

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานของหัวตรวจวัดแก๊ส

ในช่วงปี ค.ศ.1950 เป็นต้นมา ได้มีการศึกษากันอย่างจริงจังเกี่ยวกับ ปรากฏการณ์ เปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ที่มีโครงสร้างไม่เป็นไปตามปริมาณสัมพันธ์(non-stoichiometry) อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สบางชนิด ได้ทำให้ สารกึ่งตัวนำบางชนิดได้รับความสนใจในการนำมาประดิษฐ์หัวตรวจวัดแก๊สเป็นอันมาก ทั้งนี้ เนื่องมาจากผลของแก๊สทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงแบบย้อนกลับได้(reversible) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอิเล็กตรอนนำกระแส(conduction band electron) โดยปริมาณของอิเล็กตรอนนำกระแสจะแปรผกผันกับ ความต้านทานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่กว้าง อันเป็นผลมาจากการมีช่องว่างพลังงานต้องห้าม(energy gap)ที่กว้าง ดังเช่น ดีบุกออกไซด์จะมีค่าช่องว่างพลังงานต้องห้ามประมาณ 3.5eV และ สังกะสีออกไซด์ จะมีค่าประมาณ 3.2eV จากค่าช่องว่างพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง พบว่าดีบุกออกไซด์จะมีค่าสูงกว่า ดังนั้นจึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้หัวตรวจวัดแก๊สส่วนใหญ่ถูกประดิษฐ์ขึ้นจากดีบุกออกไซด์มากกว่าสังกะสีออกไซด์

ได้มีการอธิบาย หลักการ และ ทฤษฎีในการทำงานของหัวตรวจวัดแก๊สออกมาใน ลักษณะของแบบจำลอง(model)ต่างๆ มากมาย โดยในแต่ละแบบจะมีพื้นฐานที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการตอบสนองของหัวตรวจวัดแก๊สเป็น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่เกิดขึ้นบนผิวของหัวตรวจวัดแก๊ส สำหรับในที่นี้ จะกล่าวถึง แบบจำลองของ Windischmann และ Mark(1979) เนื่องจากสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายสำหรับการตรวจวัดแก๊สชนิดอื่นได้ ซึ่งในแบบจำลองนี้เป็นการอธิบายหลักการทำงานของหัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากดีบุกออกไซด์ในแบบฟิล์มบาง ที่มีการตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

หัวตรวจวัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ความหนา 500Å ที่สร้างขึ้นโดยวิธีการ RF sputter deposition ถูกนำมาตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 200°C ถึง 500°C จากผลการทดลองพอจะสรุปได้ดังนี้

- ค่าความนำไฟฟ้าของหัวตรวจวัดแก๊สจะแปรผันกับ ค่ารากที่สองของความดันย่อย (partial pressure) ของคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการ[2.1]

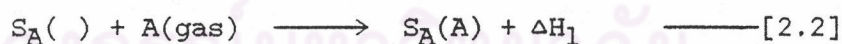
$$G = G_0 + (P_{CO})^{1/2} \quad \text{--- [2.1]}$$

เมื่อ G_0 คือ ค่าความนำไฟฟ้าพื้นหลัง (background conductance)

P_{CO} คือ ความดันย่อยของคาร์บอนมอนอกไซด์

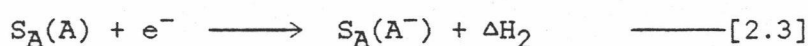
- ในบรรยากาศที่ใช้ทำการทดลองจะต้องมี sensitizing gas เป็นองค์ประกอบ ซึ่งในที่นี้คือ ออกซิเจน
- หัวตรวจวัดแก๊สจะทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม

ในแบบจำลองจะเริ่มต้นจาก sensitizing gas (A) ในบรรยากาศที่ใช้ทดลอง จะเกิด physisorption กับ adsorption site ซึ่งเขียนแทนด้วย $S_A()$ ที่อยู่บนผิวของดีบุกออกไซด์ ดังสมการ[2.2]



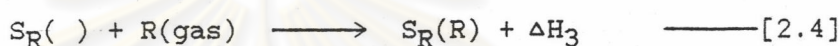
จากสมการ[2.2] ΔH_1 คือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจาก physisorption ของ sensitizing gas

$S_A(A)$ ที่เกิดขึ้นจะดึงอิเล็กตรอน (electron capture) จากดีบุกออกไซด์ดังสมการ[2.3]

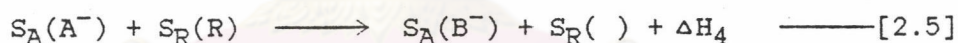


เนื่องจากสมการ[2.2] เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อ $|\Delta H_1| > kT_0$ เมื่อ T_0 คืออุณหภูมิที่ทำให้หัวตรวจวัดแก๊สทำงานได้ สมการ[2.3] เป็นปฏิกิริยาที่ตัดสินว่าปฏิกิริยารวมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเพียงใด (rate-determining step)

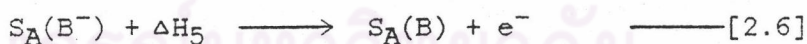
reactant gas ที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆ จะเกิด physisorption กับ $S_R()$ ซึ่งเป็น physisorption site ที่อยู่บนผิวตัวบุงออกไซด์ ดังสมการ[2.4]



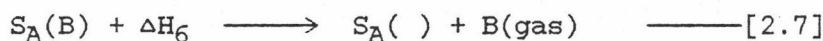
จากสมการ[2.4] ΔH_3 คือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจาก physisorption ของ reactant gas ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาของสมการ [2.4] จะเกิดขึ้นได้เมื่อ $|\Delta H_3| > kT_0$ $S_R(R)$ ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยากับ $S_A(A^-)$ ดังสมการ[2.5]



จากสมการ[2.5] ผลผลิตที่ได้คือ $S_A(B^-)$ ซึ่งจะปล่อยอิเล็กตรอนกลับเข้าสู่ตัวบุงออกไซด์ดังสมการ[2.6]



การปลดปล่อยอิเล็กตรอนในสมการ[2.6]จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อ $|\Delta H_5| < |\Delta H_2|$ และในที่สุด B จะเกิด thermal desorption ออกจาก $S_A(B)$ ดังสมการ[2.7]

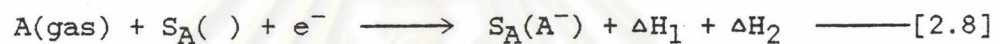


จากสมการ[2.7] ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อ $|\Delta H_6| < kT_0$ ได้ผลผลิตเป็น $S_A()$ ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยากับ sensitizing gas ได้ต่อไป

จากสมการที่[2.2] ถึงสมการที่[2.7] พอจะสรุปปฏิกิริยาที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์ได้ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1.1 Sensitizing reaction

จะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดการดึงอิเล็กตรอนจากดีบุกออกไซด์ ซึ่งทำให้ อิเล็กตรอนนำกระแสมีปริมาณลดลง เป็นผลให้ดีบุกออกไซด์มีการนำไฟฟ้าลดลง ผลรวมของปฏิกิริยาแสดงในสมการ[2.8]



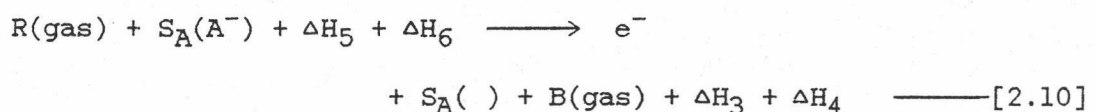
อัตราการเกิดของ A^- บนผิวดีบุกออกไซด์จะแสดงด้วยค่า r ดังสมการ[2.9]

$$r = \beta n S_A() \quad \text{---}[2.9]$$

n คือ ปริมาณอิเล็กตรอนในแถบพลังงานนำกระแสทั้งหมดที่อยู่บริเวณผิวดีบุกออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และ $S_A()$ คือ ปริมาณของ sensitizing site สำหรับเกิด physisorption บนผิวดีบุกออกไซด์ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ และ β คือค่า recombination coefficient

1.2 Detection reaction

จะเป็นปฏิกิริยาที่มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนนำกระแสให้แก่ดีบุกออกไซด์ ทำให้ อิเล็กตรอนนำกระแสมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดีบุกออกไซด์จึงนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลรวมของปฏิกิริยาแสดงในสมการ[2.10]



ฟลักซ์ของ reactant gas ที่มีความดันย่อย P_R ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวดีบุกออกไซด์แสดงได้จากค่า g ดังสมการ[2.11]

$$g = \alpha P_R \text{ (cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}\text{)} \quad \text{---}[2.11]$$

α คือ generation coefficient

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงอิเล็กตรอนนํากระแสจึงแสดงได้จากสมการ[2.12]

$$dn/dt = g - r \text{ (cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{)} \quad \text{---}[2.12]$$

ที่ steady-state $dn/dt = 0$ ดังนั้น

$$\alpha P_R = \beta n s_A(A) \quad \text{---}[2.13]$$

ดังที่ได้กล่าวในตอนต้นถึงค่าความนำไฟฟ้าของหัวตรวจวัดแก๊สซึ่งมีค่าแปรผันกับรากที่สองของค่า P_R และการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับปริมาณของอิเล็กตรอนนํากระแส(n)ดังนั้น

$$\Delta n = s_A(A) \quad \text{---}[2.14]$$

ผลรวมของจำนวน sensitizing sites แสดงในสมการที่[2.15]

$$S_A(\text{total}) = S_A(\text{ }) + S_A(A) + S_A(A^-) \approx S_A(A^-) \quad \text{---}[2.15]$$

จากสมการ[2.15] เมื่อ sensitizing gas มีปริมาณสูงกว่า reactant gas มากๆ ดังนั้นจึงนับได้ว่า $S_A(A^-)$ มีจำนวนคงที่

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณของอิเล็กตรอนนำกระแส(Δn) จะเท่ากับจำนวน $S_A(A)$ ที่เกิดขึ้น ซึ่งการเพิ่มปริมาณของอิเล็กตรอนนำกระแสจะแสดงได้จากสมการ[2.16]

$$n = n_0 + \Delta n \quad \text{—————}[2.16]$$

เมื่อ n คือปริมาณรวมของอิเล็กตรอนทั้งหมด

n_0 คือปริมาณอิเล็กตรอนในขณะที่ไม่ได้มี reactant gas

เนื่องจากความเป็นฉนวนไฟฟ้าของหัวตรวจวัดแก๊ส n_0 จึงมีค่าต่ำกว่า n มากๆ ดังนั้นจึงถือได้ว่าปริมาณของอิเล็กตรอนที่มีการเปลี่ยนแปลง จะมีค่าเท่ากับปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด ทำให้สามารถเขียนสมการ[2.14]ได้เป็นสมการ [2.17]

$$n = S_A(A) \quad \text{—————}[2.17]$$

จากการแทน [2.17] ลงใน [2.13] จะได้เป็นสมการ [2.18]

$$n = (\alpha/\beta)^{1/2} P_R^{1/2} \quad \text{—————}[2.18]$$

จากค่า n ในสมการ[2.18] ซึ่งจะแปรผันกับค่าการนำไฟฟ้า ดังนั้นในสมการ [2.18] จึงแสดงให้เห็นว่า การนำไฟฟ้าของหัวตรวจวัดแก๊สจะแปรผันกับรากที่สองของค่าความดันย่อยของ reactant gas

จากเนื้อหาของแบบจำลองที่ได้กล่าวไปทั้งหมดพอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ในการทำงานของหัวตรวจวัดแก๊ส จำเป็นต้องมี sensitizing gas ซึ่งในแบบจำลองนี้คือ แก๊สออกซิเจน
2. การใช้ช่วงอุณหภูมิของหัวตรวจวัดแก๊สที่เหมาะสม จะทำให้หัวตรวจวัดแก๊สมีการทำงานได้ดี