

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง
การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบมีฉนวน
Fabrication of Patterned Carbon nanotubes



โดย

นาย สุภสิทธิ์ แก้วศุภมั่ง รหัส 47015224

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72748
วัน,เดือน,ปี..2..2..ค.ย..2550

b..... 11272202
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตร ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสังเคราะห์การบอณาโนทิวป์แบบมีลำดับ

ผู้จัดทำ

นาย สุภสิทธิ์ มั่งมั่งผ่อง รหัส 47015224

(ผศ. ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์แบบมีผลละลาย

นาย ศุภสิทธิ์ แก้วผุดผ่อง รหัส 47015224
ผศ.ดร.สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีเทอร์มอลซีวีดีจากแอลกอฮอล์ (เอทานอล) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน โดยใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเตรียมโดยใช้วิธีการ 2 แบบคือ 1.) ใช้เหล็ก(ไม่บริสุทธิ์)ซึ่งเตรียมโดยวิธีการสปีดเตอร์ 2.) ใช้นิกเกิลซึ่งเตรียมโดยวิธีการชุบไฟฟ้า (NiSO_4) ผลปรากฏว่าการใช้เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้วิธีการสปีดเตอร์นั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากการทดลองไม่ปรากฏในการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แต่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีรามาน ทำให้ไม่สามารถยืนยันการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ ส่วนการใช้นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ สเปกโตรสโกปีรามาน จากการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการชุบ Ni พบว่าความหนาแน่นกระแสที่เหมาะสมคือ 150 mA/cm^2 ซึ่งจะเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ดี จากการทดลองยังพบว่าคาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดที่บริเวณที่มีผลละลายนิกเกิลเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fabrication of Patterned Carbon nanotubes

Mr. Suppasit Kaveputpong ID.47015224

Assis.Prof.Dr.Sutichai Chaisitsak Advisor

Educational Year 2006

ABSTRACT

We present the chemical vapor deposition (CVD) synthesis method carbon nanotubes (CNTs) from alcohol (Ethanol). Two kinds of metallic catalysts were used; 1) sputtered Fe (low purity) and 2) electrochemical plated Ni. Using the sputtered Fe catalysts, the existence of CNTs could be observed from Raman spectrum data but not be observed from Scanning Electron Microscopes (SEM) image. Therefore, the formation of CNTs using for catalysts could not be confirmed. However, for the electrochemical – plated Ni catalysts, the formation of CNTs was clearly observed from both Raman and SEM results.

Fine CNTs could be obtained for the Ni films deposited under the optimal current density of 150 mA/cm^2 . Moreover, the results also contained that CNTs could be only formed on the presence of Ni catalysts.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ได้ต้องขอขอบคุณความกรุณา ความเอาใจใส่ ของ ผศ.ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ เป็นอย่างมากที่ทำให้คำปรึกษา ความรู้ และ ความอนุเคราะห์เครื่องมือในห้องวิจัย วัสดุและอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์(Nano Electronic Materials and Devices: NEMD Lab)

ขอบคุณพี่ปุก, พี่บอย, พี่เอช และ พี่ชาติไม่ได้เลยคือ พี่โจ๊ก รวมถึงทุก ๆ คนในห้องแล็บนาโนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีส่วนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้และให้สิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งคือคอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจ รวมไปถึงคุณอ้อ จากเวสเทิร์นดิจिटอลสำหรับเครื่องรามาานสเปกโตรสโคปี

และที่ขาดไม่ได้คือคุณพ่อสายัณห์ คุณแม่อุไรวรรณ พี่ปู พี่เหม่ม สำหรับเงินสนับสนุนการศึกษาและกำลังใจที่มีให้ต่อลูกและน้องคนนี้อย่างตลอดเวลาไม่มีวันหมด รวมไปถึงคุณนิรมลที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาดี ๆ ในยามที่มีเรื่องให้คิดและประสบปัญหาต่าง ๆ มากมายโดยไม่เคยบ่นและทำให้ผิดหวังเลย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 พื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวป์และกระบวนการในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ให้มี	
ผลตามที่ต้องการ	4
2.1 ทฤษฎีของคาร์บอนนาโนทิวป์และหลักการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์.....	4
2.1.1 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	4
2.1.2 คาร์บอนนาโนทิวป์และรูปแบบต่างๆ ของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	6
2.1.2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว	
หรือ (Single-walled nanotubes: SWNTs).....	6
2.1.2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น	
หรือ (Multi-walled nanotubes MWNTs).....	8
2.1.3 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	8
2.1.3.1 คุณสมบัติทางกล.....	8
2.1.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	9
2.1.3.3 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น...10	
2.1.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	12
2.1.4.1 Base Growth.....	12
2.1.4.2 Tip Growth.....	12
2.1.5 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์.....	13
2.1.5.1 วิธี Arc discharge.....	13
2.1.5.2 วิธี Laser ablation.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.4 อัตราส่วน I(G)/I(D).....	40
3.5 การวิเคราะห์ด้วย AFM (Atomic Force Microscopy).....	41
3.5.1 หลักการทำงาน.....	41
บทที่ 4 กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปีดเตอร์และการชุบไฟฟ้า.....	43
4.1 การเตรียมฐานรองชนิดคอน โดยวิธีการสปีดเตอร์จริง.....	43
4.2 การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	46
4.2.1 การทดลอง.....	46
4.2.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	46
4.2.1.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	47
4.2.2 กระบวนการ Electroplate.....	48
4.3 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์.....	48
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	51
5.1 ผลของเงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่มีต่ออนุภาคเหล็ก.....	51
5.2 ผลของเงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่มีต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์.....	53
5.3 ผลของเงื่อนไขการชุบไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์.....	61
5.4 ผลของการทำลวดลายจากคาร์บอนนาโนทิวป์โดยการชุบไฟฟ้า.....	67
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	70
กิตติกรรมประกาศ.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน	5
รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่นกราฟีน	5
รูปที่ 2.3 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)	6
รูปที่ 2.4 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราฟีนเป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์	7
รูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการม้วนแต่ละแบบ (Armchair, Zigzag, Chiral)	7
รูปที่ 2.6 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs)	8
รูปที่ 2.7 ภาพการทดสอบความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์	9
รูปที่ 2.8 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์	10
รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	13
รูปที่ 2.10 วิธี Arc discharge	14
รูปที่ 2.11 วิธี Laser ablation	15
รูปที่ 2.12 ระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition	17
รูปที่ 2.13 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD	18
รูปที่ 2.14 ระบบของวิธี Vapor phase growth	19
รูปที่ 2.15 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process	20
รูปที่ 2.16 แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition	20
รูปที่ 2.17 ลักษณะ Single-molecule Transistor	24
รูปที่ 2.18 นาโน Probe ที่ได้จากรูปร่างคาร์บอนนาโนทิวป์	25
รูปที่ 2.19 นาโน คีม (Nano Tweezer)	26
รูปที่ 2.20 ระบบเครื่องมือสปีดเตอร์ริง	28
รูปที่ 2.21 Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System	29
รูปที่ 2.22 ระบบการสปีดเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด	30
รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs	32
รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEMs	33
รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของ TEMs	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 3.4 ภาพจาก TEM แสดงรูปร่างของ MWNTs	35
รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของ SEMs	36
รูปที่ 3.6 ภาพ SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้	37
รูปที่ 3.7 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ Anti-Stokes scattering	38
รูปที่ 3.8 กราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ	39
รูปที่ 3.9 แผนภาพวงจรการทำงานของ AFM	41
รูปที่ 3.10 คานขึ้นและเข็มที่ปลายคาน	42
รูปที่ 3.11 การเบี่ยงเบนของปลายคานทำให้แสงเลเซอร์ที่สะท้อนไปยังตัวรับแสงมีการเบี่ยงเบน จึงสามารถวัดขนาดหรือระยะได้	42
รูปที่ 4.1 แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสปีดเตอร์	43
รูปที่ 4.2 Panel of RF Generator	45
รูปที่ 4.3 Panel of Pump Switch, Ionizing Gauge and Heater	45
รูปที่ 4.4 แสดงหลักการชูปไฟฟ้า	46
รูปที่ 4.5 แสดงการทดลองชูปไฟฟ้า	48
รูปที่ 4.6 ระบบ CVD แบบความร้อน	49
รูปที่ 4.7 เครื่องมือทดลองของระบบ CVD แบบความร้อน	49
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงขั้นตอนการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์	50
รูปที่ 5.1 ภาพจาก SEM แสดงพื้นผิวซิลิกอนโดยเวลาในการสปีดเตอร์ต่างกัน (ก) 5 นาที (ข) 10 นาที (ค) 15 นาที	52
รูปที่ 5.2 ภาพจาก SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ใช้เวลา 5 นาทีในการสปีดเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 600°C (ข) 650°C (ค) 700°C (ง) 800 °C (จ) 900°C	55
รูปที่ 5.3 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆที่ความดันช่วง 5 mbar โดยเงื่อนไขในการสปีดเตอร์คือ 5 นาทีในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM	56
รูปที่ 5.4 ภาพจาก SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ใช้เวลา 10 นาทีในการสปีดเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 600°C (ข) 650°C (ค) 700°C (ง) 800 °C (จ) 900°C	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 5.5 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆที่ความดันช่วง 5 mbar โดยเงื่อนไขในการสปีดเตอร์คือ 10 นาทีในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM	58
รูปที่ 5.6 ภาพจาก SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ใช้เวลา 15 นาทีในการสปีดเตอร์ที่อุณหภูมิ (ก) 600°C (ข) 650°C (ค) 700°C (ง) 800°C (จ) 900°C	59
รูปที่ 5.7 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆที่ความดันช่วง 5 mbar โดยเงื่อนไขในการสปีดเตอร์คือ 15 นาทีในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM	60
รูปที่ 5.8 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์โดยใช้กระแส 0.07 A. ที่อุณหภูมิ (ก) 700°C (ข) 800°C	62
รูปที่ 5.9 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์โดยใช้กระแส 0.1 A. ที่อุณหภูมิ (ก) 700°C (ข) 800°C	63
รูปที่ 5.10 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์โดยใช้กระแส 0.15 A. ที่อุณหภูมิ (ก) 700°C (ข) 800°C	64
รูปที่ 5.11 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์โดยใช้กระแส 1 A. ที่อุณหภูมิ (ก) 700°C (ข) 800°C	65
รูปที่ 5.12 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่กระแสต่างๆในอุณหภูมิ (ก) 700°C (ข) 800°C	66
รูปที่ 5.13 ภาพแสดงลายต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง	67
รูปที่ 5.14 ภาพแสดงส่วนที่เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ตามลายต้นแบบ	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบค่า Thermal Conductivity.....11
2.2	เปรียบเทียบค่า Young's Modulus..... 11
2.3	เปรียบเทียบค่า Energy Gap..... 11
3.1	แสดงยอดกราฟหลัก ๆ จากการวัดรูปแบบต่าง ๆ ของคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman40
4.1	เงื่อนไขการสปีดเตอร์ Si ในการทดลอง.....44
5.1	อุณหภูมิและตัวแปรอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง..... 53
5.2	ปริมาณกระแสและตัวแปรอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การพัฒนาทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา มีการค้นคว้าวิจัยธาตุในหมู่ที่ IV ตั้งแต่การค้นพบทรานซิสเตอร์ (transistor) ที่ใช้เยอรมันเนียม (Germanium) เป็นส่วนประกอบหลักจนมาถึงการใช้ซิลิคอน (Silicon) มาสร้างเป็นวงจรรวม (Very Large Scale Integration; VLSI) ทำให้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่เล็กลงต่อมาก็ได้มีการพัฒนาโดยการเปลี่ยนคาร์บอน ให้อยู่ในรูปของ แกรไฟต์ (Graphite), เพชร (Diamond), ฟูลเลอร์รีน (Fullerene) และ คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotubes ; CNTs) โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะนำสิ่งที่สังเคราะห์ได้เหล่านี้มาใช้งาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

หลังจากที่มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotubes ; CNTs) โดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) โดยใช้กล้อง High – Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM) ส่องไปพบบริเวณที่มีคาร์บอนนาโนทิวป์อยู่อย่างหนาแน่น การค้นพบของ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) เป็นจุดเริ่มต้น ที่ทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มมีการศึกษาถึงคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อที่จะนำ คาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้น โดยเริ่มแรกในการสังเคราะห์นั้นใช้วิธี Arc Discharge ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับการสังเคราะห์ฟูลเลอร์รีน (C_{60}, C_{70}) ต่อมาได้มีการใช้ วิธี Laser Ablation แต่ในปัจจุบันวิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมและมีความหลากหลายในการสังเคราะห์ ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อยและคุณภาพที่ได้ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี งานวิจัยด้านนี้ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากคุณสมบัติที่เด่นในหลายทาง กล่าวคือ คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีค่าความแข็งแรง และความยืดหยุ่นมากกว่าวัสดุใดๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีความสามารถในการนำกระแสได้ดี และเป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การม้วนตัว หรือที่เรียกว่า “Chirality” หลังจากการค้นพบ นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยทั่วโลกต่างทำการศึกษาวิธีการผลิต คุณสมบัติ ตลอดจนวิธีการประยุกต์ใช้อย่างมากมาย คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน ของนาโนเทคโนโลยี การประยุกต์ใช้งานนั้น จะเน้นไปทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ การกักเก็บพลังงาน ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงเซ็นเซอร์และโพรบ ซึ่งก็นับว่าเป็นความหวังของการพัฒนาอุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมี รวมทั้งการแพทย์ในอนาคตอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ของปริญญาโทนี้มีคือนำเสนอวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีเทอร์มอลซีวีดีจากแอลกอฮอล์ (เอทานอลและเมทานอล) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนและอนุภาคของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเตรียมโดยวิธีสปัตเตอร์ (Sputtering) และใช้เหล็กเกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเตรียมโดยการชุบไฟฟ้า โดยทำการศึกษาปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆว่าจะมีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างไร เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา ในการสังเคราะห์ ชนิดของแอลกอฮอล์ รวมถึงเงื่อนไขอื่นๆ ที่เป็นตัวแปรสำคัญต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เหมาะสมแล้วจะสร้าง คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีผลตามที่ต้องการด้วยวิธีการทำลวดลาย ต่อไป ซึ่งข้อมูลที่ได้ นั้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทางเช่น นำมาเป็นต้นแบบในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงพาณิชย์, นำมาทำเป็นตัวเซนเซอร์ก๊าซ รวมถึงการนำข้อมูลที่ได้นี้ ไปใช้ในงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องในห้องปฏิบัติการต่อไปได้

โดยรายละเอียดของจุดประสงค์ในแต่ละบทของปริญญาโทนี้มีสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 2 จะอธิบายเกี่ยวกับพื้นฐานคาร์บอน เช่น ชนิด คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ กลไกการเกิด การสังเคราะห์ และการประยุกต์ใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งในบทนี้จะอธิบายอย่างละเอียดเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อให้รู้จักและเข้าใจคุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงการอธิบายเกี่ยวกับหลักการพื้นฐานของการ สปัตเตอร์ และ กระบวนการการชุบไฟฟ้า ในส่วนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

บทที่ 3 ในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ เนื่องจากหลังจากที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นมาแล้ว ต้องนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ เพื่อหาว่าคุณสมบัติทางโครงสร้าง ขนาด และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นอย่างไร โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในปริญญาโทนี้มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกันคือ Scanning Electron Microscope (SEM) Transmission Electron Microscope (TEM) และ Raman spectroscopy ซึ่งเครื่องมือแต่ละชนิดที่นำมาทำการวิเคราะห์นั้นจะบอกคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เทคนิค SEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปของภาพสามมิติ และ ศึกษาภาพตัดของลวดลายที่ได้สร้างขึ้น สำหรับเทคนิค TEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปของภาพสองมิติซึ่งสามารถบอกขนาดระดับอะตอม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับเทคนิค Raman spectroscopy จะบอกพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัด โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้หาความบริสุทธิ์ของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้และยังสามารถบอกชนิดและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างคร่าวๆได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือสำหรับการทดสอบที่ใช้ในกระบวนการนี้คือเครื่องวัดความหนาของฟิล์ม เพื่อตรวจสอบว่าได้ความหนาตามที่ต้องการหรือไม่ เครื่องมือชนิดสุดท้ายที่ใช้ในการตรวจสอบที่จะกล่าวถึงนี้คือ AFM (Atomic Force Microscope) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สังเกตและจัดการเคลื่อนย้ายวัสดุขนาดนาโนเมตรได้

บทที่ 4 ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนของวิธีการทดลอง โดยจะบอกอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เช่น การเตรียมฐานรองรับแผ่นซิลิกอนโดยการสปีดเตอร์กระบวนการและขั้นตอนในการชุบไฟฟ้าและวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้ได้ตามรูปแบบที่ต้องการ

บทที่ 5 จะอธิบายถึงผลการทดลองโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ซึ่งในการสังเคราะห์จะทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆเพื่อศึกษาว่ามีผลต่อการเกิด ขนาด และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างไร โดยหลังจากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงผลการทดลองส่วนของการทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ได้ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ โดยตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยนได้แก่ อุณหภูมิ และ ชนิดของแอลกอฮอล์

บทที่ 6 เป็นการสรุป และวิจารณ์ผลการทดลองที่ทดลองมาได้ว่าเป็นอย่างไร ที่สถานะใดเป็นสถานะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ลักษณะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้รูปแบบที่กำหนด รวมทั้งกล่าวถึงแนวทางในการพัฒนาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อให้มีคุณภาพมากขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

บทที่ 2

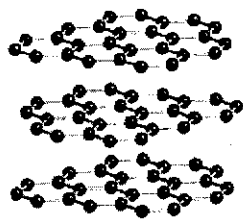
พื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวป์และกระบวนการในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ให้มี ลักษณะตามที่ต้องการ

2.1 ทฤษฎีของคาร์บอนนาโนทิวป์และหลักการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

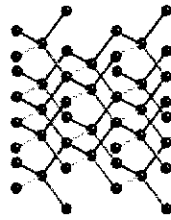
คาร์บอนอยู่ในหมู่ IV ของตารางธาตุ ซึ่งคาร์บอนสามารถอยู่ได้หลายรูปแบบ เช่น แกรไฟต์ เพชร บัคกิ้งบอล และคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในสาขา นาโนเทคโนโลยี เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างจากวัสดุอื่นปัจจุบันจึงมีการศึกษาคาร์บอนนาโนทิวป์กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะเทคนิคการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นจำเป็นต้องมีอะตอมคาร์บอนในระบบเพื่อที่จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งสารที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ก็คือ รูปต่าง ๆ ของคาร์บอน โดยสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างภายใน ดังนั้นหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.1.1 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์

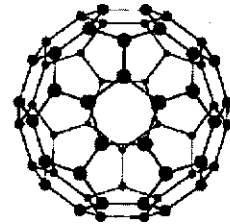
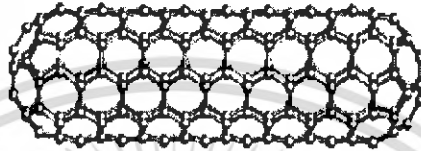
คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอน เช่นเดียวกับ เพชร (Diamond) กราไฟท์ (Graphite) เถ้าถ่าน และ Fullerene หรือ C_{60} (รูปที่ 2.1) แต่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัว เกิดเป็นโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรมีความแข็งแรงและคงทนมาก ขณะที่กราฟิที่มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายกับรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่น ในระนาบเดียวกัน เรียกว่า แผ่นกราไฟท์และมีพันธะเชื่อมต่อกันระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นกราฟิท์นั้นแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนเถ้าถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายกราฟิท์ แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า “คาร์บอนอสัณฐาน หรือ Amorphous carbon” และ Fullerene หรือ C_{60} ซึ่งมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล ซึ่งต่างจากคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวงที่เกิดจากการม้วนของแผ่นกราไฟท์



Graphite



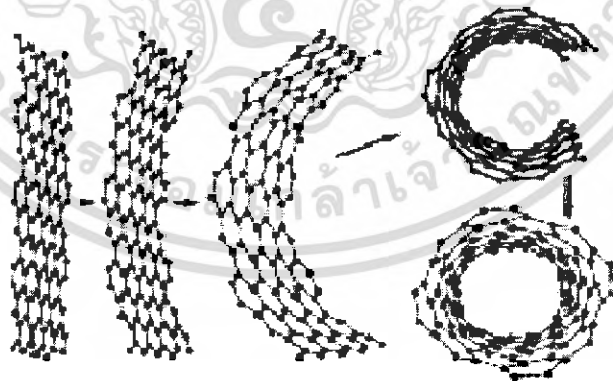
Diamond

Fullerene หรือ C₆₀

Carbon nanotubes

รูปที่ 2.1 วัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนที่แตกต่างกัน

ลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ กล่าวอย่างง่ายก็คือ แผ่นกราฟีนม้วนปิดเป็นท่อทรงกระบอก (รูปที่ 2.2) ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์ นั้นเป็น โมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก สร้างมาจากคาร์บอน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความตั้งแต่ระดับนาโนเมตร จนถึงระดับเซนติเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ จึงเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายล้านเท่า



รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่นกราฟีน

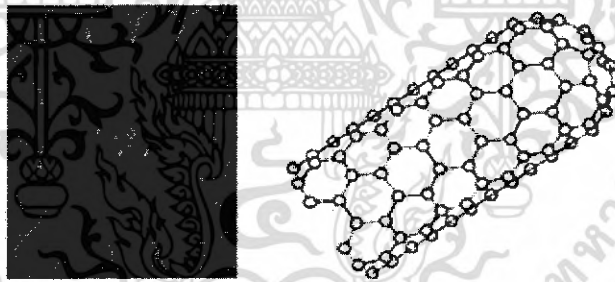
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คาร์บอนนาโนทิวป์และรูปแบบต่าง ๆ ของคาร์บอนนาโนทิวป์

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

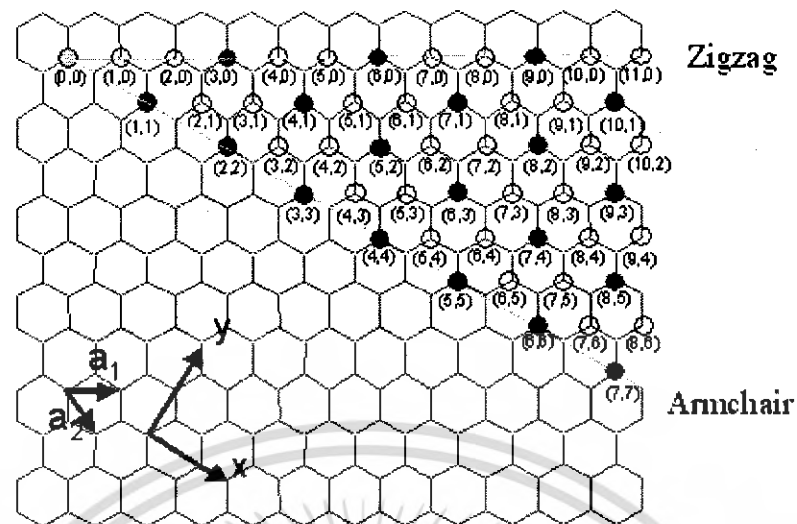
2.1.2.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว หรือ (Single-walled nanotubes: SWNTs)

จะมีลักษณะ โครงสร้างที่คล้ายกับแผ่นกราฟไฟท์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์จึงมีผนังของอะตอมคาร์บอน ที่จัดเรียงพันธะ โคเวเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม และอาจมีบริเวณที่ปลายของท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของ Fullerene ดังรูปที่ 2.3



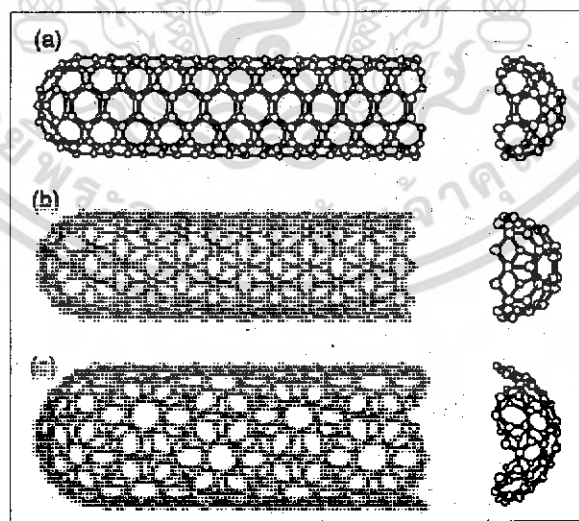
รูปที่ 2.3 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว (SWNTs)

สวดตามผนังของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังชั้นเดียวนั้น อาจมีลักษณะ โครงสร้างที่แตกต่างกันอาจแบ่งออกได้ 3 แบบ ตามการม้วนแผ่นกราฟไฟท์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน คือ โครงสร้างท่อแบบ Armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟท์ตามแนวสมมาตรแกนตั้ง โครงสร้างท่อแบบ Zigzag ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟท์ตามแนวสมมาตรแกนนอน และ โครงสร้างท่อแบบ Chiral ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟท์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพอธิบายการม้วนแผ่นกราฟไฟท์เป็นท่อคาร์บอนนาโนทิวป์

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

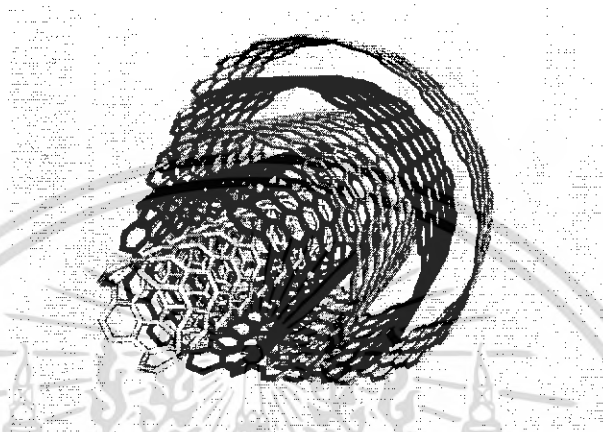


รูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดจากการม้วนแต่ละแบบ (Armchair, Zigzag, Chiral)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น หรือ (Multi-walled nanotubes : MWNTs)

คือ การซ้อนทับกันหลาย ๆ ชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยที่แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 0.34 nm โดยระยะห่างระหว่างของชั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ขึ้นจะเป็นการเพิ่มชั้นของ MWNTs



รูปที่ 2.6 ท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น (MWNTs)

2.1.3 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์

คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น มีคุณสมบัติหลายประการด้วยกันโดยสามารถยกตัวอย่างคุณสมบัติที่เด่นๆ ได้ดังต่อไปนี้ เช่น

2.1.3.1 คุณสมบัติทางกล

- ความแข็งแรง ซึ่งก็เป็นที่รู้กันดีว่า โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์แข็งแรงมาก มากกว่าเพชรและกราไฟท์ เพชรนั้นมีความแข็งแรงมากด้วยโครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราไฟท์นั้นคาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกัน และอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราไฟท์ (กราเฟน) มีความแข็งแรงมาก(มากกว่าเพชร) แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ 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) เพื่อโดยตรงกลางแท่งนาโนที่วางอยู่บน Nanopores เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่น ได้มีการใช้ AFM จับคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) (รูปที่ 2.7) ความแข็งแรง ของคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าอยู่ระหว่าง 11 ถึง 63 Gpa ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2 Gpa นอกจากนี้ SWNTs สามารถยืดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน

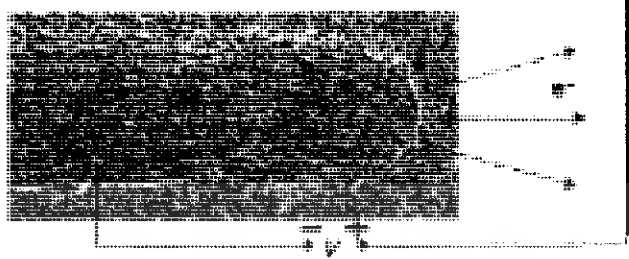


รูปที่ 2.7 ภาพการทดสอบความยืดหยุ่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) AFM microscope ของ MWNT วางผ่านรูเพื่อวัดค่า Young's modulus (ข) และ (ค) SEM ของ MWNT ที่อยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้านของ AFM เพื่อวัดค่า tensile strength

2.1.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวป์

- ความสามารถด้านการนำไฟฟ้า คาร์บอนนาโนทิวป์มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง หนึ่งมัดของคาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm² ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm² สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของคาร์บอนนาโนทิวป์ คือ สามารถในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์ในสภาวะสุญญากาศได้ (รูปที่ 2.8) เมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์วางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ต่ำกว่า เช่นจะกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1

mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว Molybdenum



รูปที่ 2.8 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของคาร์บอนนาโนทิวป์

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

2.1.3.3 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น

คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการด้วยกันนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นจะเห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าดังนี้

1. ค่านำความร้อนของคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่า 3,000 – 6,000 W/mK ซึ่งมีค่ามากกว่าวัสดุชนิดอื่นจึงสามารถที่จะนำมาทำเป็นอุปกรณ์ช่วยระบายความร้อนได้ดี
2. ค่าความยืดหยุ่นสูงเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ถึงจะโค้งงอก็สามารถคืนสู่สภาพได้โดยไม่เสียหาย
3. คาร์บอนนาโนทิวป์มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันจะมีค่า Energygap ที่ต่างกัน โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะแปรผกผันกับค่า จากตารางจะมีค่าอยู่ 340 meV ถึง 1.2 eV ซึ่งสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์ ไปใช้งานในลักษณะที่เหมาะสมกว่าวัสดุชนิดอื่น
4. มี Tensile strength ที่สูงประมาณ 50 เท่าของเหล็กแต่มีน้ำหนักเบามากกว่าเหล็กมาก

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่า Thermal conductivity

Materials	Thermal conductivity (W/mk)
Carbon nanotubes	3000-6000
Diamond	2000
Silicon	150
Copper	380
Iron	82
Aluminum	238

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่า Young's Modulus

Materials	Value (N/m) ²
Carbon nanotubes	1×10^{12}
Diamond	1000×10^9
Silicon	107×10^9
Copper	340×10^9
Tungsten	124×10^9
Steel	200×10^9

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบค่า Energygap

Materials	Value (N/m) ²
Carbon nanotubes	340 meV – 1.2 eV
Diamond	5.45 eV
Silicon	1.2 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

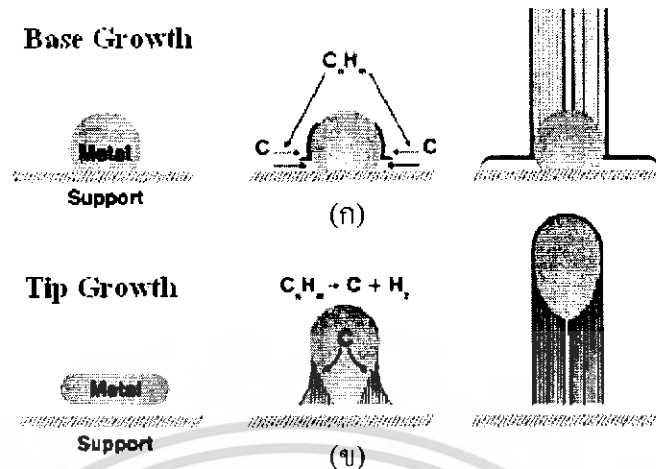
กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เป็นที่แน่ชัด และยังคงเป็นหัวข้อให้ถกเถียงกันในปัจจุบัน ซึ่งกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อาจจะถูกเปิดเผยขึ้นในระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดอาจแบ่งได้ 2 ลักษณะตามลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์คือ กลไกการเกิดแบบ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

2.1.4.1 Base Growth

จะเป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ คือในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านบน ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาลอยขึ้นด้านบน ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.9 (ก)

2.1.4.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนทำปฏิกิริยากับ โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ปลายท่อคาร์บอนนาโนทิวป์ คือที่อุณหภูมิสูงพอเหมาะที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวปฏิกิริยา และเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงกว่าด้านล่างทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาดกกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง ก่อเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ ดังรูปที่ 2.9 (ข)



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) เกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Base Growth (ข) เกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Tip Growth

2.1.5 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

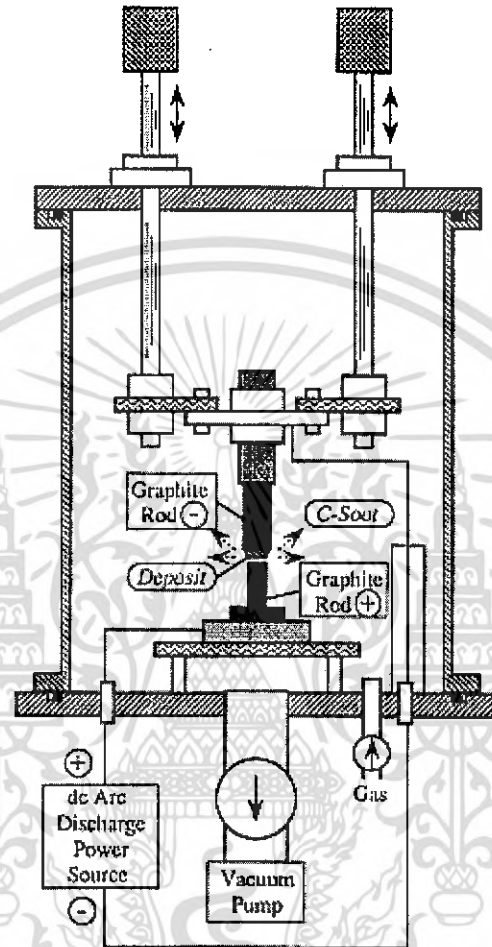
คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ต้องการ การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้น สามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีหลักๆ คือ 1.วิธี Arc discharge 2.วิธี Laser ablation 3.วิธี Chemical vapor deposition (CVD) [2,3] แต่ละวิธีก็จะวิธีการและเทคนิค รวมถึงข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป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

2.1.5.1 วิธี Arc discharge

เทคนิคนี้เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อคาร์บอนนาโน ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้ในการสังเคราะห์ Fullerene โดยใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์ และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ที่ระหว่างขั้วคาร์บอน และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 2000 °C ถึง 3000 °C ทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน จากนั้นคาร์บอนที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวใหม่เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ขั้วแคโทด คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้นี้ จะเป็นท่อชนิดผนังหลายชั้น MWNTs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในประมาณ 1-3 nm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกประมาณ 10 nm แต่ถ้าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6-1.4 nm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย และค่าใช้จ่ายถูก แต่อย่างไรก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเคราะห์ จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก ระบบของวิธี Arc discharge สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



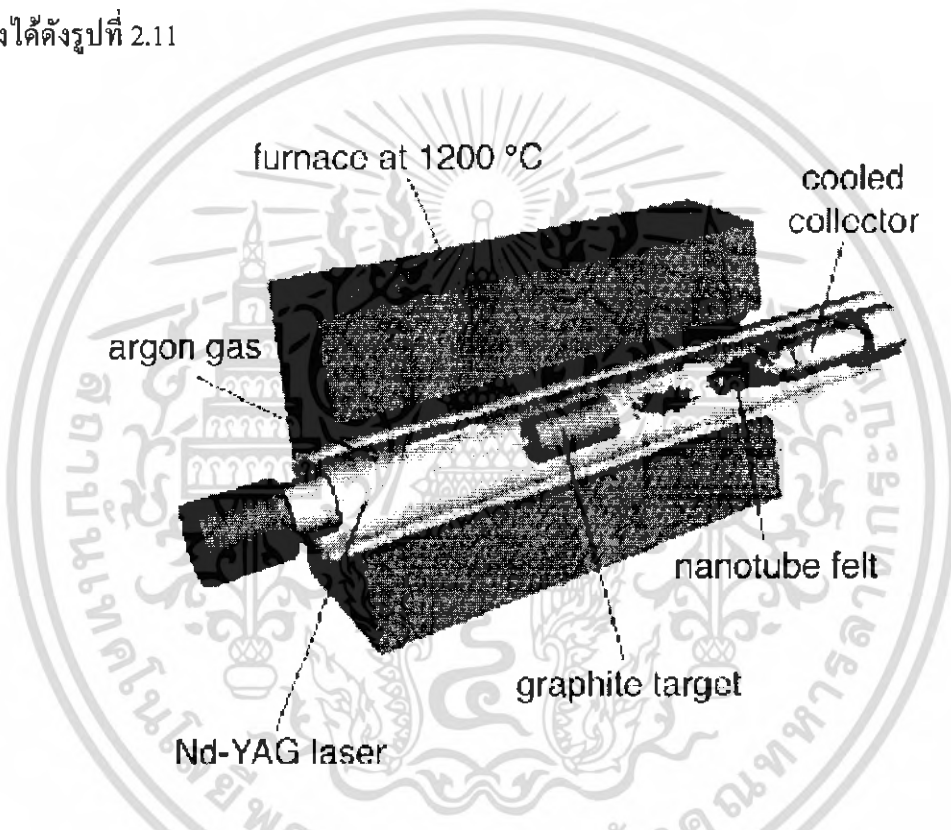
รูปที่ 2.10 วิธี Arc discharge

2.1.5.2 วิธี Laser ablation

เทคนิคนี้คิดค้นขึ้น โดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ (Smalley) โดยใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงยิงกระทบแท่งคาร์บอนผสมโลหะ ในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 ถึง 1500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนและอะตอมคาร์บอนที่ร้อนขึ้น และใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือไนโตรเจน (N_2) ไปกวาดเอาที่คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่เกิดขึ้นออกจากเตาเผาแล้วนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บที่ทำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทองแดงด้านนอกเตาเผา โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่องส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70เปอร์เซ็นต์ และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว SWNTs เท่านั้น ระบบของวิธี Laser ablation สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วิธี Laser ablation

ที่กล่าวมาทั้งสองวิธี คือวิธี Laser ablation และวิธี Arc discharge นั้นเป็นกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ใช้อุณหภูมิสูง โดยใช้อิทธิพลของแผ่นแกรไฟต์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 °C เพื่อให้เกิดการแตกตัวของอะตอมคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยา ความหนาแน่นของอะตอมทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญของการสร้างพันธะของคาร์บอนจนได้เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

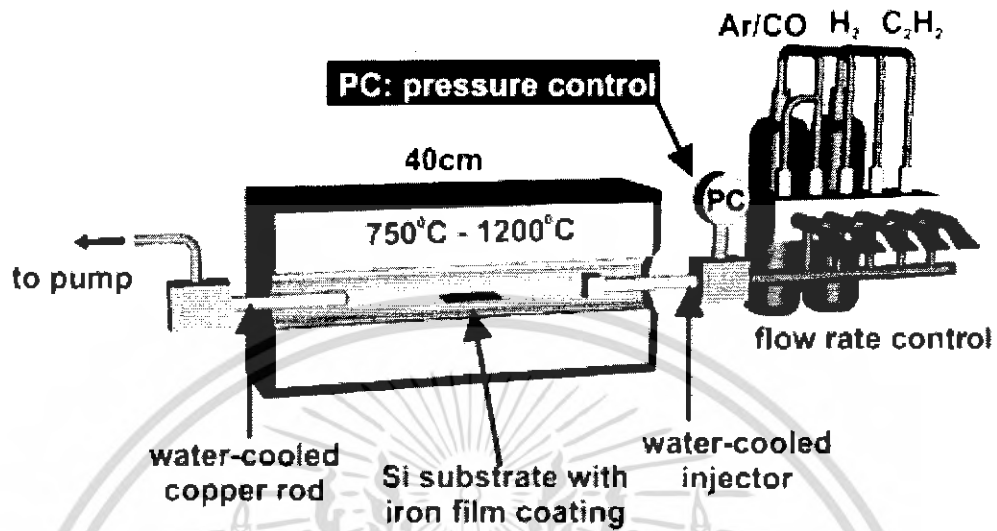
2.1.5.3 วิธี Chemical vapor deposition (CVD)

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

2.1.5.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition

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

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.12 ระบบของวิธี Thermal chemical vapor deposition

โดยข้อดีของวิธีนี้คือ

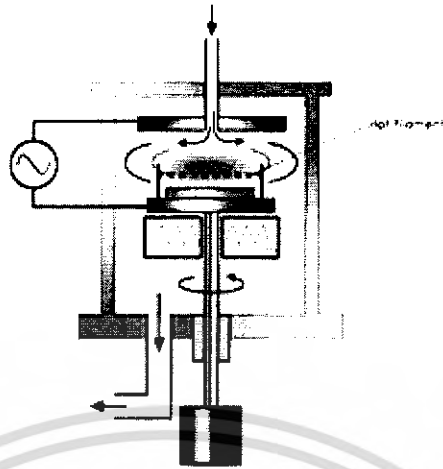
1. สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และ ทิศทางของคาร์บอนนาโนทิวป์ ได้
2. สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ให้มีสัณฐาน (patterned CNTs) บนฐานรองตามที่ต้องการได้
3. สังเคราะห์ในเชิงพาณิชย์ได้

2.1.5.3.2 วิธี Plasma enhanced chemical vapor deposition

วิธีนี้จะเป็นการกำเนิดประจุไอออนภายใน Chamber หรือเตาปฏิริยา โดยใช้แรงดันความถี่สูงเข้ามาทำให้ไอออนของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัวเกิดเป็นพลาสมาขึ้นและเข้าไปทำปฏิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิริยา รูปที่ 2.13 แสดงระบบของวิธี Plasma enhanced CVD

72748

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

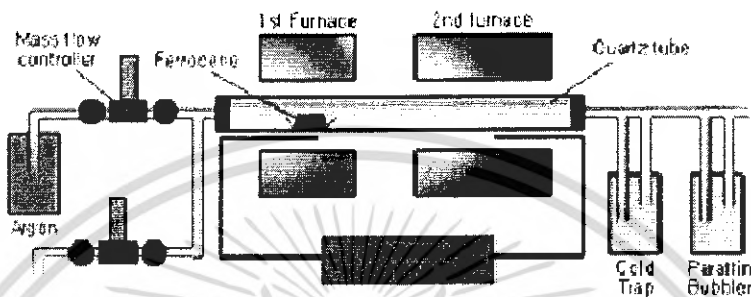


รูปที่ 2.13 ระบบของวิธี Plasma enhanced CVD

จากรูปที่ 2.13 แผ่นเพลทจะต่อกับขั้วไฟฟ้า ที่วางขนานกับฐานรอง และฐานรองจะต่ออยู่กับกราวด์ของขั้วไฟฟ้า เมื่อก๊าซเข้ามาตามท่อจากแผ่นเพลทตรงกันข้ามด้านบนกับฐานรอง ถูกแรงดันที่มีความถี่สูง เกิดเป็นพลาสมา ทำให้ไอของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนแตกตัว และลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ที่เกิดขึ้นจะก่อตัวบนอนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนฐานรอง ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นโลหะจำพวก Fe, Ni, Co เคลือบบนชั้นซิลิกอนหรือชั้นไดออกไซด์ หรือบนแก้วซึ่งการสร้างขึ้นเคลือบสามารถทำได้ด้วยวิธี Evaporation หรือวิธี Sputtering โดยโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถยึดติดกับฐานรองได้หนาแน่นจะมีผลต่อ ขนาดของท่อ, อัตราการเจริญเติบโต, ความหนาของผนัง, รูปร่าง และโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยทั่วไปแล้ว Ni เหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการปลูก MWNTs โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ที่ 15 นาโนเมตร ประสิทธิภาพผลผลิตของการใช้ Ni เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 50 % และสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400 °C) ก๊าซที่นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO เป็นต้น การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถที่จะกำหนดทิศทางการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ท่อตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด MWNTs ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด SWNTs ได้ง่ายนัก (ในปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด SWNTs ได้ โดยใช้พลาสมาระบบ RF glow-discharge (13.56 MHz) โดยใช้ก๊าซผสมของ CH_4 กับ H_2) [5]

2.1.5.3.3 วิธี Vapor phase growth

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการใช้ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ นำมาทำเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาภายใน Chamber โดยไม่ใช้ฐานรอง รูปที่ 2.14 แสดงระบบของวิธี Vapor phase growth



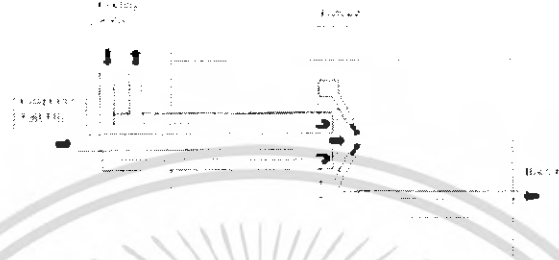
รูปที่ 2.14 ระบบของวิธี Vapor phase growth

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

2.1.5.3.4 วิธี High pressure CO disproportionate process

วิธีนี้จะเป็นการสังเคราะห์ SWNTs โดยการปล่อยก๊าซ CO ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เข้ามาอย่างต่อเนื่องให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene, $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้น คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาดเล็กและมีปริมาณมาก โดยขนาดของท่ออยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีขนาดของท่อเล็กที่สุด โดยขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNTs อยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร ประสิทธิภาพ

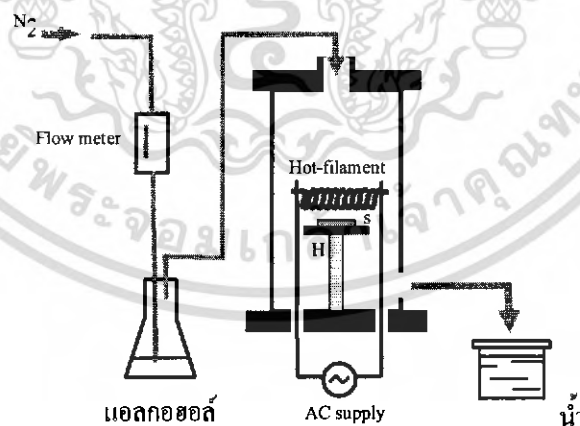
ผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 70 % แต่ยังคงยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ และเป็นอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซอันตราย รูปที่ 2.15 แสดงระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process



รูปที่ 2.15 ระบบของวิธี High pressure CO disproportionate process

2.1.5.3.5 วิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

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



รูปที่ 2.16 แสดงระบบของวิธี Hot filament enhance Chemical vapor deposition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้คือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน (Filament) เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวดความร้อน ก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนจะถูกปล่อยเข้ามาในระบบ เจลความร้อนของขดลวดความร้อนจะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและลงมาทำปฏิกิริยากับโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ จะทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ได้แก่ ไอของ แอลกอฮอล์ หรือ มีเทน (CH_4) เป็นต้น ส่วนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้โลหะจำพวก เหล็ก (Fe) และ โคบอลต์ (Co) วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ไม่ยากและประหยัดค่าใช้จ่าย ส่วนคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ นั้น จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิของฐานรอง, ชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา, อัตราการไหลของก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 3 วิธีหลัก

วิธี	Arc Discharge	Laser Ablation	CVD
วิธีการสังเคราะห์	ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งกราไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิด hot-plasma ขึ้นคาร์บอนนาโนทิวป์จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัวโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ He)	ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่งคาร์บอนที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหยของคาร์บอน หลังจากนั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ จะก่อรูปขึ้น) โดยส่วนมากสังเคราะห์ใน บรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 °C)	เป็นการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน (โดยใช้ความร้อน หรือ Plasma เข้าช่วยมีโลหะเป็นตัวเร่งการ)สังเคราะห์ที่อุณหภูมิประมาณ 400 ~ 1200 °C)
ประสิทธิภาพของผลผลิต	30~90%	มากกว่า 70%	20~90%
SWCNT	- ขนาดเส้น - Ø: 0.6~1.4 nm	- ขนาดยาว (5~20 nm) - Ø: 1~2 nm	- ขนาดยาวมาก - Ø: 0.6~4 nm
MWCNT	- ขนาดเส้น - Ø: (ใน (1~3 nm (นอก (~10 nm	เนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MWNTs แต่สามารถสังเคราะห์ได้	- ยาวมาก) > 20 nm) - Ø: 10~200 nm
ข้อดี	- เป็นวิธีที่ง่ายแล ค่าใช้จ่ายถูก - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย	- ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่เป็น SWNTs	- สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้โดยไม่ต้องใช้ โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ด้วยความดันบรรยากาศห้อง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความบริสุทธิ์สูง - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ขนาดของ SWNTs ยาว - สามารถกำหนดทิศทางของการเกิดและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี - สามารถที่จะสังเคราะห์ในเชิงอุตสาหกรรมได้
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> - ความยาวของทิวป์สั้น และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นวิธีที่แพงเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวป์ที่ได้มี Defect อยู่บ้างแต่ไม่มาก

ตารางที่ 2.5 สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาทิวป์โดยวิธี CVD แบบต่างๆ

วิธี	Thermal CVD	Plasma enhanced CVD	Hot-filament enhanced CVD	Vapor phase growth	HiPco
วิธีการแยกก๊าซ	โดยความร้อน	โดย Plasma	โดย Filament ที่มีอุณหภูมิสูง	โดยความร้อน	โดยความร้อนและความดันสูง
โลหะตัวเร่ง	particle โลหะ	particle โลหะ	particle โลหะ	ใช้ก๊าซของโลหะ	ใช้ก๊าซของโลหะ
SWCNT	- ขนาดยาว - Ø: 0.6~4 nm	ขนาดสั้น	คล้ายกับ Thermal CVD	- ขนาดยาวมาก - Ø: 2 ~ 4 nm	- ขนาดยาว - Ø: ~ 1.1 nm
ข้อดี	- สังเคราะห์ได้ทั้ง SWCNTs และ MWCNTs - ทิวป์ที่ได้ยาว	- สังเคราะห์ได้ที่ อุณหภูมิต่ำมากๆ ได้ (< 400 °C) - กำหนดทิศทางของทิวป์ได้ง่าย	- เป็นวิธีที่ง่าย และ ค่าใช้จ่ายถูก	- สังเคราะห์ทิวป์ที่ ยาวมากๆ ได้ (> 20 mm)	- มีความบริสุทธิ์สูง (> 80%)
ข้อเสีย		- สังเคราะห์ SWCNTs ได้ไม่ ยาวมากนัก	- การเกิด CNTs ไม่เหมือนกันทั่ว แผ่น	- อันตราย เนื่องจาก ใช้ CO ซึ่งเป็นพิษ - ไม่สามารถควบคุมทิศทางของและ ตำแหน่งของทิวป์ได้ง่าย	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน

คาร์บอนขนาดนาโนทิวป์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธี CVD ที่ความดันต่ำมีความเหมาะสมหลายอย่างในการไปประยุกต์ใช้งาน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ในเชิงกลพบว่ามีค่า Tensile Strength มากกว่า 60 GPa มีความยืดหยุ่นสูงทนต่อความร้อนที่ในสูญญากาศประมาณ 2800 °C และในอากาศที่ประมาณ 750 °C ดังนั้นจึงไปเพิ่มความแข็งแรงให้กับ โลหะเซรามิก

นอกจากนั้นยังมีค่าสภาพนำความร้อนสูงมาก (3,000 – 6,000 W/m.k) มากกว่าเพชรและแกรไฟต์ถึง 2,000 W/m.k ซึ่งทำให้มีการนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงหรือสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีสมบัติที่ดีหลายประการได้มีการประยุกต์ใช้งานหลายด้านด้วยกัน ทั้งด้านเชิงกลและเชิงไฟฟ้า ดังตัวอย่างของการใช้งานที่จะกล่าวดังต่อไปนี้และเป็นแค่ตัวอย่างบางส่วนเท่านั้น

2.1.6.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต เพราะด้วยคุณสมบัติที่มันมีน้ำหนักเบา ราคาถูก และมี ค่าความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังสามารถหด โค้งงอได้เหมือนสปริง เมื่อออกแรงกดแล้วคืนรูปสู่สภาพ เดิมได้ ทำให้ได้วัสดุคอมโพสิต ที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ จะแข็งแรงกว่าพวกไฟเบอร์ทั้งหลายเท่าที่เคยมีมา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่นเป็นส่วนประกอบใน รถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้ทำ เสื้อเกราะกันกระสุนเป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถเอาไปใช้ ทำเป็นหลอดทดลองขนาดนาโนเพื่อเก็บของเหลว บางอย่าง หรือทำเป็นเส้นใยคาร์บอนนาโน (Nan ceramic fibers) ได้

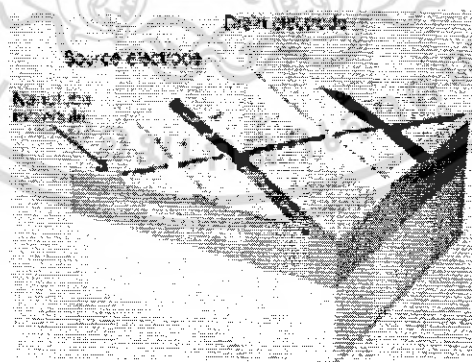
NASA สามารถสังเคราะห์คอมโพสิตของ SWNT-polyimide ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแรง การทนอุณหภูมิ และการนำไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ กล่าวอย่างง่ายคือ คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบา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

2.1.6.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ (ค่า Respect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ มีเสถียรภาพที่ดี และทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนได้ โดยใช้แรงขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายอิเล็กตรอนได้และนำไปประยุกต์ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น X - ray และแหล่งกำเนิด microwave ขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่น การประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอคอมพิวเตอร์ โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวป์แทนโลหะในส่วนที่เป็น ขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอน

2.1.6.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Device)

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีการนำไฟฟ้าเป็นแบบ ballistic กล่าวคือ ไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอน ตลอดความยาวของทิวป์ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีในวงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ยังมีคุณสมบัติเป็นเซมิคอนดักเตอร์ที่ดีอีกด้วย เมื่อไม่นานมานี้ กลุ่ม IBM และกลุ่ม Prof. Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์และ Logic Gate ที่ทำมาจาก SWCNTs สำเร็จเป็นครั้งแรกของโลกคาร์บอนนาโนทิวป์ FET (รูปที่ 2.17) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพดีกว่า MOSFET ที่ใช้งานกันในปัจจุบัน อุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ สามารถที่จะนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ได้ในอนาคต ซึ่งจะช่วยลดขนาดของอุปกรณ์และปริมาณการกินกระแสไฟลง

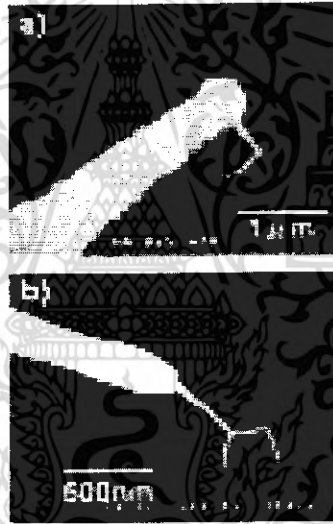


รูปที่ 2.17 ลักษณะ Single-molecule Transistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

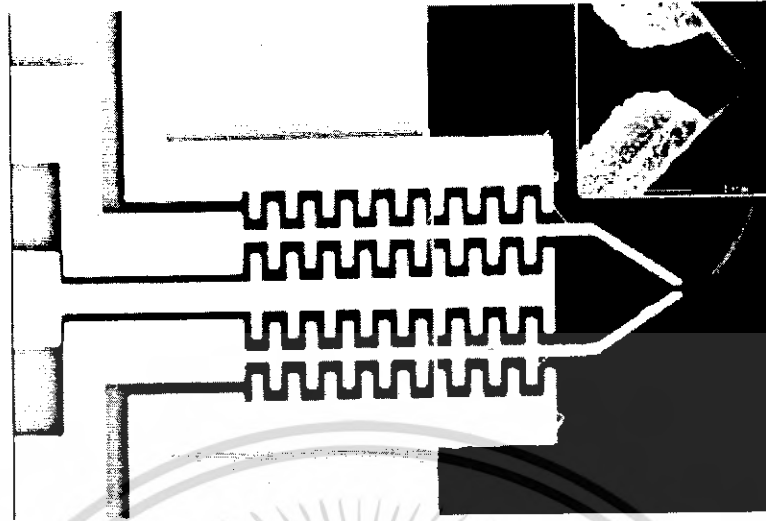
2.1.6.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซ็นเซอร์

เนื่องจากรับอนนาโนทิวป์มีขนาดระดับนาโนเมตรและมีความยืดหยุ่นสูงจึง สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็น Probe ของเครื่องมือวิเคราะห์ Scanning Probe Microscope (SPM) (รูปที่ 2.18) เช่น Scanning Tunneling Microscopy (STM) และ Atomic Force Microscopy (AFM) สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นนาโนคีบ (Nano Tweezer) (รูปที่ 2.19) นอกจากจากรับอนนาโน Probe จะสามารถช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารระดับอะตอมได้แล้ว SPM ยังสามารถถูกดัดแปลงโดยการนำ Function Group ต่าง ๆ เช่น $-COOH$ มายึดติดที่ปลายคาร์บอนนาโนทิวป์ ในส่วนของการประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ (Sensor) เซ็นเซอร์อุณหภูมิสามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ $50 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปัจจุบันทางวิชาการแสดงให้เห็นว่า คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์แก๊สเช่น NO_2 , NH_3 , O_2 ได้โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวป์ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.18 นาโน Probe ที่ได้จากรับอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 นาโน คีม (Nano Tweezer)

แต่การประยุกต์ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือไม่สามารถแยกชนิดของก๊าซที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และความเร็ว ก๊าซที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะ แนวทางสำหรับประยุกต์เชิงเซนเซอร์ให้ขึ้นสามารถทำได้ด้วยเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถ functionalize (เช่น หมู่ -OH และ -COOH เป็นต้น) ได้ ทำให้สามารถตรึงด้วยสารทางชีวภาพได้แก่ โปรตีน เอนไซม์ หรือ ดีเอ็นเอ จึงสามารถนำคาร์บอน นาโนทิวป์ ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานด้านไบโอเซนเซอร์ เพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ หรือใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารต่าง ๆ ได้ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์ มีพื้นผิวสำหรับการตรึงสารทางชีวภาพสูงทำให้สามารถเพิ่มขนาดสัญญาณได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีของไบโอเซนเซอร์เดิม

2.1.6.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

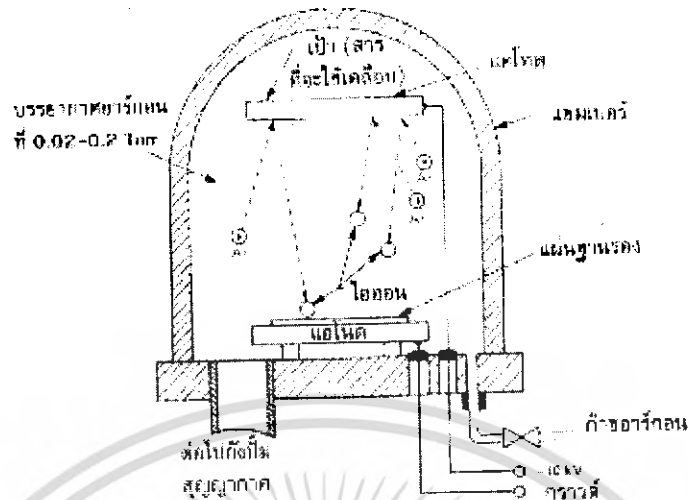
แนวความคิดที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้ในการกักเก็บพลังงานนั้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์มีลักษณะเป็นท่อกลวง เส้นผ่าศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตร และมีพื้นผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างพิเศษนี้เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยทั่วโลกที่จะนำมาใช้ในการเก็บ H_2 (ซึ่งพลังงาน H_2 - ไฮโดรเจน- เป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อม) นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon ได้แสดงผลการคำนวณไว้ว่า SWNTs จะสามารถกักเก็บ H_2 ได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อมักขึ้น และมีความเป็นไปได้ที่จะกักเก็บ H_2 ได้ถึง 6.5% โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าที่จะสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ นอกเหนือจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังสามารถนำไปใช้ใน Fuel cell ชนิด Methane, Ethanol หรือใช้เป็นขั้วในแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

2.2 กระบวนการสเปคเตอรืง

สเปคเตอรืงเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางอีกชนิดหนึ่งซึ่งอาจเป็นโลหะ สารกึ่งตัวนำหรือฉนวนก็ได้ หลักการของกระบวนการสเปคเตอรืง)แบบดีซี ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด(แสดงดังในรูปที่ 2.22 ในระบบนี้แผ่นฐานรองจะวางอยู่บนแอโนดซึ่งมีอุปกรณ์ทำความร้อนอยู่ข้างใต้เพื่อใช้เพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฐานในขณะที่เคลือบชั้นฟิล์ม)อุณหภูมิ $\approx 150-250^{\circ}\text{C}$ (และทางขั้วแคโทดจะมีเป้าซึ่งเป็นวัสดุที่จะทำการเคลือบหรือฝากลงบนแผ่นฐานที่วางอยู่ เมื่อทำการดูดอากาศออกจากแชมเบอร์)หรือbelljar) จนได้ความดันต่ำเท่าที่ต้องการ(background pressure อยู่ในช่วง $10^{-5}-10^{-6}$ Torr) จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันค่าสูงให้ระหว่างขั้วแอโนด-แคโทด และปรับความดันของก๊าซเฉื่อย)มักใช้ Ar เนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างมาก จึงเหมาะกับการใช้ระดมยิงเป้า (ที่จะเข้ามาในระบบให้มีขนาดตามต้องการ) อยู่ในช่วง 0.02-0.2 Torr (หลังจากนั้น Ar จะแตกตัวเป็นไอออนอันเนื่องจากสนามไฟฟ้าค่าสูงที่ใช้ทำเป้า จึงทำให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุดังกล่าวหลุดจากผิวหน้าเป้ามาฝากหรือเคลือบลงบนแผ่นฐานรอง เนื่องจากในขณะที่ทำการปลูกฟิล์มความดันภายในแชมเบอร์มีค่าต่ำ ดังนั้น เมื่ออะตอมของวัสดุหลุดจากผิวหน้าเป้าแล้วจะมีโอกาสชนกันเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลยก่อนที่จะฝากลงบนผิวหน้าฐานรอง ด้วยเหตุนี้ชั้นฟิล์มที่ปลูกได้จึงอาจมีลักษณะคล้ายกับการฉาบไอระเหยของโลหะ นั่นคือ มีลักษณะสเตปคอฟเวอเรจเกิดขึ้นดังแสดงในรูป) 1.13ค (ซึ่งวิธีที่ช่วยลดการเกิดสเตปคอฟเวอเรจ สามารถกระทำได้โดยการใช้แผ่นเป้าที่มีหน้าตัดใหญ่ขึ้น

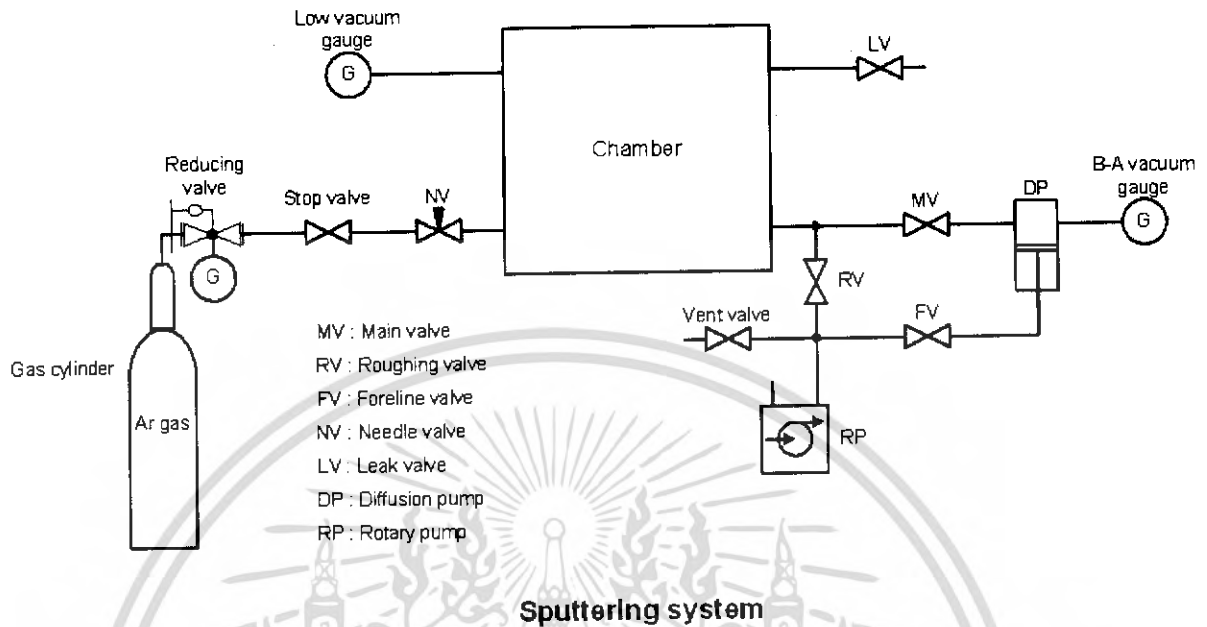


รูปที่ 2.20 ระบบเครื่องมือสปีดเตอริง

อันที่จริงแล้วเทคนิคสปีดเตอริงสามารถใช้กับวัสดุใด ๆ ก็ได้ รวมทั้งโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำที่มีจุดหลอมละลายสูง นอกจากนี้ยังสามารถทำการสปีดเตอริงพวกสารประกอบและอัลลอยได้ แม้ว่าการควบคุมองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นสารประกอบจะกระทำได้ลำบากอันเนื่องจากอัตราการสปีดเตอริงที่แตกต่างกันของส่วนประกอบของสาร ในปัจจุบันเทคนิคสปีดเตอริงมักนิยมใช้กับการปลูกฟิล์มโลหะเป็นหลักสำหรับเครื่องมือสปีดเตอริงที่ใช้โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

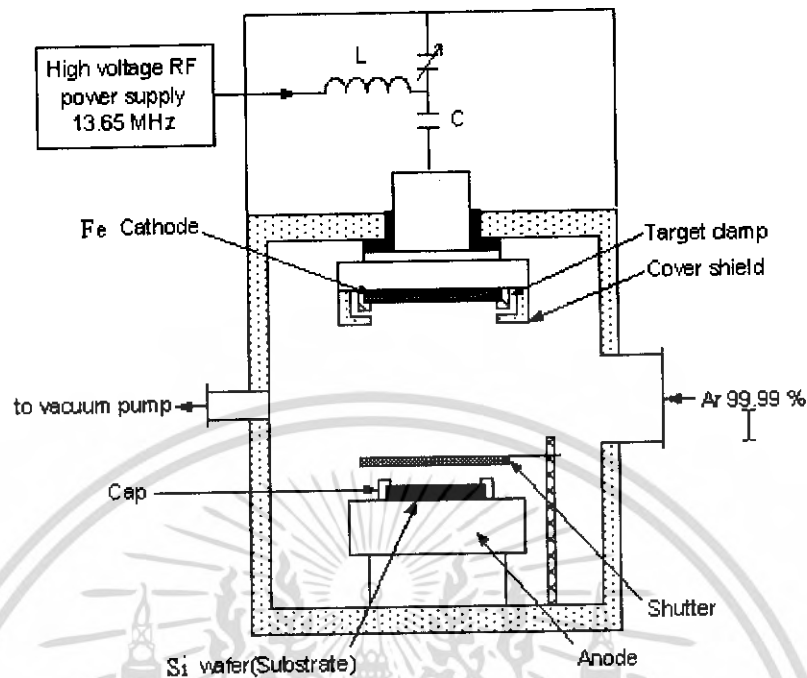
- (ก) ดีซีหรืออาร์เอฟสปีดเตอริง (dc หรือ rf sputtering) : ถ้าเป้าที่ใช้เป็นวัสดุนำไฟฟ้าสามารถใช้เครื่องมือทั้งสองประเภทได้ แต่ถ้าเป้าเป็นพวกสารไดอิเล็กตริกจะต้องใช้การกระตุ้นแบบอาร์เอฟ
- (ข) แมกนีตรอนสปีดเตอริง (magnetron sputtering): จะมีการวางแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไว้ข้างหลังเป้า เพื่อทำหน้าที่ช่วยบังคับพลาสมาที่มีอะตอมของวัสดุที่ฝากลงบนผิวหน้าแผ่นฐานรองได้ดีขึ้น และเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการฝาก
- (ค) รีแอคทีฟสปีดเตอริง (reactive sputtering): แก๊สปฏิกิริยาบางชนิดสามารถเติมเข้ามาในพลาสมาได้เพื่อช่วยปลูกฟิล์มของวัสดุที่ต้องการ อย่างเช่น ถ้าต้องการปลูกฟิล์มดีคาเนียมไนไตรด์ สามารถกระทำได้โดยการสปีดเตอริงดีคาเนียมไนไตรด์ในบรรยากาศของไนโตรเจนที่ผสมกับแก๊สเฉื่อย

2.2.1 กระบวนการทำงานของเครื่องสเป็คเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.21 Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System

จากไดอะแกรมในรูปที่ 2.23 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสเป็คเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz) , แหล่งจ่ายแก๊ส , ห้องสเป็คเตอร์ (sputtering chamber) , และปั๊มสุญญากาศ (rotary and diffusion pump) ภายในห้องสเป็คเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่นเหล็ก (Fe) เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.24 การสเป็คเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรแมทซ์ซึ่งเข้าสู่ห้องสเป็คเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสเป็คเตอร์ ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบ และดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชน โดย Si ที่ขั้วคาโทด ทำให้อะตอมของ Si กระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นซิลิคอนซึ่งวางที่ขั้วแอโนด เกิดเป็นฟิล์มโลหะ Si



รูปที่ 2.22 ระบบการสปีดเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด

2.3 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

โดยวิธีในการใช้นั้นเป็นวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เพื่อที่จะนำโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากวิธีนี้ไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยสารละลายที่ใช้ในการทำเป็นโลหะตัวเร่งนั้นจะใช้สารละลายคือสารละลายนิกเกิล โดยผลที่ต้องการนั้นจะเป็นการที่สามารถควบคุมตำแหน่งของนิกเกิลให้เกาะในตำแหน่งตามที่ต้องการได้ เพื่อนำผลลัพท์ที่ได้นี้เพื่อดูการเกาะของโลหะนิกเกิลบนผิวฐานรองแล้วนำไปเป็น Catalyst เพื่อนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ คาดว่าคาร์บอนที่ได้ ออกมานั้นจะเกิดในตำแหน่งที่มีการเกาะของโลหะตัวเร่งที่เป็นนิกเกิลเท่านั้น เพราะวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นแต่ผลลัพท์ที่ได้ก็อาจแตกต่างกัน

บทที่ 3

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

ในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งหลังจากที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นมาแล้ว ต้องนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ เพื่อหาว่าคุณสมบัติ ขนาด และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาได้เป็นอย่างไร โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกันคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopes; TEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes; SEM) และ Raman spectroscopy ซึ่งเครื่องมือแต่ละชนิดที่นำมาทำการวิเคราะห์นั้นจะบอกคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยที่เทคนิค SEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปของภาพสามมิติ สำหรับเทคนิค TEM จะบอกรูปร่างของชิ้นงานในรูปของภาพสองมิติซึ่งสามารถบอกขนาดและชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างแม่นยำ สุดท้ายสำหรับเทคนิค Raman จะบอกพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัด โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้หาความบริสุทธิ์ของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้และยังสามารถบอกชนิดและขนาดของคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างคร่าวๆได้

3.1 หลักการทำงานทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถให้กำลังขยาย (Magnification) และแจกแจงรายละเอียด (resolution) ได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา โดยในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงถึง 500,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสงในการสะท้อนวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาคะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีประสิทธิภาพถึง 0.1 นาโนเมตร โดยลำแสงอิเล็กตรอนที่มีศักย์สูงจากแคโทดที่ถูกให้ความร้อนในสุญญากาศ จะถูกเร่งและผ่านออกมาตามท่อสุญญากาศไปยังระบบคอนเดนเซอร์ (condenser system) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic coils) 4 ชุด โดยขดลวดแม่เหล็กชุดแรกจะทำให้อิเล็กตรอนผ่านไปยังด้านล่างของตัวอย่าง ส่วนชุดที่สองจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้วัตถุที่จะรวบรวมอิเล็กตรอนให้ผ่านหรือกระจายอยู่รอบๆ ตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กชุดที่สามที่ทำหน้าที่ในการขยายภาพ โดยภาพเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนผ่านไปยังตัวอย่างและมีการโฟกัสภาพไปยังจอรับภาพ เช่น จอรับภาพเรือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

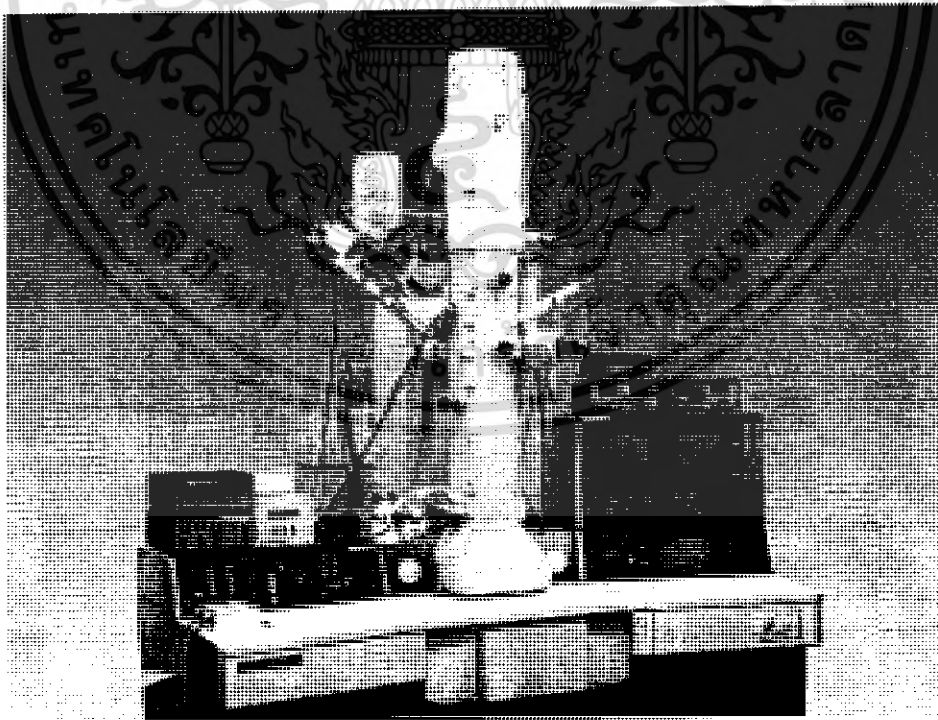
แสง หรือเซนเซอร์ไวแสง และขดลวดสนามแม่เหล็กขุดสุดท้ายจะทำหน้าที่เสมือนเลนส์ใกล้ตา ซึ่งภาพที่ได้สามารถบันทึกลงบนเพลท แผ่นฟิล์ม หรือทำการแปลงสัญญาณภาพลงสู่จอคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งภาพที่ได้นี้จะเรียกว่า Electron Micrograph (EM)

3.2 ประเภทและการนำไปใช้งานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

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

3.2.1 TEMs

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบางซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก

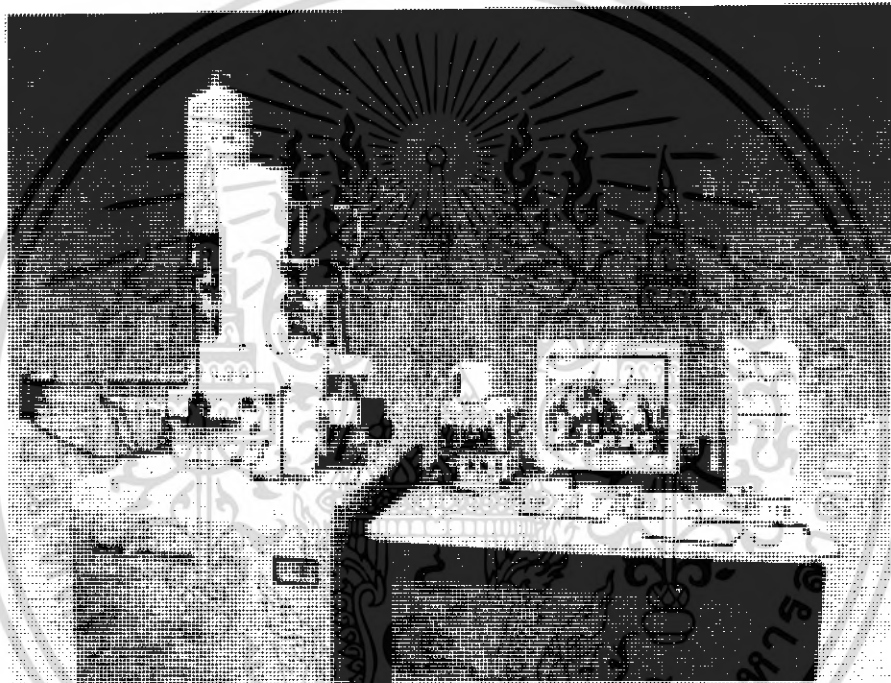


รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน TEMs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 SEMs

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะ เป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจดัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลใน รูปแบบต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณหามวลและปริมาตร กล้องจุลทรรศน์แบบนี้ เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน

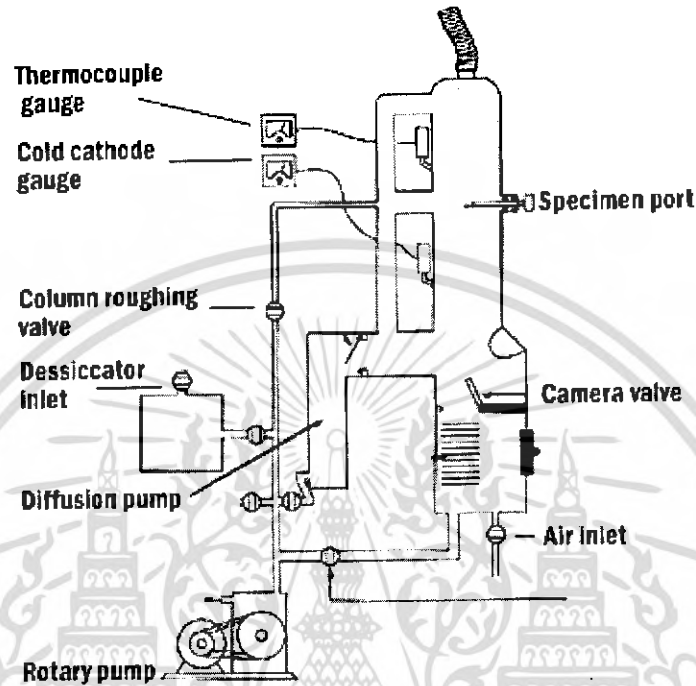


รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEMs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ระบบการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

3.3.1 ระบบการทำงานของ TEMs



รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของ TEMs

การทำงานของ TEMs จะประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 4 ระบบคือ

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

ระบบแสงสว่าง (Illuminating) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ โดยปืนอิเล็กตรอนจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และคอนเดนเซอร์เลนส์จะทำหน้าที่รวบรวมประจุ

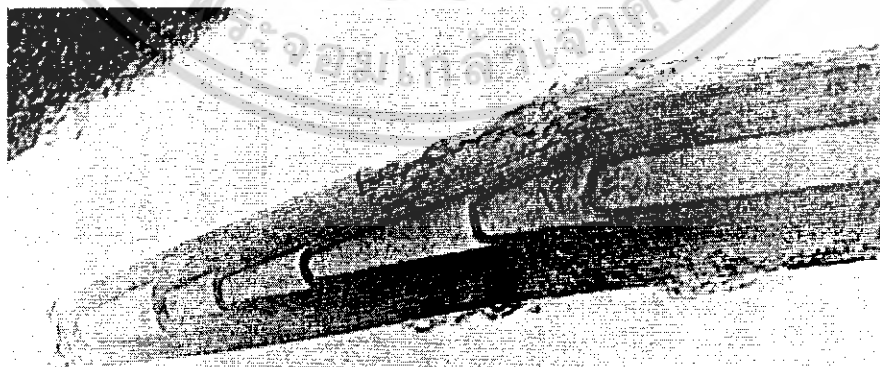
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นให้เป็นลำอิเล็กตรอน โดยใช้สนามแม่เหล็กเพื่อส่งไปยังตัวอย่าง ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ถ้าให้กระแสไฟฟ้าแรงสูงมากขึ้น ค่าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ทำให้การแจกแจงรายละเอียดดีขึ้น ดังนั้นการปรับเปลี่ยนความยาวโฟกัสจึงทำได้โดยการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้านั้นเอง คอนเดนเซอร์อาจมีได้มากกว่าหนึ่งชุด เพื่อควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนมีความเข้มและขนาดเล็กลง ทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างมากขึ้น และยังเป็น การป้องกันตัวอย่างไม่ให้ถูกทำลายด้วยความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอนด้วย

ระบบคอนเดนเซอร์เลนส์นี้จะมีแผ่น โมลิบดีนัมอยู่ในช่องว่างซึ่งจะมีรูกลมๆ ขนาดเล็กที่เรียกว่า Aperture เพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอนให้เป็นจุดกลมที่สมบูรณ์ รวมทั้งป้องกันการกระจายตัวของอิเล็กตรอนซึ่งจะส่งผลต่อความคมชัดของภาพ สำหรับขนาดของช่อง aperture นี้ ยังมีขนาดเล็ก จะยิ่งทำให้การแจกแจงรายละเอียดของภาพดีขึ้น แต่ความคมชัดจะลดลง

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

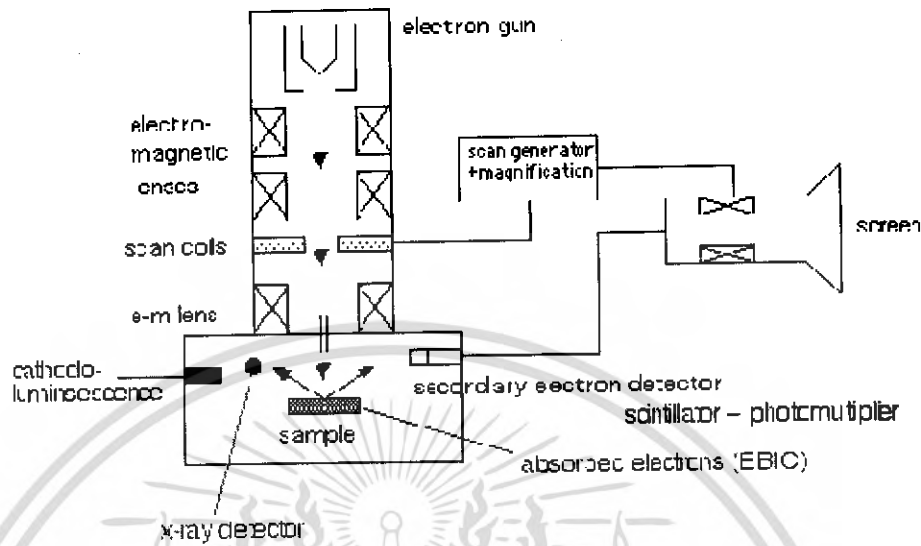
ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วยชุดเตอร์และเครื่องวัดแสง โดยระบบนี้จะอยู่ที่ Projectors lens ชุดเตอร์จะทำหน้าที่ปิดหรือเปิดให้ลำแสงอิเล็กตรอนไปตกกระทบบนแผ่นรับภาพเรืองแสง



รูปที่ 3.4 ภาพจาก TEM แสดงรูปร่างของ MWNTs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

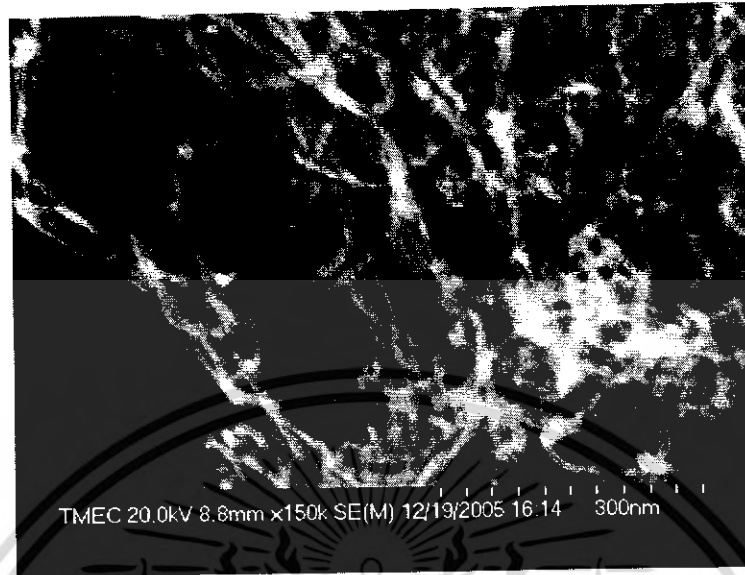
3.3.2 ระบบการทำงานของ SEMs



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานของ SEMs

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างกันคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอ CRT (Cathode Ray Tube) คอลัมน์ของ SEMs จะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์เช่นเดียวกับ TEM ถ้าอิเล็กตรอนที่ผ่าน objective lens ไปตกลงบนตัวอย่างนั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับ objective lens ถ้าอิเล็กตรอนนี้เป็น Primary electron โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่างส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า Secondary electron และถูกรวบรวมโดย electron collector ซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอ CRT ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระ นอกจากนี้ที่ Objective lens จะมีช่อง Aperture เช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพ SEMs นี้ อาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น Backscattered electron detector อิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนกลับหมดนี้จะช่วยในการบอกรายละเอียดของรูปร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่ Secondary electron ทำการตรวจสอบได้ หรือทำการติดตั้งระบบ EDS เพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุ หรือติดตั้ง Transmitted electron detector เพื่อศึกษาลักษณะภายในของตัวอย่างที่ทำให้บาง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ภาพ SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้

3.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

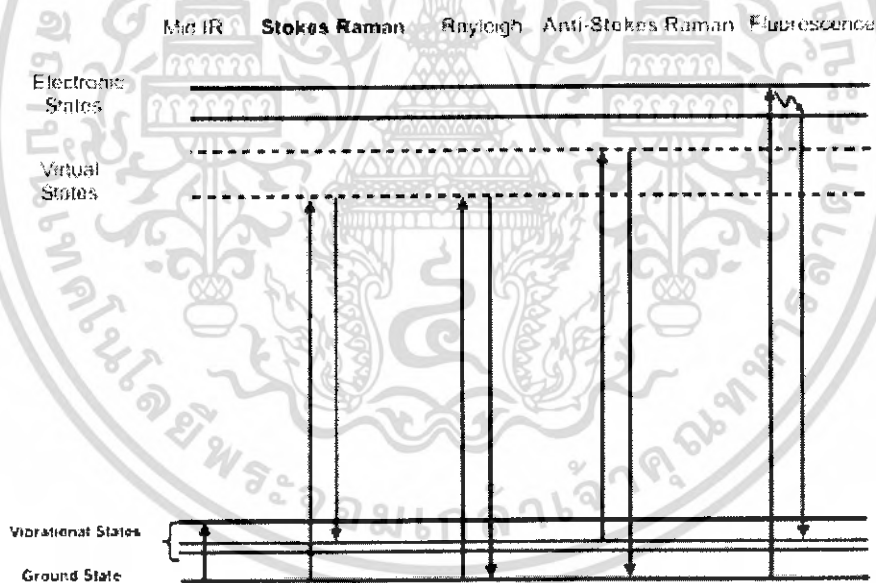
รามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาโครงสร้างของวัสดุสารจากการวัดสเปกตรัมที่เลื่อนไปของ Raman shift และตำแหน่งของสเปกตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะพันธะของชิ้นงานที่นำมาวัด โดยสารแต่ละชนิดจะมีสเปกตรัมเฉพาะของแต่ละสารที่แตกต่างกัน เทคนิคของ Raman spectroscopy มีหลักการที่สำคัญ คือ การใช้การกระเจิงไม่ยืดหยุ่น (Raman scattering) และการสั่นของโครงสร้าง เมื่อฉายแสงสีเดียวที่มีความเข้มให้กับวัสดุสาร จะเกิดการแผ่รังสีจากวัสดุสารด้วยความยาวคลื่นที่สั้นหรือยาวกว่าแสงที่ใช้ในการกระตุ้น (exciting light) โดยกลไกการกระเจิงของแสงนี้สามารถอธิบายได้ว่าเป็นการรวมกันของการโพลาไรซ์ (polarization) ของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน ทำให้เกิดภาวะไม่สมดุล ระบบจึงพยายามเข้าสู่สมดุลโดยการแผ่รังสี

3.4.1 หลักการทำงาน

เมื่อลำแสงที่มีความเข้มสูงผ่านเข้าไปยังตัวกลางโปร่งใส แสงส่วนใหญ่จะผ่านทะลุไปได้ แต่จะมีแสงส่วนน้อยเกิดการกระเจิงไปทุกทิศทางและเกิดการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) หรือแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) กับโมเลกุลของสาร เมื่อโฟตอนผ่านเข้าไปในโมเลกุลสารจะมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปซึ่งพลังงานที่เหลือจะให้สเปกตรัมออกมา ลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมจะเป็น peak แหวม โดยส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมาจะมีความยาวคลื่นเดียวกับ ความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับ พลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอน แต่มีโฟตอนบางส่วน (ประมาณ 1 ใน 10^7) ที่ กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้ เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่ เป็น Raman scatter นี้ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟ ทอนที่ตกกระทบ (Stoke shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่ความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอน ที่ ตกกระทบ (anti-Stokes shift) ซึ่ง Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะสูงกว่าระดับ พลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนจะมี พลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น และ Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering



รูปที่ 3.7 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ Anti-Stokes scattering

จากรูปที่ 3.7 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

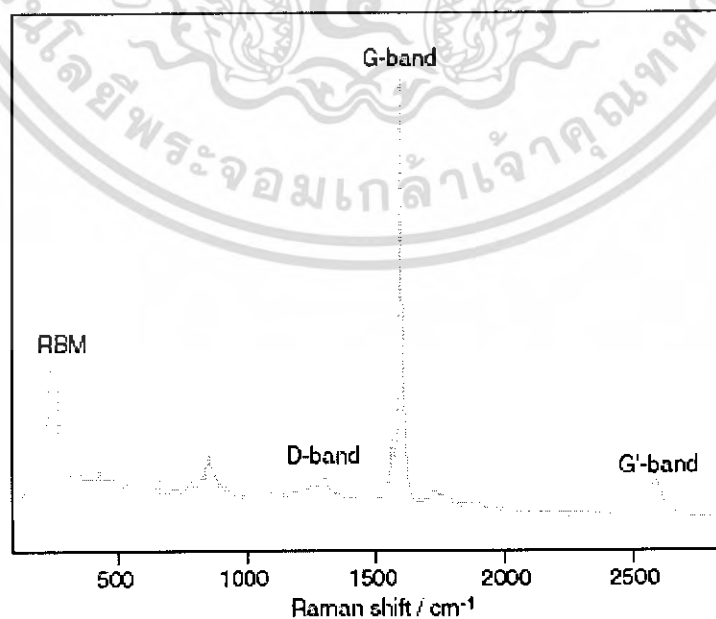
พลังงานที่สูงกว่า (virtual state) และเมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมา

3.4.2 การประยุกต์ใช้วัดคาร์บอนนาโนทิวป์

รามานสเปกโตรสโคปี เป็นเครื่องมือที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ทำการศึกษาลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน และชิ้นงานที่ทำการวัดแล้วก็ไม่เกิดการเสียหาย ซึ่งพันธะของฟูเรอเรนซ์ คาร์บอนนาโนทิวป์ อะมอฟิสคาร์บอนและโพลีคริสตรอนไลน์คาร์บอน จะอยู่ในรูปแบบของคาร์บอน สามารถสังเกตได้จากความถี่รามานที่วัดได้ในกราฟรามาน

โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องรามานมีอยู่ความถี่ที่สนใจอยู่ 4 ความถี่ คือ

- 1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $<200\text{cm}^{-1}$ จะเรียกว่าย่าน RBM(radial breathing mode) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้นจะมี SWNTs เกิดขึ้น
- 2) ความถี่ประมาณ 1340cm^{-1} เรียกว่า D-band (D:disorder) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับพันธะของกราฟไฟต์
- 3) ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่าง $1500-1600\text{cm}^{-1}$ เรียกว่า G-band จะตอบสนองกับพันธะของคาร์บอนนาโนทิวป์
- 4) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $2450-2650\text{cm}^{-1}$ เป็นโอเวอร์โทนของ D-band(overtone of D-band) เรียกว่า G'-band



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.8 กราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 D-band และ G'-band

โดยทั้ง D-band และ G'-band คือ Disorder-induced แต่จะอยู่คนละย่านความถี่ จะแสดงถึงอะมอร์ฟิสคาร์บอน หรือ ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอน โดยจะมีความถี่รามาน อยู่ที่ประมาณ 1330cm^{-1} และ 2600cm^{-1} และในโหมดนี้จะมีความสูงของพีคที่ไม่มากนักเพราะ ในย่านนี้แสดงถึงสิ่งที่เป็นสิ่งเจือปนหรือรูปแบบของผลึกที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

3.4.4 อัตราส่วน I(G)/I(D)

อัตราส่วนระหว่างความเข้มของพีค G กับความเข้มของพีค D หรือ I(G)/I(D) ซึ่งแสดงถึงความสมบูรณ์และความบริสุทธิ์ของผลึก โดยที่ค่า I(G) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีค G และ I(D) หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีค D แล้วนำมาหารกันจะได้ค่าของอัตราส่วน I(G)/I(D) ซึ่งเมื่อมีค่ามากจะแสดงถึงมีความบริสุทธิ์หรือมีความสมบูรณ์ของผลึกที่สูง

ตารางที่ 3.1 แสดงยอดกราฟหลัก ๆ จากการวัดรูปแบบต่าง ๆ ของคาร์บอนด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy

ตำแหน่งพีค	ชนิดของคาร์บอน	รายละเอียด
$\approx 1140\text{ cm}^{-1}$	Small size ($<0.1\ \mu\text{m}$) cubic diamond	พบในฟิล์มเพชรที่มีเกรนขนาดเล็ก ($<0.1\ \mu\text{m}$)
$1315 - 1326\text{ cm}^{-1}$	Hexagonal diamond	เป็นแถบกว้างพบในการสังเคราะห์แบบ shockwave
1332 cm^{-1}	Cubic diamond	พีคอันดับที่ 1 ของเพชรธรรมชาติที่มีความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงเป็น 1.9 cm^{-1}
1345 cm^{-1}	อมอร์ฟิสคาร์บอน	แถบกว้าง เมื่อถูกไฮโดรจีเนตจะเป็นไหล่ของแถบ 1550 cm^{-1}
1355 cm^{-1}	Microcrystalline graphite	พบในวัสดุสารที่มีเกรนขนาดเล็ก
1550 cm^{-1}	อมอร์ฟิสคาร์บอน หรือ diamond-like carbon	แถบกว้าง
1580 cm^{-1}	แกรไฟต์	พีคอันดับที่ 1
2458 cm^{-1}	Cubic Diamond	พีคอันดับที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

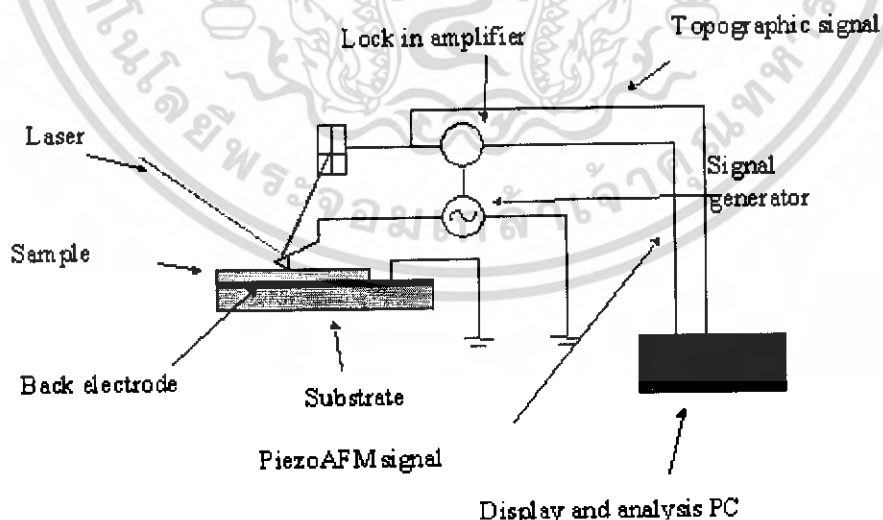
2710 cm ⁻¹	Microcrystalline graphite	พีคอันดับที่ 2
3240 cm ⁻¹	แกรไฟต์	พีคอันดับที่ 2

3.5 การวิเคราะห์ด้วย AFM (Atomic Force Microscopy)

AFM เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สังเกตและจัดการเคลื่อนย้ายวัสดุขนาดนาโนเมตรได้ ทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำและฉนวน สามารถใช้งานได้ทั้งในสิ่งแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ อากาศ ก๊าซและของเหลว กล้องจุลทรรศน์แบบนี้ เป็นกล้องที่อาศัยเข็มขนาดเล็กกวาดไปบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง เราสามารถวัดคุณสมบัติของพื้นผิวชิ้นงานได้ ดังเช่น ความสูง การดูดกลืนแสง หรือ สนามแม่เหล็ก เป็นต้น เนื่องจากปลายเข็มมีขนาดเล็กมาก จึงสามารถที่จะตรวจสอบได้ในบริเวณที่เล็กมากๆ ถึงขนาดระดับอะตอม เข็มจะกวาดไปบนพื้นผิว และแปรผลที่ได้ออกเป็นภาพกราฟฟิกทางคอมพิวเตอร์

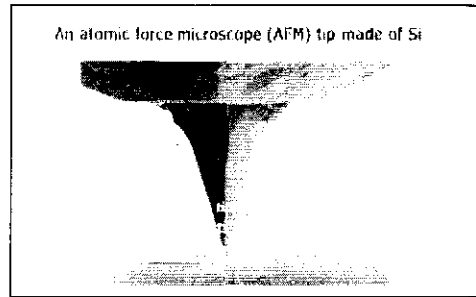
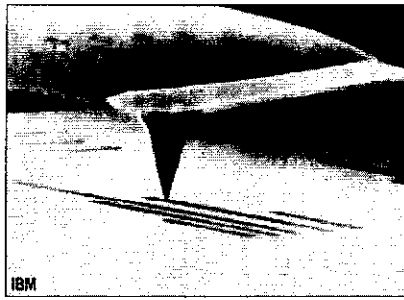
3.5.1 หลักการทำงาน

ส่วนประกอบที่สำคัญของ AFM คือคานยื่นที่ทำจากวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้ เมื่อถูกแรงกระทำ ที่ปลายคานจะมีเข็มที่ประกอบด้วยอะตอม 1 ตัว เมื่อเลื่อนคานให้ปลายเข็มอยู่ห่างจากผิววัสดุระหว่าง 0 - 100 นาโนเมตร แรงกระทำระหว่างอะตอมจะดึงคานและสามารถวัดระยะหรือใช้เคลื่อนย้ายอะตอมทีละตัว

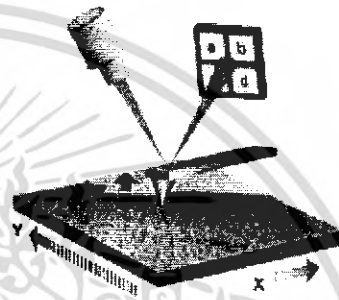
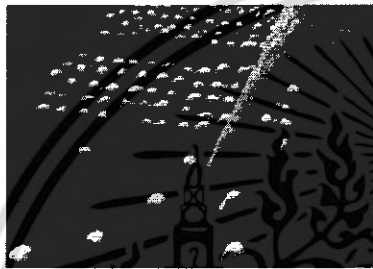


รูปที่ 3.9 แผนภาพวงจรการทำงานของ AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 คานยื่นและเข็มที่ปลายคาน



รูปที่ 3.11 การเบี่ยงเบนของปลายคานทำให้แสงเลเซอร์ที่สะท้อนไปยังตัวรับแสงมีการเบี่ยงเบน จึงสามารถวัดขนาดหรือระยะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

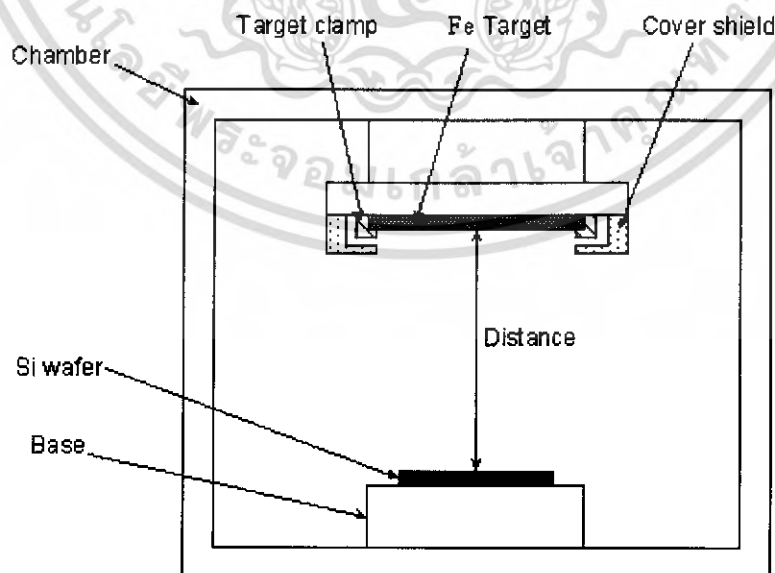
บทที่ 4

กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์ การชุบไฟฟ้าและการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบความร้อน

บทนี้จะกล่าวถึงส่วนของวิธีการทดลองโดยจะบอกอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง และขั้นตอนการทดลอง เช่น การเตรียมฐานรองแผ่นซิลิกอนโดยวิธีสปัตเตอร์ วิธีการชุบไฟฟ้าและวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์รวมถึงกระบวนการทำมาส์กที่นำไปสู่การทำลวดลายซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.1 การเตรียมฐานรองซิลิกอนโดยวิธีการสปัตเตอร์

ขั้นตอนการสปัตเตอร์ เริ่มด้วยการนำแผ่นเหล็ก 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 Si จึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปัตเตอร์ ดังแสดงตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสปัตเตอร์

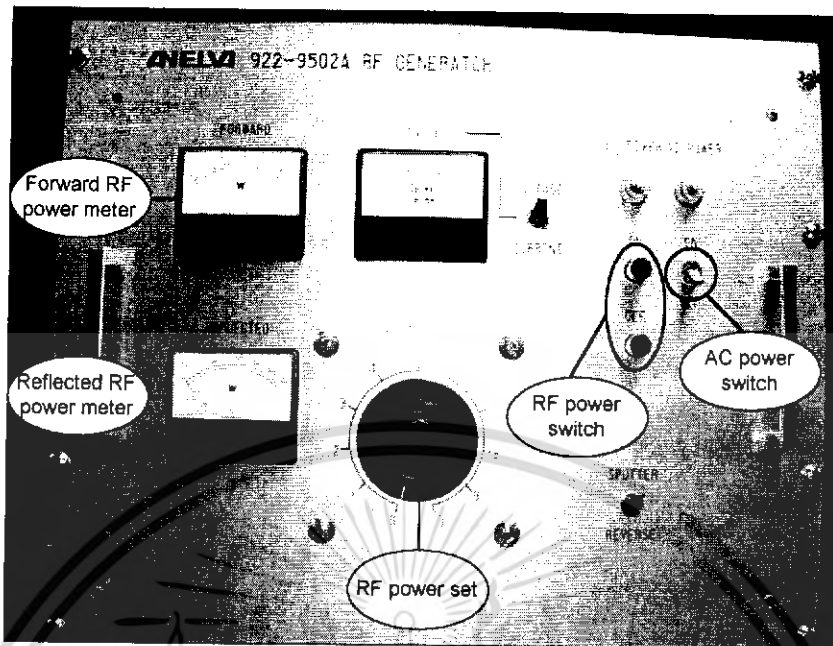
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะเริ่มด้วยการปรับระยะห่างระหว่างขั้วไปที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 37 mm จะทำให้ช่วงความดันในการสปัตเตอร์ลดลงอยู่ในช่วง $2-5 \times 10^{-3}$ bar ทำให้ได้ฟิล์มโลหะมีคุณภาพดี ในระหว่างกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะจะเกิดความร้อนทั้งขั้วคาโทดและขั้วแอโนดเนื่องจากอะตอมของอาร์กอนวิ่งไปชนขั้วคาโทด ซึ่งมีโลหะ Si ทำให้อะตอมของโลหะกระเด็นตกลงมาที่แผ่นเหล็กและคลายความร้อนลงบนแผ่นเหล็ก ซึ่งความร้อนนี้จะมีผลการเรียงตัวของอะตอมโลหะ Si ดังนั้นต้องควบคุมอุณหภูมิที่ขั้วแอโนดไม่ให้เกิน 40°C จะได้ฟิล์มโลหะที่มีคุณภาพดี

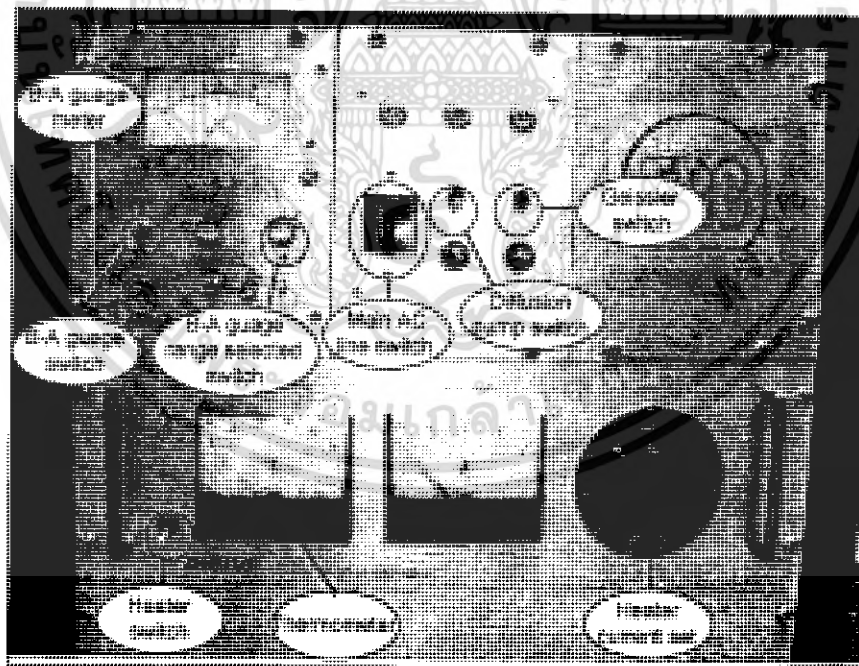
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสปัตเตอร์ Si ในการทดลอง

เงื่อนไข	รายละเอียด
ขั้ว คาโทด	เป้าโลหะ Fe ขนาด \varnothing 80 mm. ความบริสุทธิ์ 99.999% อาร์กอน 99.99 %
บรรยากาศ	$2-5 \times 10^{-3}$ bar
ความดัน	37 mm
ระยะห่างของขั้วคาโทด และขั้วแอโนด	100 - 150 วัตต์
กำลังงาน RF	$25 - 30^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิของแอโนด	ซิลิคอน
ฐานรอง	0.3 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



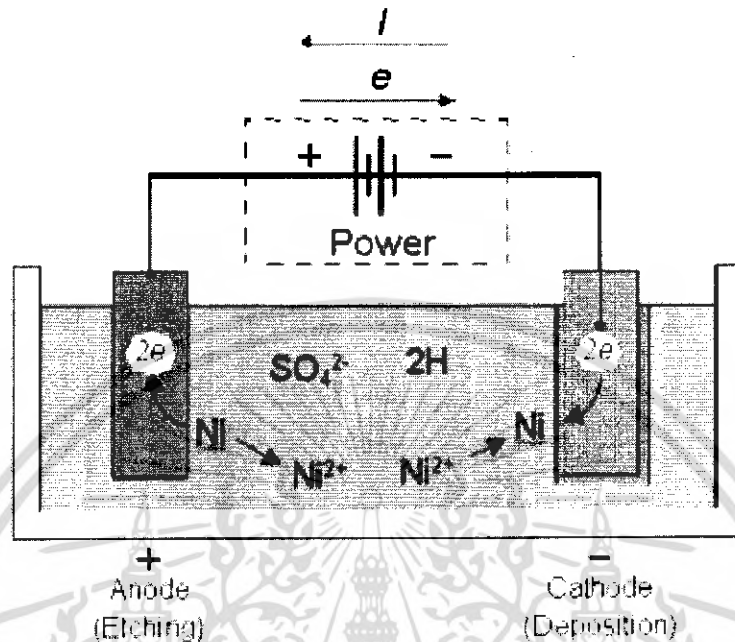
รูปที่ 4.2 Panel of RF Generator



รูปที่ 4.3 Panel of Pump Switch, Ionizing Gauge and Heater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 แสดงหลักการชุบไฟฟ้า

กระบวนการ Electroplating เป็นกระบวนการที่สามารถนำไปใช้ในการเตรียมโลหะตัวเร่งได้ซึ่งโลหะตัวเร่งนั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยโลหะตัวเร่งนี้จะเป็นตัวที่ทำให้คาร์บอนที่ทำปฏิกิริยาแล้วมาเกาะที่ตัวโลหะวัสดุที่ใช้เป็นโลหะนั้นมีหลายชนิดเช่น นิกเกิล(Ni) เหล็ก(Fe) โคบอลต์(Co) เป็นต้น วัสดุแต่ละชนิดที่ขึ้นเป็นโลหะตัวเร่งนั้นมีคุณสมบัติที่จะทำให้การเกิดของคาร์บอนนั้นแตกต่างกันในการทดลองนี้จะใช้นิกเกิลเป็นโลหะตัวเร่ง เพราะคาร์บอนที่ได้นั้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและมีเส้นตรงและวิธีการนั้นจะเป็นวิธีการจะเป็นวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นเรื่องง่ายและไม่ซับซ้อนมากนัก

4.2.1 การทดลอง

4.2.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. แผ่นสแตนเลส ขนาด 7*7 มม.หนา 0.2 มม.
2. Dry photoresis film
3. โปแทสเซียมไดโครเมต
4. Di-ionize Water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โลหะตัวล่อ(นิกเกิล)
6. น้ำยาสำหรับการชุบไฟฟ้า(นิกเกิลซัลเฟต)
7. Air pump
8. Amperostst
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์

4.2.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

- การทำครายฟิล์ม

ในการทำครายฟิล์มแผ่นครายฟิล์มที่ใช้ในการทดลองจะเป็นชนิด เนกาทีฟ จากนั้นทำตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่1

ทำความสะอาดแผ่นชิ้นงานที่ต้องการชุบในการทดลองนี้จะใช้Substate เป็นแทนเลส การทำความสะอาดเราใช้แอลกอฮอล์ ล้างแล้วเช็ดให้แห้งเพื่อล้างครายไขมันที่ติดอยู่

ขั้นตอนที่2

ตัดครายฟิล์มตามขนาดที่พอเหมาะต่อชิ้นงานที่ทำ

ขั้นตอนที่3

สังเกตว่าแผ่นครายฟิล์มจะประกอบด้วยฟิล์มบางๆชั้น ชั้นนอกจะเป็นแผ่นป้องกันความไวแสงของแผ่นตรงกลาง ลอกแผ่นพลาสติกที่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งออกแล้วนำไปประกบติดกับแผ่นSubstateระวังอย่าให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นเพราะฟองอากาศทำให้ครายฟิล์มไม่เกาะกับแผ่นSubstate จากนั้นให้นำแผ่นที่ได้ไปรีดบนเครื่องรีด อาจใช้ผ้ารองแล้วรีด ด้วยเตารีดก็ได้ จากนั้นตรวจดูว่ามีฟองอากาศอยู่หรือถ้ามี ใช้เข็มเย็บผ้าเจาะฟองอากาศแล้วไล่ฟองอากาศออกแล้วรีดทับอีกทีตรวจให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศอยู่แล้ว

ขั้นตอนที่4

เมื่อได้แผ่นSubstateที่เคลือบครายฟิล์มแล้วนำไปฉายแสงโดยใช้การส่องแสงแดดประมาณ 5-10วินาที

ขั้นตอนที่5

นำดีเวอร์ลอปเปอร์เทใส่ถาดหรือภาชนะ ที่สามารถใส่ Substate ได้โดยมีน้ำยาใส่ท่วมแผ่น Substate

ขั้นตอนที่ 6

ลอกแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่บนแผ่นกราฟฟิม์ที่เหลืออยู่ชั้นหนึ่งออก แล้วนำมาแช่น้ำที่เตรียมแล้วล้างนำไปเรื่อยๆ ลายเส้นจะปรากฏ ทำไปจน ลายชัดเจน จากนั้นนำมาล้างด้วยDI Water แล้วนำไปทำให้แห้งพร้อมที่จะใช้งานในกระบวนการ Electroplate ต่อไป

4.2.2 กระบวนการ Electroplate

1. นำสารละลายที่ใช้ในการชุบในที่นี้ใช้นิกเกิลซัลเฟตใส่ในภาชนะที่เตรียมไว้
2. ต่อขั้วElectrode ทั้งAnode และCathode โดยที่Anode ต่อเข้ากับโลหะตัวล่อซึ่งเป็นแผ่น NI ซึ่งจะปล่อย Ni-ion ออกมา และ Cathode ต่อเข้ากับSubstrate ที่ต้องการชุบ
3. เปิดAirpump เพื่อให้เกิด Bubble ในSolution
4. ป้อนกระแสที่ใช้ในการชุบ โดยป้อนตามเงื่อนไขกระแสต่างๆ
5. หลังจากชุบเสร็จแล้วให้นำชิ้นงานนำมาทำการLift off ด้วยน้ำยา Lift off แล้วล้างสารเคมีออกด้วยDI Water

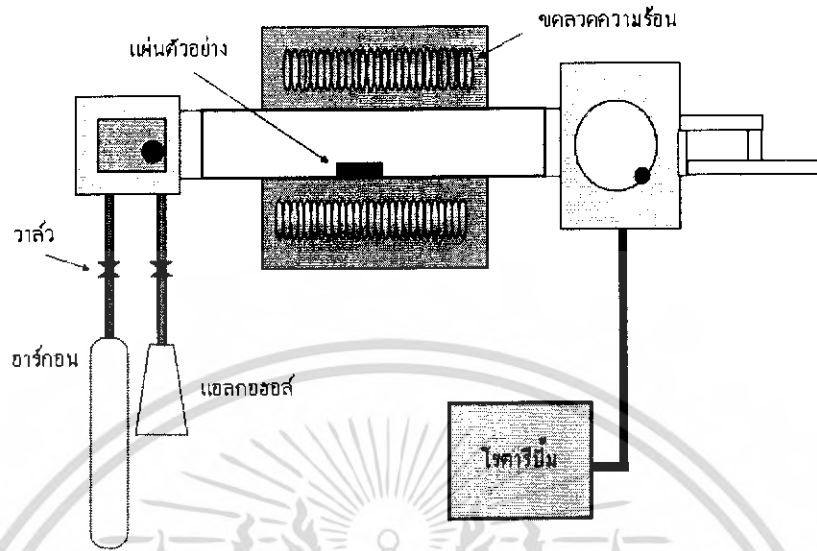


รูปที่ 4.5 แสดงการทดลองชุบไฟฟ้า

4.3 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

รูปที่ 4.5 แสดงระบบของ CVD แบบความร้อน โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน แผ่นซิลิคอนซึ่งมีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบอยู่ด้านบนวางอยู่บริเวณตรงกลางของท่อควีซ รอบๆ ของท่อจะมีขดลวดความร้อนเพื่อให้ความร้อนแก่ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



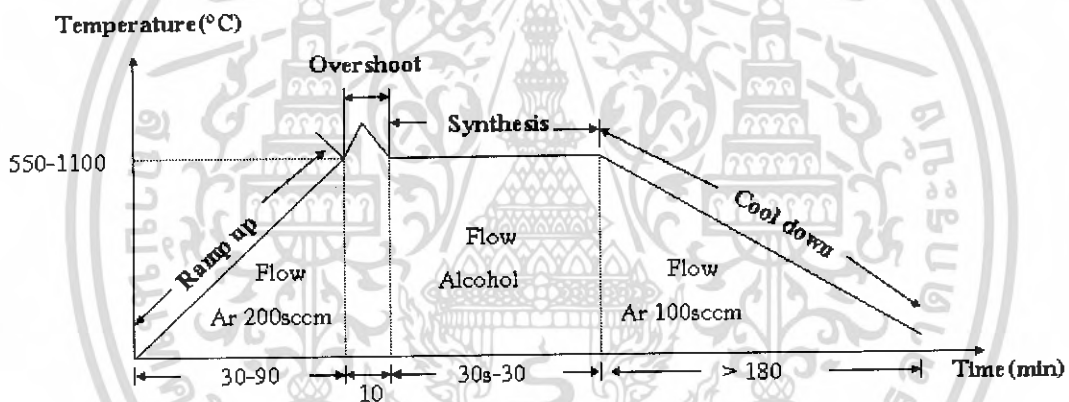
รูปที่ 4.6 ระบบ CVD แบบความร้อน



รูปที่ 4.7 เครื่องมือทดลองของระบบ CVD แบบความร้อน

หลังจากนำแผ่นซิลิคอนไปวางไว้บริเวณตรงกลางของท่อควีซแล้ว ทำการอากาศออก จากท่อควีซให้เป็นสุญญากาศที่ระดับ 6.6×10^{-2} mbar ด้วยโรตารีปั๊ม จากนั้นให้ความร้อนแก่ระบบ เป็นเวลา 30-60 นาที (อุณหภูมิที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง $550-900^{\circ}\text{C}$) ซึ่งระหว่างนี้จะปล่อยก๊าซ อาร์กอนเข้าไปในระบบด้วยอัตราการไหล 200sccm เพื่อป้องกันการการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมีเมื่อโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่อง และป้องกันระบบสุญญากาศของเครื่องไม่ให้เกิดการเสียหายในกรณีที่คู่อากาศออกเป็นเวลานานๆ เมื่ออุณหภูมิอยู่ในระดับที่ต้องการ ก็จะทำการดูดก๊าซอาร์กอนออกจากระบบ จากนั้นปล่อยไอแอลกอฮอล์เข้าสู่ระบบเพื่อทำการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ เมื่อครบเวลาที่กำหนดคู่อไอแอลกอฮอล์ออกจากระบบ จากนั้นปล่อยให้ความร้อนของระบบเย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ในขณะที่เดียวกันก็ปล่อยอาร์กอนเข้าสู่ระบบที่อัตราการไหล 100sccm จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่มีคาร์บอนนาโนทิวป์เคลือบอยู่ด้านบนไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง(Scanning Electron Microscopy) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(Transmission Electron Microscopy) และรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงขั้นตอนการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

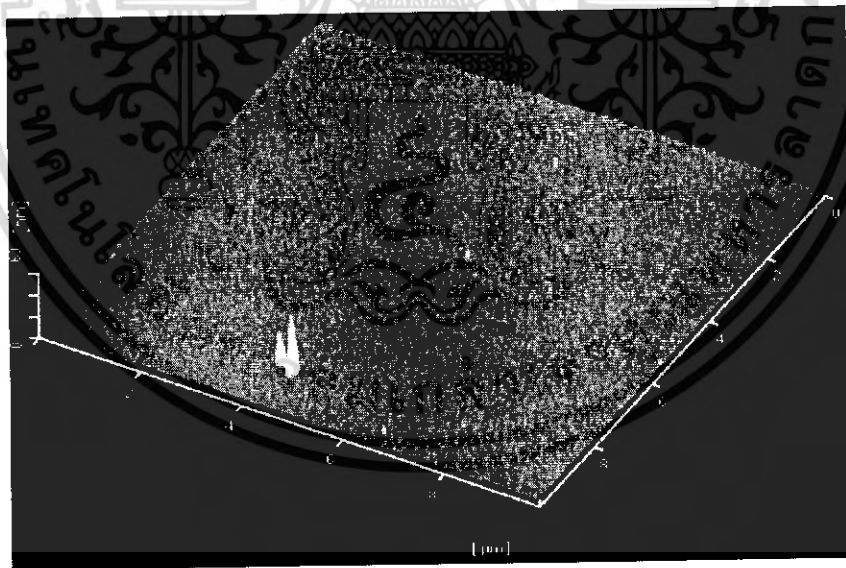
บทที่ 5

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะอธิบายถึงผลการทดลองโดยใช้แอสทอซอต์เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน ซึ่งในการสังเคราะห์จะทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆเพื่อศึกษาว่ามีผลต่อการเกิด ขนาด และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวอย่างไร โดยตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยนได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการสปีดเตอร์ ในส่วนของการหุบไฟฟ้าตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยนได้แก่ กระแส และ ระยะเวลาในการหุบ

5.1 ผลของเงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่มีต่ออนุภาคเหล็ก

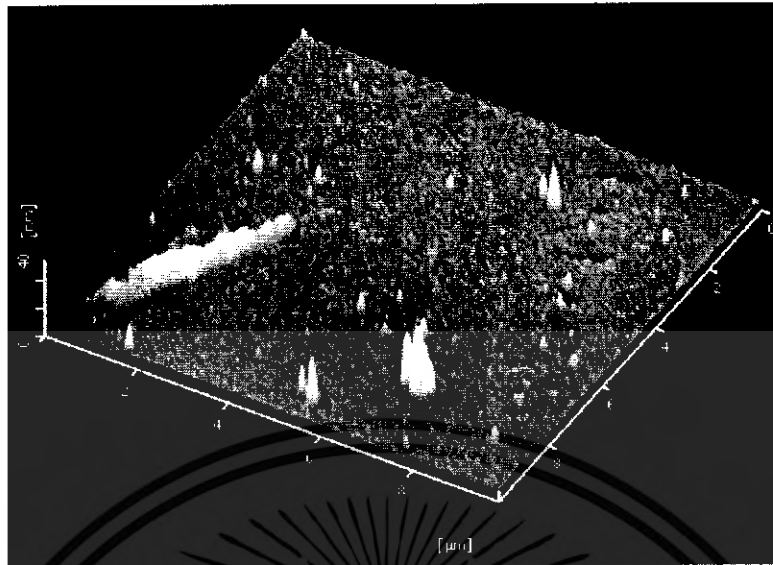
ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาว่าการสปีดเตอร์นั้นมีผลต่ออนุภาคเหล็กบนพื้นผิวอย่างไร เช่นเมื่อให้ระยะเวลาในการสปีดเตอร์เพิ่มมากขึ้นพื้นผิวของซิลิคอนจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยจะทำการตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือ AFM (Atomic Force Microscope) ในการทดลองนี้ทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการสปีดเตอร์ที่ 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที



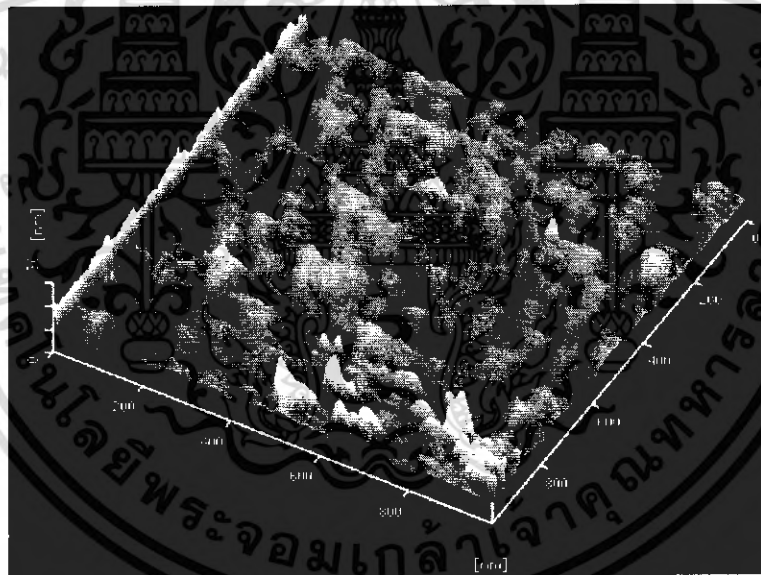
(ก)

รูปที่ 5.1 (มีต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.1 ภาพจาก SEM แสดงพื้นผิวซิงค์ไอออน โดยเวลาในการสปัตเตอร์แตกต่างกัน
(ก) 5 นาที (ข) 10 นาที (ค) 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.1 (ก) (ข) และ (ค) แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM โดยที่แต่ละภาพแสดงถึงเวลาที่ใช้ในการสปีดเตอร์แตกต่างกันตั้งแต่ 5 นาที 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ เมื่อสังเกตผลจากภาพ (ก) พบว่าที่เวลาที่ใช้ในการสปีดเตอร์ 5 นาทีภาพแสดงว่าพื้นผิวยังคงค่อนข้างมีความราบเรียบอยู่เมื่อเทียบกับภาพ (ข) และ (ค) โดยภาพทั้งสองนั้นพบว่าพื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของเหล็กที่เกาะอยู่บนแผ่นซิลิกอนที่ได้จากการสปีดเตอร์ โดยสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 5.1 (ค) พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระเป็นอย่างมากจึงสามารถกล่าวได้ว่าเวลาในการสปีดเตอร์มีผลต่อความเรียบของพื้นผิว โดยหากเวลายิ่งสูงมากอนุภาคเหล็กก็จะยิ่งเกาะอยู่บนผิวของซิลิกอนมากขึ้นตามไปด้วย

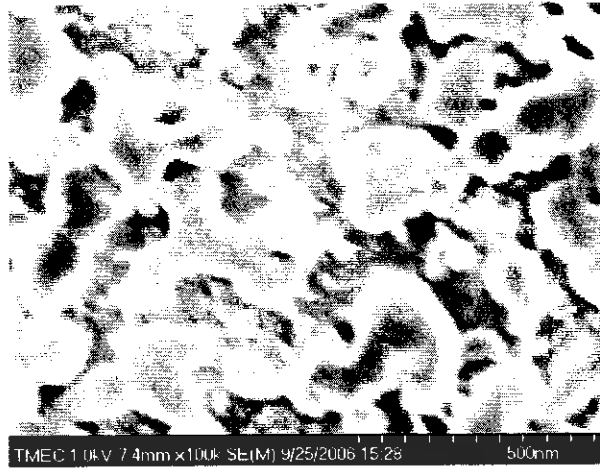
5.2 ผลของเงื่อนไขการสปีดเตอร์ที่มีต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาว่าเงื่อนไขที่แตกต่างกันทางด้านเวลาของการสปีดเตอร์นั้นเมื่อมาทำการทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกันโดยใช้วิธีเทอร์มอลซีวีดีมีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างไร เช่น เมื่อให้อุณหภูมิในการสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้นขนาดและการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์จะเป็นอย่างไร ในการทดลองนี้ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 600°C 650°C 700°C 800°C และ 900°C โดยสภาวะอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองสามารถดูได้จากตารางที่ 5.1

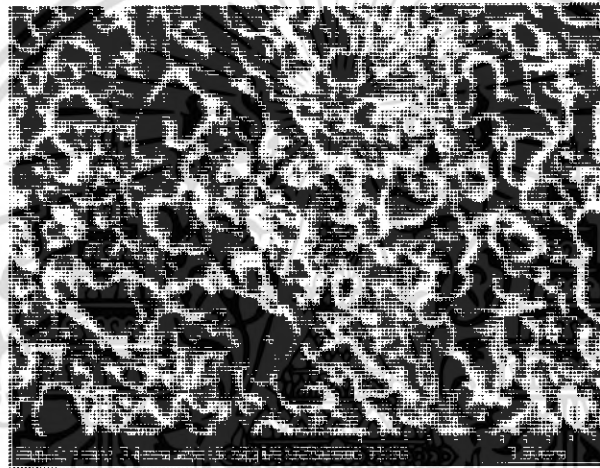
ตารางที่ 5.1 อุณหภูมิและตัวแปรอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิ	ทำการปรับเปลี่ยนที่ 600°C 650°C 700°C 800°C และ 900°C
ความดัน	5mbar
เวลา	10min
แอลกอฮอล์	เอทานอล
โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา	เหล็กที่ได้จากการสปีดเตอร์

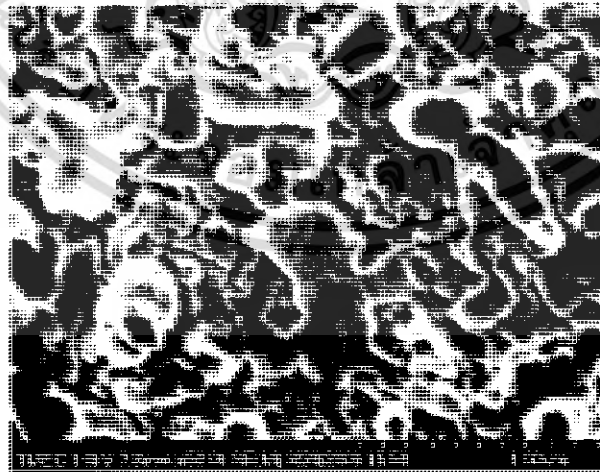
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 600°C



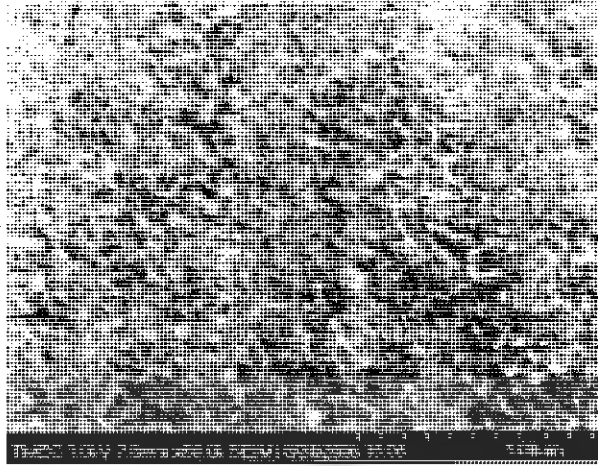
(ข) 650°C



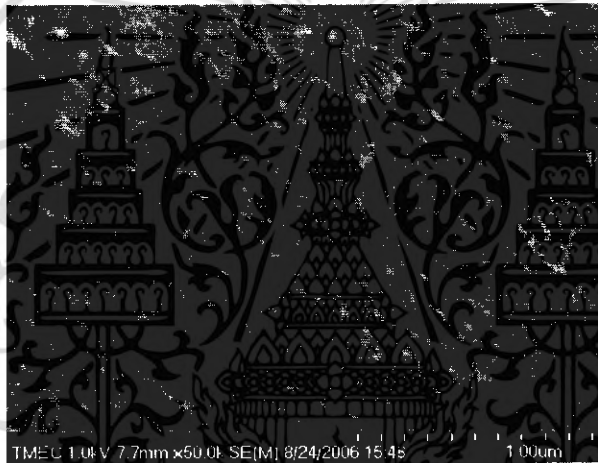
(ค) 700°C

รูปที่ 5.2 มีต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) 800°C

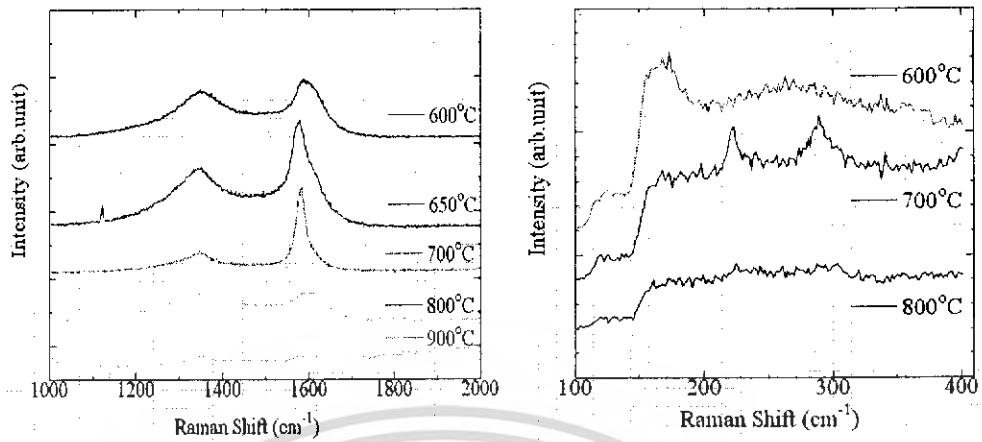


(จ) 900°C

รูปที่ 5.2 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ใช้เวลา 5 นาทีในการสปีดเตอร์ ที่อุณหภูมิ

(ก) 600°C (ข) 650°C (ค) 700°C (ง) 800°C และ (จ) 900°C

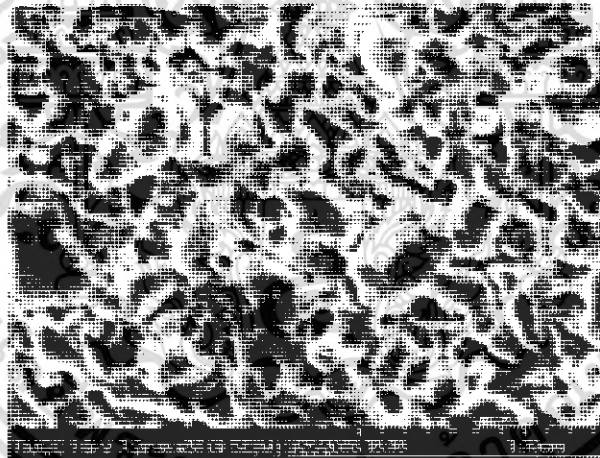
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



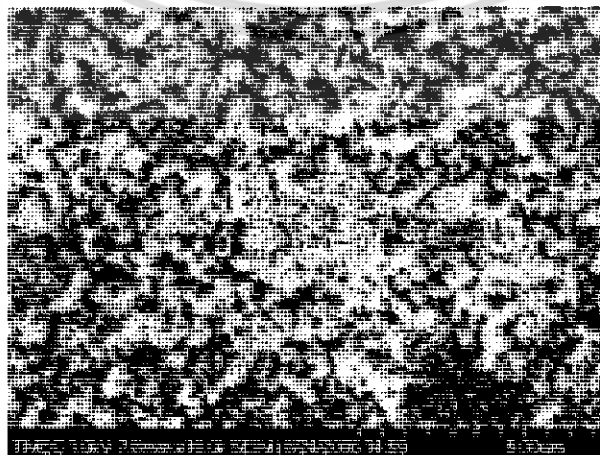
(ก) ความถี่สูง

(ข) ความถี่ต่ำ

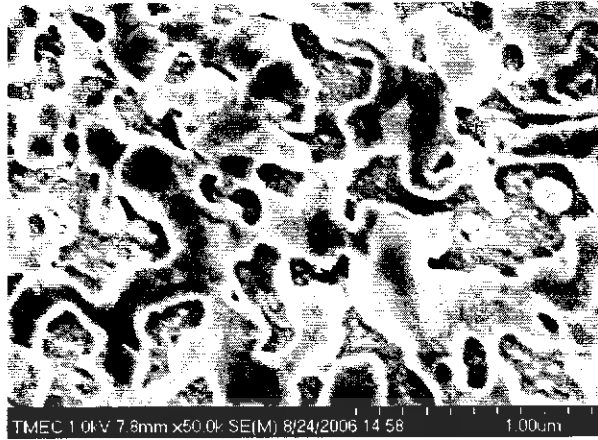
รูปที่ 5.3 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันช่วง 5 mbar โดยเงื่อนไขในการสปีดเตอร์คือ 5 นาที ในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM



(ก) 550°C



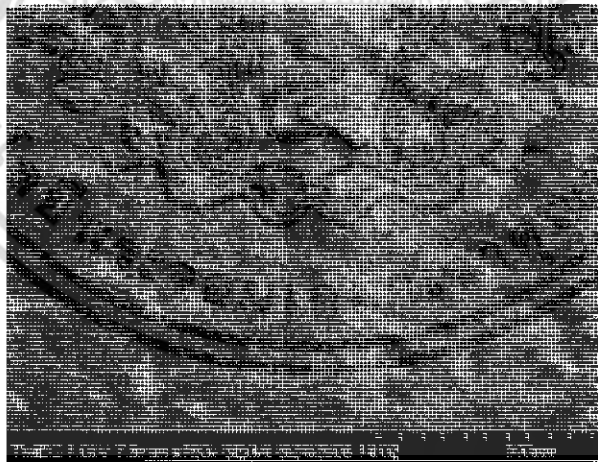
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา (ข) 600°C ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) 700°C



(ง) 800°C

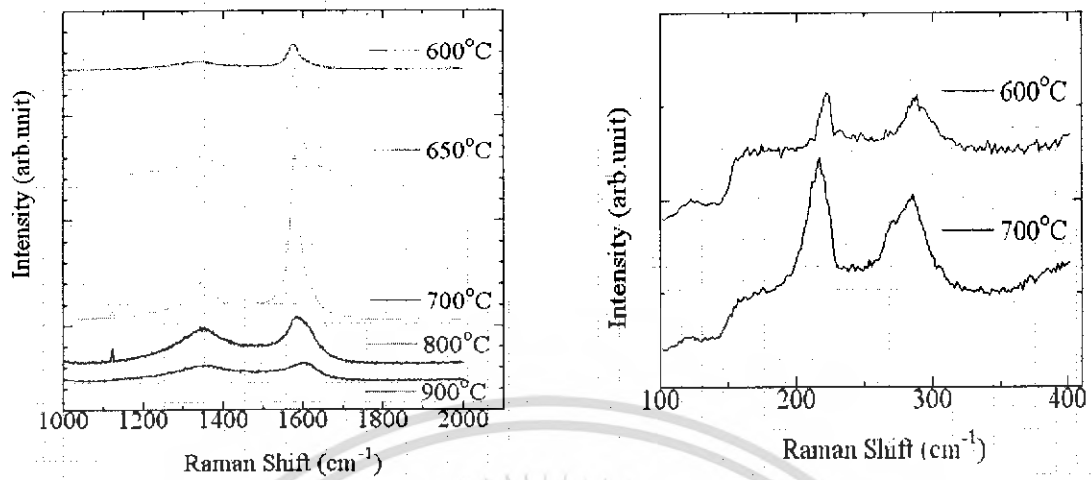


(จ) 900°C

รูปที่ 5.4 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ใช้เวลา 10 นาทีในการสปีดเตอร์ ที่อุณหภูมิ

(ก) 550°C (ข) 600°C (ค) 700°C (ง) 800°C และ (จ) 900°C

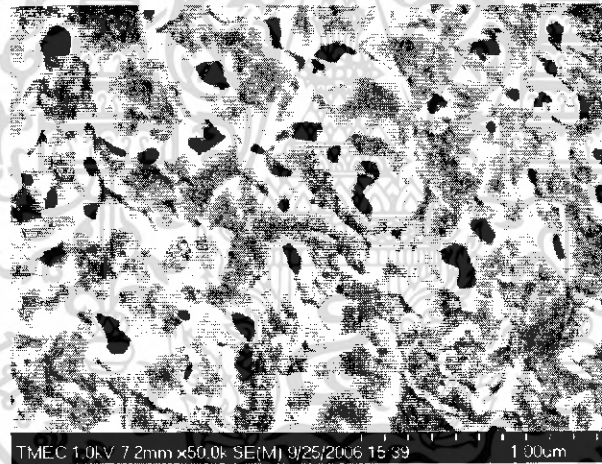
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



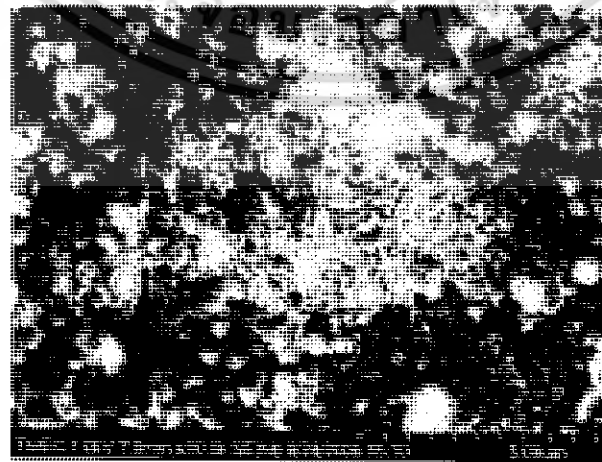
(ก) ความถี่สูง

(ข) ความถี่ต่ำ

รูปที่ 5.5 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันช่วง 5 mbar โดยเงื่อนไขในการสปีดเตอร์คือ 10 นาที ในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM

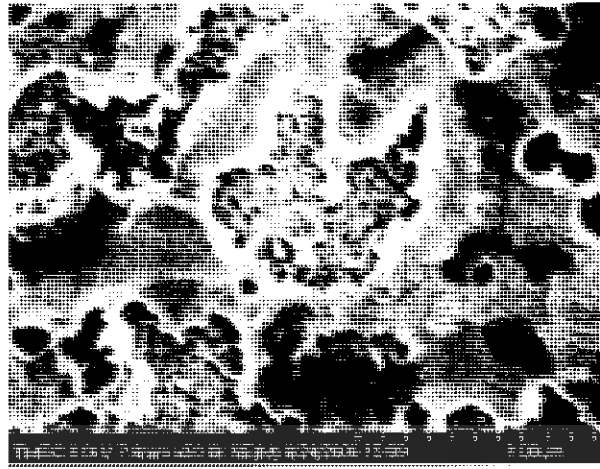


(ก) 600°C



(ข) 650°C

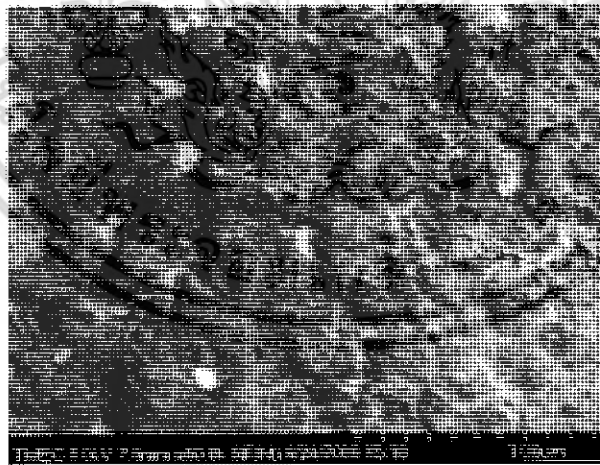
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.6(มีต่อ)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 700°C



(ข) 800°C

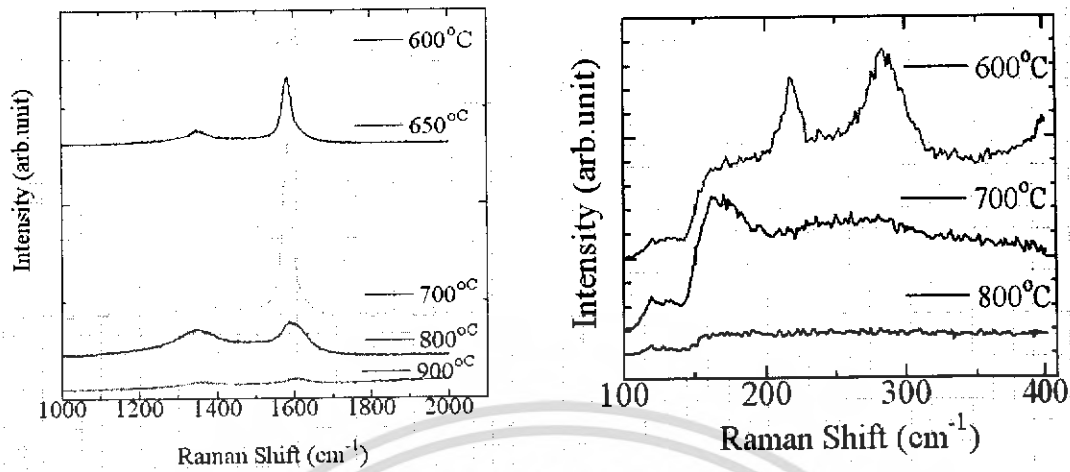


(ค) 900°C

รูปที่ 5.6 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ใช้เวลา 15 นาทีในการสปีเตอร์ ที่อุณหภูมิ

(ก) 550°C (ข) 600°C (ค) 700°C (ง) 800°C และ (จ) 900°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความถี่สูง

(ข) ความถี่ต่ำ

รูปที่ 5.7 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันช่วง 5 mbar โดยเงื่อนไขในการสปีดเตอร์คือ 15 นาที ในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM

ในรูปที่ 5.2, 5.4 และ 5.7 (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการสปีดเตอร์โดยใช้เวลาค้างกันที่อุณหภูมิ (ภายในท่อควือซ) 550°C, 600°C, 700°C, 800°C และ 900°C ตามลำดับเมื่อสังเกตผลการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ 600°C พบว่าอนุภาคของเหล็กเริ่มเกิดการรวมตัวกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าคุณภาพของเหล็กที่ใช้มีต่ำเกินไปจึงทำให้เกิดการรวมตัวกันแม้ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (700 – 900°C) จะสังเกตจากภาพ SEM จะเห็นว่าอนุภาคของเหล็กเริ่มละลายหายไปรวมตัวกับฐานรองซิลิคอนซึ่ง อย่างไรก็ตามจากรูปถ่าย SEM ก็ไม่สามารถบอกได้ว่ามีคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้นหรือไม่

เมื่อสังเกตจากรามานสเปกตรัมในรูปที่ 5.3(ก), 5.5(ก) และ 5.7(ก) ที่อุณหภูมิ 700 °C จะพบว่ามีพีคของ G-band (G-band ~1590cm⁻¹) ในอัตราส่วนที่สูงในทุก ๆ เงื่อนไขของการสปีดเตอร์ ไม่ว่าจะเป็นที่ใช้เวลา 5 นาที, 10 นาที และ 15 นาที ซึ่งเป็นพีครามานที่แสดงถึงคาร์บอนนาโนทิวป์ ส่วนพีคของ D-band ซึ่งเป็นพีครามานที่เกิดจากคาร์บอนที่มีพันธะไม่สมบูรณ์จะมีพีคในอัตราส่วนที่ต่ำ อย่างไรก็ตามพบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่า 700 °C พีคของ D-band จะมีค่าใกล้เคียงกับพีคของ G-band ซึ่งหมายความว่ามีความสมบูรณ์ของคาร์บอนนาโนทิวป์น้อยหรืออาจจะไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นเลยก็ได้ อาจจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิทำให้อนุภาคของเหล็ก

หลอมละลายรวมกับแผ่นซิลิกอนจึงทำให้มีส่วนของอนุภาคเหล็กซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์นั้นมียุ่่น้อยเกินไปจนไม่สามารถทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ในทางกลับกันพบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อยกว่า 700 °C พีกของ G-band จะมีค่าลดลงแต่ในส่วน D-band แทนจะมีค่าคงเดิมเมื่อเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งนั่นหมายความว่าค่าความเข้มของพีก G(G-band $\sim 1590\text{cm}^{-1}$) ซึ่งแสดงถึงคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่าน้อยลงแต่ยังกล่าวได้ว่าอาจจะมีคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้นไม่มากนักน้อย โดยสาเหตุที่ไม่สามารถวิเคราะห์ให้สามารถเห็นภาพที่ชัดเจนได้อาจเนื่องมาจากเหล็กที่ใช้ในการสปีดเตอร์นั้นมีคุณภาพค่อนข้างต่ำจึงทำให้เมื่อนำไปสังเคราะห์แล้วไม่สามารถพบคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างชัดเจน

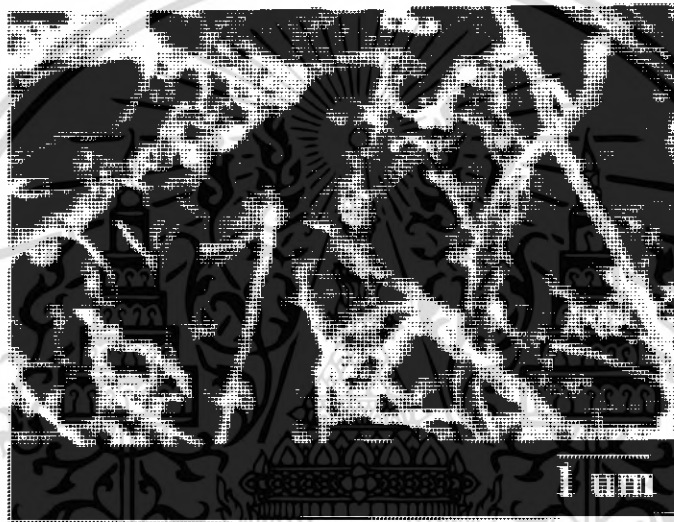
ในรูปที่ 5.3(ข), 5.5(ข) และ 5.7 (ข) แสดงรามานสเปกตรัมในโหมด RBM(radial breathing mode) ในย่านความถี่ต่ำ($150\text{-}400\text{cm}^{-1}$) ซึ่งโหมด RBM นี้จะเกิดขึ้นกับทิวป์ที่มีขนาดเล็กหรือ SWNTs และสัมพันธ์กับขนาดของทิวป์ ตามสมการ $d(\text{nm}) = 248(\text{cm}^{-1})/\omega\text{cm}^{-1}$ โดยที่ d คือขนาดของทิวป์ ω คือรามานชิฟท์(Raman shift) จากรูปด้านบนพบว่าที่ตัวแปรต่าง ๆ กันไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ หรือ ระยะเวลาในการสปีดเตอร์นั้นเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่าขณะนี้ยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่า รามานสเปกตรัมในโหมด RBM(radial breathing mode) แสดงถึงลักษณะที่แน่นอนอย่างใดอย่างหนึ่งเนื่องจากข้อมูลที่ได้นั้นกระจัดกระจายและมีความไม่สม่ำเสมอมากเกินไป ซึ่งอย่างไรก็ตามต้องทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อสรุปโดยอาจจะทำการทดลองที่ตัวแปรต่าง ๆ กัน โดยจะรวบรวมข้อมูลให้มากขึ้นเพื่อหาข้อสรุปต่อไป

5.3 ผลของเงื่อนไขการชุบไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์

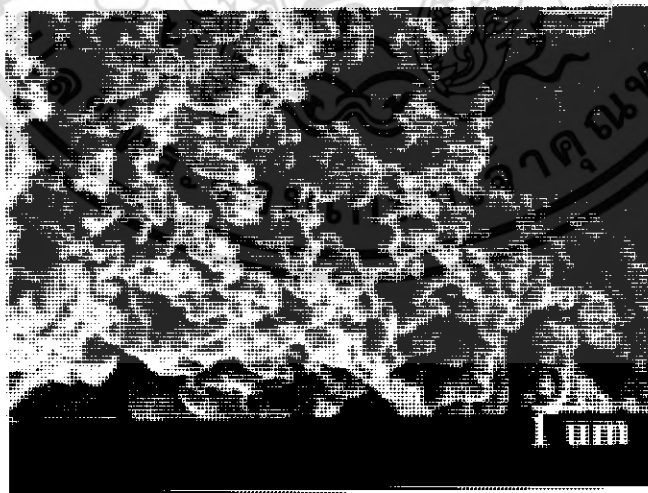
ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาว่าเงื่อนไขที่แตกต่างกันทางด้านปริมาณของกระแสที่ใช้ในส่วนของการชุบไฟฟ้าเมื่อมาทำการทดลองที่แตกต่างกัน โดยจะเปรียบเทียบโดยมีตัวแปรที่สำคัญคือปริมาณของกระแสแล้วนำไปสังเคราะห์โดยใช้วิธีเทอร์มอลซีวีดีมีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์อย่างไร ในการทดลองนี้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการชุบไฟฟ้าโดยใช้หนักเกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 0.07 A, 0.1 A, 0.15 A, และ 1 A. โดยสภาวะอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองสามารถดูได้จากตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ปริมาณกระแสและตัวแปรอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ปริมาณกระแส	ทำการปรับเปลี่ยนที่ 0.07 A. 0.1 A. 0.15 A. และ 1 A.(1 min)
ความดัน	10 mbar
เวลา	10min
แอลกอฮอล์	เอทานอล
โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา	นิกเกิลที่ได้จากการชุบไฟฟ้า



(ก) 700°C

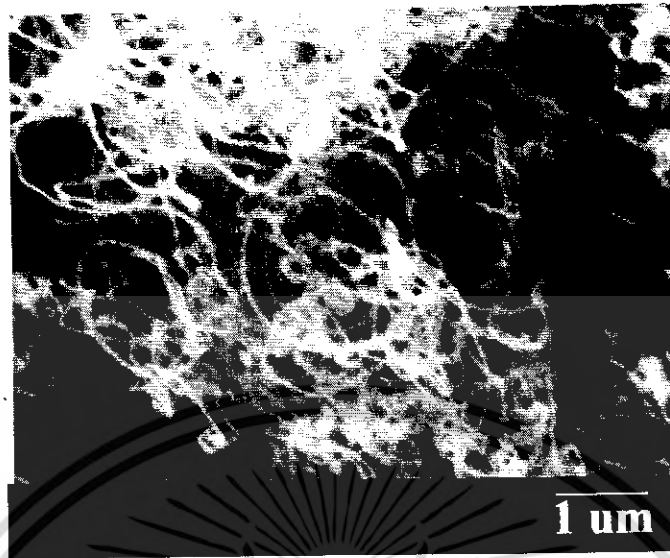


(ข) 800°C

รูปที่ 5.8 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์โดยใช้กระแส 0.07 A. ที่อุณหภูมิ

(ก) 700°C (ข) 800°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 700°C

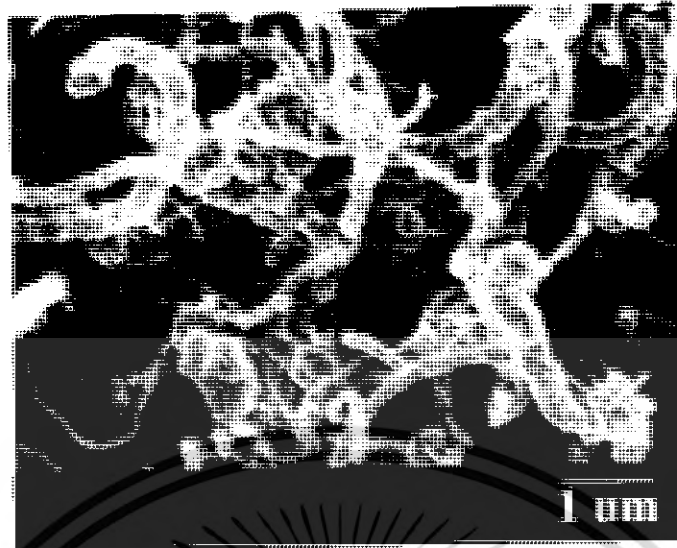


(ข) 800°C

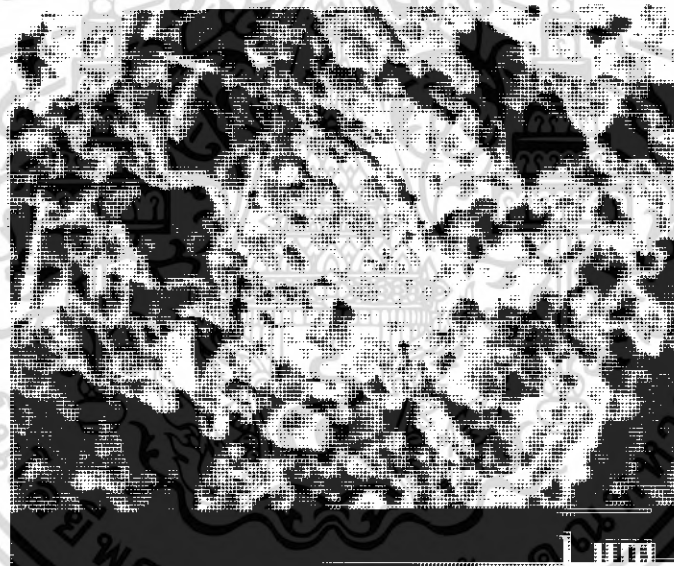
รูปที่ 5.9 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์โดยใช้กระแส 0.1 A. ที่อุณหภูมิ

(ก) 700°C (ข) 800°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 700°C

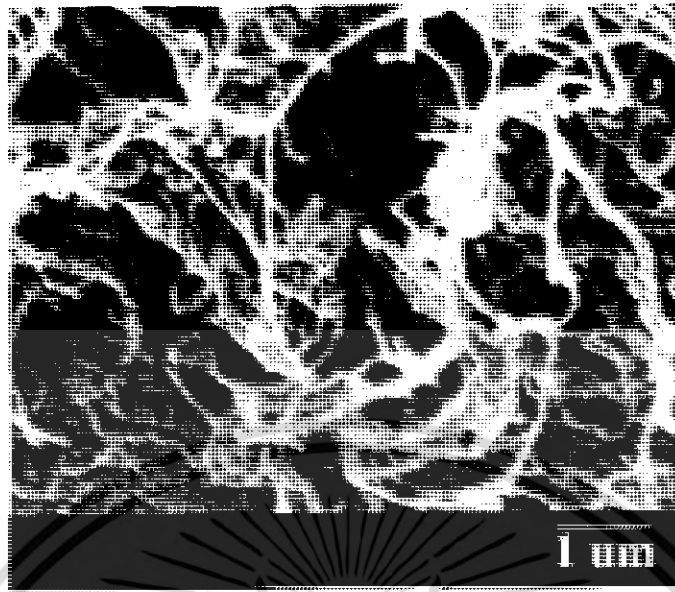


(ข) 800°C

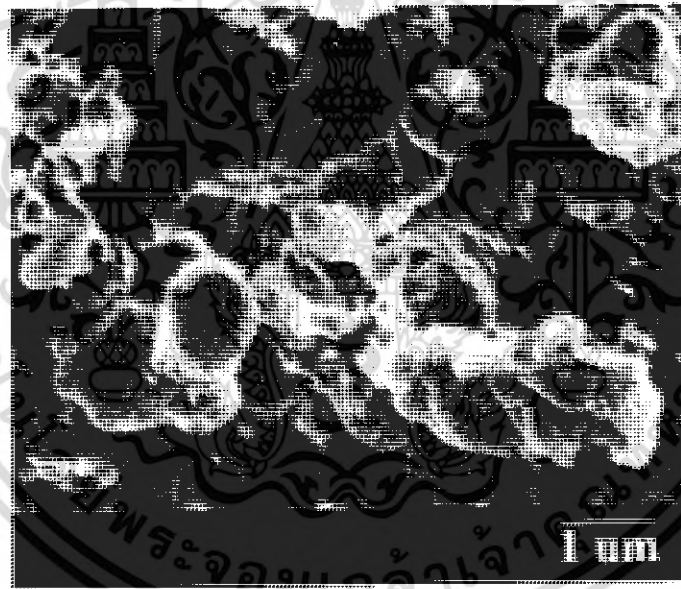
รูปที่ 5.10 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์โดยใช้กระแส 0.15 A. ที่อุณหภูมิ

(ก) 700°C (ข) 800°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 700°C

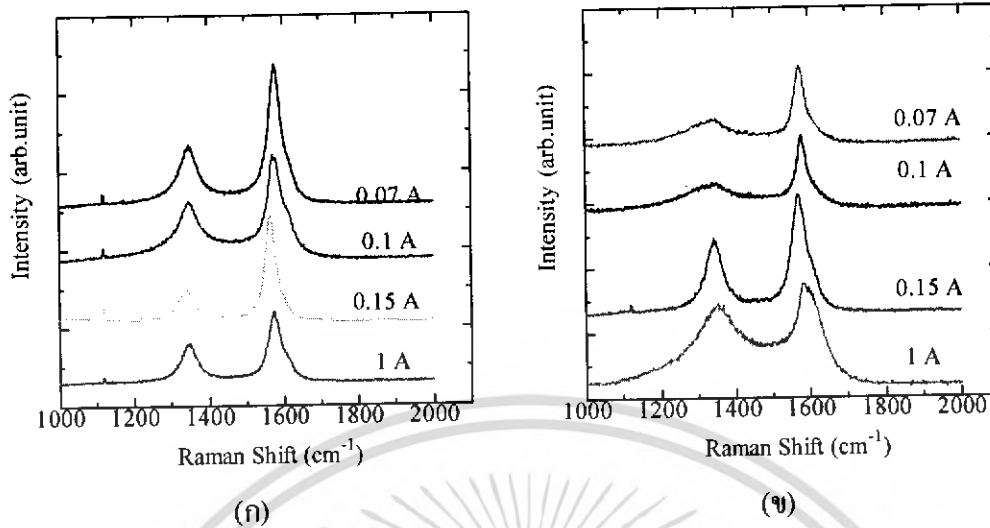


(ข) 800°C

รูปที่ 5.11 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์โดยใช้กระแส 1 A. ที่อุณหภูมิ

(ก) 700°C (ข) 800°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

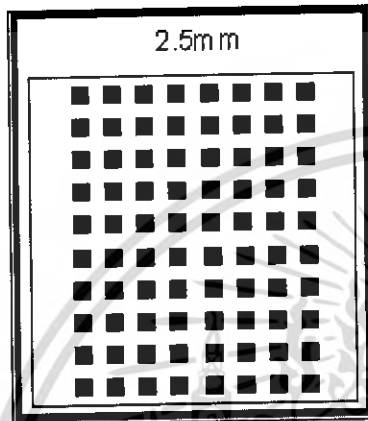


รูปที่ 5.12 รามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่กระแสต่าง ๆ ในอุณหภูมิ (ก) 700°C (ข) 800°C

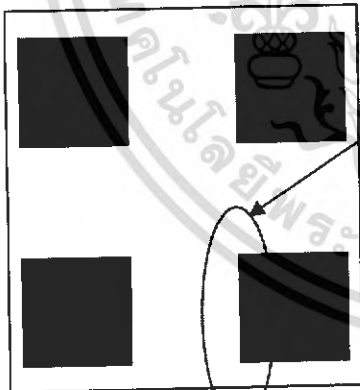
ในรูปที่ 5.8, 5.9, 5.10 และ 5.11 (ก) และ (ข) แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ทำการชุบไฟฟ้าโดยใช้ปริมาณกระแสต่างกันที่อุณหภูมิ (ภายในท่อควีซ), 700°C และ 800°C ตามลำดับเมื่อสังเกตผลการทดลองที่อุณหภูมิ 700°C พบว่าเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นอย่างไรก็ตามเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (800°C) จะสังเกตจากภาพ SEM จะเห็นว่าคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดอย่างหนาแน่นน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 700°C อย่างไรก็ตามจากรูปถ่าย SEM ก็ไม่สามารถบอกได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ในอุณหภูมิช่วง 700°C ที่สนใจในการชุบไฟฟ้าแบบใดมีความหนาแน่นมากกว่ากัน จึงต้องทำการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโกปีในรูปที่ 5.12 ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิ, ปริมาณกระแสไฟฟ้า และเวลาที่ใช้ในการชุบล้วนมีผลต่อความหนาแน่นของทิวป์ ในรูปที่ 5.12 แสดงรามานสเปกตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่ปริมาณกระแสต่าง ๆ กัน จากรูปที่ 5.12(ก) จะเห็นว่าปริมาณกระแส 0.15 A มีค่าความเข้มของพีค G (G-band $\sim 1590\text{cm}^{-1}$) ซึ่งแสดงถึงคาร์บอนนาโนทิวป์ มีค่าค่อนข้างห่างกับค่าความเข้มของพีค D (D-band $\sim 1330\text{cm}^{-1}$) ซึ่งแสดงถึงอะมอร์ฟัสคาร์บอนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึก อย่างไรก็ตามที่ปริมาณกระแสเพิ่มขึ้นแต่ใช้เวลาสั้นลง จะพบว่าความเข้มของพีค D เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของอะมอร์ฟัสคาร์บอนในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ทิวป์ที่สังเคราะห์ได้มีความหนาแน่นลดลง ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากการที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์น้อยเกินไปทำให้ความหนาแน่นของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มากพอ จึงเกิดเป็นสิ่งที่ส่งผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ อย่างไรก็ตามต้องทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่แน่ชัดต่อไป

5.3 ผลของการทำลวดลายจากคาร์บอนนาโนทิวป์โดยการชุบไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะทำการนำเอาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นนิกเกิลจากการชุบไฟฟ้ามาทำลวดลายโดยใช้ลายดังในภาพที่ 5.13 มาเป็นต้นแบบแล้วนำมาทำการชุบไฟฟ้าเสร็จแล้วจึงนำไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ต่อไป



รูปที่ 5.13 ภาพแสดงลายต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.14 ภาพแสดงส่วนที่เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ตามลายต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองโดยใช้ฐานรองที่ได้จากการสเปกโตรอานุภาคเหล็กลงบนซิลิกอนและใช้แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เราพิจารณาในส่วนของภาพจากเครื่อง SEMs โดยเมื่อสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ (600°C) จะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคเหล็กซึ่งไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ในการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำขนาดนี้ ซึ่งอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากคุณภาพของเหล็กที่ใช้ในการสเปกโตรนั้น ไม่มีคุณภาพที่ดีพอ จึงทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ยากเนื่องจากโลหะตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามเมื่อเราพิจารณาโดยใช้กราฟรามานสเปกโตรสโคปีพบว่าที่อุณหภูมิที่ดีที่สุดนั้นมีความเข้มของพีค D ก่อนข้างต่ำแค่ความเข้มของพีค G ก็มีความสูงพอสมควร ซึ่งยังแสดงให้เห็นถึงว่ามีคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้นแต่น้อยมากโดยสาเหตุน่าจะมาจากที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเฉพาะส่วนของกราฟรามานสเปกโตรสโคปีพบว่า **สถานะที่สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีประสิทธิภาพดีที่สุดจากการทดลองในขณะนี้ คือ ที่อุณหภูมิ 700°C ที่ความดันช่วง 5mbar ที่เวลา 10min ใช้เอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน**

ในส่วนของการทดลองโดยใช้นิกเกิลที่อยู่บนฐานรองสแตนเลสที่ทำเป็นลวดลายจากการชุบไฟฟ้านั้น พบว่าอุณหภูมิต่ำมีความสำคัญอย่างยิ่งในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยหากทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C จะมีการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ค่อนข้างมากและมีความเข้มของพีค G ค่อนข้างสูง และโดยการเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจาก SEM เมื่อสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (800°C) จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ขึ้นหนาแน่นน้อยกว่าที่การสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700°C และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีทำให้ทราบว่าอุณหภูมิต่ำส่งผลต่อความหนาแน่นของทิวป์ ซึ่งเมื่อสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800°C ความเข้มของพีค D จะเพิ่มขึ้น

สำหรับผลกระทบของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบไฟฟ้าแล้วนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นพบว่าที่ปริมาณกระแส 0.15 A ความหนาแน่นของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ค่อนข้างมากโดย หากเทียบกับที่ปริมาณกระแสอื่น ๆ ที่ทำการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ในเบื้องต้นว่าปริมาณกระแสนั้นมีความสำคัญเช่นกันเพราะกระแสมากยิ่งทำให้เกิดการรวมตัวของนิกเกิลมากทำให้มีความหนาแน่นของฟิล์มมาก ทิวป์ที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณกระแสเพิ่มขึ้นเป็น 1 A ความหนาแน่นกลับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดลองนั้นน้อยมากโดยใช้เวลา 1 นาที จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณกระแส และ เวลาที่ใช้ในการชุบไฟฟ้านั้นมีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยถึงแม้ปริมาณกระแสมากแต่ใช้เวลาน้อย ความหนาแน่นของทิวป์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะไม่เท่ากับการชุบ โดยใช้ปริมาณกระแสเพียงแต่ใช้เวลาในการชุบมาก อย่างไรก็ตามพบว่า **สภาวะที่สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้มีประสิทธิภาพดีที่สุดจากการทดลองโดยใช้การชุบไฟฟ้า คือ ชุบที่ปริมาณกระแส 0.15 A ใช้เวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 700°C**

จากผลการทดลองข้างต้นเมื่อนำไปพิจารณาเฉพาะในส่วนที่เป็นลวดลายที่ได้จากการชุบไฟฟ้าตามลายต้นแบบ พบว่าเกิดความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเจนในส่วนของบริษัทที่มีลวดลาย และบริเวณที่เป็นฐานรองสแตนเลสซึ่งไม่มีลวดลาย โดยส่วนที่มีลวดลายนั้นมีคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้นแต่ในส่วนที่ไม่มีลวดลายนั้นไม่มีคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้น จึงสรุปได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้นเฉพาะในส่วนที่มีโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจากการทดลองในส่วนนี้ก็สามารถนำไปสู่การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีลวดลายที่ซับซ้อนกว่านี้ได้ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Iijima, Nature (London) 354 (1991) 56-58
- [2] สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ และ จิตติ หนูแก้ว, “งานวิจัยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี CVD ที่กำลังเริ่มในไทย”, วารสารLAB.TODAY, ฉบับที่ 13, 2547, หน้า 14-20
- [3] “ท่อนาโนคาร์บอน”, <http://www.technologymedia.com/article/detail.asp?arid=2484&pid=257>
- [4] “Wondrous World of Carbon Nanotubes”, <http://students.chem.tue.nl/ifp03/synthesis.html>
- [5] T. Kato et al, Chem. Phys. Lett 381 (2003) 422-426
- [6] “Cover Story”, <http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue4/covers/cover1.html>
- [7] G.S. Choi, Y.S.Cho, K.H.Son, D.J.Kim, “Mass production of carbon nanotubes using spin-coating of nanoparticles”, Microelectronic Engineering 66 (2003) 77-82
- [8] Yoichi Murakami, Thesis: CVD Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes and their Anisotropic Optical Properties, Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, December 2004.
- [9] K. Eric Drexler, Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology
<http://www.foresight.org/EOC/Engines.pdf>
- [10] สมนึก บุญพาไสว, “นาโนเทคโนโลยีในศตวรรษที่ 21”,
<http://www.ipst.ac.th/design/document/21st-century-technology.pdf>
- [11] “เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำและวงจรรวม”, <http://www.student.nu.ac.th/electronic/Inn.doc>
- [12] การชุบและเคลือบผิว http://mylesson.swu.ac.th/gi437/O_body1.html
- [13] การวิเคราะห์และทดสอบ, <http://www.pcd.go.th>
- [14] กองแผนงานและพัฒนา สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน, ผลการสำรวจอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะและพลาสติก, 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้