สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และดีบุกออกไซด์

Preparation and Characterization of Ammonia Sensors from Carbon nanotube/SnO_2

โดย

นาย ปรัชญา คำภาบุตร

นาย ปริญญา คำภาบุตร

วพ.
ว148ก
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 82959
วัน,เดือน,ปี 29 ก.ค. 2551

b 11957840
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และดีบุกออกไซด์

Preparation and Characterization of Ammonia Sensors from Carbon nanotube/SnO_2

โดย

นาย ปรัชญา คำภาบุตร

นาย ปริญญา คำภาบุตร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และดีบุกออกไซด์

ผู้จัดทำ

นาย ปรัชญา คำภาบุตร รหัส 48015214

นาย ปริญญา คำภาบุตร รหัส 48015258

.....

(ผศ.ดร. สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียจาก คาร์บอนนาโนทิวบ์และดีบุกออกไซด์

นาย ปรัชญา คำภาบุตร รหัส 48015214
นาย ปริญญา คำภาบุตร รหัส 48015258
ผศ.ดร. สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้อธิบายถึงการสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียที่อยู่บนชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ เซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ฐานรองที่เป็นอะลูมินา ชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ และส่วนของอะลูมิเนียมที่ต่อออกมาเป็นขั้วไฟฟ้า โดยชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และ ชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ถูกเคลือบโดยเทคนิคการเคลือบไอทางเคมี (Chemical Vapor Deporition : CVD)ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนโดยใช้สารละลายที่ประกอบด้วย เหล็ก ดีบุกคลอไรด์ และเอทิลแอล กอฮอล์ ส่วนขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมถูกเคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ(thermal evaporation) ผลของโครงสร้างเซ็นเซอร์ อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ ตำแหน่งการเคลือบ บนลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์แต่ละตัวนั้นจะทราบได้เมื่อมีการตรวจวัดแอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation and Characterization of Ammonia Sensors from Carbon nanotube/SnO_2

Mr. Prachya Khumpabutra ID.48015214
Mr. Parinya Khumpabutra ID.48015258
Assist. Prof. Dr. Sutichai Chaisitsak Advisor
Educational Year 2007

Abstract

This report describes the preparation and the characterization of ammonia sensors based on carbon nanotube(CNT)/SnO_2 films. The fabricated sensors consist of a alumina (Al_2O_3) substate, a CNT/ SnO_2 film and an aluminium finger electrode.CNT/ SnO_2 films were deposited by chemical vapor deporition (CVD) technique under 1 atm argon (Ar) pressure using ferrocene-SnCl2-ethanol solution. Aluminium electrodes were deposited by thermal evaporation. The effects of the sensor structure,the concentration ratio between CNT/SnO_2 and the depositing position on the characteristic of sensors when exposed to Ammonia (NH_3) will be investigated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการจัดทำปริญญานิพนธ์ “การสร้างและคุณสมบัติของเซ็นเซอร์แอมโมเนียจากคาร์บอนนาโนทิวบ์และดีบุกออกไซด์” ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้แนวทาง ข้อมูลทางด้านวิชาการและข้อคิดด้านการปฏิบัติ ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณบัววรรณ์ ไชยธงรัตน์ สำหรับคำแนะนำทางวิชาการ ตลอดจนข้อมูลและคำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆภายในห้องทดลอง

สุดท้ายนี้ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์ได้โปรดอภิบาลประทานพรให้คุณบิดามารดา และครูอาจารย์ ผู้ให้พลังทางปัญญาแห่งความคิดและรากฐานการศึกษาแก่ผู้จัดทำจงประสบแต่ความสุขและความเจริญก้าวหน้าในหน้าที่การงานและการดำเนินชีวิตตลอดไป

ปรัชญา คำภาบุตร
ปริญญา คำภาบุตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 นิยามของเซ็นเซอร์	2
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงงาน	2
1.3 วิธีการดำเนินการ	3
1.4 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจจับทางเคมี	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวป์	4
2.1 ประวัติที่มาของคาร์บอนนาโนทิวป์	4
2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์	5
2.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	6
2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว	6
2.3.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น	8
2.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	9
2.4.1 Base Growth	9
2.4.2 Tip Growth	9
2.5 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์	10
2.6 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	13
2.6.1 วิธี Arc discharge	13
2.6.2 วิธี Laser ablation	14
2.6.3 วิธี Chemical vapor deposition (CVD)	15
2.6.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition	15
2.6.3.2 วิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition	16
2.6.3.3 วิธี Vapor phase growth	17
2.6.3.4 วิธี High pressure CO disproportionate process	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition 19

2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 20

2.7.1 หลักการทำงานทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 20

2.7.2. ประเภทและการนำไปใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 20

2.7.3 TEMs 20

2.7.4 SEMs 21

2.8 ระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 22

2.8.1 ระบบการทำงานของ TEMs 22

2.8.2 ระบบการทำงานของ SEMs 24

2.9 วิธีการการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพ 25

2.10 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน 25

2.10.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ 26

2.10.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน 26

2.10.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 27

2.10.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) เซนเซอร์ 28

2.10.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน 30

2.11 เซนเซอร์ก๊าซ 30

2.11.1 ส่วนประกอบของ เซนเซอร์ก๊าซ 30

2.11.2 คุณสมบัติของเซนเซอร์ก๊าซ 31

2.11.3 ชนิดหลัก ๆ ของเซนเซอร์ก๊าซ 32

2.12 การตรวจวัดปริมาณสาร 33

2.13 ความเป็นมาของการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ 33

2.14 นิยามของก๊าซเซ็นเซอร์ 34

2.15 ทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ 36

2.16 ปฏิกิริยาของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ 37

2.16.1 สถานะพื้นผิว (Surface state) ในการตรวจจับทางเคมี 37

2.17 กลไกในการตรวจจับก๊าซของทินออกไซด์ 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.17.1 ผลในเนื้อสาร 42

2.17.2 ผลจากผิวของสารกึ่งตัวนำ 43

2.17.3 ผลจากขอบเกรน 45

2.18 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างทินออกไซด์กับก๊าซต่างๆ 48

2.18.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน 48

2.18.2 ปฏิกิริยารีดักชัน 48

2.19 การปรับปรุงความไวในการตอบสนองโดยการเติมตัวแคทตะลิสท์ 49

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างเซ็นเซอร์ **50**

3.1 การเตรียมแผ่นฐานรองอะลูมินา 50

3.2 การสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ บนฐานรองอะลูมินา 51

3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมี 51

3.2.2 ขั้นตอนและวิธีทำการสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ 52

3.3 ขั้นตอนการสร้างลวดลายตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย 55

3.4 ขั้นตอนการสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย 57

4.1 บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง **58**

4.1 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์- ดีบุกออกไซด์ 58

4.2 ผลการทดลอง 58

4.3 การทดสอบก๊าซแอมโมเนีย 60

4.4 ผลการทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง 61

4.5 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่างๆ 64

4.6 การทดสอบน้ำ (H_2O) 65

4.7 การทดสอบก๊าซแอลพีจี 66

4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 66

4.8 ผลการทดสอบก๊าซแอลพีจี 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	**69**
5.1 สรุปผลการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์บนฐานรองอะลูมินา	69
5.2 สรุปผลจากการทดสอบแอมโมเนีย	69
5.3 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่างๆ	69
5.4 การทดสอบน้ำ (H_2O)	70
5.5 การทดสอบก๊าซแอลพีจี	70
เอกสารอ้างอิง	**71**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การจัดกลุ่มอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์	2
2.1 วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน	5
2.2 การม้วนของแผ่นกราเฟน	6
2.3 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)	7
2.4 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราไฟท์เป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์	7
2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการม้วนแต่ละแบบ (Armchair, Zigzag, Chiral)	8
2.6 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs)	8
2.7 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) เกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Base Growth (ข) เกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Tip Growth	10
2.8 ภาพการทดสอบความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) AFM microscope ของ MWNT วางผ่านรูเพื่อวัดค่า Young's modulus (ข) และ (ค) SEM ของ MWNT ที่อยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่า tensile strength	11
2.9 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์	11
2.10 วิธี Arc discharge	13
2.11 วิธี Laser ablation	14
2.12 ระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition	16
2.13 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD	16
2.14 ระบบของวิธี Vapor phase growth	17
2.15 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process	18
2.16 แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition	19
2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs	21
2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEMs	22
2.19 แผนภาพการทำงานของ TEMs	22
2.20 แผนภาพการทำงานของ SEMs	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 ลักษณะ Single-molecule Transistor	27
2.22 เซมิคัลเซนเซอร์ที่ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซ หรือสารโมเลกุลอื่น	28
2.23 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	29
2.24 ภาพจาก AFM ของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs	30
2.25 ส่วนประกอบของเซนเซอร์ก๊าซ	30
2.26 การจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers)	35
2.27 โครงสร้างของก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ	37
2.28 แบบจำลองการเกิดประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ อะตอมผู้ให้ (D) และ อะตอมผู้รับ (A) สถานะผิวจะแสดงที่ความหนาแน่นของระดับพลังงาน N(E)	39
2.29 Surface double layers แบบต่างๆ	42
2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 800 ถึง 200 องศาเซลเซียสกับปริมาณ O_2 ที่ถูกดูดกลืน	43
2.31 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของทินออกไซด์ต่ออุณหภูมิที่บรรยากาศของก๊าซต่างๆ	44
2.32 โครงสร้างแถบพลังงานของทินออกไซด์	45
2.33 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ (กำแพงศักย์ที่เกิดจากการดูดกลืนออกซิเจน)	46
2.34 แบบจำลองกำแพงศักย์ที่ขอบเกรน	47
2.35 กำแพงศักย์ตามทางเดินกระแสในทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์ (ผลึกมีขนาดน้อยกว่า สองเท่าของ Debye length)	47
2.36 การตรวจจับ C_2H_5OH ของทินออกไซด์ จะได้ CH_3COOH และ H_2O	48
2.37 การตรวจจับ O_3 ของทินออกไซด์ จะได้ O_2	49
2.38 การตรวจจับ NO_2 ของทินออกไซด์ จะได้ NO	49
3.1 แผ่นอะลูมินาที่จะนำมาตัด	50
3.2 แผ่นอะลูมินาที่ตัดแล้วขนาด 1.5 ซม. x 0.7 ซม.	50
3.3 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอุลตร้าโซนิค	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา	52
3.5 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์	53
3.6 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ	54
3.7 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์	55
3.8 แบบจำลองกระบวนการ Evaporation	56
3.9 เครื่อง Evaporator	56
3.10 การวางชิ้นงานภายในโถแก้ว	56
3.11 หัวตรวจวัดที่พร้อมทดสอบ	57
4.1 ภาพถ่าย SEM ของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมของ Ferrocene 1% $SnCl_2$ 0%	58
4.2 ภาพถ่าย SEM ของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมของ Ferrocene 0.25% $SnCl_2$ 0.75%	59
4.3 ภาพถ่าย SEM ของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมของ Ferrocene 0.5% $SnCl_2$ 0.5%	60
4.4 การทดสอบแอมโมเนียทดสอบโดยใช้ขวดทดลองขนาด 280 ซีซี และใช้แอมโมเนียปริมาณ 10 ซีซี	60
4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน Ferrocene 1 % $SnCl_2$ 0 % ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณภูมิห้อง (28° C)	61
4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน Ferrocene 0.5 % $SnCl_2$ 0.5 % ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณภูมิห้อง (28° C)	61
4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน Ferrocene 0.25 % $SnCl_2$ 0.75 % ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณภูมิห้อง (28° C)	62
4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน Ferrocene 0 % $SnCl_2$ 1 % ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณภูมิห้อง (28° C)	62
4.9 แผนภูมิแสดงค่า Response ของเซ็นเซอร์แต่ละตัวในรูปที่ 4.5-4.8	63
4.10 แผนภูมิแสดงค่า t_{on} และ t_{off} ของเซ็นเซอร์ในรูปที่ 4.5-4.8	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อ ไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 50° C	64
4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 100° C	64
4.13 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 0° C	65
4.14 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อไอน้ำที่อุณหภูมิห้อง (28° C)	65
4.15 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	66
4.16 ภาพถ่ายเครื่องวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้า	66
4.17 ภาพถ่ายปั๊มดูดก๊าซและเครื่องแปลงไฟฟ้า	67
4.18 ภาพโปรแกรม Lab View	67
4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อก๊าซ LPG 6.42% ที่อุณหภูมิห้อง (28° C)	68
4.20 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อก๊าซ LPG 6.42% ที่อุณหภูมิ 300° C	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันมีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรับรู้แทนประสาทสัมผัสต่างๆของมนุษย์ เพื่อใช้อำนวยความสะดวกและใช้ป้องกันอันตรายต่างๆที่อาจเกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สิน เช่น ก๊าซพิษและสารเคมีต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการวิจัย และตามบ้านเรือน ความสามารถในการตรวจวัดปริมาณสารและความแม่นยำต่อการตรวจวัดชนิดของสาร เป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากต่อการผลิตและความปลอดภัยในการทำงาน ส่วนในด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมใช้เพื่อตรวจวัดปริมาณก๊าซพิษและสารเคมีต่างๆที่เป็นอันตราย ในบริเวณแหล่งชุมชนและที่อยู่อาศัย ซึ่งเราสามารถจำแนกความสามารถในการวัดได้เป็นการวัดทางด้านกายภาพ และการวัดทางด้านเคมี

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

หลังจากที่มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ carbon nanotubes : CNTs เมื่อปี ค.ศ.1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อีจิมะ (Sumio Iijima) งานวิจัยด้านนี้ก็ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากคุณสมบัติที่เด่นในหลายทาง กล่าวคือ คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีค่าความความแข็งแรง และความยืดหยุ่นมากกว่าวัสดุใดๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีความสามารถในการนำกระแสได้ดี และเป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การม้วนตัว หรือที่เรียกว่า “Chirality” หลังจากการค้นพบ นักวิยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่างทำการศึกษาวิธีการผลิต คุณสมบัติ ตลอดจนวิธีการประยุกต์ใช้ อย่างมากมาย คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน ของนาโนเทคโนโลยี การประยุกต์ใช้งานนั้น จะเน้นไปทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือกำเนิดอิเล็กตรอน การกักเก็บพลังงาน ใช้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเซ็นเซอร์และโพรบ ซึ่งก็นับว่าเป็นความหวังของการพัฒนาอุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมี รวมทั้งการแพทย์ในอนาคตอีกด้วย

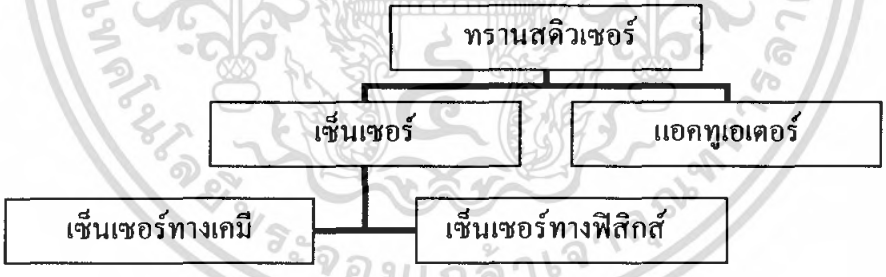
1.1 นิยามของเซ็นเซอร์

เราสามารถจำแนกชนิดของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ตรวจวัดได้ออกเป็น อุปกรณ์ ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) แอคทูเอเตอร์ (Actuators) และเซ็นเซอร์ (Sensors)

ทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกร์ที่ทำหน้าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง รูปแบบพลังงาน เช่น พลังงานทางกลศาสตร์, ทางความร้อน, ทางแสงและทางไฟฟ้า

แอคทูเอเตอร์ คือ อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณหรือพลังงานในรูปแบบอื่นๆ เช่น เปียโซอิเล็กตริก

เซ็นเซอร์ คือ อุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพลังงานในรูปแบบต่างๆเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์หัวตรวจวัดความดัน, โฟโต้ทรานซิสเตอร์ และอุปกรณ์หัวตรวจวัดก๊าซ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การจัดกลุ่มอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาการเตรียมชั้นฟิล์ม ดีบุกออกไซด์-คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SnO_2 –CNTs films)
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนของสารละลายที่เหมาะสมในการปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ เพื่อนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์ ของสาร 3 ชนิดคือ Ferrocene : SnO_2 : Ethanol
3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติการตรวจวัดแอมโมเนียของเซ็นเซอร์ที่ใช้อะลูมินาเป็นฐานรอง (substate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เพื่อศึกษาการตอบสนองของหัวตรวจวัดที่มีต่อแอมโมเนีย
5. เพื่อพัฒนาหัวตรวจวัดให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.3 วิธีการดำเนินการ

1. การเตรียมสารละลาย ของสาร 3 ชนิดคือ Ferrocene : SnO_2 : Ethanol
2. การเตรียมชั้นฟิล์ม ดีบุกออกไซด์-คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SnO_2 – CNTs films) โดยวิธีซีวีดี บนฐานรองอะลูมินา
3. วัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของฟิล์ม
4. กระบวนสร้างหัวตรวจวัด
5. ผลตอบสนองต่อแอมโมเนีย
6. สรุปผลการทดลอง

1.4 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจจับทางเคมี

รายงานฉบับนี้ได้อธิบายการสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนียชนิด Chemo - resistor ที่มีโครงสร้างอย่างง่ายซึ่งประกอบด้วยชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์-คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SnO_2 –CNTs films) ที่สังเคราห์ด้วยวิธีการซีวีดี (Chemical vapor deposition : CVD) โดยใช้เฟอโรเซน (Ferrocence) เป็นโลหะเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Particles) และคู่ขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ซึ่งการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์-คาร์บอนนาโนทิวบ์ทำได้ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ในเชิงพาณิชย์แล้วหัวตรวจจับก๊าซต้องมีราคาไม่แพงและสามารถหาซื้อได้ทั่วไป เพื่อใช้ในการตรวจจับก๊าซ

หัวตรวจจับก๊าซที่มีความแม่นยำและราคาถูก ได้มีการนำมาใช้งานตามสถานที่ต่างๆ เช่นในโรงงานอุตสาหกรรม, ทางการแพทย์, ในห้องปฏิบัติการ และบ้านเรือนที่อยู่อาศัย เป็นต้น สถานที่เหล่านี้จำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับสารเคมี ในการตรวจสอบและทำการวัดค่าระดับที่อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อป้องกันการรั่วไหลของปริมาณสารพิษ ใช้ตรวจวัดปริมาณก๊าซเพื่อนำไปใช้งานในปริมาณที่เหมาะสม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ประวัติที่มาของคาร์บอนนาโนทิวป์

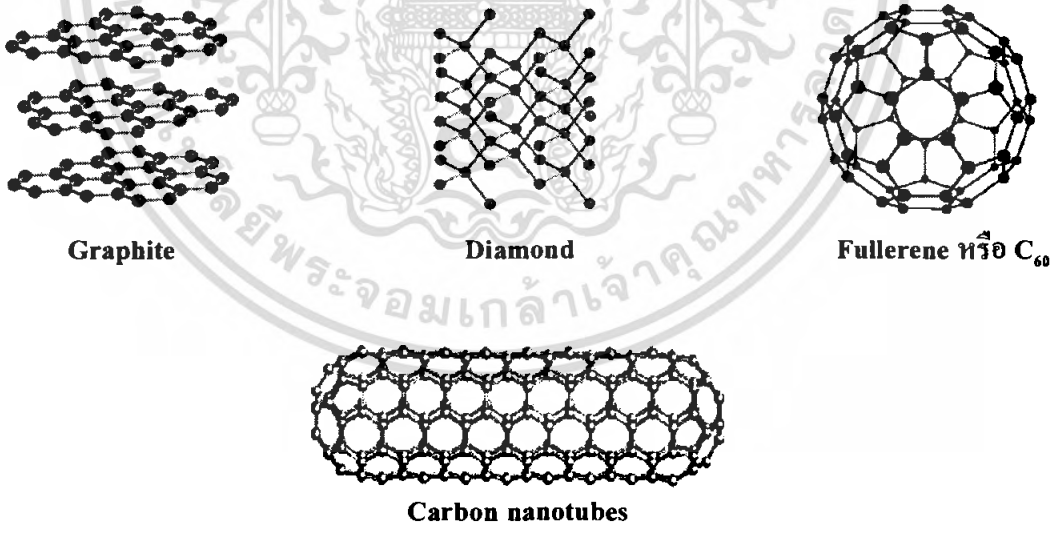
เมื่อกลางปี ค.ศ. 1985 ทีมวิจัยนำโดย Prof. Smalley ที่ Rice University ได้สังเคราะห์ Fullerene ที่มีโครงสร้างคล้ายกรงของอะตอมคาร์บอนที่ประกอบกันด้วยผิวหน้าหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม โมเลกุลของ Fullerene มีคาร์บอน 60 อะตอม ซึ่งหลังจากนั้นมีการตั้งชื่อเป็น Buckminsterfullerene ตามชื่อของสถาปนิกที่ออกแบบโดมลักษณะคล้าย C_{60} ซึ่งมีหน้าห้าเหลี่ยมชิดกับหกเหลี่ยมคล้ายกับลูกฟุตบอล สองถึงหกปีต่อมาการค้นพบนี้ ได้นำไปสู่การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งเป็นท่อ Fullerene ที่ยาวได้สัดส่วน มีผนังของท่อคาร์บอนหกเหลี่ยมซึ่งมีโครงสร้างแบบกราไฟท์และมักมีปลายปิด ผู้ที่ค้นพบคนแรกคือ นาย สุมิโอะ อีจิมะ (Sumio Iijima) นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น เป็นนักอิเล็กตรอนไมโครสโคปี ของบริษัท NEC ค้นพบเมื่อปี ค.ศ1991 ในห้องทดลองที่เมืองสึคุบา (Tsukuba) [1] โดยการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ของเขานั้น เป็นความบังเอิญที่เขาทำการสังเคราะห์ Fullerene โดยวิธีArc-evaporation แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบกราไฟท์ ที่เป็นอนุภาคขนาดนาโน และท่อในลักษณะนี้ ไม่มีผู้ใดเคยสังเกตเห็นมาก่อน ต่อมาทีมงานของ สุมิโอะ อีจิมะ สามารถที่จะสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวได้ในปริมาณที่มาก โดยปรับสภาวะของการทำ Arc-evaporation ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือท่อชนิดผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 หรือในสองปีถัดมา นาย สุมิโอะ อีจิมะ และนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ชื่อ ดอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสร้างท่อนาโนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อย ในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นกราไฟท์ และป้องกันการเกิดเป็นFullerene ขนาดเล็ก

หลังจากที่ได้มีการค้นพบ คาร์บอนนาโนทิวป์ก็กลายเป็นที่กล่าวถึงกันมากในปัจจุบันทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเหตุผลของการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆได้อย่างมากมาย นับตั้งแต่การนำมาเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแกร่ง ชิ้นงานด้านอิเล็กทรอนิกส์และแสง คะตะลิสต์แบตเตอรี่ กักเก็บพลังงานและเซนเซอร์ เพราะคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมีเอกลักษณ์ที่เด่นในทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถนำความร้อนได้สูง นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีค่าความเหนียวความแข็งแรงและความยืดหยุ่นกว่าวัสดุใดๆ ในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์

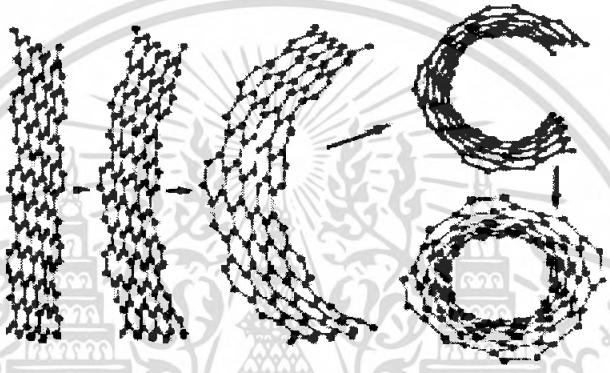
คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร (Diamond) กราไฟท์ (Graphite) เถ้าถ่าน และFullerene หรือ C_{60} (รูปที่ 2.1) แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนซ์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแกร่งและคงทนมาก ขณะที่กราไฟท์มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนซ์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกัน เรียกว่า แผ่นกราเฟนและมีพันธะเชื่อมต่อระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นกราไฟท์นั้นแข็งแกร่งมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนเถ้าถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายกราไฟท์ แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า "คาร์บอนอสัณฐาน หรือ Amorphous carbon" และ Fullerene หรือ C_{60} ซึ่งมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล ซึ่งต่างจากคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวงที่เกิดจากการม้วนของแผ่นกราเฟน



รูปที่ 2.1 วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ กล่าวอย่างง่ายๆคือ แผ่นกราเฟนม้วนปิดเป็นท่อทรงกระบอก (รูปที่ 2.2) ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์ นั้นเป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากคาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความตั้งแต่ระดับนาโนเมตร จนถึงระดับเซนติเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายล้านเท่า



รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่นกราเฟน

2.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

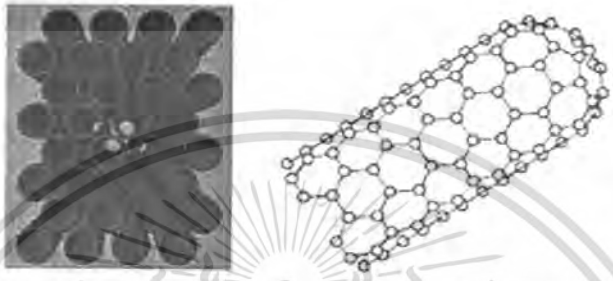
ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตาม จำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่า ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes : SWNTs) ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Nanotubes : MWNTs) ส่วนใหญ่ขนาดของ ท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 0.4 นาโนเมตรไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาว ไปจนถึงหลายเซนติเมตร และเป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณี ท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของกราไฟท์

2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว หรือ (Single-walled nanotubes: SWNTs)

จะมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราไฟท์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์จึงมีผนังของอะตอมคาร์บอน ที่จัดเรียงพันธะโควาเลนซ์ระหว่างอะตอมเป็นวง

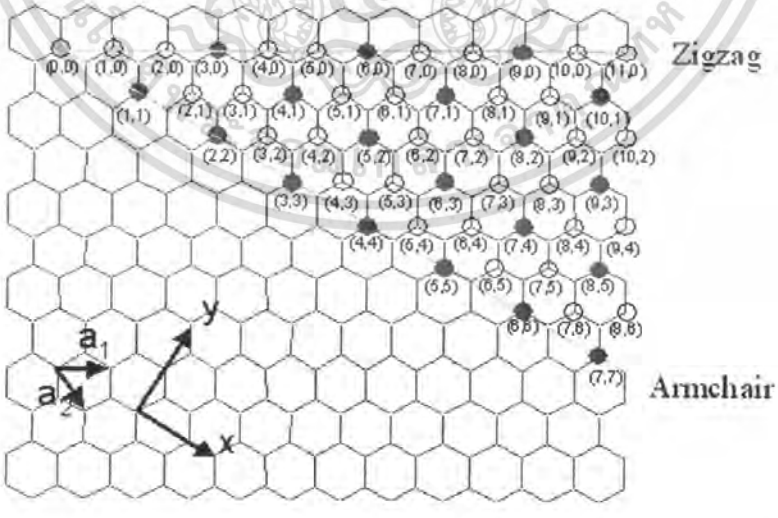
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหวนหกเหลี่ยม และอาจมีบริเวณที่ปลายของท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของ Fullerene ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)

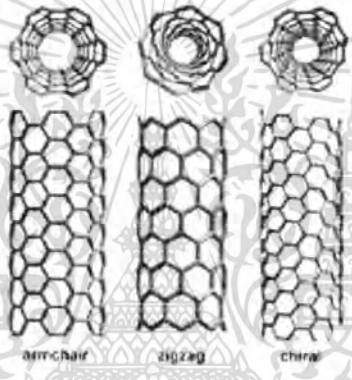
ลวดลายตามผนังของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวนั้น อาจมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันอาจแบ่งออกได้ 3 แบบ ตามการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน คือ โครงสร้างท่อแบบ Armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราไฟร์ตามแนวสมมาตรแกนตั้ง โครงสร้างท่อแบบ Zigzag ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราไฟท์ตามแนวสมมาตรแกนนอน และโครงสร้างท่อแบบ Chiral ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราไฟท์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราไฟท์เป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

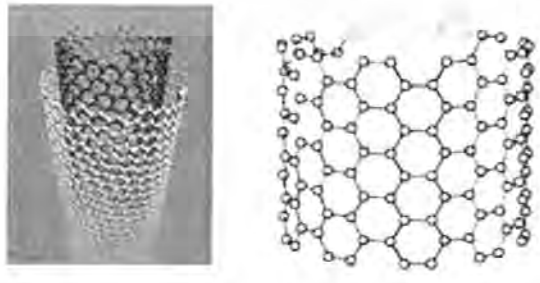
จากรูปที่ 2.4 ลักษณะของการม้วนของคาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ Zigzag แบบ Armchair และแบบ Chiral สามารถอธิบายได้คือ การม้วนแบบ Zigzag นั้นจากรูปจะพิจารณาเส้นที่ลากจากจุด (0,0) ไปยังจุด (0,10) เป็นแกนและทำการม้วนตามแนวแกน ซึ่งมุมในการม้วนก็คือ 0° ก็จะได้เป็น Zigzag nanotubes และเส้นที่ลากจากจุด (0,0) ไปยังจุด (7,7) ซึ่งเป็นมุม 30° และม้วนตามมุมดังกล่าว ก็จะได้ Armchair nanotubes แต่ถ้าทำการม้วนตามมุมอื่นๆ ที่ไม่ใช่มุม 0° และมุม 30° คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะเรียกว่า Chiral nanotubes [3] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการม้วนแต่ละแบบ (Armchair, Zigzag, Chiral)

2.2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น หรือ (Multi-walled nanotubes : MWNTs)

ผนังของท่อมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัด และยังคงเป็นหัวข้อให้ถกเถียงกันในปัจจุบัน ซึ่งกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจจะถูกเปิดเผยขึ้นในระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดอาจแบ่งได้ 2 ลักษณะตามลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์คือ กลไกการเกิดแบบ Base Growth และกลไกการเกิดแบบ Tip Growth ซึ่งจะมีความแตกต่างกันโดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

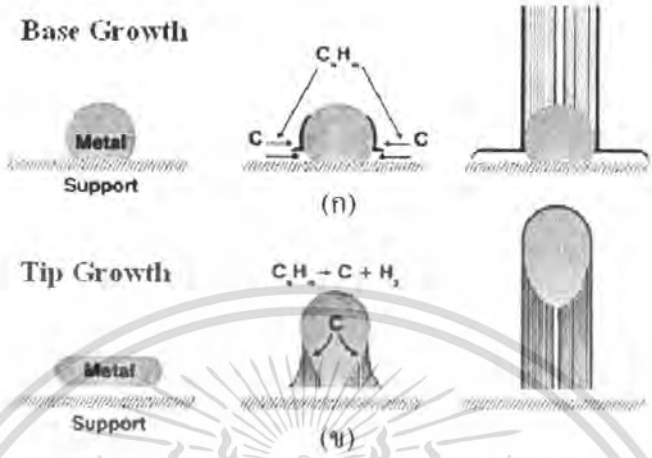
2.4.1 Base Growth

จะเป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ คือในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านบน ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบน ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.7 (ก)

2.4.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ปลายท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ คือที่อุณหภูมิสูงพอเหมาะที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.7 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) เกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Base Growth (ข) เกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Tip Growth

2.5 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

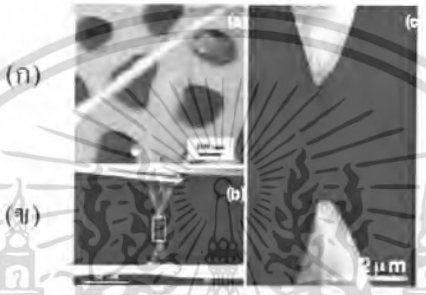
คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีคุณสมบัติหลายประการด้วยกันโดยสามารถยกตัวอย่างคุณสมบัติที่เด่นๆได้ดังต่อไปนี้ เช่น

- ความแข็งแกร่ง ซึ่งก็เป็นที่รู้กันดีว่าโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์แข็งแรงมาก มากกว่าเพชรและกราไฟท์ เพชรนั้นมีความแข็งแกร่งมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างสงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราไฟท์นั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกัน และอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราไฟท์ (กราเฟน) มีความแข็งแกร่งมาก(มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ แข็งแรงกว่าเพชรและกราไฟท์

- ความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ค่าความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าสูงถึง 1 เทราปาสคาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (Gpa) วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal Vibration หรือใช้ Scanning Force Microscopy ไปงอคาร์บอนนาโนทิวป์โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้า และมีการใช้ Atomic Force Microscopy (AFM) เพื่องอตรงกลางแท่งนาโนที่วางอยู่บน Nanopores เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่น ได้มีการ

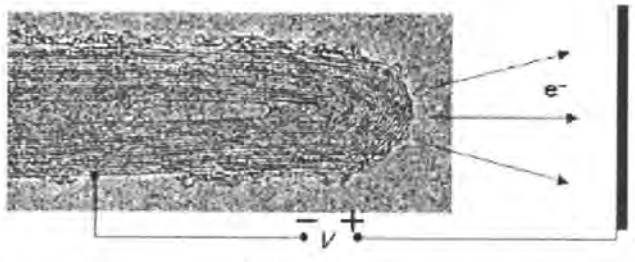
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ AFM จับคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) (รูปที่ 2.8) ความแข็งแรง ของคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าอยู่ระหว่าง 11 ถึง 63 Gpa ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2 Gpa นอกจากนี้ SWNTs สามารถยืดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.8 ภาพการทดสอบความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) AFM microscope ของ MWNT วางผ่านรูเพื่อวัดค่า Young's modulus (ข) และ (ค) SEM ของ MWNT ที่อยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่า tensile strength

- ความสามารถด้านการนำไฟฟ้า คาร์บอนนาโนทิวป์มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง หนึ่งมัดของคาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^{7} A/cm^{2} ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^{6} A/cm^{2} สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของคาร์บอนนาโนทิวป์ คือ สามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์ในสภาวะสุญญากาศได้ (รูปที่ 2.9) เมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์วางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ต่ำกว่า เช่นจะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว Molybdenum



รูปที่ 2.9 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความสามารถในการนำความร้อน ค่าการนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นสูงถึง 2000 W/m. K โดยมีบางรายงานกล่าวว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/m. K เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 3320 W/m. K นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 °C ภายใต้สุญญากาศ และ 750 °C ในสภาวะอากาศปกติ

นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการด้วยกันนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น เช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของทิวป์ เส้นผ่าศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของทิวป์ โดยคุณสมบัติทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างของคาร์บอนนาโนทิวป์

ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 ~ 2 nm
พื้นที่พื้นผิว	1,500 m^2/g
ความหนาแน่น	1.33 – 1.40 cm^3
กำลังต้านทานแรงดึง	> 60 GPa (ประมาณ 50 เท่าของเหล็กแกร่ง แต่มีน้ำหนักแค่ประมาณ 1/6 เท่า
ความยืดหยุ่น	ถึงจะถูกงอ ก็สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย
การทนต่อความร้อน	ในสุญญากาศ : ~ 2,800 °C ในอากาศ : ~ 750 °C
การนำความร้อน	MWNTs: > 3,000 W/m. K SWNTs: คาดประมาณ 6,000 W/m. K (มากกว่าเพชรและกราไฟท์ 2,000 W/m. K)
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	~ 10^9 A/cm^2 (ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง)
การปลดปล่อยอิเล็กตรอน	สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่ 1 – 3 V/um
การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี	ตามปกติจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ

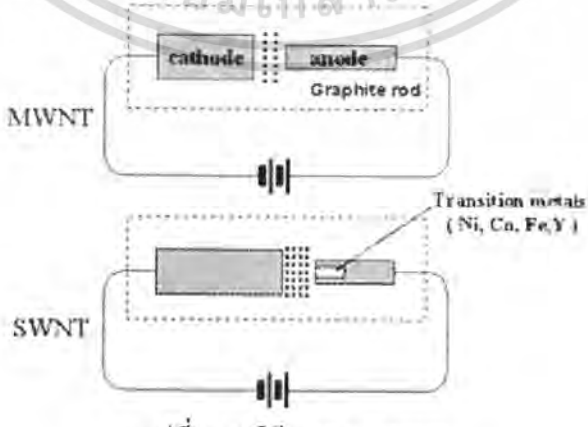
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ต้องการ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น สามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีหลักๆ คือ 1.วิธี Arc discharge 2.วิธี Laser ablation 3.วิธี Chemical vapor deposition (CVD) [2,3] แต่ละวิธีก็จะวิธีการและเทคนิค รวมถึงข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.6.1 วิธี Arc discharge

เทคนิคนี้เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้ในการสังเคราะห์ Fullerene โดยใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์ และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ที่ระหว่างขั้วคาร์บอน และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 2000 °C ถึง 3000 °C ทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน จากนั้นคาร์บอนที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ขั้วแคโทด คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้นี้ จะเป็นท่อชนิดผนังหลายชั้น MWNTs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในประมาณ 1-3 nm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกประมาณ 10 nm แต่ถ้าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-1.4 nm ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่ที่ว่าจะใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย และค่าใช้จ่ายถูก แต่อย่างไรก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก ระบบของวิธี Arc discharge สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10

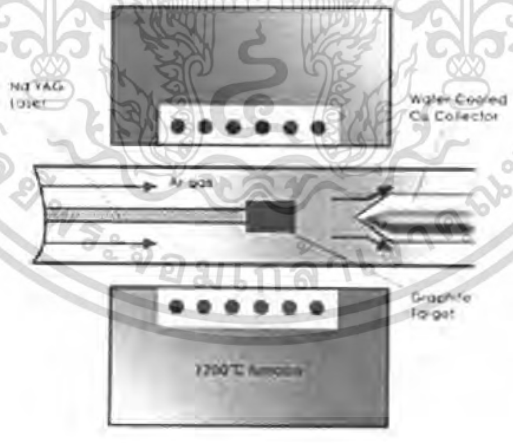


รูปที่ 2.10 วิธี Arc discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 วิธี Laser ablation

เทคนิคนี้คิดค้นขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ (Smalley)โดยใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงยิงกระทบแท่งคาร์บอนผสมโลหะในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 ถึง 1500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนและอะตอมคาร์บอนที่ร้อนขึ้น และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน (N_2)ไปกวาดเอาท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เกิดขึ้นออกจากเตาเผาแล้วนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บที่ทำมาจากทองแดงด้านนอกเตาเผา โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่องส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปที่เป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70เปอร์เซ็นต์ และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs เท่านั้น ระบบของวิธี Laser ablation สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วิธี Laser ablation

ที่กล่าวมาทั้งสองวิธี คือวิธี Laser ablation และวิธี Arc discharge นั้นเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ใช้อุณหภูมิสูง โดยใช้การยิงแผ่นแกรไฟต์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 °C เพื่อให้เกิดการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยา ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของอะตอมทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญของการสร้างพันธะของคาร์บอนจนได้เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

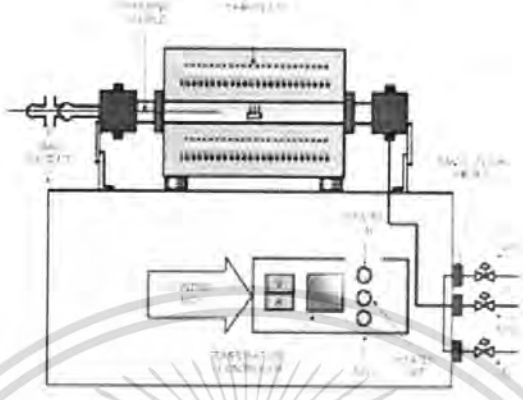
2.6.3 วิธี Chemical vapor deposition (CVD)

เทคนิคนี้จะเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี Chemical vapor deposition (CVD) นั้นยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกก๊าซและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งออกเป็น 5 วิธีใหญ่ คือ

2.6.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition

วิธีนี้จะใช้ Fe ,Ni ,Co หรือโลหะผสมทั้งสามชนิดผสมกันทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะทำการกัดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด nanometer-sized โดยใช้ NH_3 หรือ แอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 750°C - 1050°C ในการกัด และใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบปล่อยเข้ามาในระบบเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และใช้ความร้อนจากเตาความร้อนทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ถูกกัดให้มีอนุภาคขนาด nanometer-sized เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยส่วนมากจะนิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ MWNTs เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตรจะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์จะอยู่ในรูปของ SWNTs รูปที่ 2.12 แสดงระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition

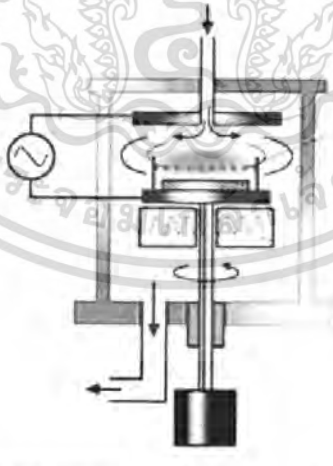
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition

2.6.3.2 วิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการกำเนิดประจุไอออนภายใน Chamber หรือเตาปฏิกิริยา โดยใช้แรงดันความถี่สูงเข้ามาทำให้ไอออนของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัวเกิดเป็นพลาสมาขึ้นและเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.13 แสดงระบบของวิธี Plasma enhanced CVD



รูปที่ 2.13 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD

จากรูปที่ 2.13 แผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทตรงกันข้ามด้านบนกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มี

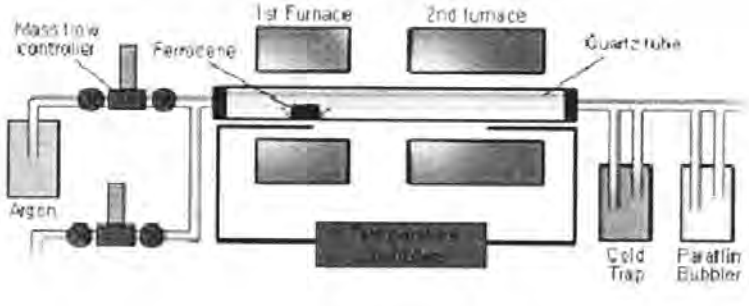
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นโลหะจำพวก Fe , Ni , Co เคลือบบนชั้นซิลิกอนหรือชั้นไดออกไซด์ หรือบนแก้วซึ่งการสร้างชั้นเคลือบสามารถทำได้ด้วยวิธี Evaporation หรือวิธี Sputtering โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถยึดติดกับฐานรองได้หนาแน่นจะมีผลต่อ ขนาดของท่อ, อัตราการเจริญเติบโต, ความหนาของผนัง, รูปร่าง และโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้ว Ni เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการปลูก MWNTs โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ที่ 15 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตของการใช้ Ni เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 50 % และสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400 °C) ก๊าซที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO เป็นต้น การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ท่อตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด MWNTs ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด SWNTs ได้ง่ายนัก (ในปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด SWNTs ได้ โดยใช้พลาสมาระบบ RF glow-discharge (13.56 MHz) โดยใช้ก๊าซผสมของ CH_4 กับ H_2) [5]

2.6.3.3 วิธี Vapor phase growth

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบนำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน Chamber โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.14 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth



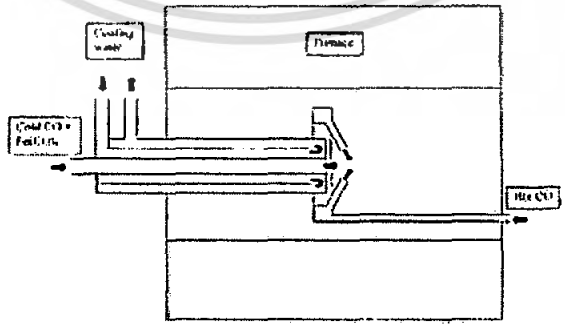
รูปที่ 2.14 ระบบของวิธี Vapor phase growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
82959

จากรูปที่ 2.14 ในระบบของวิธี Vapor phase growth จะมีเตาความร้อนอยู่ 2 เตาครอบอยู่ระหว่าง Chamber โดยเตาความร้อนที่ 1 จะทำให้ก๊าซโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นไอและก่อตัวกันขึ้นและคงสภาพไว้ เมื่อมาถึงเตาความร้อนที่ 2 อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนเนื่องจากโดนความร้อนจะแพร่และซึมทราบลงบนอนุภาคของก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะอยู่ที่ประมาณ 2-4 นาโนเมตร สำหรับ SWNTs และ 70-100 นาโนเมตร สำหรับ MWNTs การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ได้ครั้งละมากๆและมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้

2.6.3.4 วิธี High pressure CO disproportionate process

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene , $Fe(CO)_5$ ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNTs อยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 70 % แต่ยังยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ และเป็นอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซอันตราย รูปที่ 2.15 แสดงระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process

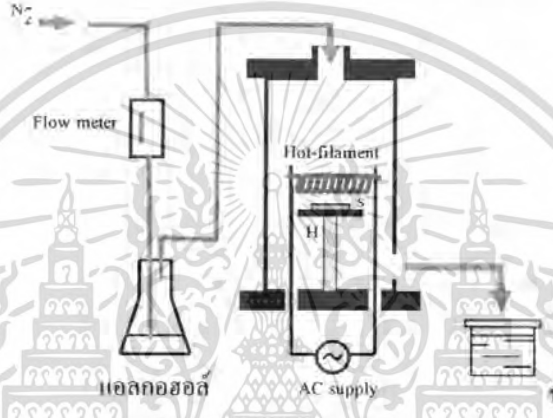


รูปที่ 2.15 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อนโดยระบบของวิธี Hot-filament enhance Chemical vapor deposition แสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

จากรูป สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้คือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน (Filament) เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดความร้อน ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะถูกปล่อยเข้ามาในระบบ เจอความร้อนของขดลวดความร้อนจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของแอลกอฮอล์ หรือ มีเทน (CH_4) เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวก เหล็ก (Fe) และ โคบอล (Co) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้นั้น จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

2.7.1 หลักการทำงานทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถให้กำลังขยาย (Magnification) และแจกแจงรายละเอียด (resolution) ได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาโดยในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงถึง 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงในการสะท้อนวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีประสิทธิภาพถึง 0.1 นาโนเมตร โดยลำแสงอิเล็กตรอนที่มีศักย์สูงจากแคโทดที่ถูกให้ความร้อนในสุญญากาศ จะถูกเร่งและผ่านออกมาตามท่อสุญญากาศไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า(electromagnetic coils) 4 ชุด โดยขดลวดแม่เหล็กชุดแรกจะทำให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของตัวอย่าง ส่วนชุดที่สองจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุที่จะรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านหรือกระจายอยู่รอบๆ ตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กชุดที่สามที่ทำหน้าที่ในการขยายภาพ โดยภาพเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนผ่านไปยังตัวอย่างและมีการโฟกัสภาพไปยังจอรับภาพ เช่น จอรับภาพเรืองแสง หรือเซนเซอร์ไวแสง และขดลวดสนามแม่เหล็กชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้ตา ซึ่งภาพที่ได้สามารถบันทึกลงบนเพลท แผ่นฟิล์ม หรือทำการแปลงสัญญาณภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะเรียกว่า Electron Micrograph (EM)

2.7.2 ประเภทและการนำไปใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopes; TEMs) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes; SEMs)

2.7.3 TEMs

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก

รูปที่ 2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs

2.7.4 SEMs

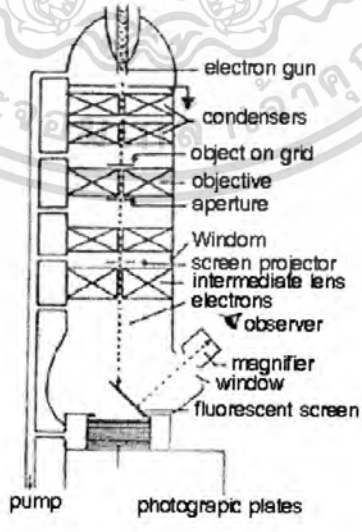
เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร กล้องจุลทรรศน์แบบนี้เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEMs

2.8 ระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.8.1 ระบบการทำงานของ TEMs



รูปที่ 2.19 แผนภาพการทำงานของ TEMs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของ TEMs จะประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 4 ระบบคือ

ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ประกอบด้วยเครื่องดูดอากาศ 2 แบบ ได้แก่ เครื่องดูดอากาศแบบ mechanical pump และเครื่องดูดอากาศที่ใช้น้ำมันแบบ diffusion pump หรืออาจเป็นแบบ ion getter pump ซึ่งจะทำงานร่วมกัน โดยเริ่มจากการทำให้ภายในคอลัมน์เป็นสุญญากาศที่มีความดันประมาณ 10-3-10-8 torr และต้องกำจัดโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ออกให้หมด เนื่องจากโมเลกุลเหล่านี้จะเกิดการดูดกลืนอิเล็กตรอนและทำให้ลำอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิง ประจุอิเล็กตรอนกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ภาพที่ได้ไม่ค่อยคมชัด นอกจากนี้ โมเลกุลของก๊าซอาจเกิดปฏิกิริยาการแผ่รังสี (ionization) ซึ่งจะทำให้ลำอิเล็กตรอนไม่คงที่หรือเคลื่อนออกไปจากทิศทางเดิม โมเลกุลของก๊าซอาจจะไปรวมตัวกับไส้หลอดที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจนเกิดการเผาไหม้และขาดในที่สุด หรืออาจไปจับกับตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างเกิดการปนเปื้อนจนไม่สามารถนำไปศึกษาหรือวิเคราะห์ต่อไปได้

ระบบแสงสว่าง (Illuminating) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ โดยปืนอิเล็กตรอนจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และคอนเดนเซอร์เลนส์จะทำหน้าที่รวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยใช้สนามแม่เหล็กเพื่อส่องไปยังตัวอย่าง ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ถ้าให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ทำให้การแจกแจงรายละเอียดดีขึ้น ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความยาวโฟกัสจึงทำได้โดยการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้านั่นเอง คอนเดนเซอร์อาจมีได้มากกว่าหนึ่งชุด เพื่อควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนมีความเข้มและขนาดเล็กลง ทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างมากขึ้น และยังเป็นการป้องกันตัวอย่างไม่ให้ถูกทำลายด้วยความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนด้วย

ระบบคอนเดนเซอร์เลนส์นี้จะมีแผ่นโมลิบดีนัมอยู่ในช่องว่างซึ่งจะมีรูกลมๆ ขนาดเล็กที่เรียกว่า Aperture เพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอนให้เป็นจุดกลมที่สมบูรณ์ รวมทั้งป้องกันการกระจายตัวของอิเล็กตรอนซึ่งจะส่งผลต่อความคมชัดของภาพ สำหรับขนาดของช่อง aperture นี้ ยิ่งมีขนาดเล็กจะยิ่งทำให้การแจกแจงรายละเอียดของภาพดีขึ้น แต่ความคมชัดจะลดลง

ระบบภาพ (Imaging system) ประกอบด้วยเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 3 ตัว คือ objective lens, intermediate lens และ projector lens เมื่อทำการฉายลำอิเล็กตรอนบนตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะผ่านตัวอย่างไปยัง objective lens ที่อยู่ใต้ช่องใส่ตัวอย่างและคอนเดนเซอร์เลนส์ objective lens จะทำหน้าที่ขยายภาพ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านไปยัง intermediate lens เพื่อทำการขยายภาพเพิ่มขึ้นอีก จากนั้นผ่านไปยัง projector lens ที่ทำหน้าที่นำภาพที่ขยายไปปรากฏบนจอซึ่งเราสามารถมองเห็นได้จากหน้าต่างสำหรับมองภาพ (viewing window)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วยชัตเตอร์และเครื่องวัดแสง โดยระบบนี้จะอยู่ใต้ Projectors lens ชัตเตอร์จะทำหน้าที่ปิดหรือเปิดให้ลำแสงอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นรับภาพเรืองแสง

2.8.2 ระบบการทำงานของ SEMs

รูปที่ 2.20 แผนภาพการทำงานของ SEMs

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) คอลัมน์ของ SEMs จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์เช่นเดียวกับ TEM ลำอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่างนั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ลำอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่นูนขึ้น นอกจากนี้ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEMs นี้อาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หรือติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บาง เป็นต้น

2.9 วิธีการการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพ

สิ่งที่แสดงให้เห็นต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของการใช้งาน การตรวจสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพและยืดอายุการใช้งานของตัวกล้อง

1. ปฏิบัติตามขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง การใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและอุปกรณ์เสริมอย่างเคร่งครัด โดยเหมาะสมกับชนิดของตัวอย่าง ข้อมูลที่ต้องการ และภาพหรือสิ่งที่จะนำไปวิเคราะห์
2. ตรวจสอบผลหรือภาพให้มีคุณภาพก่อนที่จะนำออกจากห้องปฏิบัติการ
3. ทำบันทึกตรวจสอบหน้าที่การทำงานของขั้นตอนการควบคุมคุณภาพทุกรายการ
4. ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือให้พร้อมสำหรับใช้งานอยู่เสมอ
5. มีการรายงานและปรับปรุงศักยภาพของผู้ใช้งาน
6. ทำการสอบเทียบกล้องเป็นประจำ

2.10 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน

หลังจากการค้นพบในปี ค.ศ .1991 เป็นต้นมา นักวิยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่างก็ศึกษาถึงคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ ตลอดจนถึงวิธีการผลิต วิธีการนำไปใช้และการประยุกต์อย่างมากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก คุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ มีความแข็งแกร่งสูง เบา และมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆในสาขาของนาโนเทคโนโลยี ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต เพราะด้วยคุณสมบัติที่มันมีน้ำหนักเบา ราคาถูก และมี ค่าความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังสามารถหด โค้งงอได้เหมือนสปริง เมื่อออกแรงกดแล้วคืนรูปสู่สภาพ เดิมได้ ทำให้ได้วัสดุคอมโพสิต ที่มีคุณสมบัติพิเศษคือจะแข็งแรงกว่าพวกไฟเบอร์ทั้งหลายเท่าที่เคยมีมา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาก เช่นเป็นส่วนประกอบใน รถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้ทำ เสื้อเกราะกันกระสุนเป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถเอาไปใช้ ทำเป็นหลอดทดลองขนาดนาโนเพื่อเก็บของเหลวบางอย่าง หรือทำเป็นเบ้าหล่อวัสดุเซรามิค (Nan ceramic fibers) ได้

NASA สามารถสังเคราะห์คอมโพสิตของ SWNT-polyimide ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแกร่ง การทนอุณหภูมิ และการนำไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ กล่าวอย่างง่ายคือ คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถช่วยเสริมความแข็งแกร่ง (reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ ฟิล์มบาง ไฟเบอร์ โฟม สารเคลือบ และ ผง เป็นต้น

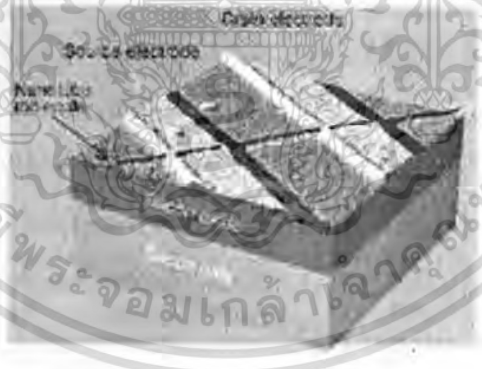
2.10.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กับความยาวน้อยมากๆ (ค่า Respect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ มีเสถียรภาพที่ดี และทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับดันไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน นักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อยาฮาชิ ไซโตะ (Yahachi Saito) สามารถประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอ คอมพิวเตอร์ โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์แทนโลหะในส่วนที่เป็น ขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอน ด้วยคุณสมบัติที่ เหนือกว่าคือมันให้ความสม่ำเสมอ ให้ปริมาณที่เพียงพอ และ มีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนั้น แล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและยังเป็นการประหยัด พลังงาน เนื่องจากมันสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง อย่างกรณีการใช้โลหะ ซึ่งตัวอย่างนี้อาจจะกำลังพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าชิ้นแรกของญี่ปุ่นที่ได้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในระดับหนึ่งไมโครเมตร ถ้าก้าวต่อไปเป็นนาโนอิเลคทรอนิคส์นั่นคือต้องลดขนาด Component ลง 10 ถึง 1000 เท่าจากเดิม ดังนั้นกระบวนทัศน์ของอิเล็กทรอนิกส์ component ขนาด นาโนทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด รีเลย์ และลอจิกเกทต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์จากเดิมระดับไมครอนที่เป็นซิลิคอนเซมิคอนดักเตอร์ ต้องหันมาใช้โครงสร้างโมเลกุลอินทรีย์ (organic molecules) หรืออนินทรีย์ (Inorganic) ในระดับนาโน มีการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นช่อง (Channel) อิเล็กตรอนผ่านระหว่างsource-drain อิเล็กโทรดสำหรับ field-effect transistor (FET) (รูปที่ 2.17) โดยสามารถควบคุมการเปิด-ปิดสวิทซ์ ด้วย voltage gate ตามปกติ แต่สิ่งที่แตกต่างจากซิลิกอน FETs ทั่วไปคือ ขนาด และการนำไฟฟ้าผ่านคาร์บอนนาโนทิวป์ นี้สูงมากกว่าถึง 1 ล้านเท่า ด้วยกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าและให้ Clock speed ในระดับสูงกว่าถึง 1 Tera Hz รวมถึงการสร้างลอจิกเกทด้วย CNTs-FETโดยมีการโด๊ปด้วยสารเพื่อที่จะเติมหรือเอาอิเล็กตรอนออกทำให้ได้ N-Typeหรือ *P-Type* เกิดขึ้น



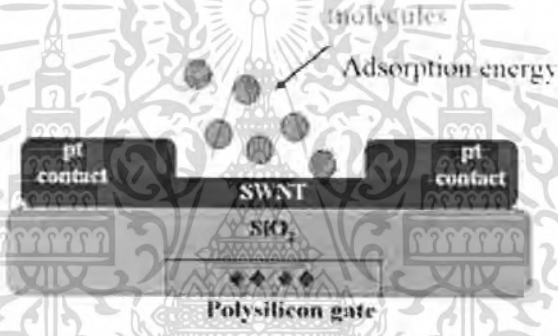
รูปที่ 2.21 ลักษณะ Single-molecule Transistor

ถึงแม้จะสามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านั้นได้ในระดับนาโนแต่สิ่งที่ท้าทายกว่าคือการเชื่อมต่อ (Wire) อุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน เพื่อจะปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หรือลอจิกได้ จึงเกิดแนวคิดที่ต้องทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นทั้งตัวเชื่อมและเป็นอุปกรณ์ในทีเดียว อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังไม่รวมถึงในระดับโครงสร้างของระบบวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์หรือระบบการทำงานอิสระอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

การที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และในขณะเดียวกันสารกึ่งตัวนำตอบสนองต่อสารพวก อัลคาไลน์ ฮาโลเจน และ ก๊าซต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น Semiconducting CNTs จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome , Methane . Krypton และ โมเลกุลของ Alkylamine แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น ลักษณะภาพของไดอะแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 2.18

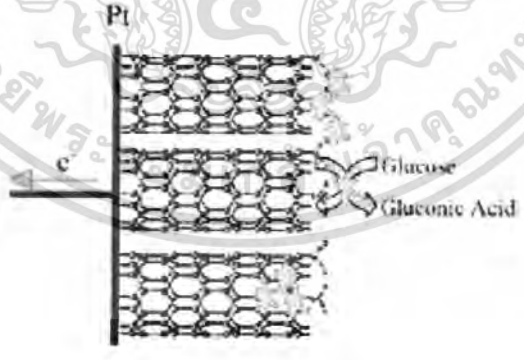


รูปที่ 2.22 เซมิคัลเซนเซอร์ที่ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซ หรือสารโมเลกุลอื่น

แต่การประยุกต์ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือไม่สามารถแยกชนิดของก๊าซที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และความเร็วก๊าซที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะ แนวทางสำหรับประยุกต์เชิงเซนเซอร์ให้ดีขึ้นสามารถทำได้ด้วยเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถ functionalize (เช่นหมู่ -OH และ- COOH เป็นต้น (ได้ ทำให้สามารถตรึงด้วยสารทางชีวภาพได้แก่ โปรตีน เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานด้านไบโอเซนเซอร์ เพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ หรือใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารต่าง ๆ ได้ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ มีพื้นผิวสำหรับการตรึงสารทางชีวภาพสูงทำให้สามารถเพิ่มขนาดสัญญาณได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีของไบโอเซนเซอร์เดิม การตรึงสารทางชีวภาพบนคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมีหลายวิธีได้แก่ การทำ simple adsorption ที่ช่องของปลายเปิดหรือผนังด้านนอกของคาร์บอนนาโนทิวป์ (วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกแต่มีข้อเสียคือ มีปริมาณสารทางชีวภาพที่ติดอยู่น้อย (การทำ hydrophobic หรือ Electrostatic interaction ระหว่างสารชีว

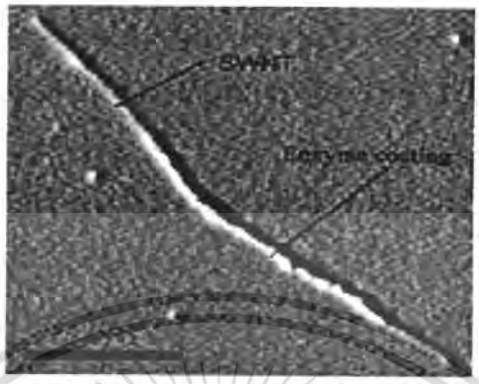
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลกับการทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์หรืออาจ Functionalize ด้านข้างของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ได้มีการพัฒนาใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ สร้างเป็นหัววัดไบโอเซนเซอร์สำหรับตรวจวัด น้ำตาลกลูโคส ดีเอ็นเอ H_2O_2 และ NADH เป็นต้น การตรึงสารทางชีวภาพที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นต้องเปิดปลายหรือเอาส่วนของครึ่งทรงกลม C_{60} ออกโดยสองวิธีหลัก ๆ คือ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์บอนนาโนทิวป์ ด้วยกรด)Acid oxidation) วิธีนี้ทำให้เกิดหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดและสามารถตรึงเอนไซม์ลงบนคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ ดังรูปที่ 2.19 ส่วนวิธีที่สองคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศ) Air oxidation) ด้วยความร้อนสูง 600 °C ประมาณ 5 นาที แต่การเปิดปลายวิธีที่สองนั้นจะตรึงเอนไซม์ได้ในปริมาณน้อยกว่าวิธีแรกเพราะไม่สามารถเพิ่มหมู่ function ของ คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ และยังส่งผลถึงความคงตัว)stability) ของเอนไซม์ด้วย ดังนั้นวิธีการเปิดปลายคาร์บอนนาโนทิวป์ จึงมีผลต่อการเข้าจับของเอนไซม์ภายในท่อของคาร์บอนนาโนทิวป์ บางรายงานใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเพื่อทำให้ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์และมีหมู่ Carboxyl เพิ่มมากขึ้น นอกจากการใช้กรดทำปฏิกิริยากับคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อทำให้เกิดหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แล้วยังสามารถใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 1.5 V กับคาร์บอนนาโนทิวป์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นหมู่เอมีนที่มีอยู่ในสารชีวภาพจะสามารถจับกับหมู่ Carboxyl บนคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ [6]



รูปที่ 2.23 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 ภาพจาก AFM ของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs

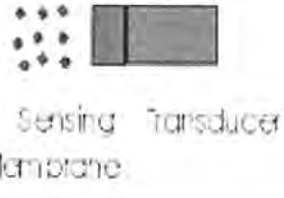
2.10.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

แนวความคิดที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้ในการกักเก็บพลังงานนั้น เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์มีลักษณะเป็นท่อกลวง เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร และมีพื้นผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างพิเศษนี้เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยทั่วโลกที่จะนำมาใช้ในการเก็บ H_2 (ซึ่งพลังงาน H_2 - ไฮโดรเจน- เป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อม) นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon ได้แสดงผลการคำนวณไว้ว่า SWNTs จะสามารถกักเก็บ H_2 ได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของทอมากขึ้น และมีความเป็นไปได้ที่จะกักเก็บ H_2 ได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่จะสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ นอกเหนือจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังสามารถนำไปใช้ใน Fuel cell ชนิด Methane, Ethanol หรือใช้เป็นขั้วในแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

2.11 เซนเซอร์ก๊าซ

2.11.1 ส่วนประกอบของ เซนเซอร์ก๊าซ

เซนเซอร์ก๊าซ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ



รูปที่2.25 แสดงส่วนประกอบของเซนเซอร์ก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.Sensing Membrane เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จับหรือทำปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซที่ต้องการวัด

2 Transducer ทำหน้าที่วัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ sensing membrane เมื่อ membrane จับหรือทำปฏิกิริยากับก๊าซ (sensing Membrane กับ Transducer อาจจะเป็นตัวเดียวกันก็ได้)

2.11.2 คุณสมบัติของเซนเซอร์ก๊าซ

เราสามารถแบ่งคุณสมบัติของก๊าซเซนเซอร์ ออกเป็น 5 อย่างที่สำคัญคือ

1. ความไวการตอบสนอง (Response)
2. ความไวในการวัด (Sensitivity)
3. ความจำเพาะ (Selectivity)
4. ความเสถียรภาพ (Stability)
5. พิสัยการวัด (Dynamic Range)

1. ความไวการตอบสนอง (Response) คือ ความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็วในทันทีเมื่อก๊าซที่เราทำการวัดมาสัมผัสกับเซนเซอร์ก๊าซ คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซ ที่เราทำการวัดเป็นก๊าซพิษหรือก๊าซไวไฟ เพื่อเราจะได้หลีกเลี่ยงและแก้ไขได้ทันทีก่อนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุร้ายแรงในบริเวณที่ทำการวัดก๊าซ หากก๊าซรั่วไหลออกมา

2. ความไวในการวัด (Sensitivity) คือ ความสามารถของเซนเซอร์ก๊าซ ที่จะบอกความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่จะทำการวัด เช่น เซนเซอร์ก๊าซบางชนิดไม่สามารถบอกความแตกต่างของ ก๊าซปริมาณน้อย ๆ เช่น 10 ppm กับ 11 ppm ได้ ดังนั้นเมื่อเรานำไปวัด ก๊าซ 2 บริเวณที่มี ก๊าซแตกต่างกันน้อย ๆ ก็จะทำให้เราเข้าใจผิดคิดว่าบริเวณทั้ง 2 มีก๊าซในปริมาณเท่ากัน คุณสมบัติชนิดนี้จะสำคัญเฉพาะกรณีก๊าซที่เราวัดมีปริมาณน้อย ๆ หรือต้องการความถูกต้องในการวัดสูงเท่านั้น

3. ความจำเพาะ (Selectivity) คือ ความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างก๊าซที่เราต้องการวัดกับก๊าซที่เราไม่ต้องการ วัดได้ กล่าวคือ เซนเซอร์ก๊าซ ชนิดหนึ่ง ๆ ควรมีความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซชนิดหนึ่งชนิดเดียวที่เราต้องการวัด และไม่ควรที่จะตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่นเพราะจะทำให้สัญญาณรบกวนการวัดได้ ในทางปฏิบัติเราต้องพยายามหาวัสดุที่ เหมาะสมที่ไวเฉพาะต่อก๊าซที่เราต้องการวัดมาใช้ทำ Sensing membrane หรืออาจจะเจือสารบางตัวลงไปในวัสดุที่ใช้ทำ membrane เพื่อทำให้ membrane มีความไวในการตอบสนองก๊าซที่เราต้องการวัดขึ้นมาได้ หรือเฉื่อยต่อการตอบสนองก๊าซที่เราไม่ต้องการที่จะวัด Selectivity เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก ซึ่งเซนเซอร์ก๊าซที่ดีต้องมีค่า Selectivity สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความเสถียรภาพ (Stability) คือ ผลในการวัดคงที่ไม่เสื่อมสภาพเร็วในการใช้งาน เพื่อให้เซ็นเซอร์ สามารถใช้วัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไป Sensing Membrane ทำจาก Polymer มักมีปัญหานี้ในการใช้งาน

5. พิสัยการวัด (Dynamic Range) คือ ช่วงกว้างของการวัดของ Sensor ซึ่ง Sensor บางตัวสามารถวัดก๊าซปริมาณตั้งแต่ 100-10000 ppm แต่บางตัวใช้วัดในระยะ 10-50 ppm

2.11.3 ชนิดหลัก ๆ ของเซนเซอร์ก๊าซ

แบ่งเซนเซอร์ก๊าซ ตามลักษณะการทำงานออกเป็น 3 ชนิดหลัก ๆ คือ

1. Gas Adsorption Gas Sensor
2. Gas Reaction Gas Sensor
3. Selective Membrane Gas Sensor

1. Gas Adsorption Gas Sensor Gas Sensor ในกลุ่มนี้ทำงานโดยวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อมีโมเลกุลของก๊าซถูกดูดซับเข้าไปบนผิวของวัสดุทำใช้ทำเซนเซอร์ ซึ่งเมื่อผิววัสดุที่ใช้ทำ เซนเซอร์ ถูกดูดซับโมเลกุลของก๊าซ เข้าไปที่ผิวก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

- surface potential ทำให้เกิดการนำไฟฟ้า
- เกิดการเปลี่ยนแปลงมวล ทำให้น้ำหนักของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลให้ความถี่รีโซ แนนซ์ของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป

2. Gas Reaction Gas Sensor Gas Sensor แบบนี้ทำการวัดผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อก๊าซที่ต้องการวัดเกิดปฏิกิริยา เช่น การจัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเซรามิคที่มีตัวคะตะลิสต์ผสมอยู่เมื่อเซรามิคสัมผัสกับก๊าซที่เผาไหม้

3. Selective Membrane Gas Sensor ซึ่งทำงานโดยใช้ประโยชน์ของ Sensing membrane ที่ยอมให้ก๊าซบางชนิดเท่านั้นผ่านเข้า ไปได้ เซนเซอร์ก๊าซ ชนิดนี้ที่ใช้วัด Oxygen จะมี แผ่น membrane แบบ solid electrolyte ที่ทำมาจาก Y_2O_3 dope ZrO_2 ส่วนที่ ใช้วัด SO_2 จะมีแผ่น membrane แบบ Solid electrolyte ที่ทำมาจาก $K_2 SO_4$ โดยเมื่อมีก๊าซ ข้างต้นซึมผ่านเข้าไปก็จะทำให้วัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป เราก็วัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหากเปลี่ยนแปลงมากก็แสดงว่ามีก๊าซดังกล่าวมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การตรวจวัดปริมาณสาร

การตรวจวัดปริมาณสารมีจุดมุ่งหมายสำคัญ เพื่อการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หรือตัวแปรต่างๆ ทั้งในระหว่างกระบวนการผลิตและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ รูปแบบและวิธีการวัดมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นการวัดตัวแปรทางกายภาพและทางเคมี ตัวอย่างการวัดทางกายภาพ เช่น การวัดปริมาตร, มวล, ความหนาแน่น, อัตราการไหล, ความดันและอุณหภูมิ เป็นต้น ในการวัดตัวแปรทางเคมีในปัจจุบัน มีเครื่องมือต่างๆ เช่น ก๊าซและลิควิดโครมาโตกราฟี (Gas-Liquid chomatroghaphy) พีเอชมิเตอร์ (pH meter) อิออนซีเลคทีฟอิเล็กโตรด (Ion-selective electrode) และสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectro photo meter) เป็นต้น เครื่องมือวัดเหล่านี้ทำงานได้ดี ทั้งการวัดตัวแปร หรือสารตัวอย่างโดยตรงหรือมีการทำตัวอย่างเปลี่ยนสภาพที่ทำให้เครื่องมือวัดหรือเซนเซอร์ตอบสนอง

การใช้วัสดุในการวิเคราะห์ปริมาณสารที่เรียกว่า Chemical assay มักใช้เวลาในการวิเคราะห์ เช่น TGS sensers ของ Figaro Engineering company ที่ใช้เนื้อสารของดีบุกออกไซด์ (SnO_2) เป็นตัวเพื่อวิเคราะห์ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากท่อไอเสียรถ ปัจจุบันมีการใช้หัววัดทางเคมีไปติดเข้ากับเครื่องมือทางไฟฟ้าในการหาปริมาณสารตัวอย่างได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว เครื่องมือวัดแบบนี้เรียกว่า เคมีเซนเซอร์ (chemsensors)

2.13 ความเป็นมาของการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ

หลายปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาในการวิเคราะห์ด้านเคมียังไม่ได้สร้างบนฐานรองซิลิกอน เป็นจำนวนมาก เช่น ใช้โลหะออกไซด์, สารประกอบเชิงซ้อน, เซรามิค, โพรลิเมอร์ และ ion-selective electrode เป็นต้น แต่แน่นอนทีเดียวการสร้างก๊าซเซนเซอร์ บนเทคโนโลยีซิลิกอนย่อมเป็นที่น่าสนใจมากกว่าเพราะตัวอุปกรณ์ที่สามารถสร้างได้เล็กซึ่งจะทำให้สามารถผลิตได้จำนวนมาก ซึ่งจะทำให้ราคาต่อตัวอุปกรณ์มีราคาถูกและยังสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้อีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1970 มีอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ 2 ชนิด ที่มีความโดดเด่นมากก็คือ ISFET ที่สร้างโดย Piet Bergveld หัวหน้ากลุ่มไบโอเซนเซอร์ (Biosensor) ที่ Twente University ประเทศเนเธอร์แลนด์ และ Palladium gate MOSFET ซึ่งสร้างในปี 1975 โดย Lund stron หัวหน้ากลุ่ม Chemical sensor ที่ Linkoping University ประเทศสวีเดน ISFET เป็นรูปแบบของมอตเฟสที่ไม่มี gate contact เมื่อ ISFET ถูกจุ่มลงในอิเล็กโตรไลต์ จะเกิดการกระแสเดรน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นอิออนของ H_2, Na หรือ K ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pd gate MOSFET เป็นมอสเฟต โดยที่ส่วนของเกทจะถูกเปลี่ยนจากอลูมิเนียม (Al) เป็นพลาเดียม (Pd) แทน ซึ่งพลาเดียมเป็น Highly catlytical active metal ที่สามารถแยกโมเลกุลของไฮโดรเจน (H_2) ออกเป็นไฮโดรเจนอะตอม (H^+) ซึ่งอะตอมเหล่านี้จะแพร่เข้าไปยังรอยต่อ Pd-SiO_2 ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสเดรนในมอสเฟต

ปัจจุบันนี้ มีความต้องการ การพัฒนาการใช้อุปกรณ์ตรวจจับทางเคมีกันมาก เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ทางเคมีภายนอกห้องปฏิบัติการ Zemel ได้รวบรวมความต้องการที่จะได้อุปกรณ์ตรวจจับทางเคมีในอุดมคติดังนี้ ราคาไม่แพง ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็ก output สามารถแสดงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า มีอัตราส่วน signal/noise ที่ดี รูปทรงแข็งแรง สร้างได้ง่าย สามารถผลิตได้ในจำนวนต่อครั้งมากๆ มีความน่าเชื่อถือ มีการแยกแยะสารเคมี มีการตอบสนองที่ดีและไม่มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิและรังสีต่างๆแน่นอนความต้องการที่กล่าวมานี้ย่อมเป็นไปไม่ได้ แต่มีการวิจัยมากมายที่แสดงให้เห็นว่าการสร้างก๊าซเซนเซอร์บนฐานรองซิลิกอนจะสามารถสนองความต้องการ ที่ได้กล่าวมาแล้วมากที่สุด

2.14 นิยามของก๊าซเซ็นเซอร์

เซนเซอร์จะเป็นส่วนสำคัญสำหรับระบบการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแสดงผลออกมาแทนการตอบสนองของประสาทสัมผัสของมนุษย์ ที่นอกจากเราจะสามารถได้ยินสัมผัส ดม กลิ่น การลิ้มรสและการมองเห็น เราอาจจะได้รับอันตรายจากการสัมผัสหรือได้รับสิ่งเหล่านั้นโดยตรงในปริมาณที่มากเกินขีดจำกัดที่ร่างกายจะได้รับ เซนเซอร์จะสามารถแสดงเป็นทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ค่าที่เท่ากับการตอบสนองของร่างกาย อย่างไรก็ตามอาจกล่าวได้ว่าการพัฒนาเซนเซอร์มีการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้สัญญาณเป็นดิจิตอลอย่างมากโดยเฉพาะการทำตัวตรวจจับ ที่สามารถตอบสนองต่อสารเคมี และในกรณีที่มีการทำกล้อง CCD ที่สามารถแยกประสาทในการมองได้สูงมากหรือน้อยแม้แต่การทำไมโครโฟนที่มีความไวในการตอบสนองเสียงได้ดี ซึ่งสิ่งเหล่านี้ยังเป็นขั้นเริ่มต้น

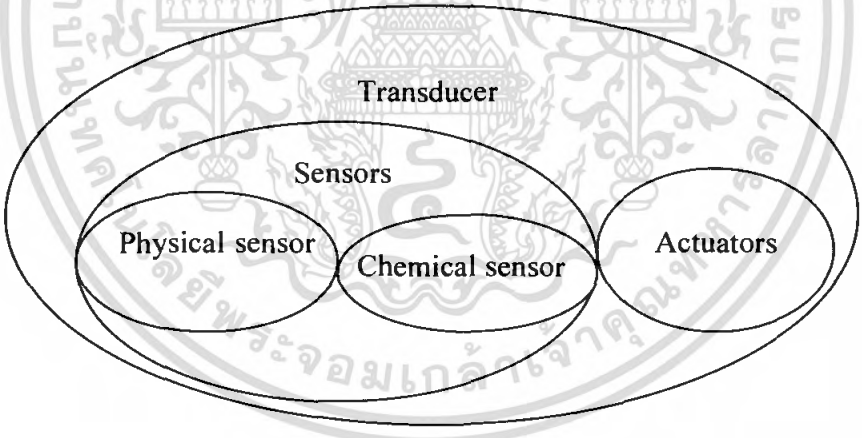
สัญญาณดิจิตอลในทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวตรวจจับทางเคมีซึ่งจะสามารถรู้รสและได้กลิ่นของสิ่งไม่มีชีวิต ถึงแม้แต่ในระบบชีววิทยายังมีระบบภูมิคุ้มกัน และการวัดปริมาณกลูโคส การวัดความเข้มข้นสารเคมีและการควบคุมปริมาณที่ต้องใช้ความถูกต้องสูง เพื่อที่จะแทนที่หรือเป็นตัววัดระบบทางชีววิทยาเหล่านี้จนในที่สุดจะได้ตรวจจับที่มีการตอบสนองและการแยกแยะที่ดี วัสดุตรวจจับทางเคมีในเชิงพาณิชย์จะต้องสามารถปรับค่าเริ่มต้นแต่ยังไม่สามารถแยกแยะและมีความไวในการตอบสนองได้ดีพอ อย่างไรก็ตามถ้ามีสารชีววิทยาที่สามารถเป็นตัวตรวจจับทางเคมีและทางชีววิทยาที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแยกแยะสารและการตอบสนองที่ดีที่เหมือนระบบชีววิทยานั้นได้รับการยอมรับในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยทางนี้อย่างกว้างขวางและจนกระทั่งในปัจจุบันได้มีเซนเซอร์ออกสู่ตลาดหลายชนิด

ตัวอย่างเซนเซอร์ที่ได้รับการแพร่หลายมากที่สุดก็คือ กลูโคส เซนเซอร์ ในปัจจุบันเซนเซอร์ชนิดสามารถสร้างได้ง่าย มีราคาถูก จนสามารถใช้แล้วทิ้งได้ เพื่อให้การตอบสนองที่ดีและมีความถูกต้อง และยังมีการแสดงผลเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อง่ายต่อการใช้

ความหมายของคำว่า ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) มีรากศัพท์มาจาก ภาษาลาติน จากคำว่า "transduco-traduco" ซึ่งหมายถึง "การเปลี่ยนสภาพ-การแปลงสภาพ" ดังนั้น อุปกรณ์จะต้องเป็นการเปลี่ยนแปลงหรือการแปลงสภาพ พลังงานจากระบบหนึ่งไปเป็นระบบอื่นโดยที่รูปแบบอาจจะเปลี่ยนไปก็ได้ ซึ่งจะเป็นความหมายของทรานสดิวเซอร์ การวัดค่าต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม ทรานสดิวเซอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูป โดยพลังงานมีอยู่หลายรูป เช่น ทางไฟฟ้า, ทางกลศาสตร์, ทางแสง, ทางความร้อน, ทางแม่เหล็ก และทางการแผ่รังสี



รูปที่ 2.26 การจัดกลุ่มของทรานสดิวเซอร์ (Transducers)

เซนเซอร์ (Sensor) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงสัญญาณในรูปแบบต่างๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ส่วนแอคชิวเอเตอร์ (Actuators) จะเป็นทรานสดิวเซอร์ที่แปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณในรูปอื่น โดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณในรูปกลศาสตร์ ตัวอย่างของเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์วัดความดัน pH เซนเซอร์ และโฟโต้ทรานซิสเตอร์ ตัวอย่างแอคชิวเอเตอร์ (Actuators) เช่น โซลินอยย์ อุปกรณ์ เพียร์โซอิเล็กตริก และเลเซอร์ไดโอด ส่วนในเคมีคอลแอคชิวเอเตอร์ (Actuators) เช่น โซลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอยย์ อุปกรณ์ เพียร์โซอิเล็กตริก และเลเซอร์ไดโอด ส่วนในเคมีคอลแอคชิวเอเตอร์ (Chemical Actuators) เมื่อป้อนศักดาทางไฟฟ้าจะทำให้เกิด ไฮโดรเจน และออกซิเจน จอภาพจะเป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดพิเศษที่แปลงจากสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นรูปแบบที่มองเห็นเช่น จอภาพ CRT, จอ LCD array ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์แสดงผล ที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป

โดยทั่วไประบบควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ในทางอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบด้วยเซนเซอร์ที่อยู่ในส่วนอินพุทต่อไปยังสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะผ่านการขยายสัญญาณ โดยแอคชิวเอเตอร์เพื่อแสดงบนหน้าจอ

2.15 ทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์

สารกึ่งตัวนำทินออกไซด์เซนเซอร์ (SnO_2) เริ่มสร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1968 โดยเซนเซอร์ชนิดนี้เริ่มพัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจจับก๊าซ LPG ในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาเพื่อที่จะใช้ในการตรวจจับก๊าซชนิดอื่นด้วย เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) แอลกอฮอล์ (C_2H_5OH) แอมโมเนีย (NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟต์ (H_2S) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นต้น

ความสำเร็จดังกล่าวนี้ ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดถึงความแตกต่างของชนิดวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างเซนเซอร์ พบว่ามีเพียงทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์เพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่สามารถตรวจจับก๊าซจากท่อไอเสียรถยนต์ได้ดี รวมทั้งในการตรวจจับก๊าซชนิดอื่นด้วย

การเริ่มวินิจฉัยในการหาวัสดุที่มาสร้างเป็นก๊าซเซนเซอร์นั้น ในเริ่มแรกทินออกไซด์ไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควร เพราะเนื่องจากปัญหาในเรื่องคุณสมบัติของทินออกไซด์เอง เช่น ความไว ในการตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ความจำเพาะในการตรวจจับก๊าซและผลของความชื้นซึ่งปัญหาเหล่านี้ จะส่งผลต่อความน่าเชื่อถือ ความน่าเชื่อถือของก๊าซเซนเซอร์จะมีความสำคัญในด้านความถูกต้องของการวัดในอุตสาหกรรมและความปลอดภัยต่อร่างกายของมนุษย์ ดังนั้น จึงมีการพัฒนาทินไดออกไซด์ในเงื่อนไขต่างและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการจนทำทินออกไซด์มีคุณสมบัติที่เหมาะสม และมีความไวในการตรวจจับก๊าซได้เร็ว ซึ่งจะแสดงว่า ทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์สามารถตรวจจับก๊าซที่มีปริมาณของสารที่ความเข้มข้นต่ำได้

ตัวตรวจจับก๊าซแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor gas sensor) คือเซ็นเซอร์ก๊าซที่อาศัยประโยชน์จากลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำกล่าวคือเมื่อมีโมเลกุลของก๊าซเข้ามาดูดเกาะ(adsorb) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับสารกึ่งตัวนำนั้นขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นโดยการวัดการนำ จะทำให้เราทราบความเข้มข้นของก๊าซได้

ลักษณะการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ 1) การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิว และ 2) การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในบัลก์ (Bulk) แบบแรกนั้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็น ฟิล์มบางหรือฟิล์มหนา ส่วนแบบหลังนั้นจะมีความหนามาก โดยมีลักษณะเป็นก้อนเซรามิค (sintered block) ลักษณะการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ ต่อชนิดของก๊าซนั้นจะขึ้นกับชนิดขององค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์และอุณหภูมิการทำงาน ตัวอย่างของวัสดุ ที่ใช้ทำก๊าซเซนเซอร์แบบนี้ได้แก่ SnO_2 , ZnO เป็นต้น สารเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์สำหรับวัดก๊าซ Nox , Co , H_2 , alcohol และอื่น ๆ อีกมากมาย โครงสร้างของก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ แสดงได้ดังรูปที่ 2.27

รูปที่ 2.27 โครงสร้างของก๊าซเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ

2.16 ปฏิกิริยาของการดูดซับก๊าซที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

2.16.1 สถานะพื้นผิว (Surface state) ในการตรวจจับทางเคมี

โลหะเซนเซอร์ส่วนใหญ่จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เราจะเน้นถึงสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวสัมผัสของสาร สารกึ่งตัวนำชนิดพีจะไม่ค่อยเสถียรเท่าชนิดเอ็นเพราะเมื่อเกิดปฏิกิริยากับก๊าซรอบๆ ทำให้คุณสมบัติของสารเปลี่ยนไปอย่างถาวร

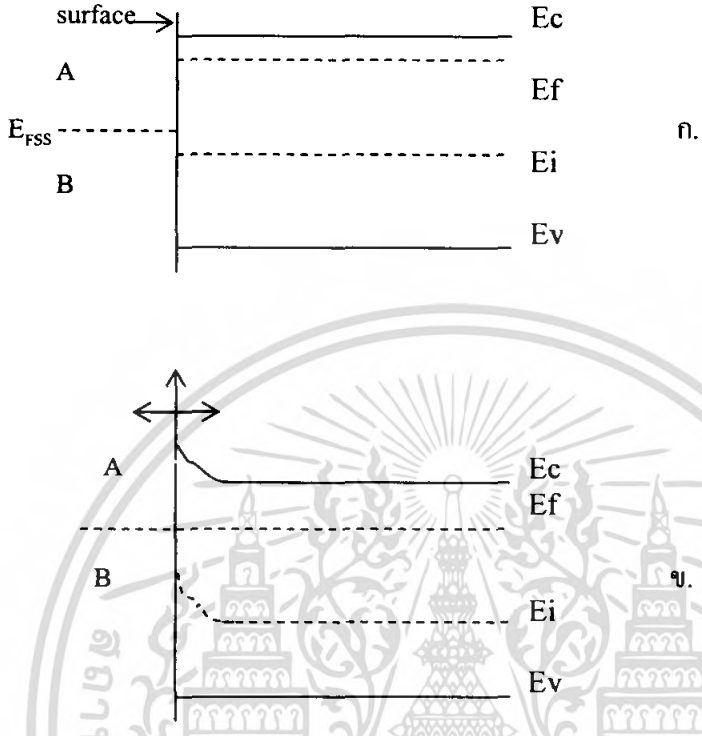
ที่ผิวสัมผัสของเนื้อสาร อะตอมจะมีพันธะขาดไป 1 หรือ 2 อะตอม ทำให้เกิดเป็นพันธะอย่างหลวมๆ ประจุบวกของ Sn^+ ไอออนจะมีประจุลบ O^- ไอออนล้อมรอบอยู่ เมื่อมีปริมาณไอออนลบรอบๆ ตัวมันน้อย ไอออนบวกจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ดังนั้นการจัดเรียงของแถบนำใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีนี้ จะมีพลังงานต่ำกว่าแถบความนำจริงและสามารถดึงอิเล็กตรอนจากเนื้อสารได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างพันธะกับด่างที่มีอนุมูล OH^- ซึ่งมีอิเล็กตรอนอิสระมาให้ในการเกิดพันธะ ทำให้เหมือนกับว่าที่ผิวมีเฉพาะไอออนลบ มีผลให้แถบพลังงานของประจุลบมีค่าสูงกว่าแถบวาเลนซ์ที่เป็นจริง ไอออนเหล่านี้มันสามารถ ดึงโฮล หรือให้อิเล็กตรอนแก่เนื้อสาร แต่ในกรณีโมเลกุลของกรดที่มีอนุมูล H^+ อิเล็กตรอนอิสระจะไม่สามารถอยู่ในชั้นสถานะผิวได้ ลักษณะการจัดเรียงตัวถูกอธิบายโดยแบบจำลองของ Madelung เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิต่ำ เนื้อสารจะถูกปกคลุมด้วยไอน้ำที่มีอนุมูล OH^- จับกับไอออนบวกที่พื้นผิว และ H^+ จะอยู่บริเวณที่มีไอออนลบ อิทธิพลของน้ำในการจับก๊าซทำให้เกิดความไม่ชัดเจน ถึงแม้เราได้ตั้งข้อสังเกตว่าโลหะออกไซด์เซนเซอร์ต่างๆ ตอบสนองในความชื้นสูงๆ ในขณะที่อุณหภูมิสูง น้ำที่ถูกดูดซับสามารถถูกขับออกจากบริเวณที่เกิดปฏิกิริยากับก๊าซเบสหรือกรดกับอะตอมผู้ให้หรือผู้รับก็ได้

เหตุผลดังกล่าวจะสามารถอธิบายได้จากแถบพลังงานที่อยู่ในเทอมของสถานะผิว “Surface states” ซึ่งจะมีทั้งสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับของอะตอมที่ผิวดังรูปที่ 2.1 แบบจำลองแถบพลังงานที่ผิว E_c คือ พลังงานที่แถบความนำ E_v คือ พลังงานที่แถบวาเลนซ์ E_i เป็นพลังงานที่ระดับครึ่งของแถบพลังงานและ E_F คือ แถบพลังงานที่ระดับเฟอร์มิที่สถานะผิว สามารถเขียนได้ว่า ความหนาแน่นของแถบพลังงาน N(E) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ E มีเหตุผลหลายข้อที่สนับสนุน เช่น ที่ชั้นของผิวที่มีอยู่หลายชั้นที่แสงสามารถทะลุผ่านผลึกได้ โดยที่แต่ละชั้นจะมีระดับพลังงานไม่เท่ากันดังนั้นจึงแสดงแถบพลังงาน 2 ระดับที่อยู่ภายในสถานะผู้รับในเทอมของ A ที่เชื่อมโยงกับไอออนโดยรูปที่ 2.27(ก) เป็นแบบจำลองของแถบพลังงาน ถ้าไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสถานะพื้นผิวและสารกึ่งตัวนำ “flat bands” เราสังเกตว่าอย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้พลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำไม่มีความจำเป็น จะมีความสัมพันธ์ต่องานเฟอร์มิของสถานะพื้นผิว (เราใช้ E_{Fss} เพื่ออธิบายการกระทำของพลังงานเฟอร์มิ) ในรูปที่ 2.27 (ข) เราแสดงถึงกรณีสมดุล อิเล็กตรอนถูกเคลื่อนย้ายจากบริเวณ E_F สูงใกล้บริเวณพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำไปสู่บริเวณ E_F ต่ำ ในสถานะพื้นผิวการแบ่งแยกประจุนำไปสู่ความต่างศักย์ของ 2 ชั้น ในตัวอย่างนี้ การเพิ่มของระดับพลังงานที่พื้นผิว (รวมระดับ E_{CS} และ E_{VS} ที่ผิว) เมื่อความต่างศักย์ของ 2 ชั้นมีประสิทธิภาพทำให้ E_F คงที่ตลอดระบบ เรามีความสมดุล (ฟังก์ชันเฟอร์มิอธิบายถึงการไม่ว่างของทุกระดับพลังงาน) การเคลื่อนย้ายของแถบ ใกล้พื้นผิว เรียกว่า “การหักเหของแถบ”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แบบจำลองการเกิดประจุที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ อะตอมผู้ให้ (D) และอะตอมผู้รับ (A) สถานะผิวจะแสดงที่ความหนาแน่นของระดับพลังงาน N(E)
ก. ในกรณีที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารกึ่งตัวนำและสถานะผิว
ข. ในกรณีที่อิเล็กตรอนจากผิวของสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปยังสถานะผิวจนถึงสมดุล

รูปแบบของฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มิเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งขึ้นอยู่กับการพยายามให้เกิดความไม่ว่างของ E_F พลังงานเฟอร์มิจะถูกประมาณที่ครึ่งหนึ่งระหว่างกลุ่มผู้ให้และกลุ่มผู้รับดังแสดงในรูปที่ 2.28 ถ้ามีเพียง 1 ระดับพลังงาน ในทำนองเดียวกันพลังงานเฟอร์มิจะเข้าสู่ระดับที่สมดุล อาจกล่าวได้ว่า เมื่อเข้าสู่สมดุลจะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน (band bending)

ที่น่าสนใจสำหรับเราคือ การวิเคราะห์สารที่สามารถถูกดูดซับและแบ่งแยกสถานะผิว มันจะฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ (ลดออกซิเจน) หรือรับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ (เพิ่มออกซิเจน) เช่น ไฮโดรเจนเมื่อถูกดูดกลืนจะฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปสารกึ่งตัวนำและจะได้เป็น H^+ ส่วนออกซิเจนเมื่อถูกดูดกลืนจะจับอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำและได้เป็น O^- การอธิบายทางคณิตศาสตร์จะอธิบายได้เหมือนกรณีของสถานะผิว เราใช้เทอมของสถานะผิวเพื่ออธิบายระดับพลังงานพื้นผิวต่อชนิดของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดกลืน ตัวอย่างของการพิจารณาก็คือ CO เคลื่อนเข้าสู่ผิวทำปฏิกิริยากับโลหะออกไซด์ดังสมการ (2.1) เมื่อ O^{2-} เปลี่ยนไปเป็นสถานะก๊าซ

$$CO + M^{2+} \longrightarrow O^{2-} \quad CO_2 + M^{2+} + 2e^- \qquad (2.1)$$

ไอออนบวกโลหะ M ทางด้านซ้ายเป็นสารที่ไม่สามารถระเหยได้โดยง่ายหรือไม่แพร่เข้าไปในเนื้อสาร มันจะมีประจุเกิดขึ้นและถูกส่งไปยังสารกึ่งตัวนำและเกิดพฤติกรรมที่สถานะผิวอีกครั้ง

กระแสไฟฟ้าในรูปแบบชั้นคู่ (Double layer) มีรูปแบบดังแสดงในรูป 2.27(ข) มีอยู่ 3 แบบเราจะอธิบายกรณีเหล่านี้ด้วยรูปแบบง่ายๆ ของการดูดซับของสถานะพื้นผิว สมมุติให้มีเพียง 1 ระดับชั้นพลังงาน

แบบที่ 1 ถ้าอิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเกิดชั้นสะสมประจุดังรูปที่ 2.28(ก) เกิดชั้นคู่ระหว่างสถานะผิวที่เป็นประจุบวกและอิเล็คตรอนที่ถูกฉีดเข้าไป เพราะว่าอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดมีการเคลื่อนที่จนมาปิดทับผิวและผลทางไฟฟ้าจากชั้นคู่จะไม่ลึก จะมีขนาดเพียงไม่กี่อังสตรอมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานเฟอร์มิที่พื้นผิวเปลี่ยนไปเป็น $d\psi$ โดย ψ คือความต่างศักย์ของชั้นคู่ ในรูปที่ 2.28(ก) ระยะห่างระหว่างชั้นประจุ d มีความสัมพันธ์กับค่าเก็บประจุ (C) ของชั้นคู่ (Faradays/unit area) ดังสมการ (2.2)

$$C = q(dN) / (d\psi) = \varepsilon_r \varepsilon_0 / d \qquad (2.2)$$

N คือ ความหนาแน่นประจุที่สถานะผิวต่อพื้นที่

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ε_0 คือ permittivity ของสุญญากาศ

ในกรณีชั้นสะสมค่า D จะมีค่าน้อย จากสมการจะได้ค่า N ที่มีค่ามาก การเคลื่อนย้ายประจุเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อธิบายการว่างของสถานะผิว ชั้นสะสมจะเกิดบนสารกึ่งตัวนำชนิด P เมื่อโฮล ถูกฉีดเข้าไปในแถบวาเลนซ์ (อิเล็กตรอนถูกดึงจากชั้นแถบวาเลนซ์โดยผู้ให้ที่มีค่าสูง) ชั้นสะสมจะเกิดขึ้นจากสถานะผิวที่มีประจุลบกับประจุโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์

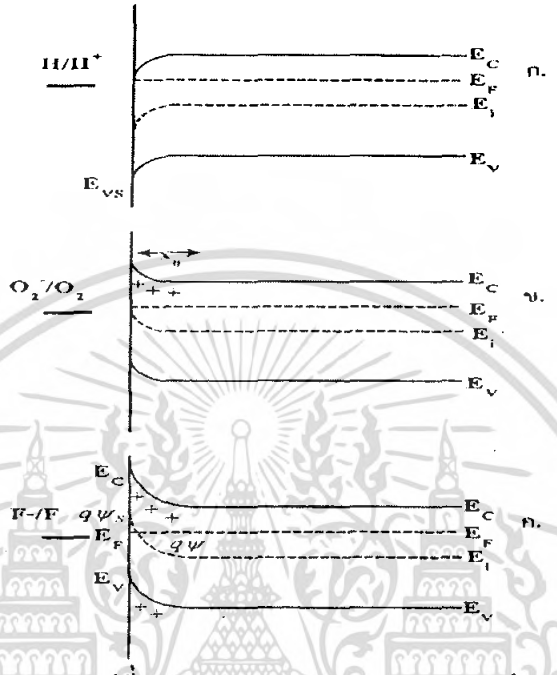
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 2 ถ้าอิเล็กตรอนถูกดึงจากแถบความนำของสารกึ่งตัวนำชนิด N โดยสถานะผิวที่เป็นตัวรับประจุที่ไม่แข็งแรงมากนักบริเวณปอดประจุที่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิว โดยแสดงดังรูป 2.28 (ข) โดยชั้นคู่ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวที่ประจุลบและไอออนของผู้ให้ประจุบวก (เคลื่อนที่ไม่ได้) ในสารกึ่งตัวนำชนิด N การดึงอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งถึงพลังเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นสถานะผิวของวัสดุตรวจจับ โดยทั่วไปประจุนี้จะมีค่าๆหนึ่งในชั้นคู่ อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำประจุจะมาจากไอออนตัวให้ ซึ่งมีปริมาณจำกัด การกำหนดจำนวนประจุจะแสดงถึงความหนาของชั้นคู่ที่ขยายเข้าไปในสารกึ่งตัวนำในขณะเดียวกันจากสมการที่ 2.2 ค่า d จะมีค่ามากกรณีในเขตปลอดประจุ ความหนาแน่นของประจุของสถานะผิวจะต่ำอยู่ในช่วง 0.001 ของชั้นเดี่ยว สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีบริเวณปลอดประจุเพิ่มขึ้น เมื่อโฮล ถูกดึงมาจากแถบวาเลนซ์ โดยอะตอมสถานะผิวผู้ให้ออกจากชั้นคู่ระหว่างประจุลบของไอออนผู้รับใกล้ๆผิวและประจุบวกที่สถานะผิว

แบบที่ 3 งานFET-based คือชั้นกลับในสารกึ่งตัวนำชนิด N ชั้นเปลี่ยนถูกสร้างออกซิไดซ์อย่างรุนแรงที่ผิว รูปที่ 2.28 ค เราให้ฟูลออรีนเป็นตัวออกซิไดซ์ ถ้าสถานะผิวมีระดับพลังงานใกล้กับแถบวาเลนซ์จะทำให้พลังงานเฟอร์มิเข้าใกล้ระดับพลังงานของสถานะผิวเพื่อให้เกิดความสมดุลย์ ถ้าพลังงานเฟอร์มิอยู่ใกล้แถบวาเลนซ์มากกว่าแถบความนำความเข้มข้นของโฮลจะปรากฏออกมา ขณะที่อะตอมตัวรับที่สถานะผิวจะมีค่าต่ำในแบบจำลอง ซึ่งแสดงว่าเกิดการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนซ์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.28 ค ที่ผิวจะเกิดการเปลี่ยนวัสดุชนิดเอ็นจะเป็นพี

ส่วนที่สำคัญที่สุดของพื้นผิวในก๊าซเซ็นเซอร์คือ ชั้นปลอดประจุ ส่วนของการวิเคราะห์ในกรณีใช้สถานะผิวง่ายๆตัวอย่างเช่น โมเลกุลของออกซิเจนจะเป็นตัวรับบนสารกึ่งตัวนำชนิดอ็น ซึ่งสมการที่ 2.1 หลีกเลี่ยงการแตกตัวที่ยุ่งยากของออกซิเจน เราสมมุติเพียง 1 ระดับพลังงานสำหรับสถานะผิวและสมมุติความเข้มข้นของสารเจือไม่ขึ้นกับระยะทาง พิจารณาเฉพาะผลของการดูดกลืนก๊าซต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสารกึ่งตัวนำโดย ψ แสดงถึงศักดาที่สัมพันธ์กับพลังงานศักย์ในเนื้อสาร สถานะผิวที่แสดงโดยรูปแบบที่ง่ายๆ เพียง 1 ชั้น ถ้ามีการยึดเหนี่ยวที่ชั้นนี้ ว่าจะเกิดReducing agent เช่น O_2^- แต่ถ้าไม่มีการยึดเหนี่ยวในชั้นนี้ บริเวณที่ว่างเกิด Reducing agent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 Surface double layers แบบต่างๆ

ก. ชั้นสะสม เมื่อที่ผิวมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก อิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปในแถบความนำ โดยปล่อยให้บริเวณผิวที่มีประจุบวกและเนื้อสารกึ่งตัวนำจะมีประจุลบ

ข. ชั้นปลอดประจุพาหะ เมื่ออิเล็กตรอนที่แถบความนำถูกยึดไว้ที่ผิว ถูกชดเชยด้วยประจุบวกบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ

ค. ชั้นกลับ เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกยึดไว้ในปริมาณมากๆ ซึ่งแสดงว่ามีการดึงอิเล็กตรอนจากทั้งแถบความนำและแถบวาเลนซ์

2.17 กลไกในการตรวจจับก๊าซของทินออกไซด์

ทินออกไซด์ มีการจัดเรียงผลึกแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า ซึ่งมีความกว้างของแถบ พลังงาน 3.5-3.8 อิเล็กตรอนโวลท์ จุดบกพร่องจำนวนมากในเนื้อทินออกไซด์จะอยู่ในรูปที่ว่างในอะตอมออกซิเจนซึ่งจะแสดงตัวเป็นผู้ให้ไอออน แต่ส่วนที่มีผลต่อการแสดงตัวเป็นอะตอมผู้ให้ก็คือที่ว่างในอะตอมออกซิเจน โดยกระบวนการที่มีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของทินออกไซด์ต่างๆมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17.1 ผลในเนื้อสาร

จุดบกพร่องในเนื้อทินออกไซด์ปกติจะเป็นที่ว่างในอะตอมออกซิเจน 1 และ 2ไอออน จากแบบจำลองจุดบกพร่องสำหรับผลึกทินไซด์บริสุทธิ์กับช่องว่างออกซิเจนสองประจุลบจะมีสมการที่อุณหภูมิสูงๆ ดังนี้

$$O^{2l}_{2} \longrightarrow Vo^{+} + 2e^{-} + O_2 \qquad (2.2)$$

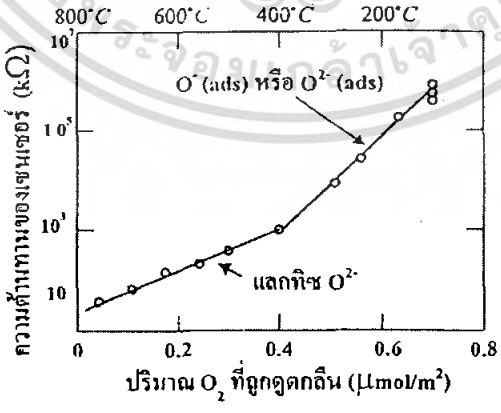
ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ของการดูดกลืนออกซิเจนจะเป็นส่วนสำคัญกว่าดังรูปที่2.8 ช่องว่างเหล่านี้จะเพิ่มอะตอมผู้ให้ในแถบพลังงาน แสดงว่าจะมีระดับของอะตอมผู้ให้อยู่ 2 ระดับที่ทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน

2.17.2 ผลจากผิวของสารกึ่งตัวนำ

ในบรรยากาศปกติออกซิเจนจะถูกดูดกลืนที่ผิวของโลหะออกไซด์และเกิดการดึงอิเล็กตรอนจากแถบความนำทำให้ค่าสภาพความต้านทานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีออกซิเจนอยู่ 3 แบบ O_2^-,O^- และO^{2-} โดยแบบแรกจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่รูปแบบอื่นจะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดกลืนออกซิเจนจากช่วง 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานลดลงตามปริมาณ O^- ทำให้รู้ว่าไอออนลบจะยังคงดูดกลืนที่ผิวซึ่งทำให้ความต้านทานสูงที่ 400 องศาเซลเซียส ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของทินออกไซด์กับอุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ

$$O_2 + 2e^- \longrightarrow 2O^- \qquad (2.3)$$



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 800 ถึง 200 องศาเซลเซียส กับปริมาณ O_2 ที่ถูกดูดกลืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

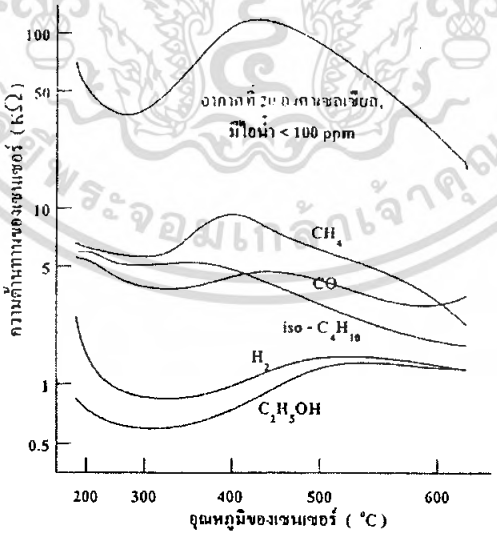
การลดลงของความต้านทานในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 ถึงประมาณ 250 องศาเซลเซียส เป็นคุณสมบัติปกติของสารกึ่งตัวนำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพิ่มจนถึงจุดที่ความต้านทานเพิ่ม คือ เริ่มเกิดการฟอร์มตัวของ O^- และ O^{2-} เมื่อถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งจะเกิดการแตกสลายของไอออนเหล่านี้ทำให้ค่าความต้านทานของทินออกไซด์ลดลงอีกครั้ง

การลดลงของความต้านทานก๊าซเซ็นเซอร์เมื่ออยู่ในบรรยากาศของก๊าซเผาไหม้สามารถอธิบายได้คือ ปริมาณไอออนของออกซิเจนบนผิวลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับก๊าซ O^- ทำให้เกิดอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในเนื้อสาร

ตัวอย่าง RH_2 คือก๊าซติดไฟใดๆ จะเกิดปฏิกิริยากับ O^- ดังนี้

$$RH_2 + 2O^- \longrightarrow RO + H_2O + 2e^-$$

จากปฏิกิริยาจะเห็นว่า การลดลงของความดันออกซิเจนจะไม่มีผลต่อความต้านทานมากนัก ในการตรวจจับก๊าซ กลไกอื่นที่สามารถอธิบายจะเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนออกซิเจนของก๊าซทดสอบจะได้ผลสรุปในการใช้ออกซิเจนของผิวที่ดูดซับ นั้นคือการเกิดการเคลื่อนย้ายของออกซิเจนจากบรรยากาศรอบๆ ความหนาแน่นสมดุลย์ของออกซิเจน ที่ถูกพื้นผิวดูดซับต่อความเข้มข้นของก๊าซรอบๆ จะเป็นตัวกำหนดความต้านทานของเซ็นเซอร์



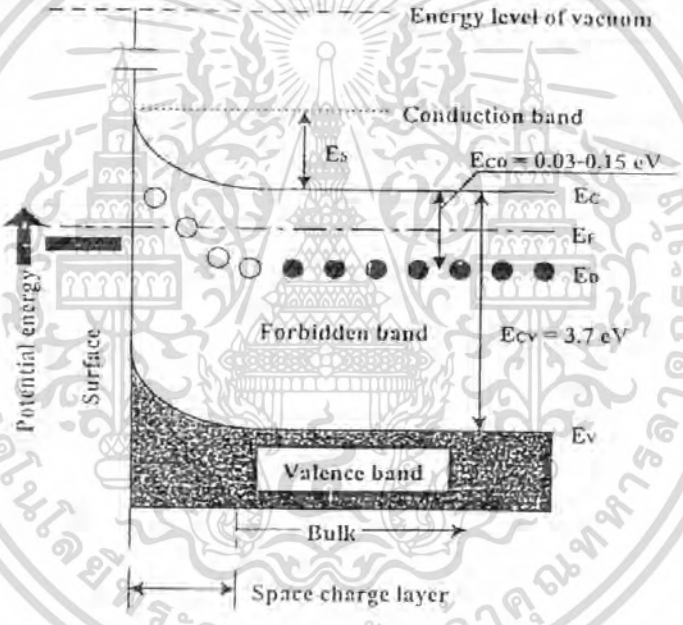
รูปที่ 2.31 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของทินออกไซด์ต่ออุณหภูมิที่บรรยากาศของก๊าซต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17.3 ผลจากขอบเกรน

การเปลี่ยนแปลงที่ผิวซึ่งเกิดจากการดูดกลืนหรือคายไอออนจะมีค่าไม่มากพอที่อธิบายถึงการที่ความต้านทานเพิ่มขึ้นมากๆ ส่วนที่มีผลต่อความต้านทานมากกว่าก็คือ ขอบเกรน

ผลึกทินออกไซด์จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ประกอบด้วยแลกทิซบกพร่องของออกซิเจนซึ่งแสดงตัวเป็นผู้ให้อิเล็คตรอน เมื่ออะตอมของออกซิเจนหลุดออกอิเล็กตรอนจากอะตอมผู้ให้บริเวณพื้นผิวจะถูกดูดกลืนเป็นไอออนลบ เกิดการฟอร์มตัวของชั้นปลอดประจุมีค่าขึ้นอยู่กับกำแพงศักย์ โดยแถบพลังงานจะเป็นดังรูป 2.31



รูปที่ 2.32 โครงสร้างแถบพลังงานของทินออกไซด์

(▬) คือ ออกซิเจนประจุลบที่ถูกดูดกลืน คือ ศักย์ที่ผิวเกิดจากการดูดซับ O_2^- หรือ O^-,

$$(O_2 + e \Leftrightarrow O_2^- \text{ ad หรือ } \frac{1}{2}O2 + e \Leftrightarrow O_2^- \text{ ad})$$

E_S คือ กำแพงศักย์

E_F คือ ระดับเฟอร์มิ

E_D คือ ระดับผู้ให้

E_C คือ ระดับต่ำสุดของแถบความนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

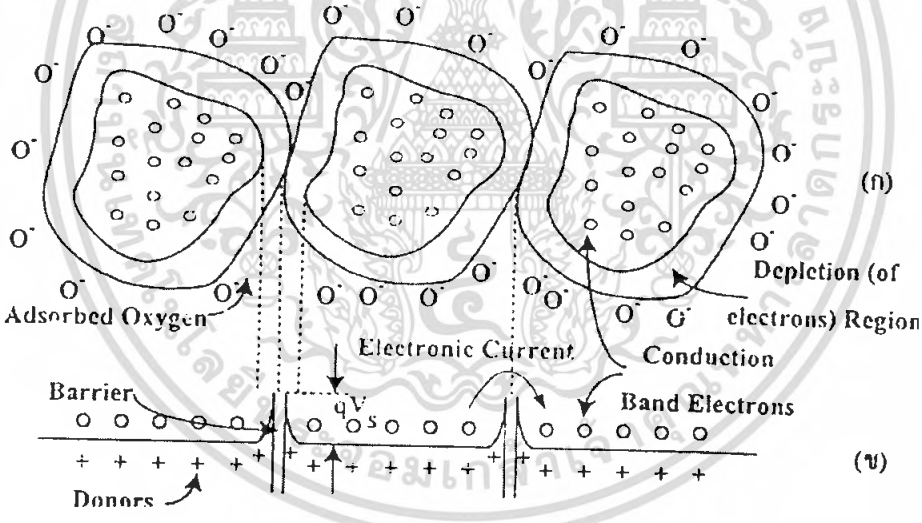
E_v คือ ระดับสูงสุดของแถบวาเลนซ์

E_{CD} คือ ความลึกของระดับผู้ให้

E_{CV} คือ ช่องว่างพลังงานระหว่าง E_C และ E_V

แบบจำลองทางฟิสิกส์สำหรับการจับคู่ของขอบเกรนแสดงถึงบริเวณปลอดประจุและผลของการดีออกซิไดซิงก์ก๊าซ ดังรูปที่ 2.32

กรณีผลึกมีขนาดน้อยกว่าสองเท่าของ Debye length ดังรูปที่ 2.33 แต่ละผลึกจะแสดงตัวเหมือนช่องทางเดินกระแสในเฟตและประจุลบที่ผิวของออกซิเจนลบจะแสดงตัวคล้ายแรงดันเกทในเฟต ทำให้มีผลต่อระดับศักย์ E_C ภายในผลึก

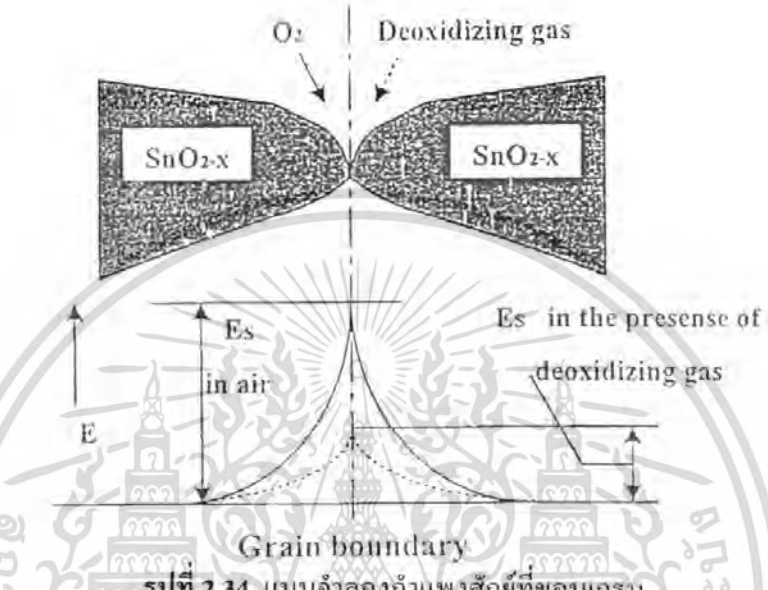


รูปที่ 2.33 โครงสร้างและแบบจำลองของสารกึ่งตัวนำ (กำแพงศักย์ที่เกิดจากการดูดกลืนออกซิเจน)

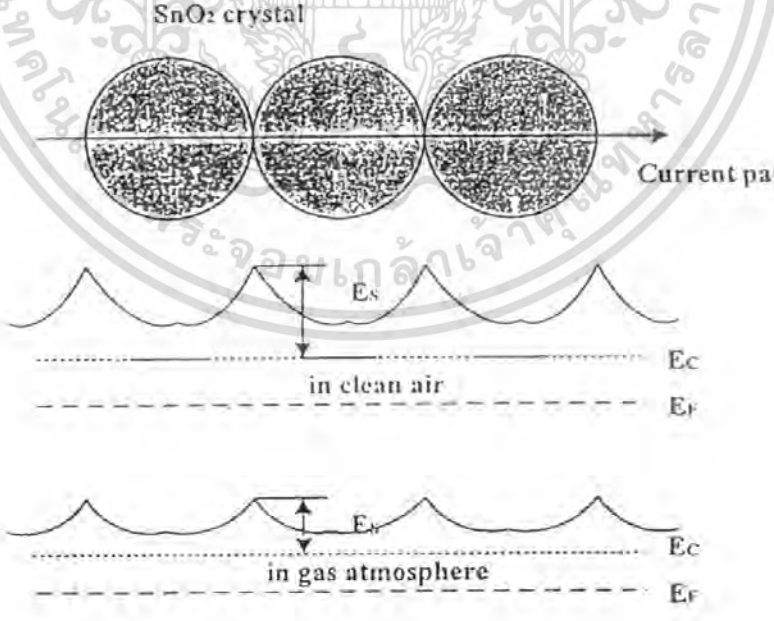
(ก) แบบจำลองทางฟิสิกส์

(ข) แบบจำลองแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 แบบจำลองกำแพงศักย์ที่ขอบเกรน



รูปที่ 2.35 กำแพงศักย์ตามทางเดินกระแสในทินออกไซด์ก๊าซเซนเซอร์
(ผลึกมีขนาดน้อยกว่า สองเท่าของ Debye length)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.18 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างทินออกไซด์กับก๊าซต่างๆ

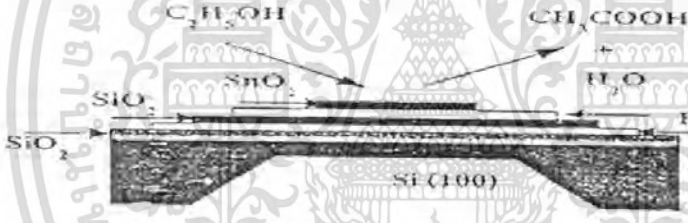
เราจะแบ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ 2 แบบ โดยดูได้จากว่าความต้านทานของทินออกไซด์ลดลงหรือเพิ่มขึ้น

2.18.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน ก๊าซทดสอบจะถูกออกซิไดซ์ (ให้อิเล็กตรอนแก่ทินออกไซด์) และทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานของทินออกไซด์ลดลง ตัวอย่างของก๊าซและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจะเป็นดังสมการที่ (2.4),(2.5) และ (2.6)

- เอทิลแอลกอฮอล์ C_2H_5OH

$$C_2H_5OH + 2O^-_{ads} \rightarrow CH_3COOH + H_2O + 2e^- \qquad (2.4)$$



รูปที่ 2.36 การตรวจจับ C_2H_5OH ของทินออกไซด์ จะได้ CH_3COOH และ H_2O

- คาร์บอนมอนอกไซด์ CO

$$CO + O^-_{ads} \rightarrow CO_2 + e^- \qquad (2.5)$$

- มีเทน CH_4

$$CH_4 + 4O^-_{ads} \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 4e^- \qquad (2.6)$$

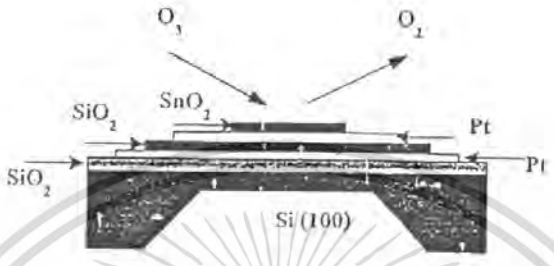
2.18.2 ปฏิกิริยารีดักชัน

ในปฏิกิริยารีดักชัน ก๊าซทดสอบจะถูกรีดิวซ์ (ดึงอิเล็กตรอนจากทินออกไซด์) และทำหน้าที่เป็นตัวออกไซด์ ซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานของทินออกไซด์เพิ่มขึ้น ตัวอย่างของก๊าซและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจะเป็นดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โอโซน O_3

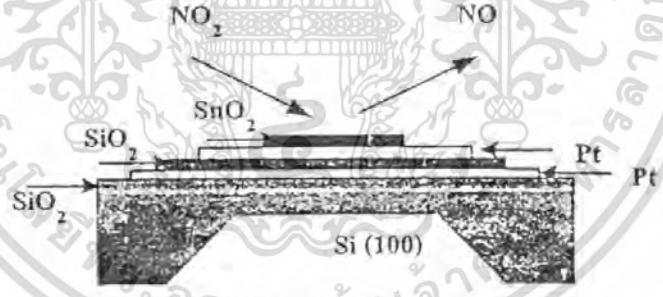
$$O_3 + e^- \rightarrow O_2 + O^-_{ad} \qquad (2.7)$$



รูปที่ 2.37 การตรวจจับ O_3 ของทินออกไซด์ จะได้ O_2

-ไนตรัส NO_2

$$NO_2 + e^- \rightarrow NO + O^-_{ad} \qquad (2.8)$$



รูปที่ 2.38 การตรวจจับ NO_2 ของทินออกไซด์ จะได้ NO

2.19 การปรับปรุงความไวในการตอบสนองโดยการเติมตัวแคทตะลิสท์

ตัวแคคตะลิส (Catalyst) คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวเองไม่เปลี่ยนแปลง และไม่ได้เปลี่ยนพลังงานอิสระของปฏิกิริยา แต่ทำให้พลังงานกระตุ้นมีค่าต่ำลง โดยรูปที่ 2.38 จะแสดงปรากฏการณ์ที่ผิวสัมผัสเมื่อเติมตัวแคทตะลิสท์

จุดประสงค์โดยทั่วไปของการเติมตัวแคทตะลิสท์ ก็เพื่อเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อก๊าซ ลดเวลาในการตอบสนองและการฟื้นตัว ตัวแคทตะลิสท์ที่นิยมใช้ทั่วๆ ไปก็จะเป็นสารพวกโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างเซ็นเซอร์

กระบวนการสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนียมีขั้นตอนดังนี้

- การเตรียมแผ่นฐานรองอะลูมินา
- การสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองอะลูมินา
- ขั้นตอนการสร้างลวดลายตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย
- ขั้นตอนการสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย

3.1 การเตรียมแผ่นฐานรองอะลูมินา

นำแผ่นอะลูมินา ที่เตรียมไว้นำมาตัดเป็นแผ่นด้วยปากกาหัวเพชรให้มีขนาด 1.5 ซม. x 0.7 ซม. ดังรูป

รูปที่ 3.1 แผ่นอะลูมินาที่จะนำมาตัด

รูปที่ 3.2 แผ่นอะลูมินาที่ตัดแล้วขนาด 1.5 ซม. x 0.7 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดแล้วไปทำความสะอาดด้วยเอทานอลและอะซีโตน โดยใช้เครื่องอุลตร้าโซนิคใช้เวลา 15 นาที

รูปที่ 3.3 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค

ข้อควรระวังในการตัดนั้นเนื่องจากแผ่นอะลูมินา มีความเปราะบางเป็นอย่างมาก ดังนั้นเวลาตัดจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดตามที่เราต้องการ

3.2 การสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์บนฐานรองอะลูมินา

เราจะทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ด้วยวิธี Thermal CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ บนฐานรองอะลูมินา โดยจะประกอบไปด้วยขั้นตอนและวิธีการดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1. ท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา (chamber)
2. กระบอกแก้วสำหรับใส่สารละลาย
3. แอลกอฮอล์ (Ethanol)
4. ผงเฟอโรเซน (Ferrorence)
5. ผงดีบุกคลอไรด์($SnCl_2$)
6. ถังเก็บก๊าซอาร์กอน (Ar)
7. แผ่นอะลูมินาขนาด 1.5 ซม. x 0.7 ซม.
8. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง
9. เครื่องทำให้เป็นอะตอม (Atomizer)
10. เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)
11. เทอร์โมคับเปิล (Thermo couple)
12. นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ขั้นตอนและวิธีทำการสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์

3.2.2.1 การเตรียมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา

โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยในการสร้างนี้ ใช้ ผงฟลูโรเซนเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะถูกนำไปผสมกับดีบุกคลอไรด์และแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล ขั้นตอนและวิธี การเตรียมสารโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้ โดย เริ่มต้นจากการคำนวณอัตราส่วนน้ำหนักของแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลกับผงฟลูโรเซนและผงดีบุกคลอไรด์ตามเงื่อนไข คือ ผงฟลูโรเซนและผงดีบุกคลอไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อน้ำหนักของเอทานอลที่ใช้ ส่วนอัตราส่วนของผงฟลูโรเซนและผงดีบุกคลอไรด์ ที่ใช้ผสมกับเอทานอลจะเป็น 1:0:100, 0.50:0.50:100, 0.25:0.75:100 และ 0:1:100 จากนั้นนำไปอุลตร้าโซนิคด้วยเครื่องอุลตร้าโซนิคเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ผงฟลูโรเซน ดีบุกคลอไรด์และแอลกอฮอล์ละลายเข้ากัน

(ก)

(ข)

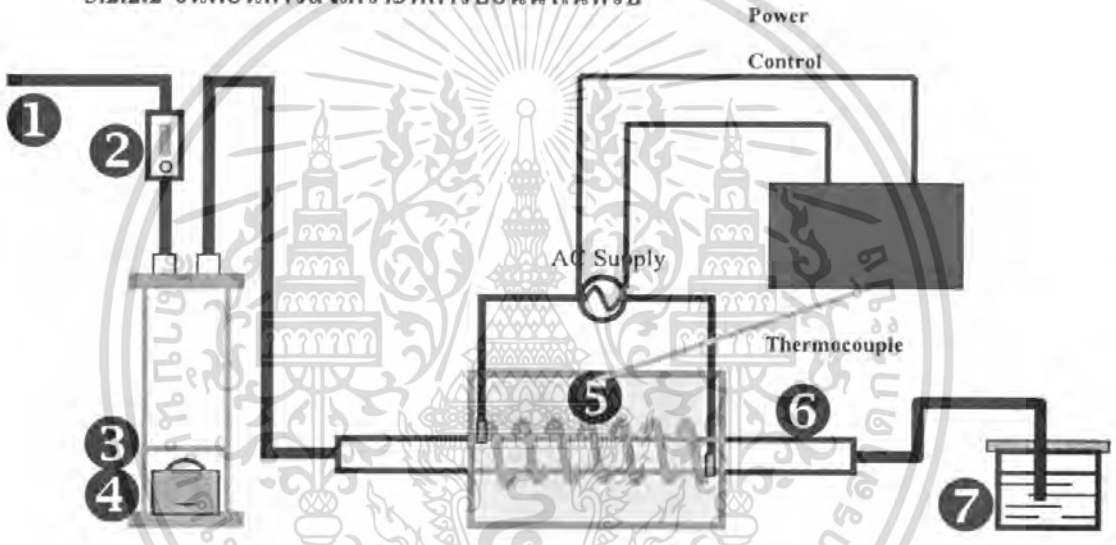
(ค)

(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา
(ก) ขั้นตอนการนำแอลกอฮอล์มาชั่งน้ำหนัก
(ข) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนมาชั่งน้ำหนัก
(ค) ขั้นตอนการนำผงดีบุกคลอไรด์มาชั่งน้ำหนัก
(ง) ขั้นตอนการนำผงฟลูโรเซนและผงดีบุกคลอไรด์ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์มาอัลตราโซนิก

3.2.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์



(1) ช่องทางเข้าของก๊าซนำพา (2) เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ
(3) สารละลาย (4) เครื่อง Atomizer (2 MHz)
(5) ฮีตเตอร์ (6) ท่อแก้ว
(7) น้ำ

รูปที่ 3.5 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์

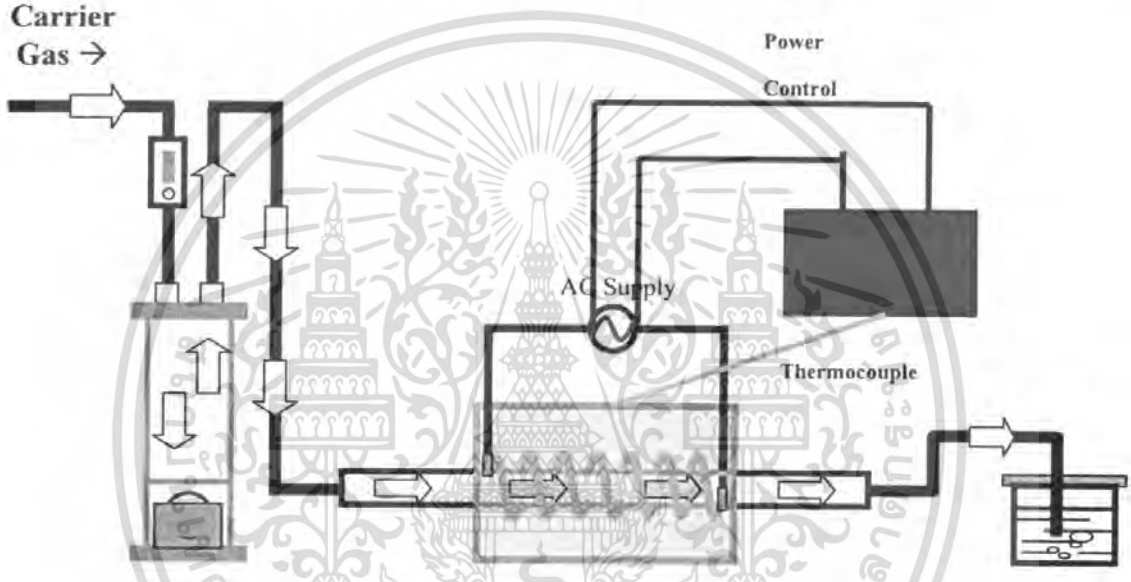
จากรูปที่ 3.5 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในเชิงปริมาณ ซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซอาร์กอน (Ar) ใช้เป็นก๊าซนำพา, Flow meter ใช้ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน, เฟอโรเซนและดีบุกคลอไรด์ ใช้เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะถูกผสมผงในแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน, เครื่อง Atomizer (2 MHz) ใช้เป็นตัวทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผสมในแอลกอฮอล์กลายเป็นละออง, ท่อแก้ว ภายในใช้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chamber หรือห้องในการทำปฏิกิริยา, ฮีตเตอร์ ใช้เป็นตัวให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยา, น้ำ ใช้ป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกไหลย้อนเข้ามาภายในระบบ

ในส่วนของชิ้นงานนั้นเราจะใส่เข้าไปในหลอดแก้วที่ตำแหน่ง 10 ซม. และ วัดจากตรงจุดกึ่งกลางของฮีตเตอร์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทดลองแล้วว่าเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ดีที่สุด

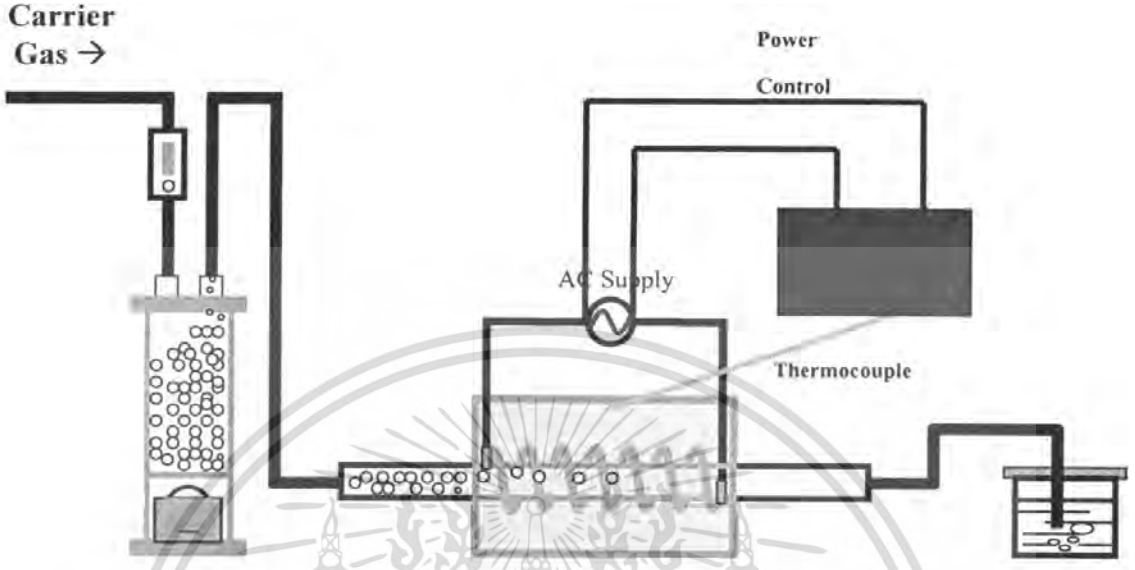
โดยในการสร้างเริ่มแรกจะต้องทำการไล่อากาศภายใน Chamber ออกเสียก่อน เพื่อมิให้เกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศ (oxidize) ในขณะที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กระบวนการไล่อากาศออกจากระบบ

จากรูปที่ 3.6 เราจะเริ่มทำการปล่อยก๊าซนำพาให้ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลเข้าไปในกระบอกแก้วซึ่งภายในบรรจุ ฟลูโรเซนและดีบุกคลอไรด์ ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ ที่อัตราการไหล 1 L/min เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ โดยในระหว่างนี้จะเปิดฮีตเตอร์ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 20 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์

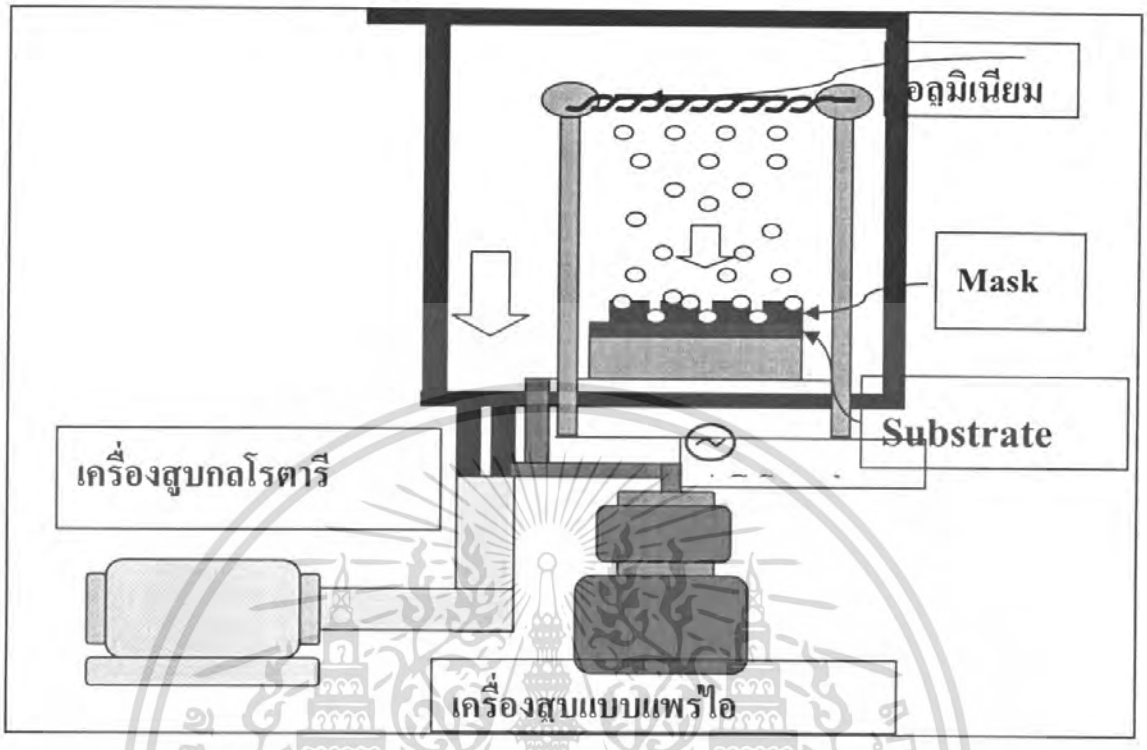
จากรูปที่ 3.7 เมื่อได้อุณหภูมิที่ 700 องศาเซลเซียสแล้ว จากนั้นจึงเปิดเครื่อง Atomizer เพื่อทำให้ ฟลูโรเซนและดีบุกคลอไรด์ ที่ผสมอยู่กับแอลกอฮอล์ เป็นละอองหมอกลอยขึ้นไปตามท่อแก้ว และลงไปในท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องในการทำปฏิกิริยา ในขั้นตอนการสังเคราะห์นี้จะใช้เวลา 20 นาที จากนั้น เมื่อครบตามกำหนดเวลาจึงทำการปิดเครื่อง Atomizer และ Heater รอให้ระบบเย็นลง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ออกมา เพื่อนำไปวัดผลการเกิดทิวบ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทำเป็นหัววัดตรวจจับก๊าซแอมโมเนียต่อไป

3.3 ขั้นตอนการสร้างลวดลายตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย

ในการสร้างลวดลายนั้นเราจะใช้แผ่นลายสำเร็จรูป (Hard mask) ที่เหมาะในการสร้างเป็นลวดลายตรวจจับก๊าซ โดยใช้เทคนิคระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ(thermal evaporation) ด้วยเครื่อง Evaporator โดยการทำลวดลายและขั้วไฟฟ้านั้นจะใช้อะลูมิเนียมเป็นสารที่ใช้เคลือบบนแผ่นฐานรอง โดยจะทำการสร้างลวดลายบนฐานรองหลังการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์

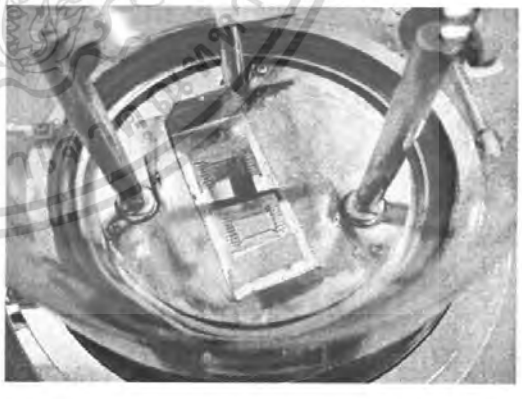
โดยมีวิธีการคือ วางแผ่นลายสำเร็จรูปบนชิ้นงานแล้ววางบนถาดรองแล้วใส่ไปในโถแก้วที่ถูกดูดอากาศออกจนหมด จากนั้นจึงให้ความร้อนแก่ขดลวดทังสเตนที่อยู่ในโถแก้ว ซึ่งใส่เส้นลวดอะลูมิเนียมไว้ภายในขดลวดทังสเตน เพื่อให้อะลูมิเนียมละลายกลายเป็นละอองหมอกแล้วปล่อยให้ตกลงบนชิ้นงาน ก็จะได้ลวดลายตามแบบแผ่นลายสำเร็จรูป(Hard mask)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แบบจำลองกระบวนการ Evaporation

รูปที่ 3.9 เครื่อง Evaporator



รูปที่ 3.10 การวางชิ้นงานภายในโถแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย

ในขั้นตอนนี้จะทำการต่อขั้วไฟฟ้าออกมาจากชิ้นงานที่ทำการปลูกทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ที่ทำลวดลายแล้วโดยใช้กาวเงิน ลวดนำไฟฟ้า ต่อสายสัญญาณออกมาเพื่อทำเป็นขั้ววัด

เราจะเห็นว่าที่ขั้วทั้งสองข้างของชิ้นงานเราจะทำการทากาวเงิน เพื่อที่จะทำการต่อสายสัญญาณออกมา โดยในขั้นตอนนี้ต้องระวังเรื่องของลวดลายตรวจวัดที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นสารเคลือบ เพราะว่าลายอาจหลุดได้หากไม่ระวัง การต่อสายสัญญาณที่ขั้วที่ทากาวเงินไว้แล้ว โดยจะสร้างอยู่บนแผ่นวงจรสำเร็จรูป เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปวัดผล ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องตรวจสอบสายสัญญาณที่ต่อกับขั้วว่าสนิทหรือไม่เพื่อป้องกันข้อผิดพลาด เมื่อนำไปวัดเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซ

รูปที่ 3.11 หัวตรวจวัดที่พร้อมทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

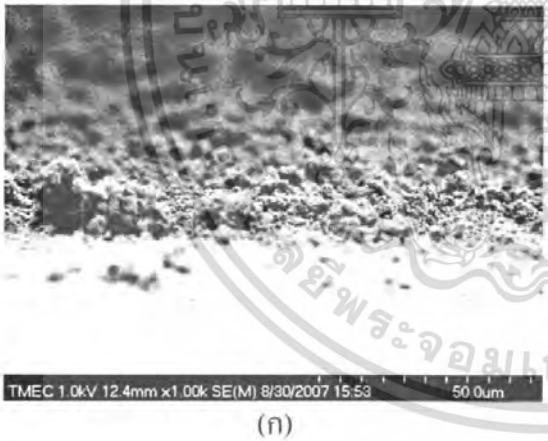
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

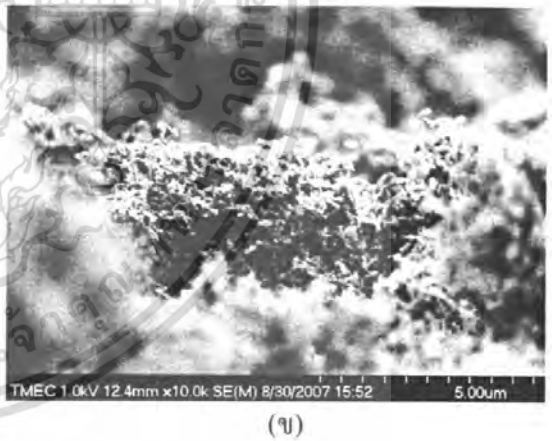
4.1 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์- ดีบุกออกไซด์

การสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์- ดีบุกออกไซด์ บนฐานรองอะลูมินาที่นำมาสร้างหัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย สังเคราะห์ด้วยวิธีการ ซีวีดี (Chemical Vapor Deposition : CVD) ที่ความดัน 1 บรรยากาศโดย ใช้เอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เฟอโรเซน (Ferrocence) เป็นโลหะเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Participles)และดีบุกคลอไรด์($SnCl_2$)เพื่อสร้างชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์ (SnO_2)สำหรับการปลูกนั้นใช้เงื่อนไขเฟอโรเซน ผสมกับดีบุกคลอไรด์ ด้วยอัตราส่วนต่างกัน ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อน้ำหนักของเอทานอล ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องอุลตร้าโซนิคโดยมีเอทานอลเป็นตัวทำละลาย ในขั้นตอนการปลูกเราใช้เครื่อง Atomizer ช่วยในการสร้างหมอกของสารละลาย โดยใช้ก๊าซอาร์กอน 100 % เป็นก๊าซนำพา

4.2 ผลการทดลอง

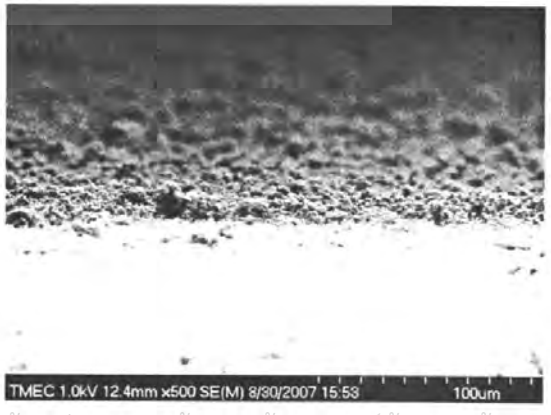


(ก)



(ข)

(ค)



(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

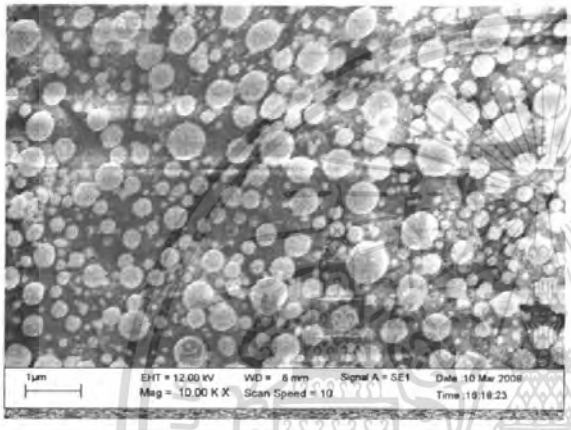
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมของ Ferrocene 1% $SnCl_2$ 0%

(ก) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 1 k

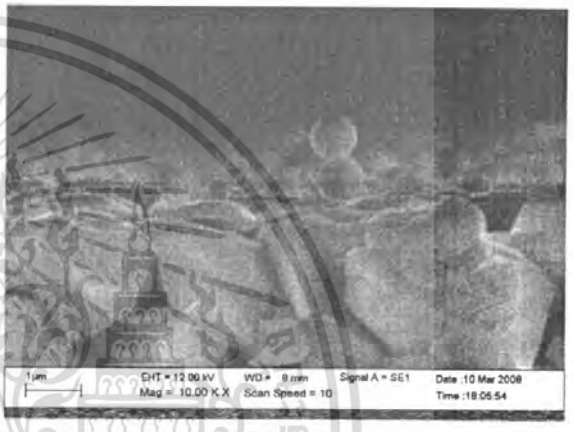
(ข) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 10 k

(ค) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 30 k

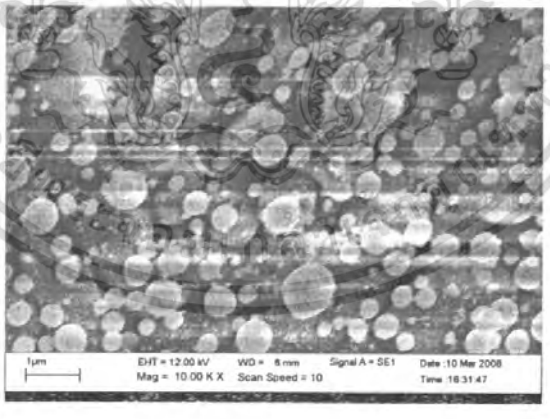
(ง) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 500



(ก)



(ข)



(ค)

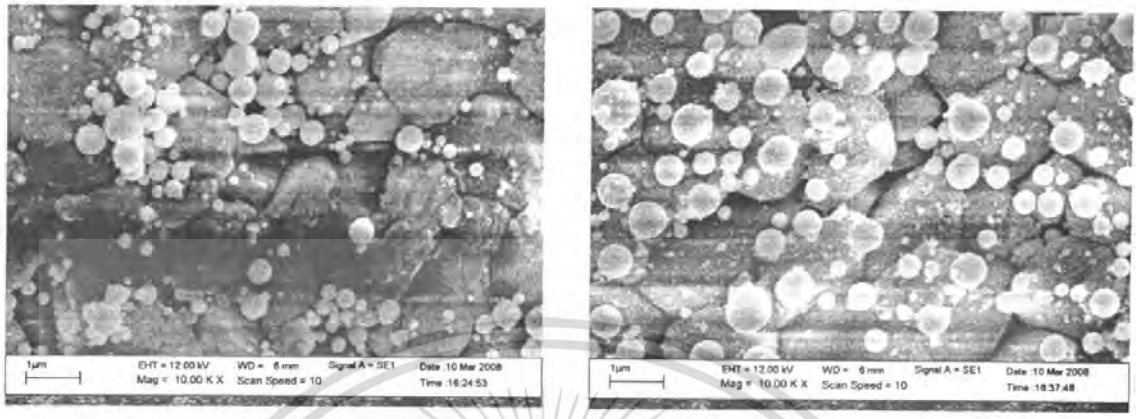
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมของ Ferrocene 0.25% $SnCl_2$ 0.75%

(ก) ภาพถ่ายแบบ Surface ที่อัตราขยาย 10 k

(ข) ภาพถ่ายแบบ cross ที่อัตราขยาย 10 k

(ค) ภาพถ่ายแบบ Surface ที่อัตราขยาย 10 k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของอะลูมินาที่อัตราส่วนผสมของ Ferrocene 0.5% $SnCl_2$ 0.5%
(ก) ภาพถ่ายแบบ Surface ที่อัตราขยาย 10 k
(ข) ภาพถ่ายแบบ Surface ที่อัตราขยาย 10 k

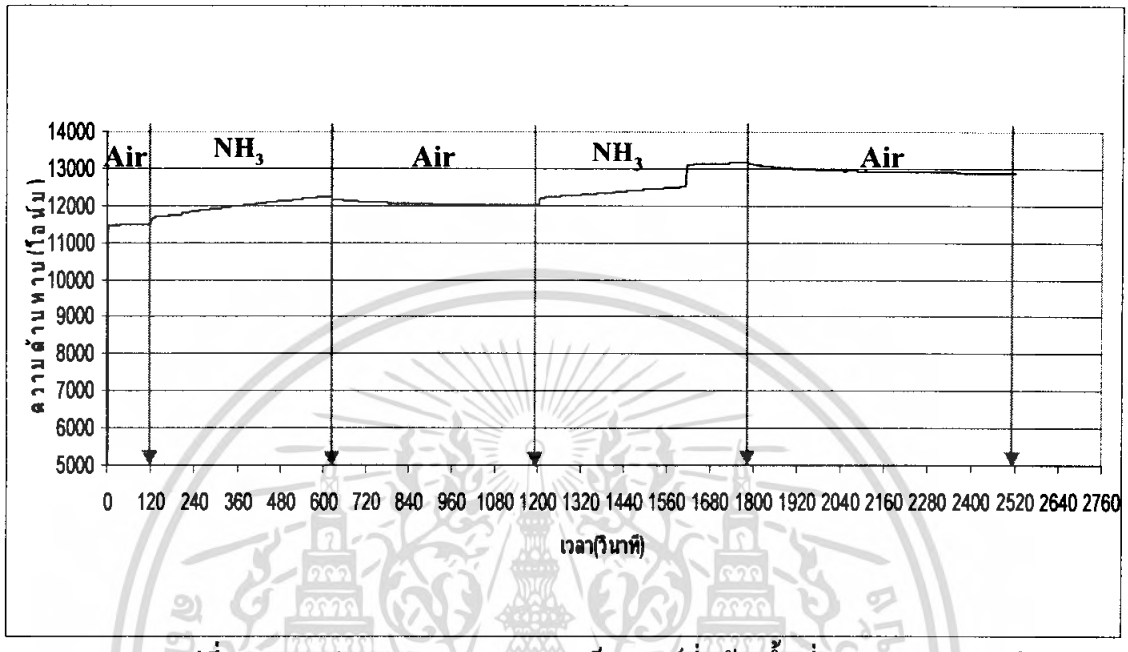
4.3 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิห้อง

ในการทดสอบก๊าซแอมโมเนียนั้นเราจะใช้ขวดทดลองขนาด 280 ซีซี และใส่แอมโมเนียความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 10 ซีซี ปิดฝาให้สนิท จากนั้นทำการวัดความต้านทานของหัวตรวจวัดกับอากาศที่อุณหภูมิห้องจนความต้านทานคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก จากนั้นเปิดฝาขวดทดลองใส่หัวตรวจวัดลงไปแล้วบันทึกค่าความต้านทานของหัวตรวจวัดที่เปลี่ยนไปจนค่าความต้านทานเริ่มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แล้วจึงนำหัวตรวจวัดออกมาจากขวดทดลอง วัดความต้านทานกับอากาศที่อุณหภูมิห้องอีก แล้วสลับกับการวัดแอมโมเนีย บันทึกค่าแล้วนำไปวาดกราฟ

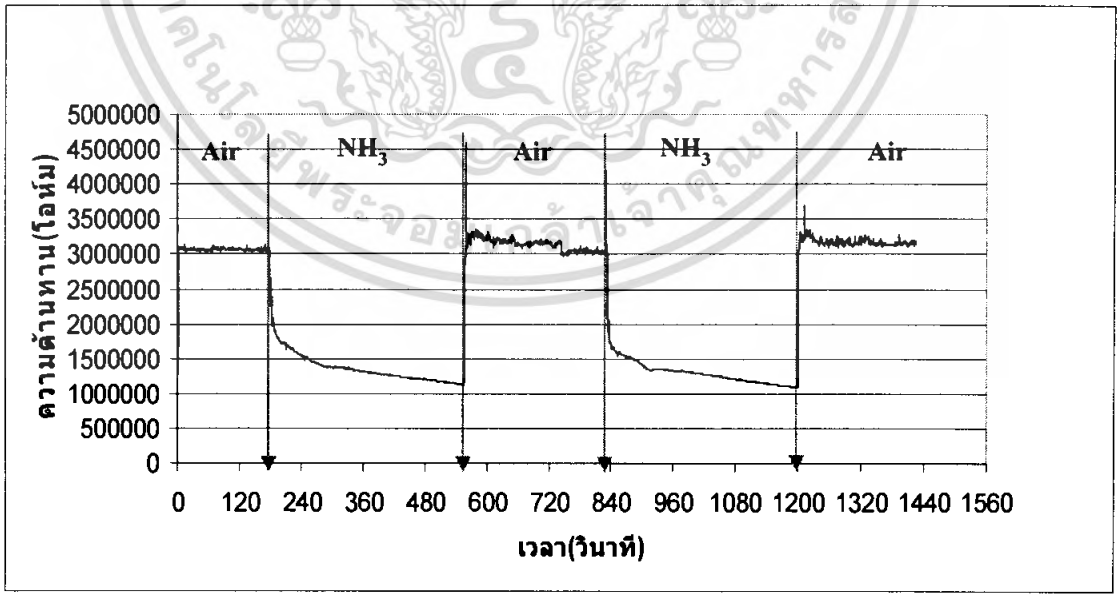
รูปที่ 4.4 การทดสอบแอมโมเนียทดสอบโดยใช้ขวดทดลองขนาด 280 ซีซี และใช้แอมโมเนียปริมาณ 10 ซีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบก๊าซแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณหภูมิห้อง (28° C)

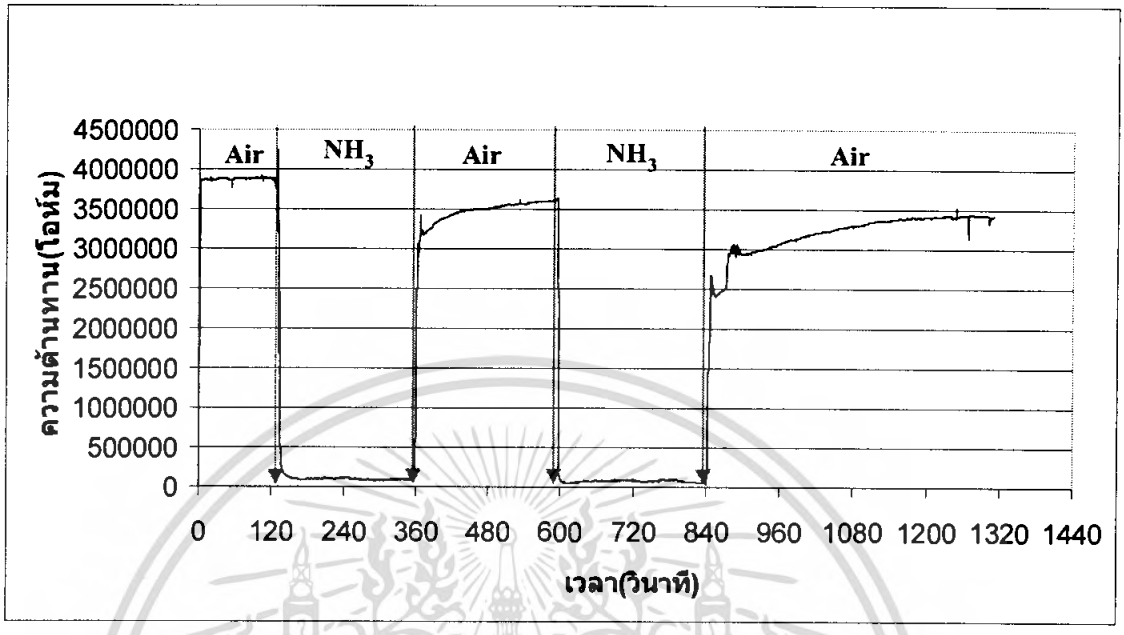


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน Ferrocene 1 % $SnCl_2$ 0 % ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณภูมิห้อง (28° C)

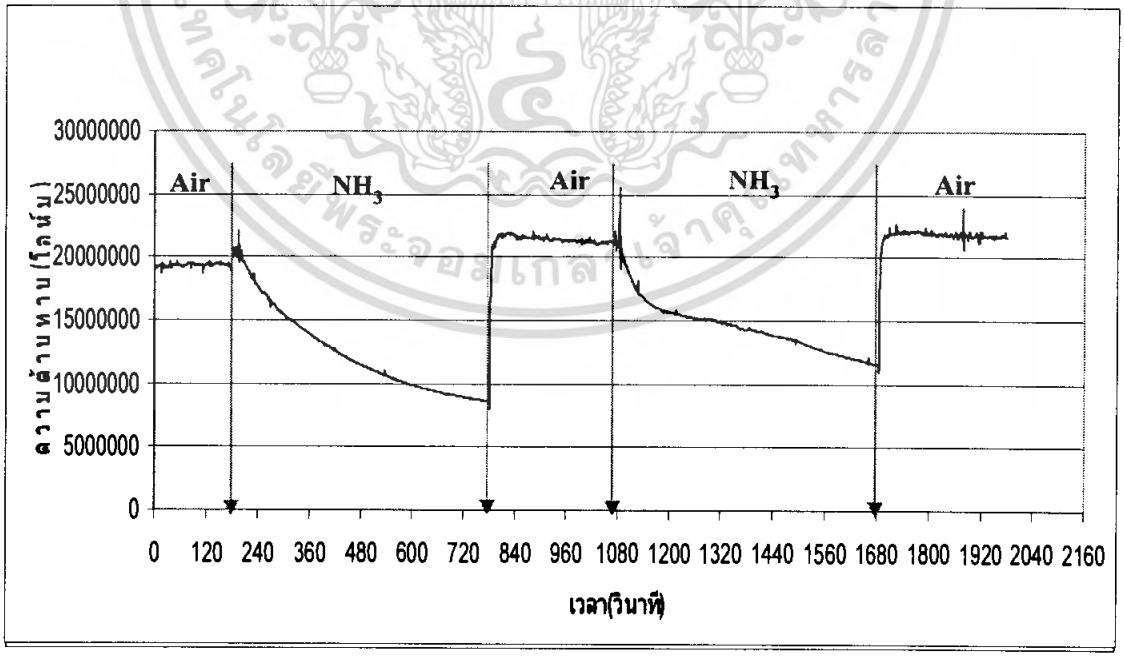


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน Ferrocene 0.5 % $SnCl_2$ 0.5 % ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณภูมิห้อง (28° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

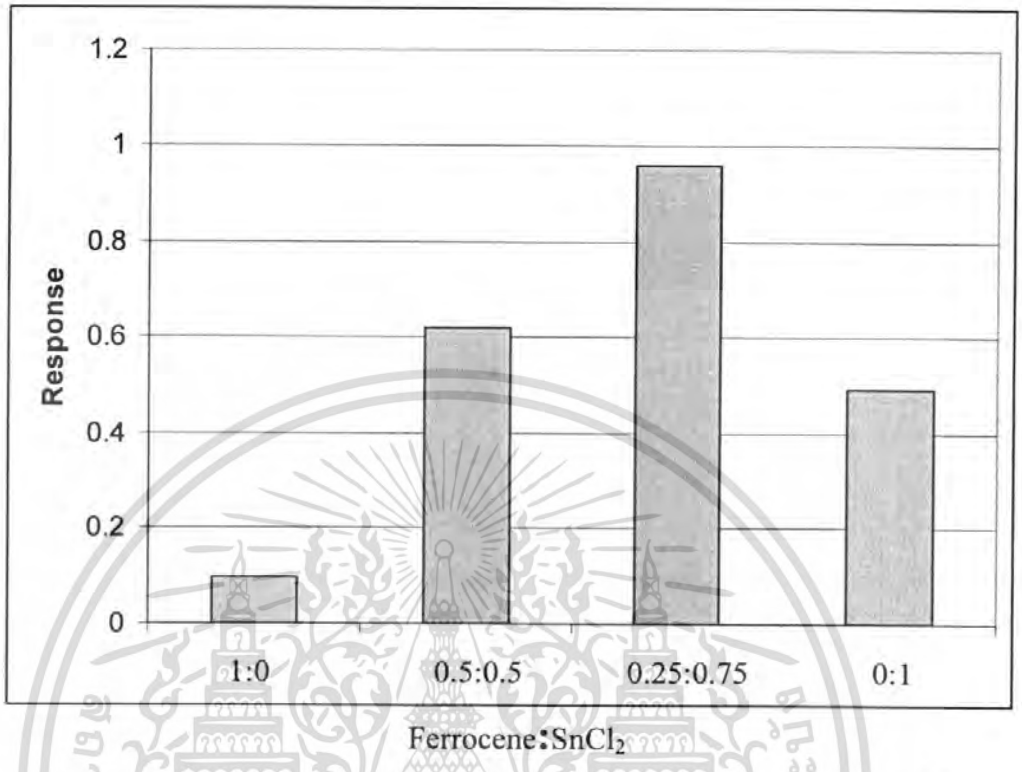


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน Ferrocene 0.25 % $SnCl_2$ 0.75 % ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณภูมิห้อง (28° C)

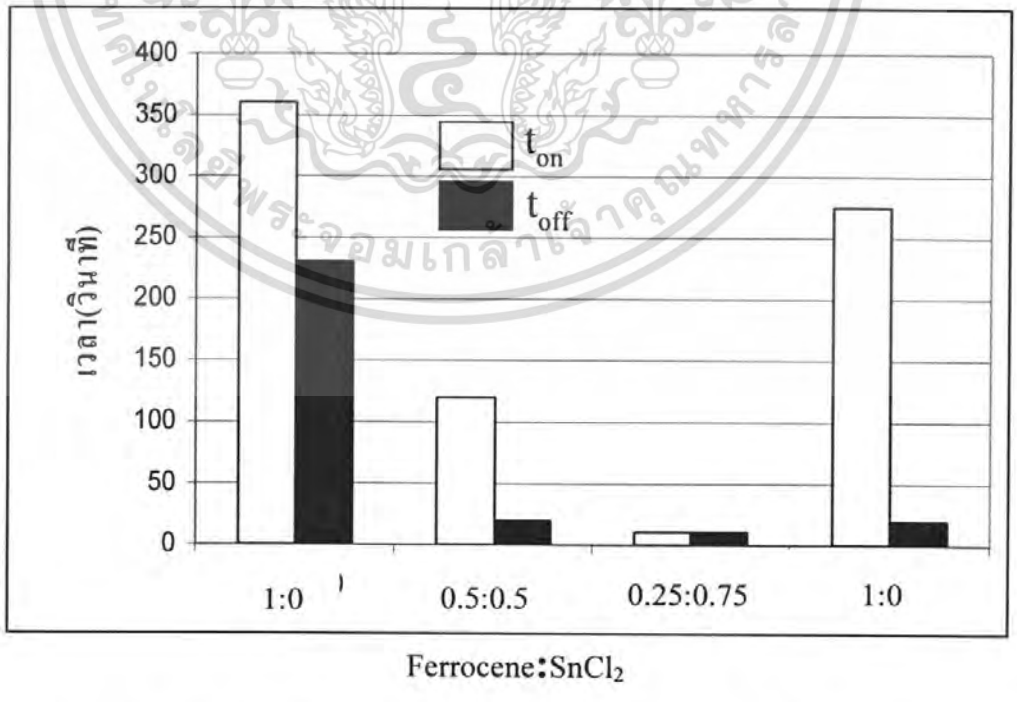


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นที่สารละลายอัตราส่วน Ferrocene 0 % $SnCl_2$ 1 % ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณภูมิห้อง (28° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



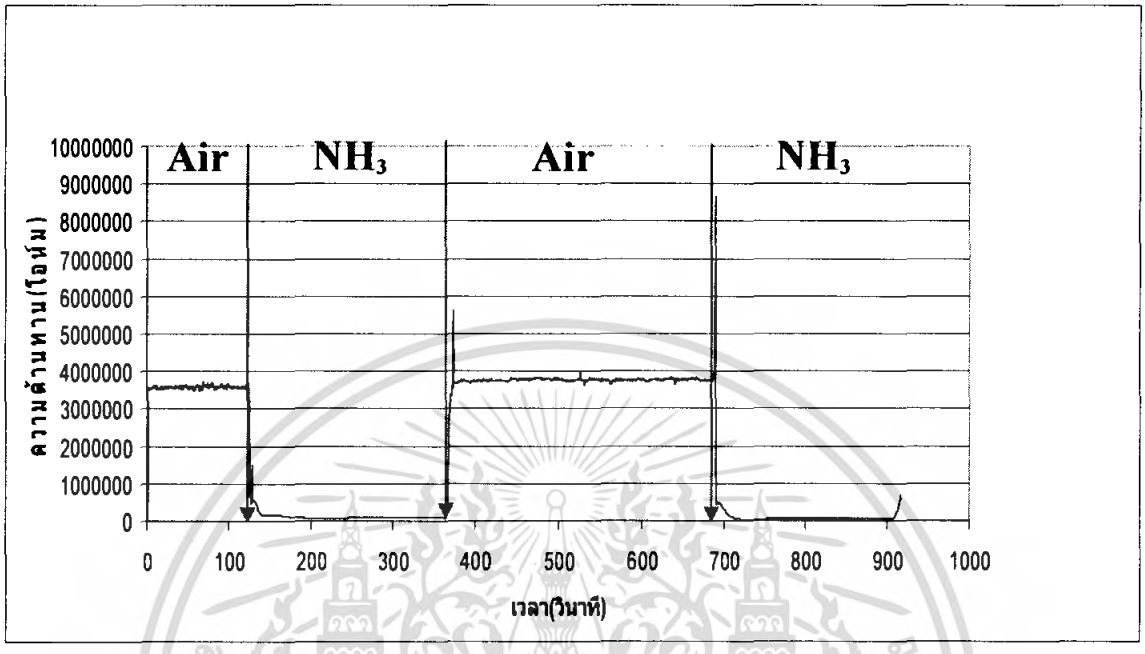
รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงค่า Response ของเซ็นเซอร์แต่ละตัวในรูปที่ 4.5-4.8



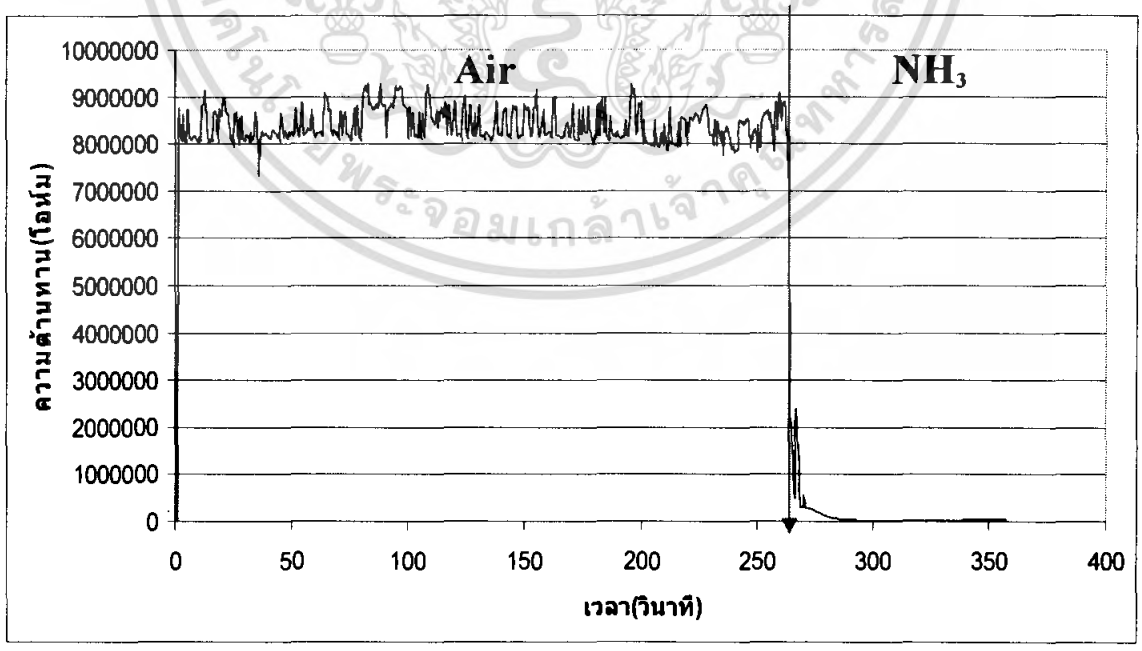
รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงค่า t_{on} และ t_{off} ของเซ็นเซอร์ในรูปที่ 4.5-4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่างๆ

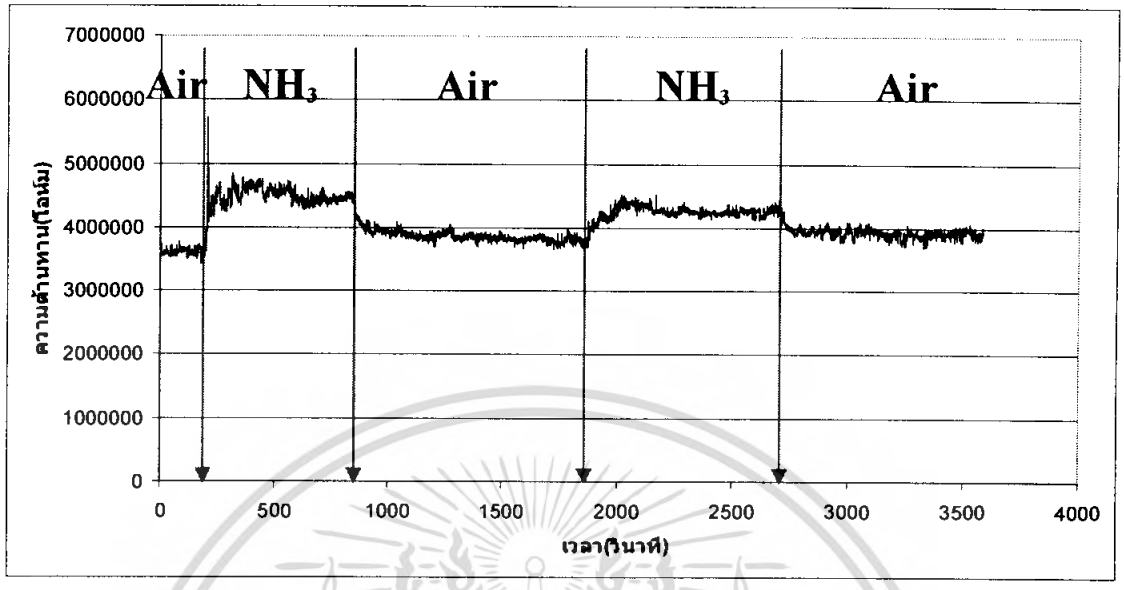


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 50° C



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 100° C

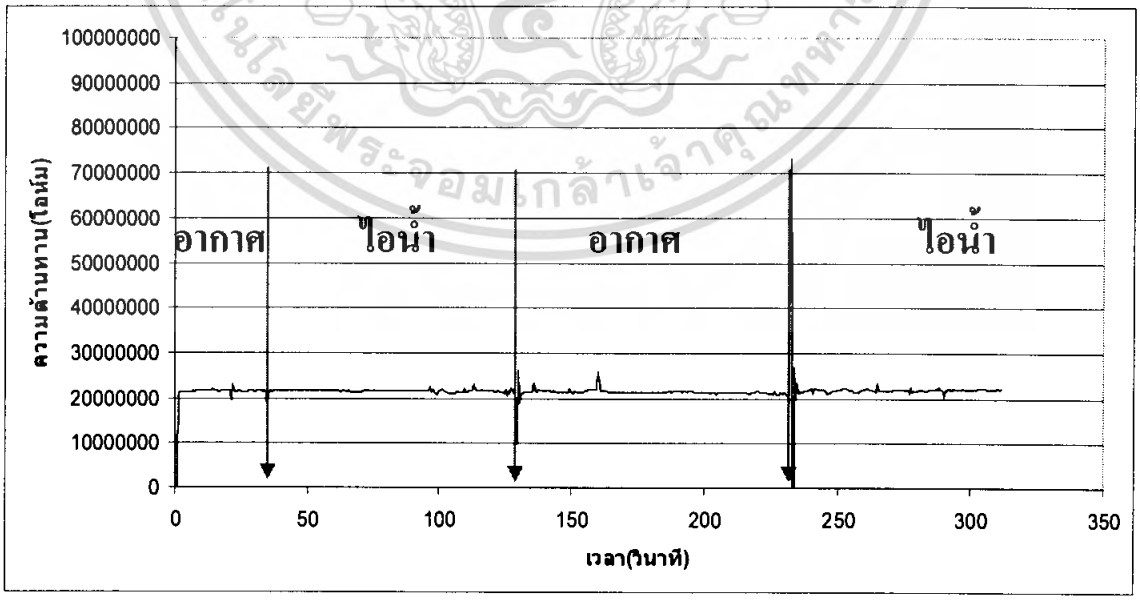
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อไอแอมโมเนียอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 0° C

4.6 การทดสอบน้ำ (H_2O)

ใช้วิธีการเดียวกับการวัดแอมโมเนีย ใช้น้ำปริมาณ 10 ซีซี ปล่อยทิ้งไว้ให้กลายเป็นไอที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงทำการวัด ได้ผลดังกราฟ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อไอน้ำที่อุณหภูมิห้อง (28° C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดสอบก๊าซแอลพีจี

4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- ก๊าซไนโตรเจน ทำหน้าที่เป็นก๊าซพาก๊าซแอลพีจีเข้ามาเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซแอลพีจีตามที่ต้องการ

- DAQ board (Data acquisition board) เป็นบอร์ดที่ใช้เชื่อมสัญญาณการควบคุม Mass-Flow controller กับเครื่องคอมพิวเตอร์

- Mass-Flow controller ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน โดยมีการควบคุมอัตราการไหลมากที่สุดคือ 5000 sccm และ 200 sccm ('standard cubic centimeter per minute: ลูกบาศก์เซนติเมตรมาตรฐาน')

- เครื่องมือวัดอัตราการไหล (flow meter) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีเข้าไปในภาชนะที่ใช้บรรจุเซ็นเซอร์ โดยมีอัตราการไหล 800 ลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- เครื่องมือวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ดังรูปที่ 4.16

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายเครื่องวัดและจ่ายแรงดัน/กระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ภาชนะที่ใช้บรรจุเซ็นเซอร์ ซึ่งมีปริมาตร 886 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภาชนะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อเชื่อมเซ็นเซอร์กับเครื่องมือวัด Keithley รุ่น 2400 ดังรูปที่ 4.16

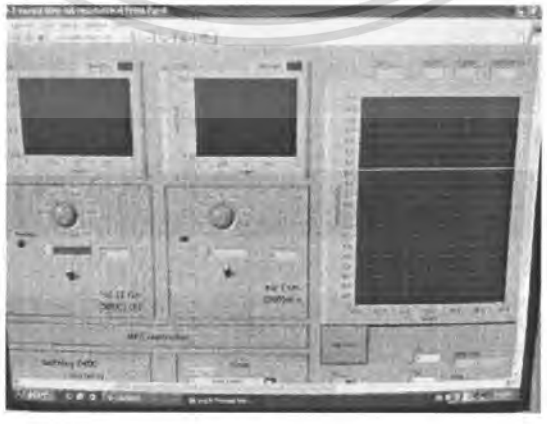
- เครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ติดต่อเครื่อง มือวัด Keithley รุ่น 2400 และ DAQ board ด้วย โปรแกรม LabView Version 7.1 ในเพื่อบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวเซ็นเซอร์เมื่อทดสอบด้วยก๊าซแอลพีจี

- เครื่องจ่ายกระแสให้ฮีตเตอร์ 2 เครื่อง

- ปั๊มดูดก๊าซและเครื่องแปลงไฟฟ้าสลับจาก 220 โวลล์ เป็น 110 โวลล์ ซึ่งทำหน้าที่ดูดก๊าซแอลพีจีและก๊าซไนโตรเจนออก ดังรูปที่ 4.18

รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายปั๊มดูดก๊าซและเครื่องแปลงไฟฟ้า

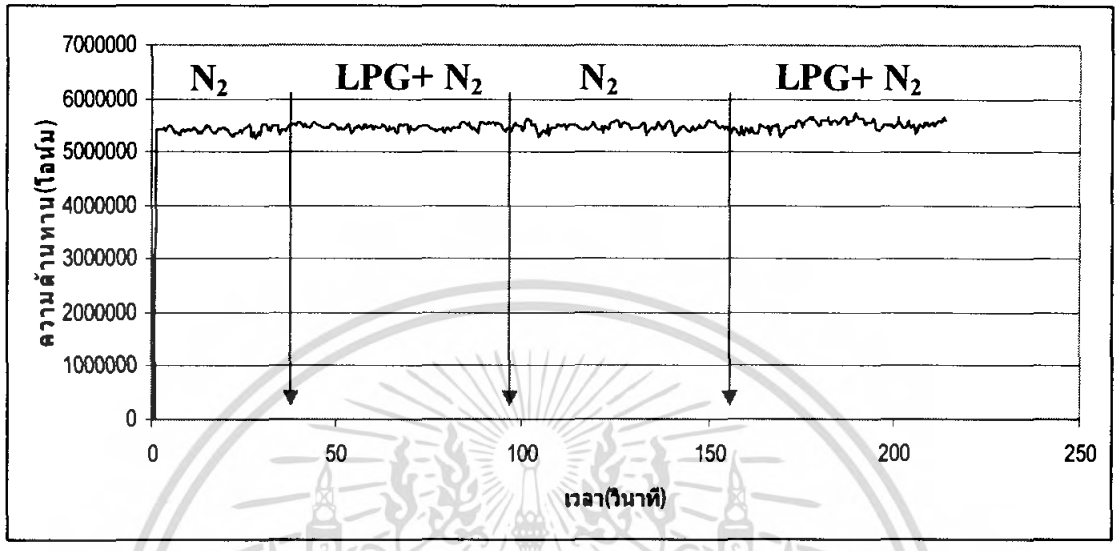
- โปรแกรมทดสอบ ในที่นี้ใช้ โปรแกรม Lab View Version 7.1 เป็นตัวควบคุมการเปิดปิดและปริมาณของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซแอลพีจี



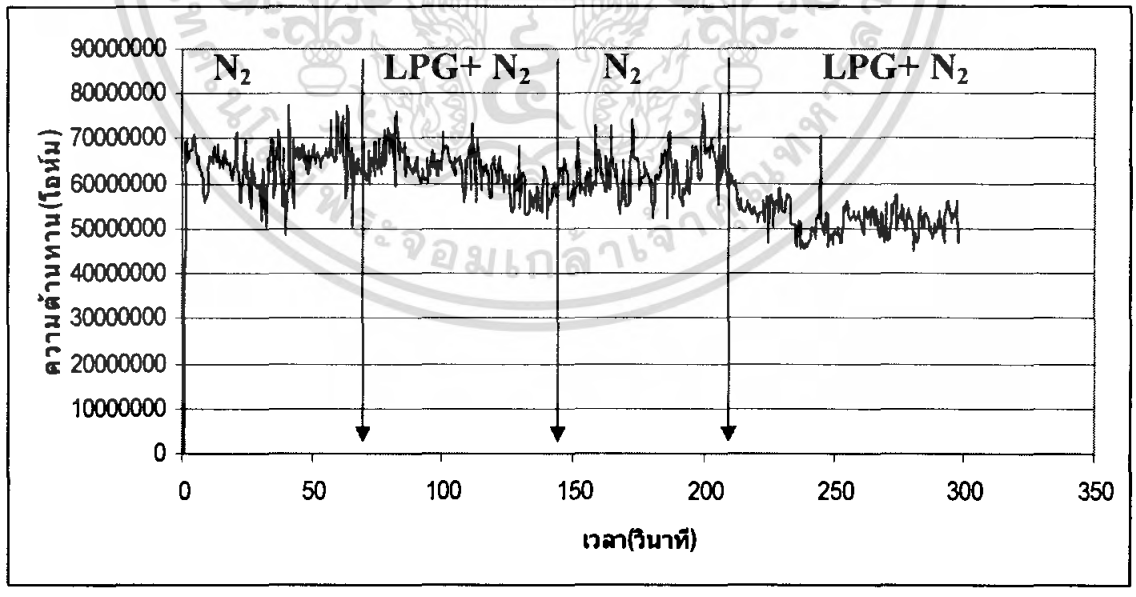
รูปที่ 4.18 ภาพโปรแกรม Lab View

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการทดสอบก๊าซแอลพีจี



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อก๊าซ LPG 6.42% ที่อุณหภูมิห้อง (28° C)



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการทดสอบเซ็นเซอร์ที่สร้างที่อัตราส่วน Ferrocence : $SnCl_2$ 0.5% : 0.5% ต่อก๊าซ LPG 6.42% ที่อุณหภูมิ 300° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และชั้นฟิล์มดีบุกออกไซด์บนฐานรองอะลูมินา

จากผลการ SEM ที่อัตราขยายต่างๆกันจะเห็นว่าเกิด SnO_2 ที่พื้นผิวของอะลูมินาลักษณะเป็นก้อนคล้ายกรวดกระจายอยู่ทั่วไปแต่มองไม่เห็นทิวบ์ที่อัตราส่วนของ Ferrocene 0.5% SnO_2 0.5% และที่อัตราส่วนของ Ferrocene 0.25% SnO_2 0.75% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอัตราส่วนของ Ferrocene ที่อาจจะน้อยเกินไป ทำให้ไม่เกิดทิวบ์ ซึ่งวิธีทดสอบก็คือลองเพิ่มปริมาณของ Ferrocene ให้มากขึ้นอาจเป็น 1% เท่าเดิม แล้วลองเปลี่ยนค่าปริมาณของ $SnCl_2$ที่อัตราส่วนต่างๆกัน

5.2 สรุปผลจากการทดสอบแอมโมเนีย

จากการทดสอบแอมโมเนียในขวดทดลองขนาด 280 ซีซี ปริมาณ 10 ซีซี ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 30 เปอร์เซ็นต์ วัดค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้องได้ผลการทดลองตามกราฟในบทที่ 4 สามารถสรุปได้ว่า

- **ที่อัตราส่วน Fe 1% $SnCl_2$ 0%** จากกราฟที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยากับแอมโมเนียที่น้อยมาก และมีค่า sensitivity น้อยที่สุด

- **ที่อัตราส่วน Fe 0% $SnCl_2$** 1% ค่าความต้านทานมีแนวโน้มลดลงตามเวลาเรื่อยๆและใช้เวลานานที่ความต้านทานจะคงที่ แต่มีการ recovery ที่เร็ว และมีค่าความต้านทานเมื่อ recovery กลับมา

- **ที่อัตราส่วน Fe 0.5% $SnCl_2$ 0.5%** จากกราฟที่ได้จะเห็นว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่คงที่คือใช้เวลาในการ recovery ที่ใกล้เคียงกันและมีค่าความต้านทานที่ recovery กลับมา ใกล้เคียงกัน

- **ที่อัตราส่วน Fe 0.75% $SnCl_2$ 0.25%** มี sensitivity มากที่สุด ใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่เมื่อ recovery กลับมาความต้านทานจะลดลงทุกครั้งและใช้เวลานานในการกลับไปที่ค่า ความต้านทานเริ่มต้น

5.3 การทดสอบก๊าซแอมโมเนียที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟผลการทดลองในบทที่ 4 ที่อุณหภูมิ 0°C,50°C,100°C สามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เซ็นเซอร์มีอัตราการวัดที่ดีขึ้น ซึ่งจากผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดสอบน้ำ (H_2O)

จากการวัดไม่มีการตอบสนองต่อเซ็นเซอร์ สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิห้องจะไม่มีการตอบสนองต่อไอน้ำในขวดทดลองที่ใช้เซ็นเซอร์ของสารละลายที่อัตราส่วน Ferrocene 0.5 % $SnCl_2$ 0.5 % น้ำ 10 cc อุณหภูมิ 28°C

5.5 การทดสอบก๊าซแอลพีจี

จากกราฟที่อุณหภูมิ 28°C และ 300°C สรุปได้ว่า เซ็นเซอร์ของสารละลายที่อัตราส่วน Ferrocene 0.5 % $SnCl_2$ 0.5 % % N_2 1000 sccm LPG 68.6 sccm ไม่มีการตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ทรงศักดิ์ น้อยทรัพย์, "การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างง่ายด้วยวิธี CVD ที่ความดัน 1 บรรยากาศ" ปริญญานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548, หน้า 48-74

[2] "ท่อนาโนคาร์บอน ",http://www.technologymedia.com/articledetail.asp?arid=2484&pid=257

[3] วีกิจ ชื่นใจดี, "การสร้างแอมโมเนียเซ็นเซอร์โดยใช้ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์" ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549, หน้า 21-30, หน้า 78

[4] ศรีสัชนา เรืองเพชร, "การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น" วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550, หน้า 6-41

[5] สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์, จิติ หนูแก้ว."งานวิจัยการสังเคราะห์คาร์บอนนานโนทิวบ์โดยวิธี CVD", LAB.TO DAY. ปีที่46,สิงหาคม2546. หน้า 14-20

[6] S. Iijima, Nature(London) 354(1991) 56-58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้