

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์สำหรับแก๊สเซ็นเซอร์

Selective Growth of CNTs for Gas Sensors

โดย

นาย ชลอ แก้วพิชัย รหัส 48015157

นาย ชีรยุทธ์ ทองห้วน รหัส 48015209

260
82327
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82200
วัน,เดือน,ปี..... 9 ก.ค. 2551

**ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์สำหรับแก๊สเซ็นเซอร์

Selective Growth of CNTs for Gas Sensors



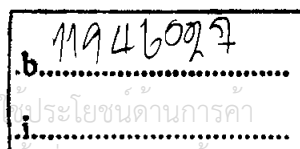
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับแก๊สเซ็นเซอร์

ผู้จัดทำ

นาย ชลอ แก้วพิชัย รหัส 48015157

นาย ชีรยุทธิ์ ทองห้วน รหัส 48015209



(รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับแก๊สเซนเซอร์

นายชลอ แก้วพิชัย รหัส 48015157

นายธีรยุทธ์ ทองหวั่น รหัส 48015209

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรภูท อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษากระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซจากคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอน ซึ่งทำการออกแบบลวดลายตัวอุปกรณ์โดยใช้เทคนิคโฟโตลิโทกราฟี และนำมาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน บนฐานรองซิลิคอนที่มีตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิล กระทำที่ความดันบรรยากาศ ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นก๊าซไฮโดรเจนผ่านแอลกอฮอล์ ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะนำมาวิเคราะห์ด้วย SEM, EDX, TEM, และ Raman Spectroscopy จากนั้น ทำการศึกษาถึงผลตอบสนองของก๊าซต่างๆ เช่น ไอรอะเทของแอลกอฮอล์ ไฮโดรเจน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Selective Growth of CNTs for Gas Sensors

Mr.Chalor Keawpichai ID 48015157

Mr.Teerayut Tongwan ID 84015209

Assoc.Prof.Dr.Toempong Phetchakul Advisor
Educational Year 2007

Abstract

This project studies the building process of Carbon Nanotube on silicon substrate. The technique photolithography is used for designing the device's pattern and Carbon Nanotube is synthesized using by HFCVD method with nickel as catalyst. This process is operated at normal pressure. Hydrogen gas and alcohol were used as source. Carbon Nanotube films are then analyzed with SEM, EDX, TEM and Raman Spectroscopy. After that the gas reactions for example, alcohol vapor, H_2 , studied for chemical sensor application.

สารบัญ

| | |
|---|----|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 3 |
| 2.1 ประวัติที่มาของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 3 |
| 2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 4 |
| 2.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 5 |
| 2.3.1 ท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว | 6 |
| 2.3.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น | 8 |
| 2.4 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 8 |
| 2.5 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ประยุกต์ใช้งาน | 10 |
| 2.5.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ | 10 |
| 2.5.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ | 11 |
| 2.5.3 ประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ | 11 |
| 2.5.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ และเซ็นเซอร์ | 11 |
| 2.5.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน | 11 |
| 2.6 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 12 |
| 2.6.1 Base Growth | 12 |
| 2.6.2 Tip Growth | 12 |
| 2.7 วิธีการสังเคราะห์ | 13 |
| 2.7.1 วิธี Arc discharge | 13 |
| 2.7.2 วิธี Laser ablation | 14 |
| 2.7.3 วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) | 15 |
| 2.7.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition | 15 |
| 2.7.3.2 วิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition | 16 |
| 2.7.3.3 วิธี Vapor phase growth | 17 |
| 2.7.3.4 วิธี High pressure CO disproportionate process | 18 |
| 2.7.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition | 19 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | |
|---|----|
| บทที่ 3 การตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ | 21 |
| 3.1 การตรวจดูลักษณะพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope; SEM | 21 |
| 3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี Energy Dispersion X-Ray; EDX | 22 |
| 3.3 การวัดด้วย Raman Spectroscope | 22 |
| บทที่ 4 การสร้างลวดลาย | 24 |
| 4.1 การสร้างชั้นฉนวน โดยกระบวนการออกซิเดชัน | 24 |
| 4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation) | 25 |
| 4.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation) | 25 |
| 4.2 กระบวนการเคลือบโลหะที่เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์ | 25 |
| 4.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี | 27 |
| 4.3.1 การเตรียมผิวหน้าแผ่น | 29 |
| 4.3.2 การเคลือบน้ำยาไวแสง | 29 |
| 4.3.2.1 แบบสปินเนอร์ (Spinner) | 29 |
| 4.3.2.2 แบบสเปรย์ (Spray Coating) | 30 |
| 4.3.2.3 แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating) | 30 |
| 4.3.3 การอบขั้น Prebake หรือ Softbake | 30 |
| 4.3.4 การปรับซ้อนมาสก์ (Mask Alignment) | 31 |
| 4.3.5 การฉายแสง (Exposure) | 33 |
| 4.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Resist Development) | 34 |
| 4.3.7 การเอตซิ่ง (Etching) | 34 |
| 4.4 การออกแบบลวดลาย สำหรับการนำมาประยุกต์เป็นโครงสร้างความต้านทาน | 36 |
| 4.4.1 กระบวนการสร้างลวดลาย | 37 |
| 4.4.2 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ | 37 |
| 4.4.3 การเคลือบโลหะแคตะไลต์ที่เกิด โดยวิธีการสปัตเตอร์ | 38 |
| 4.4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาร์ค1 | 39 |
| 4.4.5 วิธีการสกัดชั้นนิเกิล | 40 |
| 4.4.6 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาร์ค2 | 41 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | |
|--|-----------|
| 4.4.7 การเคลือบโลหะทองแดง โดยวิธีการสปีตเตอร์ | 42 |
| บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน | 43 |
| 5.1 วัตถุประสงค์ | 43 |
| 5.2 อุปกรณ์และสารเคมี | 43 |
| 5.3 ขั้นตอนการทดลอง | 43 |
| 5.4 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากการสร้าง ลดสายโดยวิธีกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี | 45 |
| 5.4.1 ฐานรองซิลิคอนสปีตด้วยนิเกิล | 45 |
| 5.4.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM | 47 |
| 5.4.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX | 48 |
| 5.4.4 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy | 48 |
| 5.5 การทดลองฐานรองซิลิคอนสปีตด้วยนิเกิลในการตรวจจับก๊าซ | 49 |
| 5.5.1 ผลการทดลองตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ | 50 |
| 5.5.2 ผลการทดลองตรวจจับไฮโดรเจน | 55 |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง | 60 |
| ภาคผนวก ก | 62 |
| ภาคผนวก ข | 63 |
| ภาคผนวก ค | 64 |

สารบัญรูป

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2.1 นาย สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) ผู้ค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์คนแรก | 3 |
| รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่นกราฟีน | 5 |
| รูปที่ 2.3 คาร์บอนนาโนทิวป์รูปแบบต่างๆ | 5 |
| รูปที่ 2.4 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs) | 6 |
| รูปที่ 2.5 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราฟีนเป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ | 7 |
| รูปที่ 2.6 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการม้วนแต่ละแบบ (Armchair, Zigzag, Chiral) | 7 |
| รูปที่ 2.7 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs) | 8 |
| รูปที่ 2.8 ภาพการทดสอบความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ | 9 |
| รูปที่ 2.9 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์ | 9 |
| รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ลักษณะ Base Growth และ Tip Growth | 13 |
| รูปที่ 2.11 วิธี Arc discharge | 14 |
| รูปที่ 2.12 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดย วิธี Laser ablation | 15 |
| รูปที่ 2.13 ระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition | 16 |
| รูปที่ 2.14 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD | 16 |
| รูปที่ 2.15 ระบบของวิธี Vapor phase growth | 17 |
| รูปที่ 2.16 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process | 18 |
| รูปที่ 2.17 แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition | 19 |
| รูปที่ 3.1 SEM (Scanning Electron Microscope) | 21 |
| รูปที่ 3.2 EDX (Energy Disperation X-Ray) | 22 |
| รูปที่ 3.3 Raman spectroscope | 23 |
| รูปที่ 4.1 Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System | 25 |
| รูปที่ 4.2 ระบบการสปีดเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด | 26 |
| รูปที่ 4.3 ขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี | 28 |
| รูปที่ 4.4 กระบวนการพิมพ์ภาพโดยวิธี Projection Printing | 32 |
| รูปที่ 4.5 กระบวนการพิมพ์ภาพโดยวิธี Step and Repeat Projection | 33 |
| รูปที่ 4.6 แสงสเปคตรัมของหลอดเมอร์คิวรี | 34 |
| รูปที่ 4.7 ผลของการเอตซิงค์ (ก) การเอตซิงค์เปียก และ (ข) การเอตซิงค์แห้ง | 35 |
| รูปที่ 4.8 มาร์คสำหรับสร้างสวดลายของแคดอะไลต์นิกเกิล | 36 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4.9 มาร์คสำหรับสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าทองแดงของรูปที่ 4.8 (ข) | 37 |
| รูปที่ 4.10 แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น | 38 |
| รูปที่ 4.11 ซิลิคอน ไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน | 38 |
| รูปที่ 4.12 นิเกิลถูกเคลือบบนซิลิคอน ไดออกไซด์ | 38 |
| รูปที่ 4.13 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (ก) การฉายแสงและ (ข) การdevelop | 39 |
| รูปที่ 4.14 กระบวนการสกัดชั้นนิเกิล | 40 |
| รูปที่ 4.15 ทำการลอกน้ำยาไวแสง | 40 |
| รูปที่ 4.16 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (ก) การฉายแสงและ (ข) การdevelop | 41 |
| รูปที่ 4.17 สปีดเตอร์ด้วยทองแดง | 42 |
| รูปที่ 4.18 ทองแดงถูกเคลือบบนนิเกิล | 42 |
| รูปที่ 5.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 44 |
| รูปที่ 5.2 ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1 | 44 |
| รูปที่ 5.3 ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2 | 45 |
| รูปที่ 5.4 เป็นมาร์คของลวดลายต่างๆที่ได้ออกแบบไว้สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี | 46 |
| รูปที่ 5.5 เป็นภาพถ่ายลวดลายของนิเกิลหลังผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี | 46 |
| รูปที่ 5.6 เป็นภาพถ่ายหลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 47 |
| รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอน | 47 |
| รูปที่ 5.8 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลาย นิเกิลหลังทำ การสังเคราะห์ | 48 |
| รูปที่ 5.9 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอน | 49 |
| รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงาน (ก) ก่อนทำการสังเคราะห์ (ข) หลังจากสังเคราะห์แล้ว | 49 |
| รูปที่ 5.11 ชุดอุปกรณ์การทดสอบของระบบที่ใช้ในการตรวจจักษ์ | 50 |
| รูปที่ 5.12 การจ่ายไนโตรเจนโดยการเปิด เฉพาะ Valve 1, Valve 2และValve 5 | 50 |
| รูปที่ 5.13 การจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยการเปิด เฉพาะ Valve 1, Valve 2และValve6 และการหยุดจ่ายปิด Valve 6 | 51 |
| รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์และหยุดจ่าย ไม่ให้ความร้อนภายในระบบวัด | 53 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | |
|--|----|
| รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการให้ความร้อนภายในระบบวัดและจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ และหยุดจ่าย | 54 |
| รูปที่ 5.16 การจ่ายไฮโดรเจน Valve 3, Valve 4 และ Valve5 และการหยุดจ่ายปิด Valve 3 | 55 |
| รูปที่ 5.17 กราฟการจ่ายไฮโดรเจนและหยุดจ่ายในระบบที่ไม่ให้ความร้อน | 57 |
| รูปที่ 5.18 กราฟการจ่ายไฮโดรเจนและหยุดจ่าย ในระบบที่ให้ความร้อน | 58 |
| รูปที่ ก-1 Raman spectroscope | 64 |
| รูปที่ ก-2 SEM (Scanning Electron Microscope) | 64 |
| รูปที่ ก-3 EDX (Energy Dispersion X-Ray) | 65 |



สารบัญตาราง

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 10 |
| ตารางที่ 2.2 สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 3 วิธีหลัก | 20 |
| ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสปีดเตอร์นิเกลในการทดลอง | 27 |
| ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ | 52 |
| ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองตรวจจับไฮโดรเจน | 56 |
| ตารางที่ ก - 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities | 62 |
| ตารางที่ ข - 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus | 63 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบัน ความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีความเจริญก้าวหน้ามาก ไม่ว่าจะเป็น ความเจริญก้าวหน้าทางยานยนต์ ความก้าวหน้าทางคอมพิวเตอร์และข้อมูล สารสนเทศ มีการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียมและอินเทอร์เน็ต ช่วยให้เราสามารถติดต่อข่าวสารกันได้อย่างรวดเร็ว และทั่ว ถึงกันมากยิ่งขึ้น ความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ การ แพทย์ ก็เจริญก้าวหน้าอย่างแพร่หลายมากขึ้นด้วยเช่นกัน มีการนำเทคโนโลยีชีวภาพ และพันธุวิศวกรรมมาใช้ในการรักษาโรคต่างๆ โดยเฉพาะเมื่อมีการค้นพบลำดับพันธุกรรม (DNA Sequence) ของมนุษย์สำเร็จ ยังทำให้ความหวังใน การรักษาโรคบางโรคซึ่งสมัยก่อนไม่สามารถรักษาได้ เกิดความเป็นจริงขึ้นมา นอกจากนี้จะมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีชีวภาพแล้ว นาโนเทคโนโลยี นั้นก็มีบทบาทสำคัญในปัจจุบันด้วยเช่นกัน

นาโนเทคโนโลยี คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากๆในระดับนาโนเมตร(ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) รวมถึงการออกแบบ หรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้าง หรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆเช่นการจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการ ได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

นาโนเทคโนโลยีเป็นสหวิชาสาขาใหม่ (Multidisciplinary area) ที่ต้องอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีจากในหลากหลายสาขารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในงานทางวัสดุศาสตร์ อิเล็กทรอนิกส์ และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ ซึ่งเรียกกันว่าวัสดุนาโน (Nanomaterials) นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nano-Electronics) และเทคโนโลยีชีวภาพนาโน (Nanobiotechnology) ตามลำดับ ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่ได้รับการออกแบบและควบคุมตั้งแต่การจัดเรียง อะตอมหรือโมเลกุล ไปจนกลายเป็นชิ้นส่วนขนาดใหญ่

ตัวอย่างหนึ่งของวัสดุนาโน (Nanomaterial) ซึ่งปัจจุบันกำลังเป็นที่สนใจคือ "คาร์บอนนาโนทิวป์(Carbonnanotube)"

ตัวอย่างทางด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) เช่น การผลิตเป็น "ชิปความจำ (memory chip)"ที่ใช้โมเลกุลของสสารเป็นทรานซิสเตอร์ แทนที่จะเป็นซิลิกอนทรานซิสเตอร์ ดังที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน หรือแม้กระทั่งการผลิตหุ่นยนต์จิ๋วที่มีขนาดเท่าเม็ดเลือดแดง ซึ่งสามารถเข้าไปรักษาโรค ทำลายไขมัน ที่อุดตันในเส้นเลือด หรือมะเร็งเนื้อร้ายในจุดที่เราต้องการได้ โดยไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องใช้การผ่าตัดแต่อย่างไร เป็นต้น ความเจริญทางด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์(Nano-Electronics) จะทำให้สิ่งที่เราเห็นในภาพยนตร์วิทยาศาสตร์ของฮอลลีวูดเป็นจริงขึ้นมาในเวลาอันใกล้นี้

ซึ่งในรายงานนี้ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับวัสดุนาโน(Nanomaterial) ที่มีคุณสมบัติของ fullerenes โมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของ อะตอมอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างอยู่ระหว่างโครงสร้างของเพชรและกราฟไฟท์ในตระกูล คาร์บอน โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน (HFCVD) กระทำที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งวิธีนี้สามารถที่จะเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิกอน เป็นลวดลายต่างๆที่ต้องการออกแบบแล้วนำไปเป็นตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คาร์บอนนาโนทิวบ์

2.1 ประวัติที่มาของคาร์บอนนาโนทิวบ์

เมื่อกลางปี ค.ศ. 1985 ทีมวิจัยนำโดย Prof. Smalley ที่ Rice University ได้สังเคราะห์ Fullerene ที่มีโครงสร้างคล้ายทรงของอะตอมคาร์บอนที่ประกอบกันด้วยผิวหน้าหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม โมเลกุลของ Fullerene มีคาร์บอน 60 อะตอม ซึ่งหลังจากนั้นมีการตั้งชื่อเป็น Buckminsterfullerene ตามชื่อของสถาปนิกที่ออกแบบโดมลักษณะคล้าย C_{60} ซึ่งมีหน้าห้าเหลี่ยมติดกับหกเหลี่ยมคล้ายกับลูกฟุตบอล สองถึงหกปีต่อมาการค้นพบนี้ ได้นำไปสู่การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งเป็นท่อ Fullerene ที่ยาวได้สัดส่วน มีผนังของท่อคาร์บอนหกเหลี่ยมซึ่งมีโครงสร้างแบบกราฟไฟท์และมีปลายปิด ผู้ที่ค้นพบคนแรกคือ นาย สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น เป็นนักอิเล็กทรอนิกส์ไมโครสโคป ของบริษัท NEC ค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1991 ในห้องทดลองที่เมืองสึกูบา (Tsukuba) โดยการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์ของเขานั้น เป็นความบังเอิญที่เขาทำการสังเคราะห์ Fullerene โดยวิธี Arc-evaporation แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบกราฟไฟท์ ที่เป็นอนุภาคขนาดนาโน และท่อในลักษณะนี้ ไม่มีผู้ใดเคยสังเกตเห็นมาก่อน



รูปที่ 2.1 นาย สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) ผู้ค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์คนแรก

ต่อมาทีมงานของ สุมิโอะ อิจิมะ สามารถที่จะสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวได้ในปริมาณที่มาก โดยปรับสภาวะของการทำ Arc-evaporation ซึ่งท่อคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือท่อชนิดผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 หรือในสองปีถัดมานาย สุมิโอะ อิจิมะ และนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็มได้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(IBM) ชื่อ คอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสร้างท่อนาโนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อย ในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นกราฟไฟท์ และป้องกันการเกิดเป็น Fullerene ขนาดเล็ก

หลังจากที่ได้มีการค้นพบ คาร์บอนนาโนทิวบ์ก็กลายเป็นที่กล่าวถึงกันมากในปัจจุบันทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเหตุผลของการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้อย่างมากมาย นับตั้งแต่การนำมาเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรง ชี้นงานด้านอิเล็กทรอนิกส์และแสง คะตะลิสต์แบบเตอรี กักเก็บพลังงานและเซนเซอร์ เพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นมีเอกลักษณ์ที่เด่นในทางอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถนำความร้อนได้สูง นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีค่าความเหนียวความแข็งแรงและความยืดหยุ่นกว่าวัสดุใดๆ ในปัจจุบัน

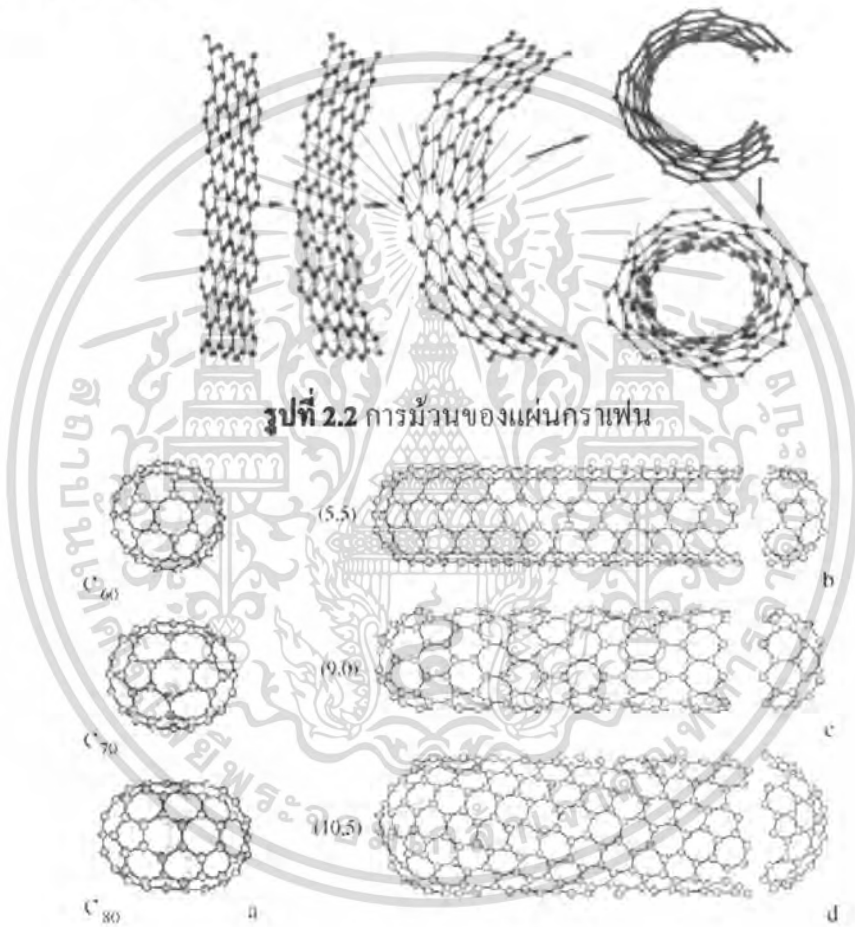
2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น ประกอบขึ้นจากราตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร (Diamond) กราไฟท์ (Graphite) เถ้าถ่าน และ Fullerene หรือ C_{60} แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน สามารถพิจารณาได้จากการห่อแผ่นกราฟไฟท์ (Graphite) ซึ่งปกตินาโนทิวบ์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากๆ (ระดับนาโนเมตร) ทำให้สามารถมองเป็นโครงสร้างหนึ่งมิติได้ โดยโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยสองส่วนที่แยกออกจากกันมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทางฟิสิกส์และเคมี ส่วนแรกคือส่วนผนังของท่อ และส่วนที่สองคือฝาปิดปากท่อ โดยส่วนฝาปิดของท่อมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมที่ได้มาจากฟูลเลอร์เร็นซ์ เช่น C_{60} หรือ C_{70}

ฟูลเลอร์เร็นซ์ มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนอยู่ในรูปหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม ในรูปแบบทางฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีรูปหลายเหลี่ยมของ Euler ที่ว่ารูปห้าเหลี่ยม 12 รูป ในรูปของโครงสร้างฝาปิดที่ประกอบด้วยรูปหาเหลี่ยมและรูปหกเหลี่ยมเท่ากัน โดยการรวมกันของรูปห้าเหลี่ยม 5 อัน ผลลัพธ์ทำให้เกิดความโค้งของผิวที่เป็นลักษณะปริมาตรปิด กฎข้อที่ 2 ในการใช้รูปห้าเหลี่ยม จะต้องอยู่ในระยะทางห้าเหลี่ยมด้วยกัน บนพื้นผิวทรงกลม ในระยะทางที่มากที่สุด เพื่อที่จะได้ความโค้งที่มีค่าน้อยที่สุด และความเค้นพื้นผิวที่น้อยที่สุด ผลลัพธ์ก็คือ โครงสร้างที่มีความเสถียรที่มากขึ้น และโครงสร้างที่เสถียรและเล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้โดยวิธีนี้ก็คือ C_{60} ส่วนโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นก็คือ C_{70} และอื่นๆ คุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งฟูลเลอร์เร็นซ์ประกอบขึ้นจากอะตอมที่เป็นเลขคู่ เพราะว่าการเพิ่มรูปหกเหลี่ยมเพื่อให้เป็นโครงสร้างที่เป็นอยู่ได้หมายถึง การเพิ่มอะตอมของคาร์บอนคุณสมบัติของนาโนทิวบ์ จึงคล้ายกับประกอบเป็นรูปทรงกระบอก โดยสร้างขึ้นจากแผ่นกราฟเฟน(Graphene) ดังในรูป 2.2 ซึ่งสามารถม้วนแผ่นกราฟเฟน(Graphene) ได้ในทิศทางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันเพื่อสร้างเป็นทรงกระบอกได้คาร์บอนสองอะตอม แผ่นกราฟีน(Graphene) จะถูกเลือกตัวที่หนึ่งใช้เป็นจุดเริ่มต้น โดยแผ่นจะหมุนจนกระทั่งอะตอมตัวที่สองมาบรรจบกันโดยเวกเตอร์จากอะตอมแรกไปอะตอมหนึ่งเรียกว่า Chiral เวกเตอร์และความยาวของมันเท่ากับเส้นรอบวงของนาโนทิวบ์โดยทิศทางของแกนนาโนทิวบ์ตั้งฉากกับ Chiral เวกเตอร์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มี Chiral เวกเตอร์แตกต่างกัน จะมีคุณสมบัติต่างกันด้วย เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกลศาสตร์ และคุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์รูปแบบต่าง ๆ

2.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตาม ลักษณะจำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่า ท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes: SWNTs) ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า ท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Multiple-Walled Nanotubes: MWNTs) ส่วนใหญ่ขนาดของ ท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ 0.4 นาโนเมตรไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาว ไปจนถึงหลายเซนติเมตร และเป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณี ท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของกราฟไฟท์

2.3.1 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes: SWNTs)

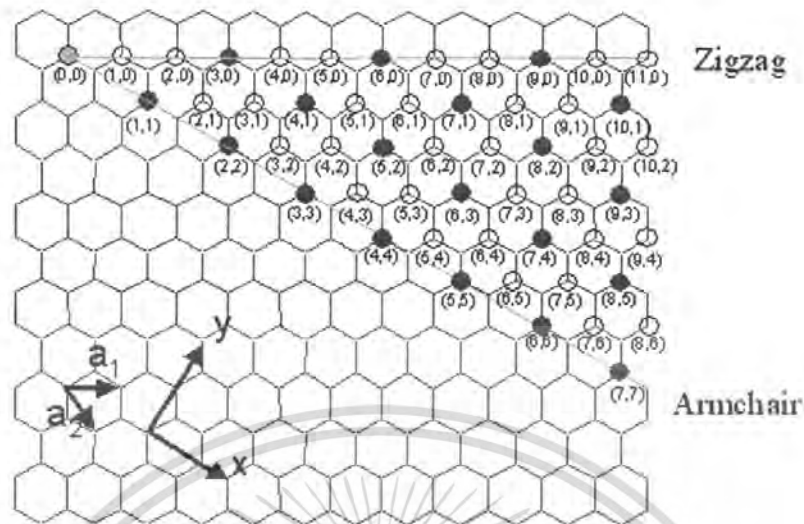
จะมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราฟไฟท์ที่มีวนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวงท่อคาร์บอนนาโนทิวป์จึงมีผนังของอะตอมคาร์บอน ที่จัดเรียงพันธะ โคเวเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม และอาจมีบริเวณที่ปลายของท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของ Fullerene ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)

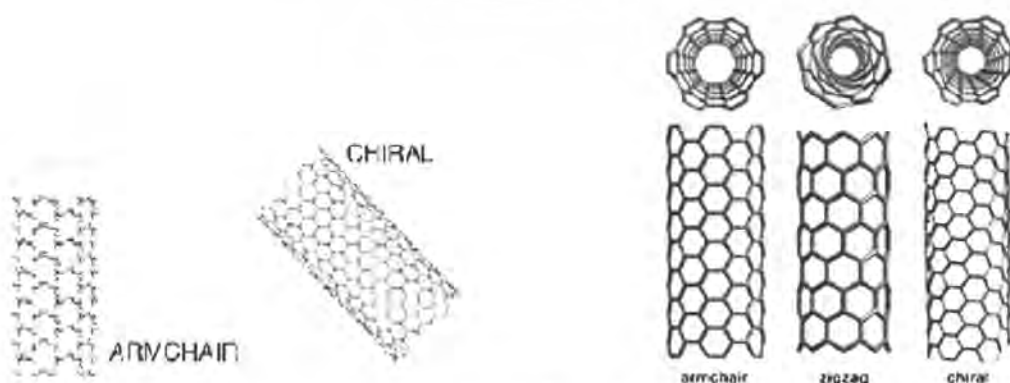
สวดลายตามผนังของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวนั้น อาจมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันอาจแบ่งออกได้ 3 แบบ ตามการม้วนแผ่นแกรไฟท์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน คือ โครงสร้างท่อแบบ Armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟท์ตามแนวสมมาตรแกนตั้ง โครงสร้างท่อแบบ Zigzag ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟท์ตามแนวสมมาตรแกนนอน และ โครงสร้างท่อแบบ Chiral ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟท์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราฟไฟต์เป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์

จากรูปที่ 2.5 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 ดังรูปที่ 2.6

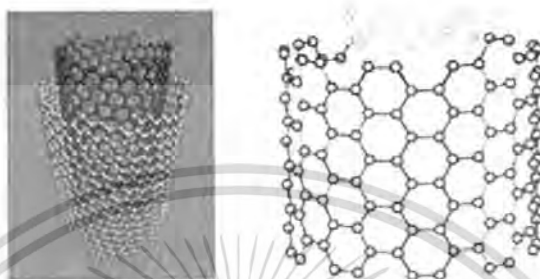


รูปที่ 2.6 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการม้วนแต่ละแบบ (Armchair, Zigzag, Chiral)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น หรือ (Multi-walled Nanotubes: MWNTs)

ผนังของท่อมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน และมีระยะห่างระหว่างท่อเท่ากับ 0.34 นาโนเมตร (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs)

2.4 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

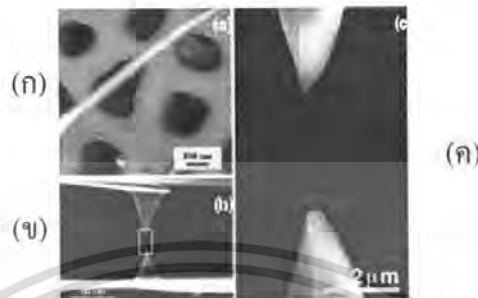
คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีคุณสมบัติหลายประการด้วยกัน โดยสามารถยกตัวอย่างคุณสมบัติที่เด่นๆ ได้ดังต่อไปนี้ เช่น

- ความแข็งแรง ซึ่งก็เป็นที่รู้กันดีว่าโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์แข็งแรงมากกว่าเพชรและกราไฟท์ เพชรนั้นมีความแข็งแรงมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราไฟท์นั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกัน และอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราไฟท์ (กราเฟน) มีความแข็งแรงมาก(มากกว่าเพชร)แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้ คาร์บอนนาโนทิวป์ แข็งแรงกว่าเพชรและกราไฟท์

- ความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ค่าความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าสูงถึง 1 เทราปาสกาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสกาล (Gpa) วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย Thermal Vibration หรือใช้ Scanning Force Microscopy ไปงอคาร์บอนนาโนทิวป์โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้า และมีการใช้ Atomic Force Microscopy (AFM) เพื่อสอดตรงกลางแท่งนาโนที่วางอยู่บน Nanopores เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่น ได้มีการใช้ AFM จับคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง

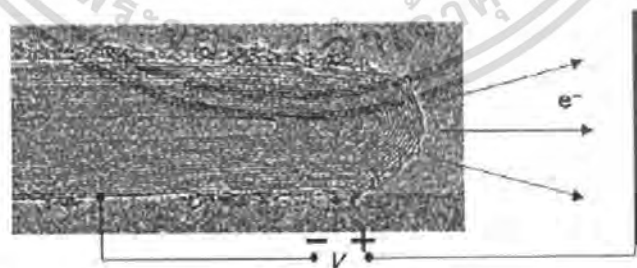
เอกสารนี้ (Tensile strength) (รูปที่ 2.8) ความแข็งแรง ของคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าอยู่ระหว่าง 11 ถึง 63 Gpa ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าลอมมีเพียง 2 Gpa นอกจากนี้ SWNTs สามารถยืดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน



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

- ความสามารถด้านการนำไฟฟ้า คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง หนึ่งมัดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm² ขณะที่ทองแดง ได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm² สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของคาร์บอนนาโนทิวบ์ คือ สามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในสภาวะสุญญากาศได้ (รูปที่ 2.9) เมื่อคาร์บอนนาโนทิวบ์วางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ต่ำกว่า เช่น จะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว Molybdenum



รูปที่ 2.9 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวบ์

- ความสามารถในการนำความร้อน ค่าการนำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นสูงถึง 2000 W/m. K โดยมีบางรายงานกล่าวว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/m. K เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 3320 W/m. K นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 °C ภายใต้สุญญากาศ และ 750 °C ในสภาวะอากาศปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการด้วยกันนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น เช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ สามารถจับยึดโมเลกุลและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของทิวบ์ เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของทิวบ์ โดยคุณสมบัติทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

| | |
|--------------------------|---|
| 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 |

2.5 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือเป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำมีความแข็งแรงแต่เบา ทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่ดี มีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และสามารถจับยึดกับโมเลกุลของก๊าซและการดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เช่นชนิดของท่อ(ซิงเกิลวอลล์และมัลติวอลล์) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของทิวบ์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.5.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่า Young's Modulus สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี จึงสามารถนำมาผสมในวัสดุอื่นๆเพื่อให้ได้วัสดุอื่นๆเพื่อให้ได้วัสดุที่เบาและมีคุณสมบัติทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นแจ้งจะขอคืนเอกสารทันทีหากมีการนำไปใช้

ศาสตร์ที่ดีหรือมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี โดยเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์ขององค์การนาซา(NAZA) ประสบความสำเร็จในการผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในโพลีเมอร์ ซึ่งนี่อาจเป็นจุดเริ่มต้นของการก้าวไปสู่การสังเคราะห์พลาสติก ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กก็เป็นได้

2.5.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์(CNTs) มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ (ค่าRespect-ratioสูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้CNTs มีเสถียรภาพที่ดีและทำให้CNTs สามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ในอุปกรณ์เช่นจอแสดงผล หลอดไฟฟ้าประหยัดพลังงานแหล่งกำเนิดX-ray ขนาดเล็กและแหล่งกำเนิดไมโครเวฟขนาดเล็ก เป็นต้น

2.5.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์เทียบเท่ากับ 1 มิติจึงทำให้มีการนำไฟฟ้าแบบ Ballistic คือไม่มีการกระจัดกระจาย ของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเหมาะที่จะใช้ในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ และนอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยเมื่อไม่นานมานี้บริษัท ไอบีเอ็ม และกลุ่มของ Prof Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์ และลอจิกจากซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นครั้งแรกของโลก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ในอนาคตได้ ทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์และปริมาณในการกินกระแสไฟฟ้าลงได้

2.5.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ และเซ็นเซอร์

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของสาร ในระดับอะตอม เช่น Scanning Probe Microscope (SPM), Atomic Force Microscopy (AFM) และประดิษฐ์เป็นนาโนคีม (Nano-Tweezers) และประดิษฐ์เป็นนาโนคีม (Nano-Tweezers) และยังสามารถดัดแปลง โดยนำ Functionnal group ต่างๆเช่น-COOH มายึดติดที่ปลายทิวบ์เพื่อนำไปใช้ในด้านชีววิทยาและการแพทย์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถนำมาสร้างเป็นเซ็นเซอร์ทางเคมีได้อีกด้วย เช่นทำเป็นเซ็นเซอร์ก๊าซเช่น H_2 , O_2 และก๊าซอื่นๆ ได้โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวบ์ที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น

2.5.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะ โครงสร้างเป็นท่อกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรและมีพื้นผิวที่มาก ทำให้เป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการเก็บไฮโดรเจน(H) ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อDillon แสดงผลการคำนวณว่า SWCNTs จะสามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์มากขึ้นและมีความเป็นไปได้ที่จะเก็บไฮโดรเจนได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้

2.6 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ Base Growth และ Tip Growth

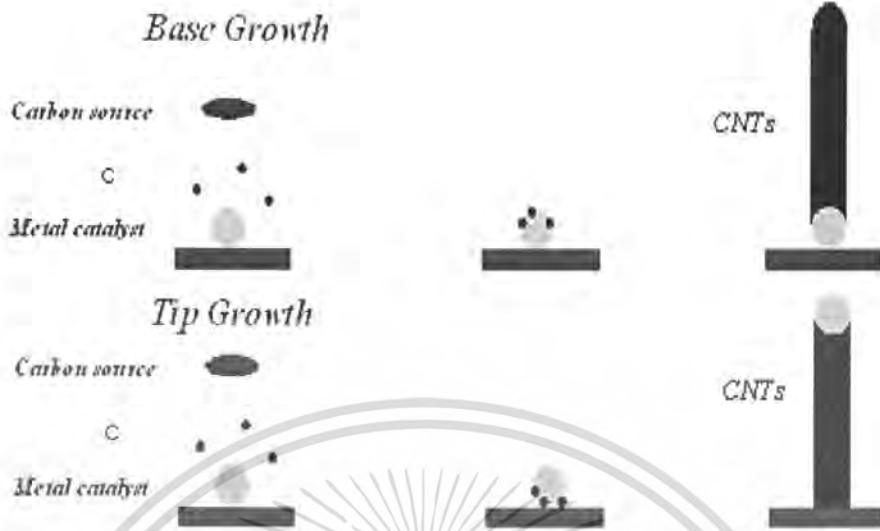
2.6.1 Base Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา(Catalyst) สามารถอธิบายได้คือที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน (carbon source) และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งและเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านบน จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่ง และก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

2.6.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา(Catalyst) ทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิวป์ ซึ่งสามารถอธิบายได้คือที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่าง จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง และก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

จากกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้ง 2 ลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำเพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว และโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดี เพื่อให้อะตอมคาร์บอนสามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมาก



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ลักษณะ Base Growth และ Tip Growth

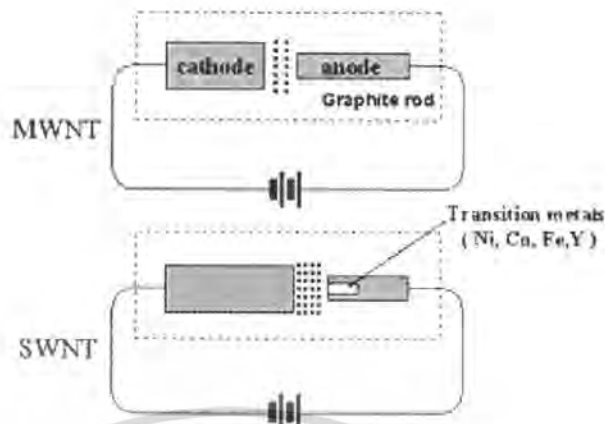
2.7 วิธีการสังเคราะห์

คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต้องการ แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี ได้แก่ Arc discharge, Laser ablation และ Chemical vapor deposition (CVD) ซึ่งแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน โดยทั้ง 3 วิธีนี้

2.7.1 วิธี Arc discharge

เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยการอาร์คที่ปลายทั้ง 2 ของแท่งกราไฟท์ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยาที่เต็มไปด้วยก๊าซเฉื่อยอาจเป็น ฮีเลียม ผสมอาร์กอน หรือไนโตรเจนเหลว ที่ความดันต่ำ โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสูงเพื่อไปอาร์คแท่งกราไฟท์ ทำให้บริเวณที่ถูกอาร์คมีอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ เกาะอยู่บนบางส่วนของแท่งกราไฟท์ที่หลุดกระเด็นออกมาและรอบบริเวณแท่งกราไฟท์ที่ถูกอาร์ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมระหว่าง ก๊าซฮีเลียม กับ ก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ และการนำความร้อนมีค่าต่างกัน จึงมีผลกระทบกับความเร็วในการแพร่ของโลหะตัวเร่ง การเย็นตัวของแท่งคาร์บอนและอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เป็นผลทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ มีขนาดต่างกันออกไปไม่สม่ำเสมอวิธี Arc discharge วิธีนี้แสดงดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 วิธี Arc discharge

และด้วยวิธีการนี้ ยังสามารถที่จะเลือกให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้ให้เป็นชนิดซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์หรือมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยหากต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิดซิงเกิลวอลล์ ก็สามารถใส่แท่งกราฟไฟท์ ที่เจือด้วยอนุภาคของโลหะตั้งเร่งเช่นเหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล หรือ โมลิบดีนัม ที่ขั้วแอโนด และถ้าต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นมัลติวอลล์ ก็สามารถใส่แท่งกราฟไฟท์บริสุทธิ์เท่านั้นก็พอ ไม่จำเป็นต้องผสมโลหะตัวเร่งก็ได้ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีนี้ ด้วยวิธี Arc discharge นี้จะทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ไม่สะอาด ประปนอยู่กับเขม่า โลหะตัวเร่งและอะตอมคาร์บอนที่มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน จึงต้องผ่านการแยกให้เหลือเฉพาะคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งยุ่งยากและคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็ต่ำอยู่คือจะมีขนาดไม่เสมอต้นบ้างยาวบ้าง

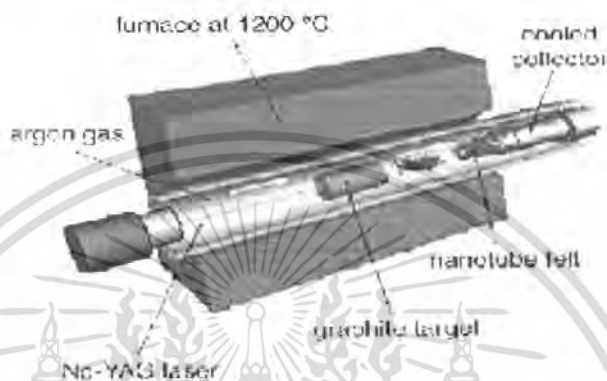
2.7.2 วิธี Laser ablation

ในปี 1995 ทีมวิจัยของ Prof. Smalley ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูง หลักการคือใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงยิงไปที่เป้าหมายซึ่งเป็นแท่งกราฟไฟท์ที่อยู่ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C ภายในเต็มไปด้วยก๊าซฮีเลียมหรืออาร์กอน ทำให้แท่งกราฟไฟท์ระเหยออกเป็นไอของคาร์บอน โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่อง ส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70% และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การสงวนเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอชเห็นเอาใช้ประโยชน์ท่านควรรู้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดซึ่งเกิดวอลท์เท่านั้นวิธี Laser ablation แสดงดังรูปที่ 2.12

Laser furnace



รูปที่ 2.12 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี Laser ablation

2.7.3 วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD)

คือการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม(เช่น ก๊าซมีเทน)บนโลหะ(เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอล)โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วยอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี Chemical vapor deposition (CVD) นั้นยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกก๊าซและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งออกเป็น 5 วิธีใหญ่ คือ

2.7.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition

วิธีนี้จะใช้ Fe ,Ni ,Co หรือโลหะผสมทั้งสามชนิดผสมกันทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะทำการกัดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด nanometer-sized โดยใช้ NH_3 หรือแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 750°C - 1050°C ในการกัด และใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบปล่อยเข้ามาในระบบ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน และใช้ความร้อนจากเตาความร้อนทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และเข้าไปทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ถูกกัดให้มีอนุภาคขนาด nanometer-sized เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

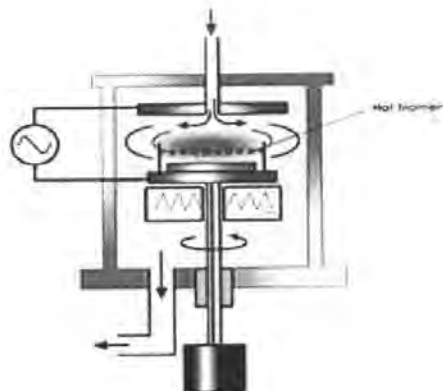
โดยส่วนมากจะนิยมใช้วิธีนี้ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะเกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์จะอยู่ในรูปของ MWNTs เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตรจะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์จะอยู่ในรูปของ SWNTs รูปที่ 2.13 แสดงระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition



รูปที่ 2.13 ระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition

2.7.3.2 วิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการกำเนิดประจุไอออนภายใน Chamber หรือเตาปฏิกิริยา โดยใช้แรงดันความถี่สูงเข้ามาทำให้ไอออนของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัวเกิดเป็นพลาสมาขึ้นและเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.14 แสดงระบบของวิธี Plasma enhanced CVD



รูปที่ 2.14 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD

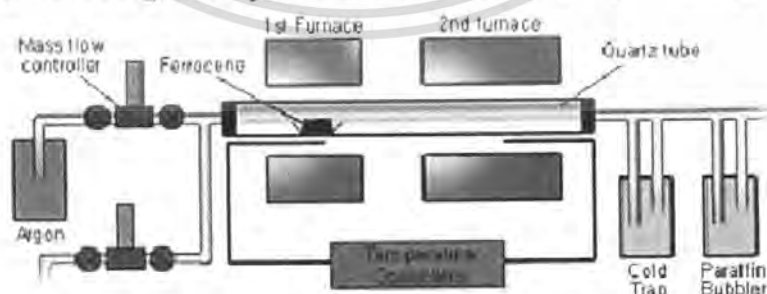
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าได้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากรูปที่ 2.14 แผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกรวดค้ำของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทตรงกันข้ามด้านบนกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มีความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นโลหะจำพวก Fe, Ni, Co เคลือบบนชั้นซิงคิกอนหรือชั้นไดออกไซด์ หรือบนแก้วซึ่งการสร้างชั้นเคลือบสามารถทำได้ด้วยวิธี Evaporation หรือวิธี Sputtering โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถยึดติดกับฐานรองได้หนาแน่นจะมีผลต่อ ขนาดของท่อ, อัตราการเจริญเติบโต, ความหนาของผนัง, รูปร่างและโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยทั่วไปแล้ว Ni เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการปลูก MWNTs โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ที่ 15 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตของการใช้ Ni เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 50 % และสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400 °C) ก๊าซที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ C_2H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_6 , CO เป็นต้น การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ท่อตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิด MWNTs ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด SWNTs ได้ง่ายนัก (ในปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิด SWNTs ได้โดยใช้พลาสมาระบบ RF glow-discharge (13.56 MHz) โดยใช้ก๊าซผสมของ CH_4 กับ H_2)

2.7.3.3 วิธี Vapor phase growth

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยการนำก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบนำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน Chamber โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.15 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth



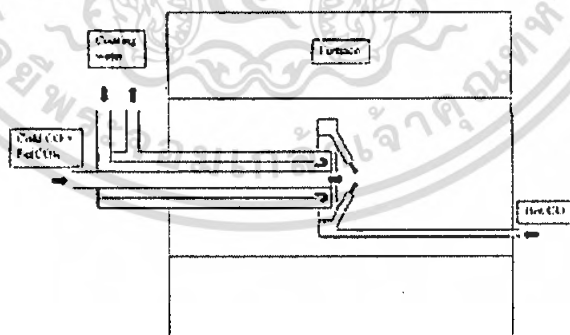
รูปที่ 2.15 ระบบของวิธี Vapor phase growth

จากรูปที่ 2.15 ในระบบของวิธี Vapor phase growth จะมีเตาความร้อนอยู่ 2 เตาครอบอยู่เอกสารนี้ระหว่าง Chamber โดยเตาความร้อนที่ 1 จะทำให้ก๊าซโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นไอและก่อไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกันชื้นและคงสภาพไว้ เมื่อมาถึงเตาความร้อนที่ 2 อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนเนื่องจากโคความร้อนจะแพร่และซึมทราบลงบนอนุภาคของก๊าซโลหะ ตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยทั่วไปแล้วการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีนี้ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะอยู่ที่ประมาณ 2-4 นาโนเมตร สำหรับ SWNTs และ 70-100 นาโนเมตร สำหรับ MWNTs การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ได้ครั้งละมากๆและมีความบริสุทธิ์สูง แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้

2.7.3.4 วิธี High pressure CO disproportionate process

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene , $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้น คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNTs อยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 70 % แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้และเป็นอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซอันตราย รูปที่ 2.16 แสดงระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process

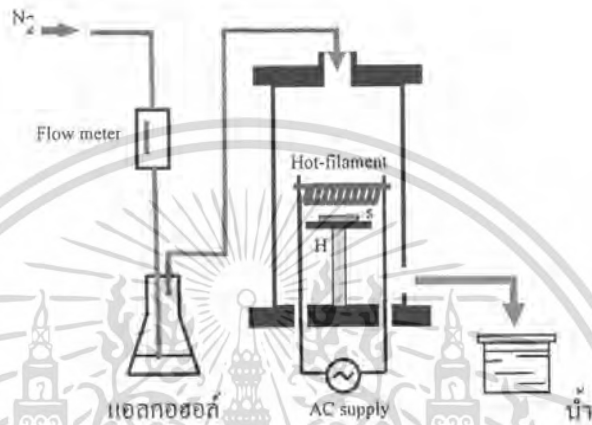


รูปที่ 2.16 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่มีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (Filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแทนการใช้เตาความร้อน โดยระบบของวิธี Hot-filament enhance Chemical vapor deposition แสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 3 วิธีหลัก

| วิธี | Arc Discharge | Laser Ablation | CVD |
|----------------------|--|---|---|
| วิธีการสังเคราะห์ | ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งกราไฟท์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิด hot-plasma ขึ้น CNTs จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว (โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ He) | ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่งคาร์บอนที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหยของคาร์บอน และ จากนั้น CNTs ก็ก่อรูปขึ้น (โดยส่วนมากสังเคราะห์ใน บรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 1200 °C) | เป็นการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อน หรือ Plasma เข้าช่วยมีโลหะเป็นตัวเร่งการสังเคราะห์ (อุณหภูมิประมาณ 400 - 1200 °C) |
| ประสิทธิภาพของผลผลิต | 30-90% | มากกว่า 70% | 20-90 |
| SWCNT | - ขนาดเส้น - Ø: 0.6-1.4 nm | - ขนาดเส้น - Ø: 0.6-1.4 nm | - ขนาดยาวมาก - Ø: ขนาดเส้น 0.6 -4 nm |
| MWCNT | - ขนาดเส้น - Ø: (ใน) 1-3 nm (นอก) 10 nm | เนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MW-CNTs แต่สามารถสังเคราะห์ได้ | - ยาวมาก (> 20 nm) - Ø: 10 -200 nm |
| ข้อดี | - เป็นวิธีที่ง่าย และ ค่าใช้จ่ายถูก - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย - สามารถสังเคราะห์ MW-CNTs ได้ โดยไม่ต้องใช้โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ในความดันบรรยากาศห้อง | - ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่เป็น SWCNTs - ความบริสุทธิ์สูง - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย | - สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWCNT ยาว - สามารถกำหนดทิศทางของและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี - สามารถที่จะสังเคราะห์ในเชิงอุตสาหกรรมได้ |
| ข้อเสีย | - ความยาวของทิวป์สั้น และ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก | - เป็นวิธีที่แพงเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง | - เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวป์ที่ได้มี Defect อยู่บ้าง แต่ไม่มาก |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญตเห็นาเปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์

3.1 การตรวจดูลักษณะพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope; SEM

SEM เป็นเทคนิคที่ใช้ดูลักษณะพื้นผิวของผลึกที่มีขนาดระดับไมครอน เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการดูลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำงานด้วยการยิงลำอิเล็กตรอนให้ไปโฟกัสตกเป็นจุดเล็ก บนเป้าซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง และเก็บรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กตรอนิกส์ ซึ่งปล่อยออกมาโดยวัตถุที่ใช้เป้าแล้วขยายเป็นภาพบนหลอดรังสีแคโทด ซึ่งแสดงรายละเอียดการทำงาน โดยเริ่มจากปืนอิเล็กตรอนจะผลิตอิเล็กตรอนในช่วงว่างขนาด 10-20 นาโนเมตรแล้วควบคุมให้พุ่งมากระทบเป้าหลอดสแกนจะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกพื้นภาพที่เล็กๆของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็กๆจะอันตรกิริยา(In interact) กับส่วนที่นูนของพื้นผิวและทำให้เกิดอิเล็กตรอนกระเจิงลำดับที่ 1 เพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอน ความสว่างหรือความเข้มของการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ลำดับที่ 2 จะขึ้นอยู่กับพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง และอิเล็กตรอนลำดับที่ 2 นี้ จะเป็นตัวสร้างสัญญาณให้เกิดภาพขึ้นSEMมีข้อได้เปรียบกว่ากล้องจุลทรรศน์อยู่มาก เนื่องจากมีกำลังขยายที่สูงกว่ามาก โดยปกติอยู่ในช่วง 50-40,000 เท่า มีความละเอียดสูง 2.5-10 นาโนเมตร มีความลึกมากกว่า 500 เท่า และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเทคนิค TEM ซึ่งต้องใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีความบางพอเพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM ใช้ได้แม้กับชิ้นงานที่เป็นก้อนแข็ง ชิ้นงานที่มีความนำจะถูกวิเคราะห์ได้ด้วยเงื่อนไขตามปกติ ส่วนชิ้นงานที่ไม่มีความนำโดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องมีการเคลือบด้วยวัสดุที่มีความนำบางๆก่อน

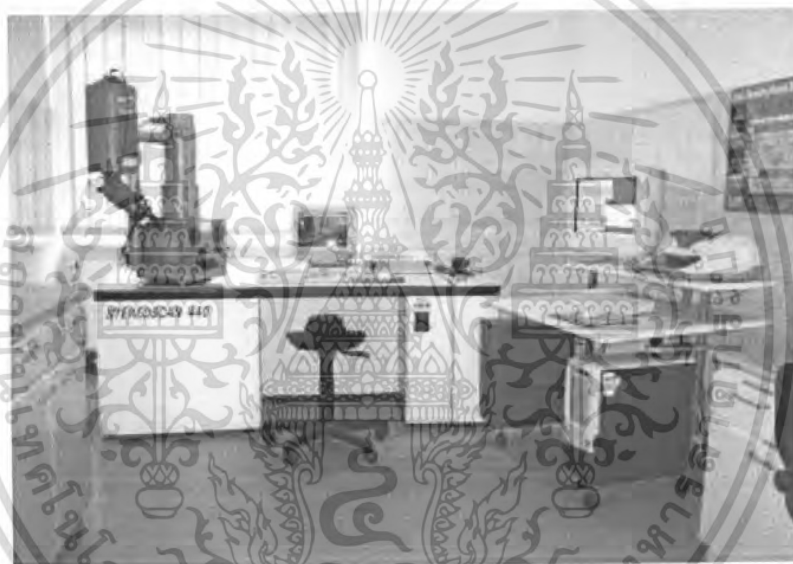


รูปที่ 3.1 SEM (Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี Energy Desperation X-Ray; EDX

EDX เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ สามารถทดสอบชิ้นงานที่เป็นของแข็งของเหลว หรือผงได้ ในระดับหน่วยการวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) หรือ ppm โดยใช้หลักการยิงรังสี X-Ray ไปยังชิ้นงานตัวอย่างและวัดระดับการกระจายพลังงานที่สะท้อนออกมาในรูป X-Ray Fluorescence จะทำให้ทราบว่ามีธาตุอะไรอยู่บ้าง ในปริมาณเท่าไร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งบรรยากาศปกติ แบบสุญญากาศ หรือก๊าซฮีเลียมได้เพื่อความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 3.2 EDX (Energy Desperation X-Ray)

3.3 การวัดด้วย Raman Spectroscope

การวัดคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscope ส่วนมากแล้ว มักจะใช้ในการตรวจสอบพันธะของคาร์บอน ดังนั้นผลที่ได้สามารถแยกชนิดของคาร์บอนได้ว่าเป็น กราไฟท์ เพชร หรือ อะมอร์ฟัสคาร์บอน โดยแสดงออกมาเป็น Raman Spectroscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 Raman spectroscope



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

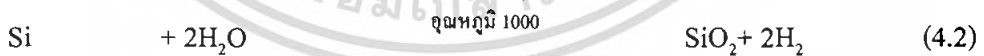
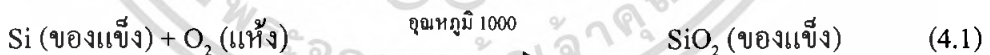
บทที่ 4

การสร้างลวดลาย

ปริญญาโทฉบับนี้จะอาศัยเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในการศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการออกซิเดชันสำหรับสร้างชั้นฉนวน กระบวนการสปีดเตอร์สำหรับเคลือบโลหะ และกระบวนการโฟโวลติโรกราฟีสำหรับการทำเป็นลวดลาย แนวคิดสำหรับการประยุกต์ให้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น เริ่มจากการศึกษาถึงผลกระทบต่างๆในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เช่น ฐานรอง แคตะไลต์ สารแหล่งจ่ายที่แตกต่างกันว่ามีผลอย่างไรต่ออัตราการเกิด ขนาดของท่อและคุณภาพของท่อ นาโนคาร์บอน จากนั้นศึกษาถึงการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการเตรียมฐานรองให้เกิดเป็นลวดลายด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ สามารถสร้างได้ทั้งหมดที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

4.1 การสร้างชั้นฉนวนโดยกระบวนการออกซิเดชัน

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) นี้จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสงใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี และยังใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้ง หรือไอน้ำ ในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้



สำหรับกลไกการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ เกิดจากก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ เข้าไปจนถึงผิวหน้าสัมผัสระหว่างซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาเคมี การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้ ทำได้ 2 ลักษณะคือ

4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

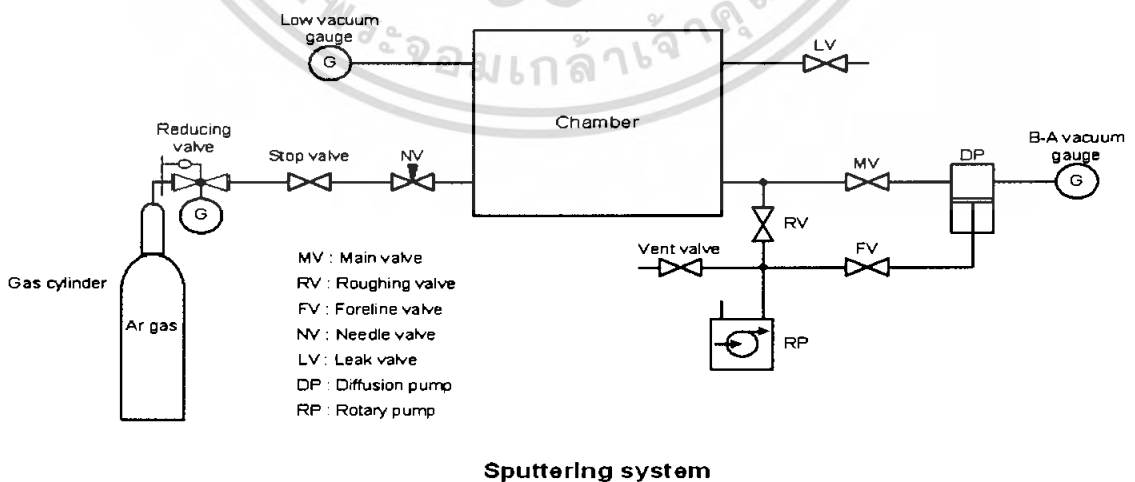
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปนที่อุณหภูมิสูง $900^{\circ}\text{C} \sim$ ประมาณ 1100°C จะทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ เตาที่ใช้ในการ oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน (ผิดพลาด $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน

4.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอน กับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ สำหรับการออกซิเดชันแบบชื้นทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้งทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบชื้นนี้คือมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ต่ำกว่าแบบแห้งหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้นจึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือได้ดีกว่า และเนื่องจากการออกซิเดชันแบบชื้นจะทำให้สภาพผิวของผลึกไม่สมบูรณ์คือการบิดเบือนของผลึก (crystal dislocation) เกิดรูพรุนขึ้น

4.2 กระบวนการเคลือบโลหะที่เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์

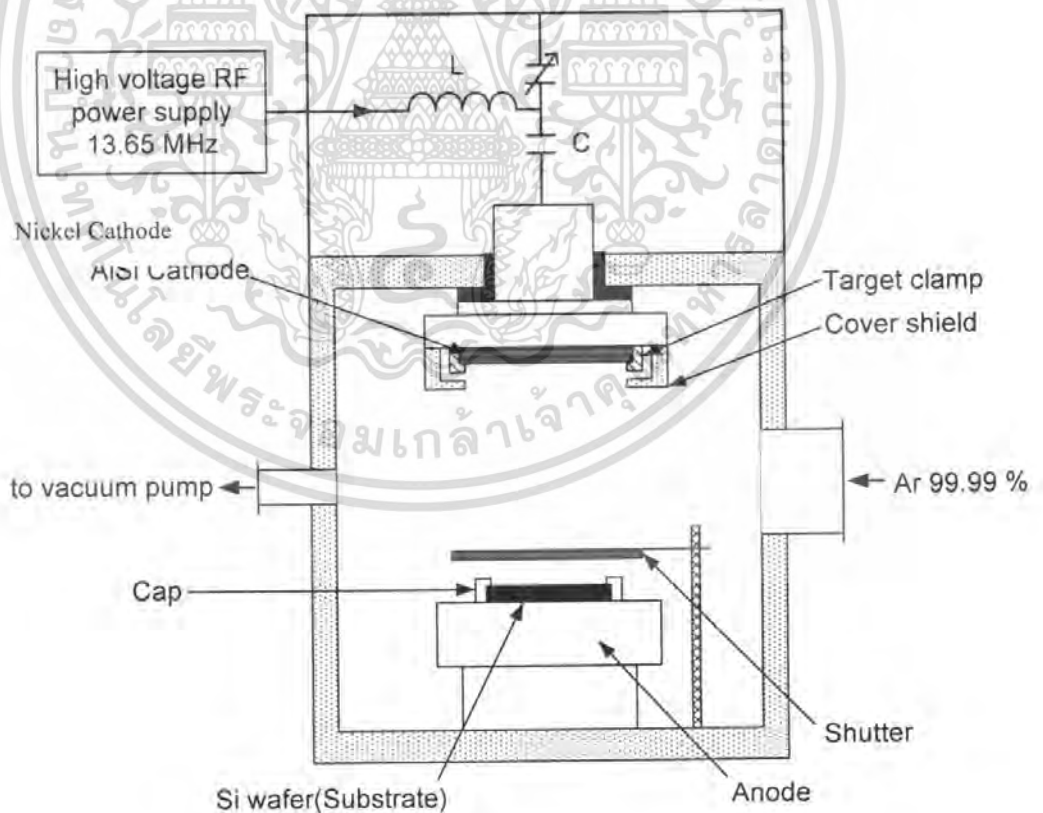
กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะที่เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า "อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์" ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากไดอะแกรมในรูปที่ 4.1 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปัตเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz) , แหล่งจ่ายแก๊ส , ห้องสปัตเตอร์(sputtering chamber), และปั๊มสุญญากาศ(rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปัตเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่นนิเกิล เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การสปัตเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรแมทซึ่งเข้าสู่ห้องสปัตเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปัตเตอร์ ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบ และดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชน โดยนิเกิลที่ขั้วคาโทด ทำให้อะตอมของนิเกิลกระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นซิลิกอนซึ่งวางที่ขั้วแอโนด เกิดเป็นฟิล์มโลหะนิเกิล



รูปที่ 4.2 ระบบการสปัตเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการสปัตเตอร์ เริ่มด้วยการนำแผ่นซิลิคอน หนา(100) วางลงบนหัวอาโนด แล้วดูดอากาศออกจากห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งเหลือความดันต่ำกว่า 5×10^{-7} บาร์ เพื่อทำความสะอาดห้องสปัตเตอร์ จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งถึงความดัน 2×10^{-1} bar โดยค่อยๆ เพิ่มกำลัง RF ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดพลาสมาขึ้นในห้องสปัตเตอร์ จากนั้นปรับความดันให้ได้ 2×10^{-3} bar ปรับกำลัง RF จนได้ค่าที่จะทำการสปัตเตอร์ ทำการพรี-สปัตเตอร์ (pre-sputter) โดยปล่อยให้ระบบอยู่ในเงื่อนไขที่จะทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของนิเกิล จึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปัตเตอร์ ดังแสดงตารางที่ 4.1

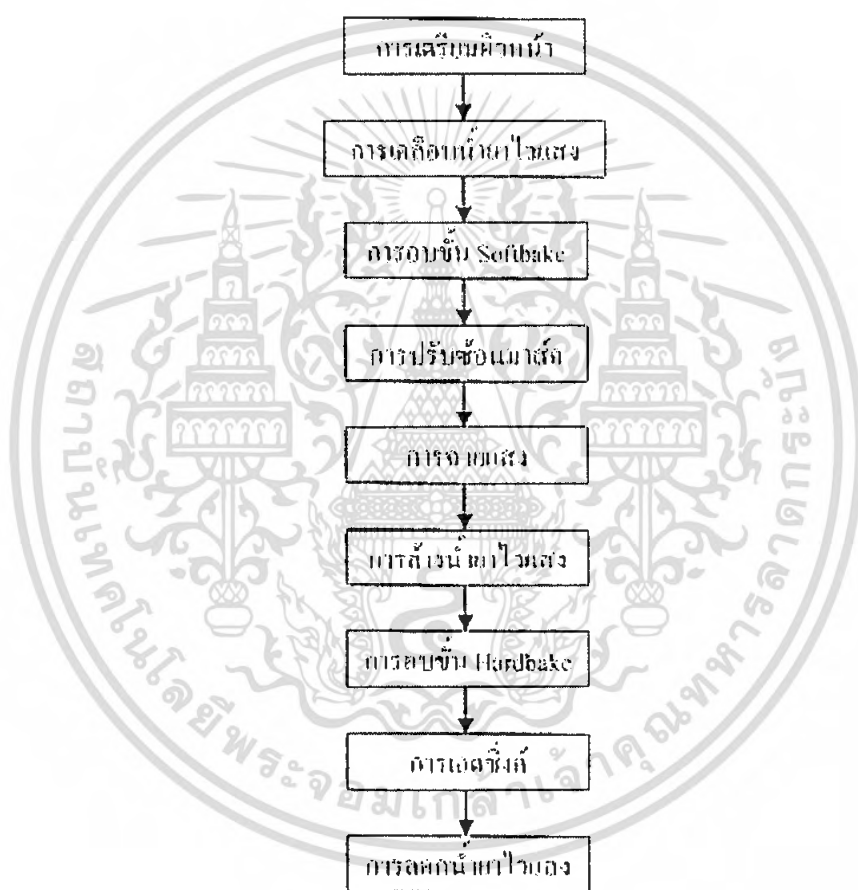
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสปัตเตอร์นิเกิลในการทดลอง

| เงื่อนไข | รายละเอียด |
|---------------------------------|--|
| หัว คาโรด | เป้าโลหะนิเกิล ขนาด \varnothing 80 mm. ความบริสุทธิ์ 99.999% |
| บรรยากาศ | อาร์กอน 99.99 % |
| ความดัน | $2-5 \times 10^{-3}$ bar |
| ระยะห่างของหัวคาโรด และหัวอาโนด | 37 mm |
| กำลังงาน RF | 100 - 150 วัตต์ |
| อุณหภูมิของอาโนด | $25 - 30$ °C |
| ฐานรอง | ซิลิคอน หนา(100) ปกคลุมด้วยซิลิคอนไดออกไซด์ 0.3 ไมครอน |

4.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมเพื่อการสกัด หรือเอตซิ่ง (etching) ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วน ที่เคลือบอยู่บนผิวผลึกซิลิคอนออก เพื่อการแพร่อะตอมของสารเจือ (impurity atom) เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ทำให้เกิดส่วนต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.3 เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกคลดความเอกลสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตมาสก์ (photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ (design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์ จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลาย



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้าง อยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสงชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลือปกคลุมอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ ถูกสกัด หรือเอตซิ่ง ด้วย “สารตัวสกัด” หรือเอตเชนท (etchant)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การเตรียมผิวหน้าแผ่น

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆหลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึก ก่อนที่จะเคลือบน้ำยาไวแสง บนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน อย่างไรก็ดี ผิววัสดุที่ใช้มากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้น ซิลิคอนออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้น หรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์ เพราะโดยปกติ ผิวของชั้นออกไซด์นี้ จะดูดซึมน้ำ หรือความชื้นจากอากาศได้คือการกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิ ราว 200-250 °C นาน 30 นาที ภายหลังการอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้นานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซึมน้ำเข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้น เมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการ เคลือบน้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ ก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexa Methyl Disilazane (HMDS) ฉีดพ่น หรืออบไอระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำ ออกจากชั้นผิวของออกไซด์โดยทั่วไปในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่น หรือหมุนให้แห้ง จากนั้นจึงจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง

4.3.2 การเคลือบน้ำยาไวแสง

การเคลือบน้ำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ทีผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสม หรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้ คือ

4.3.2.1 แบบสปินเนอร์ (Spinner)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบน้ำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกวงกลมการเคลือบน้ำยาไวแสงวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือสปินเนอร์ โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูกวางลงบนแท่นหมุน และถูกยึดติดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นน้ำยาไวแสงจะถูกหยดลง บริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (spin) ด้วยความเร็วรอบราว 3000-6000 rpm/min ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที น้ำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ความหนาของฟิล์มสารไวแสงที่ได้ มีค่าทั่วไปประมาณ 1000-2000 Å ถ้าหากความเร็วรอบต่ำเกินไป ชั้นของสารไวแสงจะหนามาก แต่ถ้าความเร็วรอบสูงๆความหนาของชั้นสารไวแสงจะไม่เท่ากัน โดยบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะหนามาก ในขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังฝุ่นละอองเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงทำภายในห้องสะอาด หรือ clean room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกควบคุม ให้มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้ระบบกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter) ระดับของความสะอาดจะขึ้นอยู่กับ ขนาด และจำนวนฝุ่นละอองในอากาศ โดยปกตินิยมใช้ค่าความหนาแน่น ของฝุ่นละอองขนาด 0.5 ไมโครเมตรในปริมาตร 1 ลูกบาศก์ฟุตเป็นมาตรฐาน

4.3.2.2 แบบสเปรย์ (Spray Coating)

วิธีการนี้น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึกและยึดเกาะกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ได้ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ ด้านล่างของแผ่นผลึก

4.3.2.3 แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้ง จะนิยมทำในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนเป็น หรือชิพ (Chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันเศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่นที่จะเกิดขึ้นขณะทำการตัดแยกชิพ ด้วยเลื่อย (sawing) หรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก

4.3.3 การอบขั้น Prebake หรือ Softbake

ภายหลังการเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบ เพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นนี้ เรียกว่า prebake หรือ softbake ซึ่งใช้อุณหภูมิราว 90-100 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำลงเล็กน้อยคือ 80-90 °C การอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดมีปฏิกิริยาเคมี – ความร้อน หรืออาจไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีซึ่งสามารถกระทำได้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (convection oven) ซึ่งในตู้อบจะมีพัดลมช่วยพัดไอร้อนจากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นผลึกทำให้แผ่นผลึกร้อน การอบสามารถทำได้จำนวนหลายแผ่นพร้อมๆ กัน โดยแผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่องคาสเซ็ทพิเศษ และวิธีการให้ความร้อนแบบนี้แผ่นผลึกจะได้รับความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน จึงอาจเกิดการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งเป็นข้อเสีย และไม่เหมาะที่จะใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง สำหรับในสายการผลิตวงจรรวม ในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกทีละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการเช่นนี้ ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถไล่ความร้อนออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อน เช่นนี้เรียกว่า “bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (hot plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางบนแผ่นร้อน หรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

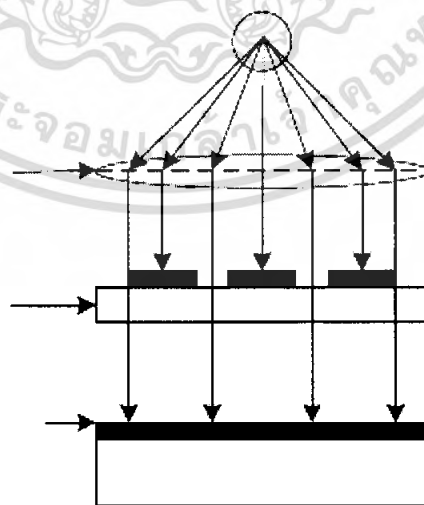
4.3.4 การปรับซอมนาส์ค (Mask Alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาสก์ซึ่งโดยปกติจะถูกวางทับ (contact) ลงไปบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็กระจกโฟโตมาสก์ชิ้นแรก หรือมาสก์ที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซอมนาส์ค (mask alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นผลึกเลย แต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่ง หรือบริเวณที่ถูกต้องเพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาสก์ตั้งแต่มาสก์ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นจะต้องมีการปรับซอมนาส์ค เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาสก์ ซอมนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ในที่สุดของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี จะทำให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ที่ตำแหน่งที่ถูกต้อง โครงสร้างของวงจรรวมจึงเป็นไปตามที่ออกแบบ และถูกต้องอย่างไรก็ดีเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซอมนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซอมนาส์ค” ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือแผ่นผลึกจะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (x-y-z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว x, y, z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาสก์จะถูกยึดให้อยู่หนึ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นผลึก และบนโฟโตมาสก์ พร้อมทั้งทำการปรับเลื่อนแผ่นผลึกทั้งแกน x, y และมุม θ จนกระทั่ง ภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาสก์ซ้อนกันลงตรงตำแหน่ง ที่ถูกต้อง จากนั้นจึงปรับให้แผ่นผลึกเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน z จนแนบสนิท กับกระจกโฟโตมาสก์ ในกรณีที่ภาพลวดลาย มีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซอมนภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไป ภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก

นอกจากนี้ยังมีจำนวนมากอีกด้วยจึงเป็นการยาก ที่จะทำการปรับซอมน โดยสังเกตจากภาพลวดลายของวงจรรวม ในทางปฏิบัติ เพื่อให้การปรับซอมนทำได้ง่าย จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซอมนาส์คโดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับซอมน” ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (square in box), กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

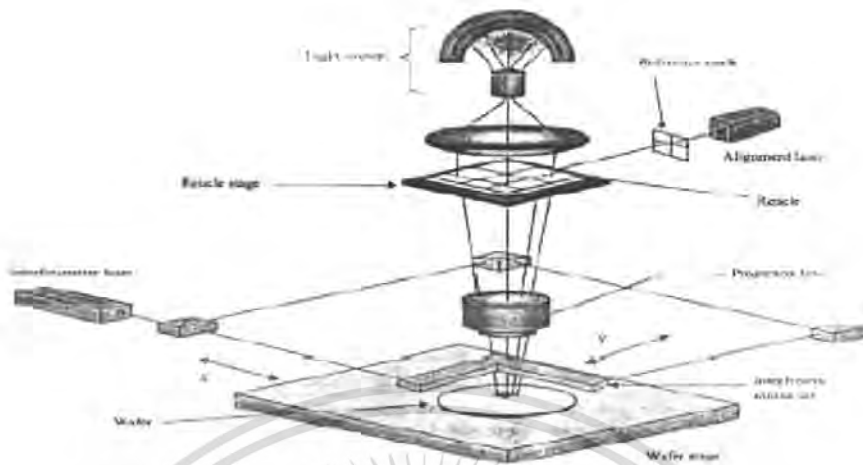
กากบาท เช่น ภาพลวดลายบนแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับซ้อน” เป็นรูปจัตุรัส และภาพลวดลายบนกระจกมาส์ค เป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น การปรับซ้อนทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพ จัตุรัสเข้าไปซ้อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยมในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมบนแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโตมาส์ค จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกต้องทุกประการ ถ้าหากการปรับซ้อนตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้อง และเกิดการเสียหายได้ขั้นตอนของการปรับซ้อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมากการพิมพ์ภาพด้วยการใช้กระจกโฟโตมาส์คมาวางทับลงไปบนแผ่นผลึกๆ ให้แนบสนิทแล้วฉายแสงซึ่งเรียกว่า วิธี contact Printing ดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่าการสัมผัสกันระหว่างแผ่นผลึก และกระจกโฟโตมาส์ค ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยขีดข่วน เกิดสิ่งสกปรก หรือความเสียหายต่าง ๆ ได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการใช้วิธีพิมพ์แบบอื่น ๆ เช่น วิธี proximity printing หรือ วิธี projection printing ดังแสดงรูปที่ 4.4 ซึ่งกระจกโฟโตมาส์คจะไม่สัมผัสกับผิวหน้าของแผ่นผลึกเลย จึงช่วยลดความเสียหายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้

สำหรับวิธีการ Projection printing อาจทำได้ 2 แบบคือ แบบ whole-substrate projection printing ซึ่งเป็นการพิมพ์ ภาพวงจรรวมลงบนแผ่นผลึก ทั้งหมดครั้งเดียวและแบบ step and repeat projection ซึ่งเป็นการพิมพ์ภาพวงจรรวมทีละภาพๆ ลงบนแผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.5 ซึ่งการพิมพ์วิธี projection printing นี้ได้รับความนิยมมากในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมแต่อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูงมากราคาของเครื่องค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.4 กระบวนการพิมพ์ภาพ โดยวิธี Projection Printing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



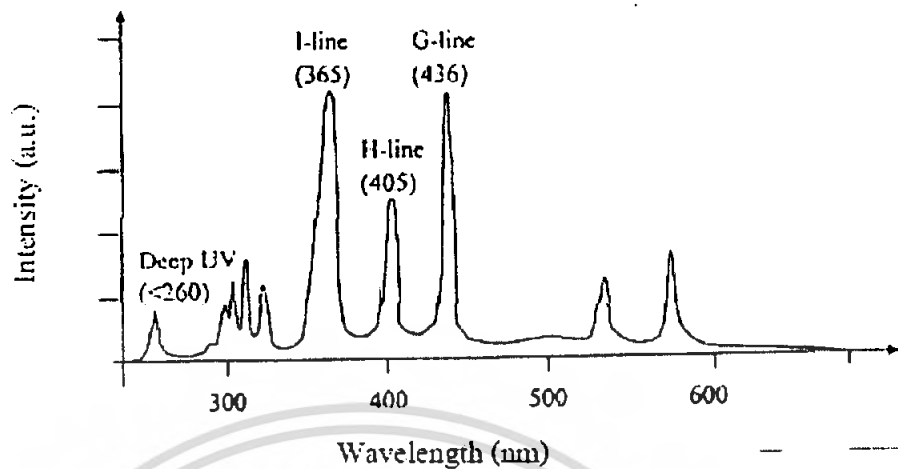
รูปที่ 4.5 กระบวนการพิมพ์ภาพโดยวิธี Step and Repeat Projection

4.3.5 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ็อนภาพระหว่างกระจกโฟโตมาส์ค และแผ่นผลึกเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโตมาส์ค เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสง ปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น λ ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วง และสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถ่ายรูปจะต้องใช้แสงในห้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กัน โดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (mercury vapor lamp) ซึ่งหลอดนี้จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความยาวคลื่นราว 310, 365, 405 และ 440 นาโนเมตร ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 3.6 และจากการศึกษาพบว่าน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 405 นาโนเมตร และน้ำยาไวแสงชนิดบวก จะมีความไวสูงสุด ใกล้กับเส้นสเปกตรัม 365 นาโนเมตร

จากสเปกตรัมของแสง ความยาวคลื่นประมาณ 400 nm ถูกเรียกว่า Near Ultraviolet Wave Lengths หรือ Near UV. ซึ่งเป็นแสง สำหรับเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีโดยทั่ว ๆ ไป สำหรับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่านี้ เราเรียกว่า Far Ultraviolet Wave Lengths หรือ Far UV. จากการศึกษพบว่า การพิมพ์ภาพที่มีขนาดเล็กๆ จำเป็นต้องใช้แสง ที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ เช่นขนาดราว 2 ไมโครเมตร ต้องใช้คลื่น Far UV. ดังนั้นในวงจรรวมระดับ VLSI ที่มีขนาดอุปกรณ์เล็กราว 1 ไมโครเมตร จึงต้องใช้แสงประเภท Far UV. ซึ่งมีความยาวคลื่นราว 100-200 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



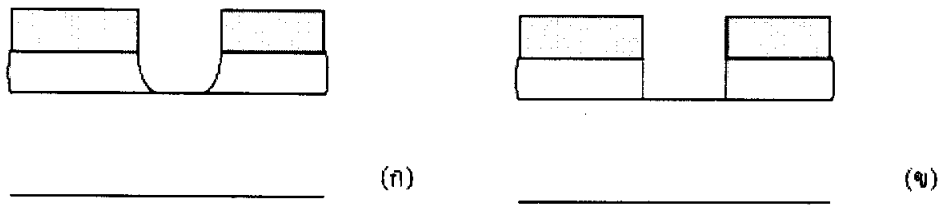
รูปที่ 4.6 แสงสเปกตรัมของหลอดเมอร์คิวรี

4.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Resist Development)

ขั้นตอนนี้เป็นการใช้น้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) ละลาย หรือล้างน้ำยาไวแสง ที่ผ่านการฉายแสงมาแล้ว ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกละลายออก แต่ถ้ากรณีน้ำยาไวแสงชนิดบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป การล้างน้ำยาไวแสงนี้ถ้าเป็นกรณีน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะใช้วิธีการพื้นฐานคือ นำแผ่นผลึกลงไปหมุนบนสปินเนอร์ (spinner) คล้ายกับการเคลือบน้ำยาไวแสง โดยขณะที่แผ่นผลึกกำลังหมุน น้ำยาล้างจะถูกฉีดพ่นลงไปบนแผ่นผลึก น้ำยาไวแสงที่ถูกละลายก็จะถูกแรงเหวี่ยงกระจายออกไปรอบๆ จากนั้นล้างแผ่นผลึกให้สะอาดด้วยสารละลายอื่นๆ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ในกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดบวก อาจทำได้ครั้งละหลายๆ แผ่นพร้อมกัน โดยจุ่มลงในน้ำยาล้าง หรืออาจใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำยาล้าง คล้ายกับวิธีการล้างน้ำยาไวแสงชนิดลบ

4.3.7 การเอตซิงค์ (Etching)

ขั้นตอนนี้เป็นการสกัด หรือการละลายชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ หรือวัสดุอื่นๆ ด้วยสารเคมีที่เป็นสารตัวสกัด หรือเอตเชนซ์ โดยที่แผ่นผลึกที่ผ่านการล้างน้ำยาไวแสง (Development) แล้ว น้ำยาไวแสงจะเหลือตกค้าง และปกคลุมอยู่บนผิวของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และบางส่วนก็ถูกละลายออกไป ทำให้ชั้นออกไซด์ บริเวณที่ไม่มีสารไวแสงเหลืออยู่ ถูกทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวสกัด เช่น กรดกัดแก้ว (HF) ก่อนการเอตซิงค์ หรือก็คือ ภายหลังจากการสร้างน้ำยาไวแสง แผ่นผลึกจะถูกนำไปอบ (post bake หรือ hard bake) เพื่อใช้ชั้นน้ำยาไวแสงแห้งสนิท และยึดติดแน่นกับผิวของ



รูปที่ 4.7 ผลของการเอตซิงค์ (ก) การเอตซิงค์เปียก และ (ข) การเอตซิงค์แห้ง

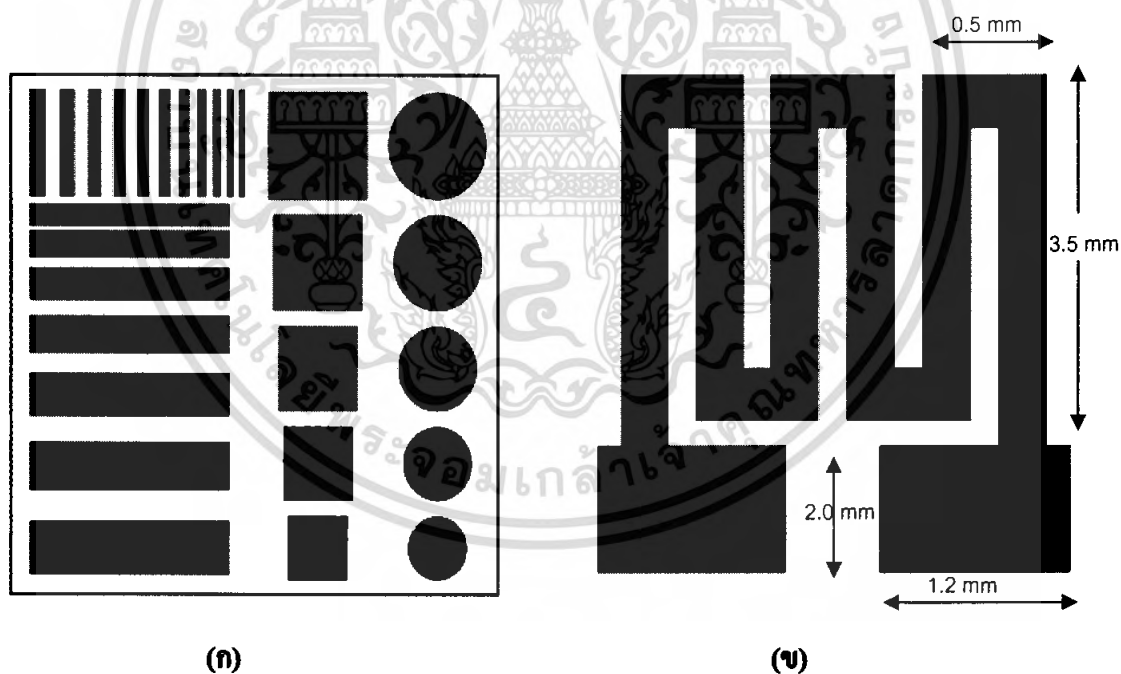
ออกไซด์ วิธีการการสกัดชั้นสาร หรือชั้นออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารตัวสกัด ที่เป็นสารละลายเคมีนี้ ถูกเรียกว่า “wet chemical etching” หรือ “wet etching” หรือ การเอตซิงค์เปียก ดังรูปที่ 4.7 (ข)

นอกจากนี้การสกัด หรือเอตซิงค์ สามารถทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาของพลาสมา (plasma) วิธีการนี้ถูกเรียกว่า “พลาสมาเอตซิงค์” หรือ “plasma etching” ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า dry etching หรือ “การเอตซิงค์แห้ง” การเอตซิงค์แบบเปียก จะทำให้เกิดมีการละลายของชั้นสารออกไปในทุกๆ ด้านรวมทั้ง ทางด้านข้างด้วย ทำให้บริเวณขอบของชั้นสาร ถูกสกัดออกไป การเอตซิงค์ในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า “ไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ “Isotropic-type” ส่วนการเอตซิงค์แบบแห้ง หรือ plasma etching จะได้ผลการเอตซิงค์แบบ “แอนไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ anisotropic-type ซึ่งจะทำให้ได้ลักษณะของลวดลายที่คมชัดกว่า การเอตซิงค์แบบเปียก ดังแสดงรูปที่ 4.7 (ก) และภาพลวดลายไม่ผิดเพี้ยนจากต้นแบบ ซึ่งวิธีการนี้ ถูกนำมาใช้กับลวดลายที่มีขนาดเป็นซับไมโครเมตร โดยที่การเอตซิงค์แบบเปียกไม่สามารถนำมาใช้ได้ อัตราการเอตซิงค์แบบเปียก จะขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารตัวสกัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการเอตซิงค์ สารละลายซึ่งเป็นสารตัวสกัด ชั้นของออกไซด์ได้แก่กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งจะมีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ผสมอยู่เพื่อควบคุมปฏิกิริยาเคมีให้สม่ำเสมอ อัตราการสกัด (etching rate) ประมาณ $1000 \text{ \AA}/\text{min}$ ที่อุณหภูมิห้องภายหลังจากทำการเอตซิงค์แล้ว ชั้นของน้ำยาไวแสงจะถูกลอกออก ด้วยการนำไปจุ่มในสารละลายที่ใช้สำหรับการลอกฟิล์ม หรือดัมในกรดบางชนิด เช่น กรดน้ำยาไวแสงชนิดลบใช้ดัมในกรดซัลฟูริกเข้มข้น และชนิดบวกใช้จุ่มล้างในสารอะซิโตน (acetone) สำหรับกรณีของซับไมครอน นิยมใช้วิธีการของพลาสมาเอตซิงค์ ซึ่งจะทำให้ได้ผิวหน้าที่สะอาด และเรียบร้อย ไม่มีชั้นของน้ำยาไวแสงหลงเหลือหรือติดค้างอยู่เลย

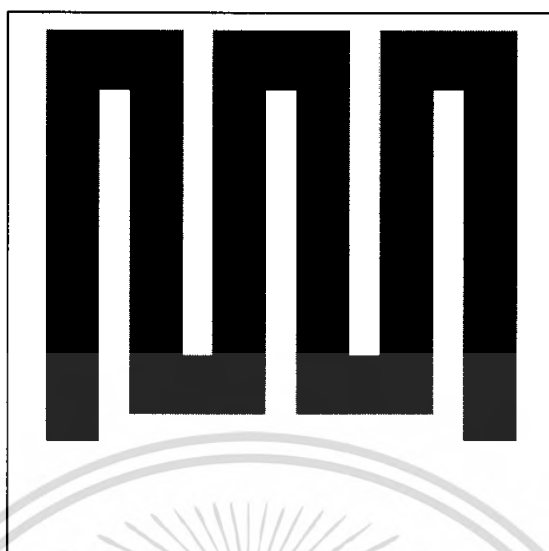
4.4 การออกแบบลวดลาย สำหรับการสังเคราะห์เป็นลวดลายที่ต้องการ และนำมาประยุกต์เป็นโครงสร้างความต้านทาน

จะกล่าวถึงเทคนิคการออกแบบและสร้างลวดลายอย่างเหมาะสมบนฐานรองซิลิคอน เพื่อต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ ก่อเกิดเป็นลักษณะของโครงสร้างความต้านทาน ซึ่งหลักการนี้สามารถนำมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวตรวจจับก๊าซได้ โดยขั้นตอนการสร้างอย่างละเอียดทั้งหมดนั้น ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4

เราสามารถออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม CorelDRAW จากนั้น จึงนำฟิล์มที่ออกแบบไว้ ไปยิงบนแผ่นใส เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยในรูปที่ 4.8 เป็นมาร์คที่ 1 ซึ่งต้องการสร้างเป็นลวดลายของตัวแคตะไลต์นิกเกิล และรูปที่ 4.9 เป็นลวดลายของทองแดง สำหรับสร้างให้เป็นขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.8 มาร์คสำหรับสร้างลวดลายของแคตะไลต์นิกเกิล



รูปที่ 4.9 มาร์คสำหรับสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าทองแดงของรูปที่ 4.8 (ข)

4.4.1 กระบวนการสร้างลวดลาย

การเตรียมแผ่นฐานรองซิลิคอนให้สะอาด

- ต้มในกรด HNO_3 10 นาที
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วย N_2
- ต้มใน Tricho 5 นาที
- อัลตราโซนิกด้วยอะซิโตน 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วย N_2

4.4.2 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปทำการสร้างชั้น SiO_2 โดยวิธี dry oxidation ที่อุณหภูมิ 1100°C ในเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้วิธี wet oxidation ที่อุณหภูมิ 1100°C ในเวลา 1.5 ชั่วโมงและใช้ dry oxidation เป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 1100°C ใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นซิลิกอนได้ความหนาซิลิกอนไดออกไซด์ ประมาณ 5000 Å° ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11



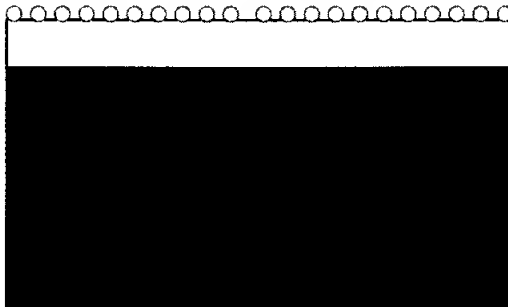
รูปที่ 4.10 แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น



รูปที่ 4.11 ซิลิกอน ไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอน

4.4.3 การเคลือบโลหะแคตะไลต์ที่เกิด โดยวิธีการสปัตเตอร์

เงื่อนไขการสปัตเตอร์นี้เกิดขึ้นตอนนี้ เป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตัวต้านทาน ซึ่งจะใช้เวลาในการสปัตเตอร์ด้วยเวลา 90 วินาที เพื่อต้องการให้โลหะนี้เกิดกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อน ไม่ให้เกิดเป็นฟิล์มโลหะ ดังในรูปที่ 4.12

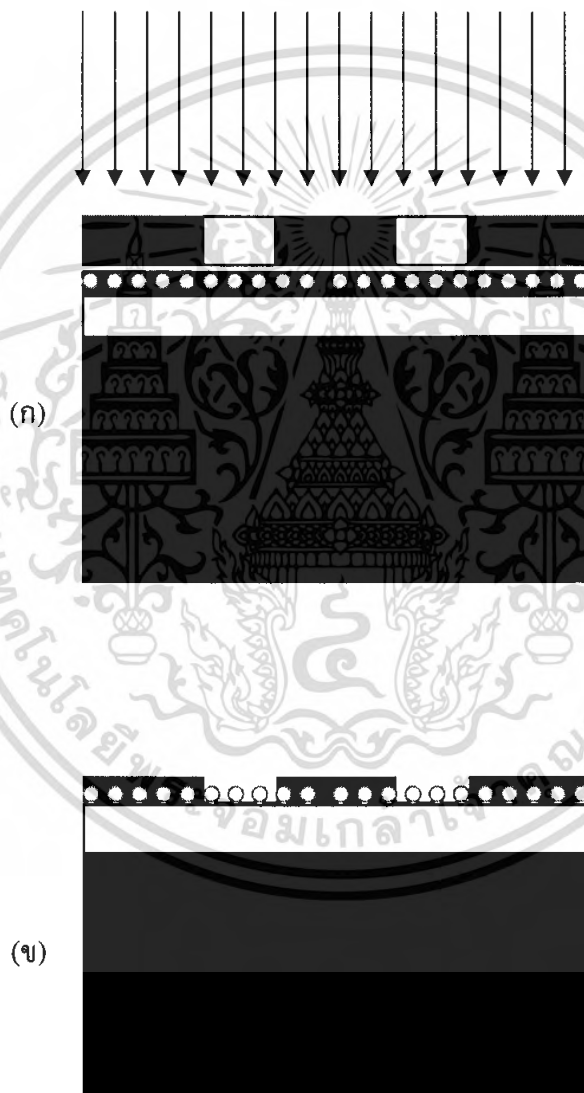


รูปที่ 4.12 นิเกิลถูกเคลือบบนซิลิกอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีมาร์ค1

นำชิ้นงาน ไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก และอบให้แห้ง จากนั้นจึงนำไปฉายแสงผ่านกระจกมาร์คสำหรับสร้างลวดลายนิเกิล แล้วนำมาทำการ Develop จากนั้นจึงนำไปสกัดชั้นนิเกิลออกแล้วทำการลอกน้ำยาไวแสง จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.13(ก) และ (ข)

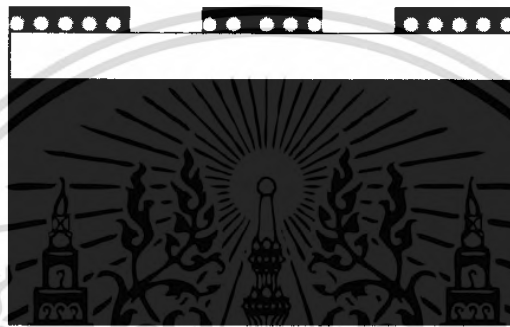


รูปที่ 4.13 กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี (ก) การฉายแสงและ (ข) การdevelop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 วิธีการสกัดชั้นนิเกิล

นำสารละลายนิเกิลต้มให้พออุ่น จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาจุ่มในสารละลายนิเกิลเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง และนำไปลอกน้ำยาไวแสง จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 กระบวนการสกัดชั้นนิเกิล



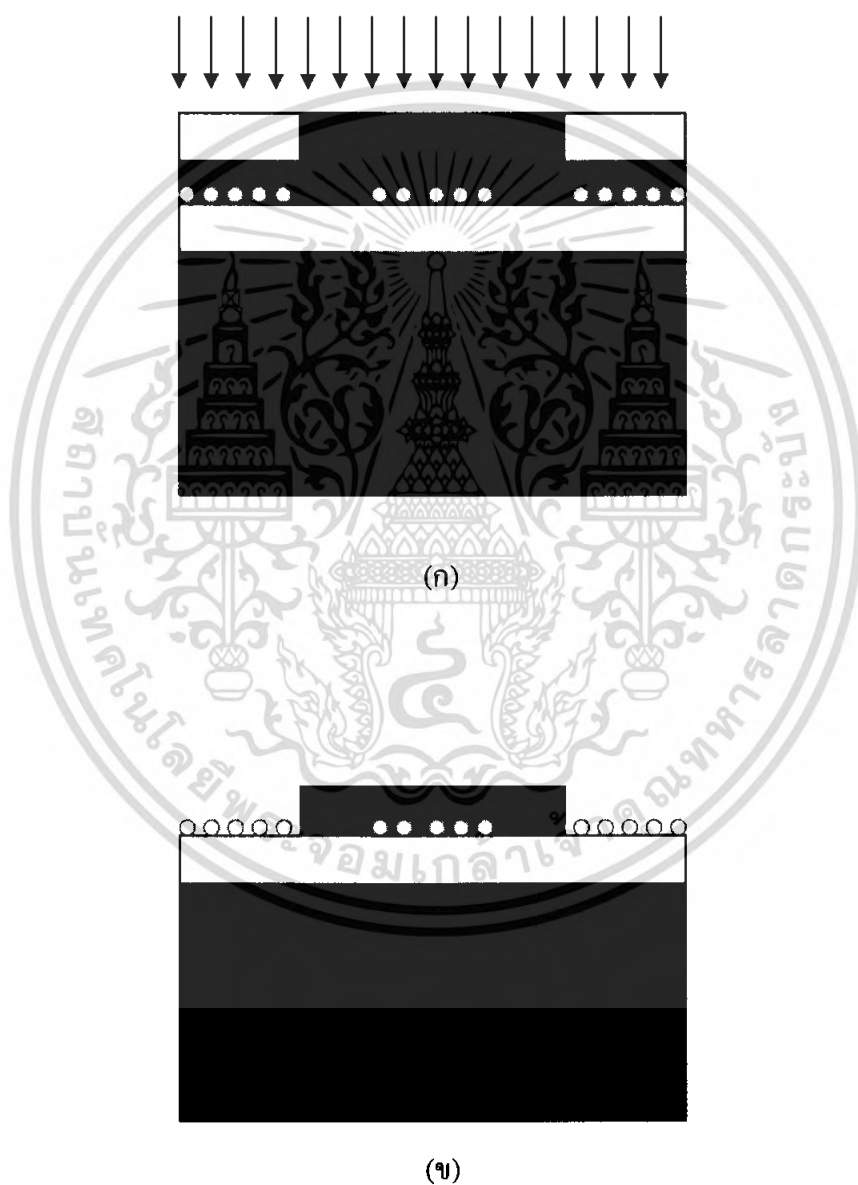
รูปที่ 4.15 ทำการลอกน้ำยาไวแสง

ตั้งแต่รูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.15 เป็นกระบวนการสร้างในรูปที่ 4.8 (ก) โดยเมื่อนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้วจะเกิดเป็นลวดลายตามที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีมาร์ค2

นำชิ้นงานไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกและอบแห้ง จากนั้นนำไปฉายแสงผ่านกระจกมาร์คสำหรับสร้างขั้วทองแดง จากนั้นจึงนำมาทำการ Develop ดังแสดงในรูปที่ 4.16(ก) และ (ข)

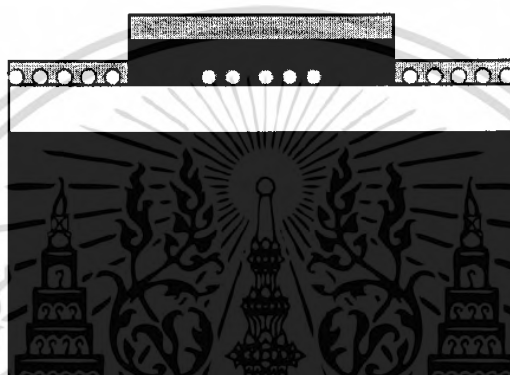


รูปที่ 4.16 กระบวนการ โฟโต้ลิโธกราฟี (ก) การฉายแสงและ (ข) การdevelop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 การเคลือบโลหะทองแดง โดยวิธีการสปีดเตอร์

การสปีดเตอร์ทองแดงสำหรับการสร้างขั้วไฟฟ้า จะใช้เวลาในการสปีดเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อต้องการให้เกิดเป็นฟิล์มทองแดง จากนั้น จึงนำไปลอกน้ำยาไวแสง โดยเป็นกระบวนการ Lift-Off เพื่อให้ส่วนที่อยู่บนน้ำยาไวแสงหลุดออกไปพร้อมกับทองแดงที่อยู่ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 สปีดเตอร์ด้วยทองแดง



รูปที่ 4.18 ทองแดงถูกเคลือบบนนิเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน

5.1 วัตถุประสงค์

- 5.1.1 ศึกษากระบวนการการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน HFCVD
- 5.1.2 ศึกษาการควบคุมการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ตามที่ต้องการ
- 5.1.3 ศึกษาการการออกแบบลดกลายเป็น โครงสร้างของตัวด้านทาน
- 5.1.4 ศึกษาการออกแบบลดกลายเป็น เพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับประเภทก๊าซ

5.2 อุปกรณ์และสารเคมี

- 5.2.1 ท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา(Chamber)
- 5.2.2 แอลกอฮอล์ (Ethanol)
- 5.2.3 ลวดทั้งสแตน
- 5.2.4 ถังเก็บก๊าซไฮโดรเจน (H_2)
- 5.2.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง
- 5.2.6 เครื่องวัดอัตราการไหล(Flow meter)
- 5.2.7 เทอร์โมคัปเปิล
- 5.2.8 ฐานรอง
 - 5.2.8.1 แผ่นซิลิกอนสปัดด้วยนิเกิล
 - 5.2.8.2 แผ่นซิลิกอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิลแล้วกัคนิเกิลเป็นลวดลาย

5.3 ขั้นตอนการทดลอง

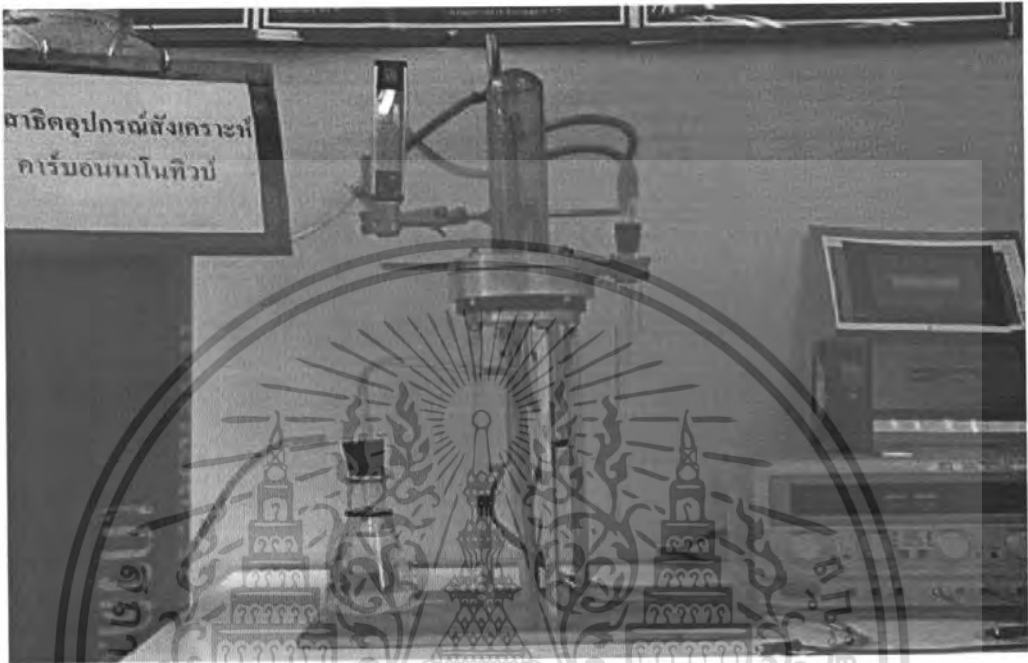
5.3.1 นำฐานรองใส่ในท่อแก้วของชุดอุปกรณ์ ดังรูปที่ 5.1

5.3.2 ให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่าน Valve-1 และ Valve-2 เข้าไปใน Chamber เพื่อไม่ให้เกิดการออกซิไดซ์ในขณะที่ทำการทดลอง ด้วยอัตราการไหล 150 cc / นาที โดยก๊าซไฮโดรเจนไม่ได้ไหลผ่านแอลกอฮอล์ โดยในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ดังรูปที่ 5.2

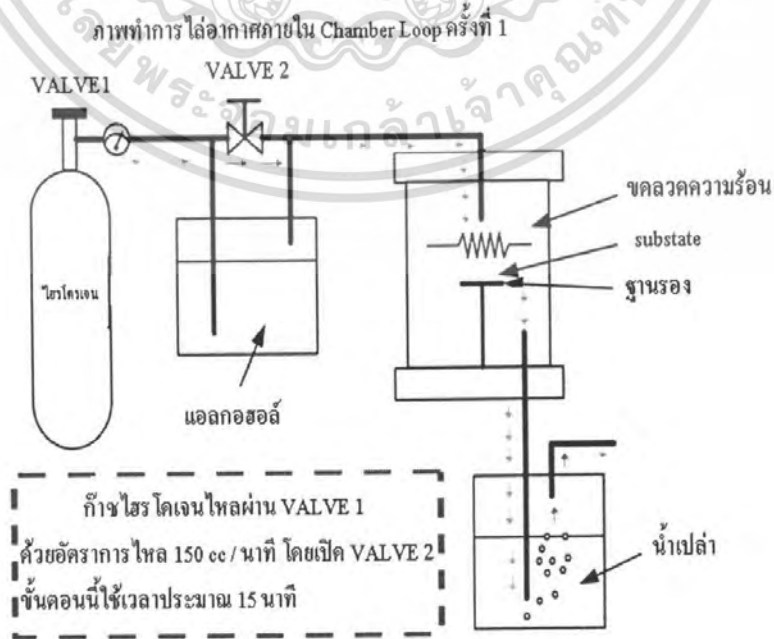
5.3.3 ทำการไล่อากาศใน Chamber อีกครั้ง ขั้นตอนนี้ทำการลด valve-1 ที่ถังไฮโดรเจนให้มีอัตราการไหลประมาณ 100 cc / นาที ปิด valve-2 เพื่อให้ไฮโดรเจนส่วนหนึ่งไหลผ่านแอลกอฮอล์ ด้วยอัตราการไหลประมาณ 8-10 cc / นาที โดยขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 10 นาที โดยก๊าซ

ไฮโดรเจนถูกแบ่งเป็นสองทางทางหนึ่งผ่านสารเอทานอล ทำให้เกิดฟองอากาศพุดพาเอาไอระเหยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแอลกอฮอล์มาผสมกับอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นไฮโดรเจนรวมกันเป็นสารจ่ายไอระเหย อัตราส่วนทั้งสองส่วนถูกควบคุมด้วยมิเตอร์การไหลและวาล์ว ดังรูปที่ 5.3



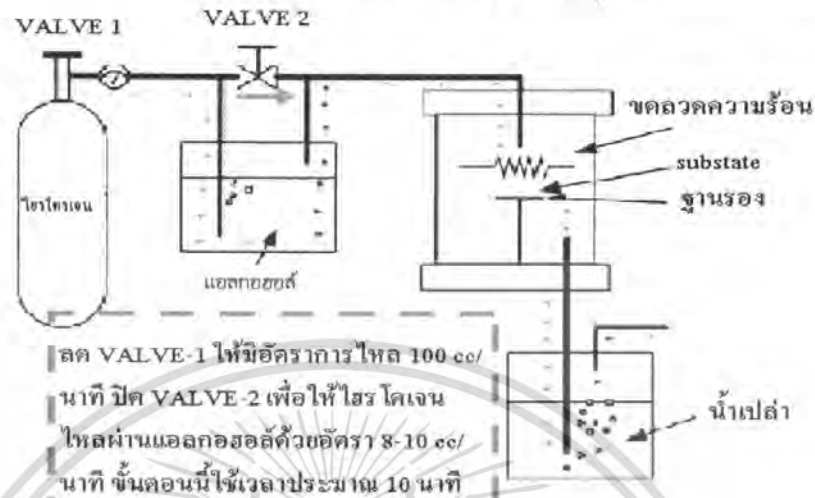
รูปที่ 5.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์



รูปที่ 5.2 ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในภาควิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2



รูปที่ 5.3 ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2

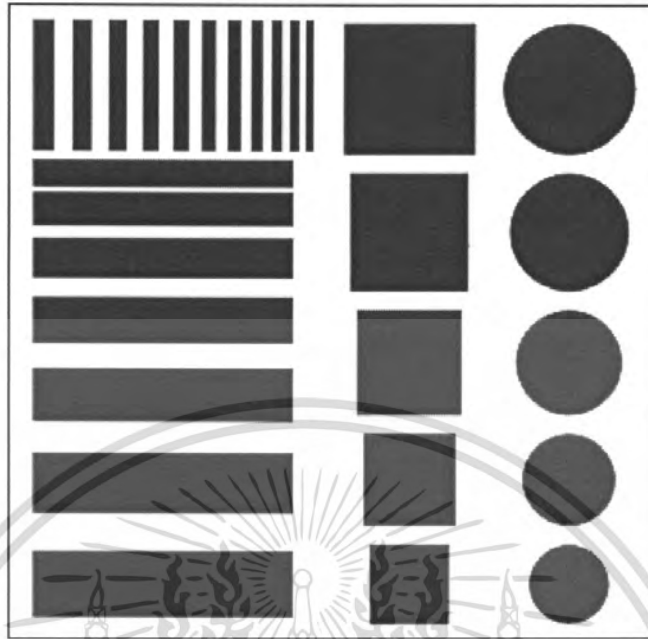
5.3.4 ทำการให้ความร้อน โดยใช้ขดลวดทั้งสแตนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. ถูกทำให้ร้อนโดยแหล่งจ่ายไฟที่มีค่า 5-20 V และกระแส 2-7 A เริ่มกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 40-60 นาที จากนั้นทำการปิด Valve-1 และรอให้ไนโตรเจนหยุดไหลเข้า Chamber และรอให้อุณหภูมิมีลดลง จากนั้นนำ sample ออก

5.4 ผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากการสร้างลวดลายโดยวิธีการกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

5.4.1 ฐานรองชนิดคอนสับต์ด้วยนิเกิล

จากการทดลองการสร้างลวดลายโดยวิธีการกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ด้วยวิธีนี้ เริ่มจากการเตรียมฐานรองด้วยการนำฐานรองไปสปีดเตอร์ด้วยนิเกิลทั่วทั้งแผ่นแล้ว จะสามารถสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งลวดลายที่ออกแบบไว้ จะนำไปยิงฟิล์มบนแผ่นใส แล้วนำมาแปะบนกระจกต้นแบบ จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ให้เกิดเป็นลวดลายต่างๆตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

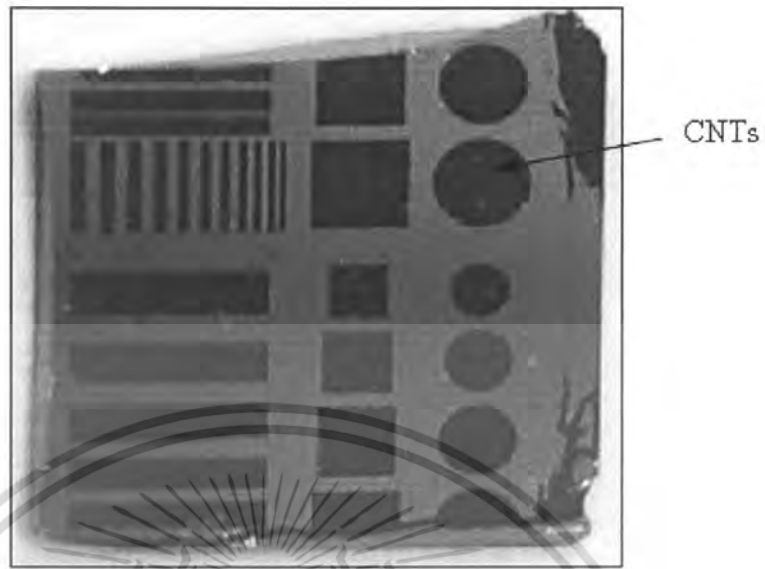


รูปที่ 5.4 เป็นมาร์คของลวดลายต่างๆที่ได้ออกแบบไว้สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



รูปที่ 5.5 เป็นภาพถ่ายลวดลายของนิเกิลหลังผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

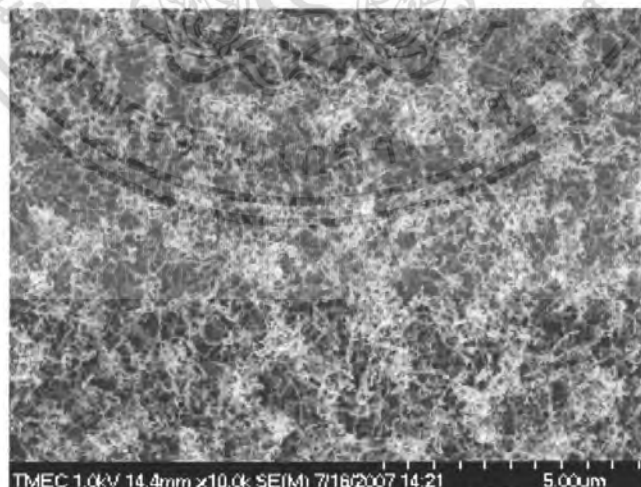
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 เป็นภาพถ่ายหลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

5.4.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM

รูปที่ 5.7 เป็นภาพถ่ายจาก SEM บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายเป็นนิเกิล ซึ่งจะสังเกตุฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วทั้งพื้นผิว และมีขนาดท่อที่ค่อนข้างเล็ก

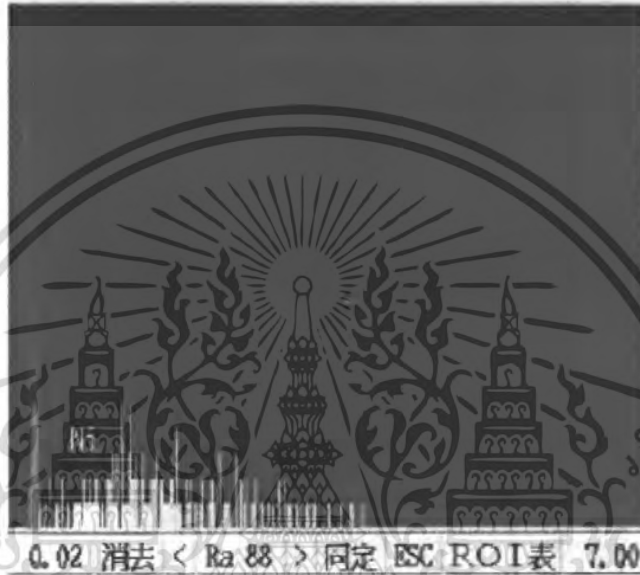


รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย EDX

รูปที่ 5.8 เป็นภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่า มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนเป็นฟิสิกส์เกิดขึ้นสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความหนาแน่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้

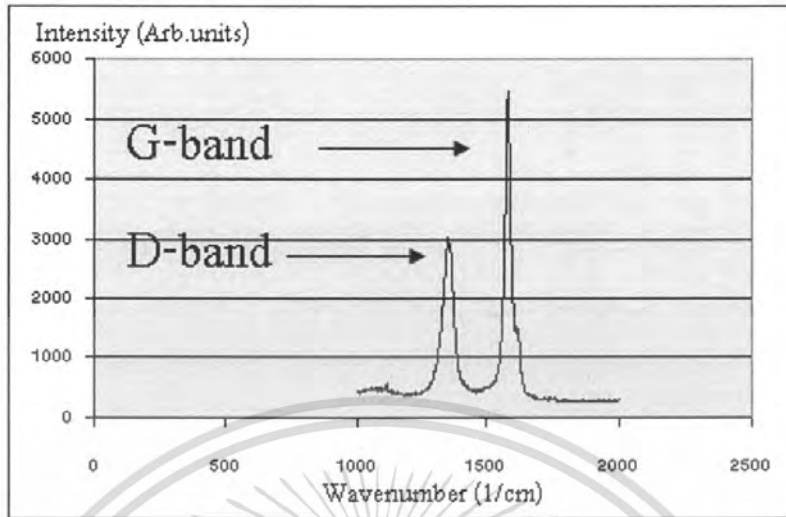


รูปที่ 5.8 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนาโนทิวป์ที่มีผลผลิตหลายชนิดหลังทำการสังเคราะห์

5.4.4 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย Raman Spectroscopy

รูปที่ 5.9 เป็นกราฟรามานสเปกตรัมที่บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งฟิสิกส์ G แสดงถึงพันธะของกราฟไฟต์ที่สมบูรณ์ ฟิสิกส์ D เป็นฟิสิกส์ที่เกิดจากคาร์บอนที่มีพันธะไม่สมบูรณ์ ดังนั้น การหาคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดูจากอัตราส่วนของ G/D ซึ่งคำนวณได้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟของฟิสิกส์ G ต่อฟิสิกส์ D

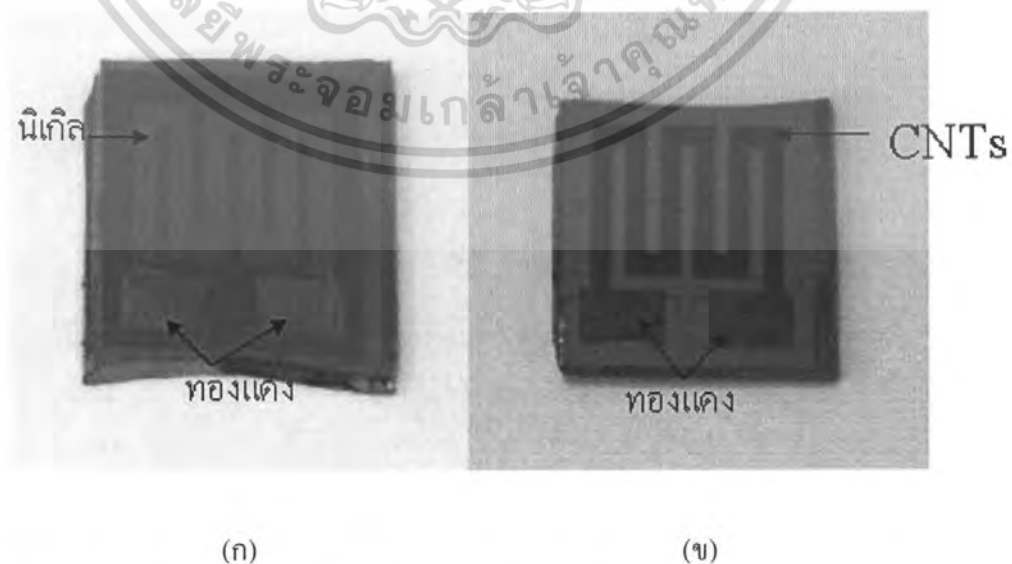
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองซิลิคอน

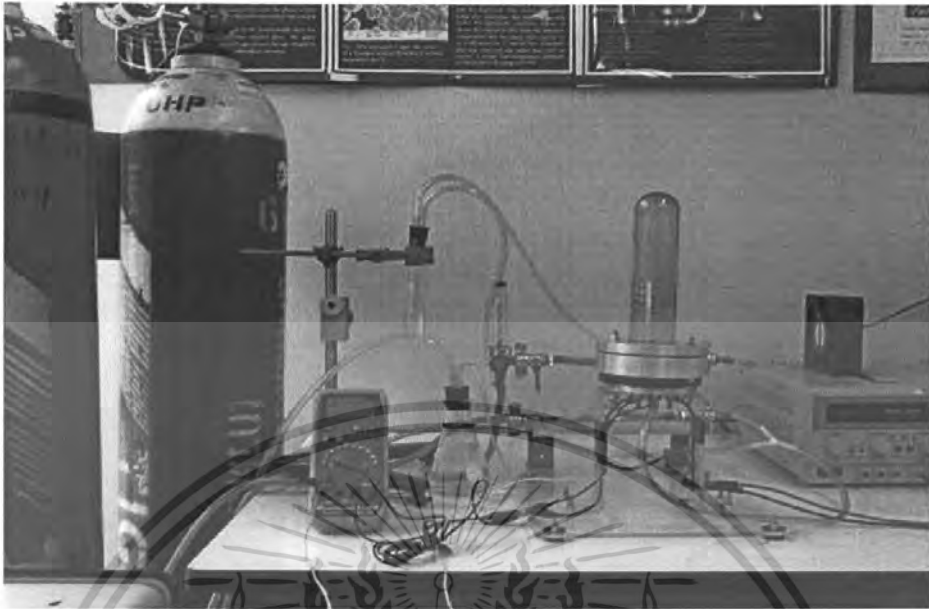
5.5 การทดลองฐานรองซิลิคอนสเป็คด้วยนิเกิลในการตรวจจับก๊าซ

การทดลองตรวจจับก๊าซจะเป็นการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ที่มีแอลกอฮอล์เข้มข้น 100% และไฮโดรเจน โดยระบบการวัดมี 2 แบบคือ แบบไม่ให้ความร้อนภายในระบบและแบบให้ความร้อนภายในระบบวัดโดยใช้คลาวด์นำความร้อน



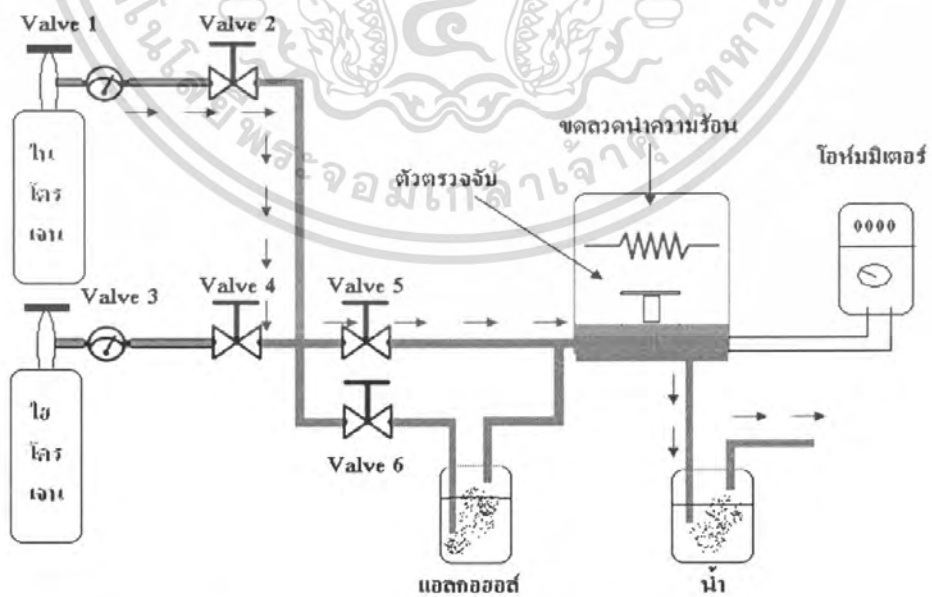
รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงาน (ก) ก่อนทำการสังเคราะห์ (ข) หลังจากสังเคราะห์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ชุดอุปกรณ์การทดลองของระบบที่ใช้ในการตรวจจับก๊าซ

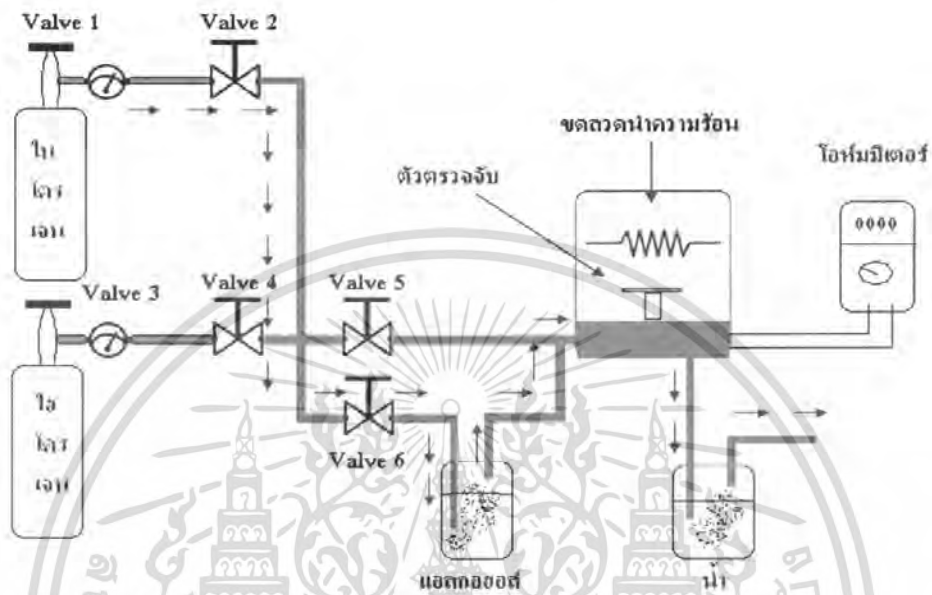
5.5.1 ผลการทดลองตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์



รูปที่ 5.12 การจ่ายไนโตรเจนโดยการเปิด เฉพาะ Valve 1, Valve 2 และ Valve 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานเริ่มต้นก่อนการทดลอง 1.122 กิโลโอห์ม เริ่มจ่ายไนโตรเจน ดังรูปที่ 5.12 ใช้เวลา 20 นาที ค่าความต้านทานที่ได้ 1.126 กิโลโอห์ม



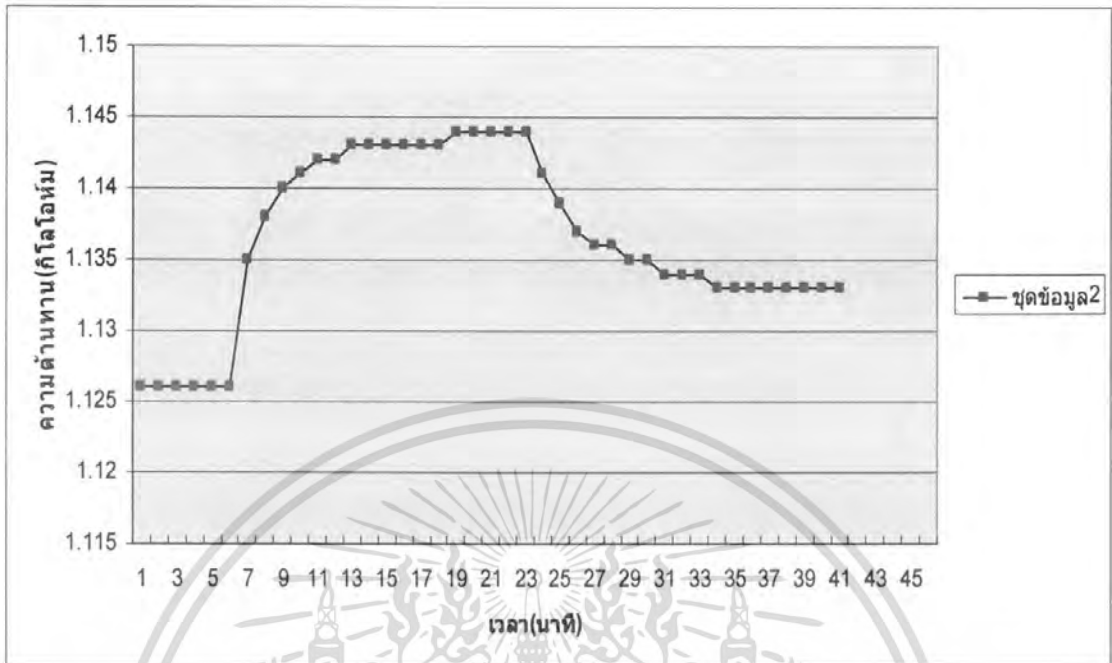
รูปที่ 5.13 การจ่ายไอระเหยแอคทิกออกไซด์โดยการเปิด เฉพาะ Valve 1, Valve 2 และ Valve 6 และการหยุดจ่ายปิด Valve 6

เริ่มจ่ายไอระเหยแอคทิกออกไซด์ และหยุดจ่ายดังรูปที่ 5.13 ค่าความต้านทานมีค่าตามตารางที่ 5.1 เริ่มให้ความร้อนภายในระบบวัดจะทำการไล่ไอระเหยแอคทิกออกไซด์ในระบบก่อน โดยการจ่ายไนโตรเจนดังรูปที่ 5.12 ค่าความต้านทานก่อนให้ความร้อน 1.133 กิโลโอห์ม แรงดันที่จ่ายให้ขดลวดนำความร้อน 1.7 โวลต์ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดนำความร้อน 3.15 แอมแปร์ ให้ความร้อนภายในระบบวัด 30 นาที ค่าความต้านทานที่ได้ 0.950 กิโลโอห์ม เริ่มจ่ายแอคทิกออกไซด์ในระบบที่ให้ความร้อน และหยุดจ่ายดังรูปที่ 5.13 มีค่าความต้านทานตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์

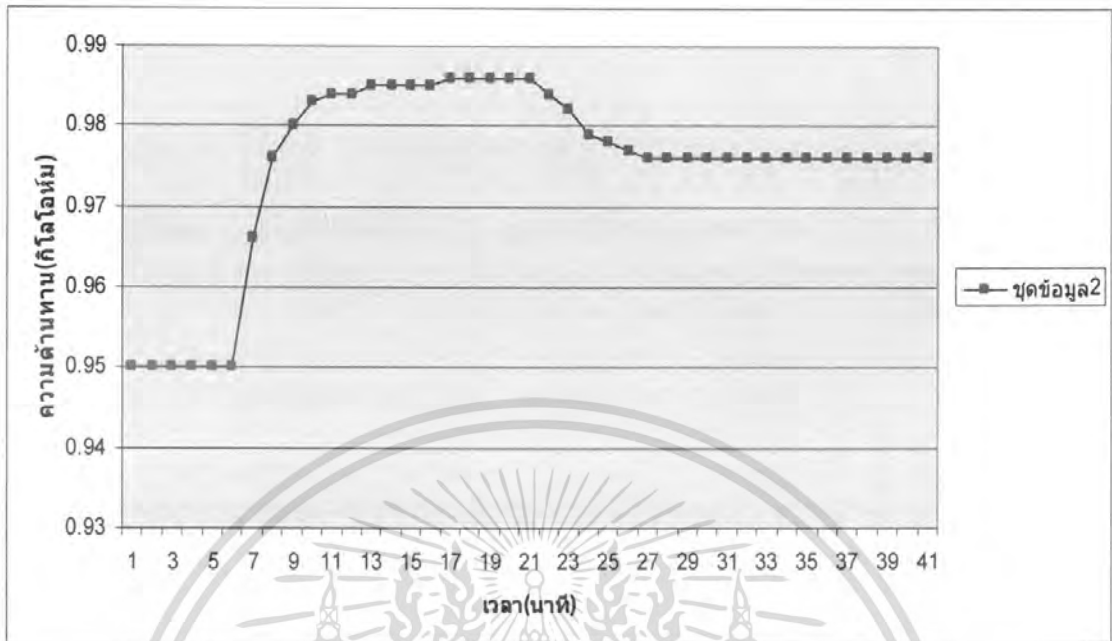
| เวลา (นาที) | ความดันทาน(กิโลโอม) | | | |
|----------------|---------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| | ไอระเหยแอลกอฮอล์ | หยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ | ให้ความร้อนภายในระบบ | |
| | | | ไอระเหยแอลกอฮอล์ | หยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ |
| 0 | 1.126 | 1.144 | 0.950 | 0.986 |
| 1 | 1.135 | 1.141 | 0.966 | 0.984 |
| 2 | 1.138 | 1.139 | 0.976 | 0.982 |
| 3 | 1.140 | 1.137 | 0.980 | 0.979 |
| 4 | 1.141 | 1.136 | 0.983 | 0.978 |
| 5 | 1.142 | 1.136 | 0.984 | 0.977 |
| 6 | 1.142 | 1.135 | 0.984 | 0.976 |
| 7 | 1.143 | 1.135 | 0.985 | 0.976 |
| 8 | 1.143 | 1.134 | 0.985 | 0.976 |
| 9 | 1.143 | 1.134 | 0.985 | 0.976 |
| 10 | 1.143 | 1.134 | 0.985 | 0.976 |
| 11 | 1.143 | 1.133 | 0.985 | 0.976 |
| 12 | 1.143 | 1.133 | 0.986 | 0.976 |
| 13 | 1.144 | 1.133 | 0.986 | 0.976 |
| 14 | 1.144 | 1.133 | 0.986 | 0.976 |
| 15 | 1.144 | 1.133 | 0.986 | 0.976 |
| 16 | 1.144 | 1.133 | 0.986 | 0.976 |
| 17 | 1.144 | 1.133 | 0.986 | 0.976 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์และหยุดจ่าย ไม่ให้ความร้อนภายในระบบวัด

จากกราฟจะ ไม่ให้ความร้อนภายในระบบวัด ในช่วง 5 นาทีแรก ค่าความต้านทานจะคงที่มีค่าอยู่ที่ 1.126 กิโลโอห์ม จากนั้นจะเริ่มจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น แล้วเริ่มมีค่าคงตัว ซึ่งในช่วงที่ค่าความต้านเปลี่ยนแปลงมากอยู่ในช่วง 5 ถึง 10 นาที เมื่อค่าเริ่มคงตัว จะเริ่มหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ค่าความต้านทานจะเริ่มมีค่าลดลงแล้วเริ่มคงตัว โดยค่าความต้านทานที่ลดลงนั้นจะไม่กลับไปยังค่าเดิมซึ่งค่าความต้านทานจะมีค่า 1.133 กิโลโอห์ม



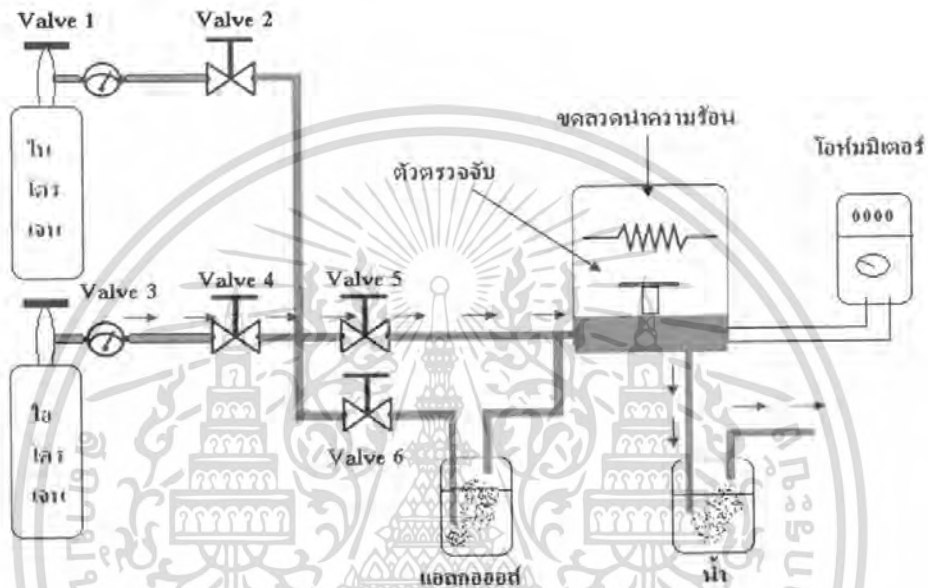
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการให้ความร้อนภายในระบบวัดและจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์และหยดจ่าย

จากกราฟจะเป็นการให้ความร้อนภายในระบบในช่วง 5 นาทีแรกค่าความต้านทานจะคงตัวที่ 0.950 กิโลโหม้มแล้วเริ่มจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ค่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วเริ่มคงตัวซึ่งในช่วง 5 ถึง 10 นาที ค่าความต้านทานจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงมากกว่ารูปที่ 5.14 เมื่อค่าเริ่มคงตัวจะหยุดการจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ค่าความต้านทานจะเริ่มมีค่าลดลงแต่ไม่กลับไปยังค่าเดิมค่าความต้านทานจะเริ่มคงตัวที่ค่า 0.976 กิโลโหม้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 ผลการทดลองตรวจจ่ายไฮโดรเจน

ค่าความต้านทานก่อนการทดลอง 1.072 กิโลโอห์มเริ่มจ่ายไฮโดรเจนดังรูปที่ 5.12 ใช้เวลา 20 นาที ค่าความต้านทานที่ได้ 1.071 กิโลโอห์ม



รูปที่ 5.16 การจ่ายไฮโดรเจน Valve 3, Valve 4 และ Valve 5 และการหยุดจ่ายปิด Valve 3

เริ่มจ่ายไฮโดรเจนภายในระบบวัดยังไม่ให้ความร้อนและหยุดจ่ายดังรูปที่ 5.16 ค่าความต้านทานมีค่าดังตารางที่ 5.2

เริ่มให้ความร้อนภายในระบบวัดจะทำการใส่ไฮโดรเจนภายในระบบก่อนโดยการจ่ายไฮโดรเจนดังรูปที่ 5.12 ทำการป้อนแหล่งจ่ายให้กับขดลวดนำความร้อน 2 โวลต์ กระแสไหลผ่านขดลวด 3.40 แอมแปร์ ค่าความต้านทานเริ่มคงตัว ที่ 1.330 กิโลโอห์ม

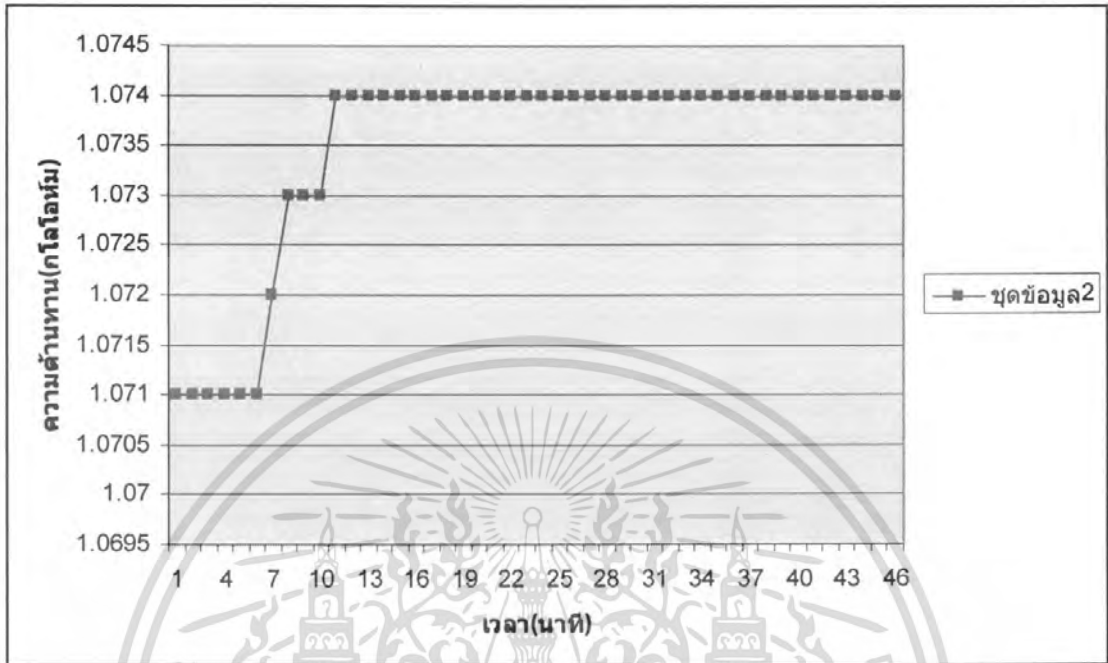
เริ่มจ่ายไฮโดรเจนผ่านเข้าไปในระบบวัดที่ให้ความร้อน และทำการหยุดจ่ายผลที่ได้มีค่าตามตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองตรวจจับไฮโดรเจน

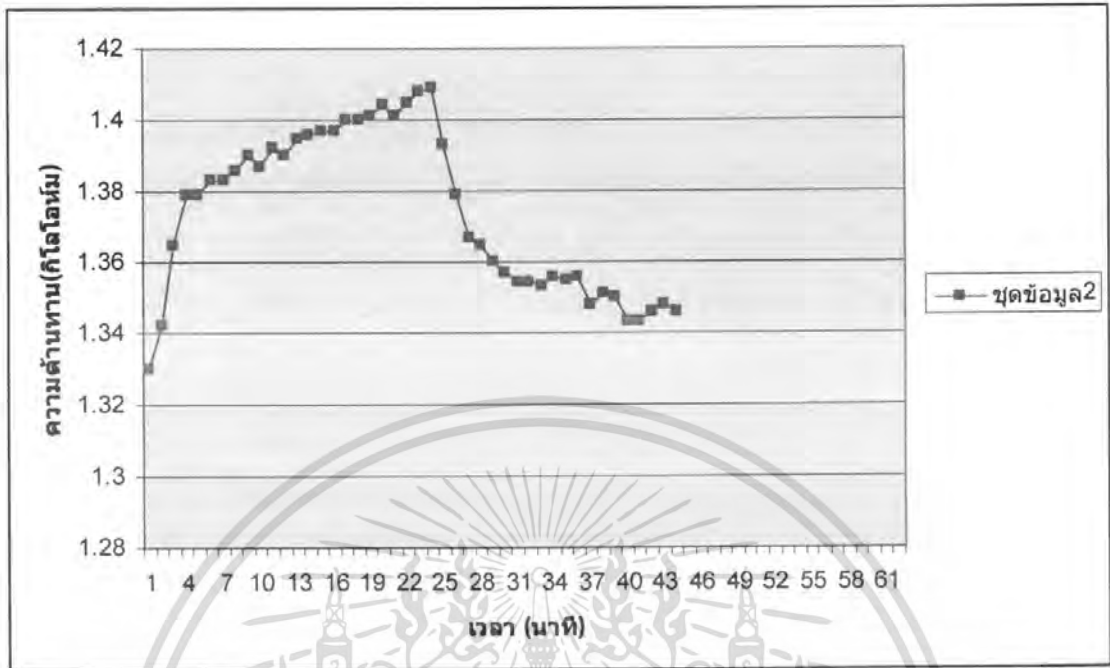
| เวลา (นาทีก) | ค่าความต้านทาน (กิโลโอห์ม) | | | |
|-----------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| | จ่ายไฮโดรเจน | หยุดจ่าย ไฮโดรเจน | ให้ความร้อนภายในระบบวัด | |
| | | | จ่ายไฮโดรเจน | หยุดจ่าย ไฮโดรเจน |
| 0 | 1.071 | 1.074 | 1.330 | 1.393 |
| 1 | 1.072 | 1.074 | 1.342 | 1.379 |
| 2 | 1.073 | 1.074 | 1.365 | 1.367 |
| 3 | 1.073 | 1.074 | 1.379 | 1.365 |
| 4 | 1.073 | 1.074 | 1.379 | 1.360 |
| 5 | 1.074 | 1.074 | 1.383 | 1.357 |
| 6 | 1.074 | 1.074 | 1.383 | 1.354 |
| 7 | 1.074 | 1.074 | 1.386 | 1.354 |
| 8 | 1.074 | 1.074 | 1.387 | 1.353 |
| 9 | 1.074 | 1.074 | 1.392 | 1.356 |
| 10 | 1.074 | 1.074 | 1.390 | 1.355 |
| 11 | 1.074 | 1.074 | 1.395 | 1.356 |
| 12 | 1.074 | 1.074 | 1.396 | 1.348 |
| 13 | 1.074 | 1.074 | 1.397 | 1.351 |
| 14 | 1.074 | 1.074 | 1.397 | 1.350 |
| 15 | 1.074 | 1.074 | 1.400 | 1.343 |
| 16 | 1.074 | 1.074 | 1.401 | 1.343 |
| 17 | 1.074 | 1.074 | 1.404 | 1.346 |
| 18 | 1.074 | 1.074 | 1.401 | 1.348 |
| 19 | 1.074 | 1.074 | 1.405 | 1.346 |
| 20 | 1.074 | 1.074 | 1.408 | |
| 21 | | | 1.409 | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 กราฟการจ่ายไฮโดรเจนและหยุดจ่ายในระบบที่ไม่ให้ความร้อน

จากกราฟรูปที่ 5.17 ในช่วง 5 นาทีแรกค่าความต้านทานจะมีค่าคงที่ 1.071 กิโลโกรัม แล้วเริ่มมีค่าเปลี่ยนแปลงไป 1.074 กิโลโกรัมในช่วงเวลา 5 ถึง 10 นาที และค่าจะคงที่ ที่ค่านี้ตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลง แม้จะหยุดจ่ายไฮโดรเจนแล้ว



รูปที่ 5.18 กราฟการจ่ายไฮโดรเจนและหยุดจ่าย ในระบบที่ให้ความร้อน

จากกราฟรูปที่ 5.18 เมื่อให้ความร้อนค่าจะไม่คงที่จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.338 ถึง 1.324 กิโลโหมม ทำให้ค่าเริ่มต้นในการวัดเป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงนั้น โดยเริ่มที่ค่า 1.330 กิโลโหมม เมื่อเริ่มจ่ายไฮโดรเจนในช่วงเวลา 5 นาทีแรก ค่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงเวลา 5 ถึง 21 นาที ค่าจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและมีการสวิงของค่าความต้านทานขึ้นลง และเมื่อเริ่มหยุดจ่ายไฮโดรเจนค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงไม่มีการสวิงของค่าความต้านทานในช่วงเวลา 21 ถึง 30 นาที และในช่วงเวลาถัดไปค่าความต้านทานจะมีลดลงแบบสวิงขึ้นลง

ในการทดลองตรวจจับก๊าซโดยไม่ให้ความร้อนในระบบวัด ทั้งการจ่ายไอระเหย แอลกอฮอล์แล้วหยุดจ่าย และการจ่ายไฮโดรเจนแล้วหยุดจ่าย จะเห็นค่าความต้านทานจะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นและลดลงไม่กลับมาที่ค่าเริ่มต้น โดยที่อุณหภูมิภายในระบบวัดจะเป็นอุณหภูมิภายในห้อง แต่ในการตรวจจับไฮโดรเจนค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อเทียบกับการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์และเมื่อทำการหยุดจ่ายไฮโดรเจน ค่าความต้านทานจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 5.17 ส่วนในการทดลองตรวจจับก๊าซ โดยให้ความร้อนภายในระบบวัด ซึ่งจะใช้ลดอุณหภูมิความร้อน ผลปรากฏว่าค่าความต้านทานที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความร้อน เมื่อจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์แล้วหยุดจ่าย หรือจ่ายไฮโดรเจนแล้วหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่าย จะทำให้ขบวนการเปลี่ยนแปลงซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในระบบมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้น รูปที่ 5.15 และ 5.18 ค่าความต้านทานอาจจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิด้วย

จากที่ได้ทำการทดลองจะสังเกตพบว่าเมื่อทำการทดลองซ้ำ ค่าความต้านทานที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะไม่ใช่ค่าความต้านทานเดิมที่ได้ทดลองก่อนหน้านี้ ดังนั้นค่าความต้านทานจะเปลี่ยนไปในการทดลองแต่ละครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการง่ายและราคาไม่แพง โดยใช้วิธี hot-filament chemical vapor deposition (HF-CVD) ซึ่งทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) โดยใช้แอลกอฮอล์ (Ethanol) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ใช้ไฮโดรเจนเป็นก๊าซนำพา (carrier gas) และใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุตั้งต้นเป็นวัสดุความร้อน โดยจากผลการทดลอง เราสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิของฐานรองอยู่ในช่วงระหว่าง 550 – 750 °C และอัตราการไหลของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในช่วง 8 – 10 cc/นาที ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 30-50 นาที โดยปลูกบนฐานรองซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิล ฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิล และฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิลแล้วก็นิเกิลเป็นวัสดุตั้งต้น (โดยนำกระบวนการของโฟโตลิโธกราฟีมาใช้ในการทำลวดลายบนแผ่นฐานรองที่เป็นซิลิคอนไดออกไซด์)

เมื่อนำไปทำการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายเป็นนิเกิล ซึ่งจะสังเกตุฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วทั้งพื้นผิว และมีขนาดท่อที่ค่อนข้างเล็ก

เมื่อนำไปทำการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่า มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนเป็นฟิคเกิดขึ้นสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความหนาแน่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้

เมื่อนำไปทำการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy เป็นกราฟรามานสเปกตรัมที่บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งฟิค G แสดงถึงพันธะของกราฟไฟต์ที่สมบูรณ์ ฟิค D เป็นฟิคที่เกิดจากคาร์บอนที่มีพันธะไม่สมบูรณ์ ดังนั้น การหาคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดูจากอัตราส่วนของ G/D ซึ่งคำนวณได้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟของฟิค G ต่อฟิค D

จากการที่ได้สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือแล้ว ด้วยคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตอบสนองกับก๊าซ ได้นำไปทดลองเป็นตัวตรวจจับก๊าซได้แก่ ไอระเหยแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 100% กับไฮโดรเจน ผลปรากฏว่าสามารถที่จะตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าไฮโดรเจน โดยการวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของคาร์บอนนาโนทิวบ์ตอนจ่ายก๊าซและหยุดจ่ายก๊าซ ในระบบวัดที่ไม่ให้ความร้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (19993) 181.
- [2] R.F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, Al Piotrowski, Thin Solid Films 398 (2001) 170..
- [4] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthematic Metal 148 (2005) 15.
- [5] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [6] S. Iijima, Nature (1991) 359,56
- [7] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388, (1997) 756.
- [8] Z.F. Ren, Z..P. Huang, J.H. Wang. M.P. Siegal, P.N. Provencio, Sience 282 (1998) 1105.
- [9] A. Thess, Science 273 (1996) 483.
- [10] C.J.Lee, D.W.Kim, Y.H. Lee, J.M.Kim, Chem. Phys. Lett.299 (1999) 97
- [11] วารสาร NANOTECIN 4 ฉบับที่ 3 มีนาคม 2548.
- [12] <http://lib.kmutt.ac.th>
- [13] <http://encyclopedia.thefreedictionary.com>
- [14] <http://www.nanotec.or.th/Webboard/view.php?No=51>
- [15] รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD สำหรับอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์, รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์.
- [16] T Phetchakul*, S Cheirsirikul, S Supdech (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand), Atmospheric pressure HFCVD Synthesis of carbon nanotube by using ethanol source, The 10th International Conference on New Diamond Science and Technology (ICNDST-10), May 11-14, 2005, AIST, Tsukuba, Japan.
- [17] Toempong Phetchakul, Somsak Cherirsirikul, Somkiat Supadech, Synthesis of carbon nanotube by HFCVD at Atmospheric Pressure, The 9 rd International Conference on Material for Advance Technologies (ICMAT 2005), July 3-8, 2005, Singapore.
- [18] เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุขเดช. รัฐพงษ์ นาคาไชย (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง), การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EE-CON 28), 20-21 ตุลาคม, 2548, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (1993) 181.
- [2] R.F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, Al Piotrowski, Thin Solid Films 398 (2001) 170..
- [4] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthematic Metal 148 (2005) 15.
- [5] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [6] S. Iijima, Nature (1991) 359,56
- [7] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388, (1997) 756.
- [8] Z.F. Ren, Z..P. Huang, J.H. Wang. M.P. Siegal, P.N. Provencio, Sience 282 (1998) 1105.
- [9] A. Thess, Science 273 (1996) 483.
- [10] C.J.Lee, D.W.Kim, Y.H. Lee, J.M.Kim, Chem. Phys. Lett.299 (1999) 97
- [11] วารสาร NANOTECIN 4 ฉบับที่ 3 มีนาคม 2548.
- [12] <http://lib.kmutt.ac.th>
- [13] <http://encyclopedia.thefreedictionary.com>
- [14] <http://www.nanotec.or.th/Webboard/view.php?No=51>
- [15] รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD สำหรับอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์, รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์.
- [16] T Phetchakul*, S Cheirsirikul, S Supdech (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand), Atmospheric pressure HFCVD Synthesis of carbon nanotube by using ethanol source, The 10th International Conference on New Diamond Science and Technology (ICNDST-10), May 11-14, 2005, AIST, Tsukuba, Japan.
- [17] Toempong Phetchakul, Somsak Cherirsirikul, Somkiat Supdech, Synthesis of carbon nanotube by HFCVD at Atmospheric Pressure, The 9 rd International Conference on Material for Advance Technologies (ICMAT 2005), July 3-8, 2005, Singapore.
- [18] เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เขียร์ศิริกุล, สมเกียรติ ศุกเดช. รัฐพงษ์ นาคาไชย (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง), การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EE-CON 28), 20-21 ตุลาคม, 2548, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก - 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities

| Material | Conductivity (w/mk) |
|------------------------|----------------------------|
| Carbon nanotubes | 3,000 - 6,000 |
| Diamond (Type II) | 2,000 |
| Boron nitride (theory) | 1,300 |
| Beryllium oxide | 370 – 590 |
| Water | 561 |
| Silicon earbide | 490 |
| Silver | 418 |
| Copper | 380 |
| Aluminum nitride | 370 |
| Gold | 311 |
| Aluminum | 238 |
| Tungsten | 170 |
| Silicon | 150 |
| Oil, Transformer | 136 |
| Iron | 182 |
| Graphite | 80 - 250 |
| Palladium | 70 |
| Platinum | 69 |
| Tin | 65 |
| Gallium arsenide | 46 |
| Germanium | 28 |
| Titanium | 20 |
| Quartz | 7 – 14 |
| Indium arsenide | 7 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

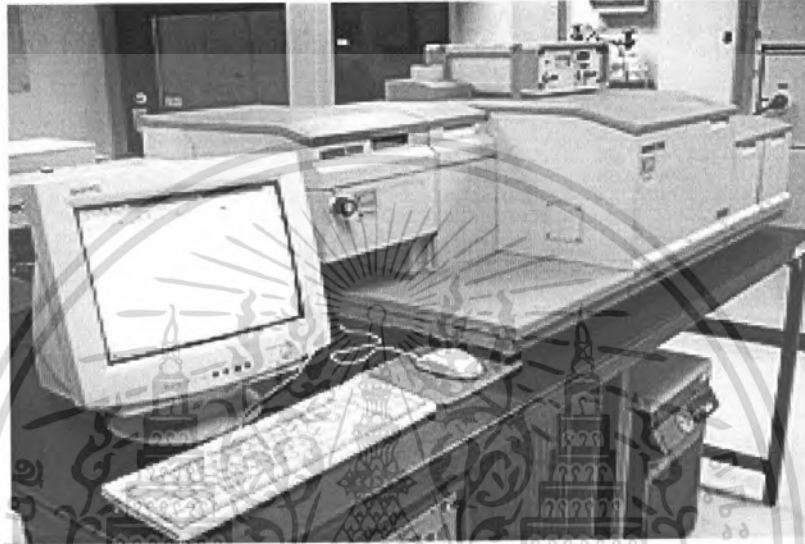
ตารางที่ ข - 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus

| Material | Value (N/m ²) |
|------------------|---------------------------|
| Carbon nanotubes | 1 x 1,012 |
| Diamond | 1000 |
| Tungsten | 340x |
| Steel | 172 – 205 |
| Ferrites (most) | 150 |
| Platinum | 147 |
| Cast iron | 138 |
| Copper | 124 |
| Silicon | 113 |
| Quartz | 79 – 107 |
| Gold | 74 – 80 |
| Silver | 71 – 78 |
| Aluminum | 69 |
| Tin | 41 – 45 |
| Lead | 14 |

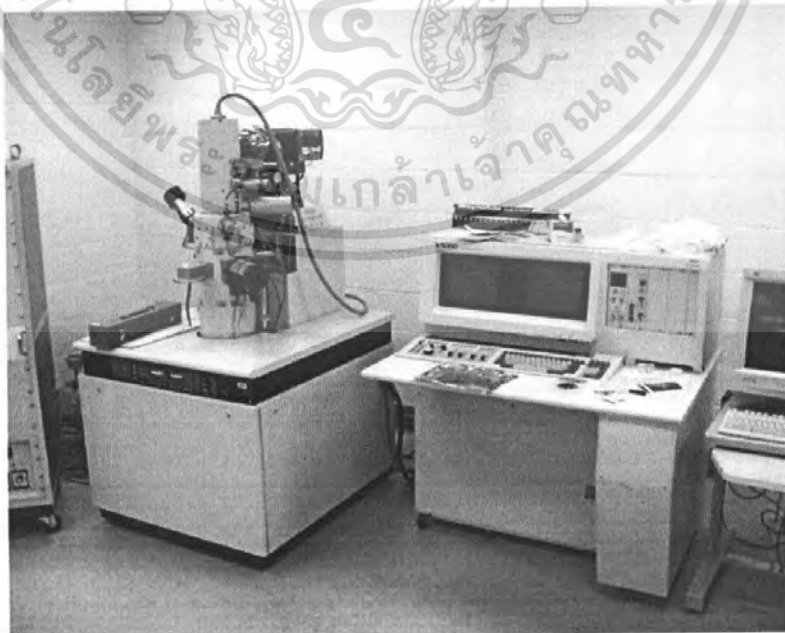
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

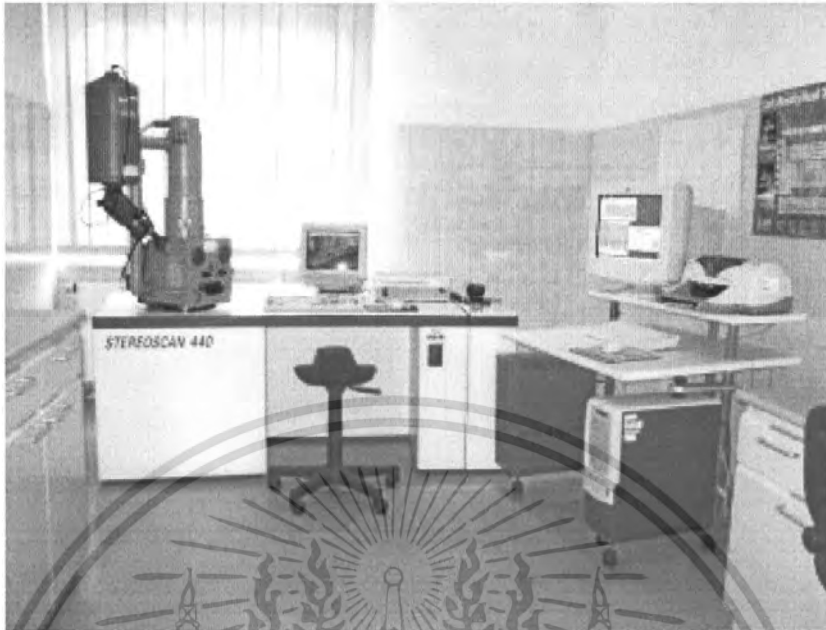


รูปที่ ค-1 Raman spectroscope



รูปที่ ค-2 SEM (Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 EDX (Energy Dispertion X-Ray)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้