



ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์

2.1 หัววัดแก๊สชนิดสารกึ่งตัวนำ (semiconductor gas sensor)

หัววัดแก๊สชนิดสารกึ่งตัวนำเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดแก๊สซึ่งมีหลักการทำงานด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าไปตามชนิดและปริมาณของแก๊สที่ดูดซับ (adsorb) อยู่บริเวณพื้นผิว โดยได้มีการนำหัววัดแก๊สชนิดสารกึ่งตัวนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดยไซยามะและคณะ (Seiyama *et. al.*) ในปี 1962 ซึ่งได้ประดิษฐ์หัววัดแก๊สจากสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ออกมาในรูปของฟิล์มบางเพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณ (detector) สำหรับแก๊สโครมาโตกราฟี และในปีเดียวกัน ทากุชิ (Taguchi) ได้ประดิษฐ์หัววัดแก๊สที่ทำจากทินออกไซด์ (SnO_2) ขึ้น [3] ต่อมาในปี ค.ศ. 1968 ได้มีการประดิษฐ์หัววัดแก๊สจากทินออกไซด์แบบเซรามิกในเชิงการค้าขึ้นเป็นครั้งแรกโดย บริษัท ฟิกาโร เอ็นจิเนียริง (Figaro Engineering Inc.) [4]

หัววัดแก๊สสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับว่าใช้แก๊สอะไรในการจำแนก เช่น อาจแบ่งตามลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนแปลง แบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์ แบ่งตามลักษณะโครงสร้างของหัววัด หรือ แบ่งตามลักษณะการทำงาน [5] โดยหัววัดแก๊สแบบสารกึ่งตัวนำเป็นหัววัดแก๊สที่ถูกจำแนกโดยชนิดของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์ และลักษณะการทำงานซึ่งอาศัยประโยชน์จากลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สเข้ามาดูดซับที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำสารกึ่งตัวนำที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดเปลี่ยนแปลง

การวิจัยและพัฒนาหัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ ได้มีการดำเนินการต่อเนื่องมานับแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เหตุผลที่ทำให้หัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำได้รับความนิยมศึกษาในวงกว้างเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ อาทิเช่น [6]

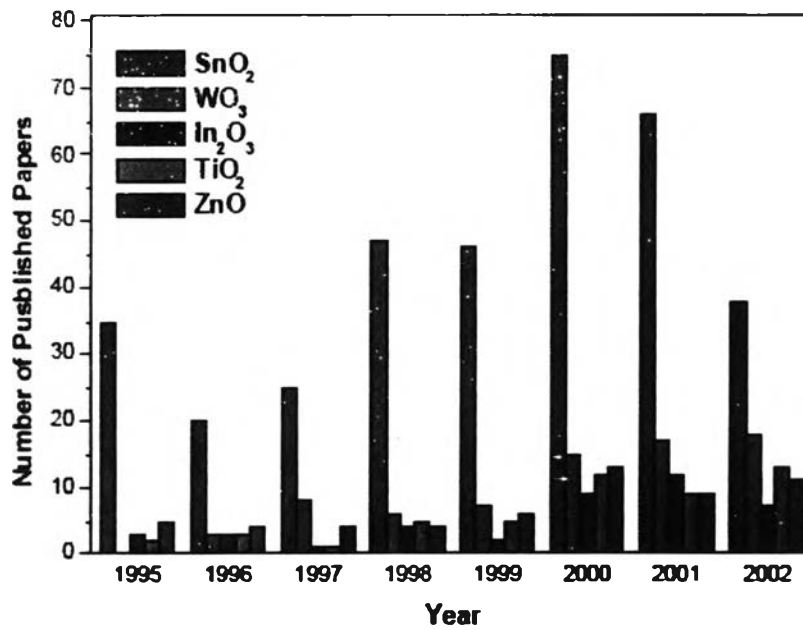
- ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ มีขนาดเล็ก สะดวกสำหรับการพกพา (เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวิเคราะห์)
- มีความไวในการตอบสนอง (response) และการคืนสภาพ (recovery) ต่อทั้ง แก๊สออกซิไดส์ (oxidizing gas) และแก๊สรีดิวส์ (reducing gas)
- มีโครงสร้างที่แข็งแรงเมื่อเปรียบเทียบกับหัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากสารอินทรีย์
- มีอายุการใช้งานยาวนาน

นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติจากความเข้มข้นของแก๊สเป็นปริมาณทางไฟฟ้าทำให้ง่ายต่อการแปลงผลสำหรับการตรวจวัดชนิดและปริมาณของแก๊สชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงทำให้มี

การประดิษฐ์หัววัดแก๊สสำหรับตรวจวัดแก๊สชนิดต่างๆ ปรากฏออกมาเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างของหัววัดแก๊สที่ได้รับการประดิษฐ์และพัฒนาขึ้น และการเปรียบเทียบปริมาณงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์หัววัดแก๊สแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 และ รูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการประดิษฐ์หัววัดแก๊สสำหรับแก๊สชนิดต่างๆ

สารกึ่งตัวนำ	ลักษณะ	แก๊สที่ตรวจวัด	สารที่ใช้เจือ	อ้างอิง
SnO ₂	ฟิล์มบาง	LPG	-	Abe และคณะ(1979)[7]
SnO ₂	เซรามิก	NO ₂	-	Sotomura และคณะ(1980)[8] Heiland(1982) [9]
ZnO	เซรามิก	C ₂ H ₅ OH	Pt,Au,Ag,Pb	LalauzelและPijolat(1984) [10]
SnO ₂	เซรามิก	C ₆ H ₆	-	Kanefusa และคณะ(1985) [11]
SnO ₂	เซรามิก	C ₂ H ₅ OH	-	Mandeniusและคณะ (1987) [12]
SnO ₂	เซรามิก	NO _x	-	Satake และ คณะ(1989) [13]
ZnO-SnO ₂	ฟิล์มบาง	C ₂ H ₅ OH	-	Tianshu, Yesheng และ Mingrong(1992) [14]
SnO ₂	เซรามิก	C ₂ H ₅ OH	WO ₃	Dong Hyun Yun,Chul Han Kwon,Hyun Woo Shin,Seung- Ryeol Kim,และKyuchung Lee(1996) [15]
SnO ₂	ฟิล์มหนา	CH ₃ CHO	WO ₃	Jinkawa,Sakai,Tamaki,Miura และYamazoe(2000) [16]
WO ₃	ฟิล์มหนา	H ₂ S	-	J.L.Solis,S.Saukko,L.Kish ,C.G.Granqvist และ V.Lantto(2001) [17]
WO ₃	ฟิล์มหนา	NO ₂	NiO	W.Nohและคณะ(2002) [18]
xTiO ₂ -(1-x) WO ₃	ฟิล์มหนา	C ₂ H ₅ OH	-	C.V.Gopal Reddyและคณะ (2003) [19]
ZnO	ฟิล์มบาง	LPG	Pd	Mitra และMaiti (2004) [20]



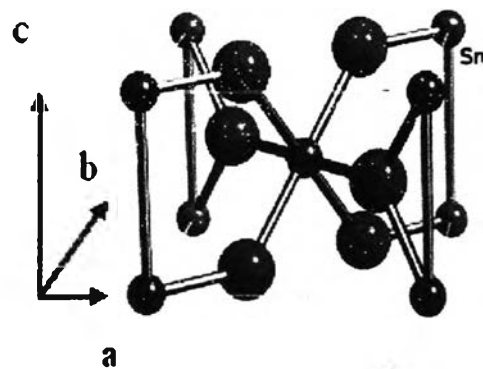
รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์หัววัดแก๊ส [6]

จากตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าในบรรดาหัววัดแก๊สที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น หัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์จาก SnO₂ ได้รับความนิยมนำไปใช้ผลิตเป็นหัววัดแก๊สมากที่สุด เนื่องจากมีความไวในการวัด การตรวจจับสัญญาณที่ดี ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ทำได้ง่าย มีการตอบสนองเร็ว [21] แต่อย่างไรก็ตามในช่วงระยะเวลาหลังจะพบว่าปริมาณงานวิจัยเกี่ยวกับหัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากทังสเตนออกไซด์ (WO₃) จะมีปริมาณมากขึ้นตามลำดับซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่าทังสเตนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติที่ดีและเป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมในการใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊ส โดยพื้นฐานหัววัดแก๊สที่ผลิตขึ้นยังมีข้อจำกัดด้านการตอบสนองต่อแก๊สอย่างจำเพาะ (selectivity) ทำให้ไม่สามารถแยกแยะชนิดของแก๊สได้โดยง่าย นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของการวัด (stability) กล่าวคือมักมีความไม่คงที่ในการวัด ดังนั้นในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการให้ความสนใจ ในการการวิจัยและพัฒนาหัววัดแก๊สแบบสารกึ่งตัวนำเพื่อปรับปรุงสมบัติและเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานให้หลากหลายขึ้น [6,21]

2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของทังสเตนออกไซด์และทินออกไซด์

2.2.1 โครงสร้างผลึกของทินออกไซด์

ทินออกไซด์เป็นวัสดุที่มีเสถียรภาพทางเคมีและทางกลสูง โดยทินออกไซด์จะเสถียรตัวอยู่ในเฟสของรูไทล์ (rutile) ซึ่งจะมีการจัดเรียงโครงสร้างผลึกแบบเตตระกอนนอล โดยในหนึ่งยูนิตเซลล์จะประกอบไปด้วย ทินสองอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



$$a=b=4.737 \text{ \AA}$$

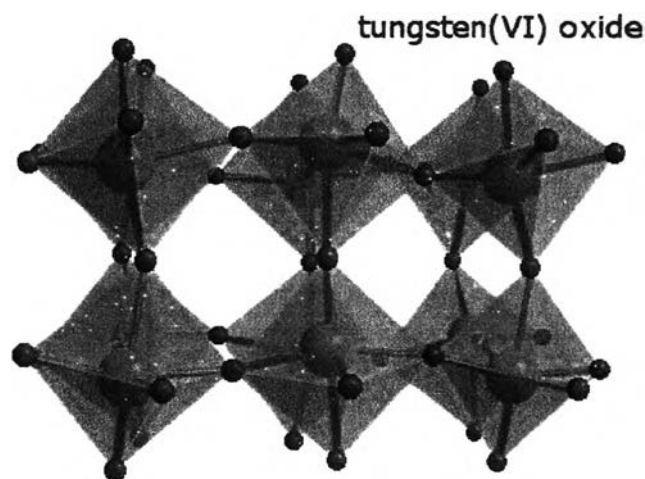
$$c=3.186 \text{ \AA}$$

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของทินออกไซด์ [22]

ทินออกไซด์มีความร้อนของการก่อเกิด (heat of formation, ΔH) เท่ากับ $1.9 \times 10^3 \text{ Jmol}^{-1}$ มีค่าความจุความร้อน (heat capacity) เท่ากับ $52.59 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ มีค่าความหนาแน่น (density) ที่อุณหภูมิ 300K เท่ากับ 6.95 g cm^{-3} มีจุดหลอมเหลว (melting point) เท่ากับ $1,630^\circ\text{C}^{23}$ และที่อุณหภูมิห้องทินออกไซด์จะมีความเข้มข้นของพาหะ (carrier concentrations) อยู่ในช่วง 3.3×10^{17} - $4.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

2.2.2 โครงสร้างผลึกของทังสเตนออกไซด์

ทังสเตนออกไซด์ มีโครงสร้างแบบ ลูกบาศก์เพอโรฟสไคต์ (cubic perovskite) ซึ่งจะคล้ายกับว่าโครงสร้างจะเกิดจากการใช้มุมร่วมกันของ WO_6 ออกตะฮีดรอน (octahedron) โดยออกซิเจนหนึ่งอะตอมจะอยู่ที่ตรงกลางหรือที่มุมของแต่ละ ออกตะฮีดรอน



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของทังสเตนออกไซด์ [22]

ทั้งสเดนออกไซด์เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกหลายแบบโดยโครงสร้างผลึกแต่ละแบบจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของทั้งสเดนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ[6]

เฟส	โครงสร้างผลึก	อุณหภูมิ($^{\circ}$ K)
ϵ - WO_3	โมโนคลินิก	0-230
δ - WO_3	ไตรคลินิก	230-290
γ - WO_3	โมโนคลินิก	290-600
β - WO_3	ออร์โธโรมบิก	600-1170
α - WO_3	เตตระกอนอล	1010-1170

ทั้งสเดนออกไซด์จะมีโครงสร้างแบบไตรคลินิกและโมโนคลินิกที่อุณหภูมิห้อง และจะมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1700° K ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของทั้งสเดนออกไซด์จะลดลงจากประมาณ 2.0 ถึง 0.2 Ohm-cm เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 293 ถึง 1123° K [6]

2.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน WO_3 - SnO_2

โครงสร้างทางจุลภาค เทคนิคการสังเคราะห์ และ กระบวนการให้ความร้อน มีผลโดยตรงต่อค่าความไวและค่าความจำเพาะของหัววัดแก๊ส ดังนั้นลำดับขั้นตอนในการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์หัววัดแก๊สจึงมีความสำคัญมากในการประดิษฐ์หัววัดแก๊ส

สมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงได้จากผลของการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้าง เมื่อเกรนมีขนาดเล็กลง จะส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของรอยต่อระหว่างเกรนหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊สพื้นที่ผิวจำเพาะจะมีความสำคัญมาก เนื่องจากเมื่อวัสดุมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการตรวจวัดแก๊สมีค่ามาก ซึ่งจะส่งผลให้หัววัดแก๊สมีค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สสูง ดังนั้นการสังเคราะห์วัสดุให้มีขนาดเกรนอยู่ในระดับนาโนเมตรจึงมีความสำคัญสำหรับการประดิษฐ์หัววัดแก๊สเนื่องจากเกรนจะมีขนาดเทียบเท่าแลตทิซของผลึก

เทคนิคการตกตะกอน (chemical precipitation) เป็นเทคนิคที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์วัสดุให้มีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดโมเลกุลของสสาร

โดยการตกตะกอนจะทำให้ห้องค์ประกอบทางเคมีผสมเข้ากันเป็นอย่างดีและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดย ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค จะสามารถควบคุมได้ด้วยปัจจัยต่างๆที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา อาทิเช่น ความเข้มข้น อุณหภูมิและค่า pH ของสารละลาย

โดยทั่วไปขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีในการตกตะกอนจะประกอบด้วยสารละลายเกลือของสารที่ต้องการตกตะกอน โดยสารละลายจะเกิดการอิมิตัวและแยกชั้นเกิดเป็นนิวคลีโอที่เสถียร แบบเอกพันธ์ (homogeneous nucleation) หรือแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous nucleation) โดยหลังจากการเกิดนิวคลีโอ จะสามารถทำให้นิวคลีโอเกิดการโตขึ้นได้โดยวิธีการแพร่ (diffusion)

การควบคุมการแพร่ (diffuse control) เกรเดียนต์ของความเข้มข้น (concentration gradient) และอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดอัตราการโตของนิวคลีโอ ดังนั้นเพื่อให้ได้อนุภาคแบบไม่กระจายตัว (monodisperse particles) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะต้องควบคุมไม่ให้เกิดการเกาะตัวกันของอนุภาคและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วงแคบ ดังนั้นทุกนิวคลีโอจะต้องเกิดขึ้นด้วยเวลาที่ใกล้เคียงกัน

ลามอร์และไดเนการ์ (La Mer and Dinegar) ได้รายงานเป็นครั้งแรกเกี่ยวกับกลไกการสังเคราะห์ โครงสร้างผลึกระดับนาโนแบบไม่กระจายตัว (monodisperse nanocrystal) โดยพบว่าการทำให้เกิดอนุภาคคอลลอยด์แบบไม่กระจายตัวจะต้องทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องชั่วคราวในการเกิดนิวเคลียสโดยการควบคุมการโตของนิวคลีโออย่างช้าๆแล้วทำให้เกิดการก่อตัวเป็นนิวเคลียสอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาอันสั้น (short nucleation burst) [24] สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์วัสดุโดยวิธีการตกตะกอนจะมีดังต่อไปนี้คือ [25]

- a) อุณหภูมิของสารละลาย
- b) ความเข้มข้นของปฏิกิริยา
- c) ลำดับของการผสม
- d) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา
- e) ผลของแอนไอออน
- f) ค่า pH
- g) ตัวทำละลาย
- h) อัตราของการผสม
- i) บรรยากาศ
- j) การทำความสะอาดภาชนะ

2.4 การปรับปรุงคุณสมบัติของหัววัดแก๊ส

ในปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาหัววัดแก๊สเพื่อช่วยแก้ปัญหาค่าความไวต่ำ การขาดความจำเพาะและความคลาดเคลื่อนในการวัด ได้มีแนวคิดในการพัฒนาออกเป็น 2 แบบคือ แบบแรกเป็นการปรับปรุงสมบัติเพื่อให้มีความจำเพาะต่อแก๊สที่ต้องการวัด และความคงที่ในการวัดเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมขนาดของเกรน ซึ่งยามาโซเอ (Yamazoe, 1983) [26] และ ทากาฮาตะ (Takabata, 1988) [27] ได้กล่าวไว้ว่าค่าความจำเพาะของหัววัดแก๊สสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการเจือสารบางชนิดและการควบคุมการให้ความร้อนแก่วัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊ส ส่วนการพัฒนาหัววัดแก๊สแบบที่สองเป็นการพัฒนาหัววัดแบบแถวลำดับ (Sensor array) โดยจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่มีความจำเพาะ ความไว และความเสถียร นำมาต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้า โดยอาศัยพื้นฐานทางไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อให้สัญญาณที่วัดได้มีความละเอียดตามแบบที่กำหนด

นอกจากนี้การเลือกอุณหภูมิการใช้งานที่เหมาะสมจะเป็นการทำให้ค่าความไวมีค่าสูงสุดในการตอบสนองต่อแก๊สเป้าหมาย [9] การเปลี่ยนแปลงแบบของหัววัดเช่น ขั้วไฟฟ้า ความหนาของชั้นตรวจวัด ขนาดและรูปร่างของหัววัดจะเป็นการทำให้ค่าความจำเพาะมีค่าสูงสุดในการตรวจวัดแก๊สเป้าหมาย [28] การเลือกใช้ตัวกรองทางกายภาพ [29,30] หรือทางเคมี [30] ที่เหมาะสมเคลือบไว้เหนือชั้นตรวจวัดจะทำให้หัววัดมีความจำเพาะต่อแก๊สเป้าหมายมากขึ้น

อิวานอฟและคณะ (Ivanov *et. Al.*) ได้ทำการศึกษาผลของสารเร่งการยึดติด (adhesion promoters) ในหัววัดแก๊สแบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทินออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ โดยหมึกที่ใช้พิมพ์ขึ้นรูปหัววัดจะถูกเตรียมโดยการผสมทินออกไซด์หรือทังสเตนออกไซด์กับสารตัวพา (vehicle) ที่ละลายในเทอร์พีนอล (terpineol) แล้วเติมสารเร่งการยึดติด (Bi_2O_3 และ $\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{Cu}_2\text{O}$) เพื่อช่วยการยึดติดระหว่างฟิล์มกับแผ่นรองให้ดีขึ้น หลังจากนั้นนำหมึกพิมพ์ที่ได้ไปพิมพ์ขึ้นรูปและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 10 นาที พบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีความพรุนตัวสูงและมีการยึดติดที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าสารที่ใช้เจือลงไปในการสร้างของหัววัดยังช่วยในการปรับปรุงค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊ส โดยค่าความไวในการตอบสนองที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆ จะเหมาะสมกับการตรวจวัดแก๊สต่างชนิดกัน โดยพบว่าหัววัดที่ประดิษฐ์จากทังสเตนออกไซด์ที่เติมด้วยสารบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) และคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu_2O) จะมีค่าความไวสูงในการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิการใช้งานที่ 250°C และหัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากทังสเตนออกไซด์ที่เติมด้วยสารบิสมัทออกไซด์อย่างเดียวจะมีค่าความไวสูงในการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการใช้งานที่ 250°C [31]

บิตเทนคอร์ท และคณะ (Bittencourt *et. Al.*) ได้ทำการศึกษาผลของวิธีการเจืออะตอมของ Pt ลงไปในโครงสร้างของหัววัดแก๊สเอทานอลแบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทินออกไซด์ โดย

ขั้นตอนการทดลองจะแบ่งวิธีการเตรียมหัววัดออกเป็นสองวิธีที่แตกต่างกัน โดยวิธีแรกจะทำการเคลือบอะตอมของ Pt ลงไปในชั้นของทินออกไซด์โดยวิธี RF magnetron sputtering แล้วนำไปให้ความร้อน ส่วนวิธีที่สองจะทำการผสมอะตอมของ Pt กับ ทินออกไซด์โดยตรงและนำไปเตรียมเป็นหมึกพิมพ์แล้วนำไปทำการพิมพ์สกรีนขึ้นรูปเป็นหัววัด จากผลการทดลองพบว่าหัววัดแก๊สที่เตรียมโดยวิธีที่สองจะมีค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลสูงกว่าวิธีแรกอยู่ 4 เท่าและสูงกว่าหัววัดแก๊สที่ไม่เคลือบอะตอม Pt อยู่ 12 เท่า [32]

ฟานีและคณะ (Phani *et Al.*) พบว่าการใช้พาราเคียมร้อยละ 1.5 ผสมกับผงทินออกไซด์และอลูมินัมซิลิเกต (aluminum silicate) ร้อยละ 35 เผาซินเทอร์ริงที่อุณหภูมิ 800°C จะให้หัววัดมีความไวต่อการตรวจจับแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) โดยจะ ไม่มีการรบกวนจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทนเมื่อทำการตรวจวัดที่อุณหภูมิ 350°C [33]

อะคิยามะและคณะ (Akiyama *et Al.*) ได้ทำการสังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์เพื่อใช้ในการประดิษฐ์หัววัดแก๊สโดยวิธีการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) สารแอมโมเนียมทั้งสเดค พาราเพนตะไฮเดรต $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงพบว่าจะสามารถนำไปใช้ตรวจวัดแก๊ส NO_x ที่อุณหภูมิการใช้งานประมาณ 300°C ได้ดีนอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊ส NO_x ให้ดีขึ้นได้โดยการใช้ Pt เป็นขั้วไฟฟ้าและเติมโลหะมีสกุล (noble metal) เช่น Ru และ Au ลงไปในโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊ส [34]

แวง และคณะ (Wang *et Al.*) พบว่าหัววัดแก๊สแบบเซรามิกที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างโมโนคลินิกและไตรคลินิกที่มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 21 nm จะมีการตอบสนองที่ดีต่อเอทานอล โดยในขั้นตอนการสังเคราะห์เมื่อใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าและความไวในการตอบสนองต่อเอทานอล และพบว่าอุณหภูมิการเผาที่ทำให้หัววัดมีค่าความไวสูงสุดคือที่ 500°C โดยมีอุณหภูมิการใช้งานประมาณ 200°C [35]

มานะ ได้ทำการเตรียมผงทั้งสเดนออกไซด์ โดยวิธีตกตะกอนสาร แอมโมเนียม ทั้งสเดค พาราเพนตะไฮเดรต $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติม Au ปริมาณเล็กน้อยลงไป ในโครงสร้างของวัสดุ แล้วทำการขึ้นรูปหัววัดแบบเซรามิกพบว่าหัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์ขึ้นจะมีการตอบสนองที่ดีต่อแก๊ส SO_2 [36]

คิมและคณะ (Kim *et Al.*) ทำการเตรียมทั้งสเดนออกไซด์แบบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอร์ริง เพื่อใช้ตรวจวัดแก๊ส NO_x โดยทำการปรับปรุงค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สโดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C พบว่าความสามารถในการเกิดผลึกของฟิล์มจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ

สมบัติการรับรู้แก๊สของฟิล์ม โดยค่าความไวของฟิล์มสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการเพิ่มความสามารถในการเกิดผลึกของฟิล์ม [37]

ฉีฮ์ และคณะ (Shieh *et. Al.*) ได้ประดิษฐ์หัววัดแก๊สแบบฟิล์มบางที่เตรียมจาก WO_3 และ $W-Ti-O$ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก โดยวิธี โซล-เจล พบว่าเมื่อเติม ไททาเนียม (Ti) ลงไปในวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊สจะทำให้วัสดุที่ได้มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 17.9 -33.8 nm และสามารถเพิ่มความไวในการตรวจวัดแก๊ส NO_2 [38]

อินุเอะ และคณะ (Inoue *et. Al.*) ได้ประดิษฐ์หัววัดแก๊สแบบฟิล์มหนาที่เตรียมจากผงทั้งสเดนออกไซด์โดยวิธี สลายตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition) สาร แอมโมเนียม พาราทังสเตต ($(NH_4)_{10}W_{12}O_{41}$) ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ $600^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการยึดติดกันระหว่างฟิล์มกับแผ่นรองสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการเติม ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารยึดประสาน (binder) ในหมึกพิมพ์ทั้งสเดนออกไซด์ และหัววัดยังแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่ติดแก๊ส NO_2 ในช่วงความเข้มข้น 2-3 ppm [39]

ลีและคณะ (Lee *et. Al.*) ได้ทำการสังเคราะห์ผงทั้งสเดนออกไซด์โดยวิธีโซลร่วมกับการตกตะกอน (sol-coprecipitation) สาร ทั้งสเดนเฮกซะคลอไรด์ (WCl_6) และไทเทเนียม เตตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) พบว่า TiO_2 ที่เติมลงไปในการสร้างของ WO_3 สามารถทำให้หัววัดมีความไวในการตอบสนองต่อแก๊ส NO_x ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (0.5-30ppm) ได้ดี [40]

ทอมเชนโก และคณะ (Tomchenko *et. Al.*) ได้ทำการเตรียมหมึกพิมพ์สำหรับการพิมพ์สกรีนขึ้นรูปหัววัดแก๊สแบบฟิล์มหนา โดยการนำทั้งสเดนออกไซด์ ผสมกับ ลาโนลิน (lanolin) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวพาโคหมี บิสมีทออกไซด์ (Bi_2O_3) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาและแก้วเป็นสารยึดประสานโคหมีที่เตรียมได้จะถูกพิมพ์ลงบนระหว่างขั้วไฟฟ้า (Au-Pd) ทั้งสองโคหมี อลูมินาเป็นแผ่นรอง และรูทีเนียมออกไซด์ (RuO_2) เป็นตัวให้ความร้อนแล้วนำขึ้นตรวจวัดที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ $680^\circ C$ เป็นเวลา 10 นาทีในอากาศแห้ง พบว่าหัววัดที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์เจือด้วยสารเร่งปฏิกิริยา บิสมีทออกไซด์ จะแสดงผลที่ดีในการตอบสนองต่อแก๊ส NO_2 ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (2-300ppm) ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าค่าความไวในการตอบสนองจะลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นฟิล์ม [41]

มานะ และ สิทธิสุนทร ได้ทำการประดิษฐ์หัววัดแก๊สแบบฟิล์มหนาที่ทำจากทั้งสเดนออกไซด์ โดยวิธีการตกตะกอนสารแอมโมเนียม ทั้งสเตต พาราเพนตะไฮเดรต ($(NH_4)_{10}W_{12}O_{41} \cdot 5H_2O$) ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $600^\circ C$ เป็นเวลา 2หรือ6 ชั่วโมง ซึ่งหัววัดที่ประดิษฐ์ขึ้นแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่ติดต่อ C_2H_5OH และแก๊ส NH_4 ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าการโคของเกรนที่อุณหภูมิสูง ทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุลดลงซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สของหัววัดมีค่าลดลง [42]

โซลิส และคณะ (Solis *et. Al.*) ได้ทำการประดิษฐ์หัววัดแก๊สจากผงทั้งสเดนเนื้อละเอียดที่เตรียมโดยวิธีการระเหยโลหะทั้งสเดน โดยทั้งสเดนที่ได้จะประกอบไปด้วยเฟสโมโนคลินิก และเตตระกอนอล ซึ่งจะมีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 40 nm สำหรับหมึกพิมพ์ทั้งสเดนที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊สจะเตรียมโดยการผสม สารเอนทาร์อก (antarox) เอทิลเซลลูโลส (ethyl-cellulose) เทอร์พินอล (terpineol) โดยหมึกพิมพ์ที่ได้จะถูกพิมพ์ลงบนแผ่นรองที่ทำจาก อลูมินา และ จิลิคอน โดยมี Au เป็นขั้วไฟฟ้าและ Pt เป็นตัวให้ความร้อน โดยฟิล์มที่ได้จะถูกนำอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300-800°C พบว่าหัววัดที่ได้จะแสดงคุณสมบัติที่ดีมากในการตรวจวัดแก๊ส H₂S ในระดับความเข้มข้นต่ำๆที่อุณหภูมิห้อง และยังพบอีกว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊ส H₂S เกือบจะหายไปหลังจากการเผาฟิล์มที่อุณหภูมิมากกว่า 600°C ซึ่งเป็นผลที่เกี่ยวเนื่องจากการหายไปของเฟส เตตระกอนอล ที่อุณหภูมิมากกว่า 600°C [43,44]

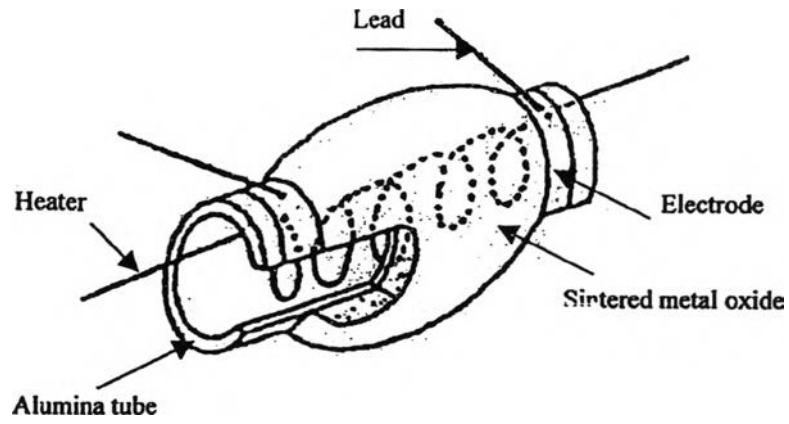
นอฮ์และคณะ (Noh *et. Al.*) ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มหนาจาก WO₃ เจือด้วย NiO โดยทำการขึ้นรูปด้วยวิธีพิมพ์สกรีน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มจะขึ้นกับ ปริมาณของ NiO , ความดันย่อยของออกซิเจน ความเข้มข้นของแก๊ส NO₂ และอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม NiO จะทำหน้าที่หน่วงการโตของเกรน ค่าความนำไฟฟ้าของ WO₃ บริสุทธิ์จะมีค่าสูงที่ความดันย่อยของออกซิเจนมีค่าต่ำๆ ค่าความนำไฟฟ้าและค่าความไวของ WO₃ เจือด้วย NiO ในอากาศจะมีค่าสูงสุดที่ 1.0 mol% NiO [45]

เรดดิและคณะ (Reddy *et. Al.*) ได้ทำการเตรียม ผงอัลลอย xTiO₂-(1-x) WO₃ โดยวิธีบดผสม แล้วนำผงอัลลอยที่ได้ไปประดิษฐ์เป็นหัววัดแก๊สแบบฟิล์มหนาด้วยวิธีพิมพ์สกรีนพบว่าหัววัดแก๊สที่ได้มีค่าความจำเพาะและความไวในการตอบสนองที่ดีต่อแก๊สเอทานอล ความเข้มข้น 100 ppm ในอากาศ ที่อุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 160°C [46]

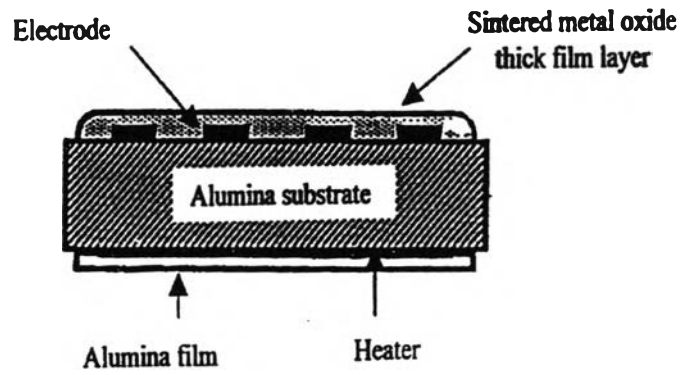
2.5 กระบวนการขึ้นรูปหัววัดแก๊ส

หัววัดแก๊สชนิดสารกึ่งตัวนำที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นจะปรากฏออกมาในแบบต่างๆ หลายแบบ ได้แก่ ฟิล์มหนา ฟิล์มบาง ผลึกเดี่ยว และเซรามิก ในแต่ละแบบจะมีข้อดี - ข้อเสียและความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานแตกต่างกัน ในการพัฒนาเทคนิคการขึ้นรูปหัววัดแก๊สชนิดสารกึ่งตัวนำด้วยเทคโนโลยีต่างๆ ซึ่งมีกระบวนการที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้หัววัดแก๊สที่มีความเหมาะสมในการตรวจวัดแก๊สในสภาวะต่างๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นตลอดเวลาในช่วงหลายปีที่ผ่านมาซึ่งในบรรดาการขึ้นรูปที่มีด้วยกันหลายวิธีนั้น กระบวนการขึ้นรูปที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายคือ

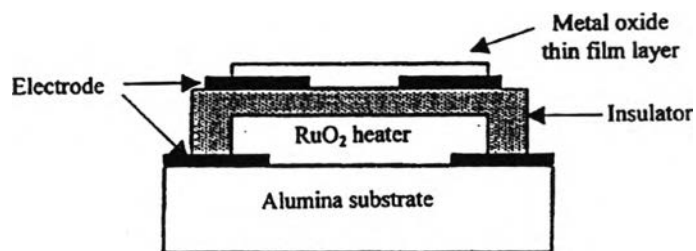
1. กระบวนการขึ้นรูปแบบเซรามิกดั้งเดิม (Typical ceramic fabrication process)
2. กระบวนการขึ้นรูปแบบฟิล์มหนา (Thick film fabrication process)
3. กระบวนการขึ้นรูปแบบฟิล์มบาง (Thin film fabrication process)



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะหัววัดแก๊สที่ขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆ (a) หัววัดแก๊สแบบเซรามิกดั้งเดิม (b) หัววัดแก๊สแบบฟิล์มหนา (c) หัววัดแก๊สแบบฟิล์มบาง [47]

สำหรับหัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์ออกมาในรูปของผลึกเดี่ยวนั้นไม่ได้รับความนิยม โดย มอริสัน (Morrison, 1982) [21] ได้ให้เหตุผลไว้ว่าเนื่องหัววัดแก๊สแบบผลึกเดี่ยวมีการตอบสนอง ต่อแก๊สที่ต่ำมาก โดยตารางที่ 2.3 เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆของหัววัดแก๊สที่ขึ้นรูป โดยกระบวนการทั้งสามแบบ

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของหัววัดแก๊สที่ขึ้นรูปแบบต่างๆ [21]

สมบัติ	ฟิล์มบาง	ฟิล์มหนา	เซรามิกบดอัด
ความไว	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
การใช้พลังงาน	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง
ราคา	สูง	ปานกลาง	ปานกลาง
กระบวนการผลิต	ยาก	ปานกลาง	ง่าย
การนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี
การแปรผันของค่าความไว	มาก	ปานกลาง	น้อย
สภาพความต้านทานเชิงกล	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี
ค่าสภาพต้านในปริมาตรตาม แนวนอน	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆ ดังที่แสดงตามตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าหัววัดแก๊สที่มีกระบวนการขึ้นรูปแบบฟิล์มหนา (thick film) จะมีคุณสมบัติด้านต่างๆอยู่ในระดับปานกลาง โดยเทคโนโลยีแบบฟิล์มหนา นิยมใช้กันทั่วไปในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น วงจรผสม อุปกรณ์ขนาดเล็ก และ หัววัดชนิดต่างๆ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ต้นทุนต่ำและให้ค่าความไวที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคแบบ ฟิล์มบาง (thin film) นอกจากนี้ยังสามารถผลิตเป็นชิ้นงานได้ครั้งละมากๆ จึงเหมาะสมที่จะผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ตัวอย่างการขึ้นรูปแบบฟิล์มหนาที่นิยมใช้กัน อาทิเช่น พิมพ์สกรีน (screen printing) โดยชิ้นงานที่ได้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และความพรุนตัวสูง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อกลไกการตอบสนองต่อแก๊ส และการตรวจวัดแก๊สที่มีความเข้มข้นต่ำๆ

2.6 กลไกการตรวจวัดแก๊ส

นับตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ.1950 เป็นต้นมา ได้มีการศึกษาอย่างจริงจังเกี่ยวกับปรากฏการณ์ การเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ที่มีโครงสร้างไม่เป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์ (non-stoichiometry) อันเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับแก๊สบางชนิด ทำให้สารกึ่งตัวนำบางชนิดได้รับความสนใจในการนำมาประดิษฐ์เป็นหัววัดแก๊ส โดยลักษณะการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำนั้น สามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ การเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าที่พื้นผิว และการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าภายในเกรน ทั้งนี้เนื่องจากผลของแก๊สจะทำให้ค่าความนำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้ (reversible) หากมีการดูดซับและการคายของแก๊สบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอิเล็กตรอนนำกระแส (conduction band electron) โดยปริมาณของอิเล็กตรอนนำกระแสจะแปรผันตรงกับค่าความนำไฟฟ้า นอกจากนี้หัววัดแก๊สชนิดสารกึ่งตัวนำยังมีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าที่กว้าง อันเนื่องจากการมีช่องว่างพลังงานต้องห้าม (energy gap) ที่กว้าง อาทิเช่น ทินออกไซด์จะมีช่องว่างพลังงานต้องห้ามประมาณ 3.6eV และสังกะสีออกไซด์จะมีค่าประมาณ 3.2 eV ดังนั้นจึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้หัววัดแก๊สส่วนใหญ่นิยมประดิษฐ์จาก ทินออกไซด์มากกว่าสังกะสีออกไซด์ เนื่องจากทินออกไซด์มีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าที่กว้างกว่า [21]

ทินออกไซด์และทังสเตนเป็นสารกึ่งตัวนำประเภท n-type [48] โดยสภาพความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีผลเกิดจากองค์ประกอบที่ไม่เป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์ของทินออกไซด์ ทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจน (oxygen vacancies) ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นจุดบกพร่องแบบโคเนอร์ (donor defects) นอกจากนี้การเจืออะตอมแปลกปลอม (foreign atoms) ลงไปในโครงสร้างจะก่อให้เกิดความบกพร่องแบบจุด (point defect) ความบกพร่องที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็น ตัวให้ (donors) และตัวรับ (acceptor) อิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อตรวจวัดแก๊ส และจะเป็นการเพิ่มปริมาณพาหะประจุอิสระ (free charge carriers) ให้แก่โครงสร้าง สำหรับกลไกการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของทินออกไซด์จะเกิดขึ้นที่พื้นผิว ซึ่งค่อนข้างมีความซับซ้อน และเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยา

ในปัจจุบันมีแบบจำลองที่ใช้อธิบาย หลักการ และ ทฤษฎีในการทำงานของหัววัดแก๊สแบบสารกึ่งตัวนำอยู่มากมาย โดยในแต่ละแบบจะมีพื้นฐานที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการตอบสนองของหัววัดแก๊ส จะเป็นปฏิกิริยา ออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของหัววัดแก๊ส [21] โดยทั่วไปค่าสภาพความนำไฟฟ้าของหัววัดแก๊สแบบฟิล์มหนา จะถูกควบคุมโดย กำแพงศักย์ชอตต์กี (Schottky barriers) ซึ่งเป็นกำแพงศักย์ที่คอยขวางกั้นการเคลื่อนที่ผ่านระหว่างเกรนของอิเล็กตรอนโดย กำแพงศักย์ชอตต์กี จะปรากฏที่ขึ้นที่รอยต่อระหว่างเกรน

กลไกการตรวจวัดแก๊สจะเริ่มต้นจากกระบวนการดูดซับออกซิเจน (oxygen adsorption) ที่อุณหภูมิการใช้งานในช่วง 200-400 °C โดยเมื่อทินออกไซด์สัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิสูง

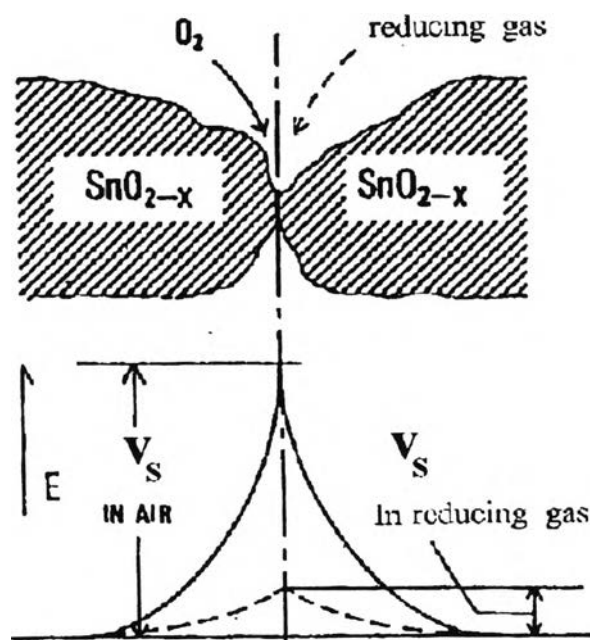
อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นออกซิเจนไอออนเช่น O^{2-} หรือ O^- ซึ่งจะก่อตัวเป็นกำแพงศักย์ขดตติ คอชขัคขวางการเคลื่อนที่ผ่านระหว่างเกรนของอิเล็กตรอนอิสระไม่ให้ไปอย่างอิสระทำให้สภาพความนำไฟฟ้าของทินออกไซด์ลดลง โดย O^- จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าให้มีค่าต่ำมากเมื่ออยู่ในสภาวะอากาศบริสุทธิ์ และอุณหภูมิการทำงานปกติซึ่งจะมีผลทำให้ กำแพงศักย์ขดตติ มีค่าสูง [49] สำหรับสารกึ่งตัวนำประเภท n-type ความหนาแน่นของประจุลบ (σ) ที่สะสมอยู่บริเวณพื้นผิว จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของ กำแพงศักย์ขดตติให้สูงขึ้นซึ่งจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ [50]

$$v_s = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon \cdot N_D \cdot e} \quad (2.1)$$

เมื่อ N_D คือ ความเข้มข้นของอะตอมผู้ให้ (bulk donor concentration)

e คือ ประจุพื้นฐาน (elementary charge)

ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของกำแพงศักย์ขดตติ อันเนื่องมาจากผลของการดักจับอิเล็กตรอนของออกซิเจน [54]

ผลของแก๊สรีดิวส์ จะทำให้ปริมาณของออกซิเจนที่ถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวของทินออกไซด์ลดลงซึ่งจะทำให้ ค่าพวงศักย์ขอตัดก็ลดลงและมีผลต่อเนื่องทำให้ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระบวนการตรวจวัดแก๊สจะสามารถสรุปได้เป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ

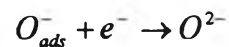
1. อิเล็กตรอนที่ปกคลุมพื้นผิวของทินออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็น O^{2-} หรือ O^{1-} ซึ่งจะมีผลทำให้ ค่าพวงศักย์ขอตัดก็มีค่าสูงขึ้นและทำให้สภาพความนำไฟฟ้ามีค่าลดลง
2. การลดยอกซิเจนที่ถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวอันเนื่องจากผลของแก๊สรีดิวส์และจะส่งผลให้ค่าพวงศักย์ขอตัดก็มีค่าลดลงทำให้ค่าสภาพความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น

2.6.1 แบบจำลอง

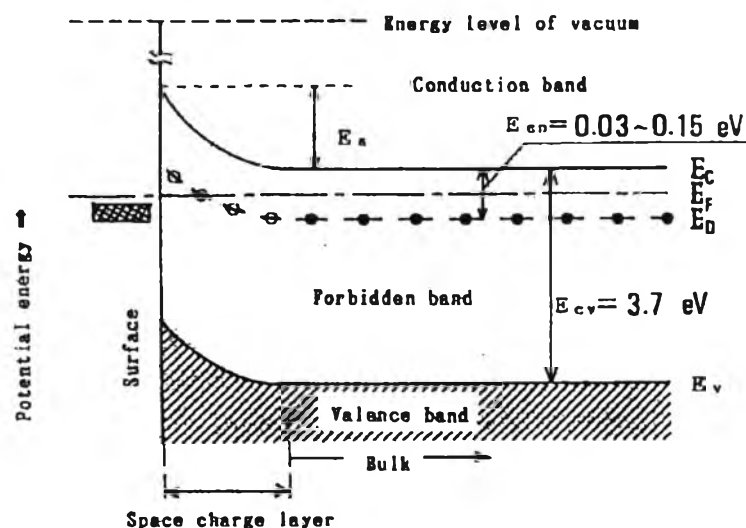
สำหรับ SnO_2 ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำประเภท n-type ซึ่งสถานะการให้อิเล็กตรอน (donor state) จะถูกเชื่อมโยงกับ ช่องว่างออกซิเจน [47-49] ลำดับแรกของการเกิดกลไกการตรวจวัดแก๊สจะเกิดการดูดซับออกซิเจนที่พื้นผิวของทินออกไซด์ดังสมการ



ที่บริเวณแลตทิซของ SnO_2 ออกซิเจนจะปรากฏอยู่ในรูปของ O^{2-} โดยออกซิเจนที่ถูกดูดซับจะไปเพิ่มสถานะการรับอิเล็กตรอน O/O^- และ O^-/O^{2-} ให้กับพื้นผิว ซึ่งอิเล็กตรอนนำกระแส (conduction electrons) จะถูกคักจับ [50,51]

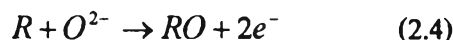


โดยสถานะทางอิเล็กทรอนิกส์ (electronic states) จะถูกแสดงด้วย แผนภาพแถบพลังงาน (band diagram) ภายใต้อันดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level)



รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบพลังงานของ SnO_{2-x} [54]

อิเล็กตรอนนำกระแส 2 ตัวจะถูกดักไว้โดย ช่องว่างออกซิเจน ที่บริเวณพื้นผิวของ SnO_2 และกลายเป็น O^{2-} ผลของแก๊สรีดิวซ์ จะมีผลทำให้ออกซิเจนที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวลดลงและจะส่งผลกระทบต่อให้ประจุรวมที่พื้นผิวด้านล่างและอิเล็กตรอนที่ถูกดักไว้จะถูกปลดปล่อยกลับคืนไปสู่แถบนำกระแส (conduction band) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้จะแสดงดังนี้



เราสามารถหาค่าความหนาแน่นพื้นผิวของออกซิเจนที่ถูกดูดซับได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$N_- = N_s \cdot (1 - \theta_R) \quad (2.5)$$

เมื่อ

- θ_R - อัตราส่วนการดูดซับสำหรับแก๊สรีดิวซ์
- N_- - ความหนาแน่นพื้นผิวของออกซิเจนที่ถูกดูดซับซึ่งมีประจุเป็นลบเนื่องจากจับกับ อิเล็กตรอนนำกระแส
- N_s - ความหนาแน่นของพื้นผิวช่องว่างการดูดซับสำหรับ ออกซิเจน
- n - ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนนำกระแส.
- N_D - ความเข้มข้นของอะตอมผู้ให้ (oxygen vacancies)

สมมติว่าเมื่อออกซิเจนถูกรีดิวซ์ อิเล็กตรอน 2 ตัวจะถูกปล่อยสู่แถบนำกระแสจะได้ความหนาแน่นประจุรวมที่พื้นผิวดังนี้

$$\sigma = \frac{2eN_s}{1 + \rho \cdot \frac{p}{\Pi}} \quad (2.6)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.6) ลงในสมการที่ (2.1) เราจะสามารถหาค่าความสูงของ กำแพงศักย์ชอตต์กี ที่พื้นผิว ได้ดังนี้

$$V_s = \frac{V_0}{\left(1 + \rho \frac{p}{\Pi}\right)^2} \quad (2.7)$$

V_0 คือความสูงของกำแพงศักย์ชอตต์กีในสภาวะที่ปราศจากแก๊สรีดิวซ์

$$V_0 = \frac{2 \cdot e \cdot N_s^2}{\epsilon \cdot N_D} \quad (2.8)$$

ค่าสภาพความนำไฟฟ้าของหัววัดจะหาได้จาก

$$G = env \quad (2.9)$$

เมื่อ V คือค่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (bulk mobility) และ n คือค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอน เนื่องจากอิเล็กตรอนทุกตัวไม่สามารถที่จะมีพลังงานสูงเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ชอตต์กีย์ได้ซึ่งสอดคล้องกับหลักสถิติของ แมกเวลล์-โบลต์ซมานน์ (Maxwell-Boltzmann) ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าจะสามารถเขียนได้เป็น

$$G = env e^{-\frac{eV_0}{kT}} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.7) จะสามารถหาค่าสภาพความนำไฟฟ้าของอากาศบริสุทธิ์, G_0 ได้ดังนี้

$$G_0 = enve^{-\frac{eV_0}{kT}} \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าความไว โดยทั่วไปของหัววัด (G/G_0) ได้ดังความสัมพันธ์

$$\frac{G}{G_0} = \exp \left(\frac{eV_0}{kT} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \rho \frac{p}{\Pi} \right)^2} \right) \right) \quad (2.12)$$

จากสมการ (12) เมื่อแก๊สรีติวส์ยังไม่ปรากฏ ($p=0$) ค่าความไว จะเท่ากับ 1 และที่ ความดันย่อย ของแก๊สรีติวส์มีค่าสูงเมื่อ $\rho(p/\Pi) \gg 1$ ค่าความไวจะเข้าใกล้จุดอิมิตัวดังสมการ (13)

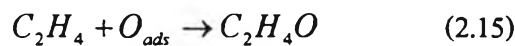
$$\left. \frac{G}{G_0} \right|_{\text{inf.}} = e^{-\frac{eV_0}{kT}} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (12) และ (13) จะสามารถเขียนค่า ฟังก์ชันการตอบสนองได้เป็น

$$\frac{G}{G_0} = \left(\frac{G}{G_0}_{\text{surf.}} \right)^{\left(\frac{1}{1-\beta c} \right)} \quad (2.14)$$

เมื่อ c คือค่าความเข้มข้นของแก๊สในหน่วย ppm โดยค่า $(G/G_0)_{\text{surf.}}$ และ β คือ ตัวแปรซึ่งจะสามารถพิจารณาสมการที่ได้จากผลการทดลอง

สำหรับกลไกการตรวจวัดแก๊สเอทิลีนที่พื้นผิวของทินออกไซด์ จะมีขั้นตอนดังนี้ โดยหลังจากการดูดซับและเรียงตัวของโมเลกุลของแก๊สเอทิลีน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็น อะซิติกแอตไซด์ (A.V.Khasin,1998) ดังสมการ



2.7 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

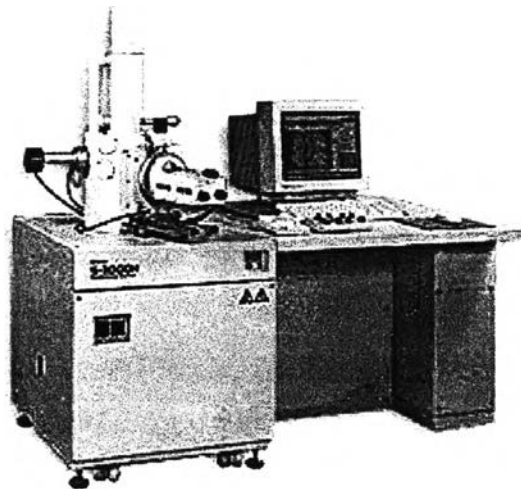
2.7.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

วัสดุที่มีขนาดเกรน (grain) ตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงระดับมิลลิเมตรจะประกอบด้วยอะตอมหลายร้อยล้านอะตอม แต่เมื่อเกรนมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร จะพบว่าใน 1 นาโนเกรนจะประกอบด้วยอะตอมประมาณ 900 อะตอม เมื่อเกรนมีขนาดเล็กจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของบริเวณรอยต่อระหว่างเกรนหรือผิวสัมผัส (interfaces) โดยทั่วไปสมบัติทางกายภาพของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามผลของการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้าง ดังนั้นเมื่อเกิดการลดลงของขนาดอนุภาคซึ่งจะสอดคล้องโดยตรงกับการเรียงตัวของอะตอม โดยเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสซึ่งจะเป็นเหตุผลสำคัญในการกำหนดสมบัติทางกายภาพของวัสดุนั้นๆ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุนาโนที่มีการเพิ่มขึ้นของบริเวณผิวสัมผัสจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางไฟฟ้า ของวัสดุ

สำหรับการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่ใช้ประโยชน์ห้วัดแก๊สจะศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่มีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อแก๊ส เอทิลีน ซึ่งในการศึกษาจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.7.1.1 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นเป็นอุปกรณ์ที่ประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้สนามไฟฟ้าแทนเลนส์กระจก โดยมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิววัตถุ ต่อจากนั้นจะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพ โดยภาพของวัตถุจะมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะของวัตถุได้ตั้งแต่ระดับ 3 ถึง 100 นาโนเมตร



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของเครื่อง SEM [55]

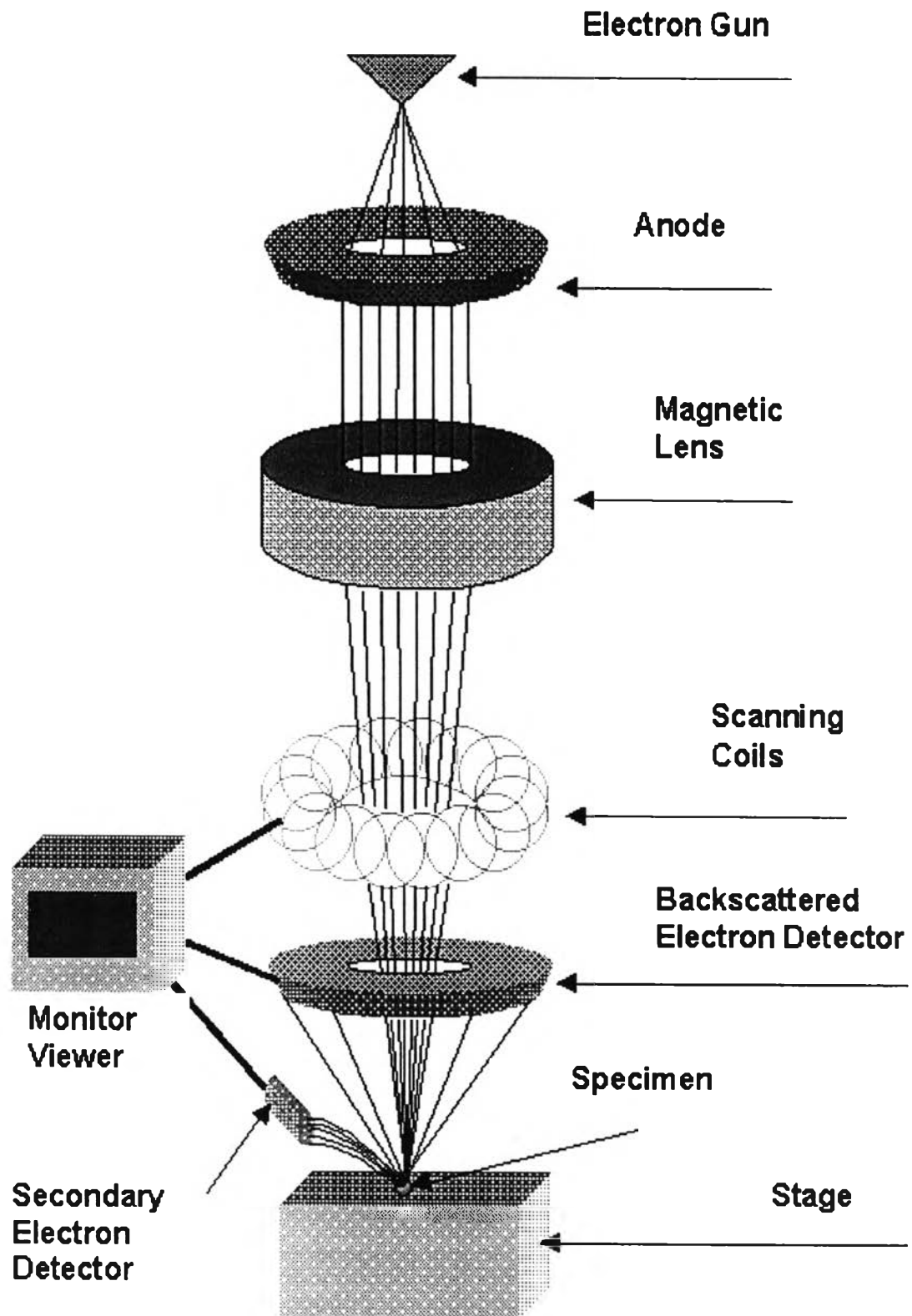
หลักการเกิดภาพในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะเริ่มต้นจากเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (1,000-3,000 eV) ที่สามารถปรับค่าได้จากนั้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกดึงดูดลงสู่เบี่ยงล่างโดยแผ่นแอนโนด (anode plate) ภายใต้อิทธิพลของความดันสุญญากาศ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน ซึ่งลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนลงสู่เบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิววัตถุพอดี และลำของอิเล็กตรอนที่กระทบผิววัตถุจะมีขนาดอยู่ในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยจะมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (scan coil) ของลำอิเล็กตรอนซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมทิศการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิววัตถุ โดยจะสามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (control unit)

เมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิววัตถุจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุของวัตถุและจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆ เป็นผลให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ชนิดต่างๆออกมาซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัตถุโดยสัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนชนิดต่างๆมีดังนี้

-สัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) เป็นภาพที่เกิดจากกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ($\approx 3-5$ eV) เกิดขึ้นในระดับพื้นผิวที่ไม่ลึก(น้อยกว่า 10 นาโนเมตร) โดยจะเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

-สัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image, BEI) ซึ่งเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมของวัตถุและกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะเกิดที่พื้นผิวระดับลึกมากกว่า 10 นาโนเมตร โดยจะเกิดขึ้นกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

-สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Image, XRI) ชนิดที่เป็นเป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆถูกกระตุ้น (excited) หรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรออกมา ทำให้อะตอมต้องรักษาสถิตของโครงสร้างรวมภายในอะตอม โดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดระดับพลังงานภายใน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่า โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM [56]

2.7.1.2 หลักการของ energy dispersive x-ray spectrophotometry (EDS)

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุและใช้เวลาไม่นานในการวิเคราะห์ โดยเทคนิค EDS มีหลักการวิเคราะห์คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของชั้นโคจร อิเล็กตรอนจึงหลุดจากวงโคจรทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร หลังจากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับ ความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะของธาตุนั้นๆ

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถกระทำได้ 3 วิธีคือ

1. การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (area scan analysis) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เอกซ์เรย์แมปปิง (x-ray mapping) ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ ลักษณะการส่องกราดเป็นแนวจากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงลักษณะการกระจายของธาตุบนพื้นผิวนั้นๆ

2. การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (line scan analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนตามแนวนอนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการจะหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3. การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งกับที่บนพื้นผิวตัวอย่าง ตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตรงจุดที่ต้องการ

รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดจากตัวอย่างจะมีพลังงานตามสมการ

$$E = h\nu \quad (2.16)$$

เมื่อ

E = พลังงานของรังสีเอกซ์

h = ค่าคงที่ของพลัง (Planck's constant $\approx 6.626 \times 10^{-34}$ J·s)

ν = ความถี่ของรังสีเอกซ์

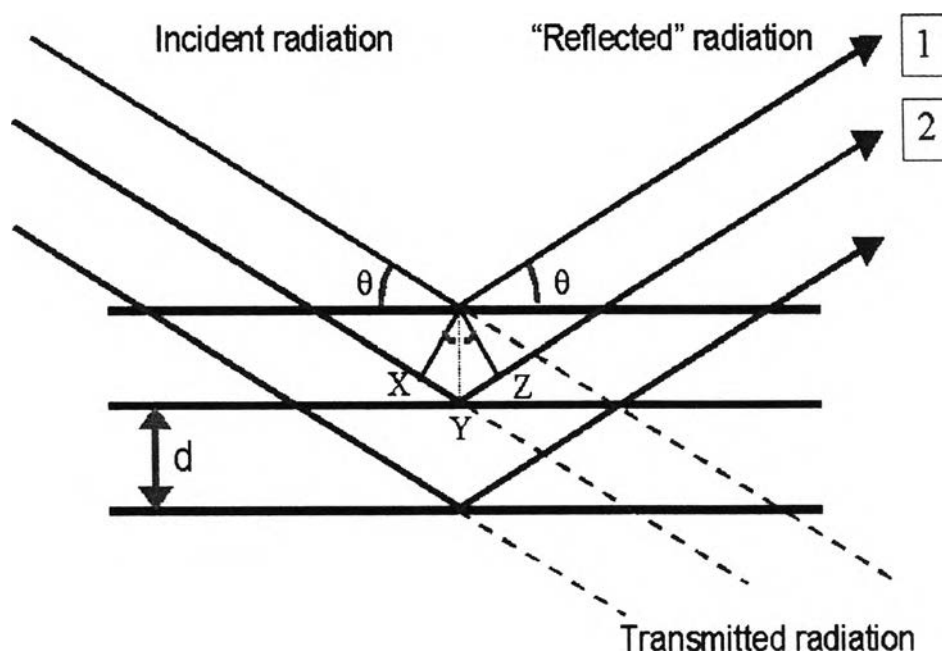
2.7.2 การวิเคราะห์เฟส

2.7.2.1 หลักการของ X-ray diffraction (XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน เป็นเครื่องมือวิเคราะห์พื้นฐานชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์รวมถึงความรู้เกี่ยวกับระบบผลึก

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึก โดยทำมุม θ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า และอีกส่วนหนึ่งจะผ่านไปยังชั้นถัดไป ของอะตอมซึ่งบางส่วนก็จะเกิดการกระเจิง เมื่ออะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆกัน รังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน ซึ่งสิ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับภาวะ 2 ประการคือ

- รังสีตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และ เส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
- ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรจะมีระยะใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์[57]

จากรูปที่ 2.9 เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นแน่นอน λ ตกกระทบผลึกทำมุม θ กับระนาบอะตอม จะมีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ถ้าคลื่นเลี้ยวเบนของรังสีมีเฟสเสริมกันจะได้ระยะที่ลำของ

รังสีเส้นที่ 2 เคลื่อนไปมากกว่าลำของรังสีเส้นที่ 1 เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสี ซึ่งจะสอดคล้องกับกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก (Bragg's law)

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.17)$$

เมื่อ n มีค่าเป็นจำนวนเต็ม, λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์, d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม, และ θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบและระนาบของผลึก สำหรับการสะท้อนของรังสีอื่นๆที่ไม่สอดคล้องกับกฎการเลี้ยวเบนของแบรกกจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน

2.7.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว

พื้นที่ผิวของสารเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำวัสดุไปใช้งาน โดยการวัดพื้นที่ผิวสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้จะอาศัยการวัดจากปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารแล้วมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

แก๊สไนโตรเจนบนผิวของวัสดุที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็น โมเลกุลหลายชั้น (multilayer) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน พบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็น โมเลกุลชั้นเดียว ซึ่งจากผลการศึกษาี้สามารถเขียนเป็นสมการที่เรียกว่า “สมการของ BET”

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \left[\frac{C-1}{V_m C} \right] \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ

- P - ความดันของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ
- P_0 - ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ
- V - ปริมาตรของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P
- V_m - ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของวัสดุด้วยความหนา 1 ชั้น โมเลกุลเต็มพอดี
- C - ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานในการดูดซับ

จากสมการของ BET สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุได้ โดยการนำค่าปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสาร (V_m) ไปคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของแก๊ส

จากสมการของ BET สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุได้ โดยการนำค่าปริมาตรของแก๊สในโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสาร (V_m) ไปคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับใน สภาพ 1 ชั้นโมเลกุลแล้วนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการ (2.19)

$$S_{sp} = \frac{N_A \cdot a_{max} \cdot S_0}{W} \quad (2.19)$$

เมื่อ

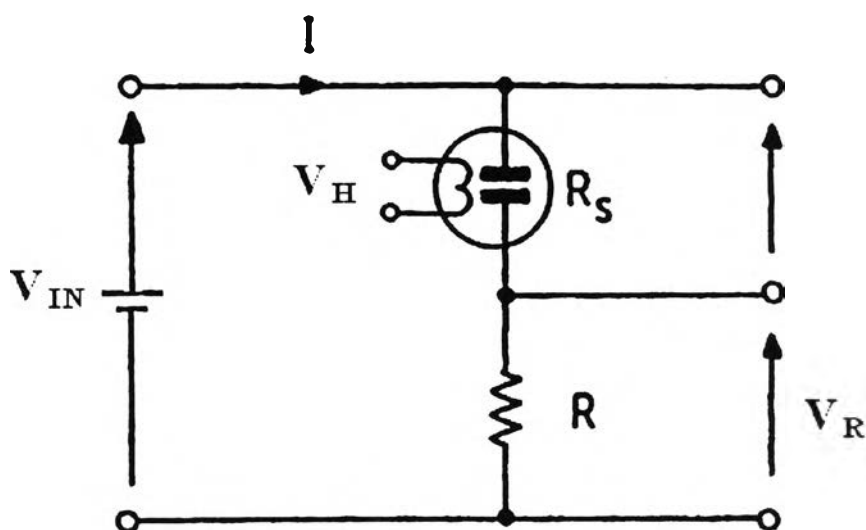
- S_{sp} -พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ
- N_A -เลขอาโวกาโดร(6.02×10^{23})
- a_{max} -จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับใน 1 ชั้นโมเลกุลหรือเท่ากับ $\frac{V_m}{22414}$
- S_0 -พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ(16.2×10^{-20})
- W -น้ำหนักของวัสดุหรือตัวดูดซับ

2.8 วงจรวัดสัญญาณ

วงจรวัดสัญญาณสำหรับหัววัดแก๊สจะประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ตัวต้านทานสำหรับวัดสัญญาณ และ หัววัดแก๊ส โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะป้อนแรงดันไฟฟ้า (V_{in}) แก่หัววัดแก๊ส (R_S) ซึ่งต่อแบบอนุกรมกับตัวต้านทานไฟฟ้า (R) ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับค่าความต้านทานของหัววัดแก๊ส โดย R ควรมีค่าใกล้เคียงกับ R_S เพื่อให้ได้สัญญาณวัดสูงที่สุด นอกจากนี้ตัวต้านทานไฟฟ้ายังช่วยป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหัววัดมากเกินไปในขณะที่วัดแก๊สที่ระดับความเข้มข้นสูง

รูปที่ 2.10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลที่ดูดซับบริเวณพื้นผิวของหัววัดแก๊ส จะทำให้ค่าความต้านทานของหัววัดแก๊สเกิดการเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าคล่อมตัวต้านทาน (V_R) เกิดการเปลี่ยนแปลงดังความสัมพันธ์

$$V_R = V_{in} \left[\frac{R}{R_S + R} \right] \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.10 วงจรวัดสัญญาณของหัววัดแก๊ส

2.9 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของหัววัดแก๊ส

หัววัดแก๊สแบบสารกึ่งตัวนำมีการประดิษฐ์จากวัสดุหลายชนิดซึ่งมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน ซึ่ง โดยทั่วไปในการเลือกใช้วัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊สจำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.9.1 ความไวในการวัด (sensitivity)

คือความสามารถของหัววัดแก๊สที่สามารถวัดแก๊สเป้าหมายที่ความเข้มข้นต่ำๆ ได้ดี

2.9.2 ความจำเพาะ (selectivity)

คือความสามารถในการเลือกชนิดแก๊สที่ต้องการวัด นั่นคือ หัววัดแก๊สชนิดหนึ่งควรที่จะมีความสามารถในการตอบสนองต่อแก๊สชนิดหนึ่ง หรือแก๊สกลุ่มหนึ่งที่สนใจเท่านั้น ไม่ควรที่จะตอบสนองต่อแก๊สชนิดอื่น เพราะจะทำให้เป็นสัญญาณรบกวนการวัดได้

2.9.3 ความเสถียรภาพ (stability)

หัววัดแก๊สที่ดีจะต้องมีความเสถียรภาพในการวัดที่ดี กล่าวคือให้ผลการวัดที่คงที่ ไม่เสื่อมประสิทธิภาพไปในระหว่างการใช้งาน ไม่เช่นนั้นจะทำให้ไม่สามารถที่จะนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง

2.9.4 พิสัยของการวัด (dynamic range)

การนำเอาหัววัดแก๊สไปใช้งานที่แตกต่างกันย่อมต้องการพิสัยของการวัดที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกหัววัดแก๊สที่มีพิสัยการวัดที่เหมาะสมก็เป็นสิ่งจำเป็น