บทที่ 1 บทนำ

ปัจจุบันมีการก้นกว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอุปกรณ์ที่มีกวามสามารถในการรับรู้ แทนประสาทสัมผัสต่างๆ ของมนุษย์ เพื่อใช้ป้องกันอันตรายต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับชีวิตและร่างกาย เช่น ก๊าซพิษและสารเกมีต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการวิจัย กวามสามารถในการ ตรวจวัดปริมาณสารและกวามแม่นยำในการตรวจวัดต่อชนิดของสาร เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากต่อ กระบวนการผลิตและกวามปลอดภัยในการทำงาน ในด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เพื่อตรวจวัด ปริมาณก๊าซพิษและสารเกมีต่างๆ ที่เป็นอันตรายในบริเวณแหล่งชุมชนและที่อยู่อาศัย ซึ่งเราสามารถ จำแนกความสามารถในการวัดได้เป็นการวัดทางด้านกายภาพ และการวัดทางด้านเกมี

การวัดทางด้านกายภาพ ได้แก่ การวัดปริมาตร, มวล, อัตราการไหล, อุณหภูมิ และความดัน เป็นต้น ส่วนการวัดทางด้านเคมี ได้แก่ การวัดค่าพีเอช, ความเข้มข้น และก๊าซ เป็นต้น เมื่อพิจารณา ถึงการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซนั้น ในปัจจุบันนอกจากวัสดุจำพวกโลหะออกไซด์แล้ว วัสดุประเภทพอลิเมอร์ก็สามารถนำมาเป็นตัววิเคราะห์และตรวจจับก๊าซได้ โดยอาศัยการดูดซับทาง เกมี (Chemical adsorption) และการเปลี่ยนแปลงของก่าความจุไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานไฟฟ้า ของชั้นฟิล์ม เราจะเรียกอุปกรณ์นี้ว่า อุปกรณ์หัวตรวจวัดทางเกมี (Chemical sensor) หรืออุปกรณ์ หัวตรวจวัดก๊าซ (Gas sensor)

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในระยะเริ่มแรกของการพัฒนาการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ จะทำการสร้างบนวัสดุจำพวก แก้ว, เซรามิก และพอลิเมอร์ เป็นต้น โดยทำการอัดขึ้นรูปและเชื่อมต่อสายสัญญาณภายใน ส่งผลให้ โกรงสร้างของหัวตรวจวัดมีขนาดใหญ่ และสามารถผลิตได้เป็นจำนวนน้อยในแต่ละครั้งการผลิด ทำให้มีรากาต่ออุปกรณ์ก่อนข้างสูง ด้วยความต้องการให้ขนาดของหัวตรวจวัดก๊าซมีขนาดเล็กลง และรากาต่ออุปกรณ์ที่ลดต่ำลง ต่อมาเทกโนโลยีซิลิกอนจึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาให้ อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงและสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันนาโนเทกโนโลยีเข้ามามีบทบาท สำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ เทกโนโลยี และวิศวกรรมมากยิ่งขึ้น และกำลังเข้ามาแทนที่เทกโนโลยี ซิลิกอน การพัฒนาเทกโนโลยีในระดับนาโนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมวัสดุระดับนาโน หรือการเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับ โมเลกุล ซึ่งวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบันก็กือ ท่อนาโนการ์บอน

1.2 ซิลิคอนใดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน (SiO₂ - CNTs)

1.2.1 ซิลิคอนใดออกไซด์ (SiO $_2$) [11]

ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) มีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกหลายรูป อะตอมของซิลิคอนจะถูก ล้อมรอบอย่างสมบูรณ์ด้วยอะตอมของออกซิเจนสี่อะตอม แต่ละโมเลกุลของซิลิคอนจะต่อกับ โมเลกุลข้างเกียงโดยใช้อะตอมของออกซิเจนร่วมกัน ทำให้เกิดเป็นสายโซ่และวงที่มีการจัดตัวอย่าง ไม่เป็นระเบียบ



ร**ูปที่ 2.1** แบบจำลองของหน่วยซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของแข็งสี่มุมที่เรียกว่าทรง เหลี่ยมสี่หน้า [11]



ร**ูปที่ 2.2** การจัดเรียงโมเลกุลของซิลิกอนไดออกไซด์ในควอตซ์จะมีการยึดติดระหว่างกันมีแรงดึง ออกทุกทิศทาง [11]

1.2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs)

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube, CNTs) เป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของ โครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากวัสดุที่เป็นธาตุพื้นฐานที่สำคัญคือ คาร์บอน เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความ ยาวถึงประมาณ 10 ใมโครเมตร ท่อนาโนคาร์บอนจึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางหลายพันเท่า มีคุณสมบัติที่แข็งแกร่งกว่าเหล็กกล้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความ ยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา สมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญอย่างมากของท่อนาโนคาร์บอนคือ ความสามารถ ในการเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังสามารถนำความร้อนที่ดีอีกด้วย จึงมีความคิดใน การนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ในงานหลายประเภท เช่น การทำชิพในเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำสายเกเบิล อุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์วัดระดับสารเคมี เป็นต้น

1.3 นิยามของเซนเซอร์

เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่สามารถใช้แทนการตอบสนองทางประสาทสัมผัสของ มนุษย์ เช่น การมองเห็น, การสัมผัส, การได้ยิน, การคมกลิ่น และการลิ้มรส จึงได้มีการสร้างและ พัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัด และแสดงผลออกมาในรูปของ สัญญาณหรือพลังงานในรูปหนึ่ง ซึ่งเราสามารถแยกชนิดของเซนเซอร์และอุปกรณ์ตรวจวัดได้ ออกเป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ (Transducers), แอกทูเอเตอร์ (Actuators) และเซนเซอร์ (Sensors)

ทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณพลังงานจาก รูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง รูปแบบพลังงาน เช่น พลังงานทางกลศาสตร์, ทางความร้อน, ทางแสง และทางไฟฟ้า

แอกทูเอเตอร์ คือ อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าไป เป็นสัญญาณหรือพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ เช่น เปียโซอิเล็กตริก

เซนเซอร์ คือ อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิคหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพลังงานใน รูปแบบต่าง ๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์หัวตรวจวัดความดัน, โฟโด้ทรานซิสเตอร์ และ อุปกรณ์หัวตรวจวัดก๊าซ เป็นต้น



ร**ูปที่ 1.1** การจัดกลุ่มอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) [9]

1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

- 1. เพื่อศึกษาการเตรียมสารละลายซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂)
- 2. เพื่อศึกษาการเตรียมชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs
- 3. เพื่อศึกษาการตอบสนองของชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs

ที่มีต่อก๊าซออกซิเจน,

เอทิลแอลกอฮอล์ และแอม โมเนีย

4. เพื่อพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1. การเตรียมโซลเจลซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)
- 2. การเตรียมชั้นฟิล์ม SiO2-MWCNTs โดยวิธีสปินโคตดิง
- 3. วัคและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม
- 4. กระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ
- 5. ผลตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย
- 6. สรุปผลการทดลอง

1.6 การประยุกต์ใช้งาน

ซิลิกอนไดออกไซด์และท่อนาโนการ์บอนถูกผลิตขึ้นมาใช้งานอย่างแพร่หลายและหลาย ลักษณะ แต่ในที่นี้เราจะเน้นถึงการประยุกต์ใช้งานด้านการตรวจจับก๊าซ สำหรับการสร้าง หัวตรวจวัดก๊าซในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในส่วนของชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซเกิดขึ้นจากการนำวัสดุ สองชนิดรวมเข้าด้วยกันในสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซได้หลายชนิด ในสถานที่ต่าง ๆ ได้ตามต้องการ แต่ในที่นี้มุ่งเน้นถึงการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O₂), เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) และแอมโมเนีย (NH₃) เป็นหลัก ชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซซึ่ง ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์และท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น(SiO₂-MWCNTs) ใช้ ประโยชน์จากปฏิกิริยาของก๊าซที่อยู่ล้อมรอบกับออกซิเจนที่อยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม ทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงก่าความจุไฟฟ้าภายในชั้นฟิล์ม โดยได้ทำการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซบนฐานรองซิลิกอน และใช้เทคนิกโซลเจลในการเตรียมฟิล์ม ทำให้สามารถสร้างหัวตรวจวัดที่มีขนาดเล็ก รากาถูก และ สามารถพัฒนาใช้งานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นได้ในอนาคต

หัวตรวจวัดก๊าซที่มีความแม่นยำและราคาถูก ได้มีการนำมาใช้งานตามสถานที่ต่าง ๆ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม, ทางการแพทย์, ในห้องปฏิบัติการ และบ้านเรือนที่อยู่อาศัย เป็นต้น สถานที่ เหล่านี้จำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับเคมี ในการตรวจสอบและทำการวัดค่าระคับที่อาจ เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ใช้เป็น อุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อป้องกันการรั่วของปริมาณสารพิษ ใช้ตรวจวัดปริมาณก๊าซเพื่อนำไปใช้งานใน ปริมาณที่เหมาะสม เป็นต้น

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 หลักการทางเคมีของโซล-เจลซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO $_2$) [1]

โซล (Solution, Sol) คือของผสมหรือคอลลอยค์ที่มีเฟสรวมกันของสารที่กระจายตัวอยู่ใน สารที่เป็นตัวกลาง ส่วนที่เป็นอนุภาคซึ่งกระจายอยู่ในตัวกลางมักจะเป็นอนุภาคของคอลลอยค์ หรือ กลุ่มของโอกิลิเมอร์ ซึ่งมีขนาคอยู่ระหว่างโมโนเมอร์และโมเลกุลขนาคใหญ่

เจล (Gel) คือสารที่มีโครงสร้างที่เป็นโมเลกุลของแข็งเรียงต่อกัน โดยปลายทั้งสองด้านเป็น เฟสของของเหลวซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสแบบต่อเนื่อง

เมื่อมีการสร้างสารเซรามิกขึ้นจากสารละลายในระบบของโซล-เจล โดยรวมไปถึงการ ตกตะกอนของอนุภาคโลหะออกไซด์จากสารละลาย เริ่มต้นด้วยโซลซึ่งไม่มีความเสถียรเกิดการ รวมตัวกันในลักษณะเป็นเครือข่ายเชื่อมโยงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนได้โครงสร้างที่แน่นรวมตัวกัน ซึ่ง เป็นการเกิดเป็นเจลนั่นเอง

สารตั้งต้นที่ใช้เตรียมโซล กลุ่มที่นิยมใช้ก็คือ กลุ่มอัลโคไซค์ของโลหะ (M(RO_x)) เมื่อ M เป็นไอออนบวกของโลหะ ส่วน R คือกลุ่มของอัลคิลพอลิเมอร์ ในขบวนการโซล-เจล เริ่มต้นด้วย การละลายสารตั้งต้นในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ซึ่งมักจะใช้สารอินทรีย์ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอาศัย 2 ขั้นตอนสำคัญคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยากอนเดนเซชัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮ โคร ไลซิส (Hydrolysis reaction)

$$M(RO)_{x+n}H_2O \to M(RO)_{x-11}(OH)_{11}+nROH$$
 (2.1)

2. ปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (Condensation reaction)

$$MOH+MOR \rightarrow M-O-M+ROH$$
(2.2)

$$MOH+MOH \rightarrow M-O-M+H_2O \tag{2.3}$$

ในช่วงของปฏิกิริยาไฮโครไลซิส ภายในโซลจะมีการสร้างกลุ่มของอัลโคไซค์โอกิลิเมอร์ ขึ้นต่อเนื่องเป็นสายและเริ่มจับตัวเป็นกลุ่มก้อน สุดท้ายหลังปฏิกิริยาคอนเคนเซชันสิ้นสุด กลุ่มของ โมเลกุลที่จับตัวกันนี้ จะมีการเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นกลุ่มของโมเลกุลขนาดใหญ่และกลายเป็น พอ ลิเมอร์ในที่สุด กระบวนการ โซลเจลอย่างง่ายได้แก่ การเตรียม SiO₂ โดย Silicate esteraz ถูก hydrolysis ก่อน แล้วกลั่นตัวที่อุณหภูมิห้อง การ hydrolysis จะช่วยทำให้เกิดหน่วย monomer ของไฮดรอกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยเร่งปฏิกิริยา พอลิคอนเดนเซชั่นที่อาจเกิดขึ้นภายหลัง คล้ายกับปฏิกิริยาเคมีที่ สามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะอื่นๆ [6] การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นไป ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

1. ปฏิกิริยาไฮโครไลซิส (Hydrolysis reaction)

$$(RO)_{3}SiOR + HOH \rightarrow (RO)_{3}SiOH + ROH$$
(2.4)

2. ปฏิกิริยาโพลีเมอร์ริเซชั่น (Polymerization reaction)

$$(RO)_{3}Si - OR + HO - Si(RO)_{3}Si \rightarrow (RO)_{3}Si - O - Si(RO)_{3} + ROH$$
(2.5)

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes)

การค้นพบท่อนาโนคาร์บอนครั้งแรกนั้นเกิดขึ้นด้วยความบังเอิญในปี ค.ศ.1991 ภายหลัง การค้นพบฟูลเลอร์รีน 6 ปี โดยนักวิจัยของบริษัท เอ็นอีซี (NEC) ในห้องทคลองที่เมืองสึคุบา (Tsukuba) ประเทศญี่ปุ่น ชื่อ ซูมิโอะ อิจิมา (Sumio Lijima) ขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่มีกำลังขยายสูงมากตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟูลเลอร์รีนจากกระบวนการยิงด้วย อิเล็กตรอน (electron arc discharge) แล้วสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับรากไม้ เป็นเส้นยาว บาง และจับกันอยู่เป็นกลุ่ม แต่ที่น่าสนใจคือ วัสดุนี้มีโครงสร้างของอะตอมที่เป็นระเบียบและสมมาตร ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือท่อชนิดผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 อิจิมาและ นักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ชื่อ ดอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถ สร้างท่อนาโนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อยในระหว่างการ สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นแกรไฟต์ และป้องกันการ เกิดเป็นฟูลเลอร์รีนขนาดเล็ก จากนั้นท่อนาโนของการ์บอนก็ได้รับความสนใจศึกษามากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างท่อนาโนการ์บอนให้มีขนาดและคุณสมบัติตามที่ด้องการ รวมทั้งการนำ ท่อนาโนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อีกด้วย

2.2.1 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

โมเลกุลของท่อนาโนคาร์บอนประกอบขึ้นจากธาตุการ์บอนเช่นเดียวกับเพชร แกรไฟต์ (graphite) เถ้าถ่าน และบอลนาโนการ์บอนหรือฟูลเลอร์รีน (Fullerene, C60 หรือ C70) แต่มี โครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมการ์บอนล้อมรอบ อะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว ดังรูปที่ 2.1(a) เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะ โควาเลนซ์ของการ์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแกร่งและคงทนมาก ขณะที่แกรไฟต์มีอะตอม การ์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนซ์ของการ์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหก เหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกันเรียกว่าแผ่นแกรฟืน (graphene) และมีพันธะเชื่อมต่อระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 2.1(b) พันธะของการ์บอนในระนาบเดียวกัน ของแผ่นแกรไฟต์นั้นแข็งแกร่งมากแต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนเถ้าถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างกล้ายแกรไฟต์แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือที่ เรียกว่าอสัณฐานของการ์บอน และฟูลเลอร์รีนมีโครงสร้างของการ์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลม กล้ายลูกฟุตบอล ดังรูปที่ 2.1(c)



ร**ูปที่ 2.1** โครงสร้างของ (a) เพชร (b) แกรไฟต์ และ (c) ฟูลเลอร์รีน

โครงสร้างของวัสดุที่กล่าวข้างต้นต่างจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่คล้ายกับแผ่น แกรไฟต์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อนาโนคาร์บอนจึงมีผนังของอะตอมคาร์บอนที่ จัดเรียงพันธะโควาเลนซ์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมและอาจมีบริเวณปลายของท่อปิด ด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของการ์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของฟูลเลอร์รีน ดังรูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอนประเภทนี้เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Singlewall carbon nanotube, SWCNTs)



ร**ูปที่ 2.2** ท่อนาโนการ์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNTs)

ลวคลายตามผนังของท่อนาโนการ์บอนแบบผนังชั้นเดียวนั้นอาจมีลักษณะโครงสร้างที่ แตกต่างกันได้ 3 แบบตามการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน คือ โครงสร้างท่อแบบ armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนตั้ง โครงสร้างท่อแบบ zigzag ที่เกิด จากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนนอน และโครงสร้างท่อแบบ chiral ที่เกิดจากการ ม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก ซึ่งโครงสร้างท่อนาโนทั้งสามแบบนั้น แสดงได้ดัง รูปที่ 2.3 และโครงสร้างที่แตกต่างกันนี้มีผลต่อคุณสมบัติหลายๆ อย่างของท่อนาโน การ์บอน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการม้วนแผ่นแกรไฟต์เป็นท่อนาโน และโครงสร้างของท่อนาโนที่ได้

โครงสร้างของท่อนาท่อนาโนคาร์บอนสามารถค้นพบได้โดยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) ที่มีความเข้มสูง และการใช้เทคนิคของ STM ยืนยันที่ว่าท่อนาโน การ์บอน จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหลายอันที่ไม่ได้เชื่อมกัน ซึ่งแตกแขนงออกมาจาก โครงสร้างที่คล้ายรังผึ้ง ซึ่งทำให้เห็นถึงชั้นอะตอมเดี่ยวของผลึกแกรไฟต์ ซึ่งถูกเรียกว่าแกรเฟสชีส (graphene sheet) ลักษณะโครงสร้างของ SWCNTs สามารถอธิบายได้โดยง่ายในเทอมของยูนิต เซลล์ 1 มิติ ซึ่งแทนด้วยเวคเตอร์ Chี และ Tี

เส้นรอบวงของตัวท่อนาโนการ์บอนต่างๆ แสดงได้ในเทอมของ Chiral vector $C\vec{h} = n\vec{a}l + m\vec{a}2$ โดยการเชื่อมต่อด้านที่มีความสมคุลย์ของเป็นผลึกทั้ง 2 ด้าน บนแกรเฟสซีส 2 มิติ โครงสร้าง แสดงถึงมุม Chiral (Ø) ที่เกิดระหว่าง Chiral vector (Cb) และทิศทาง "Zigzag" (Ø = 0) และ Vectors $\vec{a}l$ และ $\vec{a}2$ ของแกรเฟสซีสทั้ง 3 โครงสร้างของท่อนาโนการ์บอน สามารถเกิดขึ้นจากการ ม้วนของแกรเฟสซีสเข้าเป็นทรงกระบอก โดยจะเกิดเป็นท่อนาโนการ์บอน Zigzag และท่อนาโน การ์บอน Armchair ท่อนาโนการ์บอน Chiral ตามลำดับโดยที่ Chira langle ของ Ø = 0, Ø = 30 ท่อ นาโนการ์บอน Chiral จะมีก่า 0 < Ø < 30 โดยจุดตัวของเวกเตอร์ OB (โดยทั่วไปเป็น Cb) กับจุด พันธะแรกสามารถคิดได้ว่าเป็นเวกเตอร์แปลง 1 มิติพื้นฐาน (T) ยูนิตเซลล์ของพันธะ 1 มิติ คือรูป สี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งกำหนดโดยเวกเตอร์ Cb และ T ทรงกระบอก จะเชื่อมต่อฝาครอบครึ่งซีกทั้งสอง ข้างของตัวท่อนาโนการ์บอนที่ประกอบขึ้นจากการวางซ้อนกันที่จุดปลายทั้งสองของเวกเตอร์ Cb และจุดเชื่อมต่อของทรงกระบอกที่เกิดขึ้นไปตามแนวของเส้นตรง 2 เส้น OB และ AB เป็นเส้นที่ตั้ง ฉากกับเวกเตอร์ Cb = maิ1 + ma2 โดยเวกเตอร์ (n,o) หรือ (o,m) ใช้แทนท่อนาโนการ์บอน Zigzag และเวกเตอร์ (n,n) ใช้แทนท่อนาโนการ์บอน Armchair และเวลเตอร์ (n,m) ใช้แทนท่อนาโน การ์บอน Chiral เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนการ์บอน Armchair และเวลเตอร์ (n,m) ใช้แทนท่อนาโน

dt =
$$\sqrt{3}$$
 ac-c (m² - mn + n²)^{1/2} / π = \vec{Ch}/π , (2.6)

โดยที่ Ch คือความยาวของเวคเตอร์ Ch, ac – c คือความยาวของพันธะ C – C (1.42 Å) และ Chiral angle (Ø) สามารถแสดงได้โดย

$$\emptyset \tan^{-1} \left[\sqrt{3n} / (2m+n) \right]$$
 (2.7)

จากสมการที่ 2.7 จากการที่มุม Ø = 30 สำหรับ (n,n) เป็นท่อนาโนการ์บอน แบบ Armchair และ มุม Ø = 60° สำหรับ (n,o) เป็นท่อนาโนการ์บอน Zigzag จากรูปที่ 2.4 จะเป็นไปตามที่ว่าเรา กำหนด Ø ให้อยู่ระหว่าง 0 ≤ Ø ≤ 30° ดังนั้นโดยการสมมาตรมุม Ø = 0° จะเป็นไปทั้งท่อนาโน การ์บอน Zigzag และท่อนาโนการ์บอน Chiral



รูปที่ 2.4 Chiral angle ซึ่งกำหนดโดยเวกเตอร์ \vec{Ch} และ \vec{T}



ร**ูปที่ 2.5** การเป็นโลหะและสารกึ่งตัวนำของท่อนาโนคาร์บอน

ความแตกต่างในเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน dt และมุม Chiral Ø ทำให้เกิดข้อ แตกต่างในทางคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนต่างๆ เวคเตอร์ที่สมมาตร CR- (W/T) จากกลุ่มของ ความสมมาตรสำหรับท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่ส่วนที่เปลี่ยนแปลง คือ ช่วง ระยะห่างระหว่างของ T และมุมที่หมุนถูกแสดงจำนวนของรูป 6 เหลี่ยม (N) ต่อยูนิตเชลล์ของท่อนา โนคาร์บอน Chiral ถูกระบุโดยค่าต่างๆ ของ (N,N) สามารถแสดงได้ตามสูตร

$$N = 2(n^2 + n^2 + mn) / dR$$
 (2.8)

โดย dR = d ถ้ำ n – m ไม่เป็นผลดูณของ 3d หรือ dR = 3d ถ้ำ n – m เป็นผลดูณ 3d และ d ถูกนิยามว่าเป็นตัวหารร่วมที่มีค่ามากที่สุดของ (n,m) ของแต่ละรูปหกเหลี่ยมในพันธะรูปรังผึ้ง รูปที่ 2.5 ประกอบด้วยอะตอมของการ์บอน 2 อะตอม พื้นที่ของยูนิตเซลล์ของท่อนาโนการ์บอน คือ N มากกว่าชั้นแกรเฟส (graphene layer) และด้วยเหตุนี้พื้นที่ของยูนิตเซลล์สำหรับท่อนาโนการ์บอนใน พื้นที่ว่างตรงกันคือ มีจำนวนน้อยกว่า 1/N รูปที่ 2.5 ชี้ให้เห็นว่าท่อนาโนการ์บอนที่เป็นสารกึ่งตัวนำ และพวกที่เป็นโลหะ

นอกจากท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีท่อที่มีผนังหลายชั้น (Multiwall carbon nanotube, MWCNTs) ซึ่งผนังท่อมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กใน ท่อใหญ่โดยมีจุคศูนย์กลางภากตัดขวางของท่อเป็นจุคเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



ร**ูปที่ 2.6** ท่อนาโนการ์บอนผนังหลายชั้น (MWCNTs)

2.2.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน [10]

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับสมบัติของท่อนาโนที่ ต้องการ แต่วิธีการหลักๆ แบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่

2.2.2.1 วิธีอาร์คดีสชาร์จ (Arc Discharge)

เป็นวิธีเริ่มแรกในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน และเป็นวิธีเดียวกับการสังเคราะห์ฟูล เลอรีน (C₆₀.C₇₀) เป็นการสร้างพลาสมา (Plasma) ที่มีความร้อนสูง ให้เกิดขึ้นระหว่างขั้วคาร์บอน โดยการป้อนแรงคันให้เกิดกระแสไฟสูง ประมาณ 100A ระหว่างแท่งแกรไฟต์ ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm โดย krats chmer et al ในปี 1999 ท่อนาโนคาร์บอนจะเกิดการก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว วิธีนี้มีทั้งที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งจะได้เป็น Singlewalled carbon nanotubes (SWCNTs) และที่ไม่ใช้ โลหะเป็นตัวเร่ง จะได้เป็น Multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) โดยวิธี Arc Discharge เป็น วิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายน้อย แต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปน ค่อนข้างมาก มีประสิทธิภาพของผลผลิต 30-90% โดยวิธีการที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) ที่ส่งผลให้มีการสังเคราะห์ SWCNTs ถูกค้นพบโดย Iijima และ Ichihashi โดยมีเสนอ รายงานในปี 1993 เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่ได้เท่ากับ 1 nm โดยมีการ นำเสนอโลหะผสมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีส่วนผสมคือ นิเกล (Ni) 2.6%, ฟรานเซียม (Fr) 0.7%, เหล็ก (Fe) 0.75% ผลของการสังเคราะห์พบว่า สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้ มากกว่า 1 กรัมต่อชั่วโมง โดย Sun et.al



ร**ูปที่ 2.7** วิธีอาร์คดีสชาร์จ (Arc Discharge)

2.2.2.2 Laser abation vaporization

ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ ในกลุ่มของ Prof. Smalley วิธีนี้ใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูง กระทบกับแท่งการ์บอนผสมโลหะที่อยู่ในเตาอบซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1,200 °C ทำให้เกิดการ์บอน แก๊ส และการ์บอนอะตอมที่ร้อนขึ้น ท่อนาโนการ์บอนที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้จะแตกต่างจากวิธี Arc Discharge ตรงที่ให้ท่อนาโนการ์บอนที่มีความบริสุทธิ์สูงแต่ก่าใช้จ่ายก่อนข้างสูง โดยเริ่มแรก เป็นวิธีที่จะสังเคราะห์ฟูลเลอรีน ต่อมาได้มีการพัฒนาที่จะผลิต MWCNTs โดยใช้เลเซอร์พลังงานสูง กระทบกับแท่งการ์บอน โดยกระบวนการขั้นแรกนี้จะผลิต MWCNTs ได้เพียงอย่างเดียว ต่อมาได้มี การผสมโลหะเข้าไปในแท่งการ์บอนโลหะผสม ได้แก่ โคบอลต์ (Co), นิเกล และพาลเดียม (Rh) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถผลิต SWCNTs ได้ที่มีขนาด 5-20 nm โดยงานวิจัยของ Zhang และ Ijjima



รูปที่ 2.8 วิธี Laser abation vaporization

2.2.2.3 วิธี CVD (Chemical Vapor Deposition)

วิธีดีโพสิชันทางเกมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) นี้สามารถแบ่งตามวิธีการแยก ้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 5 วิธี คือ ดีโพสิชันทางเคมีด้วย ความร้อน (Thermal CVD) ดีโพสิชันทางเกมีของพลาสมา (Plasma enhanced CVD, PECVD) ดีโพสิ ชั้นทางเคมีบนเส้นใยร้อน (Hot filament CVD) ดีโพสิชั่นทางเคมีของเฟสไอ (Vapor phase growth CVD) และดีโพสิชันทางเกมีของก๊าซการ์บอนไดออกไซด์กวามคันสูง (High pressure carbon oxide CVD, HiPCo) ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันคือ ดีโพสิชันทางเคมีด้วยความร้อน เนื่องจาก สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งท่อนาโนชนิดผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น ส่วนวิธีดีโพสิชันทางเคมีของ พลาสมานั้นสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนได้ที่อุณหภูมิต่ำที่สุด (ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส) แต่ท่อนา ้โนที่ได้ส่วนมากจะเป็นชนิดผนังหลายชั้นเท่านั้น ต่อมาวิธีดีโพสิชันทางเคมีบนเส้นใยร้อนมี หลักการเช่นเดียวกันกับดีโพสิชันทางเคมีด้วยความร้อนต่างกันที่วิธีนี้ใช้เส้นใยยาวที่มีอุณหภูมิสูงใน การแยกก๊าซออกเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่คุณภาพของท่อนาโนที่สังเคราะห์ ้ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำอยู่ สุดท้ายวิธีดีโพสิชันทางเคมีของเฟสไอและดีโพสิชันทางเคมีของ ้ก๊าซการ์บอนไดออกไซด์ความคันสูง ใช้ก๊าซของโลหะ เช่น เฟอโรซีน (Fe[CO]5) แทนอนุภาคของ ้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสองวิธีนี้สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนทีละจำนวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือ ้ควบคุมทิศทางและตำแหน่งของท่อได้ไม่ง่ายนัก และใช้ก๊าซที่มีพิษ เช่น คาร์บอนมอนอกไซค์ เป็น สารตั้งต้น

วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) คือ การแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม เช่น แก๊สมีเทน, แก๊สอะเซทิลีนบนโลหะ โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมาเข้ามาช่วยอุณหภูมิ อยู่ระหว่าง 400-1,200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถควบคุมขนาดความยาวของท่อนาโน การ์บอนได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจได้ และที่สำคัญ ที่สุด วิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ โดยมีประสิทธิภาพของผลผลิต 20-90% ซึ่งวิธี CVD นี้ สามารถแบ่งย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกแก๊สและวิธีเตรียมโลหะตัวเร่ง วิธีนี้ ถูกเสนอครั้งแรกโดย Matsu moto et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผ่นภาพของวิธี Filament Assisted Thermal CVD แสดงดังรูปที่ 2.9 ภายในแชมเบอร์ (Chamber) ที่มีไส้หลอดทังสเตน (Tungsten Filament) ทำหน้าที่กำเนิดความร้อนอุณหภูมิของไส้หลอดทังสเตน มีค่าสูงถึง 2,000-2,200 °C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดทังสเตน มีอุณหภูมิ 700-1,000 °C เมื่อแก๊สผสม ระหว่างมีเทนและไฮโครเจนถูกปล่อยเข้าไปในแชมเบอร์ ที่บริเวณไส้หลอดทังสเตนจะเกิดการแตก ด้วของแก๊สขึ้น เป็นไฮโครเจนถูกปล่อยเข้าไปในแชมเบอร์ ที่บริเวณไส้หลอดทังสเตนจะเกิดการแตก ด้วของแก๊สขึ้น เป็นไฮโดรเจนอะตอมและการ์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไบอัสไฟเพื่อเพิ่มความ หนาแน่นของการก่อตัว (Growth) และอัตราการก่อตัวของทิวป์ที่อัตราส่วนระหว่างแก๊สมีเทน (0.5-2%) ต่อแก๊สไฮโครเจน กระทำที่กวามดัน 10-100 ทอร์ วิธี Filament Assisted Thermal CVD นี้เป็น วิธีการที่ง่ายก่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ท่อนาโนการ์บอนที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสังเคราะห์ ท่อ นาโนการ์บอนได้ ในบริเวณกว้างและมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอด ทังสเตนนั้น เนื่องจากผลของการให้กวามร้อนแก่ไส้หลอดทังสเตนนั้นเป็นเวลานาน ไส้หลอด ทั้งสเตนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็น W,C ทำให้หลอดทั้งสเตนเปราะและผิดรูปได้ง่าย



รูปที่ 2.9 แผ่นภาพระบบ Hot Filament activated CVD

2.3 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนในเซนเซอร์เคมี [2]

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคนิคการสร้างโครงสร้างใหม่ที่ลงลึกถึงระดับโมเลกุลหรืออะตอม นิยมใช้ปรับโครงสร้างหรือส่วนประกอบทั้งทางกายภาพ, เคมี หรือชีวภาพเพื่อให้เกิดคุณสมบัติ ใหม่ๆ ขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดี มี เสถียรภาพสูงทุกช่วงอุณหภูมิและเคมี ทั้งยังนำความร้อนได้ดีอีกด้วย ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราส่วน พื้นผิวต่อปริมาตรสูง ท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเส้นผ่านสูนย์กลาง 2-3 นาโนเมตร สามารถยาวได้ ถึง 100 ไมโครเมตร นับว่าเล็กที่สุดในหมู่การ์บอนด้วยกัน แต่แข็งเหมือนเพชรและนำไฟฟ้าได้ดี เหมือนกราไฟต์ (graphite) เพชรถือเป็นวัสดุที่แข็งที่สุดในธรรมชาติและเป็นฉนวนไฟฟ้า ขณะที่ กราไฟต์เป็นวัสดุนำไฟฟ้าเนื้ออ่อนที่สุด (มักทำไส้ดินสอ และหล่อลื่นผิวสัมผัส) คุณสมบัติทาง ไฟฟ้าของ ท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอมและกลไกการผิดรูป (mechanical deformation) เป็นสำคัญ คุณสมบัติทั้งสองทำให้ ท่อนาโนคาร์บอนเหมาะที่จะเป็นเซนเซอร์ ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากไวต่อสารเคมีและไวต่อความกดดันทางกลและกายภาพอย่างมาก สำหรับ หัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการใช้ ท่อนาโนคาร์บอนในเซนเซอร์เคมีเป็นหลัก เทคโนโลยีเซนเซอร์กำลัง ได้รับความสนใจอย่างมาก ทุกวันนี้เราต้องการเซนเซอร์ที่ตอบสนองได้ฉับไว อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์บางอย่าง เช่น ภาพ, เสียง, สัมผัส และกลิ่นยังตรวจจับได้ไม่ดีนัก จำเป็นต้องพัฒนา เซนเซอร์เกมีและฟิสิกส์ต่อไปเพื่อให้ตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมได้ถูกต้องและฉับไวตามต้องการ

2.4 Carbon Nanotube Chemical Sensors [2]

ในระยะ 10 ปีที่ผ่านมา เซนเซอร์เคมีมีมูลค่าทางการตลาดทั่วโลกสูงถึงกว่า 40 ล้านดอลลาร์ ส่วนใหญ่ใช้เพื่อตรวจคุณภาพสิ่งแวดล้อม โดยต้องมีขนาดเล็ก, ใช้พลังงานต่ำ, ตรวจจับได้เร็ว และ ไวต่อกระบวนการทำงานทางอุตสาหกรรม เซนเซอร์ที่ผลิตเพื่อการค้าส่วนใหญ่มุ่งพัฒนาในด้าน ความไว, ความถูกต้อง และเสถียรภาพการตรวจจับเป็นหลัก ทั้งนี้ทีมวิจัยทางค้านท่อนาโนคาร์บอน ได้พิจารณาเซนเซอร์เคมีหลายแบบ ทุกแบบอาศัยหลักการเปลี่ยนคุณสมบัติจำเพาะ เช่น chemiresistors และ back gate field effect transistors ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนการนำไฟฟ้าของท่อนา โนคาร์บอน magnetic resonant sensors อาศัยหลักการเปลี่ยนความถี่จาก mass loading และ optical sensor ซึ่งอาศัยหลักการกระจายและดูดซับแสงของสารเกมีเป็นหลัก

2.4.1 การดูดกลินก๊าซ [9]

การดูดกลืนก๊าซที่พื้นผิวจะประกอบด้วย การดูดกลืนทางฟิสิกส์ (Physisorption) และการ ดูดกลืนทางเคมี (Chemisorption)

1) การดูดกลืนทางฟิสิกส์ จะเป็นการดูดกลืนที่ไม่แข็งแรงระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วไดโพล (dipole-dipole) มีพลังงานยึดเหนี่ยว 0.1 ถึง 0.12 อิเล็กตรอนโวลด์ ($\Delta H_{phys} = 2$ ถึง 5 kcal mol⁻¹) พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบ (ΔH_{phys}) จะเป็นฟังก์ชั่นกับระยะห่าง ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.10 พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบจะมีค่ามากที่สุด เมื่อ ระยะห่างระหว่างพื้นผิวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ตามแบบจำลอง Lennard-Jones และเมื่อพิจารณาปริมาณ การดูดกลืนทางฟิสิกส์จะมีปริมาณเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ดังในรูปที่ 2.11 ปริมาณการดูดกลืนทาง ฟิสิกส์จะมีปริมาณมากในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

 การดูดกลินทางเคมีจะเป็นพลังงานการยึดเหนี่ยว จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการแยก โมเลกุลของก๊าซออกเป็นอะตอม พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบ (AH_{chem}) จะมีค่ามากกว่า 15 kcal mol⁻¹ เมื่ออะตอมเข้าใกล้ผิวจะเกิดพันธะเคมี และพลังงานในการดูดกลินทางเกมีจะมีค่าเป็นลบ และ มากกว่าพลังงานการดูดกลื่นทางฟิสิกส์ ดังในรูปที่ 2.10 และเมื่อพิจารณาปริมาณการดูดกลื่นทาง ฟิสิกส์ จะสังเกตปริมาณเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ดังในรูปที่ 2.11 ปริมาณการดูดกลื่นทางเคมีจะ ปริมาณมากในช่วงที่อุณหภูมิสูง



ร**ูปที่ 2.10** พลังงานการดูดกลืนทางเคมีและทางฟิสิกส์ โดยแบบจำลอง Lennard-Jones มีระยะ ระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ΔE_{A} คือ พลังงานการกระตุ้นในการดูดกลืนทางเคมี (ก) การดูดกลืนทางฟิสิกส์

(ข) การดูดกลืนทางเคมี พลังงานที่สามารถแยกโมเลกุลของอนุภาคจะอยู่ที่ตำแหน่งห่าง ระหว่างพื้นผิวทั้งสองมีก่าเข้าใกล้อนันต์ [9]



รูปที่ 2.11 ปริมาณการดูดกลืนก๊าซที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ [9]

2.4.2 หลักการพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซนเซอร์เคมี [2]

สำหรับแผ่นการ์บอนแกรฟืนที่มีการเรียงตัวการ์บอนเป็นแนวตรง ทำให้อิเล็กตรอนมีการ กระจายตัวสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เมื่อพิจารณาท่อนาโนการ์บอน แผ่นการ์บอนแกรฟืน จะมีลักษณะทรงกระบอก ซึ่งแผ่นการ์บอนแกรฟืนที่มีลักษณะ โก้ง อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนรูป จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในและ นอกแผ่น nanotubes ทรงกระบอก (cylindrical sheet) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบน plane graphene และ CNTs [2]

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการผิครูป ด้านนอกท่อ จึงมีเฉพาะ π-electron ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าเคมี CNTs ขึ้นกับโมเลกุลของก๊าซ CO₂, NO₂, NH₃, O₂ และ C₂H₅OH เป็นต้น โดยมีโมเคลของการยึด เกาะโมเลกุลของก๊าซกับท่อนาโนการ์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



ร**ูปที่ 2.13** แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของก๊าซจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT [4]

หลังการยึดเกาะ (Birding Energy) ของโมเลกุลก๊าซกับ SWCNT จะเป็นฟังก์ชันกับ ระยะทางจากโมเลกุลของก๊าซถึงท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งจากการคำนวณกับโมเลกุลก๊าซของ NO₂ที่มี โครงสร้างการยึดเหนี่ยวกับ SWCNT ตามโมเดลรูปที่ 2.14 จะมี adsorption Energy ประมาณ 0.3 eV และมีระยะยึดเหนี่ยว (Binding Distance) ประมาณ 2.5 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.14



Binding Distance (Angstrom)

ร**ูปที่ 2.14** แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO₂ กับ SWCNT [4]

จะเห็นว่าโมเลกุลของก๊าซที่กล่าวข้างต้นมีการแพร่ที่สูงบนพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน จากการ วิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจาก อะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของก๊าซ จะถูกจ่ายหรือดึงจาก SWCNT ทำให้ SWCNT ซึ่งเป็นสารกึ่ง ตัวนำชนิดพี (p-type) มีประจุ carries หรือ holes มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของ SWCNT หรือ MWCNT จึงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเกมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้

$$CNT + Gas - CNT^{\delta e} Gas^{\delta +} \text{ or } CNT^{\delta +} Gas^{\delta e}$$
(2.9)

เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกจ่าย ระหว่างเกิดปฏิกิริยา

2.5 วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิคอนใดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (SiO₂-MWCNTs)

การวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิคอนใดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (SiO₂-MWCNTs) เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ของฟิล์ม ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอตัวอย่างเทคนิครวมทั้งเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัด และวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของ ฟิล์ม ซึ่งประกอบด้วย

- 1. การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
- 2. เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)
- 3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
- 4. เครื่องวัดกวามหนาฟิล์มบางอิลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer)
- ซึ่งกล่าวในรายละเอียคหัวข้อถัคไป ตามลำคับ

2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

อินฟราเรดและรามานสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง หรือของเหลว หรือแก๊สก็ได้ ถึงแม้ว่าวิธีทั้งสองนี้จะให้ข้อมูลที่คล้ายๆ กัน คือเป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับการเกิดการสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) ของโมเลกุล จริงๆ แล้วเทคนิคทั้งสองนี้มีข้อที่แตกต่างกันตรงที่ กลไกของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสี (radiation) กับโมเลกุลหรือ molecular species เท่านั้น อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเรื่องที่เกี่ยวกับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร แต่รามานสเปก โทรสโกปีเป็นเรื่องของการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) ระหว่างโฟตอนกับโมเลกุลของ สาร พลังงานบางส่วนถูกถ่ายเทไปยังโมเลกุลทำให้เกิดการสั่นและการหมุนของโมเลกุลแล้วเกิดการ กระเจิงออกไป



รูปที่ 2.15 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับอินฟราเรคนี้ได้คำเนินมาเป็นเวลานานแล้ว ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1800 Sir William Herschel ได้ศึกษาเกี่ยวกับ heating effect ในช่วงต่างๆ ของสเปกตรัม และพบว่า heating effect มีมากที่สุด ในแถบของสเปกตรัมที่เลยสีแดง (red end) ไปแล้ว และในช่วงปลายของศตวรรษ ที่ 19 ได้เริ่มมีการศึกษาอินฟราเรคสเปกตรัมแล้ว ในปี ค.ศ. 1910 Coblentz ได้ศึกษาการดูดกลืนแสง อินฟราเรคสเปกตรัมของสารต่างๆ และได้สร้างความสัมพันธ์ของอินฟราเรคสเปกตรัมกับ โครงสร้างของสารขึ้น ซึ่งยังกงใช้อยู่จนกระทั่งปัจจุบันนี้

ในปี ค.ศ.1939-1945 ได้มีการศึกษาและการนำไปใช้ประโยชน์ของอินฟราเรดสเปกโทรส โกปีอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ของผสมพวกไฮโดรคาร์บอนและสารใน กลุ่มใกล้เคียงกันได้ดี จึงมีผู้วิจัยด้านนี้มากขึ้น ทั้งเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์และเครื่องวัดที่มีสภาพไว สูงๆ จนกระทั่งสร้างเครื่องมือทั้งชนิดลำแสงเดี่ยวและลำแสงคู่ขึ้นมาใช้ในการศึกษาอินฟราเรด สเปกตรัม เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของสารที่สนใจจนกลายเป็นงาน ประจำได้

อินฟราเรคเป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมี wave numbers อยู่ในช่วงประมาณ 12,800 ถึง 10 cm⁻¹ หรือมีช่วงความยาวคลื่นจาก 0.78 ถึง 1,000 μm เพื่อให้ง่าย และสะควกขึ้น จะแบ่งช่วงของอินฟราเรคสเปกตรัมออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงใกล้อินฟราเรด (near IR region) หรือ overtone region ซึ่งเป็นช่วงที่อยู่ใกล้กับช่วง วิสิเบิล เกิดจากการรวมกันของ IR ที่อยู่ในช่วงกลาง (นั่นคือ เป็น 2v, 3v เป็นต้น) หรือช่วงที่ต่ำกว่า 2.5 µm และมักจะพบว่า absorption band ที่ได้ค่อนข้างต่ำ (weak) overtone absorption มีประโยชน์ ในการวิเคราะห์สารพวก aromatic compounds หรือ พวก aromatic substitution ช่วงกลางอินฟราเรด (middle IR region) หรือ fundamental region ยังแบ่งออกได้เป็น

 group-frequency region เป็นช่วงที่อยู่ระหว่าง 4,000-1,300 cm⁻¹ หรือ 2.5-8 μm ซึ่ง สเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่ได้จากพวก functional groups แต่ไม่ให้ complete structure

 finger print region เป็นช่วงที่อยู่ระหว่าง 1,300-650 cm⁻¹ สเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วน ใหญ่เกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ ดังนี้ สเปกตรัมที่ได้จึงค่อนข้างยุ่งยาก การวิเคราะห์จึง ต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบโครงสร้างแล้ว

ช่วงใกลอินฟราเรค (far IR region) ช่วงนี้ไม่ค่อยจะได้ใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจาก สเปกตรัมช่วงนี้มักจะเกิดจากการสั่นของโครงสร้าง (molecular structure) หรือเกิดจากการหมุนของ โมเลกุล

ช่วงที่จะใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์นั้นเป็นช่วงกลางอินฟราเรคเป็นส่วนใหญ่ คือจาก 4,000 ถึง 400 cm⁻¹ หรือ 2.5 ถึง 25 μm ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ช่วง (region)	ช่วงความยาวคลื่น	จำนวนคลื่น	ช่วงความถี่ (v)
	(µm)	(Wave Number)	(Hz)
		(cm^{-1})	
ช่วงใกล้	0.78-2.5	12,000-4,000	$3.8 \times 10^4 - 1.2 \times 10^{14}$
ช่วงกลาง	2.5-50	4,000-200	1.2×10^{14} - 6.0×10^{12}
ช่วงไกล	50-1,000	200-10	$6.0 \times 10^{12} - 3.0 \times 10^{11}$
ช่วงที่ใช้มาก	2.5-1.5	4,000-670	$1.2 x 10^{14} - 2.0 x 10^{13}$

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงต่างๆ ของอินฟราเรคสเปกตรัม

กระบวนการดูดกลื่นแสงอินฟราเรด (The Infrared Absorption Process)

โมเลกุลของสารเคมีจะดูดกลืนแสงในช่วงของอินฟราเรด (IR) ได้นั้น ก็จะมีลักษณะ เช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล ดังได้กล่าวมาแล้ว เพียงแต่ต่างกันที่ IR มีพลังงานน้อย กว่า ดังนั้น โมเลกุลเมื่อดูดกลืนแสง IR โมเลกุลจะถูกกระตุ้น (excite) เป็นโมเลกุลที่มีพลังงานสูง กว่าอยู่ที่สภาวะพื้น โดยมีพลังงานเปลี่ยนแปลงอยู่ในราว 2-10 kcal/mole ซึ่งเป็นพลังงานพอที่จะทำ ให้ โมเลกุลเกิดการสั่น (vibration) หรือ เกิดการหมุน (rotation) เท่านั้น การดูดกลืนแสง IR ของ โมเลกุลมิใช่ว่าทุกโมเลกุลของสารจะดูดกลืนแสง IR ได้หมด แต่จะต้องมีลักษณะเฉพาะ สภาวะกี ต้องเหมาะสมด้วย คือ

1. รังสีหรือแสงนั้นจะต้องมีพลังงานพอเหมาะพอดี (quantisc) ที่จะทำให้เกิดแทรนซิชัน

2. จะต้องเกิดการควบคู่ (coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้น เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเลกุลขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไป ดังนั้น เมื่อใช้ IR ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารใดก็ตาม แล้วเกิดปรากฎการณ์ทั้งสองอย่าง ข้างบนนี้ เรียกสารนั้นว่า IR active ถ้าไม่มีการเปลี่ยนโมเมนต์ขั้วกู่ แสดงว่าสารนั้นเป็น IR inactive ถือว่าไม่มีการดูดกลืนแสง IR ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วกู่มากจะได้ IR absorption peak สูง ถ้า เปลี่ยนแปลงน้อยก็จะได้ weak absorption peak เช่น

สารที่มีกลุ่ม C = O ให้ strong IR absorption peak แต่กลุ่ม –C = N- ให้ weak IR absorption peak และ โมเลกุลที่เป็น symmetric bond เช่น H₂, Cl₂, O₂, N₂, symmetric alkenes (C-C) หรือ symmetric alkynes (C=C) เป็นต้น จะไม่ดูดกลืนแสง IR

ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer Components)

ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรคสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ก็มีลักษณะคล้ายๆ เครื่องยูวี-วิสิ เบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แต่การจัด (arrangement) อาจแตกต่างกันบ้าง ส่วนประกอบที่สำคัญคือ

- 1. ด้นกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR Source)
- 2. เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample Cell)
- 3. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)
- 4. เครื่องวัดแสงอินฟราเรด (IR Detector)
- 5. เครื่องบันทึกสเปกตรัม (Recorder หรือ Readout Devices)



ร**ูปที่ 2.16** แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR Source) ที่ใช้กันทั่วไปนั้นเป็นของแข็งที่เฉื่อย ซึ่งสามารถเผา ให้ร้อนด้วยไฟฟ้า จนมีอุณหภูมิประมาณ 1,500-2,000 K ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะให้แสงมีความเข้ม สูงสุดที่ความถี่ประมาณ 5,000 cm⁻¹

เนินสต์ โกลเวอร์ (The Nernst glower) เป็นแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรคที่ใช้กันมากที่สุด ซึ่งทำด้วยออกไซด์ของพวกธาตุแรร์ เอิร์ท (rare earth oxides) เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 1-2 มม. ยาวประมาณ 2 ซม. ต่อด้วยลวดแพลตินัมเพื่อกุ้มกันไฟฟ้า อุณหภูมิที่ใช้ งานสามารถเผาได้ถึง 1,800 K ที่สำคัญที่ต้องควบคุมคือ ใช้กระแสอย่าให้สูงเกินไป เพราะจะทำให้ หลอดเสียได้ เนื่องจากร้อนจัดเกินไป

โกลบาร์ (Globar) เป็นแท่งซิลิคอนการ์ไบด์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มม. ยาว ประมาณ 5 ซม. เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ร้อนขึ้นถึงอุณหภูมิ 1,300-1,500 K โกลบาร์ให้ ความเข้มของแสงที่บริเวณ 1,500 cm⁻¹ มากกว่าเนินสต์ โกลเวอร์

Incandescant Wire Source ใช้ถวดนิโครมหรือโรเดียมพันให้เป็นขดถวดแถ้วหุ้มด้วย เซรามิก เป็นรูปทรงกระบอก ขดถวดนี้เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจะถูกทำให้ร้อนแดง อายุการใช้งานจะ ดีกว่า 2 ชนิดแรก แต่ให้ความเข้มของแสงน้อยกว่า

โมโนโครเมเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยช่องแสงผ่าน (Slits) เกรตติง (Grating) หรืออาจมี ฟิลเตอร์ (filter) ประกอบด้วยก็ได้ ซึ่งส่วนนี้จะมีลักษณะเหมือนกับระบบโมโนโครเมเตอร์ในเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ทุกประการ

เครื่องวัดแสงอินฟราเรด (IR Detectors) เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรคที่ผลิตได้ใน ปัจจุบันล้วนเป็นพวกที่ให้ความเข้มต่ำ ประกอบกับแสงอินฟราเรคเป็นแสงที่มีพลังงานต่ำ จึงทำให้ การตรวจวัดก่อนข้างยุ่งยากกว่าการตรวจวัดแสงยูวีและวิสิเบิล เพราะพลังงานไม่พอที่จะทำให้เกิด อิเล็กตรอนในหลอดวัดแสง (phototube) ได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดอย่างอื่น ในปัจจุบัน เครื่องวัดแสงอินฟราเรดที่ใช้กันอยู่แบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ

 อาศัยหลักการทาง Photoconductive effect ซึ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวน เป็นแบบ Photon detector

 อาศัยหลักการ Heating effect โดยที่แสงอินฟราเรคถูกดูดกลื่นจะเกิดความร้อนขึ้นแล้ว ทำให้ความด้านของเส้นลวดในเครื่องวัดเปลี่ยนแปลง เรียกว่า Thermal Detector ซึ่งใช้เป็นเครื่องวัด ที่ครอบคลุมความยาวคลื่นได้กว้างขวาง

โฟตอน ดีเทคเตอร์ (Photon Detector) ประกอบด้วยแผ่นแก้วที่เป็นฉนวนแล้วฉาบบางๆ ด้วยสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น ตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วแทลเลอไรด์ อินเดียมแอนทิโมไนด์ หรือ เจอร์เมเนียม (Ge) ที่โดปด้วยทองแดงหรือปรอท แผ่นกึ่งตัวนำนี้บรรจุอยู่ในกล่องสุญญากาศ เพื่อ ไม่ให้สารกึ่งตัวนำทำปฏิกิริยากับบรรยากาศ เครื่องวัดนี้เมื่อถูกแสงที่มีพลังงานสูงพอจะทำให้เกิด การลดความต้านทานลง สำหรับตะกั่วซัลไฟต์ไวต่อแสงในช่วง 1-3 µm หรือ 10,000 ถึง 2,000 cm⁻¹ โดยมี response time ประมาณ 10 µsec แต่ถ้าใช้สารอื่นและทำให้เย็นด้วยไนโตรเจนเหลวหรือ ฮีเลียมเหลว จะทำให้เครื่องวัดนี้มีสภาพไวดีขึ้นไปในทางความยาวกลื่นมากขึ้น และมี response time เร็วขนาด 20x10⁻² วินาที

เทอร์มัลดีเทลเตอร์ (Thermal Detector) โดยอาศัยสมบัติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความ ร้อนของสารเมื่อได้รับแสงอินฟราเรด ได้ถูกนำมาใช้สำหรับทำดีเทกเตอร์เพื่อวัดแสงอินฟราเรด ซึ่ง อาจจำแนกออกได้เป็น 4 แบบด้วยกันคือ

แบบที่ 1 เป็นเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) หรือเทอร์โมไพล์ (Thermopile) ดีเทค เตอร์ชนิดนี้นิยมใช้กันมากสำหรับวัดแสงอินฟราเรค ประกอบด้วยแผ่นทองสีดำ (blacken gold foil) เชื่อมเข้ากับลวดโลหะเล็กๆ 2 ชนิดที่ต่างกัน หรือเป็นลวดแพลทินัม (Pt) เชื่อมกับลวดเงิน หรือลวด พลวงเชื่อมกับบิสมัท เมื่อทำให้ปลายที่เชื่อมทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยที่ปลายหนึ่ง (reference junction) จะป้องกัน ไม่ให้ถูกแสงเลย และให้อุณหภูมิคงที่อีกปลายหนึ่งให้รับแสงอินฟราเรค เทอร์โมไพล์เป็นชื่อของดี เทคเตอร์ที่ได้จากการเอาเทอร์โมคับเปิลหลายอันมาต่อกันเข้าแบบอนุกรม เพื่อให้ได้ แรงเคลื่อนไฟฟ้ามากขึ้น ดีเทคเตอร์ชนิดนี้ถ้าออกแบบดีแล้วสามารถบอกความแตกต่างของอุณหภูมิ ได้ถึง 10⁻⁵ °C หรือเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสอง 6-7 µv/µw และมี response time ประมาณ 100 m.sec

แบบที่ 2 เรียกว่า เทอร์มิสเตอร์ (Thermister) หรือโบโลมิเตอร์ (Bolometer) สำหรับโบโล มิเตอร์เป็นดีเทคเตอร์ประเภทอาศัยการเปลี่ยนแปลงความด้านทานของลวคโลหะ เมื่อทำให้อุณหภูมิ เปลี่ยนแปลง เช่น ประกอบด้วยลวดแพลทินัม หรือลวดนิกเกิลเล็กๆ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความ ด้านทานเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิเปลี่ยนมีค่าสูง (~0.4% ต่อ °C) แต่ถ้าเป็นเทอร์มิสเตอร์ จะทำด้วย ออกไซด์ของโลหะบางชนิด เช่น ออกไซด์ของโคบอลต์ หรือนิกเกิล ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความ ด้านทานเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิเปลี่ยนมีค่าสูง (4-7% ต่อ^oC) ทั้งนี้โดยทำเป็น 2 ชุดเหมือนกัน ชุด หนึ่งจะไม่ให้ถูกแสงเลย แต่อีกชุดหนึ่งให้รับแสงอินฟราเรด แล้วนำไปต่อเข้าวงจรเป็นแบบ wheatstone bridge

แบบที่ 3 เรียกว่า โกเลย์ (Golay) หรือนิวมาติกดีเทคเตอร์ (Pneumatic Detector) หลักการที่ ใช้ในการทำดีเทคเตอร์ชนิดนี้คือ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดความดันของแก๊สเลื่อยใน ภาชนะปิดเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้น แก๊สเฉื่อยจะบรรจุไว้ในภาชนะรูปทรงกระบอกเล็กๆ ด้านที่รับ แสงอินฟราเรดจะเป็นโลหะสีดำอยู่กับที่ ด้านตรงข้ามเป็นไดอะแฟรมที่ทำด้วยเงินให้เคลื่อนไหวได้ เมื่อโลหะสีดำได้รับแสงอินฟราเรดจะถูกถ่ายเทความร้อนไปยังแก๊สเฉื่อย ทำให้เกิดความดันขึ้นไป ดันแผ่นไดอะแฟรมเงิน ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไป การบิดเบี้ยวไปทำให้แสงสะท้อนไปยังหลอดวัด แสง (phototube) เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นแตกต่างกันตามปริมาณของแสงอินฟราเรด หรืออาจใช้หลัก ของการเปลี่ยนความจุ (capacitance) ก็ได้ โกเลย์ดีเทคเตอร์นี้ราคาค่อนข้างแพง แต่เมื่อเปรียบเทียบ กับดีเทคเตอร์ชนิดอื่นๆ แล้วปรากฏว่ามีสภาพไวในช่วงใกล้หรือกลางอินฟราเรดเท่าๆ กับ เทอร์โมคัปเปิล แต่ถ้าใช้ในช่วงต่ำว่า 200 cm⁻¹หรือช่วงไกลอินฟราเรดจะดีมาก

แบบที่ 4 เรียกว่า ไพโรอิเล็กทริกดีเทคเตอร์ (Pyroelectric Detector) ดีเทคเตอร์นี้เพิ่งจะ ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับวัดแสงอินฟราเรคเมื่อไม่นานมานี้ โดยใช้ผลึกของสารบางชนิด เช่น ไตรไกลซีนซัลเฟต (Triglycine sulphate, TGS) หรือดิวเทอเรตไตรไกลซีนซัลเฟต (DTGS) หรือลิเทียมแทนทาเลต หรือแบเรียมไททาเนต เป็นต้น ผลึกเหล่านี้มีสมบัติเกี่ยวกับโมเมนต์ขั้วคู่ของ มันไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถ้านำผลึกเหล่านี้ไปไว้ระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่เป็นแผ่น โลหะ แล้วต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าภายนอก เป็นเหตุให้มีกระแสไหลในวงจรเพื่อทำให้การกระจายของ ประจุกลับเข้าสมดุลใหม่ การเกิดกระแสเนื่องจากความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดี เทคเตอร์ชนิดนี้ให้ response time เร็วกว่า จึงเป็นที่นิยมใช้ทำดีเทคเตอร์ของเครื่องใน Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

เครื่องบันทึกสเปกตรัม หรือ Read Out Devices สัญญาณที่ได้จากดีเทคเตอร์ซึ่งเป็น สัญญาณที่น้อยจำเป็นจะต้องเข้าเครื่องขยายสัญญาณเสียก่อน ก่อนที่จะเข้าเครื่องบันทึกหรือเครื่อง อ่านสัญญาณเช่นเดียวกับเครื่องยูวี-วิสิเบิล สปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งอาจเป็นเครื่อง recorder, printer, video display terminals หรือ cy plotters เป็นต้น

2.5.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชน ก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิด คือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอม ในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและ หักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมี การกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path different) เป็นจำนวนเท่า ของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.10



รูปที่ 2.17 การตกกระทบของการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

$$N\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \tag{2.10}$$

โดยที่ N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3.....

- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
- d_{bkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
- θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

ระนาบต่างๆ ของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตก กระทบแล้วกระเงิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.17 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่ เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X-Ray Diffractometer ดังแสดงในรูปที่ 2.18 นำ ค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก



รูปที่ 2.18 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้ เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการ เลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบน และยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอ สำหรับธาตุหรือ สารประกอบชนิดเดียวกัน

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็น ผลึกของฟิล์มบางได้ดังนี้

ค่าคงที่แลตทิช (Lattice constant) จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์แอมปลิจูดของการ เลี้ยวเบนของคลื่นคือ F เวกเตอร์คลื่นของระนาบคลื่นที่ตกกระทบคือ k เวกเตอร์คลื่นของคลื่น สะท้อนคือ k' ดังนั้น

$$\mathbf{F} = \int \mathbf{n}_{\mathrm{G}} \mathbf{e}^{\left[i\left(\mathbf{G}^{+}\mathbf{k}^{-}\mathbf{k}^{'}\right)\right]} \tag{2.11}$$

โดยที่ n_g คือ แอมปลิจูดของการเลี้ยวเบน

G คือ แลตทิสส่วนกลับ (Reciprocal lattice) สามารถหาค่าแลตทิสส่วนกลับได้จากสมการ

$$\vec{\mathbf{G}} = \vec{\mathbf{k}'} \cdot \vec{\mathbf{k}}$$
(2.12)

ເນື່ອ

$$\left|\vec{\mathbf{k}'}\right| = \left|\vec{\mathbf{k}}\right| = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2.13}$$

จะได้

$$|\mathbf{G}|^{2} = \vec{\mathbf{G}}.\vec{\mathbf{G}} = (\vec{\mathbf{k}}' - \vec{\mathbf{k}}).(\vec{\mathbf{k}}' - \vec{\mathbf{k}}')$$
(2.14)

$$|G|^{2} = G.G = 2|k|^{2} - 2\vec{k}'\vec{k}$$
 (2.15)

$$|\mathbf{G}|^{2} = 4 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{2} (1-\cos 2\theta)$$
(2.16)

เมื่อ 20 คือมุมระหว่าง $\vec{\mathbf{k}}$ และ $\vec{\mathbf{k}}'$ แก้สมการหาค่า λ จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{4\pi}{|\vec{G}|} \sin\theta \tag{2.17}$$

และจากสมการการหาค่าของ $|G|^2$

$$|G|^{2} = \left(\frac{2\pi}{a}\right)^{2} (h^{2}+k^{2}+l^{2})$$
 (2.18)

เมื่อ h, k และ 1 คือ ตัวเลขระนาบของผลึก จะได้สมการของค่าคงที่แลตทิชเป็น

$$a = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$
(2.19)

โดยที่ a คือ ค่าคงที่แลตทิช

- λ_{x} คือ ค่ากวามยาวกลิ่นของรังสีเอ็กซ์
- θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

2.5.3 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ใน การส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างชิ้นงาน ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิว แล้วแสดงผลบนจอ (Cathode Ray Tube, CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวคำ มีกำลังขยาย 10 ถึง 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงานคือ เมื่ออิเล็กตรอนกระทบชิ้นงานทำให้ เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron, SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณแล้วนำ สัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT

หลักการทำงานของเครื่อง (Scanning Electron Microscope, SEM) ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า แก โทค (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 ถึง 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) พร้อม ทั้งมีกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่ไฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราคไปบนผิวตัวอย่างโดยขคลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coil) บน ระนาบ x y สิ่งสำคัญของการทำงานบนเครื่อง SEM คือการเลือกสัญญาณอิเล็กตรอนกับอะตอมของ ชิ้นงานมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของปฏิกิริยาอิเล็กตรอนต่อชนิดของชิ้นงานขึ้นอยู่กับ องก์ประกอบของธาตุในเนื้อชิ้นงานตัวอย่าง และกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณ แบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron, PE) ถ่ายโอนพลังงาน ให้แก่อะตอมของตัวอย่างบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่า พลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีก ทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของ ตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะหลุดออกมาจากชั้น กวามลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ด ลอดออกมา



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบภายในเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 2.20 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกคึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่าง อิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ใน กรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกคึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณ อิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจากสัญญาณ อิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกคึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกใบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนเข้าสู่ บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก CaF₂ และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบาง ทำหน้าที่เป็น Collector ป้อน แรงดันไบแอสที่ 12 kv ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตามท่อนำแสง เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไป เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วจึงทำการขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำ อิเล็กตรอนจะถูกกวบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการ กราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณ ต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุมควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความ มืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกราคบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอน ในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้น จึงเกิดกวามสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

้ กำลังขยาย = พื้นที่บน CRT/พื้นที่ของการกวาคบนชิ้นงานของลำอิเล็กตรอน (2.20)

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้ว ยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย ซึ่งลักษณะ ความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการ กราดมีความเร็วสูง เราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกราด

2.5.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มบางด้วยเครื่อง Ellipsomter

การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มบางด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsomter) เป็นการวิเคราะห์ ผลของการสะท้อน (Reflection) ด้วยหลักการ โพลาไรเซชัน (Polarization) ของแสงเลเซอร์ตก กระทบผิวของวัสดุ ใช้ประโยชน์เพื่อการวิเคราะห์และพัฒนาคุณภาพของฟิล์ม ประกอบด้วยตัวแปร ของค่าคงที่ทางแสง (Optical constants) ถ้าผิวของวัสคุถูกปกคลุมด้วยฟิล์มลักษณะ โปร่งแสง ข้อมูล ที่ได้จะเกี่ยวข้องกับความหนาและค่าคงที่ทางแสงของฟิล์ม เช่น ค่าดัชนีหักเหแสง (Reflection of Index) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) ในด้านกระบวนการผลิต สามารถใช้หาค่าเปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอของฟิล์ม (Thickness uniformity%) เพื่อใช้ในการพัฒนา กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มต่างๆ



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบภายในของเครื่อง Ellipsomter

เครื่องอิลลิปโซมิเตอร์แบบช่วงความขาวคลื่นเดียว (Single wave Lange) จะใช้แหล่งจ่าย พลังงานแสงเลเซอร์กำลังต่ำในข่าน Class II เป็นแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (HeNe Laser) ที่มีความขาวคลื่นแสงเท่ากับ 633 นาโนเมตร และสำหรับเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์แบบช่วง ความขาวคลื่นคู่ (Dual wave Lange) จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด จากฮีเลียม-นีออน (HeNe Laser) ที่ความขาวคลื่นแสง 633 นาโนเมตร และเลเซอร์ไดโอด (Laser diode) ที่ความขาว คลื่นแสง 780 นาโนเมตร โดยทั่วไปจะมีขนาดลำแสง (Spot Size) ประมาณ 12x22 ไมโครเมตร แสง เลเซอร์เหล่านี้จะถูกส่งผ่านตามแนวเส้นทางแสง (Optical axis) โดยผ่านปริซึมโพลาไรเซอร์ (Polarizer prism) เพื่อเปลี่ยนลำแสงจากวงกลมเป็นเชิงเส้น (Linearly polarized light) ลำแสงจะมี ความเข้มคงที่ และถูกเปลี่ยนกลับเป็นวงกลมโพลาไรซ์ จากอุปกรณ์ที่เรียกว่า ควอเตอร์เวฟ กอมเพนเซเตอร์ (Quarter wave Compemsator) ที่ถูกแทรกเข้าไปในแนวเส้นทางเดินของแสง (หรือ ยังคงเป็นเส้นตรง เมื่อคอมเพนเซเตอร์ถูกดึงออกจากแนวเส้นทางเดินของแสง) การแทรกเข้าไป หรือการดึงออกไปของ +90° คอมเพนเซเตอร์จะเป็นโดยอัตโนมัติภายใด้การควบกุมด้วยโปรแกรม ของคอมพิวเตอร์ แล้วแสงที่ได้ (ด้วยการแทรกเข้าไป หรือดึงออกมาของ +90° คอมเพนเซเตอร์ใน แนวทางเดินของแสง) จะถูกฉายลงบนผิวของแผ่นชิ้นงาน และสะท้อนไปยังอุปกรณ์ด้วตรวจงับทาง แสง (Photo detector)



รูปที่ 2.22 เครื่อง Ellipsomter

แสงที่สะท้อนจะผ่านปริซึมอนาไลเซอร์ และตรวจวัดด้วยตัวตรวจจับทางแสงเป็นอุปกรณ์ เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า และแปรโดยตรงกับความเข้ม (Intensity) ของแสงที่สะท้อน ผ่านตัวอนาไลเซอร์ โดยมีตัวกรอง (Filter) ทำหน้าที่ป้องกันแสงอื่นๆ ที่อาจแทรกสอดระหว่าง ปรึซึมอนาไลเซอร์กับตัวตรวจจับแสง ผลการวัดค่าความหนาฟิล์ม, ค่าดัชนีหักเหแสง, และค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ถูกยืนยันด้วยค่า Fit error ซึ่งเป็นการคำนวณทางสถิติ โดยค่า Fit error ที่ยอมรับต้องมีค่าไม่เกิน 1.00 หรือมากกว่าตามชนิดของฟิล์มที่ทำการตรวจสอบ

2.6 การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอร์ริง

การสร้างฟิล์มบางโดยกระบวนการเคลือบฟิล์ม (Thin film deposition) นั้น มีอยู่หลาย เทคนิคที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยถ้าแบ่งตามกลไกการก่อตัวของชั้นฟิล์มบาง สามารถแบ่งออก ได้ 2 เทคนิค คือ กระบวนการเคลือบฟิล์มบางทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD) และ กระบวนการเคลือบฟิล์มบางทางเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ดังแสดงภาพรวมในรูปที่ 2.23



ร**ูปที่ 2.23** เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง

2.6.1 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอร์ริง

การสปัตเตอร์ริง (Sputtering) คือ ขบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสคุถูกทำให้หลุดออกมา ด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และ โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่ง เข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ การสปัตเตอร์ริงมีกระบวนการที่สำคัญดังนี้

1. อาศัยการคิสชาร์จไฟฟ้าของก๊าซอาร์กอน (Ar) ทำให้เกิคการแตกตัวเป็นไอออน

2. จากนั้นทำการเร่งไอออน ให้วิ่งชนเป้าสารเคลือบ (Target) ที่ต่ออยู่กับขั้วลบของ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

 เป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของก๊าซ อะตอมของเป้าสารเคลือบจะหลุดออกมา และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมายังแผ่นฐานรองในทุกทิศทุกทาง จากพลังงานของอนุภาคสารเคลือบ ที่หลุดมานั้นมีค่าสูงมาก ดังนั้นอนุภาคสารเคลือบที่ได้จากการสปัตเตอร์ริงที่ตกกระทบแผ่นฐานรอง จะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อแผ่นฐานรอง



รูปที่ 2.24 กลไกการเคลือบฟิล์มระบบสปัตเตอร์ริง

2.6.2 อันตรกิริยาระหว่างใอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

เมื่อเป้าสารเคลือบที่เป็นของแข็งถูกชนโดยไอออนจะเกิดปรากฏการณ์ดังรูปที่ 2.25 สามารถอธิบายพฤติกรรมของไอออนในลักษณะต่างๆ กันดังนี้

 1. ไอออนที่สะท้อนกลับจากผิวหน้า ส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากการ รวมตัวกันกับอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ

การชนของไอออน ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary electron) ออกจากเป้าสารเคลือบ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ

 3. ใอออนที่ฝังตัวลงในผิวสารเคลือบ (Ion implantation) มีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อ พลังงาน ใอออน 1 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ (keV) สำหรับ ใอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในเป้าสาร เคลือบที่เป็นทองแดง

การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบ
 ใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect) เราเรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของ
 โครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered Surface Layers

การเปิดปรากฏการณ์ในแต่ละแบบนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิด และพลังงานของไอออนบวกที่เข้า ชน สำหรับในกรณีการเกิดสปัตเตอร์ริงจะเกิดได้ดีในช่วงพลังงานของไอออนบวกประมาณ 0.1 ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์


รูปที่ 2.25 เปรียบเทียบลักษณะการชนของลูกบิลเลียตกับการสปัตเตอร์ริง

กล ไกของการสปัตเตอร์ริงอาจเปรียบเทียบ ได้กับการชนของลูกบิลเลียด ดังรูปที่ 2.25 พิจารณาให้อนุภาคทั้งหมดเป็นทรงกลมแข็ง โดยให้ไอออนบวกเป็นลูกขาว (Cue Ball) และให้ อะตอมที่ผิวเป้าสารเคลือบเป็นลูกสี (Colored Ball) ที่เรียงกันเป็นระเบียบ การชนของลูกขาวจะทำ ให้ลูกสึกระทบกันเป็นทอดๆ แล้วกระเจิงออกทุกทิศทุกทางรวมทั้งในทิศทางย้อนกลับ ซึ่งเปรียบได้ กับอะตอมถูกสปัตเตอร์ออกจากเป้า ในความเป็นจริงจะมีแรงระหว่างอะตอมซึ่งจะแตกต่างจากกรณี

ของลูกบิลเลียด แต่แบบการจำลองการชนนี้ก็สามารถอธิบายได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด การที่ไอออนบวกชนเป้าสารเคลือบ แล้วมีการถ่ายทอดโมเมนตัมให้กับอะตอมของผิวเป้า สารเคลือบที่อยู่นิ่ง เป็นกลไกที่นำไปสู่การสปัตเตอร์อะตอมออกจากผิวของเป้าซึ่งดังรูปที่ 2.26 ใน การชนไอออนบวกจะชนผิวของเป้า 2 หรือ 3 อะตอมเกือบพร้อมๆ กัน อะตอมที่ถูกชนตอนแรกยัง ไม่ถูกสปัตเตอร์ แต่เป็นอะตอมที่ถูกชน การชนจะมีสองลักษณะคือ แบบแรก อะตอมถูกชนใน ลักษณะ Low energy knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวขนานกับผิวของ เป้า มีการเคลื่อนด้วในแนวเฉียงด้านข้างกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้า ซึ่งมีอยู่ให้หลุดออกเป็นการชน เพียงครั้งเดียว แบบที่สอง อะตอมถูกชนในลักษณะ Primary knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัม ส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวพุ่งเข้าสู่เป้า อะตอมจะเคลื่อนตัวลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไปทำให้ดัวมัน เองสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออก หรือมีการชนต่อไปอย่างต่อเนื่องจนทำ ให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศเปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออน บวกที่เข้าชนอะตอมเหล่านี้ก็จะกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกในที่สุด



ร**ูปที่ 2.26** การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปัตเตอร์ริง

2.6.3 กระบวนการชนในบริเวณที่ก๊าซเกิดการแตกตัว

หลักการทำให้ก้าซเกิดการ ไอออ ในซ์ และมีสถานะเป็นพลาสมาดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ก๊าซที่เกิดการ ไอออ ในซ์จะมีความคันตั้งแต่ 1 มิลลิทอร์ (mTorr) ขึ้นไป แหล่งกำเนิดเริ่มต้นของการ เกิด ไอออ ในซ์คือ การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอม แต่เนื่องจากว่าการชนกันดังกล่าวจะมีทั้ง การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelatic collision) ซึ่งการชน แบบยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซหรือ ไอออน จะมีการถ่ายพลังงานจากอิเล็กตรอน ไปยังอะตอมหรือ ไอออนที่ถูกชนมีค่าต่ำ ทั้งนี้เพราะว่ามวลของอิเล็กตรอนกับมวลของอะตอมหรือ ไอออนมีค่าแตกต่างกันก่อนข้างมาก

ในขณะที่ก๊าซแตกตัวและมีสถานะเป็นพลาสมา จะมีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้นเป็น จำนวนมาก การชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมจะทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ แสดงกวามสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{e} + \mathbf{G}^0 \to \mathbf{G}^+ + 2\mathbf{e}^- \tag{2.21}$$

โดยที่ G⁰ คือ อะตอมของก๊าซที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุด (Ground state) G⁺ คือ ไอออนของก๊าซที่มีประจุบวก

ถ้าให้อะตอมของก๊าซที่ถูกชนเป็นก๊าซอาร์กอน (Ar) แล้วเกิดการไอออในซ์ ดังนั้น กวามสัมพันธ์ (2.22) เขียนได้ดังนี้

$$e + Ar \rightarrow Ar^{+} + 2e^{-}$$
 (2.22)

จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ (2.21) หรือ (2.22) จะพบว่า อะตอมที่เป็นกลางหนึ่ง อะตอมเมื่อเกิด ไอออ ในซ์ จะ ได้ ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุบวกหนึ่งตัวพร้อมกันนั้นจะเกิด อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัว และถ้าต้องการให้มี ไอออนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าอาจจะทำให้ ได้ โดย กำจัดอิเล็กตรอนตัวที่เพิ่มขึ้นมาให้หมด ไป แต่การกำจัดอิเล็กตรอนตัวที่เพิ่มขึ้นมานั้นจะด้องให้ พลังงานกับอิเล็กตรอนที่มากพอสมควร และ โดยปกติทั่วไปไอออนที่อยู่ในสถานะที่มีประจุไฟฟ้าที่ มากกว่า 2+ ขึ้นไป จะไม่สามารถสังเกตเห็นได้

กระบวนการปกติที่เกิดขึ้นในพลาสมาคือ การกระตุ้นอะตอมหรือไอออนที่อยู่ในระดับ พลังงานต่ำสุด เพื่อให้อะตอมหรือไอออนไปอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงขึ้นหรือที่เรียกว่าอยู่ใน สถานะกระตุ้นพร้อมทั้งมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนอะตอมหรือไอออนเหล่านั้น ซึ่งแสดงกวามสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$e + Ar \rightarrow Ar^{+} + e^{-}$$
 (2.23)

อะตอมหรือไอออนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะมีช่วงเวลา (Lifetime) ที่อยู่ในสถานะดังกล่าว เป็นช่วงเวลาสั้นมากๆ หลังจากนั้นจะมีการสลายตัวพร้อมกับปลดปล่อยโฟตอนออกมา ลักษณะ เช่นนี้เป็นคุณลักษณะของพลาสมา และเป็นจุดเริ่มต้นที่จะอธิบายเรื่องโกล์วดิสชาร์จของก๊าซ

2.6.4 อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบสปัตเตอร์ริง

อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบการสปัตเตอร์ริง หมายถึง ความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จาก การสปัตเตอร์ริง ต่อหน่วยของเวลาการสปัตเตอร์ ขึ้นอยู่กับปริมาณอะตอมของเป้าสารเคลือบที่ถูก สปัตเตอร์และสภาพของการชนกับอะตอมเหล่านี้ไปยังวัสดุฐานรอง อัตราการเคลือบฟิล์มจะ สัมพันธ์กับก่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ก่ากระแสไฟฟ้า, ก่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, อัตราการไหลของ ก๊าซเฉื่อย, ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุฐานรอง และความดันภายในภาชนะสุญญากาศ ในสภาวะของการโกล์วดิสชาร์จ

เนื่องจากกระแสไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และความคันก๊าซ เป็นปริมาณที่ขึ้นต่อกัน การวัคผลกระทบของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งนั้นไม่สามารถทำได้ ในทางปฏิบัติจึงละเลยหรือไม่ให้ ความสำคัญกับตัวแปรที่มีผลน้อยที่สุด ด้วยการกำหนดตัวแปรคงที่และทำการศึกษาผลจากตัวแปร อีกตัวที่สนใจ เช่น ทำการวัคความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้า ที่มีความคงที่ค่าๆ หนึ่ง กำลังไฟฟ้าในที่นี้เป็นการรวมผลของค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความ ต่างศักย์ไฟฟ้าของการดิสชาร์จเข้าด้วยกัน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในระบบการสปัตเตอร์ริง แบบ อาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง (RF sputtering) ซึ่งสามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบ ฟิล์มได้ ดังสมการ (2.24)

$$R\alpha \frac{P}{P'l}$$
(2.24)

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า

P' คือ ความคัน

1 คือ ระยะจากเป้าสารเคลือบกับวัสคุฐานรอง

2.7 ระบบดีซี สปัตเตอร์ริง

ระบบการสปัตเตอร์ริงแบบ ดีซี สปัตเตอร์ริง (DC sputtering) ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไป จะประกอบด้วยกู่อิเล็กโทรดที่วางขนานกัน ด้านหนึ่งของอิเล็กโทรดจะเป็นขั้วกาโทดและอีกด้าน เป็นอาโนด บริเวณกาโทดจะมีเป้าสารเกลือบและระบบน้ำหล่อเย็น ส่วนบริเวณอาโนดจะ ประกอบด้วยฐานรองและระบบน้ำหล่อเย็น เมื่อควบคุมความดันของก๊าซอาร์กอนภายในระบบที่ 0.1 ทอร์และทำการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง โดยต่ออนุกรมกับความต้านทาน 1 ถึง 10 กิโลโอห์ม ศักดาระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะมีก่าประมาณ 1 ถึง 10 กิโลโวลต์ ทำให้เกิดการดิสชาร์จผ่านตัวกลางที่ เป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย และก๊าซอาร์กอนที่เกิดการโกล์วดิสชาร์จจะถูกเร่งพุ่งชนคาโทดที่เป็น เป้าสารเคลือบ และเกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้นที่อาโนดหรือวัสดุฐานรอง



รูปที่ 2.27 ระบบดีซีสปัตเตอร์ริง

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ขั้นตอนของการออกแบบและกระบวนการสร้าง ได้ทำการออกแบบโครงสร้างหัวตรวจวัด ก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน และทำการสร้างโดยแบ่งตามลักษณะโครงสร้าง ดังนี้

- 1. การออกแบบขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า
- 2. การออกแบบพื้นที่ของแผ่นชั้นรับสัญญาณก๊าซ
- 3. การสร้างกระจกมาส์กต้นแบบ
- 4. กระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ

3.1 การออกแบบขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของชั้นฟิล์มขณะ ตรวจจับก๊าซ ขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าสร้างขึ้นจากโลหะแพลทินัม (Pt) และมีไททาเนียม (Ti) เป็น ชั้นประสาน ระหว่างชั้นของโลหะแพลทินัมและซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดลวดลาย 60 ไมครอน ในพื้นที่ 6800x6800 ไมครอน



รูปที่ 3.1 ลักษณะลวดลายของขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การใช้โลหะไททาเนียม (Ti) เป็นชั้นประสาน เนื่องจากโลหะแพลทินัมมีความสามารถใน การยึดเกาะกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ไม่ดีนัก จึงเลือกใช้โลหะไททาเนียมซึ่งสามารถยึดเกาะกับชั้น ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า





ร**ูปที่ 3.2** โครงสร้างของวงจรชักนำไฟฟ้าแบบต่างๆ (ก) โครงสร้าง A (ข) โครงสร้าง B (ค) โครง สร้าง C (ง) โครงสร้าง D (จ) โครงสร้าง E และ (ฉ) โครงสร้างของส่วนขยาย

3.2 การออกแบบพื้นที่ของแผ่นชั้นรับสัญญาณก๊าซ

ชั้นฟิล์มซิลิคอน ใดออก ไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน (SiO₂-MWCNTs) ทำหน้าที่ในการ ตรวจจับก๊าซ โดยทำการสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอน ใดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีสปิน โคตติง และกำหนดขนาดพื้นที่ของชั้นซิลิคอน ใดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนเท่ากับ 6800x6800 ไมครอน



รูปที่ 3.3 ลักษณะลวดลายของพื้นที่แผ่นชั้นสัญญาณก๊าซ

3.3 การสร้างกระจกมาสักต้นแบบ

เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างต่างๆ ของหัวตรวจวัดก๊าซแด้ว ทำการวาดลวดลายของ มาส์ก (Mask) ต่างๆ ด้วยโปรแกรม LEDIT (v8.03) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบและวาด ลวดลายต้นแบบ จากนั้นทำการแปลงไฟล์เป็น PDF File เพื่อสามารถถ่ายภาพลงบนฟิล์มใสแล้ว นำมาประกอบเข้ากับกระจกควอทซ์ที่มีขนาด 3x3 นิ้ว เพื่อใช้ประโยชน์เป็นกระจกมาส์กต้นแบบใน กระบวนการถ่ายลวดลาย (Photolithography) ต่อไป



รูปที่ 3.4 ลักษณะภาพถ่ายโปรแกรม LEDIT

ซึ่งกระจกมาส์กต้นแบบต่างๆ จะถูกกำหนดด้วยขั้นตอนของการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ ดังต่อไปนี้

- มาส์กที่ 1 สำหรับขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า
- มาส์กที่ 2 สำหรับเปิดขั้วไฟฟ้าขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2



รูปที่ 3.5 ลักษณะกระจกต้นแบบ มาส์กที่ 1



รูปที่ 3.6 ลักษณะกระจกต้นแบบมาส์กที่ 2

3.4 กระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบ่งเป็นหัวข้อย่อยและขั้นตอนต่างๆ ตามลำดับดังต่อไปนี้

3.4.1 การทำความสะอาดและเตรียมแผ่นเบื้องต้น

 เตรียมแผ่นผลึกฐานรองเริ่มต้น โดยใช้แผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ชนิด p หรือชนิด n มีความหนาประมาณ 350 ถึง 400 ไมครอน ทำการตัดแผ่นซิลิคอนตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน เพื่อกำจัดเศษของโลหะ, กราบไขมัน และฝุ่นผง ที่อาจปนเปื้อนมากับแผ่นซิลิคอน โดยมีขั้นตอน ดังนี้

- ล้างแผ่นซิลิกอนด้วยน้ำ DI ในเครื่องสั่นด้วยความถี่สูง (Ultra sonic) 5 นาที
- ต้มในกรดในตริก (HNO3) 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะบริเวณผิวของซิลิคอน
- ล้างด้วยน้ำ DI จำนวน 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซในโตรเจน
- ด้มในไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดคราบไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นด้วยความถี่สูง 5 นาที
- ถ้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



(ก)



(ป)

รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายของ (ก) เครื่อง Ultra sonic และ (ข) manual bench

3.4.2 การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) กำหนดกวามหนาประมาณ 4500 อังสตรอม ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง 1 ชั่วโมง แบบชื้น 2 ชั่วโมง และแบบแห้ง 1.5 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อเป็นชั้นฉนวน โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- ออกซิเคชั่นแบบแห้ง (Dry oxidation) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลก๊าซออกซิเจน 1,200 cc/min

- ออกซิเคชั่นแบบชื้น (Wet oxidation) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส อัตราการ ใหลก๊าซออกซิเจน 1,000 cc/min



(fl) Frontage



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายของเตาออกซิเคชัน

3.4.3 การสร้างขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

 ทำการเคลือบชั้นฟิล์มไททาเนียม (Ti) ด้วยเครื่องดีซีสปัตเตอร์ริง (DC Sputtering) กำหนดความหนาประมาณ 1,500 อังสตรอม เงื่อนไขการสปัตเตอร์ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการสปัตเตอร์ริง Ti ด้วยเครื่องดีซี สปัตเตอร์ริง

เงื่อนไข	รายละเอียด
1. เป้าสารเคลือบ	Ti 99%, Ø50 มิลลิเมตร
2. บรรยากาศ	ก๊าซ AR
3. ความคัน	0.15 Torr
4. กำลังงาน	115 วัตต์
5. ระยะห่าง target กับ substrate	30 มิลลิเมตร
6. เวลาการสปัตเตอร์ริง	30 นาที

 ทำการเคลือบชั้นฟิล์มแพลทินัม (Pt) ด้วยเครื่องดีซีสปัตเตอร์ริง (DC Sputtering) กำหนดความหนาประมาณ 2,000 อังสตรอม เงื่อนใบการสปัตเตอร์แสดงในตารางที่ 3.2

เงื่อนไข	รายละเอียด		
1. เป้าสารเคลือบ	Pt 99%, Ø50 มิลลิเมตร		
2. บรรยากาศ	ก๊าซ AR		
3. ความดัน	0.15 Torr		
4. กำลังงาน	115 วัตต์		
5. ระยะห่าง target กับ substrate	30 มิลลิเมตร		
6. เวลาการสปัตเตอร์ริง	40 นาที		

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการสปัตเตอร์ริง Pt ด้วยเครื่องดีซี สปัตเตอร์ริง



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายเครื่องคีซี สปัตเตอร์ริง

ทำการซินเตอร์ริง (Sintering) เป็นการอบฟิล์มด้วยความร้อนเพื่อทำให้เกิดรอยต่อ

โอห์มมิกที่ดี

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการซินเตอร์ริง

เงื่อนไข	รายละเอียด		
1. บรรยากาศ	N ₂ (อัตราจ่ายก๊าซ 200 ซีซีต่อนาทึ)		
2. อุณหภูมิ	800 องศาเซลเซียส		
3. เวลาการซินเตอร์ริง	2 ชั่วโมง		



ร**ูปที่ 3.10** ภาพถ่ายเตาซินเตอร์ริง

 กระบวนการโฟโตลิโชกราฟีมาส์กที่ 1 เพื่อสร้างวงจรชักนำไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้า ตามขั้นตอนในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ขั้นตอนการ โฟโตลิโธกราฟีน้ำยาไวแสงชนิดบวก

กระบวนการ	เทคนิค	อุณหภูมิ (^o C)	เวลา (นาที:วินาที)	หมายเหตุ
Photolithography	Spin (5,000 rpm)	-	00:20	AZ4620
	Prebake	95	30:00	
	Expose	-	00:50	
Developed	Az Develop 1	-	01:30	
	Az Develop 2	-	01:30	
	DI Water	-	00:10	
Post bake	-	95	30:00	



(ก)

(ป)

รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายของ (ก) เครื่อง Mask Aligner และ (ข) เครื่อง Spinner

5. ทำการกัดถวดถายชั้นฟิล์ม Pt และ Ti เพื่อสร้างเป็นวงจรชักนำไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้า ตามตารางที่ 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.5	ขั้นตอนการ	กัดชั้นฟิล์มแท	เลทินัม (Pt)
1101411515			

ขั้นตอน	สารถะถาย	อุณหภูมิ (^o C)	ເວລາ (นາที:วินาที)	อัตราการกัด
				(A/Min)
1	HCL(3):HNO ₃ (1)	60	05:30	300
2	DI_1	60	10:00	-
3	DI_2	60	10:00	-
4	DI_3	25	05:00	-

ตารางที่ 3.6 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มไททาเนียม (Ti)

ขั้นตอน	สารละลาย	อุณหภูมิ (^o C)	ເວລາ (นາที:วินาที)	อัตราการกัด
				(A/Min)
1	H ₂ O(20):HF(1):H ₂ O ₂ (1)	25	03:30	700
2	DI_1	25	05:00	-
3	DI_2	25	05:00	-

- 6. ทำการ Strip resist ด้วยอะซิโตนและถ้างด้วยน้ำ DI
- 7. ทำการเป่าแห้งด้วยในโตรเจน

3.4.4 สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนใดออกใซด์-ท่อนาโนการ์บอน

- 1. เตรียมโซลผสมซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน ตามเงื่อนไขดังนี้
 - ชั่งสารละลายซิลิคอนไดออกไซด์และท่อนาโนการ์บอน อัตราส่วน 20:1, 40:1,

60:1, 80:1 และ100:1

- อุลตราโซนิค (Untra sonic) โซลผสม 1 ชั่วโมง
- 2. ทำความสะอาดแผ่น
 - ล้างแผ่นซิลิกอนด้วยน้ำ DI ในเครื่องสั่นด้วยความถี่สูง (Ultra sonic) 5 นาที
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - ด้มในใตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene) 5 นาที
 - ถ้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นด้วยความถี่สูง 5 นาที
 - ถ้างด้วยน้ำ DI
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซในโตรเจน

 สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน (SiO₂-MWCNTs) โดยวิธี สปินโคตติง เงื่อนไขดังตารางที่ 3.7 และ 3.8

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนโดยวิธีสปินโกตติง

เงื่อนไข	รายละเอียด
1. ซิลิคอนไดออกไซด์	สารละลายซิลิกอนไดออกไซด์
2. ท่อนาโนคาร์บอน	MWCNTs >95%, Ø20-25 mm, ความยาว 0.5-2µm.
3. SiO ₂ -MWCNTs	20:1, 40:1, 60:1, 80:1 และ 100:1
4. ความเร็วการสปิน	3,000 รอบต่อนาที
5. เวลาการสปีน	15 วินาที

ตารางที่ 3.8 เงื่อนใขการอบฟิล์ม

เงื่อนไข	รายละเอียด		
1. บรรยากาศ	ปกติ		
2. อุณหภูมิ	120 องศาเซลเซียส		
3. เวลาการอบฟิล์ม	30 นาที		

3.4.5 ทำการเปิดช่องขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

- 1. กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีมาส์กที่ 2 เพื่อเปิดขั้วไฟฟ้าขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2
- 2. กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนด้วย Buffer for oxidation ตามตาราง

ที่ 3.9

- 3. ทำการ Strip resist ด้วยอะซิโตนและล้างด้วยน้ำ DI
- 4. ทำการเป่าแห้งด้วยในโตรเจน

ตารางที่ 3.9 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนใดออกใซด์-ท่อนาโนการ์บอนเพื่อทำการเปิดขั้ว

ขั้นตอน	สารละลาย	อุณหภูมิ (^o C)	เวลา (นาที:วินาที)	อัตราการกัด (°A/Min)
1	BHF	25	01:00	2000
2	DI_1	25	05:00	-
3	DI_2	25	05:00	-

ลักษณะ โครงสร้างของหัวตรวจวัดก๊าซตามลำดับการสร้างแสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็น ขั้นตอนในการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ตามลำดับดังนี้

- แผ่นซิลิคอนเริ่มต้น
- 2) ทำการตัดแผ่นซิลิกอนและทำกวามสะอาด



3) กระบวนการออกซิเคชั่น



4) ดีซี สปัตเตอร์ริง



5) ดีซี สปัตเตอร์ริง



6) โฟโตลิโชกราฟี มาส์ก 1



7) กระบวนการ Etching



8) กระบวนการ Etching



9) สปินโคตติง



10) โฟโตลิโธกราฟี มาส์ก 2



11) กระบวนการ Etching



ร**ูปที่ 3.12** ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโน การ์บอนชนิดผนังหลายชั้น



ร**ูปที่ 3.13** ลักษณะภาพตัดขวางของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน ชนิดผนังหลายชั้น



ร**ูปที่ 3.14** ลักษณะ โครงสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนใดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนัง หลายชั้น



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนที่สร้างเสร็จ



ร**ูปที่ 3.16** ภาพถ่ายหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอนใดออกไซด์

ในการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับการเตรียมแผ่นชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซ การศึกษา คุณสมบัติต่างๆ จึงมีความสำคัญมากต่อการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการ เพื่อนำมา ประยุกต์ในงานวิจัยนี้

4.1.1 การเตรียมสารละลายโซลเจลซิลิคอนไดออกไซด์

สารละลายซิลิคอนไดออกไซด์เตรียมได้จากการนำสารตั้งต้นเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) ผสมกับตัวทำละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ด้วยอัตราส่วนโดยโมล คือ 1:4 กวนโซล ผสมทั้งสองนาน 5 นาที ต่อจากนั้นผสมกับน้ำที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดไอออน (DI) และกรดไฮโดร กลอริก (HCL) 4 โมล และ 0.001 โมล ตามลำดับ กวนโซลผสมนาน 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ ก่อนที่จะนำไปเคลือบผิว ขั้นตอนต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 งั้นตอนการเตรียมสารละลายโซลเจลซิลิคอนไคออกไซด์

4.1.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์

การเคลือบฟิล์มและแอนนีลตามขั้นตอนในรูปที่ 4.2 จะเริ่มจากหยุดสารละลายโซลเจล ซิลิคอนไดออกไซด์ลงบนฐานรองซิลิคอน สปินด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที อบที่อุณหภูมิ 120 องสาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นและสารอินทรีย์ต่างๆจากนั้นทำการแอนนีลที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศในโตรเจนต่อออกซิเจน 800:200 ลูกบาศก์มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อไล่สารอินทรีย์



ร**ูปที่ 4.2** ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์

4.1.3 การทดสอบสารละลายซิลิคอนไดออกไซด์

นำสารละลายซิลิคอนไดออกไซด์ที่จัดเตรียมไว้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 500°C นาน 30 นาที สารละลายซิลิคอนไดออกไซด์ก็จะเปลี่ยนเป็นผลึก นำผลึกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR) เพื่อยืนยันว่าเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 4.4 และเมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าลักษณะของกราฟจัดอยู่ในรูปฟอร์มเดียวกับกราฟมาตรฐาน จึง สรุปได้ว่าสารละลาย Sol-Gel สามารถนำมาใช้เป็น SiO₂ ฟิล์มได้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงคุณสมบัติมาตรฐานของซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงกุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ยี่ห้อ Broker รุ่น IFS 28 ในกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า อิน ฟาเรดสเปกตรัมของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) จะปรากฎยอดสัญญาณที่ wavenumber 1077.44, 954.45, 793.51, 566.68 และ 482.23 cm⁻¹ และยอดสัญญาณของ H_2O อยู่ที่ wavenumber 1640.27 และ 3459.10 cm⁻¹ ซึ่งมีลักษณะ ใกล้เคียงกับ standard spectrum

4.1.4 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางซิลิคอนใดออกไซด์

สามารถหาความหนาตามจำนวนชั้นในการเคลือบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (scanning electron microscopy : SEM) โดยมีความเร็วของสปีนเนอร์ 3,000 รอบ/นาที ดังรูปที่ 4.5



ร**ูปที่ 4.5** ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบางซิลิคอนไคออกไซด์ที่ความหนา 5000 อังสตรอม



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของความหนาต่อจำนวนชั้นในการเคลือบที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที

จากกราฟรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าความหนาของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เพิ่มขึ้นตาม จำชั้นหรือจำนวนครั้งในการสปิน โดยที่ความเร็วของการสปินเนอร์ 3000 รอบต่อนาที เคลือบ 1 ครั้ง จะมีความหนาประมาณ 1000 อังสตรอม

4.1.5 การศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์4.1.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแกนนิ่ง

จากกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (SEM) สามารถศึกษารูปร่างของฟิล์มบางซิลิคอนได ออกไซด์ หลังจากการแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7



(ง) 700 องศาเซลเซียส





จากการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (SEM) รูปที่ 4.7 พบว่า ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มประกอบด้วยเม็ดเกรนเล็กๆ กระจายทั่วผิวหน้าอย่างเป็นระเบียบ และมี ขนาดเล็กลง การจัดเรียงตัวดีขึ้น เมื่ออุณหภูมิการแอนนีลสูงขึ้น

4.1.5.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์

ศึกษาความเป็นผลึกของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ได้จากเครื่องวัดความเลี้ยวเบนด้วย รังสีเอ็กซ์ (X – rays diffraction, XRD) หลังจากการแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



ร**ูปที่ 4.8** การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง XRD หลังจากการ แอนนีลที่อุณหภูมิ (ก) No anneal, (ง) 400, (ก) 500, (ง) 600 และ (ง) 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ยี่ห้อ Philips รุ่น PM8203A ฐานข้อมูลจะแสดงผล ระนาบต่างๆ ของ SiO₂ ดังที่ปรากฎออกมาในรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.8 (ก) อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 120 องศา เซลเซียสและ ไม่ได้แอนนีลผลของ XRD จะยังคงปรากฎผลของระนาบผลึก SiO₂ บางระนาบ เช่น 100, 102 และ 110 เกิดขึ้น รูปที่ 4.8 (ข) และ (ก) เมื่อทำการแอนนีลในช่วงอุณหภูมิ 400 - 500 องศา เซลเซียส ผลึกหลายรูปของ SiO₂ จะมียอดสัญญาณสูงสุดที่ระนาบ 100 และเมื่อทำการแอนนีล ในช่วงอุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส จะปรากฎระนาบส่วนใหญ่ของ SiO₂ เป็น 102 คังแสดงใน รูป 4.8 (ง) และ (จ) ตามลำดับ

4.1.6 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์

สามารถศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์โดยการวิเคราะห์ผลการ สะท้อน (Reflection) ด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) ด้วยหลักการโพลาไรเซชัน (Polarization) รูปที่ 4.9 แสดงค่าดัชนีหักเหของแสงหลังการแอนนีลที่อุณหภูมิค่าต่างๆ เป็นเวลา 30 นาที



ร**ูปที่ 4.9** แสดงก่าดัชนีหักของแสงหลังการแอนนีลที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

4.1.7 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนใดออกไซด์

จากการนำฟิล์มบางซิลิคอนใดออกไซด์มาทดสอบกับเครื่องมือวัดคุณสมบัติของสารกึ่ง ตัวนำ(Semiconductor/Component test system) ยี่ห้อ HP รุ่น 4061A สามารถศึกษาสภาพความ ด้านทานไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 4.10



ร**ูปที่ 4.10** กราฟ I-V แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์

จากการเปรียบเทียบหลังการแอนนิลที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ค่าความค้านไฟฟ้าของฟิล์มจะ สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการแอนนิลสูงขึ้น จากกราฟรูปที่ 4.10 ที่อุณหภูมิการแอนนิล 700 องศาเซลเซียส ก่าความค้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีค่ามากที่สุด

4.2 การเตรียมท่อนาโนคาร์บอน (CNTs)

สำหรับท่อนาโนคาร์บอนที่นำมาใช้ในการทคลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นท่อนาโน การ์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผลิตโดยบริษัท Aldich มีขนาดเส้นผ่าสูนย์กลาง 20-50 นาโนเมตร กวามยาว 0.5-2 ไมโครเมตร



ร**ูปที่ 4.11** ภาพถ่ายท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ด้วยเครื่อง SEM

4.3 การศึกษาระยะห่างขั้วไฟฟ้า

วงจรชักนำและขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่นำค่าความจุที่ตรวจจับได้ออกมาสู่ภายนอกการศึกษาวงจร ชักนำและระยะห่างขั้วไฟฟ้าจึงมีความสำคัญต่อการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ เพื่อเพิ่มความความสามารถ ในการตรวจจับก๊าซ งานวิจัยนี้ได้ทดลองสร้างวงจรชักนำและขั้วไฟฟ้าขึ้นจากโลหะแพลทินัม (Pt) โดยมีโลหะไททาเนียม (Ti) ทำหน้าที่เป็นชั้นประสานระหว่างแพลทินัม กับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) จึงได้ทำการศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์มโลหะที่สร้างขึ้นจากระบบการสปัตเตอร์ริงแบบดีซี สปัตเตอร์ริง เพื่อประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้า

การหาค่าความหนาของฟิล์มแพลทินัม

ทคลองการปลูกฟิล์มแพลทินัม (Pt) และไททาเนียม (Ti) ด้วยระบบการสปัตเตอร์ริงแบบ ดีซีสปัตเตอร์ริง โดยทำการง่ายก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ (Ar 99.99%) เข้าสู่ห้องสปัตเตอร์ริง ควบคุม กำลังงานการสปัตเตอร์ริงเท่ากับ 115 วัตต์ ที่ความดัน 0.15 Torr และทำการสปัตเตอร์ริงเป็นเวลา 15, 30, และ 45 นาที จากรูปที่ 4.12 พบว่าฟิล์มบางแพลทินัมมีอัตราการเคลือบฟิล์มประมาณ 88 อังสตรอมต่อนาที และฟิล์มบางไททาเนียมมีอัตราการเคลือบฟิล์มประมาณ 49 อังสตรอมต่อนาที ลักษณะความหนาของฟิล์มแพลทินัมที่เวลาการเคลือบฟิล์ม 30 นาที กับฟิล์มไททาเนียมที่เวลาการ เคลือบฟิล์ม 45 นาที บนชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.12





4.4 การเตรียมชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs

การเคลือบฟิล์มและแอนนีลตามขั้นตอนในรูปที่ 4.13 จะเริ่มจากหยุคโซลผสม SiO₂-MWCNTs ลงบนฐานรองซิลิคอนที่มีออกไซค์ปกคลุมอยู่ สปินด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที อบที่ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นและสารอินทรีย์ต่างๆ จากนั้นทำการแอนนีลที่ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศปกติ



รูปที่ 4.13 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs

4.4.1 การศึกษาผิวหน้าของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน

สามารถศึกษารูปร่างของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนจากกล้อง จุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.14



(ค) SiO₂-MWCNTs สัคส่วน 60 : 1 โดยน้ำหนัก

(ง) SiO₂-MWCNTs สัคส่วน 40 : 1 โดยน้ำหนัก

ร**ูปที่ 4.14** ภาพถ่ายผิวหน้าชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs ด้วยเครื่อง SEM

จากการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (SEM) รูปที่ 4.14 พบว่า ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มประกอบด้วยท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้นจำนวนมากวางกระจาย อยู่ทั่วผิวหน้า และมีจำนวนหนาแน่นขึ้นตามสัดส่วนของท่อนาโนการ์บอนที่มากขึ้น สามารถศึกษาโครงสร้างของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนได้จาก เครื่องวัดความเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X – rays diffraction, XRD) ที่ความหนาค่าต่างๆ ดังแสดงใน รูปที่ 4.15



ร**ูปที่ 4.15** การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนด้วยเครื่อง XRD ที่อุณหภูมิการแอนนีล 200 องศาเซลเซียส ความหนา (ก) 2000, (ง) 3000, (ก) 4000, (ง) 5000 และ (ง) 6000 อังสตรอม ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ชนิดผนังหลายชั้น (SiO₂-MWCNTs) ที่อุณหภูมิการแอนนิล 200 องศาเซลเซียส ความหนา 2000, 3000, 4000, 5000 และ 6000 อังสตรอม พบว่าชั้นฟิล์มยังคงปรากฏผลึกหลายรูปของ SiO₂ โดยจะ ปรากฏยอดสูงสุดที่ระนาบ 101 ในทุกความหนาชั้นฟิล์ม ระนาบผลึก SiO₂ ยังคงปรากฏลักษณะ เดียวกันในทุกกราฟ ซึ่งผลจากการตรวจสอบความเป็นผลึก จะใกล้เคียงกับชั้นฟิล์ม SiO₂ ที่ไม่มีการ แอนนิล

4.5 การตอบสนองที่มีต่อก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ

4.5.1 การศึกษาความไวในการตรวจจับก๊าซ

หัวตรวจวัดก๊าซที่สร้างขึ้นถูกนำมาวัดผลตอบสนองที่มีต่อก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซออกซิเจน กวามเข้มข้น 500, 1,000, 5,000 และ 10,000 ppm เอทิลแอลกอฮอล์กวามเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และแอมโมเนียกวามเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการจ่ายก๊าซ 150 ซีซี ต่อนาที โดยทำการตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิโดยรอบของหัวตรวจวัดก๊าซ 30 องศาเซลเซียส และวัดผล การเปลี่ยนแปลงก่ากวามจุไฟฟ้าของหัวตรวจวัดก๊าซด้วยมัลติมิเตอร์

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\Delta C = [(C_{gas} - C_{air})/C_{air}] \times 100\%$$
(4.1)

์ โดยที่ $\Delta_{
m C}$ คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงก่ากวามจุไฟฟ้า

- $C_{_{\rm gas}}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มขณะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซ
- C_{air} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มที่สภาวะปกติ
- ถ้า C_{gas}<C_{air} แสดงว่าก๊าซที่ใช้ทดสอบป็นตัวออกซิไดซ์ C_{gas}>C_{air} แสดงว่าก๊าซที่ใช้ทดสอบป็นตัวรีดิวซ์

4.6 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O₂)

เนื่องจากออกซิเจนอยู่ในรูปของก๊าซ การเจือความเข้มข้นจึงใช้ก๊าซ ในโตรเจนเป็นก๊าซผสม โดยมีก่าดังตารางที่ 4.1 และมีการเซ็ตอัพเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ดังรูป 4.16 โดยก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่จะมีกวามเข้มข้น 1% หรือ 10,000 ppm

	D 0 D 0 D 0			
ความเข้มข้น	500 ppm	1000 ppm	5000 ppm	10000 ppm
อัตราส่วน $\mathrm{O}_2:\mathrm{N}_2$ (cc)	1:19	1:9	1:1	1:0

ตารางที่ 4.1 การเจือความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน



รูปที่ 4.16 แผนผังระบบวัดผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการทคลองแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O₂)

ความเข้มข้น	สัคส่วน	ความหนา	ค่าความจุ		ค่าความจุ ค่าความจุ		ค่าค⁄	ງານຈຸ	
ของก๊าซ	SiO ₂ -	(A [°])	โครงส	โครงสร้าง A		เร้าง A โครงสร้าง C		โครงส	ชร้าง E
(ppm)	MWCNTs		(nF)		(nF) (nF)		(n	F)	
			C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}	
500	20:1	2000	1.2	0.812	1.1	0.803	1.1	0.920	
1000	20:1	2000	1.2	0.810	1.1	0.795	1.1	0.915	
5000	20:1	2000	1.2	0.807	1.1	0.791	1.1	0.900	
10000	20:1	2000	1.2	0.802	1.1	0.785	1.1	0.906	
500	40:1	3000	1.3	0.820	1.2	0.812	1.2	0.931	
1000	40:1	3000	1.3	0.815	1.2	0.810	1.2	0.925	

ความเข้มข้น	สัคส่วน	ความหนา	ค่าความจุ		ค่าความจุ		ค่าความจุ	
ของก๊าซ	SiO ₂ -	(A ⁰)	โครงสร้าง A		โครงสร้าง C		โครงสร้าง E	
(ppm)	MWCNTs		(nF)		(nF)		(nF)	
			C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}
5000	40:1	3000	1.3	0.812	1.2	0.805	1.2	0.922
10000	40:1	3000	1.3	0.805	1.2	0.800	1.2	0.910
500	60:1	4000	1.4	0.840	1.3	0.830	1.3	0.915
1000	60:1	4000	1.4	0.835	1.3	0.827	1.3	0.911
5000	60:1	4000	1.4	0.830	1.3	0.824	1.3	0.905
10000	60:1	4000	1.4	0.821	1.3	0.818	1.3	0.900
500	80:1	5000	1.6	0.880	1.5	0.889	1.5	0.940
1000	80:1	5000	1.6	0.873	1.5	0.881	1.5	0.930
5000	80:1	5000	1.6	0.860	1.5	0.875	1.5	0.931
10000	80:1	5000	1.6	0.855	1.5	0.871	1.5	0.925
500	100:1	6000	1.7	0.920	1.6	0.928	1.6	0.970
1000	100:1	6000	1.7	0.910	1.6	0.920	1.6	0.930
5000	100:1	6000	1.7	0.915	1.6	0.921	1.6	0.950
10000	100:1	6000	1.7	0.900	1.6	0.910	1.6	0.920

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการทคลองแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่วัคได้จากการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O₂)



ร**ูปที่ 4.17** การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 500 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนได ออกไซค์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศา เซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A. B. C. D และ E



ร**ูปที่ 4.18** การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 1,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนได ออกไซค์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.19** การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 5,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนได ออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โกรงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.20** การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 10,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนได ออกไซค์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E


ร**ูปที่ 4.21** การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 10,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนได ออกไซด์บริสุทธิ์ อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E

จากกราฟรูปที่ 4.21 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 10,000 ppm ของชั้นฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ใช้สำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ ไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซกับกราฟรูปที่ 4.20 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจนของชั้นฟิล์มซิลิคอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น จากการเปรียบเทียบพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า ความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราการ เปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ โดยที่หัวตรวจวัดก๊าซตาม ลักษณะโครงสร้าง A มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ค่าความจุไฟฟ้าต่างกัน ประมาณ 4.5 เปอร์เซ็นต์



ร**ูปที่ 4.22** ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน (O₂) ของชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs และ SiO₂ บริสุทธิ์ โครงสร้าง A

จากกราฟรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs และ SiO₂ บริสุทธิ์ ตอบรับก๊าซ ออกซิเจน (O₂) ที่ใช้ทำการทดสอบ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความ เข้มข้นของก๊าซ โดยที่ความเข้มข้นของก๊าซ 10,000 ppm ชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs สัคส่วน 100:1 มี อัตราการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากกว่าชั้นฟิล์ม SiO₂ บริสุทธิ์ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากโครงสร้างเซ็นเซอร์ ได้ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ผสม ในสารละลายซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ทำให้คุณลักษณะของฟิล์มที่ได้มีการนำไฟฟ้าน้อยเกือบ เป็นฉนวน ทั้งนี้ MWCNTs ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) [3] และมีโมเดลของชั้น ฟิล์มเป็นแบบ RC Model [5] เมื่อทำการตรวจจับก๊าซ O₂ ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสภาพความนำใน ท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากเกิดการ oxidizing กับโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน (O₂) ทำให้ก๊าซ ออกซิเจนถูก ดูดกลืนเข้าไปในชั้น SiO₂-MWCNTs ทำให้มีการจับอิเล็กตรอนจาก p-type MWCNTs ขึ้น ทำให้จำนวนโฮลในวัสดุเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ก่า Dielectric constant ของฟิล์มลดลงตามความ เข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดกลืนในโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเข้าไปใน MWCNTs ได้มากขึ้น

4.7 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) เงื่อนไขที่ใช้

- เวลาในการง่ายก๊าซที่ใช้ทคสอบ 100 วินาที
- อัตราการจ่ายก๊าซที่ใช้ทดสอบ 150 ซีซีต่อนาที

เนื่องจากเอทิลแอลกอฮอล์ 99.5% เป็นของเหลว เมื่อต้องการความเข้มข้น ค่าต่าง ๆ จึงใช้น้ำ DI เป็นตัวเจือจาง โดยเทียบจากตารางที่ 4.3 จากนั้นใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาหะ โดยมีแผนผัง การเซ็ตอัพเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ดังรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ : น้ำ DI (cc) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้น	0.1%	1%	10%	20%
อัตราส่วนเอทิลแอลกอฮอล์ : น้ำ DI (cc)	1 : 999	1 : 99	1:9	1:0.9

4.7.1 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากการทคสอบโคยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 20% จะได้ผลดังรูปที่ 4.24, 4.25, 4.26 และ 4.27 ที่อุณหภูมิแวคล้อม 30 องศาเซลเซียส โคยที่ชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนมีความหนา 5,000 องสตรอม



รูปที่ 4.23 แผนผังระบบวัดผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH)

ความเข้มข้น	สัคส่วน	ความหนา	ค่าความจุ		ค่าความจุ		ค่าความจุ	
ของก๊าซ	SiO ₂ -	(A [°])	โครงสร้าง A		โครงสร้าง C		โครงสร้าง E	
(%)	MWCNTs		(nF)		(nF)		(nF)	
			C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}
0.1	20:1	2000	1.2	1.465	1.1	1.235	1.1	1.125
1	20:1	2000	1.2	1.520	1.1	1.250	1.1	1.140
10	20:1	2000	1.2	1.500	1.1	1.260	1.1	1.165
20	20:1	2000	1.2	1.550	1.1	1.275	1.1	1.185
0.1	40:1	3000	1.3	1.590	1.2	1.335	1.2	1.210
1	40:1	3000	1.3	1.655	1.2	1.355	1.2	1.235
10	40:1	3000	1.3	1.670	1.2	1.375	1.2	1.265
20	40:1	3000	1.3	1.690	1.2	1.380	1.2	1.280
0.1	60:1	4000	1.4	1.720	1.3	1.430	1.3	1.260
1	60:1	4000	1.4	1.730	1.3	1.455	1.3	1.285
10	60:1	4000	1.4	1.755	1.3	1.460	1.3	1.310
20	60:1	4000	1.4	1.780	1.3	1.470	1.3	1.320
0.1	80:1	5000	1.6	1.150	1.5	1.485	1.5	1.315
1	80:1	5000	1.6	1.775	1.5	1.550	1.5	1.330
10	80:1	5000	1.6	1.810	1.5	1.565	1.5	1.355

	สัคส่วน	ความหนา	ค่าความจุ		ค่าความจุ		ค่าความจุ	
ของก๊าซ	SiO ₂ -	(A ⁰)	โครงสร้าง A		โครงสร้าง C		โครงสร้าง E	
(%)	MWCNTs		(nF)		(nF)		(nF)	
			C _{air}	C_{gas}	C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}
20	80:1	5000	1.6	1.850	1.5	1.580	1.5	1.370
0.1	100:1	6000	1.7	1.690	1.6	1.320	1.6	1.300
1	100:1	6000	1.7	1.810	1.6	1.540	1.6	1.350
10	100:1	6000	1.7	1.870	1.6	1.790	1.6	1.505
20	100:1	6000	1.7	1.930	1.6	1.680	1.6	1.400

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทคลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH)



ร**ูปที่ 4.24** การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ความเข้มข้น 0.1% ของชั้นฟิล์มซิลิคอน ใดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศา เซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โครงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.25** การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ความเข้มข้น 1% ของชั้นฟิล์มซิลิคอน ได ออกไซค์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โกรงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.26** การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ความเข้มข้น 10% ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ใด ออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โกรงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.27** การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ความเข้มข้น 20% ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ใด ออกไซค์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัค 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โกรงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.28** ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของเอทิลแอลกอ ฮอล์ (C₂H₅OH) ของชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs และ SiO₂ บริสุทธิ์ โครงสร้าง A

จากกราฟรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs และ SiO₂ บริสุทธิ์ ตอบรับก๊าซ เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ที่ใช้ทำการทดสอบ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ตามความเข้มข้นของก๊าซ โดยที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% ชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs สัคส่วน 100:1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากกว่าชั้นฟิล์ม SiO₂ บริสุทธิ์ ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) เป็น Reducing agent แต่น้อยกว่าก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) ทำให้ อัตราการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) สูงกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) เมื่อทำการวัดค่า C ทำให้ค่า Δ C ของ NH₃ มีการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นกว่า Δ C ของ C₂H₅OH

4.8 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) เงื่อนไขที่ใช้

- เวลาในการง่ายก๊าซที่ใช้ทคสอบ 100 วินาที

- อัตราการจ่ายก๊าซที่ใช้ทุดสอบ 150 ซีซีต่อนาที

เนื่องจากแอมโมเนีย 25% เป็นของเหลว เมื่อต้องการความเข้มข้น ค่าต่าง ๆ จึงใช้น้ำ DI เป็น ตัวเจือจาง จากนั้นใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาหะ โดยมีแผนผังการเซ็ตอัพเครื่องมือที่ใช้ในการวัด การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ดังรูปที่ 4.29

4.8.1 การตอบสนองต่อแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากการทคสอบโคยใช้แอมโมเนียความเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 20% จะได้ผลดังรูปที่ 4.30, 4.31, 4.32 และ 4.33 ที่อุณหภูมิแวคล้อม 30 องศาเซลเซียส โดยที่ชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนา โนการ์บอนมีกวามหนา 5,000 อังสตรอม



รูปที่ 4.29 แผนผังระบบวัดผลการทดลอง

ความเข้มข้น	สัคส่วน	ความหนา	ค่าความจุ		ค่าความจุ		ค่าความจุ	
ของก๊าซ (%)	SiO ₂ -	(A ⁰)	โครงสร้าง A		โครงสร้าง C		โครงสร้าง E	
	MWCNTs		(nF)		(nF)		(nF)	
			C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}
0.1	20:1	2000	1.2	1.840	1.1	1.600	1.1	1.345
1	20:1	2000	1.2	1.865	1.1	1.630	1.1	1.370
10	20:1	2000	1.2	1.875	1.1	1.655	1.1	1.395
20	20:1	2000	1.2	1.890	1.1	1.675	1.1	1.410
0.1	40:1	3000	1.3	1.835	1.2	1.635	1.2	1.185
1	40:1	3000	1.3	1.860	1.2	1.645	1.2	1.205
10	40:1	3000	1.3	1.885	1.2	1.670	1.2	1.440
20	40:1	3000	1.3	1.900	1.2	1.690	1.2	1.465
0.1	60:1	4000	1.4	1.845	1.3	1.640	1.3	1.55
1	60:1	4000	1.4	1.870	1.3	1.675	1.3	1.370
10	60:1	4000	1.4	1.895	1.3	1.690	1.3	1.385
20	60:1	4000	1.4	1.920	1.3	1.710	1.3	1.400
0.1	80:1	5000	1.6	1.885	1.5	1.670	1.5	1.420
1	80:1	5000	1.6	1.900	1.5	1.690	1.5	1.445
10	80:1	5000	1.6	1.935	1.5	1.710	1.5	1.480
20	80:1	5000	1.6	1.950	1.5	1.735	1.5	1.485
0.1	100:1	6000	1.7	1.870	1.6	1.690	1.6	1.500
1	100:1	6000	1.7	1.930	1.6	1.710	1.6	1.510
10	100:1	6000	1.7	1.980	1.6	1.730	1.6	1.530
20	100:1	6000	1.7	2.050	1.6	1.750	1.6	1.550

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH₃)



ร**ูปที่ 4. 30** การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH₃) ความเข้มข้น 0.1% ของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตรา ส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โกรงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.31** การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH₃) ความเข้มข้น 1% ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตรา ส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.32** การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH₃) ความเข้มข้น 10% ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตรา ส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.33** การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH₃) ความเข้มข้น 20% ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตรา ส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



ร**ูปที่ 4.34** ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของแอมโมเนีย (NH₃) ของชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs และ SiO₂ บริสุทธิ์ โครงสร้าง A

จากกราฟรูปที่ 4.34 จะเห็นว่าชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs และ SiO₂ บริสุทธิ์ ตอบรับก๊าซ แอมโมเนีย(NH₃) ที่ใช้ทำการทดสอบ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความ เข้มข้นของก๊าซ โดยที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% ชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs สัดส่วน 100:1 มีอัตรา การเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากกว่าชั้นฟิล์ม SiO₂ บริสุทธิ์ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการทดสอบกับก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) ทำให้ชั้นฟิล์ม SiO₂- MWCNTs มีค่า Dielectric constant เพิ่มขึ้น เนื่องจากก๊าซแอมโมเนียเป็น Reducing agent กับการดูดซับ (adsorption) โมเลกุล ของก๊าซแอมโมเนียที่ MWCNTs ทำให้เกิดการฉีดพาหะอิเล็กตรอนเข้าไปใน MWCNTs ทำให้ จำนวนพาหะโฮลใน MWCNTs ชนิดพี (p-type) ลดลง [3] ค่าความนำของท่อนาโนคาร์บอนลดลง และทำให้ชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้น

4.9 การศึกษาความหนาของชั้นฟิล์ม SiO,-MWCNTs ต่อการตอบรับก๊าซ

ความหนาของชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซมีผลต่อการตอบรับก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ โดยที่ หัวตรวจวัดก๊าซ มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาลคลง อัตราการเปลี่ยนแปลง ก่าความจุไฟฟ้าต่อความหนา แสดงในรูปที่ 4.35, 4.36 และ 4.37



รูปที่ 4.35 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (${
m O}_2$) ความเข้มข้น 10,000 ppm ที่ความหนาต่างๆ

ผลจากการเพิ่มความหนาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O₂) ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 10,000 ppm พบว่าหัวตรวจวัคก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A มีอัตราการ เปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซมากที่สุด โดยที่ความหนา 3000 อังสตรอม หัวตรวจวัคก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและลดลงตามลักษณะ โครงสร้างแต่ละแบบ จากการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มในช่วง 2000 อังสตรอม ถึง 5000 อังสตรอม หัวตรวจวัคก๊าซตาม ลักษณะ โครงสร้าง A ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 2000 อังสตรอม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ ไฟฟ้ามากกว่ากวามหนาของชั้นฟิล์ม 5000 อังสตรอม ประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.36 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂ H₅OH) ความเข้มข้น 20% ที่ความหนาต่างๆ

ผลจากการเพิ่มความหนาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซ เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% พบว่าเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นค่า ความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงลดลง โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะ โครงสร้างของหัวตรวจวัดก๊าซแต่ละแบบ โดยที่หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด จากการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มในช่วง 2000 อังสตรอม ถึง 5000 อังสตรอม หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 2000 อังสตรอม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าความหนาของชั้นฟิล์ม 5000 อังสตรอม ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์



ร**ูปที่ 4.37** การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) ความเข้มข้น 20% ที่ความหนาต่างๆ

ผลจากการเพิ่มความหนาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% พบว่าหัวตรวจวัคก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A มีอัตราการ เปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซมากที่สุด โดยที่ความหนา 2000 อังสตรอม หัวตรวจวัคก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามาก ที่สุด โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและลดลงตามลักษณะ โครงสร้างแต่ละ แบบ จากการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มในช่วง 2000 อังสตรอม ถึง 5000 อังสตรอม หัวตรวจวัด ก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 2000 อังสตรอม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า ความจุไฟฟ้ามากกว่าความหนาของชั้นฟิล์ม 5000 อังสตรอม ประมาณ 3.5 เปอร์เซ็นต์ ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มซิลิคอนใดออกใซด์-ท่อนาโนคาร์บอน จาก 2000 อังสตรอมขึ้นเป็น 3000, 4000, 5000 และ 6000 อังสตรอม หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A, B, C, D และ E มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และ แอมโมเนีย แตกต่างกัน โดยหัวตรวจวัดก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ ไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียดีที่สุด

4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซ

อุณหภูมิมีผลต่อการต่อการตอบสนองต่อก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ โดยหัวตรวจวัดก๊าซมี อัตราการเปลี่ยนก่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองต่อก๊าซ แสดงในรูปที่ 4.38, 4.39 และ 4.40



รูปที่ 4.38 การตอบสนองต่อก้าซออกซิเจน (${
m O}_2$) ความเข้มข้น 10,000 pm ที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซ ออกซิเจน (O₂) ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 10,000 ppm พบว่าหัวตรวจวัด ก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด โดยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความ จุไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงก่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลักษณะ โครงสร้างแต่ละ แบบ จากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มใน10-90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากก่าวามจุไฟฟ้ามากก่าว 10 องศาเซลเซียส ประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.39 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซ เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂ H₅OH) ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% พบว่าเมื่อของอุณหภูมิชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นค่า ความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะ โครงสร้างของหัวตรวจวัดก๊าซแต่ละแบบ โดยที่หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากการเพิ่มอุณหภูมิ ของชั้นฟิล์ม ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากมีสุดที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์



ร**ูปที่ 4.40** การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซ แอมโมเนีย (NH₃) ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% พบว่าหัวตรวจวัคก๊าซ ตามลักษณะโครงสร้าง A มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซมากที่สุด โดย ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัคก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการ เปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม ลักษณะโครงสร้างแต่ละแบบ จากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มใน 10-90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัด ก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า มากกว่าอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ประมาณ 7.5 เปอร์เซ็นต์

ผลของการเพิ่มอุณหภูมิให้กับชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส ในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย พบว่าหัวตรวจวัด ก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยที่สุด มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า ความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซมากที่สุดและตรวจจับก๊าซแอมโมเนียได้ดีที่สุด

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาวิจัยการศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) เตรียมได้จากสารละลายโซลเจล ซิลิคอนไดออกไซด์ สร้างชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซโดยวิธีสปินโคตติง และวัดผลตอบสนองที่มีต่อ ก๊าซออกซิเจน (O₂), เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) และแอมโมเนีย (NH₃) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ได้ นำเสนอแล้วนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

จากการศึกษาฟิล์มบางของซิลิคอนใดออกไซด์ที่เตรียมจากสารละลายโซลเจลเคลือบลงบน ผิวของซิลิคอนด้วยเทคนิคสปินโคตติง พบว่าสามารถควบคุมความหนาฟิล์มโดยการเพิ่มจำนวนครั้ง ในการสปิน ปัญหาอย่างหนึ่งที่พบในการเตรียมฟิล์มคือการแตกของฟิล์ม ซึ่งปัญหานี้มี ความสัมพันธ์กันกับความสะอาดของผิวซับสเตรท สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของฟิล์ม และซับสเตรท, ความหนืดของโซลผสม, กระบวนการให้ความร้อน และความเค้นที่ไม่สมคุลที่เกิด ระหว่างการแห้งตัว การอบแห้งควรจะทำอย่างช้าๆ หรือภายใต้จุดที่ต่ำกว่าค่าวิกฤต

จากการนำหัวตรวจวัดก๊าซมาวัดผลตอบสนองต่อก๊าซพบว่า ลักษณะความจุที่วัดได้สำหรับ การตรวจวัดก๊าซแต่ละชนิดที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ 30 °C หัวตรวจวัดก๊าซตอบรับการ ตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O₂), เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) และแอมโมเนีย (NH₃) โดยมีลักษณะการ ตอบรับแบบผกผันสำหรับ (O₂) และไม่ผกผันสำหรับก๊าซ (C₂H₅OH) และ (NH₃)

ผลการทคสอบการตรวจจับก๊าซชนิดต่างๆ ของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่อัตราส่วนผสม 100:1, 80:1, 60:1, 40:1 และ 20:1 พบว่าที่ อัตราส่วน SiO₂-MWCNTs 100:1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงก่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด

ผลการทคสอบการตรวจจับก๊าซชนิคต่าง ๆ ของหัวตรวจวัคก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซค์-ท่อนาโนการ์บอนชนิคผนังหลายชั้นต่อโครงสร้าง A, B, C, D และ E พบว่าระยะห่างขั้วไฟฟ้า น้อยลง จะทำให้ก่ากวามจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากขึ้น

ผลการทดสอบการตรวจจับก๊าซชนิดต่าง ๆ ของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้นต่อกวามหนาของชั้นฟิล์มที่กวามหนา 2,000, 3,000, 4,000, 5,000 และ 6,000 อังสตรอม พบว่าที่กวามหนา 2000 อังสตรอม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงก่ากวามจุ ไฟฟ้ามากที่สุด

อุณหภูมิมีผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ จากการเพิ่มอุณหภูมิ ในช่วง10-90 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า ความจุไฟฟ้ามากที่สุด ผลการทคสอบการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O₂), เอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) และ แอมโมเนีย (NH₃) ของหัวตรวจวัคก๊าซแบบซิลิกอนไคออกไซค์-ท่อนาโนการ์บอนชนิคผนังหลาย ชั้น ตามลักษณะโครงสร้าง A, B, C, D และ E พบว่าหัวตรวจวัคก๊าซตอบรับก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) ได้ดีที่สุด

วิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน ชนิดผนังหลายชั้น ที่ได้ทำการศึกษาและวิจัยนั้น เงื่อนไขต่างๆ เช่นระยะห่างขั้วไฟฟ้า สัดส่วนของ โซลผสมซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนและความหนาที่เหมาะสมในการสร้างชั้นฟิล์ม เป็น ข้อมูลที่แสดงถึงกวามสามารถในการตรวจจับก๊าซ การวัดผลตอบสนองที่มีต่อก๊าซชนิดต่างๆ เป็น ข้อมูลที่แสดงถึงกวามสามารถในการตรวจจับก๊าซเหล่านั้นได้ การพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซชนิดนี้ให้ดี ขึ้นเป็นสิ่งจำเป็นต่อการนำไปประยุกต์ในงานต่างๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

- C.J. Brinker and G.W. Scherer. 1992. Sol-Gel Sciences: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. New York : Academic Press., pp.21-54
- [2] M.Meyyappan, Carbon nanotube: science and applications. USA : CRC Press., 2005, pp.213-214
- [3] Keat Ghee Ong, Kefeng Zeng, and Craig A. Grimes, "A Wireless, Passive Carbon Nanotube-Based Gas Sensor." IEEE Sensors Journal, vol. 2, 2000, pp.85
- [4] Shu Peng, James O'Keeffe, Chengyu Wei, K.Cho, Jing Kong, Robert Chen, Nathan Franklin, and H.Dai, "Carbon Nanotube Chemical and Mechanical Sensors." Conference Paper for the 3rd International Worksorp on Structural Health Monitoring, pp.2-3
- [5] Junya Suehiro, Guangbin Zhou, and Masanori Hara, Fabrication of carbon nanotube-based gas sensor using dielectrophoresis and its application for ammonia detection by impedance spectroscopy, Appl.Phys. Lett., vol. 36, 2003, pp.112
- [6] Donald R. Ulrich, "Sol-Gel processing." Chemtech 1988, pp.242
- [7] ศรีสัชนา เรื่องเพชร และ สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, "การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอนได ออกไซด์ที่เตรียมได้จากเทคนิคโซลเจล", การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 2548, หน้า 1141-1144
- [8] จรัญ ศรีธาราธิกุณ. "การพัฒนาทินออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มบางโดยเทกนิก โซลเจลบนฐานรองซิลิกอน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทกโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้ากุณทหารลาดกระบัง. 2545, หน้า 24
- [9] สมพงษ์ เจริญกิจ. "การพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบัน เทกโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548, หน้า 6-7
- [10] ทวิศักดิ์ มัฏฐาพันธ์. "การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีซีวีดีแบบถวดความร้อน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าดุณทหารลาดกระบัง. 2548, หน้า 2-14
- [11] ใบรอัน แนพพ์. 2542. ซิลิกอน. เล่มที่ 1. แปลโดย ตะวัน สุขน้อย. พิมพ์กรั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: แปลน พลิ้นท์ติ้ง. หน้า 9-11

ประวัติผู้เขียน

นายศรีสัชนา เรื่องเพชร
23 สิงหาคม 2510
จังหวัดระนอง
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาศรีนกรินทรวิโรฒ พ.ศ. 2543
นักวิทยาศาสตร์ 5 โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
พ.ศ. 2538-ปัจจุบัน
ศรีสัชนา เรื่องเพชร และ สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, "การศึกษา
คุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากเทกนิค
โซลเจล", การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 2548,
หน้า 1141-1144