

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบลวดความร้อน
Selective growth of Carbon Nanotubes by Hot Filament Chemical Vapor
Deposition at Atmospheric Pressure



โดย
นาย ฉัฐพงศ์ สังข์ทองจีน
นาย นิรันดร์ อินนา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72941
วัน,เดือน,ปี..... 26 ส.ย. 2550

b. 11945002
i.....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบลวดความร้อน
Selective growth of Carbon Nanotubes by Hot Filament Chemical Vapor
Deposition at Atmospheric Pressure



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่องการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐพงศ์ สังข์ทองจีน
2. นายนิรันดร์ อินนา



(รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยวิธีซีวีดี

แบบขดลวดความร้อน

นาย ญัฐพงศ์ สังข์ทองจีน รหัส 47015166

นาย นิรันดร์ อินนา รหัส 47015173

รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน บนฐานรองทองแดง ซิลิคอน ซิลิคอนไดออกไซด์ และการเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยการสร้างลวดลายบนฐานรอง เพื่อให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นในบริเวณที่ต้องการ โดยมีตัวกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทำการเคลือบลงบนฐานรองก่อนการสังเคราะห์ฟิล์มในระบบนี้จะใช้เอทิลแอลกอฮอล์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์และได้ศึกษาถึงเงื่อนไขที่จะเกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อไฮโดรเจนหลังจากนั้นจะนำไปพัฒนาเพื่อให้เกิดฟิล์มในบริเวณที่ต้องการสำหรับนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์

ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์จะถูกวิเคราะห์ด้วย SEM RAMAN และEDX เพื่อตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งทราบได้จากการตรวจสอบเหล่านี้ และผลของข้อมูลทั้งหมดจะนำมาพัฒนาในการสร้างต่อไป

Selective growth of Carbon nanotube by

Hot Filament CVD

Mr. Natapong Sungthongjeen ID. 47015166

Mr. Nirun Inna ID. 47015173

Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul Advisor

Educational Year 2006

Abstract

In this report, we propose the synthesis of carbon nanotube by HFCVD on copper and silicon substrate and selective growth of carbon nanotube. Nickel is used for catalyst material that is deposited on the substrate before synthesis. In our system, ethanol and hydrogen gas are used as source material. We study the condition that carbon nanotube film can be grown such as, temperature substrate, the ration of carbon per hydrogen and the rate of growth , after that, the selective growth technique is develop for device application.

Carbon nanotube, film is characterized by SEM, RAMAN TEM and EDX. The quality and morphology surface of carbon nanotube with be known after there investigation. All of the data is used for developing process.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.ติมพงษ์ เพ็ชรกุล ในการให้คำแนะนำปรึกษา แนวทางในการแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนข้าพเจ้า ขอขอบคุณ นายภูวนัย บุญหนัก บริษัท Wethen Digital สำหรับ Raman spectrum ขอขอบคุณ นายเอกราช รัตนอุดมสุข ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ และขอขอบคุณ นายรัฐพงษ์ นาคาไชย ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ผู้บังคับ

นาย ณัฐพงศ์ สังข์ทองจีน

ผู้แก้ไข

นาย นิรันดร์ อินนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | |
|--|----|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 นาโนเทคโนโลยีและคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 4 |
| 2.1 นาโนเทคโนโลยีคืออะไร | 4 |
| 2.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์คืออะไร | 5 |
| 2.3 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 7 |
| 2.4 ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 9 |
| 2.4.1 Single Walled Carbon nanotubes (SWCNTs) | 9 |
| 2.4.2 Multi Walled Carbon nanotubes (MWCNTs) | 10 |
| 2.5 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งาน | 10 |
| 2.5.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ | 10 |
| 2.5.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน | 11 |
| 2.5.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ | 11 |
| 2.5.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์ | 12 |
| 2.5.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน | 12 |
| บทที่ 3 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 13 |
| 3.1 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 13 |
| 3.1.1 Base Growth | 13 |
| 3.1.2 Tip Growth | 13 |
| 3.2 วิธีการสังเคราะห์ | 14 |
| 3.2.1 วิธี Arc discharge | 14 |
| 3.2.2 วิธี Laser ablation | 16 |
| 3.2.3 วิธี CVD | 17 |
| 3.2.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition | 19 |
| 3.2.3.2 Plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD) | 19 |
| 3.2.3.3 Vapor phase growth | 19 |
| 3.2.3.4 High pressure CO disproportionate process | 19 |
| 3.2.3.5 Hot filament enhance CVD (HF-CVD) | 20 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | |
|---|----|
| บทที่ 4 กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์บนฐานรอง | 22 |
| บทที่ 5 เทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 27 |
| 5.1 การตรวจลักษณะพื้นผิวด้วย SEM | 27 |
| 5.2 การตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX | 28 |
| 5.3 การวัดด้วย Raman Spectroscope | 28 |
| บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD | |
| แบบลดความร้อน | 30 |
| 6.1 วัตถุประสงค์ | 30 |
| 6.2 อุปกรณ์และสารเคมี | 30 |
| 6.3 ขั้นตอนการทดลอง | 30 |
| 6.4 ผลการทดลอง | 33 |
| 6.4.1 ฐานรองทองแดงสปัตด้วยนิเกิล | 33 |
| 6.4.2 ฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิล | 36 |
| 6.4.3 ฐานรองซัลไฟคอนสปัตด้วยนิเกิล | 39 |
| 6.4.4 ฐานรองซัลไฟคอนไดออกไซด์สปัตด้วยนิเกิล | 42 |
| 6.4.5 ฐานรองซัลไฟคอนไดออกไซด์สปัตด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วออกแบบเป็นสวดตาย | 45 |
| 6.4.6 ฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติ | 48 |
| บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง | 51 |
| เอกสารอ้างอิง | 53 |
| ภาคผนวก | 54 |
| ภาคผนวก ก | 54 |
| ภาคผนวก ข | 54 |
| ภาคผนวก ค | 54 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 2.1 | ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ | 7 |
| 2.2 | การม้วนของแผ่น Graphene | 8 |
| 2.3 | คาร์บอนนาโนทิวบ์รูปแบบต่าง ๆ | 8 |
| 2.4 | ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด | 9 |
| 2.5 | ลักษณะของ MWCNTs | 10 |
| 2.6 | การสังเคราะห์พลาสติก ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ | 11 |
| 3.1 | กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Base Growth และ Tip Growth | 14 |
| 3.2 | การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี Arc discharge | 15 |
| 3.3 | การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี Laser ablation | 16 |
| 3.4 | การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD | 17 |
| 3.5 | ระบบของ HF-CVD | 20 |
| 4.1 | Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System | 22 |
| 4.2 | ระบบการสปีดเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด | 23 |
| 4.3 | แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสปีดเตอร์ | 24 |
| 4.4 | Panel of RF Generator | 26 |
| 4.5 | Panel of Pump Switch ,Ionizing Gauge and Heater | 26 |
| 5.1 | SEM (Scanning Electron Microscope) | 27 |
| 5.2 | EDX (Energy Dispersion X-Ray) | 28 |
| 5.3 | Raman spectroscopy | 29 |
| 6.1 | ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 31 |
| 6.2 | ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1 | 31 |
| 6.3 | ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2 | 32 |
| 6.4 | ภาพพื้นผิวฐานรองทองแดงสปีดด้วยนิเกิลก่อนกระบวนการสังเคราะห์ | 33 |
| 6.5 | ภาพพื้นผิวฐานรองทองแดงสปีดด้วยนิเกิลหลังกระบวนการสังเคราะห์ | 33 |
| 6.6 | Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองทองแดงสปีดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C | 34 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 6.7 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองของทองแดงสปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 34 |
| 6.8 | ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองทองแดงสปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 35 |
| 6.9 | ภาพพื้นผิวฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิลก่อนกระบวนการสังเคราะห์ | 36 |
| 6.10 | ภาพพื้นผิวฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิลหลังกระบวนการสังเคราะห์ | 36 |
| 6.11 | Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C | 37 |
| 6.12 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 37 |
| 6.13 | ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 38 |
| 6.14 | ภาพพื้นผิวฐานรองซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิลก่อนกระบวนการสังเคราะห์ | 39 |
| 6.15 | ภาพพื้นผิวฐานรองซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิลหลังกระบวนการสังเคราะห์ | 39 |
| 6.16 | Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C | 40 |
| 6.17 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 40 |
| 6.18 | ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 41 |
| 6.19 | ภาพพื้นผิวฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิลก่อนกระบวนการสังเคราะห์ | 42 |
| 6.20 | ภาพพื้นผิวฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิลหลังกระบวนการสังเคราะห์ | 42 |
| 6.21 | Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C | 43 |
| 6.22 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 43 |
| 6.23 | ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 44 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 6.24 | ภาพถ่ายพื้นผิวฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้ว ออกแบบเป็นลวดลายก่อนกระบวนการสังเคราะห์ | 45 |
| 6.25 | ภาพถ่ายพื้นผิวฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้ว ออกแบบเป็นลวดลายหลังกระบวนการสังเคราะห์ | 45 |
| 6.26 | Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรอง ซิลิคอนไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วออกแบบเป็นลวดลาย ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 46 |
| 6.27 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ สปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วแล้วออกแบบเป็นลวดลาย ที่อุณหภูมิฐานรอง ประมาณ 600 – 700 °C | 46 |
| 6.28 | ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ สปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม.แล้วออกแบบเป็นลวดลาย ที่อุณหภูมิฐานรอง ประมาณ 600 – 700 °C | 47 |
| 6.29 | ภาพพื้นผิวฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติก่อนกระบวนการ สังเคราะห์ | 48 |
| 6.30 | ภาพพื้นผิวฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติหลังกระบวนการ สังเคราะห์ | 48 |
| 6.31 | Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บน ฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติ ที่อุณหภูมิฐานรอง ประมาณ 600-700 °C | 49 |
| 6.32 | แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้า เป็น 3 มิติ ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 49 |
| 6.33 | ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทาง ไฟฟ้าเป็น 3 มิติ ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C | 50 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---------------------------------------|------|
| 3.1 | สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก | 18 |
| 4.1 | เงื่อนไขการสปีดเตอร์ Ni ในการทดลอง | 25 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนำความเปลี่ยนแปลงมาสู่โลกมาสู่ชีวิตของเราอยู่เสมอ จนเมื่อเร็วๆ นี้ ในศตวรรษที่ผ่านมา เราได้เห็นอิทธิพลของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทั้งในทางที่ดีและร้ายอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากความก้าวหน้าทางวิชาการที่สำคัญ การล่วงรู้ความลับของโครงสร้างอะตอม นำไปสู่ความสามารถในการนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ประโยชน์ แต่ก็นำมาใช้ประหัตประหารกันได้ด้วย ความรู้เรื่องสารเคมีได้นำไปสู่อุตสาหกรรมเคมีและโพลีเมอร์ ทำให้คนทั่วไปได้มีเครื่องอุปโภคใหม่ๆ ในราคาไม่แพง แม้จะก่อปัญหาเรื่องมลพิษของสารเคมีตกค้างจากการเกษตรและอุตสาหกรรมในขณะเดียวกันด้วย ความรู้ในเรื่องของอิเล็กทรอนิกส์ได้นำมาสู่การประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยี สารสนเทศอย่างกว้างขวาง ความรู้เรื่องพันธุกรรมนำมาสู่การพัฒนาและพันธุ์พืช พันธุ์สัตว์ใหม่ๆ แม้จะมีความเป็นห่วงกันอยู่ในด้านผลลบของเทคโนโลยีใหม่ๆ เหล่านี้อยู่บ้างก็ตาม

ท่ามกลางความเปลี่ยนแปลงที่มาจากวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเหล่านี้ มีความเปลี่ยนแปลงที่สำคัญที่กำลังเกิดขึ้นและมีที่ท่าว่าจะเป็นความเปลี่ยนแปลงที่สำคัญมากของศตวรรษใหม่ ซึ่งอาจจะสำคัญยิ่งกว่าความเปลี่ยนแปลงที่แล้วๆ มาที่ก็จัดว่ายิ่งใหญ่มากอยู่แล้ว ความเปลี่ยนแปลงใหม่นี้เกิดจากการที่วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีความก้าวหน้ามาถึงจุดที่จะสามารถออกแบบและสร้างวัสดุ และเครื่องมือเครื่องใช้ที่มีขนาดจิ๋วมาก จี๋วจนวัดขนาดไม่ใช่ระดับมิลลิเมตร (หนึ่งในพันเมตร) ไม่ใช่ระดับไมโครเมตร (หนึ่งในล้านเมตร) แต่เป็นระดับนาโนเมตร (หนึ่งในพันล้านเมตร) ระดับนาโนเมตรเป็นระดับขนาดของโมเลกุลและอะตอม ดังนั้น วัสดุเครื่องมือเครื่องใช้ดังกล่าว จะมีขนาดเท่ากับโมเลกุลหรืออะตอมเท่านั้น เทคโนโลยีใหม่นี้เรียกว่า นาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) เป็นเทคโนโลยีของการทำวัสดุ เครื่องมือและเครื่องใช้ขนาดจิ๋ว คำถามคือ จี๋วคืออย่างไร คำตอบคือ ดิตรงที่สามารถทำงานได้ในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ดิตรงที่ใช้เนื้อที่น้อย ดิตรงที่สามารถทำงานที่เดิม ไม่เคยคาดฝันว่าจะทำได้ เคมีจิ๋ว วัสดุจิ๋ว อิเล็กทรอนิกส์ระดับจิ๋ว โฟตอนิกส์ระดับจิ๋ว (คล้ายอิเล็กทรอนิกส์ แต่ใช้อิเล็กตรอน) ทั้งหมดล้วนเป็นเรื่องจิ๋วที่ "ยิ่งใหญ่" ทั้งสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนเทคโนโลยีอาจดูเหมือนเรื่องไกลตัว และสามารถพบเห็นได้เพียงแต่ในภาพยนตร์ ฮอลลีวูดเท่านั้น แต่ถ้าเราลองย้อนกลับมาดูสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นรอบตัวเพียง 10 ปีที่ผ่านมา ก็จะพบว่าสิ่งที่เราไม่เคยนึกเคยฝันมาก่อนได้เกิดขึ้นมากมายไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีสารสนเทศ (information technology) ซึ่งทำให้เราสามารถย่อโลกมาไว้ในมือ สื่อสารกันได้อย่างไร้พรมแดน อีกทั้งยังมี ชีวะเทคโนโลยี และเทคโนโลยีชีวสารสนเทศ (bioinformatics) ที่ช่วยทำให้เราเข้าใจองค์ประกอบของชีวิตมากขึ้น โดยการถอดรหัสพันธุกรรมซึ่งเปรียบเสมือน “พิมพ์เขียว” ของสิ่งมีชีวิต ความรู้ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ และทางการเกษตรได้อย่างกว้างขวาง ดังนั้น นาโนเทคโนโลยี และ เทคโนโลยี DNA chip จึงไม่ใช่สิ่งที่ไกลตัวอีกต่อไป อย่างไรก็ตามเราควรพึงระลึกอยู่เสมอว่าไม่ว่าความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจะก้าวไกลเพียงไร ต่างก็เป็นเพียงสิ่งประดิษฐ์ที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อที่จะเลียนแบบระบบในธรรมชาติเท่านั้น เทคโนโลยีเหล่านี้คงจะเป็นบันทึกอีกหน้าหนึ่งในประวัติศาสตร์ของมนุษยชาติที่เราต้องเผชิญในอนาคตอันใกล้

คำว่า “นาโน” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า “คนแคระ” หมายถึง หนึ่งในพันล้านหน่วย หรือหนึ่งในพันล้านส่วน แต่ที่นิยมเรียกกันจนติดปาก คือ นาโนเมตร (nanometre) ซึ่งหมายถึงสิบลำดับลบเก้าเมตร หรือ 1 ส่วนพันล้านของ 1 เมตร หรือเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า แองสตรอมยูนิต (angstrom unit) ดังนั้น “นาโนเทคโนโลยี” คือ วิชาการประยุกต์แขนงใหม่ที่ว่าด้วยเรื่องของเทคโนโลยีในการประกอบและผลิตสิ่งต่างๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอม หรือโมเลกุลเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำและถูกต้องในระดับนาโนเมตรหรือขนาด 1 ในพันล้านส่วนของ 1 เมตร โดยเป็นการผสมผสานของวิทยาศาสตร์หลายแขนง เช่น ชีววิทยา ฟิสิกส์ ชีวเคมี วิศวกรรมศาสตร์สาขาหุ่นยนต์ และเครื่องจักรกล

นาโนเทคโนโลยี มี 3 สาขาหลัก คือ

1. นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology) เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ ด้านชีวภาพ
2. นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (ไฮเทค) เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและทำงานด้วยประสิทธิภาพสูง
3. วัสดุนาโน (Nanomaterials) การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านวัสดุนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในรายงานฉบับนี้ได้ให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับวัสดุนาโน ที่มีคุณสมบัติของ fullerenes โมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างอยู่ระหว่างโครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์ในตระกูลของคาร์บอน โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

นาโนเทคโนโลยีและคาร์บอนนาโนทิวบ์

2.1 นาโนเทคโนโลยีคืออะไร

ทุกวันนี้มีคำถามมากมายเหลือเกินว่านาโนเทคโนโลยีคืออะไร ทำไมถึงได้มีความสำคัญ มากนัก และทำไมสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่เราคุ้นเคย จึงได้เปลี่ยนไปอย่างสิ้นเชิงเมื่อวัสดุมีขนาดเล็ก ในระดับนาโน รวมทั้งอะไรเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์อันแปลกประหลาดต่างๆที่ไม่เคย พบมาก่อนในวัสดุที่มีขนาดใหญ่ เช่น การที่อนุภาคทองคำนาโนมีสีแดงหรือสีม่วงแทนที่จะเป็นสี เหลือง การที่อนุภาคเงินนาโนกลับกลายเป็นฉนวนไฟฟ้าทั้งที่ปกติเงินเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก การที่ อนุภาคนาโนของโลหะเล็บบางชนิดกลับสามารถเร่งปฏิกิริยาเคมีได้อย่างว่องไว หรือการที่วัสดุนา โนมีความแข็งแรงเหนือกว่าวัสดุขนาดใหญ่ ฯลฯ

ความหมายของนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) ที่ถูกนิยามขึ้น โดยมูลนิธิวิทยาศาสตร์ แห่งชาติ (National Science Foundation, NSF) ของสหรัฐอเมริกาเมื่ออยู่ 3 มุมมองด้วยกันคือ

1. การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในระดับอะตอม โมเลกุล หรือ โมเลกุลมหภาค (macromolecule) ที่ มีขนาดเล็กในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร
2. การสร้างและการใช้ประโยชน์จากโครงสร้าง อุปกรณ์ หรือระบบต่างๆ ที่มีสมบัติและหน้าที่ ใหม่ๆเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความเล็กในระดับนาโน (nanoscale) ของสิ่งนั้นๆ
3. ความสามารถในการควบคุมและจัดการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในระดับอะตอม

ดังนั้นความหมายโดยรวมของนาโนเทคโนโลยีก็คือ “ การจัดการ การสร้าง การสังเคราะห์ที่ วัสดุ อุปกรณ์และระบบต่างๆ ที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยความถูกต้องและ แม่นยำ ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่างๆมี “ สมบัติที่พิเศษขึ้น ” ทำให้เกิดประโยชน์ ต่อผู้ใช้ สอดและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ ”

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระดับนาโนได้รับความสนใจมาก โดยเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจ มาก คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งเป็นสาขาหนึ่งในหลายๆสาขาของนาโนเทคโนโลยีที่ได้รับความ สนใจ โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งประเภทของการวิจัยทางด้านวัสดุนาโนออกเป็น 5 สาขาดังนี้

อนุภาคนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องผงและอนุภาคขนาดเล็ก โดยจะมีประโยชน์ใน

เอกสารนี้เป็นงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์หรือต้องการใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เข้าไป เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอุปกรณ์เป้าหมายจะเป็น อุปกรณ์ประเภท เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ อุปกรณ์ตรวจวินิจฉัย วัสดุดูดซับกลิ่นสารพิษ วัสดุเสริมแรง

วัสดุผสมผสมนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการผสมผสานที่เกิดขึ้นในระดับเล็ก ทำให้แสดงคุณสมบัติพิเศษในระดับอะตอมออกมา เป้าหมายในการวิจัยทางด้านนี้ คือ แผ่นฟิล์มและบรรจุภัณฑ์ที่ต้านทานการซึมผ่านของก๊าซและความชื้น วัสดุเสริมแรงเพื่อใช้ในทางการแพทย์ วัสดุสำหรับเครื่องสำอาง เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซ

เส้นใยนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุนาโนรูปให้เป็นเส้นใยที่มีขนาดนาโนซึ่งจะแสดงคุณสมบัติพิเศษต่างๆหลายอย่างออกมา เป้าหมายของการวิจัยในด้านนี้คือ เซ็นเซอร์ตรวจจับก๊าซและสารเคมี วัสดุส่งสารออกฤทธิ์ แผ่นกรองอนุภาค ผิวหนังเทียม

โครงสร้างนาโนของคาร์บอน และโพร่งนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนที่จะพัฒนาให้ได้ผลิตภัณฑ์พวก ท่อนาโนคาร์บอนที่จะนำไปทำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ วัสดุเสริมความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ด้วยขามเซรามิก กระฉกเสริมแรง วัสดุโพร่งนาโนเพื่อทำเยื่อ เมมเบรน

ฟิล์มบางนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนและพัฒนาที่จะส่งเสริมเรื่องของการเป็นศูนย์กลางและอาหาร ผลิตภัณฑ์จากวัสดุนาโนในกลุ่มนี้จะมีลักษณะเป็นวัสดุทำหน้าที่ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวินิจฉัย โรคและวัตถุที่มีขนาดนาโน จะเรียกว่าเป็นเซ็นเซอร์ก็ได้ แต่จะเป็นเซ็นเซอร์ที่พัฒนาให้เหมาะกับประเทศไทย ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ก็คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มบางอินทรีย์ เช่น หลอดไฟ แบบแบนเรียบ เซลล์สุริยะแบบอินทรีย์ เป็นต้น

จะเห็นได้ว่า การวิจัยนั้นมีหลายๆด้าน แต่ด้านที่ได้รับการสนใจที่สุดน่าจะเป็น ด้านโครงสร้าง นาโนคาร์บอนและ โพร่งนาโน เราจึงเลือกเป็นหัวข้อในการวิจัยของเรา

2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์คืออะไร

นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติของ fullerenes โมเลกุลที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ และมีโครงสร้างอยู่ระหว่างโครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์ในตระกูลของคาร์บอน และเมื่อไม่นานมานี้มีการค้นพบโครงสร้างใหม่ของ fullerenes ที่มีลักษณะเป็นลูกบอลที่มีโครงสร้างเหมือนกรงปิดที่เป็นรูปทรงกลมซึ่งประกอบไปด้วย 60 อะตอมของคาร์บอนที่มีลักษณะสมมาตร(C60) ซึ่งเป็นการค้นพบการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมแบบใหม่ที่ไม่เคยพบมาก่อน

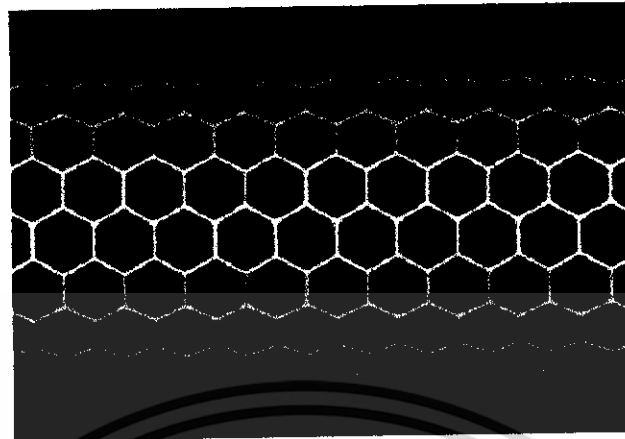
นอกจากนี้นักวิจัยได้ทำการคัดแปลงโมเลกุลที่ค้นพบนั้นให้ขยายยาวออกไปเป็นโครงสร้างที่เป็นท่อเรียวยาวเล็กได้สำเร็จและเรียกโครงสร้างนั้นว่า ท่อนาโนคาร์บอน(carbon nanotubes)

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน ม้วนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตร ท่อนาโนคาร์บอน มีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่า เหล็กกล้า สามารถนำไฟฟ้า หรือ กลายเป็นฉนวน (ไม่นำไฟฟ้า) ได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวการจัดเรียงตัว ของอะตอมคาร์บอนบนผนังท่อนาโนคาร์บอน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสายไฟจิ๋ว ในเครื่องใช้ไฟฟ้า (nanoelectronics) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานกว่า ไทเทเนียม หรือผลิตเป็น แบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานนับสิบปี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา เป็นต้น

โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน มีโครงสร้างเป็นแบบโมเลกุลเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นแถวยาวของคาร์บอนเรียงตัวกันเป็นแนวยาวนับล้านๆเท่าของขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) จะ โค้งตัวม้วนเป็นแกนจากด้านหนึ่งไปบรรจบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งนักเคมีมีแนวความคิดว่าท่อนาโนคาร์บอนนี้มีลักษณะเป็น monoelemental polymer (โพลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยธาตุเพียงชนิดเดียว ซึ่งแตกต่างจากโพลิเมอร์ที่พบโดยทั่วไปที่จะพบอะตอมของธาตุอื่นด้วย)

จากการทดลองและการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ท่อกลวงนี้มีความสามารถในการยึดหยุ่นเป็นพิเศษ มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติที่ไม่ธรรมดาอีกหลายประการ ตัวอย่างเช่น สามารถหดกลับจากรูปหนึ่งไปสู่อีกรูปหนึ่งอย่างฉับพลันและสามารถสร้างเป็นเชือกที่มีความแข็งแรงมากเป็นพิเศษ นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าจึงทำให้มีการทดลองสร้างเป็น สายโลหะนาโน (Nanowires) และตัวนำไฟฟ้าในขนาดนาโนสเกล (Nanoscale transistors) และในปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงและประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าการผลิตโมเลกุลที่เป็นสายโลหะขนาดเล็กจะเป็นเรื่องน่าท้าทายก็ตามอนึ่งถึงแม้ว่าการค้นพบท่อนาโนคาร์บอนมากกว่า 30 ปี โดยบริษัท NEC ของญี่ปุ่นแต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบในขณะนั้นก็ยังไม่สามารถนำมาใช้ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์

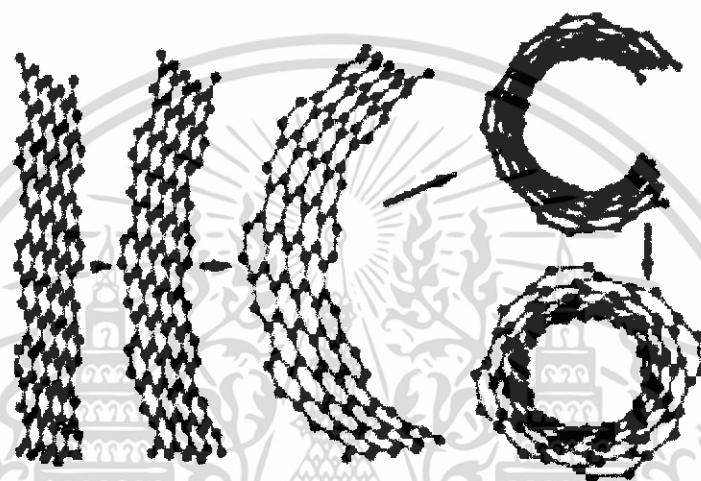
2.3 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถพิจารณาได้จากการห่อแผ่นกราไฟท์ (Graphite) ซึ่งปกติคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากๆ (ระดับนาโนเมตร) ทำให้สามารถมองเป็นโครงสร้างหนึ่งมิติได้ โดยโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยสองส่วนที่แยกออกจากกันมีคุณสมบัติแตกต่างกันทางฟิสิกส์และเคมี ส่วนแรกคือส่วนผนังของท่อ และส่วนที่สองคือฝาปิดของท่อ โดยส่วนฝาปิดของท่อกับลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมที่ได้มาจากฟูลเลอร์เร็นซ์ เช่น C_{60} หรือ C_{70}

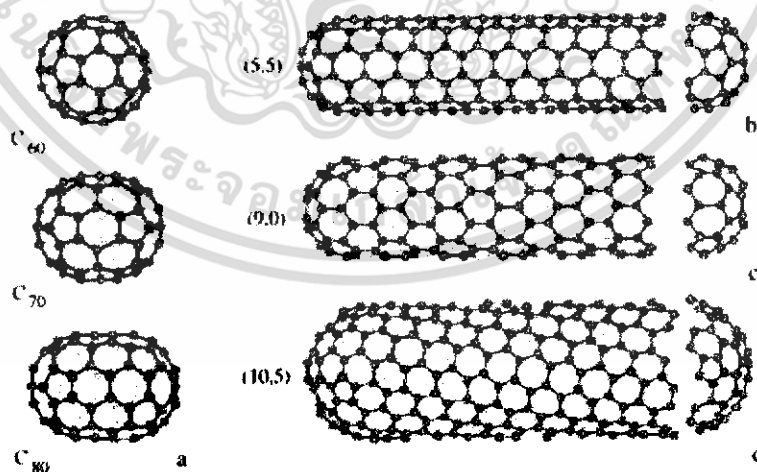
ฟูลเลอร์เร็นซ์ มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนอยู่ในรูปหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม ในรูปแบบทางฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีรูปหลายเหลี่ยมของ Euler ที่ว่ารูปห้าเหลี่ยม 12 รูป ในรูปของโครงสร้างฝาปิดที่ประกอบด้วยรูปห้าเหลี่ยมและรูปหกเหลี่ยมเท่ากัน โดยการรวมกันของรูปห้าเหลี่ยม 5 อัน ผลลัพธ์ทำให้เกิดความโค้งของพื้นผิวที่เป็นลักษณะปริมาตรปิด กฎข้อที่ 2 ในการใช้รูปห้าเหลี่ยม จะต้องอยู่ในระยะทางระหว่างห้าเหลี่ยมด้วยกันบนพื้นผิวทรงกลมในระยะทางที่มากที่สุด เพื่อที่จะได้ความโค้งที่มีค่าน้อยที่สุด และความเค้นที่น้อยที่สุด ผลลัพธ์ก็คือ โครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น และ โครงสร้างที่เสถียรและเล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้โดยวิธีนี้ก็คือ C_{60} ส่วนโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นก็คือ C_{70} และอื่นๆ คุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งฟูลเลอร์เร็นซ์ประกอบขึ้นจากคาร์บอนอะตอมที่เป็นเลขคู่ เพราะว่าการเพิ่มรูปหกเหลี่ยมเพื่อให้เป็น โครงสร้างที่เป็นอยู่ได้หมายถึง การเพิ่มอะตอมของคาร์บอนคุณสมบัติของนาโนทิวบ์ จึงคล้ายกับประกอบเป็นรูปทรงกระบอก โดยสร้างขึ้นมาจากแผ่น Graphene ที่มีขนาดแน่นอนและห่อขึ้นมาในทิศทางที่แน่นอนทำให้เป็นทรงกระบอกที่สมมาตรกัน โดยได้แสดงการม้วนของแผ่น Graphene ใน รูปที่ 2 ซึ่งสามารถม้วนแผ่น Graphene ได้ในทิศทางที่แตกต่างกันเพื่อสร้างเป็นทรงกระบอก ได้คาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองอะตอม แผ่น Graphene จะถูกเลือกตัวที่หนึ่งใช้เป็นจุดเริ่มต้น โดยแผ่นจะหมุนจนกระทั่งอะตอมตัวที่สองมาบรรจบกันโดยเวกเตอร์จากอะตอมแรกไปอีกอะตอมหนึ่งเรียกว่า chiral เวกเตอร์ และความยาวของมันเท่ากับเส้นรอบวงของนาโนทิวบ์ โดยทิศทางของแกนนาโนทิวบ์จะตั้งฉากกับ chiral เวกเตอร์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มี chiral เวกเตอร์แตกต่างกัน จะมีคุณสมบัติต่างกัน ด้วย เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกลศาสตร์และ คุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่น Graphene



รูปที่ 2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์รูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

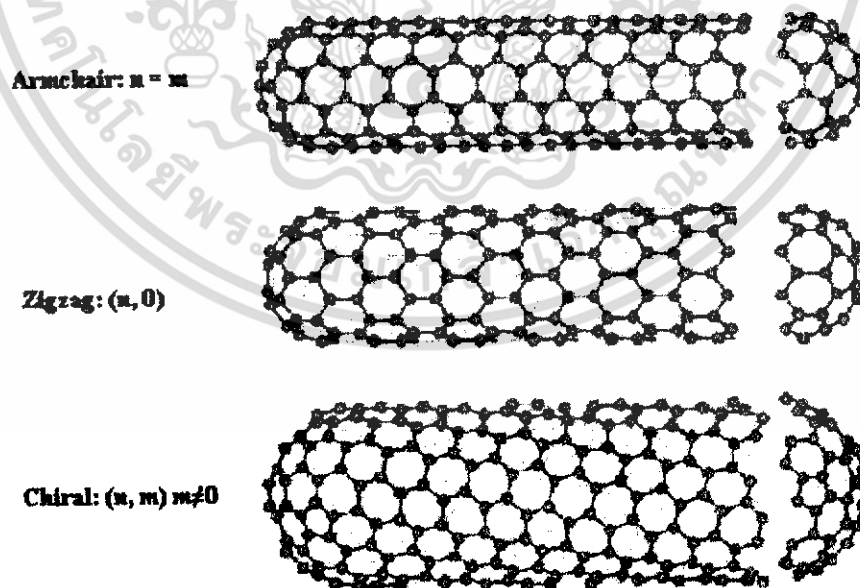
2.4 ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotubes) สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆคือ

2.4.1 Single Walled Carbon nanotubes (SWCNTs)

SWCNTs นั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ (graphene sheet) ให้เป็นท่อทรงกระบอก โครงสร้างของ SWCNTs นั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นอีก 3 ชนิดตามลักษณะการม้วน ซึ่งได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral เส้นผ่าศูนย์กลางนั้นมีขนาดประมาณ 0.4 - 2.0 nm ส่วน MWCNTs นั้น คือการซ้อนกันหลายๆ ชั้นของทิวบ์ โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 nm เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของ MWCNTs นั้นมีขนาดประมาณ 1.5-15 nm ส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกนั้นมีขนาดประมาณ 2.5-30 nm คุณสมบัติของ CNTs ไม่ว่าจะเป็นทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของทิวบ์ เช่น ชนิด (SWCNTs, MWCNTs) เส้นผ่าศูนย์กลาง และ ลักษณะการม้วนของทิวบ์

ซึ่งเกิลวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Single walled carbon nanotubes (SWCNTs)) ยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ชนิดตามลักษณะการม้วนคือ Armchair nanotubes, Zigzag nanotubes และ Chiral nanotubes ซึ่งได้แสดงลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิดใน รูปที่ 4

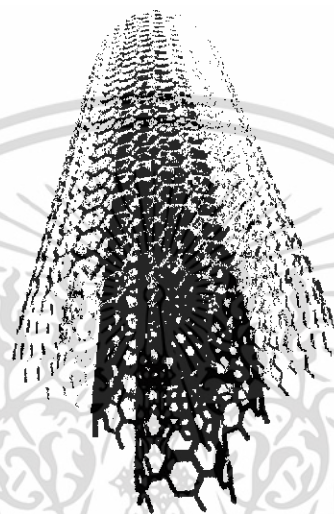


รูปที่ 2.4 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 Multi Walled Carbon nanotubes (MWCNTs)

มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ SWCNTs ที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป โดยแต่ละชั้นมีระยะห่างกันประมาณ 0.34 nm. ดังแสดงใน รูปที่ 5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของ MWCNTs

2.5 การนำคาร์บอนนาโนทิวไปประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือเป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูงแต่เบา ทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่ดี มีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และสามารถจับยึดกับ โมเลกุลของก๊าซและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เช่น ชนิดของทิวบ์ (ซิงเกิลวอลล์และมัลติวอลล์) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของทิวบ์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.5.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าขั้วมอดูลัสสูง สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี จึงสามารถนำมาผสมในวัสดุอื่นๆเพื่อให้ได้วัสดุที่เบาและมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดีหรือมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี โดยเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์ขององค์การนาซา(NASA) ประสบความสำเร็จในการผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในโพลีเมอร์ ซึ่งนี่อาจเป็น

จุดเริ่มต้นของการก้าวไปสู่การสังเคราะห์พลาสติก ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กก็เป็นได้



รูปที่ 6 การสังเคราะห์พลาสติก ที่สามารถนำไฟฟ้าได้

2.5.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์(CNTs)มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ(ค่าAspect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้CNTs มีเสถียรภาพที่ดี และทำให้CNTs สามารถถ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ในอุปกรณ์เช่น จอแสดงผล หลอดไฟฟ้าประหยัดพลังงาน แหล่งกำเนิด X-ray ขนาดเล็กและ แหล่งกำเนิดไมโครเวฟขนาดเล็ก เป็นต้น

2.5.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์เทียบเท่ากับ 1 มิติจึงทำให้มีการนำไฟฟ้าแบบ Ballistic คือไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดที่จะใช้ ในวงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และนอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยเมื่อไม่นานมานี้ บริษัท ไอบีเอ็ม และกลุ่มของ Prof Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์ และลอจิกเกตจากซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นครั้งแรกของโลก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ในอนาคตได้ ทำให้อัตราขนาดของอุปกรณ์และปริมาณในการกินกระแสไฟฟ้างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของสาร ในระดับอะตอม เช่น Scanning Probe Microscope (SPM) , Atomic Force Microscopy (AFM) และประดิษฐ์เป็นนาโนคีม (Nano-Tweezers) และยังสามารถคัดแปลง โดยนำ Functional group ต่างๆ เช่น $-COOH$ มายึดติดที่ปลายทิวบ์เพื่อนำไปใช้ในด้านชีววิทยาและการแพทย์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้ อีกด้วย เช่นทำเป็นเซนเซอร์ก๊าซเช่น NO_2, NH_3, O_2 ได้โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวบ์ที่เปลี่ยนไปเป็นต้น

2.5.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวที่มาก ทำให้เป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการเก็บไฮโดรเจน(H) ซึ่งเป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยมีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon แสดงผลการคำนวณว่า SWCNTs จะสามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวบ์มากขึ้นและมีความเป็นไปได้ที่จะเก็บไฮโดรเจนได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้

บทที่ 3

วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

3.1 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ Base Growth , Tip Growth

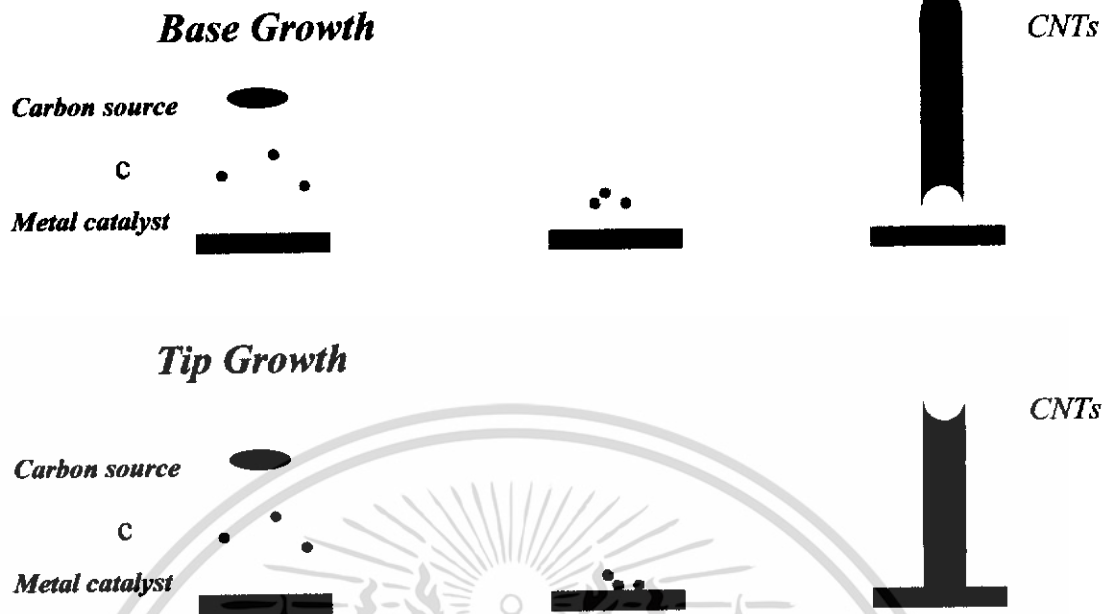
3.1.1 Base Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1 และสามารถอธิบายได้คือที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source) และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านบน จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่ง และก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิวป์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถอธิบายได้คือที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่าง จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง และก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

จากกลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้ง 2 ลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมที่ต่ำ เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว และโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดี เพื่อให้อะตอมคาร์บอนสามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมากๆ



รูปที่ 3.1 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Base Growth และ Tip Growth

3.2 วิธีการสังเคราะห์

CNTsสามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถที่จะสังเคราะห์ได้จากสามวิธีการหลักคือ

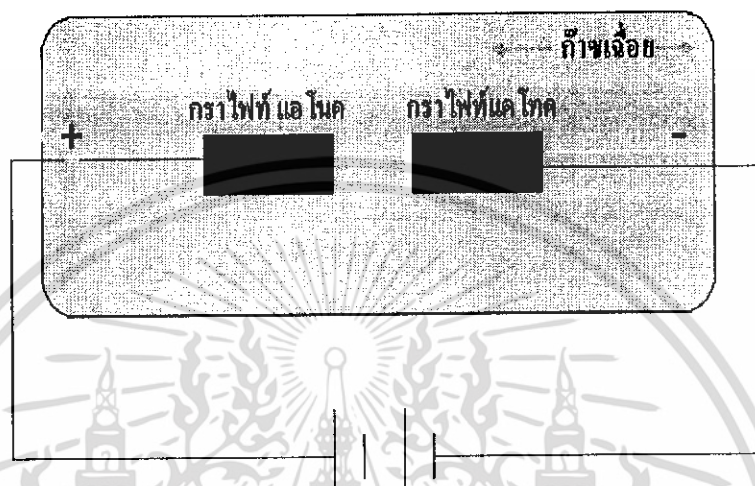
- 1) วิธี Arc discharge
- 2) วิธี Laser ablation
- 3) วิธี Chemical vapor deposition (CVD)

3.2.1 วิธี Arc discharge

วิธี Arc discharge เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการอาร์คที่ปลายทั้ง 2 ของแท่งกราไฟท์(หรือแท่งคาร์บอน) 2 แท่ง ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยาที่เต็มไปด้วยก๊าซเฉื่อย อาจเป็น ฮีเลียม (helium) ผสมกับ อาร์กอน(argon) หรือ ไนโตรเจนเหลว ที่ความดันต่ำโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสูงเพื่อไปอาร์คแท่งกราไฟท์ ทำให้บริเวณที่ถูกอาร์คมีอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ เกาะอยู่บนบางส่วนของแท่ง กราไฟท์ ที่หลุดกระเด็นออกมาและรอบบริเวณแท่งกราไฟท์ที่ถูกอาร์ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมระหว่าง ก๊าซฮีเลียมกับ ก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ และการนำความร้อนมีค่าต่างกัน จึงมีผลกระทบกับความเร็วในการแพร่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะตัวเร่ง การเข็นตัวของแท่งคาร์บอนและอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เป็นผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ มีขนาดต่างกันออกไปไม่สม่ำเสมอ วิธี Arc discharge สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



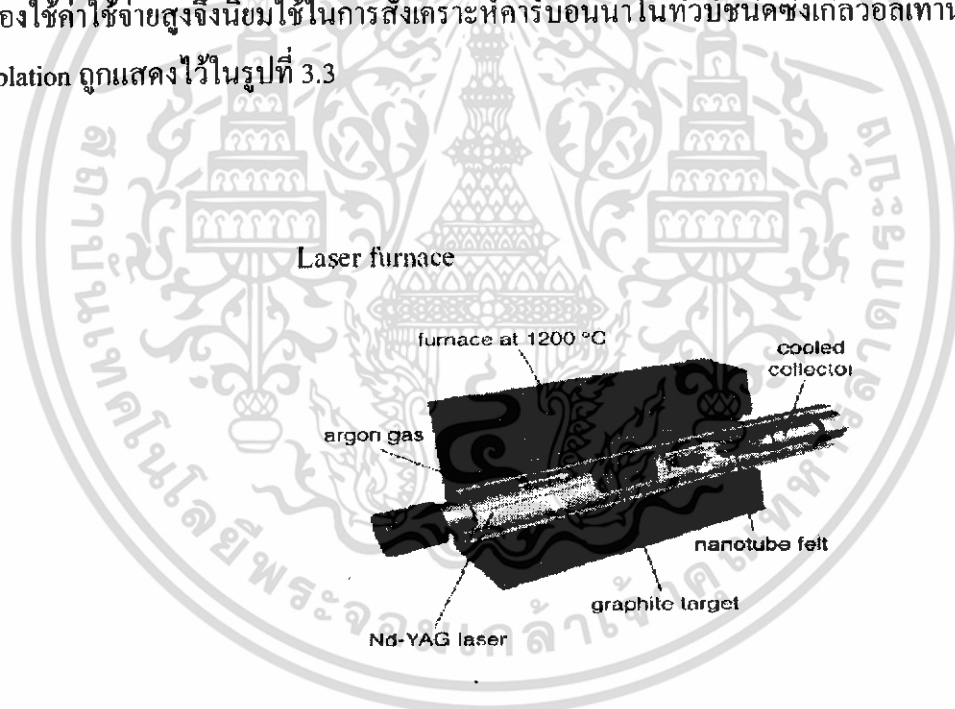
รูปที่ 3.2 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี Arc discharge

และด้วยวิธีการนี้ ยังสามารถที่จะเลือกให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้ ให้เป็นชนิด ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNTs) หรือ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNTs) โดยหากต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิด ซิงเกิลวอลล์ ก็สามารถใช้แท่ง กราไฟต์ ที่เจือด้วยอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni) หรือ โมลิบดีนัม (Mo) ที่ขั้วแอนโนด และถ้าต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นมัลติวอลล์ ก็สามารถใช้แท่งกราฟิตบริสุทธิ์ เท่านั้นก็พอ ไม่จำเป็นต้องผสมโลหะตัวเร่งก็ได้ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีนี้ ด้วยวิธี Arc discharge นี้ จะทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ไม่สะอาด ปะปนกับ เขม่า, โลหะตัวเร่ง และ อะตอมคาร์บอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน จึงต้องผ่านการแยก ให้เหลือเฉพาะคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งจะยุ่งยากและคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ก็ยังคงต่ำอยู่คือจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอสั้นบ้างยาวบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วิธี Laser ablation

ในปี 1995 ทีมวิจัยของ Prof. Smalley ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูง หลักการคือใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงยิงไปที่เป้าหมายซึ่งเป็นแท่งกราไฟท์ที่อยู่ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C ภายในเต็มไปด้วยก๊าซฮีเลียมหรืออาร์กอน ทำให้แท่งกราไฟท์ระเหยออกเป็นไอของคาร์บอน 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 เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดซิงเกิลวอลล์เท่านั้น วิธี Laser ablation ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี Laser ablation

3.2.3 วิธี CVD

วิธีแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition) คือการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี CVD ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD

72941

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก

| วิธี | Arc Discharge | Laser Ablation | CVD |
|----------------------|--|---|--|
| วิธีการสังเคราะห์ | ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งกราไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 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) โดยให้ความร้อน หรือ Plasma เข้าช่วยมีโลหะเป็นตัวเร่งการสังเคราะห์ (อุณหภูมิประมาณ 400 - 1200 °C) |
| ประสิทธิภาพของผลผลิต | 30-90% | มากกว่า 70% | 20-90 |
| SWCNT | - ขนาดสั้น - Ø: 0.6-1.4 nm | - ขนาดสั้น - Ø: 0.6-1.4 nm | - ขนาดยาวมาก - Ø: ขนาดสั้น 0.6-4 nm |
| MWCNT | - ขนาดสั้น - 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 โดยไม่ต้องใช้ โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ในความดันบรรยากาศห้อง | - ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่เป็น SWCNTs - ความบริสุทธิ์สูง - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย | - สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWCNT ยาว - สามารถกำหนดทิศทางของ และตำแหน่งของทิวป์ได้ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี - สามารถที่จะสังเคราะห์ในเชิงอุตสาหกรรมได้ |
| ข้อเสีย | - ความยาวของทิวป์สั้น และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก | - เป็นวิธีที่แพงเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง | - เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวป์ที่ได้มี Defect อยู่บ้างแต่ไม่มาก |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี CVD นั้นยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกก๊าซและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งออกเป็น 5 วิธีใหญ่คือ

3.2.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition

วิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมชั้นออกไซด์ของซิลิคอน (Si) และเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งชนิด ซิงเกิลวอลล์ และมัลติวอลล์ ใช้โลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก(Fe), โคบอล(Co), นิกเกิล(Ni), โมลิบดีนัม(Mo) หรือ อัดลอยของโลหะเหล่านี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีขนาดยาวอยู่ในช่วง 0.6-4 nm

3.2.3.2 Plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD)

วิธี Plasma CVD เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C โลหะตัวเร่งที่ใช้คือ เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และ โคบอล (Co) นอกจากนี้วิธีนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถกำหนดทิศทางการเกิดของทิวป์ให้ทิวป์ตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดมัลติวอลล์ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิดซิงเกิลวอลล์ได้ แต่ปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดซิงเกิลวอลล์ได้แล้ว

3.2.3.3 Vapor phase growth

เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นก๊าซของโลหะ เช่น Ferrocene ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ครั้งละเป็นจำนวนมากๆ และทิวป์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวมาก (มากกว่า 20 μm) และ มีความบริสุทธิ์มากกว่า 80 % แต่เนื่องจากวิธีนี้มักจะใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายจึงต้องระมัดระวังอย่างมากนอกจากนี้วิธีนี้ยังยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดทิวป์อีกด้วย

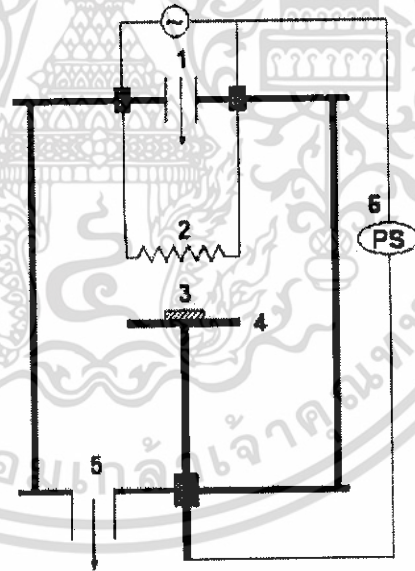
3.2.3.4 High pressure CO disproportionate process

วิธีนี้จะคล้ายกับวิธี Vapor phase growth คือ ใช้ก๊าซของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์(CO)เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน(Carbon source)จึงต้องระมัดระวังอันตรายจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์(CO)ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ การควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นทำได้ยาก แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะมีปริมาณที่มาก มีความบริสุทธิ์สูงมากประมาณ 80 % และมีสิ่งเจือปนน้อย

3.2.3.5 Hot filament enhance CVD (HF-CVD)

สำหรับวิธีนี้ จะมีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ก๊าซ วิธี HF-CVD นี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

หลักการคือ ใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้น ที่ขดลวดมีฐานรองสำหรับวางโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe) และ โคบอล (Co) ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา (Chamber) จะมีท่อนำก๊าซซึ่งเป็นก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบเช่น ไอของแอลกอฮอล์ หรือมีเทน (CH_4) เป็นต้น เข้ามาภายในระบบ ความร้อนจากขดลวดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ $1600\text{--}2000^\circ\text{C}$ จะทำให้โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิสูงและถูกเร่งปฏิกิริยาโดยโลหะตัวเร่ง อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆ จะแตกตัวออกจากโมเลกุลของก๊าซและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่ง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยแสดงระบบของ HF-CVD ในรูปที่ 3.5



Schematic of the hot filament chemical vapor deposition system. (1) gas inlet, (2) filament, (3) substrate, (4) substrate holder, (5) pumping port and (6) dc power supply, $\pm 600\text{ V}$.

รูปที่ 3.5 ระบบของ HF-CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

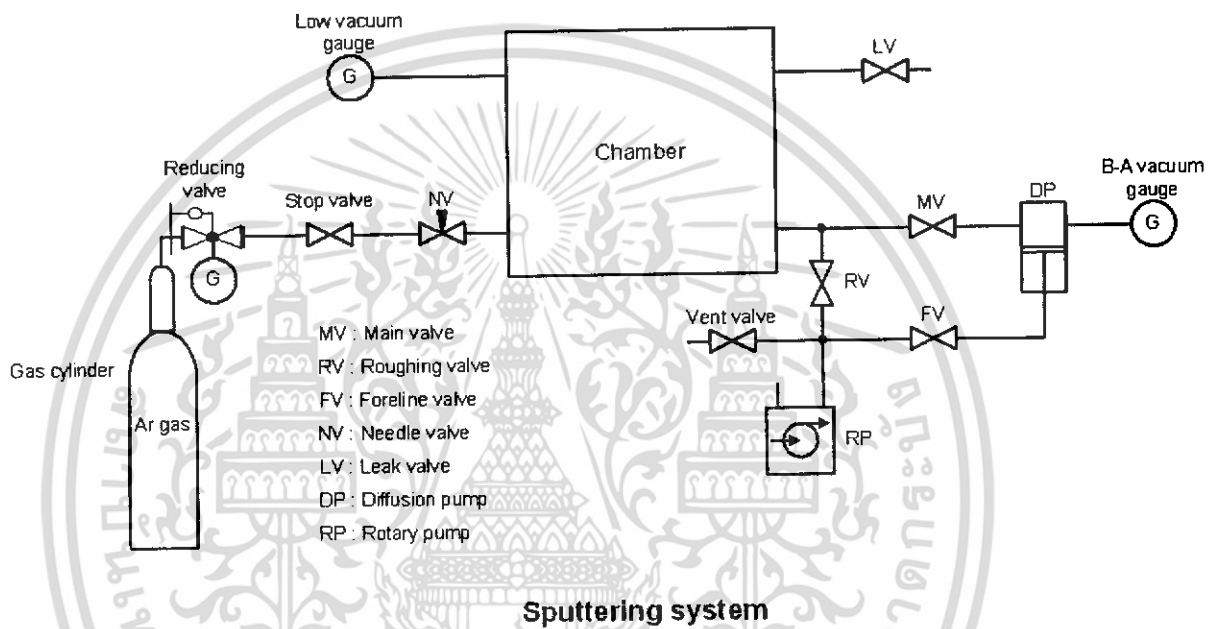
แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน วิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ทั้ง SWCNTs และ MWCNTs ส่วน PE-CVD นั้นสามารถสังเคราะห์ CNTs ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400°C) แต่ CNTs ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้โดยส่วนมากจะเป็นชนิด multi-walled เท่านั้น ส่วนวิธี HF-CVD นั้นมีหลักการเดียวกับวิธี Thermal CVD เพียงแต่ใช้ Filaments ที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกก๊าซออกเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โดยส่วนมากแล้วคุณภาพของ CNTs ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามยังสามารถพัฒนาได้อีก ส่วนวิธี Vapor phase growth นั้นใช้ก๊าซของโลหะ เช่น ferrocene, Fe(CO)₅ ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก สองวิธีหลังนี้สามารถสังเคราะห์ CNTs ที่ละจำนวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมทิศทางและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่ายนัก และ ก๊าซที่ใช้ส่วนมากมีพิษ (เช่น CO เป็นต้น)

โดยในการวิจัยของเรานั้นจะเลือกใช้วิธี CVD แบบหลอดความร้อน (HFCVD) เป็นวิธีในการสังเคราะห์ CNTs โดยใช้เอทานอลผสมก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนพอเหมาะแหล่งจ่ายไอระเหยคือ ไล่หลอดความร้อนถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 2000°C อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550-750°C โดยกระทำที่ความดันบรรยากาศ

บทที่ 4

กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์บนฐานรอง

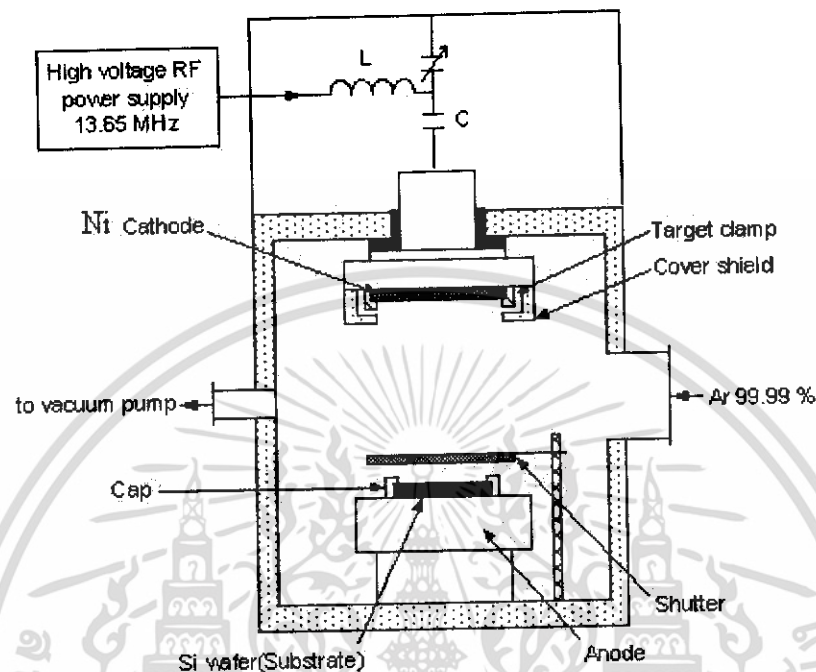
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “อาร์เอฟไดโอดสปัตเตอร์”



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

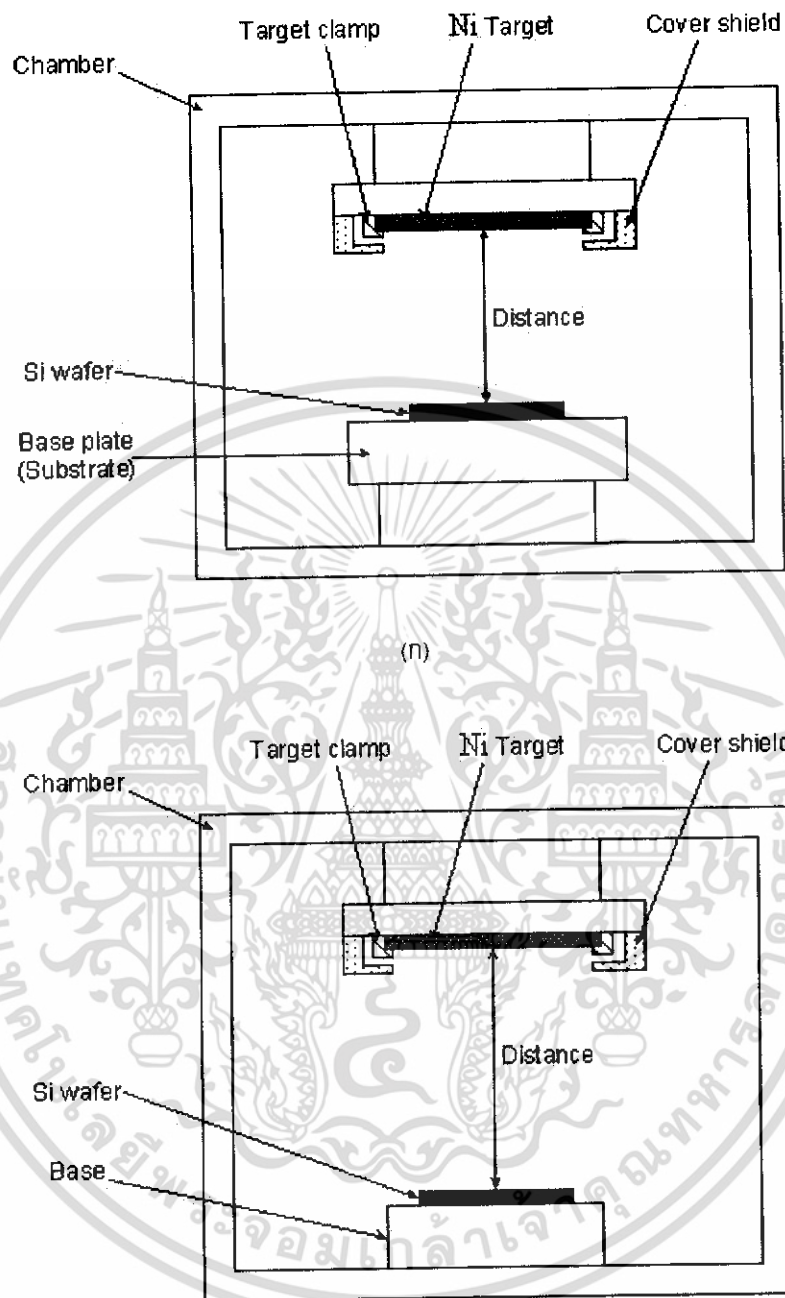
จากไดอะแกรมในรูปที่ 4.1 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปัตเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz) , แหล่งจ่ายแก๊ส , ห้องสปัตเตอร์(sputtering chamber) , และปั๊มสุญญากาศ(rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปัตเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่นอลูมิเนียมซิลิคอน (Al-Si (2wt%)) เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 การสปัตเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรมะทซึ่งเข้าสู่ห้องสปัตเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปัตเตอร์ ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบ และดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชน Ni ที่ขั้วคาโทด ทำให้อะตอมของ Ni กระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นซิลิคอนซึ่งวางที่ขั้วแอโนด เกิดเป็นฟิล์มโลหะ Ni

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ระบบการสปัตเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด

ขั้นตอนการสปัตเตอร์ เริ่มด้วยการนำแผ่นซิลิคอน หนา(100) วางลงบนขั้วอาโนด แล้วดูดอากาศออกจากห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งเหลือความดันต่ำกว่า 5×10^{-7} บาร์ เพื่อทำความสะอาดห้องสปัตเตอร์ จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งถึงความดัน 2×10^{-1} bar โดยค่อยๆ เพิ่มกำลัง RF ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดพลาสมาขึ้นในห้องสปัตเตอร์ จากนั้น ปรับความดันให้ได้ 2×10^{-3} bar [13,10] ปรับกำลัง RF จนได้ค่าที่จะทำการสปัตเตอร์ ทำการพรี-สปัตเตอร์ (pre-sputter) โดยปล่อยให้ระบบอยู่ในเงื่อนไขที่จะทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของ Ni จึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 90 วินาที ดังแสดงตารางที่ 4.1



(ข)

รูปที่ 4.3 แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสปัตเตอร์

(ก) ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนด ที่ 27 cm

(ข) ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนด ที่ 37 cm

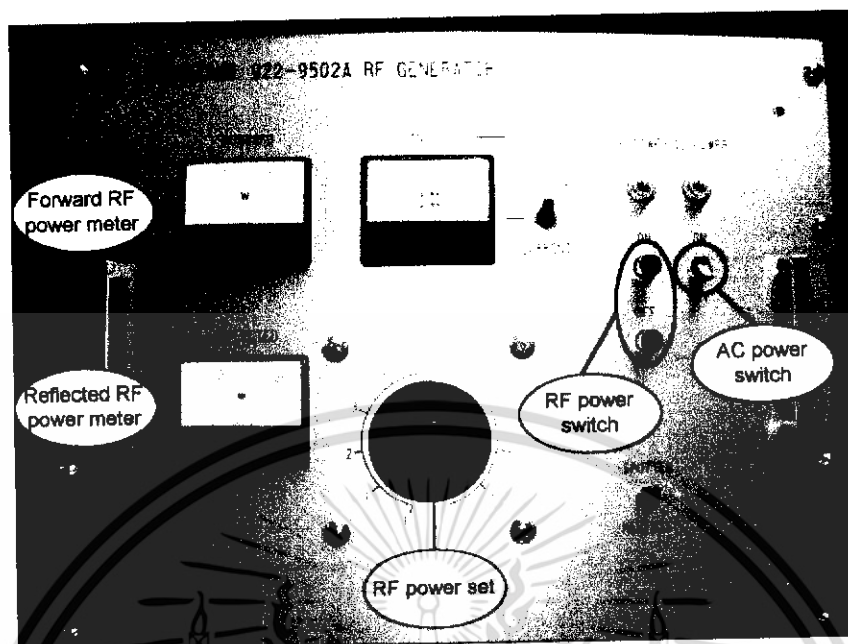
กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะเริ่มด้วยการปรับระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด ซึ่งมีสองระยะคือ 27 และ 37 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งระยะความห่างที่ 27 mm จะมีขีดจำกัดเรื่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันที่ให้สร้างฟิล์ม ซึ่งจะมีช่วงการใช้งานได้ที่ความดันต่ำสุดที่ 2×10^{-2} bar [13] ผลของฟิล์มโลหะที่ได้มีสีเทาเข้มและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฉนวน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างขั้วให้มากขึ้นไปที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 37 mm จะทำให้ช่วงความดันในการสปีดเตอร์ลดลงอยู่ในช่วง $2-5 \times 10^{-3}$ bar ทำให้ได้ฟิล์มโลหะมีคุณภาพดีขึ้น ในระหว่างกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะจะเกิดความร้อนทั้งขั้วคาโทดและขั้วแอโนดเนื่องจากอะตอมของอาร์กอนวิ่งไปชนขั้วคาโทด ซึ่งมีโลหะ Ni ทำให้อะตอมของโลหะกระเด็นตกลงมาที่แผ่นซิลิกอนและคลายความร้อนลงบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งความร้อนนี้จะมีผลการเรียงตัวของอะตอมโลหะ Ni ดังนั้นต้องควบคุมอุณหภูมิที่ขั้วแอโนดไม่ให้เกิน 40°C จะได้ฟิล์มโลหะที่มีคุณภาพดีขึ้น

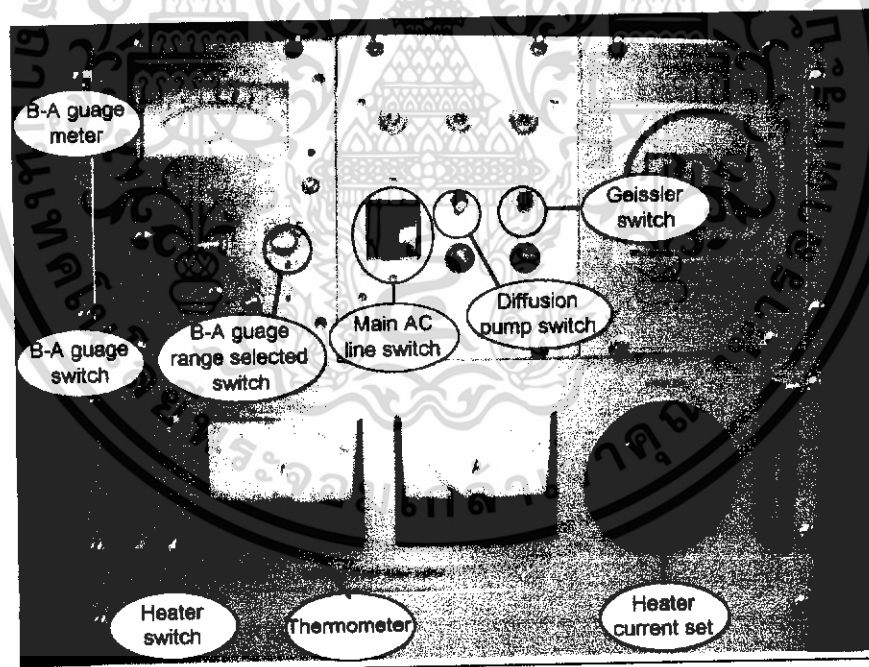
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสปีดเตอร์ Ni ในการทดลอง

| เงื่อนไข | รายละเอียด |
|----------------------------------|---|
| ขั้วคาโทด | เป้าโลหะ Ni (2wt%) ขนาด \varnothing 80 mm. ความบริสุทธิ์ 99.99% |
| บรรยากาศ | อาร์กอน 99.99% |
| ความดัน | $2-5 \times 10^{-3}$ bar |
| เวลา | 90 วินาที |
| ระยะห่างของขั้วคาโทดและขั้วแอโนด | 37 mm |
| กำลังงาน RF | 100 - 150 วัตต์ |
| อุณหภูมิของแอโนด | $25 - 30^{\circ}\text{C}$ |
| ฐานรอง | ซิลิกอนระนาบ (100) ปกคลุมด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ 0.3 ไมครอน |

จากเงื่อนไขของการสปีดเตอร์ทั้งหมดสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการทำงานในระบบของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปีดเตอร์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.4 Panel of RF Generator



รูปที่ 4.5 Panel of Pump Switch ,Ionizing Gauge and Heater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

เทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์

5.1 การตรวจดูลักษณะพื้นผิวด้วย SEM

SEM เป็นเทคนิคที่ใช้ดูลักษณะพื้นผิวของผลึกที่มีขนาดระดับไมครอน เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการดูลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำงานด้วยการยิงลำอิเล็กตรอนให้ไปโฟกัสตกเป็นจุดเล็ก บนเป้าซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่าง และเก็บรวบรวมและแสดงสัญญาณอิเล็กทริกที่ส่งป้อนออกมาโดยวัตถุที่ใช้เป้าแล้วขยายเป็นภาพบนหลอดรังสีแคโทด ซึ่งแสดงรายละเอียดการทำงาน โดยเริ่มจากปืนอิเล็กตรอนจะผลิตอิเล็กตรอนในช่องว่างขนาด 10 – 20 นาโนเมตรแล้วควบคุมให้พุ่งมากระทบเป้าขดลวดสแกนจะปล่อยให้ลำอิเล็กตรอนแยกภาพพื้นที่เล็ก ๆ ของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับด้วยมุมเล็ก ๆ จะอันตรกิริยา (Ininteract) กับส่วนที่นูนของพื้นผิวและทำให้เกิดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับลำดับที่ 1 เพื่อสร้างสัญญาณของอิเล็กตรอน ความสว่างหรือความเข้มของการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ลำดับที่ 2 จะขึ้นอยู่กับพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง และอิเล็กตรอนลำดับที่ 2 นี้ จะเป็นตัวสร้างสัญญาณให้เกิดภาพขึ้น SEM มีข้อได้เปรียบกว่ากล้องจุลทรรศน์อยู่มาก เนื่องจากมีกำลังขยายที่สูงกว่ามาก โดยปกติอยู่ในช่วง 50 – 40,000 เท่า มีความละเอียดสูง 2.5 – 10 นาโนเมตร มีความลึกมากกว่า 500 เท่า และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับเทคนิค TEM ซึ่งต้องใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีความบางพอเพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM ใช้ได้แม้กับชิ้นงานที่เป็นก้อนแข็ง ชิ้นงานที่มีความนำจะถูกวิเคราะห์ได้ด้วยเงื่อนไขตามปกติ ส่วนชิ้นงานที่ไม่มีความนำโดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องมีการเคลือบด้วยวัสดุที่มีความนำเช่น ทองหรือคาร์บอนบาง ๆ ก่อน

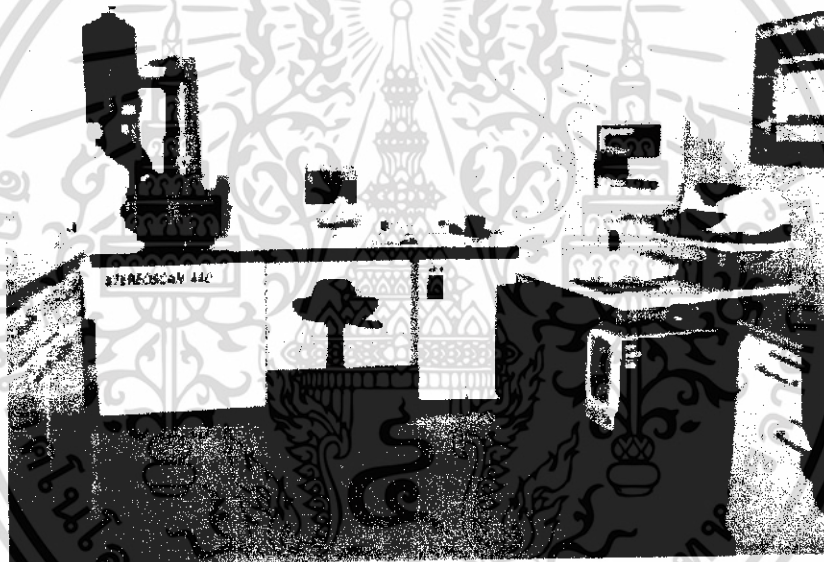


รูปที่ 5.1 SEM (Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX

EDX เป็นเป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ สามารถทดสอบชิ้นงานที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือเป็นผงได้ ในระดับหน่วยการวัดเป็น % หรือ ppm โดยใช้หลักการยิงรังสี X-Ray ไปยังชิ้นงานตัวอย่างและวัดระดับการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive) ที่สะท้อนออกมาในรูป X-Ray Fluorescence จะทำให้ทราบว่ามีธาตุอะไรอยู่บ้าง ในปริมาณเท่าไร สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งบรรยากาศแบบปกติ แบบสุญญากาศ หรือก๊าซฮีเลียมได้เพื่อความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 5.2 EDX (Energy Dispersion X-Ray)

5.3 การวัดด้วย Raman Spectroscopy

การวัดคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ส่วนมากแล้ว มักจะใช้ในการตรวจสอบพันธะของคาร์บอน ดังนั้นผลที่ได้สามารถแยกชนิดของคาร์บอนได้ว่าเป็น แกรไฟต์ เพชร หรือ อะมอร์ฟัสคาร์บอน โดยแสดงออกมาเป็น Raman Spectrum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 Raman spectroscope



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน

6.1 วัตถุประสงค์

- 6.1.1 ศึกษากระบวนการการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD
- 6.1.2 หาค่าที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรอง ต่างๆ
- 6.1.3 ศึกษาการเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์บริเวณที่ต้องการ
- 6.1.4 ศึกษาการออกแบบลดความเครียด เพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับประเภทแก๊สเซนเซอร์

6.2 อุปกรณ์และสารเคมี

- 6.2.1 ท่อแก้วที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา(Chamber)
- 6.2.2 แอลกอฮอล์(Ethanol)
- 6.2.3 ลวดทั้งสแตนเลส
- 6.2.4 ถังเก็บแก๊สไฮโดรเจน (H_2)
- 6.2.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสูง
- 6.2.6 เครื่องวัดอัตราการไหล(Flow meter)
- 6.2.7 เทอร์โมคัปเปิล
- 6.2.8 ฐานรอง
 1. แผ่นทองแดงสปัดด้วยนิเกิล
 2. แผ่นซิลิกอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิล
 3. แผ่นทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิล
 4. แผ่นซิลิกอนสปัดด้วยนิเกิล
 5. แผ่นซิลิกอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิลแล้วกัณนิเกิลเป็นลวดลาย

6.3 ขั้นตอนการทดลอง

6.3.1 นำฐานรองใส่ในท่อแก้วของชุดอุปกรณ์ ดังรูปที่ 6.1

6.3.2 ให้แก๊สไฮโดรเจนไหลผ่าน Valve-1 และ Valve-2 เข้าไปใน Chamber เพื่อไม่ให้เกิดการออกซิไดซ์ในขณะที่ทำการทดลอง ด้วยอัตราการไหล 150 cc / นาที โดยแก๊สไฮโดรเจนไม่ได้ไหลผ่านแอลกอฮอล์ โดยในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ดังรูปที่ 6.2

6.3.3 ทำการไล่อากาศใน Chamber อีกครั้ง ขั้นตอนนี้ทำการลด valve-1 ที่ตั้งไฮโดรเจนให้มีอัตราการไหลประมาณ 100 cc / นาที ปิด valve-2 เพื่อให้ไฮโดรเจนส่วนหนึ่งไหลผ่านแอลกอฮอล์

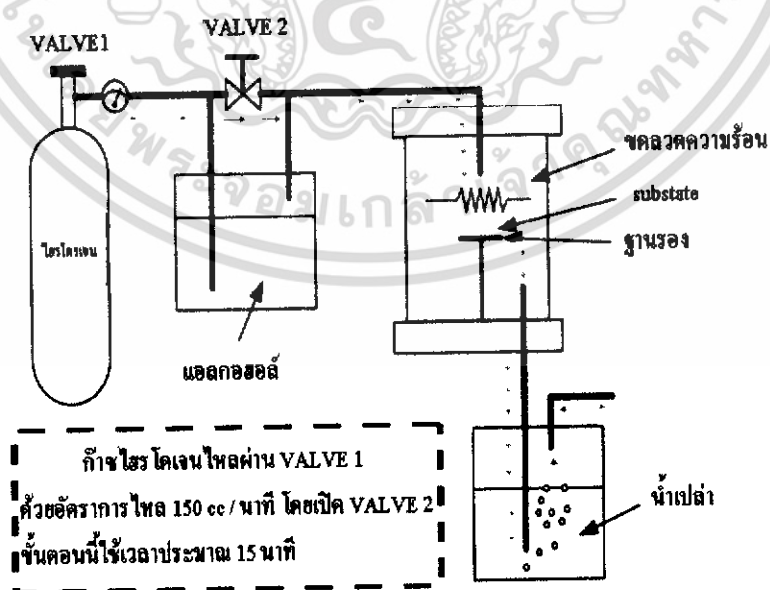
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยอัตราการไหลประมาณ 8-10 cc / นาที โดยขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 10 นาที โดยก๊าซไฮโดรเจนถูกแบ่งเป็นสองทางทางหนึ่งผ่านสารเอทานอล ทำให้เกิดฟองอากาศพุดาเอาไธระเหยของแอลกอฮอล์มาผสมกับอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นไฮโดรเจนรวมกันเป็นสารจำยไธระเหย อัตราส่วนทั้งสองส่วนถูกควบคุมด้วยมิเตอร์การไหลและวาล์ว ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

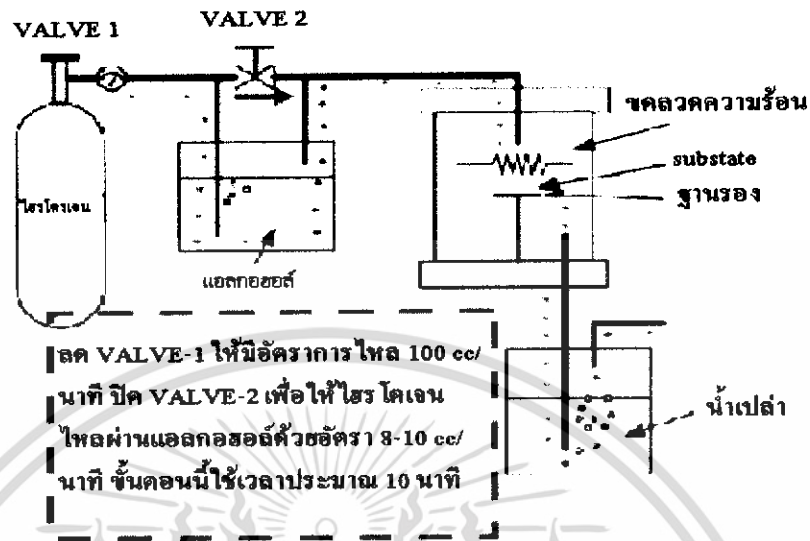
ภาพทำการไล่อากาศภายใน Chamber Loop ครั้งที่ 1



รูปที่ 6.2 ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2



รูปที่ 6.3 ทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2

6.3.4 ทำการให้ความร้อน โดยใช้ขดลวดทั้งสแตนท์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm. ถูกทำให้ร้อน โดยแหล่งจ่ายไฟที่มีค่า 30-40 v และกระแส 9-10 A. เริ่มกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 40-60 นาที จากนั้นทำการปิด valve-1 และรอให้ไนโตรเจนหยุดไหลเข้า Chamber และรอให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นนำ sample ออก

6.4 ผลการทดลอง

6.4.1 ฐานรองทองแดงสปีดด้วยนิเกิล

จากการทดลองโดยการเตรียมฐานรองทองแดงโดยมีตัวคะตะไลต์เป็นนิเกิลสปีดเติมแผ่น เพื่อให้การสังเคราะห์เกิดฟิล์มได้บริเวณกว้าง เป็นเวลา 15 นาที เราจะได้ความหนาของฟิล์มนิเกิลที่เคลือบบนฐานรองทองแดง มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร



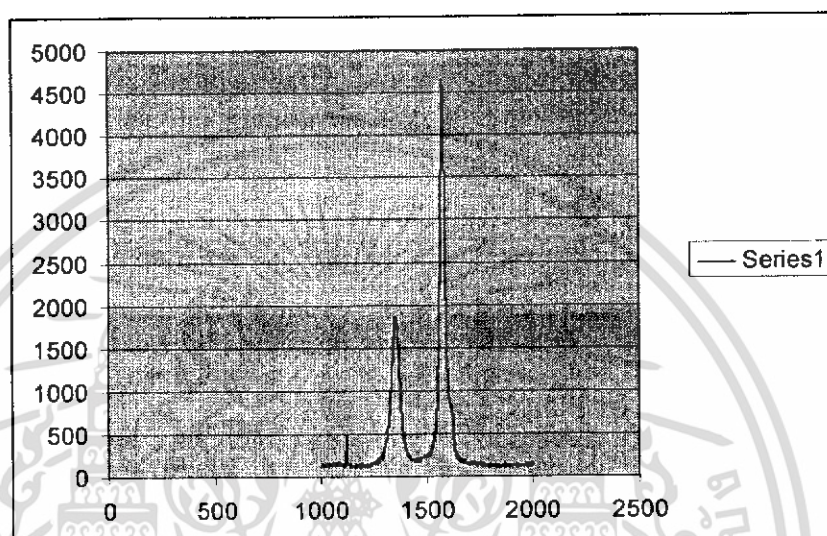
รูปที่ 6.4 ภาพพื้นผิวฐานรองทองแดงสปีดด้วยนิเกิลก่อนกระบวนการสังเคราะห์



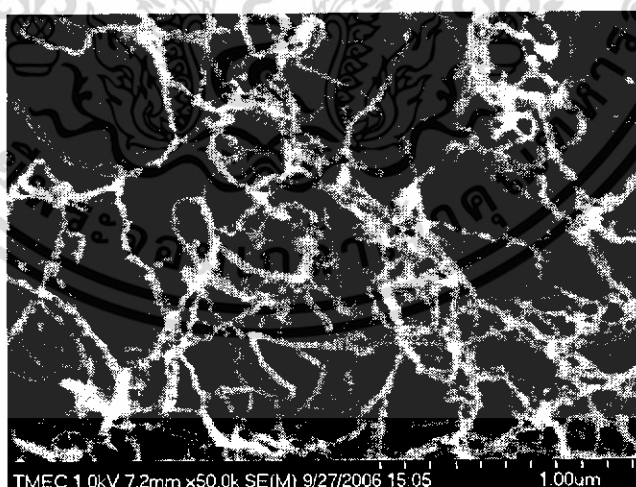
รูปที่ 6.5 ภาพพื้นผิวฐานรองทองแดงสปีดด้วยนิเกิลหลังกระบวนการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 142 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 62 minute |



รูปที่ 6.6 Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองทองแดง สปีดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C



รูปที่ 6.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองของทองแดง สปีดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองทองแดงสปีดด้วย
 นิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

จากภาพพื้นผิวก่อนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ พื้นผิวจะปกคลุมไปด้วยนิเกิลที่ได้จากการสปีดเป็นเวลา 15 นาที เมื่อผ่านการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้ว พื้นผิวจะมีลักษณะเป็นสีดำ จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman spectroscope จะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟของ G Band อยู่ที่ 1580 cm^{-1} และกราฟของ D Band อยู่ที่ 1350 cm^{-1} แสดงว่าจะมีส่วนประกอบที่เป็นกราฟไฟต์มากกว่าส่วนประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่กราฟไฟต์ ผลจากภาพถ่าย SEM จะมีความหนาแน่นของเส้นใยน้อย และเมื่อตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่อง EDX แล้ว ภาพที่ได้จะเห็นยอดกราฟของคาร์บอนสูงกว่านิเกิลมาก ซึ่งก่อนการสังเคราะห์จะไม่มียอดคลื่นของคาร์บอน

6.4.2 ฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิกเกิล

กระบวนการElectroplating เป็นกระบวนการที่สามารถนำไปใช้ในการเตรียมโลหะตัวเร่งได้ซึ่งโลหะตัวเร่งนั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยโลหะตัวเร่งนี้จะเป็นตัวที่ทำให้คาร์บอนที่ทำปฏิกิริยาแล้วมาเกาะที่ตัวโลหะวัสดุที่ใช้เป็นโลหะนั้นมีหลายชนิดเช่น นิกเกิล(Ni) เหล็ก(Fe) โคบอลต์(Co) เป็นต้น วัสดุแต่ละชนิดที่ใช่เป็นโลหะตัวเร่งนั้นมีความสมบัติที่จะทำให้การเกิดของคาร์บอนนั้นแตกต่างกันในการทดลองนี้จะใช้นิกเกิลเป็นโลหะตัวล่อ เพราะคาร์บอนที่ได้นั้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและมีเส้นตรงและวิธีการนั้นจะเป็นวิธีการจะเป็นวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนมากนัก



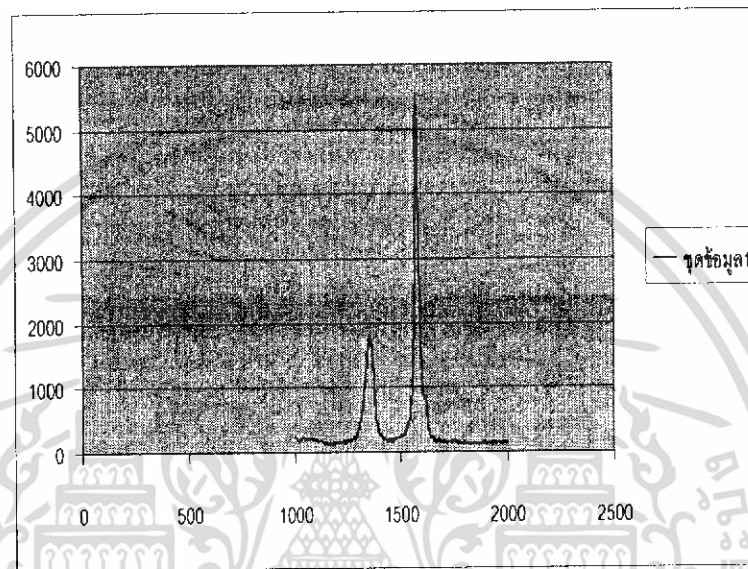
รูปที่ 6.9 ภาพพื้นผิวฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิกเกิลก่อนกระบวนการสังเคราะห์



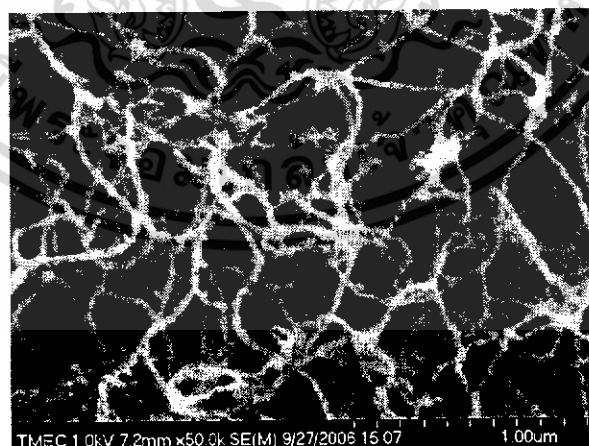
รูปที่ 6.10 ภาพพื้นผิวฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิกเกิลหลังกระบวนการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 106 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 44 minute |

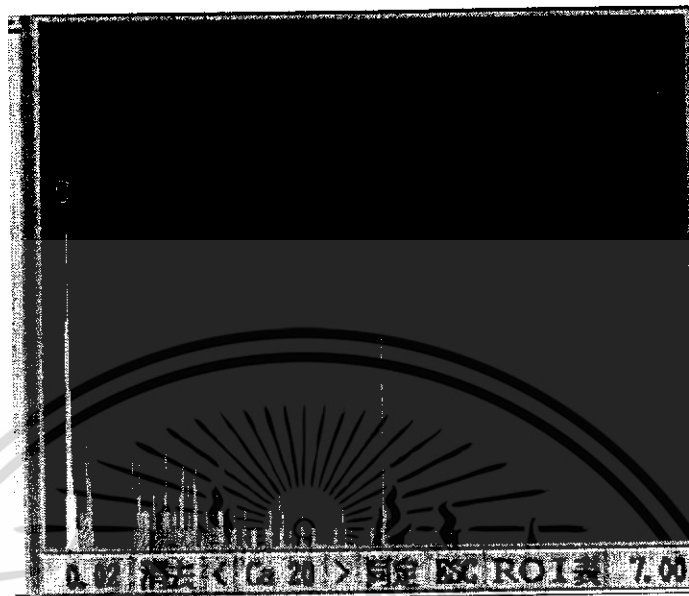


รูปที่ 6.11 Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C



รูปที่ 6.12 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองทองชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้า
ด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

จากภาพพื้นผิวก่อนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ พื้นผิวจะมีลักษณะเป็นลายเส้นของนิเกิลสลับกับลายทองแดงที่เกิดจากชุบทางไฟฟ้า หลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ลายเส้นส่วนที่เป็นนิเกิลจะมีลักษณะเป็นฟิล์มสีดำ บริเวณที่เป็นทองแดงจะไม่มีการเปลี่ยน จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman spectroscope จะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟของ G Band อยู่ที่ 1585 cm^{-1} และกราฟของ D Band อยู่ที่ 1355 cm^{-1} แสดงว่าจะมีส่วนประกอบที่เป็นกราฟไฟต์มากกว่าส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กราฟไฟต์ ผลจากภาพถ่าย SEM จะมีความหนาแน่นของเส้นใยมาก และเมื่อตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่อง EDX แล้ว ภาพที่ได้จะเห็นยอดกราฟของคาร์บอนสูงกว่านิเกิลมาก ซึ่งก่อนการสังเคราะห์จะไม่มียอดคลื่นของคาร์บอน

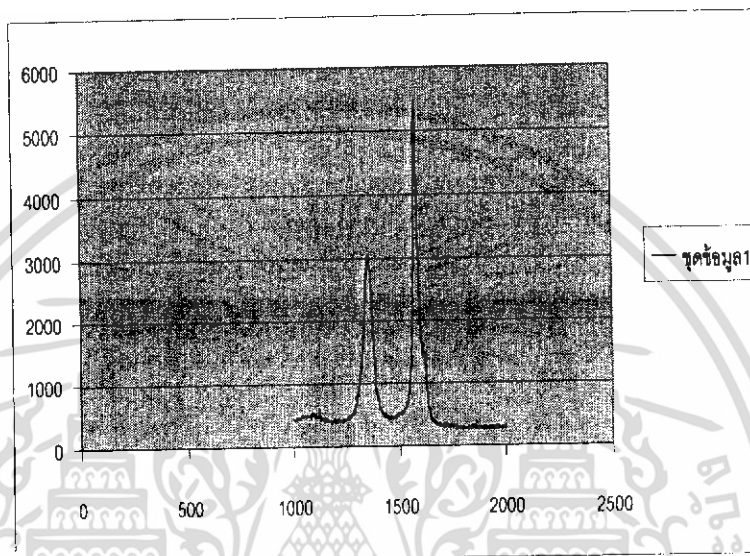
6.4.3 ฐานรองชิลิคอนสปัดด้วยนิเกิล

จากการทดลองโดยการนำฐานรองชิลิคอนนำมาสปัดด้วยนิเกิลเป็นจุด เพื่อเป็นตัวสะท้อนแสงทำให้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ โดยในขั้นตอนการสปัดนิเกิลนั้น จะใช้วัสดุบั้งเพื่อให้เกิดจุด ซึ่งจุดที่เกิดขึ้นจะเป็นบริเวณของนิเกิล เวลาที่ใช้ในการสปัดจะใช้เวลา 15 นาที จะให้ความหนาของนิเกิลประมาณ 1 ไมโครเมตร

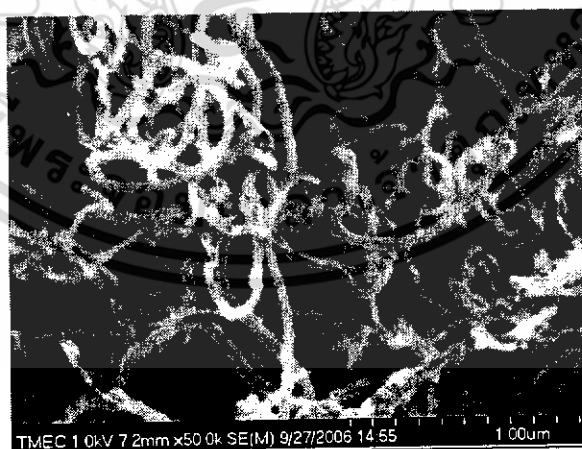
รูปที่ 6.14 ภาพพื้นผิวฐานรองชิลิคอนสปัดด้วยนิเกิลก่อนกระบวนการสังเคราะห์

รูปที่ 6.15 ภาพพื้นผิวฐานรองชิลิคอนสปัดด้วยนิเกิลหลังกระบวนการสังเคราะห์

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 107 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 35 minute |



รูปที่ 6.16 Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C



รูปที่ 6.17 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

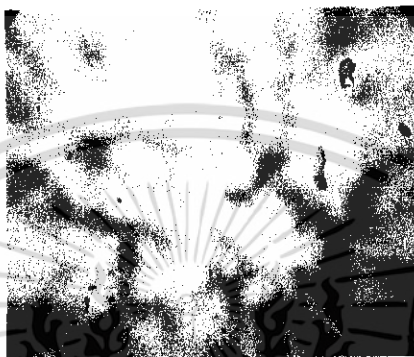


รูปที่ 6.18 ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองซิลิคอนสปัตด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

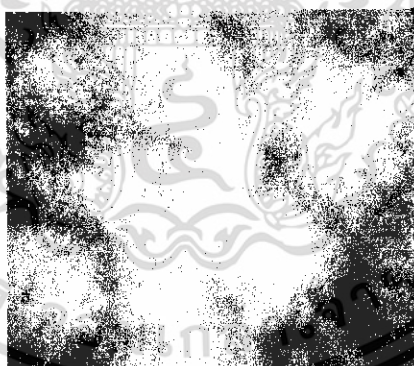
จากภาพพื้นผิวก่อนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ บนฐานรองซิลิคอนสปัตด้วยนิเกิล ที่เกิดจากการใช้มาร์คที่มีรูมาบ่ง เพื่อให้เกิดนิเกิลเป็นจุด เมื่อผ่านการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แล้ว พื้นผิวจะมีลักษณะเป็นสีดำในส่วนที่เป็นนิเกิล ส่วนที่เป็นซิลิคอนจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman spectroscopy จะสังเกตเห็นได้ว่า กราฟของ G Band อยู่ที่ 1580 cm^{-1} จะสูงกว่ากราฟของ D Band อยู่ที่ 1350 cm^{-1} แสดงว่าจะมีส่วนประกอบที่เป็นกราฟไฟต์มากกว่าส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กราฟไฟต์ ผลจากภาพถ่าย SEM จะมีความหนาแน่นของเส้นใย เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่อง EDX แล้ว ภาพที่ได้จะเห็นยอดกราฟของคาร์บอนสูงกว่านิเกิลมาก ซึ่งก่อนการสังเคราะห์จะไม่มียอดคลื่นของคาร์บอน

6.4.4 ฐานรองซัลฟอนไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิล

จากการทดลองโดยการนำฐานรองซัลฟอนไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิลทั้งแผ่น เพื่อเป็นตัว
 คัดตะไลต์ทำให้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ โดยเวลาที่ใช้ในการสปีด เป็นเวลา 15
 นาที จะให้ความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร



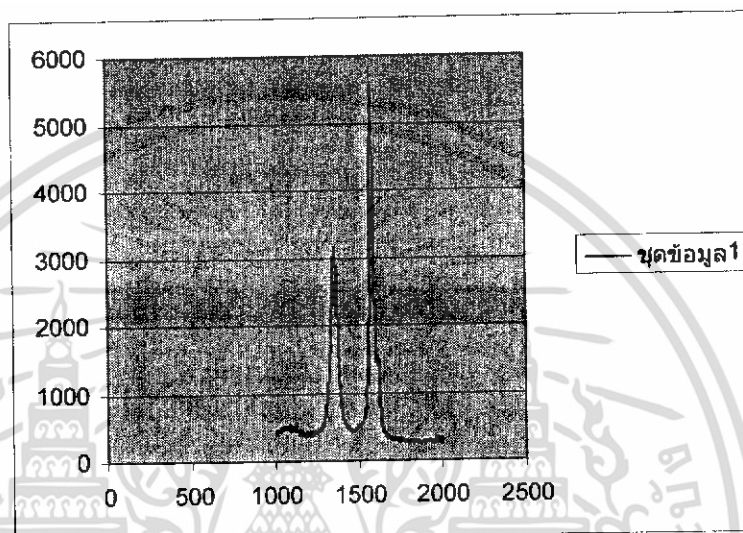
รูปที่ 6.19 ภาพพื้นผิวฐานรองซัลฟอนไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิลก่อนกระบวนการสังเคราะห์



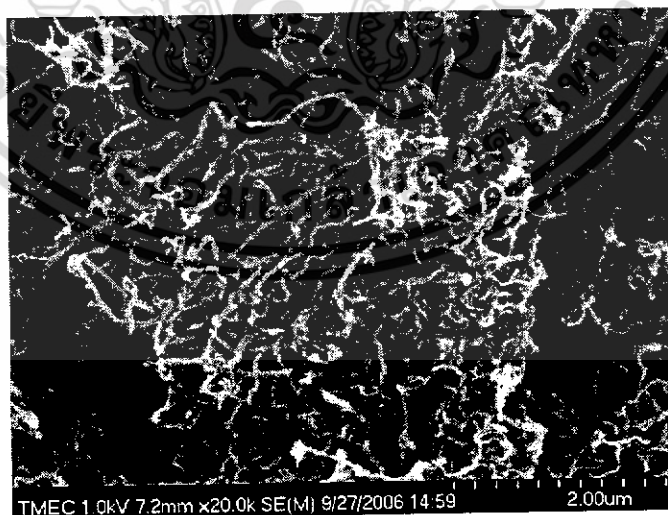
รูปที่ 6.20 ภาพพื้นผิวฐานรองซัลฟอนไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิลหลังกระบวนการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 122 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 46 minute |



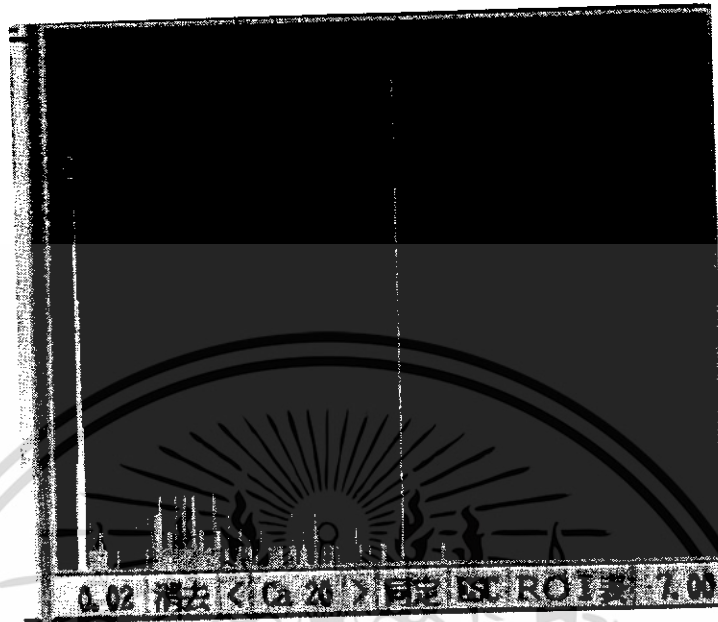
รูปที่ 6.21 Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิกอน ไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C



รูปที่ 6.22 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิกอน ไดออกไซด์

สปีดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

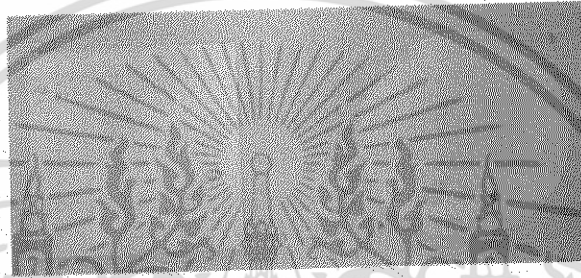
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



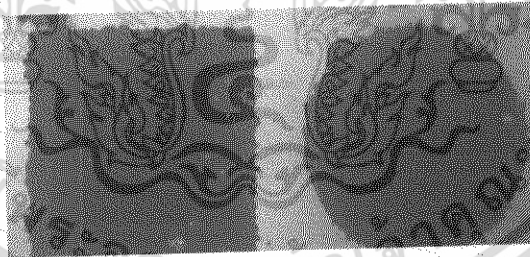
รูปที่ 6.23 ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์
สปีดด้วยนิเกิล ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

จากภาพพื้นผิวก่อนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิลจะถูกปกคลุมไปด้วยนิเกิลเมื่อผ่านการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้ว พื้นผิวจะมีลักษณะเป็นสีดำเต็มแผ่น จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman spectroscopy จะสังเกตเห็นได้ว่า กราฟของ G Band อยู่ที่ 1583 cm^{-1} จะสูงกว่ากราฟของ D Band อยู่ที่ 1356 cm^{-1} แสดงว่าจะมีส่วนประกอบที่เป็นกราฟไฟต์มากกว่าส่วนประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่กราฟไฟต์ ผลจากภาพถ่าย SEM จะมีความหนาแน่นของเส้นใยมาก เมื่อตรวจสอบสมบัติของเครื่อง EDX แล้ว ภาพที่ได้จะเห็นยอดกราฟของคาร์บอนสูงกว่านิเกิลมาก ซึ่งก่อนการสังเคราะห์จะไม่มียอดคลื่นของคาร์บอน

6.4.5 ฐานรองชิลิคอนไดออกไซด์สัปดาห์ด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วออกแบบเป็นลวดลายจากการทดลองนำแผ่นชิลิคอนไดออกไซด์มาทำการแกะสลักด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อทำการเปิดมาร์ก จากนั้นนำแผ่นชิลิคอนไดออกไซด์มา Etching เพื่อกัดนิเกิลออก แล้วทำการลอกน้ำยาไวแสง AZ ออก เราก็จะได้ฐานรองที่ต้องการดังรูปที่ 6.24 หลังจากนั้นเราก็นำฐานรองดังกล่าวมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ ประมาณ 45 นาที อุณหภูมิของฐานรองประมาณ 600- 700 °C ดังรูปที่ 6.25

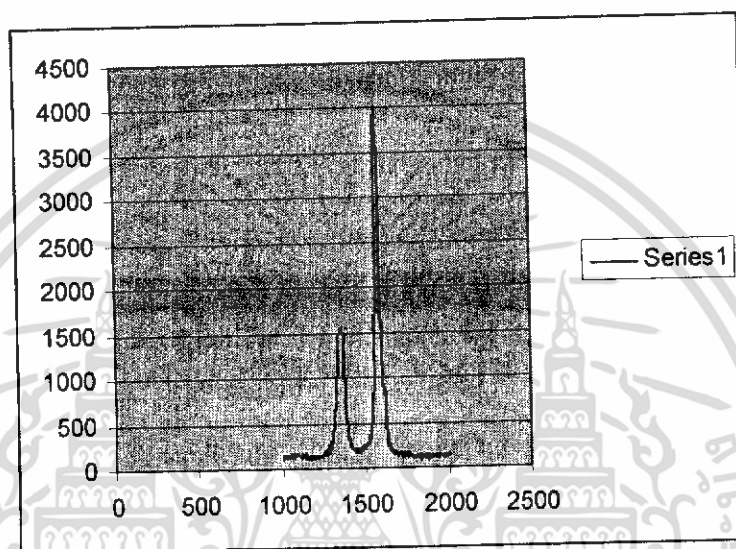


รูปที่ 6.24 ภาพถ่ายพื้นผิวฐานรองชิลิคอนไดออกไซด์สัปดาห์ด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วออกแบบเป็นลวดลายก่อนกระบวนการสังเคราะห์

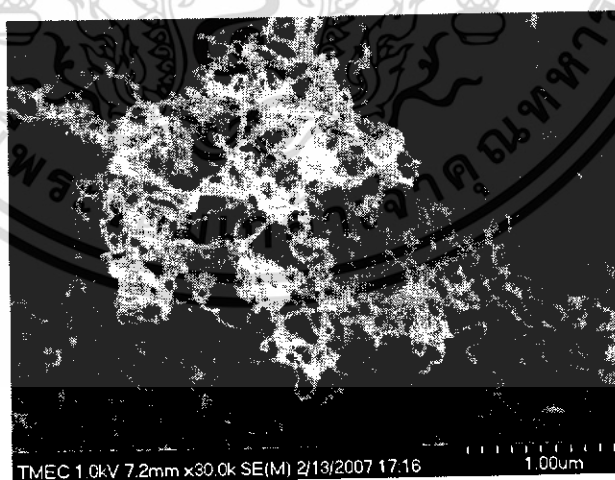


รูปที่ 6.25 ภาพถ่ายพื้นผิวฐานรองชิลิคอนไดออกไซด์สัปดาห์ด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วออกแบบเป็นลวดลายหลังกระบวนการสังเคราะห์

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 132 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 45 minute |

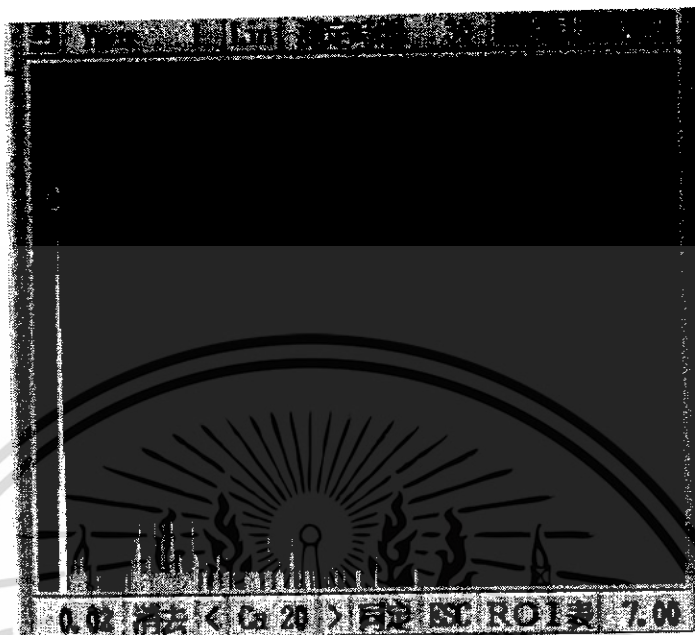


รูปที่ 6.26 Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน ไดออกไซด์สปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วออกแบบเป็นลวดลาย ที่อุณหภูมิฐานรอง ประมาณ 600 – 700 °C



รูปที่ 6.27 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองซิลิคอน ไดออกไซด์ สปีดด้วยนิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วแล้วออกแบบเป็นลวดลาย ที่อุณหภูมิฐานรอง ประมาณ 600 – 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.28 ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปีดด้วย
 นิเกิลเป็นเวลา 1 ชม. แล้วออกแบบเป็นลวดลาย ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

จากภาพพื้นผิวของฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ถูกออกแบบด้วยลวดลายด้วย
 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จะเกิดลวดลายตามที่ได้ออกแบบ เมื่อผ่านการสังเคราะห์คาร์บอนนา
 โนทิวบ์แล้ว บริเวณที่เป็นนิเกิลจะมีลักษณะเป็นสีดำตามลวดลายที่ออกแบบไว้ ส่วนที่เป็น
 ซิลิคอนไดออกไซด์จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนา
 โนทิวบ์ด้วย Raman spectroscopy จะสังเกตเห็นได้ว่า กราฟของ G Band อยู่ที่ 1575 cm^{-1} จะสูง
 กว่ากราฟของ D Band อยู่ที่ 1350 cm^{-1} แสดงว่าจะมีส่วนประกอบที่เป็นกราฟไฟต์มากกว่า
 ส่วนประกอบอื่นๆ ผลจากภาพถ่าย SEM จะมีความหนาแน่นของเส้นใยมาก เมื่อตรวจสอบ
 คุณสมบัติของเครื่อง EDX แล้ว ภาพที่ได้จะเห็นยอดกราฟของคาร์บอนสูงกว่านิเกิลมาก ซึ่งก่อน
 การสังเคราะห์จะไม่มียอดคลื่นของคาร์บอน

6.4.6 ฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติ

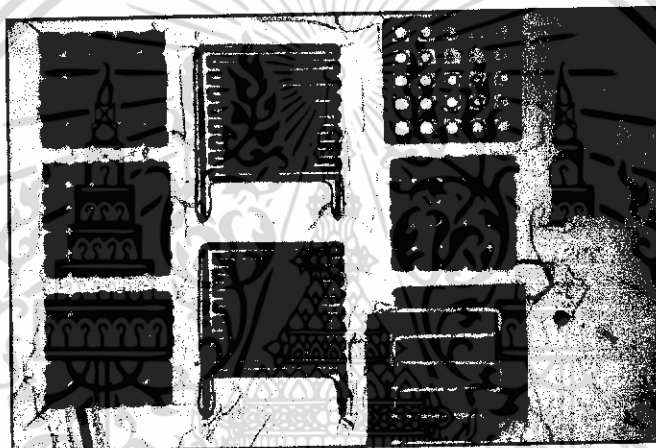
จากการทดลองเราเตรียมกระบวนการการสร้าง 2 ส่วนด้วยกัน คือ

- เตรียม Mark

เตรียมแผ่นกราฟไฟต์, ทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์, อบแผ่นให้แห้ง, เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ SU-8 2010, สปรินแผ่น 500 รอบ 5 วินาที / 5000 รอบ 5 วินาที, วางฟิล์มต้นแบบ, ฉายแสง UV 1 นาที, อบให้แห้ง Develop 45 วินาทีเพื่อเปิดช่อง และชุบทางไฟฟ้า

- เตรียม Samble

เตรียมแผ่นสแตนเลส, ทำความสะอาดแผ่น, อบให้แห้ง, ทำความสะอาดด้วยพลาสติก, เคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบ SU-8 100



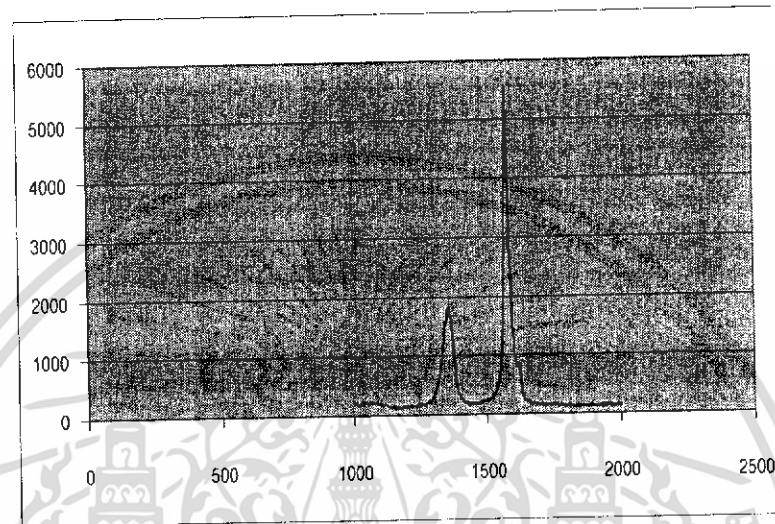
รูปที่ 6.29 ภาพพื้นผิวฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติก่อนกระบวนการสังเคราะห์



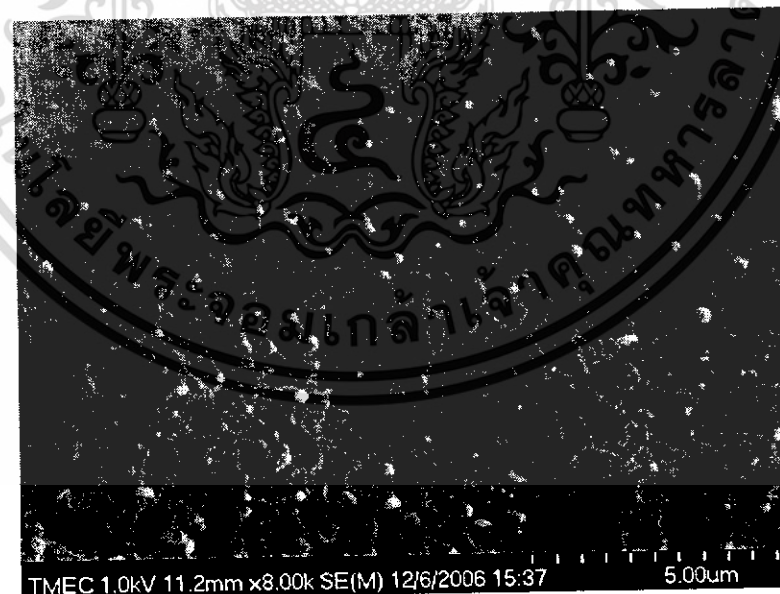
รูปที่ 6.30 ภาพพื้นผิวฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติหลังกระบวนการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| PARAMETER | VALUE |
|-------------|------------|
| Power | 128 W. |
| Temperature | 600-700 °C |
| Time | 45 minute |

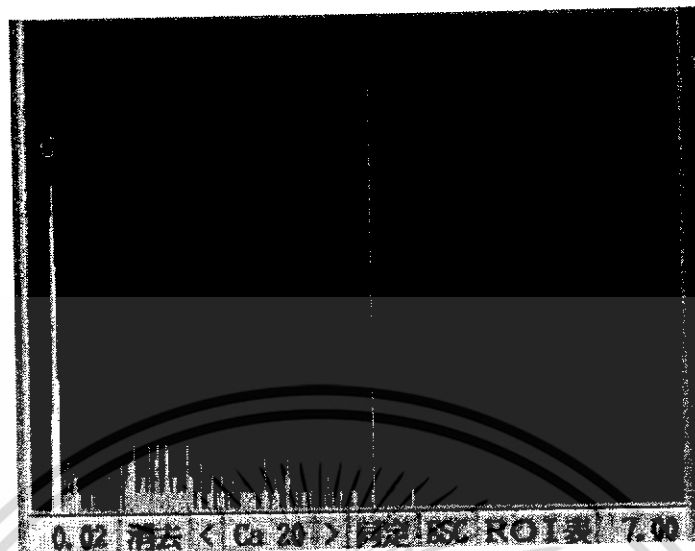


รูปที่ 6.31 Raman Spectrum แสดงคุณภาพ ของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์บนฐานรอง
 นิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติ ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600-700 °C



รูปที่ 6.32 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้า
 เป็น 3 มิติ ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.33 ภาพผลการตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX บนฐานรองฐานรองนิเกิลที่ถูกชุบทางไฟฟ้าเป็น 3 มิติ ที่อุณหภูมิฐานรองประมาณ 600 – 700 °C

จากฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิลเป็น 3 มิติ เมื่อผ่านการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้ว พื้นผิวจะมีลักษณะเป็นสีดำในส่วนที่เป็นนิเกิล จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman spectroscope จะสังเกตเห็นได้ว่า กราฟของ G Band อยู่ที่ 1580 cm^{-1} จะสูงกว่ากราฟของ D Band อยู่ที่ 1350 cm^{-1} แสดงว่าจะมีส่วนประกอบที่เป็นกราฟไฟต์มากกว่าส่วนประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่กราฟไฟต์ ผลจากภาพถ่าย SEM จะมีความหนาแน่นของเส้นใยมาก เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติของเครื่อง EDX แล้ว ภาพที่ได้จะเห็นยอดกราฟของคาร์บอนสูงกว่า

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการง่ายและราคาไม่แพง โดยใช้วิธี hot-filament chemical vapor deposition (HF-CVD) ซึ่งทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) โดยใช้แอลกอฮอล์ (Ethanol) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ใช้ไฮโดรเจนเป็นก๊าซนำพา (carrier gas) และใช้ขดลวดทั้งเสตนเป็นลวดความร้อน โดยจากผลการทดลอง เราสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิของฐานรองอยู่ในช่วงระหว่าง 600 – 700 °C และอัตราการไหลของแอลกอฮอล์ที่อยู่ในช่วง 8 – 10 cc/นาที ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 30-50 นาที โดยปลุกบนฐานรองต่างๆ ดังนี้ ฐานรองทองแดงสปัดด้วยนิเกิล ฐานรองทองแดงชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิล ฐานรองซิลิคอนสปัดด้วยนิเกิล ฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิล และฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์สปัดด้วยนิเกิลแล้วกัดนิเกิลเป็นลวดลาย (โดยนำกระบวนการของโฟโต้ลิโธกราฟีมาใช้ในการทำลวดลายบนแผ่นฐานรองที่เป็นซิลิคอนไดออกไซด์)

จากการทดลองที่ได้จาก Raman spectroscopy แล้วผลที่เกิดขึ้นคือได้กราฟที่มียอดคลื่น Raman spectrum ที่มี 2 ยอดคู่กัน โดยยอดคลื่นทั้งสองจะอยู่ประมาณที่ 1580 cm^{-1} กับ 1320 cm^{-1} โดยยอดคลื่นที่ 1580 cm^{-1} คือ G-band (แสดงถึงส่วนประกอบที่เป็นกราฟไฟต์) และยอดคลื่นที่ 1320 cm^{-1} คือ D-band (แสดงถึงส่วนประกอบอื่นๆที่ไม่ใช่กราฟไฟต์) ซึ่งฐานรองทั้ง 5 ฐานรองให้กราฟที่มียอดคลื่นของ G-band สูงกว่า ยอดคลื่นของ D-band จึงสรุปได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีส่วนประกอบของ กราฟไฟต์ มากกว่าส่วนประกอบของธาตุอื่นๆ (คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีสิ่งเจือปนอยู่น้อย)

เมื่อนำไปดูลักษณะพื้นผิวของผลึกด้วยเทคนิค SEM แล้ว ผลปรากฏว่าเกิดเส้นใยของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีความหนาแน่นมาก ไม่ว่าจะเป็นฐานรองชนิดใดก็ตาม ทั้งนี้เป็นเพราะเราได้ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่เหมาะสมกับฐานรองต่างๆ ซึ่งเราได้นำภาพถ่าย SEM ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่เหมาะสมมาแสดงให้ดูเท่านั้น ส่วนที่เป็น 3 มิติ นั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเกิดเฉพาะส่วนบนของนิเกิลและรอบๆเท่านั้นแต่มันจะไม่เกิดช่องที่ลึกเข้าไปอาจเป็นเพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้เกิดข้างบนก่อนแล้วทำให้ห่อหุ้มของคาร์บอนที่เกิดจากการระเหยของแอลกอฮอล์ไม่สามารถผ่านเข้าไปในช่องได้จึงทำให้ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในช่องได้

เมื่อนำฐานรองชนิดต่างๆที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์มาตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX (Energy Dispersion X-Ray) เพื่อยืนยันว่าฐานรองที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์มีธาตุคาร์บอนมากน้อยแค่ไหน ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิเกิลเนื่องจากว่าก่อนการสังเคราะห์ เราได้สปีดด้วยนิเกิล พอสังเคราะห์เสร็จเราจะได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็คืออะตอมของคาร์บอนที่เรียงตัวกันแล้วมีวนตัวเป็นนาโนทิวบ์นั่นเอง แต่ธาตุของคาร์บอนจะมีปริมาณที่มากกว่าธาตุนิเกิลแสดงว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้มีความหนาแน่นในปริมาณที่มาก

ผลที่ได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป และเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตฟิล์มนี้เป็นการใช้ศักยภาพ วัสดุ และอุปกรณ์ที่มีภายในประเทศทั้งหมด หากมีการศึกษาและพัฒนาต่อไปจะสามารถก่อให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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, Science 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 ศุกเดช. รัฐพงษ์ นาคาไชย (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง), การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EE-CON 28), 20-21 ตุลาคม, 2548, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 carbide | 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตาราง 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 ง-1 Raman spectroscope



รูปที่ ง-2 SEM (Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-3 EDX (Energy Dispersion X-Ray)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้