



การเตรียมโมลิตินัมไตรออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนโดยวิธี
แมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดก๊าซ

โดย
ไชยยันต์ โอรส

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2556

Preparation of Molybdenum Trioxide Nanostructure
by Reactive Magnetron Sputtering for Gas sensing
Application

By

Chaiyan Oros

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2008

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ ด้วยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.อนุรัตน์ วิสิทธิ์สรรรถ ที่ปรึกษาโครงการวิจัยนี้ ซึ่งท่านเป็นนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการวิจัยนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลจุลภาค (Nano-Electronics and MEMs Laboratory) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.มติ ห่อประทุม นักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ชิ้นงาน

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยจนโครงการวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

ไชยันต์ ไอร์ส
พฤศจิกายน 2556



บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : social 033

ชื่อโครงการ : การเตรียมโมลิติน้ำมึโตรออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดก๊าซ

ชื่อนักวิจัย : ดร.ไชยยันต์ โอโรส

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิจัยเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกทำการศึกษากการเตรียมโมลิติน้ำมึโตรออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและสมบัติการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางโมลิติน้ำมึโตรออกไซด์ที่เตรียมโดยเงื่อนไขอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 sccm, 12 sccm และ 16 sccm พบว่าโมลิติน้ำมึโตรออกไซด์มีโครงสร้างลักษณะรูปลายเข็มที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น มีขนาดแตกต่างกันระหว่าง 0.2-0.5 ไมโครเมตร โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโมลิติน้ำมึโตรออกไซด์เป็นแบบ เฟสออร์โธโรมบิก ของโมลิติน้ำมึโตรออกไซด์สำหรับสมบัติการตรวจวัดก๊าซเอทานอล พบว่าฟิล์มบางโมลิติน้ำมึโตรออกไซด์เป็นการกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เนื่องจากมีความต้านทานลดลงเมื่ออยู่ในบรรยากาศของเอทานอล และฟิล์มบางโมลิติน้ำมึโตรออกไซด์สามารถตรวจวัดก๊าซเอทานอลได้ต่ำถึง 100 ppm ที่อุณหภูมิการวัด 400°C

ในส่วนที่ 2 ได้ทำการศึกษากการเตรียมทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและสมบัติการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เตรียมโดยเงื่อนไขอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm พบว่าทินออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงจาก อัญฐาน เป็นโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 12 sccm ถึง 48 sccm ความเป็นโครงสร้างผลึกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์สมบัติพื้นผิว พบว่าฟิล์มทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนทุกค่า แสดงลักษณะของแท่งนาโน โดยมีขนาดเล็กลงตามอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น แต่พบว่าอัตราการเคลือบลดลงจาก 0.28-0.10 nm/s เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 12 sccm ถึง 48 sccm สำหรับสมบัติการตรวจวัดก๊าซเอทานอล พบว่า พบว่าฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งนาโนเป็นการกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เนื่องจากมีความต้านทานลดลงเมื่ออยู่ในบรรยากาศของเอทานอล และฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งนาโนสามารถตรวจวัดก๊าซเอทานอลได้ต่ำถึง 50 ppm ที่อุณหภูมิการวัด 250°C

E-mail Address : Chaiyan.Oro@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2556

Abstract

Code of project : social 033/2556

Project name : Preparation of Molybdenum Trioxide Nanostructure by Reactive
Magnetron Sputtering for Gas sensing Application

Researcher name : Chaiyan Oros, Ph.D.

In this research are separated into two parts. In first part, suitable sputtering conditions for the formation MoO₃ nanostructures are studied and the MoO₃ thin films prepared under different condition are tested toward ethanol gas sensing. Sputtering with oxygen flow rate are systematically varied in the range 8 sccm to 16 sccm. It was found that molybdenum oxide nano-needle tend to form at high oxygen flow rate of 16 sccm. Under these conditions, MoO₃ nano-needles are formed with different length ranging from 0.2-0.5 μm. In addition, MoO₃ nano-needles are highly crystalline with MoO₃ Orthorhombic crystal phase. Gas sensing performances of sputtered molybdenum oxide nano-needle thin film have been characterized toward ethanol sensing. It was found that molybdenum oxide thin films exhibit n-type conductivity with decreased resistance when exposed to ethanol, which is reducing gas. In addition, the molybdenum oxide thin films are capable of detecting ethanol gas at concentrations lower than 100 at operating temperature 400 °C.

In the second part, the structure of Tin oxide thin films with different oxygen flow rate are studied and the Tin oxide thin films prepared under different condition are tested toward ethanol gas sensing. It was found that the structure of Tin oxide changes from amorphous to crystalline as the oxygen flow rate increases from 12 to 24 sccm and the degree of crystallinity tends to improve as the oxygen flow rate increases further. From morphological characterization, all SnO₂ films prepared with different oxygen flow rates comprise isolated columnar nanorod structures and the nanorod size tends to decrease as the oxygen flow rate increases. In addition, the deposition rate is found to decrease from 0.28 to 0.10 nm/s as the oxygen flow rate increases from 12 to 48 sccm. Gas sensing performances of sputtered SnO₂ nanorod thin film have been characterized toward ethanol sensing. It was found that SnO₂ nanorod thin film exhibit n-type conductivity with decreased resistance when exposed to ethanol, which is reducing gas. In addition, the SnO₂ nanorod thin film are detecting ethanol gas at concentrations lower than 50 ppm at operating temperature 250 °C.

E-mail Address : Chaiyan.Oro@mutr.ac.th

Period of project : 1 October 2012 – 30 September 2013

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
บทนำ	1
หลักการและเหตุผล	3
วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
คำถามการวิจัย	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
ขอบเขตการวิจัย	4
ผลการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	5
แนวทางในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	5
2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
หลักการตรวจจับทางเคมีของสารกึ่งตัวนำ	6

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
สถานะพื้นผิว (Surface State) ในการตรวจจับทางเคมี	7
การดูดซับออกซิเจน	13
การเคลือบฟิล์มภายใต้สภาวะสุญญากาศ	14
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์	14
อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวปัสสารเคลือบ	15
กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge)	16
ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์	18
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
วิธีดำเนินการวิจัย	23
4 ผลการดำเนินการวิจัย	26
การประดิษฐ์ Cr-Au Electrode สำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัด ก๊าซด้วยเทคนิคการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์	26
ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซของ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอค ทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์	27
ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซของ ออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนี ตรอนสปัตเตอร์	31
5 สรุปผลการวิจัย	36
สรุปผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซของ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอค ทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
สรุปลผลการศึกษาระดับบัณฑิตทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซของหิน ออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบปรีแอคทีฟแมกนีต รอนสปัตเตอร์ริง	36
บรรณานุกรม	38
ประวัติผู้วิจัย	40



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การเปรียบเทียบสมบัติหัววัดก๊าซชนิดต่างๆ	2
1.2	การเปรียบเทียบหัววัดก๊าซประเภทเซรามิก ฟิล์มหนา และฟิล์มบาง	3
3.1	เงื่อนไขการเคลือบ Cr-Au Electrode	23
3.2	เงื่อนไขการเคลือบโมลิบดีนัมไตรออกไซด์	24
3.3	เงื่อนไขการเคลือบทินออกไซด์	24



สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
2.1	แบบจำลองการเกิดประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ อะตอมผู้ให้ (D) และ อะตอมผู้รับ (A) สถานะผิวจะแสดงที่ความหนาแน่นของระดับพลังงาน N(E)	9
2.2	ลักษณะแบบจำลองแถบพลังงาน Double layer ชนิดต่างๆ	12
2.3	อันตรกิริยาระหว่างไอออนและเป้าสารเคลือบ	16
2.4	ลักษณะการโกล์วดิสซาร์ระหว่างซั้วอิเล็กโทรด	18
2.5	ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี สปีดเตอริง	19
2.6	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	20
2.7	การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการจัดเป้าสารเคลือบในระบบเคลือบฟิล์มพลาสมาแม่เหล็กและแนวการจัดเป้าสารเคลือบในระบบเคลือบฟิล์มพลาสมาแม่เหล็ก	21
4.1	แผนภาพไดอะแกรมหัววัดก๊าซ	26
4.2	แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 sccm, 12 sccm และ 16 sccm	28
4.3	แผนภาพพื้นผิวของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 sccm, 12 sccm และ 16 sccm	28
4.4	ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลกับอุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์	29
4.5	ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์กับการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 400°C	30
4.6	ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์กับปริมาณก๊าซเอทานอล	30
4.7	แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm	31

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.8	แผนภาพแท่งระดับนาโนของทินออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm	32
4.9	ความหนาของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งนาโนและอัตราการเคลือบฟิล์มกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	33
4.10	ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งกับปริมาณก๊าซเอทานอลที่อุณหภูมิ 250°C	34
4.11	ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งกับปริมาณก๊าซเอทานอลที่อุณหภูมิ 300°C	35



บทที่ 1

บทนำ

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านมลภาวะสิ่งแวดล้อมทางอากาศเป็นปัญหาที่สำคัญมากทั้งภายในและต่าง ประเทศ โดยต้นเหตุของปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมและยานยนต์ ทำให้เกิดก๊าซจำพวกคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และอื่นๆ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับก๊าซดังกล่าวที่ใช้ในปัจจุบันจึงมีหลายชนิดและได้มีการประดิษฐ์และผลิตออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น หัววัดก๊าซแบบไฟเบอร์ออปติก (Fiber Optic Sensors) หัววัดก๊าซแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Sensors) หัววัดก๊าซแบบ SAW (Surface Acoustic Wave Sensors) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้คือ หัววัดก๊าซที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เช่น ดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO_2) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) และโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) นอกจากนี้ยังได้มีการนำหัววัดก๊าซหรือก๊าซเซนเซอร์ (Gas Sensors) ไปใช้งานในด้านอื่น ๆ อีก เช่น หัววัดก๊าซสำหรับวัดการเผาไหม้ในสภาวะไร้ออกซิเจน หัววัดก๊าซแอลกอฮอล์ในปอดสำหรับผู้ขับขี่ยานยนต์ และงานอุตสาหกรรมอีกมากมาย เช่น อุตสาหกรรมน้ำหอม อุตสาหกรรมอาหาร งานทางด้านการแพทย์และการประยุกต์ใช้ในบ้านเรือน

ปัจจุบันก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Gas Sensors) เป็นก๊าซเซนเซอร์ที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก จะเห็นได้จากการเปรียบเทียบสมบัติในข้อดีดังตารางที่ 1.1 ซึ่งพบว่า ก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำจะมีข้อดีอยู่หลายข้อยกเว้น การใช้พลังงานมาก กล่าวคือ โดยส่วนมาก ก๊าซเซนเซอร์จะตอบสนองต่อก๊าซทดสอบที่อุณหภูมิสูง (High Operating Temperature) จึงต้องมีการให้อุณหภูมิแก่เซนเซอร์ในขณะที่ตรวจจับก๊าซ

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบสมบัติหัววัดก๊าซชนิดต่างๆ

Name	Sensor structure	Sensitivity	Selectivity	Stability	Cost	Power consumption
Catalytic gas sensor	O	O	X	Δ	Δ	X
Semiconductor gas sensor	O	O	Δ	Δ	O	X
Electrochemical gas sensor	Δ	Δ	O	Δ	Δ	Δ
Gas FET	Δ	Δ	Δ	Δ	O	Δ
QCM & SAW gas sensor	O	O	X	X	Δ	O
Optical gas sensor	X	O	O	Δ	X	Δ

O:good , Δ:fair and X:poor

อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อดีหลายประการยังทำให้ผู้วิจัยหลายกลุ่ม สนใจที่จะพัฒนาก๊าซเซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำให้ดีขึ้นโดยการค้นหาวัดวัสดุ วิธีการและเงื่อนไขในการผลิตเซนเซอร์ ก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำนั้น เป็นก๊าซเซนเซอร์ที่อาศัยประโยชน์จากลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซมาดูดซับ (Adsorb) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับสารกึ่งตัวนำขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนไป ดังนั้น โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เราทราบความเข้มข้นของก๊าซได้ ลักษณะการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิว และการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในบัลค์ (Bulk) แบบแรกนั้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นฟิล์มบางหรือฟิล์มหนา (Thin or Thick films) ส่วนแบบหลังนั้นจะมีความหนามากโดยมีลักษณะเป็นก้อนเซรามิก (Sintered Block) กรณีฟิล์มบางก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ ปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจมาก เพราะคุณสมบัติของมันมีประโยชน์หลายประการเมื่อเทียบกับ แบบฟิล์มหนาและเซรามิก เช่น การควบคุมตัวแปรในกระบวนการผลิตง่าย ความเร็วในการตอบสนอง ใช้พลังงานต่ำและต้นทุนในการผลิตต่ำ เป็นต้น แต่ถ้าดูจากตารางที่ 1.2 จะพบว่ามีข้อเสียเด่นชัดอยู่ประการหนึ่ง ก็คือ ความไวในการตรวจจับ (Sensitivity) ต่ำ ดังนั้นปัจจุบันจึงมีความพยายามพัฒนาโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มบางเพื่อให้ก๊าซเซนเซอร์แบบฟิล์มบางมีคุณสมบัติดีขึ้น

ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบหัววัดก๊าซประเภทเซรามิก ฟิล์มหนา และฟิล์มบาง

Characteristics	Sintered	Thick films	Thin films
Manufacturing process	Δ	Δ	O
Reproducibility	X	Δ	O
Microelectronics compatibility	X	Δ	O
Sensitivity	O	Δ	X
Power consumption	Δ	Δ	O
Fast response	X	Δ	O
cost	Δ	Δ	O

O:good , Δ:fair and X:poor

หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าหัววัดเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ เข้ามามากมายปีละหลายร้อยล้านบาท ไม่ว่าจะเป็เซ็นเซอร์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือตามบ้านเรือน เนื่องจากยังไม่มีงานวิจัยดังกล่าวที่สามารถนำไปผลิตเชิงพาณิชย์ในราคาถูกลง ด้วยเทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro electromechanical systems: MEMS) จะช่วยให้เราสามารถสร้างเซ็นเซอร์ขนาดเล็กและมีราคาถูกลง สามารถนำไปใช้ทดแทนเซ็นเซอร์ต่างๆ ที่จะต้องนำเข้า จึงเกิดโครงการนี้ขึ้นเพื่อที่จะเน้นการผลิตต้นแบบเชิงพาณิชย์อุปกรณ์ประเภทเซ็นเซอร์ขึ้นใช้เองภายในประเทศ เช่น Gas sensor array ขนาดเล็กสำหรับตรวจวัด Carbonmonoxide (CO), Nitrus oxide (NOx), landfilled gases เป็นต้น และสามารถถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ภาคเอกชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นาโนเทคโนโลยีเป็นศาสตร์เกี่ยวกับการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรหรือในระดับเดียวกับขนาดโมเลกุลนั่นเอง การสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีขนาดเล็กมากนี้มีประโยชน์อยู่มากมายทั้งในด้านเทคโนโลยีวัสดุ (nanomaterials) อิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics) และชีวภาพ (nanobiotechnology) เทคโนโลยีด้านวัสดุนาโนเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานที่สำคัญที่จะรองรับนาโนเทคโนโลยีด้านอื่นๆ วัสดุที่มีโครงสร้างแบบนาโนมีอยู่หลายอย่าง เช่น ผงขนาดนาโน (nanopowders) ท่อขนาดนาโน (nanotubes) และโครงสร้างอื่นขนาดนาโน เช่น nanofibre nanorod nanowires เป็นต้น วัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่มีประโยชน์มากต่อ เทคโนโลยีก๊าซเซ็นเซอร์ เนื่องจากคุณสมบัติอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (high surface to volume ratio) ซึ่งคุณสมบัตินี้จะ

ทำให้เราได้วัสดุที่มีความไวในการตรวจจับก๊าซสูงเพราะการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุจะทำให้ความสามารถในการตรวจจับโมเลกุลของก๊าซเป็นไปได้ง่ายขึ้น

โครงการนี้จะเน้นเน้นการพัฒนาเทคโนโลยี และประยุกต์ใช้ในการสร้างเซ็นเซอร์ชนิดใหม่ๆ รุนุ่มๆ ที่มีความไวสูงขึ้นโดยอาศัยนาโนเทคโนโลยี เช่น โครงสร้างระดับนาโนเมตรของโมลิบดีนัมไดออกไซด์ออกไซด์ (Molybdenum Trioxide- Nanostructures) และทินออกไซด์ (Tin Oxide) โดยการเตรียมด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง เป็นพื้นฐานสำหรับช่วยเพิ่มการดูดซับไอ (gas adsorption) ซึ่งจะช่วยให้ Gas sensor มีความไว (Sensitivity) สูงขึ้นกว่าเดิม

วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพ ความไวสำหรับอุปกรณ์ก๊าซเซ็นเซอร์ขนาดเล็กที่สร้างขึ้น ได้แก่ ก๊าซเซ็นเซอร์สำหรับวัดก๊าซต่างๆ เช่น CO, NO_x, landfilled gases เป็นต้น โดยใช้นาโนเทคโนโลยีคือ โครงสร้างระดับนาโนเมตรของโมลิบดีนัมไดออกไซด์ และทินออกไซด์เป็นพื้นฐาน ร่วมกับเทคโนโลยีฟิล์มบาง และเทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS)

คำถามการวิจัย

การหาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์โมลิบดีนัมไดออกไซด์และทินออกไซด์ โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของโมลิบดีนัมไดออกไซด์และทินออกไซด์ โครงสร้างระดับนาโนกับคุณสมบัติการตรวจวัดก๊าซ

นิยามศัพท์เฉพาะ

โมลิบดีนัมไดออกไซด์, ทินออกไซด์, แมกนีตรอนสปัตเตอริง, การตรวจวัดก๊าซ

ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมโมลิบดีนัมไดออกไซด์และทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนลงบน Si Wafer และ Cr-Au Electrode โดยเทคนิคการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยกำหนดตัวแปรของเงื่อนไขการเคลือบโมลิบดีนัมไดออกไซด์และทินออกไซด์ดังนี้

- อัตราการเคลือบฟิล์ม
- อัตราการป้อนก๊าซเข้าทำปฏิกิริยา
- ความหนาของฟิล์ม

2. นำโมลิบดีนัมไตรออกไซด์และทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนที่ได้จากการเตรียมมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD และ SEM
- สมบัติการตรวจวัดก๊าซ

3. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

มีความรู้ความเข้าใจถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการสร้างโมลิบดีนัมไตรออกไซด์และทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดก๊าซ

มีความรู้ ทักษะ และความสามารถทางของการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคสเปตเตอริง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติการตรวจวัดก๊าซของโมลิบดีนัมไตรออกไซด์และทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนให้ดียิ่งขึ้น

แนวทางในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

เผยแพร่ผลงานวิจัยในการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติแก่ผู้ที่สนใจ



บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

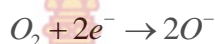
อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับก๊าซดังกล่าวที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิดและได้มีการประดิษฐ์ และผลิตออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น หัววัดก๊าซแบบไฟเบอร์ออปติก (Fiber Optic Sensors) หัววัดก๊าซแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Sensors) หัววัดก๊าซแบบ SAW (Surface Acoustic Wave Sensors) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้คือ หัววัดก๊าซที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เช่น ดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO_2) ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) และโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3)

ก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำนั้น เป็นก๊าซเซนเซอร์ที่อาศัยประโยชน์จากลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซมาดูดซับ (Adsorb) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับสารกึ่งตัวนำขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนไป ดังนั้น โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เราทราบความเข้มข้นของก๊าซได้ ซึ่งก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความไวของอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์ จึงมีความพยายามจะหาวัสดุเข้ามาโด๊ป (Doping Material) เพื่อให้ก๊าซเซนเซอร์มีคุณสมบัติดีขึ้น ต่อมาได้มีการศึกษาในด้านวัสดุนาโน เทคโนโลยีกันอย่างแพร่หลาย ซึ่ง เทคโนโลยีด้านวัสดุนาโนเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานที่สำคัญที่จะรองรับนาโนเทคโนโลยีด้านอื่นๆ วัสดุที่มีโครงสร้างแบบนาโนมีอยู่หลายอย่าง เช่น ผงขนาดนาโน (nanopowders) ท่อขนาดนาโน (nanotubes) และโครงสร้างอื่นขนาดนาโน เช่น nanofibre, nanorod, nanowires เป็นต้น วัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่มีประโยชน์มากต่อ เทคโนโลยีก๊าซเซนเซอร์ เนื่องจากคุณสมบัติอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (high surface to volume ratio) ซึ่งคุณสมบัตินี้จะทำให้เราได้วัสดุที่มีความไวในการตรวจจับก๊าซสูงเพราะว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุจะทำให้ความสามารถในการตรวจจับโมเลกุลของก๊าซเป็นไปได้ง่ายขึ้น

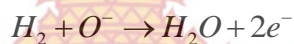
หลักการตรวจจับทางเคมีของสารกึ่งตัวนำ

หัววัดก๊าซชนิดกึ่งตัวนำของโลหะออกไซด์ (Metal Oxide) เช่น SnO_2 , WO_3 , MoO_3 , ZnO จะแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าในขณะที่ทำการตรวจจับก๊าซ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมตอบสนองของหัววัดก๊าซชนิดนี้คือ สมบัติพื้นผิว (Surface State) และสมบัติขอบของเกรน (Grain Boundary) ของวัสดุที่ใช้ในหัววัดก๊าซ

บริเวณผิวสัมผัสของโลหะออกไซด์ อะตอมจะมีพันธะไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดเป็นพันธะแขวนห้อย (Dangling bonds) ซึ่งจะไม่มีการชดเชยของส่วนที่ขาดหายไป และจะไม่มีการรวมกับอะตอมรอบข้างได้ โลหะออกไซด์ส่วนใหญ่ ไอออนลบและไอออนบวกจะมีพันธะอย่างหลวมๆ จากปรากฏการณ์นี้เมื่อมีการให้ความร้อนแก่โลหะออกไซด์ ออกซิเจนในบรรยากาศจะรับอิเล็กตรอนจากโลหะออกไซด์ และจะดูดซับ (Adsorb) ที่ผิวเกรนของโลหะออกไซด์ในสภาพของไอออน



ทำให้ที่ผิวเกรนของโลหะออกไซด์ ถูกปกคลุมด้วยชั้นไอออนของออกซิเจน กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดกำแพงพลังงานศักย์ (Potential Barrier) ขึ้นที่ผิวของโลหะออกไซด์ หากในอากาศขณะนั้นประกอบด้วยก๊าซรีดิวซ์ เช่น H_2 ก๊าซรีดิวซ์ในอากาศจะถูกดูดซับที่ผิวของโลหะออกไซด์ และจะส่งอิเล็กตรอนให้แก่โลหะออกไซด์



เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์นั้น พิจารณาได้จากปริมาณของประจุที่ถูกแลกเปลี่ยน ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าของโลหะออกไซด์จึงสามารถพิจารณาได้จากความเข้มข้นของออกซิเจนในบรรยากาศ โดยถ้าในบรรยากาศไม่มีก๊าซรีดิวซ์ (Reducing gas) เป็นองค์ประกอบจะทำให้ไอออนของออกซิเจนมีปริมาณมากส่งผลให้ความต้านทานของโลหะออกไซด์มีค่าสูง ในทางกลับกันหากมีก๊าซรีดิวซ์มากก็จะส่งผลให้ความต้านทานของโลหะออกไซด์ลดลง

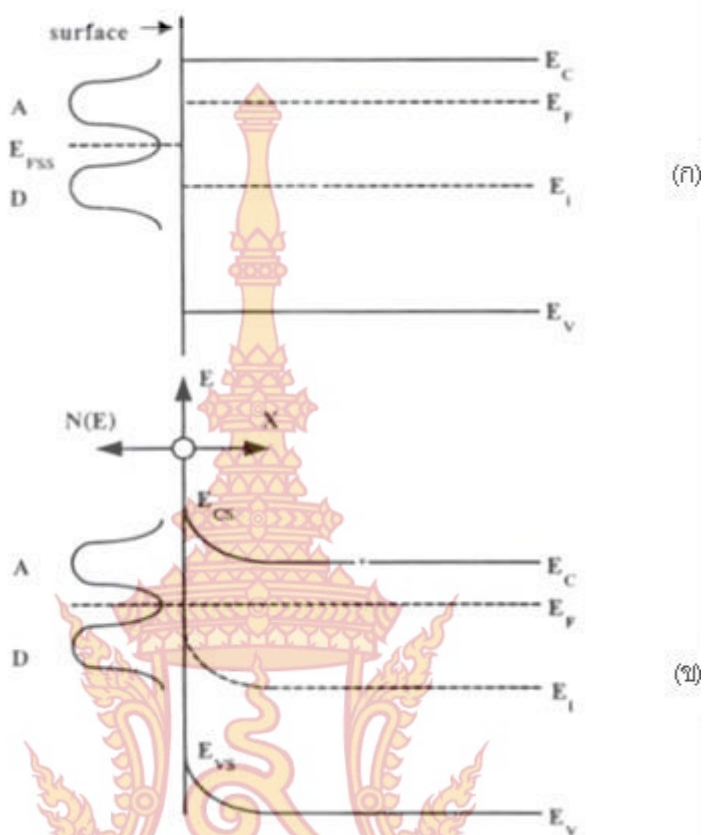
ในการปรับปรุงคุณสมบัติการตรวจวัดก๊าซของโลหะออกไซด์นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติพื้นผิว และสมบัติของขอบเกรนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (high surface to volume ratio) จึงจำเป็นต้องศึกษาการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนในรูปแบบต่างๆ เช่น โครงสร้างแบบ nanofibre nanorod และ nanowires เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดของโลหะออกไซด์

สถานะพื้นผิว (Surface State) ในการตรวจจับทางเคมี

บริเวณที่ผิวสัมผัสของเนื้อสารกึ่งตัวนำ อะตอมจะมีพันธะขาดไป 1 หรือ 2 อะตอมทำให้เกิดพันธะแขวนห้อย (Dangling bonds) ซึ่งจะไม่มีการชดเชยของส่วนที่ขาดหายไป และจะไม่มีการรวมกับอะตอมรอบข้างได้ โลหะออกไซด์ส่วนใหญ่ ไอออนลบและไอออนบวกจะมีพันธะอย่างหลวม ๆ ประจุบวกของโลหะไอออน จะมีประจุลบของ O^- ไอออนลบล้อมรอบอยู่ เมื่อมีปริมาณไอออนลบรอบๆ ตัวมันน้อย ไอออนบวกจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ดังนั้นการจัดเรียงของแถบความนำในกรณีนี้จะมีพลังงานต่ำกว่าแถบความนำจริง และสามารถดึงอิเล็กตรอนจากเนื้อสารได้ ซึ่งเหมือนกับว่าที่ผิวมีเฉพาะไอออนลบ จึงทำให้แถบพลังงานของประจุลบมีค่าสูงกว่าแถบวาเลนซ์ที่เป็นจริง ไอออนเหล่านี้สามารถดึงโฮลหรือให้อิเล็กตรอนแก่เนื้อสารได้ เหตุผลดังกล่าวจะสามารถ

อธิบายได้จากแถบพลังงานที่อยู่ในเทอมของสถานะผิว ซึ่งจะมีทั้งสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับของอะตอมที่ผิวดังรูปที่ 2.1 แบบจำลองแถบพลังงานที่ผิว E_C คือพลังงานที่แถบความนำ E_V คือพลังงานที่แถบวาเลนซ์ E_i เป็นพลังงานที่ระดับครึ่งของแถบพลังงาน และ E_F คือแถบพลังงานเฟอร์มิที่สถานะผิว สามารถกล่าวได้ว่า ความหนาแน่นของแถบพลังงาน $N(E)$ เป็นฟังก์ชันกับพลังงาน E ซึ่งมีเหตุผลหลายข้อที่สนับสนุนข้อเสนอนี้ เช่น ชั้นของผิวที่มีอยู่หลายชั้นที่แสงสามารถทะลุผ่านผลึกได้ โดยที่แต่ละชั้นจะมีระดับพลังงานไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีแถบพลังงาน 2 ระดับที่อยู่ภายในสถานะผู้รับ (A) ที่เชื่อมโยงกับไอออนลบที่ผิว

จากรูปที่ 2.1 (ก) เป็นการแบบจำลองแถบพลังงานขณะไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสถานะผิวและสารกึ่งตัวนำ “Flat Bands” ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำ (E_F) ไม่ต่อเนื่องกับระดับพลังงานเฟอร์มิที่มีสถานะผิว (E_{FSS}) ส่วนในรูปที่ 2.1(ข) แสดงกรณีที่มีสถานะสมดุล อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากระดับพลังงาน (E_F) ที่มีค่าสูงกว่า ซึ่งอยู่ใกล้ๆ ผิวของสารกึ่งตัวนำไปยังขอบเขตที่มีระดับพลังงานต่ำ (E_F) บริเวณสถานะผิวการแยกกันของประจุจะทำให้เกิดเป็นความต่างศักย์สองชั้น (Double-layer) สถานะนี้ทำให้เกิดการยกระดับพลังงานที่ชั้นผิว (ทั้ง E_{CS} และ E_{VS} ที่ผิว) เมื่อความต่างศักย์สองชั้น (Double-layer voltage) มีค่ามากพอ จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิมีค่าเท่ากันทั้งระบบ ($E_F = E_{FSS}$) และระบบจะเข้าสู่สมดุล การเคลื่อนย้ายของแถบพลังงานบริเวณใกล้ๆ ผิวนี้จะเรียกว่า Band bending และทำให้ฟังก์ชันการกระจายของพลังงานเฟอร์มิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับประมาณครึ่งหนึ่งของตำแหน่งอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ และถ้ามีเพียง 1 ระดับพลังงาน ระดับพลังงานเฟอร์มิจะเข้าสู่ระดับที่สมดุล ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่า เมื่อเข้าสู่สมดุลจะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน (Band bending) ขึ้น



รูปที่ 2.1

แบบจำลอง

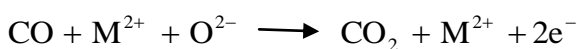
การเกิดประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ อะตอมผู้ให้ (D) และอะตอมผู้รับ
สถานะผิวจะแสดงที่ความหนาแน่นของระดับพลังงาน $N(E)$

(A)

(ก) ในกรณีที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารกึ่งตัวนำและสถานะผิว

(ข) ในกรณีที่อิเล็กตรอนจากผิวของสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปยังสถานะผิวจนถึงสมดุล

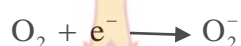
จุดที่น่าสนใจที่จะพิจารณา ก็คือความสามารถในการดูดซับที่สถานะผิวซึ่งเป็นการฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำหรือการรับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ (Oxidizing agents) เช่น ไฮโดรเจนเมื่อถูกดูดซับก๊าซ จะฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำและจะได้เป็น H^+ ส่วนออกซิเจนเมื่อขณะดูดซับก๊าซจะรับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำและจะได้เป็น O^- ที่ผิว การอธิบายทางคณิตศาสตร์จะสามารถแสดงในลักษณะที่คล้ายๆกับกรณีที่สถานะผิว หรืออาจจะใช้เทอมของสถานะผิวในการอธิบายระดับพลังงานที่ผิวขณะดูดซับก็ได้ อย่างเช่น CO เมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวและทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ จะทำให้ O^{2-} เปลี่ยนไปเป็นสถานะก๊าซ



กระแสไฟฟ้าในรูปแบบ Double layer ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข) จะสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ซึ่งทั้ง 3 ชนิดสามารถสร้างแบบจำลองการดูดซับที่สถานะผิวโดยจะสมมติให้มีระดับพลังงานอยู่เพียง 1 ระดับ ดังนั้นระดับพลังงานของผู้ให้มันจะเป็นกลางเมื่อไม่ถูกแรงยึดเหนี่ยว เช่น



หรืออะตอมผู้รับจะแสดงความเป็นกลางเมื่อไม่ถูกยึดเหนี่ยว เช่น



แบบที่หนึ่ง ถ้าอิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปในการกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะเกิดชั้นสะสมของประจุ (Accumulation layer) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2(ก) การเกิดชั้น Double layer ระหว่างประจุบวกที่สถานะผิวและประจุที่ฉีดเข้าไป เพราะว่าอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปจะเกิดการเคลื่อนที่จนอิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่มาปิดที่ผิวและผลทางไฟฟ้าจากชั้น Double layer ที่ไม่ลึกมาก โดยอยู่ในช่วงประมาณ 10\AA ของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานเฟอร์มิที่ผิวจะเปลี่ยนไป $d\psi$ เมื่อ ψ เป็น ศักดาที่ Double layer ดังรูปที่ 2.2 (ก) ระยะทางระหว่างประจุ d จะมีความสัมพันธ์กับค่าเก็บประจุที่ชั้น Double layer (ฟารัด/พื้นที่หนึ่งหน่วย) ดังสมการ

$$C = q \frac{dN}{d\psi} = \frac{\epsilon_0}{d}$$

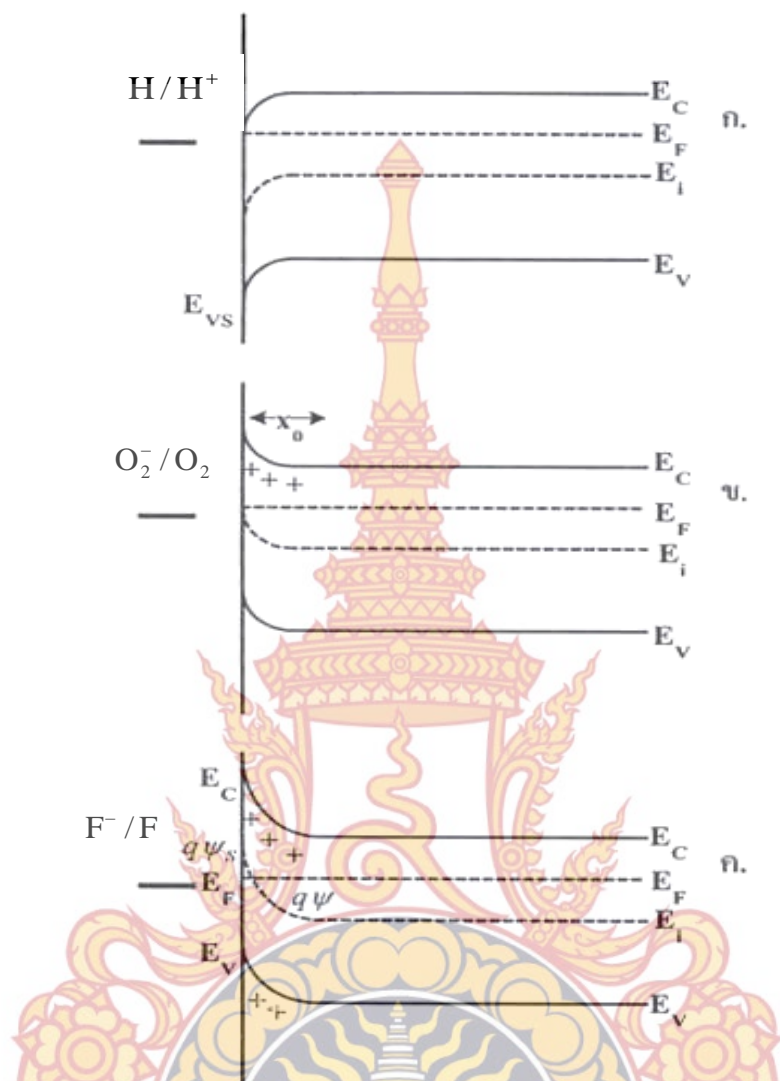
เมื่อ N เป็นความหนาแน่นของประจุที่สถานะผิวต่อพื้นที่ ϵ เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และ ϵ_0 เป็นค่าเพอร์มิติวิตี (Permittivity) ในสุญญากาศ สำหรับชั้นสะสม ค่า d จะมีค่าน้อย ดังนั้นที่สถานะสมมูลค่า N จะมีค่ามากตามสมการ การเคลื่อนย้ายประจุเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำจนกระทั่งเข้าสู่สมมูลที่ระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำ เป็นการอธิบายการเกิดการยึดเหนี่ยวที่สถานะผิว ชั้นสะสมจะเกิดชั้นบนสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อโฮลถูกฉีดเข้าไปในแถบวาเลนซ์ (อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากชั้นวาเลนซ์โดยตัวรับประจุที่แข็งแรง) ชั้นสะสมจะเกิดชั้นระหว่างประจุลบที่สถานะผิวและโฮลที่ฉีดเข้าไปในแถบวาเลนซ์

แบบที่ 2 ถ้าอิเล็กตรอนถูกดึงออกจากชั้นแถบความนำของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยผู้รับประจุที่สถานะผิวจะเกิดเป็นชั้นปลดประจุพาหะ (Depletion layer) หรือ Space-Charge layer ที่ผิวซึ่งจะแสดงในรูป 2.2 (ข) หลังจากนั้นจะเกิด Double layer ระหว่างประจุลบที่สถานะผิวและประจุบวกของอะตอมผู้ให้ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การดึงอิเล็กตรอนจะยังคงดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นสถานะผิวของวัสดุตรวจจับ โดยทั่วไปแล้วประจุนี้มีค่า ๆ หนึ่งในชั้น Double layer อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำประจุจะถูกแบ่งเป็นอะตอมผู้ให้และจะมีจำนวนจำกัด การกำหนดจำนวนประจุจะแสดงถึงความหนาของชั้น Double layer ที่ขยายค่าเข้า

ไปในสารกึ่งตัวนำ ค่า d จะมีค่ามาก เมื่อกรณีของ Depletion layer มีความหนาแน่นของประจุที่สถานะผิวต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วง 0.001 ของ Monolayer ส่วนการเกิดขึ้นปลดปล่อยประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดพี โหล์จะถูกดึงจากแถบวาเลนซ์โดยอะตอมผู้ให้ซึ่งออกมาจาก Double layer ที่อยู่ระหว่างประจุลบของอ็อนผู้รับในเนื้อสารใกล้ ๆ ผิวและประจุบวกที่สถานะผิว

แบบที่สาม จะเรียกว่า Inversion layer ซึ่งจะได้รับการสนใจในการนำมาสร้างก๊าซ เซนเซอร์ชนิดมอสเฟตอยู่น้อย ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะเกิดขึ้น Inversion layer เมื่อมีความต้องการรับประจุอย่างรุนแรง (Oxidizing agent) ที่ผิว ในรูปที่ 2.2 (ค) ตัวที่มีความสามารถ Oxidizing agent สูง เช่น ฟลูออไรท์ (F) ระดับพลังงานที่สถานะผิวจะมีค่าเข้าใกล้กับแถบวาเลนซ์ ซึ่งทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิที่ผิวที่เข้าสู่แถบวาเลนซ์ และถ้ามีมากกว่าแถบความนำจะทำให้ความหนาแน่นของโฮล์เกิดขึ้น ในทางกลับกันอะตอมผู้รับที่สถานะผิวจะมีค่าน้อยในแถบความนำ ซึ่งแสดงว่าจะเกิดการดึงอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ในรูปที่ 2.2 (ค) ที่ผิวจะเกิด “Inverted” ทำให้สารชนิดเอ็นเปลี่ยนเป็นชนิดพี ที่ผิว ในกรณีของมอสเฟต Inverted layer จะถูกการเหนี่ยวนำ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าที่เกท การป้อนสนามไฟฟ้าด้วยค่าที่มากจะทำให้เกิดประจุบวกที่สารชนิดเอ็น ถ้าค่าสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอ บางส่วนของประจุบวกจะกลายเป็นโฮล์ในชั้นวาเลนซ์





รูปที่ 2.2 ลักษณะแบบจำลองแถบพลังงาน Double layer ชนิดต่างๆ

- (ก) ชั้นสะสมเมื่อที่ผิวมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวกมาก อิเล็กตรอนจะถูกดึงดูดเข้าไปในแถบความนำโดยปล่อยให้บริเวณผิวมีประจุบวกและประจุลบที่สารกึ่งตัวนำ
- (ข) ชั้นปลอดประจุพาหะ เมื่ออิเล็กตรอนที่แถบความนำถูกยึดไว้ที่ผิว ซึ่งจะถูกลดเซย์ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ
- (ค) ชั้นกลับ (Inversion layer) เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกยึดไว้มาก ซึ่งแสดงว่ามีการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นแถบความนำและชั้นวาเลนซ์

เป็นที่แน่ชัดว่า ชนิดที่สำคัญที่สุดของ Surface layer ในก๊าซเซนเซอร์ คือ ชนิดชั้นปลอดประจุพาหะ (Depletion layer) ซึ่งจะได้รับการพิจารณานำมาวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์จะใช้สถานะผิวง่าย ๆ เช่น ในขณะที่โมเลกุลของออกซิเจน ซึ่งเป็นตัวรับประจุในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยการกำหนดเงื่อนไขเราจะสมมติว่าที่สถานะผิวมีระดับพลังงานเพียงระดับเดียวและความหนาแน่น

ของสารที่เจอเข้าไปจะขึ้นอยู่กับระยะทาง ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดการดูดซับที่ทำให้สภาพความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนไป โดย ψ แสดงศักดา (เป็นฟังก์ชันกับ x) ที่สัมพันธ์กับพลังงานศักย์ในเนื้อสาร สถานะผิวที่แสดงโดยรูปแบบง่าย ๆคือ ที่ Single layer ถ้ามีการยึดเหนี่ยวที่ชั้นนี้ ที่ว่างจะเกิด Reducing agent เช่น O_2^- แต่ถ้าไม่มีการยึดเหนี่ยวในชั้นนี้ บริเวณที่ว่างจะเกิด Oxidizing agent เช่น O_2

การดูดซับออกซิเจน

แบบจำลองของแถบพลังงานที่ผิวสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ดูดซับ O_2^- ในสภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) นั้น เมื่อเกิดขึ้น Double layer การเลื่อนตำแหน่งของระดับเฟอร์มิที่ผิวไปยังตำแหน่งอื่นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ O_2^-/O_2 เพราะฟังก์ชันการกระจายของพลังงานเฟอร์มิที่สมดุลจะมีค่าไม่ต่างไปจากระดับพลังงานที่สถานะผิว ออกซิเจนที่ถูกดูดซับจะเกิดขึ้นที่ Double layer ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะเดียวกัน Negative layer จะเป็นการดูดซับออกซิเจนและประจุบวกจะเป็นผู้ให้อิเล็กตรอนในเนื้อสาร โดยที่ประจุรวมในชั้นปลอดประจุพาหะจะสมดุลกับประจุที่ดูดซับออกซิเจน จะได้ว่า

$$N_s = N_D x_0$$

N_s คือ ความหนาแน่นของประจุที่ผิวต่อพื้นที่ (V/m^2)

N_D คือ ความหนาแน่นของประจุผู้ให้ (V/m^2)

x_0 คือ ความหนาแน่นของบริเวณเขตปลอดประจุพาหะ (m)

ซึ่งพิจารณาได้โดยใช้สมการ Poisson's equation พิสูจน์ใน 1 มิติ

$$d^2\psi/d^2x^2 = -qN_D/\epsilon_0$$

ψ คือ ศักดาที่เทียบกับเนื้อสารในรูปที่ 2.2 ในกรณีของชั้นปลอดประจุพาหะ กำหนดให้ $\psi = 0$ ที่ตำแหน่ง $x = x_0$ (ในเนื้อสาร) การลดลงของ ψ ที่ตำแหน่ง ψ_s ซึ่งอยู่ที่ผิวจะได้

$$\psi = -(qN_D/2\epsilon_0)(x_0 - x)^2$$

ใช้เงื่อนไขรอยต่อ $\psi = 0$ และ $d\psi/dx = 0$ ที่ $x=x_0$ ดังนั้นที่ผิว ($x = 0$) เราได้

$$\psi_s = -qN_D x_0^2 / 2\epsilon_r \epsilon_0$$

จาก $N_s = N_D x_0$ และ $\psi_s = -qN_D x_0^2 / 2\epsilon_r \epsilon_0$ จะได้ว่า

$$\psi_s = -qN_s^2 / 2\epsilon_0 N_D$$

ให้ค่าแพนซ์คือฟังก์ชันความหนาแน่นของออกซิเจนที่ถูกดูดซับ สูตรที่อยู่ในรูป Schottky equation โดยที่ n_s คือความหนาแน่นประจุพาหะที่ผิวต่อปริมาตร กำหนดโดย Boltzmann factor คือ

$$n_s = N_D \exp(q\psi_s / kT)$$

การเคลือบฟิล์มภายใต้สภาวะสุญญากาศ

ปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคนิคการเคลือบฟิล์มในสภาวะที่เป็นสุญญากาศมาใช้งานกันมากขึ้น เนื่องจากในสภาวะสุญญากาศนี้ จะสามารถควบคุมปริมาณของก๊าซและการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าในสภาวะความดันบรรยากาศ โดยทั่วไปอากาศจะประกอบไปด้วยก๊าซต่างๆมากมาย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของก๊าซในสภาวะความดันบรรยากาศจึงไม่สามารถกำหนดได้ ข้อดีของการเคลือบฟิล์มในสภาวะสุญญากาศคือ สามารถใช้กับสารเคลือบได้หลายประเภท ทำให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติในด้านต่างๆ ดีกว่าการเคลือบในสภาวะบรรยากาศ และการกำหนดตัวแปรในการเคลือบได้แก่ อุณหภูมิชิ้นงาน อัตราการเคลือบ ปริมาณออกซิเจนเป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดสมบัติของฟิล์มที่เคลือบได้ เช่น ส่วนประกอบของฟิล์ม ความเสถียร โครงสร้างผลึกของฟิล์ม ซึ่งสามารถควบคุมตัวแปรได้แน่นอนกว่าการเคลือบในสภาวะความดันบรรยากาศ ในปัจจุบันการเคลือบฟิล์มในสภาวะสุญญากาศมีหลากหลายวิธีด้วยกัน อย่างเช่น ดีซี สปีดเตอริง อาร์เอฟ สปีดเตอริง ไอออนเพลตติ้ง หรือ การระเหยสาร เป็นต้น โดยแต่ละวิธีจะเหมาะกับการนำไปใช้งานที่ต่างกัน ซึ่งงานที่ผ่านการเคลือบจะมีอยู่หลายประเภทอย่างเช่น ในด้านงานเคลือบกระจก (Low Emissivity Coating , Solar Control Coating , AR Coating) ในด้านงานเคลือบแข็งหรืองานเคลือบตกแต่งเพื่อความสวยงาม หรือจะเป็นงานเคลือบประเภท Protective Coating และ Metallic Effect Coating เป็นต้น

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอริง

การสปีดเตอริง หมายถึง กระบวนการที่อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวหน้าของเป้า โดยการชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง ลำของไอออนที่มีพลังงานสูงในกระบวนการสปีดเตอริงสามารถสร้างได้หลายแบบวิธี ในกระบวนการเคลือบจะเกิดการเรืองแสง (Glow Discharge) จากก๊าซเฉื่อยหรือบางที่เป็นก๊าซที่ทำปฏิกิริยา (Reactive) ที่แสดงว่าเกิดการเคลื่อนที่ในการเคลือบฟิล์มสำหรับค่า Sputtering yield หากจากอัตราการเคลือบโดยขึ้นอยู่กับเป้าของสารเคลือบ มวลของไอออนที่มาชน พลังงานของอนุภาคเคลื่อนที่และมุมตกกระทบ ในกระบวนการสปีดเตอริงนี้ อนุภาคที่วิ่งชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปีดเตอริงคือ

1. มีสารเคลือบเป็นเป้า (Target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงบนแผ่นรองรับ

2. มีอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่ยอมรับทั่วไปคือ การเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุชนิดหนึ่งที่ยืดต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้ตามทฤษฎีฟิสิกส์ การชนระหว่าง 2 อนุภาค ที่ให้การส่งถ่ายพลังงาน และโมเมนตัมดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของก๊าซในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Ion Gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือผลิตได้จากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge) เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไป จึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

เมื่อพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบขณะที่ไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุ จะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้

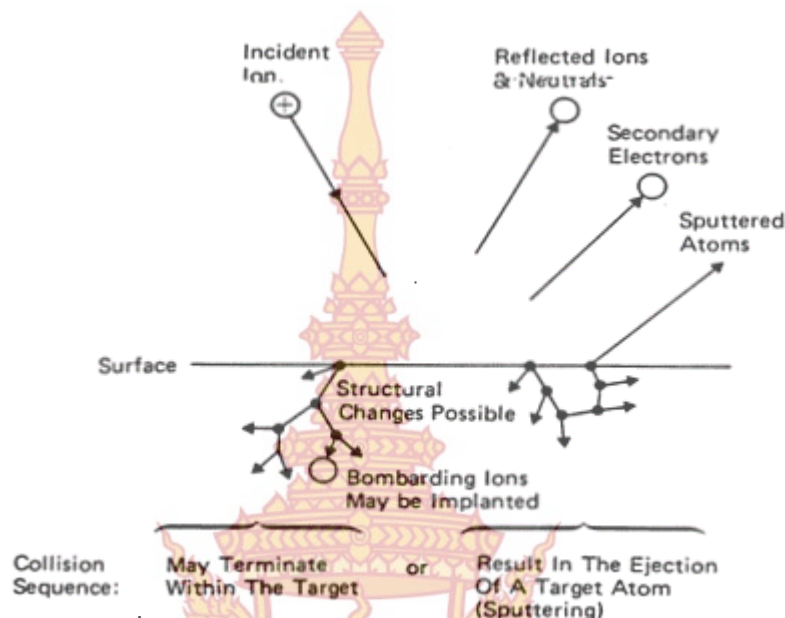
1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected ion and Neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากเป้าสารเคลือบ ถ้าไอออนที่เข้าชนนั้นมีพลังงานสูงพอ

3. การฝังตัวของไอออน (Ion Implanatation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้นอาจฝังตัวลงในเนื้อของเป้าสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน

4. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผิวเป้าสารเคลือบ (Target Material Structural Rearrangement) บางครั้งการชนของไอออนบนผิวเป้าสารเคลือบอาจทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่เป้าสารเคลือบใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice Defect) เราเรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered Surface Layers

5. ในกระบวนการปัดเตอริง การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบ ต่อเนื่อง ระหว่างอะตอมของสารเคลือบปรากฏการณ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและเป้าสารเคลือบ

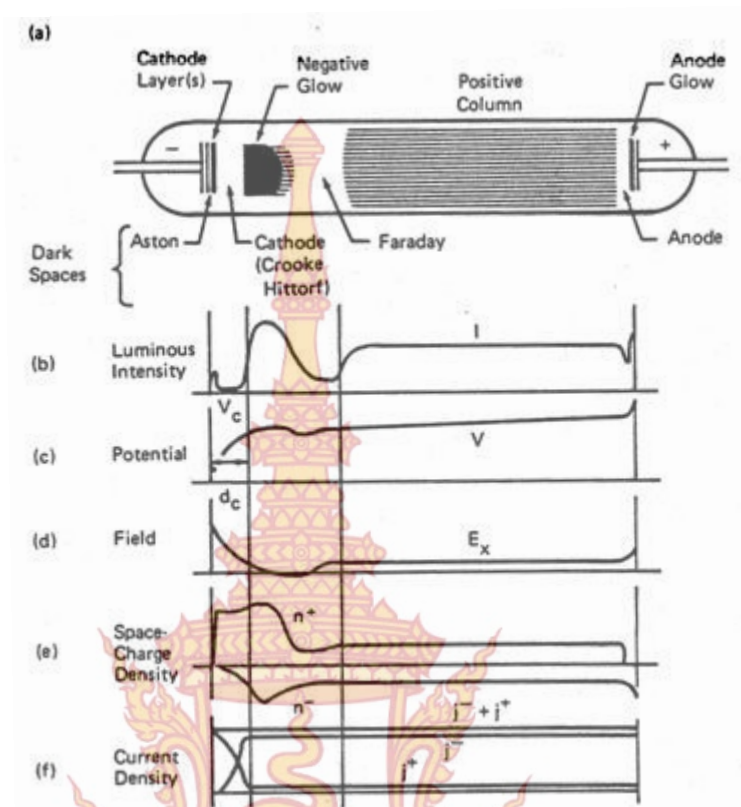
กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge)

ในการผลิตอนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้นวิธีที่นิยมและใช้กันมาก ได้แก่ กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ ซึ่งในกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จจะเกิดขึ้นโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว ภายใต้ความดันบรรยากาศที่ต่ำ ($10^{-3} - 10^{-1}$ Torr) ดังรูปที่ 2.4 เมื่อเริ่มต้นแรงดันไฟฟ้าน้อย กระแสจะเกิดจากอิเล็กตรอนและไอออนบวก ซึ่งได้จากการแตกตัวของก๊าซเนื่องจากการชนกันเอง หรือถูกชนโดยรังสีคอสมิก อิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก (Anode) และไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วลบ (Cathode) ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง แต่กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าต่ำมาก เมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองจนถึงแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) พลังงานของประจุจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจนมีค่าสูงขึ้น สามารถชนกับโมเลกุลของก๊าซที่อยู่ใน 챔เบอร์ ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก เรียกว่าการไอออไนซ์ของก๊าซ โดยไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วคาโทดที่ติดเป้าสารเคลือบไว้ด้านบน ทำให้อิเล็กตรอนชุดที่สองและอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบที่ถูกชนหลุดออกมาจากเป้าสารเคลือบด้วยการถ่ายเทโมเมนตัม โดยอะตอมของเป้าสารเคลือบที่ถูกชนจะพุ่งกระจายภายในระบบสุญญากาศ ซึ่งพร้อมที่จะตกลงบนแผ่นรองรับ ส่วนอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วแอโนดและทำให้เกิดการไอออไนซ์ก๊าซอย่างต่อเนื่อง ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ เพื่อรักษาสภาวะโกลว์ดิสชาร์จต่อไป หลังจากการไอออไนซ์ของ

ก๊าซ ไอออนซึ่งมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าทำให้บริเวณขั้วคาโทดมีประจุบวกเกาะกลุ่มกัน (Positive Space Charge) เกิดขึ้นสูง ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วแอโนดอย่างรวดเร็วทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณขั้วคาโทดมีค่าสูง ศักย์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมบริเวณนี้เกือบทั้งหมด

พ้นจากบริเวณนี้สนามไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลง อิเล็กตรอนหลังการไอออไนซ์หลายๆ ครั้งใกล้คาโทดจะสูญเสียพลังงานไปมากไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองภายใต้สนามไฟฟ้าที่ต่ำนี้ เพื่อให้มีพลังงานสูงเพียงพอที่จะไอออไนซ์ก๊าซครั้งต่อไปได้จึงเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด โดยระหว่างนี้อาจทำเพียงกระตุ้น (Excited) อะตอมของก๊าซเท่านั้น เมื่ออะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะกระตุ้นกลับสู่สภาวะพื้น จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา จึงเกิดเป็นสีต่างๆ ตามชนิดก๊าซเรียกว่า เกิดโกลด์สชาร์จ ส่วนไอออนบวกที่วิ่งเข้าสู่คาโทดจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่คาโทดให้เป็นกลางทางไฟฟ้า และกลับจากสภาวะไอออไนซ์สู่สภาวะพื้น โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอะตอมของก๊าซจากสภาวะไอออนสู่สภาวะพื้นนี้ มีความถี่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้เกิดเป็นบริเวณมืดและบริเวณมืดนี้ จะเกิดขึ้นในช่วงระยะปลอดการชนจากผิวคาโทดโดยเป็นระยะปลอดการชนเฉลี่ย (Mean Free Path) ระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมของก๊าซ โดยระยะของแถบมืดจะเปลี่ยนไปตามความดันบรรยากาศภายใน และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด พบว่าผลคูณระหว่างความดันกับระยะของแถบมืดมีค่าคงที่ เมื่อความดันลดลงแถบมืดจะมีระยะยาวขึ้น ทำให้การผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยลง กระแสลดลง ดังนั้นอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงจะมีปริมาณลดลงด้วย แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้น แถบมืดจะมีค่าลดลง การผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนกรสปีดเตอริงสูงขึ้นตามความดันก๊าซ ขณะที่ความดันก๊าซในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนจะมีค่าลดลง อะตอมของสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบจะถูกส่งผ่านลงเคลือบบนแผ่นรองรับได้ยากขึ้น เนื่องจากการชนกันกับโมเลกุลของก๊าซและเคลื่อนที่ย้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังแฮมเบอร์ ทำให้ค่าyieldของการสปีดเตอริงมีค่าลดลงเมื่อมีความดันสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการเกิดสปีดเตอริงจะขึ้นอยู่กับความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรด

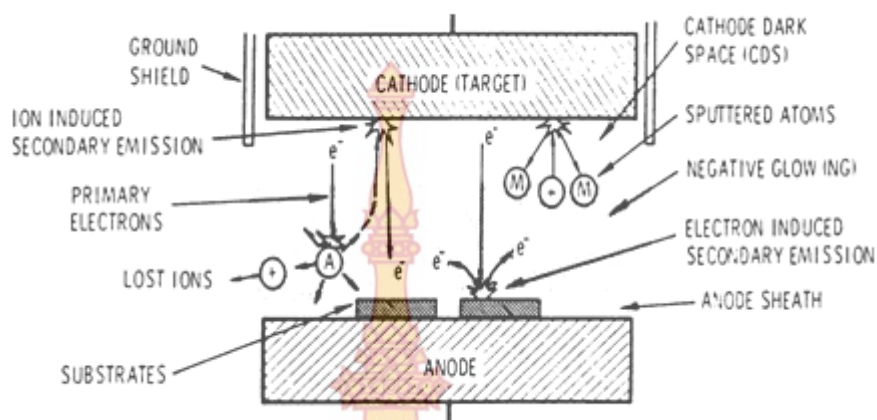
แรงดันไฟฟ้าทั้งหลายในกระบวนกรโกลด์สชาร์จ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด และระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนชุดที่สองกับโมเลกุลของก๊าซ (ระยะปลอดการชนจะแปรผกผันกับความดันก๊าซ) ถ้าความดันก๊าซต่ำเกินไปหรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนให้มากพอก่อนการชนกับแอโนด ถ้าความดันก๊าซสูงเกินไป หรือระยะทาง d มากเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอในการไอออไนซ์ก๊าซ ดังนั้นทั้งสองกรณีนี้จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าทั้งหลายที่มีค่าค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.4 ลักษณะการโค้วดิสซาร์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

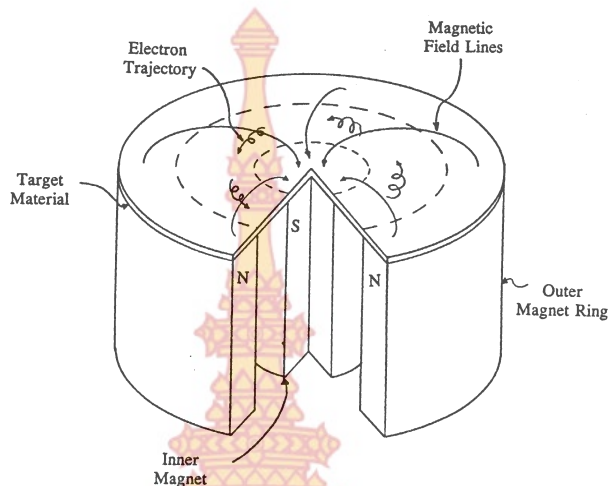
ปัจจุบันการเคลือบฟิล์มด้วยระบบ ดีซี สปัตเตอริงจะเป็นที่นิยมใช้น้อยกว่าระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เพราะการเคลือบฟิล์มด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นจะให้อัตราการสปัตเตอริงมากกว่า สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มโลหะเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้าและฮีตเตอร์ จึงจะอธิบายพอเป็นสังเขปดังนี้



รูปที่ 2.5 ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี สปีดเตอริง

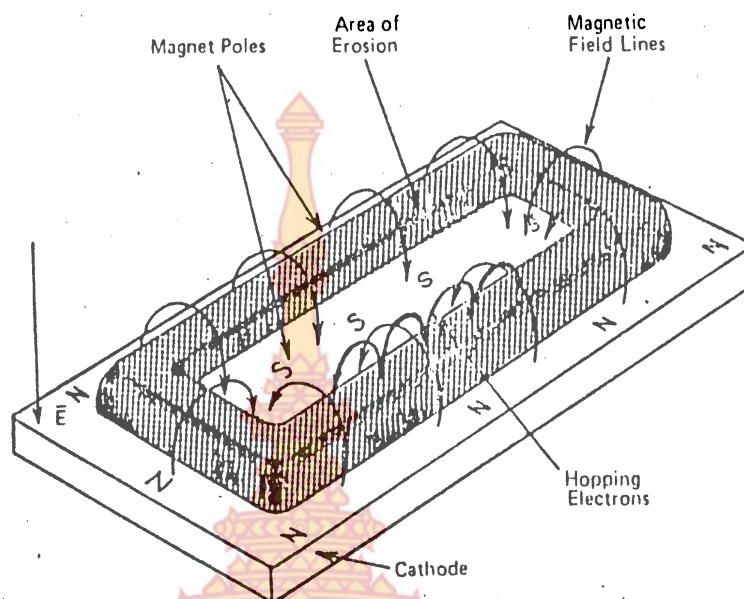
ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเตอริง (D.C. Magnetron Sputtering) ได้พัฒนามาจากระบบ ดีซี สปีดเตอริง เพราะเนื่องจากว่าอัตราการสปีดเตอริงนั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างอีลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปีดเตอริง อาจทำได้ 2 วิธี คือโดยการเพิ่มอีลด์หรือโดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ แต่ในระบบ ดีซี สปีดเตอริง ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดหรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความดันประมาณ 100 มิลลิทอร์ นอกจากนี้ในระบบ ดีซี สปีดเตอริง ทั่วไปอะตอมของก๊าซที่เกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% และเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซแทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย รูปที่ 2.5 เป็นการแสดงระบบ ดีซี สปีดเตอริงอย่างง่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเตอริงจึงถูกพัฒนาขึ้นมา โดยใช้สนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดการไอออไนซ์มากขึ้น ซึ่งระบบ ดีซี สปีดเตอริงจะไม่มี เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาช่วย โดยทำให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางกับผิวหน้าของเป้าสารเคลือบและมีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น อำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งเข้าชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยมากขึ้น เมื่อก๊าซเกิดการไอออไนซ์มากขึ้นจะทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นด้วย จากทฤษฎีพบว่าถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็กโดยมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลม แต่ถ้าอิเล็กตรอนทำมุม θ กับสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่แบบหมุนควง อิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก และจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็ก ระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมของก๊าซ แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศตั้งฉากกัน อำนาจของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้ว ยัง

สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift Motion)



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามตามยาว จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงมากนัก แต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์สซาร์จเปลี่ยนแปลงไป และยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามตามขวาง ทำให้เกิดกระบวนการเพิ่มไอออนเกิดขึ้น โดยที่หลังจากไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบแล้วจะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับสองออกมา อิเล็กตรอนลำดับสองจะเคลื่อนที่ในลักษณะไซคลอยด์ (Cycloid) ทำให้ถูกกักอยู่ในสนามแม่เหล็กใกล้คาโทด และเคลื่อนที่ลอยเลื่อนไปตามแนวผิวหน้าของคาโทด ดังรูปที่ 2.7 ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับอะตอมของก๊าซบริเวณผิวเป้าสารเคลือบได้มากขึ้น จนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมาก อิเล็กตรอนที่ไม่ชนกับอะตอมของก๊าซจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบ และผลิตอิเล็กตรอนลำดับสองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตเป็นปริมาณมาก กรณีใช้สนามแม่เหล็กทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอน สปัตเตอริงทรงกระบอก และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบ ดีซี สปัตเตอริง ที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาเนอร์ แมกนีตรอน สปัตเตอริงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการจัดเป้าสารเคลือบในระบบเคลือบฟิล์มพลาสมา
แมกนีตรอนสปัตเตอริง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 1995 M. Di Giulio และคณะได้ทำการเคลือบฟิล์มบาง SnO_2 ด้วยเทคนิค r.f. reactive sputtering โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบการตรวจวัดก๊าซ CO ระหว่างฟิล์มบาง SnO_2 กับฟิล์มบาง SnO_2 ที่โดบด้วย Pt ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มบางทั้งสองแสดงโครงสร้างผลึกของ SnO_2 ที่พีค (110) (200) และ (101) และจากผลการตรวจวัดก๊าซ CO ที่ 500 ppm พบว่า ฟิล์มบาง SnO_2 มีอุณหภูมิทดสอบที่ 300°C มีค่าการตอบสนองต่อก๊าซ 120% ระยะเวลาการตอบสนอง 100 วินาที ระยะเวลาคืนตัว 200 วินาที และฟิล์มบาง SnO_2 ที่โดบด้วย Pt มีอุณหภูมิทดสอบที่ 170°C มีค่าการตอบสนองต่อก๊าซ 400% ระยะเวลาการตอบสนอง 180 วินาที ระยะเวลาคืนตัว 120 วินาที จากผลการทดสอบจะเห็นว่าการโดบด้วย Pt มีผลให้การใช้อุณหภูมิทดสอบน้อยลง และมีการตอบสนองต่อก๊าซเพิ่มสูงขึ้น

ปี ค.ศ. 1999 Vladimir V. Kissine ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่อสมบัติการตรวจวัดก๊าซของฟิล์มบาง SnO_2 โดยการเตรียมด้วยเทคนิค r.f. sputtering จากผลการศึกษาพบว่าฟิล์มบาง SnO_2 ที่เตรียมในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนมีโครงสร้างผลึกที่มีความเป็นอสัณฐาน และเมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 600°C ฟิล์มแสดงโครงสร้างผลึกของ SnO_2 และฟิล์มบางที่เตรียมในบรรยากาศผสมของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจนพบว่าฟิล์มแสดงโครงสร้าง

ผลึกของ SnO₂ มีขนาดเกรนประมาณ 100 nm มีการตอบสนองต่อก๊าซเอทานอลที่ 1500 ppm ผลจากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของ SnO₂ จากการเตรียมด้วยเทคนิค r.f. sputtering และยังส่งผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซทดสอบ

ปี ค .ศ. 2008 Heyun Zhao ศึกษาผลของ SnO₂ nanorods ต่อการตอบสนองต่อก๊าซเอทานอล พบว่า SnO₂ nanorods มีโครงสร้างผลึกรูทิวลิปของ SnO₂ มีลักษณะเป็นแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 nm ผลการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซเอทานอล 1000 ppm ต่ออุณหภูมิทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และมีค่าการตอบสนองสูงสุดที่ 300°C แต่มีค่าการตอบสนองลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 300°C ซึ่งเป็นผลมาจากไอออนของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิต่างๆ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 4 ขั้นตอนหลัก สำหรับประดิษฐ์และศึกษาหัววัดก๊าซชนิดโมลบดีนัมไมโตรออกไซด์และทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนการประดิษฐ์ Cr-Au Electrode สำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดก๊าซด้วยเทคนิคการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง เริ่มต้นจากการประดิษฐ์มาสก์ (Mask) สำหรับออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้า โดยใช้วิธีการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า จากนั้นนำไปเคลือบฟิล์มสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การสร้างมาสก์ด้วยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า จะเริ่มต้นจากการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้า ก่อนจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการติดฟิล์ม (Dry Film Lamination) และฉายแสงด้วยเครื่อง Mask Aligner จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งโลหะที่ใช้เคลือบนี้เป็นโลหะนิกเกิล จากนั้นเคลือบฟิล์มสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้เงื่อนไขการเคลือบดังนี้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการเคลือบ Cr-Au Electrode

ตัวแปรการเคลือบ	โครเมียม (Cr)	ทอง (Au)
แผ่นรองรับ	Alumina	Alumina coated thin Cr
เป้าสารเคลือบ	Cr (3inch diam, 99.95%)	Au (3inch diam, 99.95%)
ความดันก่อนเคลือบ	$<6.0 \times 10^{-6}$ mbar	$<6.0 \times 10^{-6}$ mbar
อัตราการไหลของอาร์กอน	4.0 sccm	4.0 sccm
ความดันระหว่างเคลือบ	3.3×10^{-3} mbar	3.3×10^{-3} mbar
กระแส	0.3 A	0.2 A
เวลา	3 นาที	5 นาที

2) การสังเคราะห์โมลิบดีนัมไตรออกไซด์และทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้เงื่อนไขการเคลือบดังนี้

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการเคลือบโมลิบดีนัมไตรออกไซด์

ตัวแปรการเคลือบ	โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3)
แผ่นรองรับ	Silicon wafer (100), Electrode
เป้าสารเคลือบ	Mo (3inch diam, 99.95%)
ความดันก่อนเคลือบ	$<6.0 \times 10^{-6}$ mbar
อัตราการไหลของอาร์กอน	4.0 sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	4-16 sccm
ความดันระหว่างเคลือบ	3.0×10^{-3} - 6.0×10^{-3} mbar
กำลังไฟฟ้าในการเคลือบ	200 Watt

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการเคลือบทินออกไซด์

ตัวแปรการเคลือบ	ทินออกไซด์ (SnO_2)
แผ่นรองรับ	Silicon wafer (100), Electrode
เป้าสารเคลือบ	Sn (3inch diam, 99.99%)
ความดันก่อนเคลือบ	$< 6 \times 10^{-6}$ mbar
อัตราการไหลของอาร์กอน	4.0 sccm
อัตราการไหลของออกซิเจน	12-48 sccm
ความดันระหว่างเคลือบ	4.0×10^{-3} - 9.0×10^{-3} mbar
กำลังไฟฟ้าในการเคลือบ	400 Watt

3) การวิเคราะห์สมบัติของโพลีดีนัมไตรออกไซด์และทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนโดยใช้เครื่องมือดังนี้

3.1 เครื่องมือ X-ray diffraction (XRD) สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

3.2 เครื่องมือ Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

4) การทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซทดสอบ



บทที่ 4

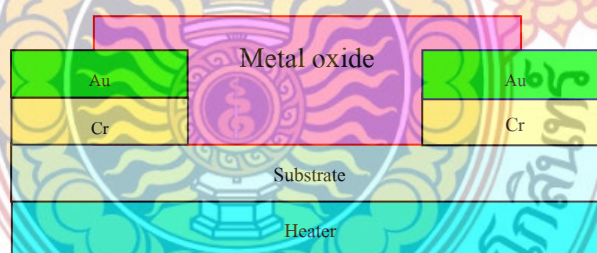
ผลการดำเนินการวิจัย

รายงานผลการวิจัยในบทนี้เริ่มด้วยการประดิษฐ์ Cr-Au Electrode สำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้า การศึกษาห้วงก๊าซชนิดโมลิบดีนัมไตรออกไซด์และตามด้วยการศึกษาห้วงก๊าซชนิดทินออกไซด์โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การประดิษฐ์ Cr-Au Electrode สำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดก๊าซด้วยเทคนิคการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เริ่มต้นจากการประดิษฐ์มาสก์ (Mask) สำหรับออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้า โดยใช้วิธีการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า จากนั้นนำไปเคลือบฟิล์มสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การสร้างมาสก์ด้วยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า จะเริ่มต้นจากการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้า ก่อนจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการติดฟิล์ม (Dry Film Lamination) และฉายแสงด้วยเครื่อง Mask Aligner จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งโลหะที่ใช้เคลือบนี้เป็นโลหะนิกเกิล จากนั้นเคลือบฟิล์มสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง แผนภาพห้วงก๊าซแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่

4.1 แผนภาพไดอะแกรมห้วงก๊าซ

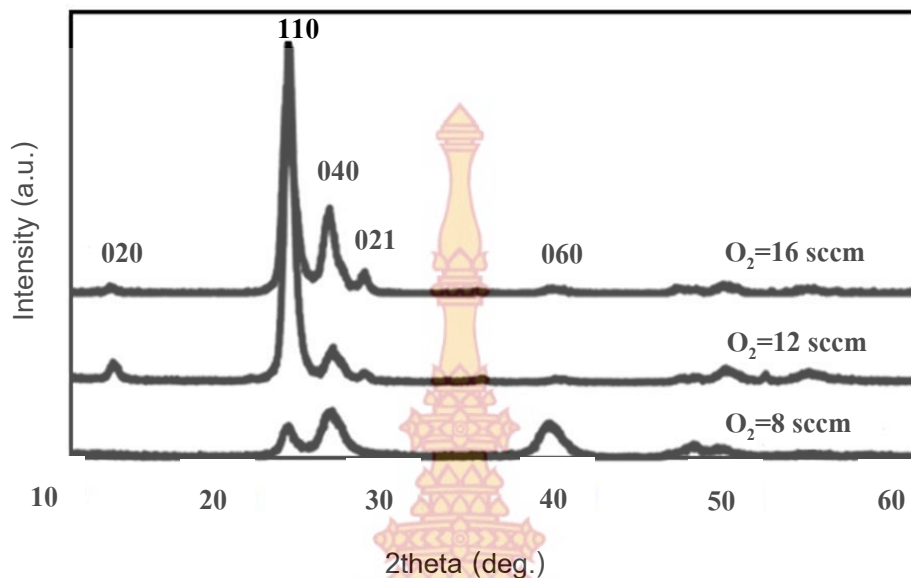
จากเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มโลหะสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้าที่ได้กำหนดดังรายละเอียดตามตารางที่ 3.1 สำหรับการเคลือบฟิล์มโลหะโครเมียม (Cr) ซึ่งเป็น Adhesive layer นั้น ผลที่ได้จากการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบ ทำให้ระบบมีความดันประมาณ 3.3×10^{-3} mbar หลังจากเคลือบเป็นเวลา 3 นาที ผลจากการวัดความหนาประมาณ 380 นาโนเมตร ส่วนการเคลือบฟิล์มโลหะทอง (Au) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าของเซนเซอร์ เมื่อปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในระบบ ระบบจะมีความดัน

ประมาณ 3.3×10^{-3} mbar ภายหลังจากเคลือบฟิล์มเป็นเวลา 5 นาที ความหนาที่วัดได้มีค่าประมาณ 420 นาโนเมตร ผลการวัดความหนาของฟิล์มจะทำให้ทราบความหยาบหรือความขรุขระของฟิล์มที่เคลือบแบบหยาบๆ ได้ ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความสะอาดชิ้นงาน ซึ่งมีฝุ่น คราบสกปรกที่มาเกาะภายหลังจากการเคลือบฟิล์ม หรืออาจเป็นผลมาจากความสม่ำเสมอ (Uniform) ของการสเป็คเตอร์เนื่องมาจากตำแหน่งการวางชิ้นงานเปลี่ยนไป

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซของโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

ในส่วนนี้จะอธิบายการเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริงลงบนวัสดุรองรับ Si wafer (110) และ ขั้วไฟฟ้า Cr-Au (Cr-Au electrode) โดยจะอธิบายถึงผลกระทบของอัตราการไหลของออกซิเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ โดยไม่มีการให้ความร้อนระหว่างทำการเคลือบ สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) และ scanning electron microscope (SEM) และศึกษาสมบัติการตรวจวัดก๊าซเอทานอล

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 sccm, 12 sccm และ 16 sccm แสดงด้วยแผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.2 พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์แสดงโครงสร้างเฟส orthorhombic ของโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ ที่พีค 12.7° 23.3° 25.7° และ 27.3° และพบว่าโครงสร้างของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์มีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้อัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากว่ามีอัตราการเกิดอันตรกิริยาของโมลิบดีนัมกับออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น



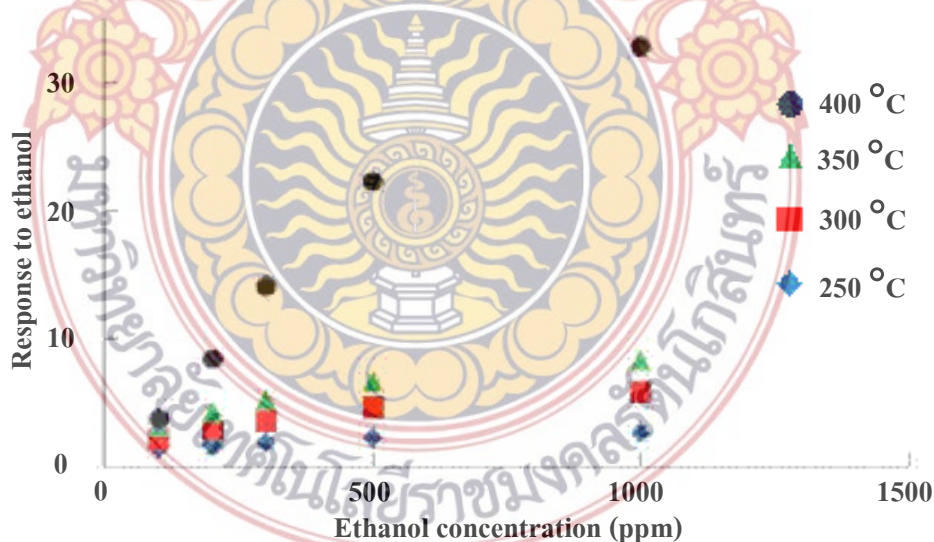
รูปที่ 4.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 sccm, 12 sccm และ 16 sccm

แผนภาพพื้นผิวของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 sccm, 12 sccm และ 16 sccm แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ที่เตรียมโดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm และ 16 sccm มีลักษณะผิวเป็นโครงสร้างผลึกรูปปลายเข็ม มีขนาดแตกต่างกันระหว่าง 0.2-0.5 ไมโครเมตร

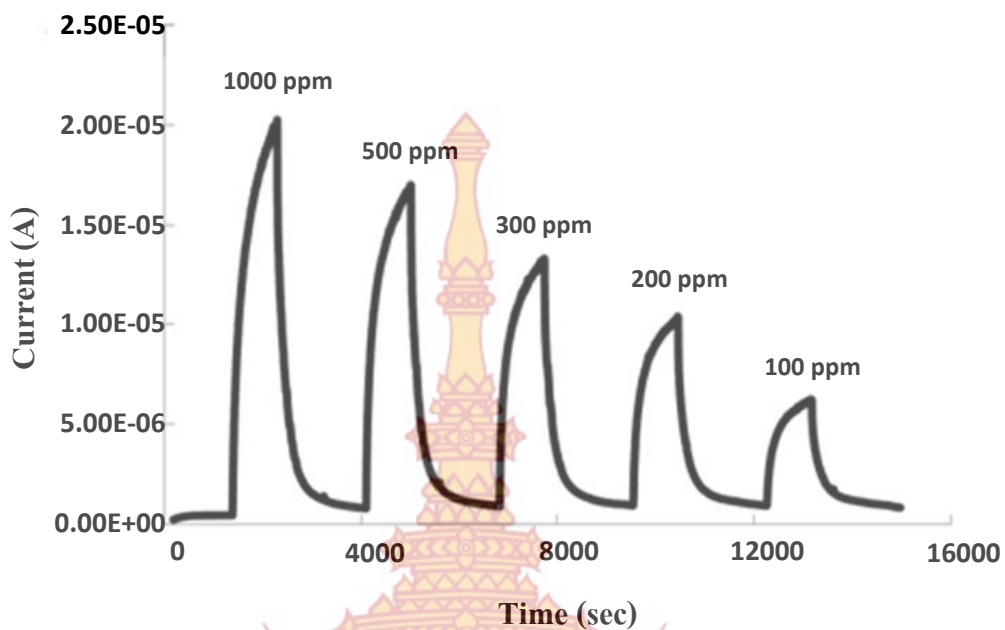


รูปที่ 4.3 แผนภาพพื้นผิวของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 8 sccm, 12 sccm และ 16 sccm

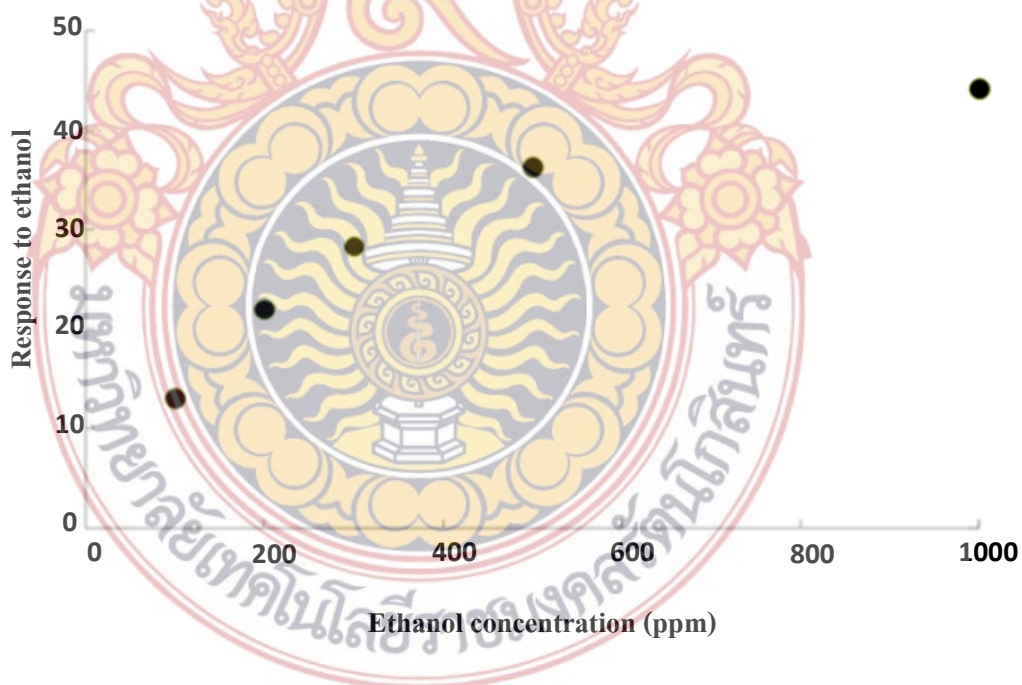
สำหรับผลการตรวจวัดก๊าซเอทานอล (Ethanol) ของฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์จะทำการศึกษาฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของออกซิเจน 16 sccm เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกที่ดีที่สุด โดยจะทำการวัดในเทอมของกระแสและความไวในการตรวจวัด พบว่าที่อุณหภูมิสำหรับการตรวจวัด 250 °C-400 °C ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวฟิล์มกับก๊าซเพิ่มมากขึ้น ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลที่ปริมาณ 100-1000 ppm กับอุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดของฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์ แสดงในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดและปริมาณก๊าซเอทานอลเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์กับการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 400°C พบว่าความต้านทานของฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์ลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะของก๊าซเอทานอล แสดงให้เห็นว่าของฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์มีคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รูปที่ 4.6 แสดงความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณก๊าซเอทานอลที่เพิ่มขึ้น และพบว่ามี การตอบสนองต่อก๊าซเอทานอลสูงสุดที่ 2000 ppm สามารถวัดช่วงเวลาการตอบสนอง (10%-90%) ได้ประมาณ 2.95 นาที่ และช่วงเวลาในการคืนกลับ (100%-10%) ได้ประมาณ 5.88 นาที่ และยังพบว่าฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์สามารถตรวจวัดก๊าซเอทานอลที่ปริมาณต่ำ 100 ppm ที่อุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 400°C



รูปที่ 4.4 ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลกับอุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดของฟิล์มบางโพลีไดเมทิลไดออกไซด์



รูปที่ 4.5 ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์กับสำหรับการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 400°C

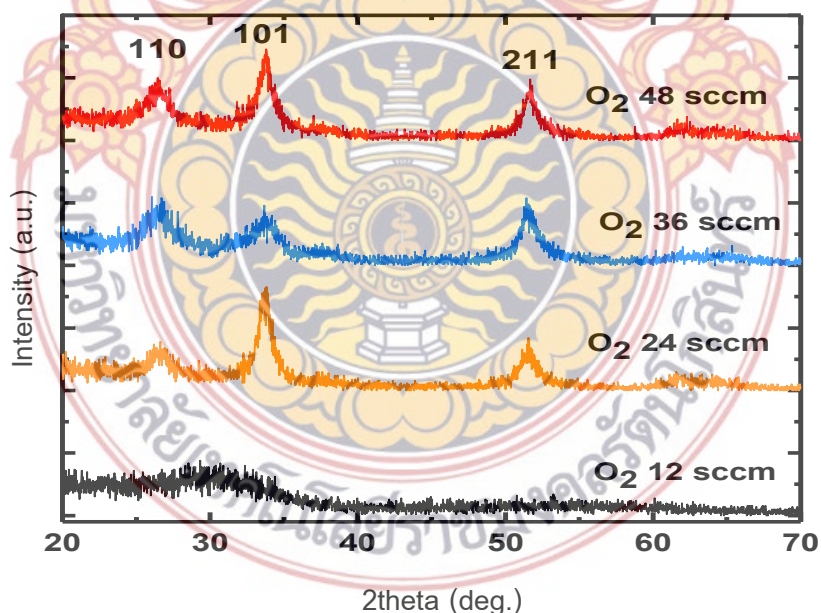


รูปที่ 4.6 ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์กับปริมาณก๊าซเอทานอล

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซของทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

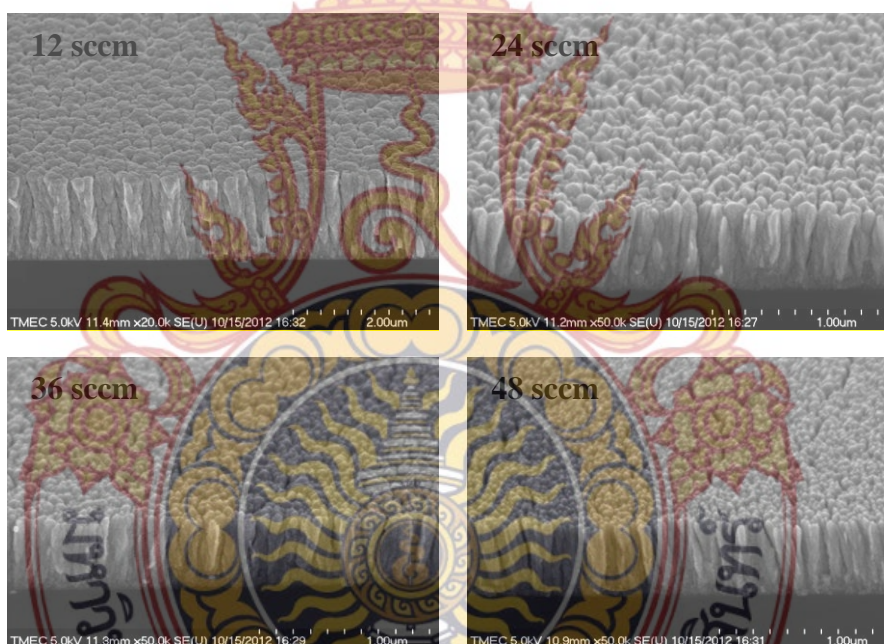
ในส่วนนี้จะอธิบายการเคลือบฟิล์มบางทินออกไซด์ด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริงลงบนวัสดุรองรับ Si wafer (110) และ ขั้วไฟฟ้า Cr-Au (Cr-Au electrode) โดยจะอธิบายถึงผลกระทบของอัตราการไหลของออกซิเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มบางทินออกไซด์ โดยไม่มีการให้ความร้อนระหว่างทำการเคลือบ สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางทินออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) และ scanning electron microscope (SEM) และศึกษาสมบัติการตรวจวัดก๊าซเอทานอล

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm แสดงด้วยแผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.7 พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางทินออกไซด์ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน โดยที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่ำ พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางทินออกไซด์เป็นแบบอสัณฐาน และที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์มบางทินออกไซด์แสดงโครงสร้างผลึกของทินออกไซด์เฟส tetragonal ที่พิกัด 26.72° , 34.03° และ 51.91° แสดงว่าโครงสร้างของฟิล์มบางทินออกไซด์มีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้อัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากว่ามีอัตราการเกิดอันตรกิริยาของทินกับออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.7 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm

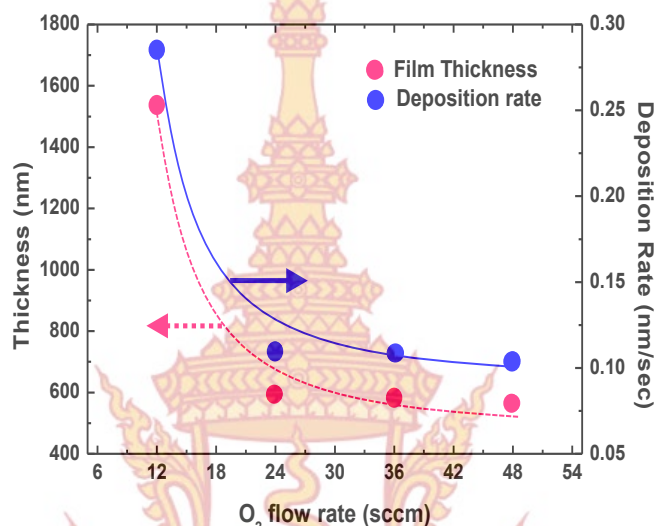
แผนภาพของทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าฟิล์มบางทินออกไซด์ทั้งหมดที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่างๆ แสดงลักษณะโครงสร้างแบบแท่งระดับนาโน อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบแท่งระดับนาโนของทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่ำมีลักษณะแท่งที่ใหญ่ มีความหนาแน่นสูงและมีพื้นผิวที่เรียบกว่าทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแท่งระดับนาโนของทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm มีค่าเท่ากับ 150 nm, 100 nm, 80 nm และ 70 nm ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ความหนาของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm มีค่าเท่ากับ 1537 nm, 595 nm, 585 nm และ 565 nm ตามลำดับ และจากนั้นคำนวณอัตราการเคลือบฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เวลา 90 นาที ได้เท่ากับ 0.28 nm/s, 0.11 nm/s, 0.10 nm/s และ 0.10 nm/s ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แผนภาพแท่งระดับนาโนของทินออกไซด์ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm

รูปที่ 4.9 แสดงความหนาของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งนาโนและอัตราการเคลือบฟิล์มกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน พบว่าความหนาของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งนาโนและอัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 12 sccm เป็น 24 sccm และจะคงที่เมื่ออัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นอีก การลดลงของอัตราการเคลือบจากอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการลดลงของโมเลกุลของก๊าซ

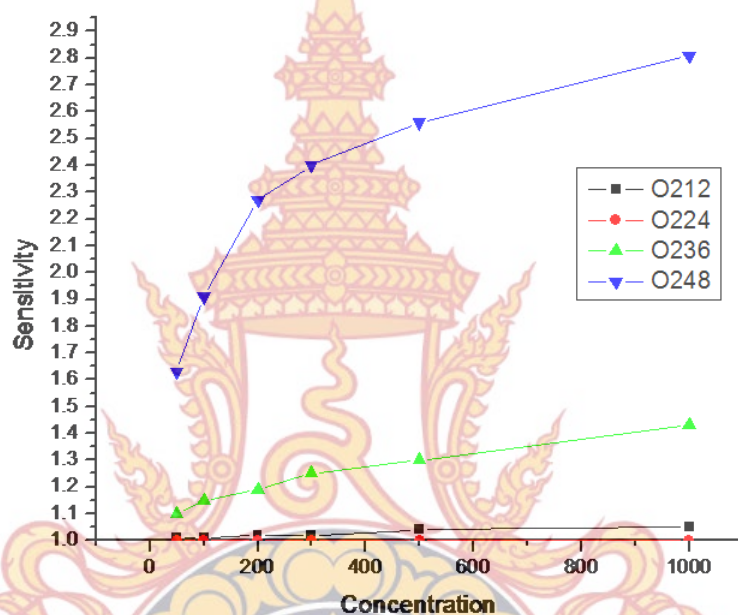
อาร์กอนและพลังงานของไอออนที่ลดลงอันเนื่องมาจากความดันที่เพิ่มขึ้น การลดลงของอัตราการเคลือบอย่างรวดเร็ว อาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนรูปแบบการเคลือบจากการเคลือบแบบโลหะเป็นการเคลือบแบบโลหะออกไซด์ เพราะอันตรกิริยาระหว่างไอออนของออกซิเจนกับโมเลกุลของโลหะทำให้อัตราการเคลือบลดลง



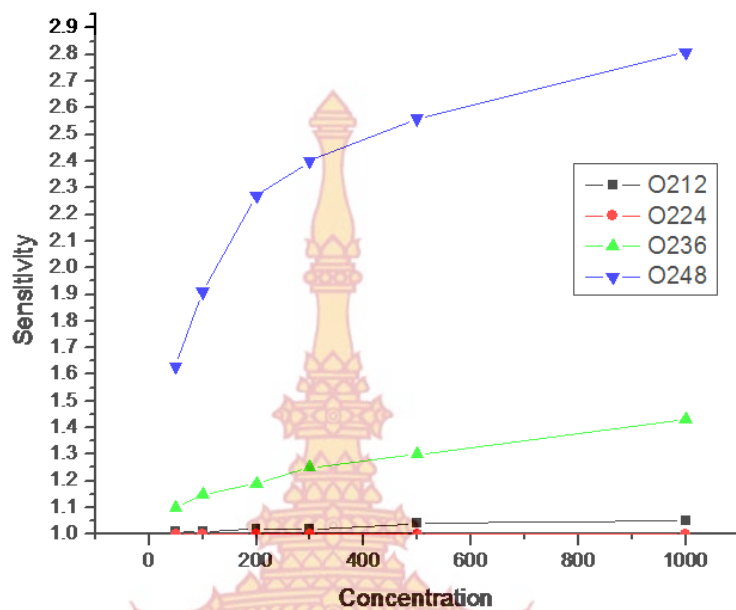
รูปที่ 4.9 ความหนาของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งนาโนและอัตราการเคลือบฟิล์มกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

การศึกษาการตอบสนองต่อก๊าซเอทานอลเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือหัววัดก๊าซมีความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเมื่อมีก๊าซเอทานอลมาดูดซับที่ผิวของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งนาโนจะเห็นได้ว่าฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งนาโนตอบสนองได้ดี จากรูปที่ 4.10 แสดงความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งกับปริมาณก๊าซเอทานอลที่อุณหภูมิ 250°C และรูปที่ 4.11 แสดงความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งกับปริมาณก๊าซเอทานอลที่อุณหภูมิ 300°C พบว่าความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งที่เคลือบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนสูงจะมีค่าความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลสูงกว่าฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งที่เคลือบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่ำ เนื่องจากฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งที่เคลือบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนสูงมีความเป็นโครงสร้างผลึกที่ดี และมีขนาดแท่งระดับนาโนที่เล็กทำให้มีขนาดพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงจึงทำให้เกิดอันตรกิริยาดูดซับที่ผิวของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งได้ดี และยังพบว่าความต้านทานของฟิล์มบางฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะ

ของก๊าซเอทานอล แสดงให้เห็นว่าของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งมีคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และพบว่าความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดและปริมาณก๊าซเอทานอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวฟิล์มกับก๊าซเพิ่มมากขึ้น และพบว่าฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งสามารถตรวจวัดก๊าซเอทานอลที่ปริมาณต่ำ 50 ppm ที่อุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 250°C



รูปที่ 4.10 ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งกับปริมาณก๊าซเอทานอลที่อุณหภูมิ 250°C



รูปที่ 4.11 ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งกับ ปริมาณก๊าซเอทานอลที่อุณหภูมิ 300°C



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์และฟิล์มบางทินออกไซด์โดยการเตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซ

5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซของโมลิบดีนัมไตรออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์แสดงโครงสร้างเฟส orthorhombic ของโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ ที่พีค 12.7° 23.3° 25.7° และ 27.3° และพบว่าโครงสร้างของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์มีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้อัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากว่ามีอัตราการเกิดอันตรกิริยาของโมลิบดีนัมกับออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น และมีลักษณะผิวเป็นโครงสร้างผลึกรูปปลายเข็ม มีขนาดแตกต่างกันระหว่าง 0.2-0.5 ไมโครเมตร

ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดและปริมาณก๊าซเอทานอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวฟิล์มกับก๊าซเพิ่มมากขึ้น และความต้านทานของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะของก๊าซเอทานอล แสดงให้เห็นว่าของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์มีคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และวัดช่วงเวลาการตอบสนอง (10%-90%) ได้ประมาณ 2.95 นาที และช่วงเวลาในการคืนกลับ (100%-10%) ได้ประมาณ 5.88 นาที และฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์สามารถตรวจวัดก๊าซเอทานอลที่ปริมาณต่ำ 100 ppm ที่อุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 400°C

5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการตรวจวัดก๊าซของทินออกไซด์โครงสร้างระดับนาโนด้วยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางทินออกไซด์ขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน โดยที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่ำ พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางทินออกไซด์เป็นแบบออสัญฐาน และที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์มบางทินออกไซด์แสดงโครงสร้างผลึกของทินออกไซด์ เฟส tetragonal ที่พีค 26.72° , 34.03° และ 51.91° แสดงว่าโครงสร้างของฟิล์มบางทินออกไซด์มีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้อัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากว่ามีอัตรา

การเกิดอันตรกิริยาของทินกับออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น และฟิล์มบางทินออกไซด์ทั้งหมดที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่างๆ แสดงลักษณะโครงสร้างแบบแท่งระดับนาโน อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบแท่งระดับนาโนของทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่ำมีลักษณะแท่งที่ใหญ่ มีความหนาแน่นสูงและมีพื้นผิวที่เรียบกว่าทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแท่งระดับนาโนของทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm มีค่าเท่ากับ 150 nm, 100 nm, 80 nm และ 70 nm ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ความหนาของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เตรียมที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm และ 48 sccm มีค่าเท่ากับ 1537 nm, 595 nm, 585 nm และ 565 nm ตามลำดับ และจากนั้นคำนวณอัตราการเคลือบฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เวลา 90 นาที ได้เท่ากับ 0.28 nm/s, 0.11 nm/s, 0.10 nm/s และ 0.10 nm/s ตามลำดับ

ความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งที่เคลือบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนสูงจะมีค่าความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลสูงกว่าฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งที่เคลือบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่ำ เนื่องจากฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งที่เคลือบที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนสูงมีความเป็นโครงสร้างผลึกที่ดี และมีขนาดแท่งระดับนาโนที่เล็กทำให้มีขนาดพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงจึงทำให้เกิดอันตรกิริยาดูดซับที่ผิวของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งได้ดี และยังพบว่าความต้านทานของฟิล์มบางฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะของก๊าซเอทานอล แสดงให้เห็นว่าของฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งมีคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และพบว่าความไวในการตรวจวัดก๊าซเอทานอลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดและปริมาณก๊าซเอทานอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวฟิล์มกับก๊าซเพิ่มมากขึ้น และพบว่าฟิล์มบางทินออกไซด์โครงสร้างแบบแท่งสามารถตรวจวัดก๊าซเอทานอลที่ปริมาณต่ำ 50 ppm ที่อุณหภูมิสำหรับการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 250°C

บรรณานุกรม

- Sberveglieri, G., 1992, **Gas Sensors Principle, Operation and Delvelopment**, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 1-409.
- Winefordner, J.D., 1993, **Physics, Chemistry and Technology of Solid State Gas Sensor Devices**, John Wiley & Sons , New York, pp. 5-125.
- Hussain, O.M., Rao, K.S., 2003, “Characterization of activated reactive evaporated MoO₃ thin films for gas sensor applications”, **Materials Chemistry and Physics**, Vol. 80, pp. 638– 646.
- Sunu, S.S., Prabhu, E., Jayaraman, V., Gnanasekar, K.I., Seshagiri, T.K., Gnanasekaran, T., 2004, “Electrical conductivity and gas sensing properties of MoO₃”, **Sensors and Actuators B**, Vol. 101, pp. 161–174.
- Barazzouk, S., Tandon, R.P., Hotchandani, S., 2006, “MoO₃-based sensor for NO, NO₂ and CH₄ detection”, **Sensors and Actuators B**, Vol. 119, pp. 691–694.
- Ramana , C.V., Julien, C.M., 2006, “Chemical and electrochemical properties of molybdenum oxide thin films prepared by reactive pulsed-laser assisted deposition”, **Chemical Physics Letters**, Vol. 428, pp. 114–118.
- Ganguly, A., George, R., 2007, “Synthesis, characterization and gas sensitivity of MoO₃ nanoparticles”, **Bulletin of Material Science**, Vol. 30, No. 2, pp. 183–185.
- Ozturk, S., Kilinc, N., Tasaltin, N., Ozturk, Z.Z., 2011, “Acomparative study on the NO₂ gas sensing properties of ZnO thin films, nanowires And nanorods”, **Thin Solid Films**.
- Xiaoyan,Z., Jianpeng, L., Ming, M., Qingzhong, X., 2011, “ Effect of ethanol gas on the electrical properties of ZnO nanorods”, **Physica E**, Vol. 43, pp. 1056-1060.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Shouli, B., Xin, L., Dianqing, L., Song, C., Ruixian, L., Aifan, C., 2011, "Synthesis of ZnO nanorod and its application in NO₂ sensors", **Sensors and Actuators B**, Vol. 153, pp. 110-116.
- Bong, K.M., Soon, D.C., 2004, "SnO₂ thin film gas sensor fabricated by ion beam deposition", **Sensors and Actuators B**, Vol. 98, pp.239-246.
- Yong, S.C., 2001, "New gas sensing mechanism for SnO₂ thin films gas sensors fabricated by using ion beam sputtering", **Sensors and Actuators B**, Vol. 77, pp.200-208.
- Karthigeyan, A., Gupta, R.P., Burgmair, M., Sharma, S.K., Eisele, I., 2002, "Influence of oxidation temperature, film thickness and substrate on NO₂ sensing of SnO₂ ultra thin films", **Sensors and Actuators B**, Vol. 87, pp.321-330.
- Toshinari, Y., Hitosi, O., Cheng, J.J., Atsushi, N., Toshio, K., Noriyuki, N., 2005, "Effect of density and thickness on H₂-gas sensing property of sputtered SnO₂ films", **Vacuum**, Vol. 77, pp.237-243.
- Forleo, A., Francioso, L., Capone, S., Casino, F., Siciliano, P., Tan, O.K., Hui, H., 2011, "Fabrication at wafer level of miniaturized gas sensors based on SnO₂ nanorods deposited by PECVD and gas sensing characteristics", **Sensors and Actuators B**, Vol.154, pp.283-287.
- Aapo, V., Sergey, N., Antti, H., Pekka, K., 2011, "Transient characterization techniques for resistive metal-oxide gas sensors", **Sensors and Actuators B**, Vol.159, pp.12- 26.
- Shaalana, N.M., Yamazakia, T., Kikuta, T., 2011, "Synthesis of metal and metal oxide nanostructures and their application for gas sensing", **Materials Chemistry and Physics**, Vol.127, pp.143-150.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อผู้วิจัย	ดร.ไชยยันต์ โอรส
วัน เดือน ปีเกิด	14 มิถุนายน 2523
ประวัติการศึกษา	
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย 2546
ปริญญาโท	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 2549
ปริญญาเอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 2554
การเผยแพร่ผลงานวิชาการ	<ol style="list-style-type: none">1. C. Oros, A. Wisitsoraat, P. Limsuwan¹, M. Horpathum, V. Patthanasettakul and A. Tuantranont, 2008, "Gas-sensing Property Evaluation of Reactively Sputtered Chromium Oxide Thin Films", <i>Advanced Materials Research</i>, Vols.55-57, pp. 285-288.2. C. Oros, A. Wisitsoraat, D. Phokharatkul, P. Limsuwan, and A. Tuantranont, 2011 "Carbon Nanotubes Dispersed Molybdenum Oxide Nanocomposite Thin Film Gas Sensor Prepared by Electron Beam Evaporation", <i>Sensor Letters</i>, Vol. 9, pp. 348-352.3. C. Oros, A. Wisitsoraat, D. Phokharatkul, P. Limsuwan and A. Tuantranont, 2011, "Fabrication and Gas-Sensing Characterization of Molybdenum Oxide Nanostructure by Reactive RF Sputtering", <i>Advanced Materials Research</i>, Vol. 213, pp. 98-102.4. C. Oros, A. Wisitsoraat, M. Horprathum, 2013 "Fabrication and Characterization of Tin Oxide nanorods prepared by glancing angle DC reactive magnetron sputtering", <i>Advanced Materials Research</i>, Vol. 770, pp. 189-192.