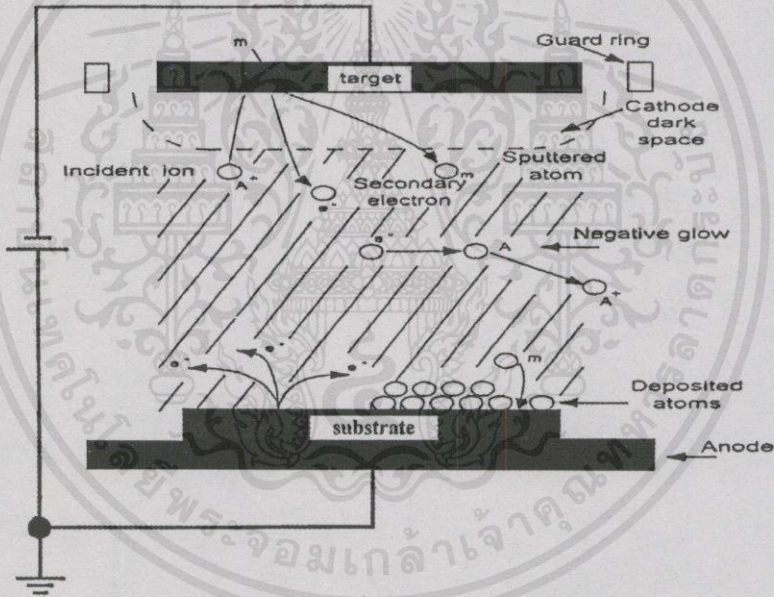
ก๊าซอาร์กอนในโกลด์ดีสชาร์ทจะถูกเร่งไปที่ขั้วคาโทดและเกิด การสปัตเตอร์ที่เป่าจนทำให้เกิดการปลุกผลึกเป็นฟิล์มบางบนฐานรองด้านอโนด

การสปัตเตอร์โดยใช้ระบบดีซีนั้นการชนของโมเลกุลก๊าซและความดันที่ก๊าซจะมีค่าสูงเมื่อระยะที่อนุภาคชนกันมีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง จำนวนของอนุภาคของส่วนที่ปลุกผลึกเป็นฟิล์มบางจะอยู่บนพื้นที่ W

$$W = K_1 W_0 / pd \tag{4.5}$$

อัตราการตกผลึก R หาได้โดย

$$R = W / t \tag{4.6}$$



รูปที่ 4.10 แบบจำลองการเกิด DC diode sputtering

เมื่อ K_1 มีค่าคงที่ W_0 คือจำนวนของอนุภาคที่ถูกสปัตเตอร์จากพื้นที่คาโทด p เป็นความดันก๊าซดีสชาร์ท d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง W คือความหนาแน่นของฟิล์มที่ได้จากการสปัตเตอร์ จำนวนของอนุภาคที่ถูกสปัตเตอร์จากพื้นที่ของขั้วคาโทด W_0 ซึ่งหาได้โดย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_0 = (j_+ / e)st(A/N) \tag{4.7}$$

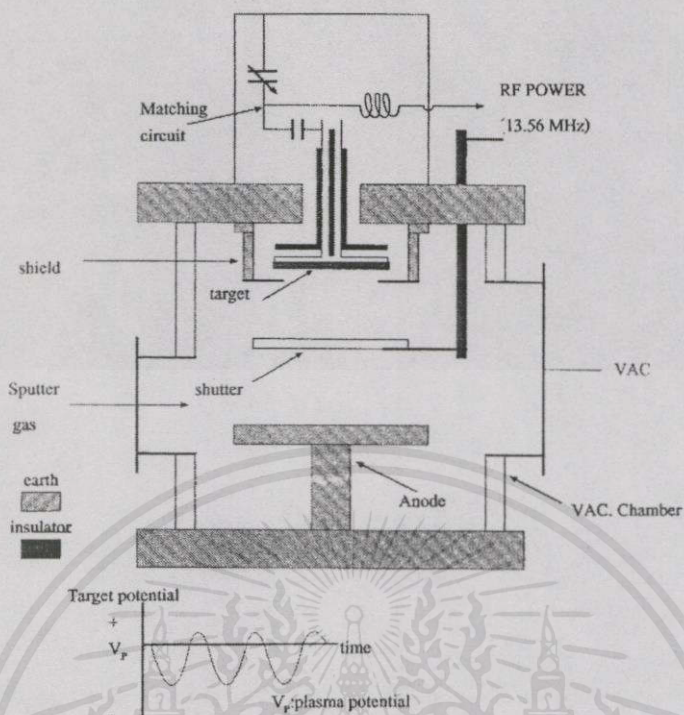
เมื่อ j_s คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ขั้วคาโทด e คือประจุของอิเล็กตรอน s คือสัมประสิทธิ์ในการสปีดเตอร์ A คือ น้ำหนักของอะตอมของวัสดุที่ถูกสปีดเตอร์ และ N คือ ค่า Avogadro's number ด้วยข้อสันนิษฐานที่ว่ากระแสไอออนจะมีค่าเข้าใกล้ กระแสอิซซาร์ท I_s และสัมประสิทธิ์ของการสปีดเตอร์จะขึ้นอยู่กับแรงดันของการดิซชาร์จ V_s จำนวนอนุภาคที่ถูกสปีดเตอร์ทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ $V_s I_s / e$ ดังนั้นการปลูกผลึกจะขึ้นอยู่กับ $V_s I_s t$

4.2.9 อาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง (RF Sputtering)

ในการใช้เป่าฉนวนแทนที่เป่าโลหะใน ระบบ ดีซี สปีดเตอร์ริงนั้น การก่อเกิดประจุ (glow-discharge) จะไม่เกิดขึ้นเพราะว่าจะเกิดประจุบวกที่ผิวหน้าของฉนวน ดังนั้นการก่อเกิดประจุของเป่าฉนวนจะต้องใช้พลังงานความถี่คลื่นวิทยุแทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเรียกระบบนี้ว่า ระบบสปีดเตอร์คลื่นความถี่วิทยุหรือ RF Sputtering วิธีแก้ปัญหาที่ DC Diode Sputtering ทำไม่ได้ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคบางอย่างขึ้นเพื่อให้สามารถใช้คาโทดที่เป็นฉนวนได้โดยใช้แรงดันไฟสลับจ่ายเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งรู้จักกันในนามของ RF Sputtering โดยมีเงื่อนไขอยู่ว่า

- อิเล็กตรอนที่สูญเสียจากผิวฉนวน เนื่องจากกลไกของ ดีซี โกลวดิซชาร์จสปีดเตอร์จะถูกทดแทนเข้ามาเป็นจังหวะตามคาบเวลาของคลื่นไฟฟ้าสลับ
- โกลวดิซชาร์จจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ภายใต้สภาพของไฟฟ้าสลับที่สามารถทดแทนอิเล็กตรอนที่สูญเสียจากผิวได้เร็วกว่าช่วงเวลาที่ดีซชาร์จจะดับ (น้อยกว่าถึง 10 ไมโครวินาที)
- สนามไฟฟ้าที่เกิดภายใน process chamber จะต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้ไอออนมีพลังงานจลน์แรงพอเมื่อกระทบฉนวน target แล้วเกิดการสปีดเตอร์
- การสปีดเตอร์ที่เกิดใน process chamber ควรเกิดเฉพาะบนผิว target (ไม่ควรเกิดบนผิว chamber หรือผิวอิเล็กโทรดที่ไม่ใช่ target)
- RF power ที่ใช้จะต้องมีประสิทธิภาพดีพอที่จะทำให้เกิด โกลวดิซชาร์จสปีดเตอร์ที่มีอัตราการพอกพูนสูงสุด

การสปีดเตอร์ใน RF-discharge นั้น การสปีดเตอร์ในการดิซชาร์จที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุได้พบในปี 1960 โดยพบว่าเกิดขึ้นที่ผิวแก้วเคลือบท่อดิซชาร์จสปีดเตอร์ในระหว่างการเกิด RF-discharge จะใช้สำหรับการสร้างฟิล์มบางและในปัจจุบันได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมาก โดยระบบดังกล่าวดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.11 ระบบสปัตเตอร์ริงแบบ RF sputtering

ในระบบ อาร์เอฟ สปัตเตอร์ริงจะต้องใช้วงจร impedance-matching ที่อยู่ระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานและแชมเบอร์

โดยทั่วไป impedance ของแหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุ มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ค่า impedance ของการก่อเกิดประจุ (glow-discharge) จะอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 กิโลโอห์ม ในอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง ค่าความหนาแน่นของกระแสที่เป้า I_s มีค่าเท่ากับ

$$i_s \cong CdV / dt \quad (4.8)$$

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้าระหว่างการเกิดดิสชาร์จ และวัสดุเป้า dv/dt คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงศักดาที่ผิวเป้า และเมื่อพบว่าที่เพิ่มความถี่ในการสร้างจะทำให้กระแสไอออนที่เป้ามืดค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในทางปฏิบัติจะใช้ความถี่เท่ากับ 13.56 MHz

การเกิดดิสชาร์จในระบบ อาร์เอฟ สปัตเตอร์ ความดันมีค่าต่ำอยู่ที่ 10^{-2} ทอร์ เมื่อสนามไฟฟ้าในโอกาสของการชนระหว่างโมเลกุลก๊าซและอิเล็กตรอนลำดับสองจะเกิดขึ้นจำนวนมาก ในระบบอาร์เอฟ สปัตเตอร์ นั้น blocking capacitor จะต่ออยู่ระหว่างวงจร match และเป้าพื้นที่ของเป้ามืดมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ของอานอดและพื้นที่ของฐานรองชิ้นงานมาก ๆ โครงสร้างของการวางแบบสมมาตรของอิเล็กโตรดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ตรงที่เป้ามืดศักดาเป็นลบ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุ

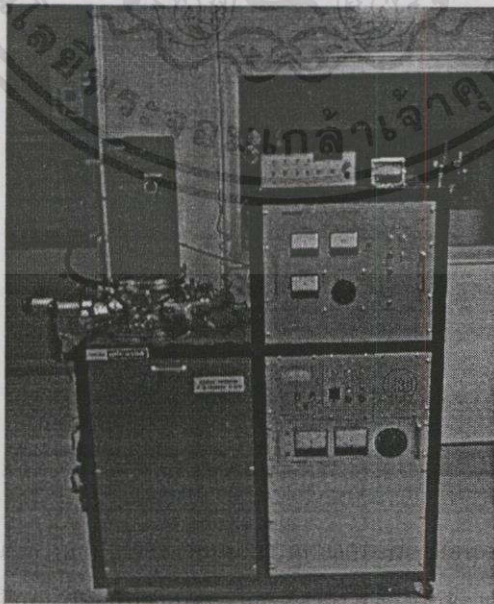
ให้เกิดการสปีดเตอร์ริงในระบบอาร์เอฟ การป้อนไฟกระแสตรงจะมีค่าครึ่งหนึ่งของศักดาขดคลื่นถึงคลื่นของแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ สำหรับค่าสภาพความต้านทานของน้ำหล่อเย็นที่ขั้วคาโรจะต้องมีค่าสูงพอที่จะรักษาสภาพความเป็นฉนวนไว้ได้

4.3 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยใช้ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง

ระบบสปีดเตอร์ริงที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบาง ZnO นี้จะมีเงื่อนไขดังนี้คือ

1. เป็นระบบสปีดเตอร์แบบแหล่งจ่ายพลังงานความถี่วิทยุ 13.56 MHz
2. กำลังความถี่คลื่นวิทยุ 150 วัตต์
3. ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเป้า 1.75 กิโลวัตต์
4. ระยะห่างระหว่างฐานรองถึงเป้า 3.5 เซนติเมตร
5. เนื้อวัสดุที่เป็นเป้าเคลือบสารคือ ZnO ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร และมีความหนา 0.8 เซนติเมตร
6. อุณหภูมิของฐานรองโลหะ มีค่า 200 องศาเซลเซียส
7. Presputtering time 20 นาที
8. ก๊าซที่ใช้คือ Ar : O₂ (85:15)

4.4 ส่วนประกอบที่สำคัญของ SPF - RF Sputtering System



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลทั้งหมดไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

รูปที่ 4.12 รูป SPF - RF Sputtering System

1. ปัมสุญญากาศ เพื่อใช้ในการลดความดันของก๊าซภายในระบบให้มีความดันต่ำ เพื่อให้ระบบเกิดความสะอาดและมีความเป็นสุญญากาศมากที่สุด โดยในระบบนี้จะประกอบอยู่ด้วยปั๊มสุญญากาศอยู่ 2 ชนิด คือ

1.1 Mechanical Rotary Pump ซึ่งจะใช้ในการลดความดันในระดับ ในช่วง 1 Torr ถึง 10^{-3} Torr

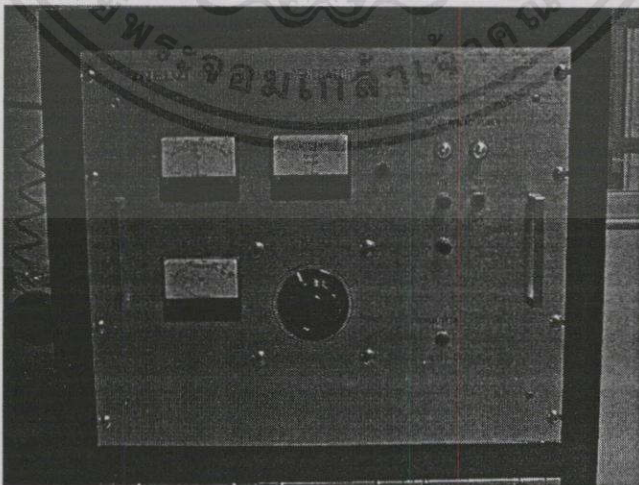
1.2 Oil Diffusion Pump ซึ่งจะทำงานร่วมกับ Mechanical Rotary Pump ซึ่งจะมีช่วงการใช้งานอยู่ที่ความดัน 1×10^{-3} ถึง 1.0×10^{-8} torr โดยมี maximum pumping rate อยู่ที่ 0.6 l/sec

2. แคมเบอร์สุญญากาศ ทำจากโลหะผสมระหว่างเหล็ก-สแตนเลส ซึ่งมีรูปทรงเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร

3. ขั้วคาโทดและเป่าสารเคลือบมีโครงสร้างของคาโทดเป็นแบบ Planar ที่ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเหล็ก - สแตนเลส โดยที่พื้นที่เป่าสารเคลือบจะเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หนา 0.8 เซนติเมตร ซึ่งเป็น ผง ZnO อัดแน่นที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 %

4. ระบบระบายความร้อนที่ขั้วคาโทดจะต้องใช้ที่มีความต้านทานสูงเพื่อหล่อเย็นและรักษาความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า โดยมีอัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตรต่อนาทีที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ส่วนระบบระบายความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จะมีอัตราการไหล ของน้ำ 0.4 ลิตรต่อนาทีที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

5. แหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ เว้นแต่เพื่อการศึกษาค้นคว้า โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 4.13 ภาพแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุรุ่น 922-9502A

องค์ประกอบโดยหลักของแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A

พลังงานอินพุท	: AC 100 โวลต์ (50/60Hz)
พลังงานเอาต์พุท	: 450 วัตต์
คลื่นความถี่	: 13.56 MHz
อิมพีแดนซ์	: 50 โอห์ม
ขนาดเครื่อง	: 480 (กว้าง) x 490(ยาว) x 400(สูง) mm

6. เกจวัดความดัน จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

- Low vacuum gauge จะใช้วัดความดันในช่วง $10^{-1} \sim 10^{-4}$ torr
- B-A Vacuum gauge ซึ่งจะเป็น NI-10D Wide – Range Ionization Gauge ที่สามารถวัดความดันในช่วงที่กว้างมาก คือสามารถวัดได้ตั้งแต่ความดัน $10^{-1} \sim 10^{-11}$ torr แต่ในระบบนี้จะใช้วัดในช่วง $10^{-4} \sim 10^{-11}$ (10^{-2} Pa ถึง 10^{-9} Pa)

7. ระบบป้อนก๊าซจะประกอบด้วยท่อก๊าซ Ar, Ar : O₂ (85:15) และ Ar : O₂ (50:50) และระบบควบคุมการไหลก๊าซ Mass-flow controller

4.5 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มบาง ZnO โดยใช้ระบบสปีดเตอร์ริง

1. เช็ควาล์วทุกวาล์วให้อยู่ที่ตำแหน่งปิด
2. เปิดวาล์วน้ำ
3. เปิด Main Power (ปั๊มโรตารี) พร้อมกับเปิด Roughing valve เพื่อนำอากาศในแชมเบอร์ออก, เปิดสวิตช์ Dill Diffuse Pump
4. อีก 20 นาที เช็ค Low vacuum gauge เพื่อเช็ควัดความดันในแชมเบอร์อยู่ที่ 10^{-3} torr
5. ปิด Roughing valve เปิด foreling valve เพื่อดูดอากาศใน oil diffuse pump
6. อีก 30 นาที เติมน้ำ Liquid nitrogen เข้าไปที่ liquid N₂ trap
7. รอจนครบ 5 นาที เปิด main valve
8. อีก 90 นาที เช็ค B-A vacuum gauge เพื่อแน่ใจว่า ความดันในแชมเบอร์อยู่ที่ระดับ 1.3×10^{-5} Pa (10^{-7} torr) เพื่อให้ลดสิ่งเจือปนภายในแชมเบอร์และเพื่อให้คุณภาพของฟิล์มบางดี
9. เปิด variable conductance valve ที่ละน้อย, เปิด pressure reducing valve และ Mass flow controller ปรับลดเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้
10. ปรับ mass flow controller ให้มีอัตราการไหลก๊าซอยู่ที่ 9 ccm

11. ปรับ Main valve เพื่อให้ความดันอยู่ที่ระดับ 3 Pa (22.5×10^{-3} Torr)
12. เปิด Main switch ที่เครื่อง RF Generator
13. เปิด Transmission switch
14. ปรับ meter selector switch ไปที่ตำแหน่ง current
15. ค่อย ๆ ปรับ Power set จนสังเกตเห็น Plasma ภายในแชมเบอร์ จาก window
16. ทำการ Presputter ประมาณ 20 นาที (ขึ้นอยู่กับชนิดของเป้าเคลือบสารและสิ่งเจือปน)
17. เปิด shutter
18. ปิด shutter เมื่อครบเวลาที่กำหนดไว้
19. ลด Power set ลงไปที่ศูนย์
20. ปิด variable conductance valve, ปิด mass flow controller, เปิด Main valve
21. รอ 5 นาที ปิด Transmission switch
22. รอ 5 นาที ปิด Main switch ที่เครื่อง RF Generator
23. รอ 10 นาที ปิด Main valve เปิด ventilation valve เพื่อเปิดแชมเบอร์นำเอาฐานรองออก
24. ปิด ventilation valve พร้อมกับปิดแชมเบอร์
25. เปิด main valve
26. เมื่อภายในแชมเบอร์มีความดันอยู่ที่ระดับ 10^{-3} torr, ปิด Main valve
27. ปิด oil diffuse pump (โดยที่ไม่มี liquid N₂ ใน trap)
28. รอ 15 นาที ปิด foreline valve, เปิด mechanical pump ventilation valve (ซึ่งจะได้ยินเสียงอากาศไหลออก) พร้อมกับเปิด mechanical pump (Power switch)
29. ปิดน้ำ

4.6 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะโดยใช้ระบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง

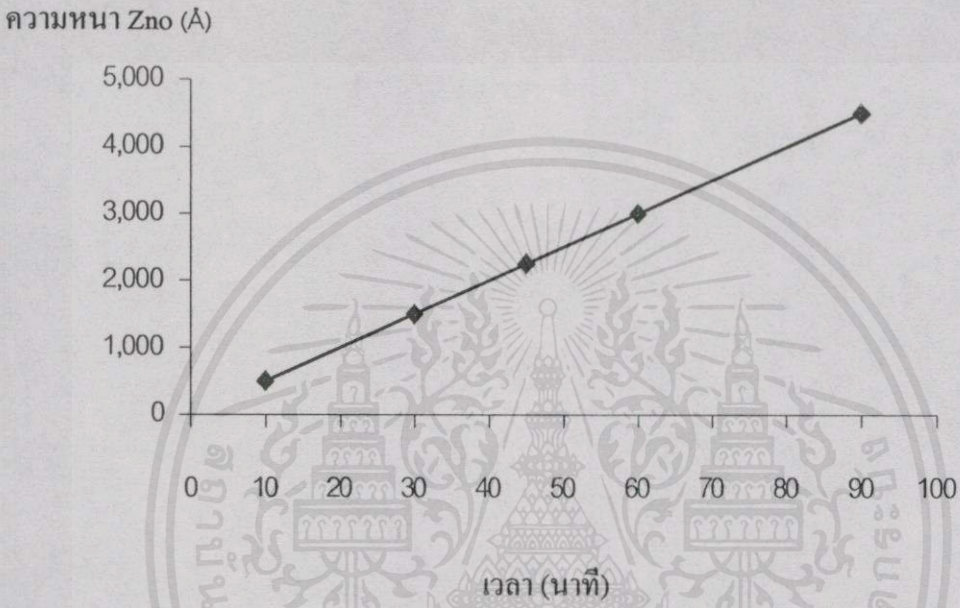
ระบบสปีดเตอร์ริงที่ใช้ในการสร้างฟิล์มโลหะนี้จะมีเงื่อนไขดังนี้คือ

1. เป็นระบบสปีดเตอร์แบบป้อนกำลังไฟฟ้าที่ Al มีค่า 110 วัตต์ ส่วน Pt, Pd และ Ti มีค่า 25 วัตต์
2. ระยะห่างระหว่างฐานรองถึงเป้า ที่ Al, Pd, Pt และ Ti มีระยะห่าง 2.0 เซนติเมตร
3. ขนาดเป้า Al ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และ มีความหนา 0.1 เซนติเมตร ส่วน Pd, Pt และ Ti มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และมีความหนา 0.15 เซนติเมตร
4. ก๊าซที่ใช้คืออาร์กอนบริสุทธิ์ (Ar pure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

4.7 อัตราการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริงตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ข้างต้นพบว่าความหนาของการสร้างฟิล์มบางจะขึ้นอยู่กับเวลาในการสปีดเตอร์และกำลังเข้าที่พุด ที่สร้างจากแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ ซึ่งอัตราการสร้างจะเป็นดังรูป 4.14

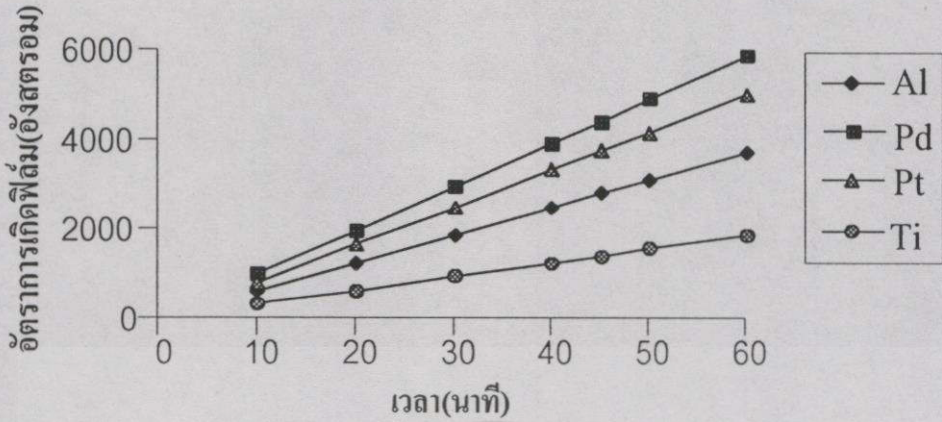


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์กับเวลาในการสปีดเตอร์ริงโดยใช้ก๊าซผสม Ar-O₂ (85:15)

จากความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าอัตราการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ตามเงื่อนไขที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่กล่าวไว้ข้างต้นมีค่าประมาณ 50 อังสตรอมต่อนาที

4.8 อัตราการสร้างฟิล์มบาง Al, Pd, Pt และ Ti

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอัตราการเกิดฟิล์มบางของ Al (aluminium), Pd (palladium), Pt (platinum) และ Ti (Titanium) ซึ่งจะนำไปใช้ในการสร้างไมโครฮีตเตอร์และการเติมสารคะตะไลต์จะอาศัยการใช้กระบวนการ ดีซี สปีดเตอร์ริง โดยทำในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ (Ar pure) ทำการสปีดเตอร์ริงเพื่อหาอัตราการเกิดฟิล์ม...
ไม่จำกัดใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์อัตราการเกิดฟิล์มกับเวลาในการสปีดเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

อัตราการเกิดฟิล์มโดยใช้เงื่อนไขตามข้อที่ 4.6 จะได้ค่าของฟิล์ม Al มีค่าเท่ากับ 62.5 Å/min, Pd ที่มีค่าเท่ากับ 96.6 Å/min, Pt ที่มีค่าเท่ากับ 83.3 Å/min และ Ti ที่มีค่าเท่ากับ 31.2 Å/min ดังในรูป 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะตีพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

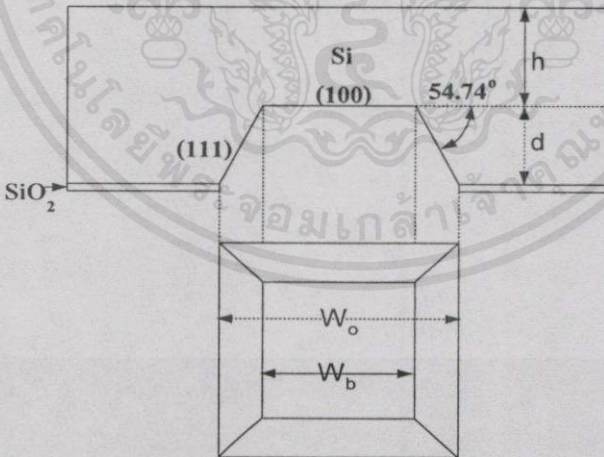
การออกแบบและการสร้าง

กระบวนการสร้างหัววัดก๊าซเซนเซอร์ ประกอบด้วยลำดับขั้นตอนดังนี้

- การออกแบบลวดลายฮีทเตอร์
- กระจกแบบลวดลายหัววัดก๊าซ
- การผลิตกระจกมาส์กต้นแบบ
- ขั้นตอนการสร้างฮีทเตอร์พร้อมกับหัววัดก๊าซ

5.1 การออกแบบไดอะแฟรม^[18]

ไดอะแฟรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของหัววัดก๊าซสร้างขึ้นเพื่อลดการสูญเสียความร้อนของไมโครฮีทเตอร์ขณะทำการตรวจจับก๊าซ โดยจะทำการกัดฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ในสารละลาย EPD ซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกให้เป็นไดอะแฟรมบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) ซึ่งเป็นต้นแบบของไดอะแฟรมได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) หลุมที่เกิดจากการกัดจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมขนานดังในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 รายละเอียดการกัดซิลิคอนโดยสารละลาย

รายละเอียดการกำหนดขนาดต้นแบบของไดอะแฟรมบนฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) หรือตั้งฉากกับทิศทาง (110) ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

$$W_b = W_0 - 2d \cot 54.74^\circ \quad (5.1)$$

$$\approx W_0 - \sqrt{2}d \quad (5.2)$$

โดยที่ W_0 คือ ขนาดของต้นแบบ

W_b คือ ขนาดของไดอะแฟรมหลังการกัด

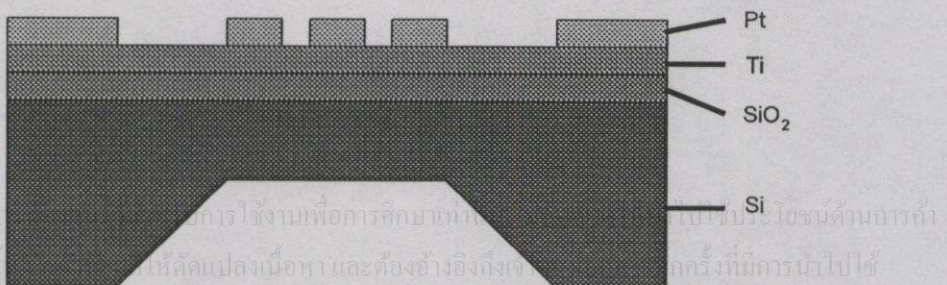
d คือ ความลึกของไดอะแฟรม

h คือ ความหนาของไดอะแฟรม

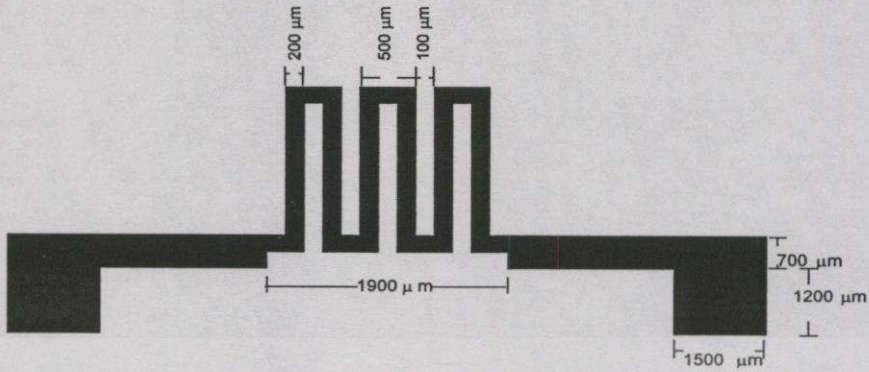
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดความหนาของไดอะแฟรมให้มีความหนา 200 ไมครอน โดยต้องการให้ขนาดของช่องไดอะแฟรมหลังการกัดมีขนาดไม่น้อยกว่า 2,450 ไมครอน เมื่อใช้ฐานรองซิลิคอนหนา 400 ไมครอน ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขนาดของไดอะแฟรมต้นแบบ 2,500 ไมครอนจากสมการที่ 5.2 ซึ่งจะได้ขนาดของช่องไดอะแฟรมหลังการกัดเป็น 2,480 ไมครอน

5.2 กระบวนการออกแบบฮีเทออร์

การออกแบบจะพิจารณาและศึกษาการสร้างฮีเทออร์จากโครงสร้างและทฤษฎีการทำงาน ของฮีเทออร์โดยคำนึงถึงอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงที่ต้องการใช้งาน และต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับการ นำไปใช้งาน โดยการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ต้องไม่เกิดออกไซด์ได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวสูง และมีค่า สภาพความต้านทานต่ำในการสร้างฮีเทออร์ในที่นี้ได้ทำการเลือกโลหะแพลทินัมซึ่งมีค่าสภาพ ความต้านทาน $10.30 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ และจุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส มาทำเป็นไมโครฮีเทออร์จาก โลหะแพลทินัมด้วยกระบวนการ ดีซี สปีดเตอร์ริง ใช้ความหนาของแพลทินัมเท่ากับ 2,500 ไมครอน ได้ค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มเมื่อผ่านกระบวนการกัดเป็นลวดลายของไมโครฮีเทออร์ มีค่าเท่ากับ 60.3 โอห์ม^[19] (ตั้งกระบวนการสร้างตามภาคผนวก ข) โดยเริ่มจากการเลือกชนิดของ ฐานรองผ่านกระบวนการขั้นตอนต่าง ๆ ตามลำดับ เช่น กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการ สปีดเตอร์ริง กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และ กระบวนการกัดจะมีโครงสร้าง ดังรูป 5.2 และมีลวดลายตามรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 โครงสร้างไมโครฮีเทออร์



รูปที่ 5.3 ลวดลายไมโครฮีทเตอร์

โดยการออกแบบกำหนดค่าความต้านทานของลวดลายฟิล์มโลหะได้จาก

$$R = R_s N \quad (5.3)$$

R คือ ค่าความต้านทานของตัวฮีทเตอร์ (Ω)

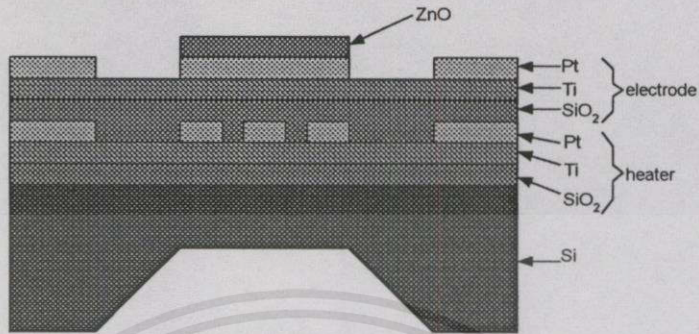
R_s คือ ค่า sheet resistance (Ω/\square)

N คือ จำนวนช่องที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

5.3 การสร้างออกแบบลวดลายหัววัดก๊าซ

การออกแบบหัววัดก๊าซจะต้องพิจารณาถึง โครงสร้างและทฤษฎีการทำงานของหัววัดก๊าซ โดยดูคุณสมบัติต่าง ๆ ของก๊าซเซนเซอร์ แล้วนำไปออกแบบโครงสร้างด้วยการพิจารณาถึงขนาดของฐานรองที่ต้องมีตัวให้ความร้อนอยู่ในอีกด้วย ซึ่งก็คือฮีทเตอร์ที่กล่าวไว้ในขั้นต้นแล้ว แล้วอีกทั้งยังพิจารณาถึงตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าอีกด้วยลวดลายที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการผลิตกระจกมาส์ก โดยใช้โปรแกรม LEDIT ออกแบบวาดลวดลายแล้วนำไปทำเป็นฟิล์มออกมาเป็นกระจกมาส์ก เพื่อจะใช้ในกระบวนการสร้างหัววัดก๊าซบนแผ่นผลึกซิลิคอนต่อไป โดยจะผ่านกระบวนการต่าง ๆ เป็นลำดับ เช่น กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี กระบวนการสปีดเตอร์ริง การกัดด้วยสารละลาย เป็นต้น ซึ่งเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการสร้าง ผลที่ได้ก็คือชิพของหัววัดก๊าซบนฐานรองซิลิคอน และจะมีการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นบนแผ่นฐานรองก่อนที่จะนำไปตัดแยกและเมื่อทำการทดลองเสร็จแล้ว แผ่นผลึกซิลิคอนก็จะถูกนำไปตัดออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ตามขนาดของหัววัดก๊าซ เพื่อที่จะสะดวกต่อการนำไปต่อใช้งานตรวจจับก๊าซในบริเวณที่ต้องการต่อไป

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาหัววัดก๊าซที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบ 2 ขั้ว ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 5.4 ซึ่งตามโครงสร้างที่เห็นนี้จะมีชั้นฮีทเตอร์อยู่ด้านล่างอีกชั้นหนึ่งซึ่งเป็นชั้นที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิเหมาะสมกับการทำงานของก๊าซเซนเซอร์

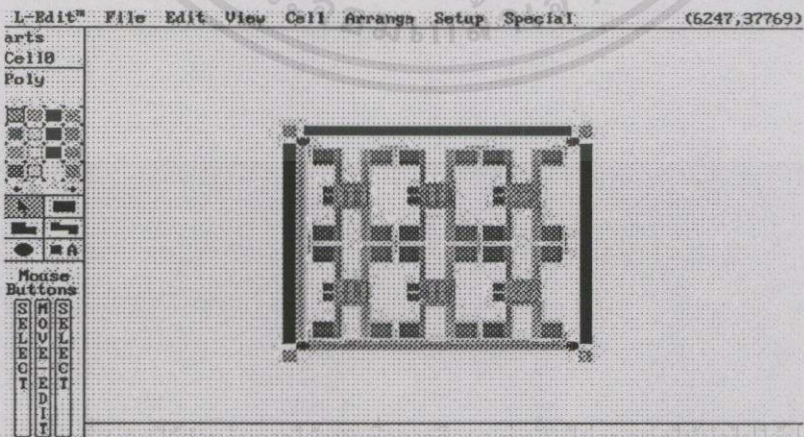


รูปที่ 5.4 ภาพ โครงสร้างหัววัดก๊าซที่มีฮีทเตอร์อยู่ด้านล่าง

โดยลักษณะขั้วอิเล็กทรอนิกส์ 2 ขั้ว และการสร้างกระจกคั่นแบบ (mask) จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.4

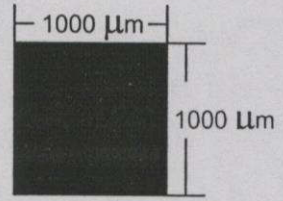
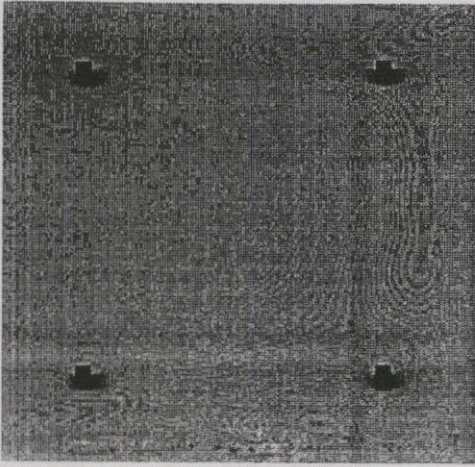
5.4 การสร้างกระจกมาส์กคั่นแบบ

เมื่อได้คั่นแบบลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์แล้วพร้อมกับลวดลายของฮีทเตอร์และรูปแบบโครงสร้างของชั้นต่าง ๆ แล้ว ได้นำมาออกแบบวาดลงในโปรแกรม LEDIT ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วาดรูปแบบโครงสร้างภายในตัวชิพซึ่งใช้งานได้ง่าย นำมาวาดคั่นแบบแล้วนำภาพที่เขียนแล้วไปถ่ายภาพเป็นฟิล์มแบบ positive ซึ่งจะมีลักษณะของภาพจะเหมือนกับที่วาดในโปรแกรม ซึ่งขั้นตอนต่อไปก็จะนำเอามาประกอบกับกระจกเพื่อทำเป็นกระจกมาส์กซึ่งมีขนาด 3"x3" ในลำดับต่อไป

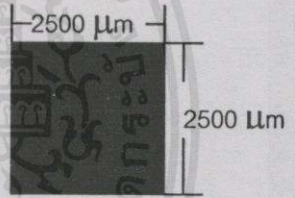
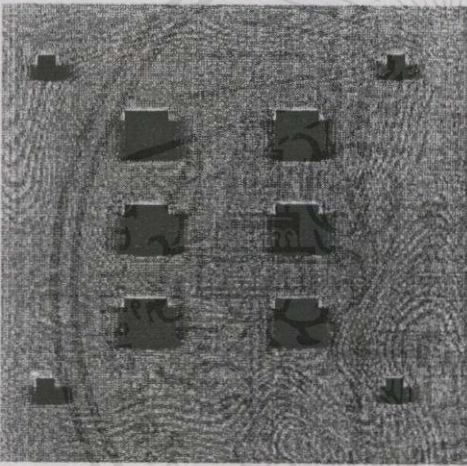


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบัน

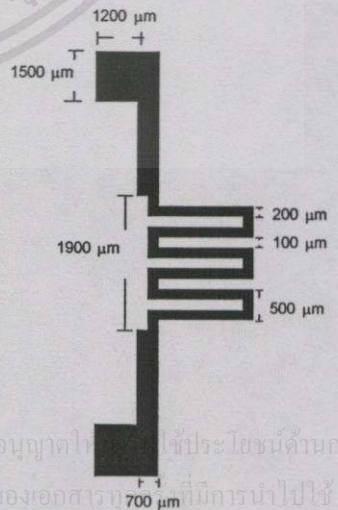
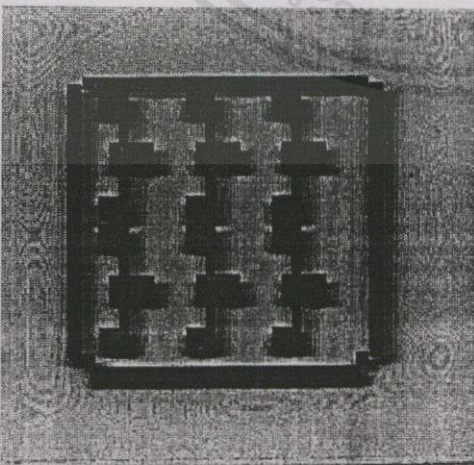
รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายโปรแกรม LEDIT ที่นำมาออกแบบลวดลายคั่นแบบ



รูปที่ 5.6 ดันแบบมาสก์ที่ 1 ใช้สร้างจุด Alignment

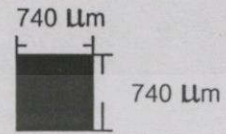
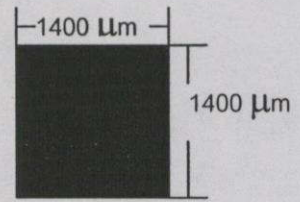
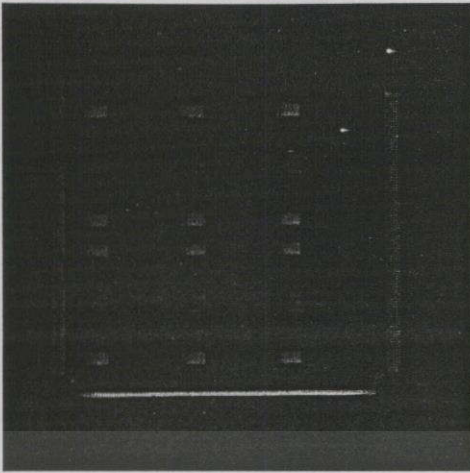


รูปที่ 5.7 ดันแบบมาสก์ที่ 2 เปิดช่อง ไดอะแฟรม

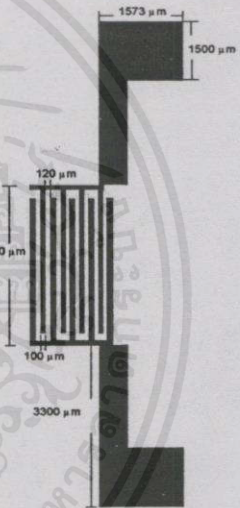
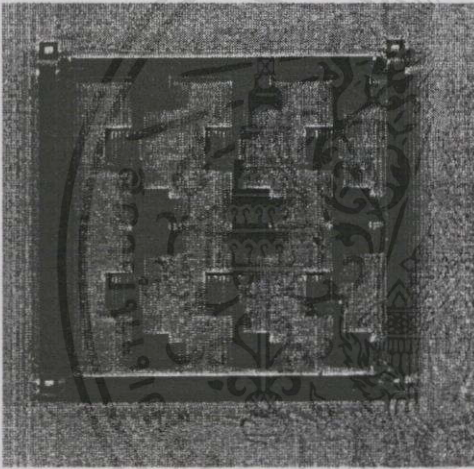


เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย
 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

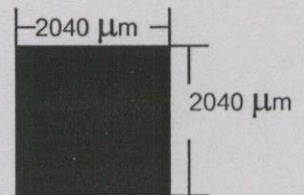
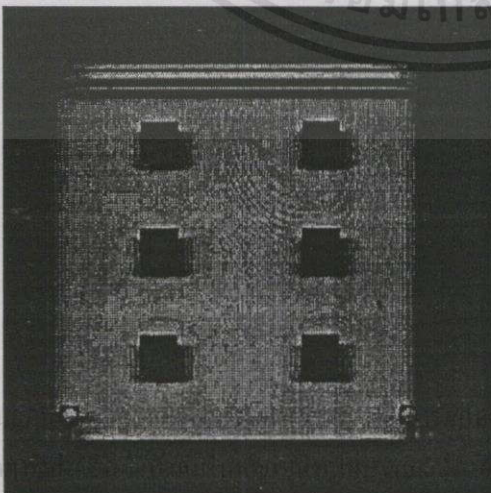
รูปที่ 5.8 ดันแบบมาสก์ที่ 3 ใช้สำหรับสร้างฮีเตอร์



รูปที่ 5.9 ดันแบบมาสก์ที่ 4 สำหรับเจาะช่องขั้วของฮีเทออร์



รูปที่ 5.10 ดันแบบมาสก์ที่ 5 สำหรับสร้างขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 5.11 ดันแบบมาสก์ที่ 6 สำหรับปิดช่องฟิล์มบาง ZnO ไม่ให้ถูกกัด

เอกสารนี้เป็น
ไม่ว่ากรณีใด

เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ขั้นตอนการสร้างหัววัดก๊าซ

การสร้างหัววัดก๊าซซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในวิทยานิพนธ์ นี้ได้ใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำแบบแนวระนาบ (Planar technology) อาศัยเทคนิคการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอน โดยใช้การสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แผ่นฐานรองซึ่งเป็นแผ่นผลึกเดี่ยวสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ระบายของผลึกคือ (100) ซึ่งกระบวนการการสร้างเริ่มจากการเตรียมแผ่นฐานรอง ไปจนกระทั่งถึงการสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างชั้นฉนวนด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)
3. กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ (Metalization)
4. การสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering)
5. กระบวนการเก็บประจุ (Packaging)

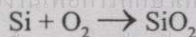
เมื่อทำการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนตามกระบวนการขั้นต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ก็จะได้แผ่นผลึกที่สะอาดพร้อมที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในขั้นตอนต่อไป

5.5.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

กระบวนการนี้เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อไปปกคลุมที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกสร้างปกคลุมผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นหน้าฉากป้องกันบริเวณผิวหน้ามิให้มีผลกระทบต่อชั้นโครงสร้างที่จะสร้างขึ้นในชั้นลำดับต่อไป ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation process) โดยการให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน (O_2) หรือบรรยากาศที่มีไอน้ำ (H_2O) ที่อุณหภูมิในช่วง 800 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ คือ กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation) และกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation) ปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นดังนี้

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



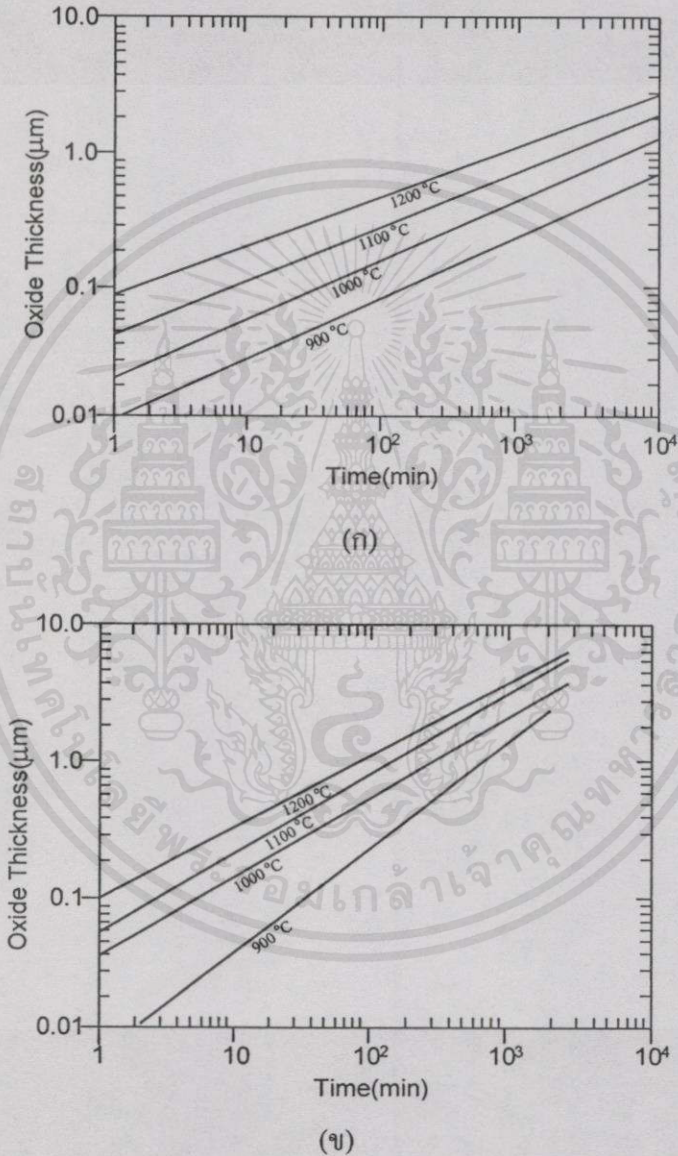
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกบนเว็บไซต์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation)



กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งจะให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างสูง แต่จะใช้เวลาในการเกิดซิลิกอนไดออกไซด์นานกว่ากระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น ซึ่งมีอัตราการเกิดซิลิกอนไดออกไซด์ได้เร็ว แต่ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำและมีรูพรุนมาก ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง

อัตราการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ของกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งและแบบชื้นที่ขึ้นอยู่กับเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 (ก) และ 5.12 (ข) ตามลำดับ^[17]



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์กับเวลา

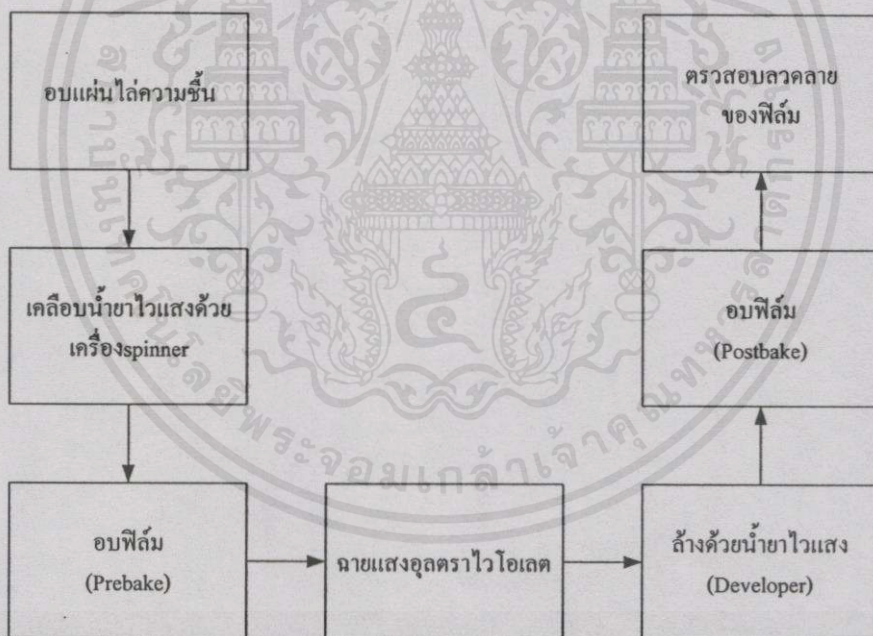
เอกสารนี้เป็น (ก) กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด (ข) กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึก เพื่อเปิดช่องซึลิกอน ไดออกไซด์หรือกำหนดพื้นที่บริเวณที่ต้องการโดยใช้น้ำยาไวแสง น้ำยาไวแสงที่ใช้กันโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) เช่น AZ-1350, AZ-4620, AZ-5014, AZ-4700 เป็นต้น น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะมีคุณสมบัติ คือ เมื่อผ่านการฉายแสงบริเวณที่โดนแสงจะทำปฏิกิริยาซึ่งสามารถลอกออกด้วยน้ำยาล้างได้ ส่วนบริเวณที่ไม่โดนแสงจะยังคงอยู่เหมือนเดิม
2. น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) เช่น Way coat, OMR, DTFR เป็นต้น น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับน้ำยาไวแสงชนิดบวก กล่าวคือบริเวณที่โดนแสงจะทำปฏิกิริยาแข็งตัว ส่วนบริเวณที่ไม่โดนแสงจะถูกล้างออกด้วยน้ำยาล้าง

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแสดงได้ดังรูปที่ 5.13



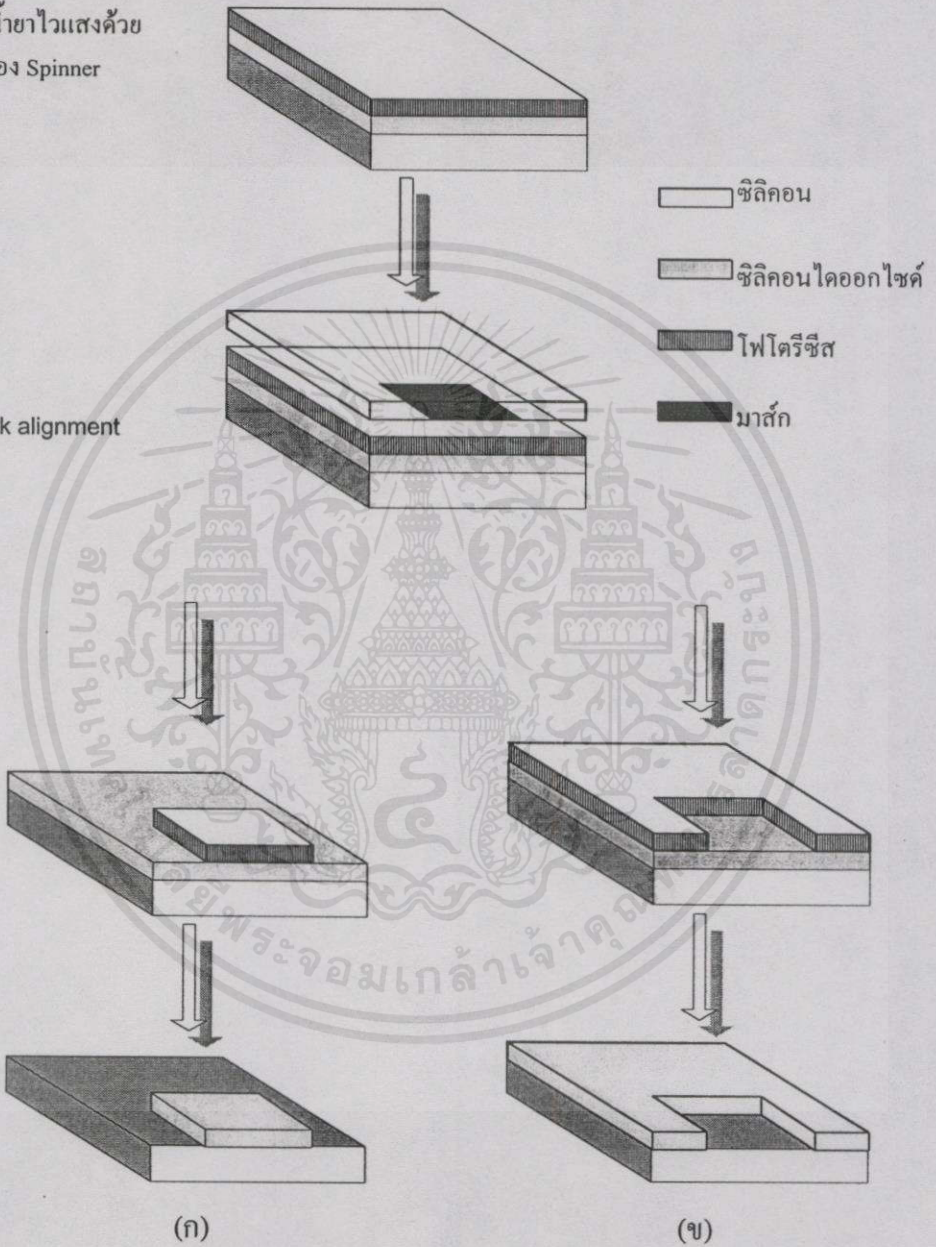
รูปที่ 5.13 ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ขั้นตอนแรกเริ่มจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี คือ การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกซึลิกอนโดยใช้เทคนิค สปิน (Spin coating) เพื่อให้ให้น้ำยาไวแสงเคลือบสม่ำเสมอบนผิวหน้าของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ แล้วนำไปอบเพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง จากนั้นฉายแสงอุลตราไวโอเลต แสงอุลตราไวโอเลตนั้นจะทำให้โครงสร้างของน้ำยาไวแสงนั้นเปลี่ยนแปลง โดยจะทำปฏิกิริยากับ

โมเลกุลของน้ำยาไวแสงถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบจะเกิดพันธะเกาะเกี่ยวกัน (permilized) ในบริเวณที่ถูกฉายแสง ส่วนน้ำยาไวแสงชนิดบวกพันธะของโมเลกุลจะแตกออกเมื่อถูกแสง หลังจากนั้นก็จะได้ลวดลายของฟิล์มตามที่ต้องการเพื่อจะนำไปใช้กับกระบวนการในขั้นต่อไป

เคลือบน้ำยาไวแสงด้วย
เครื่อง Spinner

Mask alignment



รูปที่ 5.14 ขั้นตอนโฟโตลิโธกราฟีที่ใช้น้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็น (ก) น้ำยาไวแสงชนิดบวก ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตามสงวนลิขสิทธิ์สงวนเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
(ข) น้ำยาไวแสงชนิดลบ

5.5.3 กระบวนการสร้างลวดลาย (Metalization)

กระบวนการสร้างลวดลายอิทเตอร์บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์และซัลไฟด์ไดออกไซด์ที่สร้างบนซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างทับชั้นอิทเตอร์อีกชั้นเพื่อทำเป็นหัววัดก๊าซนี้ได้ใช้โลหะแพลทินัมมาเคลือบเป็นฟิล์มบางบนผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีชั้นของโลหะไททาเนียมเป็นตัวประสาน (combine) โดยโลหะทั้งสองจะอาศัยกระบวนการสปัตเตอร์ริงต์ด้วยการซินเตอร์ริงในบรรยากาศไนโตรเจนเพื่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มมิกมีความต้านทานต่ำ

5.5.4 การสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะสามารถสร้างได้หลายแบบแต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้กระบวนการสปัตเตอร์ริงต์ที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 4 โดยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะมีขนาดประมาณ 3×3 ตารางมิลลิเมตรและในการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนอิเล็คโตรดนี้จะใช้ AZ-4620 เป็น photoresist ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเป็นมาสก์ป้องกันการกัด (etching) ของสารละลายกรดจึงจะทำให้ได้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ตามแบบที่ต้องการ

5.5.5 กระบวนการเก็บประจุ

กระบวนการเก็บประจุ คือ การที่นำเอาวงจรรวมหรือสิ่งประดิษฐ์ที่ได้สร้างขึ้นมาบรรจุลงตัวถังในที่นี้คือหัววัดก๊าซให้พร้อมที่ใช้งานได้สะดวกขึ้น โดยหัววัดก๊าซที่สร้างขึ้นมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรก เมื่อนำผลการทดสอบแล้วจะถูกนำมาตัดแยกชิ้นเล็ก ๆ แต่ละวงจร หลังจากนั้นนำชิปที่ได้ติดลงบนตัวถัง ทำการต่อสายจากวงจรรวมที่ชิปมายังที่ขาของตัวถัง ทำการฉีกฝาเรียบร้อย และทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกครั้งซึ่งเป็นขั้นสุดท้ายเพื่อที่นำไปใช้งานต่อไป

5.6 กระบวนการสร้างหัววัดก๊าซซิงค์ออกไซด์

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างหัววัดก๊าซแบ่งได้เป็นขั้นตอนย่อย ๆ ได้ โดยมีขั้นตอนรายละเอียดดังนี้

(1) เตรียมวัสดุฐานรอง

- ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดพี (P) เพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
- ขนาดความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400 ไมครอน

(2) การทำความสะอาดผิวหน้าผลึกเริ่มต้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การทำความสะอาดผิวหน้าเป็นการล้างสิ่งเจือปน โลหะหนัก เศษซิลิคอน สารแขวนลอย คราบไขมัน รวมทั้งซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิว เพื่อให้แผ่นสะอาดจนพร้อมที่จะ

นำไปสร้างต่อไป ขั้นตอนการทำความสะอาดผิวเริ่มต้น ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะเป็นขั้นตอนที่ทำให้เป็นมาตรฐานของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ 5.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

ขั้นตอน	เทคนิค	อุณหภูมิ (°C)	เวลา	หมายเหตุ
Super sonic in solution	DI Water	-	5 นาที	
Surface cleaning	DI Water			Rinse
	HNO ₃	hot	10 นาที	Boil
	DI Water	-	5 วินาที	Rinse
	DI Water	hot	5 นาที	Boil
	DI Water	hot	5 นาที	Boil
	DI Water	-	5 วินาที	Rinse
	Tri Chlo	hot	5 นาที	Boil
Super sonic	Acetone	-	3 นาที	-
In solution(SSS)	DI Water	-	-	Rinse
Slice etching	HF 5 %	-	20 วินาที	Rinse
	DI Water	-	-	Rinse
	DI Water	-	-	Rinse

(3) กระบวนการออกซิเดชัน (ชั้นฉนวน)

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในขั้นตอนนี้เพื่อจะเป็นชั้นฉนวน เพื่อคลุมแผ่นซิลิคอนและป้องกันการกัดเป็นช่องที่ใช้สำหรับการ Alignment และเป็นชั้นไดอะแพรมฉะนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างหน้าจึงสร้างหน้าประมาณ 7,000 อังสตรอม โดยใช้กระบวนการ Dry Oxidation และ Wet Oxidation โดยมีเงื่อนไขดังนี้

อัตราการให้ก๊าซออกซิเจน 1,200 cc/min (Dry oxidation)

อัตราการให้ก๊าซออกซิเจน 1,000 cc/min (Wet oxidation)

อุณหภูมิ (°C) 1,000 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ขั้นตอนการเตรียมช่อง

ขั้นตอน	เทคนิค	อุณหภูมิ(°C)	เวลา	หมายเหตุ
Etching	Buffer for oxidation	-	8 นาที	-
	DI Water	-	10 วินาที	Rinse
check and clean	H ₂ SO ₄	hot	5 นาที	Rinse
waycoat	H ₂ SO ₄	hot	5 นาที	Rinse
	DI Water	hot	1 นาที	Rinse
	DI Water	hot	1 นาที	Rinse
	DI Water	-	1 นาที	Rinse

(6) กระบวนการกัด (etching)

กระบวนการนี้เป็นการสร้างช่องที่ใช้สำหรับการ alignment ด้วยการใช้สารละลาย EPD (Ethylenediamine + Pyrocatechol + DI)

(7) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 2

กระบวนการใช้กระจกมาสก์ที่ 2 เป็นต้นแบบสำหรับกัดส่วนของซิลิคอนที่ทำเป็นไดอะแฟรม ซึ่งจะทำด้านหน้าของแผ่นในขั้นตอนนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ คือ waycoat โดยอาศัยขั้นตอนดังตารางที่ 5.2 เช่นกัน

(8) กระบวนการสร้างช่องไดอะแฟรม

กระบวนการนี้จะเป็นการตรวจสอบความคมชัดของมาสก์และทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนซึ่งจะเหมือนกับกระบวนการขั้นที่ 5

(9) กระบวนการกัด (etching)

กระบวนการนี้เป็นการสร้างช่องที่ใช้สำหรับการสร้างไดอะแฟรมด้วยการใช้สารละลาย EPD (Ethylenediamine + Pyrocatechol + DI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(10) กระบวนการทำความสะอาด

กระบวนการที่นี้จะเป็นการทำความสะอาดแผ่นโดยการล้างซิลิคอนไดออกไซด์เดิมออกทั้งหมดและทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนซึ่งจะเหมือนกับกระบวนการขั้นที่ 5

(11) กระบวนการสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์

เมื่อได้แผ่นที่มีโคอะเฟรมจากขั้นตอนที่ผ่านมาจะทำการทำความสะอาดแผ่นโดยการกัดซิลิคอนไดออกไซด์เดิมออกก่อนแล้วอาศัยกระบวนการสปัตเตอร์ริง ด้วยระบบ RF sputtering ในบรรยากาศของอาร์กอน-ออกซิเจน Ar : O₂ (85:15) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่ขึ้นมาโดยไม่หนามากเพื่อการระบายความร้อนได้ดีจึงสร้างซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 2,500 อังสตรอม

(12) กระบวนการสร้างชั้นประสานชั้นแรก

ใช้โลหะไททาเนียมโดยอาศัยกระบวนการ ดีซี สปัตเตอร์ริง (DC sputtering) ทำการสร้างฟิล์มบางโลหะไททาเนียมลงบนผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม

(13) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 3

ใช้กระจกมาสก์ที่ 3 เป็นต้นแบบสำหรับกัดส่วนของไททาเนียมที่ไม่ต้องการออก ในขั้นตอนนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก คือ AZ 4620 โดยมีขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 5.4 ขั้นตอนการโฟโตลิโธกราฟีน้ำยาไวแสงชนิดบวก

กระบวนการ	เทคนิค	อุณหภูมิ(°C)	เวลา	หมายเหตุ
Photolithography	Spin(5000rpm)	25	20 วินาที	AZ4620
	Prebake	95	35 วินาที	
	Expose	-	60 วินาที	Mask III,IV,V,VI
Developed	Az Develop 1	-	120 วินาที	Rinse
	Az Develop 2	-	90 วินาที	Rinse
	DI Water	-	10 วินาที	Rinse
	DI Water	-	10 วินาที	Rinse
Post-bake		95	35 นาที	

ไม่ทำการฉีดไล่ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(14) กระบวนการกัด (etching) ชั้นไททาเนียม

สารละลายที่ใช้ละลายชั้นไททาเนียม ได้แก่ สารละลายผสมซึ่งมีกรดกัดไททาเนียม โดยใช้น้ำยา $H_2O : HF : H_2O_2$ 20:1:1 จุ่มแผ่นที่ผ่านขั้นตอนที่ 5 ลงในสารละลายนี้มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นล้างฟิล์มออกด้วยการจุ่ม acetone และล้างด้วย DI Water

(15) กระบวนการสร้างชั้นฮีเตอร์

ใช้โลหะแพลทินัมโดยอาศัยกระบวนการ ดีซี สปีดเตอร์ริง (DC sputtering) ทำการสร้างฟิล์มบางลงบนผิวหน้าชั้นไททาเนียมและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ มีความหนาประมาณ 6,000 อังสตรอม

(16) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 3

ใช้กระจกมาสก์ที่ 3 เป็นต้นแบบสำหรับกัดส่วนของแพลทินัมที่ไม่ต้องการออก ในขั้นตอนนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก คือ AZ 4620 โดยอาศัยขั้นตอนดังตาราง 5.4 เช่นกัน

(17) ขั้นตอนการกัดกระบวนการกัด (etching) ชั้นแพลทินัม

สารละลายที่ใช้ละลายชั้นแพลทินัม ได้แก่ สารละลายผสมซึ่งมีกรดกัดแพลทินัม โดยใช้น้ำยา $HCl : HNO_3$ 3:1 (hot) จุ่มแผ่นที่ผ่านขั้นตอนที่ 15 ลงในสารละลายเป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นล้างฟิล์มออกด้วยการจุ่ม acetone และล้างด้วย DI Water

(18) กระบวนการ ซินเตอร์ริง (Sintering)

ทำการซินเตอร์ริงเพื่อให้โครงสร้างของฟิล์มมีการเกาะกัน ได้ดียิ่งขึ้น โดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

(19) กระบวนการสร้างชั้นฉนวนชั้นที่สอง

ขบวนการนี้เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยอาศัยกระบวนการสปีดเตอร์ริง ด้วยระบบ RF sputtering ในบรรยากาศของอาร์กอน-ออกซิเจน $Ar : O_2$ (85:15) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที (ขั้นตอนการสปีดเตอร์ริงและวิธีสปีดเตอร์ริงได้แสดงในบทที่ 4)

(20) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 4

ใช้กระจกมาสก์ที่ 4 เป็นต้นแบบสำหรับกัดซิลิคอน ไดออกไซด์เปิดขั้วฮีเตอร์ ในขั้นตอนนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก คือ AZ 4620 โดยอาศัยขั้นตอนตามตาราง 5.4 เช่นกัน

(21) กระบวนการกัดซิลิคอนไดออกไซด์

นำแผ่นจากกระบวนการที่ 19 มาเปิดช่องขั้วฮีทเตอร์ซึ่งอยู่ด้านล่างโดยในสารละลาย
buffer for oxidation

(22) ขั้นตอนสร้างชั้นประสานชั้นที่สอง

ใช้โลหะไททาเนียมโดยอาศัยกระบวนการ ดีซี สปีดเตอร์ริง (DC sputtering) ทำการ
สร้างฟิล์มบางโลหะไททาเนียมลงบนผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีความหนาประมาณ
1,000 อังสตรอม

(23) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 5

ใช้กระจกมาสก์ที่ 5 เป็นต้นแบบสำหรับกัดส่วนของไททาเนียมที่ไม่ต้องการออก ใน
ขั้นตอนนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก คือ AZ 4620 โดยมีขั้นตอนดังตาราง 5.4 เช่นกัน

(24) กระบวนการกัด (etching) ชั้นไททาเนียม

สารละลายที่ใช้ละลายชั้นไททาเนียม โดยอาศัยกระบวนการที่ 14

(25) กระบวนการสร้างชั้นอิเล็กโทรด

ใช้โลหะแพลทินัมโดยอาศัยกระบวนการ ดีซี สปีดเตอร์ริง (DC sputtering) ทำการ
สร้างฟิล์มบางลงบนผิวหน้าชั้นไททาเนียมและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ มีความหนาประมาณ 6,000
อังสตรอม

(26) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสร้างอิเล็กโทรด

เพื่อทำลวดลายขั้วอิเล็กโทรด โดยขั้นตอนจะเหมือนกับกระบวนการที่ 23

(27) ขั้นตอนการกัดกระบวนการกัด (etching) ชั้นแพลทินัม

สารละลายที่ใช้ละลายชั้นแพลทินัม ได้แก่ สารละลายผสมซึ่งมีกรดกัดแพลทินัมโดย
ใช้น้ำยา HCl : HNO₃ 3:1 (hot) จุ่มแผ่นที่ผ่านขั้นตอนที่ 22 ลงในสารละลายเป็นเวลา 1 ถึง 2 นาที
หลังจากนั้นล้างฟิล์มออกด้วยการจุ่ม acetone และล้างด้วย DI Water

(28) กระบวนการ ซินเตอร์ริง (Sintering)

ทำการซินเตอร์ริงเพื่อให้โครงสร้างของฟิล์มมีการเกาะกันได้ดียิ่งขึ้น โดยการตั้ง
แผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที ที่อุณหภูมิ
700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

(29) กระบวนการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์(ZnO)

โดยกระบวนการใช้การสเปคเตอร์ริง เพื่อสร้างชั้นซิงค์ออกไซด์ แบบอาร์เอฟสเปคเตอร์ริง ที่บรรยากาศอาร์กอนออกซิเจน Ar : O₂ (85:15) อุณหภูมิฐานรอง 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

(30) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาส์กที่ 6

ใช้กระจกมาส์กที่ 6 เป็นคั้นแบบ สำหรับกัดซิงค์ออกไซด์เพื่อให้ได้ขนาดที่ออกแบบไว้ขั้นตอนนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก คือ AZ 4620 โดยอาศัยกระบวนการดังตาราง 5.4 เช่นกัน

(31) ขั้นตอนการกัดกระบวนการกัด (etching)

สารละลายที่กัดซิงค์ออกไซด์ในส่วนที่ไม่มีฟิล์ม ได้แก่ สารละลายผสมซึ่งมีกรดกัดซิงค์ออกไซด์โดยใช้น้ำยา HCl : HNO₃ 3 : 1 จุ่มแผ่นที่ผ่านขั้นตอนที่ 30 ลงในสารละลายเป็นเวลา 3 วินาทีหลังจากนั้นล้างฟิล์มออกด้วยการจุ่ม acetone และล้างด้วย DI Water

(32) กระบวนการแอนนีส (Anneal)

ทำการแอนนีสเพื่อให้โครงสร้างของฟิล์มมีการเกาะกันได้ดียิ่งขึ้น โดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ลักษณะโครงสร้างของวงจรตามลำดับการสร้าง ดังรูป 5.14 ซึ่งจะเป็ขั้นตอนในการสร้างหัววัดก๊าซซิงค์ออกไซด์ตามลำดับดังนี้

ขั้นตอนที่ (1)-(2) แผ่นเริ่มต้น

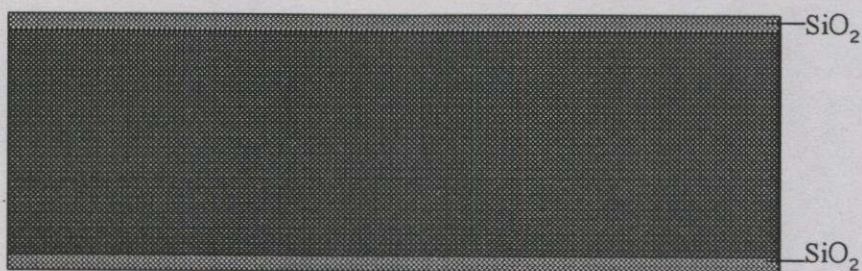


เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทเอกชน การเปิดเผยข้อมูลอาจก่อให้เกิดความเสียหายทางธุรกิจได้

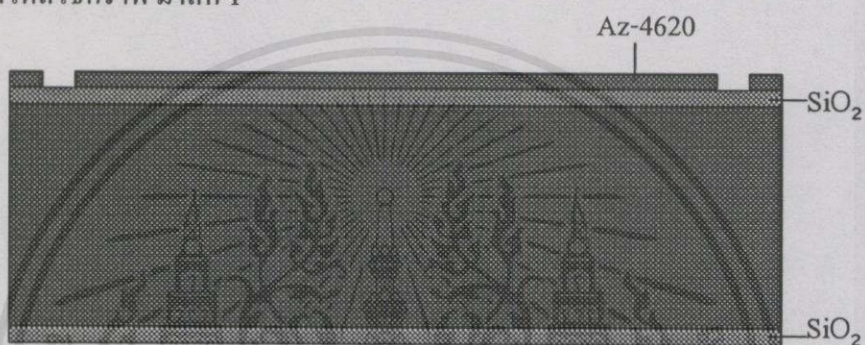
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15 โครงสร้างขั้นตอนการสร้างหัววัดซิงค์ออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์

ขั้นตอนที่ (3) ออกซิเดชัน



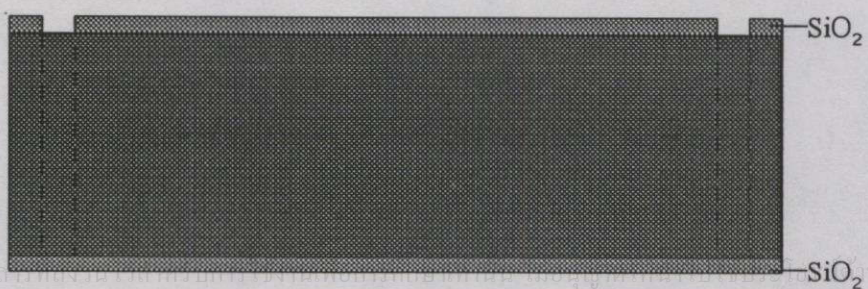
ขั้นตอนที่ (4) โฟโตลิโธกราฟี มาส์ก 1



ขั้นตอนที่ (5) Etching



ขั้นตอนที่ (6) Etching

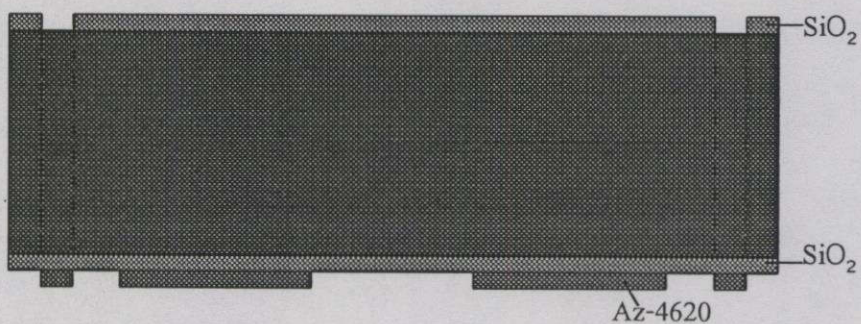


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยทางอิเล็กทรอนิกส์โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

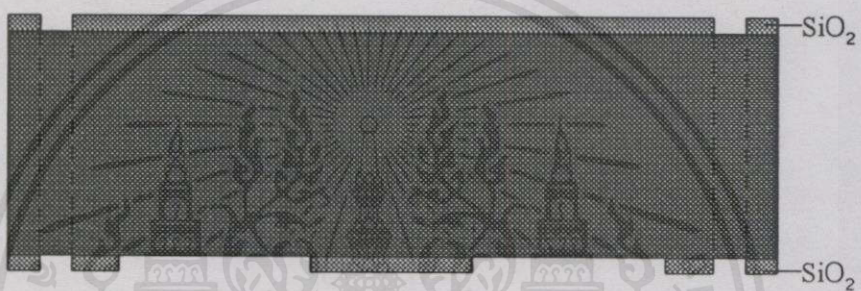
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15 (ต่อ)

ขั้นตอนที่ (7) โฟโตลิโธกราฟีมาสก์ 2



ขั้นตอนที่ (8) Etching



ขั้นตอนที่ (9) Etching

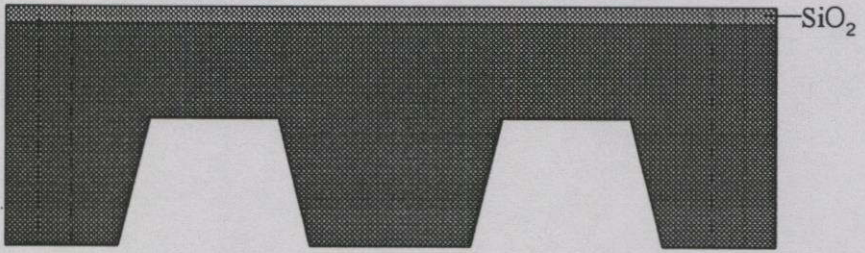


ขั้นตอนที่ (10) ทำความสะอาดแผ่น

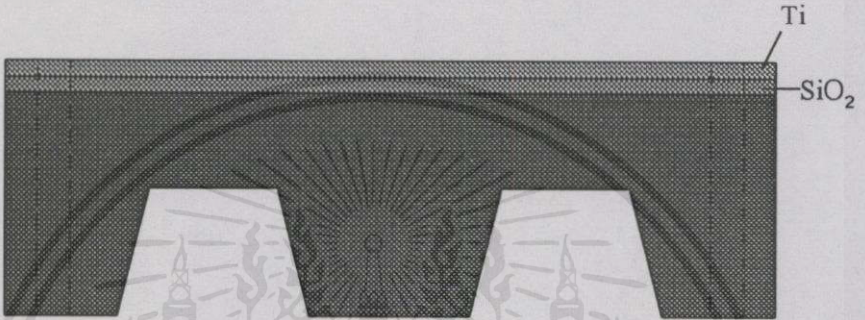


เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ผ่านการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ (11) สปีดเตอร์ริง



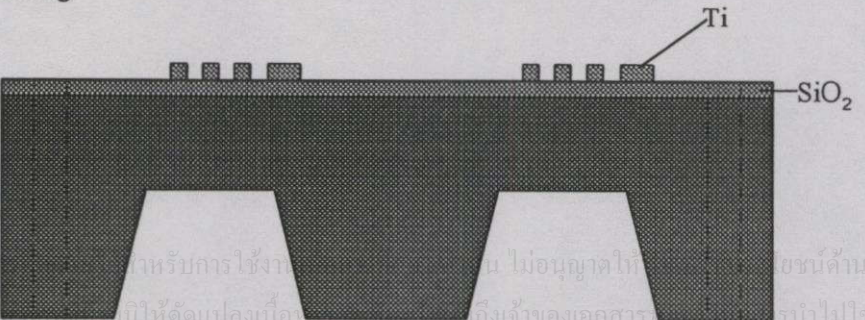
ขั้นตอนที่ (12) สปีดเตอร์ริง



ขั้นตอนที่ (13) โฟโตลิโธกราฟีมาสก์ 3



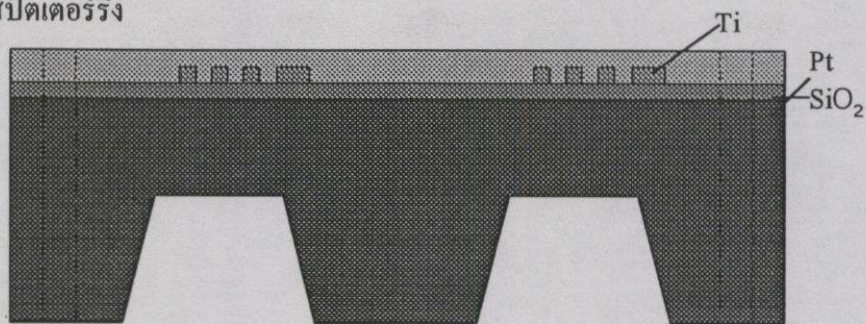
ขั้นตอนที่ (14) Etching



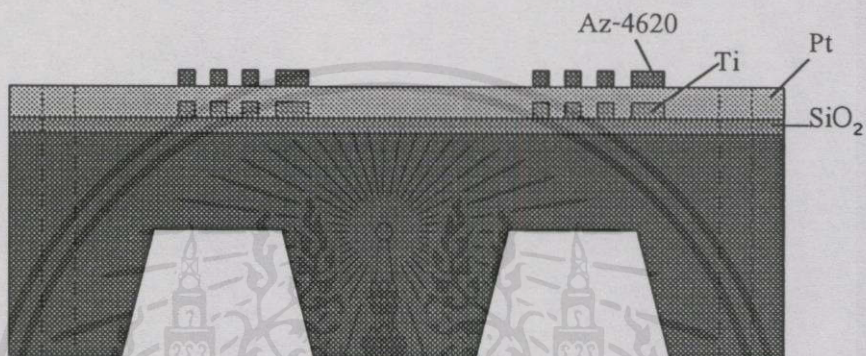
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์บริการวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รูปที่ 5.15 (ต่อ)

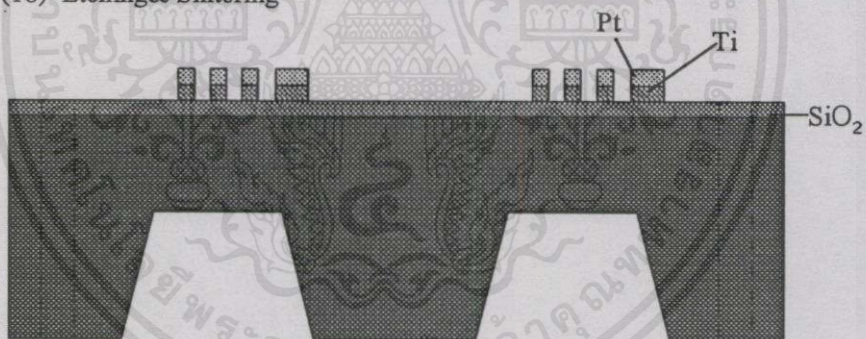
ขั้นตอนที่ (15) สปีดเตอร์ริง



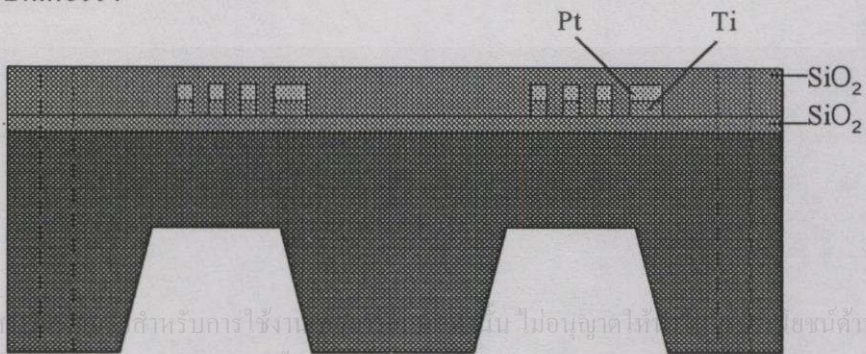
ขั้นตอนที่ (16) โฟโตลิโธกราฟีมาสก์ 3



ขั้นตอนที่ (17) - (18) Etching & Sintering



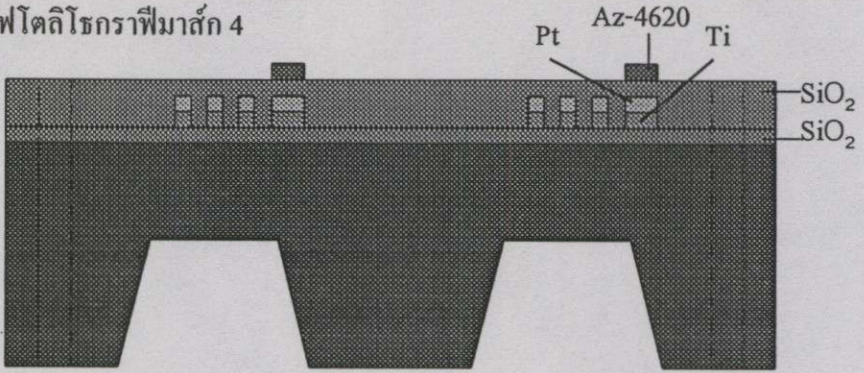
ขั้นตอนที่ (19) สปีดเตอร์ริง



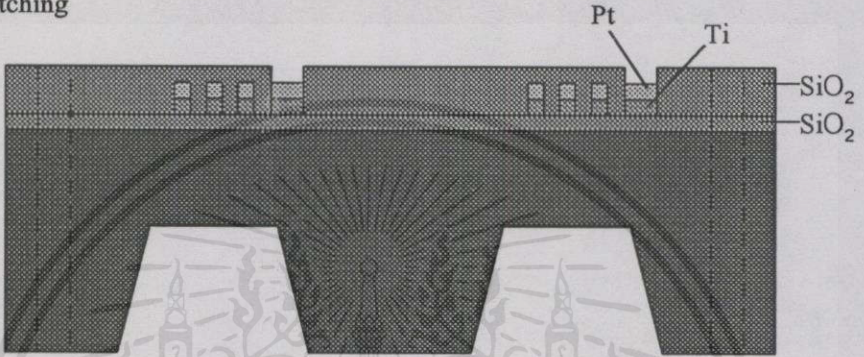
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15 (ต่อ)

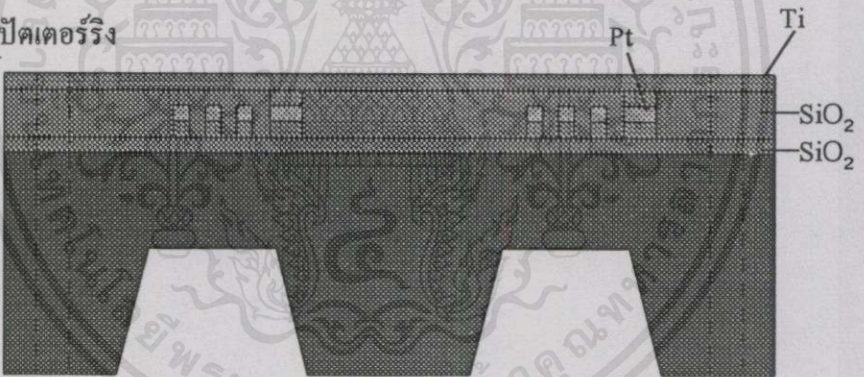
ขั้นตอนที่ (20) โฟโตลิโธกราฟีมาสก์ 4



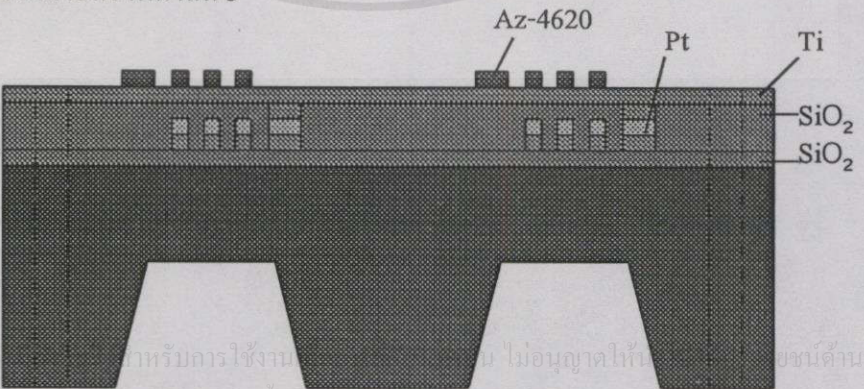
ขั้นตอนที่ (21) Etching



ขั้นตอนที่ (22) สเป็คเตอร์ริง

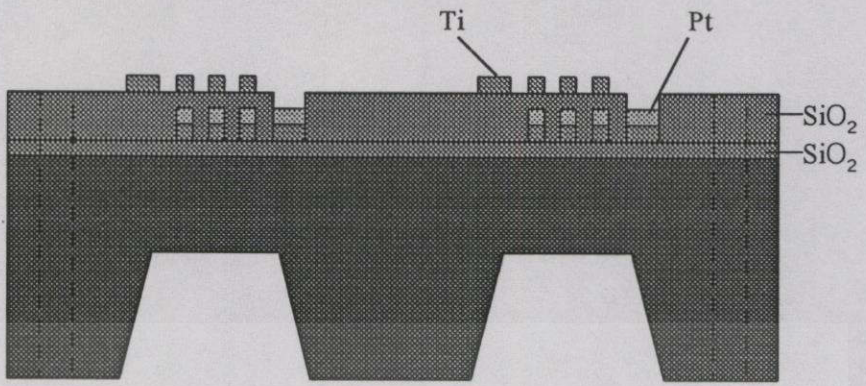


ขั้นตอนที่ (23) โฟโตลิโธกราฟีมาสก์ 5

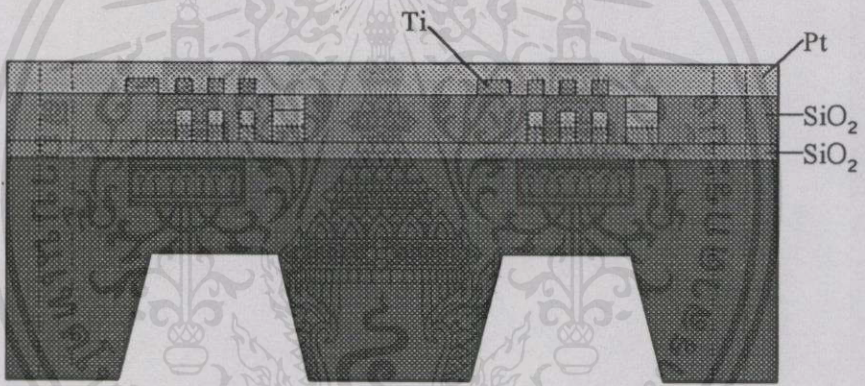


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 5.15 (ต่อ)

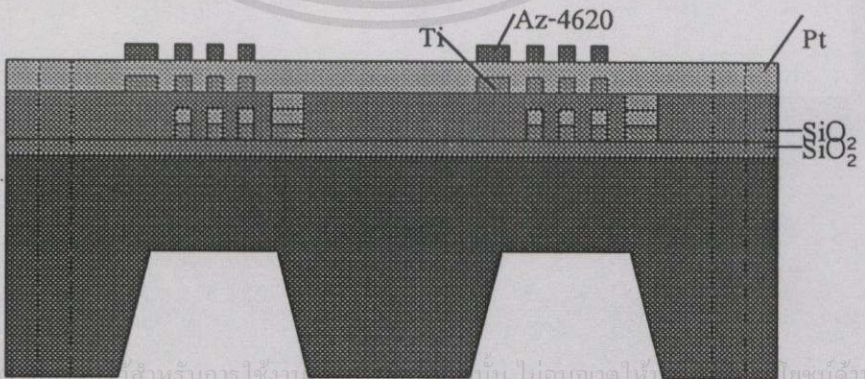
ขั้นตอนที่ (24) Etching



ขั้นตอนที่ (25) สเปคเตอร์ริง

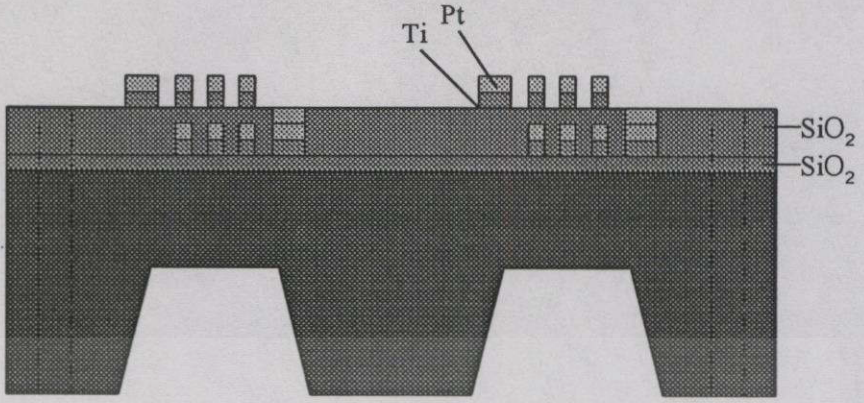


ขั้นตอนที่ (26) โฟโตลิโกราฟีมาสก์ 5

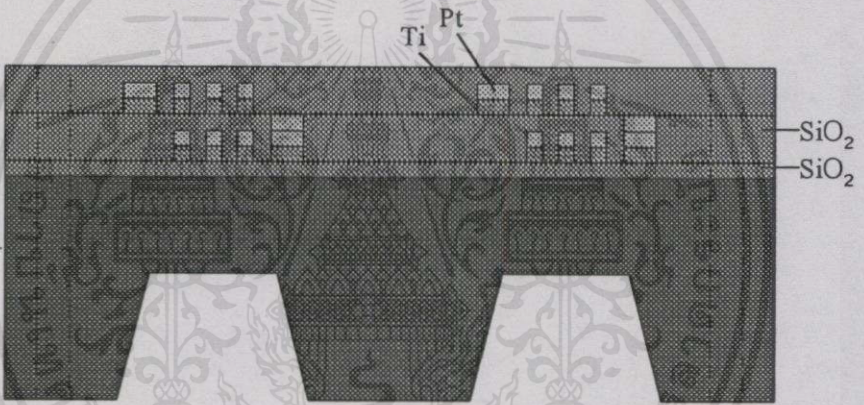


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้
 ใช้อื่นๆ ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 5.15 (ต่อ)

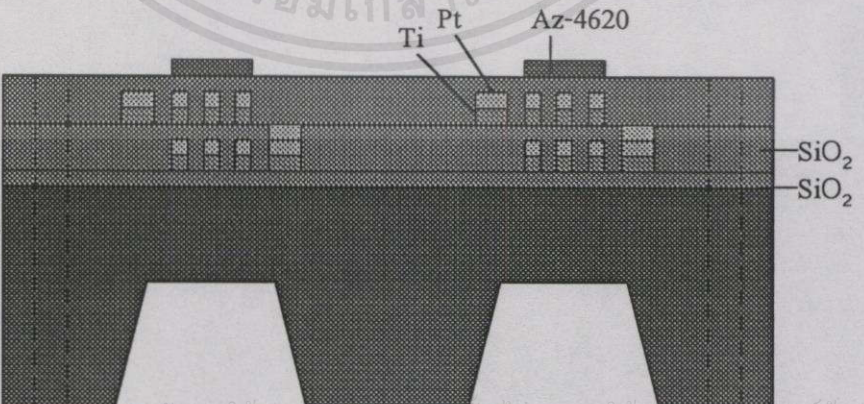
ขั้นตอนที่ (27) - (28) Etching & Sintering



ขั้นตอนที่ (29) สเป็คเตอร์ริง



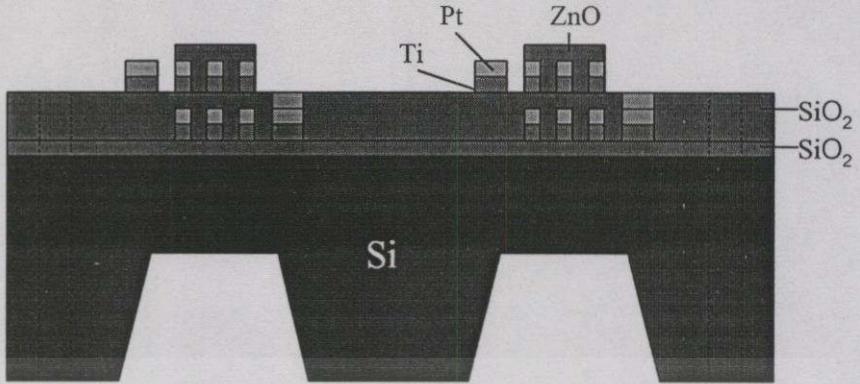
ขั้นตอนที่ (30) โฟโตลิโธกราฟีมาสก์ 6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปขายหรือเผยแพร่ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.15 (ต่อ)

ขั้นตอนที่ (31) - (32) Etching & Sintering



รูปที่ 5.15 (ต่อ)

5.7 กระบวนการสร้างหัววัดก๊าซโดยการเติมสารคะตะไลต์

หัววัดก๊าซที่ได้จากการเติมสารคะตะไลต์ให้กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยสารคะตะไลต์ที่เติม ได้แก่ Al, Pd และ Pt ในการทดลองนี้จะใช้การเติมแบบจับเวลา ในการสปัตเตอร์ริง 2, 5, 10 และ 20 วินาที และจากข้อมูลในการวิจัย พบว่าการเติมสารคะตะไลต์ Al, Pd และ Pt เมื่อผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีผลทำให้ความไวในการตรวจจับก๊าซของซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

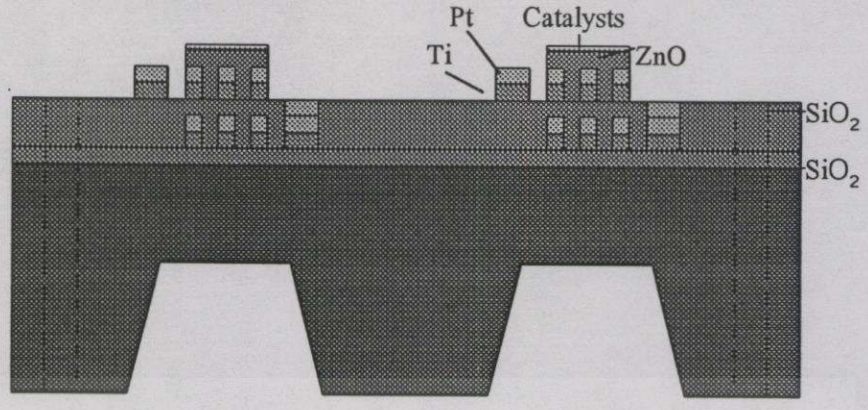
1. ขั้นตอนที่ 33 จะต่อจากขั้นตอนที่ 32
2. กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีมาส์กที่ 6
3. สปัตเตอร์ริงด้วยสาร Al, Pd และ Pt โดยใช้เวลา 2, 5, 10 และ 20 วินาที ลงบนฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์
4. ลอกฟิล์ม AZ 4620
5. กระบวนการซินเตอร์ริง

หลังจากที่นำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบด้วยสาร Al, Pd และ Pt ผ่านการซินเตอร์ริงดังรายละเอียดในตาราง

ตารางที่ 5.5 กระบวนการซินเตอร์ริง

ขั้นตอน	เทคนิค	อุณหภูมิ(°C)	เวลา(นาที)	หมายเหตุ
ซินเตอร์ริง	Al, Pd และ Pt	600	30	อุณหภูมิซินเตอร์ริง

ขั้นตอนที่ (33) เติมสารคะตะไลต์

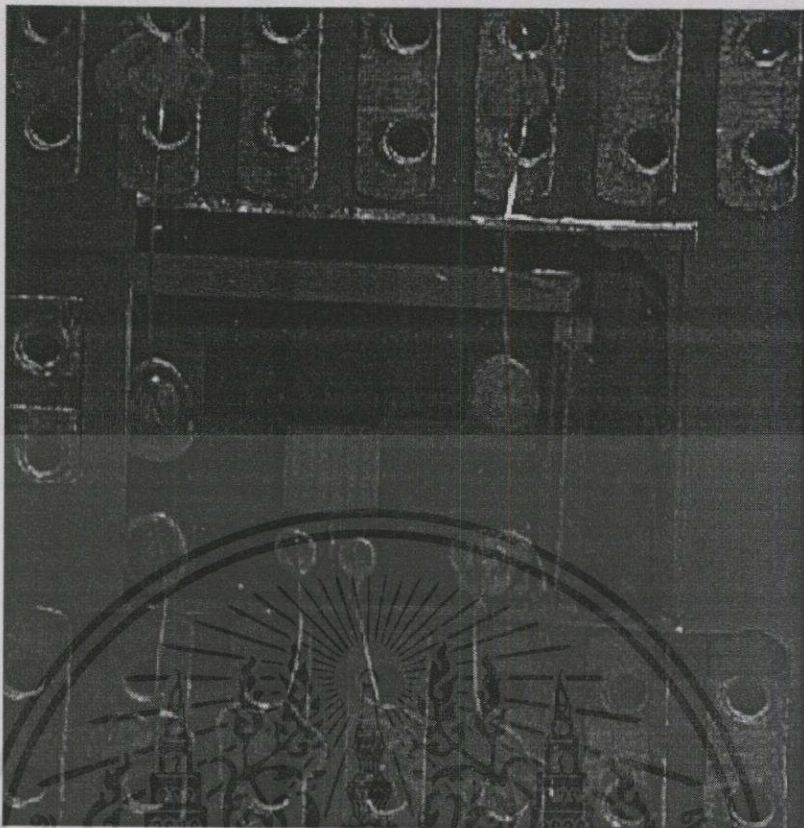


รูปที่ 5.16 ลักษณะโครงสร้างหัวค้ำก๊าซที่ใช้อุณหภูมิในการซินเตอร์ริง 600 องศาเซลเซียส และเติมสารคะตะไลต์

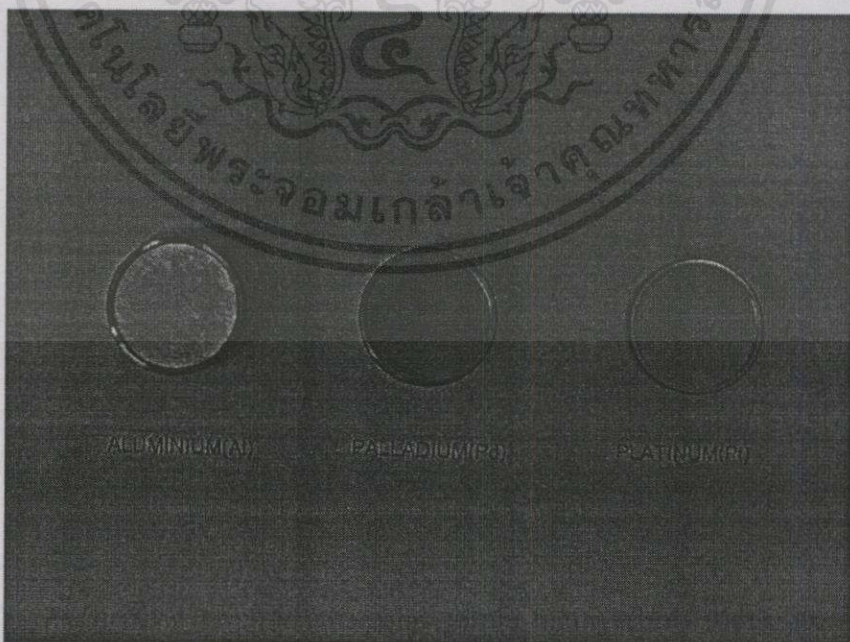


รูปที่ 5.17 วงจรซิงค์ออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะมิใช่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 วงจรก๊าซเซนเซอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอก

งานการค้า

รูปที่ 5.19 ภาพสารตะตะไลด์

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

จากบทที่ 4 ได้กล่าวถึง การสร้างหัววัดก๊าซฟิล์มบางชนิดออกไซด์และกระบวนการสร้างแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่สร้างขึ้นในเงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากการทดสอบก๊าซ โดยคุณสมบัติของฟิล์มที่สร้างขึ้นจะนำมาวิเคราะห์เพื่อทราบถึงกลไกและพฤติกรรมของฟิล์ม ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

6.1 การศึกษาเงื่อนไขอัตราส่วนของ Ar-O₂

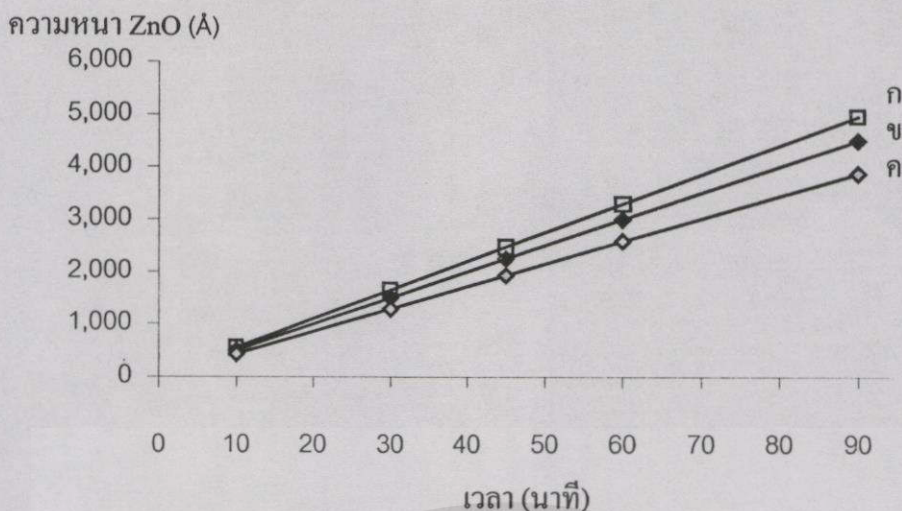
การสร้างฟิล์มบางชนิดออกไซด์ โดยการสปัตเตอร์ริง แบบอาร์เอฟ (RF) ที่มีก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซหลักในการเกิดพลาสมา และมีก๊าซออกซิเจนเป็นส่วนผสม โดยก๊าซผสมของ Ar-O₂ เป็นกลไกในการเกิดพลาสมา ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษา เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทำหัววัดก๊าซเซนเซอร์ต่อไป

6.1.1 การศึกษาอัตราการสร้างฟิล์มบางชนิดออกไซด์

กระบวนการสร้างฟิล์มบางชนิดออกไซด์ในการใช้กระบวนการสปัตเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ โดยอาศัยเงื่อนไขตามหัวข้อในข้อ 4.3 จะเป็นการศึกษาอัตราการเกิดฟิล์มบางชนิดออกไซด์ของก๊าซผสม Ar-O₂ ในอัตราส่วน 100:0, 85:15 และ 50:50 โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้กำลังเข้าที่พุทของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุเท่ากับ 150 วัตต์ และการควบคุมอุณหภูมิฐานรอง 150 องศาเซลเซียส

จากการทดลองดังในรูปที่ 6.1 ทำให้เห็นอัตราการสร้างฟิล์มโดยใช้ Ar-O₂ ในอัตราส่วน 85:15 มีค่าเท่ากับ 50 Å/min ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วน 100:0 ที่มีค่าเท่ากับ 53 Å/min แม้จะมากกว่าอัตราส่วน 50:50 ที่มีค่าเท่ากับ 41 Å/min ดังนั้นจึงทำให้เห็นว่าปริมาณของอัตราส่วนของ Ar-O₂ ในแชมเบอร์มีผลต่ออัตราการสร้างฟิล์มบางชนิดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์กับกำลังเข้าที่พุทของความถี่

วิทยุแหล่งกำเนิดคลื่นที่ใช้ในการสปีดเคอร์ริง 150 วัตต์

(ก) อัตราส่วนก๊าซผสม Ar-O₂ เท่ากับ 100:0

(ข) อัตราส่วนก๊าซผสม Ar-O₂ เท่ากับ 85:15

(ค) อัตราส่วนก๊าซผสม Ar-O₂ เท่ากับ 50:50

6.1.2 การศึกษาความไวของหัวก๊าซ

เป็นการศึกษาความไวในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้องโดยการนำฟิล์มที่สร้างจากก๊าซ Ar-O₂ ในอัตราส่วนทั้ง 100:50, 85:15 และ 50:50 และทำการผ่านอุณหภูมิแอนนีสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศสังเคราะห์ N₂:O₂ (80:20) ซึ่งจะทำให้การศึกษาความไวในการตอบสนองต่อแอมโมเนียในช่วงความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5, และ 10% โดยปริมาตร โดยที่ค่า

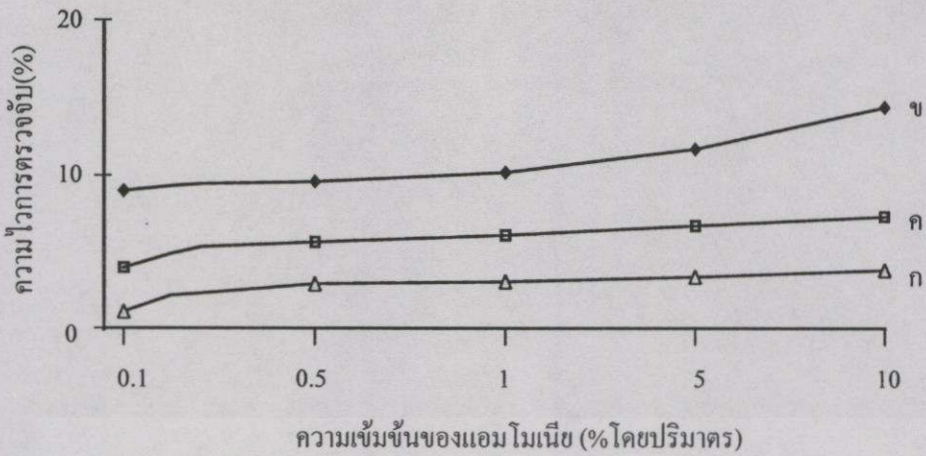
$$\Delta R = [(R_g - R) / R_g] \times 100[\%]$$

ΔR = ค่าความไวการตรวจจับ

R = ค่าความต้านทานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สภาวะปกติ

R_g = ค่าความต้านทานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ขณะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์กับความเข้มข้นของแอมโมเนียในเงื่อนไขปริมาณออกซิเจนในอาร์กอนที่อัตราส่วนต่าง ๆ

- (ก) อัตราส่วน Ar-O₂ เท่ากับ (100:0)
 (ข) อัตราส่วน Ar-O₂ เท่ากับ (85:15)
 (ค) อัตราส่วน Ar-O₂ เท่ากับ (50:50)

จากการทดลองที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างจากอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ปริมาณออกซิเจนในก๊าซอาร์กอนจะสามารถมีความไวในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้องได้ แต่เมื่อพิจารณาความไวในการตรวจจับก๊าซ พบว่าการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยใช้เงื่อนไข Ar-O₂ (85:15) จะสามารถให้ความไวในการตรวจจับที่ดีที่สุด และยังมีช่วงความดันของก๊าซในการสปัตเตอร์ริงได้กว้างมาก เมื่อพิจารณาถึงช่วงความดันของก๊าซผสมที่ทำให้เกิด Dark space

6.2 การศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ Ar-O₂ (85:15)

จากหัวข้อที่ 6.1 ทำให้ได้อัตราส่วนของออกซิเจนในอาร์กอนที่ใช้ในการสปัตเตอร์ริงในช่วงความดันดังกล่าวยังเป็นช่วงที่กว้าง ดังนั้นในการทดลองในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาเพื่อหาช่วงที่เหมาะสมในการสปัตเตอร์ริง (RF Diode Sputtering) ที่มีการเสถียรและคุณภาพของฟิล์มที่ดีที่สุด โดยการสปัตเตอร์ริงเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และการวัดค่าสภาพความต้านทานผิว

ถึงแม้ว่าเงื่อนไขสำคัญที่กำหนดว่า

- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ทำการแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
- กำลังความถี่วิทยุ 150 วัตต์
 - ระยะห่างระหว่างฐานรองถึงเป้า 3.5 เซนติเมตร

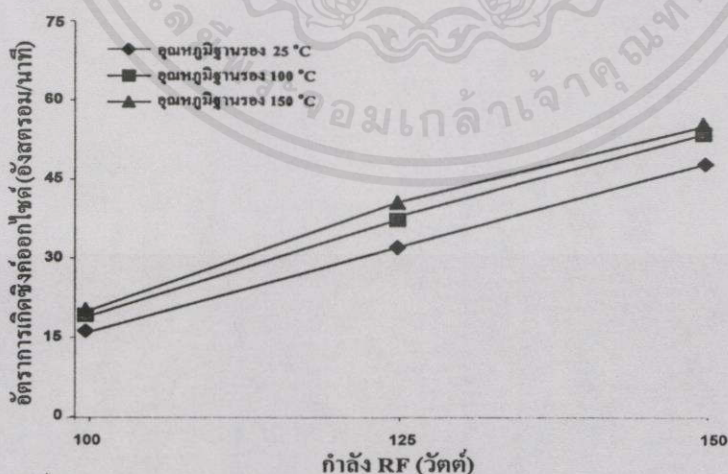
- ใช้เนื้อสาร ZnO 99.999% เป็นวัสดุเป้าที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตรและมีความหนา 0.8 เซนติเมตร
- ใช้ก๊าซผสม Ar-O₂ ในอัตราส่วน 85:15

แต่เมื่อใช้ความดันก๊าซผสมอาร์ก่อนกับออกซิเจนเท่ากับ 85:15 จะสร้างฟิล์ม ZnO ได้เหมือนกัน แต่ภายใต้กำลังเข้าที่พุทของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุกับอุณหภูมิฐานรองดังกล่าวจะทำให้เกิดฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์ที่ต่างกัน

6.2.1 การศึกษาอัตราการเกิดฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์ระหว่างกำลัง RF กับอุณหภูมิฐานรอง

กระบวนการสร้างฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์ จากการใช้ระบบสปัดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ โดยจะมีเงื่อนไขหลักดังในหัวข้อ 4.3 ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาอัตราการสร้างฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์จากก๊าซผสม Ar-O₂ ในอัตราส่วน 85:15 โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้กำลังเข้าที่พุทของแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (RF) 100 ถึง 200 วัตต์และการควบคุมอุณหภูมิของฐานรองอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 400 องศาเซลเซียส ซึ่งผลศึกษาอัตราการสร้างฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์จากกำลังเข้าที่พุทของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุกับอุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ ดังในรูปที่ 6.3

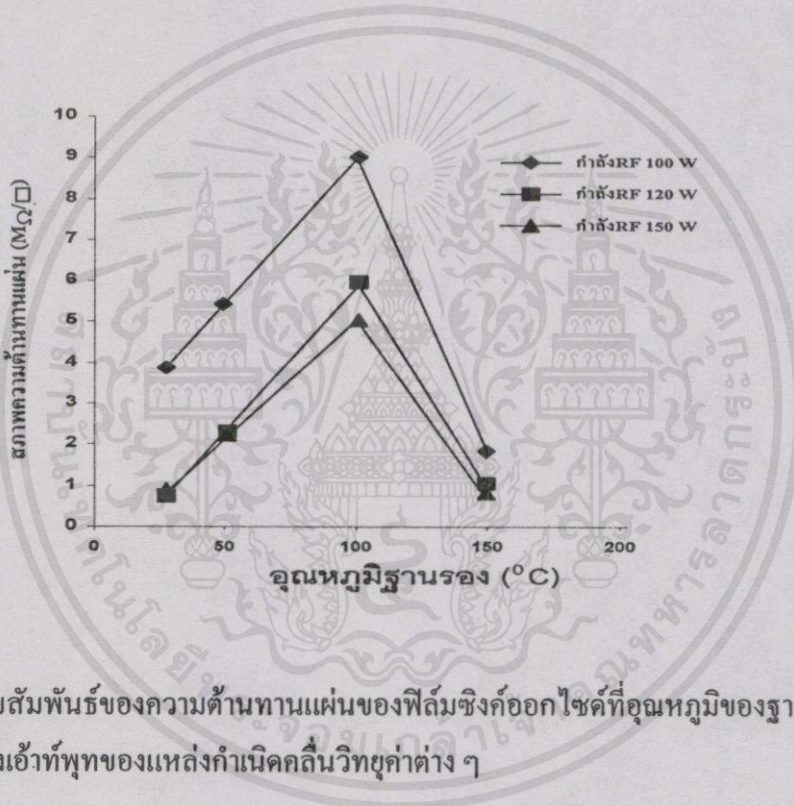
จากรูปที่ 6.3 ได้แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มบางของซึ่งค้อออกไซด์ที่ได้จากการ สปัดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ อัตราการสร้างฟิล์มโดยใช้ Ar-O₂ ในอัตราส่วน 85:15 มีความสัมพันธ์กับกำลัง RF และอุณหภูมิของฐานรอง คือเมื่อใช้กำลัง RF มากขึ้น จะทำให้อัตราการเกิดฟิล์มมากขึ้น ยกเว้นในกรณีที่อุณหภูมิของฐานรองและกำลัง RF มีค่าสูง ๆ (200 ถึง 400 องศาเซลเซียส, 150 ถึง 200 วัตต์) จะทำให้อัตราการเกิดฟิล์มลดลงเมื่อฐานรองมีอุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดฟิล์มจะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบางซึ่งค้อออกไซด์กับกำลังเข้าที่พุทของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ 100 ถึง 150 วัตต์ ที่ใช้ในการสปัดเตอร์ริงโดยใช้อุณหภูมิฐานรองค่าต่าง ๆ กัน

6.2.2 การศึกษาความต้านทานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์กับอุณหภูมิฐานรอง

ตามเงื่อนไขต่าง ๆ กล่าวคือ เมื่อต้องการฟิล์มของซิงค์ออกไซด์ที่มีความต้านทานสูงสามารถทำได้โดยการใช้กำลังอาร์เอฟต่ำ และให้อุณหภูมิของอาโนดอยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึง 150 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มซิงค์ออกไซด์ มีค่าสูงถึง 9 Megaohm/square เมื่อทำการสปีดเตอร์ริง โดยใช้กำลัง 100 วัตต์และอุณหภูมิของอาโนด 100 องศาเซลเซียส เมื่อต้องการฟิล์มของซิงค์ออกไซด์ที่มีความต้านทานต่ำ เช่น ในการใช้งานเป็นตัวต้านทานสามารถสร้างฟิล์มได้โดยการใช้กำลังอาร์เอฟและอุณหภูมิของอาโนดค่าสูง ๆ ในกรณีนี้ความต้านทานแผ่นมีค่าต่ำประมาณ 1 Megaohm/square เมื่อทำการสปีดเตอร์ริงโดยกำลัง อาร์เอฟ 150 วัตต์ และอุณหภูมิของอาโนด 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ของความต้านทานแผ่นของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิของฐานรองกับกำลังเอ้าท์พุทของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุค่าต่าง ๆ

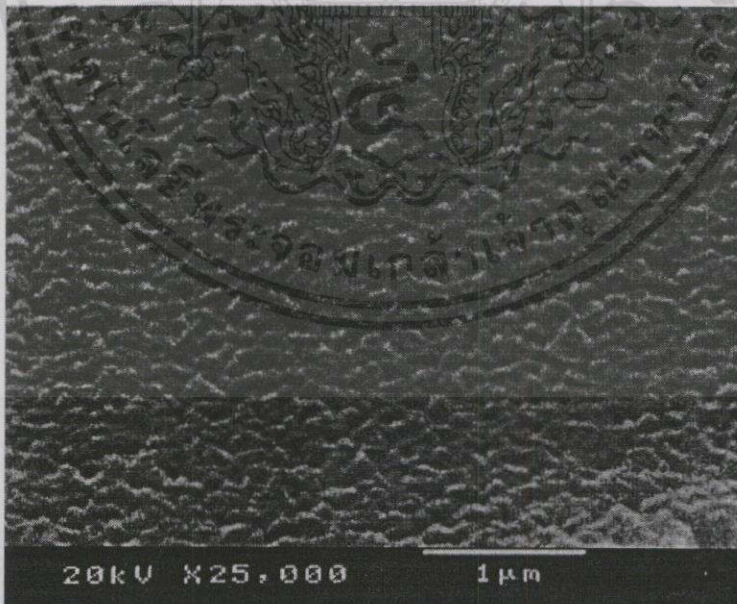
6.2.3 ผลความดันก๊าซ Ar-O₂ ต่อค่าความต้านทานผิว

ผลจากการนำฟิล์มบาง ZnO ที่ได้จากการสปีดเตอร์ริงในบรรยากาศ Ar:O₂ (85:15) ซึ่งตามความดันบรรยากาศที่ต่างกันดังกล่าว นำมาวัดค่าความต้านทานผิวดังแสดงในตารางที่ 6.1 แสดงผลความต้านทานของผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานผิว (R_s) จะมีค่ามาก หลังผ่านการสปีดเตอร์ริง และเมื่อนำฟิล์มทดสอบหาความต้านทานที่ผิว ผลดังกล่าวอธิบายได้ว่าฟิล์มที่สร้างขึ้นมานี้ จะมีปริมาณของออกซิเจนในซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อยู่น้อย จึงทำให้ฟิล์มมีสภาพความต้านทานสูง

ตารางที่ 6.1 ผลของความต้านทานผิวของซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ

กระบวนการ	ค่าความต้านทานผิว (Ω/\square)			
	4×10^{-2} mbar	6×10^{-1} mbar	8×10^{-2} mbar	1×10^{-1} mbar
สปีดเตอร์ริง ZnO ใน (Ar-O ₂)	$> 6 \times 10^6$	5×10^6	1×10^6	$> 4 \times 10^6$
แอนนีล ZnO ใน Air	7×10^5	8×10^4	5×10^4	$> 3 \times 10^6$

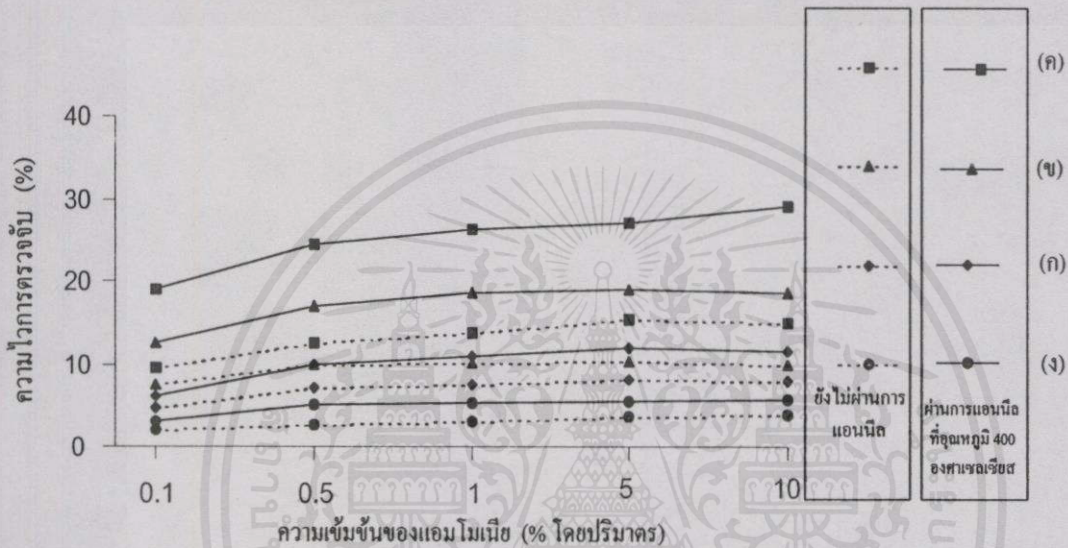
แต่หลังจากที่เราให้ความร้อนกับฟิล์มในบรรยากาศของอากาศที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้มีการปรับโครงสร้างของฟิล์มเกิดขึ้นใหม่ เนื่องจากการเกิดกระบวนการออกซิเดชันของ ZnO กับออกซิเจนในอากาศก็จะทำให้องค์ประกอบของ ZnO มากขึ้น โดยฟิล์มที่ได้จะเป็นโครงสร้างแบบโพลีคริสเตอไรต์ ซึ่งผลโดยรวมทำให้ค่าสภาพความต้านทานผิวของฟิล์มจะลดลง



รูปที่ 6.5 รูปถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ความดันก๊าซผสม Ar-O₂ (85:15) ไม่ว่าจะถี่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.4 การตรวจจ็บบก๊าซแอมโมเนียของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างขึ้นนี้จะนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านตรวจจ็บบก๊าซ โดยจะทดสอบในการตรวจจ็บบก๊าซแอมโมเนีย โดยความต้านทานของฟิล์มที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเมื่อมีการดูดซับทางเคมีกับก๊าซแอมโมเนีย ดังนั้นในการศึกษาความไวในการตรวจจ็บบก๊าซแอมโมเนียของฟิล์มบาง ($\Delta R = [(R_g - R)/R] \times 100[\%]$) ซึ่ง R หมายถึงค่าความต้านทานของฟิล์มที่สภาวะปกติ และ R_g หมายถึงค่าความต้านทานของฟิล์ม ขณะที่มีการดูดซับทางเคมีกับก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5 และ 10% โดยปริมาตร



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ของความไวการตรวจจ็บบต่อการตอบสนองในก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5 และ 10% โดยปริมาตรกับค่าสภาพความต้านทานผิวก่อนการแอนนัลและหลังการแอนนัลที่ 400 องศาเซลเซียส ที่ความดันก๊าซ $Ar-O_2$ ต่าง ๆ กัน คือ
 (ก) ฟิล์มที่สร้างจากการใช้ความดันก๊าซผสม 4×10^{-2} mbar
 (ข) ฟิล์มที่สร้างจากการใช้ความดันก๊าซผสม 6×10^{-2} mbar
 (ค) ฟิล์มที่สร้างจากการใช้ความดันก๊าซผสม 8×10^{-2} mbar
 (ง) ฟิล์มที่สร้างจากการใช้ความดันก๊าซผสม 1×10^{-1} mbar

จากการตรวจจ็บบก๊าซแอมโมเนียของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้ผ่านขั้นตอนของการแอนนัล (รูปที่ 6.6) พบว่า ความไวในการตรวจจ็บบในการตรวจจ็บบก๊าซแอมโมเนียของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงน้อย โดยที่ใน 6.6 (ง) มีความไวในการตรวจจ็บบในการตรวจจ็บบก๊าซแอมโมเนียนั้นเล็กน้อย ในขณะที่ 6.6 (ก) และ (ข) จะมีการดูดซับทางเคมีเพิ่มขึ้น โดยที่ (ข) มีความไวในการตรวจจ็บบในการตรวจจ็บบก๊าซแอมโมเนียได้ดีกว่า (ก)

แต่เมื่อทำการแอนนัลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศของ $N_2 : O_2$ (80:20) (รูปที่ 6.6) จะพบว่าความไวในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียจะมีค่าต่างกัน โดยที่ใน (ค) ที่มีค่าสภาพความดันทานต่ำที่สุด จะมีความไวการตรวจจับเมื่อตรวจจับก๊าซแอมโมเนียสูงกว่า (ข), (ก) ตามลำดับ ส่วนเงื่อนไข (ง) จะมีความไวในการตรวจจับตรวจก๊าซแอมโมเนียน้อยมาก

จากการทดลองใช้ความดันก๊าซผสม ได้แก่ค่า 4×10^{-2} , 6×10^{-2} , 8×10^{-2} และ 1×10^{-1} mbar ในการสปีดเตอร์ริงพบว่าช่วงความดันก๊าซผสมซึ่งได้แก่ 4×10^{-2} , 6×10^{-2} และ 8×10^{-2} mbar สามารถสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่นำไปสร้างหัววัดก๊าซได้เพราะจากการนำฟิล์มที่สร้างขึ้นมาทำเป็นตัวตรวจจับก๊าซ โดยพิจารณาจากการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียดังแสดงในรูป 6.6 และยังพบอีกว่าช่วงความดันก๊าซผสมที่ 8×10^{-2} mbar จะมีความไวในการตรวจจับการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียสูงสุด

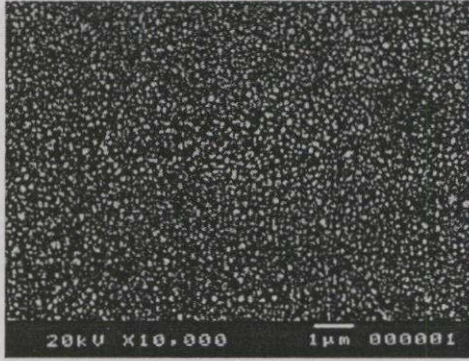
จากผลดังกล่าวทำให้กล่าวได้ว่าการสร้างฟิล์มโดยใช้ความดันก๊าซ 4×10^{-2} , 6×10^{-2} และ 1×10^{-1} mbar แม้ว่าจะสามารถทำให้เกิด dark space ได้ แต่ความดันก๊าซดังกล่าวมีระยะ dark space ที่ไม่เหมาะสมคือในช่วงความดันก๊าซ 4×10^{-2} และ 6×10^{-2} mbar เป็นช่วงที่มีความดันก๊าซในแคมเบอร์มีค่ามากเกินไป จึงทำให้ความกว้างของ dark space น้อยเกินไป จนอาจทำให้เกิดสารเจือที่ไม่ต้องการมาเคลือบบนฐานรองในขณะที่ในช่วงความดันก๊าซ 1×10^{-1} mbar เป็นช่วงที่มีความดันก๊าซในแคมเบอร์มีค่าน้อยเกินไป จึงทำให้ความกว้างของ dark space มากเกินไปจึงเกิดการดิสชาร์จที่ไม่มีเสถียรภาพและใช้เวลาในการสปีดเตอร์ริงมากกว่า

6.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซผสมในหัวข้อ 6.2 ทำให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสปีดเตอร์ริงเพื่อสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ คือ ช่วงความดันก๊าซ 8×10^{-2} mbar ดังนั้นในหัวข้อนี้ได้มีการศึกษาอุณหภูมิในการแอนนัล จะมีผลต่อเม็ดเกรนและผลต่อความไวในการตรวจจับก๊าซ ซึ่งจะศึกษาที่อุณหภูมิในการแอนนัลที่ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับโดยมีเงื่อนไขในการสปีดเตอร์ริงดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.2 และใช้ความดันของก๊าซผสม $Ar-O_2$ (85:15) ที่ความดันก๊าซ 8×10^{-2} mbar

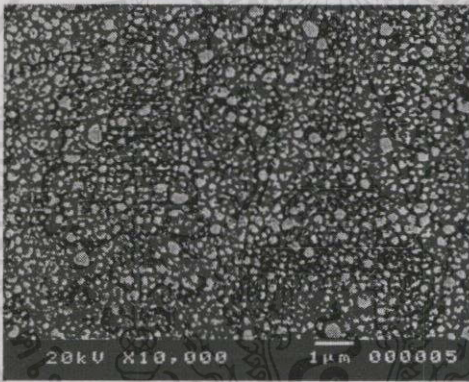
6.3.1 ผลต่อเม็ดเกรน

จากการถ่ายภาพผิวหน้าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ดังในรูป 6.7 พบว่าหลังจากการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ โดยการสปีดเตอร์ริงที่ใช้ความดันก๊าซผสม $Ar-O_2$ (85:15) 8×10^{-2} mbar ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มที่ได้จะมีเม็ดเกรนที่เล็ก จึงมีลักษณะเรียบเมื่อใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า

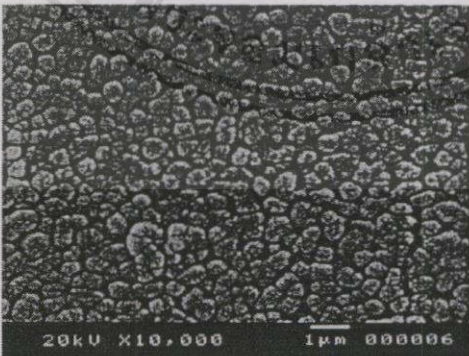


รูปที่ 6.7 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM จากการสัปเดตเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซผสมอาร์กอน-ออกซิเจน (85:15)

เมื่อนำฟิล์มที่ได้ทำการแอนนัลในบรรยากาศอากาศสังเคราะห์ ($N_2:O_2 = 80:20$) ที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 6.8 พบว่าลักษณะของเม็ดเกรน (Grain size) จะมีขนาดใหญ่ขึ้นดังนี้



(ก) แอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

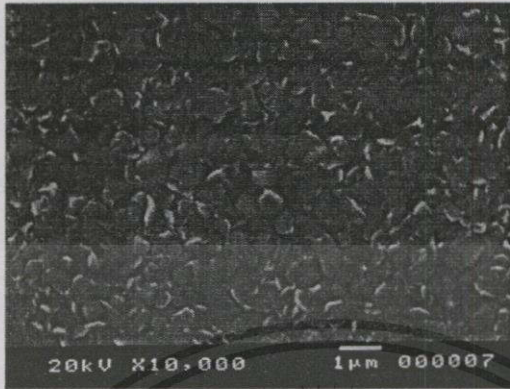


(ข) แอนนัลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใ้ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 6.8 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ทำการแอนนัล 1 ชั่วโมงด้วยเครื่อง SEM ในวากูมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

(Scanning Electron Microscope)



(ค) แอนนีสที่อุณหภูมิต่ำ 800 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6.8 (ต่อ)

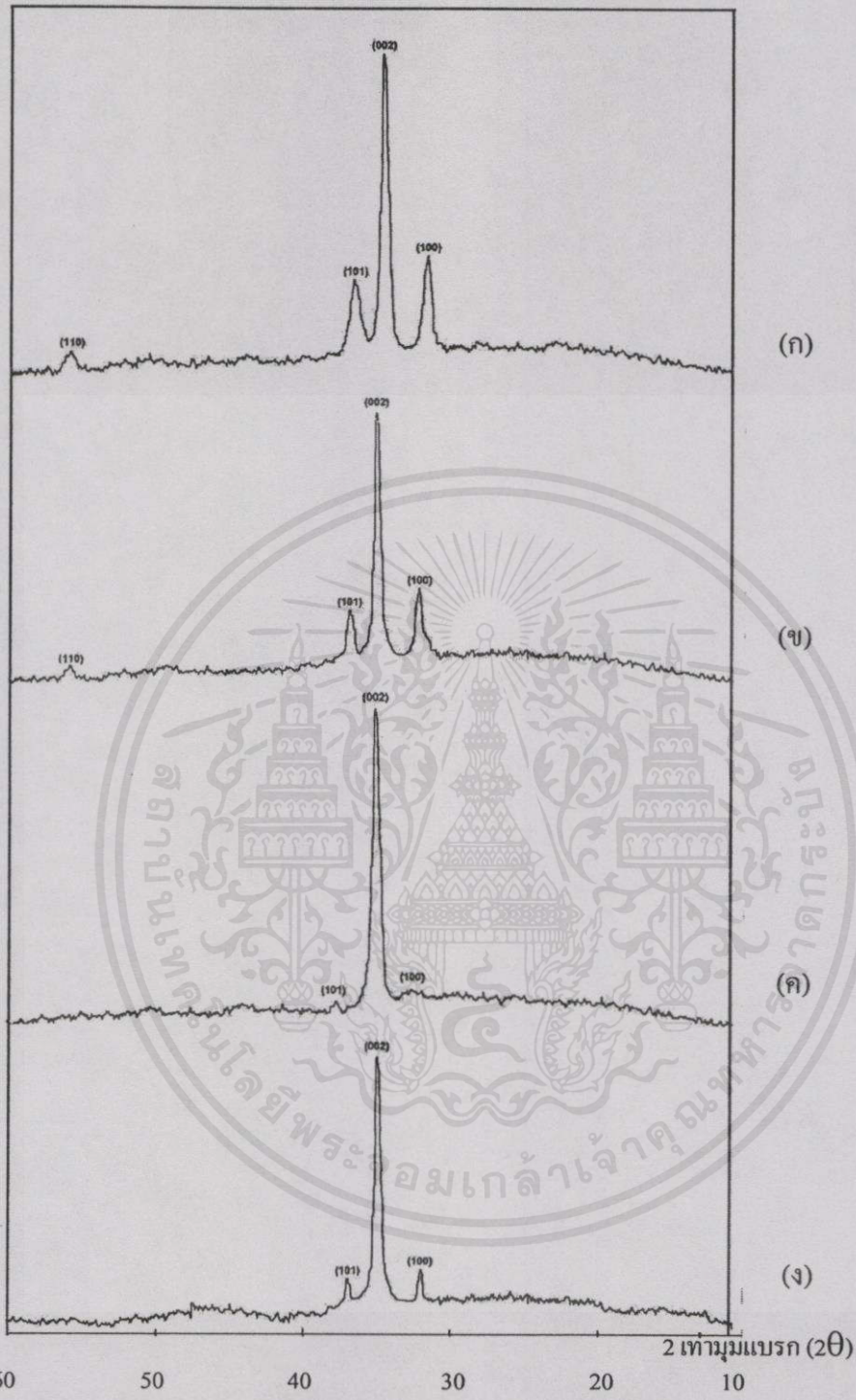
จากการสเปกโตรริง (รูปที่ 6.8) จะมีขนาดของเม็ดเกรนน้อยกว่า 0.1 ไมครอนและเมื่อนำฟิล์มที่ได้มาแบ่งออกเป็น 3 ชั้นเพื่อทำการศึกษานาโนเม็ดเกรน โดยผ่านกระบวนการแอนนีสที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยที่ชั้นแรกที่อุณหภูมิต่ำ 400 องศาเซลเซียส เม็ดเกรนที่ได้จะมีขนาดน้อยกว่า 0.3 ไมครอนดังรูปที่ 6.8 (ก) ชั้นที่สองผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิต่ำ 600 องศาเซลเซียส เม็ดเกรนที่ได้จะมีขนาดน้อยกว่า 0.5 ไมครอนดังรูปที่ 6.8 (ข) และชั้นสุดท้ายผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิต่ำ 800 องศาเซลเซียส ขนาดเม็ดเกรนที่ได้มีน้อยกว่า 1 ไมครอนดังรูปที่ 6.8 (ค) โดยลักษณะของเม็ดเกรนจะไม่เป็นระเบียบ

6.3.2 ผลต่อการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลจากการแอนนีสฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จะมีผลต่อการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อย่างไร โดยการนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากเงื่อนไขต่าง ๆ ศึกษาด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน สเปกตรัม

จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่ไม่ผ่านกระบวนการแอนนีส พบว่ามีความเข้มของยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง 2θ ในช่วง 10 ถึง 60° ดังในรูปที่ 6.9 (ก) แต่เมื่อนำฟิล์มมาทำการแอนนีสที่อุณหภูมิต่ำ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส ในรูป 6.9 (ข), (ค) และ (ง) จะพบความเข้มของยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง 2θ ต่าง ๆ คือ 31.77° , 34.42° , 36.26° และ 56.60° ซึ่งที่มุมดังกล่าว ค่า Inplanar d-spacing จะใกล้เคียงกับค่า Inplanar d-spacing มาตรฐานของโพลีคริสตัลไลน์ ZnO ดังแสดงในตาราง 6.2

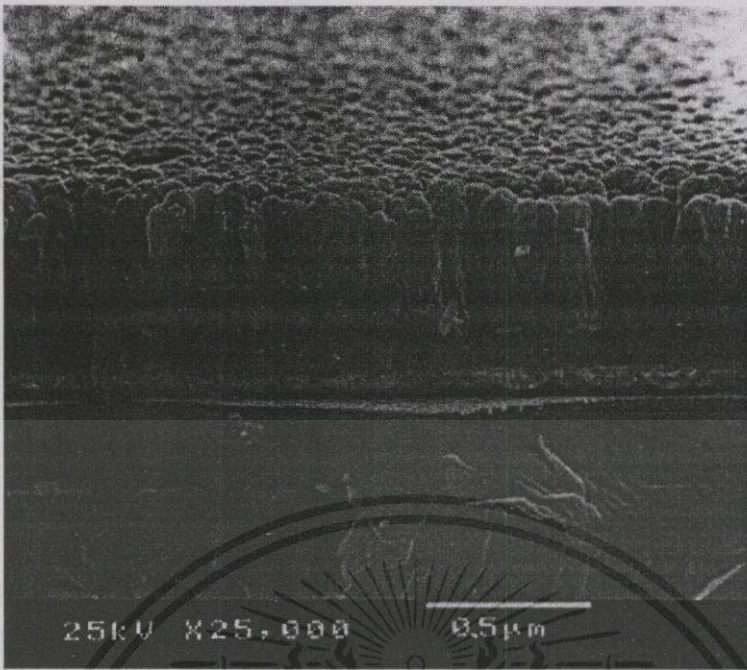
ความเข้ม (arb.units)



รูปที่ 6.9 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง ZnO ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟกชัน (ใช้ Cu K α) ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในบรรยากาศอากาศสังเคราะห์ N₂ : O₂ (80:20)

- (ก) ฟิล์มบาง ZnO ที่ไม่ผ่านการแอนนัล
- (ข) แอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส
- (ค) แอนนัลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส
- (ง) แอนนัลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์หรือในรูปแบบอื่นใดก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 ภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่ 600 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 6.9 (ค) จะพบว่าการที่มีตำแหน่ง 2θ คือ 34.42° เค้นชัดและมีความเข้มสัญญาณสูงกว่าสัญญาณที่ตำแหน่งอื่นจะมีรูปแบบของโครงสร้างผลึกแบบโพลคริสโตไรต์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวฐานรองที่เรียกว่า C-axis เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6.10

จากค่ามุมที่ได้จากรูป 6.9 จะสามารถหาค่า d-spacing ที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้ Bragg's law จากสมการ (3.1)

ตัวอย่างเช่น ที่มุม $2\theta = 34.42^\circ$ โดยใช้ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ 1.5406 \AA

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

$$d = 1.5406/2 \times \sin\theta$$

$$d = 2.603^\circ$$

เพราะฉะนั้นจากขอดสัญญาณที่ตำแหน่ง 2θ จะสามารถหาค่า Inplanar d-spacing ค่าต่าง ๆ และเมื่อเทียบกับค่า Inplanar d-spacing ของ ZnO มาตรฐานจาก JCPDS ดังแสดงที่บัตร 36-1451 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในตารางที่ 6.2 ซึ่งจะได้ค่า Inplanar d-spacing และระนาบของผลึกต่าง ๆ ดังนี้

ไม่รวมกติทางต้น ออกทางนามพิเศษแบบสงเนตฯ และตองอ็ององงเซาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 ค่า Inplanar d-spacing และระนาบของผลึก โพลีคริสตอลของ ZnO

ค่า 2 เท่าของมุมเบรกก	Inplanar d-spacing (Å) จากการทดลอง	Inplanar d-spacing (Å จากบัตร 36-1451)	h k l
31.77	2.821	2.814	(100)
34.42	2.606	2.603	(002)
36.26	2.480	2.476	(101)
56.60	1.627	1.625	(110)

จากการเปรียบเทียบ Inplanar d-spacing ของ ZnO ที่ได้จากการทดลองดังในรูป 6.9 (ก), (ข), (ค) และ (ง) จะมีค่าใกล้เคียงกับ Inplanar d-spacing ของ ZnO ค่ามาตรฐานจากบัตร 36-1451 ของ JCPDS ซึ่งตำแหน่ง 2θ ดังกล่าวจะเป็นค่าที่ $1/\theta_0$ มีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งอื่น จึงทำให้พบยอดสัญญาณที่ตำแหน่งดังกล่าว และจากค่า Inplanar d-spacing ของ ZnO มาตรฐาน ทำให้สรุปได้ว่าผลึกของโพลีคริสตอลดังกล่าว จึงมีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal ที่มีค่า Lattice parameter ของผลึกคือ $a : 3.24982$ และ $c : 5.20661$ และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มของยอดสัญญาณที่ปรากฏในรูป 6.9 โดยละเอียดแล้วจะพบว่า ความเข้มของยอดสัญญาณในรูป 6.9 (ก) และ 6.9 (ข) จะมีความเข้มของยอดสัญญาณที่เด่นชัด 4 ตำแหน่ง คือ 31.77° , 34.42° , 36.26° และ 56.60°

จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ZnO ที่ไม่ผ่านกระบวนการแอนนีสล ดังในรูปที่ 6.9 (ก)และที่ผ่านการแอนนีสลอุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส ดังในรูปที่ 6.9 (ข) พบความเข้มของยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง 2θ ในช่วง 10° ถึง 60° ที่ยอดสัญญาณตำแหน่ง 2θ ต่าง ๆ คือ 31.77° , 34.42° , 36.26° และ 56.60° เมื่อนำฟิล์มมาทำการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะพบความเข้มของยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง 31.77° และ 36.26° ส่วนตำแหน่งที่ 34.42° มีค่าสูงที่สุดดังรูปที่ 6.9 (ค) ในส่วนความเข้มของยอดสัญญาณที่การแอนนีสลอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส ในรูป 6.9 (ง) จะพบความเข้มของยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง 2θ ต่าง ๆ คือ 31.77° , 34.42° และ 36.26° โดยมีมุมที่ 31.77° และ 36.26° เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมุมที่ได้กล่าวมาจะมีค่า Inplanar d-spacing จะใกล้เคียงกับค่า Inplanar d-spacing ของโพลีคริสตอล ZnO ดังแสดงในตาราง 6.2

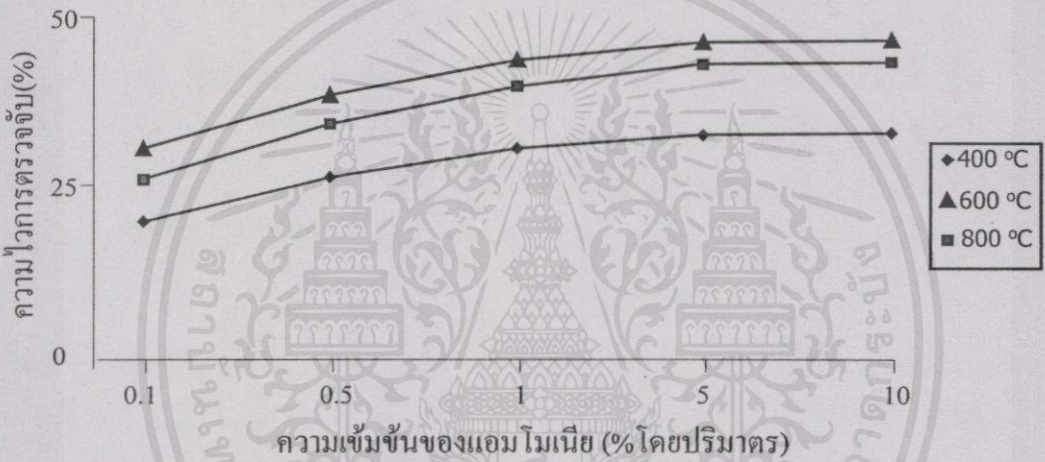
เมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์ฟิล์มบางยังพบอีกว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนีสลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ความเข้มของยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง 34.42° จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนตำแหน่งที่ 31.77° , 36.26° และ 56.60° จะลดน้อยลง ในส่วนของอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียสนั้น จะเห็นได้ว่ามียอดสัญญาณ 31.77° และ 36.26° ชัดเล็กน้อย

ไม่มีการวัดค่าทั้งหมด อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.3 ผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซ

การศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์มบางต่อการตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย ในช่วง 0.1, 0.5, 1, 5 และ 10% โดยปริมาตร โดยวิธีการสร้างและวิธีการวัดได้แสดงในบทที่ 5

การทดลองเพิ่มอุณหภูมิโดยการนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ มาตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ในช่วง 0.1, 0.5, 1, 5 และ 10% โดยปริมาตร ผลที่ได้ดังแสดงในรูป 6.11 จะเห็นได้ว่าความไวในการตรวจจับจะเพิ่มมากขึ้น โดยที่ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 800 และ 400 องศาเซลเซียส โดยที่ความไวในการตรวจจับ $\Delta R = [(R_{\text{u}} - R)/R] \times 100[\%]$



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ของความไวการตรวจจับในก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้องโดยการแอนนัลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากผลการทดลองการนำฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาตรวจจับก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 5 และ 10% โดยปริมาตร จะพบว่าค่าความไวในการตรวจจับของหัววัดก๊าซเมื่อใช้ในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เพิ่มขึ้น และพบว่าที่ความไวในการตรวจจับของตัวตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 800 และ 400 องศาเซลเซียส

6.3.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์งานวิจัยสำหรับใช้ภายในเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์จะทำให้ได้ค่าตัวแปรไฟฟ้า เช่น ค่าสภาพความต้านทาน (ไม่มีการวัดค่าทั้งต้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (Resistivity ; ρ), ความหนาแน่นของประจุพาหะ (electron concentration ; n_H) และค่าความคล่อง

ตัว (Hall mobility; μ_H) ในขณะที่ทำการตรวจจับแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง โดยลักษณะชิ้นงานได้แสดงดังรูป 3.8

จากการทดลองใช้กระแสคงที่ 500 μA โดยวัดที่สนามแม่เหล็ก 3,000 เกาส์ ซึ่งหาค่าวัดแรงดันฮอลล์ (V_H) เฉลี่ย และความต่างศักย์ระหว่างขั้ว (V_R) เฉลี่ยเพื่อที่จะหาค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ

ตัวอย่างเช่น พิล์มบางซิงค์ออกไซด์แอนนูลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

$$\text{จะได้ค่า } V_H = 8.67 \text{ mV}, V_R = 20.16 \text{ mV}$$

ค่าสภาพความต้านทานผิว ρ ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์หาได้จากสมการ 3.2

$$\rho = \frac{\pi t \cdot V_R}{I \cdot \ln 2}$$

$$\text{ดังนั้น } \rho = 0.0055 \text{ } (\Omega \cdot \text{cm})$$

เมื่อใช้ฟิล์มบางที่มีความหนา 3,000 \AA ซึ่งสามารถหาค่า Hall coefficiente R_H ได้จากสมการ (3.3)

$$R_H = \frac{V_H \cdot t}{I \cdot B}$$

$$\text{ดังนั้น } R_H = 17.34 \text{ } (\text{cm}^3/\text{C})$$

ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ (electron concentration : n_H) จะหาได้จากสมการ (3.4)

$$n_H = \frac{1}{qR_H}$$

$$\text{ดังนั้น } n_H = 3.6 \times 10^{17} \text{ } (\text{cm}^{-3})$$

และค่าความคล่องตัว (Hall mobility μ_H จากสมการ (3.5)

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \text{ } (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1})$$

และเมื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ (electron concentration ; n_H) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังตาราง 6.3

ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่างจากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

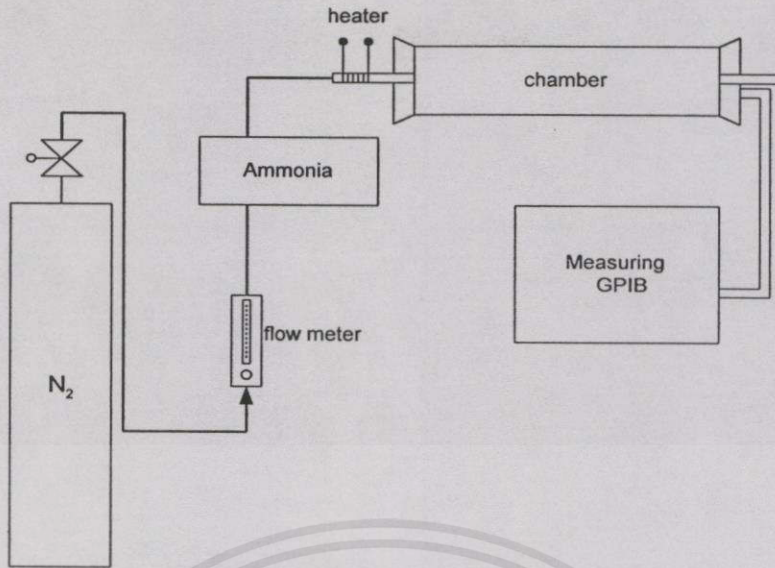
อุณหภูมิ (°C)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	V_H (mV)	R_H (cm^3/C)	n_H ($\times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)	μ_H ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	V_R (mV)
25	0.0110	91.21	10.43	20.86	3.00	1903	40.32
400	0.0055	182.42	8.67	17.34	3.60	3163	20.16
600	0.0045	221.94	7.34	14.68	4.26	3258	16.57
800	0.0050	196.56	8.12	16.24	3.85	3192	18.71

จากการทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์จะทำให้ได้ ค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ (electron concentration ; n_H) ค่าความนำไฟฟ้า σ และค่าความคล่องตัว (Hall mobility ; μ_H) ของฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ที่เงื่อนไขของฟิล์มต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์มบางที่ 25, 400, 600 องศาเซลเซียส นำไปทำการวัดจะได้ค่า σ , μ_H และ n_H มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ค่า σ , μ_H และ n_H มีค่าลดลง จากผลทำให้สรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการแพร่เข้าไปในเนื้อสารของที่ว่างออกซิเจนซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสครีฟภายในซิงค์ออกไซด์

6.4 ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองก๊าซ

ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการทดลองใช้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในการตรวจจับก๊าซ ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความไวในการตรวจจับยังคงมีขนาดน้อยมาก ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้จะเป็นการศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งจะมีผลต่อความไวในการตรวจจับก๊าซอย่างไร โดยจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของฟิล์มขณะตรวจจับในช่วง 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส โดยระบบการวัดแสดงดังรูปที่ 6.12 โดยใช้ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

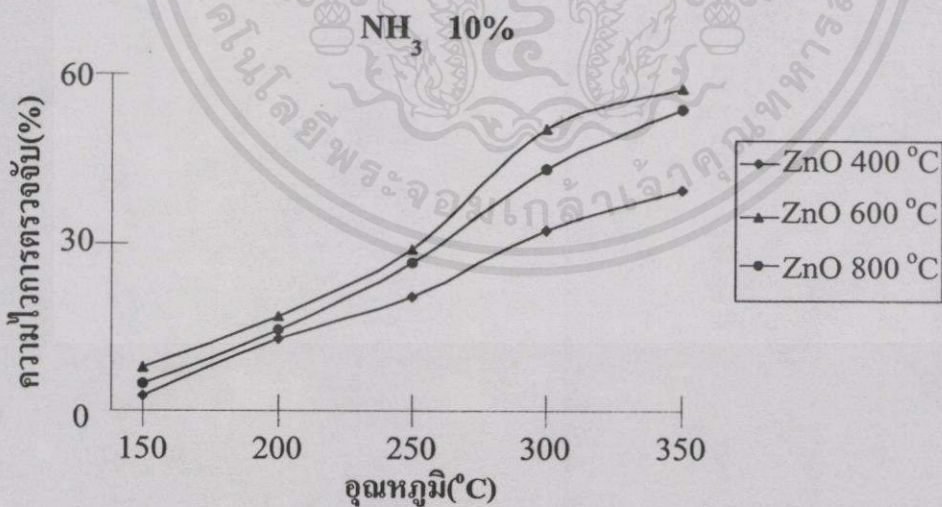
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 ระบบวัดการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย ด้วยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิในช่วง 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส

6.4.1 ผลของอุณหภูมิการทำงานต่ออุณหภูมิการแอนนัลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

การทดลองเพิ่มอุณหภูมิโดยนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส นำมาเพิ่มอุณหภูมิของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ขณะตรวจจับในช่วง 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) 10 % โดยปริมาตร จะเห็นได้ว่าความไวในการตรวจจับจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดย

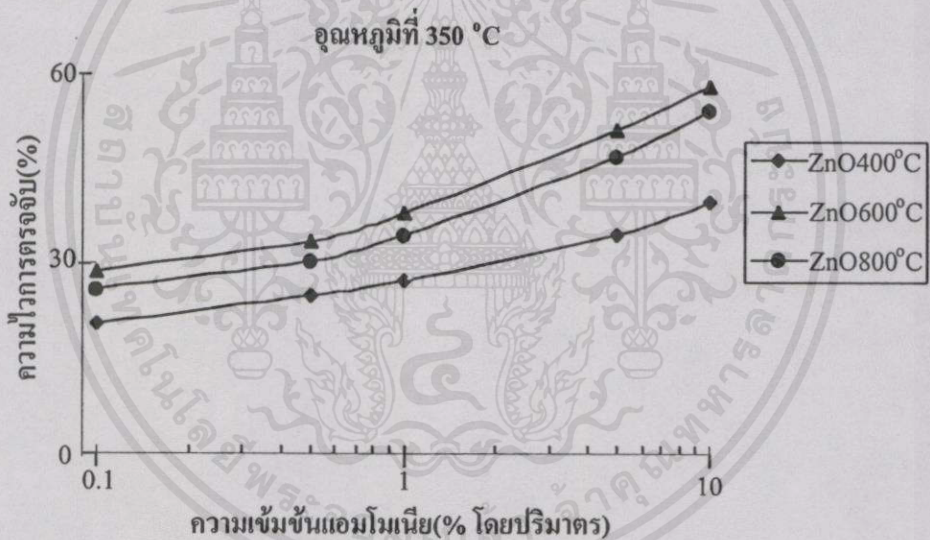


รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ของความไวในการตรวจจับก๊าซกับอุณหภูมิการทำงานของหัววัดก๊าซที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 10 % โดยปริมาตร ของฟิล์มบางที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส

จากการทดลอง การนำฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนिलที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิการทำงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย 10 % โดยปริมาตร จะมีความไวในการตรวจจับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการทำงานของหัววัดก๊าซที่เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 350 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 6.13 และพบอีกว่าความไวในการตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิแอนนिल 600 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าอุณหภูมิ 800 และ 400 องศาเซลเซียส

6.4.2 ผลของความเข้มข้นแอมโมเนียต่ออุณหภูมิแอนนिल

การศึกษาผลของความไวในการตรวจจับโดยนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านอุณหภูมิการแอนนिलที่ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียสตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย พบว่ามีความเข้มข้นก๊าซแอมโมเนียช่วง 0.1, 0.5, 1, 5 และ 10 % โดยปริมาตรดังรูปที่ 6.14 โดยอุณหภูมิการทำงานของหัววัดก๊าซอยู่ที่ 350 องศาเซลเซียส

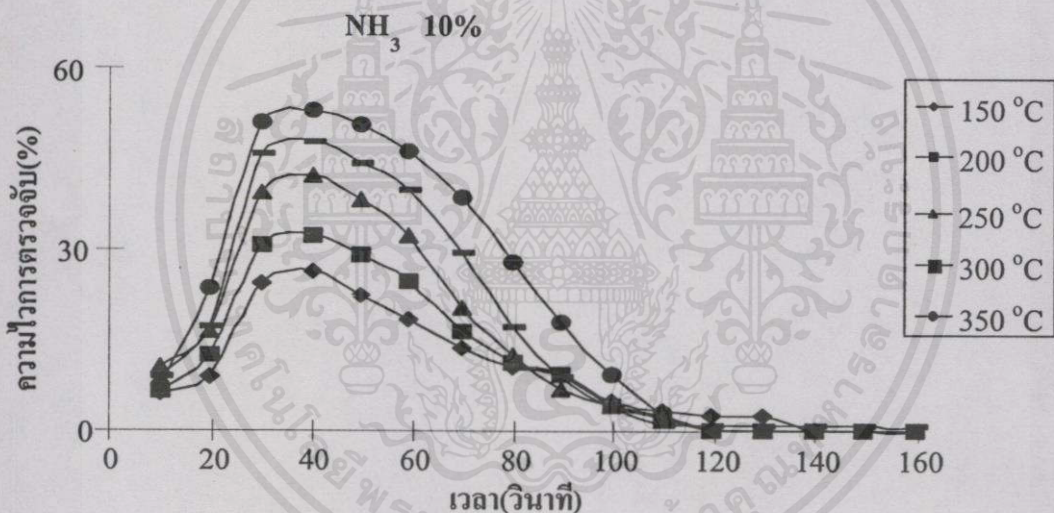


รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ของความไวในการตรวจจับกับความเข้มข้นแอมโมเนียที่ค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนिलที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส

ผลที่ได้จากการนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนिलที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนีย 0.1, 0.5, 1, 5 และ 10 % โดยปริมาตรพบว่าความไวในการตรวจจับมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของแอมโมเนียและฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนिलที่ 600 องศาเซลเซียสมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

6.4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย

จากผลการเพิ่มอุณหภูมิฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ในช่วง 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย ดังในรูป 6.15 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จาก 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ ความไวในการตรวจจับในการตรวจจับแอมโมเนียจะเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก โดยที่การตรวจจับที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียสจะมีค่าใกล้เคียงกันตามรูปที่ 6.15 และพิจารณาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฟิล์มขณะตรวจจับเวลาในการตรวจจับก๊าซจะมีค่าระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ 30วินาที (Response time or Gas exposure time) และระยะเวลาในการคืนสภาพของฟิล์ม (Recovery time) ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ประมาณ 80 วินาที โดยใช้เวลาในการตรวจจับแอมโมเนีย (Operating time) ทั้งหมด 110 วินาที ส่วนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสใช้เวลาคืนสภาพ 100 วินาที



รูปที่ 6.15 ความไวในการตรวจจับต่อก๊าซแอมโมเนียของตัวตรวจจับก๊าซ โดยสัมพันธ์กับเวลาในการตรวจจับก๊าซ (Operating Time) โดยใช้ความเข้มข้นแอมโมเนียที่ 10 % โดยปริมาตรที่อุณหภูมิหัววัดค่าต่าง ๆ

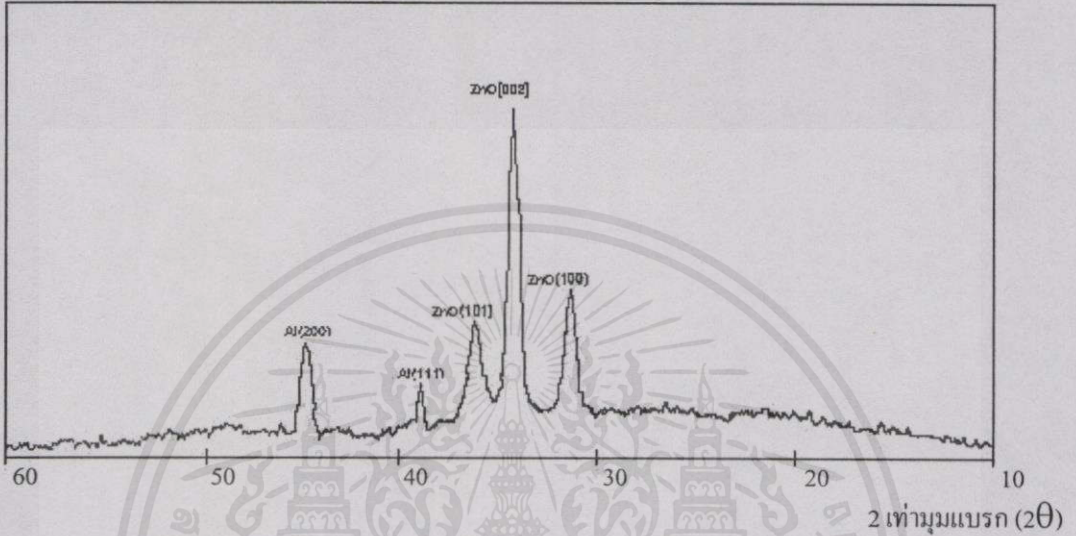
6.5 ผลของการเติมสารคะตะไลต์ต่อการตรวจจับก๊าซ

จากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการตรวจจับก๊าซ (Operating time) จะใช้เวลาดังสั้น 110 วินาที ในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการทดลองเติมสารคะตะไลต์เพื่อที่จะลดระยะเวลาในการตรวจจับก๊าซ

6.5.1 ผลการเติมสารคละไตต์ Al, Pd และ Pt ต่อการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

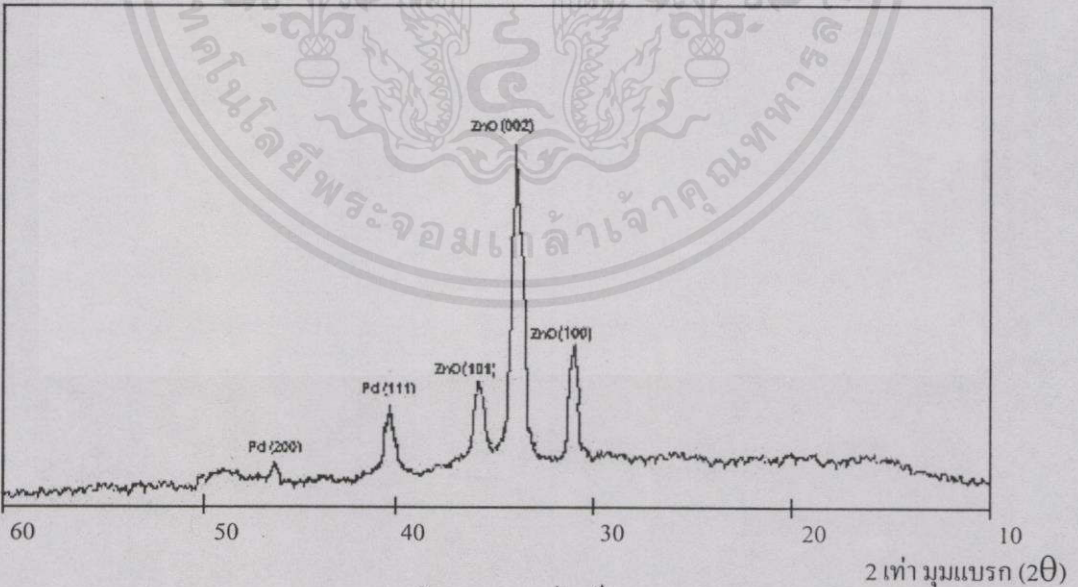
ซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการการแอนนัลที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง และนำมาเติมสารคละไตต์ Al, Pd และ Pt ด้วยการสปัตเตอร์ริงเป็นเวลา 5 วินาที และทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสนาน 30 นาที จะมีผลต่อการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังแสดงในรูปที่ 6.16

ความเข้ม (arb.units)



(ก) เติมสารคละไตต์ Al

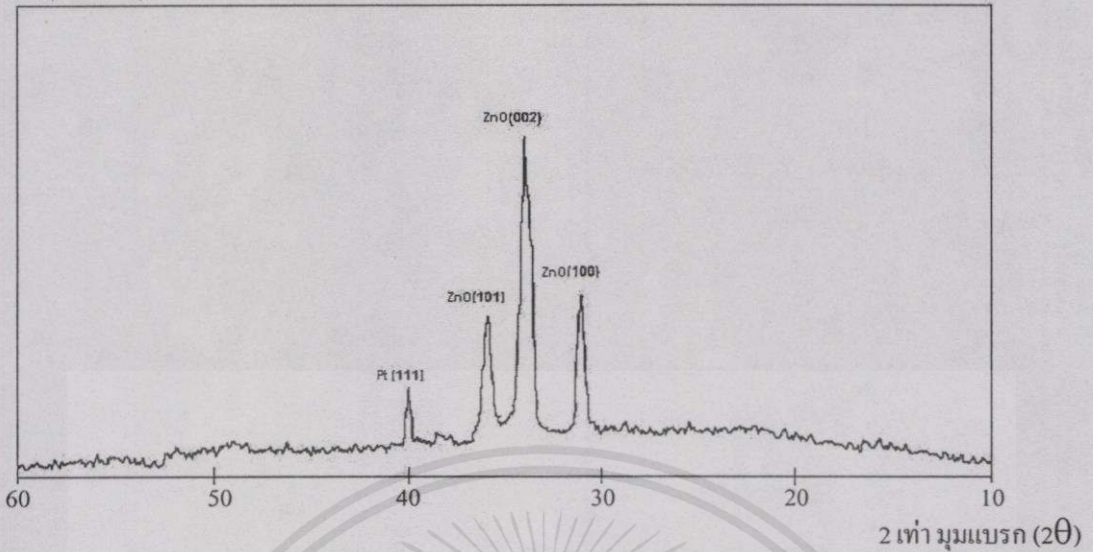
ความเข้ม (arb.units)



(ข) เติมสารคละไตต์ Pd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 6.16 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารคละไตต์ด้วยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน

ความเข้ม (arb.units)



(ก) เติมสารคะตะไลต์ Pt

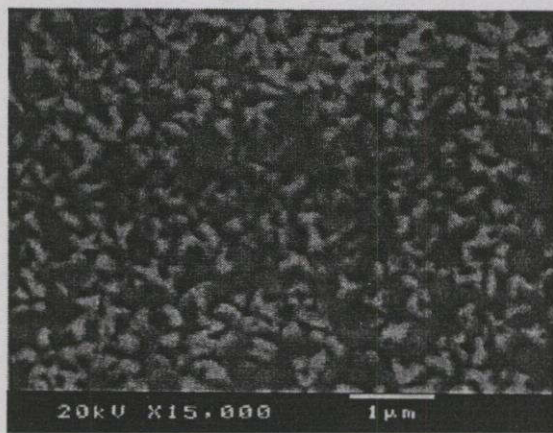
รูปที่ 6.16 (ต่อ)

เมื่อพิจารณาจากการเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟกชัน สเปกตรัม หลังจากที่เติม Al, Pd และ Pt ด้วยกระบวนการดีซีสปีดเตอร์ริงให้กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ พบว่าฟิล์มที่ได้ยังคงเป็นโพลีคริสตัลของซิงค์ออกไซด์แต่จะสังเกตได้ว่าค่าความสูงของยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง ZnO(002) มีค่าลดลง ส่วนที่ตำแหน่ง ZnO(101) และ ZnO(100) มีค่าเพิ่มขึ้นเพราะโลหะที่ทำการเติมเข้าไปอาจไปรบกวนการเป็นผลึกแบบตั้งฉากกับพื้นผิวหรือ C-axis ทำให้มีค่าลดลง และในการเติมสารคะตะไลต์ Al ก็ จะพบยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง Al(200) และ Al(111) ส่วนการเติมสารคะตะไลต์ Pd ก็ จะพบยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง Pd(200) และ Pd(111) และการเติมสารคะตะไลต์ Pt ก็ จะพบยอดสัญญาณที่ตำแหน่ง Pt(111) ที่ระนาบของสาร แต่ละชนิดที่ต่างกัน

6.5.2 ลักษณะพื้นผิวเมื่อเติมสารคะตะไลต์

ผลของการถ่ายภาพพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) หลังจากผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง และนำมาเติมสารคะตะไลต์ Al, Pd และ Pt และทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสนาน 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 6.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.17 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ทำการเติมสารคะตะไลต์ด้วยการ

สเปคเตอร์ริง เป็นเวลา 5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ก) เติมสารคะตะไลต์ Al

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามปรับค่าแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) เติมสารคะตะไลต์ Pd

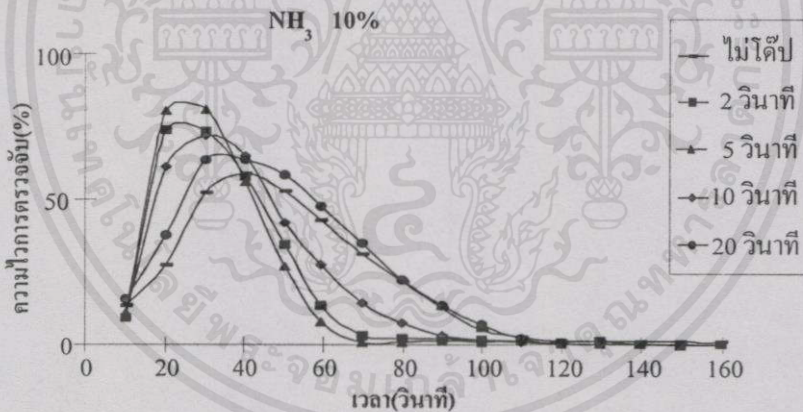
(ค) เติมสารคะตะไลต์ Pt

เมื่อได้มีการเติมสารคะตะไลต์ Al, Pd และ Pt ลงในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างด้วยเงื่อนไขความดันบรรยากาศ Ar-O₂ (85:15) กำลังเคลื่อนความถี่วิทยุ 150 วัตต์ และอุณหภูมิฐานรอง 150 องศาเซลเซียส เมื่อเติมสาร Al (รูปที่ 6.17 ก) จะเห็นว่าเม็ดเกรนมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงมากนักซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการเติมสาร Pd (รูปที่ 6.17 ข) แต่ในส่วนของ การเติม Pt นี้ (รูปที่ 6.17 ค) จะเห็นได้ว่าผิวหน้าเม็ดเกรนมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นระเบียบ

6.5.3 การเติมสารคะตะไลต์ Al, Pd และ Pt และการตรวจจับแอมโมเนีย

การเติมสารคะตะไลต์ Al, Pd และ Pt ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริงโดยกระบวนการสปัตเตอร์ริงด้วยเวลาการสปัตเตอร์ริง 2, 5, 10 และ 20 วินาที สร้างตัวตรวจจับและวิธีการดังแสดงในบทที่ 5 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองโดยการเติมสาร Al, Pd และ Pt ให้กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่ใช้เวลาการสปัตเตอร์ริง 5, 10, 15 และ 20 วินาที โดยการนำมาทดสอบการตรวจจับแอมโมเนีย ดังรูป 6.18 พบว่าเมื่อใช้สารคะตะไลต์ทำการสปัตเตอร์ริงเป็นเวลา 5 วินาที จะให้ความไวในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร ได้ดีกว่าที่ใช้เวลาการสปัตเตอร์ริง 2, 10 และ 20 วินาที

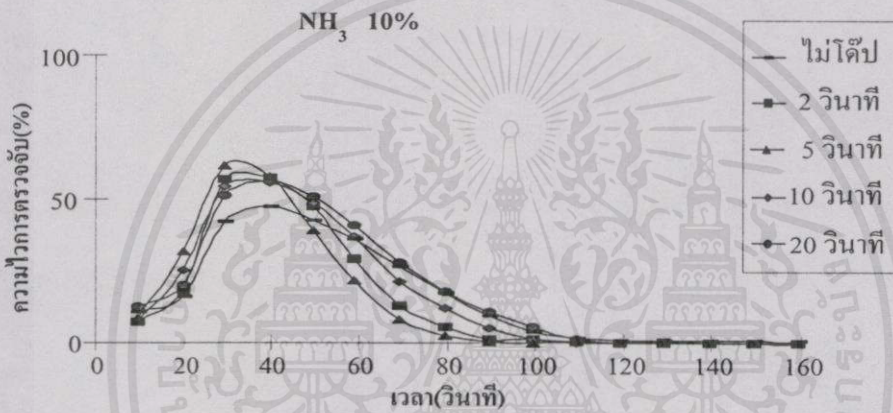
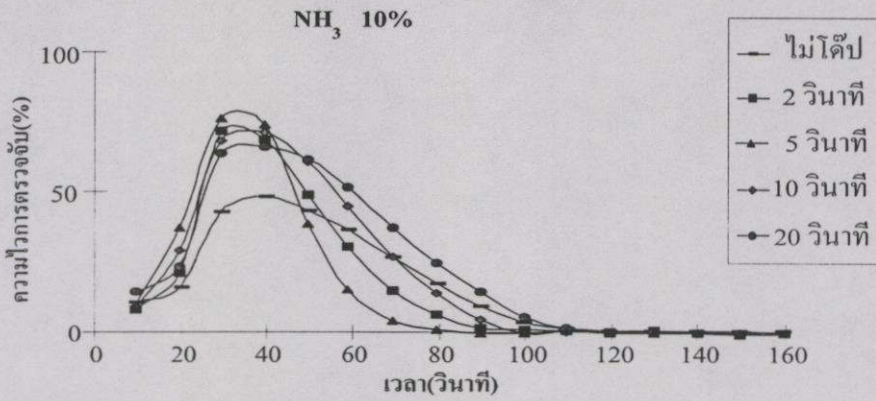


(ก) เติมสารคะตะไลต์ Al

รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 10 %

โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เมื่อเติมสารคะตะไลต์ด้วยการสปัตเตอร์ริงเป็นเวลาค่าต่าง ๆ

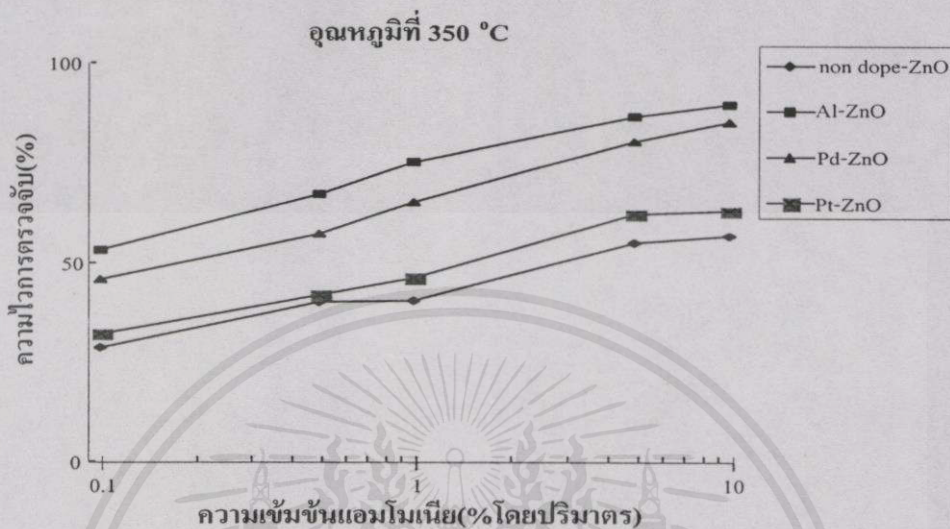
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.18 (ต่อ)

จากการทดลองเดิมสาร Al, Pd และ Pt ให้กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ความไวในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสพบว่า การเดิมสารคะตะไลต์ Al จะทำให้ความไวในการตรวจจับและการตอบสนองของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ต่อก๊าซได้ดีและเร็วกว่าการเดิม Pd และ Pt ขณะตรวจจับเวลาในซิงค์ก๊าซจะมีค่าระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ 10 วินาที (Response time or Gas exposure time) และระยะเวลาในการคืนสภาพของฟิล์ม (Recovery time) ประมาณ 50วินาที โดยใช้เวลาในการตรวจจับแอมโมเนีย (Operating time) ทั้งหมด 60 วินาที ดังรูปที่ 6.18 (ก) ส่วนการเดิมสารคะตะไลต์ Pd จะมีค่าระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ 20 วินาที และระยะเวลาในการคืนสภาพของฟิล์มประมาณ 60 วินาที โดยใช้เวลาในการตรวจจับแอมโมเนียทั้งหมด 80 วินาที ดังรูปที่ 6.18 (ข) และการเดิมสารคะตะไลต์ Pt จะมีค่าระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ 20วินาที และระยะเวลาในการคืนสภาพของฟิล์มประมาณ 70วินาที โดยใช้เวลาในการตรวจจับแอมโมเนียทั้งหมด 90 วินาที ดังรูปที่ 6.18 (ค)

เมื่อสังเกตถึงความไวในการตรวจจับจึงทำการนำมาเปรียบเทียบเพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มบางที่ถูกเติมสารคะตะไลต์ที่ต่างชนิดกันและที่ไม่ได้เติมดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับกับความเข้มข้นแอมโมเนียที่ค่าต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เติมสารคะตะไลต์ชนิดต่าง ๆ

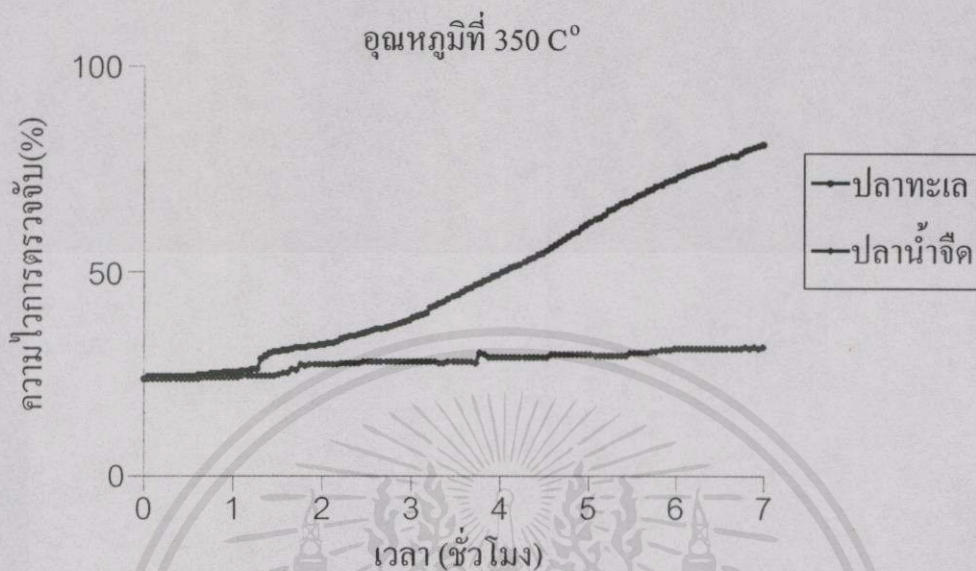
ดังนั้นการเติมสารคะตะไลต์ Al, Pd และ Pt ให้กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในเวลารสปีดเตอร์ริง 2, 5, 10 และ 20 วินาที จะเป็นการเติมคะตะไลต์ Al จะมีความไวในการตรวจจับก๊าซ (ช่วงที่กำลังดูดแบบทางเคมี) ได้ดีกว่าการเติม Pd และ Pt ให้กับฟิล์ม โดยที่การเติม Al เป็นเวลา 5 วินาที ด้วยการสปีดเตอร์ริงจะมีความไวในการตรวจจับมากที่สุดในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียและมีความไวในการตรวจจับมากกว่าการเติม Pd และ Pt ที่ใช้เวลาในการสปีดเตอร์ริง 5 วินาที

เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่า ความไวในการตรวจจับที่เติมลงไปในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้มีความไวต่อการตรวจจับก๊าซที่ดีขึ้นแต่จะเห็นได้ว่าระยะเวลาจับก๊าซออกจากฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปริมาณคะตะไลต์และจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขณะใช้งานที่เหมาะสมอีกด้วย

6.6 การพัฒนานำไปใช้

จากการทดลองที่ผ่านมาได้ทำการทดลองสร้างหัววัดก๊าซขึ้นจากฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ผ่านกระบวนการแอนนิงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และเติมสารเติมเต็ม Al ที่มีความไวในการตรวจจับดีที่สุด เมื่อทำการวัดก๊าซแอมโมเนียที่แสดงผลของหัววัดก๊าซจึงมีแนวคิดที่จะนำทดสอบวัดกับสิ่งที่น่าจะมีก๊าซแอมโมเนียเป็นส่วนประกอบเมื่อเวลาย่อยสลายอันได้แก่ อาหารทะเล เช่น ปลา ปลาหมึก กุ้งและปู เป็นต้น เพราะเมื่อมีการย่อยสลายเกิดขึ้นอาหารทะเลดังกล่าวจะส่งกลิ่น

ออกมาให้เราทราบถึงความสดของอาหาร ในที่นี้เราจะทำการวัดความไวในการตรวจจับต่อการตอบสนองก๊าซที่ออกมาจากอาหารทะเล โดยในการทดลองนี้เราจะใช้ปลาเป็นตัวทำการทดลอง โดยจะมีการเปรียบเทียบปลาทั้งชนิดปลาน้ำจืดและปลาน้ำเค็ม



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซกับเวลาที่ใช้ในการตรวจจับ โดยใช้หัววัดก๊าซที่เติมสาร AI

จากการทดลองได้นำหัววัดก๊าซที่สร้างจากฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ไปใช้งานที่ทำการตรวจจับก๊าซในอาหารจำพวกอาหารทะเลนั้นในที่นี้เราใช้ปลาน้ำจืดและน้ำเค็มมาทำการวัดก๊าซที่ออกมา โดยจับเวลาดูความไวในการตรวจจับไปในการทดลองเราใช้เวลาทั้งหมด 7 ชั่วโมง ทำการวัดค่าทุก ๆ 3 นาที สังเกตจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปปลาทะเลจะมีค่าความไวในการตรวจจับเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง 21 นาที แต่ในส่วนปลาน้ำจืดมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

การทดลองต่อไปนี้เป็นกรนำหัววัดก๊าซที่สร้างจากฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มาตรวจจับก๊าซอื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์, อะซิโตน และ แอมโมเนีย ที่ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้ทราบว่าก๊าซที่ออกมาจากปลาทะเลนั้นอาจเป็นก๊าซจำพวกก๊าซแอมโมเนีย

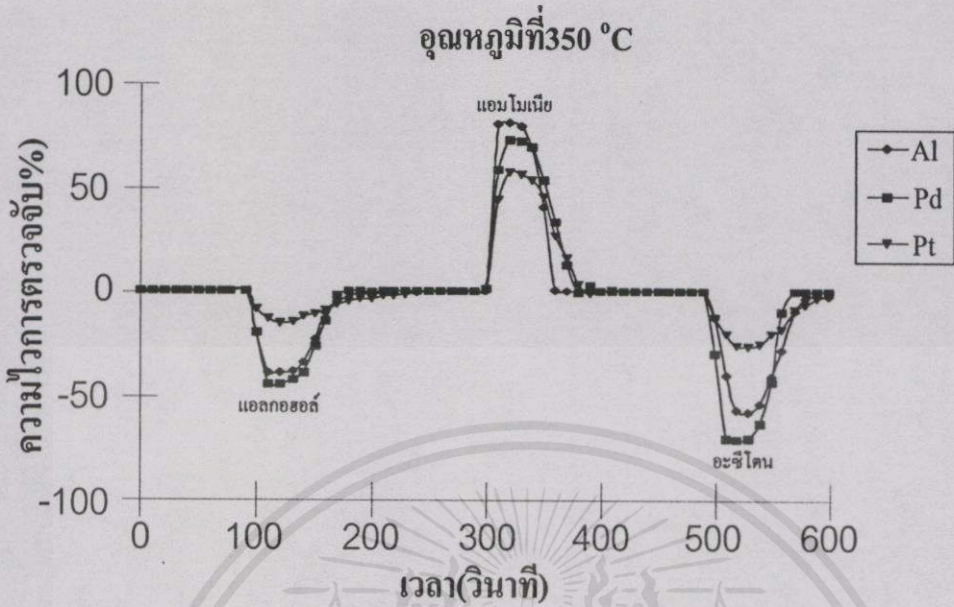
ความไวในการตรวจจับก๊าซ $\Delta R = [(R_g - R) / R_g] \times 100[\%]$; แอมโมเนีย

$$\Delta R = [(R_g - R) / R] \times 100[\%]; \text{แอลกอฮอล์, อะซิโตน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสาร $\Delta R =$ ค่าความไวการตรวจจับ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น $R =$ ค่าความต้านทานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สภาวะปกติ ก็มีการนำไปใช้

$R_g =$ ค่าความต้านทานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ขณะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซ



รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับต่อเวลาของก๊าซชนิดต่าง ๆ โดยใช้หัววัดก๊าซที่เติมสาร Al, Pd และ Pt ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองเมื่อนำหัววัดก๊าซฟิล์มบางซึ่งออกไซด์มาทำการทดสอบตรวจจับ ก๊าซชนิดต่าง ๆ ในการทำงานที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าช่วงเวลาที่ 100 ถึง 200 วินาที และที่เวลา 500 ถึง 600 วินาที เป็นการทดสอบกับความเข้มข้นของก๊าซแอลกอฮอล์และก๊าซอะซิโตน ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร จะพบว่า การตรวจจับของตัวฟิล์มบางที่เติม Pd จะมีความไวต่อการตอบสนองก๊าซแอลกอฮอล์และก๊าซอะซิโตนมีมากกว่าก๊าซแอมโมเนียและฟิล์มบางที่เติม Al และ Pt มีความไวน้อยกว่าโดยมีการเปลี่ยนแปลงไปทางด้านลบแสดงว่ามีความต้านทานลดลงเมื่อดูดซับก๊าซทั้งสองชนิด แต่เมื่อนำฟิล์มที่ทำการเติมสารคะตะไลต์ไปตรวจจับก๊าซแอมโมเนียความเข้มข้น 10 % โดยปริมาตรที่เวลา 300 ถึง 400 วินาที ผลปรากฏว่าฟิล์มบางที่เติม Al จะมีความไวการตรวจจับได้มากกว่า Pd และ Pt และมีการเปลี่ยนแปลงความไวทางด้านบวกแสดงว่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าการทำงานอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางซึ่งออกไซด์ที่ทำการเติมคะตะไลต์ Al จะมีความเหมาะสมที่ใช้ทำการวัดก๊าซแอมโมเนียเพราะให้ความไวสูงสุด ถ้าการวัดก๊าซแอลกอฮอล์และก๊าซอะซิโตนจะใช้ที่เติมคะตะไลต์ Pd จะเหมาะสมกว่า ดังรูปที่ 6.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยศึกษาออกแบบและสร้างหัววัดก๊าซเซนเซอร์ซิงค์ออกไซด์ ที่ได้นำเสนอมานี้สามารถอธิบายเป็นส่วนสำคัญ ๆ ได้ดังนี้

ในส่วนของกระบวนการสร้างที่ใช้กระบวนการสปีดเตอร์ริง แบบ อาร์เอฟ ในการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ซึ่งฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะมีค่าความไวการตรวจจับเปลี่ยนแปลงไป เมื่อได้รับก๊าซที่เข้ามาในระบบ โดยคุณสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่สร้างมาในแง่ของความดันก๊าซผสมอาร์กอน-ออกซิเจน ในอัตราส่วน 100:0, 85:15 และ 50:50 นั้นอัตราส่วนที่ 85:15 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด ที่ทำให้เกิดฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่สามารถตรวจจับแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.1 ถึง 10% โดยปริมาตร มีอัตราการสร้างฟิล์มที่ดี คือ 50 อังสตรอมต่ออนาที อีกทั้งยังเป็นช่วงความดันก๊าซผสมอาร์กอน-ออกซิเจนที่ทำให้เกิดพลาสมา

โดยช่วงความดันที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ความดัน 8×10^{-2} มิลลิบาร์ เพราะช่วงดังกล่าวเมื่อทำการสปีดเตอร์ริงและผ่านกระบวนการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศสังเคราะห์ $N_2:O_2$ (80:20) เป็นเวลา 60 นาที ทำให้เกิดผลึกโพลิคริสตอลของซิงค์ออกไซด์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ hcp (hexagonal closed-pack) สองโครงสร้างซ้อนกันมีระนาบ (101), (002) และ (100) ที่มีความเค้นขัด (ความเข้มของยอดสัญญาณสูง) จากการวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟกชันสเปกตรัม และมีความต้านทานเปลี่ยนแปลงต่อแอมโมเนียได้พอสมควร เมื่อนำมาตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิห้อง

การศึกษาอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าทำให้ขนาดของเม็ดเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยฟิล์มที่ไม่ได้ผ่านการแอนนัลมีขนาดเล็กมาก ในขณะที่ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลที่ 600 องศาเซลเซียส จะมีขนาดของเม็ดเกรนที่ใหญ่ขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสขนาดของเม็ดเกรนไม่สมบูรณ์มากนัก โดยสังเกตจากภาพถ่ายเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) และยังพบว่าฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลที่ 600 องศาเซลเซียสมีปริมาณผลึกของระนาบ (002) ในองค์ประกอบของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มากขึ้น โดยเป็นโครงสร้างผลึกแบบตั้งฉากกับพื้นผิวฐานรอง (c-axis) และปริมาณผลึก (101) และ (100) มีปริมาณที่ลดลง จากการวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟกชัน และเมื่อนำมาตรวจจับแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้องในช่วงความเข้มข้น 0.1 ถึง 10% โดยปริมาตร พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลขึ้นเป็น 600 องศาเซลเซียสจะมีความไวในการตรวจจับแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้นและที่น้อยลงมาคือที่อุณหภูมิ 800 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลดังกล่าวจึงได้มีการทดลองวัดรากฏการรอสอลล์ ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์ม

บางซิงค์ออกไซด์ที่ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของประจุพาหะ (n_H) โดยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะมีความหนาแน่นของประจุพาหะมากที่สุด คือ $4.26 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ที่ต่ำลงมาอยู่ที่การแอนนัลอุณหภูมิ 800 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นของประจุพาหะที่ต่ำสุด คือ $3.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ เมื่อพิจารณาถึงความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (μ_n) จะมีค่าลดลงตามลำดับ

การทดลองต่อไปเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับการทำงานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ และสร้างชั้นที่เรียกว่าไมโครฮีเทอโรสตรักเจอร์จากโลหะแพลทินัมโดยมีชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นตัวฉนวนกั้นกลางอีกชั้นหนึ่งเป็นส่วนที่ส่งความร้อนไปยังฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เมื่อทำการวัดความไวเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิการทำงานอยู่ที่ 350 องศาเซลเซียส และยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิให้กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ในขณะที่ทำการวัดจะช่วยทำให้การขับก๊าซออกจากเนื้อฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ได้ดีโดยที่จะมีค่าระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ 30 วินาที (Response time or Gas exposure time) และระยะเวลาในการคืนสภาพของฟิล์ม (Recovery time) ประมาณ 80 วินาที เวลาในการตอบสนองต่อความเข้มข้นแอมโมเนียทั้งหมด (Operating time) อยู่ที่ 110 วินาที

การลดระยะเวลาในการตรวจจับแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส สามารถทำได้โดยการเติมสารคะตะไลต์ เช่น Al, Pd และ Pt ให้กับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยใช้กระบวนการสปัตเตอร์ริง และผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จะพบว่า การเติมสารคะตะไลต์ Al จะช่วยลดระยะเวลาในการตรวจจับแอมโมเนียได้ดีกว่าการเติมสารคะตะไลต์ Pd และ Pt ให้กับฟิล์ม อีกทั้งความไวที่เปลี่ยนแปลงในตอบสนองต่อความเข้มข้นแอมโมเนียต่อการตรวจจับก็ดีกว่า โดยการเติมสารคะตะไลต์ Al จะมีค่าระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ 10 วินาที และระยะเวลาในการคืนสภาพของฟิล์มประมาณ 50 วินาที โดยใช้เวลาในการตรวจจับแอมโมเนียทั้งหมด 60 วินาที ส่วนการเติมสารคะตะไลต์ Pd จะมีค่าระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ 20 วินาที และระยะเวลาในการคืนสภาพของฟิล์มประมาณ 60 วินาที โดยใช้เวลาในการตรวจจับแอมโมเนียทั้งหมด 80 วินาที และการเติมสารคะตะไลต์ Pt จะมีค่าระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ 20 วินาที และระยะเวลาในการคืนสภาพของฟิล์มประมาณ 70 วินาที โดยใช้เวลาในการตรวจจับแอมโมเนียทั้งหมด 90 วินาที

การนำหัววัดก๊าซที่สร้างจากฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มาพัฒนานำไปใช้งานที่ทำการตรวจจับก๊าซในอาหารจำพวกอาหารทะเลนั้นในที่นี้เราใช้ปลาน้ำจืดและน้ำเค็มมาทำการวัดก๊าซที่ออกมา โดยจับเวลาดูความไวที่เปลี่ยนแปลงไป การเปรียบเทียบกันปรากฏว่าความไวการตรวจจับที่เปลี่ยนแปลงด้านปลาน้ำเค็มมีมากกว่าปลาน้ำจืด

งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทำวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมดการออกแบบและสร้างห้วัดก๊าซโดยทำการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ และผลของการทดลองตรวจจับความเข้มข้นแอมโมเนียของห้วัด เป็นข้อมูลที่แสดงถึงความสามารถในการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซในระดับต่าง ๆ กันได้ โดยที่การทำงานนั้นต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิการทำงานของห้วัด และเมื่อต้องการให้มีการตรวจจับที่ดีขึ้นและลดเวลาในการตรวจจับให้น้อยลงก็โดยการเติมสารคะตะไลต์ ซึ่งสามารถนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มาสร้างเป็นระบบวัดก๊าซตรวจจับแอมโมเนียที่มีการจัดเก็บข้อมูลและประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในด้านความปลอดภัย ทั้งโรงงานอุตสาหกรรม หรือห้องปฏิบัติการต่าง ๆ เป็นต้น

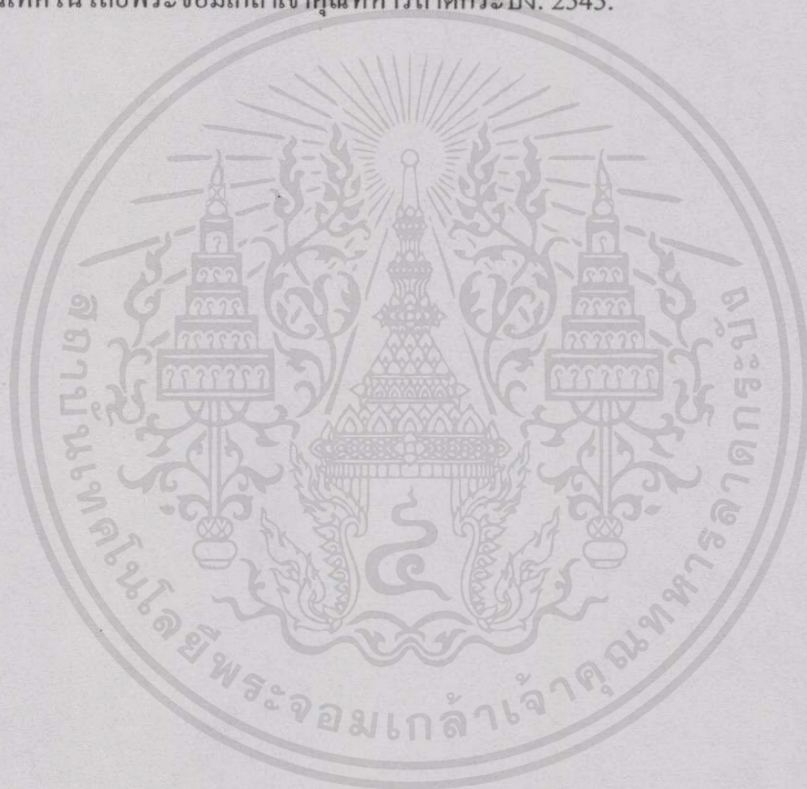


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Middelhock and S.A.Audet, **Silicon Sensors**, (1989) pp.249-270.
- [2] Mare J. Madou and S. Roy Morrison, **Chemical Sensing With Solid State Devices**, (1988) pp. 479-511.
- [3] C. J. Bossart, *Ind. Res.*, 18 (6), (1976) pp.96.
- [4] S. R. Morrison, *Sensor and actuator* (inpress).
- [5] S.M. Sze, **Semiconductor sensor**, USA 1994, John Wiley & Son, Inc.
- [6] V. Lantto and P. Romppainen, "Electrical Studies on the Reactions of CO with Different Oxygen Species on SnO₂ Surfaces.", *Thin Solid Films* 192 (1987). pp.243-264.
- [7] F. C. Stedile and B. A. S. De Barros, JR, "Characterization of Tin Oxide Thin Films deposited by reactive sputtering.", *Thin Solid Films*, 170 (1989) pp. 285-291.
- [8] T.SeiYama, **Chemical sensor Technology**, Tokyo : Kodansha Ltd., c1988-1992, pp.16-19.
- [9] K. Wasa and Sh. HayaKawa, **Handbook of sputter deposition technology: Principles. Technology and Applications**, Noyes Publication, 1992.
- [10] Cullity, B. D., **Element of X-Ray Diffraction.**, pp.1-176. 2nd ed. Massachusetts: Addison-Wesley 1978.
- [11] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง "การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิติคอน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2544.หน้า 61-67.
- [12] สมเกียรติ ศุภเดช, **เซมิคอนดักเตอร์ ฟิสิกส์**, พิมพ์ครั้งที่ 1, (2542), หน้า 327-331
- [13] Ohring, M., **The Materials Science of Thin Films.**, pp. 112-113. San Diego : Academic Press, 1992.
- [14] Wasa, K. **Sputtering Techniques and application** Chopra, K. L. and Malhotra, L. K. (ed.), **Thin Film Technology and Applications Proceeding of the International Workshop on Thin Film Technology and Applications. November 19-30 New Delhi, India.**, pp.40-41. New Delhi: McGraw-Hill Publishing company Limited, 1984.
- [15] Chopman, B., **Glow Discharge Processes: Sputtering nd Plasma Etching.**, pp. 241-242. New York : John Wiley & Son., 1980.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- [16] Chopman, B., **Glow Discharge Processes: Sputtering nd Plasma Etching.**, pp. 243. New York : John Wiley & Son., 1980.

- [17] อติศักดิ์ ศรีจุม, “การศึกษาคุณสมบัติการตอบสนองต่อก๊าซของทินออกไซด์”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [18] ศรีเมษ รัตนชัย และคณะ. 2534 “ การศึกษาเทคนิคการควบคุมความหนาไดอะแฟรมของซิลิกอนในสารละลาย EPD.”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14, พ.ศ. 2534, หน้า 2-136 ถึง 2-142
- [19] จริญญา ศรีธาราธิคุณ, “การพัฒนาทินออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มบางโดยเทคนิคโซลเจลบนฐานรองซิลิกอน.”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เงื่อนไขของฟิล์มที่ใช้เป็นหน้าฉากป้องกันพลาสมา

การเลือกเงื่อนไขฟิล์มที่ใช้เป็นหน้าฉากป้องกันพลาสมานั้นจะต้องพิจารณาโดยมีหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 1ก

ตารางที่ 1 ก แสดงความแตกต่างความสามารถของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

เงื่อนไข	Az-4620	Az-1350
ชนิดของฟิล์ม	ชนิดบวก	ชนิดบวก
ชนิดของฟิล์ม(ที่5000รอบ/นาที)	5 ถึง 7 ไมครอน	5000 อังสตรอม
ความคมชัดของลวดลาย	พอใช้	ดี
เกิดปฏิกิริยากับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์	ไม่เกิด	ไม่เกิด
น้ำยาที่ใช้ล้างฟิล์ม	อะซีโตน	อะซีโตน
การเกิดปฏิกิริยาต่อความร้อนของพลาสมา	ป้องกันได้	ป้องกันไม่ได้

จากข้อมูลดังกล่าวจะได้ว่า เงื่อนไขของฟิล์มที่เหมาะสมกับการทำเป็นหน้าฉากป้องกันพลาสมาจากกระบวนการสปีดเตอริงและ ไม่เกิดปฏิกิริยากับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จนก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับเนื้อฟิล์ม คือ Az-4620 แต่ความคมชัดในการทำลวดลายจะไม่ดีเท่า Az-1350 ก็ตาม แต่ Az-4620 มีความหนาของชั้นฟิล์มมากกว่า Az-1350 จึงทำการล้างฟิล์มส่วนที่ไม่ต้องการออกได้ง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ก คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซิงค์ออกไซด์ในรูปผลึกเดี่ยว

Crystal system	6 mm (wurtzite)
Space group	$P6_3mc$
Lattice constant	$a=3.24256 \text{ \AA}$, $c=5.1948 \text{ \AA}$
Sublimation point	$1975 \pm 0^\circ\text{C}$
Hardness	4 Mohs
Dielectric constants	$\epsilon_{11}^s=8.55$, $\epsilon_{33}^s=10.2 \times 10^{-11} \text{ F/m}$
Density	$5.665 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Thermal expansion coefficient	$\alpha_{11}=4.0$, $\alpha_{33}=2.1 (\times 10^{-6} / ^\circ\text{C})$
Optical transparency	$0.4\text{-}2.5 \mu\text{m}$
Refractive index	$n_o=1.9985$, $n_e=2.0147 (\lambda=6328 \text{ \AA})$
Electro-optic constant	$r_{33}=2.6$, $r_{13}=1.4 (\times 10^{-12} \text{ m/V}$, $\lambda=6328 \text{ \AA})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

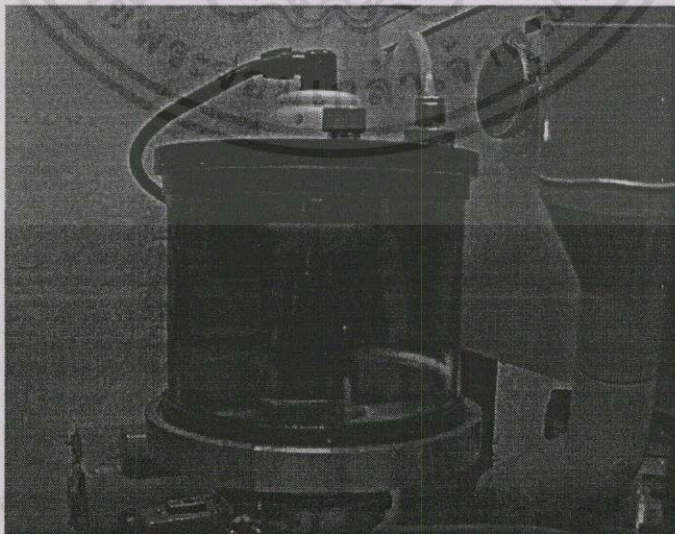
1. ลำดับภาพขั้นตอนการสร้างไมโครฮีทเตอร์

1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น



รูปที่ 1ข แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้นที่นำมาสร้างไมโครฮีทเตอร์

2. กระบวนการสปัตเตอร์ริง

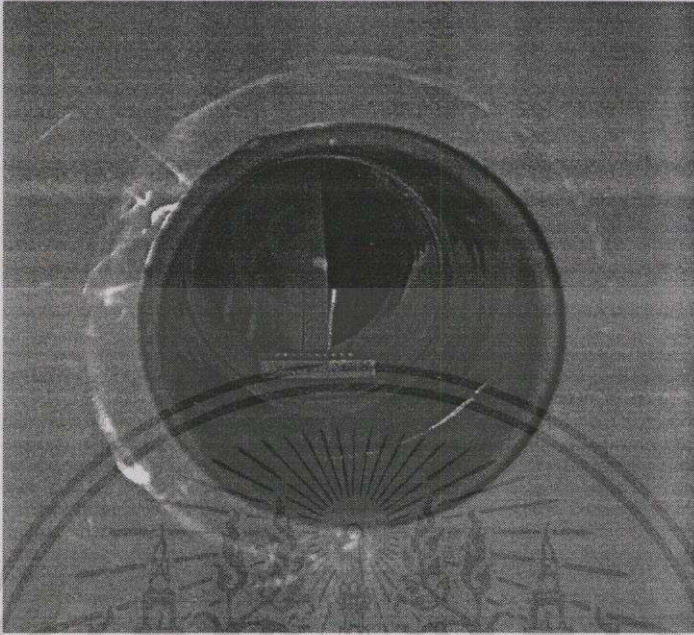


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

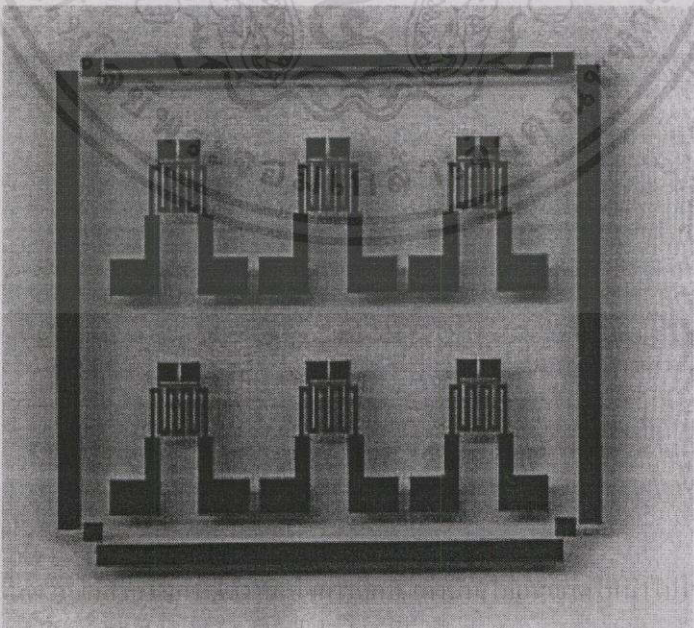
รูปที่ 2ข การเคลือบชั้นโลหะแพลทินัมด้วยกระบวนการ ดีซี สปัตเตอร์ริง

3. กระบวนการขึ้นเตอร์ริง



รูปที่ 3ข การขึ้นเตอร์ริง โลหะเพลทินัมบนแผ่นซิลิคอน

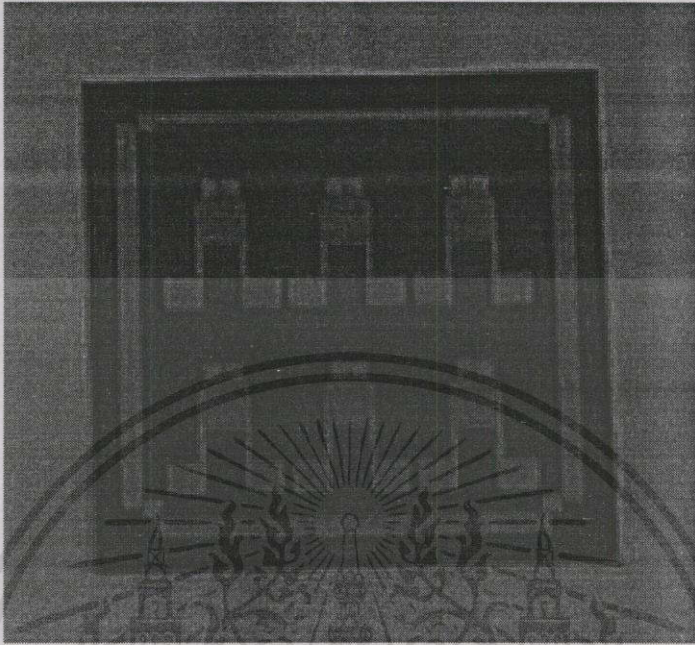
4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ
ไม่จำกัดวงจำกัดสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ และขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ไว้เพื่อใช้ในการค้า
ไม่จำกัดวงจำกัดสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ และขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ไว้เพื่อใช้ในการค้า

รูปที่ 4ข สวดลายบนกระจกมาสก์เพื่อสร้างสวดลายโดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

5. กระบวนการกัดด้วยสารละลายเคมี



รูปที่ 5x ผ่านกระบวนการกัดลวดลายด้วยสารละลายเคมี HCl : HNO₃ (3:1)

6. ทดสอบ



เอกสารนี้

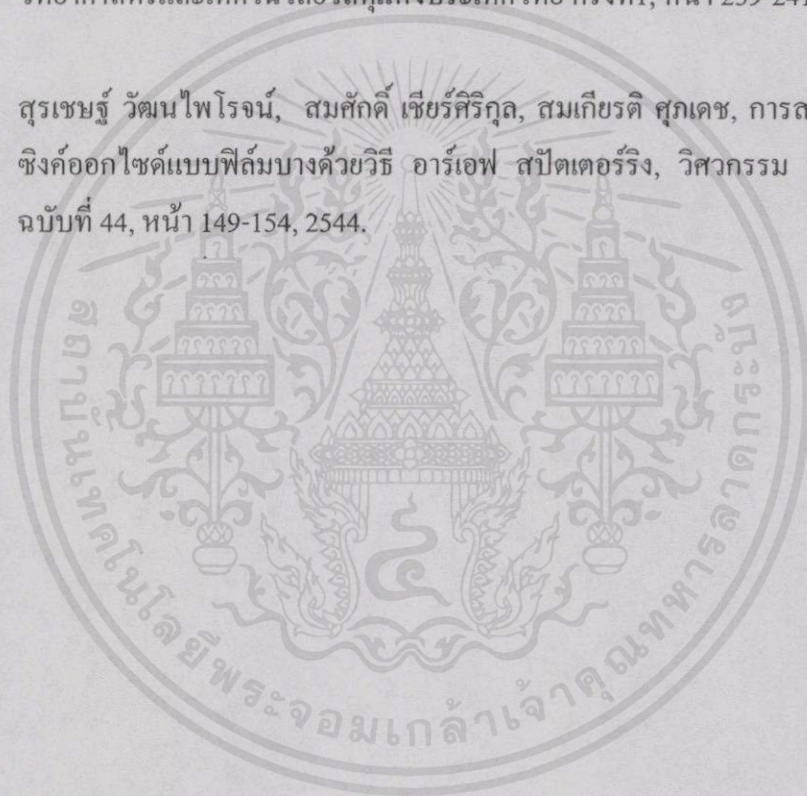
ไม่ว่าจะที่ไหนก็ตาม อีกขั้นที่ห้ามมิให้คัดลอกเพื่อหาประโยชน์ต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6x ก่อนและหลังการทดสอบโดยป้อนกำลังงาน ไฟฟ้าเข้าสู่ไมโครฮีเตอร์

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ทางวิชาการ

- สุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุขเดช, “การสร้างฮีตเตอร์จากฟิล์มโลหะแพลทินัมโดยวิธีการดีซีสปีดเตอร์ริง, การประชุมวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย ครั้งที่1, หน้า 239-241
- สุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุขเดช, การสร้างหัววัดก๊าซซิงค์ออกไซด์แบบฟิล์มบางด้วยวิธี อาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง, วิศวกรรม มก., ปีที่ 15, ฉบับที่ 44, หน้า 149-154, 2544.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายสุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์
วัน เดือน ปี เกิด	24 มิถุนายน 2514
ภูมิลำเนา	เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต เทคโนโลยีอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันราชภัฏพระนคร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2535
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	รายละเอียดในภาคผนวก ค.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้