

การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโน
คาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

STUDY AND FABRICATION OF SiO_2 -MULTIWALLED CARBON
NANOTUBE BASED GAS SENSORS

ศรียุชชา เรืองเพชร
SRISUCHANA RUANGPHET

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโน
คาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

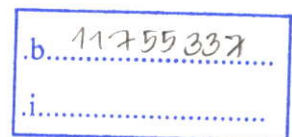
STUDY AND FABRICATION OF SiO_2 - MULTIWALLED CARBON
NANOTUBE BASED GAS SENSORS



ศรีสัชชา เรืองเพชร

SRISUCHANA RUANGPHET

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **71577**
วัน,เดือน,ปี. **22 พ.ค. 2550**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

**STUDY AND FABRICATION OF SiO₂– MULTIWALLED CARBON
NANOTUBE BASED GAS SENSORS**

SRISUCHANA RUANGPHET

**A THESIS SUMMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELETRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น
นักศึกษา	นายศรีสัชชา เรืองเพชร
รหัสประจำตัว	45060801
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น หัวตรวจวัดก๊าซซึ่งประกอบด้วยท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นและซิลิคอนไดออกไซด์ ที่เตรียมมาจากสารละลายโซลเจลซิลิคอนไดออกไซด์ โดยวิธีสปิน โคตติง ลงบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ของฐานรองซิลิคอน ขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าสร้างขึ้นจากโลหะแพลทินัมและไททาเนียม จากการเคลือบด้วยเครื่อง ดี ซี สปีดเตอร์ริง โดยมีไททาเนียมทำหน้าที่เป็นชั้นประสานระหว่างแพลทินัมและซิลิคอนไดออกไซด์ หัวตรวจวัดก๊าซถูกนำมาทดสอบการตรวจจับก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย โดยได้ทำการวิเคราะห์ผล ด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบก๊าซออกซิเจนวัดที่ความเข้มข้นของก๊าซในช่วง 500-10,000 ppm ส่วนการทดสอบเอทิลแอลกอฮอล์และแอมโมเนียละลายในน้ำบริสุทธิ์ วัดที่ความเข้มข้นในช่วง 0.1-20% โดยปริมาตร ผลจากการทดสอบพบว่าหัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้างแบบอินเทอร์ดิฟิวด ซึ่งมึระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 30 ไมครอน ตอบสนองต่อก๊าซทั้ง 3 ชนิดได้ดีที่สุด ศึกษาสัดส่วนซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สรุปได้ว่าที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก ชั้นฟิล์มมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด จากการตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน 10,000 ppm, เอทิลแอลกอฮอล์ 20% และแอมโมเนีย 20% ชั้นฟิล์มมีการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า ประมาณ 34, 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชั้นฟิล์มที่ไม่ได้ผสมท่อานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ประมาณ 28, 53 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ศึกษาอุณหภูมิใช้งานในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส จากการตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน 10,000 ppm, เอทิลแอลกอฮอล์ 20% และแอมโมเนีย 20% พบว่าชั้นฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าสูงสุด ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 38, 66 และ 74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ “การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น” ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้แนวทาง ข้อมูลทางด้านวิชาการและข้อคิดด้านการปฏิบัติ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ทำให้ทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบคุณ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำทางวิชาการ ตลอดจนความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและเทคนิคต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณปัทมิตา เทียนส่องใจ โครงการเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ เจ้าหน้าที่และเพื่อน ๆ ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำทางวิชาการตลอดจนความช่วยเหลือในการใช้วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ

สุดท้ายนี้ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์ได้โปรดอภิบาลประทานพรให้คุณบิดามารดา และครูอาจารย์ ผู้ให้พลังทางปัญญาแห่งความคิดและรากฐานการศึกษาแก่ผู้จัดทำจงประสบแต่ความสุขและความเจริญก้าวหน้าในหน้าที่การงาน ในการดำเนินชีวิตตลอดไป

ศรีสัชชา เรืองเพชร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการสัญลักษณ์.....	XIV
ศัพท์เทคนิค.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน (SiO ₂ – CNTs)	2
1.2.1 ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	2
1.2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs)	3
1.3 นิยามของเซนเซอร์.....	3
1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 การประยุกต์ใช้งาน.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 หลักการทางเคมีของ โซล-เจลซิลิคอน ไดออกไซด์ (SiO ₂).....	6
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes).....	7
2.2.1 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน.....	8
2.2.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	12
2.2.2.1 วิธีอาร์คดีสชาร์จ (Arc Discharge).....	12
2.2.2.2 Laser ablation vaporization.....	13
2.2.2.3 วิธีดีโพสิชันทางเคมี (chemical vapor deposition, CVD).....	14
2.3 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนในเซนเซอร์เคมีและฟิสิกส์.....	15
2.4 Carbon Nanotube Chemical Sensors.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การดูกลืนก๊าซ.....	16
2.4.2 หลักการพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซนเซอร์เคมี.....	18
2.5 วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (SiO ₂ -MWCNTs).....	20
2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR).....	20
2.5.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	26
2.5.3 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	30
2.5.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มบางด้วยเครื่อง Ellipsometer.....	32
2.6 การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอร์ริง.....	34
2.6.1 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอร์ริง.....	35
2.6.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ.....	36
2.6.3 กระบวนการชนกันในบริเวณที่ก๊าซเกิดการแตกตัว.....	38
2.6.4 อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบสปัตเตอร์ริง.....	39
2.7 ระบบดีซี สปัตเตอร์ริง.....	40
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	41
3.1 การออกแบบขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	41
3.2 การออกแบบพื้นที่ของแผ่นชั้นรับสัญญาณก๊าซ.....	43
3.3 การสร้างกระจกมาสก์ต้นแบบ.....	43
3.4 กระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ.....	44
3.4.1 การทำความสะอาดและเตรียมแผ่นเบื้องต้น.....	44
3.4.2 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂).....	45
3.4.3 การสร้างขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	46
3.4.4 การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน.....	50
3.4.5 การเปิดช่องขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	56
4.1 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์.....	56
4.1.1 การเตรียมสารละลายโซล-เจลซิลิคอนไดออกไซด์.....	56
4.1.2 การเตรียมฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์.....	57
4.1.3 การทดสอบสารละลายโซล-เจลซิลิคอนไดออกไซด์.....	57
4.1.4 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์.....	58
4.1.5 การศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์.....	60
4.1.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแกนนิ่งบางซิลิคอนไดออกไซด์.....	60
4.1.5.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์.....	61
4.1.6 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์.....	62
4.1.7 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์.....	63
4.2 การจัดเตรียมท่อนาโนคาร์บอน.....	63
4.3 การศึกษาระยะห่างขั้วไฟฟ้า.....	64
4.4 การเตรียมชั้นฟิล์ม SiO ₂ -MWCNTs.....	65
4.4.1 การศึกษาผิวหน้าของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ชนิดผนังหลายชั้น.....	66
4.5 การตอบสนองที่มีต่อก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ.....	68
4.5.1 การศึกษาความไวในการตรวจจับก๊าซ.....	68
4.6 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O ₂)	69
4.7 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H ₅ OH)	74
4.7.1 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	74
4.8 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH ₃).....	79
4.8.1 การตอบสนองต่อแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	79
4.9 การศึกษาความหนาของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ต่อการตอบรับก๊าซ.....	84
4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซ.....	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงต่างๆ ของอินฟราเรดสเปกตรัม.....	22
3.1 เงื่อนไขการสปีดเตอร์ริง Ti ด้วยเครื่องดีซี สปีดเตอร์ริง.....	46
3.2 เงื่อนไขการสปีดเตอร์ริง Pt ด้วยเครื่องดีซี สปีดเตอร์ริง.....	47
3.3 เงื่อนไขการซินเตอร์ริง.....	48
3.4 ขั้นตอนการโฟโตลิโธกราฟีน้ำยาไวแสงชนิดบวก.....	48
3.5 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มแพลทินัม (Pt).....	49
3.6 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มไททาเนียม (Ti).....	49
3.7 เงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีสปิน โคตติง.....	50
3.8 เงื่อนไขการอบฟิล์ม.....	51
3.9 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อทำการเปิดขั้ว.....	51
4.1 การเจอความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน.....	69
4.2 ผลการทดลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O ₂).....	69
4.3 อัตราส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ : น้ำ DI (cc) ที่ความเข้มข้นต่าง.....	74
4.4 ผลการทดลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H ₅ OH).....	75
4.5 ผลการทดลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH ₃).....	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แบบจำลองของหน่วยชิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของแข็งสี่มุมที่เรียกว่าทรงเหลี่ยมสี่หน้า..... 2
1.2	การจัดเรียงโมเลกุลของซิลิคอนไดออกไซด์ในควอตซ์จะมีการยึดติดระหว่างกันมีแรงดึงออกทุกทิศทาง..... 2
1.3	การจัดกลุ่มอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ (Transducers)..... 4
2.1	โครงสร้างของ (a) เพชร (b) แกรไฟต์ และ (c) ฟูลเลอร์รีน..... 8
2.2	ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT)..... 9
2.3	ลักษณะการม้วนแผ่นแกรไฟต์เป็นท่อนาโน และโครงสร้างของท่อนาโนที่ได้..... 9
2.4	Chiral angle ซึ่งกำหนดโดยเวกเตอร์ Ch และ T..... 11
2.5	การเป็นโลหะและสารกึ่งตัวนำของท่อนาโนคาร์บอน..... 11
2.6	ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWCNTs)..... 12
2.7	วิธีอาร์คดีสชาร์จ (Arc Discharge)..... 13
2.8	วิธี Laser ablation vaporization..... 14
2.9	แผ่นภาพระบบ Hot Filament activated CVD..... 15
2.10	แบบจำลอง Lennard-Jones การดูดกลืนทางฟิสิกส์และการดูดกลืนทางเคมี..... 17
2.11	ปริมาณการดูดกลืนก๊าซที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ..... 17
2.12	แผนภาพแสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบน plane graphene และ CNT..... 18
2.13	แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของก๊าซจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT..... 18
2.14	แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO ₂ กับ SWCNT..... 19
2.15	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)..... 21
2.16	แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์..... 24
2.17	การตกกระทบของการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์..... 27
2.18	เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)..... 28
2.19	ส่วนประกอบภายในเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)..... 31
2.20	เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)..... 31
2.21	ส่วนประกอบภายในของเครื่อง Ellipsometer..... 33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 เครื่อง Ellipsometer.....	34
2.23 เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง.....	35
2.24 กลไกการเคลือบฟิล์มระบบสปีดเตอร์ริง.....	36
2.25 เปรียบเทียบลักษณะการชนของลูกบิลเลียดกับการสปีดเตอร์ริง.....	37
2.26 การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปีดเตอร์ริง.....	38
2.27 ระบบดีซี สปีดเตอร์ริง.....	40
3.1 ลักษณะสลายตัวของขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	41
3.2 โครงสร้างของวงจรชักนำไฟฟ้าแบบต่างๆ (ก) โครงสร้าง A (ข) โครงสร้าง B (ค) โครงสร้าง C (ง) โครงสร้าง D (จ) โครงสร้าง E และ (ฉ) โครงสร้างของส่วนขยาย.....	42
3.3 ลักษณะสลายของพื้นที่แผ่นชั้นสัญญาณก๊าซ.....	43
3.4 ลักษณะภาพถ่ายโปรแกรม LEDIT.....	43
3.5 ลักษณะกระจกต้นแบบ มาส์กที่ 1.....	44
3.6 ลักษณะกระจกต้นแบบ มาส์กที่ 2.....	44
3.7 ภาพถ่ายของ (ก) เครื่อง Ultra sonic และ (ข) manual bench.....	45
3.8 ภาพถ่ายของเตาออกซิเดชัน.....	46
3.9 ภาพถ่ายเครื่องดีซี สปีดเตอร์ริง.....	47
3.10 ภาพถ่ายเตาซินเตอร์ริง.....	48
3.11 ภาพถ่ายของ (ก) เครื่อง Mask Aligner และ (ข) เครื่อง Spinner.....	49
3.12 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโน คาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น.....	54
3.13 ลักษณะภาพตัดขวางของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ชนิดผนังหลายชั้น.....	54
3.14 ลักษณะ โครงสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ชนิดผนังหลาย ชั้น.....	54
3.15 ภาพถ่ายหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างเสร็จ.....	55
3.16 ภาพถ่ายหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน.....	55
4.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซลเจลซิลิคอนไดออกไซด์.....	56

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์.....57
4.3	กราฟแสดงคุณสมบัติมาตรฐานของซิลิคอนไดออกไซด์.....58
4.4	กราฟแสดงคุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้.....58
4.5	ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 5000 อังสตรอม.....59
4.6	ความสัมพันธ์ของความหนาต่อจำนวนชั้นในการเคลือบที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที.....59
4.7	ผิวหน้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากการแอนนัลที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500, (ค) 600 และ (ง) 700 องศาเซลเซียส.....60
4.8	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง XRD หลังจากการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียส.....61
4.9	แสดงค่าดัชนีหักของแสงหลังการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 , 500 , 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....62
4.10	กราฟ I-V แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์.....63
4.11	ภาพถ่ายผิวหน้า MWCNTs ด้วยเครื่อง SEM.....64
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มแพลทินัมและไททานเนียมกับเวลาการสปัตเตอร์ริง.....65
4.13	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง SiO ₂ -MWCNTs.....65
4.14	ภาพถ่ายผิวหน้าชั้นฟิล์ม SiO ₂ -MWCNTs ด้วยเครื่อง SEM.....66
4.15	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่อง XRD ที่ความหนา 2000, 3000, 4000, และ 5000 อังสตรอม.....67
4.16	แผนผังระบบวัดผลการทดลอง.....69
4.17	การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 5,00 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโครงสร้าง A, B, C, D และ E.....71
4.18	การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 1,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโครงสร้าง A, B, C, D และ E.....71

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 5,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	72
4.20 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 1,0000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	72
4.21 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 500, 1,000, 5,000 และ 10,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ไดออกไซด์บริสุทธิ์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	73
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน (O ₂) ของชั้นฟิล์ม SiO ₂ -MWCNTs และ SiO ₂ บริสุทธิ์ โครงสร้าง A.....	73
4.23 แผนผังระบบวัดผลการทดลอง.....	75
4.24 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H ₅ OH) ความเข้มข้น 0.1% ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	76
4.25 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H ₅ OH) ความเข้มข้น 1% ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	77
4.26 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H ₅ OH) ความเข้มข้น 10% ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	77
4.27 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H ₅ OH) ความเข้มข้น 20% ของชั้นฟิล์มซิลิกอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	78
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H ₅ OH) ของชั้นฟิล์ม SiO ₂ -MWCNTs และ SiO ₂ บริสุทธิ์ โครงสร้าง A.....	78
4.29 แผนผังระบบวัดผลการทดลอง.....	79

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 0.1% ของชั้นฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	81
4.31 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 1% ของชั้นฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	81
4.32 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 10% ของชั้นฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	82
4.33 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 20% ของชั้นฟิล์ม ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E.....	82
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของแอมโมเนีย (NH_3) ของชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs และ SiO_2 บริสุทธิ์ โครงสร้าง A.....	83
4.35 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O_2) ความเข้มข้น 10,000 ppm ที่ความหนาต่างๆ.....	84
4.36 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 20% ที่ความหนาต่างๆ.....	84
4.37 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 20% ที่ความหนาต่างๆ.....	85
4.38 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O_2) ความเข้มข้น 10,000 ppm ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	86
4.39 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$) ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	87
4.40 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	87

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
C	ค่าความจุไฟฟ้า	ฟารัด
C_{air}	ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มในบรรยากาศปกติ	นาโนฟารัด
C_{gas}	ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มในบรรยากาศของก๊าซ	นาโนฟารัด
$^{\circ}C$	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส
C_2H_5OH	เอทิลแอลกอฮอล์	-
CNTs	ท่อนาโนคาร์บอน	-
e^-	ประจุของอิเล็กตรอน	คูลอมบ์
ΔG	พลังงานที่ใช้ในการย่อยสลายโมเลกุลออกซิเจน	อิเล็กตรอน โวลต์
I_s	กระแสคิซาร์จ	ไมโครแอมแปร์
MWCNTs	ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	-
NH_3	แอมโมเนีย	-
i_s	ความหนาแน่นกระแสที่เป่าสารเคลือบ	แอมป์ต่อตารางเมตร
j	ความหนาแน่นกระแสที่ขั้วแคโทด	แอมป์ต่อตารางเมตร
K	ค่าคงที่ Lattice Scattering Mode ($3\pi/8$)	-
K_1	ค่าคงที่	-
I	ระยะห่างระหว่างคู่อิเล็กโตรด	เซนติเมตร
N	ความหนาแน่นของประจุที่สถานะผิว	(cm^{-3})
N(E)	ความหนาแน่นของระดับพลังงาน	(cm^{-3})
N_D	ความหนาแน่นของผู้ให้อิเล็กตรอน	(cm^{-3})
N_S	ความหนาแน่นของประจุบนผิว	(cm^{-3})
O_2	ออกซิเจน	-
P	ความดันก๊าซ	Kg/cm^2
q	ประจุไฟฟ้า	คูลอมบ์
ΔC	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า	-
r_c	รัศมีแคโทด	เซนติเมตร
S	สัมประสิทธิ์ในการสปีดเดอว์ริง	-
SWCNTs	ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว	-
t	ความหนา	มิลลิเมตร

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T	อุณหภูมิ	เคลวิน
t	เวลา	นาที่
X_0	ความหนาแน่นของชั้น	-
ψ	ศักดาที่ Double layer	โวลต์
ψ_s	ศักดาที่ผิวสัมผัสกับเนื้อสาร	โวลต์
ε	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	-
ε_0	ค่าเพอร์มิติวิตีในอากาศ	F/cm
μ_H	ค่าความคล่องตัวของพาหะ	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
λ	ความยาวคลื่น	นาโนเมตร
λ_0	ค่า Mean free path	-

ศัพท์เทคนิค

การดูดกลืน	Absorption
การดูดซับ	Adsorption
อะซิโตน	Aceton
แอมโมเนีย	Ammonia
ระยะทางการยึดเหนี่ยว	Binding distance
พลังงานการยึดเหนี่ยว	Binding energy
พันธะ	Bond
ท่อนาโนคาร์บอน	Carbon nanotube
พันธะโควาเลนต์	Covalent band
น้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน	Deionized water
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
อิเล็กตรอน	Electron
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethanol
ฟูลเลอร์รีน	Fullerene
หัวตรวจวัดก๊าซ	Gas sensors
แกรไฟีน	Graphene
แกรไฟต์	Graphite
ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	Multiwalled carbon nanotubes
ออกซิเจน	Oxygen
ผลึกหลายรูป	Poly crystalline
ซิลิคอนไดออกไซด์	Silicon dioxide
ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว	Singlewalled carbon nanotubes
สเปกตรัม	Spectrum
สปัตเตอร์ริง	Sputtering
ฐานรอง	Substrate
สังเคราะห์	Synthesis
อุลตราโซนิก	Ultrasonic
รังสีเอ็กซ์	X-ray

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันมีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรับรู้แทนประสาทสัมผัสต่างๆ ของมนุษย์ เพื่อใช้ป้องกันอันตรายต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับชีวิตและร่างกาย เช่น ก๊าซพิษและสารเคมีต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการวิจัย ความสามารถในการตรวจวัดปริมาณสารและความแม่นยำในการตรวจวัดต่อชนิดของสาร เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากต่อกระบวนการผลิตและความปลอดภัยในการทำงาน ในด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เพื่อตรวจวัดปริมาณก๊าซพิษและสารเคมีต่างๆ ที่เป็นอันตรายในบริเวณแหล่งชุมชนและที่อยู่อาศัย ซึ่งเราสามารถจำแนกความสามารถในการวัดได้เป็นการวัดทางด้านกายภาพ และการวัดทางด้านเคมี

การวัดทางด้านกายภาพ ได้แก่ การวัดปริมาตร, มวล, อัตราการไหล, อุณหภูมิ และความดัน เป็นต้น ส่วนการวัดทางด้านเคมี ได้แก่ การวัดค่าพีเอช, ความเข้มข้น และก๊าซ เป็นต้น เมื่อพิจารณาถึงการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซนั้น ในปัจจุบันนอกจากวัสดุจำพวกโลหะออกไซด์แล้ว วัสดุประเภทพอลิเมอร์ก็สามารถนำมาเป็นตัววิเคราะห์และตรวจจับก๊าซได้ โดยอาศัยการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) และการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม เราจะเรียกอุปกรณ์นี้ว่า อุปกรณ์หัวตรวจวัดทางเคมี (Chemical sensor) หรืออุปกรณ์หัวตรวจวัดก๊าซ (Gas sensor)

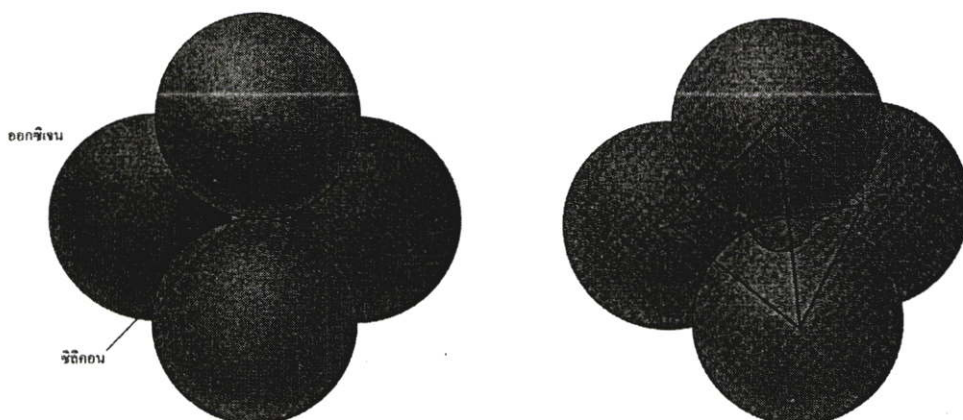
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในระยะเริ่มแรกของการพัฒนาการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ จะทำการสร้างบนวัสดุจำพวกแก้ว, เซรามิก และพอลิเมอร์ เป็นต้น โดยทำการอัดขึ้นรูปและเชื่อมต่อสายสัญญาณภายใน ส่งผลให้โครงสร้างของหัวตรวจวัดมีขนาดใหญ่ และสามารถผลิตได้เป็นจำนวนน้อยในแต่ละครั้งการผลิต ทำให้มีราคาต่ออุปกรณ์ค่อนข้างสูง ด้วยความต้องการให้ขนาดของหัวตรวจวัดก๊าซมีขนาดเล็กลง และราคาต่ออุปกรณ์ที่ลดต่ำลง ต่อมาเทคโนโลยีซิลิคอนจึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงและสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และวิศวกรรมมากยิ่งขึ้น และกำลังเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีซิลิคอน การพัฒนาเทคโนโลยีในระดับนาโนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมวัสดุระดับนาโน หรือการเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับโมเลกุล ซึ่งวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบันก็คือ ท่อนาโนคาร์บอน

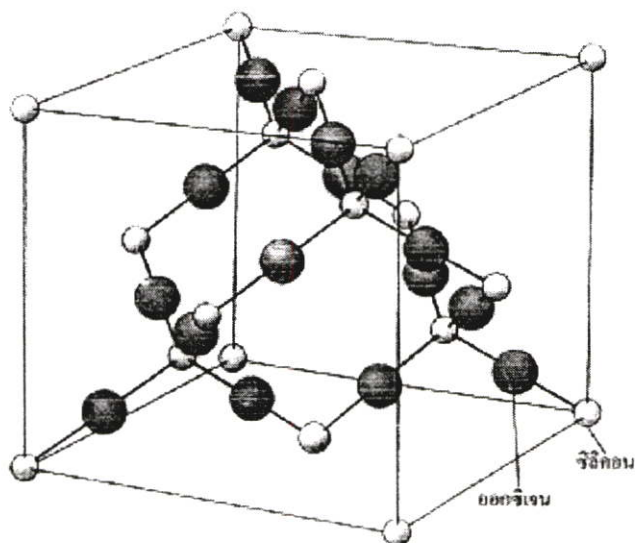
1.2 ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน (SiO_2 – CNTs)

1.2.1 ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) [11]

ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกหลายรูป อะตอมของซิลิคอนจะถูกล้อมรอบอย่างสมบูรณ์ด้วยอะตอมของออกซิเจนสี่อะตอม แต่ละโมเลกุลของซิลิคอนจะต่อกับโมเลกุลข้างเคียงโดยใช้อะตอมของออกซิเจนร่วมกัน ทำให้เกิดเป็นสายโซ่และวงที่มีการจัดตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 2.1 แบบจำลองของหน่วยซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของแข็งที่มุมที่เรียกว่าทรงเหลี่ยมสี่หน้า [11]



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงโมเลกุลของซิลิคอนไดออกไซด์ในควอตซ์จะมีการยึดติดระหว่างกันมีแรงดึงออกทุกทิศทาง [11]

1.2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs)

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube, CNTs) เป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากวัสดุที่เป็นธาตุพื้นฐานที่สำคัญคือ คาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความยาวถึงประมาณ 10 ไมโครเมตร ท่อนาโนคาร์บอนจึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า มีคุณสมบัติที่แข็งแกร่งกว่าเหล็กกล้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา สมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญอย่างมากของท่อนาโนคาร์บอนคือ ความสามารถในการเป็นตัวนำหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังสามารถนำความร้อนที่ติดอยู่ด้วย จึงมีความคิดในการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ในงานหลายประเภท เช่น การทำชิปในเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำสายเคเบิล อุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์วัดระดับสารเคมี เป็นต้น

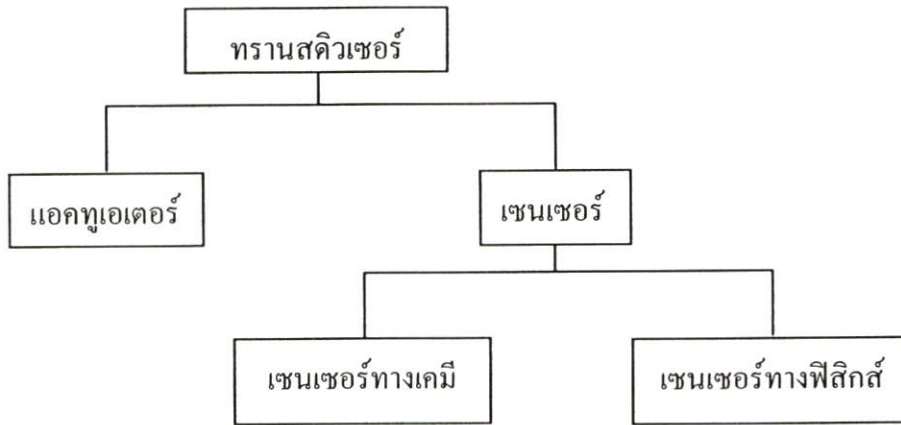
1.3 นิยามของเซนเซอร์

เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่สามารถใช้แทนการตอบสนองทางประสาทสัมผัสของมนุษย์ เช่น การมองเห็น, การสัมผัส, การได้ยิน, การดมกลิ่น และการลิ้มรส จึงได้มีการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัด และแสดงผลออกมาในรูปแบบของสัญญาณหรือพลังงานในรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเราสามารถแยกชนิดของเซนเซอร์และอุปกรณ์ตรวจวัดได้ออกเป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ (Transducers), แอคทูเอเตอร์ (Actuators) และเซนเซอร์ (Sensors)

ทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง รูปแบบพลังงาน เช่น พลังงานทางกลศาสตร์, ทางความร้อน, ทางแสง และทางไฟฟ้า

แอกทูเอเตอร์ คือ อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณหรือพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ เช่น เปียโซอิเล็กทริก

เซนเซอร์ คือ อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์หัวตรวจวัดความดัน, โฟโตทรานซิสเตอร์ และอุปกรณ์หัวตรวจวัดก๊าซ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การจัดกลุ่มอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) [9]

1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมสารละลายซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)
2. เพื่อศึกษาการเตรียมชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs
3. เพื่อศึกษาการตอบสนองของชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs ที่มีต่อก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย
4. เพื่อพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมโซลเจลซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)
2. การเตรียมชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs โดยวิธีสปิน โคนติง
3. วัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม
4. กระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ
5. ผลตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย
6. สรุปผลการทดลอง

1.6 การประยุกต์ใช้งาน

ซัลฟอนไดออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอนถูกผลิตขึ้นมาใช้งานอย่างแพร่หลายและหลายลักษณะ แต่ในที่นี้เราจะเน้นถึงการประยุกต์ใช้งานด้านการตรวจจับก๊าซ สำหรับการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในส่วนของชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซเกิดขึ้นจากการนำวัสดุสองชนิดรวมเข้าด้วยกันในสัดส่วนที่เหมาะสม สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซได้หลายชนิดในสถานที่ต่าง ๆ ได้ตามต้องการ แต่ในที่นี้มุ่งเน้นถึงการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O_2), เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) และแอมโมเนีย (NH_3) เป็นหลัก ชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซซึ่งประกอบด้วยซัลฟอนไดออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (SiO_2 -MWCNTs) ใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยาของก๊าซที่อยู่ล้อมรอบกับออกซิเจนที่อยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าภายในชั้นฟิล์ม โดยได้ทำการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซบนฐานรองซัลฟอน และใช้เทคนิคโซลเจลในการเตรียมฟิล์ม ทำให้สามารถสร้างหัวตรวจวัดที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก และสามารถพัฒนาใช้งานร่วมกับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์อื่นได้ในอนาคต

หัวตรวจวัดก๊าซที่มีความแม่นยำและราคาถูก ได้มีการนำมาใช้งานตามสถานที่ต่าง ๆ เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม, ทางการแพทย์, ในห้องปฏิบัติการ และบ้านเรือนที่อยู่อาศัย เป็นต้น สถานที่เหล่านี้จำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับเคมี ในการตรวจสอบและทำการวัดค่าระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อป้องกันการรั่วของปริมาณสารพิษ ใช้ตรวจวัดปริมาณก๊าซเพื่อนำไปใช้งานในปริมาณที่เหมาะสม เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 หลักการทางเคมีของโซล-เจลซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) [1]

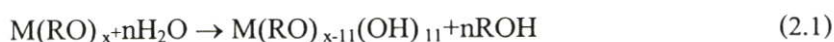
โซล (Solution, Sol) คือของผสมหรือคอลลอยด์ที่มีเฟสรวมกันของสารที่กระจายตัวอยู่ในสารที่เป็นตัวกลาง ส่วนที่เป็นอนุภาคซึ่งกระจายอยู่ในตัวกลางมักจะเป็นอนุภาคของคอลลอยด์ หรือกลุ่มของโพลิเมอร์ ซึ่งมีขนาดอยู่ระหว่าง โมโนเมอร์และ โมเลกุลขนาดใหญ่

เจล (Gel) คือสารที่มีโครงสร้างที่เป็น โมเลกุลของแข็งเรียงต่อกัน โดยปลายทั้งสองด้านเป็นเฟสของของเหลวซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสแบบต่อเนื่อง

เมื่อมีการสร้างสารเซรามิกขึ้นจากสารละลายในระบบของ โซล-เจล โดยรวมไปถึงการตกตะกอนของอนุภาคโลหะออกไซด์จากสารละลาย เริ่มต้นด้วยโซลซึ่งไม่มีความเสถียรเกิดการรวมตัวกันในลักษณะเป็นเครือข่ายเชื่อมโยงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนได้โครงสร้างที่แน่นรวมตัวกัน ซึ่งเป็นการเกิดเป็นเจลนั่นเอง

สารตั้งต้นที่ใช้เตรียม โซล กลุ่มที่นิยมใช้ก็คือ กลุ่มอัล โคไซด์ของโลหะ (M(RO)_x) เมื่อ M เป็นไอออนบวกของโลหะ ส่วน R คือกลุ่มของอัลคิลพอลิเมอร์ ในขบวนการ โซล-เจล เริ่มต้นด้วยการละลายสารตั้งต้นในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ซึ่งมักจะใช้สารอินทรีย์ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอาศัย 2 ขั้นตอนสำคัญคือ ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกริยากอนเดนเซชัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction)



2. ปฏิกริยากอนเดนเซชัน (Condensation reaction)



ในช่วงของปฏิกริยาไฮโดรไลซิส ภายในโซลจะมีการสร้างกลุ่มของอัล โคไซด์ โพลิเมอร์ขึ้นต่อเนื่องเป็นสายและเริ่มจับตัวเป็นกลุ่มก้อน สุดท้ายหลังปฏิกริยากอนเดนเซชันสิ้นสุด กลุ่มของโมเลกุลที่จับตัวกันนี้ จะมีการเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นกลุ่มของโมเลกุลขนาดใหญ่และกลายเป็น พอลิเมอร์ในที่สุด

กระบวนการโซลเจลอย่างง่ายได้แก่ การเตรียม SiO_2 โดย Silicate esteraz ถูก hydrolysis ก่อน แล้วกลั่นตัวที่อุณหภูมิห้อง การ hydrolysis จะช่วยทำให้เกิดหน่วย monomer ของไฮดรอกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยเร่งปฏิกิริยา พอลิคอนเดนเซชันที่อาจเกิดขึ้นภายหลัง คล้ายกับปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะอื่นๆ [6] การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นไป ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction)



2. ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ริเซชัน (Polymerization reaction)

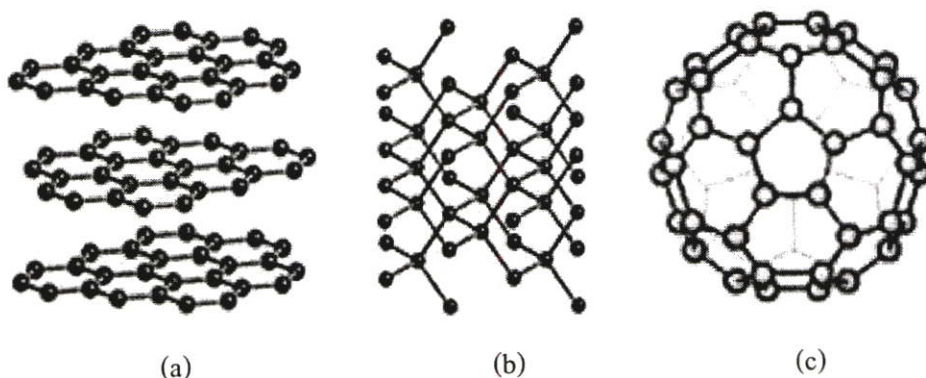


2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes)

การค้นพบท่อนาโนคาร์บอนครั้งแรกนั้นเกิดขึ้นด้วยความบังเอิญในปี ค.ศ.1991 ภายหลังจากการค้นพบฟูลเลอร์รีน 6 ปี โดยนักวิจัยของบริษัท เอ็นอีซี (NEC) ในห้องทดลองที่เมืองสึกุบา (Tsukuba) ประเทศญี่ปุ่น ชื่อ ซุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมากตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟูลเลอร์รีนจากกระบวนการยิงด้วยอิเล็กตรอน (electron arc discharge) แล้วสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับรากไม้ เป็นเส้นยาว บาง และจับกันอยู่เป็นกลุ่ม แต่ที่น่าสนใจคือ วัสดุนี้มีโครงสร้างของอะตอมที่เป็นระเบียบและสมมาตร ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือท่อชนิดผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 อิจิมาและนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ชื่อ ดอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสร้างท่อนาโนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อยในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นแกรไฟต์ และป้องกันการเกิดเป็นฟูลเลอร์รีนขนาดเล็ก จากนั้นท่อนาโนของคาร์บอนก็ได้รับความสนใจศึกษามากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดและคุณสมบัติตามที่ต้องการ รวมทั้งการนำท่อนาโนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อีกด้วย

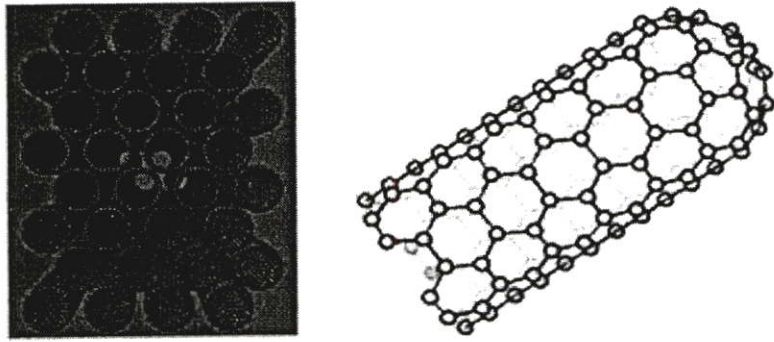
2.2.1 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

โมเลกุลของท่อนาโนคาร์บอนประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอนเช่นเดียวกับเพชร แกรไฟต์ (graphite) เถ้าถ่าน และบอลนาโนคาร์บอนหรือฟูลเลอร์รีน (Fullerene, C₆₀ หรือ C₇₀) แต่มีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว ดังรูปที่ 2.1(a) เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแกร่งและคงทนมาก ขณะที่แกรไฟต์มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกันเรียกว่าแผ่นแกรไฟน์ (graphene) และมีพันธะเชื่อมต่อระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 2.1(b) พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นแกรไฟต์นั้นแข็งแกร่งมากแต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนเถ้าถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่าอสัณฐานของคาร์บอน และฟูลเลอร์รีนมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล ดังรูปที่ 2.1(c)



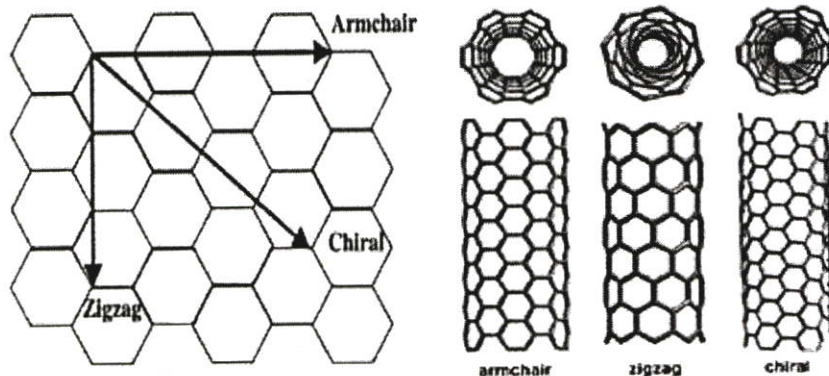
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ (a) เพชร (b) แกรไฟต์ และ (c) ฟูลเลอร์รีน

โครงสร้างของวัสดุที่กล่าวข้างต้นต่างจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่คล้ายกับแผ่นแกรไฟต์ที่มีวนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อนาโนคาร์บอนจึงมีผนังของอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมและอาจมีบริเวณปลายของท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของฟูลเลอร์รีน ดังรูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอนประเภทนี้เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Singlewall carbon nanotube, SWCNTs)



รูปที่ 2.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNTs)

ลวดลายตามผนังของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวนั้นอาจมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ 3 แบบตามการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน คือ โครงสร้างท่อแบบ armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนตั้ง โครงสร้างท่อแบบ zigzag ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรแกนนอน และโครงสร้างท่อแบบ chiral ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก ซึ่งโครงสร้างท่อนาโนทั้งสามแบบนี้ แสดงได้ดัง รูปที่ 2.3 และ โครงสร้างที่แตกต่างกันนี้มีผลต่อคุณสมบัติหลายๆ อย่างของท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการม้วนแผ่นแกรไฟต์เป็นท่อนาโน และโครงสร้างของท่อนาโนที่ได้

โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนสามารถค้นพบได้โดยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) ที่มีความเข้มสูง และการใช้เทคนิคของ STM ยืนยันว่าท่อนาโนคาร์บอน จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหลายอันที่ไม่ได้เชื่อมกัน ซึ่งแตกแขนงออกมาจากโครงสร้างที่คล้ายรังผึ้ง ซึ่งทำให้เห็นถึงชั้นอะตอมเดี่ยวของผลึกแกรไฟต์ ซึ่งถูกเรียกว่าแกรเฟลชีส

(graphene sheet) ลักษณะโครงสร้างของ SWCNTs สามารถอธิบายได้โดยง่ายในเทอมของยูนิตเซลล์ 1 มิติ ซึ่งแทนด้วยเวกเตอร์ \vec{Ch} และ \vec{T}

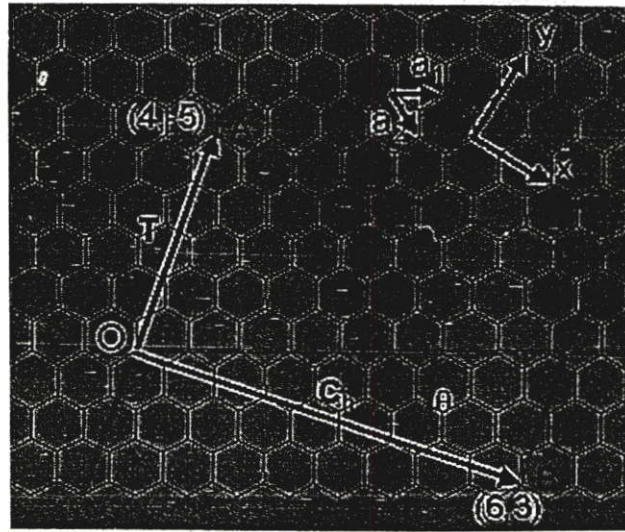
เส้นรอบวงของตัวท่อนาโนคาร์บอนต่างๆ แสดงได้ในเทอมของ Chiral vector $\vec{Ch} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$ โดยการเชื่อมต่อด้านที่มีความสมดุทธ์ของเป็นผลึกทั้ง 2 ด้าน บนแกรเฟสชีต 2 มิติ โครงสร้างแสดงถึงมุม Chiral (θ) ที่เกิดระหว่าง Chiral vector (\vec{Ch}) และทิศทาง “Zigzag” ($\theta = 0$) และ Vectors \vec{a}_1 และ \vec{a}_2 ของแกรเฟสชีตทั้ง 3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน สามารถเกิดขึ้นจากการม้วนของแกรเฟสชีตเข้าเป็นทรงกระบอก โดยจะเกิดเป็นท่อนาโนคาร์บอน Zigzag และท่อนาโนคาร์บอน Armchair ท่อนาโนคาร์บอน Chiral ตามลำดับโดยที่ Chiral angle ของ $\theta = 0$, $\theta = 30^\circ$ ท่อนาโนคาร์บอน Chiral จะมีค่า $0 < \theta < 30^\circ$ โดยจุดตัวของเวกเตอร์ \vec{OB} (โดยทั่วไปเป็น \vec{Ch}) กับจุดพันธะแรกสามารถคิดได้ว่าเป็นเวกเตอร์แปลง 1 มิติพื้นฐาน (T) ยูนิตเซลล์ของพันธะ 1 มิติ คือรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งกำหนดโดยเวกเตอร์ \vec{Ch} และ \vec{T} ทรงกระบอก จะเชื่อมต่อฝาครอบครึ่งซีกทั้งสองข้างของตัวท่อนาโนคาร์บอนที่ประกอบขึ้นจากการวางซ้อนกันที่จุดปลายทั้งสองของเวกเตอร์ \vec{Ch} และจุดเชื่อมต่อของทรงกระบอกที่เกิดขึ้นไปตามแนวของเส้นตรง 2 เส้น OB และ AB เป็นเส้นที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ $\vec{Ch} = m\vec{a}_1 + n\vec{a}_2$ โดยเวกเตอร์ (n,o) หรือ (o,m) ใช้แทนท่อนาโนคาร์บอน Zigzag และเวกเตอร์ (n,n) ใช้แทนท่อนาโนคาร์บอน Armchair และเวกเตอร์ (n,m) ใช้แทนท่อนาโนคาร์บอน Chiral เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน dt สามารถแสดงได้โดย

$$dt = \sqrt{3} ac-c (m^2 - mn + n^2)^{1/2} / \pi = \vec{Ch} / \pi, \quad (2.6)$$

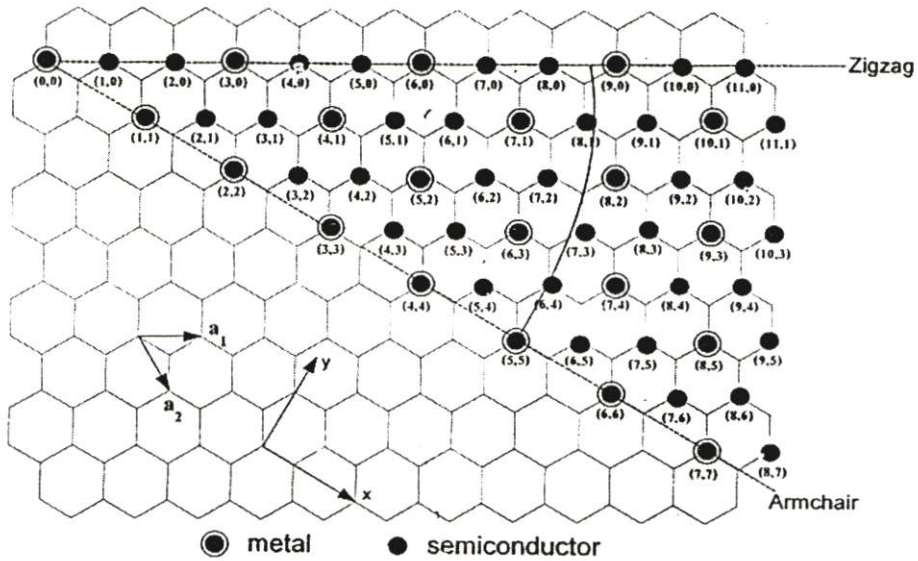
โดยที่ Ch คือความยาวของเวกเตอร์ \vec{Ch} , $ac - c$ คือความยาวของพันธะ C - C (1.42 Å) และ Chiral angle (θ) สามารถแสดงได้โดย

$$\theta = \tan^{-1} [\sqrt{3}n / (2m + n)] \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 จากการที่มุม $\theta = 30^\circ$ สำหรับ (n,n) เป็นท่อนาโนคาร์บอน แบบ Armchair และ มุม $\theta = 60^\circ$ สำหรับ (n,o) เป็นท่อนาโนคาร์บอน Zigzag จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าเรา กำหนด θ ให้อยู่ระหว่าง $0 \leq \theta \leq 30^\circ$ ดังนั้นโดยการสมมาตรมุม $\theta = 0^\circ$ จะเห็นไปทั้งท่อนาโนคาร์บอน Zigzag และท่อนาโนคาร์บอน Chiral



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



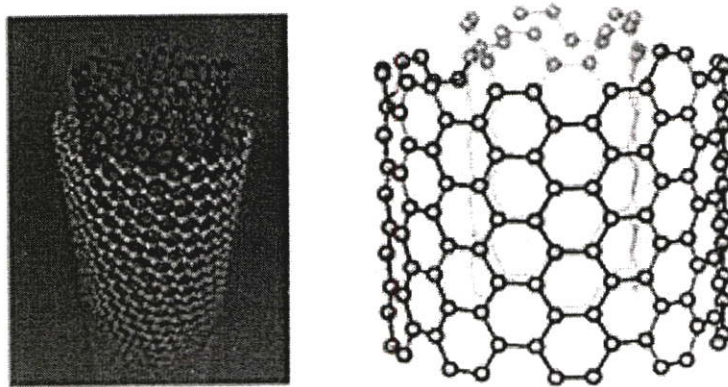
รูปที่ 2.5 การเป็นโลหะและสารกึ่งตัวนำของท่อนาโนคาร์บอน

ความแตกต่างในเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน dt และมุม Chiral θ ทำให้เกิดข้อแตกต่างในทางคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนต่างๆ เวกเตอร์ที่สมมาตร CR- (W/T) จากกลุ่มของความสมมาตรสำหรับท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่ส่วนที่เปลี่ยนแปลง คือ ช่วงระยะห่างระหว่างของ T และมุมที่หมุนถูกแสดงจำนวนของรูป 6 เหลี่ยม (N) ค่อยูนิตเซลล์ของท่อนาโนคาร์บอน Chiral ถูกระบุโดยค่าต่างๆ ของ (N,N) สามารถแสดงได้ตามสูตร

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

โดย $dR = d$ ถ้า $n - m$ ไม่เป็นผลคูณของ 3d หรือ $dR = 3d$ ถ้า $n - m$ เป็นผลคูณ 3d และ d ถูกนิยามว่าเป็นตัวหารร่วมที่มีค่ามากที่สุดของ (n,m) ของแต่ละรูปหกเหลี่ยมในพันธะรูปร่างผึ้ง รูปที่ 2.5 ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน 2 อะตอม พื้นที่ของยูนิเซลล์ของท่อนาโนคาร์บอน คือ N มากกว่าชั้นแกรเฟส (graphene layer) และด้วยเหตุนี้พื้นที่ของยูนิเซลล์สำหรับท่อนาโนคาร์บอนในพื้นที่ว่างตรงกันคือ มีจำนวนน้อยกว่า $1/N$ รูปที่ 2.5 ซึ่งให้เห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นสารกึ่งตัวนำ และพวกที่เป็นโลหะ

นอกจากท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีท่อที่มีผนังหลายชั้น (Multiwall carbon nanotube, MWCNTs) ซึ่งผนังท่อมักจะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWCNTs)

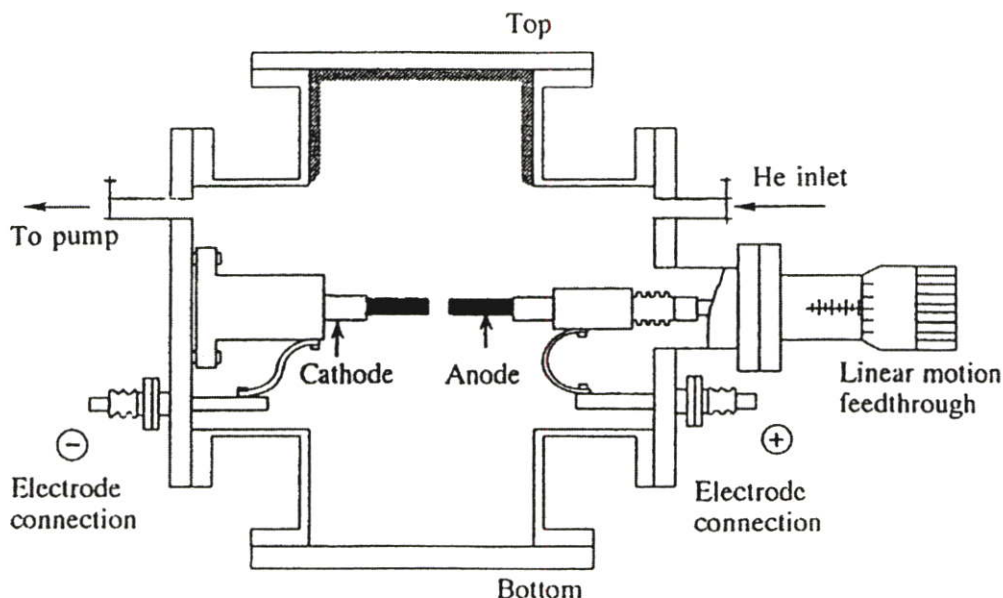
2.2.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน [10]

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับสมบัติของท่อนาโนที่ต้องการ แต่วิธีการหลักๆ แบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่

2.2.2.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)

เป็นวิธีเริ่มแรกในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน และเป็นวิธีเดียวกับการสังเคราะห์ฟูลเลอรีน ($C_{60}C_{70}$) เป็นการสร้างพลาสมา (Plasma) ที่มีความร้อนสูง ให้เกิดขึ้นระหว่างขั้วคาร์บอน โดยการป้อนแรงดันให้เกิดกระแสไฟสูง ประมาณ 100A ระหว่างแท่งแกรไฟต์ ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm โดย Kratschmer et al ในปี 1999 ท่อนาโนคาร์บอนจะเกิดการก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว วิธีนี้มีทั้งที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งจะได้เป็น Singlewalled carbon nanotubes (SWCNTs) และที่ไม่ใช้โลหะเป็นตัวเร่ง จะได้เป็น Multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) โดยวิธี Arc Discharge เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายน้อย แต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปน

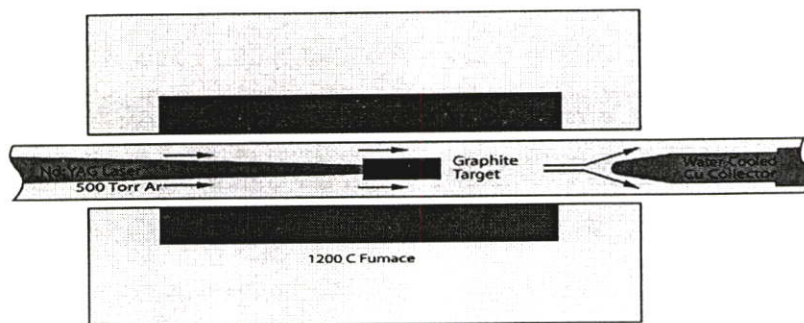
ค่อนข้างมาก มีประสิทธิภาพของผลผลิต 30-90% โดยวิธีการที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) ที่ส่งผลให้มีการสังเคราะห์ SWCNTs ถูกค้นพบโดย Iijima และ Ichihashi โดยมีเสนอรายงานในปี 1993 เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดท่อนาโนคาร์บอนที่ได้เท่ากับ 1 nm โดยมีการนำเสนอโลหะผสมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีส่วนผสมคือ นิกเกิล (Ni) 2.6%, ฟรานเซียม (Fr) 0.7%, เหล็ก (Fe) 0.75% ผลของการสังเคราะห์พบว่า สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้มากกว่า 1 กรัมต่อชั่วโมง โดย Sun et.al



รูปที่ 2.7 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)

2.2.2.2 Laser ablation vaporization

ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ ในกลุ่มของ Prof. Smalley วิธีนี้ใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูง กระแทกกับแท่งคาร์บอนผสมโลหะที่อยู่ในเตาอบซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1,200 °C ทำให้เกิดคาร์บอนแก๊ส และคาร์บอนอะตอมที่ร้อนขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้จะแตกต่างจากวิธี Arc Discharge ตรงที่ให้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีความบริสุทธิ์สูงแต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง โดยเริ่มแรกเป็นวิธีที่จะสังเคราะห์ฟูลเลอร์ริน ต่อมาได้มีการพัฒนาที่จะผลิต MWCNTs โดยใช้เลเซอร์พลังงานสูง กระแทกกับแท่งคาร์บอน โดยกระบวนการขั้นแรกนี้จะผลิต MWCNTs ได้เพียงอย่างเดียว ต่อมาได้มีการผสมโลหะเข้าไปในแท่งคาร์บอนโลหะผสม ได้แก่ โคบอลต์ (Co), นิกเกิล และพาลาเดียม (Rh) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถผลิต SWCNTs ได้ที่มีขนาด 5-20 nm โดยงานวิจัยของ Zhang และ Iijima



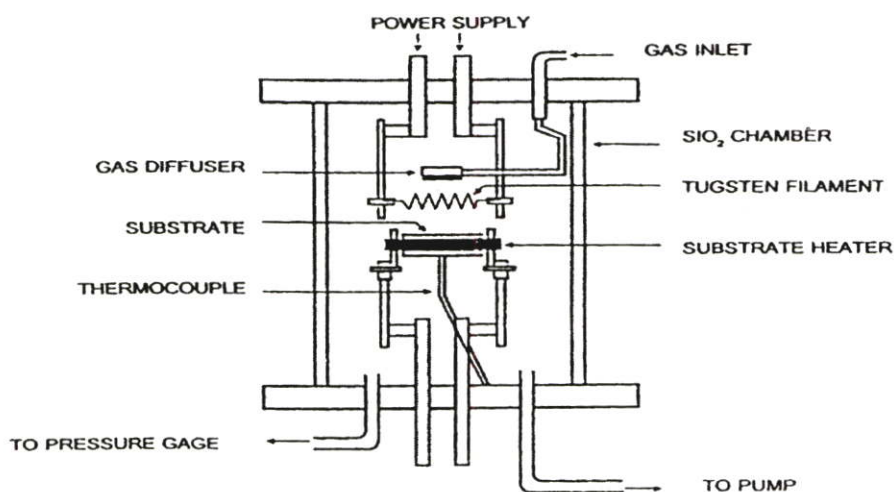
รูปที่ 2.8 วิธี Laser ablation vaporization

2.2.2.3 วิธี CVD (Chemical Vapor Deposition)

วิธีดีโพสิชันทางเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) นี้สามารถแบ่งตามวิธีการแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอนและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 5 วิธี คือ ดีโพสิชันทางเคมีด้วยความร้อน (Thermal CVD) ดีโพสิชันทางเคมีของพลาสมา (Plasma enhanced CVD, PECVD) ดีโพสิชันทางเคมีบนเส้นใยร้อน (Hot filament CVD) ดีโพสิชันทางเคมีของเฟสไอ (Vapor phase growth CVD) และดีโพสิชันทางเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูง (High pressure carbon oxide CVD, HiPCo) ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันคือ ดีโพสิชันทางเคมีด้วยความร้อน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ทั้งท่อนาโนชนิดผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น ส่วนวิธีดีโพสิชันทางเคมีของพลาสมานั้นสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนได้ที่อุณหภูมิต่ำที่สุด (ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส) แต่ท่อนาโนที่ได้ส่วนมากจะเป็นชนิดผนังหลายชั้นเท่านั้น ต่อมาวิธีดีโพสิชันทางเคมีบนเส้นใยร้อนมีหลักการเช่นเดียวกับดีโพสิชันทางเคมีด้วยความร้อนต่างกันที่วิธีนี้ใช้เส้นใยขาวที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกก๊าซออกเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่คุณภาพของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำอยู่ สุดท้ายวิธีดีโพสิชันทางเคมีของเฟสไอและดีโพสิชันทางเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูง ใช้ก๊าซของโลหะ เช่น เฟอโรซีน ($\text{Fe}[\text{CO}]_5$) แทนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสองวิธีนี้สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนที่ละจํานวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือควบคุมทิศทางและตำแหน่งของท่อได้ไม่ถนัด และใช้ก๊าซที่มีพิษ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นสารตั้งต้น

วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) คือ การแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม เช่น แก๊สมีเทน, แก๊สอะเซทิลีนบนโลหะ โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมาเข้ามาช่วยอุณหภูมิ อยู่ระหว่าง 400-1,200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถควบคุมขนาดความยาวของท่อนาโนคาร์บอนได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุด วิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ โดยมีประสิทธิภาพของผลผลิต 20-90% ซึ่งวิธี CVD นี้ สามารถแบ่งย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกแก๊สและวิธีเตรียมโลหะตัวเร่ง วิธีนี้

ถูกเสนอครั้งแรกโดย Matsu moto et al. จาก NIRIM ในปี ค.ศ. 1981 แผนภาพของวิธี Filament Assisted Thermal CVD แสดงดังรูปที่ 2.9 ภายในแชมเบอร์ (Chamber) ที่มีไส้หลอดทั้งสแตน (Tungsten Filament) ทำหน้าที่กำเนิดความร้อนอุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตน มีค่าสูงถึง 2,000-2,200 °C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดทั้งสแตน มีอุณหภูมิ 700-1,000 °C เมื่อแก๊สผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปในแชมเบอร์ ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนจะเกิดการแตกตัวของแก๊สขึ้น เป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม ฐานรองสามารถไบอัสไฟเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการก่อตัว (Growth) และอัตราการก่อตัวของทิวป์ที่อัตราส่วนระหว่างแก๊สมีเทน (0.5-2%) ต่อแก๊สไฮโดรเจน กระทำที่ความดัน 10-100 ทอร์ วิธี Filament Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่ายค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ท่อนานคาร์บอนที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสังเคราะห์ ท่อนานคาร์บอนได้ ในบริเวณกว้างและมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนนั้น เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งสแตนนั้นเป็นเวลานาน ไส้หลอดทั้งสแตนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนเป็น W_2C ทำให้หลอดทั้งสแตนเปราะและผิกรูปได้ง่าย



รูปที่ 2.9 แผนภาพระบบ Hot Filament activated CVD

2.3 การประยุกต์ใช้ท่อนานคาร์บอนในเซนเซอร์เคมี [2]

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคนิคการสร้างโครงสร้างใหม่ที่ลงลึกถึงระดับ โมเลกุลหรืออะตอม นิยมใช้ปรับโครงสร้างหรือส่วนประกอบทั้งทางกายภาพ, เคมี หรือชีวภาพเพื่อให้เกิดคุณสมบัติใหม่ๆ ขึ้น ท่อนานคาร์บอนเป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่มีความสนใจ เนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดี มีเสถียรภาพสูงทุกช่วงอุณหภูมิและเคมี ทั้งยังนำความร้อนได้ดีอีกด้วย ท่อนานคาร์บอนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ท่อนานคาร์บอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-3 นาโนเมตร สามารถยาวได้ถึง 100 ไมโครเมตร นับว่าเล็กที่สุดในหมู่คาร์บอนด้วยกัน แต่แข็งเหมือนเพชรและนำไฟฟ้าได้ดีเหมือนกราไฟต์ (graphite) เพชรถือเป็นวัสดุที่แข็งที่สุดในธรรมชาติและเป็นฉนวนไฟฟ้า ขณะที่

กราไฟต์เป็นวัสดุนำไฟฟ้าเนื้ออ่อนที่สุด (มักทำไส้ดินสอด และหลอดลื่นผิวสัมผัส) คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอมและกลไกการผิดรูป (mechanical deformation) เป็นสำคัญ คุณสมบัติทั้งสองทำให้ ท่อนาโนคาร์บอนเหมาะที่จะเป็นเซนเซอร์ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากไวต่อสารเคมีและไวต่อความกดดันทางกลและกายภาพอย่างมาก สำหรับหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการ ใช้ ท่อนาโนคาร์บอนในเซนเซอร์เคมีเป็นหลัก เทคโนโลยีเซนเซอร์กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก ทุกวันนี้เราต้องการเซนเซอร์ที่ตอบสนองได้ฉับไว อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์บางอย่าง เช่น ภาพ, เสียง, สัมผัส และกลิ่นยังตรวจจับได้ไม่ดัดนัก จำเป็นต้องพัฒนาเซนเซอร์เคมีและฟิสิกส์ต่อไปเพื่อให้ตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมได้ถูกต้องและฉับไวตามต้องการ

2.4 Carbon Nanotube Chemical Sensors [2]

ในระยะ 10 ปีที่ผ่านมา เซนเซอร์เคมีมีมูลค่าทางการตลาดทั่วโลกสูงถึงกว่า 40 ล้านดอลลาร์ ส่วนใหญ่ใช้เพื่อตรวจคุณภาพสิ่งแวดล้อม โดยต้องมีขนาดเล็ก, ใช้พลังงานต่ำ, ตรวจจับได้เร็ว และไวต่อกระบวนการทำงานทางอุตสาหกรรม เซนเซอร์ที่ผลิตเพื่อการค้าส่วนใหญ่มุ่งพัฒนาในด้านความไว, ความถูกต้อง และเสถียรภาพการตรวจจับเป็นหลัก ทั้งนี้ที่มวิจัยทางด้านท่อนาโนคาร์บอน ได้พิจารณาเซนเซอร์เคมีหลายแบบ ทุกแบบอาศัยหลักการเปลี่ยนคุณสมบัติจำเพาะ เช่น chemiresistors และ back gate field effect transistors ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน magnetic resonant sensors อาศัยหลักการเปลี่ยนความถี่จาก mass loading และ optical sensor ซึ่งอาศัยหลักการกระจายและดูดซับแสงของสารเคมีเป็นหลัก

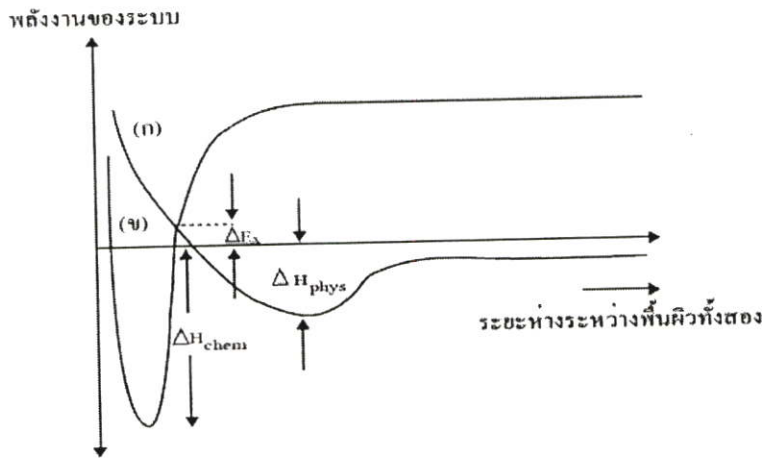
2.4.1 การดูดกลืนก๊าซ [9]

การดูดกลืนก๊าซที่พื้นผิวจะประกอบด้วย การดูดกลืนทางฟิสิกส์ (Physisorption) และการดูดกลืนทางเคมี (Chemisorption)

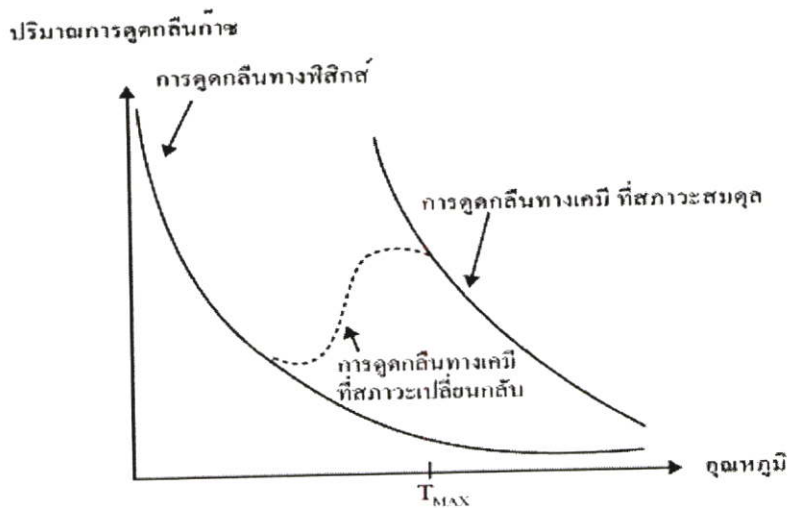
1) การดูดกลืนทางฟิสิกส์ จะเป็นการดูดกลืนที่ไม่แข็งแรงระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองด้วยแรงดึงดูดระหว่างขั้วไดโพล (dipole-dipole) มีพลังงานยึดเหนี่ยว 0.1 ถึง 0.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ($\Delta H_{\text{phys}} = 2$ ถึง 5 kcal mol^{-1}) พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบ (ΔH_{phys}) จะเป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง ดังแสดงในรูป 2.10 พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบจะมีค่ามากที่สุด เมื่อระยะห่างระหว่างพื้นผิวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ตามแบบจำลอง Lennard-Jones และเมื่อพิจารณาปริมาณการดูดกลืนทางฟิสิกส์จะมีปริมาณเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ดังในรูปที่ 2.11 ปริมาณการดูดกลืนทางฟิสิกส์จะมีปริมาณมากในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ

2) การดูดกลืนทางเคมีจะเป็นพลังงานการยึดเหนี่ยว จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการแยกโมเลกุลของก๊าซออกเป็นอะตอม พลังงานยึดเหนี่ยวของระบบ (ΔH_{chem}) จะมีค่ามากกว่า 15 kcal mol^{-1} เมื่ออะตอมเข้าใกล้ผิวจะเกิดพันธะเคมี และพลังงานในการดูดกลืนทางเคมีจะมีค่าเป็นลบ และ

มากกว่าพลังงานการดูดกลืนทางฟิสิกส์ ดังในรูปที่ 2.10 และเมื่อพิจารณาปริมาณการดูดกลืนทางฟิสิกส์ จะสังเกตปริมาณเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ดังในรูปที่ 2.11 ปริมาณการดูดกลืนทางเคมีจะปริมาณมากในช่วงที่อุณหภูมิสูง



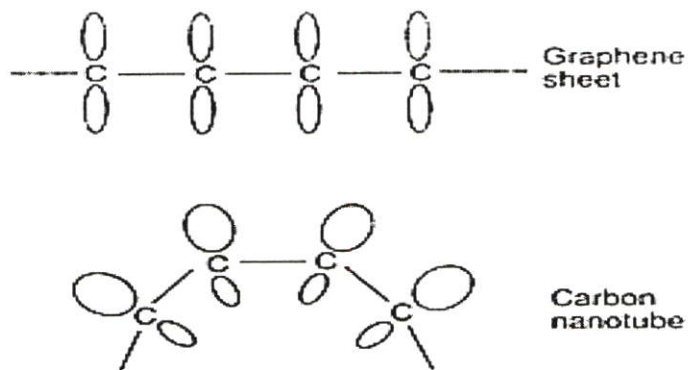
รูปที่ 2.10 พลังงานการดูดกลืนทางเคมีและทางฟิสิกส์ โดยแบบจำลอง Lennard-Jones มีระยะระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ΔE_A คือ พลังงานการกระตุ้นในการดูดกลืนทางเคมี
 (ก) การดูดกลืนทางฟิสิกส์
 (ข) การดูดกลืนทางเคมี พลังงานที่สามารถแยกโมเลกุลของอนุภาคจะอยู่ที่ตำแหน่งห่างระหว่างพื้นผิวทั้งสองมีค่าเข้าใกล้อนันต์ [9]



รูปที่ 2.11 ปริมาณการดูดกลืนก๊าซที่อุณหภูมิต่าง ๆ [9]

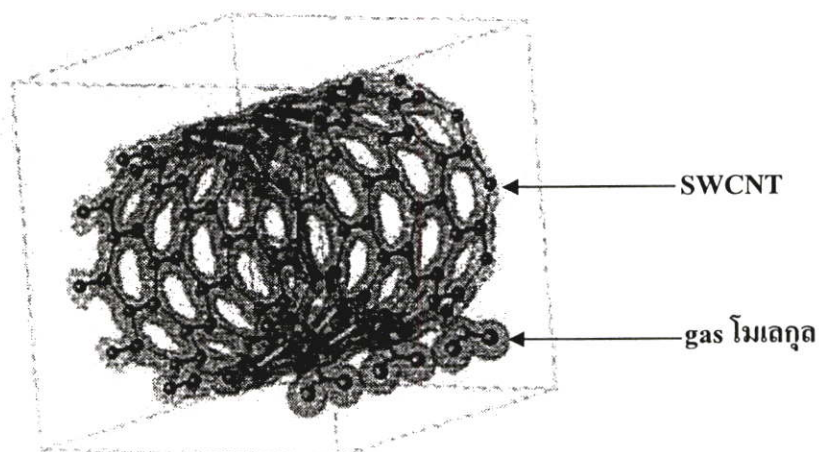
2.4.2 หลักการพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซนเซอร์เคมี [2]

สำหรับแผ่นคาร์บอนแกรฟีนที่มีการเรียงตัวคาร์บอนเป็นแนวตรง ทำให้อิเล็กตรอนมีการกระจายตัวสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เมื่อพิจารณาท่อนาโนคาร์บอน แผ่นคาร์บอนแกรฟีนจะมีลักษณะทรงกระบอก ซึ่งแผ่นคาร์บอนแกรฟีนที่มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนรูปจากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในและนอกแผ่น nanotubes ทรงกระบอก (cylindrical sheet) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



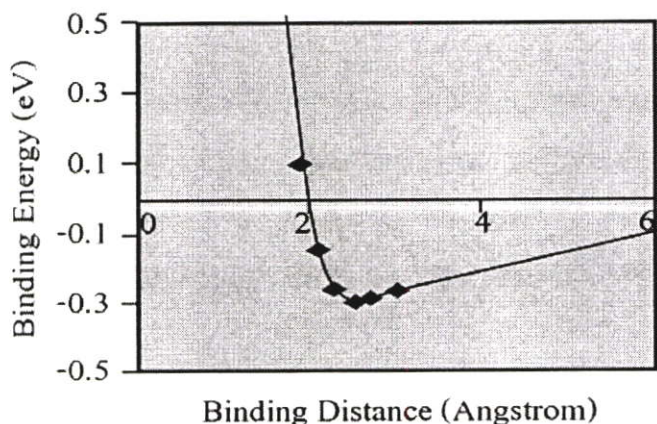
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบน plane graphene และ CNTs [2]

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการผิดรูป ด้านนอกท่อ จึงมีเฉพาะ π -electron ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าเคมี CNTs ขึ้นกับโมเลกุลของก๊าซ CO_2 , NO_2 , NH_3 , O_2 และ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เป็นต้น โดยมีโมเดลของการยึดเกาะ โมเลกุลของก๊าซกับท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



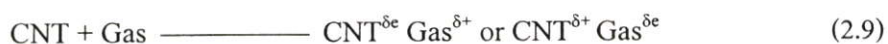
รูปที่ 2.13 แสดงโมเดลการยึดเกาะ โมเลกุลของก๊าซจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT [4]

หลังการยึดเกาะ (Binding Energy) ของโมเลกุลก๊าซกับ SWCNT จะเป็นฟังก์ชันกับระยะทางจากโมเลกุลของก๊าซถึงท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งจากการคำนวณกับโมเลกุลก๊าซของ NO_2 ที่มีโครงสร้างการยึดเหนี่ยวกับ SWCNT ตามโมเดลรูปที่ 2.14 จะมี adsorption Energy ประมาณ 0.3 eV และมีระยะยึดเหนี่ยว (Binding Distance) ประมาณ 2.5 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO_2 กับ SWCNT [4]

จะเห็นว่าโมเลกุลของก๊าซที่กล่าวข้างต้นมีการแพร่ที่สูงบนพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน จากการวิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของก๊าซ จะถูกถ่ายหรือดึงจาก SWCNT ทำให้ SWCNT ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) มีประจุ carriers หรือ holes มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของ SWCNT หรือ MWCNT จึงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้



เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกถ่าย ระหว่างเกิดปฏิริยา

2.5 วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (SiO₂-MWCNTs)

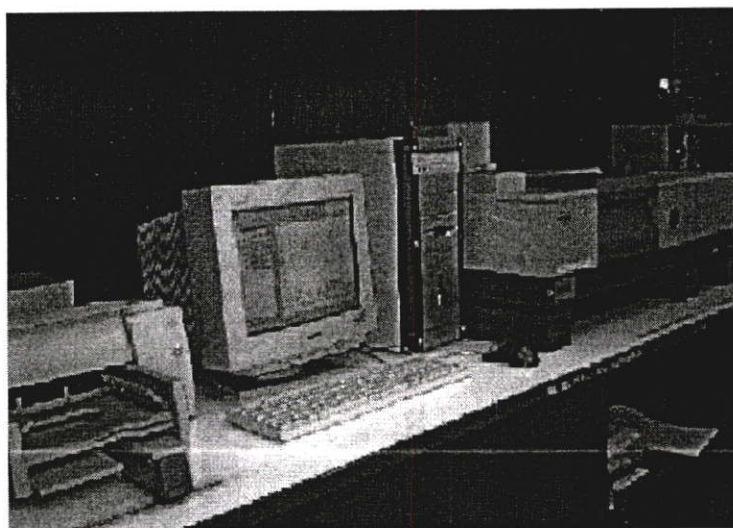
การวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (SiO₂-MWCNTs) เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ของฟิล์ม ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอตัวอย่างเทคนิครวมทั้งเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัด และวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม ซึ่งประกอบด้วย

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

ซึ่งกล่าวในรายละเอียดหัวข้อถัดไป ตามลำดับ

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

อินฟราเรดและรามานสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง หรือของเหลว หรือแก๊สก็ได้ ถึงแม้ว่าวิธีทั้งสองนี้จะให้ข้อมูลที่คล้ายๆ กัน คือเป็นข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดการสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) ของโมเลกุล จริงๆ แล้วเทคนิคทั้งสองนี้มีข้อที่แตกต่างกันตรงที่ กลไกของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสี (radiation) กับโมเลกุลหรือ molecular species เท่านั้น อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเรื่องที่เกี่ยวกับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร แต่รามานสเปกโทรสโกปีเป็นเรื่องของการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) ระหว่างโฟตอนกับโมเลกุลของสาร พลังงานบางส่วนถูกถ่ายเทไปยังโมเลกุลทำให้เกิดการสั่นและการหมุนของโมเลกุลแล้วเกิดการกระเจิงออกไป



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

การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับอินฟราเรดนี้ได้ดำเนินมาเป็นเวลานานแล้ว ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1800 Sir William Herschel ได้ศึกษาเกี่ยวกับ heating effect ในช่วงต่างๆ ของสเปกตรัม และพบว่า heating effect มีมากที่สุด ในแถบของสเปกตรัมที่เลขสีแดง (red end) ไปแล้ว และในช่วงปลายของศตวรรษที่ 19 ได้เริ่มมีการศึกษาอินฟราเรดสเปกตรัมแล้ว ในปี ค.ศ. 1910 Coblentz ได้ศึกษาการดูดกลืนแสงอินฟราเรดสเปกตรัมของสารต่างๆ และได้สร้างความสัมพันธ์ของอินฟราเรดสเปกตรัมกับโครงสร้างของสารขึ้น ซึ่งยังคงใช้อยู่จนกระทั่งปัจจุบันนี้

ในปี ค.ศ. 1939-1945 ได้มีการศึกษาและการนำไปใช้ประโยชน์ของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ของผสมพวกไฮโดรคาร์บอนและสารในกลุ่มใกล้เคียงกันได้ดี จึงมีผู้วิจัยด้านนี้มากขึ้น ทั้งเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์และเครื่องวัดที่มีสภาพไวสูงๆ จนกระทั่งสร้างเครื่องมือทั้งชนิดลำแสงเดี่ยวและลำแสงคู่ขึ้นมาใช้ในการศึกษาอินฟราเรดสเปกตรัม เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของสารที่สนใจจนกลายเป็นงานประจำได้

อินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมี wave numbers อยู่ในช่วงประมาณ $12,800$ ถึง 10 cm^{-1} หรือมีช่วงความยาวคลื่นจาก 0.78 ถึง $1,000\text{ }\mu\text{m}$ เพื่อให้ง่ายและสะดวกขึ้น จะแบ่งช่วงของอินฟราเรดสเปกตรัมออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงใกล้อินฟราเรด (near IR region) หรือ overtone region ซึ่งเป็นช่วงที่อยู่ใกล้กับช่วงวิสิเบิล เกิดจากการรวมกันของ IR ที่อยู่ในช่วงกลาง (นั่นคือ เป็น 2ν , 3ν เป็นต้น) หรือช่วงที่ต่ำกว่า $2.5\text{ }\mu\text{m}$ และมักจะพบว่า absorption band ที่ได้ค่อนข้างต่ำ (weak) overtone absorption มีประโยชน์ในการวิเคราะห์สารพวก aromatic compounds หรือ พวก aromatic substitution

ช่วงกลางอินฟราเรด (middle IR region) หรือ fundamental region ยังแบ่งออกได้เป็น

1. group-frequency region เป็นช่วงที่อยู่ระหว่าง $4,000-1,300 \text{ cm}^{-1}$ หรือ $2.5-8 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งสเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่ได้จากพวก functional groups แต่ไม่ให้ complete structure
2. finger print region เป็นช่วงที่อยู่ระหว่าง $1,300-650 \text{ cm}^{-1}$ สเปกตรัมที่ได้ในช่วงนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ ดังนั้น สเปกตรัมที่ได้จึงค่อนข้างยุ่งยาก การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบโครงสร้างแล้ว

ช่วงไกลอินฟราเรด (far IR region) ช่วงนี้ไม่ค่อยจะได้ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัมช่วงนี้มักเกิดจากการสั่นของโครงสร้าง (molecular structure) หรือเกิดจากการหมุนของโมเลกุล

ช่วงที่จะใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์นั้นเป็นช่วงกลางอินฟราเรดเป็นส่วนใหญ่ คือจาก $4,000$ ถึง 400 cm^{-1} หรือ 2.5 ถึง $25 \text{ }\mu\text{m}$ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงต่างๆ ของอินฟราเรดสเปกตรัม

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

กระบวนการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (The Infrared Absorption Process)

โมเลกุลของสารเคมีจะดูดกลืนแสงในช่วงของอินฟราเรด (IR) ได้นั้น ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการดูดกลืนแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล ดังได้กล่าวมาแล้ว เพียงแต่ต่างกันที่ IR มีพลังงานน้อยกว่า ดังนั้น โมเลกุลเมื่อดูดกลืนแสง IR โมเลกุลจะถูกกระตุ้น (excite) เป็นโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าอยู่ที่สภาวะพื้น โดยมีพลังงานเปลี่ยนแปลงอยู่ในราว $2-10 \text{ kcal/mole}$ ซึ่งเป็นพลังงานพอที่จะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่น (vibration) หรือ เกิดการหมุน (rotation) เท่านั้น การดูดกลืนแสง IR ของโมเลกุลมิใช่ว่าทุกโมเลกุลของสารจะดูดกลืนแสง IR ได้หมด แต่จะต้องมีลักษณะเฉพาะ สภาวะก็ต้องเหมาะสมด้วย คือ

1. รังสีหรือแสงนั้นจะต้องมีพลังงานพอเหมาะพอดี (quantise) ที่จะทำให้เกิดแตรนซิชั่น
 2. จะต้องเกิดการควบคู่ (coupling) พอดีระหว่างสนามไฟฟ้าจากการแผ่รังสีกับสารนั้น
- เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแล้วจะทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุลนั้นเปลี่ยนไป

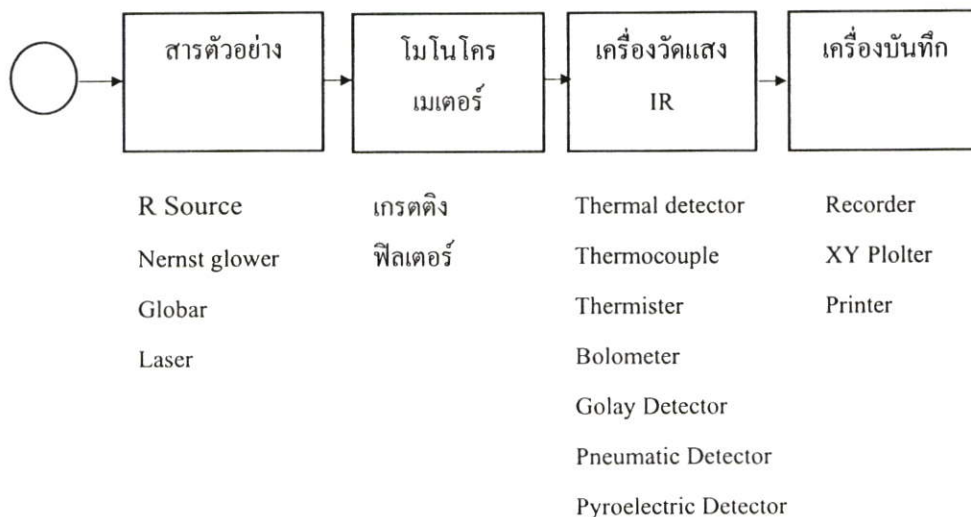
ดังนั้น เมื่อใช้ IR ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสารใดก็ตาม แล้วเกิดปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างข้างบนนี้ เรียกสารนั้นว่า IR active ถ้าไม่มีการเปลี่ยนโมเมนต์ขั้วคู่ แสดงว่าสารนั้นเป็น IR inactive ถือว่าไม่มีการดูดกลืนแสง IR ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่มากจะได้ IR absorption peak สูง ถ้าเปลี่ยนแปลงน้อยก็จะได้ weak absorption peak เช่น

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

ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer Components)

ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ก็มีลักษณะคล้ายๆ เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แต่การจัด (arrangement) อาจแตกต่างกันบ้าง ส่วนประกอบที่สำคัญคือ

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



รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR Source) ที่ใช้กันทั่วไปนั้นเป็นของแข็งที่เฉื่อย ซึ่งสามารถเผาให้ร้อนด้วยไฟฟ้า จนมีอุณหภูมิประมาณ 1,500-2,000 K ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะให้แสงมีความเข้มสูงสุดที่ความถี่ประมาณ $5,000 \text{ cm}^{-1}$

เนินสต์ โกลเวอร์ (The Nernst glower) เป็นแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดที่ใช้กันมากที่สุด ซึ่งทำด้วยออกไซด์ของพวกธาตุแรรร์ เอิร์ท (rare earth oxides) เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 มม. ยาวประมาณ 2 ซม. ต่อด้วยลวดแพลตินัมเพื่อคุ้มกันไฟฟ้า อุณหภูมิที่ใช้งานสามารถเผาได้ถึง 1,800 K ที่สำคัญที่ต้องควบคุมคือ ใช้กระแสอย่างให้สูงเกินไป เพราะจะทำให้หลอมเสียได้ เนื่องจากร้อนจัดเกินไป

โกลบาร์ (Globar) เป็นแท่งซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มม. ยาวประมาณ 5 ซม. เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ร้อนขึ้นถึงอุณหภูมิ 1,300-1,500 K โกลบาร์ให้ความเข้มของแสงที่บริเวณ $1,500 \text{ cm}^{-1}$ มากกว่าเนินสต์ โกลเวอร์

Incandescent Wire Source ใช้ลวดนิโครมหรือโรเดียมพันให้เป็นขดลวดแล้วหุ้มด้วยเซรามิก เป็นรูปทรงกระบอก ขดลวดนี้เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจะถูกทำให้ร้อนแดง อายุการใช้งานจะดีกว่า 2 ชนิดแรก แต่ให้ความเข้มของแสงน้อยกว่า

โมนโครเมเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยช่องแสงผ่าน (Slits) เกรตติง (Grating) หรืออาจมีฟิลเตอร์ (filter) ประกอบด้วยก็ได้ ซึ่งส่วนนี้จะมีลักษณะเหมือนกับระบบโมนโครเมเตอร์ในเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ทุกประการ

เครื่องวัดแสงอินฟราเรด (IR Detectors) เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดที่ผลิตได้ในปัจจุบันล้วนเป็นพวกที่ให้ค่าความเข้มต่ำ ประกอบกับแสงอินฟราเรดเป็นแสงที่มีพลังงานต่ำ จึงทำให้การตรวจวัดค่อนข้างยุ่งยากกว่าการตรวจวัดแสงยูวีและวิสิเบิล เพราะพลังงานไม่พอที่จะทำให้เกิด

อิเล็กทรอนิกส์ในหลอดวัดแสง (phototube) ได้ คั้งนั้น จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดอย่างอื่น ในปัจจุบัน เครื่องวัดแสงอินฟราเรดที่ใช้กันอยู่แบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ

1) อาศัยหลักการทาง Photoconductive effect ซึ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำ เป็นแบบ Photon detector

2) อาศัยหลักการ Heating effect โดยที่แสงอินฟราเรดถูกดูดกลืนจะเกิดความร้อนขึ้นแล้ว ทำให้ความต้านของเส้นลวดในเครื่องวัดเปลี่ยนแปลง เรียกว่า Thermal Detector ซึ่งใช้เป็นเครื่องวัดที่ครอบคลุมความยาวคลื่นได้กว้างขวาง

โฟตอน คีเทคเตอร์ (Photon Detector) ประกอบด้วยแผ่นแก้วที่เป็นฉนวนแล้วฉาบบางๆ ด้วยสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น ตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วเทลลูไรด์ อินเดียมแอนทิโมนด์ หรือ เจอร์เมเนียม (Ge) ที่โคปด้วยทองแดงหรือปรอท แผ่นกึ่งตัวนำนี้บรรจุอยู่ในกล่องสุญญากาศ เพื่อไม่ให้สารกึ่งตัวนำทำปฏิกิริยากับบรรยากาศ เครื่องวัดนี้เมื่อถูกแสงที่มีพลังงานสูงพอจะทำให้เกิดการลดความต้านทานลง สำหรับตะกั่วซัลไฟด์ไวต่อแสงในช่วง $1-3 \mu\text{m}$ หรือ $10,000$ ถึง $2,000 \text{ cm}^{-1}$ โดยมี response time ประมาณ $10 \mu\text{sec}$ แต่ถ้าใช้สารอื่นและทำให้เย็นด้วยไนโตรเจนเหลวหรือฮีเลียมเหลว จะทำให้เครื่องวัดนี้มีสภาพไวดีขึ้นไปในทางความยาวคลื่นมากขึ้น และมี response time เร็วขนาด 20×10^{-9} วินาที

เทอร์มัลคีเทคเตอร์ (Thermal Detector) โดยอาศัยสมบัติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารเมื่อได้รับแสงอินฟราเรด ได้ถูกนำมาใช้สำหรับทำคีเทคเตอร์เพื่อวัดแสงอินฟราเรด ซึ่งอาจจำแนกออกได้เป็น 4 แบบด้วยกันคือ

แบบที่ 1 เป็นเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) หรือเทอร์โมไพล์ (Thermopile) คีเทคเตอร์ชนิดนี้นิยมใช้กันมากสำหรับวัดแสงอินฟราเรด ประกอบด้วยแผ่นทองสีดำ (blacken gold foil) เชื่อมเข้ากับลวดโลหะเล็กๆ 2 ชนิดที่ต่างกัน หรือเป็นลวดแพลทินัม (Pt) เชื่อมกับลวดเงิน หรือลวดพลวงเชื่อมกับบิสมีท เมื่อทำให้ปลายที่เชื่อมทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยที่ปลายหนึ่ง (reference junction) จะป้องกันไม่ให้ถูกแสงเลย และให้อุณหภูมิคงที่อีกปลายหนึ่งให้รับแสงอินฟราเรด เทอร์โมไพล์เป็นชื่อของคีเทคเตอร์ที่ได้จากการเอาเทอร์โมคัปเปิลหลายอันมาต่อกันเข้าแบบอนุกรม เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามากขึ้น คีเทคเตอร์ชนิดนี้ออกแบบดีแล้วสามารถบอกความแตกต่างของอุณหภูมิได้ถึง $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสอง $6-7 \mu\text{V}/\mu\text{W}$ และมี response time ประมาณ 100 m.sec

แบบที่ 2 เรียกว่า เทอร์มิสเตอร์ (Thermister) หรือโบลอมิเตอร์ (Bolometer) สำหรับโบลอมิเตอร์เป็นคีเทคเตอร์ประเภทอาศัยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของลวดโลหะ เมื่อทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เช่น ประกอบด้วยลวดแพลทินัม หรือลวดนิกเกิลเล็กๆ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิเปลี่ยนมีค่าสูง ($\sim 0.4\%$ ต่อ $^{\circ}\text{C}$) แต่ถ้าเป็นเทอร์มิสเตอร์ จะทำด้วย

ออกไซด์ของโลหะบางชนิด เช่น ออกไซด์ของโคบอลต์ หรือนิกเกิล ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิเปลี่ยนมีค่าสูง (4-7% ต่อ °C) ทั้งนี้โดยทำเป็น 2 ชุดเหมือนกัน ชุดหนึ่งจะไม่ให้ถูกแสงเลย แต่อีกชุดหนึ่งให้รับแสงอินฟราเรด แล้วนำไปต่อเข้าวงจรเป็นแบบ wheatstone bridge

แบบที่ 3 เรียกว่า โกลีย์ (Golay) หรือนิวมาติกดีเทคเตอร์ (Pneumatic Detector) หลักการที่ใช้ในการทำดีเทคเตอร์ชนิดนี้คือ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดความดันของแก๊สเฉื่อยในภาชนะปิดเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้น แก๊สเฉื่อยจะบรรจุไว้ในภาชนะรูปทรงกระบอกเล็กๆ ด้านที่รับแสงอินฟราเรดจะเป็นโลหะสีดำอยู่กับที่ ด้านตรงข้ามเป็นไดอะแฟรมที่ทำด้วยเงินให้เคลื่อนไหวได้เมื่อโลหะสีดำได้รับแสงอินฟราเรดจะถูกถ่ายเทความร้อนไปยังแก๊สเฉื่อย ทำให้เกิดความดันขึ้นไปดันแผ่นไดอะแฟรมเงิน ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไป การบิดเบี้ยวไปทำให้แสงสะท้อนไปยังหลอดวัดแสง (phototube) เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นแตกต่างกันตามปริมาณของแสงอินฟราเรด หรืออาจใช้หลักของการเปลี่ยนความจุ (capacitance) ก็ได้ โกลีย์ดีเทคเตอร์นี้ราคาค่อนข้างแพง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับดีเทคเตอร์ชนิดอื่นๆ แล้วปรากฏว่ามีสภาพไวในช่วงใกล้หรือกลางอินฟราเรดเท่าๆ กับเทอร์โมคัปเปิล แต่ถ้าใช้ในช่วงต่ำกว่า 200 cm^{-1} หรือช่วงไกลอินฟราเรดจะดีมาก

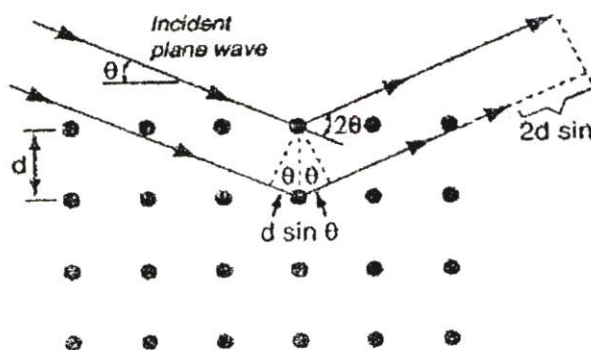
แบบที่ 4 เรียกว่า ไพโรอิเล็กทริกดีเทคเตอร์ (Pyroelectric Detector) ดีเทคเตอร์นี้เพิ่งจะได้รับการพัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับวัดแสงอินฟราเรดเมื่อไม่นานมานี้ โดยใช้ผลึกของสารบางชนิด เช่น ไตรไกลซีนซัลเฟต (Triglycine sulphate, TGS) หรือคิวเทอเรตไตรไกลซีนซัลเฟต (DTGS) หรือลิเทียมแทนทาลेट หรือแบเรียมไททานेट เป็นต้น ผลึกเหล่านี้มีสมบัติเกี่ยวกับโมเมนต์ขั้วคู่ของมันไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถ้านำผลึกเหล่านี้ไปไว้ระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่เป็นแผ่นโลหะ แล้วต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าภายนอก เป็นเหตุให้มีกระแสไหลในวงจรเพื่อทำให้การกระจายของประจุกลับเข้าสู่สมดุลใหม่ การเกิดกระแสเนื่องจากความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดีเทคเตอร์ชนิดนี้ให้ response time เร็วกว่า จึงเป็นที่นิยมใช้ทำดีเทคเตอร์ของเครื่องใน Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

เครื่องบันทึกสเปกตรัม หรือ Read Out Devices สัญญาณที่ได้จากดีเทคเตอร์ซึ่งเป็นสัญญาณที่น้อยจำเป็นจะต้องเข้าเครื่องขยายสัญญาณเสียก่อน ก่อนที่จะเข้าเครื่องบันทึกหรือเครื่องอ่านสัญญาณเช่นเดียวกับเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งอาจเป็นเครื่อง recorder, printer, video display terminals หรือ cy plotters เป็นต้น

2.5.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิด คือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว

(Characteristic X-ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่าน โครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.10

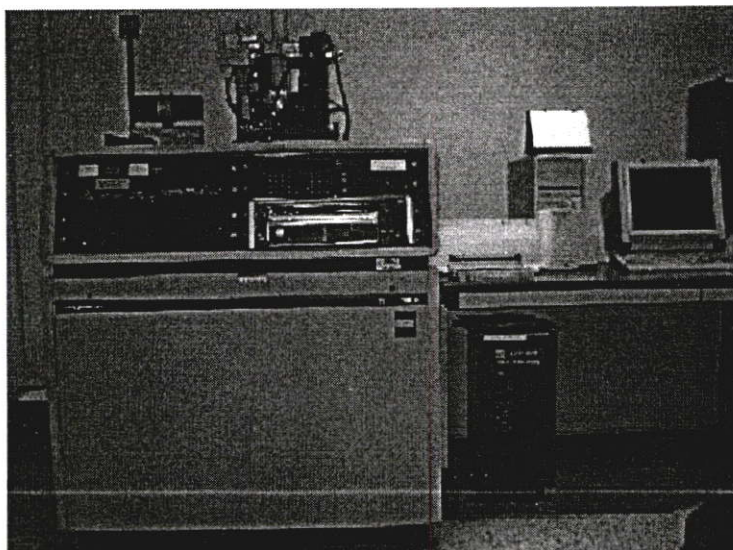


รูปที่ 2.17 การตกกระทบของการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

$$N\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad (2.10)$$

- โดยที่ N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3.....
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
 θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

ระนาบต่างๆ ของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.17 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X-Ray Diffractometer ดังแสดงในรูปที่ 2.18 นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก



รูปที่ 2.18 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้ เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบน และยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอ สำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางได้ดังนี้

ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constant) จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบนของคลื่นคือ F เวกเตอร์คลื่นของระนาบคลื่นที่ตกกระทบคือ k เวกเตอร์คลื่นของคลื่นสะท้อนคือ k' ดังนั้น

$$F = [n_G e^{i(\vec{G} \cdot \vec{k} - k')} \quad (2.11)$$

โดยที่ n_G คือ แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบน

G คือ แลตทิซส่วนกลับ (Reciprocal lattice)

สามารถหาค่าแลตทิซส่วนกลับได้จากสมการ

$$\vec{G} = \vec{k}' - \vec{k} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$|\vec{k}'| = |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.13)$$

จะได้

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

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

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

เมื่อ 2θ คือมุมระหว่าง \vec{k} และ \vec{k}' แก้สมการหาค่า λ จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{4\pi}{|G|} \sin\theta \quad (2.17)$$

และจากสมการการหาค่าของ $|G|^2$

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

เมื่อ h , k และ l คือ ตัวเลขระนาบของผลึก
จะได้สมการของค่าคงที่แลตทิซเป็น

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

โดยที่ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

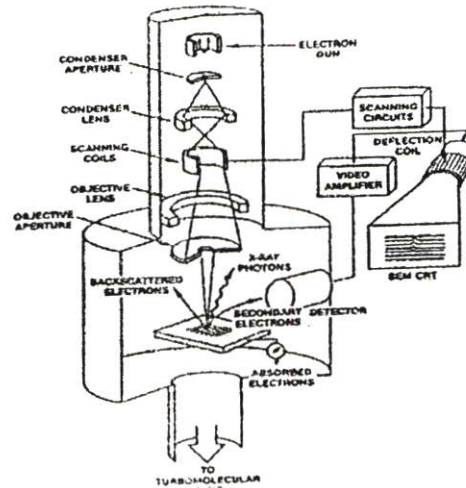
θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

2.5.3 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างชิ้นงาน ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ (Cathode Ray Tube, CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 ถึง 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงานคือ เมื่ออิเล็กตรอนกระทบชิ้นงานทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron, SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณแล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT

หลักการทำงานของเครื่อง (Scanning Electron Microscope, SEM) ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 ถึง 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) พร้อมทั้งมีกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็ลลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกวาดไปบนผิวตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coil) บนระนาบ x y สิ่งสำคัญของการทำงานบนเครื่อง SEM คือการเลือกสัญญาณอิเล็กตรอนกับอะตอมของชิ้นงานมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของปฏิกิริยาอิเล็กตรอนต่อชนิดของชิ้นงานขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อชิ้นงานตัวอย่าง และกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron, PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่างบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่าง ได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบภายในเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 2.20 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก CaF_2 และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบาง ทำหน้าที่เป็น Collector ป้อน

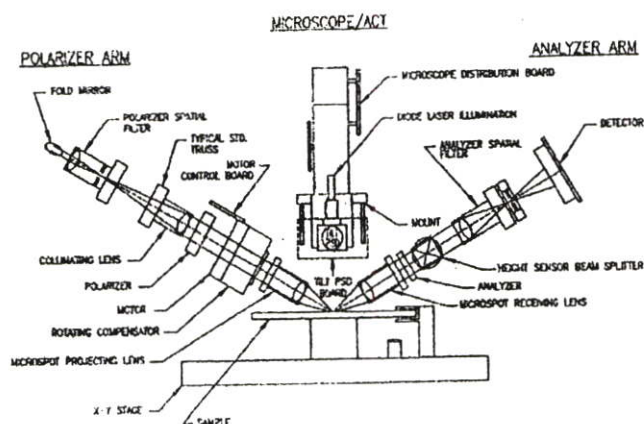
แรงดันไบแอสที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตามท่อนำแสง เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วจึงทำการขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อไประบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กกลบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการเคลื่อนที่ของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่บนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงจอภาพ CRT โดกว่าพื้นที่การเคลื่อนที่ของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้น จึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT/พื้นที่ของการกวาดบนชิ้นงานของลำอิเล็กตรอน}}{\quad} \quad (2.20)$$

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกวาดแล้ว ยังควบคุมความเร็วในการกวาดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกวาดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกวาดมีความเร็วสูง เราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกวาด

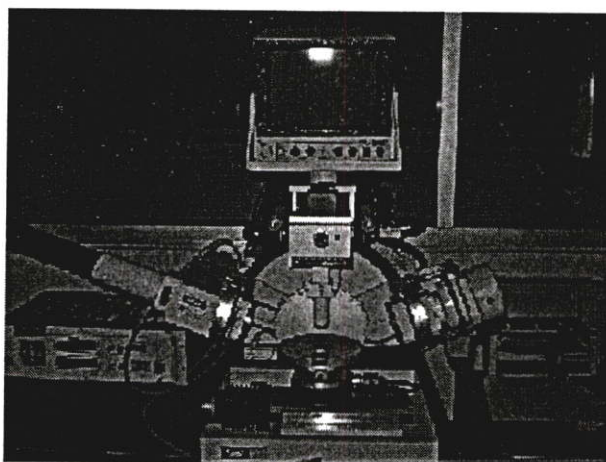
2.5.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มบางด้วยเครื่อง Ellipsometer

การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มบางด้วยเครื่องอิลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) เป็นการวิเคราะห์ผลของการสะท้อน (Reflection) ด้วยหลักการโพลาไรเซชัน (Polarization) ของแสงเลเซอร์ตกกระทบผิวของวัสดุ ใช้ประโยชน์เพื่อการวิเคราะห์และพัฒนาคุณภาพของฟิล์ม ประกอบด้วยตัวแปรของค่าคงที่ทางแสง (Optical constants) ถ้าผิวของวัสดุถูกปกคลุมด้วยฟิล์มลักษณะโปร่งแสง ข้อมูลที่ได้จะเกี่ยวข้องกับความหนาและค่าคงที่ทางแสงของฟิล์ม เช่น ค่าดัชนีหักเหแสง (Reflection of Index) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) ในด้านกระบวนการผลิตสามารถใช้หาค่าเปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอของฟิล์ม (Thickness uniformity%) เพื่อใช้ในการพัฒนากระบวนการสร้างชั้นฟิล์มต่างๆ



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบภายในของเครื่อง Ellipsometer

เครื่องอิลลิปโซมิเตอร์แบบช่วงความยาวคลื่นเดียว (Single wave Lange) จะใช้แหล่งจ่ายพลังงานแสงเลเซอร์กำลังต่ำในย่าน Class II เป็นแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (HeNe Laser) ที่มีความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 633 นาโนเมตร และสำหรับเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์แบบช่วงความยาวคลื่นคู่ (Dual wave Lange) จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด จากฮีเลียม-นีออน (HeNe Laser) ที่ความยาวคลื่นแสง 633 นาโนเมตร และเลเซอร์ไดโอด (Laser diode) ที่ความยาวคลื่นแสง 780 นาโนเมตร โดยทั่วไปจะมีขนาดลำแสง (Spot Size) ประมาณ 12x22 ไมโครเมตร แสงเลเซอร์เหล่านี้จะถูกส่งผ่านตามแนวเส้นทางแสง (Optical axis) โดยผ่านปริซึมโพลาไรเซอร์ (Polarizer prism) เพื่อเปลี่ยนลำแสงจากวงกลมเป็นเชิงเส้น (Linearly polarized light) ลำแสงจะมีความเข้มคงที่ และถูกเปลี่ยนกลับเป็นวงกลมโพลาไรซ์ จากอุปกรณ์ที่เรียกว่า ควอเตอร์เวฟคอมเพนเซเตอร์ (Quarter wave Compensator) ที่ถูกแทรกเข้าไปในแนวเส้นทางเดินของแสง (หรือยังคงเป็นเส้นตรง เมื่อคอมเพนเซเตอร์ถูกดึงออกจากแนวเส้นทางเดินของแสง) การแทรกเข้าไปหรือการดึงออกไปของ $+90^{\circ}$ คอมเพนเซเตอร์จะเป็นโดยอัตโนมัติภายใต้การควบคุมด้วยโปรแกรมของคอมพิวเตอร์ แล้วแสงที่ได้ (ด้วยการแทรกเข้าไป หรือดึงออกมาของ $+90^{\circ}$ คอมเพนเซเตอร์ในแนวทางการเดินของแสง) จะถูกฉายลงบนผิวของแผ่นชิ้นงาน และสะท้อนไปยังอุปกรณ์ตรวจจับทางแสง (Photo detector)

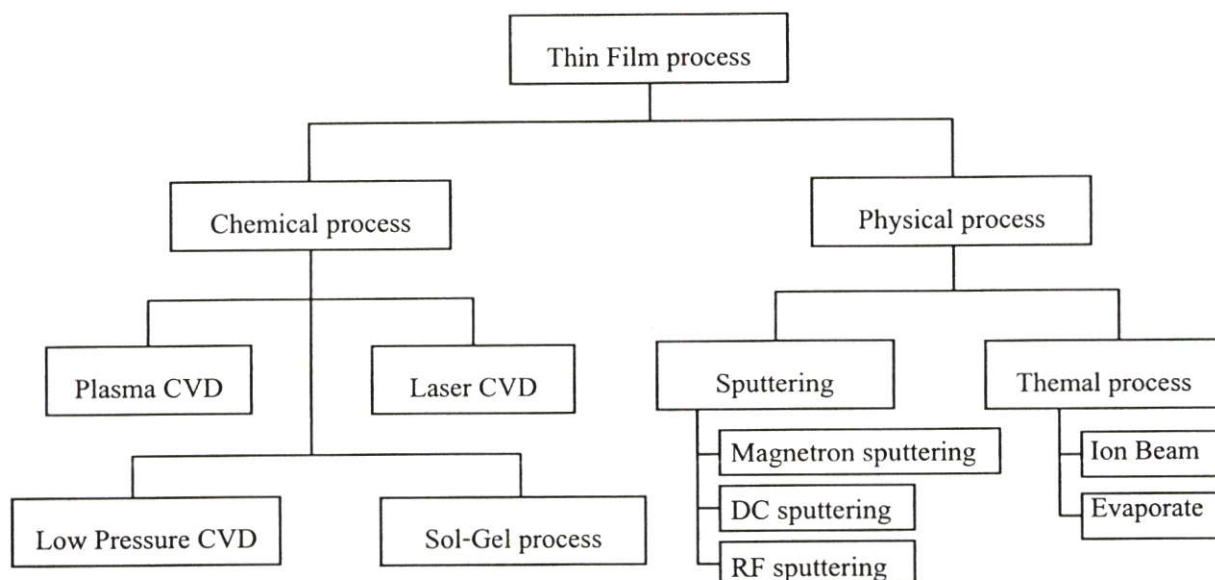


รูปที่ 2.22 เครื่อง Ellipsometer

แสงที่สะท้อนจะผ่านปริซึมอนาไลเซอร์ และตรวจวัดด้วยตัวตรวจจับทางแสงเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า และแปร โดยตรงกับความเข้ม (Intensity) ของแสงที่สะท้อนผ่านตัวอนาไลเซอร์ โดยมีตัวกรอง (Filter) ทำหน้าที่ป้องกันแสงอื่นๆ ที่อาจแทรกสอดระหว่างปริซึมอนาไลเซอร์กับตัวตรวจจับแสง ผลการวัดค่าความหนาฟิล์ม, ค่าดัชนีหักเหแสง, และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ถูกยืนยันด้วยค่า Fit error ซึ่งเป็นการคำนวณทางสถิติ โดยค่า Fit error ที่ยอมรับต้องมีค่าไม่เกิน 1.00 หรือมากกว่าตามชนิดของฟิล์มที่ทำการตรวจสอบ

2.6 การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปีดเตอร์ริง

การสร้างฟิล์มบางโดยกระบวนการเคลือบฟิล์ม (Thin film deposition) นั้น มีอยู่หลายเทคนิคที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยถ้าแบ่งตามกลไกการก่อตัวของชั้นฟิล์มบาง สามารถแบ่งออกได้ 2 เทคนิค คือ กระบวนการเคลือบฟิล์มบางทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD) และกระบวนการเคลือบฟิล์มบางทางเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ดังแสดงภาพรวมในรูปที่ 2.23



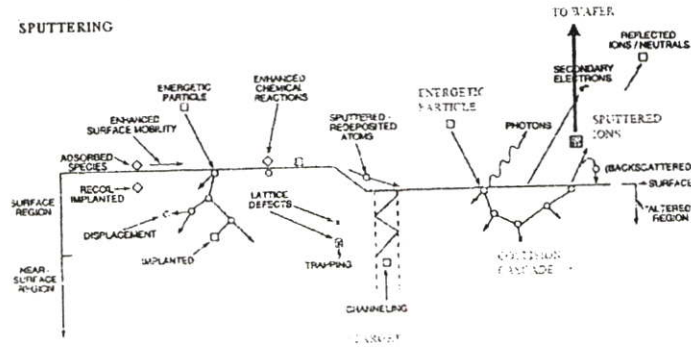
รูปที่ 2.23 เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง

2.6.1 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอร์ริง

การสปัตเตอร์ริง (Sputtering) คือ ขบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ การสปัตเตอร์ริงมีกระบวนการที่สำคัญดังนี้

1. อาศัยการ discharge ไฟฟ้าของก๊าซอาร์กอน (Ar) ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน
2. จากนั้นทำการเร่งไอออน ให้วิ่งชนเป้าสารเคลือบ (Target) ที่ต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

3. เป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของก๊าซ อะตอมของเป้าสารเคลือบจะหลุดออกมา และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมายังแผ่นฐานรองในทุกทิศทาง จากพลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดมานั้นมีค่าสูงมาก ดังนั้นอนุภาคสารเคลือบที่ได้จากการสปัตเตอร์ริงที่ตกกระทบแผ่นฐานรอง จะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อแผ่นฐานรอง



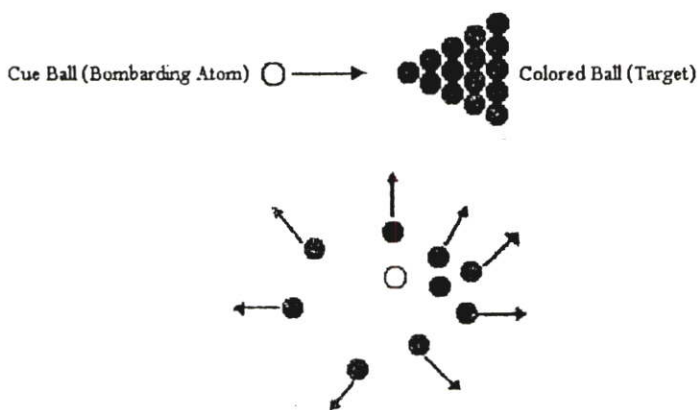
รูปที่ 2.24 กลไกการเคลือบฟิล์มระบบสปัตเตอร์ริง

2.6.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวสารเคลือบ

เมื่อเป่าสารเคลือบที่เป็นของแข็งถูกชนโดยไอออนจะเกิดปรากฏการณ์ดังรูปที่ 2.25 สามารถอธิบายพฤติกรรมของไอออนในลักษณะต่างๆ กันดังนี้

1. ไอออนที่สะท้อนกลับจากผิวหน้า ส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากการรวมตัวกันกับอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าของเป่าสารเคลือบ
2. การชนของไอออน ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary electron) ออกจากเป่าสารเคลือบ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ
3. ไอออนที่ฝังตัวลงในผิวสารเคลือบ (Ion implantation) มีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน 1 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ (keV) สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในเป่าสารเคลือบที่เป็นทองแดง
4. การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect) เราเรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered Surface Layers

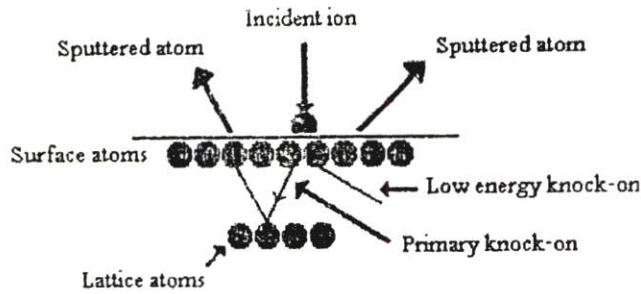
การเปิดปรากฏการณ์ในแต่ละแบบนี้จะขึ้นอยู่กับชนิด และพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชน สำหรับในกรณีการเกิดสปัตเตอร์ริงจะเกิดได้ดีในช่วงพลังงานของไอออนบวกประมาณ 0.1 ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์



รูปที่ 2.25 เปรียบเทียบลักษณะการชนของลูกบิลเลียดกับการสปีดเตอร์ริง

กลไกของการสปีดเตอร์ริงอาจเปรียบเทียบได้กับการชนของลูกบิลเลียด ดังรูปที่ 2.25 พิจารณาให้ออนุภาคทั้งหมดเป็นทรงกลมแข็ง โดยให้อิออนบวกเป็นลูกขาว (Cue Ball) และให้อะตอมที่ผิวเป้าสารเคลือบเป็นลูกสี (Colored Ball) ที่เรียงกันเป็นระเบียบ การชนของลูกขาวจะทำให้ลูกสีกระทบกันเป็นทอดๆ แล้วกระเจิงออกทุกทิศทุกทางรวมทั้งในทิศทางย้อนกลับ ซึ่งเปรียบได้กับอะตอมถูกสปีดเตอร์ออกจากเป้า ในความเป็นจริงจะมีแรงระหว่างอะตอมซึ่งจะแตกต่างจากกรณีของลูกบิลเลียด แต่แบบการจำลองการชนนี้ก็สามารอธิบายได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

การที่อิออนบวกชนเป้าสารเคลือบ แล้วมีการถ่ายทอด โมเมนตัมให้กับอะตอมของผิวเป้าสารเคลือบที่อยู่หนึ่ง เป็นกลไกที่นำไปสู่การสปีดเตอร์อะตอมออกจากผิวของเป้าซึ่งดังรูปที่ 2.26 ในการชนอิออนบวกจะชนผิวของเป้า 2 หรือ 3 อะตอมเกือบพร้อมๆ กัน อะตอมที่ถูกชนตอนแรกยังไม่ถูกสปีดเตอร์ แต่เป็นอะตอมที่ถูกชน การชนจะมีสองลักษณะคือ แบบแรก อะตอมถูกชนในลักษณะ Low energy knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวขนานกับผิวของเป้า มีการเคลื่อนตัวในแนวเฉียงด้านข้างกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้า ซึ่งมีอยู่ให้หลุดออกเป็นการชนเพียงครั้งเดียว แบบที่สอง อะตอมถูกชนในลักษณะ Primary knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวพุ่งเข้าสู่เป้า อะตอมจะเคลื่อนตัวลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไปทำให้ตัวมันเองสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออก หรือมีการชนต่อไปอย่างต่อเนื่องจนทำให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศเปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของอิออนบวกที่เข้าชนอะตอมเหล่านี้ก็จะกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกในที่สุด



รูปที่ 2.26 การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปีดเตอร์ริง

2.6.3 กระบวนการชนในบริเวณที่ก๊าซเกิดการแตกตัว

หลักการทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ และมีสถานะเป็นพลาสมาดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ก๊าซที่เกิดการไอออไนซ์จะมีความดันตั้งแต่ 1 มิลลิทอร์ (mTorr) ขึ้นไป แหล่งกำเนิดเริ่มต้นของการเกิดไอออไนซ์คือ การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอม แต่เนื่องจากการชนกันดังกล่าวจะมีทั้งการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) ซึ่งการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซหรือไอออน จะมีการถ่ายพลังงานจากอิเล็กตรอนไปยังอะตอมหรือไอออนที่ถูกชนมีค่าต่ำ ทั้งนี้เพราะว่ามวลของอิเล็กตรอนกับมวลของอะตอมหรือไอออนมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก

ในขณะที่ก๊าซแตกตัวและมีสถานะเป็นพลาสมา จะมีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก การชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมจะทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



โดยที่ G^0 คือ อะตอมของก๊าซที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุด (Ground state)

G^+ คือ ไอออนของก๊าซที่มีประจุบวก

ถ้าให้อะตอมของก๊าซที่ถูกชนเป็นก๊าซอาร์กอน (Ar) แล้วเกิดการไอออไนซ์ ดังนั้นความสัมพันธ์ (2.22) เขียนได้ดังนี้



จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ (2.21) หรือ (2.22) จะพบว่า อะตอมที่เป็นกลางหนึ่งอะตอมเมื่อเกิดไอออนไนซ์ จะได้ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุบวกหนึ่งตัวพร้อมกันนั้นจะเกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัว และถ้าต้องการให้มีไอออนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าอาจจะทำได้โดยกำจัดอิเล็กตรอนตัวที่เพิ่มขึ้นมาให้หมดไป แต่การกำจัดอิเล็กตรอนตัวที่เพิ่มขึ้นมานั้นจะต้องให้พลังงานกับอิเล็กตรอนที่มากพอสมควร และโดยปกติทั่วไปไอออนที่อยู่ในสถานะที่มีประจุไฟฟ้าที่มากกว่า $2+$ ขึ้นไป จะไม่สามารถสังเกตเห็นได้

กระบวนการปกติที่เกิดขึ้นในพลาสมาคือ การกระตุ้นอะตอมหรือไอออนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุด เพื่อให้อะตอมหรือไอออนไปอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงขึ้นหรือที่เรียกว่าอยู่ในสถานะกระตุ้นพร้อมทั้งมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนอะตอมหรือไอออนเหล่านั้น ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



อะตอมหรือไอออนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะมีช่วงเวลา (Lifetime) ที่อยู่ในสถานะดังกล่าวเป็นช่วงเวลาสั้นมากๆ หลังจากนั้นจะมีการสลายตัวพร้อมกับปลดปล่อยโฟตอนออกมา ลักษณะเช่นนี้เป็นคุณลักษณะของพลาสมา และเป็นจุดเริ่มต้นที่จะอธิบายเรื่อง โกลว์ดิสชาร์จของก๊าซ

2.6.4 อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบสปัตเตอร์ริง

อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบการสปัตเตอร์ริง หมายถึง ความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการสปัตเตอร์ริง ต่อหน่วยของเวลาการสปัตเตอร์ริง ขึ้นอยู่กับปริมาณอะตอมของเป้าสารเคลือบที่ถูกสปัตเตอร์และสภาพของการชนกับอะตอมเหล่านี้ไปยังวัสดุฐานรอง อัตราการเคลือบฟิล์มจะสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่ากระแสไฟฟ้า, ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, อัตราการไหลของก๊าซเฉื่อย, ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุฐานรอง และความดันภายในภาชนะสุญญากาศ ในสถานะของการ โกลว์ดิสชาร์จ

เนื่องจากกระแสไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และความดันก๊าซ เป็นปริมาณที่ขึ้นต่อการวัดผลกระทบของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งนั้นไม่สามารถทำได้ ในทางปฏิบัติจึงละเอียดหรือไม่ให้ความสำคัญกับตัวแปรที่มีผลน้อยที่สุด ด้วยการกำหนดตัวแปรคงที่และทำการศึกษาผลจากตัวแปรอีกตัวที่สนใจ เช่น ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่มีความคงที่ค่าๆ หนึ่ง กำลังไฟฟ้าในที่นี้เป็นการรวมผลของค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของการดิสชาร์จเข้าด้วยกัน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในระบบการสปัตเตอร์ริง แบบอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง (RF sputtering) ซึ่งสามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์มได้ ดังสมการ (2.24)

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

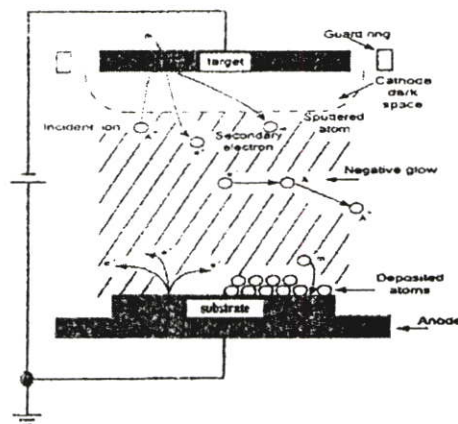
โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า

P' คือ ความดัน

l คือ ระยะจากเป้าสารเคลือบกับวัสดุฐานรอง

2.7 ระบบดีซี สปีดเตอร์ริง

ระบบการสปีดเตอร์ริงแบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง (DC sputtering) ลักษณะ โครงสร้างโดยทั่วไป จะประกอบด้วยคู่อิเล็กโทรดที่วางขนานกัน ด้านหนึ่งของอิเล็กโทรดจะเป็นขั้วคาโทดและอีกด้าน เป็นอโนด บริเวณคาโทดจะมีเป้าสารเคลือบและระบบน้ำหล่อเย็น ส่วนบริเวณอโนดจะ ประกอบด้วยฐานรองและระบบน้ำหล่อเย็น เมื่อควบคุมความดันของก๊าซอาร์กอนภายในระบบที่ 0.1 ทอร์และทำการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง โดยต่ออนุกรมกับความต้านทาน 1 ถึง 10 กิโลโอห์ม สักการะหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะมีค่าประมาณ 1 ถึง 10 กิโลโวลต์ ทำให้เกิดการดีสชาร์จผ่านตัวกลางที่เป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย และก๊าซอาร์กอนที่เกิดการ โกลว์ดีสชาร์จจะถูกเร่งพุ่งชนคาโทดที่เป็น เป้าสารเคลือบ และเกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้นที่อโนดหรือวัสดุฐานรอง



รูปที่ 2.27 ระบบดีซีสปีดเตอร์ริง

บทที่ 3

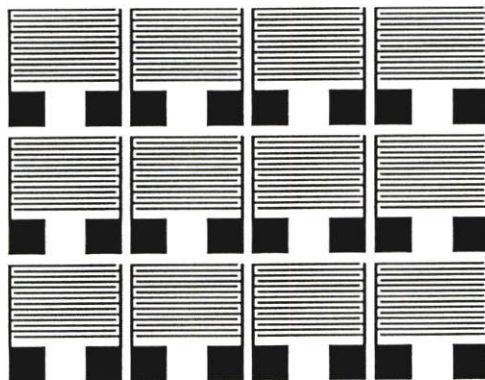
การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ขั้นตอนของการออกแบบและกระบวนการสร้าง ได้ทำการออกแบบ โครงสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน และทำการสร้าง โดยแบ่งตามลักษณะ โครงสร้าง ดังนี้

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

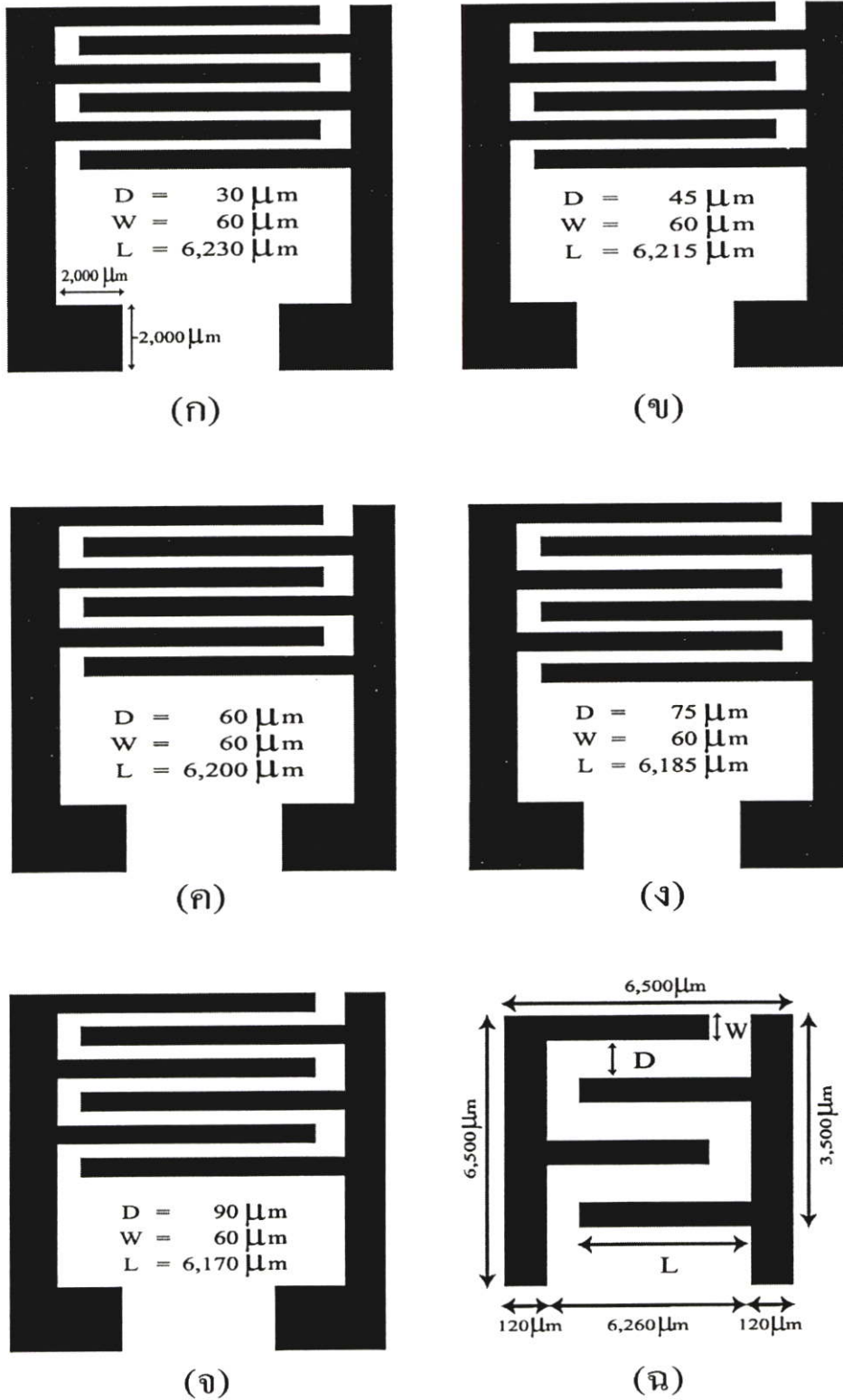
3.1 การออกแบบขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของชั้นฟิล์มขณะตรวจจับก๊าซ ขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าสร้างขึ้นจากโลหะแพลทินัม (Pt) และมีไททาเนียม (Ti) เป็นชั้นประสาน ระหว่างชั้นของโลหะแพลทินัมและซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดลวดลาย 60 ไมครอน ในพื้นที่ 6800x6800 ไมครอน



รูปที่ 3.1 ลักษณะลวดลายของขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

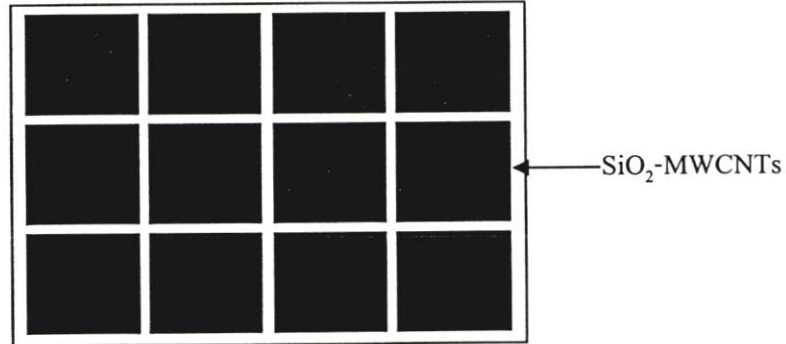
การใช้โลหะไททาเนียม (Ti) เป็นชั้นประสาน เนื่องจากโลหะแพลทินัมมีความสามารถในการยึดเกาะกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ไม่ดีนัก จึงเลือกใช้โลหะไททาเนียมซึ่งสามารถยึดเกาะกับชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของวงจรถักนำไฟฟ้าแบบต่างๆ (ก) โครงสร้าง A (ข) โครงสร้าง B (ค) โครงสร้าง C (ง) โครงสร้าง D (จ) โครงสร้าง E และ (ฉ) โครงสร้างของส่วนขยาย

3.2 การออกแบบพื้นที่ของแผ่นชั้นรับสัญญาณก๊าซ

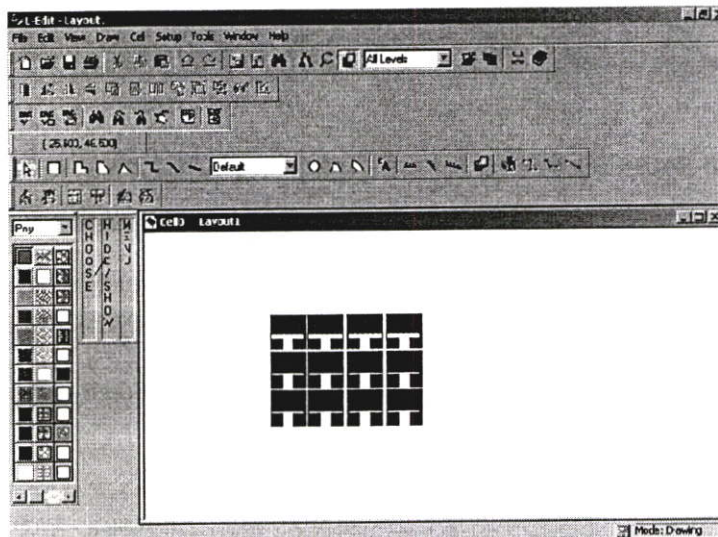
ชั้นฟิล์มซิลิคอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ($\text{SiO}_2\text{-MWCNTs}$) ทำหน้าที่ในการตรวจจับก๊าซ โดยทำการสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีสปิ้น โคลดิง และกำหนดขนาดพื้นที่ของชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 6800×6800 ไมครอน



รูปที่ 3.3 ลักษณะลวดลายของพื้นที่แผ่นชั้นสัญญาณก๊าซ

3.3 การสร้างกระจกมาสก์ต้นแบบ

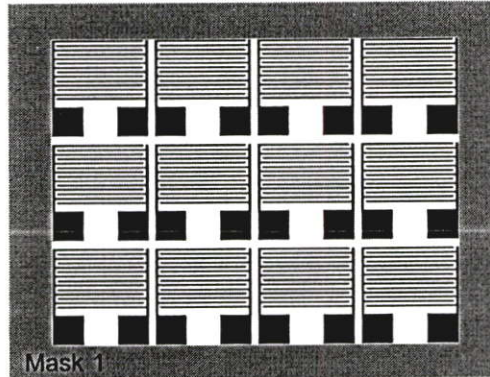
เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างต่างๆ ของหัวตรวจวัดก๊าซแล้ว ทำการวาดลวดลายของมาสก์ (Mask) ต่างๆ ด้วยโปรแกรม LEDIT (v8.03) ซึ่งเป็น โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบและวาดลวดลายต้นแบบ จากนั้นทำการแปลงไฟล์เป็น PDF File เพื่อสามารถถ่ายภาพลงบนฟิล์มใสแล้วนำมาประกอบเข้ากับกระจกควอทซ์ที่มีขนาด 3×3 นิ้ว เพื่อใช้ประโยชน์เป็นกระจกมาสก์ต้นแบบในกระบวนการถ่ายภาพลวดลาย (Photolithography) ต่อไป



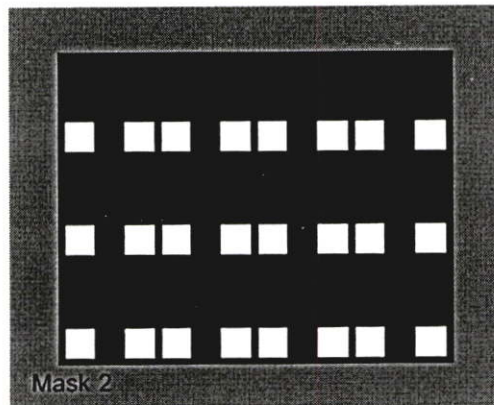
รูปที่ 3.4 ลักษณะภาพถ่ายโปรแกรม LEDIT

ซึ่งกระจกมาสก์ต้นแบบต่างๆ 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

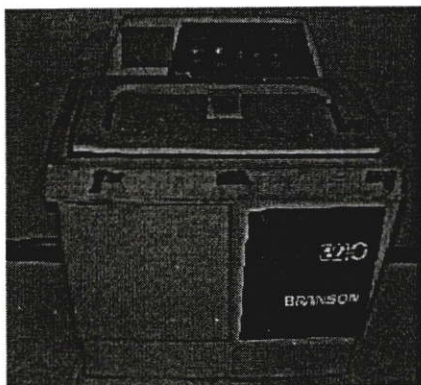
ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบ่งเป็นหัวข้อย่อยและขั้นตอนต่างๆ ตามลำดับดังต่อไปนี้

3.4.1 การทำความสะอาดและเตรียมแผ่นเบื้องต้น

1. เตรียมแผ่นผลึกฐานรองเริ่มต้น โดยใช้แผ่นซิลิคอนระนาบ (100) ชนิด p หรือชนิด n มีความหนาประมาณ 350 ถึง 400 ไมครอน

2. ทำการตัดแผ่นซิลิกอนตามขนาดที่ต้องการ จากนั้นทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน เพื่อกำจัดเศษของโลหะ, คราบไขมัน และฝุ่นผง ที่อาจปนเปื้อนมากับแผ่นซิลิกอน โดยมีขั้นตอน ดังนี้

- ล้างแผ่นซิลิกอนด้วยน้ำ DI ในเครื่องสั่นด้วยความถี่สูง (Ultra sonic) 5 นาที
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะบริเวณผิวของซิลิกอน
- ล้างด้วยน้ำ DI จำนวน 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดคราบไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นด้วยความถี่สูง 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



(ก)



(ข)

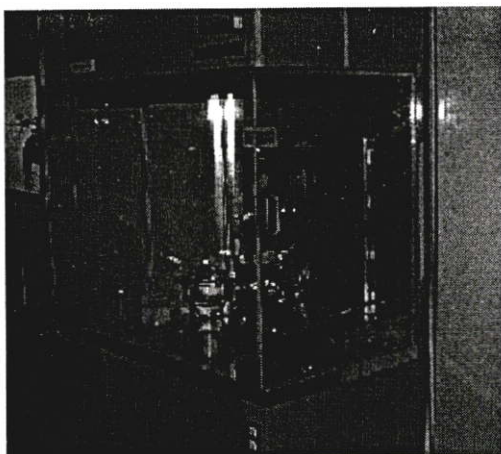
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายของ (ก) เครื่อง Ultra sonic และ (ข) manual bench

3.4.2 การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

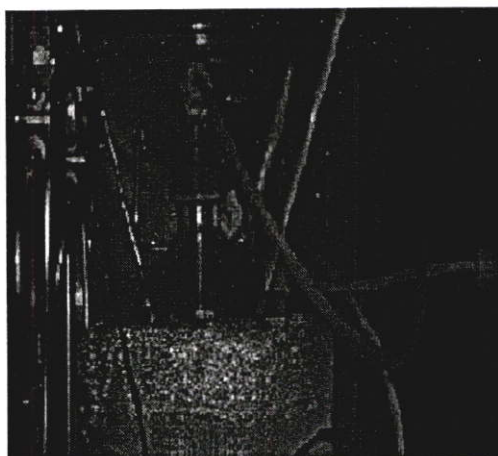
1. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) กำหนดความหนาประมาณ 4500 อังสตรอม ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง 1 ชั่วโมง แบบชื้น 2 ชั่วโมง และแบบแห้ง 1.5 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อเป็นชั้นฉนวน โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 1,200 cc/min

- ออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน 1,000 cc/min



(ก) Frontage



(ข) Backard

รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายของเตาออกซิเดชัน

3.4.3 การสร้างขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

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

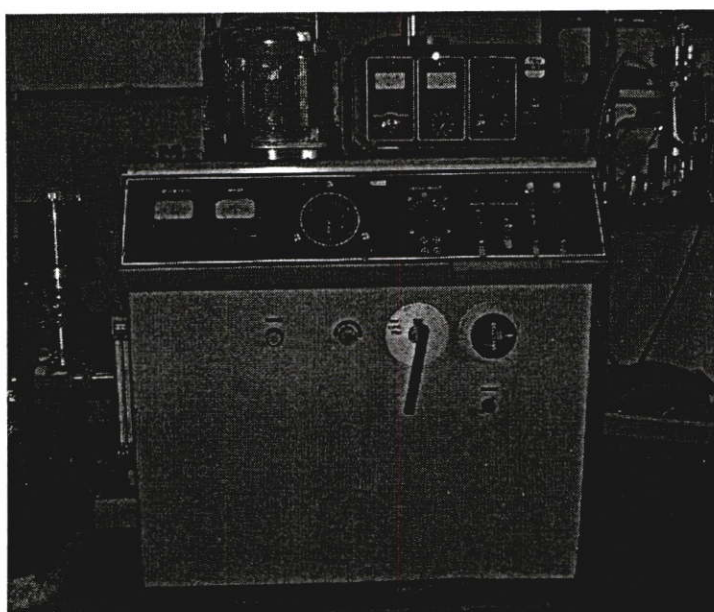
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการสปัตเตอร์ริง Ti ด้วยเครื่องดีซี สปัตเตอร์ริง

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

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

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการสปัตเตอร์ริง Pt ด้วยเครื่องดีซี สปัตเตอร์ริง

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

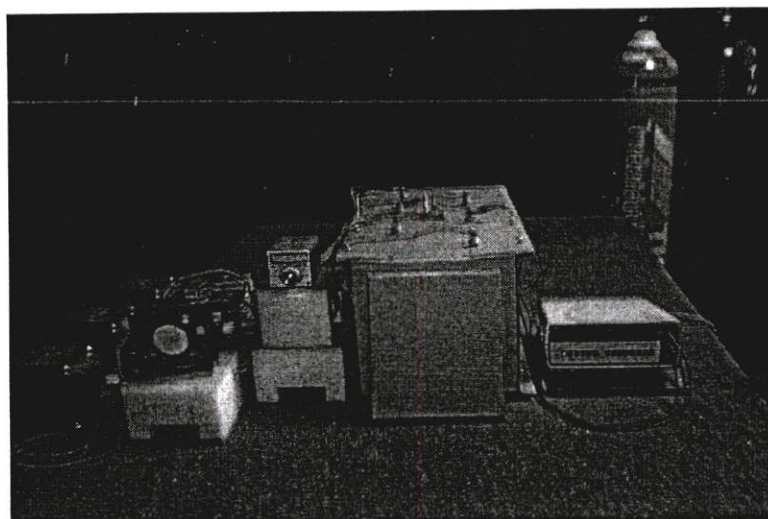


รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายเครื่องดีซี สปัตเตอร์ริง

3. ทำการซินเตอร์ริง (Sintering) เป็นการอบฟิล์มด้วยความร้อนเพื่อทำให้เกิดรอยต่อ
โหนดที่ดี

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการซินเตอร์ริง

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



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายเตาซินเตอร์ริง

4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 1 เพื่อสร้างวงจรรักษาไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าตามขั้นตอนในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ขั้นตอนการโฟโตลิโธกราฟีน้ำยาไวแสงชนิดบวก

กระบวนการ	เทคนิค	อุณหภูมิ (°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)



(ข)

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

5. ทำการกัดลวดลายชั้นฟิล์ม Pt และ Ti เพื่อสร้างเป็นวงจรรักษาไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าตามตารางที่ 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มแพลทินัม (Pt)

ขั้นตอน	สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที: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 (°C)	เวลา (นาที: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 ด้วยอะซิโตนและล้างด้วยน้ำ DI
7. ทำการเป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

3.4.4 สร้างชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน

1. เตรียมโซลผสมซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ตามเงื่อนไขดังนี้
 - ชั่งสารละลายซิลิกอนไดออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอน อัตราส่วน 20:1, 40:1, 60:1, 80:1 และ 100:1
 - อุลตราโซนิก (Ultra sonic) โซลผสม 1 ชั่วโมง
2. ทำความสะอาดแผ่น
 - ล้างแผ่นซิลิกอนด้วยน้ำ DI ในเครื่องสั่นด้วยความถี่สูง (Ultra sonic) 5 นาที
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - ต้มในไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene) 5 นาที
 - ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นด้วยความถี่สูง 5 นาที
 - ล้างด้วยน้ำ DI
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
3. สร้างชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน (SiO_2 -MWCNTs) โดยวิธีสปินโคตติง เงื่อนไขดังตารางที่ 3.7 และ 3.8

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีสปินโคตติง

เงื่อนไข	รายละเอียด
1. ซิลิกอนไดออกไซด์	สารละลายซิลิกอนไดออกไซด์
2. ท่อนาโนคาร์บอน	MWCNTs >95%, \varnothing 20-25 mm, ความยาว 0.5-2 μ m.
3. SiO_2 -MWCNTs	20:1, 40:1, 60:1, 80:1 และ 100:1
4. ความเร็วการสปิน	3,000 รอบต่อนาที
5. เวลาการสปิน	15 วินาที

ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขการอบฟิล์ม

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

3.4.5 ทำการเปิดช่องขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

- กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 2 เพื่อเปิดขั้วไฟฟ้าขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2
- กัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนด้วย Buffer for oxidation ตามตารางที่ 3.9
- ทำการ Strip resist ด้วยอะซิโตนและล้างด้วยน้ำ DI
- ทำการเป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

ตารางที่ 3.9 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อทำการเปิดขั้ว

ขั้นตอน	สารละลาย	อุณหภูมิ (°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	-

ลักษณะโครงสร้างของหัวตรวจวัดก๊าซตามลำดับการสร้างแสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นขั้นตอนในการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นตามลำดับดังนี้

- 1) แผ่นซิลิกอนเริ่มต้น
- 2) ทำการตัดแผ่นซิลิกอนและทำความสะอาด



Si

3) กระบวนการออกซิเดชัน



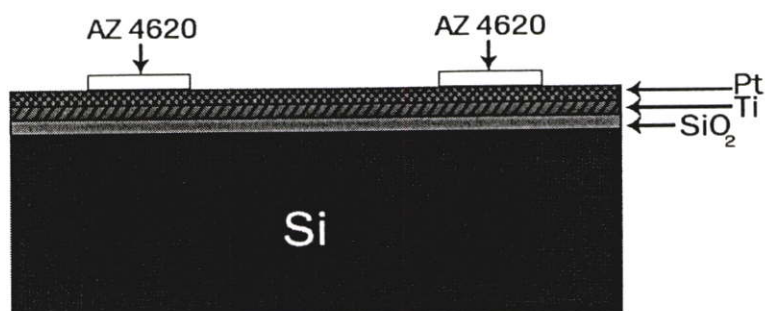
4) คีชี สปีเตอร์ริง



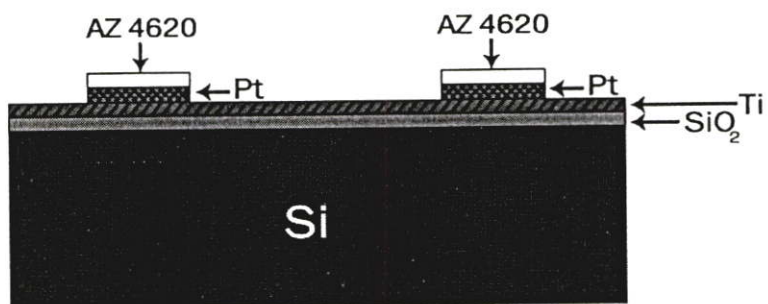
5) คีชี สปีเตอร์ริง



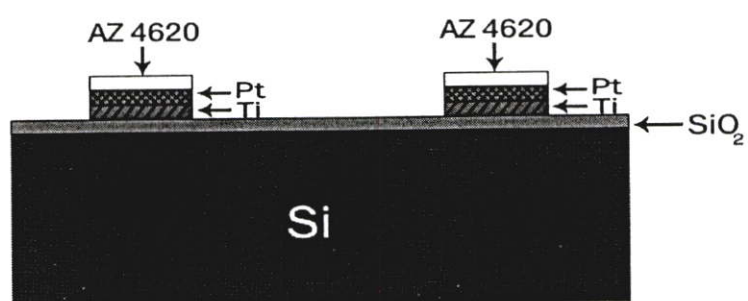
6) โฟโตลิโธกราฟี มาส์ก 1



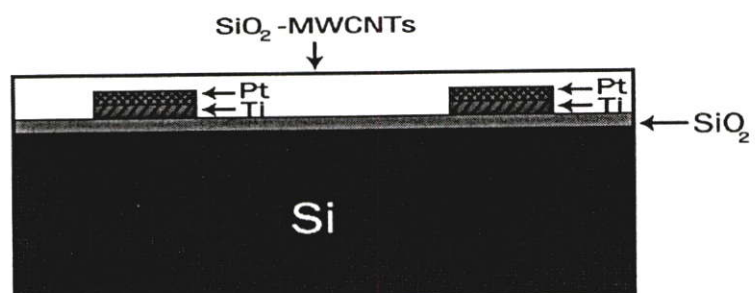
7) กระบวนการ Etching



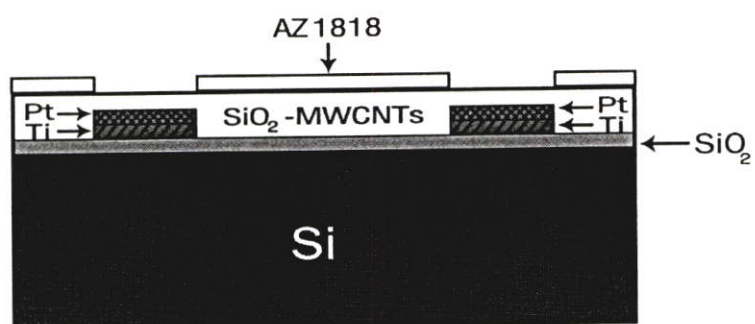
8) กระบวนการ Etching



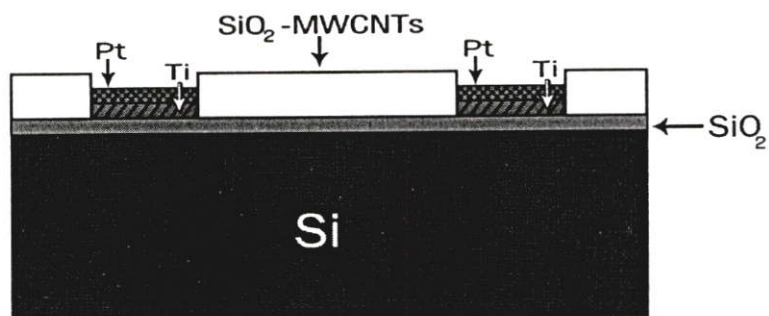
9) สปินโค้ตติง



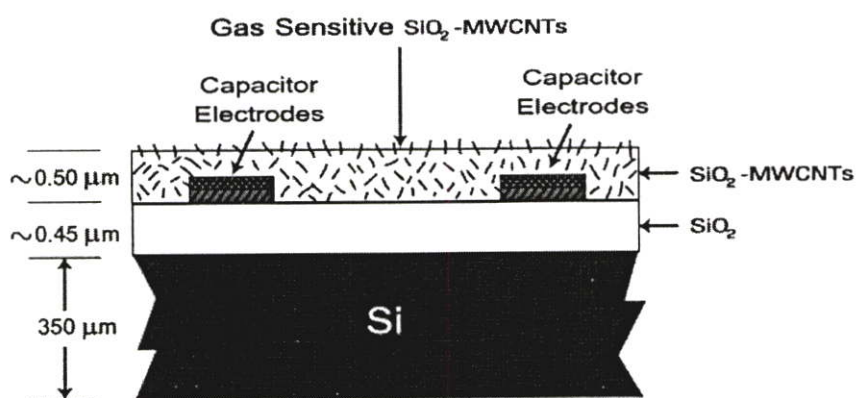
10) โฟโตลิโธกราฟี มาส์ก 2



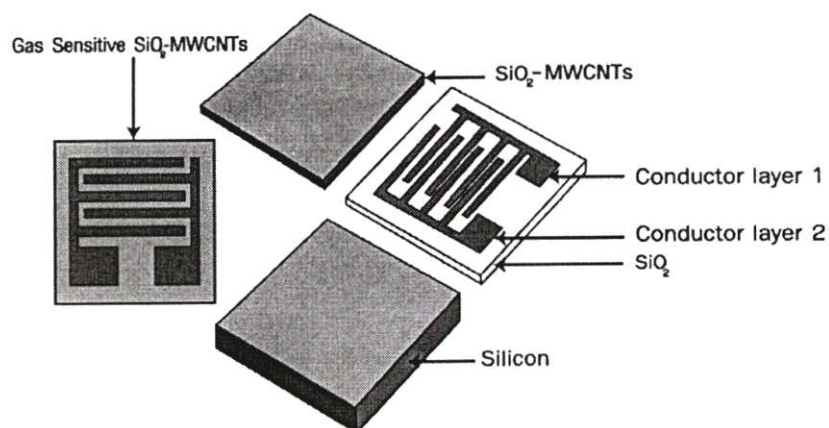
11) กระบวนการ Etching



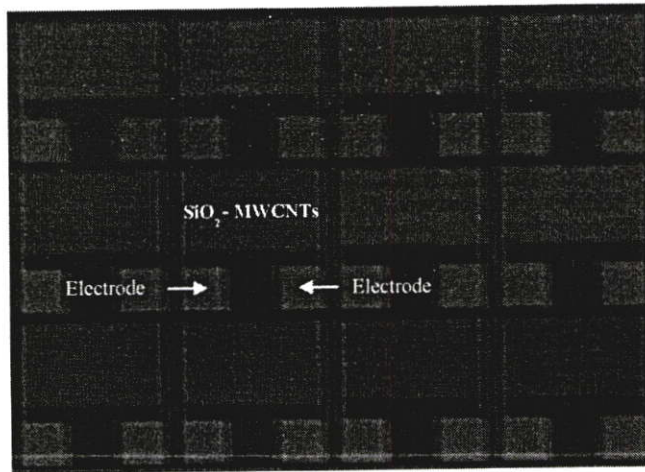
รูปที่ 3.12 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น



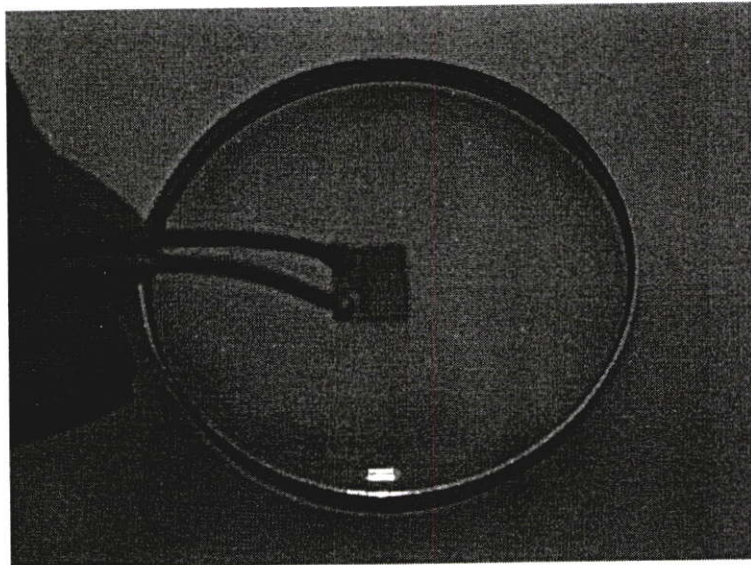
รูปที่ 3.13 ลักษณะภาพตัดขวางของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น



รูปที่ 3.14 ลักษณะโครงสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนที่สร้างเสร็จ



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน

บทที่ 4

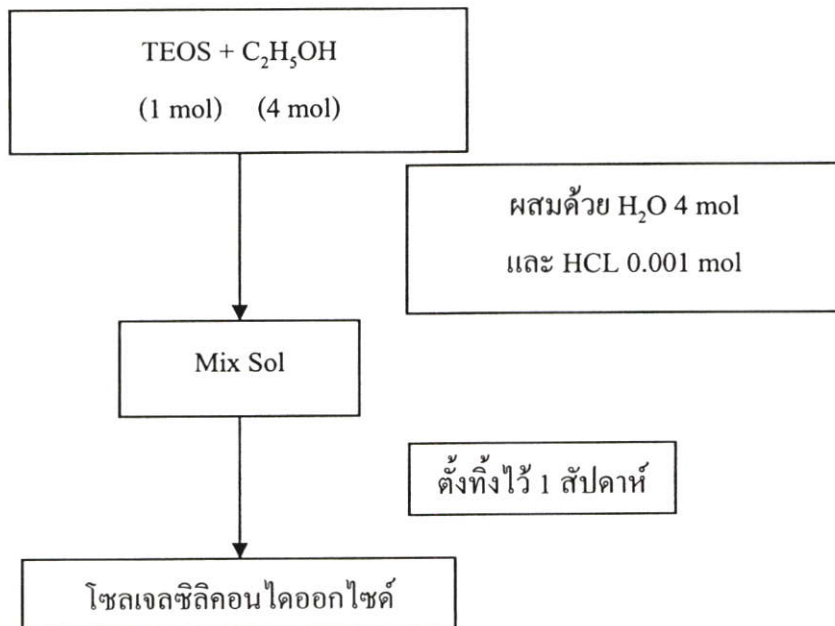
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์

ในการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับการเตรียมแผ่นชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซ การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ จึงมีความสำคัญมากต่อการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการ เพื่อนำมาประยุกต์ในงานวิจัยนี้

4.1.1 การเตรียมสารละลายโซลเจลซิลิกอนไดออกไซด์

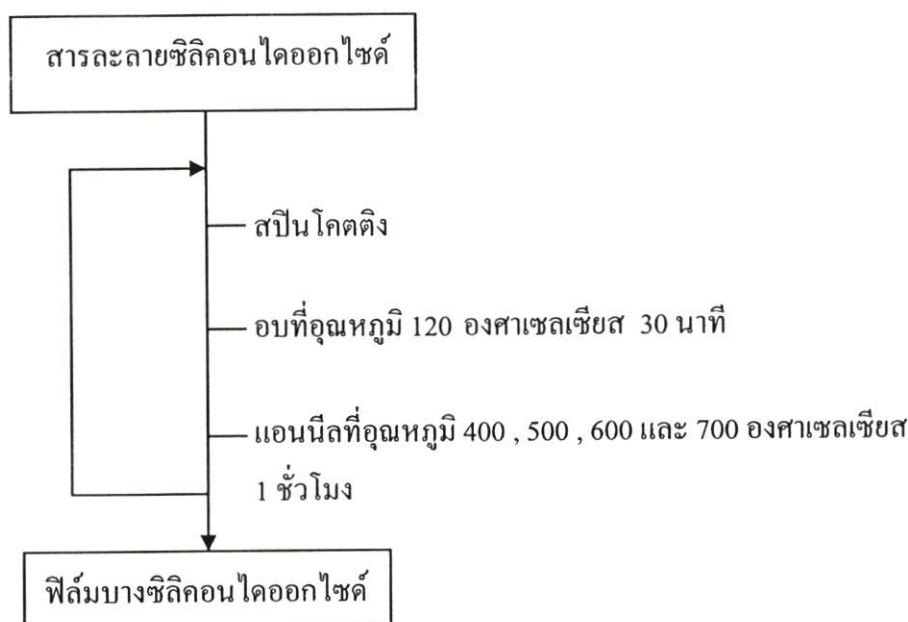
สารละลายซิลิกอนไดออกไซด์เตรียมได้จากการนำสารตั้งต้นเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) ผสมกับตัวทำละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ด้วยอัตราส่วนโดยโมล คือ 1:4 กวนโซลผสมทั้งสองนาน 5 นาที ต่อจากนั้นผสมกับน้ำที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดไอออน (DI) และกรดไฮโดรคลอริก (HCL) 4 โมล และ 0.001 โมล ตามลำดับ กวนโซลผสมนาน 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ ก่อนที่จะนำไปเคลือบผิว ขั้นตอนต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซลเจลซิลิกอนไดออกไซด์

4.1.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์

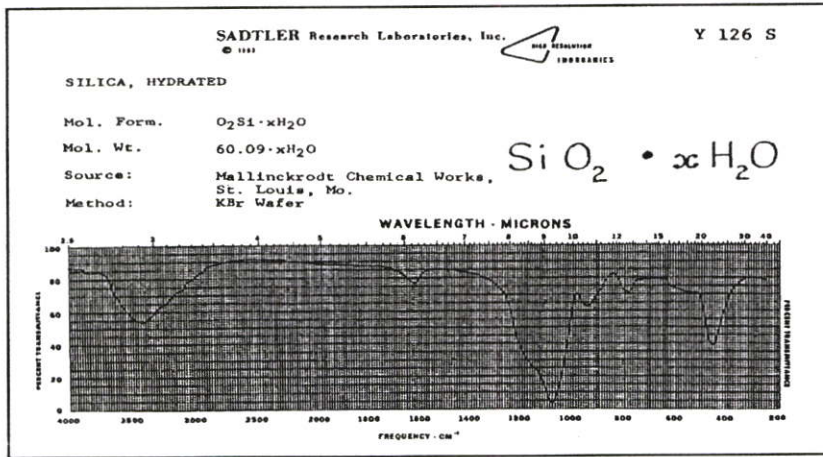
การเคลือบฟิล์มและแอนนีสตามขั้นตอนในรูปที่ 4.2 จะเริ่มจากหยดสารละลายโซลเจลซิลิกอนไดออกไซด์ลงบนฐานรองซิลิกอน สปินด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นและสารอินทรีย์ต่างๆจากนั้นทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศไนโตรเจนต่อออกซิเจน 800:200 ถูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อไล่สารอินทรีย์



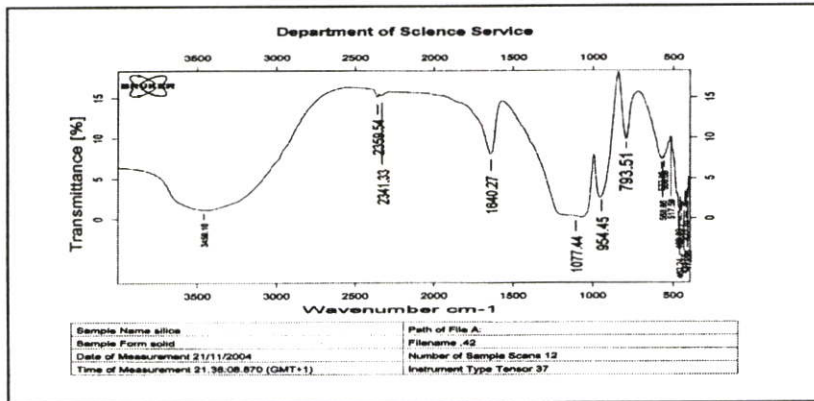
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์

4.1.3 การทดสอบสารละลายซิลิกอนไดออกไซด์

นำสารละลายซิลิกอนไดออกไซด์ที่จัดเตรียมไว้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 500°C นาน 30 นาที สารละลายซิลิกอนไดออกไซด์ก็จะเปลี่ยนเป็นผลึก นำผลึกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) เพื่อยืนยันว่าเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.4 และเมื่อนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าลักษณะของกราฟจัดอยู่ในรูปฟอร์มเดียวกับกราฟมาตรฐาน จึงสรุปได้ว่าสารละลาย Sol-Gel สามารถนำมาใช้เป็น SiO₂ ฟิล์มได้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงคุณสมบัติมาตรฐานของซิลิกอนไดออกไซด์

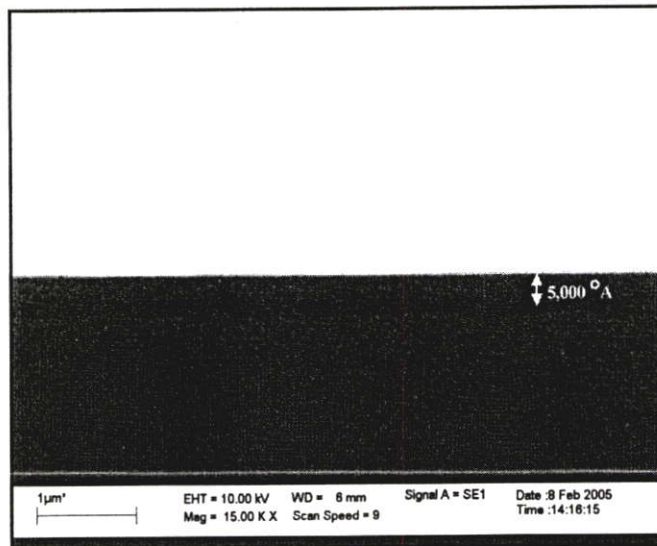


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงคุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้

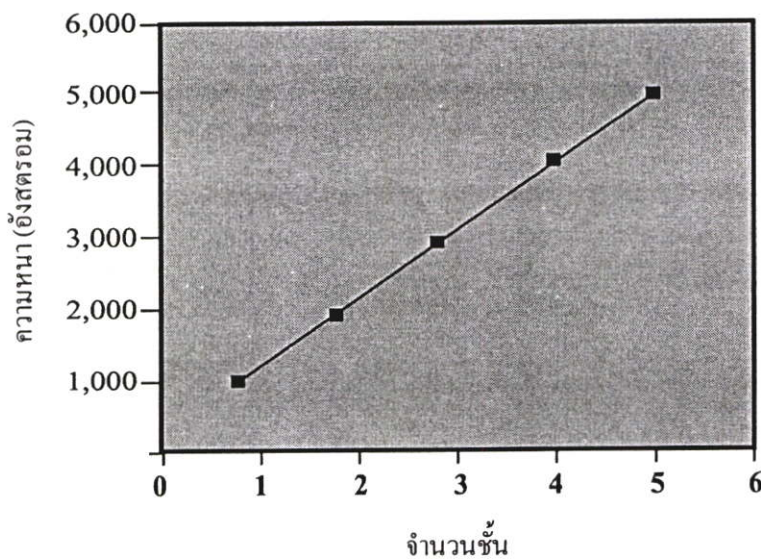
ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ยี่ห้อ Broker รุ่น IFS 28 ในกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จะปรากฏยอดสัญญาณที่ wavenumber 1077.44, 954.45, 793.51, 566.68 และ 482.23 cm^{-1} และยอดสัญญาณของ H_2O อยู่ที่ wavenumber 1640.27 และ 3459.10 cm^{-1} ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับ standard spectrum

4.1.4 การหาค่าความหนาของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์

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



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 5000 อังสตรอม



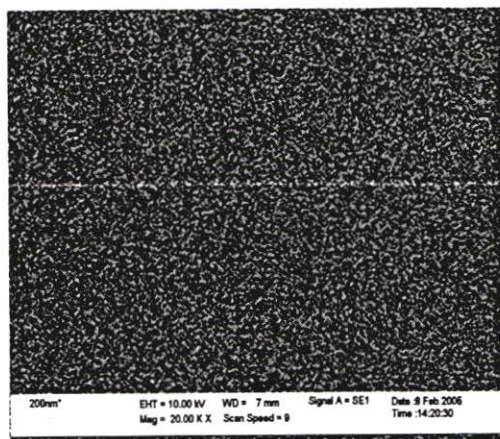
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของความหนาต่อจำนวนชั้นในการเคลือบที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที

จากกราฟรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าความหนาของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เพิ่มขึ้นตามจำนวนหรือจำนวนครั้งในการสปิน โดยที่ความเร็วของการสปินเนอร์ 3000 รอบต่อนาที เคลือบ 1 ครั้ง จะมีความหนาประมาณ 1000 อังสตรอม

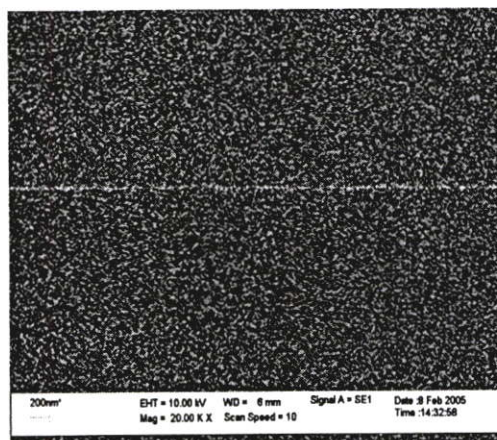
4.1.5 การศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์

4.1.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง

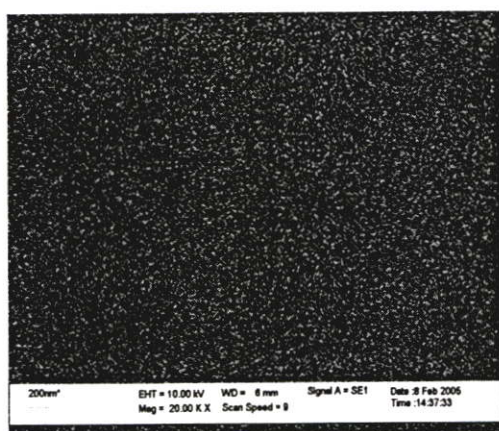
จากกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (SEM) สามารถศึกษารูปร่างของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7



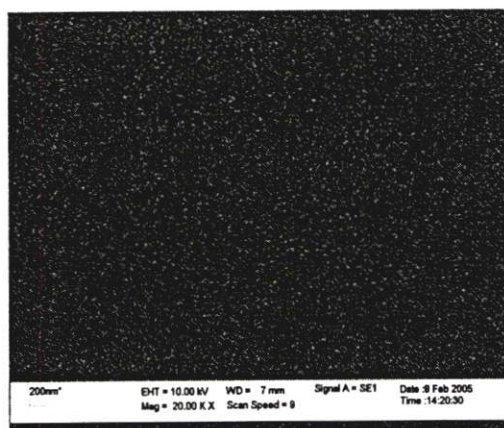
(ก) 400 องศาเซลเซียส



(ข) 500 องศาเซลเซียส



(ค) 600 องศาเซลเซียส



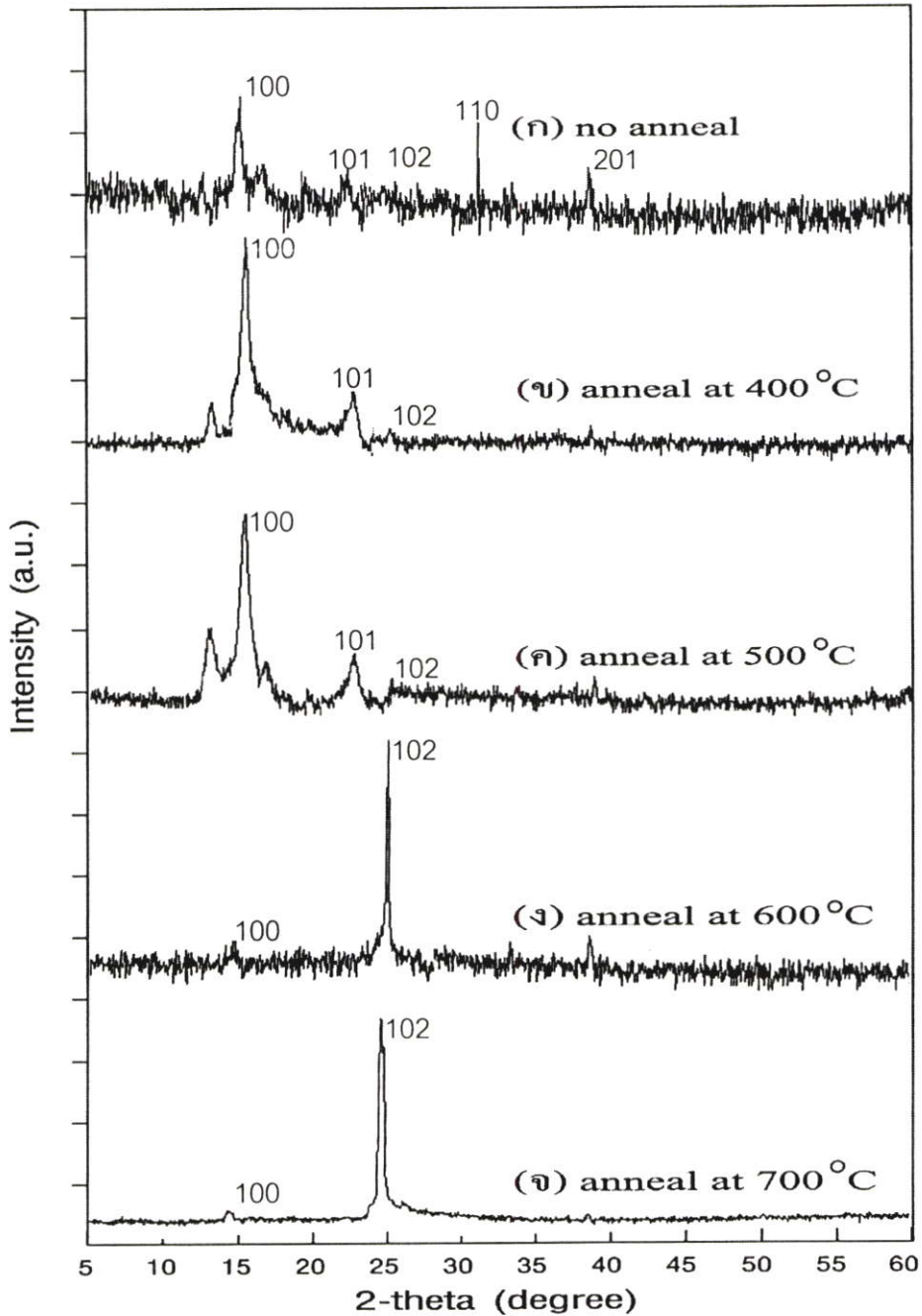
(ง) 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.7 ผิวหน้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากการแอนนีสที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500, (ค) 600 และ (ง) 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (SEM) รูปที่ 4.7 พบว่า ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มประกอบด้วยเม็ดเกรนเล็กๆ กระจายทั่วผิวหน้าอย่างเป็นระเบียบ และมีขนาดเล็กลง การจัดเรียงตัวดีขึ้น เมื่ออุณหภูมิการแอนนีสสูงขึ้น

4.1.5.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์

ศึกษาความเป็นผลึกของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ได้จากเครื่องวัดความเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X – rays diffraction, XRD) หลังจากการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

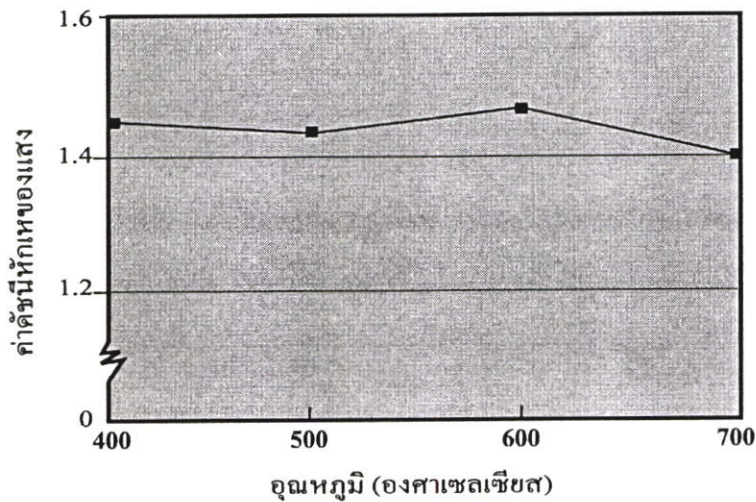


รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง XRD หลังจากการแอนนัลที่อุณหภูมิ (ก) No anneal, (ข) 400, (ค) 500, (ง) 600 และ (จ) 700 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ยี่ห้อ Philips รุ่น PM8203A ฐานข้อมูลจะแสดงผลระนาบต่างๆ ของ SiO_2 ดังที่ปรากฏออกมาในรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.8 (ก) ออบฟิล์มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสและไม่ได้แอนนีสผลของ XRD จะยังคงปรากฏผลของระนาบผลึก SiO_2 บางระนาบ เช่น 100, 102 และ 110 เกิดขึ้น รูปที่ 4.8 (ข) และ (ค) เมื่อทำการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 400 - 500 องศาเซลเซียส ผลึกหลายรูปของ SiO_2 จะมียอดสัญญาณสูงสุดที่ระนาบ 100 และเมื่อทำการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส จะปรากฏระนาบส่วนใหญ่ของ SiO_2 เป็น 102 ดังแสดงในรูป 4.8 (ง) และ (จ) ตามลำดับ

4.1.6 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์

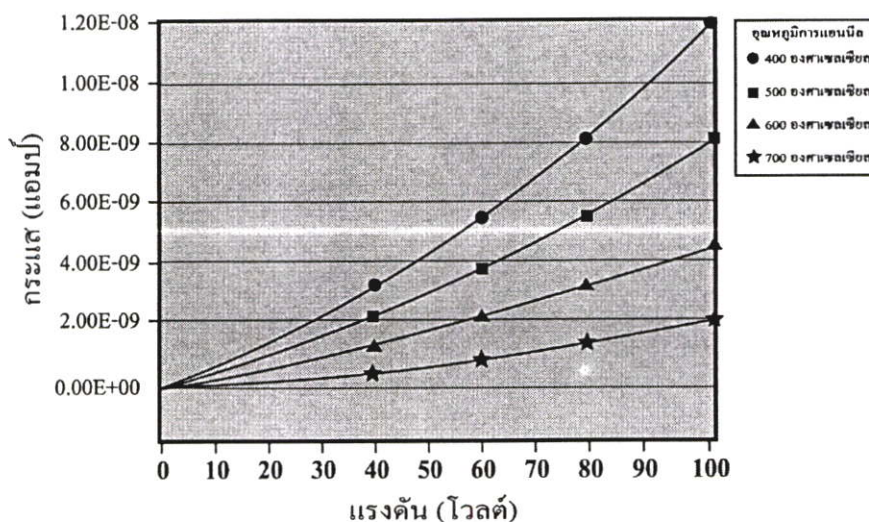
สามารถศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์โดยการวิเคราะห์ผลการสะท้อน (Reflection) ด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) ด้วยหลักการโพลาไรเซชัน (Polarization) รูปที่ 4.9 แสดงค่าดัชนีหักเหของแสงหลังการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.9 แสดงค่าดัชนีหักเหของแสงหลังการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

4.1.7 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์

จากการนำฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์มาทดสอบกับเครื่องมือวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ(Semiconductor/Component test system) ยี่ห้อ HP รุ่น 4061A สามารถศึกษาสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 4.10

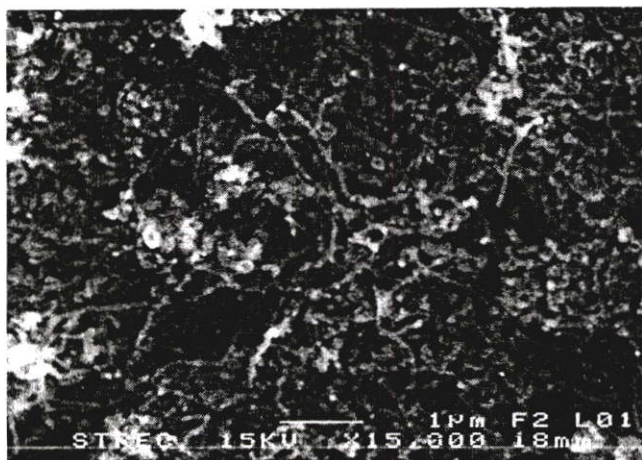


รูปที่ 4.10 กราฟ I-V แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์

จากการเปรียบเทียบหลังการแอนนีสที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ค่าความต้านไฟฟ้าของฟิล์มจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิกำลังสูงขึ้น จากกราฟรูปที่ 4.10 ที่อุณหภูมิกำลัง 700 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีค่ามากที่สุด

4.2 การเตรียมท่อคาร์บอน (CNTs)

สำหรับท่อคาร์บอนที่นำมาใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นท่อคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่ผลิตโดยบริษัท Aldich มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20-50 นาโนเมตร ความยาว 0.5-2 ไมโครเมตร



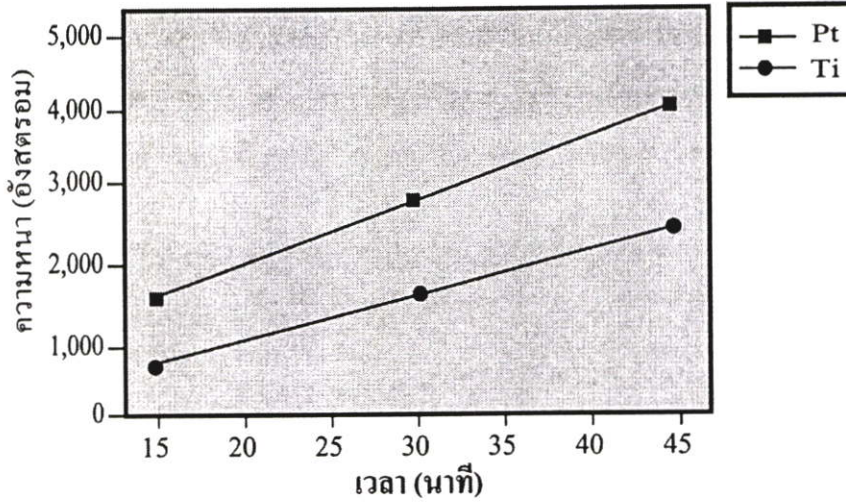
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ด้วยเครื่อง SEM

4.3 การศึกษาระยะห่างขั้วไฟฟ้า

วงจรชกนำและขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่นำค่าความจุที่ตรวจจับได้ออกมาสู่ภายนอกการศึกษาวงจรชกนำและระยะห่างขั้วไฟฟ้าจึงมีความสำคัญต่อการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับก๊าซ งานวิจัยนี้ได้ทดลองสร้างวงจรชกนำและขั้วไฟฟ้าขึ้นจากโลหะแพลทินัม (Pt) โดยมีโลหะไททานเนียม (Ti) ทำหน้าที่เป็นชั้นประสานระหว่างแพลทินัม กับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) จึงได้ทำการศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์มโลหะที่สร้างขึ้นจากระบบการสปัตเตอร์ริงแบบดีซีสปัตเตอร์ริง เพื่อประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้า

การหาค่าความหนาของฟิล์มแพลทินัม

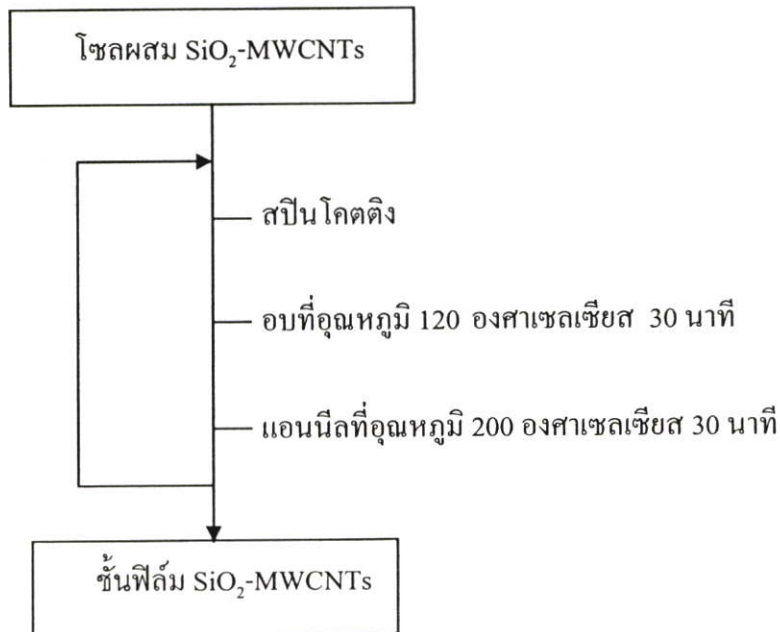
ทดลองการปลูกฟิล์มแพลทินัม (Pt) และไททานเนียม (Ti) ด้วยระบบการสปัตเตอร์ริงแบบดีซีสปัตเตอร์ริง โดยทำการจ่ายก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ (Ar 99.99%) เข้าสู่ห้องสปัตเตอร์ริง ควบคุมกำลังงานการสปัตเตอร์ริงเท่ากับ 115 วัตต์ ที่ความดัน 0.15 Torr และทำการสปัตเตอร์ริงเป็นเวลา 15, 30, และ 45 นาที จากรูปที่ 4.12 พบว่าฟิล์มบางแพลทินัมมีอัตราการเคลือบฟิล์มประมาณ 88 อังสตรอมต่อนาที และฟิล์มบางไททานเนียมมีอัตราการเคลือบฟิล์มประมาณ 49 อังสตรอมต่อนาที ลักษณะความหนาของฟิล์มแพลทินัมที่เวลาการเคลือบฟิล์ม 30 นาที กับฟิล์มไททานเนียมที่เวลาการเคลือบฟิล์ม 45 นาที บนชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มแพลทินัมและไททาเนียมกับเวลาการสปัตเตอร์ริง

4.4 การเตรียมชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs

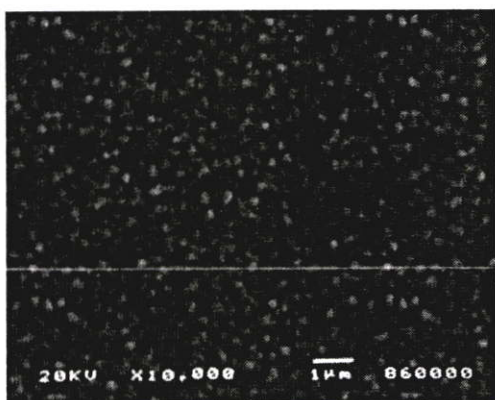
การเคลือบฟิล์มและแอนนัลตามขั้นตอนในรูปที่ 4.13 จะเริ่มจากหยดโซลผสม SiO_2 -MWCNTs ลงบนฐานรองซิลิคอนที่มีออกไซด์ปกคลุมอยู่ สปินด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นและสารอินทรีย์ต่างๆ จากนั้นทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศปกติ



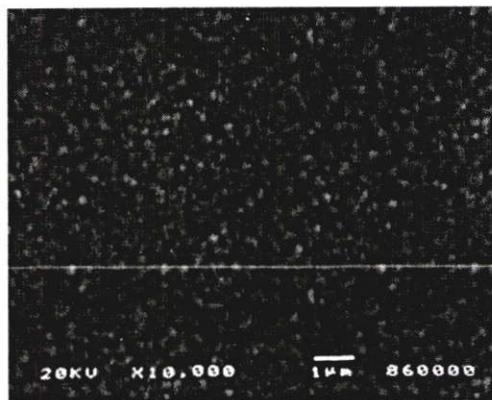
รูปที่ 4.13 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs

4.4.1 การศึกษาผิวหน้าของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน

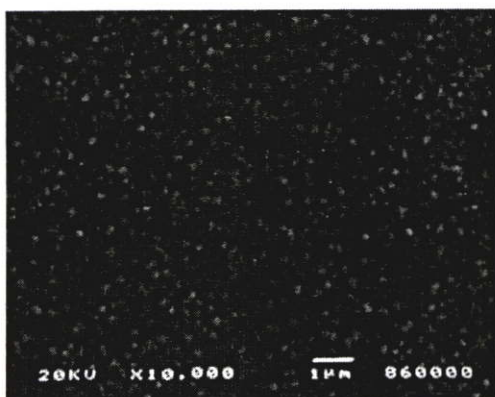
สามารถศึกษารูปร่างของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนจากกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.14



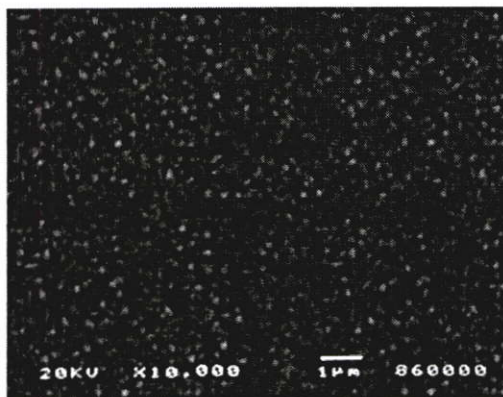
(ก) SiO₂-MWCNTs สัดส่วน
100 : 1 โดยน้ำหนัก



(ข) SiO₂-MWCNTs สัดส่วน
80 : 1 โดยน้ำหนัก



(ค) SiO₂-MWCNTs สัดส่วน
60 : 1 โดยน้ำหนัก

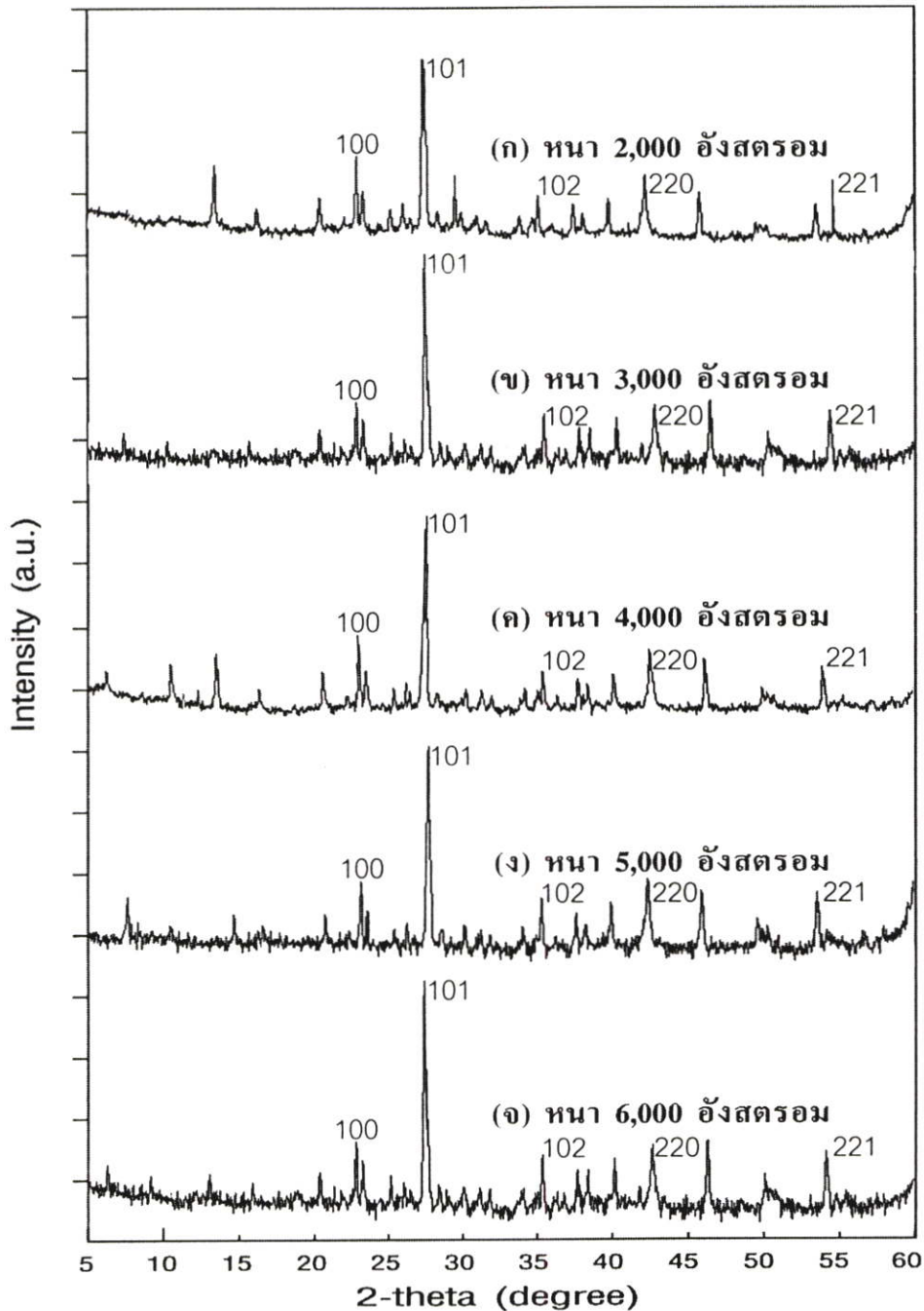


(ง) SiO₂-MWCNTs สัดส่วน
40 : 1 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายผิวหน้าชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs ด้วยเครื่อง SEM

จากการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนิ่ง (SEM) รูปที่ 4.14 พบว่าลักษณะผิวหน้าของฟิล์มประกอบด้วยท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นจำนวนมากวางกระจายอยู่ทั่วผิวหน้า และมีจำนวนหนาแน่นขึ้นตามสัดส่วนของท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้น

สามารถศึกษาโครงสร้างของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนได้จากเครื่องวัดความเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X – rays diffraction, XRD) ที่ความหนาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่อง XRD ที่อุณหภูมิการแอนนัล 200 องศาเซลเซียส ความหนา (ก) 2000, (ข) 3000, (ค) 4000, (ง) 5000 และ (จ) 6000 อังสตรอม ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (SiO₂-MWCNTs) ที่อุณหภูมิการแอนนีส 200 องศาเซลเซียส ความหนา 2000, 3000, 4000, 5000 และ 6000 อังสตรอม พบว่าชั้นฟิล์มยังคงปรากฏผลึกหลายรูปของ SiO₂ โดยจะปรากฏยอดสูงสุดที่ระนาบ 101 ในทุกความหนาชั้นฟิล์ม ระนาบผลึก SiO₂ ยังคงปรากฏลักษณะเดียวกันในทุกกราฟ ซึ่งผลจากการตรวจสอบความเป็นผลึก จะใกล้เคียงกับชั้นฟิล์ม SiO₂ ที่ไม่มีการแอนนีส

4.5 การตอบสนองที่มีต่อก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ

4.5.1 การศึกษาความไวในการตรวจจับก๊าซ

หัวตรวจวัดก๊าซที่สร้างขึ้นถูกนำมาวัดผลตอบสนองที่มีต่อก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 500, 1,000, 5,000 และ 10,000 ppm เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ และแอมโมเนียความเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการจ่ายก๊าซ 150 ซีซีต่อนาที โดยทำการตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิโดยรอบของหัวตรวจวัดก๊าซ 30 องศาเซลเซียส และวัดผลการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของหัวตรวจวัดก๊าซด้วยมัลติมิเตอร์

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย แสดงดังสมการที่ 4.1

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

โดยที่ ΔC คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า

C_{gas} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มขณะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซ

C_{air} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มที่สภาวะปกติ

ถ้า $C_{\text{gas}} < C_{\text{air}}$ แสดงว่าก๊าซที่ใช้ทดสอบป็นตัวออกซิไดซ์

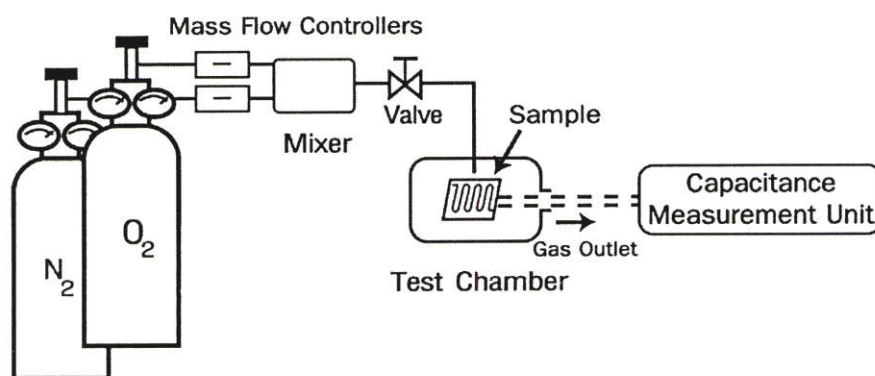
$C_{\text{gas}} > C_{\text{air}}$ แสดงว่าก๊าซที่ใช้ทดสอบป็นตัวรีดิวซ์

4.6 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O_2)

เนื่องจากออกซิเจนอยู่ในรูปของก๊าซ การเจือความเข้มข้นจึงใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซผสม โดยมีค่าดังตารางที่ 4.1 และมีการเชื่อมต่อเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ดังรูป 4.16 โดยก๊าซออกซิเจนที่มีอยู่จะมีความเข้มข้น 1% หรือ 10,000 ppm

ตารางที่ 4.1 การเจือความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน

ความเข้มข้น	500 ppm	1000 ppm	5000 ppm	10000 ppm
อัตราส่วน $O_2 : N_2$ (cc)	1 : 19	1 : 9	1 : 1	1 : 0



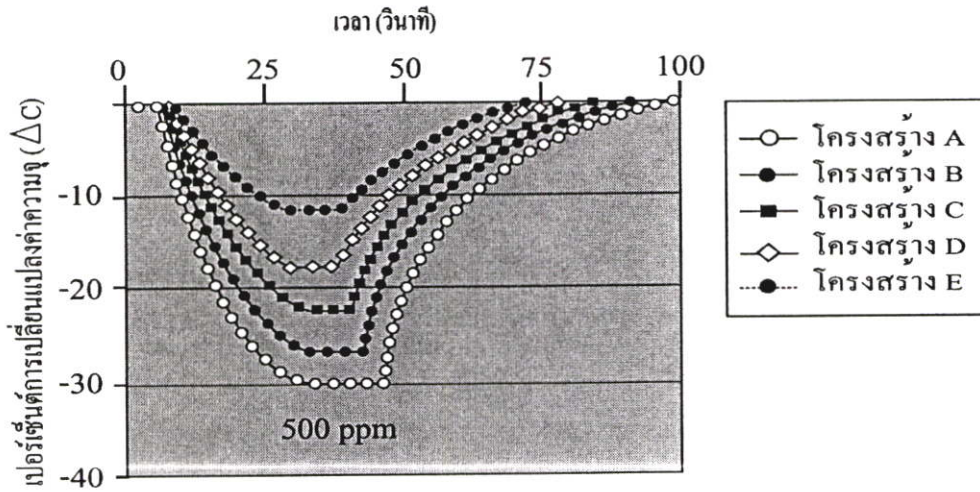
รูปที่ 4.16 แผนผังระบบวัดผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O_2)

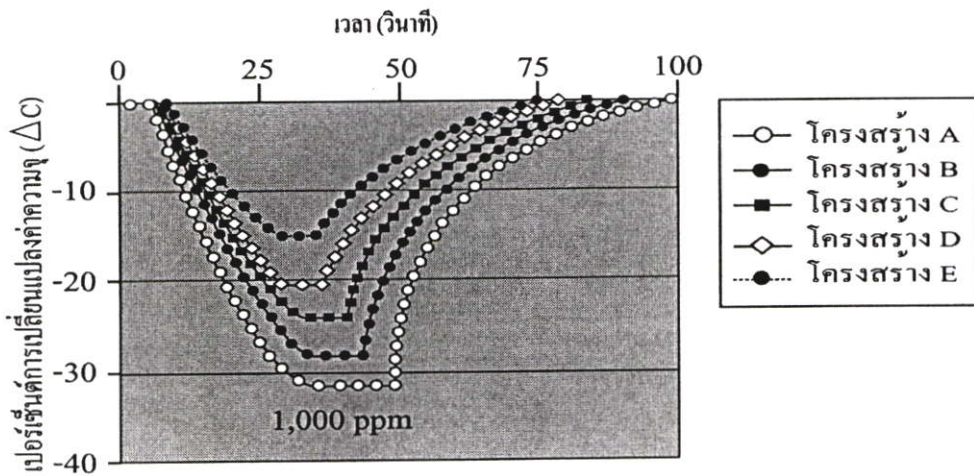
ความเข้มข้น ของก๊าซ (ppm)	สัดส่วน SiO_2 - MWCNTs	ความหนา (A°)	ค่าความจุ โครงสร้าง A (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง C (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง E (nF)	
			C_{air}	C_{gas}	C_{air}	C_{gas}	C_{air}	C_{gas}
500	20:1	2000	1.2	0.812	1.1	0.803	1.1	0.920
1000	20:1	2000	1.2	0.810	1.1	0.795	1.1	0.915
5000	20:1	2000	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

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลการทดลองแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O₂)

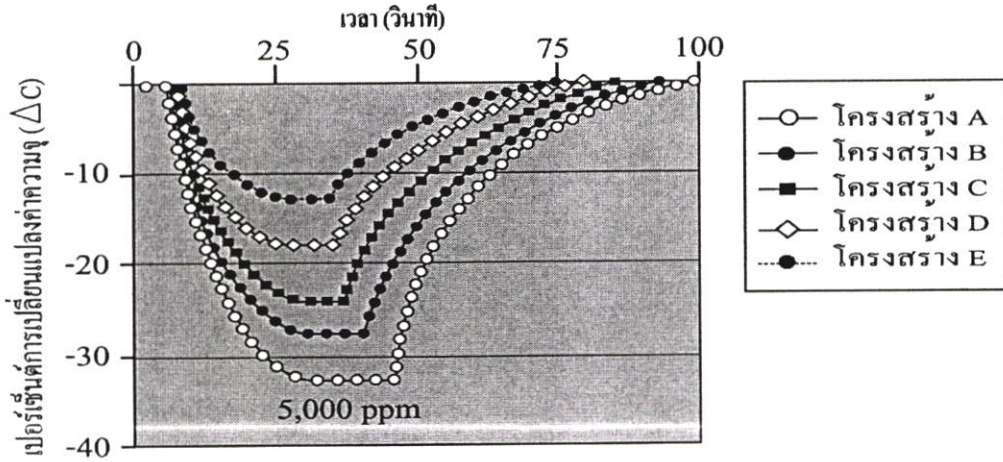
ความเข้มข้น ของก๊าซ (ppm)	สัดส่วน SiO ₂ - MWCNTs	ความหนา (A°)	ค่าความจุ โครงสร้าง A (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง C (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง E (nF)	
			C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}
5000	40:1	3000	1.3	0.812	1.2	0.805	1.2	0.922
10000	40:1	3000	1.3	0.805	1.2	0.800	1.2	0.910
500	60:1	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



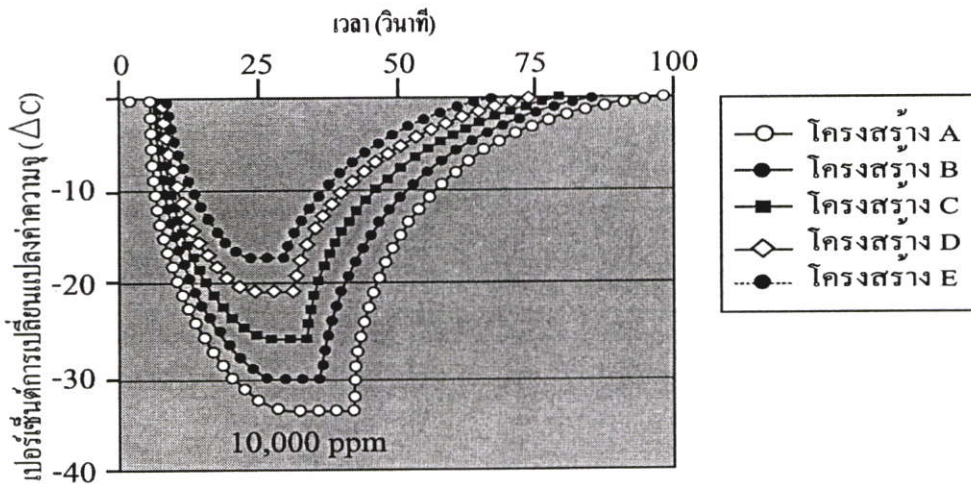
รูปที่ 4.17 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 500 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



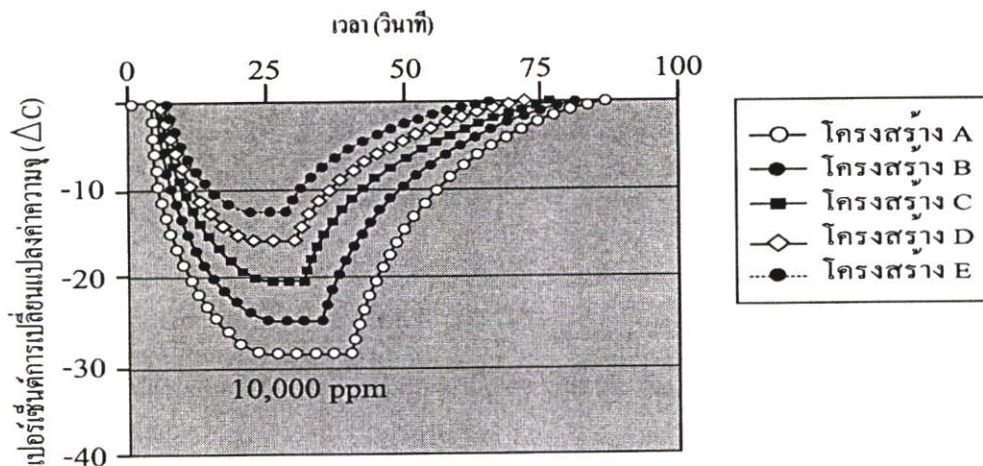
รูปที่ 4.18 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 1,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



รูปที่ 4.19 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 5,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E

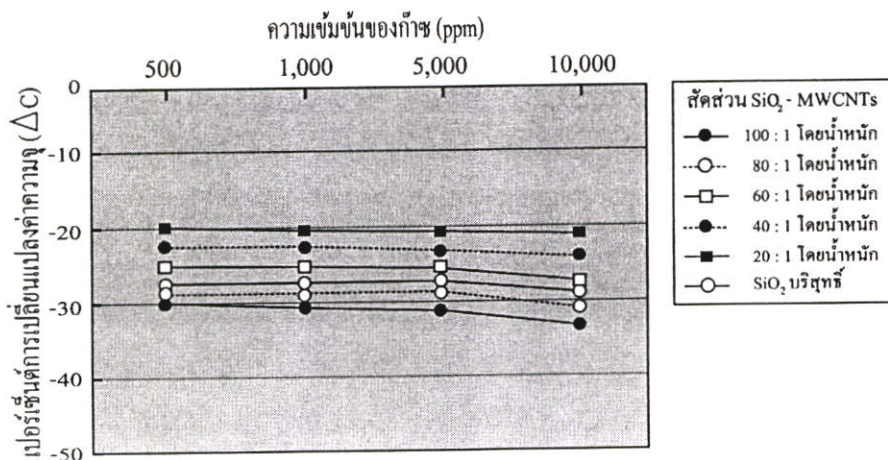


รูปที่ 4.20 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 10,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



รูปที่ 4.21 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 10,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E

จากกราฟรูปที่ 4.21 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 10,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ใช้สำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซกับกราฟรูปที่ 4.20 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจนของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น จากการเปรียบเทียบพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ โดยที่หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่างกัน ประมาณ 4.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน (O_2) ของชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs และ SiO_2 บริสุทธิ์ โครงสร้าง A

จากกราฟรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs และ SiO_2 บริสุทธิ์ ตอบรับก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่ใช้ทำการทดสอบ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของก๊าซ โดยที่ความเข้มข้นของก๊าซ 10,000 ppm ชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs สัดส่วน 100:1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากกว่าชั้นฟิล์ม SiO_2 บริสุทธิ์ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากโครงสร้างเส้นเซอร์ ได้ใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWCNTs) ผสมในสารละลายซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ทำให้คุณลักษณะของฟิล์มที่ได้มีการนำไฟฟ้าน้อยเกือบเป็นฉนวน ทั้งนี้ MWCNTs ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) [3] และมีโมเดลของชั้นฟิล์มเป็นแบบ RC Model [5] เมื่อทำการตรวจจับก๊าซ O_2 ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสภาพความนำในท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากเกิดการ oxidizing กับโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน (O_2) ทำให้ก๊าซออกซิเจนถูก ดูดกลืนเข้าไปในชั้น SiO_2 -MWCNTs ทำให้มีการจับอิเล็กตรอนจาก p-type MWCNTs ขึ้น ทำให้จำนวนโฮลในวัสดุเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่า Dielectric constant ของฟิล์มลดลงตามความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดกลืนในโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเข้าไปใน MWCNTs ได้มากขึ้น

4.7 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

เงื่อนไขที่ใช้

- เวลาในการจ่ายก๊าซที่ใช้ทดสอบ 100 วินาที
- อัตราการจ่ายก๊าซที่ใช้ทดสอบ 150 ซีซีต่อนาที

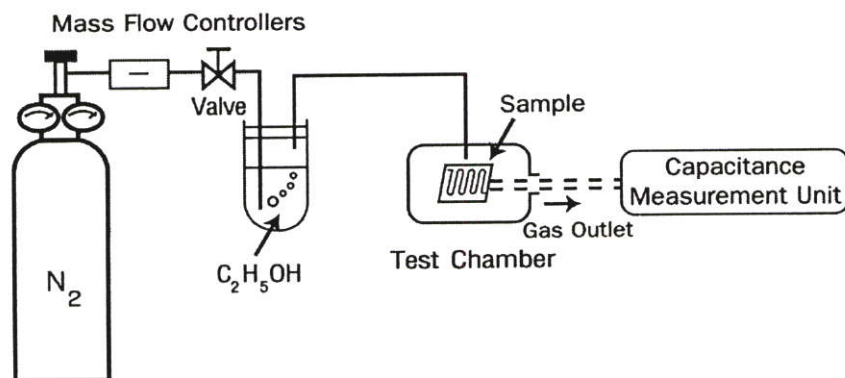
เนื่องจากเอทิลแอลกอฮอล์ 99.5% เป็นของเหลว เมื่อต้องการความเข้มข้น ค่าต่าง ๆ จึงใช้น้ำ DI เป็นตัวเจือจาง โดยเทียบจากตารางที่ 4.3 จากนั้นใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาหะ โดยมีแผนผังการเชื่อมต่อเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ดังรูปที่ 4.23

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

จากการทดสอบโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 20% จะได้ผลดังรูปที่ 4.24, 4.25, 4.26 และ 4.27 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส โดยที่ชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนมีความหนา 5,000 อนุกรม



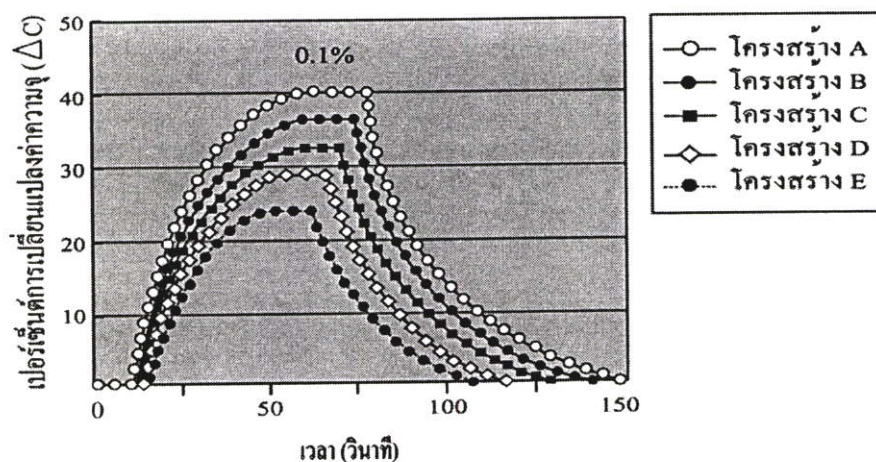
รูปที่ 4.23 แผนผังระบบวัดผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH)

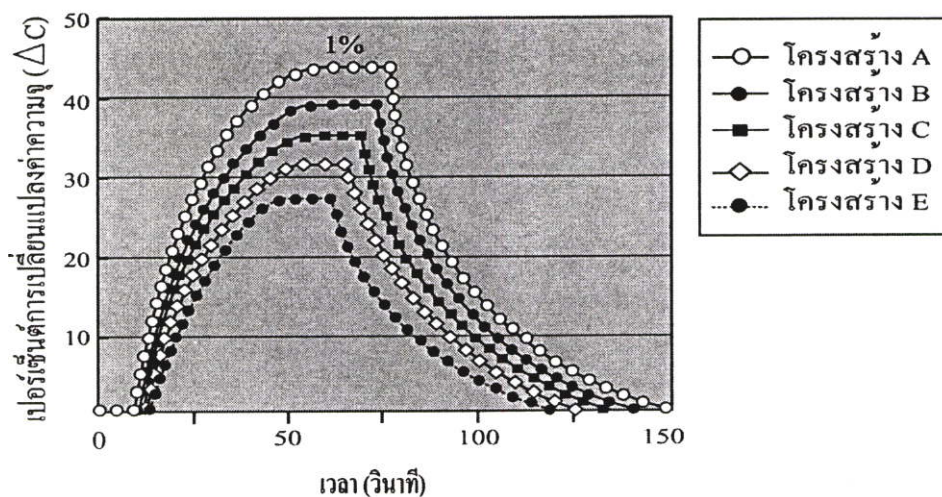
ความเข้มข้น ของก๊าซ (%)	สัดส่วน SiO_2 - MWCNTs	ความหนา (A°)	ค่าความจุ โครงสร้าง A (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง C (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง E (nF)	
			C_{air}	C_{gas}	C_{air}	C_{gas}	C_{air}	C_{gas}
0.1	20:1	2000	1.2	1.465	1.1	1.235	1.1	1.125
1	20:1	2000	1.2	1.520	1.1	1.250	1.1	1.140
10	20:1	2000	1.2	1.500	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

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ผลการทดลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์(C_2H_5OH)

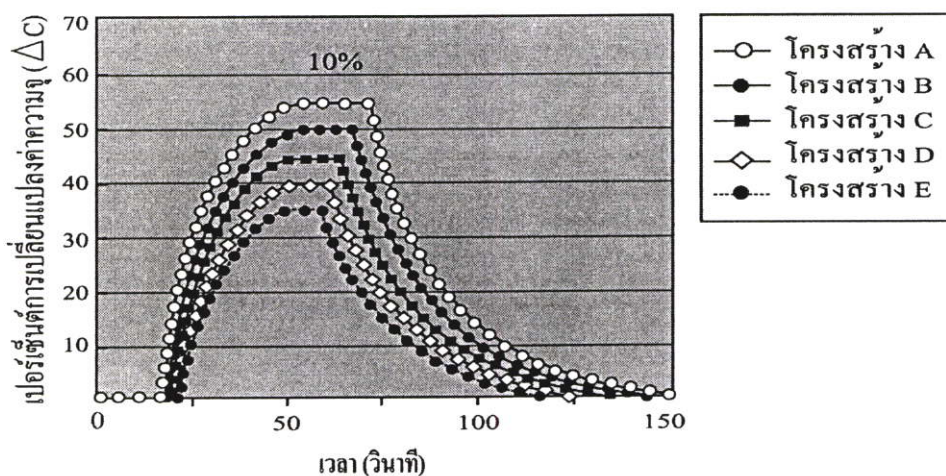
ความเข้มข้น ของก๊าซ (%)	สัดส่วน SiO_2 - MWCNTs	ความหนา (\AA)	ค่าความจุ โครงสร้าง A (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง C (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง E (nF)	
			C_{air}	C_{gas}	C_{air}	C_{gas}	C_{air}	C_{gas}
20	80:1	5000	1.6	1.850	1.5	1.580	1.5	1.370
0.1	100:1	6000	1.7	1.690	1.6	1.320	1.6	1.300
1	100:1	6000	1.7	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



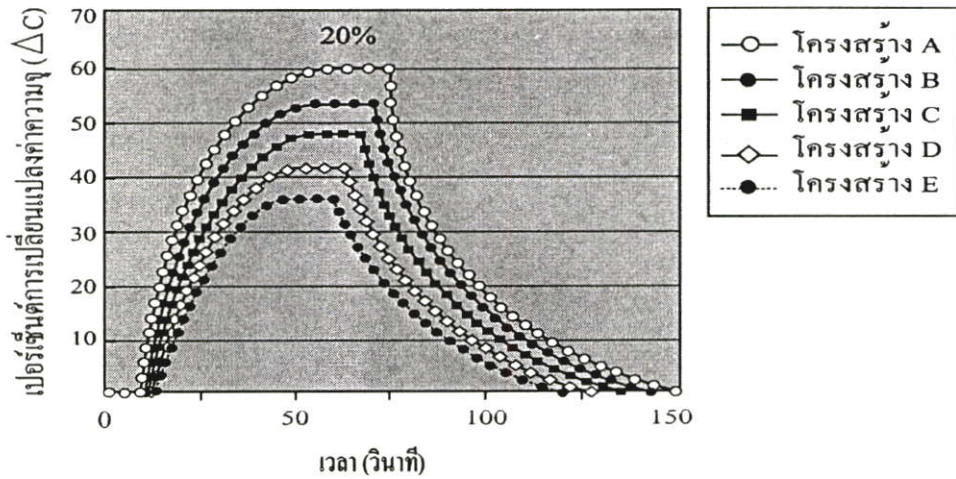
รูปที่ 4.24 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ความเข้มข้น 0.1% ของชั้นฟิล์มซิลิคอน ไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โครงสร้าง A, B, C, D และ E



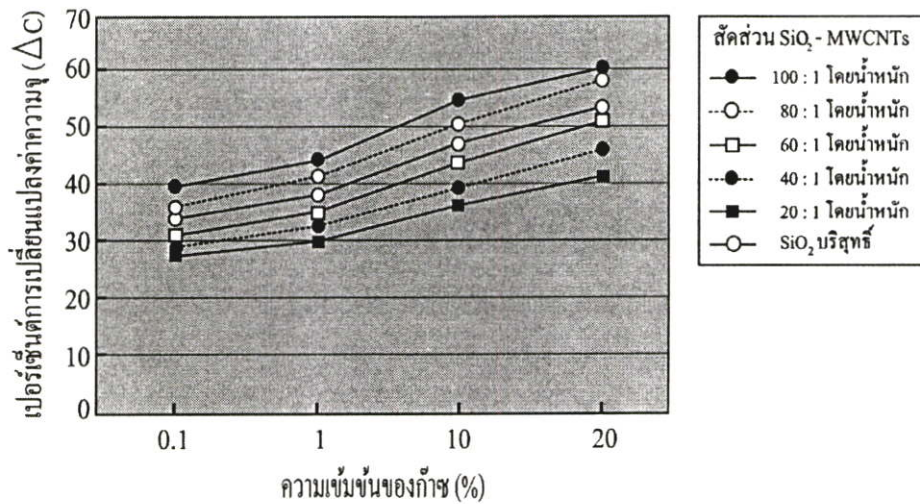
รูปที่ 4.25 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ความเข้มข้น 1% ของชั้นฟิล์มซิลิโคน ไดออกไซด์-ท่อนานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



รูปที่ 4.26 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ความเข้มข้น 10% ของชั้นฟิล์มซิลิโคนไดออกไซด์-ท่อนานาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



รูปที่ 4.27 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ความเข้มข้น 20% ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ของชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs และ SiO_2 บริสุทธิ์ โครงสร้าง A

จากกราฟรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs และ SiO_2 บริสุทธิ์ ตอบรับก๊าซเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ที่ใช้ทำการทดสอบ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของก๊าซ โดยที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% ชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs สัดส่วน 100:1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากกว่าชั้นฟิล์ม SiO_2 บริสุทธิ์ ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์

เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เป็น Reducing agent แต่น้อยกว่าก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) สูงกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) เมื่อทำการวัดค่า C ทำให้ค่า ΔC ของ NH_3 มีการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นกว่า ΔC ของ C_2H_5OH

4.8 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH_3)

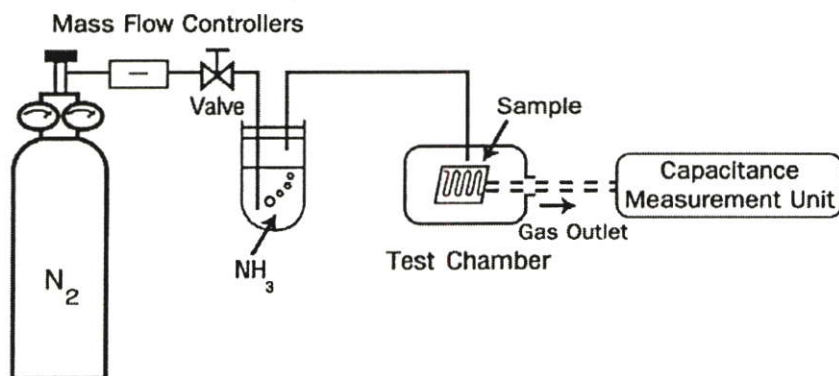
เงื่อนไขที่ใช้

- เวลาในการจ่ายก๊าซที่ใช้ทดสอบ 100 วินาที
- อัตราการจ่ายก๊าซที่ใช้ทดสอบ 150 ซีซีต่อนาที

เนื่องจากแอมโมเนีย 25% เป็นของเหลว เมื่อต้องการความเข้มข้น ค่าต่าง ๆ จึงใช้น้ำ DI เป็นตัวเจือจาง จากนั้นใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาหะ โดยมีแผนผังการเชื่อมต่อเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ดังรูปที่ 4.29

4.8.1 การตอบสนองต่อแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ

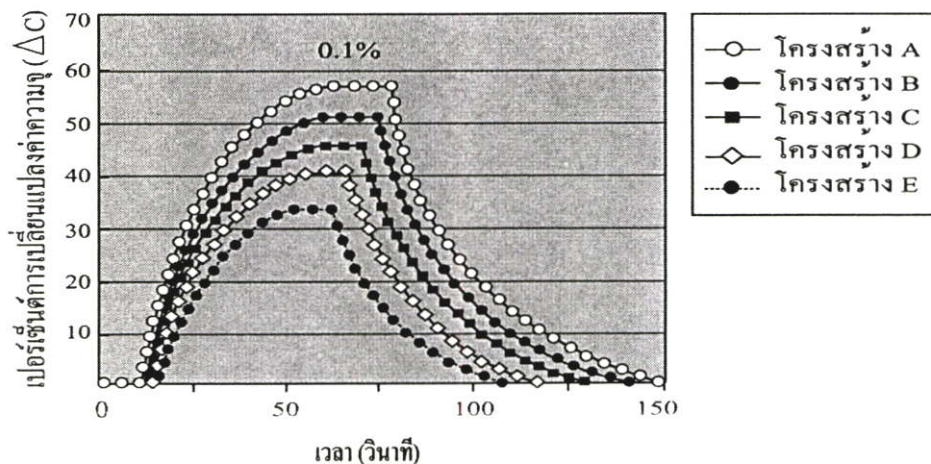
จากการทดสอบโดยใช้แอมโมเนียความเข้มข้น 0.1, 1, 10 และ 20% จะได้ผลดังรูปที่ 4.30, 4.31, 4.32 และ 4.33 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส โดยที่ชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนมีความหนา 5,000 อังสตรอม



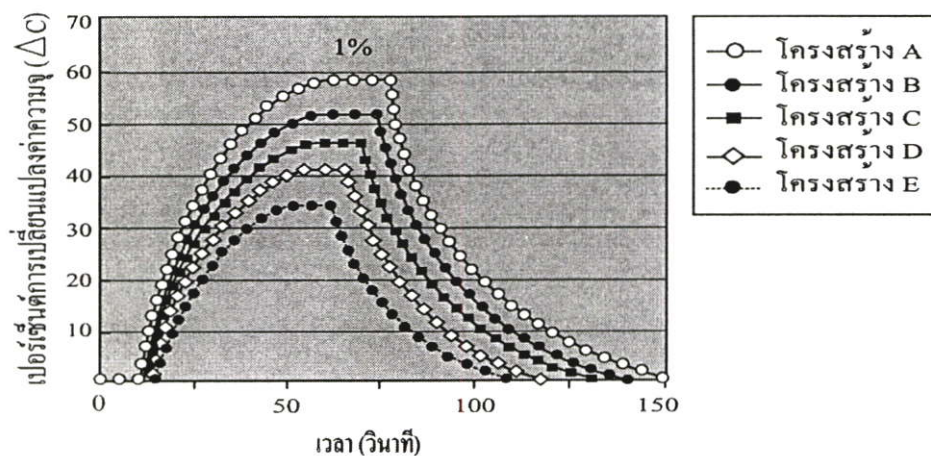
รูปที่ 4.29 แผนผังระบบวัดผลการทดลอง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH₃)

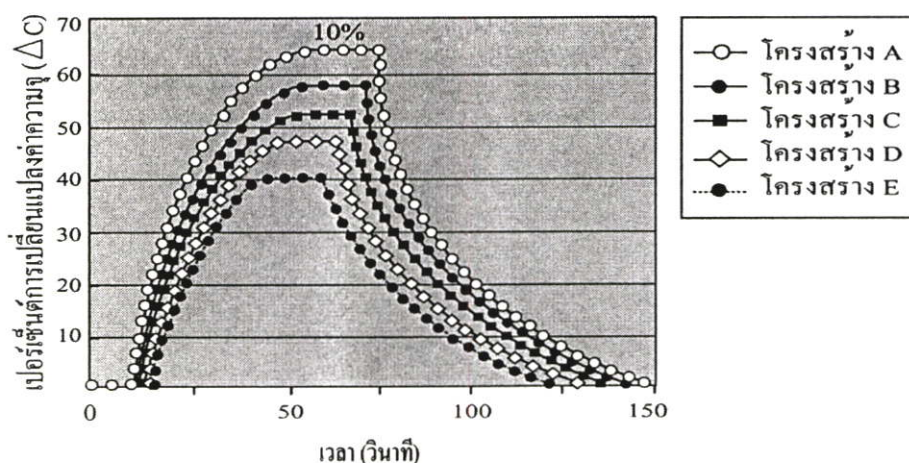
ความเข้มข้น ของก๊าซ (%)	สัดส่วน SiO ₂ - MWCNTs	ความหนา (A°)	ค่าความจุ โครงสร้าง A (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง C (nF)		ค่าความจุ โครงสร้าง E (nF)	
			C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}	C _{air}	C _{gas}
0.1	20:1	2000	1.2	1.840	1.1	1.600	1.1	1.345
1	20:1	2000	1.2	1.865	1.1	1.630	1.1	1.370
10	20:1	2000	1.2	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



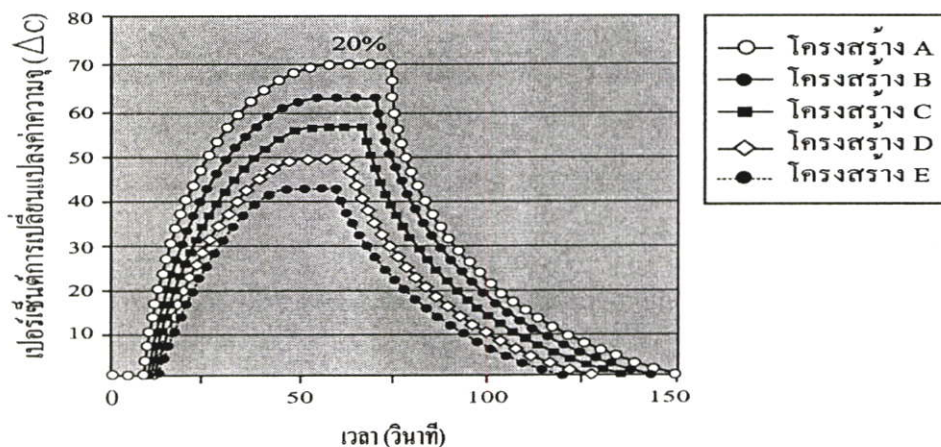
รูปที่ 4.30 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 0.1% ของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



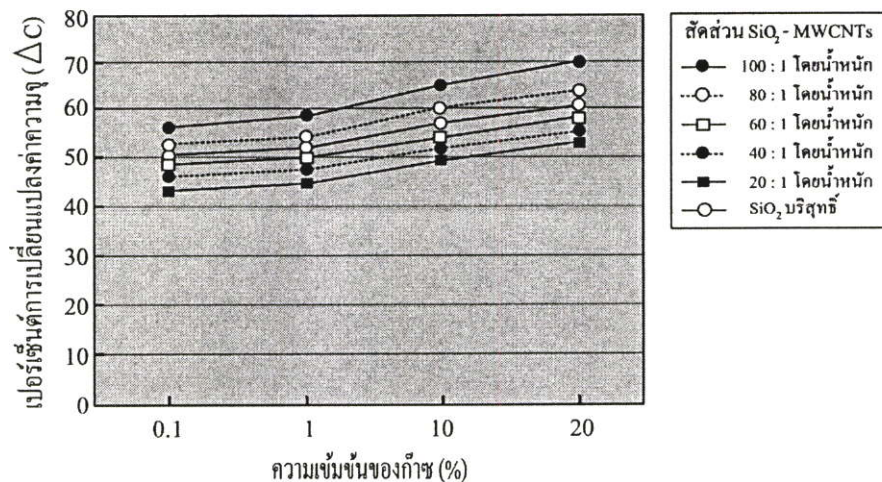
รูปที่ 4.31 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 1% ของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



รูปที่ 4.32 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 10% ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



รูปที่ 4.33 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 20% ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น อุณหภูมิขณะทำการวัด 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก โครงสร้าง A, B, C, D และ E



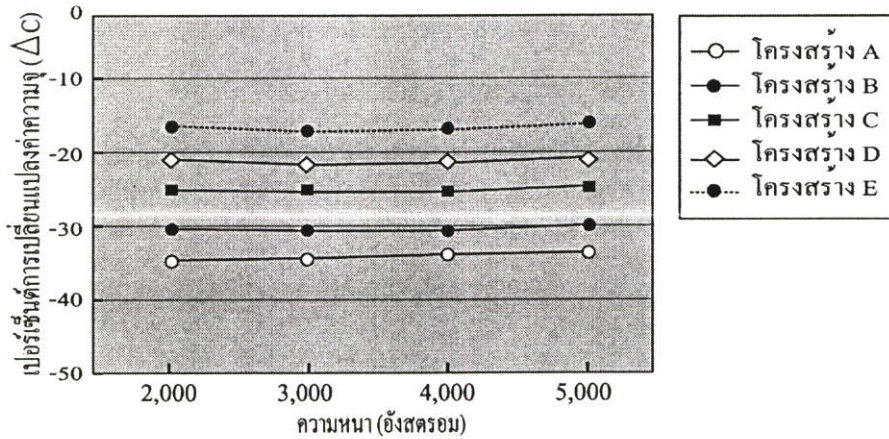
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของแอมโมเนีย (NH_3) ของชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs และ SiO_2 บริสุทธิ์ โครงสร้าง A

จากกราฟรูปที่ 4.34 จะเห็นว่าชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs และ SiO_2 บริสุทธิ์ ตอบรับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่ใช้ทำการทดสอบ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของก๊าซ โดยที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% ชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs สัดส่วน 100:1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากกว่าชั้นฟิล์ม SiO_2 บริสุทธิ์ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการทดสอบกับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ทำให้ชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs มีค่า Dielectric constant เพิ่มขึ้น เนื่องจากก๊าซแอมโมเนียเป็น Reducing agent กักการดูดซับ (adsorption) โมเลกุลของก๊าซแอมโมเนียที่ MWCNTs ทำให้เกิดการฉีดพาหะอิเล็กตรอนเข้าไปใน MWCNTs ทำให้จำนวนพาหะโฮลใน MWCNTs ชนิดพี (p-type) ลดลง [3] ค่าความนำของท่อนาโนคาร์บอนลดลง และทำให้ชั้นฟิล์ม SiO_2 -MWCNTs มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการดูดซับจำนวนโมเลกุลของก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้น

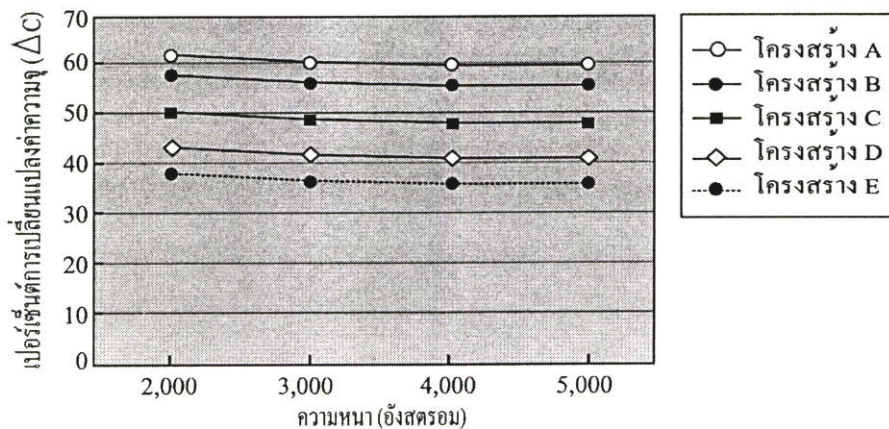
4.9 การศึกษาความหนาของชั้นฟิล์ม SiO₂-MWCNTs ต่อการตอบรับก๊าซ

ความหนาของชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซมีผลต่อการตอบรับก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ โดยที่หัวตรวจวัดก๊าซ มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาลดลง อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อความหนา แสดงในรูปที่ 4.35, 4.36 และ 4.37



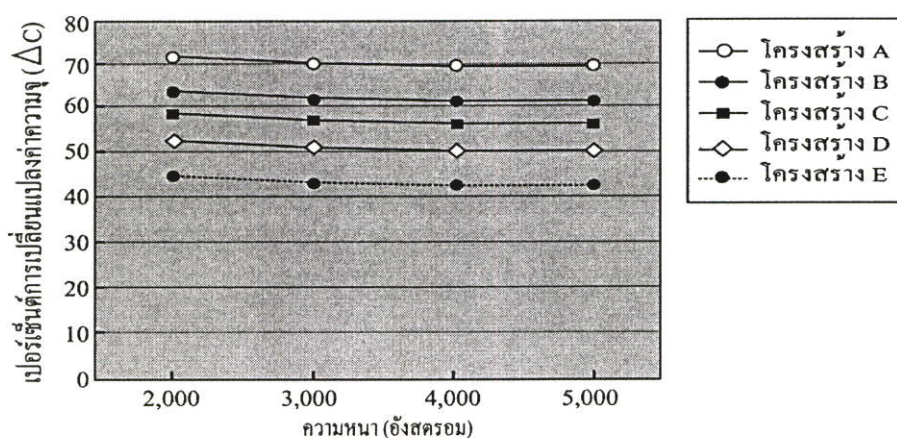
รูปที่ 4.35 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O₂) ความเข้มข้น 10,000 ppm ที่ความหนาต่างๆ

ผลจากการเพิ่มความหนาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O₂) ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 10,000 ppm พบว่าหัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซมากที่สุด โดยที่ความหนา 3000 อังสตรอม หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและลดลงตามลักษณะ โครงสร้างแต่ละแบบ จากการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มในช่วง 2000 อังสตรอม ถึง 5000 อังสตรอม หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 2000 อังสตรอม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าความหนาของชั้นฟิล์ม 5000 อังสตรอม ประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.36 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลแอลกอฮอล์ (C₂H₅OH) ความเข้มข้น 20% ที่ความหนาต่างๆ

ผลจากการเพิ่มความหนาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซ เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% พบว่าเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงลดลง โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะ โครงสร้างของหัวตรวจวัดก๊าซแต่ละแบบ โดยที่หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด จากการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มในช่วง 2000 อังสตรอม ถึง 5000 อังสตรอม หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 2000 อังสตรอม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าความหนาของชั้นฟิล์ม 5000 อังสตรอม ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์



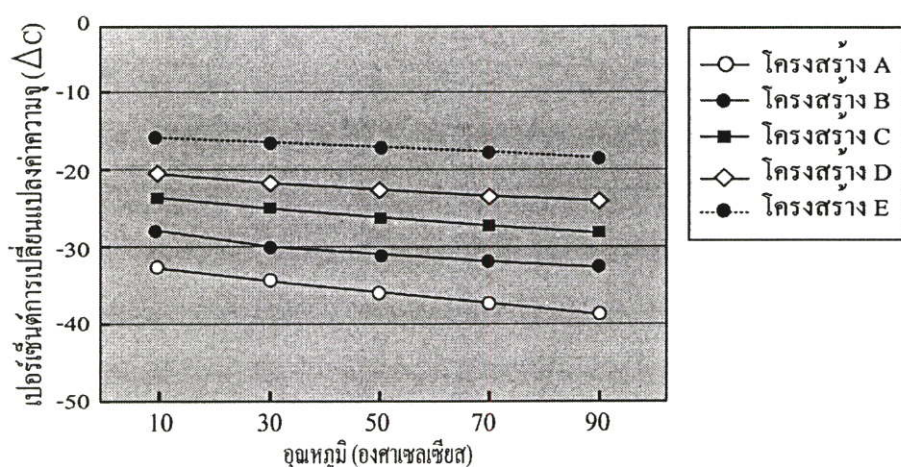
รูปที่ 4.37 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 20% ที่ความหนาต่างๆ

ผลจากการเพิ่มความหนาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% พบว่าหัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซมากที่สุด โดยที่ความหนา 2000 อังสตรอม หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและลดลงตามลักษณะ โครงสร้างแต่ละแบบ จากการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มในช่วง 2000 อังสตรอม ถึง 5000 อังสตรอม หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม 2000 อังสตรอม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าความหนาของชั้นฟิล์ม 5000 อังสตรอม ประมาณ 3.5 เปอร์เซ็นต์

ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน จาก 2000 อังสตรอมขึ้นเป็น 3000, 4000, 5000 และ 6000 อังสตรอม หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และ แอมโมเนีย แตกต่างกัน โดยหัวตรวจวัดก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียดีที่สุด

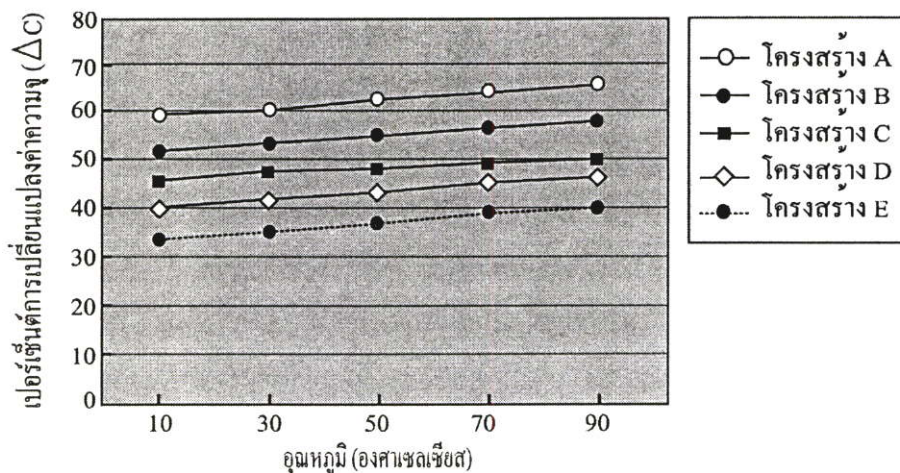
4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซ

อุณหภูมิมีผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ โดยหัวตรวจวัดก๊าซมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองต่อก๊าซ แสดงในรูปที่ 4.38, 4.39 และ 4.40



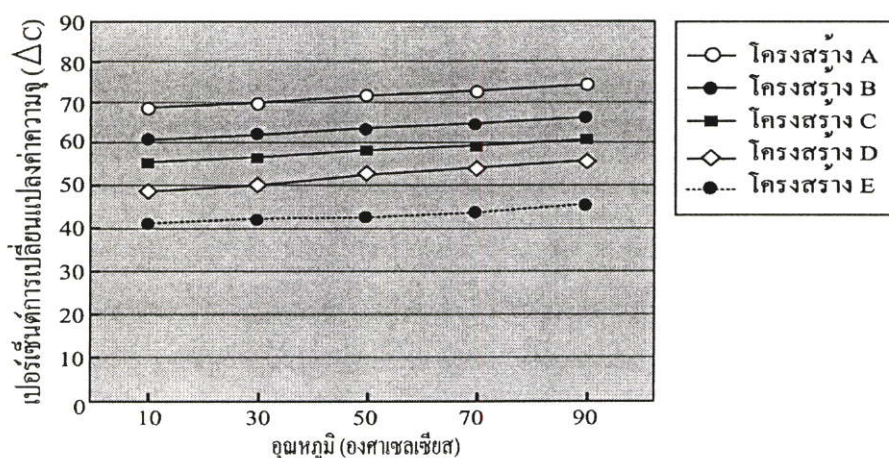
รูปที่ 4.38 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O_2) ความเข้มข้น 10,000 ppm ที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O_2) ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 10,000 ppm พบว่าหัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด โดยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลักษณะ โครงสร้างแต่ละแบบ จากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มใน 10-90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.39 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซเอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% พบว่าเมื่ออุณหภูมิชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะโครงสร้างของหัวตรวจวัดก๊าซแต่ละแบบ โดยที่หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์ม ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะ โครงสร้าง A ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.40 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของก๊าซ 20% พบว่าหัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซมากที่สุด โดยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A, B, C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลักษณะโครงสร้างแต่ละแบบ จากการเพิ่มอุณหภูมิของชั้นฟิล์มใน 10-90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ประมาณ 7.5 เปอร์เซ็นต์

ผลของการเพิ่มอุณหภูมิให้กับชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส ในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน, เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย พบว่าหัวตรวจวัดก๊าซตามลักษณะโครงสร้าง A ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยที่สุด มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการตรวจจับก๊าซมากที่สุดและตรวจจับก๊าซแอมโมเนียได้ดีที่สุด

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาวิจัยการศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น โดยซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เตรียมได้จากสารละลายโซลเจล ซิลิคอนไดออกไซด์ สร้างชั้นฟิล์มรับสัญญาณก๊าซโดยวิธีสปิน โคตติง และวัดผลตอบสนองที่มีต่อก๊าซออกซิเจน (O_2), เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) และแอมโมเนีย (NH_3) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ได้นำเสนอแล้วนั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

จากการศึกษาฟิล์มบางของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เตรียมจากสารละลายโซลเจลเคลือบลงบนผิวของซิลิคอนด้วยเทคนิคสปิน โคตติง พบว่าสามารถควบคุมความหนาฟิล์มโดยการเพิ่มจำนวนครั้งในการสปิน ปัญหาอย่างหนึ่งที่พบในการเตรียมฟิล์มคือการแตกของฟิล์ม ซึ่งปัญหานี้มีความสัมพันธ์กันกับความสะอาดของผิวซับสเตรท สมบัติการขยายตัวทางความร้อนของฟิล์มและซับสเตรท, ความหนืดของโซลผสม, กระบวนการให้ความร้อน และความเค้นที่ไม่สมดุลที่เกิดขึ้นระหว่างการแห้งตัว การอบแห้งควรจะทำอย่างช้าๆ หรือภายใต้จุดที่ต่ำกว่าค่าวิกฤต

จากการนำหัวตรวจวัดก๊าซมาวัดผลตอบสนองต่อก๊าซพบว่า ลักษณะความจุที่วัดได้สำหรับการตรวจวัดก๊าซแต่ละชนิดที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ 30°C หัวตรวจวัดก๊าซตอบรับการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O_2), เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) และแอมโมเนีย (NH_3) โดยมีลักษณะการตอบรับแบบผกผันสำหรับ (O_2) และ ไม่ผกผันสำหรับก๊าซ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) และ (NH_3)

ผลการทดสอบการตรวจจับก๊าซชนิดต่างๆ ของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่อัตราส่วนผสม 100:1, 80:1, 60:1, 40:1 และ 20:1 พบว่าที่อัตราส่วน SiO_2 -MWCNTs 100:1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด

ผลการทดสอบการตรวจจับก๊าซชนิดต่าง ๆ ของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นต่อโครงสร้าง A, B, C, D และ E พบว่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าน้อยลง จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากขึ้น

ผลการทดสอบการตรวจจับก๊าซชนิดต่าง ๆ ของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นต่อความหนาของชั้นฟิล์มที่ความหนา 2,000, 3,000, 4,000, 5,000 และ 6,000 อังสตรอม พบว่าที่ความหนา 2000 อังสตรอม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด

อุณหภูมิมีผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ จากการเพิ่มอุณหภูมิ ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หัวตรวจวัดก๊าซมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด

ผลการทดสอบการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O_2), เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) และแอมโมเนีย (NH_3) ของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ตามลักษณะ โครงสร้าง A, B, C, D และ E พบว่าหัวตรวจวัดก๊าซตอบรับก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ได้ดีที่สุด

วิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่ได้ทำการศึกษาและวิจัยนั้น เจื่อนใจต่างๆ เช่นระยะห่างขั้วไฟฟ้า สัดส่วนของซิลิคอนซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนและความหนาที่เหมาะสมในการสร้างชั้นฟิล์ม เป็นข้อมูลที่แสดงถึงความสามารถในการตรวจจับก๊าซ การวัดผลตอบสนองที่มีต่อก๊าซชนิดต่างๆ เป็นข้อมูลที่แสดงถึงความสามารถในการตรวจจับก๊าซเหล่านั้นได้ การพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซชนิดนี้ให้ดีขึ้นเป็นสิ่งจำเป็นต่อการนำไปประยุกต์ในงานต่างๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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] ศรีสัชชา เรืองเพชร และ สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, "การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากเทคนิคโซลเจล", การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 2548, หน้า 1141-1144
- [8] จริญญา ศรีธาราธิคุณ. "การพัฒนาทินออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มบางโดยเทคนิคโซลเจลบนฐานรองซิลิกอน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545, หน้า 24
- [9] สมพงษ์ เจริญกิจ. "การพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548, หน้า 6-7
- [10] ทวีศักดิ์ มัญญาพันธ์. "การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีซีวีดีแบบลดความร้อน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548, หน้า 2-14
- [11] ไบรอัน แนพพ์. 2542. ซิลิกอน. เล่มที่ 1. แปลโดย ตะวัน สุขน้อย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: แปลน พลันท์ดิง. หน้า 9-11

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายศรีสัชชา เรืองเพชร
วัน เดือน ปีเกิด	23 สิงหาคม 2510
ภูมิลำเนา	จังหวัดระนอง
ประวัติการศึกษา	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2543
ประวัติการทำงาน	นักวิทยาศาสตร์ 5 โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2538-ปัจจุบัน
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	ศรีสัชชา เรืองเพชร และ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล, “การศึกษา คุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากเทคนิค โซลเจล”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, 2548, หน้า 1141-1144