

การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความถี่ร้อน

SELECTIVE GROWTH OF CARBON NANOTUBE FILM BY
HOT FILAMENT CVD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-040-391

การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน

SELECTIVE GROWTH OF CARBON NANOTUBE FILM BY
HOT FILAMENT CVD



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82743
วัน,เดือน,ปี..... 22 ก.ค. 2551

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ. 2551

**SELECTIVE GROWTH OF CARBON NANOTUBE FILM BY
HOT FILAMENT CVD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONIC
ENGINEERING SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตั้ง 2008 จนถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL – 2008 – EN – M – 040 – 331



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน
Selective Growth of Carbon Nanotube Film by Hot Filament CVD

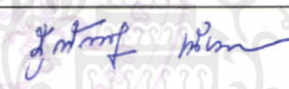
นักศึกษา นายรัฐพงษ์ นาคาไชย

รหัสประจำตัว 47060457

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
รศ.ดร.วรากร	เกษมสุวรรณ	
รศ.สมศักดิ์	เชียรศิริกุล	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
รศ.ดร.เต็มพงษ์	เพ็ชรกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 20 พฤษภาคม 2551 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.วิวีวรรณ ชินะตระกูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....30.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๕๑.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขด ลวดความร้อน
นักศึกษา	นายรัฐพงษ์ นาคาไชย
รหัสประจำตัว	47060457
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาสังเคราะห์และการเตรียมฐานรองสำหรับการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งขั้นตอนทั้งสองส่วนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการที่จะนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจะใช้วิธี CVD แบบขดลวดความร้อน กระทำที่ความดันบรรยากาศ มีแหล่งจ่ายไอระเหยคือเอทานอลผสมก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนพอเหมาะ ใล้ลวดความร้อนถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 2000 องศาเซลเซียส ใช้วัสดุฐานรอง 4 ชนิด ได้แก่ ฐานรองสารประกอบกราฟต์หรือไส้ดินสอ ฐานรองคาร์บอนอัดแน่นหรือถ่าน ฐานรองซิลิคอน และฐานรองทองแดง โดยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงของเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิฐานรอง 550 – 750 องศาเซลเซียส กำลังงาน 105 – 140 วัตต์ เวลาในการสังเคราะห์ 25 – 40 นาที และอัตราส่วนของไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายต่อไฮโดรเจนรวมประมาณ 8 – 12 % โดยปริมาตร ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้บนฐานรองทั้งหมด และได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนตัวแปรบางชนิด เช่น ใช้สารแหล่งจ่ายจากเอทานอลเปลี่ยนเป็นอะซีโตน ใช้ตัวแคตะไลต์จากนิเกิลเปลี่ยนเป็นผงเหล็ก และเลือกวัสดุฐานรองที่นำมาทำการศึกษาคือ ซิลิคอนและทองแดง ผลปรากฏว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้ และเป็นแบบผนังหลายชั้น

ในขั้นตอนต่อไป นำเสนอวิธีการเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยการสร้างลวดลายบนฐานรอง เพื่อต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นในบริเวณที่ต้องการ โดยใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลและสังเคราะห์ด้วยวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) ในการทดลองนี้ ศึกษาการสร้างลวดลายด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การใช้หน้ากากป้องกัน กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และการชุบด้วยไฟฟ้า ฐานรอง ที่นำมาศึกษามี 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอนและทองแดง ผลการทดลองปรากฏว่า สามารถเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดในบริเวณที่ต้องการได้ และสุดท้ายได้ประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานสำหรับตรวจจับแอลกอฮอล์

Thesis Title	Selective Growth of Carbon Nanotube Film by Hot Filament CVD
Student	Mr. Rattapong Nakachai
Student ID.	47060457
Degree	Master of Engineering
Program	Electronic Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Toempong Phetchakul

Abstract

This thesis presents the synthesis and selective growth of carbon nanotube film. The HFCVD at atmospheric pressure was used in this work. The vapor source was ethanol mixed with hydrogen gas at appropriated ratio. The filament was heated up to around 2000°C. The four kinds of substrate were graphite, carbon, silicon and copper substrates. By this system CNTs can be grown at the condition substrate temperature in the range 550 - 750°C, 105-140 watt, 25-40 minute and 8-12 vol% of the ratio of H₂ gas passed through ethanol (for bubbling) to total H₂ gas. The results showed that CNTs film can be synthesized on all substrates and they were multi-walled.

The selective growth of carbon nanotube has been studied by patterning on substrate for controlling the growth of carbon nanotube by Ni as catalyst and synthesis by HFCVD. The research studies some techniques for selective growth which were shadow mask, photolithography and electroplating. Substrates for this studies were silicon and copper. CNTs can be selectively grown well. Finally, the resistive chemical sensor from CNTs film was applied for detecting ethanol vapor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำชี้แนะเกี่ยวกับการสังเคราะห์และการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากรองศาสตราจารย์ ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ เพื่อน และพี่ ๆ น้อง ๆ ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำชี้แนะด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณกวนย นุญหนัก จากบริษัท WD ในการใช้เครื่องมือ Raman Spectroscopy

ขอขอบคุณ คุณเอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์ และคุณนิมิตร สมหวัง จาก TMEC ในการใช้เครื่องมือ SEM และ EDX

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยห่วงใยและให้การสนับสนุนการศึกษา ผู้วิจัยมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
สัญลักษณ์.....	XV
ศัพท์เทคนิค.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	5
2.1 ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	5
2.1.1 Single Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs).....	6
2.1.2 Multiple Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs).....	6
2.2 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	7
2.2.1 คุณสมบัติทางกล.....	7
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	9
2.2.3 คุณสมบัติทางความร้อน.....	9
2.3 การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาประยุกต์ใช้งาน.....	10
2.3.1 ประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ.....	11
2.3.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์.....	12
2.3.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4	กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และเทคโนโลยีไมโคร-อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง.....	39
4.1	กระบวนการออกซิเดชันสำหรับสร้างชั้นฉนวน.....	39
4.1.1	การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation).....	40
4.1.2	การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation).....	41
4.2	กระบวนการสปีดเตอร์ริงสำหรับเคลือบแคตะไลต์และขั้วไฟฟ้า.....	41
4.3	กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับสร้างลวดลาย.....	43
4.3.1	การเตรียมผิวหน้าแผ่น.....	44
4.3.2	การเคลือบน้ำยาไวแสง.....	45
4.3.2.1	แบบสปินเนอร์ (Spinner).....	45
4.3.2.2	แบบสเปรย์ (Spray Coating).....	45
4.3.2.3	แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating).....	45
4.3.3	การอบขึ้น Prebake หรือ Softbake.....	46
4.3.4	การปรับซ็อนมาสก์ (Mask Alignment).....	46
4.3.5	การฉายแสง (Exposure).....	49
4.3.6	การล้างน้ำยาไวแสง (Resist Development).....	50
4.3.7	การเอตซิงค์ (Etching).....	50
4.4	กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบ ขดลวดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ.....	51
บทที่ 5	กระบวนการทดลอง การสร้างลวดลายและผลการทดลอง.....	54
5.1	อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	54
5.2	ขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์.....	55
5.3	กระบวนการทดลอง.....	57
5.3.1	ฐานรองที่ใช้สำหรับการทดลอง.....	57
5.3.1.1	ฐานรองสารประกอบกราฟต์หรือไส้ดินสอด.....	57
5.3.1.2	ฐานรองคาร์บอนอัดแน่นหรือถ่าน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งในพิธีการยกย่องเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตของเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำเผยแพร่

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3.1.3 ฐานรองซิลิคอน.....	57
5.3.1.4 ฐานรองทองแดง.....	57
5.3.2 แคตะไลต์ที่ใช้สำหรับการทดลอง.....	57
5.3.2.1 ผงเหล็ก.....	57
5.3.2.2 นิกเกิล.....	57
5.3.3 สารแห้งง่ายที่ใช้สำหรับการทดลอง.....	57
5.3.3.1 แอลกอฮอล์.....	57
5.3.3.2 อะซีโตน.....	57
5.3.4 สารเคมีที่ใช้สำหรับสำหรับสกัดชั้นนิกเกิล.....	58
5.3.5 วิธีการเตรียมฐานรอง.....	58
5.3.4.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน.....	58
5.3.4.2 การเตรียมฐานรองทองแดง.....	58
5.3.5 เงื่อนไขในการสังเคราะห์.....	58
5.3.6 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ลงบน ฐานรองสารประกอบกราไฟต์และฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอน	59
5.3.7 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ลงบน ฐานรองซิลิคอน.....	62
5.3.7.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ด้วย SEM.....	63
5.3.7.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ด้วย EDX.....	64
5.3.7.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ด้วย Raman Spectroscopy.....	65
5.3.8 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ลงบน ฐานรองทองแดง.....	66
5.3.8.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ด้วย SEM.....	67
5.3.8.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ด้วย EDX.....	68
5.3.8.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ด้วย Raman Spectroscopy.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้
เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.4	เทคนิคการเตรียมฐานรองสำหรับการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	70
5.4.1	การสร้างลวดลายโดยวิธีการใช้หน้ากากป้องกัน (Shadow mask).....	70
5.4.1.1	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM.....	72
5.4.1.2	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX.....	73
5.4.1.3	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy	73
5.4.2	การสร้างลวดลายโดยวิธีกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography).....	74
5.4.2.1	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM.....	77
5.4.2.2	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX.....	78
5.4.2.3	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy.....	79
5.4.3	การสร้างลวดลายโดยวิธีการชุบทางไฟฟ้า (Electroplating).....	80
5.4.3.1	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM.....	82
5.4.3.2	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX.....	84
5.4.3.3	การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy.....	84
5.5	กระบวนการสร้างเป็นโครงสร้างความต้านทาน.....	84
5.5.1	การเตรียมผิวหน้าให้สะอาด.....	86
5.5.2	กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	87
5.5.3	กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบโลหะแคดเมไลต์นิกเกิล.....	87
5.5.4	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาร์ค 1 สำหรับสร้างลวดลายนิกเกิล.....	88
5.5.5	กระบวนการสกัดชั้นนิกเกิลด้วยวิธีการ wet etching.....	89
5.5.6	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาร์ค 2 สำหรับเปิดช่อง เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า.....	89
5.5.7	กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง.....	90
5.6	การนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากห้องปฏิบัติการ

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	97
เอกสารอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities.....	102
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus.....	103
ภาคผนวก ค. เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	104
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด.....	7
2.2 โครงสร้างของ MWCNTs.....	7
2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	8
2.4 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศ.....	9
2.5 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ.....	10
2.6 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างสายเคเบิลสำหรับลิฟท์อวกาศ.....	11
2.7 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการแสดงผล.....	12
2.8 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างทรานซิสเตอร์.....	13
2.9 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างตัวเซนเซอร์เคมี.....	14
2.10 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน.....	14
2.11 วิธี Arc Discharge.....	16
2.12 วิธี Laser Ablation.....	17
2.13 วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD).....	18
2.14 วิธี Thermal Chemical Vapor Deposition.....	19
2.15 วิธี Vapor Phase Growth.....	20
2.16 วิธี Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition (PE-CVD).....	20
2.17 วิธี High Pressure CO Disproportionate Process.....	21
2.18 วิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD).....	23
2.19 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Root Growth.....	24
2.20 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Tip Growth.....	25
3.1 โค้ดโปรแกรมการทำงานของเครื่อง SEM.....	27
3.2 ภาพแสดงอำนาจการแยกแยะของ SEM.....	30
3.3 ภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	30
3.4 โค้ดโปรแกรมของ Transmission Electron Microscope.....	31
3.5 ตัวอย่างภาพถ่าย TEM ของท่อคาร์บอน.....	32
3.6 โค้ดโปรแกรมการทำงานของเครื่องระบบ Energy Dispersive X-ray.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากท่านมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ภาพจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ.....	34
3.8 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer.....	35
3.9 ระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering.....	36
3.10 กราฟรามานที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	37
4.1 ภาพถ่ายของเตาให้ความร้อนสำหรับสร้างชั้นฉนวน.....	40
4.2 ภาพถ่ายของเครื่องสปีดเตอร์ริงสำหรับเคลือบแคตะไลต์และขั้วไฟฟ้า.....	41
4.3 ระบบการสปีดเตอร์แบบอาร์เอฟไดโอด.....	42
4.4 ภาพถ่ายของเครื่องฉายแสงสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	43
4.5 ขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	44
4.6 กระบวนการพิมพ์ภาพ โดยวิธี Projection Printing.....	48
4.7 กระบวนการพิมพ์ภาพ โดยวิธี Step and Repeat Projection.....	48
4.8 แสงสเปกตรัมของหลอดเมอร์คูรี่.....	49
4.9 ภาพที่แสดงถึงผลของการเอตซิงค์.....	50
4.10 แผนภาพแสดงระบบ HFCVD.....	52
4.11 ภาพถ่ายอุปกรณ์ของระบบ HFCVD ที่สร้างขึ้นเองอย่างง่าย.....	52
5.1 กระบวนการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1.....	56
5.2 กระบวนการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2.....	56
5.3 ภาพถ่ายจาก SEM ของตัวแคตะไลต์ผงเหล็กที่ถูกเคลือบอยู่บนพื้นผิว.....	59
5.4 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอน.....	61
5.5 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองซิลิคอน.....	63
5.6 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองซิลิคอน.....	64
5.7 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอน.....	65
5.8 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองทองแดง.....	67
5.9 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองทองแดง.....	69
5.10 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดง.....	69
5.11 กระบวนการเคลือบนิเกิลด้วยการสปีดเตอร์ริง โดยมีหน้าฉากป้องกัน.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากท่านมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 ภาพถ่ายจาก SEM บนฐานรองซิลิคอนบริเวณที่ถูกเคลือบด้วยนิเกิล.....	72
5.13 ภาพถ่ายจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวป์ตรงบริเวณขอบเขตของลวดลายวงกลม.....	72
5.14 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิล.....	73
5.15 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอน.....	74
5.16 วิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	75
5.17 มาร์คของลวดลายต่างๆที่ได้ออกแบบไว้สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	77
5.18 ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณขอบเขตของลวดลายนิเกิล.....	78
5.19 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายนิเกิล หลังทำการสังเคราะห์.....	79
5.20 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอน.....	79
5.21 ภาพแสดงการซุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิลบนฐานรองทองแดง.....	80
5.22 วิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	81
5.23 ภาพถ่ายของลวดลายนิเกิลที่เป็นเส้นตรงบนฐานรองทองแดง.....	82
5.24 ภาพถ่ายจาก SEM ของนิเกิลที่ได้จากการซุบด้วยไฟฟ้า.....	83
5.25 ภาพถ่ายจาก SEM หลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์.....	83
5.26 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองทองแดงที่มีลวดลาย เส้นตรงหลังทำการสังเคราะห์.....	84
5.27 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองทองแดง.....	85
5.28 แม่สั๊กที่หนึ่ง สำหรับสร้างลวดลายของแคตะไลต์นิเกิล.....	86
5.29 แม่สั๊กที่สอง สำหรับสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าทองแดง.....	86
5.30 การเตรียมแผ่นสำหรับสร้างชั้นฉนวน.....	87
5.31 นิเกิลถูกเคลือบบนซิลิคอนไดออกไซด์.....	88
5.32 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแม่สั๊กที่หนึ่ง.....	88
5.33 กระบวนการสกัดชั้นนิเกิลด้วย wet etching.....	89
5.34 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแม่สั๊กที่สอง.....	90
5.35 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง.....	91

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.36 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงานก่อนทำการสังเคราะห์.....	91
5.37 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงานหลังจากสังเคราะห์แล้ว.....	92
5.38 ภาพถ่ายระบบสำหรับตรวจวัดก๊าซ.....	92
5.39 ภาพแสดงการไล่อากาศภายในระบบออก.....	93
5.40 ภาพแสดงการพัฒนาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าสู่ระบบ.....	94
5.41 กราฟแสดงคุณสมบัติการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบที่ไม่ให้ความร้อน.....	94
5.42 กราฟแสดงคุณสมบัติการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบที่ให้ความร้อน.....	95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

E	ความหมาย
Fe	สนามไฟฟ้า
Ni	เหล็ก
H ₂	นิเกิล
N ₂	ก๊าซไฮโดรเจน
O ₂	ก๊าซไนโตรเจน
Ar	ก๊าซออกซิเจน
V	ก๊าซอาร์กอน
W	แรงดัน
eV	กำลังงานไฟฟ้า
CNTs	อิเล็กตรอน โวลต์
C ₂ H ₅ OH	คาร์บอนนาโนทิวบ์
SWCNTs	แอลกอฮอล์
MWCNTs	คาร์บอนนาโนทิวบ์
A	ชนิดผนังชั้นเดียว
cm ²	คาร์บอนนาโนทิวบ์
K	ชนิดผนังหลายชั้น
°C	กระแส
Co	ตารางเซนติเมตร
Mo	เคลวิน
Si	องศาเซลเซียส
Cu	โคบอลต์
T	โมลิบดีนัม
t	ซิลิคอน
A	ทองแดง
	อุณหภูมิ
	เวลา
	องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

การดูดซับ	Adsorption
การเจริญเติบโต	Growth
การกระเจิง	Scattering
การดูดซับทางกายภาพ	Physical adsorption
กราไฟต์	Graphite
แกรฟีน	Graphene
อะซีโตน	Acetone
แอมโมเนีย	Ammonia
ระยะทางการยึดเหนี่ยว	Binding distance
พลังงานการยึดเหนี่ยว	Binding energy
ท่อนาโนคาร์บอน	Carbon nanotube
พันธะโควาเลนต์	Covalent band
น้ำปราศจากไอออน	Deionized water
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	Dielectric constant
อิเล็กตรอน	Electron
เอทิลแอลกอฮอล์	Ethanol
ฟูลเลอร์รีน	Fullerene
หัวตรวจวัดก๊าซ	Gas sensors
ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	Multi-Walled Carbon Nanotubes
ออกซิเจน	Oxygen
ผลึกหลายรูป	Poly crystalline
ซิลิคอนไดออกไซด์	Silicon dioxide
ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว	Single-Walled Carbon Nanotubes
สเปกตรัม	Spectrum
สปัตเตอร์ริง	Sputtering
ฐานรอง	Substrate
สังเคราะห์	Synthesis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกกรณีที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

รังสีเอ็กซ์	X-ray
ข้อบกพร่องในโครงสร้าง	Structural defects
ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	Electron density
ฐานรอง	Substrate
ตัวเร่งปฏิกิริยา	Catalysis
ทังสเตน	Tungsten
นาโนคีม	Nano-tweezers
นาโนอิเล็กทรอนิกส์	Nano electronic
บั๊กกี้บอล	Bucky ball
แผ่นชั้นอพิแทกซี	Epitaxial layers
พันธะ	Bond
พันธะโควาเลนต์	Covalent band
ฟูลเลอร์รีน	Fullerence
รูปแบบการเลี้ยวเบน	Diffraction pattern
เลนส์วัตถุ	Objection lens
เลนส์คอนเดนเซอร์	Condenser lens
สเปกตรัม	Spectrum
แหล่งจ่าย	Source
อะมอร์ฟัสคาร์บอน	Amorphous carbon
อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน	Specimen holder
อัลตราโซนิค	Ultrasonic
ไฮโดรคาร์บอน	Hydrocarbon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนักวิจัยได้สนใจและทำการศึกษาเทคโนโลยีมานาน เนื่องจากเทคโนโลยีระดับนาโนกำลังจะเข้าไปมีบทบาทในการพัฒนาการผลิตสิ่งของเครื่องใช้ อุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ หรือแม้แต่อาหารที่เรารับประทาน ซึ่งเทคโนโลยีทางด้านนี้สามารถแบ่งออกเป็นหลายสาขา และสาขาที่นักวิจัยให้ความสนใจค่อนข้างสูงคือ นาโนอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายสาขา [1-4] ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีระดับนาโนเมตรจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและกำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเตรียมวัสดุในระดับนาโน หรือการเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงจนอยู่ในระดับโมเลกุล ซึ่งวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบันก็คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์

ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาวัสดุที่เป็นส่วนหนึ่งของนาโนเทคโนโลยี ที่เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ ได้ศึกษาตั้งแต่เริ่มกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน จะได้เป็นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเครื่องมือต่างๆ ประกอบด้วย SEM, Raman Spectroscopy และ EDX ต่อมาได้ศึกษาเทคนิคการสร้างลวดลายของนิเกิลซึ่งเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อต้องการศึกษาถึงเทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดในบริเวณพื้นที่ที่ต้องการ เทคนิคต่างๆเหล่านี้สามารถนำมาพัฒนาและออกแบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นตัวค้ำยัน เพื่อต้องการนำมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวตรวจจับก๊าซ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คาร์บอนนาโนทิวบ์ จัดเป็นวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง มีความไวต่อปฏิกิริยา ส่วนใหญ่จึงนำมาพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวเซนเซอร์เคมี ซึ่งในปัจจุบันต้องการตัวเซนเซอร์เคมีที่มีการตอบสนองได้อย่างฉับไว มีความแม่นยำสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีขนาดเล็ก และใช้กำลังงานต่ำ วิธีการสร้างตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์เคมีโดยใช้วัสดุคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวตรวจจับนั้น ถูกแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน และส่วนสุดท้ายที่สำคัญคือ การศึกษาขั้นตอนการเตรียมฐานรองและการออกแบบลวดลายอย่างเหมาะสมให้ประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ขั้นตอนเหล่านี้สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการของเทคโนโลยีในการสร้างสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำได้ทั้งหมดที่ห้องปฏิบัติการ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD ที่ความดันบรรยากาศ
2. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองต่างๆ และผลของการเกิดเมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิด
3. เพื่อศึกษาการเตรียมฐานรองให้เกิดเป็นลวดลายสำหรับการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์
4. เพื่อศึกษาการออกแบบลวดลาย ให้สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) กระทำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายไฮโดรเจนแอลกอฮอล์
2. ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ จะมีลักษณะของท่อที่เป็นแบบผนังหลายชั้น
3. สามารถสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองซิลิคอนและฐานรองทองแดงได้ โดยใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลหรือผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลหรืออะซีโตน
4. สามารถควบคุมให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ตรงบริเวณที่ต้องการ ได้ด้วยการเตรียมฐานรองให้เกิดเป็นลวดลายของตัวแคตะไลต์
5. การออกแบบและใช้เทคนิคการสร้างลวดลายที่เหมาะสม สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ แนวโน้มของการที่จะนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้น ส่วนมากมักจะนำมาใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์ประเภทตัวเซนเซอร์ต่างๆ ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์เช่น เซอร์ที่สร้างจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะอาศัยอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยอุปกรณ์ชนิดนี้ จะมีขั้วต่อออกมาเพื่อทำการวัดค่าของความต้านทานที่เปลี่ยนไปของบริเวณที่เป็นตัวตรวจจับต่อสิ่งเร้าภายนอก ด้วยประเด็นนี้เอง ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาถึงการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดขึ้นตรงบริเวณที่ต้องการ โดยสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ และศึกษาถึงวิธีการสร้างลวดลายลงบนฐานรองชนิดที่เป็นฉนวนและตัวนำ เพื่อที่จะหาเงื่อนไขและความเหมาะสมซึ่งนำไปสู่การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวเซนเซอร์ เป็นต้น

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในส่วนแรก จะกล่าวถึงการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน กระทำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ส่วนผสมของแอลกอฮอล์กับไฮโดรเจนในอัตราส่วนที่เหมาะสม ได้มีการนำวัสดุฐานรองมาสังเคราะห์ด้วยกัน 4 ชนิด และยังสามารถศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางอย่างที่อาจมีผลต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แต่ฐานรองที่สนใจจะนำมาศึกษาเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีสองชนิดได้แก่ ฐานรองซิลิคอนและฐานรองทองแดง ใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิล ซึ่งฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้บนฐานรองทั้งหมดนั้น จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ เพื่ออธิบายถึงองค์ประกอบ ลักษณะของท่อ ความหนาแน่น และคุณภาพที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้

ส่วนที่สอง จะศึกษาถึงการเตรียมฐานรองเพื่อที่จะควบคุมการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดตรงบริเวณที่ต้องการ โดยจะใช้เทคนิคต่างๆ ในการสร้างลวดลายเช่น การใช้หน้ากากป้องกัน ในขณะที่ทำการสปีดเตอร์ริง กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และการชุบทางไฟฟ้าเคมี เพื่อให้เกิดลวดลายบนฐานรองที่ทำการศึกษา

ส่วนสุดท้าย จะทำการศึกษาการสร้างลวดลายอย่างเหมาะสม ให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นตัวต้านทานซึ่งได้จากฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากนั้นจะนำมาทำการวัดค่าความต้านทานที่ได้ เพื่อที่จะทำการศึกษาและพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายไอระเหยของแอลกอฮอล์
2. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางอย่างเช่น แคตะไลต์ ฐานรอง และสารแหล่งจ่าย รวมไปถึงวิธีการเตรียมฐานรองที่จะนำมาสังเคราะห์
3. ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย SEM, EDX และ Raman Spectroscopy
4. ศึกษาการสร้างลวดลายสำหรับเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์จากการเตรียมฐานรองด้วยเทคนิคต่างๆเช่น การใช้หน้ากากป้องกัน กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีและกระบวนการชุบทางไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบให้รับทราบและขอสงวนลิขสิทธิ์ไว้ ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

5. ศึกษาการออกแบบลวดลายและการเตรียมฐานรอง เพื่อให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นตัวต้านทานไฟฟ้าสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นการศึกษา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวความคิด ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะกล่าวถึงประเภทและคุณสมบัติพิเศษของคาร์บอนนาโนทิวบ์ รวมถึงการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ จากนั้นจะอธิบายหลักการของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีต่างๆและกลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์

บทที่ 3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เพื่ออธิบายถึงองค์ประกอบ ลักษณะของท่อ ความหนาแน่น และคุณภาพที่ได้จากการสังเคราะห์ว่าเป็นอย่างไร โดยจะมีเครื่องมือที่ทำการวิเคราะห์ 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ Scanning Electron Microscope (SEM) จะแสดงถึงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์, Transmission Electron Microscope (TEM) จะแสดงถึงขนาดของท่อ นาโนคาร์บอนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ชัดเจน, Energy Dispersive X-ray microanalysis (EDX)จะบอกถึงองค์ประกอบของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ ว่าประกอบด้วยธาตุใดบ้างและ Raman Spectroscopy บอกถึงคุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์

บทที่ 4 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์และเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึงการใช้เทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในการศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการออกซิเดชันสำหรับสร้างชั้นฉนวน กระบวนการสปีดเตอร์สำหรับเคลือบโลหะ และกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับการทำเป็นลวดลาย

บทที่ 5 กระบวนการทดลอง การสร้างลวดลายและผลการทดลอง จะกล่าวถึงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองชนิดต่างๆ อีกทั้งยังศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ เช่น ตัวแคตะไลต์ ฐานรอง สารแหล่งจ่าย ผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย SEM, EDX และ Raman spectroscopy ต่อมาจะเป็นส่วนของการเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานสำหรับนำมาใช้งานเป็นตัวตรวจจับก๊าซ

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง จะสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ทดลองมาว่าเป็นอย่างไร ควรเลือกใช้ตัวแปรแบบไหนอย่างเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน รวมถึงแนวทางการพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นวัสดุที่เพิ่งถูกค้นพบไม่นานมานี้ ซึ่งประกอบขึ้นจากธาตุของคาร์บอนคล้ายๆกับ เพชร (Diamond) กราไฟต์ (Graphite) บัคกี้บอล (Bucky Ball) และฟูลเลอร์ริน (Fullerenes) แต่ต่างกันตรงที่คาร์บอนนาโนทิวบ์มีพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยม เรียงกันเป็นแผ่นระนาบเดียวกัน และมีลักษณะ โครงสร้างเป็นท่อกลวงที่เกิดจากการม้วนตัวของแผ่น ดังนั้นรายละเอียดต่างๆของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

2.1 ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถพิจารณาได้จากการม้วนตัวของแผ่นกราฟไฟต์ ซึ่งปกติคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากๆ (ระดับนาโนเมตร) ทำให้สามารถมองเป็นโครงสร้างหนึ่งมิติได้ โดยโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยสองส่วนที่แยกออกจากกันมีคุณสมบัติแตกต่างกันทางฟิสิกส์และเคมี ส่วนแรกคือส่วนผนังของท่อ และส่วนที่สองคือ ฝาปิดของท่อ โดยส่วนฝาปิดของท่อมักจะเป็นครึ่งทรงกลมที่ได้มาจากการจัดเรียงตัวของฟูลเลอร์เรนซ์ เช่น C_{60} หรือ C_{70}

ฟูลเลอร์เรนซ์ มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนอยู่ในรูปหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม ในรูปแบบทางฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีรูปหลายเหลี่ยมของ Euler ที่ว่ารูปห้าเหลี่ยม 12 รูป ในรูปของโครงสร้างฝาปิดที่ประกอบด้วยรูปห้าเหลี่ยมและรูปหกเหลี่ยมเท่ากัน โดยการรวมกันของรูปห้าเหลี่ยม 5 อัน ผลลัพธ์ทำให้เกิดความโค้งของพื้นผิวที่เป็นลักษณะปริมาตรปิด กฎข้อที่ 2 ในการใช้รูปห้าเหลี่ยม จะต้องอยู่ในระยะทางระหว่างห้าเหลี่ยมด้วยกันบนพื้นผิวทรงกลมในระยะทางที่มากที่สุด เพื่อที่จะได้ความโค้งที่มีค่าน้อยที่สุด และความเค้นพื้นผิวน้อยที่สุด ผลลัพธ์ก็คือ โครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น และโครงสร้างที่เสถียรและเล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้โดยวิธีนี้ก็คือ C_{60} ส่วนโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นก็คือ C_{70} และอื่นๆ คุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งฟูลเลอร์เรนซ์ประกอบขึ้นจากคาร์บอนอะตอมที่เป็นเลขคู่ เพราะว่าการเพิ่มรูปหกเหลี่ยมเพื่อให้เป็นโครงสร้างที่เป็นอยู่ได้ หมายถึงการเพิ่มอะตอมของคาร์บอนคุณสมบัติของนาโนทิวบ์ จึงคล้ายกับประกอบเป็นรูปทรงกระบอก โดยสร้างขึ้นมาจากแผ่นกราฟไฟต์ที่มีขนาดแน่นอนและห่อขึ้นมาในทิศทางที่แน่นอน ทำให้เป็นทรงกระบอกที่สมมาตรกัน ซึ่งสามารถม้วนแผ่นกราฟไฟต์ ได้ในทิศทางที่แตกต่างกันเพื่อสร้างเป็นทรงกระบอก ได้คาร์บอนสองอะตอม แผ่นกราฟไฟต์จะถูกเลือกตัวที่หนึ่งใช้เป็นจุดเริ่มต้น โดยแผ่นจะหมุนจนกระทั่งอะตอมตัวที่สองมาบรรจบกันโดยเวกเตอร์จากอะตอมแรกไปอีกอะตอมหนึ่งเรียกว่า chiral เวกเตอร์ และความยาวของมันเท่ากับเส้นรอบวงของนาโนทิวบ์ โดยทิศทางของ

แกนนาโนทิวบ์จะตั้งฉากกับ chiral เวกเตอร์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มี chiral เวกเตอร์แตกต่างกัน จะมีคุณสมบัติต่างกันด้วย เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกลศาสตร์และ คุณสมบัติทางไฟฟ้า ประเภทของคาร์บอนนาโนทิวบ์ พิจารณาได้จากการม้วนตัวของแผ่นกราฟไฟต์ ซึ่งโดยทั่วไป ท่อนาโนคาร์บอนจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมาก (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) มีความยาวตั้งแต่ระดับนาโนเมตรไปจนถึงระดับเซนติเมตร ซึ่งถ้าเทียบอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง จะมีค่าหลายล้านเท่าทีเดียว และคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆได้แก่

2.1.1 Single Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs) [5]

SWCNTs นั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ (graphene sheet) ให้เป็นท่อทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลางนั้นมีขนาดประมาณ 0.4 -2.0 nm ส่วนคุณสมบัติของ CNTs ไม่ว่าจะผ่านทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของทิวบ์ เช่น ชนิด (SWCNTs, MWCNTs) เส้นผ่าศูนย์กลาง และ ลักษณะการม้วนของทิวบ์ SWCNTs เป็นโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังชั้นเดียวเป็นรูปทรงกระบอก นอกจากนั้น SWCNTs ยังสามารถแบ่งย่อยๆได้อีกเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะการม้วนตัวของแผ่นกราฟไฟต์ ได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral ซึ่งลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิดนี้ จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

2.1.2 Multiple Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) [6]

MWCNTs จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ SWCNTs แต่จะมีลักษณะโครงสร้างภายในที่เป็นการซ้อนตัวของ SWCNTs ตั้งแต่ 2 ท่อขึ้นไป มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก อะตอมตามผนังของท่อมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยทุกท่อมีแกนร่วมกัน (tube axis) และมีระยะห่างระหว่างชั้นของท่อประมาณ 0.34 – 0.39 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างชั้น กราฟไฟต์ที่ซ้อนกันอยู่ในกราฟไฟต์ (0.355 นาโนเมตร) ลักษณะการซ้อนกันจะเหมือนกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันนั้น จะมีค่า Energy gap ที่ต่างกัน โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะแปรผกผันกับค่า Energy gap และส่วนใหญ่ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกสุดประมาณ 10 – 50 นาโนเมตร ความยาว ความสมบูรณ์ของการเรียงตัว และการม้วนเกลียวที่แตกต่างกันไม่สามารถควบคุมอย่างแม่นยำได้ มีปริมาณจุดบกพร่องที่ค่อนข้างสูง ทำให้ความแข็งแรงต่ำกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นแบบผนังชั้นเดียว ดังรูปที่ 2.2 แสดงถึงโครงสร้างที่เป็นผนังหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

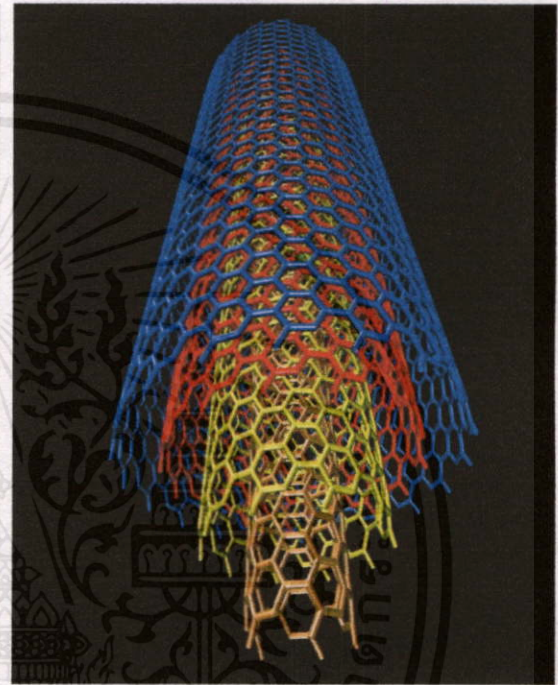
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ [7-9]

เป็นที่ทราบกันดีว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เช่น ชนิดของท่อ (แบบผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้น) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของท่อ (Armchair, Zigzag และ Chiral)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ MWCNTs

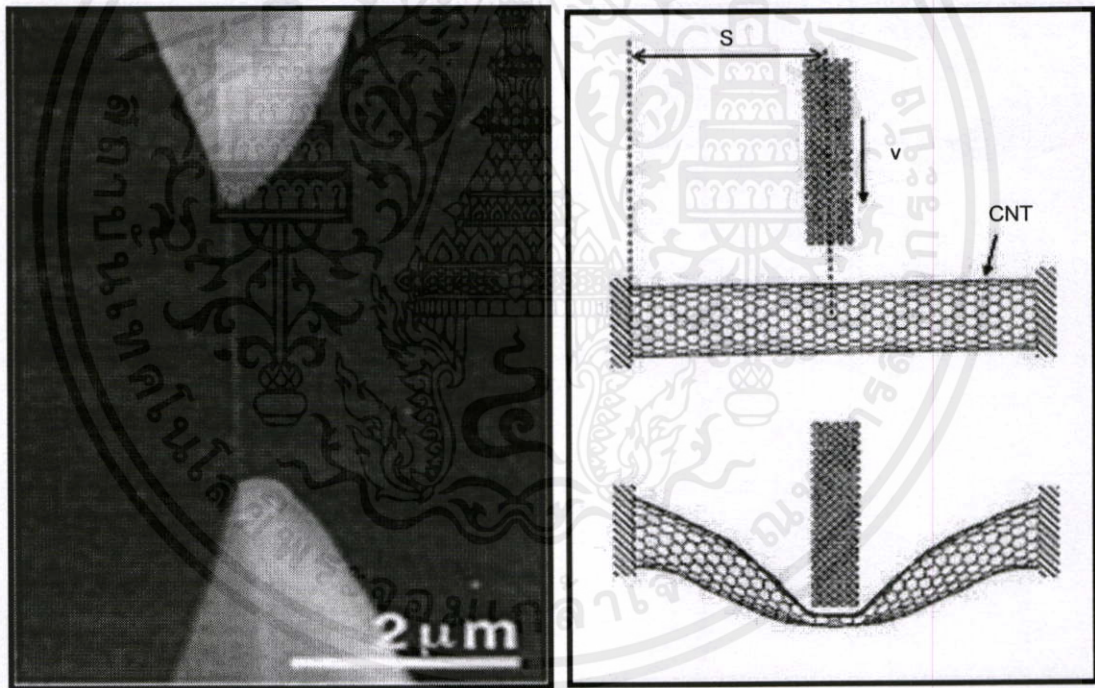
2.2.1 คุณสมบัติทางกล

เพชรซึ่งรู้กันดีว่ามีความแข็งแรงมากด้วย โครงสร้างโครงตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มีสี่ตำแหน่งอย่างลงตัว ขณะที่โครงสร้างของกราฟิต์นั้น คาร์บอนหนึ่งอะตอมเชื่อมพันธะกับคาร์บอนอีกสามอะตอมในระนาบเดียวกันและอีกหนึ่งพันธะที่เหลือจะยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟิต์ (กราฟีน) มีความแข็งแรงมาก (มากกว่าเพชร) [5] แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ด้วยลักษณะ

โครงสร้าง CNTs ดังกล่าวรวมถึงพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้ CNTs แข็งแรงกว่าเพชรและกราฟิต์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของ CNTs มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล (Tpa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (Gpa) คงเป็นที่สงสัยว่าขนาดของ CNTs เล็กจิ๋วขนาดนั้นจะวัดได้อย่างไร วิธีการประเมินค่าความยืดหยุ่นนี้ทำได้หลายวิธีเช่น โดยอาศัย thermal vibration หรือใช้ scanning force microscopy ไปงอ CNTs โดยยึดปลายหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนในสนามไฟฟ้า และมีการใช้ atomic force microscopy (AFM) เพื่องอตรงกลางแท่งนาโนที่วางอยู่บน nanopores เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่นได้มีการใช้ AFM จับ CNTs ทั้งสองข้างแล้วดึงจนขาดเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ความแข็งแรงของ CNT มีค่าอยู่ระหว่าง 11 ถึง 63 Gpa ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2 Gpa นอกจากนี้ SWCNTs สามารถยึดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน SWCNT มีพื้นที่ผิวได้ถึง $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยมีความหนาแน่น 1.33 ถึง 1.40 g/cm^3 รูปที่ 2.3 (ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของ CNT ขณะที่มียึดดูมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง



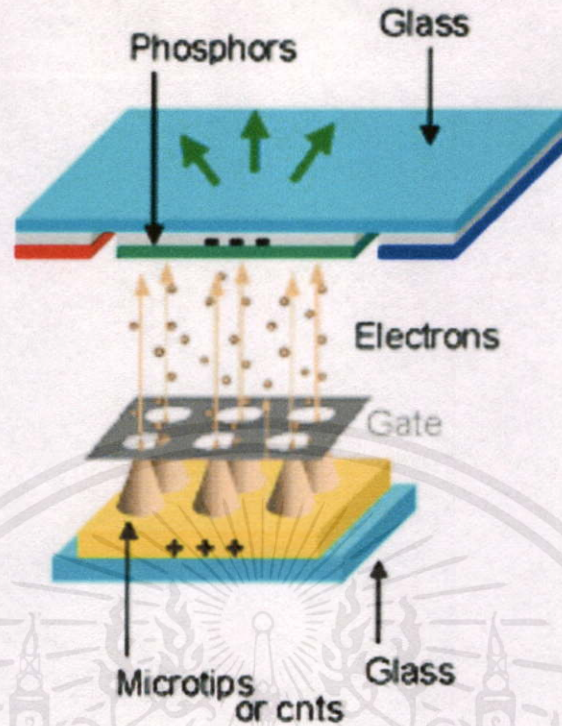
(ก)

(ข)

รูปที่ 2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ (ก) ภาพจาก SEM ของ CNT ที่อยู่ระหว่างปลายทั้งสองด้านของ AFM นี้ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช้เพื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ภาพแสดงการยืดหยุ่นที่ดีของ CNT ขณะที่มียึดดูมาชนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.4 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศ

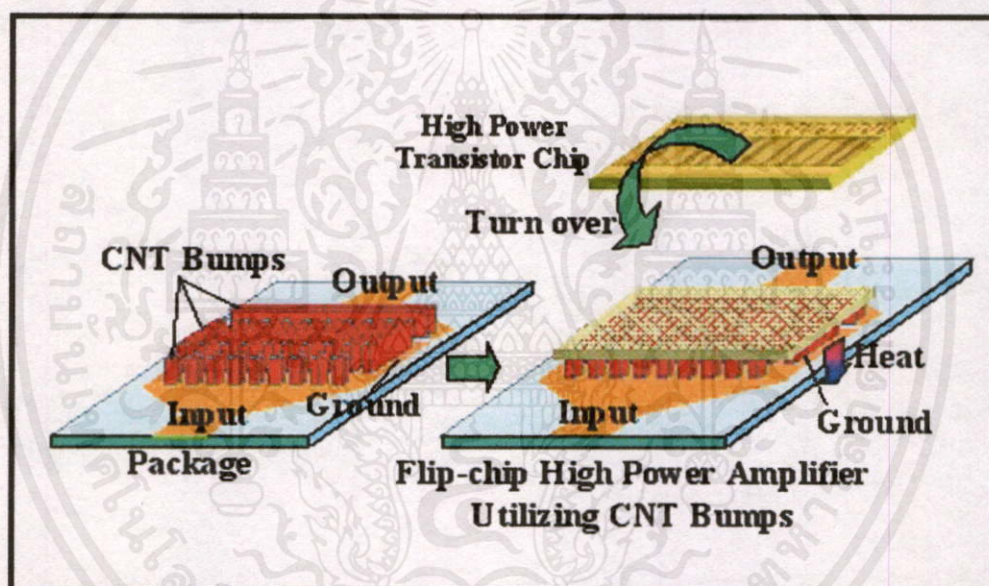
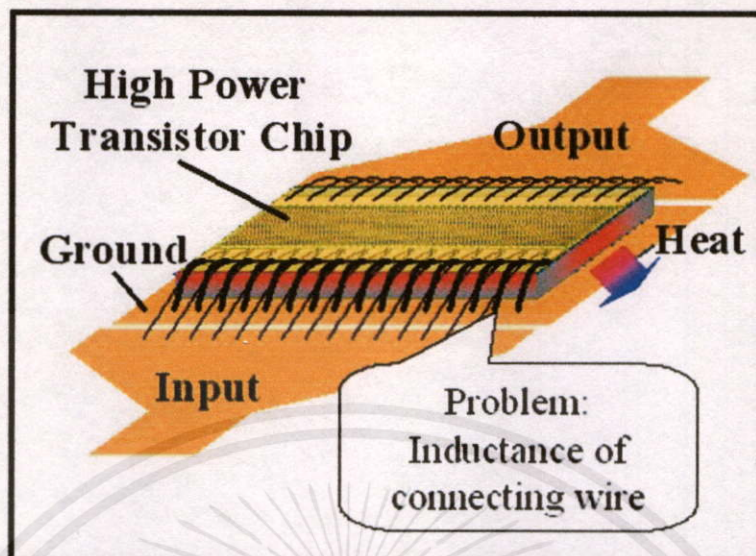
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

CNTs มีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของ CNTs สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm² ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm² นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของ CNTs คือ สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของ CNTs ในสถานะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า เช่นจะกระตุ้น phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 mm จะใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 V ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 V สำหรับปลายที่เป็นขั้ว molybdenum ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.2.3 คุณสมบัติทางความร้อน

ค่าการนำความร้อนของ CNTs สูงถึง 2000 W/mK โดยมีบางรายงานกล่าวว่า CNTs มีค่าการนำความร้อนได้ถึง 6000 W/mK เมื่อเปรียบเทียบกับเพชรที่มีค่าการนำความร้อนเพียง 3320 W/mK นอกจากนี้ CNTs ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2800 °C ภายใต้สุญญากาศ และ 750 °C ในสภาวะปกติ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ ดังรูปที่ 2.5 เป็นการนำคุณสมบัติการนำความร้อนที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์มาเป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิปที่ใช้งานกำลังสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



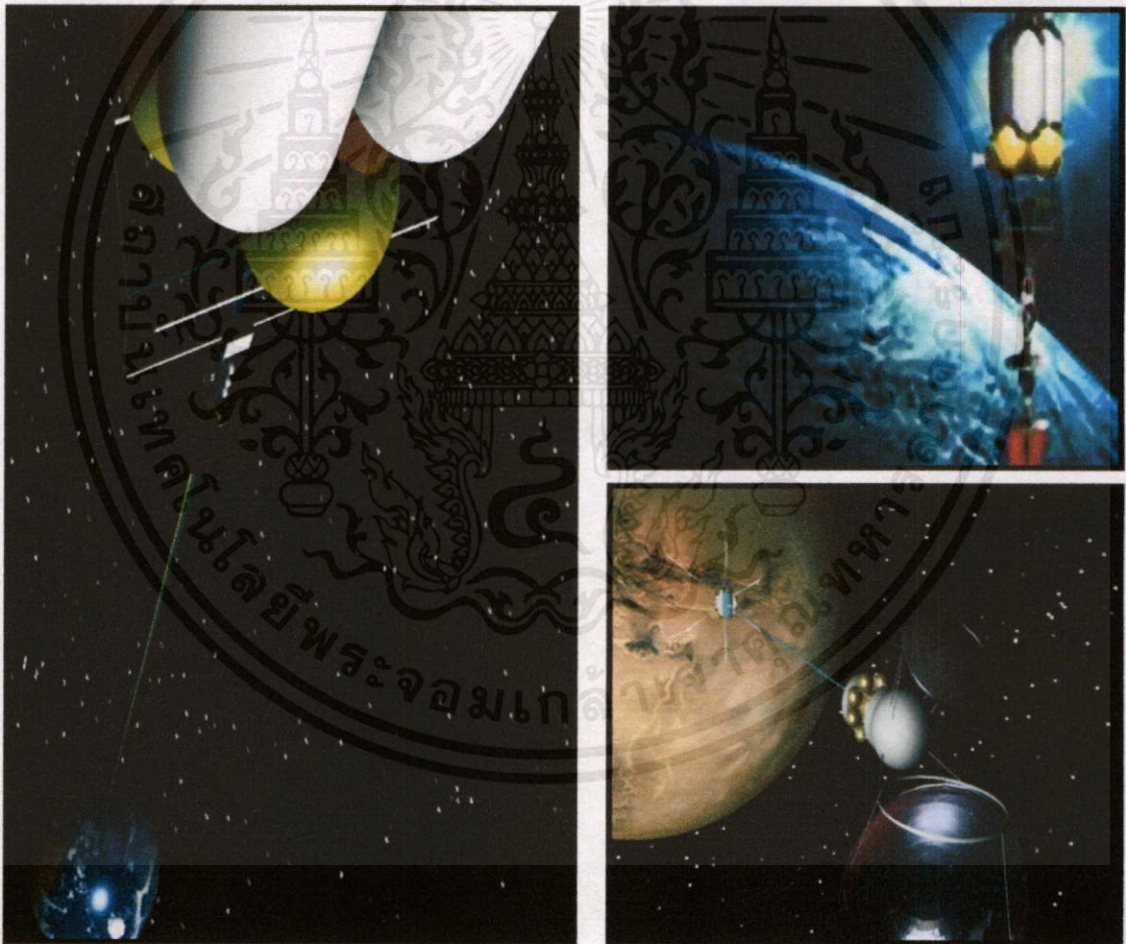
รูปที่ 2.5 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นตัวระบายความร้อนให้กับชิพ

2.3 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน

จากการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์พบว่า เป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูงแต่มิฉะนั้นหนักเบา อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่ดี มีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และสามารถจับยึดกับโมเลกุลของก๊าซและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ เช่น ชนิดของทิวป์ (ซิงเกิลวอลล์และมัลติวอลล์) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของทิวป์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.3.1 ประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

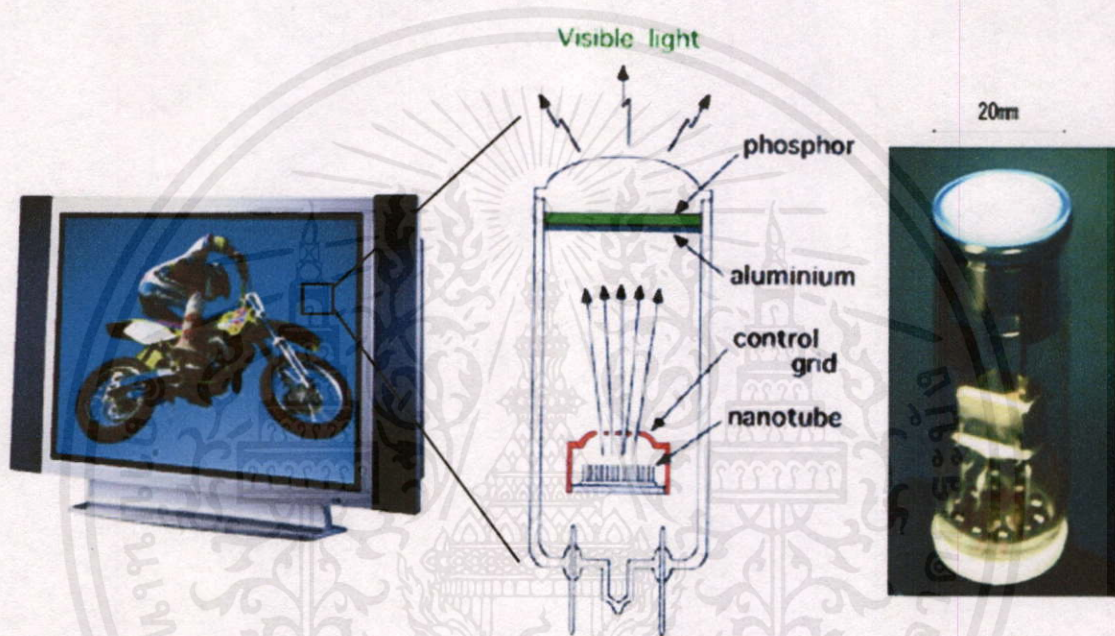
เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าขั้วมอดูลัสสูง สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี จึงเหมาะที่จะนำมาเป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆเพื่อให้ได้วัสดุที่เบา มีค่าความยืดหยุ่นสูง ทำให้ไม่แตกง่าย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างมาก เช่น ส่วนประกอบของรถยนต์ เครื่องจักร หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ และนี่อาจเป็นจุดเริ่มต้นของการก้าวไปสู่การสังเคราะห์พลาสติกที่สามารถนำไฟฟ้าได้ มีความแข็งแรงมาก มีน้ำหนักที่เบา และสามารถสร้างได้หลายรูปแบบ โดยเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์ขององค์การนาซา (NASA) ประสบความสำเร็จในการผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในโพลีเมอร์ เพื่อสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ หรือนำมาเป็นส่วนผสมในการสร้างสายเคเบิลที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูงสำหรับสร้างลิฟท์อวกาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 2.6 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการสร้างสายเคเบิลสำหรับลิฟท์อวกาศนำไปใช้

2.3.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

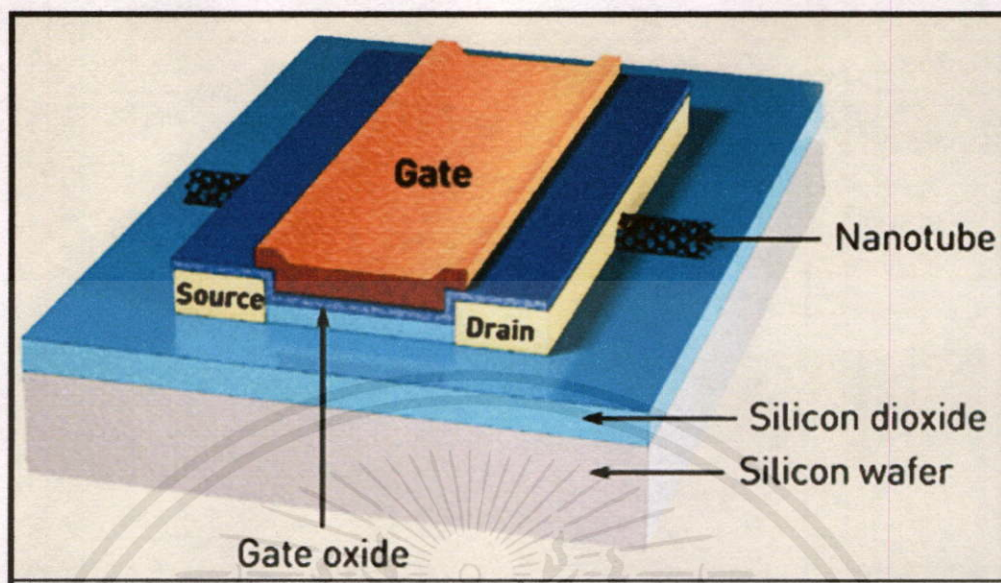
เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNTs) มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมาก (ค่า Aspect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้ CNTs มีเสถียรภาพที่ดี และทำให้ CNTs สามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนในอุปกรณ์เช่น จอแสดงผล หลอดไฟฟ้าประหยัดพลังงาน แหล่งกำเนิด X-ray ขนาดเล็กและแหล่งกำเนิดไมโครเวฟขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการแสดงผล

2.3.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากโครงสร้างของ CNTs เทียบเท่ากับ 1 มิติ จึงทำให้มีการนำไฟฟ้าแบบ Ballistic คือไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเหมาะที่จะใช้ ในวงจรรนาโนอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยเมื่อไม่นานมานี้ บริษัทไอบีเอ็ม และกลุ่มของ Prof Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์ และลอจิกเกตจากซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นครั้งแรกของโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ในอนาคตได้ ทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์และปริมาณในการกินกระแสไฟฟ้าลงได้



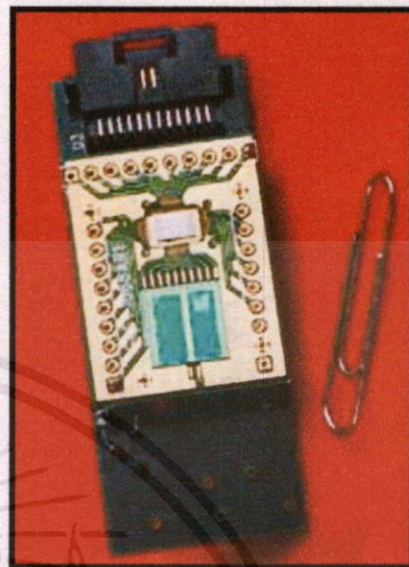
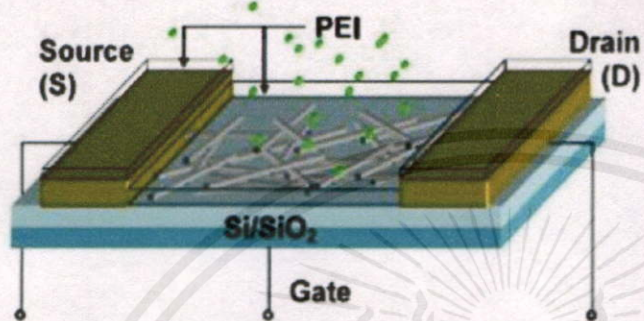
รูปที่ 2.8 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างทรานซิสเตอร์

2.3.4 ประยุกต์ใช้เป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์ [10-12]

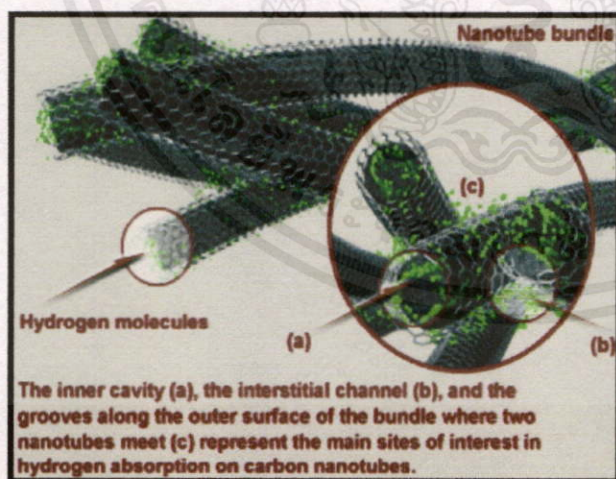
เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์ มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของสาร ในระดับอะตอม เช่น Scanning Probe Microscope (SPM), Atomic Force Microscopy (AFM) และประดิษฐ์เป็นนาโนคีม (Nano-Tweezers) และยังสามารถตัดแปลง โดยนำ Functional group ต่างๆ เช่น $-COOH$ มายึดติดที่ปลายทิวป์เพื่อนำไปใช้ในด้านชีววิทยาและการแพทย์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวป์ยังสามารถนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้ อีกด้วย เช่นทำเป็นเซนเซอร์ก๊าซเช่น NO_2 , NH_3 , O_2 ได้โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวป์ที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.9

2.3.5 ประยุกต์ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรและมีพื้นผิวที่มาก ทำให้เป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการเก็บไฮโดรเจน(H) ซึ่งเป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยมีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon แสดงผลการคำนวณว่า SWCNTs จะสามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของทิวป์มากขึ้นและมีความเป็นไปได้ที่จะเก็บไฮโดรเจนได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้ ดังรูปที่ 2.10 เป็นการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างตัวเซนเซอร์เคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น **รูปที่ 2.10 ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน** ที่มีการนำไปใช้

2.4 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

CNTs สามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถที่จะสังเคราะห์ได้จากสามวิธีการหลักคือ

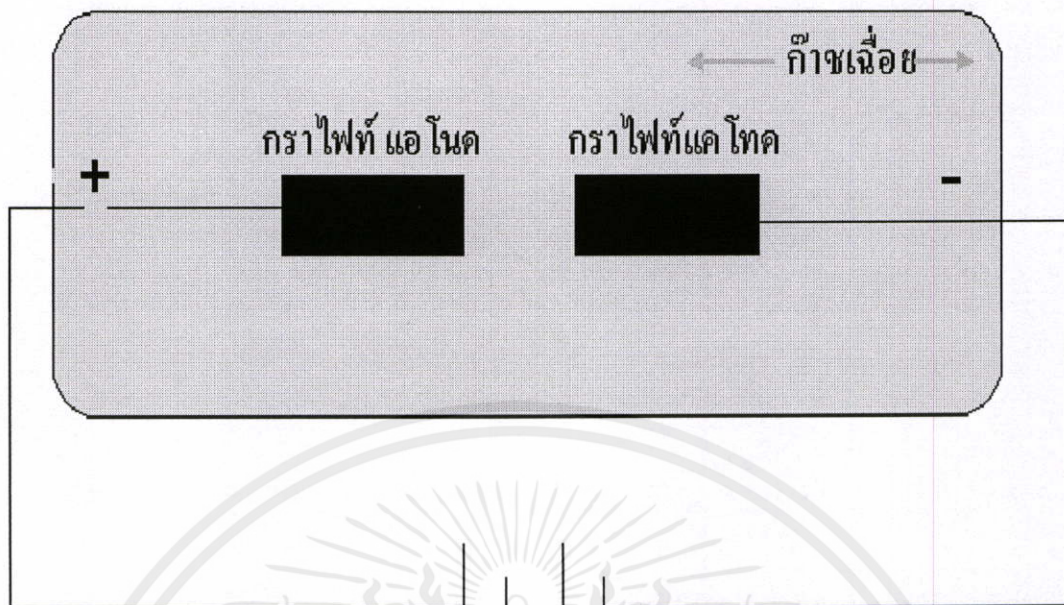
- 1) วิธี Arc Discharge
- 2) วิธี Laser Ablation
- 3) วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD)

2.4.1 วิธี Arc Discharge

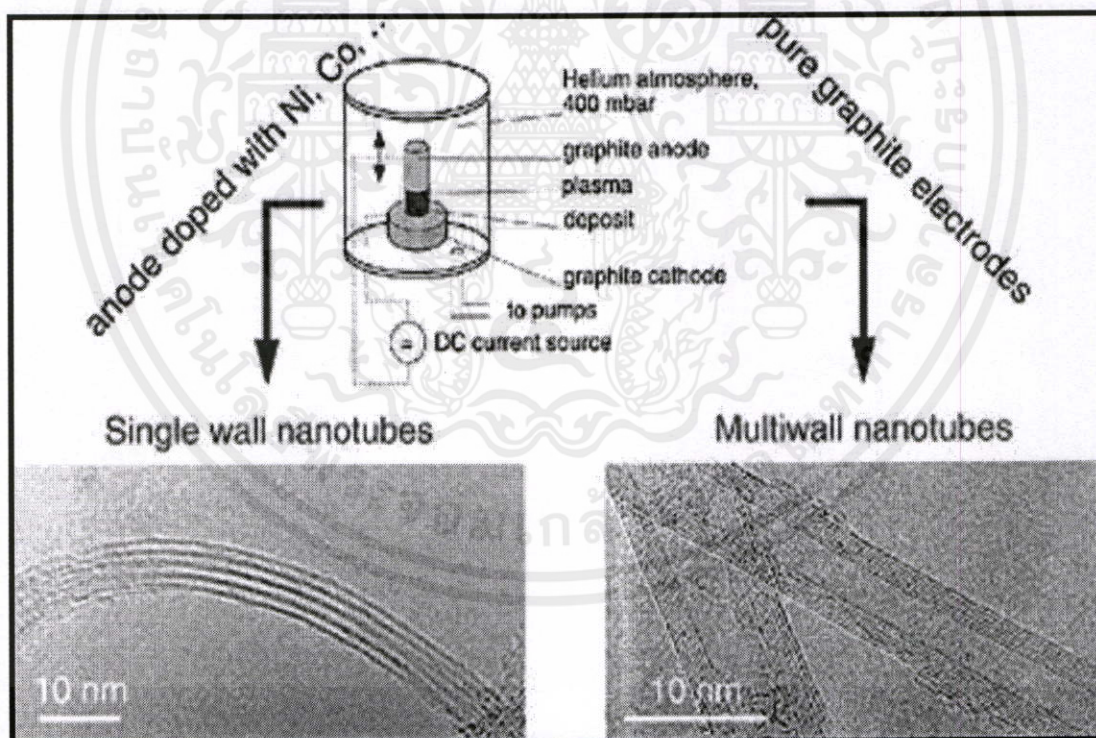
วิธี Arc discharge เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยการอาร์คที่ปลายทั้ง 2 ของแท่งกราไฟต์(หรือแท่งคาร์บอน) 2 แท่ง ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยาที่เต็มไปด้วยก๊าซเฉื่อย อาจเป็น ฮีเลียม (Helium) ผสมกับอาร์กอน (Argon) หรือไนโตรเจนเหลวที่ความดันต่ำโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสูงเพื่อไปอาร์คแท่งกราไฟต์ ทำให้บริเวณที่ถูกอาร์คมีอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ เกาะอยู่บนบางส่วนของแท่ง กราไฟต์ ที่หลุดกระเด็นออกมาและรอบบริเวณแท่งกราไฟต์ที่ถูกอาร์ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมระหว่าง ก๊าซฮีเลียมกับ ก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่และการนำความร้อนมีค่าต่างกัน จึงมีผลกระทบกับความเร็วในการแพร่ของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

การเย็นตัวของแท่งคาร์บอนและอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เป็นผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ มีขนาดต่างกันออกไปไม่สม่ำเสมอ วิธี Arc discharge สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 และด้วยวิธีการนี้ ยังสามารถที่จะเลือกให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้ ให้เป็นชนิดซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNTs) หรือมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNTs) โดยหากต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิด ซิงเกิลวอลล์ ก็สามารถใส่แท่งกราไฟต์ ที่เจือด้วยอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เช่นเหล็ก (Fe), โคบอล (Co), นิกเกิล (Ni) หรือโมลิบดีนัม (Mo) ที่ขั้วแอโนด และถ้าต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นมัลติวอลล์ ก็สามารถใส่แท่งกราไฟต์บริสุทธิ์ เท่านั้นก็พอ ไม่จำเป็นต้องผสมโลหะตัวเร่งก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีนี้ ด้วยวิธี Arc discharge นี้ จะทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ไม่สะอาด ปะปนกับเขม่า โลหะตัวเร่งและอะตอมคาร์บอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน จึงต้องผ่านการแยกให้เหลือเฉพาะคาร์บอนนาโน

เอกสารนี้
แม้ว่ากรณี
บ้างย่าว้าง
ก็ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

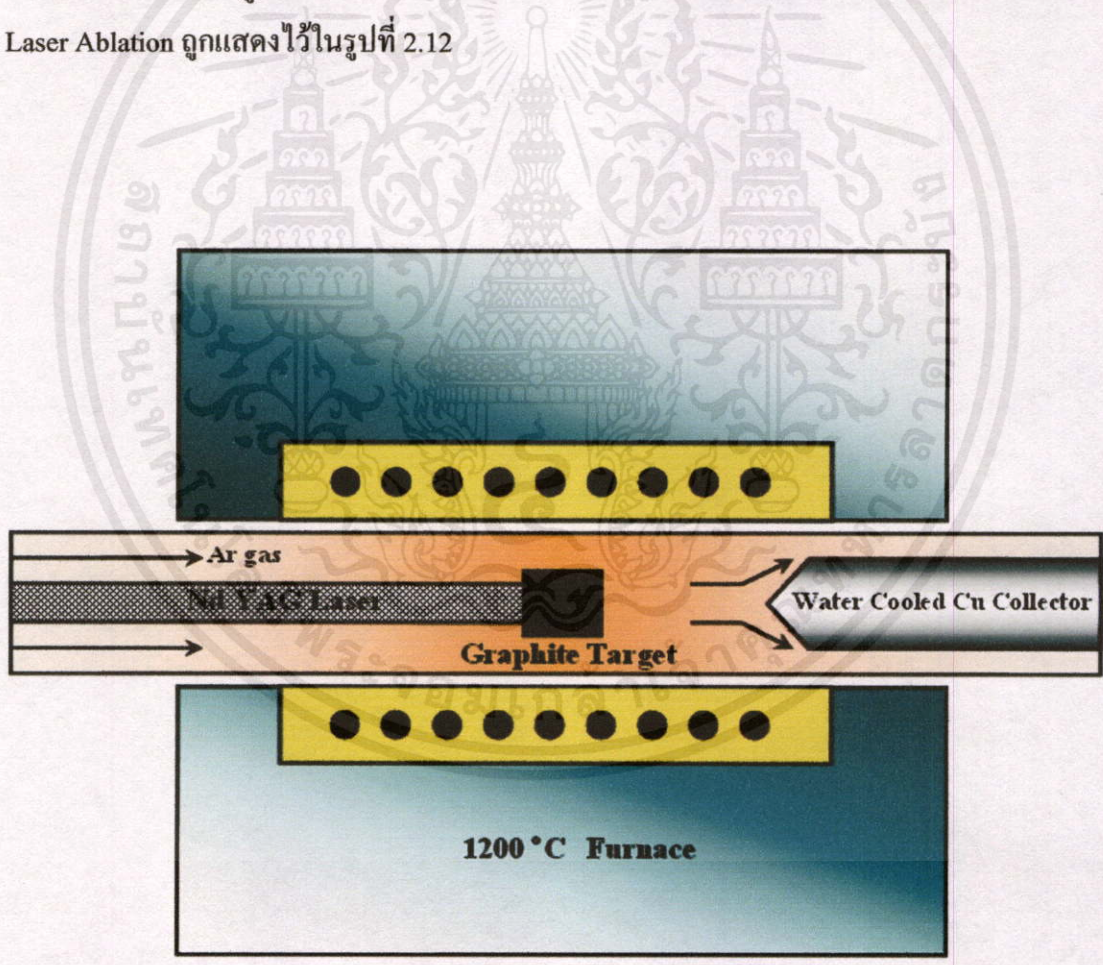
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง **รูปที่ 2.11** วิธี Arc Discharge ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) หลักการทำงานในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย

(ข) คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากกระบวนการนี้

2.4.2 วิธี Laser Ablation

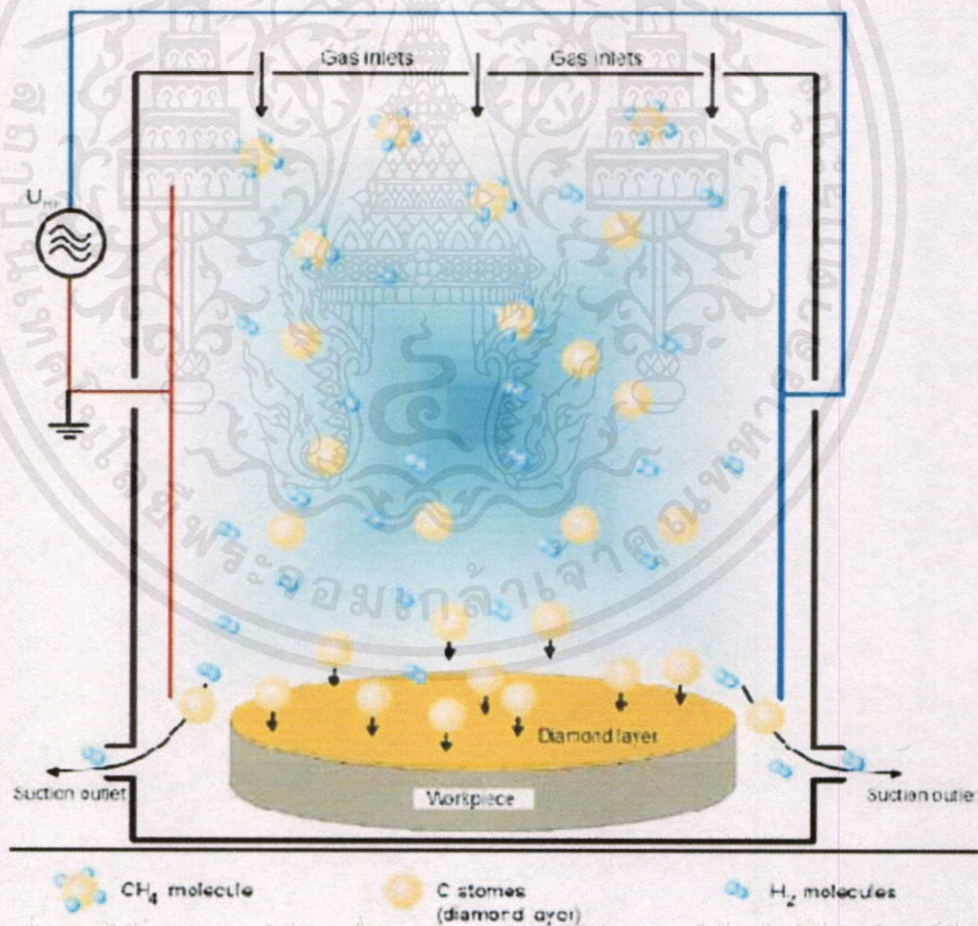
ในปี 1995 ทีมวิจัยของ Prof. Smalley ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูง หลักการคือใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงยิงไปที่เป้าหมายซึ่งเป็นแท่งกราไฟต์ที่อยู่ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C ภายในเต็มไปด้วยก๊าซฮีเลียมหรืออาร์กอน ทำให้แท่งกราไฟต์ระเหยออกเป็นไอของคาร์บอนโดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่อง ส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปที่เป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70 % และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดซิงเกิลวอลล์เท่านั้น วิธี Laser Ablation ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก **รูปที่ 2.12 วิธี Laser Ablation** ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD)

วิธีการสังเคราะห์แบบ CVD (Chemical Vapor Deposition) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ทั้งชนิดที่เป็นผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ สามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก โดยใช้หลักการของกระบวนการการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน เอทิลแอลกอฮอล์ อะซีโตน เป็นต้น) และสามารถก่อเกิดได้บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวบ์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวบ์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี CVD นั้นยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกก๊าซและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 5 วิธีใหญ่คือ

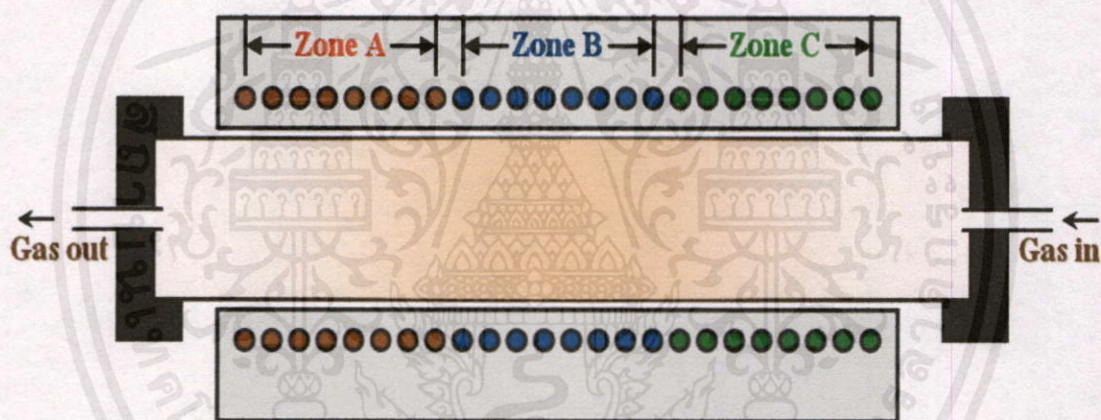


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 วิธี Chemical Vapor Deposition (CVD)

2.4.3.1 วิธี Thermal Chemical Vapor Deposition

วิธี Thermal CVD ที่แสดงในรูปที่ 2.14 เป็นวิธีในกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเตรียมชั้นออกไซด์ของซิลิคอน (Si) และเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งชนิด ซิงเกิลวอลล์และมัลติวอลล์ ใช้โลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe), โคบอล (Co), นิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo) หรืออัลลอยของโลหะเหล่านี้ โดยส่วนมากวิธีนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะเกี่ยวข้องกับขนาดของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่ง ปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นที่เคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อประมาณ 1 นาโนเมตร คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีความยาวอยู่ในช่วง 0.6-4 nm

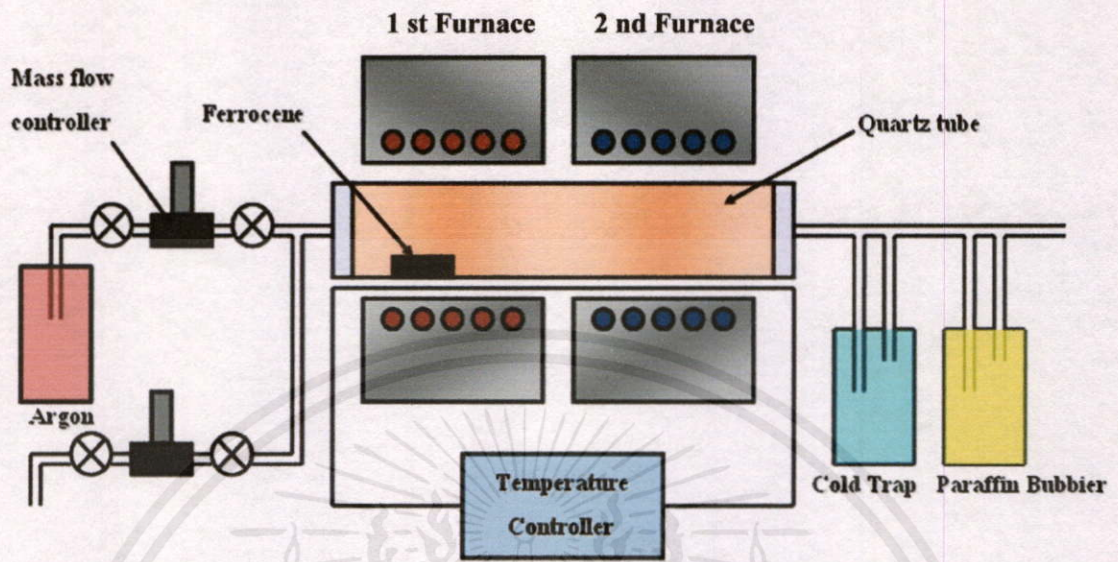


รูปที่ 2.14 วิธี Thermal Chemical Vapor Deposition (Thermal CVD)

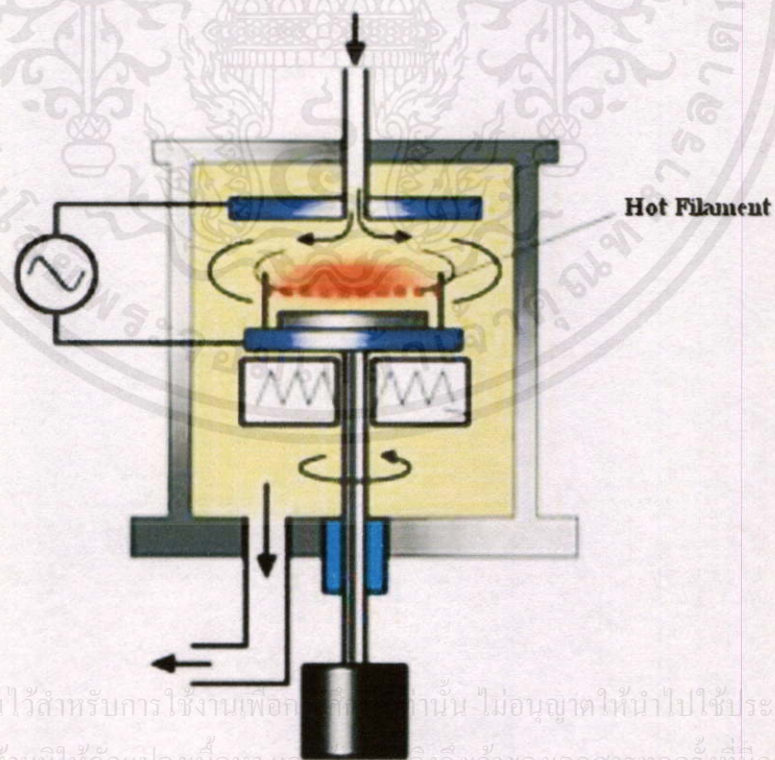
2.4.3.2 วิธี Vapor Phase Growth

จากรูปที่ 2.15 เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นก๊าซของโลหะ เช่น Ferrocene ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ครั้งละเป็นจำนวนมากๆและทิวป์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวมากๆ (มากกว่า 20 μm) และมีความบริสุทธิ์มากกว่า 80 % แต่เนื่องจากวิธีนี้มักจะใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายจึงต้องระมัดระวังอย่างมากนอกจากนี้วิธีนี้ยังยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำมาตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต อาจก่อให้เกิดผลเสียหายและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 วิธี Vapor Phase Growth



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

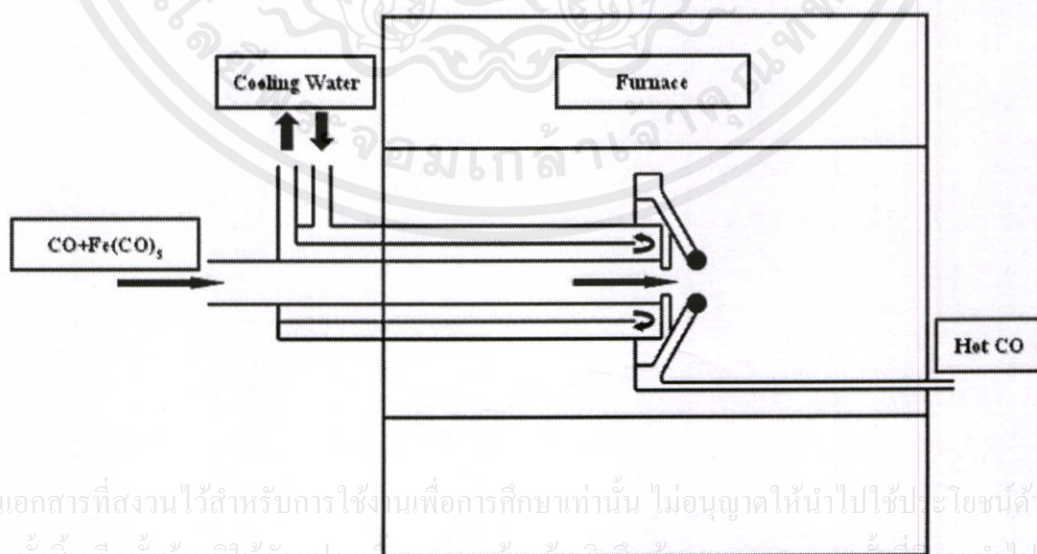
รูปที่ 2.16 วิธี Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PE-CVD)

2.4.3.3 วิธี Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition (PE-CVD)

วิธี Plasma CVD เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C โลหะตัวเร่งที่ใช้คือ เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และโคบอล (Co) นอกจากนี้ วิธีนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถกำหนดทิศทางการเกิดของทิวบ์ให้ทิวบ์ตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดมัลติวอลล์ ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิดซิงเกิลวอลล์ได้ แต่ปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดซิงเกิลวอลล์ได้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.16

2.4.3.4 วิธี High Pressure CO Disproportionate Process

วิธีนี้จะคล้ายกับวิธี Vapor phase growth คือใช้ก๊าซของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน(Carbon source) แล้วปล่อยให้เข้ามาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene, $\text{Fe}(\text{CO})_5$ จนเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังอันตรายจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เนื่องจากเป็นอันตรายต่อร่างกายอย่างยิ่ง ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ การควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นทำได้ยาก แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะเป็นลักษณะแบบ SWCNTs มีขนาดค่อนข้างเล็กและมีปริมาณที่มาก โดยที่ขนาดของท่อเล็กสุดอยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ขนาดของท่อได้เล็กที่สุด โดยมีขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร มีความบริสุทธิ์ประมาณ 80 % และมีสิ่งเจือปนน้อย ดังแสดงรูปที่ 2.17

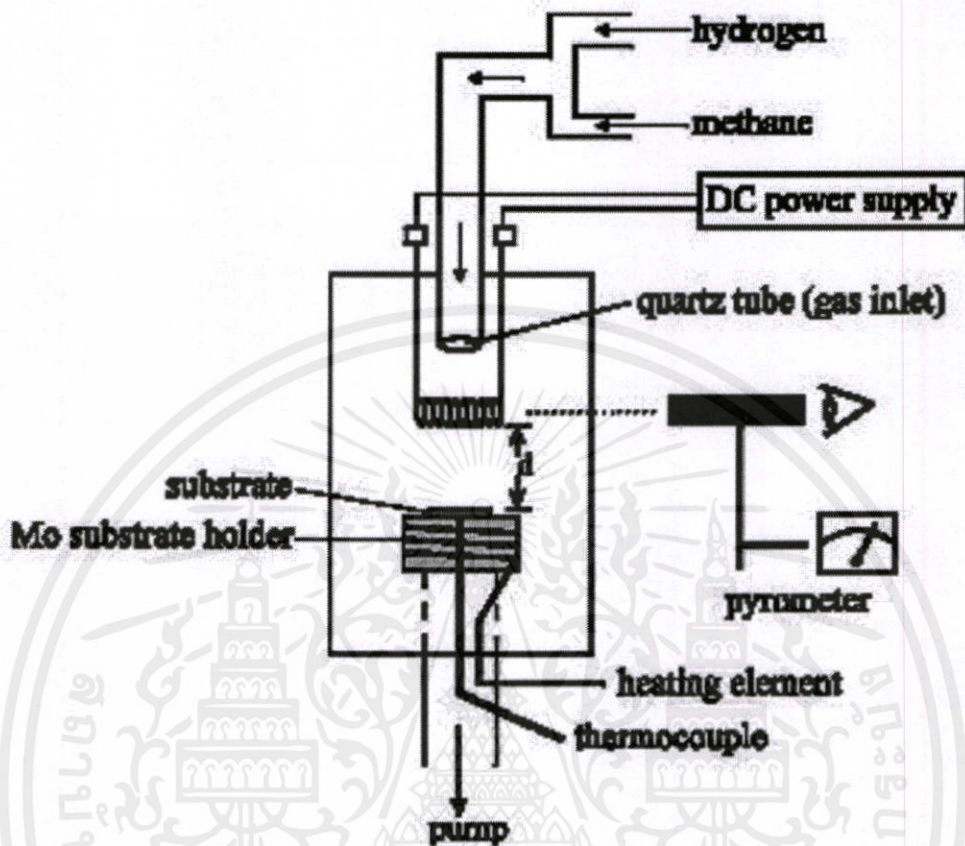


รูปที่ 2.17 วิธี High Pressure CO Disproportionate Process

2.4.3.5 วิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD) [13]

จากรูปที่ 2.18 วิธี Hot filament CVD นี้ ซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD เพียงแต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ก๊าซ วิธี Hot filament CVD นี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร หลักการคือใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวด มีฐานรองสำหรับวางแผ่นตัวอย่าง ใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) หรือ นิกเกิล (Ni) ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา (Chamber) จะมีท่อนำก๊าซซึ่งเป็นก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบเช่น ไอร์อะเซทของแอลกอฮอล์ อะซีโตน หรือมีเทน (CH_4) เป็นต้น ไหลผ่านเข้ามาภายในระบบ ความร้อนจากขดลวดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ $1600\text{--}2000^\circ\text{C}$ ซึ่งทำให้มีอุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วงประมาณ $550\text{--}750^\circ\text{C}$ และทำให้โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิสูง ซึ่งอะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆ จะแตกตัวออกจากโมเลกุลของก๊าซและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้บนแผ่นตัวอย่าง จนก่อเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการสังเคราะห์แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน วิธี Thermal CVD จะเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ทั้ง SWCNTs และ MWCNTs ส่วน PE-CVD นั้นสามารถสังเคราะห์ CNTs ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400°C) แต่ CNTs ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้โดยส่วนมากจะเป็นชนิด Multi-Walled เท่านั้น ส่วนวิธี HF-CVD นั้นมีหลักการเดียวกันกับวิธี Thermal CVD เพียงแต่ใช้ Filament ที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกก๊าซออกเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โดยส่วนมากแล้วคุณภาพของ CNTs ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำอยู่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น ความดันภายใน Chamber ชนิดของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิฐานรอง หรือ อัตราการไหลของก๊าซที่เป็นแหล่งกำเนิดสารประกอบคาร์บอน เป็นต้น ส่วนวิธี Vapor Phase Growth นั้น ใช้ก๊าซของโลหะ เช่น Ferrocene, $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก สองวิธีหลังนี้สามารถสังเคราะห์ CNTs ที่ละจำนวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมทิศทางและตำแหน่งของทิวบ์ได้ง่ายนักและก๊าซที่ใช้ส่วนมากเป็นก๊าซที่มีพิษ (เช่น CO เป็นต้น)

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้ศึกษาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) โดยใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอลเป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนผสมกับก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนของไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายต่อไฮโดรเจนรวมประมาณ 8 - 12 % โดยปริมาตร ใต้ลวดความร้อนถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 2000°C ทำให้ได้อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วงประมาณ $550\text{--}750^\circ\text{C}$ โดยกระทำที่ความดันบรรยากาศ ใช้ฐานรองที่ต้องการศึกษาอยู่ 4 ชนิดคือ ฐานรองสารประกอบกราไฟต์หรือไส้ดินสอด ฐานรองคาร์บอนอัดแน่นหรือถ่าน ฐานรองซิลิคอน และฐานรองทองแดง ใช้ให้เกิดเป็นตัวแคตะไลต์ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อได้เปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆเช่น ฐานรอง สารแหล่งจ่ายและตัวแคตะไลต์



รูปที่ 2.18 วิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD)

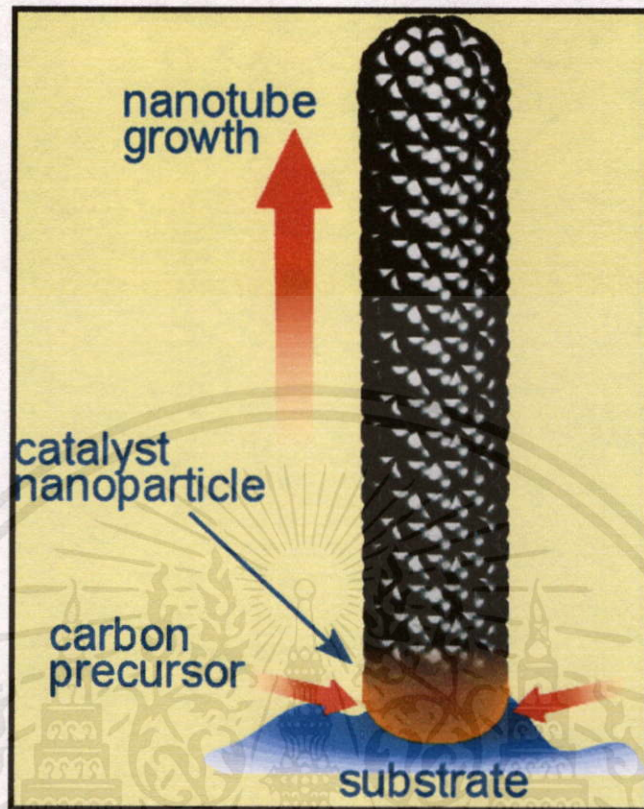
2.5 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

กลไกของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์นั้น ในปัจจุบันยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่ชัดได้ว่า เกิดลักษณะใด ซึ่งจะทราบได้ในช่วงระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวป์ก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตาม ลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ จะสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

- 1) กลไกการเกิดแบบ Root Growth
- 2) กลไกการเกิดแบบ Tip Growth

2.5.1 Root Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์
 ไม่ว่าจะชนิดใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.19 และสามารถอธิบายได้คือที่
 อุณหภูมิสูงมากพอ จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon

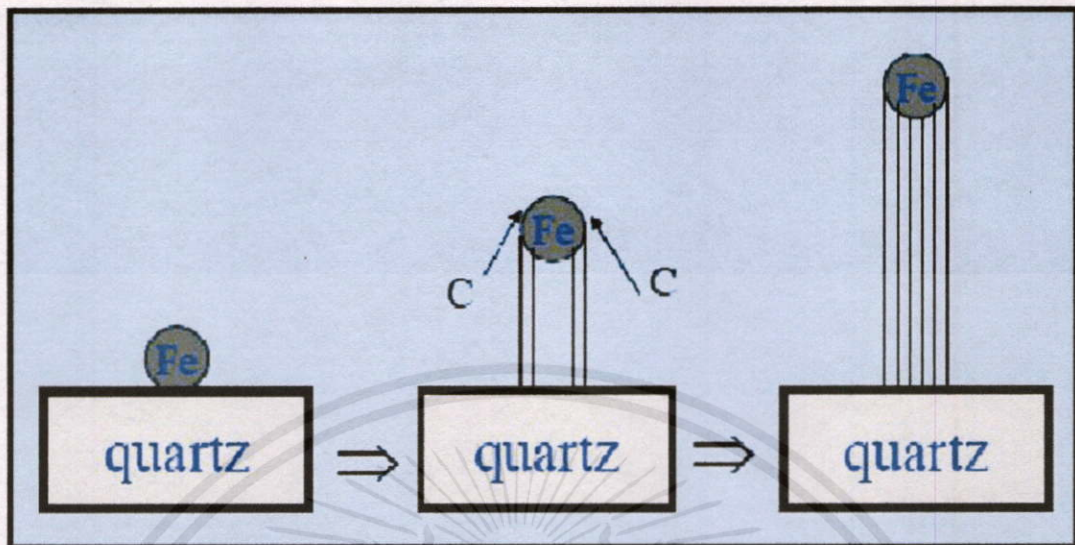


รูปที่ 2.19 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวแบบ Root Growth

source) และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านบน จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งและก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิว ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ ที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่าง จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่งและก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบ Tip Growth

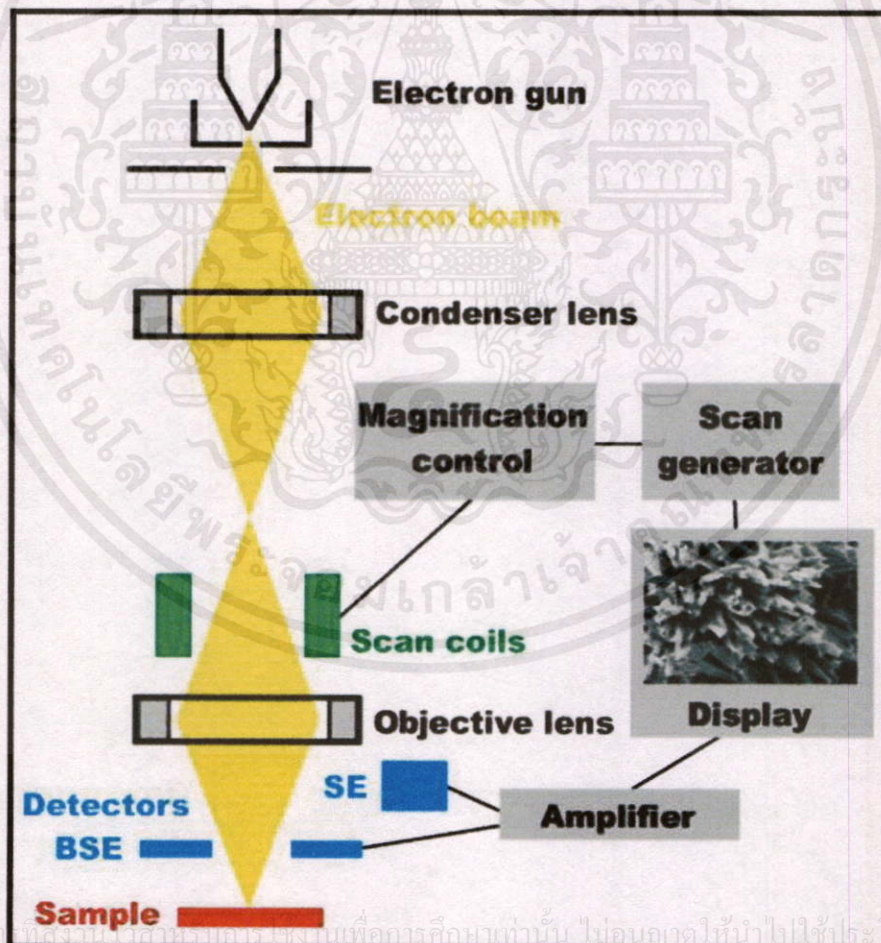
จากกลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้ง 2 ลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมที่ต่ำ เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว และโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดี เพื่อให้อะตอมคาร์บอนสามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมากๆ

โดยสรุป ท่อนานาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีบทบาทเชิงประยุกต์มากมาย และมีกรรมวิธีการผลิตที่ใช้ต้นทุนต่ำ ในอนาคตการเลือกผลิตเฉพาะท่อนานาโนคาร์บอนชนิดใดชนิดหนึ่ง (SWCNT หรือ MWCNT) จะสามารถกระทำได้นอกจากนี้ กลไกการคัดแยกท่อนที่มีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบโลหะหรือสารกึ่งตัวนำก็จะดีขึ้นด้วย ซึ่งการนำไปใช้งานสำหรับการประยุกต์ด้านต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องเข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพเป็นอย่างดี ดังนั้น ในบทต่อไป จะกล่าวถึงเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เพื่อศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของท่อนานาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่าน Condenser lens เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสโดย Objective lens ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาและกราดในระนาบ xy หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง SEM

บทที่ 3

เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เนื่องจากการศึกษาด้านนาโนเทคโนโลยีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร ซึ่งในส่วนของในบทนี้ จะกล่าวถึงเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติ ขนาดและความบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบด้วย SEM สำหรับวิเคราะห์ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ลงบนพื้นผิวฐานรอง EDX สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆบนฐานรองและ Raman Spectroscopy สำหรับวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือซึ่งสามารถช่วยให้เข้าถึงสิ่งเล็กๆเหล่านี้ได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมีขีดจำกัดในกำลังขยายเนื่องจากการแทรกสอดของแสง ดังตารางที่ 3.1 จะแสดงค่า Resolution สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ

ตารางที่ 3.1 ข้อจำกัดและ Resolution ของกล้องจุลทรรศน์แบบต่าง ๆ

เทคนิค	ข้อจำกัด	Resolution
ตา	เรตินา	70,000 อังสตรอม
กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	การเลี้ยวเบนของแสง	3,000 อังสตรอม
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน	30 อังสตรอม
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน	1 อังสตรอม
กล้องจุลทรรศน์แบบ field ion	ขนาดอะตอม	3 อังสตรอม
near-field scanning probe microscopies	ขนาด "aperture"	0.1-100 อังสตรอม

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า งานวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในบทนี้ นอกจากจะกล่าวถึงรายละเอียดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแล้ว ยังได้ กล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์เช่น Energy Dispersive X-Ray เพื่อวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน และ Raman Spectrometer เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นต้น

องค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และเลนส์อิเล็กตรอน

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source)

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญของ SEM โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมาก วัสดุที่ใช้ทำปืนอิเล็กตรอนนี้ต้องมีเสถียรภาพสูง ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญมี 3 ตัว ได้แก่ ขนาดของลำอิเล็กตรอน ณ จุดตกกระทบ ปริมาณกระแส ณ จุดตกกระทบ และมุมคอนเวอร์เจนต์ ภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปต้องเป็นจุดที่เล็ก ๆ ในปัจจุบันมีปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้งานอยู่ 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. ลวดทังสเทน (Tungsten Filament) ปืนอิเล็กตรอนชนิดนี้เป็นแบบที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสภาพสุญญากาศ ใช้หลักการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากความร้อน หรือเรียกว่าแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน (Thermionic emission)

2. ผลึก LaB_6 (Lanthanum Hexaboride Crystal) ปืนอิเล็กตรอนชนิดนี้ทำจากทังสเทน ใช้หลักการทำงานแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน เช่นเดียวกัน แต่สามารถให้ความสว่าง (Brightness) สูงกว่า 10 เท่า มีอายุการทำงานนานกว่า แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพง และต้องการสภาพการทำงานที่เป็นสุญญากาศเป็นพิเศษ

3. แหล่งกำเนิดแบบฟิลด์เปลล์อิมิชชัน (Cold Field Emission Source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ทำจากทังสเทนเช่นกัน แต่ใช้หลักการทำงานของการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม (Quantum tunneling) และสามารถให้ความสว่างสูงมาก ทำงานที่อุณหภูมิห้อง

4. แหล่งกำเนิดแบบช็อตตี้ฟิลด์อิมิชชัน (Schottky Field Emission Source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ ใช้หลักการทำงานของการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่ปืนอิเล็กตรอนชนิดนี้ ทำจากทังสเทน (100) ที่เคลือบด้วย ZnO และต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1800 K

เลนส์อิเล็กตรอน

เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะมีแรงมากระทำกับลำอิเล็กตรอน ดังนั้นเราสามารถนำหลักการนี้ในการโฟกัสลำอิเล็กตรอนได้ ซึ่งเราจะเรียกเครื่องมือที่สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนนี้ว่า Condenser lens โดยจะประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กสองขั้วและอาศัยขดลวดทองแดงสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อให้

กระแสไฟฟ้า กลางเลนส์แม่เหล็กจะมีช่องสำหรับให้ลำอิเล็กตรอนผ่าน แรงแม่เหล็กจะบีบลำอิเล็กตรอนไปโฟกัสที่จุดโฟกัส ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้น ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบที่ผิวของวัตถุเป้าหมาย โดยมีคอยล์กวาดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุ

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron)

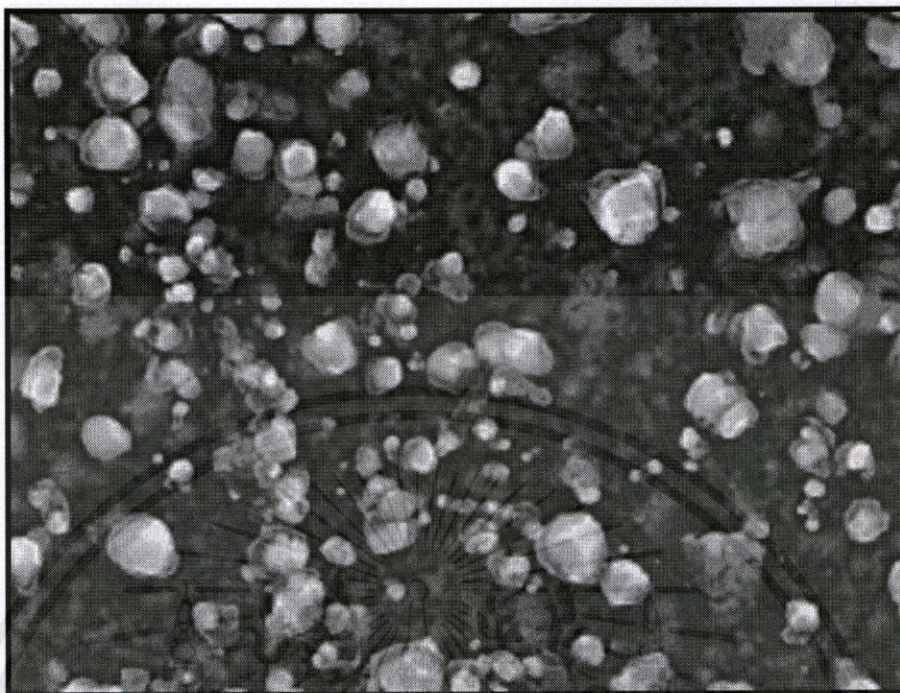
เมื่อลำอิเล็กตรอนพุ่งเข้าชนชิ้นงานจะถ่ายเทพลังงานให้อะตอมในสารตัวอย่าง ซึ่งหากพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากโอกาสการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิที่พุ่งชนสามารถเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน หากอิเล็กตรอนปฐมภูมิสามารถแทรกผ่านชิ้นงานได้ลึก โอกาสเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็จะน้อยลง ดังนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนใหญ่จะเกิดจากบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน

Electron Detector

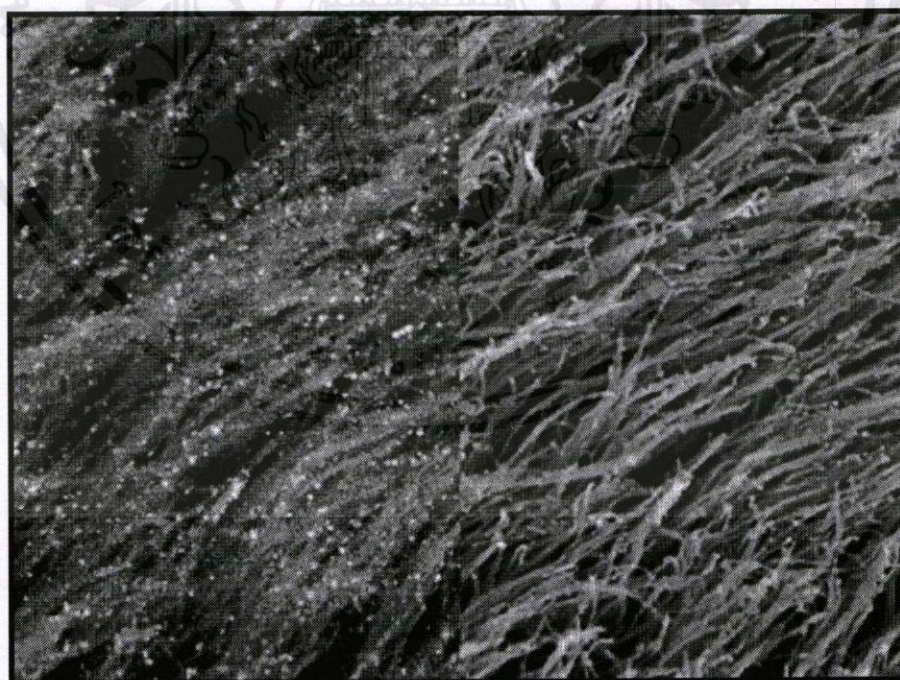
หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนจะเลือกเฉพาะสัญญาณที่ต้องการ เนื่องจากบริเวณผิวจะมีสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอะตอมของชิ้นงานและอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนหลายชนิด หากสัญญาณที่ต้องการนำไปสร้างภาพคืออิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะถูกดึงด้วยสนามไฟฟ้าจากหัววัดสัญญาณ ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะมีพลังงานต่ำจึงเคลื่อนที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนเข้าสู่หัววัดสัญญาณจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชน Scintillator (ทำมาจาก CaF_2) ทำให้เกิดโฟตอน ซึ่งจะถูกส่งไปตาม Light guide เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและนำไปขยายสัญญาณต่อไป

การเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบผิวชิ้นงานจะทำให้เกิดผลจากอันตรกิริยาต่างๆภายในระบบ หัววัดสัญญาณจะตรวจวัดสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้น เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิหรือ Backscatter electron และนำสัญญาณไปแสดงออกบนจอ Cathode Ray Tube (CRT) โดย SEM จะมีระบบชุด Scanning coil ซึ่งเป็นขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณที่ควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงตำแหน่งบนจอภาพแบบจุดต่อจุด ปริมาณของสัญญาณ



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงอำนาจการแยกแยะของ SEM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวน วิชาสำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์

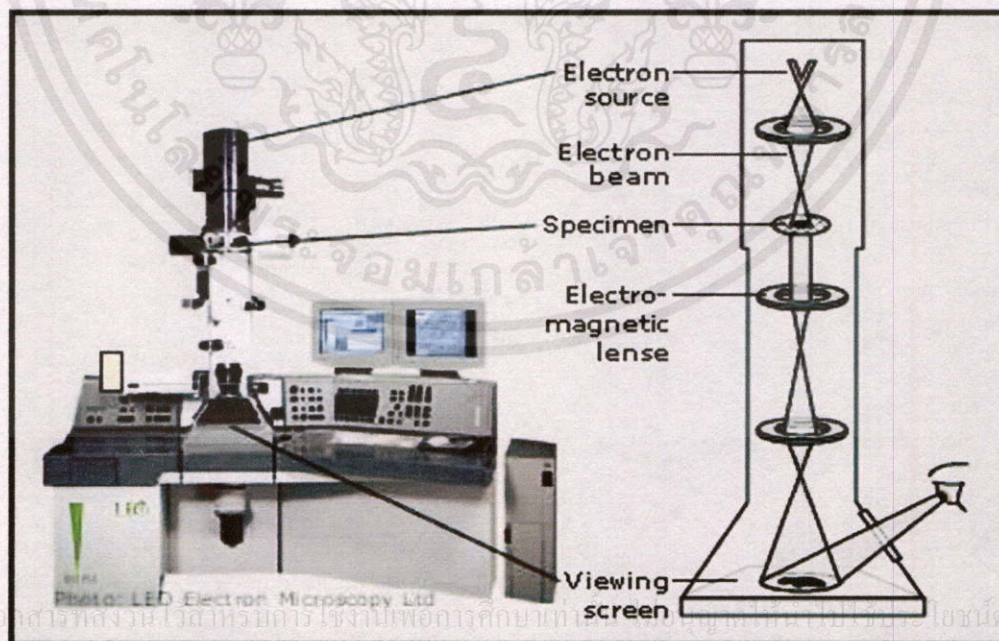
อิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมความมืดความสว่างบนจอ ในรูปที่ 3.2 เป็นภาพแสดงอำนาจการแยกแยะของ SEM และ รูป 3.3 เป็นภาพตัวอย่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากพื้นที่ในการกราดลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงานมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่แสดงผลบนจอภาพ ดังนั้นเราจะได้กำลังขยายของกล้อง SEM คือ

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่แสดงผลบน CRT}}{\text{พื้นที่กราดลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน}}$$

สำหรับความละเอียดของภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการกราดลำอิเล็กตรอน ถ้าใช้ความเร็วในการกราดมีค่าสูงก็จะทำให้ภาพมีความละเอียดต่ำ และหากใช้ความเร็วในการกราดลำอิเล็กตรอนต่ำก็จะทำให้ภาพมีความละเอียดสูง ซึ่งเราสามารถควบคุมความเร็วของการกราดลำอิเล็กตรอนด้วยอุปกรณ์ Scanning coil

3.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องทะลุ Transmission Electron Microscope (TEM)

การศึกษาเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) จะใช้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสสารที่มีขนาดเล็กมาก ตั้งแต่ระดับไมโครเมตรไปจนถึงระดับอะตอม



รูปที่ 3.4 ใตอะแกรมของ Transmission Electron Microscope (TEM)

รูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) โดย TEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ในลักษณะเดียวกับ SEM แต่ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนในกล้อง TEM สูงถึง 100 – 400 กิโลโวลต์ (kV) กล้อง TEM ทำงานโดยใช้เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) 2 อัน เพื่อให้โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ขนานกับคอลัมน์ของกล้อง จากนั้น ลำอิเล็กตรอนจะผ่านชิ้นงานที่เตรียมให้บาง (< 500 นาโนเมตร) และเกิดการเลี้ยวเบน ลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบน จะถูกโฟกัสรวมกันเป็นจุดดิฟแฟรกชัน (Diffraction spots) ที่ระนาบแบคโฟกัลปี (Back focal plane) โดยเลนส์วัตถุ (Objective lens) จากนั้นจะผ่านไปยังเลนส์โปรเจกเตอร์แม่เหล็กอีก 3 ตัวเพื่อทำหน้าที่ขยายและแสดงภาพลงมาบนจอของกล้อง TEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องผ่าน สามารถสร้างภาพได้โดยอาศัย Selected Area Electron Diffraction (SAED) ซึ่งอยู่ระหว่างชิ้นงานและเลนส์โปรเจกเตอร์ ลำอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะทะลุผ่านชิ้นงาน โดยที่ไม่ได้เกิดการกระเจิง และมีลำอิเล็กตรอนบางส่วนที่สูญเสียพลังงานเนื่องจากการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น แต่ไม่เปลี่ยนเส้นทาง ภาพที่สร้างจากอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานโดยไม่เปลี่ยนทิศทาง เรียกว่า Bright-field image ถ้าตัวรับอิเล็กตรอนรับเฉพาะอิเล็กตรอนที่หักเหทิศทาง เนื่องจากระนาบของผลึก hkl แล้ว ภาพที่ได้จากส่วนนี้ เรียก Dark-field image สามารถแบ่งลักษณะของภาพได้ 2 ชนิดคือ รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมในวัสดุและภาพขยายขนาด 10,000 – 1,000,000 เท่า ซึ่งสามารถแปลผลข้อมูลที่ได้จากภาพทั้งสองนี้ได้อย่างกว้างขวาง ดังแสดงตัวอย่างของท่อนาโนคาร์บอนในรูปที่ 3.5 ที่ได้จาก TEM



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอน

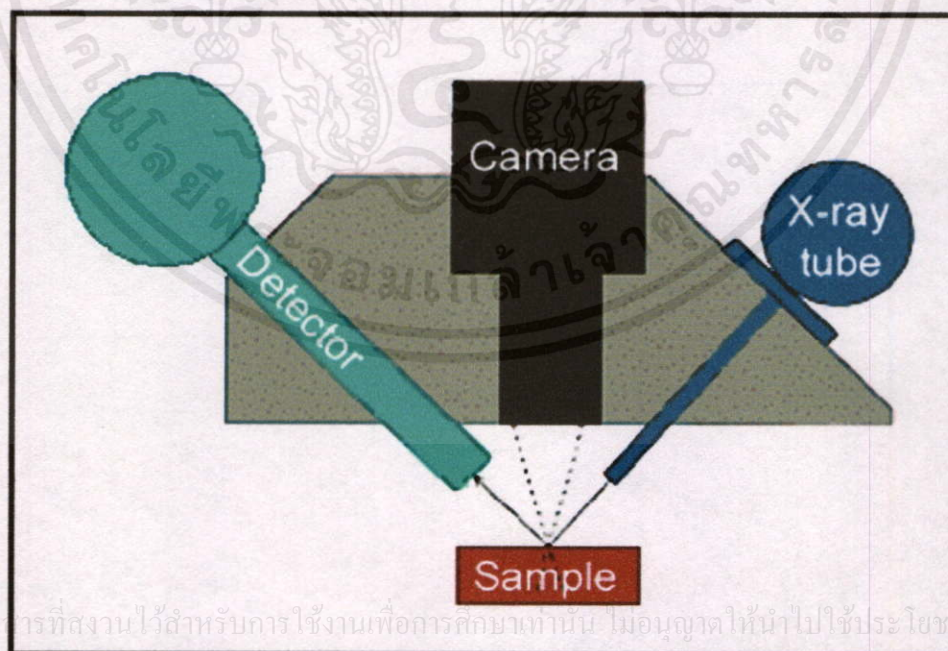
3.3 การวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) จากสัญญาณ X-Ray

EDX หรือ EDS เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ในของแข็งและของเหลวโดยการฉายด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อจะศึกษาการกระจายของพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จากอะตอมของชิ้นงาน หลังจากฉายรังสีเอกซ์กระทบชิ้นงาน โดยจะแสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้บนแกนตั้ง และแสดงค่าพลังงานบนแกนนอน ซึ่งค่าพลังงานที่ได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้าสู่วงในจะมีความเฉพาะเจาะจงของอะตอมแต่ละธาตุ ทำให้ศึกษาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อถูกฉายด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานปลดปล่อย รังสีเอกซ์ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละธาตุออกมา จากนั้น Energy dispersive detector จะตรวจสอบสเปกตรัมของรังสีที่ถูกปล่อยออกมา ซึ่งธาตุแต่ละธาตุในสารตัวอย่างจะมีความเฉพาะตัวของพลังงานของรังสีที่ปล่อยออกมา

หลักการการทำงานของ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

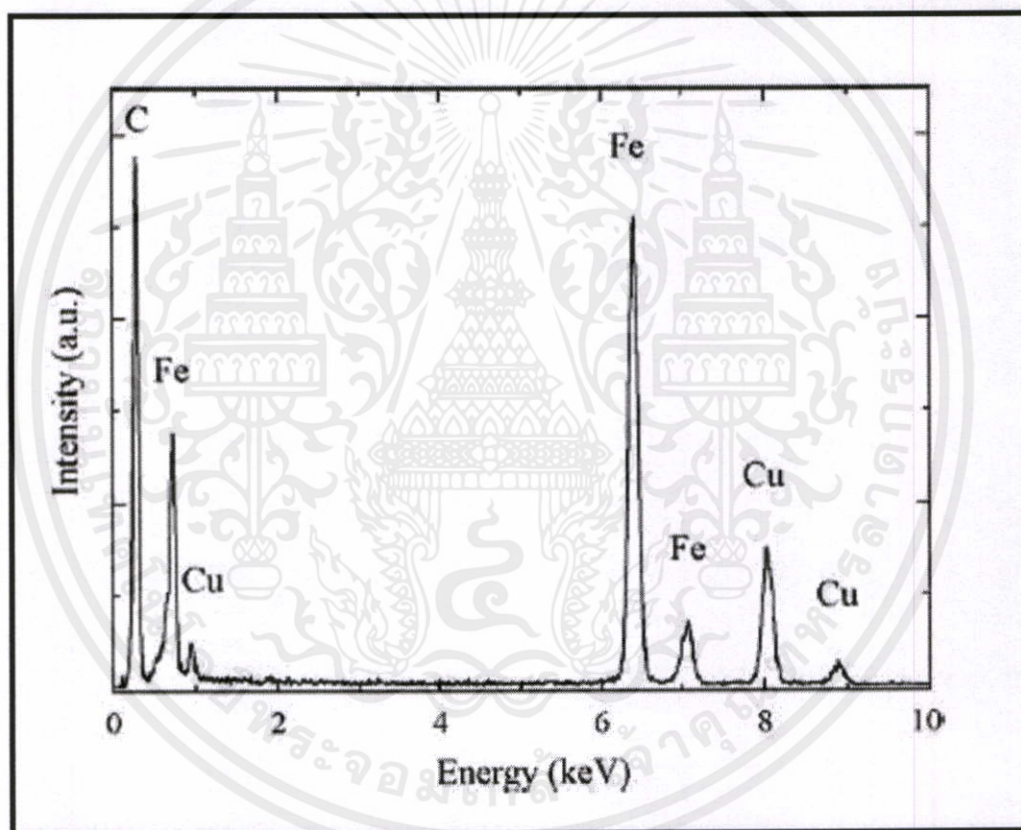
รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องระบบ Energy dispersive X-ray เมื่อรังสีเอกซ์กระทบชิ้นงานจะมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนชั้นใน เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานมากกว่าพลังงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง ระบบ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

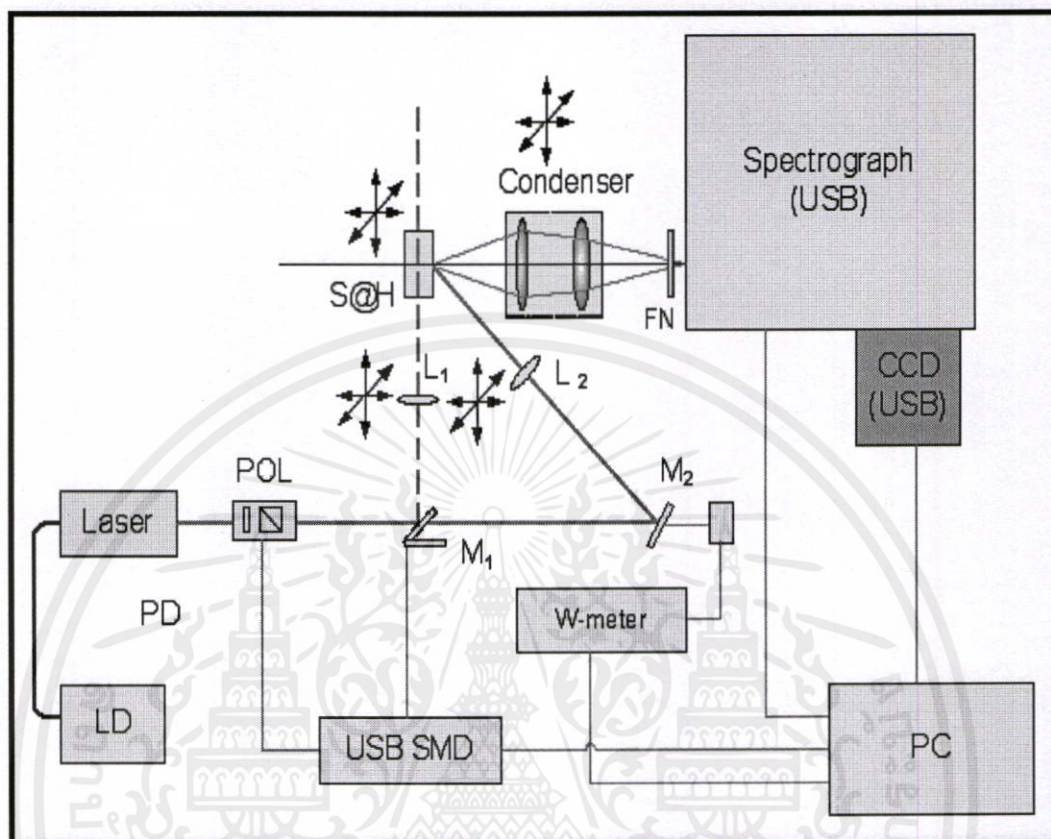
ยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานจลน์และหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้เกิดที่ว่างในวงโคจร หลังจากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่นที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะเข้ามาแทนที่การตกเข้ามาแทนที่ของอิเล็กตรอนวงนอกนี้ เรียกว่า Relaxation และอะตอมจะปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละอะตอมออกมาในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะตกเข้าไปแทนที่และปลดปล่อยพลังงาน ผลของพลังงานนี้จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าหลุดออกไป เรียกว่า Auger electron ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายที่ได้จากกระบวนการ Auger emission โดยรังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนตัวแรกหลุดออกไปจากวงใน ทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนตัวที่สอง รูปที่ 3.7 เป็นภาพถ่ายตัวอย่างจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ



รูปที่ 3.7 ภาพจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ

3.4 การวิเคราะห์คุณภาพของธาตุด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสาร Raman Spectroscopy ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ Vibrational Spectroscopy เช่นเดียวกับ Infrared (IR) Spectroscopy แต่แถบอินฟราเรดเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยน โมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ส่วนแถบรามานเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยน ความเป็นขั้วได้ (polarizability) มีหลายกรณีที่การทรานซิชันเกิดขึ้นได้ในกรณีของรามาน แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีของอินฟราเรด



รูปที่ 3.8 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer

รูปที่ 3.8 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer โดยทั่วไป โดยทั่วไป เครื่อง Raman Spectrometer จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วน คือ ส่วนเลเซอร์ ส่วนของ Probe และ ส่วน Spectrograph

Laser : เลเซอร์จะถูกใช้ในระบบของ Raman Spectrometer เนื่องจากเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว

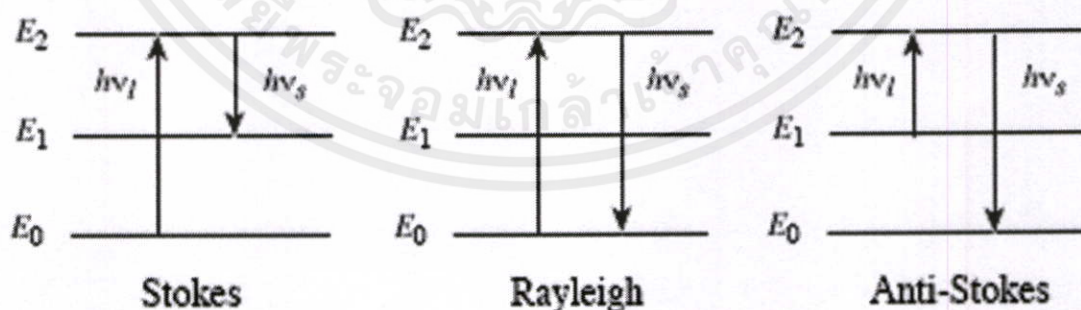
Probe : โพรบจะทำหน้าที่วัดปริมาณของโฟตอนที่กระเจิงออกมา โดยกรอง Rayleigh scatter และสัญญาณอื่นๆ ออกไป แล้วส่ง Raman scatter ไปยัง spectrograph มี Probe บางชนิดที่ทำหน้าที่โฟกัสลำแสงเลเซอร์ซึ่งตกกระทบชิ้นงานด้วย

Spectrograph : เมื่อ Spectrograph ได้รับ Raman scatter ก็จะส่งต่อผ่านเกรตติงเพื่อแยกความยาวคลื่นตามความถี่ แล้วส่งต่อไปยัง detector ซึ่งจะทำการบันทึกความเข้มของ Raman scatter ในแต่ละค่าความยาวคลื่น ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะนำมาเขียนลักษณะของ Raman Spectrum

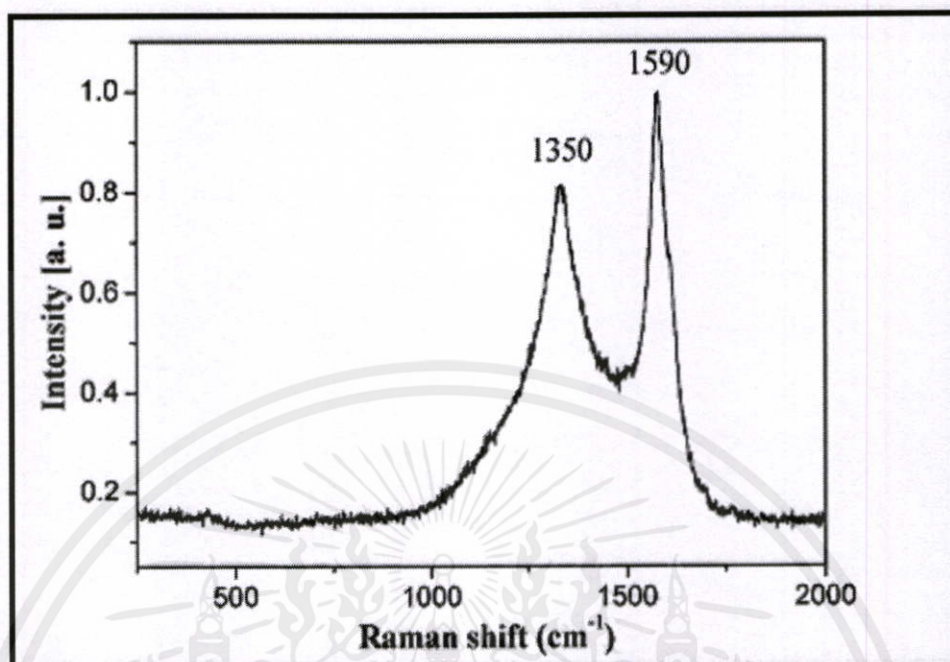
หลักการทํางานของ Raman Spectroscopy

เมื่อลำแสงกระทบสารตัวอย่าง โฟตอนจะถูกดูดกลืนและกระเจิงออกมา ส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอน แต่มีโฟตอนบางส่วน (ประมาณ 1 ใน 10^7) ที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่เป็ Raman scatter นี้ ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (Stoke shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (anti-Stokes shift) Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนสูงกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering จากรูปที่ 3.9 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า (virtual state) เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมา

สเปกตรัมแบบรามานจะเป็นกราฟระหว่าง ความเข้มของรังสีรามานที่กระเจิงออกมา เทียบกับความถี่ที่แตกต่างออกไปจากความถี่ของแสงตกกระทบ (นิยมใช้หน่วยของเลขคลื่น, cm^{-1}) ซึ่งความแตกต่างของความถี่นี้จะเรียกว่า Raman Shift ค่าที่ใช้ในการสร้างกราฟนิยมใช้ความถี่ในย่านของ Stokes รูปที่ 3.10 เป็นตัวอย่างของกราฟรามานที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวบ์



เอกสารนี้รูปที่ 3.9 ระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti- โชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ Stokes scattering ักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟรามานที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวบ์

โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเทคนิครามาน มีความถี่ที่สนใจอยู่ 3 ย่านคือ

1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $<200 \text{ cm}^{-1}$ จะเรียกย่านความถี่นี้ว่า RBM (radial breathing mode) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้น แสดงว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว

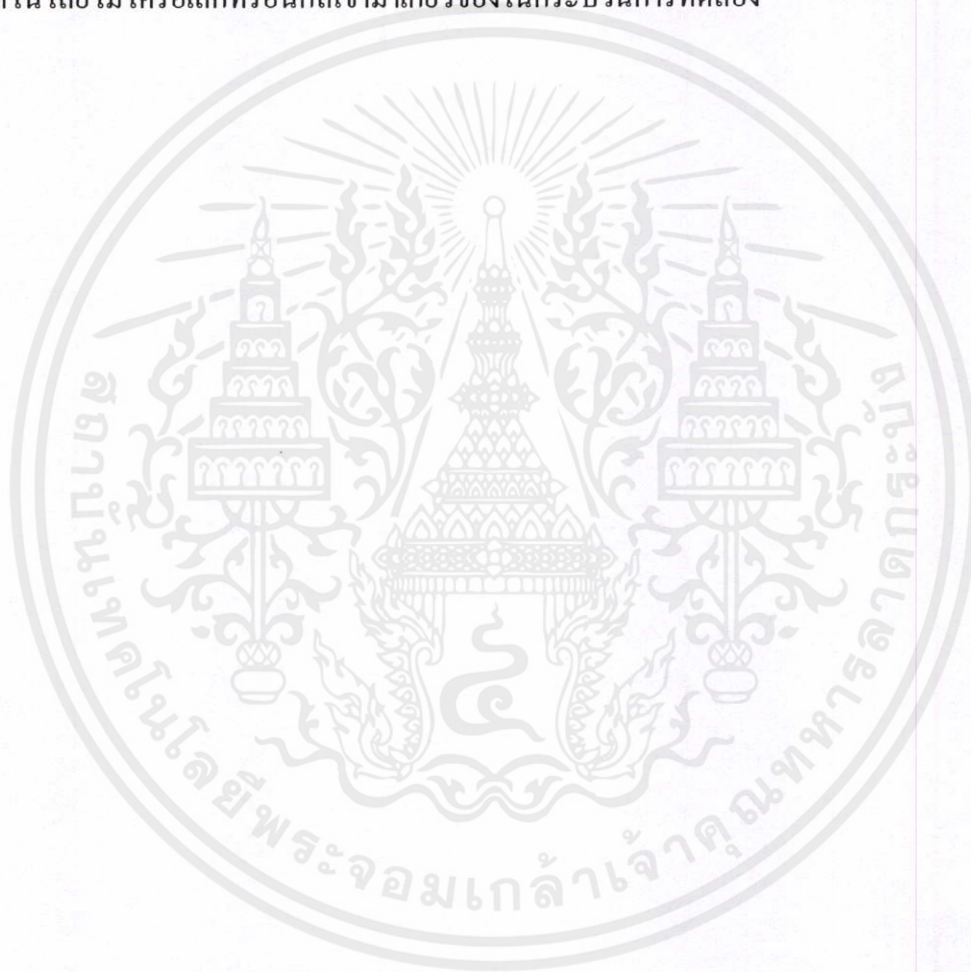
2) ความถี่เฉลี่ยประมาณ 1340 cm^{-1} เรียกว่าย่าน D-Band ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีพันธะไม่สมบูรณ์หรือมี Defect ในย่านนี้ไม่ควรจะมีความสูงของพีคมากนัก เพราะเป็นย่านที่แสดงถึงความไม่สมบูรณ์หรือมีสิ่งเจือปนที่อยู่ในรูปแบบของผลึกที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

3) ความถี่เฉลี่ยประมาณ $1500 - 1600 \text{ cm}^{-1}$ เรียกว่าย่าน G-Band ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีพันธะสมบูรณ์ ในส่วนของพีคที่แสดงถึงความบริสุทธิ์นั้น ความกว้างของแถบ G-band ยังบ่งบอกถึงคุณสมบัติการเป็นตัวนำที่ดีหรือสารกึ่งตัวนำของคาร์บอนนาโนทิวบ์อีกด้วย ดังนั้น การวิเคราะห์คุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะหาได้จากการนำ

เอกสารนี้ค่าพื้นที่ใต้กราฟของพีค G มาหารกับพีค D หรืออัตราส่วนของ $I(G)/I(D)$ ซึ่งค่าที่มากจะแสดงถึง

ไม่ว่ากรณี ความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์หา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสรุป จะพบว่าการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้อง
ใช้เครื่องมือต่างๆเหล่านี้ช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่ง SEM เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก
ในการหาขนาดของท่อได้อย่างคร่าวๆและยังแสดงถึงลักษณะการเกิดได้อีกด้วย เครื่องมือ EDX
สำหรับเพื่อยืนยันถึงองค์ประกอบธาตุต่างๆที่สำคัญ เครื่องมือ TEM สำหรับศึกษาถึงขนาดและ
ลักษณะของท่ออย่างละเอียด และสุดท้ายสำหรับเครื่องมือ Raman Spectroscopy ที่บอกถึงความ
บริสุทธิ์ของท่อคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ด้วยกราฟ ในบทต่อไป จะกล่าวถึงกระบวนการ
สังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HF-CVD กระทำที่ความดันบรรยากาศ และศึกษาถึงการนำ
เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

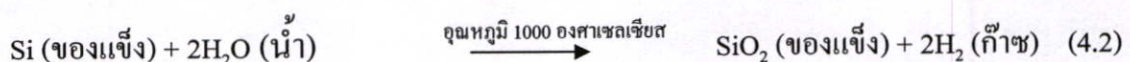
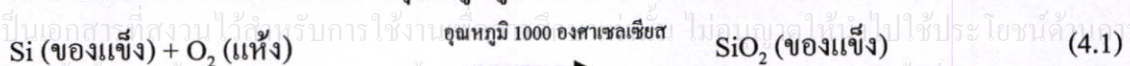
กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์และเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีและกระบวนการต่างๆของเทคโนโลยีพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เกี่ยวข้องกันสำหรับประยุกต์ให้คาร์บอนนาโนทิวส์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์ในที่นี่ ใช้วิธี HFCVD ที่ความดันบรรยากาศ กระบวนการสร้างเหล่านี้ จำเป็นต้องมีเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องด้วย โดยจะประกอบด้วย กระบวนการออกซิเดชันสำหรับสร้างชั้นฉนวนบนฐานรองซิลิคอนหรือซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้าและแคตะไลต์ และกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับการทำเป็นลวดลาย แนวคิดสำหรับการประยุกต์ให้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น เริ่มจากการศึกษาถึงผลกระทบต่างๆในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์ เช่น ฐานรอง แคตะไลต์ และสารแหล่งจ่ายที่แตกต่างกันว่ามีผลอย่างไรต่ออัตราการเกิด ขนาดของท่อและคุณภาพของท่อคาร์บอน จากนั้นศึกษาถึงการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวส์ โดยการเตรียมฐานรองให้เกิดเป็นลวดลายด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการสร้างวงจรรวม และสามารถสร้างได้ทั้งหมดที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

4.1 กระบวนการออกซิเดชันสำหรับสร้างชั้นฉนวน

การสร้างชั้นฉนวนนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เพื่อต้องการควบคุมไม่ให้กระแสไฟฟ้าของขั้วโลหะไหลผ่านเข้าไปในเนื้อของซิลิคอน แต่ต้องการให้ผ่านฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวส์ ซึ่งเป็นวัสดุรองรับที่สำคัญในการตรวจจับก๊าซ

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) นี้จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสงใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี และยังใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยขบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้ง หรือน้ำ ในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้





รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของเตาให้ความร้อนสำหรับสร้างชั้นฉนวน

สำหรับกลไกการเกิดขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี เกิดจากก๊าซออกซิเจนแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ เข้าไปจนถึงผิวหน้าสัมผัสระหว่างซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาเคมี การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้ ทำได้ 2 ลักษณะคือ

4.1.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

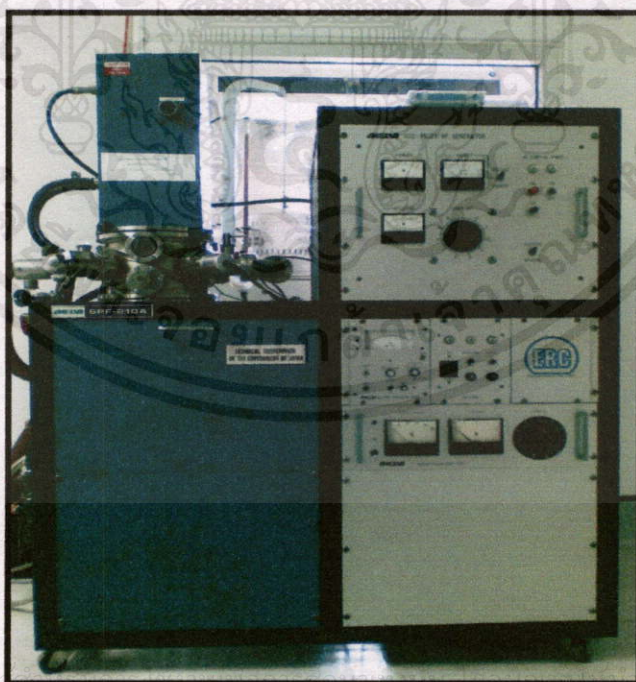
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นใดเจือปนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 900°C ถึง 1100°C จะทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการ 4.1 และ 4.2 เตาที่ใช้ในการ oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน (ผิดพลาด $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน

4.1.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอน กับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ สำหรับการออกซิเดชันแบบชื้นทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้งทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบชื้นนี้คือมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่เร็วกว่าแบบแห้งหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้นจึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือได้ดีกว่า และเนื่องจากการออกซิเดชันแบบชื้นจะทำให้สภาพผิวของผลึกไม่สมบูรณ์คือการบิดเบือนของผลึก (crystal dislocation) เกิดรูพรุนขึ้น

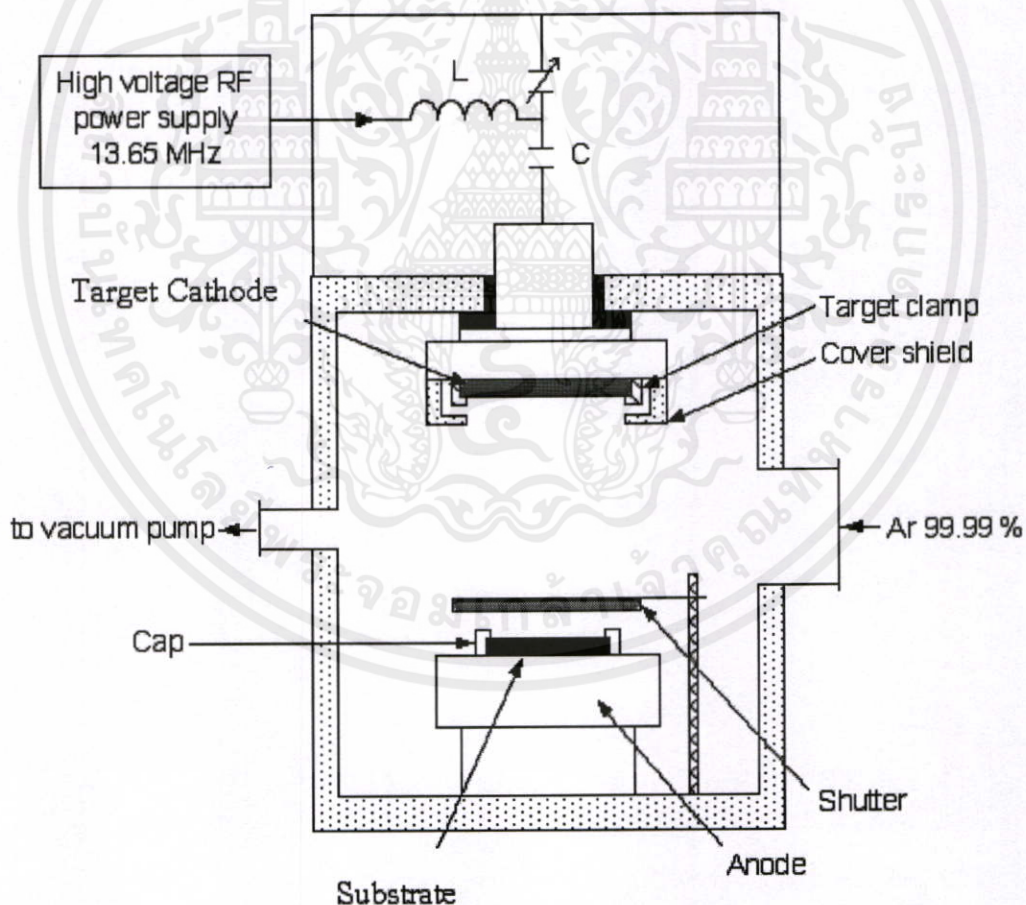
4.2 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบแคตะไลต์และขั้วไฟฟ้า

วิธีการสปัตเตอร์ริง ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับเคลือบโลหะบนพื้นผิวฐานรองเพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับงานบางประเภทและได้ประยุกต์ใช้กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้าที่เป็นทองแดง อีกทั้งต้องการเคลือบนิเกิลซึ่งเป็นตัวแคตะไลต์เพื่อช่วยในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า“อาร์เอฟ ไดโอดสปัตเตอร์” ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของเครื่องสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบแคตะไลต์และขั้วไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.3 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปีดเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz) , แหล่งจ่ายก๊าซ , ห้องสปีดเตอร์(sputtering chamber), และปั๊มสุญญากาศ(rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปีดเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่น Target เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด การสปีดเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรมะทซึ่งเข้าสู่ห้องสปีดเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน (Ar) ทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปีดเตอร์ ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบ และดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชนโดยนิเกิลที่ขั้วคาโทด ทำให้อะตอมของ Target กระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นตัวอย่างซึ่งวางที่ขั้วแอโนด จะเกิดเป็นฟิล์มโลหะเคลือบอยู่บนฐานรอง

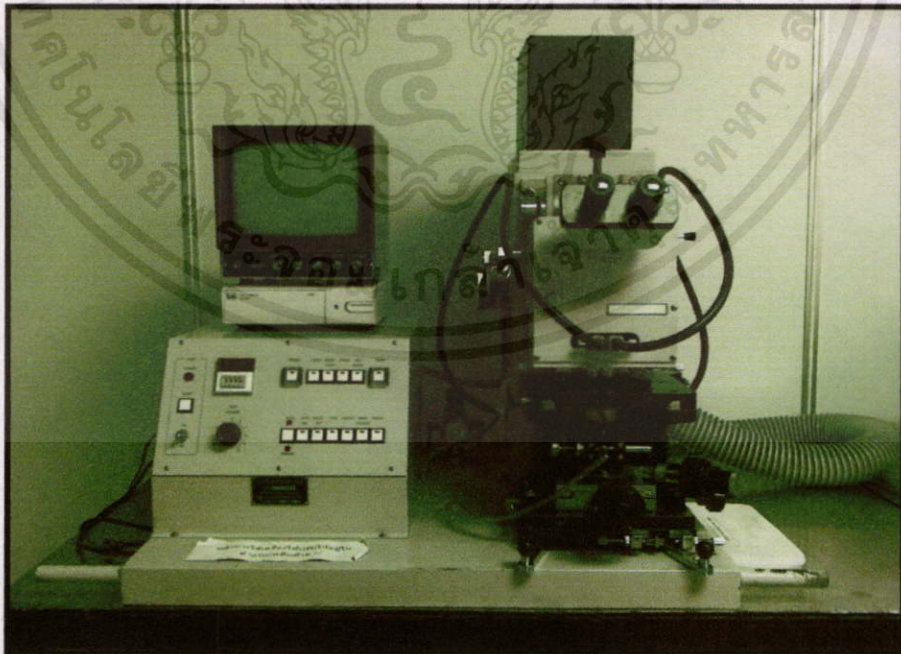


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้

รูปที่ 4.3 ระบบการสปีดเตอร์แบบอาร์เอฟไดโอด ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสร้างลวดลาย

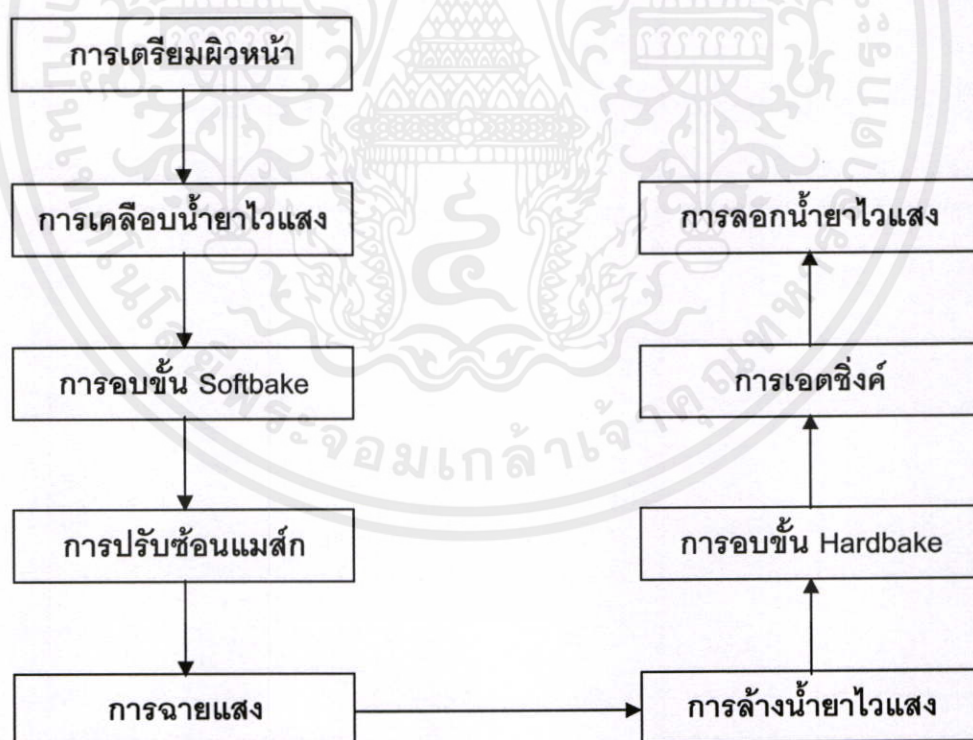
โดยทั่วไปแล้วเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมเพื่อการสกัด หรือเอตซิงค์ (etching) ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วน ที่เคลือบอยู่บนผิวผลึกซิลิคอนออก เพื่อการแพร่อะตอมของสารเจือ (impurity atom) เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ทำให้เกิดส่วนต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งลำดับขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.5 เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงด้วยเครื่องมือสำหรับการฉายแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยแสงจะผ่านกระจกลวดลายต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตแมสก์ (photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ (design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตแมสก์ จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้าง อยู่บนผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสงชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลือปกคลุมอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ ถูกสกัด หรือเอตซิงค์ ด้วย “สารตัวสกัด” หรือเอตเชนซ์



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของเครื่องฉายแสงสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

4.3.1 การเตรียมผิวหน้า

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆหลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึก ก่อนที่จะเคลือบน้ำยาไวแสง บนผิวสารต่างชนิดกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้มากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้น ซิลิคอนออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจากการกำจัดความชื้นที่อยู่ในชั้นออกไซด์ เพราะโดยปกติ ผิวของชั้นออกไซด์นี้ จะดูดซับไอน้ำ หรือความชื้นจากอากาศได้ดีการกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า Pre bake หรือ dehydration bake ที่อุณหภูมิราว 200-250 °C นาน 30 นาที ภายหลังการอบ ถ้าหากนำออกมาทิ้งไว้นานเกินกว่า 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์จะดูดซับความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นต้องทำการอบใหม่ ดังนั้น เมื่ออบเสร็จแล้วควรดำเนินการ เคลือบน้ำยาไวแสงทันที นอกจากนี้ ก่อนเคลือบน้ำยาไวแสง อาจใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexa Methyl Disilazane (HMDS) ฉีดพ่น หรืออบไอระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำ ออกจากชั้นผิวของออกไซด์โดยทั่วไปในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรย์ของสาร HMDS แล้วปั่น หรือหมุนให้แห้ง จากนั้นจึงจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 ขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

4.3.2 การเคลือบนำยาไวแสง

การเคลือบนำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุอื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสม หรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้ คือ

4.3.2.1 แบบสปินเนอร์ (Spinner)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบนำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึกวงกลมการเคลือบนำยาไวแสงวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือสปินเนอร์ โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูวางลงบนแท่นหมุน และถูกยึดติดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นนำยาไวแสงจะถูกหยดลง บริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่เหมาะสม เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (spin) ด้วยความเร็วรอบราว 3000-6000 rpm/min ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที นำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ความหนาของฟิล์มสารไวแสงที่ได้ มีค่าทั่วไปประมาณ 1000-2000 Å ถ้าหากความเร็วรอบต่ำเกินไป ชั้นของสารไวแสงจะหนามาก แต่ถ้าความเร็วรอบสูงๆความหนาของชั้นสารไวแสงจะไม่เท่ากัน โดยบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะหนามาก ในขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังฝุ่นละอองเป็นพิเศษ ดังนั้นจึงทำภายในห้องสะอาด หรือ clean room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้จะถูกควบคุม ให้มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้ระบบกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter) ระดับของความสะอาดจะขึ้นอยู่กับ ขนาด และจำนวนฝุ่นละอองในอากาศ โดยปกตินิยมใช้ค่าความหนาแน่น ของฝุ่นละอองขนาด 0.5 ไมโครเมตร ในปริมาตร 1 ลูกบาศก์ฟุตเป็นมาตรฐาน

4.3.2.2 แบบสเปรย์ (Spray Coating)

วิธีการนี้นำยาไวแสงจะถูกฉีดหรือพ่นออกมาให้เป็นละออง นำยาจะตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึกและยึดเกี่ยวกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ได้ทำได้ค่อนข้างยากปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ ด้านล่างของแผ่นผลึก

4.3.2.3 แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating)

การเคลือบนำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้ง จะนิยมทำในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นหรือชิพ (chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยนำยาไวแสง ทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันเศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่นที่จะเกิดขึ้นขณะทำการตัดแยกชิพ ด้วยเลื่อย (sawing) หรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้นำยาไวแสงชนิดบวก

4.3.3 การอบชั้น Prebake หรือ Softbake

ภายหลังจากเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบ เพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำชั้นตอนต่อไป การอบในขั้นนี้ เรียกว่า prebake หรือ softbake ซึ่งใช้อุณหภูมิราว 90-100 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำลงเล็กน้อยคือ 80-90 °C การอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดมีปฏิกิริยาเคมี – ความร้อน หรืออาจไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีซึ่งสามารถกระทำได้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (convection oven) ซึ่งในตู้อบจะมีพัดลมช่วยพัดไอร้อนจากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นผลึกทำให้แผ่นผลึกร้อน การอบสามารถทำได้จำนวนหลายแผ่นพร้อมๆ กัน โดยแผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่องกาสซีทพิเศษ และวิธีการให้ความร้อนแบบนี้แผ่นผลึกจะได้รับความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้ อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน จึงอาจเกิดการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งเป็นข้อเสีย และไม่เหมาะที่จะใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง สำหรับในสายการผลิตวงจรรวม ในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกทีละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการเช่นนี้ ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสงซึ่งทำให้สามารถไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อน เช่นนี้เรียกว่า “bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (hot plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางบนแผ่นร้อนหรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

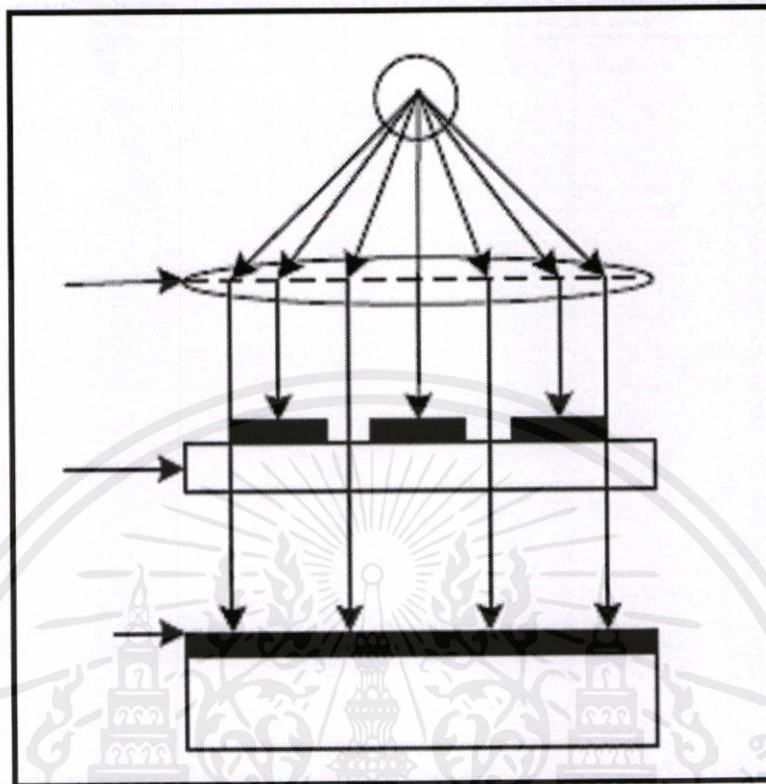
4.3.4 การปรับชั้นแมสก์ (Mask Alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตแมสก์ซึ่งโดยปกติจะถูวางทาบทับ (contact) ลงไปบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโตแมสก์ชั้นแรก หรือแมสก์ที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับชั้นแมสก์ (mask alignment) ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวม บนแผ่นผลึกเลย แต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้น ได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่ง หรือบริเวณที่ถูกต้องเพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตแมสก์ตั้งแต่แมสก์ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับชั้นแมสก์ เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกแมสก์ ซ้อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้องในที่สุดของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จะทำให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ที่ตำแหน่งที่ถูกต้อง โครงสร้างของวงจรรวมจึงเป็นไปตามที่ออกแบบและถูกต้อง อย่างไรก็ตามเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก

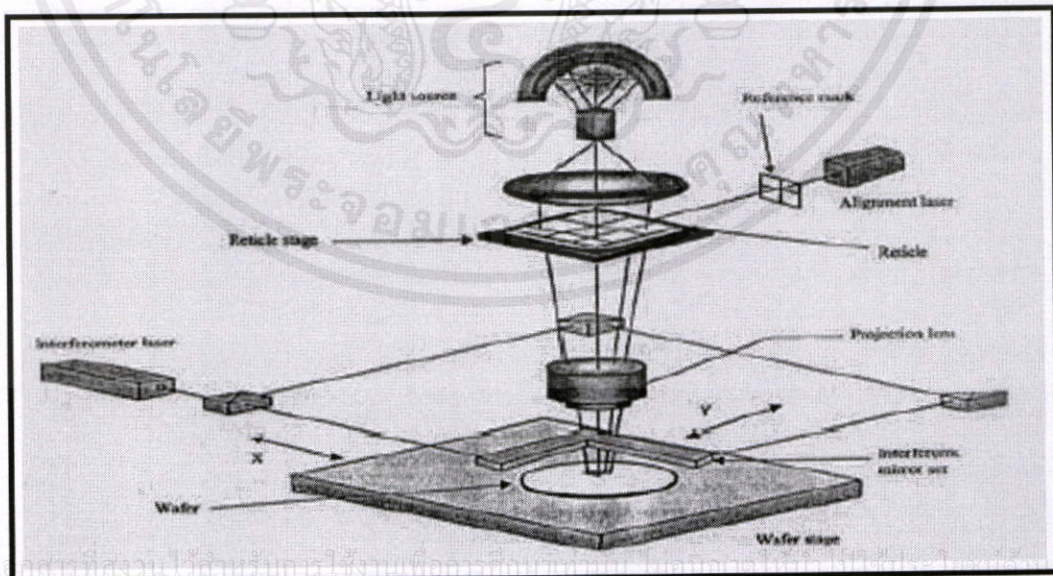
ดังนั้นในการปรับซ็อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซ็อนแมสก์” ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือแผ่นผลึกจะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (x-y-z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว x, y, z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตแมสก์จะถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นผลึก และบนโฟโตแมสก์ พร้อมกับทำการปรับเลื่อนแผ่นผลึกทั้งแกน x, y และมุม θ จนกระทั่ง ภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตแมสก์ซ้อนกันลงตรงตำแหน่ง ที่ถูกต้อง จากนั้นจึงปรับให้แผ่นผลึกเลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน z จนแนบสนิทกับกระจกโฟโตแมสก์ ในกรณีที่ภาพลวดลาย มีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ็อนภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไป ภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก

นอกจากนี้ยังมีจำนวนมากอีกด้วยจึงเป็นการยาก ที่จะทำการปรับซ็อนโดยสังเกตจากภาพลวดลายของวงจรรวม ในทางปฏิบัติ เพื่อให้การปรับซ็อนทำได้ง่าย จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซ็อนแมสก์โดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับซ็อน” ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (square in box), กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากบาท เช่น ภาพลวดลายบนแผ่นผลึกของ “เครื่องหมายปรับซ็อน” เป็นรูปจัตุรัส และภาพลวดลายบนกระจกแมสก์ เป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น การปรับซ็อนทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นผลึก บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพ จัตุรัสเข้าไปซ้อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยมในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมบนแผ่นผลึก และบนกระจกโฟโตแมสก์ จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกต้องทุกประการ ถ้าหากการปรับซ็อนตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้องและเกิดการเสียหายได้ขั้นตอนของการปรับซ็อนจึงเป็นเรื่องสำคัญมากการพิมพ์ภาพด้วยการใช้กระจกโฟโตแมสก์มาวางทับลงไปบนแผ่นผลึกๆ ให้แนบสนิทแล้วฉายแสงซึ่งเรียกว่า วิธี contact printing ดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่ามีการสัมผัสกันระหว่างแผ่นผลึก และกระจกโฟโตแมสก์ ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยขีดขูด เกิดสิ่งสกปรก หรือความเสียหายต่าง ๆ ได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการใช้วิธีพิมพ์แบบอื่น ๆ เช่นวิธี projection printing ดังแสดงรูปที่ 4.6 ซึ่งกระจกโฟโตแมสก์จะไม่สัมผัสกับผิวหน้าของแผ่นผลึกเลย จึงช่วยลดความเสียหายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้

สำหรับวิธีการ projection printing อาจทำได้ 2 แบบคือ แบบ whole-substrate projection printing ซึ่งเป็นการพิมพ์ ภาพวงจรรวมลงบนแผ่นผลึก ทั้งหมดครั้งเดียวและแบบ step and repeat projection ซึ่งเป็นการพิมพ์ภาพวงจรรวมทีละภาพๆ ลงบนแผ่นผลึกดังแสดงรูปที่ 4.7 ซึ่งการพิมพ์วิธี projection printing นี้ ได้รับความนิยมมากในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมแต่อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูงมาราคาของเครื่องค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.6 กระบวนการพิมพ์ภาพโดยวิธี Projection Printing

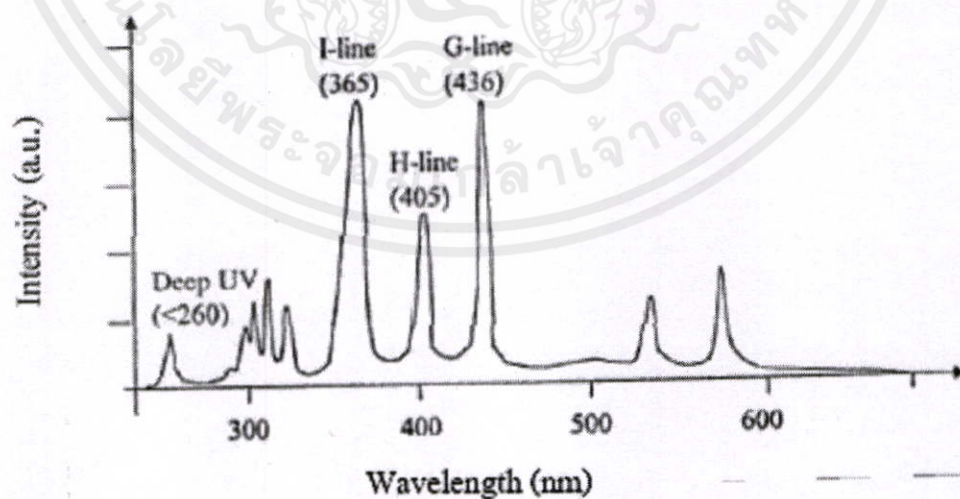


รูปที่ 4.7 กระบวนการพิมพ์ภาพโดยวิธี Step and Repeat Projection

4.3.5 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ็อนภาพระหว่างกระจกโฟโตแมสก์ และแผ่นผลึกเรียบร็อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโตแมสก์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสง ปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่น λ ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือ แสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วง และสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีจึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถาวรจะต้องใช้แสงในท้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (mercury vapor lamp) ซึ่งหลอดนี้จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความยาวคลื่นราว 310, 365, 405 และ 440 นาโนเมตร ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 4.8 และจากการศึกษาพบว่าน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 405 นาโนเมตร และน้ำยาไวแสงชนิดบวก จะมีความไวสูงสุด ใกล้กับเส้นสเปกตรัม 365 นาโนเมตร

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

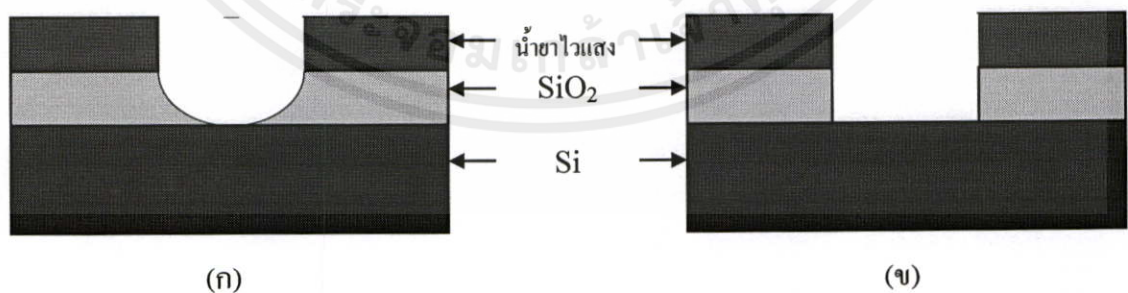
รูปที่ 4.8 แสงสเปกตรัมของหลอดเมอร์คิวรี

4.3.6 การล้างน้ำยาไวแสง (Resist Development)

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

4.3.7 การเอตซิงค์ (Etching)

ขั้นตอนนี้เป็นการสกัดหรือการละลายชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ หรือวัสดุอื่นๆ ด้วยสารเคมีที่เป็นสารตัวสกัด หรือเอตเชนท์ โดยที่แผ่นผลึกที่ผ่านการล้างน้ำยาไวแสง (development) แล้ว น้ำยาไวแสงจะเหลือตกค้าง และปกคลุมอยู่บนผิวของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และบางส่วนก็ถูกละลายออกไป ทำให้ชั้นออกไซด์ บริเวณที่ไม่มีสารไวแสงเหลืออยู่ ถูกทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวสกัด เช่น กรดกัดแก้ว (HF) ก่อนการเอตซิงค์ หรือก็คือ ภายหลังการสร้างน้ำยาไวแสง แผ่นผลึกจะถูกนำไปอบ (post bake หรือ hard bake) เพื่อใช้ชั้นน้ำยาไวแสงแห้งสนิท และยึดติดแน่นกับผิวของออกไซด์ วิธีการการสกัดชั้นสาร หรือชั้นออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารตัวสกัด ที่เป็นสารละลายเคมีนี้ ถูกเรียกว่า “wet chemical etching” หรือ “wet etching” หรือ การเอตซิงค์เปียก ดังรูปที่ 4.9 (ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.9 ภาพที่แสดงถึงผลของการเอตซิงค์เปียกให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง (ก) การเอตซิงค์เปียกถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

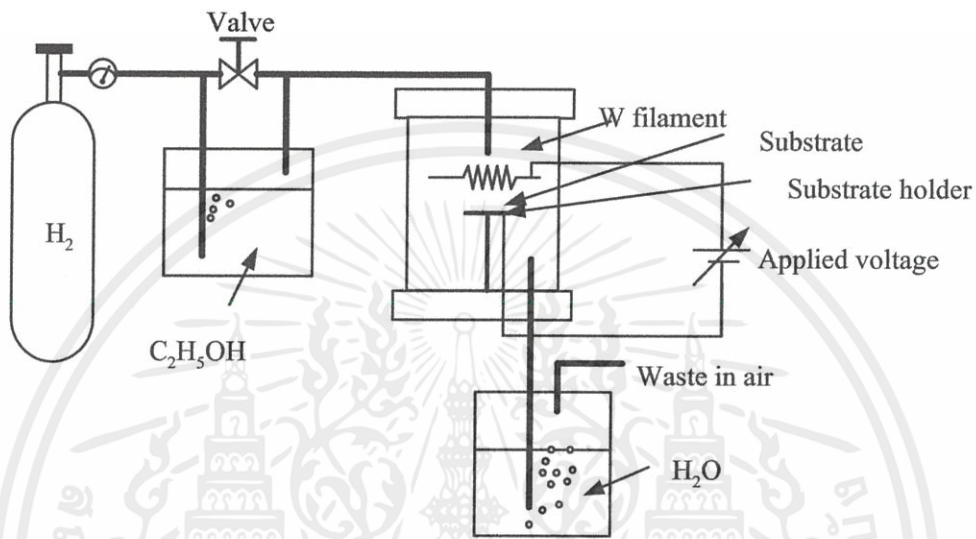
(ข) การเอตซิงค์แห้ง

นอกจากนี้การสกัด หรือเอตซิงค์ สามารถทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาของพลาสมา (plasma) วิธีการนี้ถูกเรียกว่า “พลาสมาเอตซิงค์” หรือ “plasma etching” ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า dry etching หรือ “การเอตซิงค์แห้ง” การเอตซิงค์แบบเปียก จะทำให้เกิดมีการละลายของชั้นสารออกไปในทุกๆ ด้านรวมทั้ง ทางด้านข้างด้วย ทำให้บริเวณขอบของชั้นสาร ถูกสกัดออกไป การเอตซิงค์ในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า “ไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ “Isotropic-type” ส่วนการเอตซิงค์แบบแห้ง หรือ plasma etching จะได้ผลการเอตซิงค์แบบ “แอนไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ anisotropic-type ซึ่งจะทำให้ได้ลักษณะของลวดลายที่คมชัดกว่าการเอตซิงค์แบบเปียก ดังแสดงรูปที่ 4.9 (ข) และภาพลวดลายไม่ผิดเพี้ยนจากต้นแบบ ซึ่งวิธีการนี้ ถูกนำมาใช้กับลวดลายที่มีขนาดเป็นซับไมโครเมตร โดยที่การเอตซิงค์แบบเปียกไม่สามารถนำมาใช้ได้ อัตราการเอตซิงค์แบบเปียก จะขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารตัวสกัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการเอตซิงค์ สารละลายซึ่งเป็นสารตัวสกัด ชั้นของออกไซด์ได้แก่กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งจะมีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) ผสมอยู่เพื่อควบคุมปฏิกิริยาเคมีให้สม่ำเสมอ อัตราการสกัด (etching rate) ประมาณ 1000 Å/min ที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากทำการเอตซิงค์แล้ว ชั้นของน้ำยาไวแสงจะถูกลอกออก ด้วยการนำไปจุ่มในสารละลายที่ใช้สำหรับการลอกฟิล์ม หรือต้มในกรดบางชนิด เช่น กรดน้ำยาไวแสงชนิดลบใช้ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้น และชนิดบวกใช้จุ่มล้างในสารอะซิโตน (acetone) สำหรับกรณีของซับไมครอน นิยมใช้วิธีการของพลาสมาเอตซิงค์ ซึ่งจะทำให้ได้ผิวหน้าที่สะอาด และเรียบร้อย ไม่มีชั้นของน้ำยาไวแสงหลงเหลือหรือติดค้างอยู่เลย

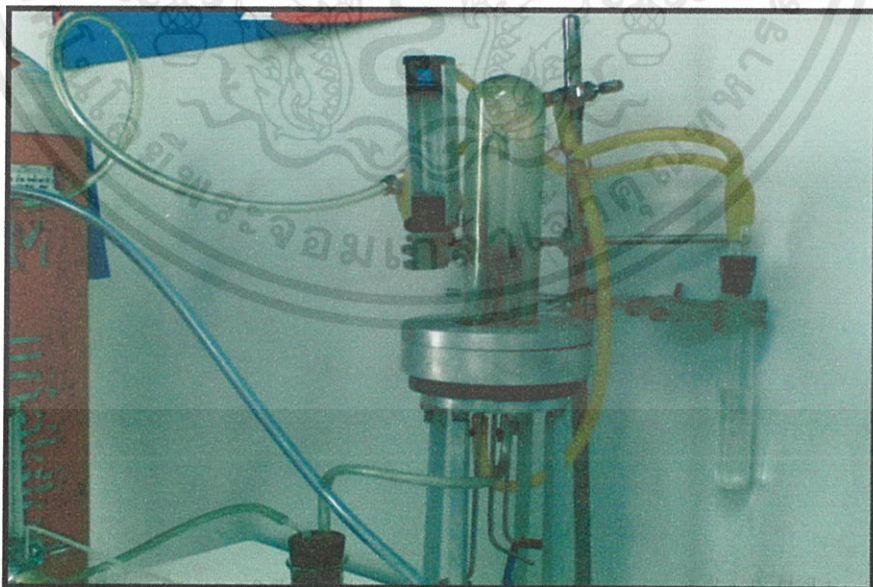
4.4 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ [14-16]

การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน(HFCVD) กระทำที่ความดันบรรยากาศ ใช้สารแหล่งจ่ายที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนผสมกับก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนพอเหมาะ ใส์ของขดลวดความร้อนคือทังสเตน จากแผนภาพรูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นระบบ HFCVD ที่สร้างขึ้นเองอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยท่อแก้ว pyrex ภายในมีลวดทังสเตนเป็นลวดความร้อนซึ่งถูกให้กระแสเข้าไปจากภายนอกจนทำให้เกิดความร้อนสูงจนทำให้โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิสูง ซึ่งอะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆจะแตกตัวออกจากโมเลกุลของก๊าซ และไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้บนแผ่นตัวอย่างจนก่อเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยจะมีเทอร์โมคัปเปิลติดอยู่ที่ใต้ฐานรองไว้สำหรับวัดอุณหภูมิใต้ฐานรอง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 550 – 750 องศาเซลเซียส มีแท่นยึดจับสำหรับนำวัสดุฐานรองมาวาง ซึ่งอยู่ใต้ขดลวดความร้อน 3 มิลลิเมตร ก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายจะถูกแบ่งออกเป็นสองทาง ทางหนึ่งผ่านสารแหล่งจ่ายที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน ทำให้เกิดฟองอากาศพุดพาเอาไอระเหยของสาร

แหล่งจ่ายมาผสมกับอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นไฮโดรเจนรวมกันเป็นสารแหล่งจ่ายไฮอะเซทิลเข้ามาผสมกันภายใน Chamber โดยมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายต่อไฮโดรเจนรวมประมาณ 8 – 12 % โดยปริมาตร อัตราส่วนทั้งสองส่วนถูกควบคุมด้วยมิเตอร์การไหลและวาล์ว เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ประมาณ 25 – 40 นาที ด้วยระบบนี้ยังสามารถให้สนามไฟฟ้าไปที่ระหว่างไส้ของขดลวดความร้อนและฐานรองในขณะที่ทำการสังเคราะห์ได้สำหรับกรณีที่ต้องการศึกษาการควบคุมให้ท่อนาโนคาร์บอนก่อเกิดในแนวตั้ง



รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงระบบ HFCVD



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูอาจารย์เท่านั้น มิใช่ผู้เผยแพร่แบบประชาชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายอุปกรณ์ของระบบ HFCVD ที่สร้างขึ้นเองอย่างง่าย

โดยสรุป การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในปัจจุบัน พบว่าสามารถทำได้หลายวิธี แต่เนื่องจากราคาของอุปกรณ์ต่างๆในการสังเคราะห์มีราคาสูงและบางวิธีใช้ก๊าซพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย แต่ด้วยระบบ HF-CVD เป็นวิธีที่ประหยัด กระทำที่ความดันบรรยากาศและไม่มีก๊าซพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เพียงแต่ขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์นั้น อาจต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากภายในระบบที่ต้องให้ความร้อนและต้องใช้ก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นก๊าซไวไฟเป็นส่วนผสมด้วย จึงควรทำด้วยความรอบคอบ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จะนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือดั่งที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และในบทต่อไปจะกล่าวถึงเงื่อนไขต่างๆในการสังเคราะห์รวมทั้งการนำเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเกี่ยวข้องสำหรับการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

กระบวนการทดลอง การสร้างลวดลายและผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนต่างๆ ในการเตรียมฐานรอง โดยใช้เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์มีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการสร้างเพื่อจุดประสงค์ในการสร้างลวดลายบนฐานรองที่เป็นทั้งฉนวนและตัวนำ ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงการนำเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยวิธีการต่างๆ นำไปสู่แนวคิดในการนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวเช่น เซอร์ก้าซ ซึ่งฐานรองที่เตรียมไว้ จะนำมาสังเคราะห์ด้วยระบบชีวิตแบบขดลวดความร้อน กระทำที่บรรยากาศโดยฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

5.1 อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

1. ถังก๊าซไฮโดรเจน
2. เรกกูเลเตอร์สำหรับควบคุมการไหลของก๊าซที่หัวถัง
3. Flow meter สำหรับควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ
4. สารแหล่งจ่าย (แอลกอฮอล์, อะซีโตน)
5. สารละลายผงเหล็ก
6. เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง
7. ขดลวดทั้งสแตน เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ยาว 1 ซม.
8. เทอร์โมคัปเปิล
9. Chamber ทำจากท่อควอทซ์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 20 ซม.
10. นาฬิกาจับเวลา
11. พัดลมระบายความร้อน
12. แผ่นทึบแสง
13. มัลติมิเตอร์
14. บีกเกอร์สำหรับใส่สารแหล่งจ่าย
15. บีกเกอร์สำหรับเช็คแก๊สที่ไหลออกสู่ระบบ
16. ฐานรองสำหรับนำมาทำการทดลอง ประกอบด้วย

16.1 กราไฟต์ที่ทำจากไส้ดินสอด

16.2 คาร์บอนอัดแน่นหรือถ่าน

16.3 ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยผงเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนในชั้นเรียน มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำเอกสารฉบับนี้ไปเผยแพร่หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 16.4 ซิลิโคนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยนิเกิล
- 16.5 ซิลิโคนไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยนิเกิลและมีลวดลาย
- 16.6 ทองแดงที่เคลือบด้วยผงเหล็ก
- 16.7 ทองแดงที่เคลือบด้วยนิเกิล
- 16.8 ทองแดงที่เคลือบด้วยนิเกิลและมีลวดลาย

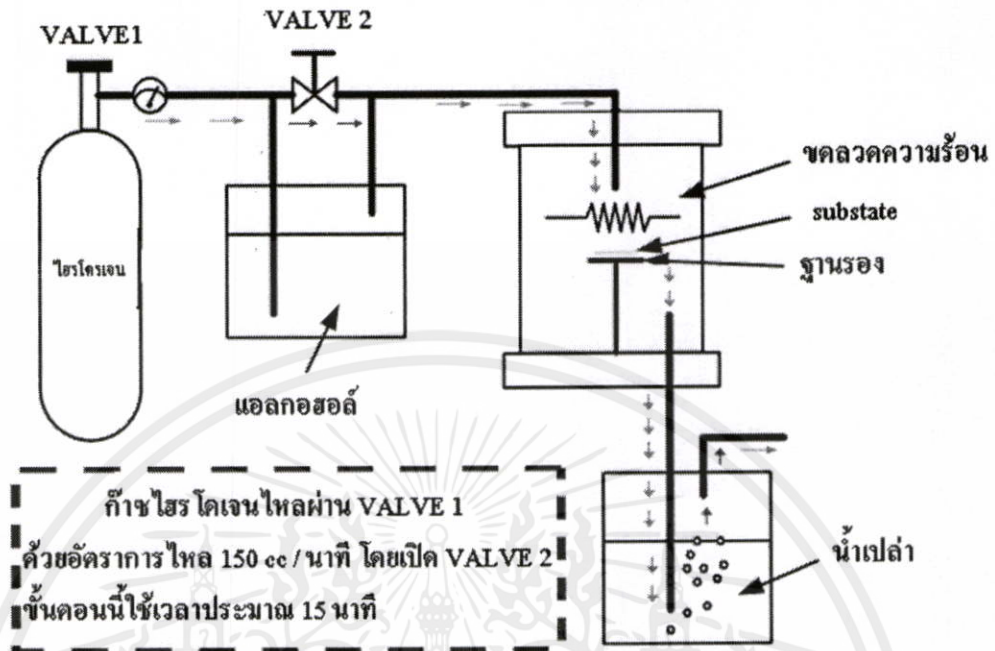
5.2 ขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์

ในการศึกษาถึงขั้นตอนในสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถเริ่มตั้งแต่กระบวนการดังต่อไปนี้

1. เปิด Chamber ออกเพื่อนำแผ่นฐานรองที่เตรียมไว้ไปวางบนตัวรองรับ จากนั้นจึงปิด Chamber ลง
2. ตรวจสอบระบบตำแหน่งของวาล์วทั้งหมดให้อยู่ตำแหน่งปิด
3. เปิด Valve 1 และ Valve 2 ของก๊าซไฮโดรเจนให้ไหลผ่านเข้าสู่ระบบภายใน Chamber เพื่อทำการไล่อากาศภายในให้ออกจนหมด จนเหลือแต่บรรยากาศของไฮโดรเจน ด้วยอัตราการไหล 150 cc / นาที เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5.3
4. ปรับอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนให้เหลือ 100 cc / นาที ต่อมาทำการปรับ Valve 2 เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนไหลผ่านผ่านสารแหล่งจ่ายในอัตราส่วน 8-10% ปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5.4
5. เริ่มจับเวลาและในขณะเดียวกันค่อยๆเพิ่มกระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงไปยังขดลวดทั้งสแตนเพื่อให้เกิดเป็นความร้อน โดยมีเทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิที่บริเวณใต้ฐานรอง ซึ่งมีค่าอยู่ราวๆ 550 – 750 องศาเซลเซียส และมีแผ่นทึบแสงสำหรับสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นบนฐานรอง ใช้เวลาในการสังเคราะห์ประมาณ 30 – 40 นาที
6. ปิด Valve 1 และ Valve 2 แล้วจึงค่อยๆลดกระแสลงจนหมด รอจนกว่าก๊าซที่อยู่ภายใน Chamber หมด ซึ่งสังเกตได้จากฟองอากาศภายในบีกเกอร์สำหรับเช็คก๊าซที่ไหลออกสู่ระบบ ในขณะเดียวกันก็เพื่อต้องการให้อุณหภูมิภายใน Chamber เย็นตัวลง (สามารถทำได้ด้วยการเปิดพัดลมระบายความร้อนไปที่ Chamber จากนั้นจึงเปิด Chamber ออกแล้วนำแผ่นฐานรองที่สังเคราะห์แล้วออกมาและปิด Chamber

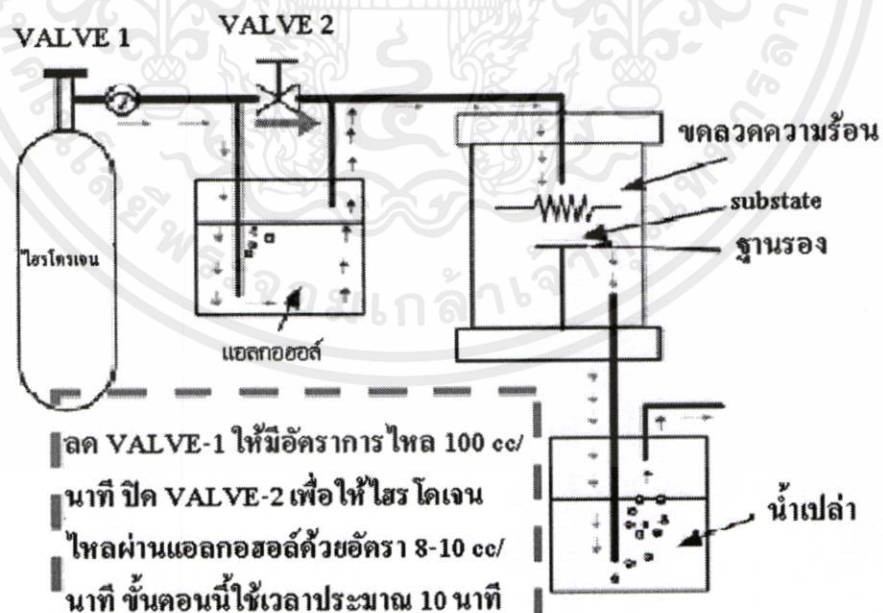
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพทำการไล่อากาศภายใน Chamber Loop ครั้งที่ 1



รูปที่ 5.1 กระบวนการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 1

ภาพทำการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2



รูปที่ 5.2 กระบวนการไล่อากาศภายใน Chamber loop ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 กระบวนการทดลอง

ก่อนทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จำเป็นต้องศึกษาถึงตัวแปรต่างๆที่นำมาทำการทดลองและวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่อาจมีผลต่อการสังเคราะห์ จากนั้นได้ศึกษาถึงการเตรียมฐานรองด้วยเทคนิคต่างๆเพื่อต้องการควบคุมให้เกิดในบริเวณที่ต้องการ นำไปสู่แนวทางการออกแบบลวดลายที่เหมาะสม ให้สามารถใช้งานเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ได้ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

5.3.1 ฐานรองที่ใช้สำหรับการทดลอง

ในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD นี้ ได้ศึกษาการใช้ฐานรองอยู่ 4 ชนิดได้แก่

5.3.1.1 ฐานรองสารประกอบกราไฟต์หรือไส้ดินสอด

5.3.1.2 ฐานรองคาร์บอนอัดแน่นหรือถ่าน

5.3.1.3 ฐานรองซิลิคอน

ชนิด N-Types (หรือ P-Type) มีความหนาประมาณ 400 ไมโครเมตรและมีขนาดพื้นที่ประมาณ 5 ตารางมิลลิเมตร

5.3.1.4 ฐานรองทองแดง

หนาประมาณ 500 ไมโครเมตรและมีขนาดพื้นที่ประมาณ 5 ตารางมิลลิเมตร

5.3.2 แคตตาลิซิสที่ใช้สำหรับการทดลอง

เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งใช้แคตตาลิซิสอยู่ 2 ประเภทได้แก่

5.3.2.1 ผงเหล็ก ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$)

เตรียมได้จากสารละลายระหว่างเหล็กในเตรตกับเอทานอล

5.3.2.2 นิกเกิล (Nickel)

- เตรียมได้จากวิธีการสปีดเตอรั้ง
- เตรียมได้จากวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า

5.3.3 สารแหล่งจ่ายที่ใช้สำหรับการทดลอง

เป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของคาร์บอน ซึ่งใช้อยู่ 2 ชนิดได้แก่

5.3.3.1 แอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษายกเว้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้คัดแบบสิ่งใดก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3.2 อะซีโตน ($(\text{CH}_3)_2\text{CO}$)

5.3.4 สารเคมีที่ใช้สำหรับสำหรับสกัดชั้นนิเกิล

ส่วนผสมของสารเคมีที่ใช้ในการสกัดชั้นนิเกิลนี้ยังสามารถสกัดชั้นทองแดงได้ด้วย โดยมีอัตราของส่วนผสมนี้คือ น้ำ DI : HNO_3 : H_2SO_4 เป็น 1 : 1 : 2 ส่วน ในขั้นตอนการสกัดนั้น เมื่อนำสารเคมีมาอุ่นให้พอประมาณ จะช่วยให้อัตราเร็วการสกัดดียิ่งขึ้น

5.3.5 วิธีการเตรียมฐานรอง

ขั้นตอนของกระบวนการเตรียมฐานรอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HF-CVD และฐานรองบางประเภทจำเป็นต้องใช้ตัวแคตะไลต์เพื่อช่วยในการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยฐานรองที่ต้องการนำมาศึกษาแบ่งเป็นสองชนิดคือ ฐานรองซิลิคอนและฐานรองทองแดง

5.3.4.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน

นำแผ่นซิลิคอนมาทำความสะอาดผิวหน้า ต่อมาจะนำไปสร้างชั้นฉนวนด้วยกระบวนการออกซิเดชัน จากนั้นจึงนำไปเคลือบแคตะไลต์ โดยแบ่งได้สามกรณีคือ

กรณีที่ 1 เคลือบแคตะไลต์นี้เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงเป็นแบบฟิล์มบาง

กรณีที่ 2 เคลือบแคตะไลต์นี้เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงเป็นแบบกลุ่มก้อน

กรณีที่ 3 เคลือบแคตะไลต์ผงเหล็กด้วยการจุ่มลงในสารละลายผงเหล็กแล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

อุณหภูมิห้อง

5.3.4.2 การเตรียมฐานรองทองแดง

นำมาทำความสะอาดผิวหน้า จากนั้นจึงนำไปเคลือบแคตะไลต์ โดยแบ่งได้สองกรณีคือ

กรณีที่ 1 เคลือบแคตะไลต์นี้เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริงเป็นแบบฟิล์มบาง

กรณีที่ 2 เคลือบแคตะไลต์ผงเหล็กด้วยการจุ่มลงในสารละลายผงเหล็กแล้วปล่อยให้แห้งที่

อุณหภูมิห้อง

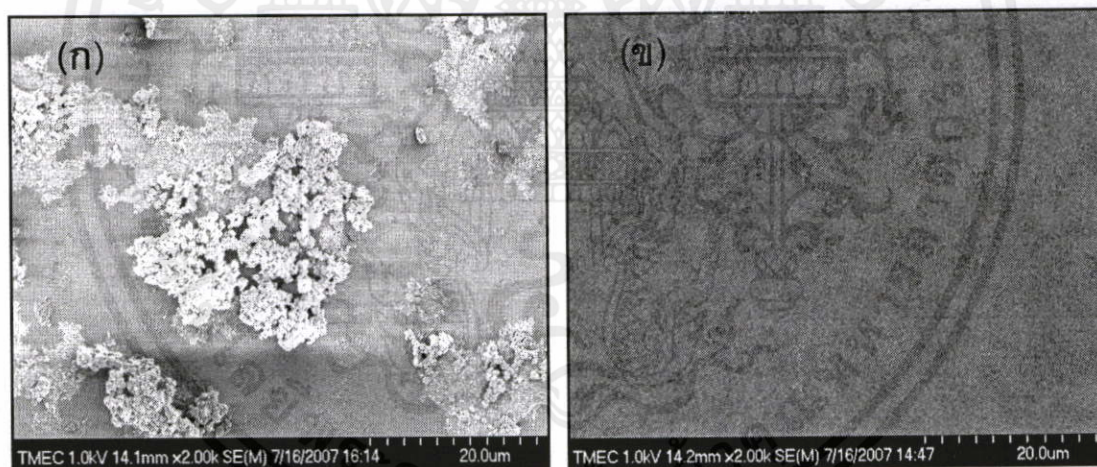
5.3.5 เงื่อนไขในการสังเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของระบบ HF-CVD มีดังนี้คือ

- กระทำที่ความดันบรรยากาศ
- อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550 – 750 องศาเซลเซียส
- เวลาในการสังเคราะห์ 25 – 40 นาที
- อัตราส่วนของไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายต่อไฮโดรเจนรวม 8 – 12 % โดยปริมาตร
- กำลังงาน 105 – 140 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ลงบนฐานรองที่ไม่มีส่วนประกอบของคาร์บอนเลยคือ การใช้ตัวแคตะไลต์สำหรับเป็นตัวช่วยให้เกิดคาร์บอนนาโนทิว์ ในที่นี้ ฐานรองที่ต้องการจะนำมาศึกษามีสองชนิดได้แก่ ฐานรองซิลิคอนและทองแดง โดยตัวแคตะไลต์ที่จะนำมาเคลือบลงบนฐานรองมีสองประเภทคือ ผงเหล็กและนิเกิล ซึ่งวิธีการเคลือบผงเหล็กบนฐานรองทำได้โดยเริ่มจากการผสมสารละลายระหว่างเหล็กไนเตรต ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) กับ เอทานอล จากนั้นนำฐานรองทั้งสองชนิดมาจุ่มในสารละลายที่เตรียมไว้ จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงค่อยนำไปเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ จากรูปที่ 5.3 สังเกตจะพบว่าลักษณะการกระจายตัวของผงเหล็กภายหลังจากการเคลือบบนฐานรองซิลิคอนนั้น มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มไม่กระจายตัวเหมือนในกรณีของฐานรองที่เป็นทองแดง อีกทั้งการยึดเกาะของตัวแคตะไลต์บนผิวหน้าของฐานรองก็ไม่สม่ำเสมอ อาจเป็นเพราะลักษณะพื้นผิวที่มันวาวของซิลิคอน ซึ่งอาจเป็นผลทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนนาโนทิว์ต่ำและเกิดไม่ทั่วทั้งพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 5.3(ก) ส่วนในรูปที่ 5.3(ข) เป็นกรณีของแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยผงเหล็ก พบว่ามีการยึดเกาะของตัวแคตะไลต์บนผิวหน้าของฐานรองค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนกรณีของตัวแคตะไลต์นิเกิล การเตรียมฐานรองนั้น จะใช้วิธีการเคลือบนิเกิลด้วยวิธีการสปัตเตอร์ลงบนฐานรอง ซึ่งมีการยึดเกาะที่ดี และพื้นผิวสม่ำเสมอ



รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายจาก SEM ของตัวแคตะไลต์ผงเหล็กที่ถูกเคลือบอยู่บนพื้นผิว

(ก) ฐานรองซิลิคอน

(ข) ฐานรองทองแดง

5.3.6 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ลงบนฐานรองสารประกอบ

กราฟไฟต์และฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอน [14-16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองสองชนิดนี้ จุดประสงค์เพื่อทำการทดสอบระบบ HF-CVD ที่ความดันบรรยากาศ เนื่องจากเป็นฐานรองที่มีส่วนผสมของคาร์บอนและหาได้

ง่าย ไม่ต้องทำการเตรียมแคตะไลต์บนฐานรองแต่อย่างใด ผลการทดลองปรากฏว่า สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้ โดยสังเกตได้จาก SEM ซึ่งใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน รูปที่ 5.4(ก) เป็นท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดบนฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอน ส่วนรูปที่ 5.4(ข) เป็นภาพถ่ายพื้นผิวของฐานรองสารประกอบกราไฟต์ จะสังเกตเห็นท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น เมื่อนำฐานรองสองชนิดนี้มาเปรียบเทียบกัน พบว่าฐานรองสารประกอบกราไฟต์จะมีความหนาแน่นของท่อนาโนคาร์บอนมากที่สุด เมื่อนำฐานรองสารประกอบกราไฟต์มาวิเคราะห์ด้วยวิธี XRF (X-ray Fluorescence Spectroscopy) ดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ พบว่าจะเห็นองค์ประกอบต่างๆที่มีออกไซด์ของโลหะเป็นสารประกอบนอกเหนือจากคาร์บอน ซึ่งออกไซด์ของโลหะเหล่านี้ น่าจะทำหน้าที่เป็นตัวแคตะไลต์ที่สำคัญในการช่วยให้เกิดได้อย่างหนาแน่น

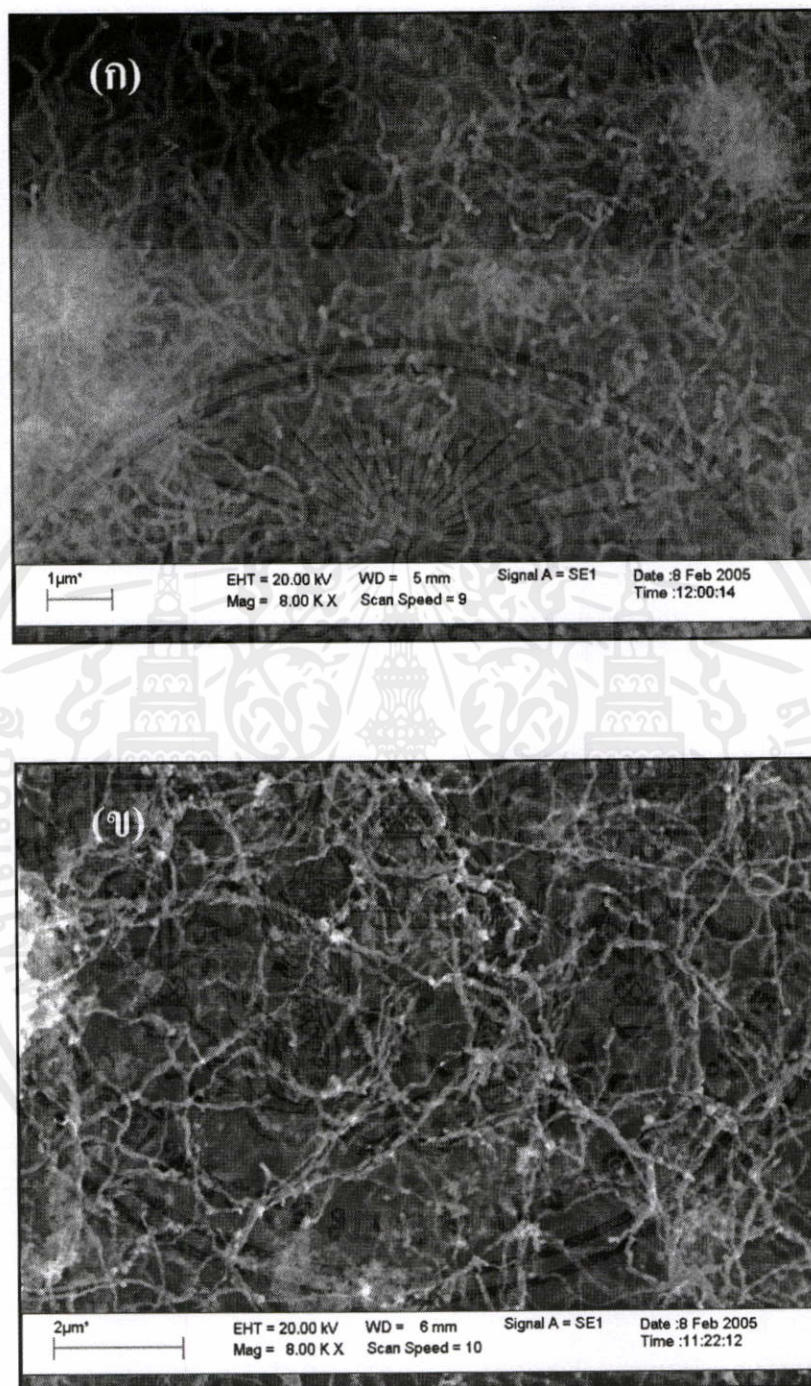
ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบจาก X-ray Fluorescence Spectroscopy บนฐานรองสารประกอบกราไฟต์

Oxide composition	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO ₃
Graphite substrate	2.43%	22.5%	1.05%	2.65%	1.33%	8.99%

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์บนฐานรองสารประกอบกราไฟต์และอะมอร์ฟัสคาร์บอน

อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C
กำลังงาน	140 W
สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์
แคตะไลต์	-
เวลา	40 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ (ก) ฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอนคุณภาพดีให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง (ข) ฐานรองสารประกอบกราฟไฟด์ ออกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.7 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ลงบนฐานรองซิลิคอน [17-18]

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองชนิดนี้ จุดประสงค์เพื่อต้องการศึกษาสำหรับการประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากสามารถนำไปสู่การพัฒนาเป็นวงจรรวมได้ในส่วนนี้ ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิด คือสารแหล่งจ่ายและตัวแคตะไลต์ ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงขนาดของท่อและคุณภาพของฟิล์มที่ได้ภายหลังจากการสังเคราะห์ว่าเป็นอย่างไร จากตารางที่ 5.3 จะแบ่งชนิดของตัวแปรที่ต้องการจะศึกษาไว้ 4 ชนิด โดยทั้งหมดนั้น มีฐานรองเป็นซิลิคอน ส่วนเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้น เป็นเงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด ดังในตารางที่ 5.4 ทั้งนี้เพื่อต้องการจะนำผลการทดลองของคาร์บอนนาโนทิว์ที่สังเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบกันเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 5.3 แผ่นทดลองที่นำมาทำการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน

สารแหล่งจ่าย แคตะไลต์	เอทานอล	อะซีโตน
ผงเหล็ก	1. ซิลิคอน เคลือบผงเหล็ก/เอทานอล	2. ซิลิคอน เคลือบผงเหล็ก/อะซีโตน
นิกเกิล	3. ซิลิคอน เคลือบนิกเกิล/เอทานอล	4. ซิลิคอน เคลือบนิกเกิล/อะซีโตน

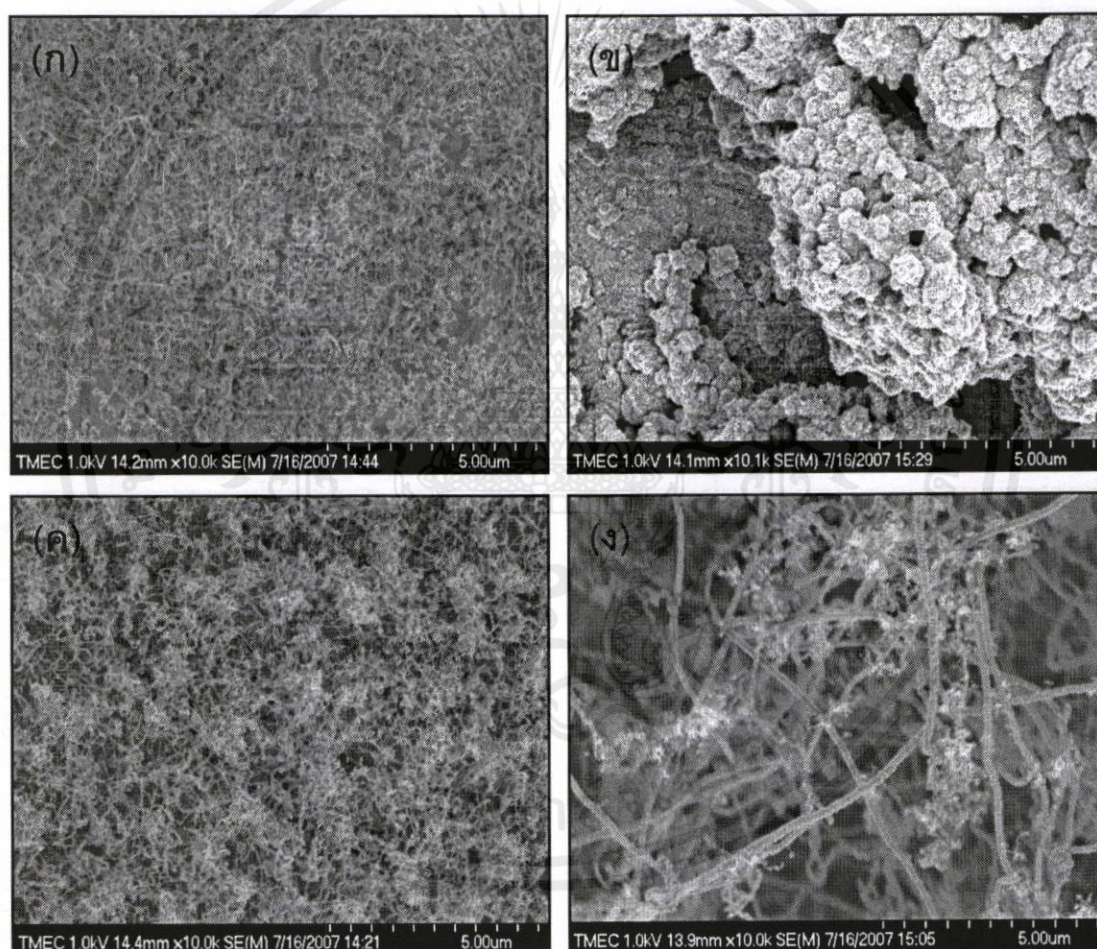
ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอน

สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์	อะซีโตน	แอลกอฮอล์	อะซีโตน
แคตะไลต์	ผงเหล็ก	ผงเหล็ก	นิกเกิล	นิกเกิล
อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C	600-700 °C	600-700 °C	600-700 °C
กำลังงาน	135 W	135 W	135 W	135 W
เวลา	30-40 นาที	30-40 นาที	30-40 นาที	30-40 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.7.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย SEM

จากรูปที่ 5.5 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนที่กำลังขยายที่เท่ากัน(10000 เท่า) ซึ่งได้สังเคราะห์ลงบนฐานรองซิลิคอน ซึ่งได้ศึกษาการใช้ตัวแคตะไลต์และสารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน รูปที่ 5.5(ก) เป็นท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดการใช้ตัวแคตะไลต์เป็นผงเหล็กและสารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอล ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการเกิดค่อนข้างต่ำจนเห็นพื้นผิวของฐานรองบางส่วน ลักษณะของท่อขึ้นอย่างไม่เป็นระเบียบ มีขนาดของท่อที่ค่อนข้างเล็ก รูปที่ 5.5(ข) เมื่อเปลี่ยนสารแหล่งจ่ายเป็นอะซิโตน พบว่าเกิดอะมอร์ฟัสคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไม่สังเกตเห็นเป็นลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน และก่อดัวไม่ปกคลุมทั่วพื้นผิวของฐานรอง



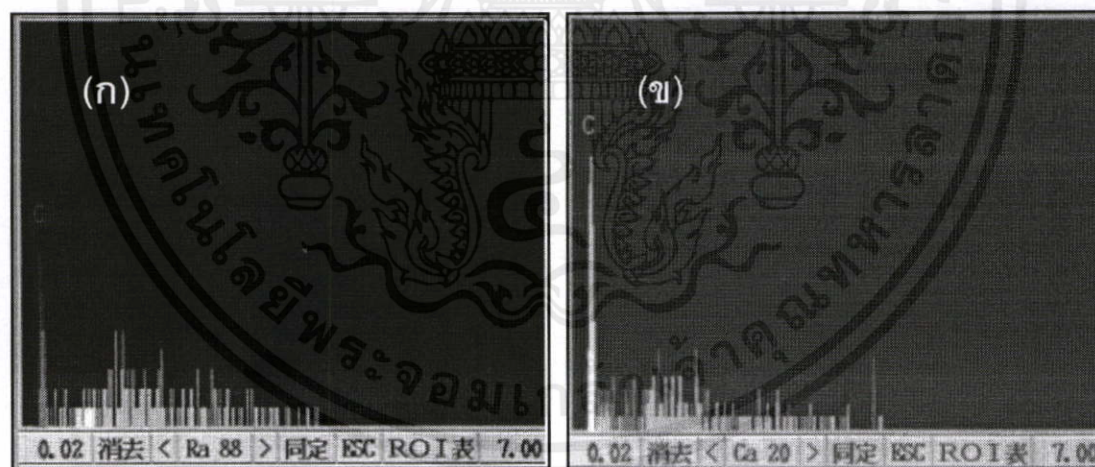
รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองซิลิคอน

- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
- (ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
 - (ข) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซิโตน
 - (ค) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
 - (ง) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซิโตน

รูปที่ 5.5(ค) เมื่อเปลี่ยนมาใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลและสารแหล่งจ่ายเป็นเอทธานอล พบว่าท่อานาโนคาร์บอนเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วทั้งพื้นผิวแต่มีขนาดของท่อค่อนข้างเล็ก ส่วนรูปที่ 5.5(ง) ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตน พบว่าสังเคราะห์ได้ขนาดของท่อานาโนคาร์บอนประมาณ 200 – 300 นาโนเมตร ซึ่งค่อนข้างจะใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 5.5(ค) ที่ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทธานอลแต่ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลเหมือนกัน แสดงว่าสารแหล่งจ่ายอาจมีผลต่อขนาดของท่อด้วย อีกทั้งความหนาแน่นของท่อานาโนคาร์บอนก็มากด้วยเช่นกัน

5.3.7.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX

การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาวิเคราะห์ด้วย EDX จะได้กราฟที่แสดงถึงความหนาแน่นของธาตุคาร์บอนหรืออัตราการเกิดของท่อานาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้บนฐานรอง ในการทดลองนี้ ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทธานอลซึ่งไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด แต่ต้องการจะศึกษาผลของอัตราการเกิดที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแคตะไลต์ รูปที่ 5.6(ก) ใช้ตัวแคตะไลต์เป็นผงเหล็ก พบว่าฟิล์มที่ได้แสดงถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบคาร์บอนเกิดขึ้น แต่ไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับรูปที่ 5.6(ข) ซึ่งใช้ตัวแคตะไลต์นิเกิล พบว่ามีฟิล์มของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นสูงกว่า แสดงว่าตัวแคตะไลต์นิเกิล อาจมีผลต่ออัตราการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่มากนักน้อย



รูปที่ 5.6 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอน

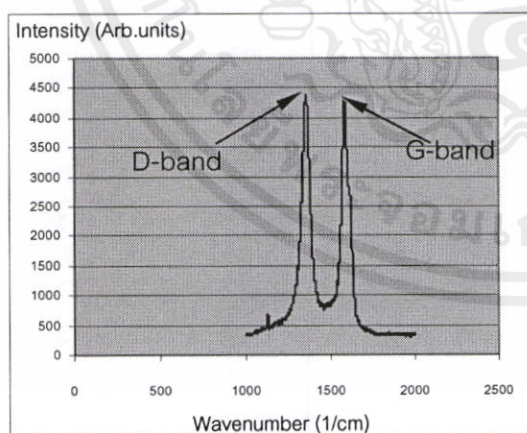
(ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทธานอล

(ข) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทธานอล

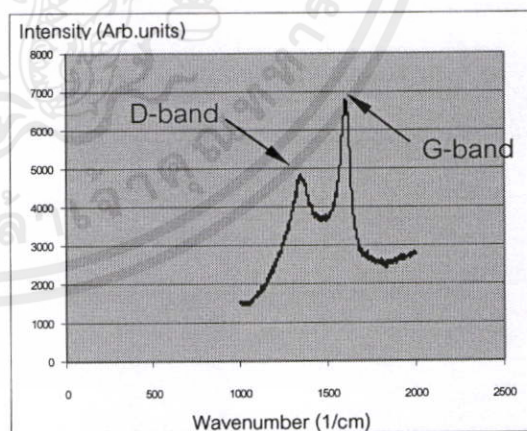
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.7.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy

การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเทคนิครามาน เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถบอกถึงคุณภาพหรือความบริสุทธิ์ของฟิล์ม อีกทั้งยังบอกถึงลักษณะของท่อที่สังเคราะห์ได้ว่าเป็นแบบผนังชั้นเดียวหรือหลายชั้นได้อย่างคร่าวๆ อีกด้วย ซึ่งสังเกตได้จากย่านที่มีพิคเกิดขึ้น ในการทดลองนี้ จะเน้นถึงการใช้เทคนิครามานเพื่อวิเคราะห์ถึงคุณภาพของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้เท่านั้น ซึ่งได้ศึกษาการใช้ตัวแคตะไลต์และสารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน รูปที่ 5.7 แสดงรามานสเปกตรัมที่บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งพิค G แสดงถึงพันธะของกราฟไฟต์ที่สมบูรณ์ พิค D เป็นพิคที่เกิดจากคาร์บอนที่มีพันธะไม่สมบูรณ์ รูปที่ 5.7(ก) พบว่าเกิดพิคของ G กับ D สูงใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้แคตะไลต์ผงเหล็กและสารแหล่งจ่ายคือเอทานอล ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนเป็นแคตะไลต์นิกเกิล กลับพบว่า พิคของ G สูงกว่า D ดังแสดงในรูปที่ 5.7(ข) ซึ่งบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ที่ได้ค่อนข้างดีที่สุดเมื่อเทียบกับฐานรองเดียวกัน แสดงว่าการใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอลและแคตะไลต์นิกเกิลน่าจะเป็นส่วนสำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอนที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ส่วนในกรณีของกราฟรามานที่ได้จากการใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตน นั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.7(ข) และ (ง) พบว่า ลักษณะของกราฟตรงช่วงบริเวณระหว่างพิคของ G กับพิคของ D กลับมีค่าสูง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่อาจจะมีสารประกอบอื่นๆ ปะปนรวมอยู่ด้วย นอกเหนือจากธาตุคาร์บอน แสดงถึงพันธะที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์



(ก)



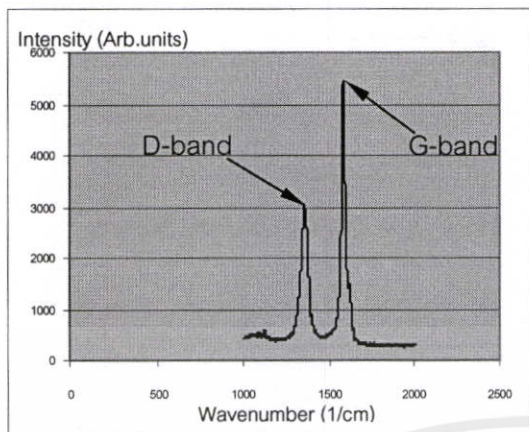
(ข)

รูปที่ 5.7 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอน

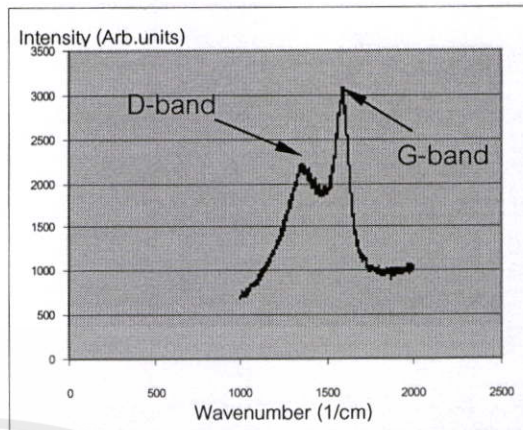
(ก) ตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ข) ตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรแจกจ่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเป็นเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ง)

รูปที่ 5.7(ต่อ) รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองซิลิคอน

(ก) ตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ง) ตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

5.3.8 ผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ลงบนฐานรองทองแดง [17-18]

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองชนิดนี้ จุดประสงค์เพื่อต้องการศึกษาการใช้ทองแดงที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี มาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในการนำมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งเพื่อทดสอบว่าคาร์บอนนาโนทิว์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้บนฐานรองทองแดง การทดลองในส่วนนี้ ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรบางชนิดเหมือนกับกรณีของซิลิคอนคือสารแหล่งจ่ายและตัวแคตะไลต์ จากตารางที่ 5.5 จะแบ่งชนิดของตัวแปรที่ต้องการจะศึกษาไว้ 4 ชนิด โดยทั้งหมดนั้น มีฐานรองเป็นทองแดง กระทำด้วยเงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด ดังในตารางที่ 5.6 จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบต่อไป

ตารางที่ 5.5 แผ่นทดลองที่นำมาทำการสังเคราะห์ บนฐานรองทองแดง

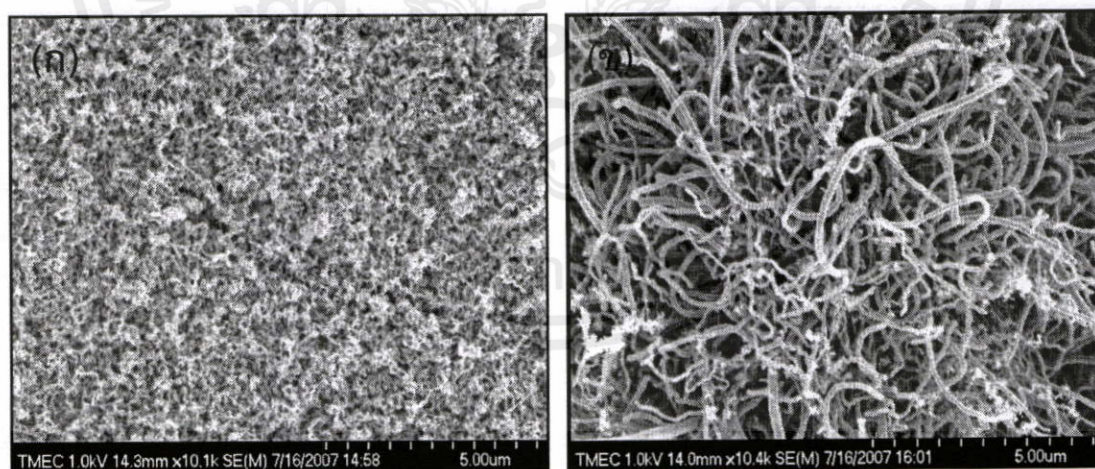
สารแหล่งจ่าย แคตะไลต์	เอทานอล	อะซีโตน
ผงเหล็ก	1. ทองแดง เคลือบผงเหล็ก/เอทานอล	2. ทองแดง เคลือบผงเหล็ก/อะซีโตน
นิกเกิล	3. ทองแดง เคลือบนิกเกิล/เอทานอล	4. ทองแดง เคลือบนิกเกิล/อะซีโตน

ตารางที่ 5.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์บนฐานรองทองแดง

สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์	อะซีโตน	แอลกอฮอล์	อะซีโตน
แคตะไลต์	ผงเหล็ก	ผงเหล็ก	นิกเกิล	นิกเกิล
อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C	600-700 °C	600-700 °C	600-700 °C
กำลังงาน	106 W	106 W	106 W	106 W
เวลา	25-30 นาที	25-30 นาที	25-30 นาที	25-30 นาที

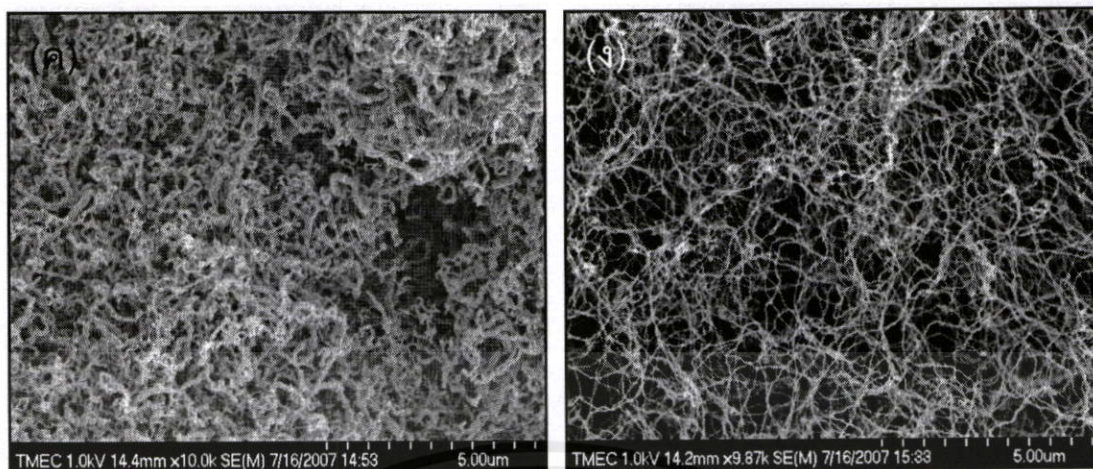
5.3.8.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย SEM

จากรูปที่ 5.8 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนในกำลังขยายที่เท่ากัน (10000 เท่า) ซึ่งได้สังเคราะห์ลงบนฐานรองทองแดง ซึ่งได้ศึกษาการใช้ตัวแคตะไลต์และสารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน จากรูปที่ 5.8(ก) พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ มีความหนาแน่นสูงและเกิดทั่วทั้งพื้นผิวอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะของท่อค่อนข้างสังเกตุยาก เนื่องจากขนาดของท่อที่เล็กมาก รูปที่ 5.8(ข) สังเกตเห็นลักษณะของท่อได้อย่างชัดเจน มีขนาดของท่อประมาณ 100 – 400 nm และเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วบนฐานรอง รูปที่ 5.8(ค) จะมีลักษณะของท่อ นาโนคาร์บอนไม่ค่อยมีความสมบูรณ์และค่อนข้างเล็ก มีอัตราการเกิดที่หนาแน่น รูปที่ 5.8(ง) สังเกตเห็นลักษณะของท่ออย่างชัดเจนและเกิดอย่างหนาแน่น ท่อมีขนาดเล็กและยาว



รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงถึงเจ้าของเอกสารทุกกรณีการนำไปใช้
(ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
(ข) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน



รูปที่ 5.8(ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองทองแดง

- (ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
- (ง) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

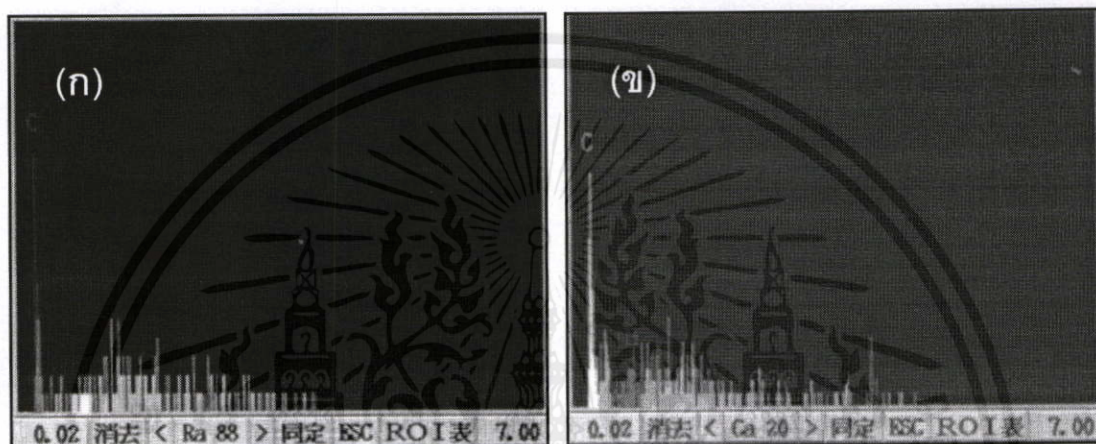
5.3.8.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย EDX

ในการทดลองนี้ ต้องการจะศึกษาผลของอัตราการเกิดที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแคตะไลต์ โดยที่ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลซึ่งไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดเช่นเดียวกับกรณีของฐานรองซิลิคอน ดังนั้นนำฟิล์มที่สังเคราะห์ได้บนฐานรองทองแดงนำมาวิเคราะห์หาความหนาแน่นของธาตุคาร์บอนด้วย EDX ปรากฏว่า จากรูปที่ 5.9(ก) พบว่ามีพีคของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นซึ่งใช้ตัวแคตะไลต์เป็นผงเหล็ก เมื่อเทียบกับรูปที่ 5.9(ข) ซึ่งใช้ตัวแคตะไลต์นิกเกิล พบว่ามีพีคของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นน่าจะสรุปได้ว่า ความหนาแน่นของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้นั้น ขึ้นอยู่กับการเตรียมตัวแคตะไลต์ที่เคลือบบนฐานรอง ให้มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ

5.3.8.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย Raman Spectroscopy

การศึกษาคุณภาพของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้บนฐานรองทองแดง โดยการใช้ตัวแคตะไลต์และสารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน พบว่า รูปที่ 5.10(ก) เกิดพีค G ซึ่งเป็นพันธะที่สมบูรณ์ค่อนข้างสูง แต่พีค D ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่สมบูรณ์กลับสูงเกือบใกล้เคียงกันขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้แคตะไลต์ผงเหล็กและสารแหล่งจ่ายคือเอทานอล ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนเป็นแคตะไลต์นิกเกิลพบว่า พีคของ G สูงกว่า D ดังแสดงในรูปที่ 5.10(ค) ซึ่งบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ที่ได้ค่อนข้างดีที่สุดเมื่อเทียบกับด้วยฐานรองเดียวกัน แสดงว่าการใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอลและแคตะไลต์นิกเกิลน่าจะเป็นส่วนสำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองทองแดงที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ส่วนกราฟรามานในรูปที่ 5.10(ข) และ 5.10(ง) ที่ได้จาก

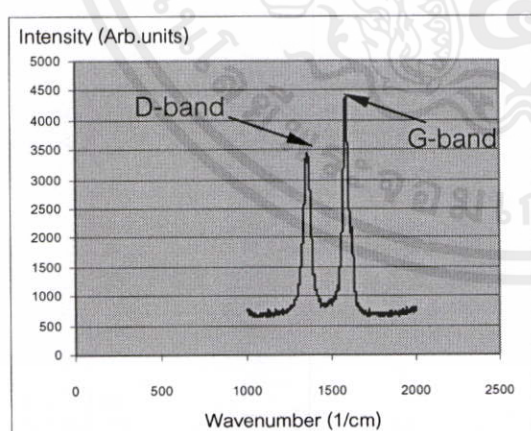
การใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตนนั้น พบว่า ลักษณะของกราฟตรงช่วงบริเวณระหว่างพีคของ G กับพีคของ D กลับมีค่าสูง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่อาจจะมีสารประกอบอื่นๆปะปนรวมอยู่ด้วย นอกเหนือจากธาตุคาร์บอน แสดงถึงพันธะที่ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อสังเกต แนวโน้มที่ได้จากกราฟรามานของฐานรองทองแดงพบว่าลักษณะของกราฟคล้ายกับกรณีของ ฐานรองซิลิกอน ดังนั้นสรุปได้ว่า แคตะไลต์นี้เกิดและสารแหล่งจ่ายเอทานอล จึงถูกเลือกเป็นตัว แปรที่เหมาะสมจะนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีคุณภาพสูง



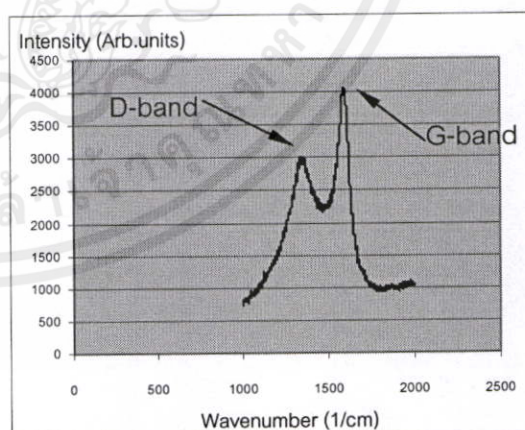
รูปที่ 5.9 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองทองแดง

(ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็ก

(ข) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิกเกิล



(ก)

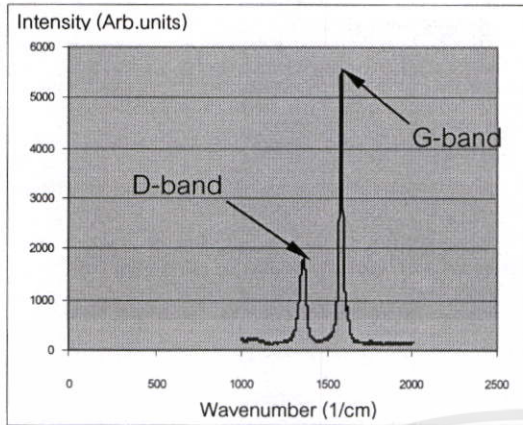


(ข)

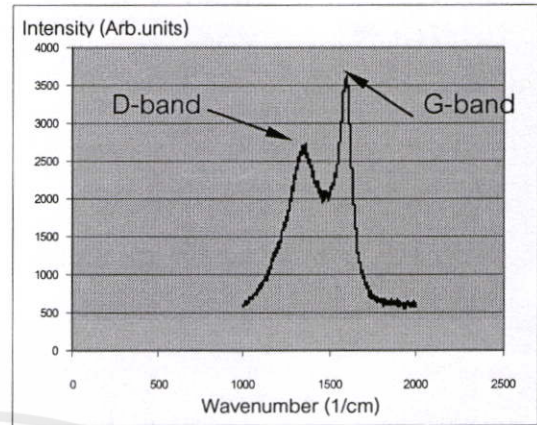
เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 5.10 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดง โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง (ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ข) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน



(ก)



(ง)

รูปที่ 5.10(ต่อ) รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองทองแดง

(ก) เคลือบด้วยตัวแคตะไลต์นิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

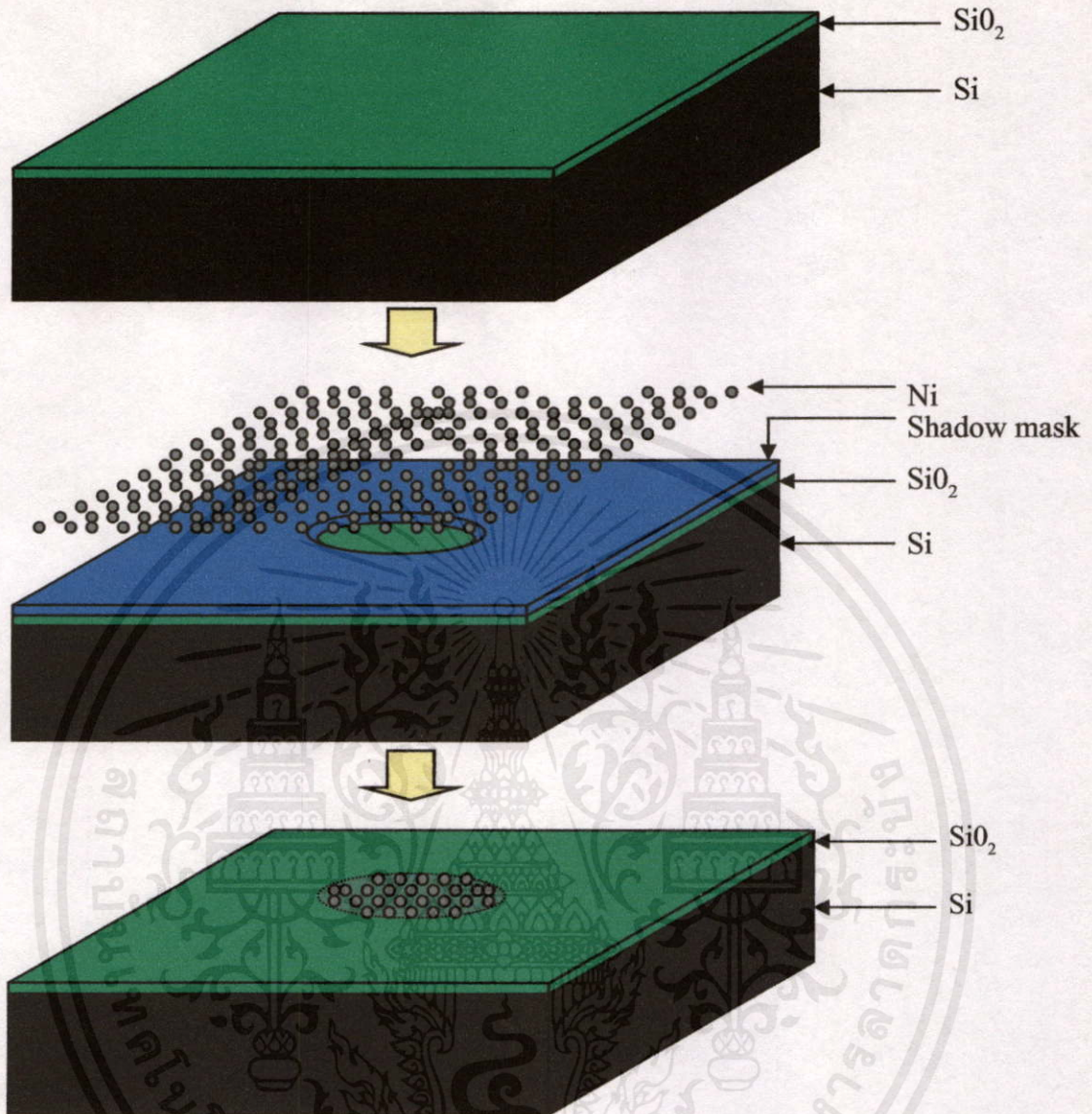
(ง) เคลือบด้วยแคตะไลต์นิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

5.4 เทคนิคการเตรียมฐานรองสำหรับการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ [19-20]

จากผลการทดลองที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนนาโนทิว์จะเกิดได้โดยใช้ตัวแคตะไลต์ ดังนั้นหากต้องการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ให้เกิดในบริเวณที่ต้องการนั้น ขึ้นอยู่กับการสร้างลวดลายของตัวแคตะไลต์บนฐานรอง ในการทดลองนี้ ศึกษาการใช้ตัวแคตะไลต์ที่เป็นนิเกิลเท่านั้น เนื่องจากกระบวนการเตรียมฐานรองเป็นลวดลายนิเกิล สามารถทำได้ด้วยเทคโนโลยีด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีเทคนิควิธีในการสร้างลวดลายต่างๆ ได้ดังนี้

5.4.1 การสร้างลวดลายโดยวิธีการใช้หน้ากากป้องกัน (Shadow mask)

จากรูปที่ 5.11 เป็นกระบวนการสร้างลวดลายตามลำดับ โดยเริ่มจากนำหน้ากากที่มีลวดลายไปวางประกบกับฐานรอง ใช้ฐานรองที่นำมาศึกษาเป็นซิลิคอนที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ จากนั้นนำไปทำการสปัตเตอร์ด้วยนิเกิล โดยนิเกิลจะเคลือบลงบนผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 (ก) เวลาในการสปัตเตอร์ คือ 90 วินาที จะเห็นเป็นรูปวงกลมตามลวดลายของหน้ากากป้องกัน เมื่อทำการขยายภาพบริเวณพื้นผิวนิเกิล แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 (ข) จะเห็นว่าโลหะนิเกิลจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนตลอดพื้นผิวที่เป็นวงกลม สาเหตุเนื่องจากเวลาในการสปัตเตอร์น้อย ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่ต้องการเปรียบเทียบกับโลหะนิเกิลที่เคลือบเป็นลักษณะของฟิล์ม ดังนั้นจะได้นิเกิลเคลือบลงบนฐานรองตามลวดลายของหน้ากากหรือตรงบริเวณที่ไม่มีอะไรมาบัง จากนั้นจึงนำฐานรองที่เตรียมแล้ว ไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ โดยมีเงื่อนไขดังตารางที่ 5.7



รูปที่ 5.11 กระบวนการเคลือบนิเกิลด้วยการสปัตเตอร์ริง โดยมีหน้ากปกป้องกัน

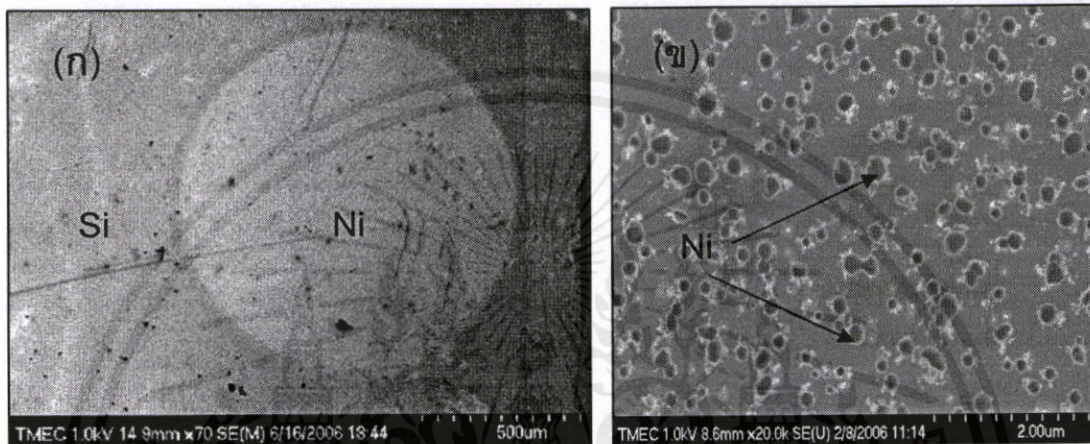
ตารางที่ 5.7 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายจากการใช้หน้ากปกป้องกัน

อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C
กำลังงาน	120 W
สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์
แคตะไลต์	นิเกิล
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหาก่อนและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

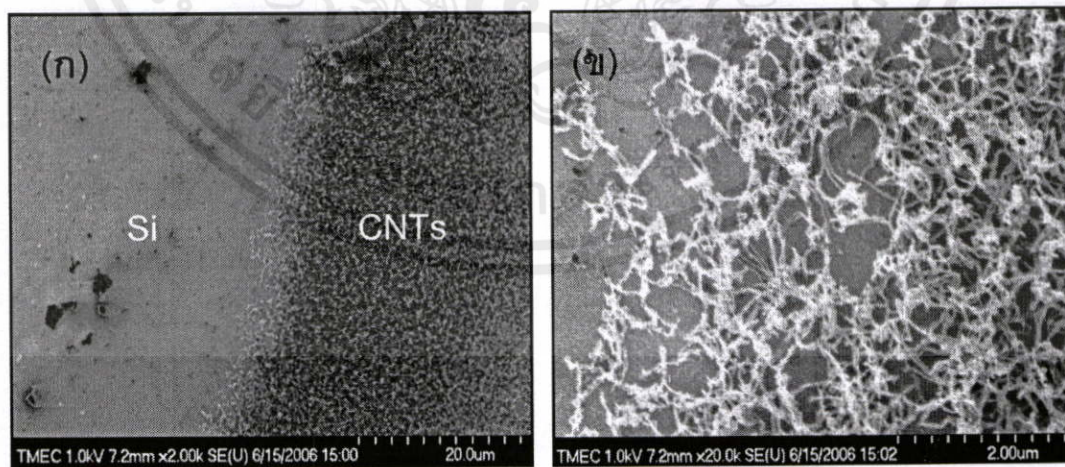
5.4.1.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM

รูปที่ 5.13(ก) เป็นภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยายต่ำบริเวณขอบเขตวงกลมที่ได้จากการใช้ หน้ากากป้องกัน พบว่ามีคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นในบริเวณวงกลมและแสดงถึงขอบเขตระหว่าง ส่วนที่เกิดกับไม่เกิดอย่างชัดเจน รูปที่ 5.13(ข) เป็นภาพจาก SEM ที่กำลังขยายสูง สังเกตจะพบว่า เกิดการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน ไปตามพื้นผิวของซิลิคอนอย่างเห็นได้ชัดและเกิดขึ้นมาอย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายจาก SEM บนฐานรองซิลิคอนบริเวณที่ถูกเคลือบด้วยนิเกิล

- (ก) กำลังขยายต่ำ
- (ข) กำลังขยายสูง



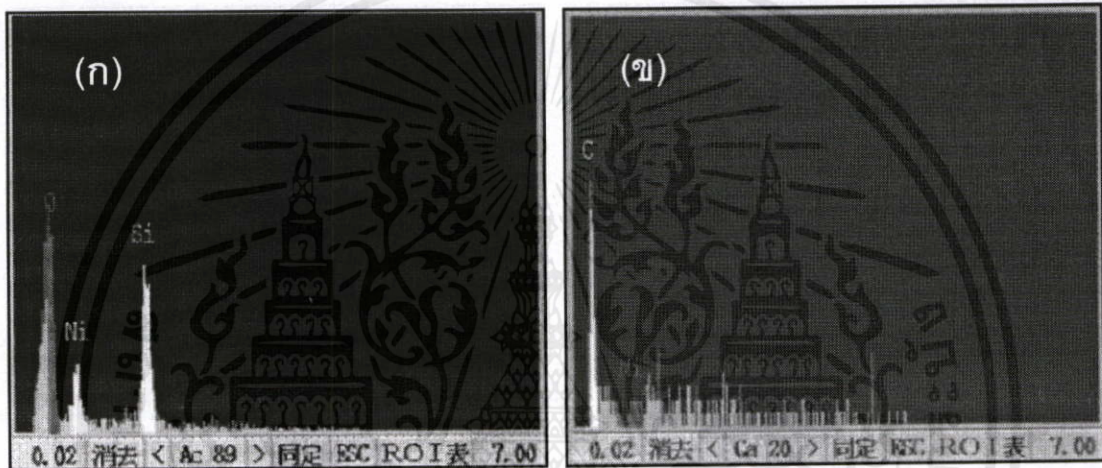
รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ตรงบริเวณขอบเขตของลวดลายวงกลม

- (ก) ที่กำลังขยายต่ำ
- (ข) ที่กำลังขยายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในหน่วยงานราชการนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.1.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX

รูปที่ 5.14(ก) เป็นภาพจาก EDX พบว่า เมื่อนำฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิล ก่อนทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะสังเกตเห็นองค์ประกอบของธาตุที่แสดงเป็นพีคต่างๆคือพีคของธาตุนิกเกิลและซิลิคอน ซึ่งเป็นชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ และมีพีคของธาตุนิเกิลเกิดขึ้นไม่สูงนักซึ่งได้จากการสปัตเตอร์ริงที่เวลาน้อย แต่ไม่พบพีคที่เป็นธาตุคาร์บอนแต่อย่างใด ในรูปที่ 5.14(ข) ภายหลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้ว พบว่ามีพีคของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นมาอย่างชัดเจน



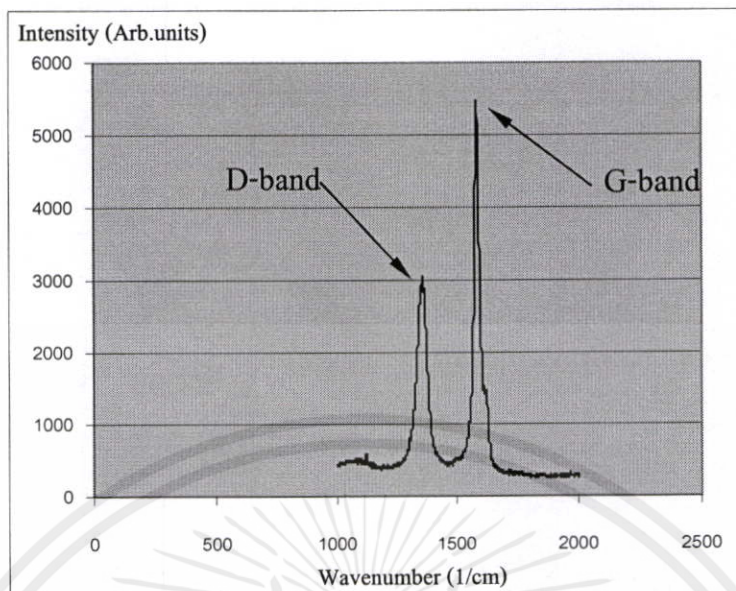
รูปที่ 5.14 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิล

(ก) ก่อนทำการสังเคราะห์

(ข) หลังทำการสังเคราะห์

5.4.1.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy

รูปที่ 5.15 เป็นกราฟรามานสเปกตรัมที่บ่งบอกถึงชนิดของคาร์บอนว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีพันธะสมบูรณ์ จากค่าสเปกตรัมที่ประมาณ 1580 cm^{-1} หรือ G-band และ ค่าสเปกตรัมที่ประมาณ 1355 cm^{-1} หรือ D-band ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายจากการใช้หน้ากากป้องกัน พบว่าอยู่ในย่านของสเปกตรัมที่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งยืนยันได้จากกราฟว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ และสามารถคำนวณหาคุณภาพของฟิล์มได้จากอัตราส่วนของ G/D ถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

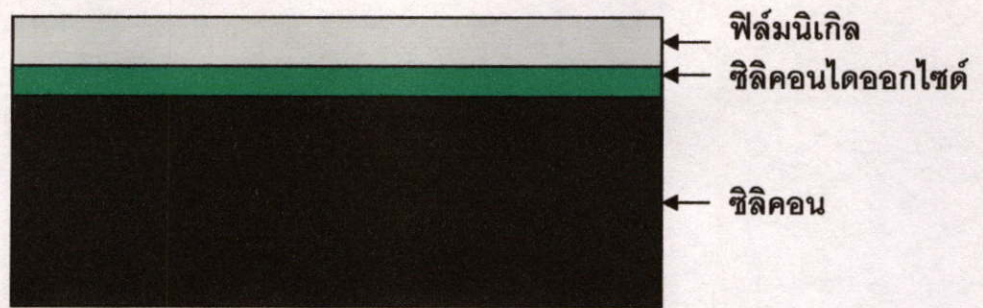


รูปที่ 5.15 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองซิลิคอน

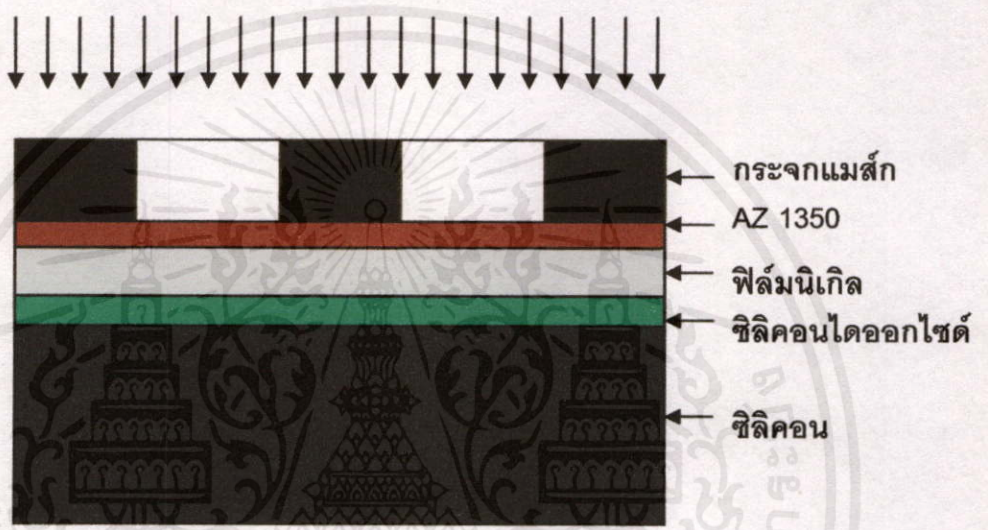
จากการทดลองนี้ พบว่ากระบวนการสร้างด้วยลวดลายด้วยวิธีใช้หน้ากากป้องกัน ข้อดีคือไม่ค่อยมีชั้นคอนซันชันมากนัก และใช้เวลาน้อย แต่ความคมชัดของลวดลายที่ได้ค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจไม่เหมาะสำหรับการสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กๆ ได้ และการสปีดเตอร์จึงนิเกิดเป็นแบบกลุ่ม ก้อนนั้น พบว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ได้ ดังนั้นในหัวข้อต่อไป จะทำการทดลองสปีดเตอร์จึงนิเกิดแบบเป็นฟิล์มบาง ซึ่งคาดว่าน่าจะสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ได้เช่นกัน

5.4.2 การสร้างลวดลายโดยวิธีกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยวิธีนี้ แบ่งออกได้เป็นสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นการออกแบบลวดลายที่เป็นต้นแบบ ซึ่งใช้โปรแกรม Corel Draw สำหรับออกแบบลวดลายตามต้องการ ดังรูปที่ 5.17(ก) จากนั้นจะนำไปสร้างต้นแบบลงบนแผ่นพลาสติกใส แล้วนำมาปะบนกระจกสำหรับเป็นต้นแบบ เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เริ่มจากการเตรียมฐานรองด้วยการนำแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ไปเคลือบนิเกิดด้วยการสปีดเตอร์จึงนิให้ฟิล์มบาง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ดังรูปที่ 5.16(ก) รูปที่ 5.16(ข) นำกระจกต้นแบบมาวางบนฐานรองที่เคลือบชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวกแล้วนำไปฉายแสง รูปที่ 5.16(ค) ทำการ develop เพื่อเปิดช่องสำหรับทำการกัดชั้นนิเกิด รูปที่ 5.16 (ง) แสดงบริเวณที่นิเกิดโดนกัดออกด้วยวิธีการ wet etching รูปที่ 5.16(จ) ทำการลอกชั้นน้ำยาไวแสง จะได้ลวดลายต่างๆตามที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 5.17(ข) จากนั้นจึงนำฐานรองที่ได้ ไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ โดยมีเงื่อนไขดังตารางที่ 5.8 ภายหลังจากกระบวนการสังเคราะห์แล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.17(ค)



(ก)



(ข)

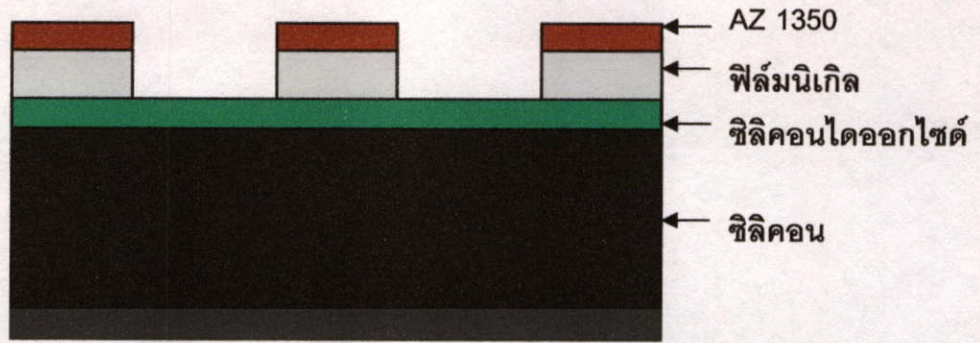


(ค)

รูปที่ 5.16 วิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ส(ก) การเคลือบนิเกิลด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง ญาติให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่จำกัดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม(ข) การฉายแสง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) การ develop



(ง)



(จ)

รูปที่ 5.16(ต่อ) วิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

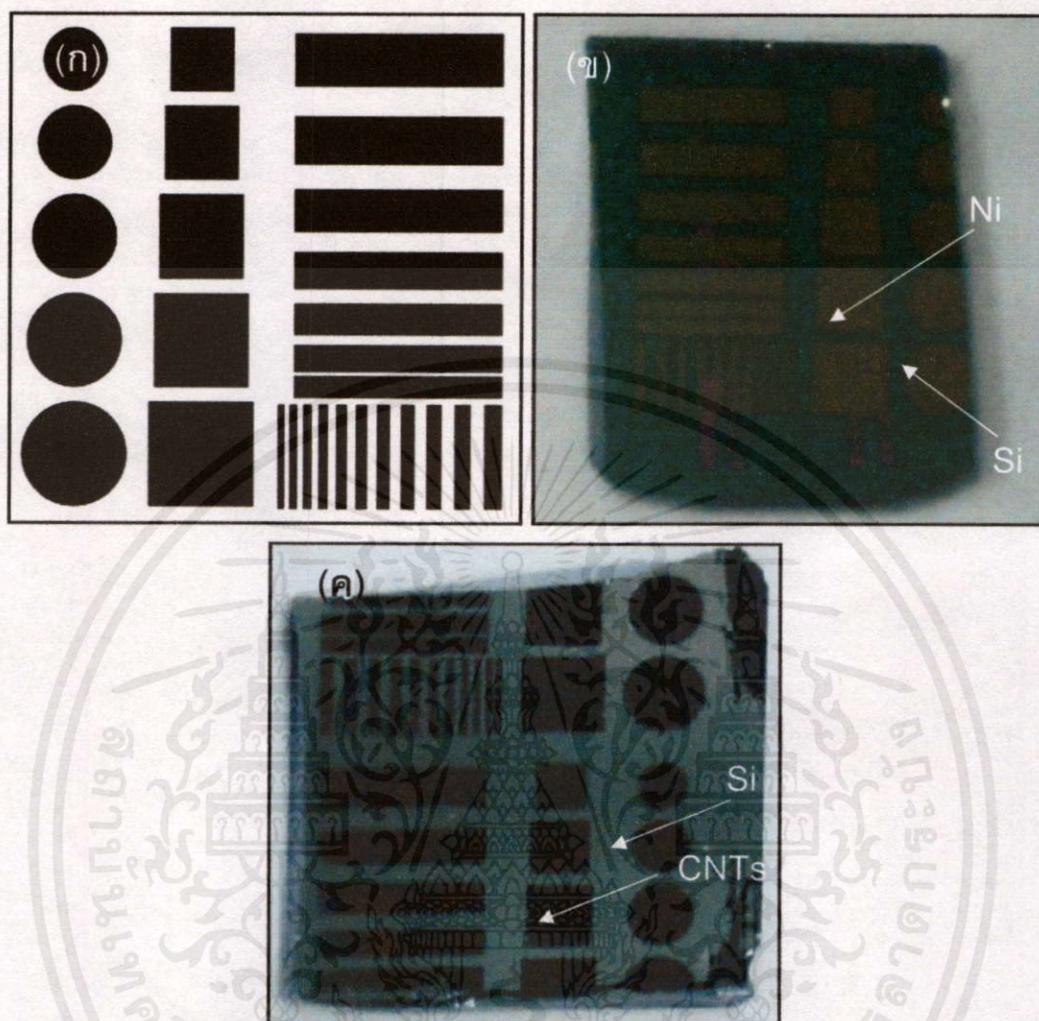
(ง) การกัดชั้นนิเกิล

(จ) การลอกชั้นน้ำยาไวแสง

ตารางที่ 5.8 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C
กำลังงาน	120 W
สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์
แคตะไลต์	นิเกิล
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการแปรรูปเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

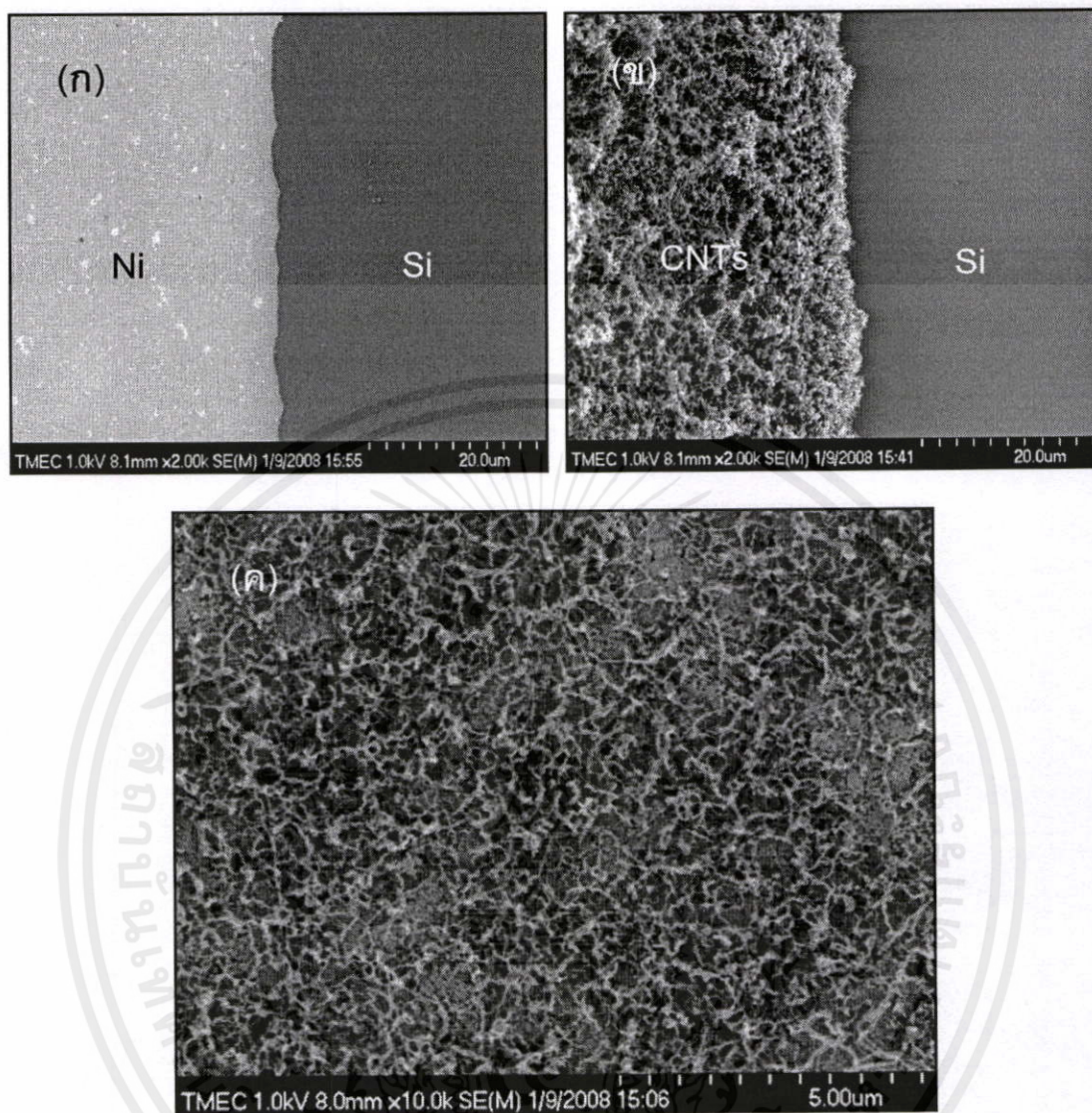


รูปที่ 5.17 แมสก์ของลวดลายต่างๆที่ได้ออกแบบไว้สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

- (ก) แมสก์สำหรับกระจกต้นแบบเป็นลวดลายต่างๆ
- (ข) ภาพถ่ายลวดลายของนิเกิลหลังผ่านกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี
- (ค) ภาพถ่ายลวดลายภายหลังการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

5.4.2.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย SEM

รูปที่ 5.18 เป็นภาพถ่ายจาก SEM บนฐานรองซิลิคอนที่ออกแบบให้กำเนิดมีลวดลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ รูปที่ 5.18(ก) ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณขอบเขต พบว่าลวดลายมีความคมชัด จากนั้นเมื่อมาทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.18(ข) ซึ่งจะสังเกตเห็นคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วทั้งพื้นผิวและแสดงถึงขอบเขตที่คมชัดเช่นกัน รูปที่ 5.18(ค) เป็นภาพถ่ายจาก SEM เฉพาะบริเวณที่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ พบว่าเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น และมีขนาดท่อที่ค่อนข้างเล็ก



รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายจาก SEM บริเวณขอบเขตของลวดสายนิเกิล

(ก) ขอบเขตระหว่างนิเกิลกับฐานรองซิลิคอน

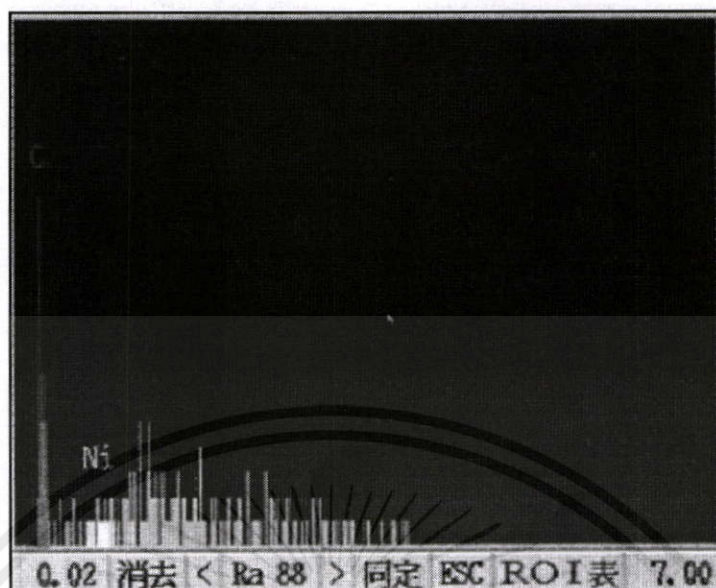
(ข) ขอบเขตระหว่างคาร์บอนนาโนทิวกับฐานรองซิลิคอน

(ค) บริเวณที่เป็นคาร์บอนนาโนทิว

5.4.2.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวด้วย EDX

เมื่อนำฟิล์มที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย EDX พบว่า รูปที่ 5.19 เป็นภาพจาก EDX ที่แสดงถึง

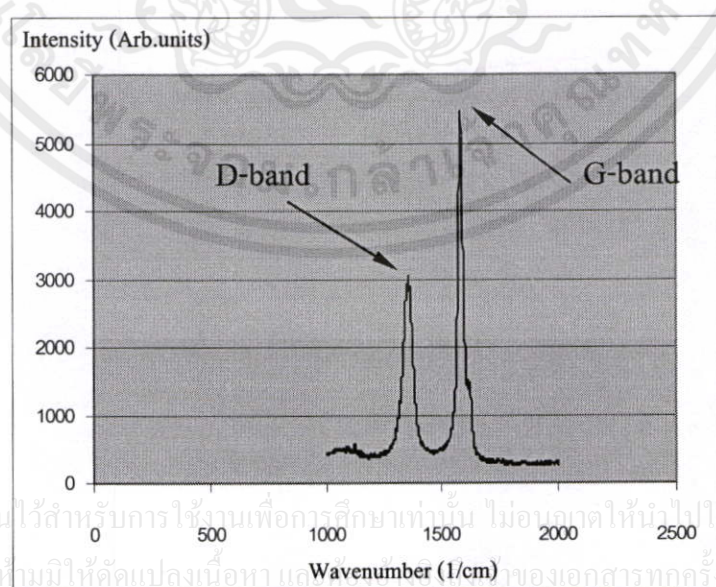
องค์ประกอบของธาตุคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนเป็นฟูลเลอรีน (C₆₀) และคาร์บอนนาโนทิว (CNT) ซึ่งบ่งบอกถึงความหนาแน่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวที่สังเคราะห์ได้ ที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายนิเกิล
หลังทำการสังเคราะห์

5.4.2.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วย Raman Spectroscopy

รูปที่ 5.20 เป็นค่ารามานสเปคตรัมที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี พบว่า กราฟที่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่บ่งบอกว่า เป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ และพิกที่แสดงถึงความบริสุทธิ์อย่างชัดเจน



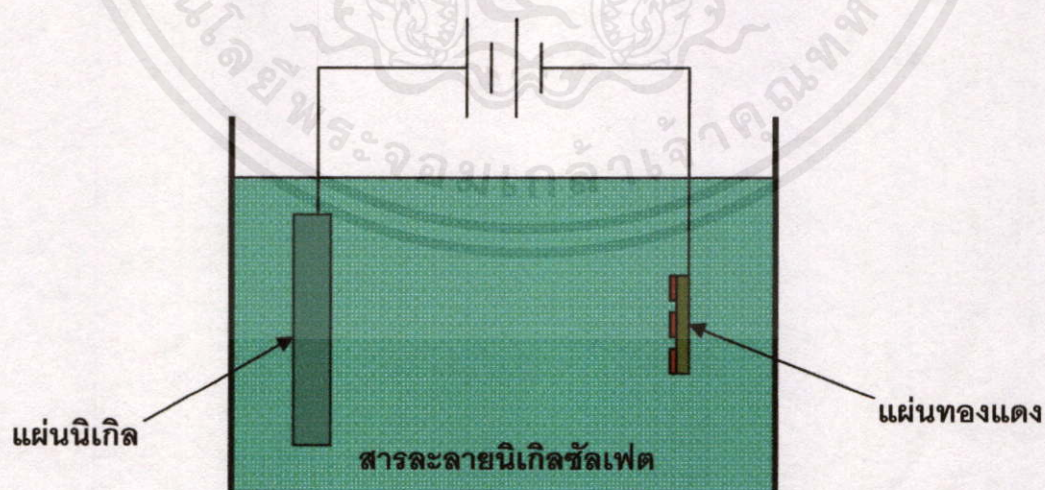
รูปที่ 5.20 รามานสเปคตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และเผยแพร่ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 การสร้างลวดลายโดยวิธีการชุบทางไฟฟ้า (Electroplating) [20]

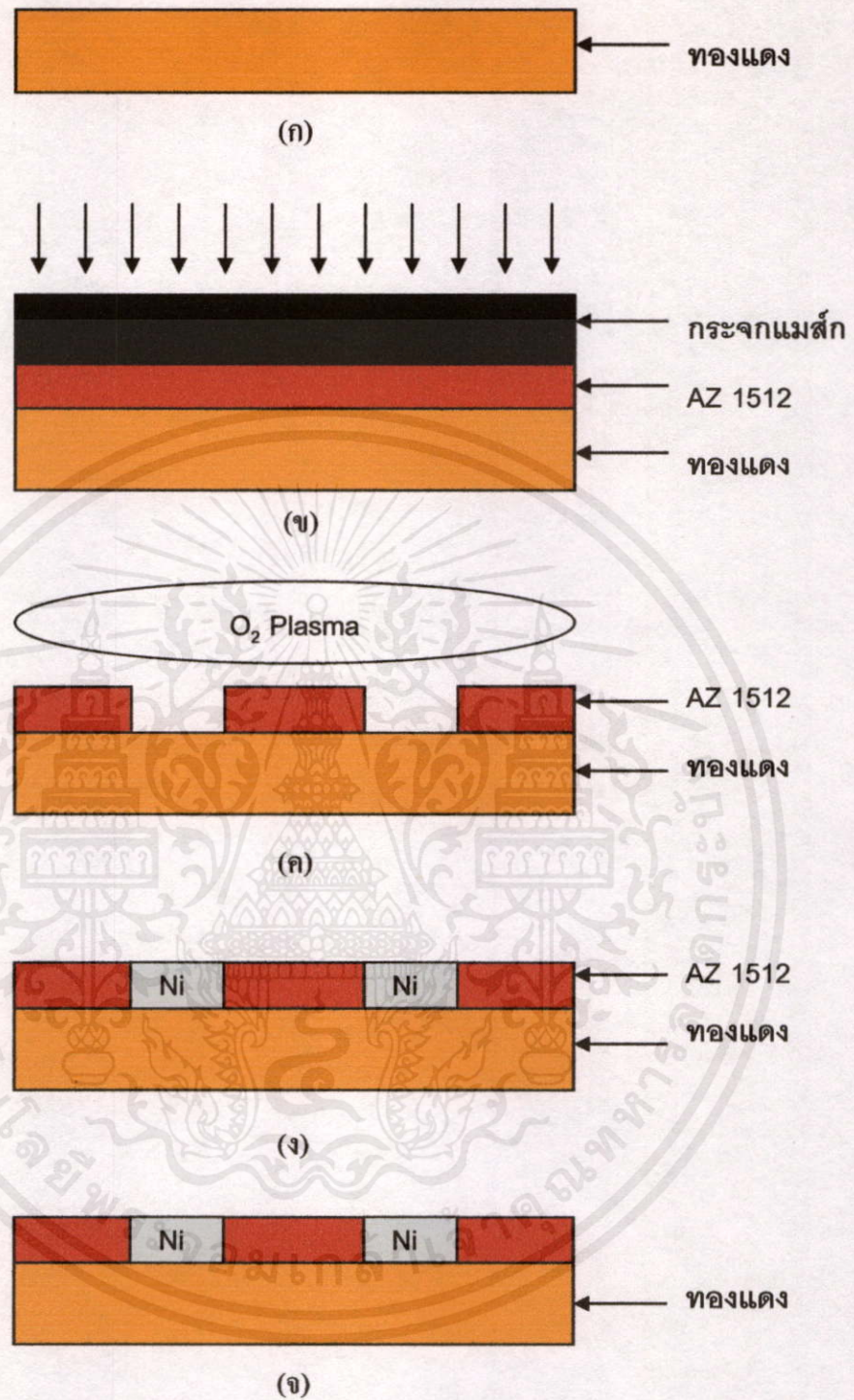
กระบวนการชุบทางไฟฟ้า (Electroplating) เป็นกระบวนการที่สามารถนำไปใช้ในการเตรียมตัวแคตะไลต์ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ การทดลองนี้ ได้ทำการสร้างลวดลายของนิเกิลบนฐานรองทองแดง เพื่อต้องการศึกษาว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่สามารถเกิดขึ้นบนฐานรองทองแดงตรงบริเวณที่ปราศจากตัวแคตะไลต์ รูปที่ 5.21 เป็นภาพถ่ายของระบบการชุบทางไฟฟ้า โดยมีโลหะนิเกิลเป็นขั้วลบ ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟขั้วบวก และแผ่นทองแดงเตรียมไว้ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟขั้วลบ ใช้เวลาในการชุบประมาณ 30 นาที ด้วยกระแส 0.2 แอมแปร์

การสร้างลวดลายของนิเกิลบนฐานรองทองแดง เริ่มจากการออกแบบลวดลายที่เป็นลายเส้นตรงลงบนแผ่นใสสำหรับเป็นต้นแบบในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในส่วนของขั้นตอนการเตรียมฐานรองก่อนนำไปชุบไฟฟ้านั้น เริ่มต้นด้วยการนำแผ่นทองแดง หนาประมาณ 500 ไมครอน มาทำความสะอาดคราบไขมันด้วยแอลกอฮอล์ ดังแสดงในรูป 5.22(ก) จากนั้นนำกระจกต้นแบบมาวางบนฐานรองที่เคลือบชั้นน้ำยาไวแสงชนิดลบแล้วนำไปฉายแสงดังแสดงในรูปที่ 5.22(ข) รูปที่ 5.22(ค) ทำการ develop และทำความสะอาดแผ่นด้วยวิธีพลาสมาหรือกระบวนการ dry etching เพื่อเปิดช่องสำหรับเติมโลหะนิเกิลด้วยวิธีการชุบทางไฟฟ้า รูปที่ 5.22(ง) นำแผ่นไปเติมโลหะนิเกิลด้วยการชุบทางไฟฟ้า รูปที่ 5.22(จ) ทำการลอกชั้นน้ำยาไวแสงออก จะได้ลวดลายต่างๆตามที่ได้ออกแบบดังแสดงในรูปจากนั้นจึงนำฐานรองที่ได้ ไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีเงื่อนไขดังตารางที่ 5.9 โดยรูปที่ 5.23(ก) เป็นภาพหลังจากที่ผ่านการชุบทางไฟฟ้า ต่อมาเมื่อนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์แล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.23(ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.21 ภาพแสดงการชุบทางไฟฟ้าด้วยนิเกิลบนฐานรองทองแดง



รูปที่ 5.22 วิธีการสร้างลวดลายด้วยได้โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

(ก) การทำความสะอาดแผ่นท่องแดงด้วยแอลกอฮอล์

(ข) การฉายแสง

(ค) การ develop และ พลาสมา

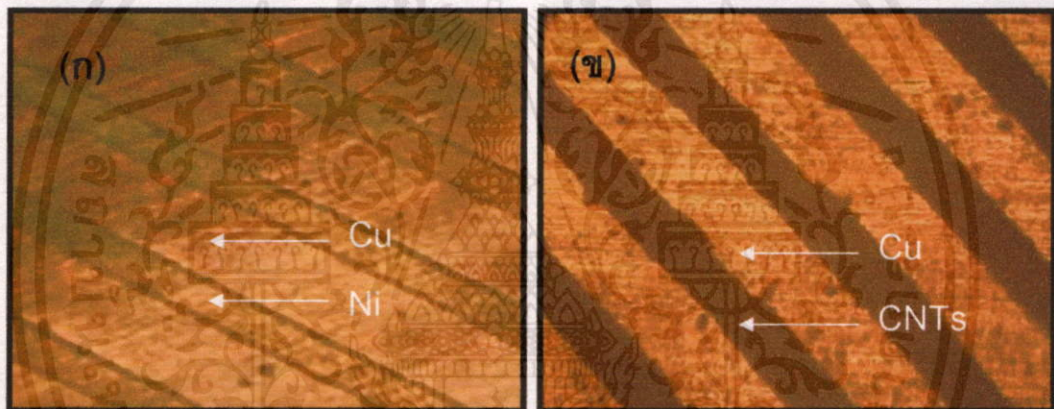
(ง) การเติมนิเกิลด้วยวิธีชุบทางไฟฟ้า

(จ) การลอกชั้นน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองทองแดงที่มีลวดลายจากการชุบทางไฟฟ้า

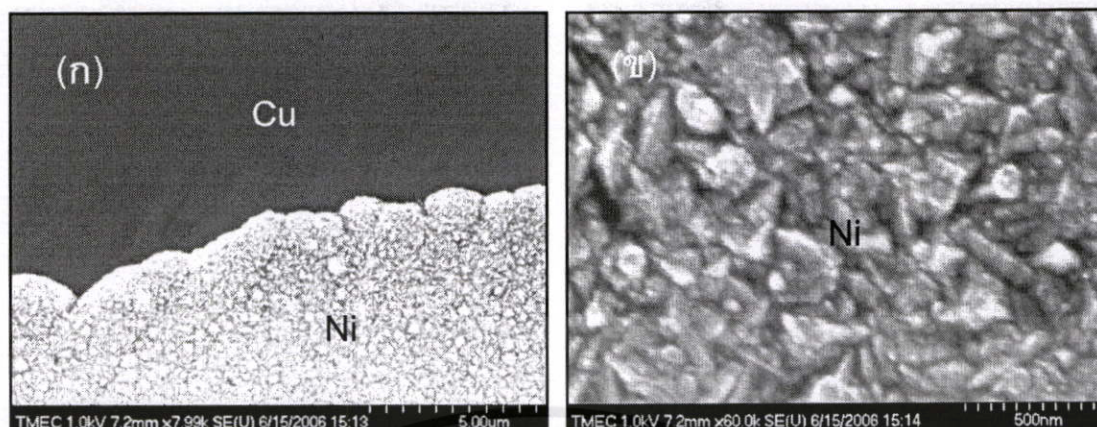
อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C
กำลังงาน	106 W
สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์
แคตะไลต์	นิกเกิล
เวลา	25-30 นาที



รูปที่ 5.23 ภาพถ่ายของลวดลายนิกเกิลที่เป็นเส้นตรงบนฐานรองทองแดง
(ก) ภาพถ่ายลวดลายของนิกเกิลหลังจากกระบวนการชุบทางไฟฟ้า
(ข) ภาพถ่ายลวดลายภายหลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์

5.4.3.1 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิว์ด้วย SEM

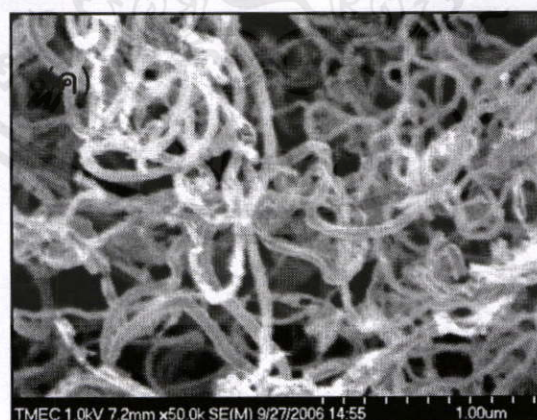
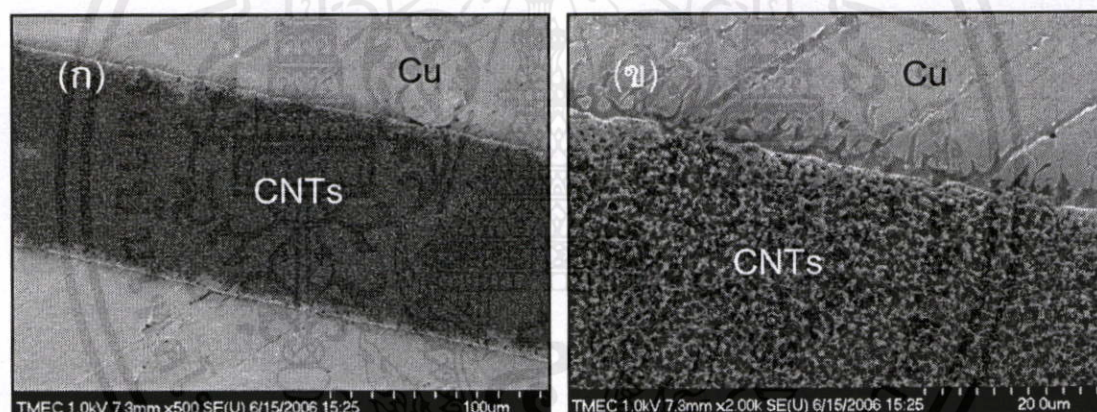
รูปที่ 5.24(ก) เป็นภาพถ่ายจาก SEM ที่แสดงถึงขอบเขตของลวดลายนิกเกิลที่ได้จากการชุบทางไฟฟ้าบนฐานรองทองแดง พบว่าลวดลายมีความคมชัด รูป 5.24(ข) เป็นภาพจาก SEM ครอบคลุมบริเวณที่เป็นนิกเกิล ซึ่งพบว่าเป็นผลึกเกาะติดกันอย่างหนาแน่น รูปที่ 5.25(ก) เป็นภาพจาก SEM ที่กำลังขยายต่ำและรูปที่ 5.25(ข) ภาพจาก SEM ที่กำลังขยายสูง บอกลักษณะขอบเขตระหว่างคาร์บอนนาโนทิว์กับทองแดง ซึ่งพบว่าคาร์บอนนาโนทิว์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้บนฐานรองทองแดง และรูปที่ 5.25(ค) เป็นภาพจาก SEM พบว่าคาร์บอนนาโนทิว์เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นและเห็นขนาดท่อที่ชัดเจน ประมาณ 10-50 nm



รูปที่ 5.24 ภาพถ่ายจาก SEM ของนิเกิลที่ได้จากการชุบด้วยไฟฟ้า

(ก) ขอบเขตระหว่างฐานรองทองแดงกับนิเกิล

(ข) พื้นผิวของนิเกิลที่ได้จากการชุบทางไฟฟ้า



รูปที่ 5.25 ภาพถ่ายจาก SEM หลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

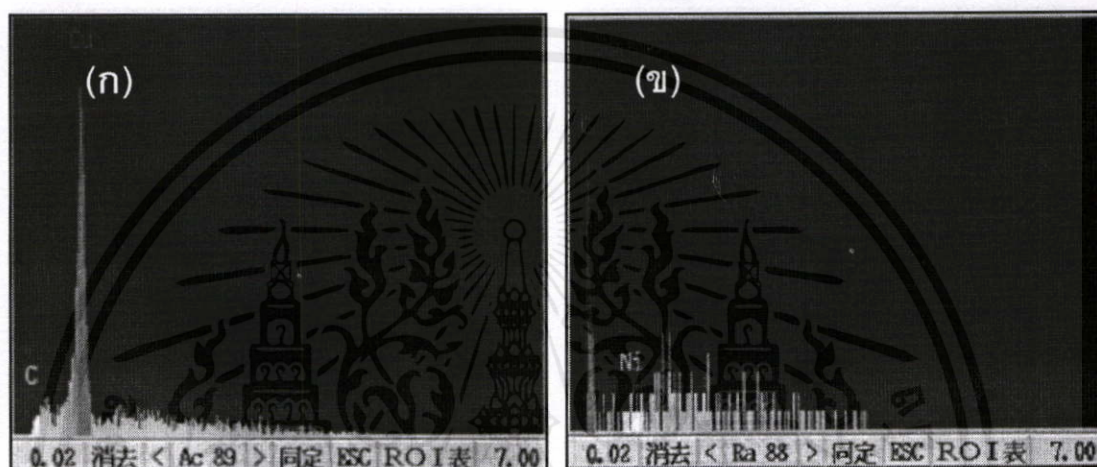
(ก) กำลัขชายต่ำบริเวณขอบเขต

(ข) กำลัขชายสูงบริเวณขอบเขต

(ค) คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้บนบนลวดลายของฐานรองทองแดง

5.4.3.2 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย EDX

รูปที่ 5.26(ก) เป็นภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุตรงบริเวณทองแดง พบว่าไม่มีฟีกของคาร์บอนเกิดขึ้นเลย เป็นการยืนยันอย่างแน่นหนาว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่สามารถเกิดได้บนฐานรองทองแดง รูปที่ 5.26(ข) แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองทองแดงที่มีลวดลายนิเกิลซึ่งได้จากการชุบทางไฟฟ้า หลังทำการสังเคราะห์พบว่าไม่มีฟีกของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความหนาแน่นที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 5.26 ภาพจาก EDX ที่แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุนบนฐานรองทองแดงที่มีลวดลายเส้นตรงหลังทำการสังเคราะห์
(ก) บริเวณที่เป็นฐานรองทองแดง
(ข) บริเวณที่เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์

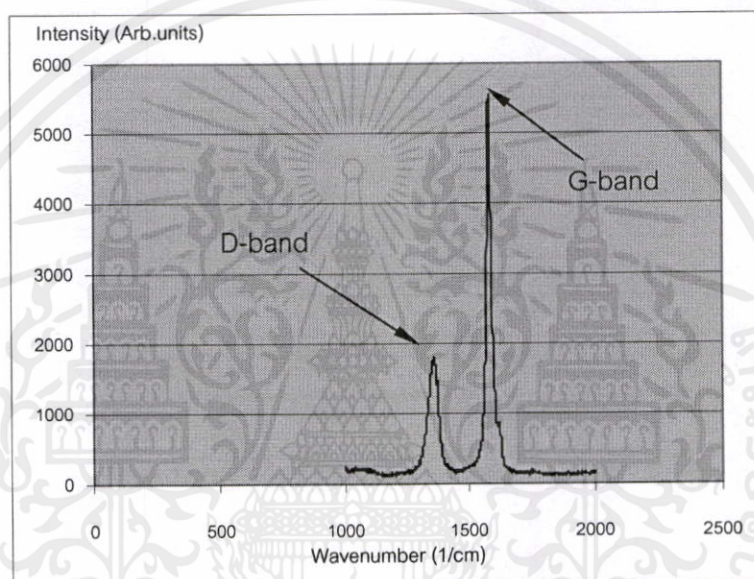
5.4.3.3 การวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy

รูปที่ 5.27 เป็นค่ารามานสเปคตรัมที่ได้จากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดงที่มีลวดลายจากการชุบทางไฟฟ้า พบว่า กราฟที่ได้อยู่ในช่วงความถี่ที่บ่งบอกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดย G-band คือพันธะที่สมบูรณ์ของกราฟไฟต์และ D-band คือพันธะที่ไม่สมบูรณ์

5.5 กระบวนการสร้างเป็นโครงสร้างความต้านทาน

จากเทคนิคการเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีการสร้างลวดลายนั้น ทำให้ได้แนวคิดที่จะนำเทคนิคต่างๆมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานได้

โดยเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างที่เป็นลวดลายด้วยโปรแกรม Corel DRAW มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงได้ในรูปที่ 5.28 เป็นแม่สักร์ที่หนึ่ง ซึ่งเป็นลวดลายของแคตะไลต์นิกเกิลและรูปที่ 5.29 เป็นแม่สักร์ที่สอง สำหรับลวดลายของทองแดงเพื่อสร้างให้เป็นขั้วไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไปยิงฟิล์มบนแผ่นใสเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยลวดลายดังกล่าวถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการของเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากนั้น จึงนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD โดยมีเงื่อนไขการสังเคราะห์ดังตารางที่ 5.10

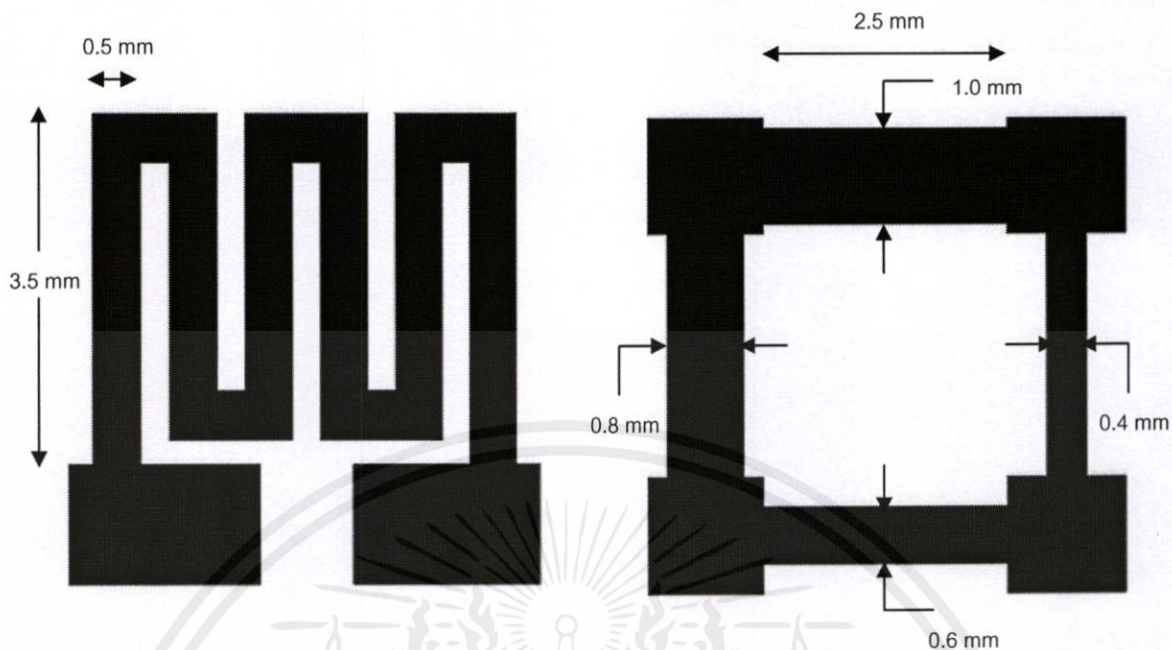


รูปที่ 5.27 รามานสเปกตรัมของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดง

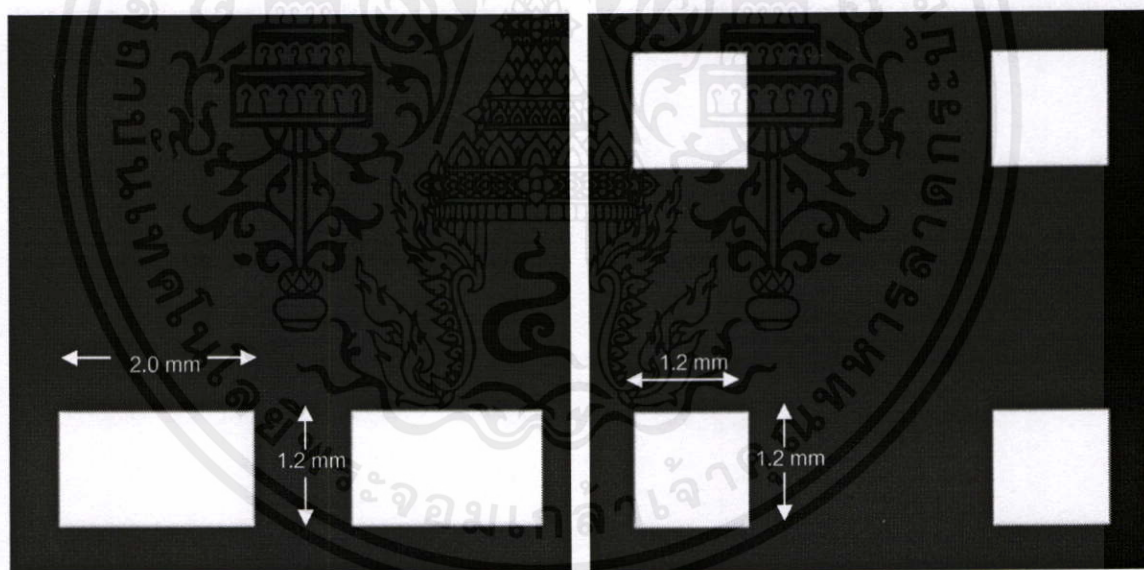
ตารางที่ 5.10 เงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองซิลิคอนที่มีลวดลายเป็นโครงสร้างความต้านทาน

อุณหภูมิฐานรอง	600-700 °C
กำลังงาน	120 W
สารแหล่งจ่าย	แอลกอฮอล์
แคตะไลต์	นิกเกิล
เวลา	30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น ถือว่าเป็นลิขสิทธิ์ของงานและจะแจ้งถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ทันทีที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 แมสก์ที่หนึ่ง สำหรับสร้างลวดลายของแคตอะไลต์นิเกิล



รูปที่ 5.29 แมสก์ที่สอง สำหรับสร้างลวดลายของขั้วไฟฟ้าทองแดง

5.5.1 การเตรียมผิวหน้าให้สะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารนำแผ่นฐานรองซิลิคอนมาทำความสะอาดดังนี้ ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ต้มในกรด HNO_3 10 นาที และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้มในน้ำ DI แก้วที่ 1 และ 2 แก้วละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI และเป่าแห้งด้วย N_2

- ต้มใน Trichloro ethylene 5 นาที
- อัลตราโซนิกด้วยอะซิโตน 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI และเป่าแห้งด้วย N_2

5.5.2 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปทำการสร้างชั้น SiO_2 โดยวิธี dry oxidation ที่อุณหภูมิ $1100\text{ }^{\circ}C$ ในเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้วิธี wet oxidation ที่อุณหภูมิ $1100\text{ }^{\circ}C$ ในเวลา 1.5 ชั่วโมงและใช้ dry oxidation เป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ $1100\text{ }^{\circ}C$ ใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง ได้ออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นซิลิคอนได้ความหนาซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 5000 \AA ดังแสดงในรูปที่ 5.30(ก) และ รูปที่ 5.30(ข)



(ก)



(ข)

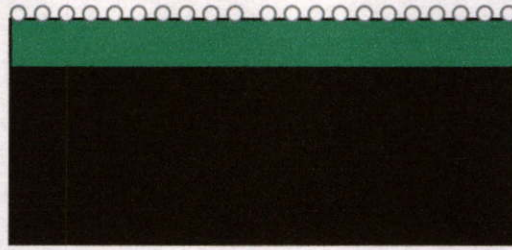
รูปที่ 5.30 การเตรียมแผ่นสำหรับสร้างชั้นฉนวน

(ก) ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

(ข) สร้างชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิคอน

5.5.3 กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบโลหะแคดเมิลต์นิกเกิล

เงื่อนไขการสปัตเตอร์นิกเกิลขั้นตอนนี้ เป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตัวต้านทาน ซึ่งจะใช้เวลาในการสปัตเตอร์ด้วยเวลาไม่เกิน 90 วินาที ความดันประมาณ $2 \times 10^{-6}\text{ Torr}$ ทั้งนี้เพื่อต้องการให้โลหะนิกเกิลกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อน ขาดจากกันทางไฟฟ้า ไม่ให้เกิดเป็นฟิล์มโลหะ ดังในรูปที่ 5.31



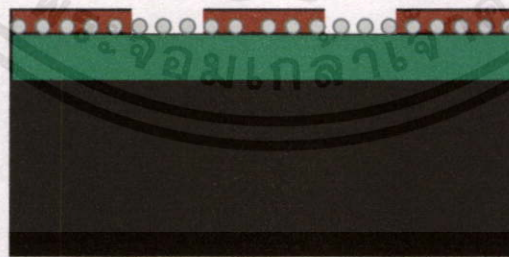
รูปที่ 5.31 นิเกิลถูกเคลือบบนซิลิคอนไดออกไซด์

5.5.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสก์ 1 สำหรับสร้างลวดลายนิเกิล

รูปที่ 5.32(ก) นำชิ้นงานไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ 1350) และอบให้แห้ง จากนั้นจึงนำไปฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบสำหรับสร้างลวดลายนิเกิล รูปที่ 5.32(ข) ทำการ develop เพื่อเปิดช่องสำหรับสกัดชั้นนิเกิล



(ก)

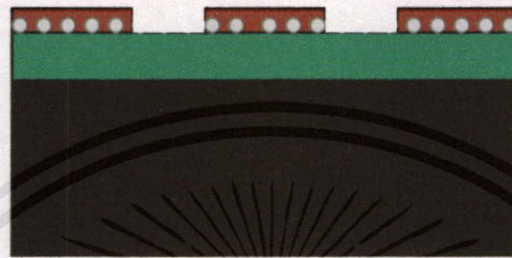


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 5.32 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสก์ที่หนึ่ง ถ้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดลอก (ก) การฉายแสงสำหรับสร้างลวดลายนิเกิล ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (ข) การ develop เพื่อเปิดช่องสำหรับสกัดชั้นนิเกิล

5.5.5 กระบวนการสกัดชั้นนิเกิลด้วยวิธีการ wet etching

นำสารเคมีสำหรับสกัดชั้นนิเกิลมาต้มให้พออุ่น จึงนำชิ้นงานมาจุ่มในสารละลายนิเกิลเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้ง และนำไปลอกน้ำยาไวแสงด้วยอะซิโตน จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.33(ก) และ 5.33(ข)



(ก)



(ข)

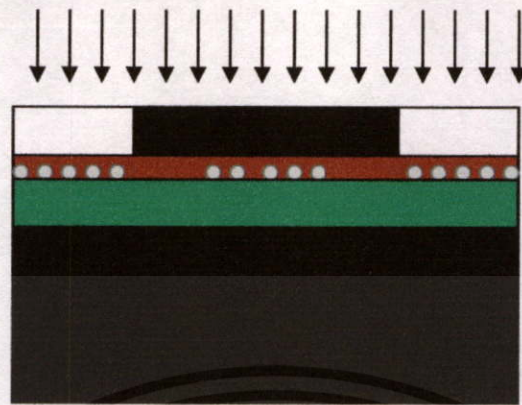
รูปที่ 5.33 กระบวนการสกัดชั้นนิเกิลด้วย wet etching

(ก) ชั้นนิเกิลที่ถูกสกัดออก

(ข) ทำการลอกน้ำยาไวแสง

5.5.6 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสก์ 2 สำหรับเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า

รูปที่ 5.34(ก) นำชิ้นงานไปเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกและอบให้แห้ง โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงนั้น จะใช้ความเร็วรอบ 500 และ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 และ 30 วินาที ตามลำดับ เพื่อต้องการให้ฟิล์มมีความหนาพอให้สามารถทำการ Lift-off ได้ ต่อมนำชิ้นงานไปฉายแสงผ่านกระจกแมสก์ที่สอง สำหรับสร้างขั้วทองแดง จากนั้นจึงนำมาทำการ develop ดังแสดงในรูปที่ 5.34(ข)



(ก)



(ข)

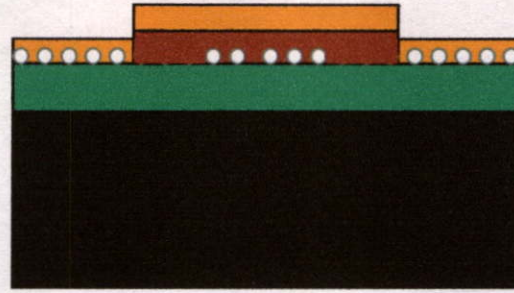
รูปที่ 5.34 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแมสก์ที่สอง

(ก) การฉายแสงเพื่อเปิดช่องสร้างสำหรับสร้างขั้วไฟฟ้า

(ข) การ develop สำหรับสร้างขั้วทองแดงด้วยการสปีดเตอร์ริง

5.5.7 กระบวนการสปีดเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง

การสปีดเตอร์ทองแดงสำหรับต้องการสร้างขั้วไฟฟ้า จะใช้เวลาในการสปีดเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr เพื่อต้องการให้เกิดเป็นฟิล์มทองแดง โดยเงื่อนไขการสปีดเตอร์ด้วยเวลานี้ จะได้ความหนาของฟิล์มทองแดงที่เหมาะสมสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าได้ โดยความหนาของฟิล์มทองแดงจะต้องไม่มากไปกว่าความหนาของชั้นน้ำยาไวแสง จากนั้นจึงนำไปลอกชั้นน้ำยาไวแสงด้วยอะซิโตน โดยเป็นกระบวนการ Lift-off เพื่อให้ส่วนที่อยู่บนน้ำยาไวแสงหลุดออกไปพร้อมกับทองแดงที่อยู่ด้านบนดังแสดงในรูปที่ 5.35(ก) และ รูปที่ 5.35(ข) ส่วนรูปที่ 5.36 เป็นภาพก่อนทำการสังเคราะห์ที่แสดงถึงลวดลายของนิเกิลและขั้วทองแดงอย่างชัดเจน ต่อมาเมื่อนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์แล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.37



(ก)

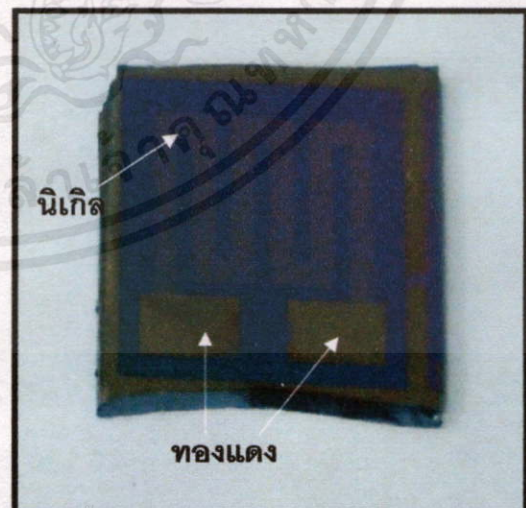
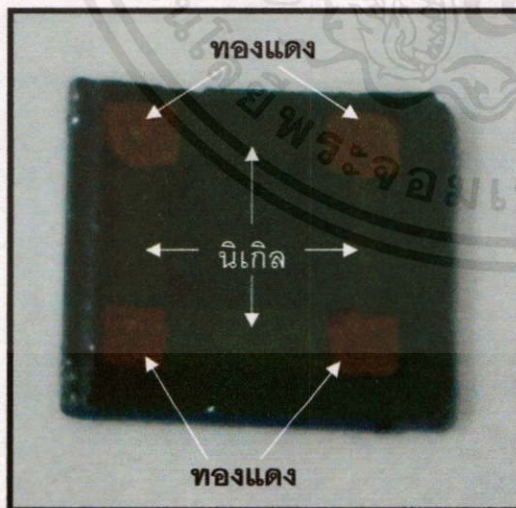


(ข)

รูปที่ 5.35 กระบวนการสปีดเตอร์ริงสำหรับสร้างขั้วโลหะทองแดง

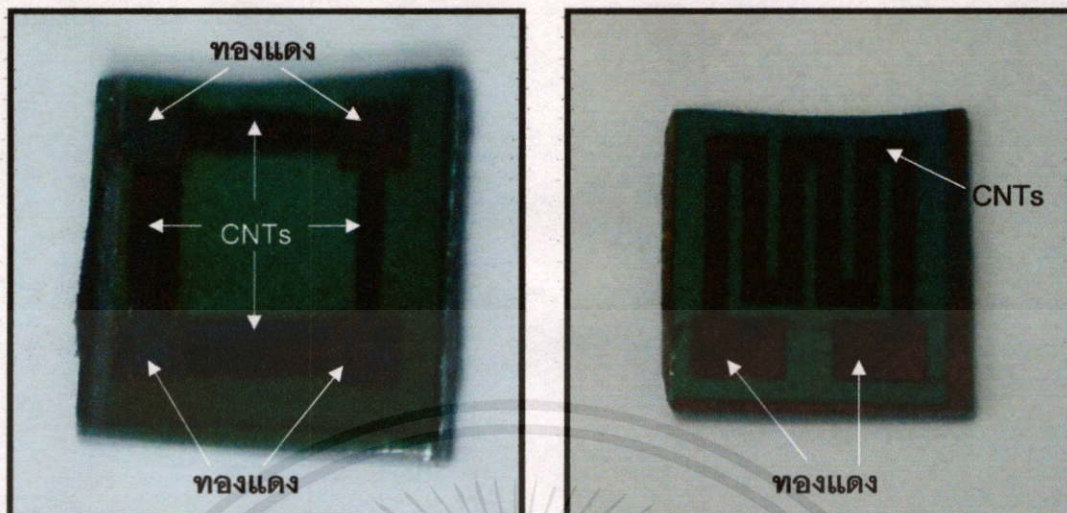
(ก) ทองแดงถูกเคลือบลงบนฐานรอง

(ข) ลอกน้ำยาไวแสงด้วยวิธี Lift-off



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (ก) (ข)
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.36 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงานก่อนทำการสังเคราะห์



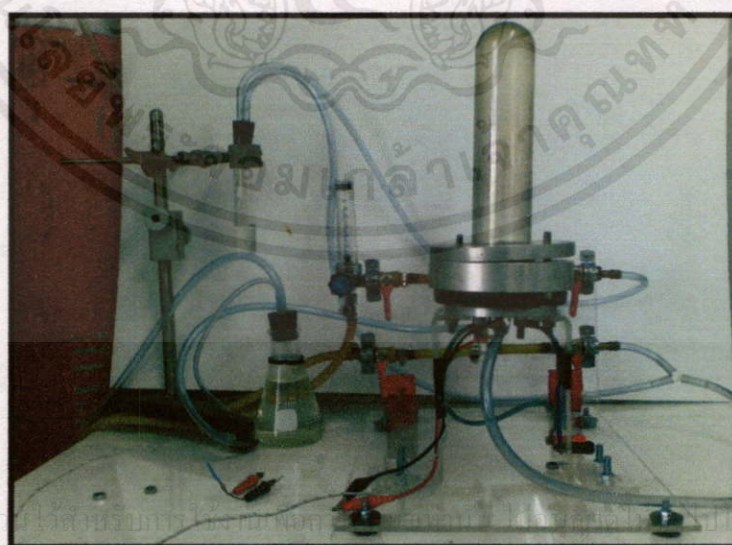
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.37 ภาพถ่ายจริงของชิ้นงานหลังจากสังเคราะห์แล้ว

5.6 การนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ

การทดลองนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 5.37(ข) มาทำการทดสอบการตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์ เนื่องจากมีพื้นที่สำหรับตรวจจับก๊าซมากกว่า โดยหลักการทำงานของตัวเซ็นเซอร์นั้น จะอาศัยกลไกของการดูดซับ โมเลกุลของก๊าซที่สัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ ทำให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าในเนื้อวัสดุนั้นลดลง เป็นผลเนื่องมาจากค่าของความต้านทานที่เพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ระบบในการวัดคุณสมบัติการตรวจจับก๊าซนั้น จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 ภาพถ่ายระบบสำหรับตรวจวัดก๊าซ

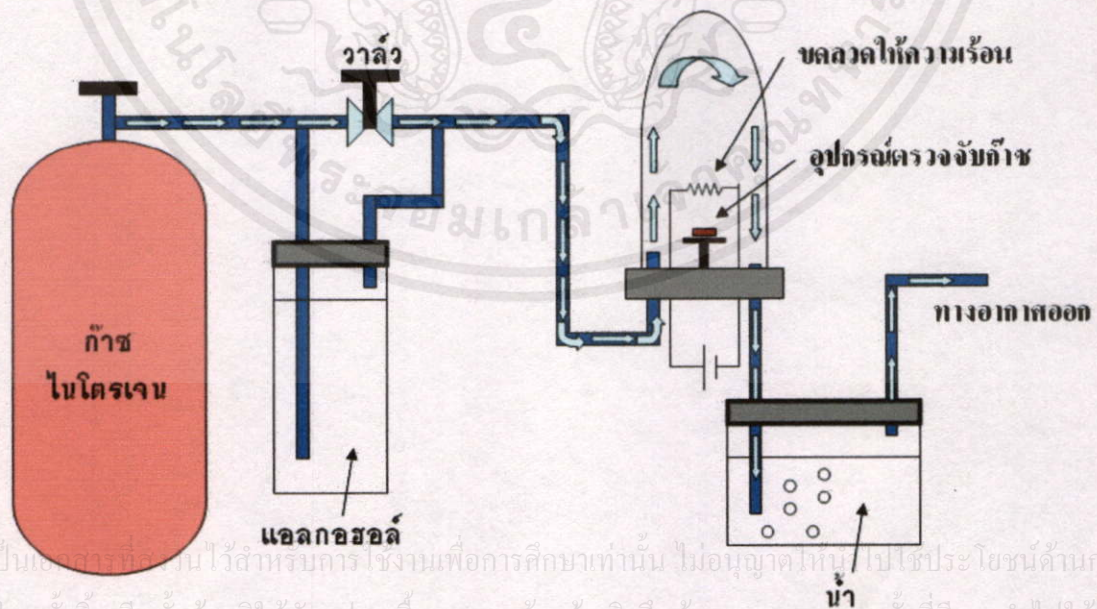
ขั้นตอนการนำมาตรวัดก๊าซ โดยเริ่มจากวัดค่าความดันทานเริ่มต้นก่อนการตรวจวัด ได้ 1.122 กิโลโอห์ม แสดงได้ดังรูปที่ 5.39 และ 5.40 โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้คือ

กรณีที่ 1 ไม่ให้ความร้อนภายในระบบวัด

1. เริ่มจ่ายก๊าซใน โครเจนเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าความดันทานคงที่ 1.126 กิโลโอห์ม
2. เริ่มจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยมีใน โครเจนเป็นตัวนำพา ทำการบันทึกค่าความดันทานที่เปลี่ยนไป จนได้ค่าคงที่
3. หยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยที่ยังจ่ายก๊าซใน โครเจนอยู่ ทำการบันทึกค่าความดันทานที่เปลี่ยนไปจนได้ค่าคงที่ จากนั้นทดสอบการทำซ้ำอีกครั้งแล้วบันทึกค่า

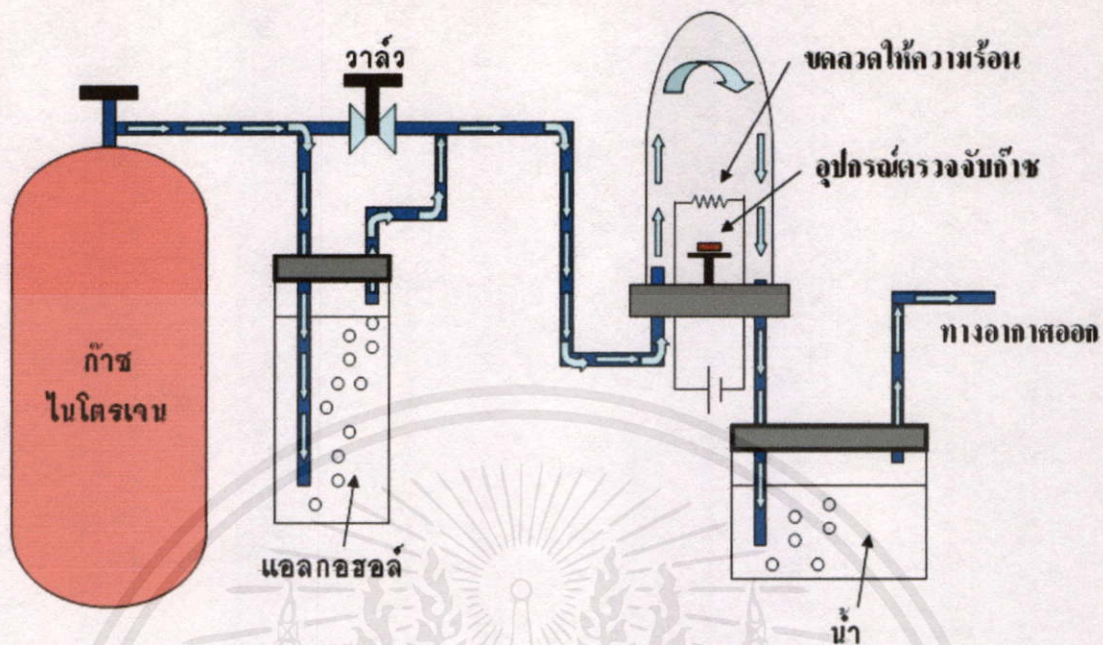
กรณีที่ 2 ให้ความร้อนภายในระบบวัด (อุณหภูมิที่ฐานรองประมาณ $70 - 80^{\circ}\text{C}$)

1. เริ่มจ่ายใน โครเจนเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าความดันทานคงที่ได้ 0.95 กิโลโอห์ม
2. เริ่มจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยมีใน โครเจนเป็นตัวนำพา ทำการบันทึกค่าความดันทานที่เปลี่ยนไป จนได้ค่าคงที่
3. หยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์โดยที่ยังจ่ายใน โครเจนอยู่ ทำการบันทึกค่าความดันทานที่เปลี่ยนไปจนได้ค่าคงที่ จากนั้นทดสอบการทำซ้ำอีกครั้งแล้วบันทึกค่า

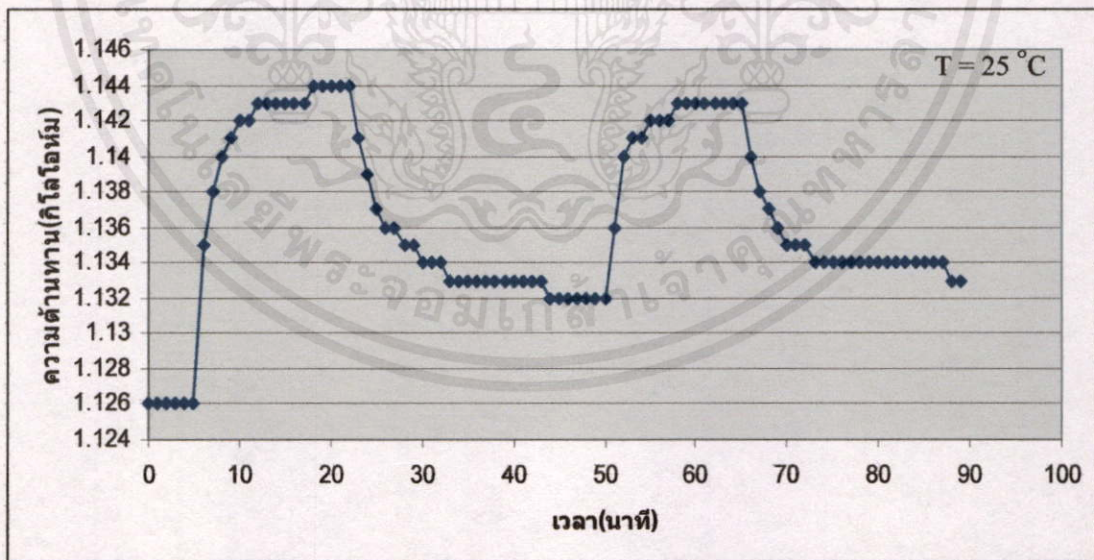


เอกสารนี้เป็นเอกสารนี้จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.39 ภาพแสดงการไล่อากาศภายในระบบออก

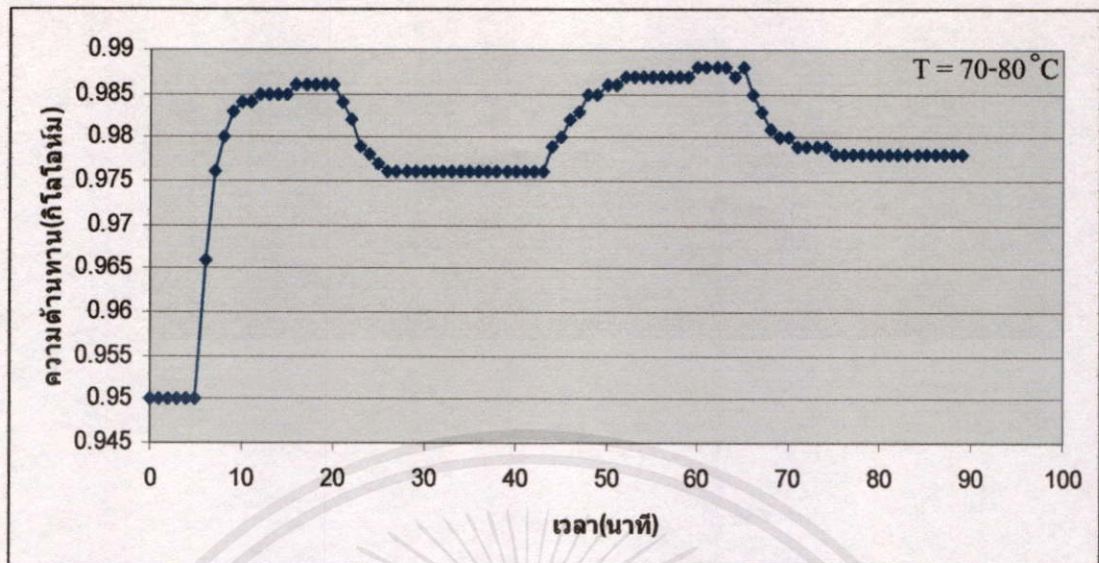


รูปที่ 5.40 ภาพแสดงการพัฒนาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 5.41 กราฟแสดงคุณสมบัติการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบที่ไม่ให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.42 กราฟแสดงคุณสมบัติการตรวจจับไอระเหยแอลกอฮอล์ในระบบที่ให้ความร้อน

จากรูปที่ 5.46 พบว่าในขั้นตอนแรกเริ่มจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบที่ยังไม่ให้ความร้อน วัดค่าความต้านทานคงที่ประมาณ 1.126 กิโลโกรัม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา สังเกตได้ว่าค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เริ่มอิมตัวได้ค่าประมาณ 1.144 กิโลโกรัม ใช้เวลาประมาณ 17 นาที ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 1.598 % ต่อมาเมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงลดลง จนมาคงที่ที่ค่าๆหนึ่งประมาณ 1.132 กิโลโกรัม และเมื่อทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 5.47 เมื่อทดสอบการจ่ายไนโตรเจนเข้ามาภายในระบบที่ให้ความร้อน วัดค่าความต้านทานคงที่ประมาณ 0.95 กิโลโกรัม จากนั้นทำการเปิดวาล์วให้ไนโตรเจนพัดพาไอระเหยแอลกอฮอล์เข้ามา ได้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเพิ่มขึ้นเป็น 0.986 % ใช้เวลาประมาณ 16 นาที ได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 3.789 % เมื่อทำการหยุดจ่ายไอระเหยแอลกอฮอล์ ได้ค่าความต้านทานลดลงจนคงที่ที่ 0.976 กิโลโกรัม และทดสอบการทำซ้ำอีกครั้ง ผลปรากฏว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันเหมือนกับกรณีที่ 1 ซึ่งในความเป็นจริงของทั้งสองกรณีนี้ ค่าความต้านทานควรลดลงมาที่ค่าแรกเริ่มคือ 1.126 กิโลโกรัม อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปนานมากพอสมควร จึงพบว่า ค่าความต้านทานจะกลับไปสู่ค่าเท่าเดิม ดังนั้นน่าจะสรุปได้ว่า สาเหตุน่าจะมาจากกรณีที่อาจจะยังมีโมเลกุลของไอระเหยแอลกอฮอล์บางส่วน เกาะอยู่ในวัสดุที่เป็นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังระเหยออกไม่หมด

โดยสรุป การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน สามารถทำได้ง่าย และเมื่อได้ศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ที่ต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อสังเคราะห์โดยใช้แคะโตะไลต์นิเกิลและสารแหล่งจ่ายเป็นแอลกอฮอล์ จะได้คุณภาพฟิล์มที่ดีซึ่งยืนยันได้จากกราฟรามานสเปกตรัมของทั้งสองฐานรอง ต่อมาได้ศึกษาการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งพบว่าจะได้ความคมชัดของลวดลายสูงจากวิธีโฟโตลิโธกราฟีและวิธีชุบทางไฟฟ้า จากเทคนิคการสร้างลวดลายเหล่านี้ เพื่อต้องการที่จะนำมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยจะเลือกใช้ฐานรองเป็นซิลิคอน ซึ่งเหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทตัวเซ็นเซอร์ และอาจพัฒนาไปสู่วงจรรวมได้ โดยกระบวนการสร้างต่างๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์มาเกี่ยวข้องด้วยในการที่จะสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้นำเสนอถึงวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) กระทำที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้แหล่งกำเนิดคาร์บอนเป็นเอทานอลที่มีก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวนำพา ใช้ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิลเป็นตัวช่วยในการเกิด ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถทำได้ง่าย ราคาประหยัดกว่าวิธีอื่นๆ และไม่ใช้ก๊าซพิษที่เป็นอันตราย ส่วนข้อเสียคือ สามารถสังเคราะห์ได้บนพื้นที่เล็กและสร้างได้ครั้งละหนึ่งชิ้นงาน โดยท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้เป็นแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) อีกทั้งไม่สามารถควบคุมขนาดของท่อได้

ในส่วนของการสังเคราะห์ ได้ทำการศึกษาถึงผลการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองต่างชนิดกัน ซึ่งแบ่งได้ 4 ชนิด ได้แก่ ฐานรองสารประกอบกราฟไฟต์หรือใส่ดินสอ ฐานรองคาร์บอนอัดแน่นหรือถ่าน ฐานรองซิลิคอน และฐานรองทองแดง เจือไนในการสังเคราะห์คือ อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550 – 750 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 105 – 140 วัตต์ เวลาในการสังเคราะห์ 25 – 40 นาที อัตราส่วนของไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายต่อไฮโดรเจนรวมประมาณ 8 – 12 % โดยปริมาตร ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้บนฐานรองทั้งหมด จากนั้นได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนตัวแปรบางชนิด เช่น ใช้สารแหล่งจ่ายจากเอทานอลเปลี่ยนเป็นอะซีโตน ใช้ตัวแคตะไลต์จากนิเกิลเปลี่ยนเป็นผงเหล็ก และเลือกวัสดุฐานรองที่นำมาทำการศึกษาคือ ซิลิคอนและทองแดง ผลการทดลองเมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยายเท่ากัน (10000 เท่า) ปรากฏว่า กรณีของฐานรองซิลิคอนนั้น พบว่าได้ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใหญ่ที่สุดประมาณ 200 – 300 นาโนเมตร เมื่อใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตนและแคตะไลต์เป็นนิเกิล ในกรณีของฐานรองทองแดง พบว่าได้ขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่ใหญ่ที่สุดประมาณ 100 – 400 นาโนเมตร เมื่อใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตนและแคตะไลต์เป็นผงเหล็ก เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy เพื่อศึกษาถึงคุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยความบริสุทธิ์คำนวณได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง G/D โดยพีค G-Band ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงความสมบูรณ์ของพันธะคาร์บอน และ D-Band เป็นพีคที่แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของพันธะคาร์บอน ปรากฏว่า กรณีของฐานรองซิลิคอน ซึ่งสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ พบว่าจะคำนวณได้ความบริสุทธิ์ที่ดีที่สุด ซึ่งมีดัชนีประมาณ 1.802 เมื่อใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลและแคตะไลต์เป็นนิเกิล ในกรณีของฐานรองทองแดง ซึ่งสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ พบว่าจะคำนวณได้ความบริสุทธิ์ที่ดีที่สุด มีดัชนีประมาณ 3.027 เมื่อใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลและแคตะไลต์เป็นนิเกิล จะพบว่า มีแนวโน้มเหมือนกับกรณีเดียวกันกับซิลิคอน แสดงว่าเอทานอลเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารแหล่งจ่ายในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต้องการคุณภาพสูง

ในส่วนของการสร้างลวดลายนั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการศึกษาการเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้เกิดขึ้นในบริเวณที่ต้องการ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเกิดได้บนฐานรองที่มีแคตะไลต์เคลือบอยู่ จึงได้ทำการศึกษาการสร้างลวดลายลงบนฐานรองที่เป็นฉนวนและตัวนำไฟฟ้า ตัวแคตะไลต์เป็นนิเกิล และสารแหล่งจ่ายเป็นแอลกอฮอล์ ส่วนของขั้นตอนกระบวนการสร้างลวดลายนั้น พบว่า มีความจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์มามีส่วนเกี่ยวข้องด้วยคือ กระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นฉนวนบนฐานรองซิลิคอน กระบวนการสปัตเตอร์ริงสำหรับเคลือบตัวแคตะไลต์นิเกิล และกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับสร้างลวดลาย

เทคนิคการสร้างลวดลายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งได้ 3 วิธีคือเทคนิควิธีการสร้างลวดลายจากใช้หน้ากากป้องกัน วิธีกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และวิธีการชุบทางไฟฟ้า โดยวิธีแรกเป็นการสร้างลวดลายจากการใช้หน้ากากป้องกัน ซึ่งสามารถทำได้ง่ายเพียงนำหน้ากากที่เป็นลวดลายไปวางทับบนฐานรองแล้วจึงนำไปทำการเคลือบนิเกิลด้วยการสปัตเตอร์ริง แต่ลวดลายที่ได้มีความคมชัดต่ำ วิธีที่สองเป็นการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งเริ่มจากการนำฐานรองซิลิคอนไปสปัตเตอร์ริงด้วยนิเกิล จากนั้นจึงนำไปเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จะได้ลวดลายต่างๆตามต้นแบบที่ออกแบบไว้ ซึ่งวิธีนี้พบว่าลวดลายมีความคมชัดสูง แต่ขั้นตอนต่างๆค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลาพอสมควร วิธีที่สามเป็นการสร้างลวดลายนิเกิลด้วยการชุบทางไฟฟ้าซึ่งใช้ฐานรองเป็นทองแดง วิธีนี้ใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีในการเปิดช่องสำหรับเติมโลหะนิเกิลที่ได้จากการชุบด้วยไฟฟ้า โดยใช้สารละลายเป็นนิเกิลซัลเฟต มีแท่งโลหะนิเกิลต่อกับขั้วบวกและแผ่นทองแดงต่อกับขั้วลบ จากนั้นทำการป้อนกระแส 0.2 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าวิธีนี้ลวดลายมีความคมชัดสูงเช่นกัน และเมื่อนำฐานรองที่สร้างลวดลายด้วยเทคนิคต่างๆดังกล่าวมาไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ปรากฏว่าสามารถสังเคราะห์ได้โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้

จากเทคนิคต่างๆของการสร้างลวดลาย ทำให้สามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานได้ คือ การสปัตเตอร์นิเกิลให้เป็นกลุ่มก้อนเพื่อต้องการให้ขาดจากกันทางไฟฟ้า และสร้างเป็นลวดลายโดยมีขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นทองแดง ซึ่งเหมาะสมจะทำเป็นขั้วเพราะเมื่อทำการสังเคราะห์ ปรากฏว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้บนทองแดง แต่จะเกิดเป็นฟิล์มบนลวดลายนิเกิลที่เป็นกลุ่มก้อน โครงสร้างนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซได้ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำมาทดสอบการตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์ผลปรากฏว่าสามารถตรวจจับได้ ซึ่งได้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นประมาณ 1.598 % ต่อมาเมื่อทดลองทำการให้ความร้อนแก่ระบบ พบว่าสามารถตรวจจับได้ดียิ่งขึ้น โดยมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นประมาณ 3.789 %

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng. B, 19, p.181, 1993.
- [2] R.F. Service, Science, 271, p 1232, 1996.
- [3] Fischer E.John, Johnson T. Alan, Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 4 (1999) 28.
- [4] M. Buongiorno Nardelli, J.-L. Fattebert, D. Orlikowski, C.Roland, Q. Zhao, J. Bernholc, Carbon 38 (2000) 1703.
- [5] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388 (1997) 756.
- [6] Z.F. Ren, Z.P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [7] J. Weber, A. Kumar, A. Kumar, and S. Bhansali, "Novel lactate and pH biosensor for skin and sweat analysis based on single walled carbon nanotubes." Sens. Actuators B, vol. 117, pp.308-313, 2006.
- [8] J. Suchiro, H. Imakiire, S. Hidaka, W. Ding, G. Zhou, K. Imasaka and M. Hava, "Shottky - type response of carbon nanotube NO₂ gas sensor fabricated onto aluminum electrodes by dielectrophoresis," Sens. Actuators B, vol. 114, pp. 943-949, 2006.
- [9] C. S. Huany, B. R. Huang, Y. H. Jang, M.S. Tsai, and C. Y. Yeh, "Three-terminal CNTs gas sensor for N₂ detection." Diamond Relat. Mater., vol 14, pp. 1872-1875, 2005.
- [10] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski. Thin Solid Film 398 (2001) 170
- [11] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthematic Metal 148 (2005) 15.
- [12] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [13] Toshiya Okazaki, Hisanori Shinohara, Synthesis and characterization of single- wall carbon nanotube by hot-filament assisted chemical vapor deposition, Chemical Physics Letters 376 (2003) 606-611.
- [14] T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech "Asmospheric pressure HFCVD synthesis of Carbon nanotube by using ethanol source" ICNDST-10, May 11-14, 2005 AIST, Tsukuba, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยทางวิชาการเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น กรุณาแจ้งการเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech “Synthesis of Carbon Nanotube by HFCVD at Atmospheric pressure” ICMAT 3rd, 3-8 July 2005, Singapore.
- [16] เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุกเดช และ รัฐพงษ์ นาคาไชย “การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 เดือนตุลาคม 2548, หน้า 1145 -1148
- [17] รัฐพงษ์ นาคาไชย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุกเดช และ เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารแหล่งจ่าย แคตะไลต์ และฐานรองต่างชนิดกัน, วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2550 (12-17).
- [18] รัฐพงษ์ นาคาไชย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุกเดช และ เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวรองรับต่างชนิดกัน, การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 29 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551 (175-182).
- [19] รัฐพงษ์ นาคาไชย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุกเดช, เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, นิमित ชมนาวัง และ รังสรรค์ เมืองเหลือ “การเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์จากการสร้างลดด้วยวิธี CVDแบบลดความร้อน”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 เดือนพฤศจิกายน 2549, หน้า 729-732
- [20] T. Phetchakul , N. Chomnawang , S. Cheirsirikul , **R. Nakachai**, E. Ratanaudomphisut and P. Songsiriritthigul “Selective Growth of CNT on Ni/Cu Substrate” Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, January 16-19, 2007, Bangkok, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า Thermal conductivities

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus

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

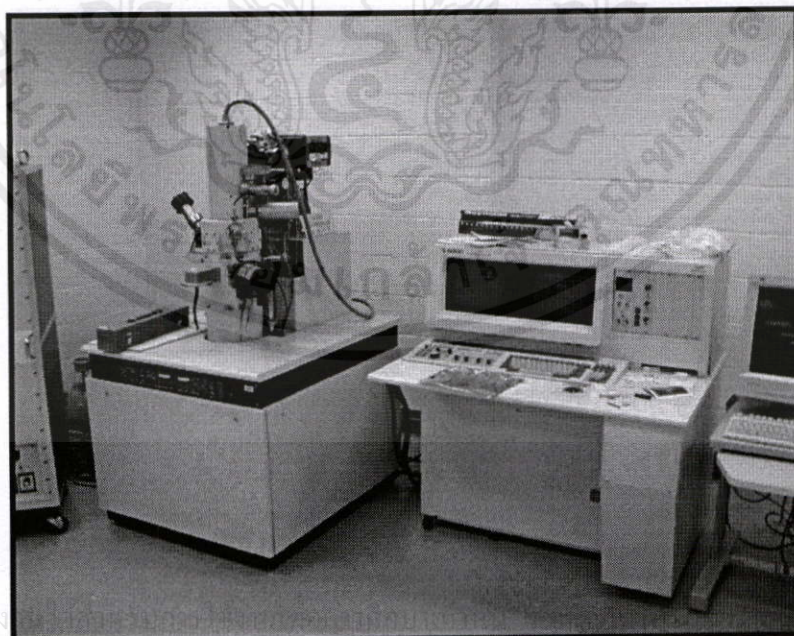
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

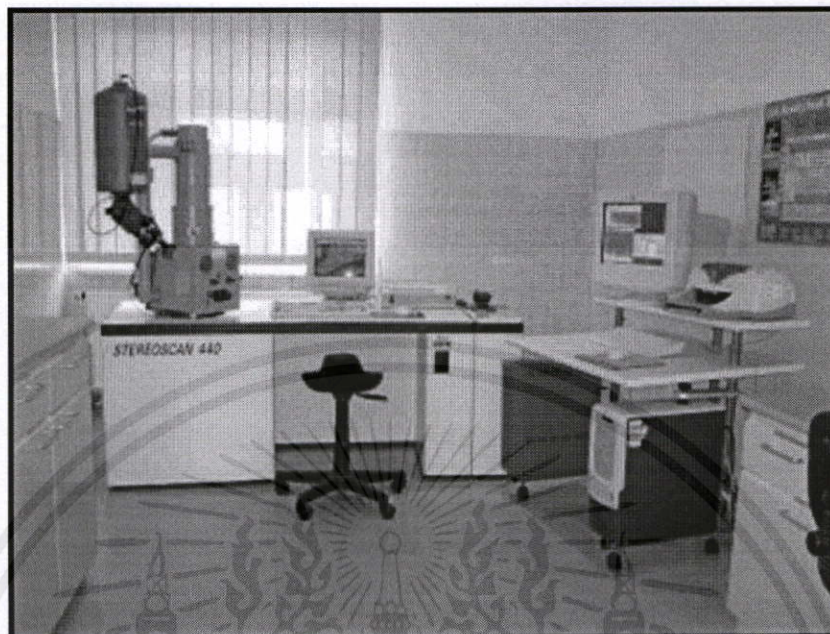


รูปที่ ค-1 Raman spectroscopy



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไซชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค-2 SEM (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ ค-3 EDX (Energy Dispersive X-Ray)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

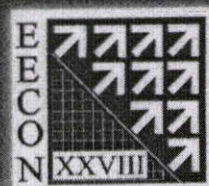
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

28th Electrical Engineering Conference



Volume II

- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

Electrical Engineering



T.DABOS Co., Ltd.



Western Digital



ศูนย์เทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
20 - 21 ตุลาคม 2548
ณ โรงแรม เพิร์ล วิลเลจ จ.ภูเก็ต

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ Synthesis of Carbon Nanotube by HFCVD for Electronic Devices

เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล สมเกียรติ สุขเกษ และ รัฐพงษ์ นาคาไชย
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร.0-2739-0643 โทรสาร.0-2739-2384

E-mail: kptoempo@kmitl.ac.th, s7060457@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเป็นวัสดุของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน แหล่งจ่ายไอร่ะเหยคือเอทานอลผสมกับก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนพอเหมาะ ใ้สลดความร้อนถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 2000°C วัสดุฐานรองสามชนิด ได้แก่ ซิลิกอนที่มีเหล็กเป็นตัวกระตุ้นคาร์บอน และ สารประกอบกราฟไฟต์ อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550-750°C กระทำที่ความดันบรรยากาศ ผลปรากฏว่าท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้ และเป็นแบบผนังหลายชั้น นอกจากนี้ผลของสนามไฟฟ้ายังช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนสามารถเกิดขึ้นในแนวตั้ง

คำสำคัญ: ท่อนาโนคาร์บอน, HFCVD

Abstract

This paper presents the synthesis of carbon nanotubes (CNTs) for electronic devices material. The vapor source is ethanol mixed with hydrogen gas at appropriated ratio. The filament was heated up to around 2000°C. The substrates were silicon with iron catalysis, carbon and composite graphite. Substrate temperature was in the range 550-750°C. CNTs can be grown and they were multi-walled. The electric field affected the CNTs growth in the vertical direction.

Keywords: carbon nanotube, HFCVD

1. บทนำ

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีความโดดเด่นของคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกล[1, 2] ตัวอย่างเช่น สามารถเป็นทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำ ขึ้นอยู่กับการเกิดและการจับตัว มีความนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มีขนาดเล็กมาก นอกจากนี้ยังมีความทนต่อแรงทางกลได้ดี ในทางอิเล็กทรอนิกส์พยายามหาสิ่งทดแทนในการลดขนาดของอุปกรณ์

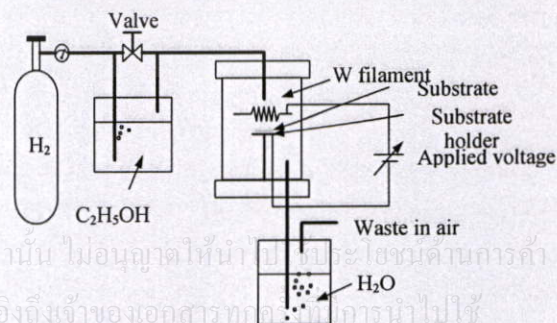
ในวงจรรวม วัสดุท่อนาโนคาร์บอนเป็นหนึ่งในสิ่งที่มีการคาดหมายว่าจะมาช่วยทดแทนข้อจำกัดดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้งานวัสดุนี้ในอุปกรณ์เซ็นเซอร์และอื่นๆ[3-5]

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีรายงานครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1991[6] ซึ่งการสังเคราะห์สามารถทำได้หลายวิธีแต่วิธีการหลักๆแบ่งได้ 3 ประเภท วิธีแรกได้แก่ วิธีอาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) วิธีที่สองได้แก่ laser ablation vaporization และวิธีที่สามได้แก่วิธี CVD (chemical vapor deposition) ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้มีทั้งแบบผนังเดี่ยว(single-walled)และผนังหลายชั้น (multi-walled)[7-10]

ในรายงานนี้ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี HFCVD ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นความดันที่สูง ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นสารเอทานอลผสมกับก๊าซไฮโดรเจน วิธีนี้จะสิ้นเปลืองสารแหล่งจ่ายเริ่มต้นน้อย ง่ายต่อการสร้างและมีอัตราการเกิดพอควร์และสามารถใช้สร้างท่อนาโนคาร์บอนสำหรับงานทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2. การทดลอง

แผนภาพในรูปที่ 1 แสดงระบบ HFCVD ซึ่งประกอบด้วยท่อแก้ว pyrex มีลดทังสเดนเป็นลดความร้อนซึ่งถูกให้กระแสเข้าไปจากภายนอกทำให้เกิดความร้อน 2000°C นำวัสดุฐานรองวางลงบนแท่นจับซึ่งอยู่ใ้สลดความร้อน 3 มิลลิเมตร ก๊าซไฮโดรเจนถูกแบ่งเป็นสองทาง ทางหนึ่งผ่านสารเอทานอล ทำให้เกิดฟองอากาศฟัดเอาไอร่ะเหยของแอลกอฮอล์มาผสมกับอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นไฮโดรเจนรวมกันเป็นสารจ่าย



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงระบบ HFCVD

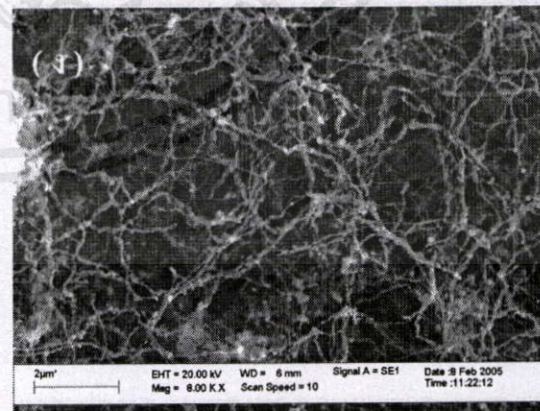
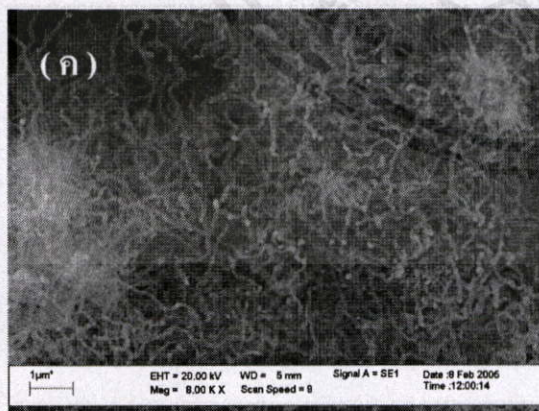
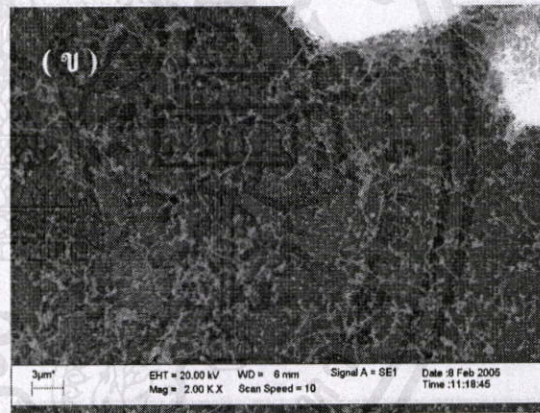
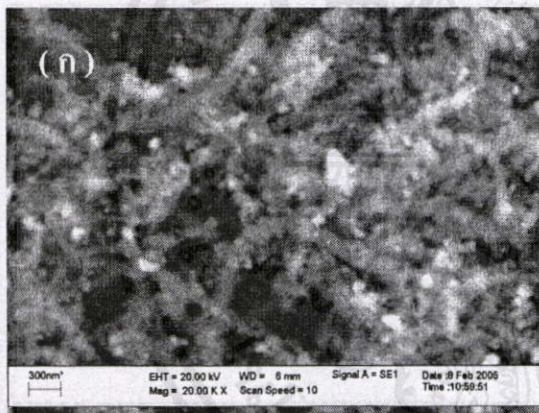
ไอระเหย อัตราส่วนทั้งสองส่วนถูกควบคุมด้วยมิเตอร์การไหลและวาล์ว สนามไฟฟ้าสามารถให้แก่ระบบนี้ที่ระหว่างไส้ลวดความร้อนและฐานรองในขณะที่ทำการสังเคราะห์

ฐานรองซิลิกอนแบ่งเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกนำไปขัดด้วยผงเพชรขนาด 2-3 ไมโครเมตร อีกกลุ่มหนึ่งมีผิวหน้ามันวาว จากนั้นนำทั้งหมดมาเคลือบสารละลายระหว่างเหล็กไนเตรต ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$) กับเอทานอล จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ฐานรองชนิดที่สองได้แก่การนำเอาผงคาร์บอนมาอัดแน่น และฐานรองชนิดที่สามได้แก่การนำสารประกอบกราไฟต์จากไส้ดินสอด่ โดยที่ฐานรองคาร์บอนและสารประกอบกราไฟต์ไม่ได้มีการจุ่มลงในสารละลายเหล็กไนเตรตกับเอทานอลแต่อย่างใด

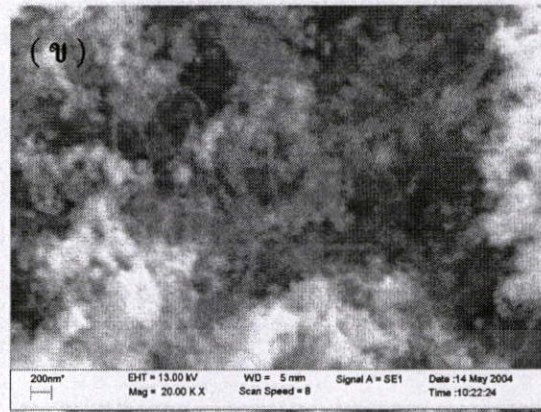
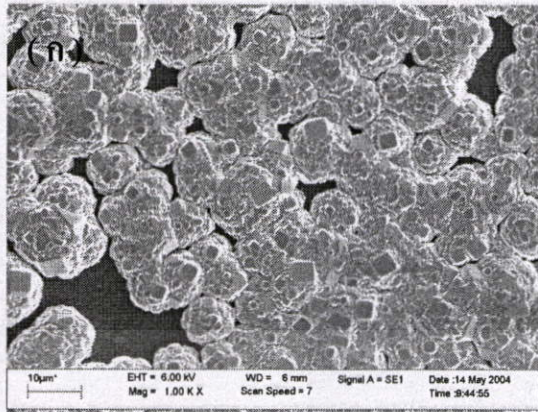
เงื่อนไขการสังเคราะห์กระทำที่อุณหภูมิฐานรองในช่วง 550-750°C อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนผ่านเอทานอลต่อไฮโดรเจนรวมคือ 8-10% ปริมาตร เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 30 นาที กระทำที่ความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ยังอาจใช้สนามไฟฟ้าระหว่างไส้ลวดความร้อนและฐานรองด้วยแหล่งจ่ายแรงดันภายนอก

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

รูปที่ 2 เป็นภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นบนฐานรองต่างๆ รูปที่ 2(ก) เป็นพื้นผิวของฐานรองซิลิกอนผิวมัน เคลือบคະລະໂລດໂດຍວິທີດັ່ງ ໄດ້ຄຳວາມາຂັງດັນແລ້ວ ຈຶ່ງຈະສັງເກດເຫັນທ່ອນາໂນຄາຣ໌ບອນປາກຖືກຢູ່ ເມື່ອດູຟື້ນຜົວຮຸ່ມດັ່ງສະແດງໃນຮູບ 2(ບ) ຈະເຫັນວ່າທ່ອນາໂນຄາຣ໌ບອນເກີດຂຶ້ນຮະຈາຍທົ່ວໄປທັງຜົວຜືນ ຮູບທີ່ 2(ຄ) ເປັນທ່ອນາໂນຄາຣ໌ບອນທີ່ເກີດບຸນຮຸ່ມອະມໍຣ໌ຟ໌ສຄາຣ໌ບອນ ສ່ວນຮູບທີ່ 2(ງ) ເປັນຮູບຖ່າຍຜືນຜົວຂອງຮຸ່ມສາຣປະກອບກຣາຟ໌ຕ໌ ຈະສັງເກດເຫັນທ່ອນາໂນຄາຣ໌ບອນເກີດຂຶ້ນອ່າງຮຸ່ມແນ່ນ ໂດຍຮຸ່ມສາຣປະກອບກຣາຟ໌ຕ໌ຈະມີຄວາມແນ່ນຂອງທ່ອນາໂນຄາຣ໌ບອນມາກທີ່ສຸດ ເມື່ອນຳຮຸ່ມສາຣປະກອບກຣາຟ໌ຕ໌ມາວິເຄາະທ້ວຶດໂດຍວິທີ XRF (X-ray fluorescence spectroscopy) ດັ່ງສະແດງໃນຕາຣາງທີ່ 1 ຈະເຫັນອັກໂສຣປະກອບຕ່າງໆທີ່ມີອອກໄຊດ໌ຂອງໂລຫະເປັນສາຣປະກອບນອກເນື້ອຈາກຄາຣ໌ບອນ ຈຶ່ງອອກໄຊດ໌ຂອງໂລຫະເຫຼົ່ານີ້ ນຳຈະທຳເນົາທີ່ເປັນຄະໂລດ໌ເມື່ອນໃນຣຸ່ມຜົວຂອງຮຸ່ມຮຸ່ມ



รูปที่ 2 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอน (ก) ฐานรองซิลิกอนผิวมันวาวถูกเคลือบด้วยคະລະໂລດໂດຍວິທີດັ່ງ (ข) ภาพมุมมองกว้างของพื้นที่ผิวฐานรองซิลิกอนผิวมันวาวถูกเคลือบด้วยคະລະໂລດໂດຍ (ค) ฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอน (ง) ฐานรองสารประกอบกราไฟต์ซึ่งกระทำที่อุณหภูมิของฐานรอง 550-750°C



รูปที่ 3 ภาพถ่ายจาก SEM ที่อัตราส่วนไอระเหยมากกว่า 10% ปริมาตร (ก) ฐานรองซิลิกอนที่ซัดด้วยผงเพชรและเคลือบคະดะไลต์เหล็ก อุณหภูมิฐานรองมากกว่า 850°C (ข) ฐานรองซิลิกอนที่มีการซัดด้วยผงเพชรและเคลือบคະดะไลต์เหล็ก อุณหภูมิฐานรองประมาณ 850°C หรือต่ำกว่า

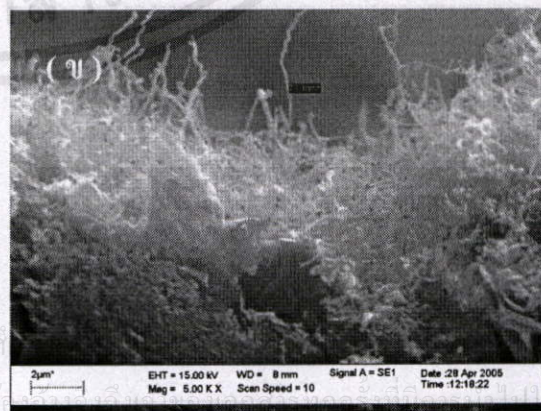
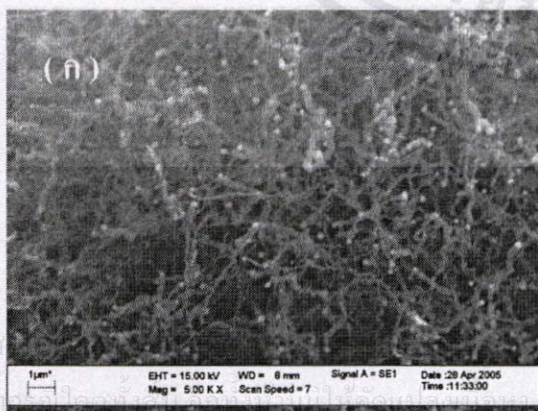
รูปที่ 3 เป็นภาพถ่าย SEM ของฐานรองซิลิกอนที่ซัดด้วยผงเพชรและเคลือบคະดะไลต์เหล็ก รูปที่ 3(ก) เป็นภาพถ่าย SEM ในกรณีที่อัตราส่วนไอระเหยสูงคือมากกว่า 10% ปริมาตร กระทำที่อุณหภูมิฐานรองสูงกว่า 850°C ซึ่งปรากฏว่า จะเกิดเป็นผลึกเพชรขึ้นแทน แสดงว่าอุณหภูมิสูงเกินช่วงการเกิดท่อนาโนคาร์บอน แต่เป็นช่วงที่เกิดเพชร อัตราส่วนของสาร ไอระเหยในที่นี้ใช้ค่าเดียวกัน แสดงว่า ที่อุณหภูมิฐานรองมีส่วนกำหนดการเกิดวัสดุบนฐานรอง รูปที่ 3(ข) เป็นกรณีที่ลดอุณหภูมิของฐานรองต่ำกว่า 850°C โดยกระทำที่เงื่อนไขเดิม ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นอะมอร์ฟัสคาร์บอนเกิดปกคลุมที่พื้นผิวของฐานรอง และยังสังเกตเห็นท่อนาโนคาร์บอนบนพื้นผิวของอะมอร์ฟัสคาร์บอนเช่นกัน

ซึ่งอัตราส่วนของสารแห้งช่ยที่มีค่าสูง ทำให้อะมอร์ฟัสคาร์บอนเกิดได้ง่ายและทำให้อ่อนาโนคาร์บอนเกิดน้อยลง

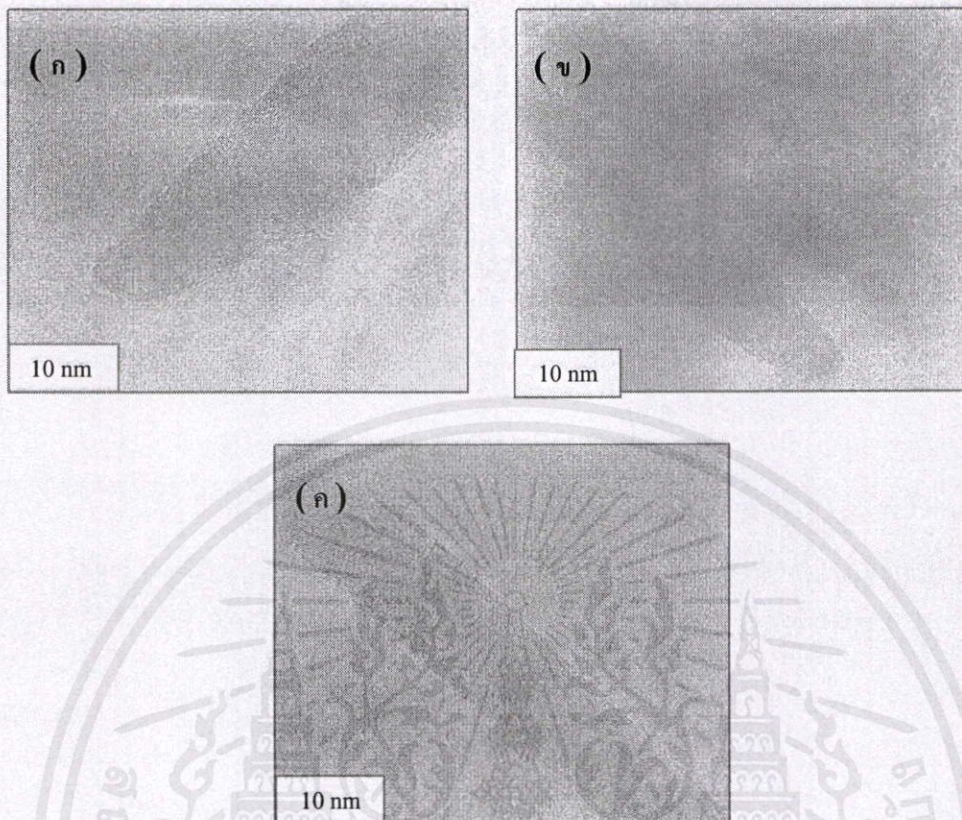
รูปที่ 4 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองสารประกอบกราไฟต์ เมื่อมีสนามไฟฟ้าในขณะที่ทำการสังเคราะห์ โดยให้แรงดัน 600 โวลต์ไปที่ระหว่างไส้หลอดความร้อนกับฐานรองดัง แสดงในรูปที่ 1 รูปที่ 4(ก) แสดงภาพด้านบน ซึ่งจะสังเกตเห็นลักษณะของท่อตั้งตรงในแนวตั้งมากกว่าในกรณีที่ไม่มีให้สนามไฟฟ้าอย่างชัดเจน รูปที่ 4(ข) แสดงภาพตัดขวางของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะเส้นในแนวตั้งเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม แม้จะเพิ่มสนามไฟฟ้ามากขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนก็ไม่สามารถที่จะเป็นเส้นตรงในแนวตั้งได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบจาก XRF

Oxide composition	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO ₃
Graphite substrate	2.43%	22.5%	1.05%	2.65%	1.33%	8.99%



รูปที่ 4 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรอง สารประกอบกราไฟต์ที่ให้แรงดัน 600 โวลต์ระหว่างไส้หลอดความร้อนกับฐานรอง (ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพตัดขวาง



รูปที่ 5 ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอน (ก) ฐานรองซิลิกอนที่มีคะตะไลต์เป็นเหล็ก (ข) ฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอน (ค) สารประกอบกราไฟต์

รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายด้วยเทคนิคTEM (transmission electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่ฐานรองชนิดต่างๆ จากภาพถ่ายสามารถแสดงชนิดของท่อนาโนคาร์บอนได้ว่าเป็นแบบผนังหลายชั้น และมีปลายปิด เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร

4. สรุปผลการทดลอง

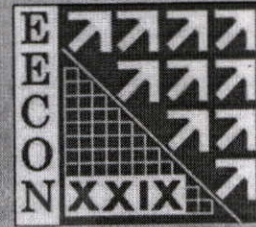
การสังเคราะห์ฟิล์มนาโนคาร์บอนด้วยเอทานอลผสมไฮโดรเจนที่ความดันบรรยากาศสามารถทำได้ เงื่อนไขการเกิดมีอัตราส่วนของก๊าซไอร่าเซตที่เงื่อนไขเดียวกับการเกิดเพชร ส่วนอุณหภูมิฐานรองจะอยู่ในช่วงต่ำกว่าการเกิดเพชร การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้ สามารถสังเคราะห์ลงบนฐานรองลักษณะต่างๆ ได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้นี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตรหรือน้อยกว่า เป็นแบบผนังหลายชั้นที่มีความยาวในระดับไมโครเมตร การให้สนามไฟฟ้าไปที่ระหว่างใส่ขดลวดความร้อนกับฐานรองมีผลต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอนในแนวตั้ง วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างวัสดุท่อนาโนคาร์บอนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับเงินสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (1993) 181.
- [2] R. F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski, Thin Solid Films 398 (2001) 170..
- [4] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthematic Metal 148 (2005) 15.
- [5] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [6] S.Iijima, Nature(1991) 359,56
- [7] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388, (1997) 756.
- [8] Z.F.Ren, Z..P.Huang, J.H.Wang.M.P.Siegal, P.N.Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [9] A.Thess, Science 273 (1996) 483.
- [10] C.J.Lee, D.W.Kim, Y.H. Lee, J.M. Kim, Chem. Phys. Lett.299(1999) 97.



The EECON-29 Conference Joins the Sixtieth Anniversary Celebration of His Majesty's Accession to the Throne

29th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

Volume II

- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

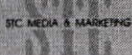


๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๙
ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี



ดำเนินการโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



การเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์จากการสร้างลวดลายด้วยวิธี CVD แบบลวดความร้อน Selective Growth of Carbon Nanotube by HFCVD

รัฐพงษ์ นาคาไชย¹, เติมพงษ์ เพ็ชรภู¹, สมศักดิ์ เขียวศิริกุล¹, สมเกียรติ ตุ๊กเดช¹, เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ¹, นิमित ชมนาวัง¹ และรังสรรค์ เมืองเหลือ¹
¹ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์: 0-2739-0643 โทรสาร: 0-2739-2384

¹ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

E-mail: s7060457@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยการสร้างลวดลายบนฐานรอง เพื่อให้คาร์บอนนาโนทิวป์เกิดขึ้นในบริเวณที่ต้องการ โดยใช้ตัวเคลือบโลหะเป็นนิเกิล สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบลวดความร้อน (Hot Filament CVD) ในการทดลองนี้ ใช้ฐานรอง 2 ชนิด ได้แก่ ทองแดงและซิลิคอนที่ได้ทำการสร้างลวดลายที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและวงกลม ลงบนผิวหน้าทองแดงและซิลิคอนตามลำดับ ผลการทดลองปรากฏว่าคาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดในบริเวณที่เป็นวงกลม และเส้นตรงบนลวดลายเคลือบโลหะที่เตรียมไว้ คุณภาพของลวดลายขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมลวดลายบนฐานรอง ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ถูกตรวจสอบและยืนยันด้วยผลจากการวัดด้วยวิธี EDX (Energy Dispersive X-Ray)

คำสำคัญ: คาร์บอนนาโนทิวป์, CVD แบบลวดความร้อน, การสร้างลวดลาย

Abstract

This paper presents the selective growth of carbon nanotube by hot filament CVD (HFCVD). The nickel is used as catalyst which cover on substrates. Nickel catalyst is patterned on two kind of substrate, silicon and copper, in circular shape and strip line, respectively. The results show that CNT films are synthesized only on the patterned nickel catalyst. The quality of pattern depend on the patterned substrate preparation. The films are investigated and confirmed by EDX (Energy Dispersive X-Ray).

Keywords: Carbon Nanotube, Hot Filament CVD, Patterning

1. บทนำ

คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon Nanotubes) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุซึ่งเป็นโมเลกุลของคาร์บอน ที่มีคุณสมบัติพิเศษมากมาย เช่น เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีกว่าทองแดง มีความแข็งแรงมากกว่าเพชร และมีความยืดหยุ่นสูงมาก [1,2] ทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่จะนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่างๆ มากมาย จึงทำให้นักวิจัยพยายามคิดค้นเทคนิคใหม่ๆ ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ไว้หลายวิธีด้วยกัน แต่ไม่ว่าจะสังเคราะห์ด้วยวิธีใดก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ ก็มีคุณสมบัติที่พิเศษเหมือนกัน และมีลักษณะ 2 แบบหลักๆ คือ แบบเป็นท่อที่มีลักษณะของผนังเดี่ยว (Single-walled) และแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled) [3-6] หากจะกล่าวถึงการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ คาร์บอนนาโนทิวป์อาจจะนำมาทดแทนอุปกรณ์บางชนิดในวงจรรวม CMOS เพื่อให้มีขนาดเล็กลง แต่ประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะนำมาสร้างเป็นช่องทางเดินกระแสของอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้แล้ว ยังเหมาะแก่การนำมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่างๆ [7-9]

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ต้องการลงบนฐานรองต่างชนิดกัน เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในการสร้างอุปกรณ์อื่นๆ ฐานรองที่ใช้แตกต่างกันนั้น เพื่อจุดประสงค์ของงานที่ต่างกัน จากนั้นทำการสังเคราะห์ฟิล์มลงบนฐานรองที่ได้ทำลวดลายไว้แล้ว เพื่อศึกษาดูการเกิดขึ้นของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ตรงบริเวณที่ต้องการ ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ จะทำการตรวจสอบด้วยวิธี EDX

2. วิธีการทดลอง

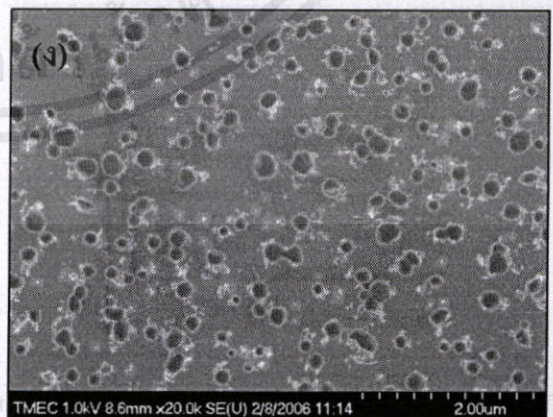
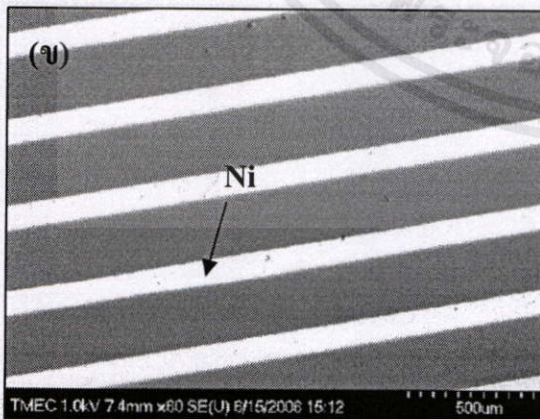
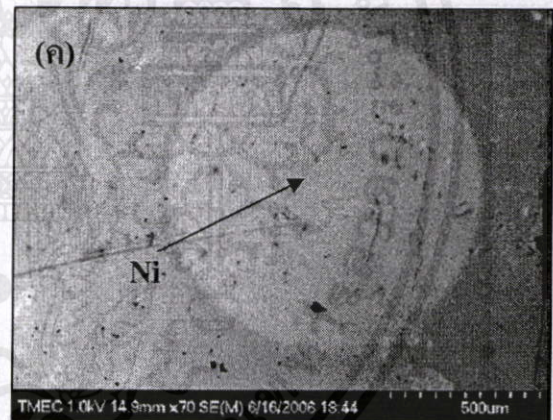
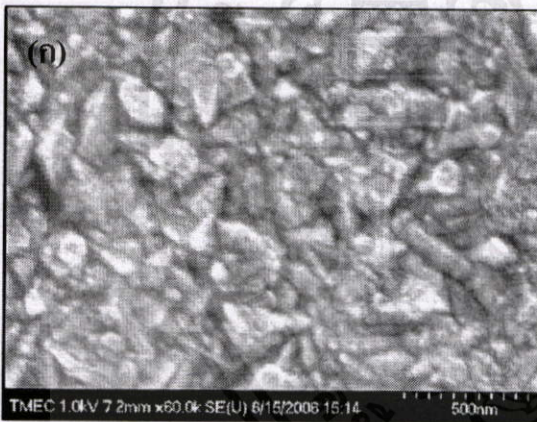
ในการทดลองนี้ ใช้แผ่นฐานรองสองชนิด ได้แก่ ทองแดงที่มีลวดลายเป็นรูปเส้นตรงและซิลิคอนที่มีลวดลายเป็นรูปวงกลม แผ่นฐานรองที่แตกต่างกันทั้งสองชนิดนี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน แผ่นทองแดงที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางสามารถฉีกออกมาได้ เหมาะสำหรับอุปกรณ์ประเภทฟิล์มบางบนพื้นผิวหลากหลายและ

อุปกรณ์พิเศษบางชนิด สำหรับฐานรองซิลิคอน เหมาะสำหรับอุปกรณ์
ทั่วไปทางอิเล็กทรอนิกส์ที่จะใช้ร่วมกับเทคโนโลยีวงจรรวม

แผ่นฐานรองทองแดงจะเคลือบวัสดุแคตะไลต์นิเกิล ด้วย
วิธีการชุบทางไฟฟ้าในสารละลาย สารนิเกิลจะถูกเคลือบลงบนพื้น
ผิวทองแดงทั้งหมด รูปที่ 1(ก) เป็นภาพถ่าย SEM ที่แสดงถึงพื้นผิวของนิ
เกิลที่เคลือบลงบนทองแดง ซึ่งจะมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและยึดติดแน่น
กับทองแดง การทำลวดลายของฟิล์มนิเกิลสามารถทำได้ด้วยการทำ
ลวดลายของทองแดงลงบนแผ่นอีพ็อกซี โดยกระบวนการโฟโตลิโทกรา
ฟีใช้ในกระบวนการทำอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เมื่อสร้าง
ลวดลายลงบนแผ่นอีพ็อกซีตามต้องการ จะนำเอาแผ่นฐานรองนี้ไปชุบ
สารละลาย นิเกิลเหมือนเดิม สารนิเกิลจะยึดติดกับผิวทองแดงและจะไม่
ยึดติดกับฐานรองอีพ็อกซี ทำให้เกิดลวดลายฐานรองนิเกิลเคลือบบน
ลายทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) เป็นภาพถ่าย SEM ลวดลายนิเกิล
เคลือบลงบนทองแดง ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนที่เป็นนิเกิลเคลือบทองแดง
และอีพ็อกซีที่ไม่มีทองแดงและนิเกิลเคลือบอยู่ ลวดลายที่ใช้มีความ
ละเอียดในระดับหลายสิบลไมโครเมตร ซึ่งเป็นมิติในงานไมโคร
อิเล็กทรอนิกส์

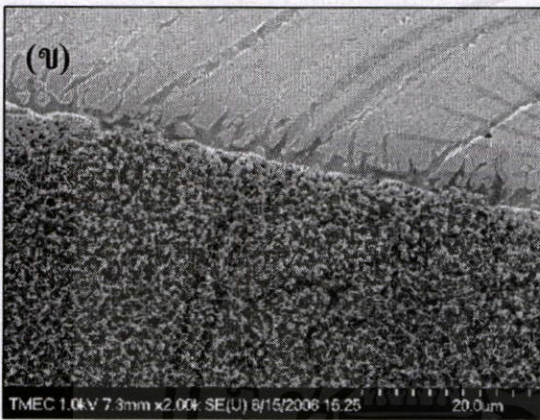
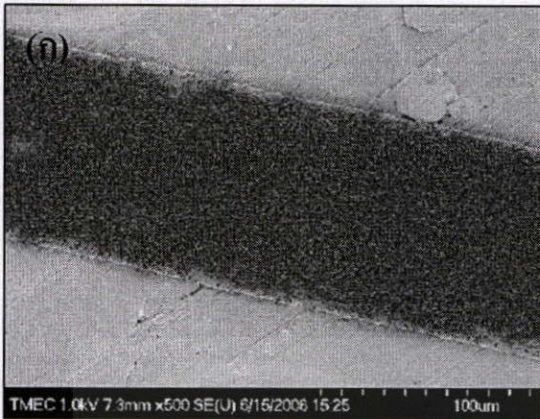
แผ่นฐานรองซิลิคอน จะทำการเคลือบนิเกิลด้วยวิธีการ
สปีดเตอร์ โดยสร้างลวดลายได้จากหน้ากากที่มีลวดลายวงกลม ซึ่งจะ
นำไปวางบนพื้นผิวซิลิคอนขณะทำการสปีดเตอร์ โดยนิเกิลจะเคลือบลง
บนผิวหน้าซิลิคอนเป็นรูปร่างวงกลม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 1(ค) เวลาในการ
สปีดเตอร์ คือ 90 วินาที เมื่อทำการขยายภาพบริเวณพื้นผิวนิเกิล แสดงได้
ดังรูปที่ 1(ง) จะเห็นว่า โลหะนิเกิลจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน ไม่เป็นฟิล์ม
ปกคลุมตลอดพื้นผิวที่เป็นวงกลม สาเหตุเนื่องจากเวลาในการสปีดเตอร์
น้อย ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่ต้องการเปรียบเทียบกับโลหะนิเกิลที่เคลือบเป็น
ลักษณะของฟิล์ม

ฐานรองที่เตรียมไว้ จะถูกนำมาสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบ
ลวดความร้อน ระบบที่ใช้เป็นระบบที่สร้างขึ้นเอง[10] ซึ่งใช้สารเอทาน
อลและก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งจ่าย โดยกระทำที่ความดันบรรยากาศ
ระบบนี้จะเป็นระบบที่ง่าย ประหยัด และไม่มีสารที่เป็นพิษ แต่สามารถที่
จะสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวได้เช่นเดียวกัน เงื่อนไขที่สำคัญใน
การสังเคราะห์คืออุณหภูมิพื้นผิวฐานรองอยู่ในช่วง 550-750 องศา
เซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผ่านสารเอทานอลคือ



รูปที่ 1 ภาพถ่าย SEM แสดงลวดลายบนฐานรองที่ใช้แคตะไลต์เป็นนิเกิลก่อนทำการสังเคราะห์ (ก) พื้นผิวนิเกิลบนฐานรองทองแดง

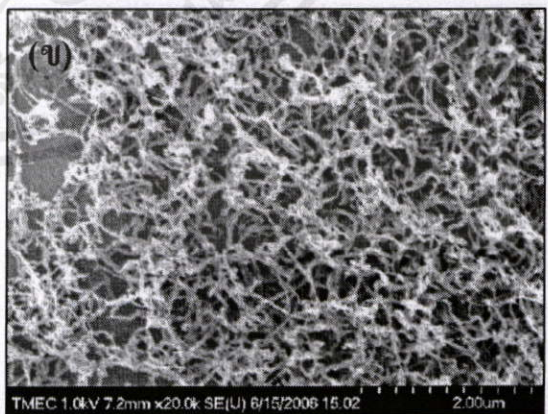
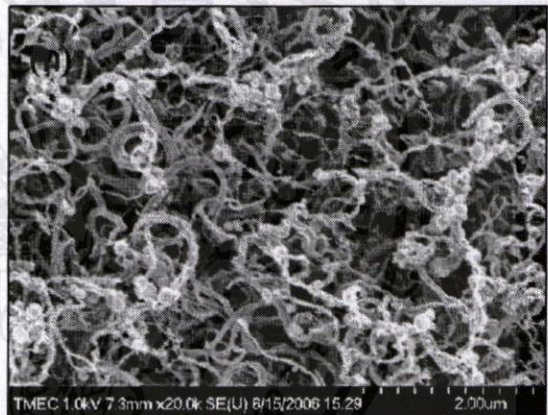
(ข) ลวดลายนิเกิลบนฐานรองทองแดง (ค) ลวดลายนิเกิลบนฐานรองซิลิคอน และ(ง) พื้นผิวนิเกิลบนฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM บริเวณขอบเขตพื้นที่ของซิลิคอนกับนิเกิล

รูปที่ 4 แสดงภาพถ่าย SEM คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดบน ลวดลายของฐานรองทั้งสอง รูปที่ 4(ก) เป็นกรณีของฐานรองทองแดงที่ เคลือบนิเกิล สังเกตจะพบว่า จะเกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างหนา

รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ตรงขอบเขตของลวดลายรอยต่อระหว่างฟิล์ม CNTและบริเวณอีพ็อกซี (ก) กำลังขยายต่ำ (ข) กำลังขยายสูง

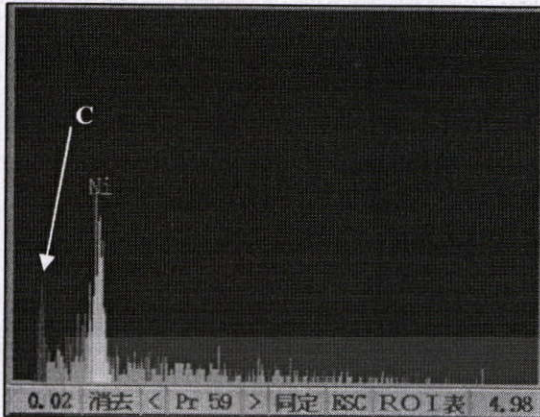


รูปที่ 4 ภาพจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ (ก) บนลวดลายของฐานรองทองแดงที่เคลือบนิเกิล (ข) บนลวดลายของฐานรองซิลิคอนที่เคลือบนิเกิล

ไฮโดรเจนรวม ซึ่งอยู่ในช่วง 8-10% โดยปริมาตร เวลาในการสังเคราะห์ ประมาณ 45 นาที

รูปที่ 2(ก) เป็นภาพถ่าย SEM ของบริเวณพื้นผิวฐานรองนิเกิล ที่เคลือบลงบนทองแดง ซึ่งแสดงให้เห็นในส่วนของลวดลายบริเวณที่มีนิเกิลเคลือบทองแดงกับบริเวณอีพ็อกซีที่ไม่มีนิเกิลเคลือบทองแดงอยู่ ซึ่ง สังเกตเห็นว่า จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในบริเวณที่มีนิเกิลเคลือบลงบน ทองแดงเท่านั้น รูปที่ 2(ข) เป็นภาพขยายบริเวณขอบเขตของลวดลาย รอยต่อระหว่างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และบริเวณอีพ็อกซี จากภาพจะ เห็นลวดลายมีความคมชัดสูง

รูปที่ 3 เป็นภาพถ่าย SEM แสดงส่วนขยายของบริเวณ ขอบเขตลวดลายของนิเกิลที่เป็นส่วนของวงกลมและพื้นผิวซิลิคอน ซึ่ง จะสังเกตเห็นความคมชัดของลวดลาย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับฐานรองนิ เกิลที่เคลือบลงบนทองแดงแล้ว พบว่า จะมีความคมชัดน้อยกว่า ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับวิธีการทำลวดลายที่แตกต่างกัน ในกรณีของฐานรองซิลิคอน ใช้ วิธีการนำหน้ากากไปบังในขณะที่เคลือบนิเกิลด้วยวิธีการสปัตเตอร์ ซึ่งวิธีนี้ จะทำให้บริเวณขอบเขตของลวดลายไม่คมชัดเท่ากับวิธีการโฟโต ลิโทกราฟีที่มีความประณีตกว่า และเมื่อนำไปสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนา โนทิวบ์ จะได้ผลความคมชัดของลวดลายตามความประณีต



รูปที่ 5 ภาพจาก EDX บนพื้นผิวที่ทำลวดลายของฐานรองซิลิคอน

แน่น ก่อตัวขึ้นมาอย่างไม่เป็นระเบียบ ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ มีขนาดใหญ่และเล็กปะปนกันระหว่าง 10–300 นาโนเมตร เป็นแบบผนังหลายชั้น รูปที่ 4(ข) เป็นกรณีของฐานรองซิลิคอนที่เคลือบนิเกิล ซึ่งจะสังเกตุฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดขึ้น แต่ไม่หนาแน่นเท่ากับฐานรองทองแดง ท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์มีขนาดที่เล็กกว่า แสดงว่าฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีลักษณะต่างกันั้น สาเหตุน่าจะมาจากพื้นผิวของตัวแคตะไลต์ที่เป็นนิเกิลเคลือบบนฐานรองทองแดงนั้น มีลักษณะเป็นฟิล์ม ทำให้อัตราการเรียงตัวของคาร์บอนก่อเกิดได้หนาแน่นกว่ากรณีของฐานรองซิลิคอนที่มีตัวแคตะไลต์นิเกิลกระจายเป็นกลุ่มก้อน และขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต่างกันของฐานรองทั้งสองนั้น เป็นผลมาจากระยะเวลาในการให้ความร้อน ตั้งแต่เริ่มเกิดการเรียงตัวของคาร์บอนบนฐานรองทองแดง ใช้เวลามากกว่ากรณีของฐานรองซิลิคอน เพราะว่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดบนฐานรองทองแดงเกิดได้เร็วกว่า ซึ่งใช้เวลาประมาณ 25 นาทีจากเวลาทั้งหมดประมาณ 45 นาที ในขณะที่บนฐานรองซิลิคอนยังไม่มีการเกิด แสดงว่าอุณหภูมิฐานรองขณะเริ่มเกิดการเรียงตัวของคาร์บอนของฐานรองทองแดง ต่ำกว่าอุณหภูมิของฐานรองซิลิคอน

ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ ถูกนำมาตรวจสอบคุณสมบัติด้วยวิธี EDX(Energy Dispersive X-Ray) เพื่อยืนยันว่าเป็นสารคาร์บอน ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้เป็นสารคาร์บอนทั้งหมด ดังรูปที่ 5 เป็นตัวอย่างคุณสมบัติ EDX ของฟิล์มที่สังเคราะห์ลงบนฐานรองซิลิคอนเคลือบนิเกิลที่วัดในช่วงแถบพลังงาน 0–1 KeV จะสังเกตเห็นเส้นกราฟที่เป็นยอดของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้น ซึ่งจะไม่พบก่อนทำการสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นเส้นกราฟของนิเกิลปรากฏเช่นเดียวกัน ซึ่งยอดกราฟของคาร์บอน อาจจะไม่สูงเมื่อเทียบกับนิเกิล ทั้งนี้เป็นเพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ มีอัตราการเกิดที่ไม่หนาแน่น

4. สรุปผลการทดลอง

การเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถทำได้โดยการสร้างลวดลายลงบนฐานรอง ซึ่งฐานรองที่เป็นทองแดง จะใช้วิธีการชุบทางไฟฟ้าเคมีด้วยตัวแคตะไลต์ที่เป็นนิเกิล เกิดเป็นลวดลายรูปเส้นตรงที่คมชัดและละเอียดสูง ส่วนฐานรองที่เป็นซิลิคอน จะสร้างลวดลายโดยการนำหน้ากากมาวางบนฐานรอง แล้วทำการ สเป็คเตอร์ตัวแคตะไลต์นิเกิลลงไป จะเกิดเป็นลวดลายรูปวงกลมที่ไม่คมชัดเท่าที่ควร ลวดลายของฐานรองทั้งสองที่ออกแบบต่างกันั้น ไม่มีผลใดๆต่ออัตราการเกิดคาร์บอน และเมื่อนำมาสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD พบว่าความหนาแน่นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดงที่ถูกเคลือบด้วยนิเกิลมีความหนาแน่นสูงกว่าบนฐานรองซิลิคอนที่ถูกเคลือบด้วยนิเกิล ซึ่งแสดงว่า การเตรียมพื้นผิวฐานรองที่แตกต่างกัน จะทำให้มีผลต่อความหนาแน่นและความคมชัดของลวดลายต่างกัน นอกจากนี้แล้วขนาดของท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีความแตกต่างกันอีกด้วย โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เกิดบนฐานรองนิเกิลเคลือบทองแดงจะมีขนาดใหญ่กว่าบนฐานรองนิเกิลเคลือบซิลิคอน วิธีการสังเคราะห์ให้เกิดตามบริเวณที่ต้องการนั้น สามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ต่างๆได้ เช่น อุปกรณ์เซ็นเซอร์ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนด้านการเงิน

6. เอกสารอ้างอิง

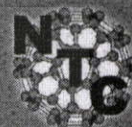
- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (19993) 181.
- [2] R. F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388, (1997) 756.
- [4] Z.F.Ren, Z.P.Huang, J.H.Wang,M.P.Siegal, P.N.Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [5] A.Thess, Science 273 (1996) 483.
- [6] C.J.Lee, D.W.Kim, Y.H. Lee, J.M. Kim, Chem. Phys. Lett.299(1999) 97.
- [7] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski, Thin Solid Films 398 (2001) 170.
- [8] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthematic Metal 148 (2005) 15.
- [9] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [10] เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียรศิริกุล, สมเกียรติ สุกเกษ และ รัฐพงษ์ นาคาไชย “การสังเคราะห์ท่อานาโนคาร์บอนด้วยวิธี CVD แบบลวดความร้อะสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 เดือนตุลาคม 2548, หน้า 1145 -1148.

JANUARY 16-19, 2007

BANGKOK, THAILAND



IEEE



IEEE-NEMS TECHNICAL DIGEST

Organized/Sponsored by

IEEE Nanotechnology Council

National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Thailand
National Metal and Materials Technology Center (MTEC), NSTDA, Thailand
Shun Hing Institute of Advanced Engineering, CUHK, Hong Kong
Center for Micro and Nano Systems, CHKK, Hong Kong
Institute for Cell Mimetic Space Exploration, UCLA, USA
Global Emerging Technology Institute (GETI), Japan/USA
Chinese Society of Micro-Nano Technology, China

Selective Growth of CNT on Ni/Cu Substrate

Toempong Phetchakul^{1,*}, Nimit Chomnawang^{2,3}, Somsak Cheirsirikul¹, Ratthapong Nakachai¹,
Eakkarach Ratanaudomphit⁴ and Prayoon Songsiriritthigul^{3,5}

¹Electronic Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520.

²School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand 30000.

³National Synchrotron Research Center, Nakhonratchasima, Thailand 30000.

⁴Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand 24000.

⁵School of Physics, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand 30000.

Abstract—This paper presents a method for selective growth of CNT films. Specific areas for CNT growing were defined by patterning Ni electrodes on a Cu substrate using lithography process. CNT films were grown on the substrate by HFCVD method at atmospheric pressure using ethanol and hydrogen as sources. The films were examined and confirmed with SEM, Raman and EDX analysis. We observed that CNT only grow in selective areas of Ni. None can be grown on Cu background. This finding suggests a novel method of selective growth of CNT using Cu as a masking layer. Preliminary results also show possibility of growing CNT across the gaps between 3D interdigital Ni electrodes fabricated by LIGA technique.

Keywords—Cu masking; CNT selective growth; 3D electrodes

I. INTRODUCTION

Very interesting properties of carbon nanotubes (CNT), both electrical and mechanical, have been applied in many fields [1-4]. Several efforts have tried to bring it to practical applications. However, it is still difficult to be realized in most of industrial products. Recently, Samsung Advanced Institute of Technology have demonstrated 15-inch LCD screen made of CNT arrays. With excellent properties such as electrical conduction better than metal, mechanical strength greater than steel and very small diameter, CNT have been used to emit electrons for LCD screen illumination.

Selective growth of CNT is one of the most important processes necessary for electronic applications [5-7]. Various methods have been proposed to pre-pattern catalyst on both conductive and non-conductive substrates before CNT synthesis [8-10]. Some of these use lithography and lift-off

processes to define selective areas of CNT films. In the field of electron emission, use of conductive substrates is required. On the other hand, CNT films for sensor devices are usually synthesized on non-conductive substrates which do not affect chemical reaction between the CNT film and chemical quantity. Some device applications require a good connection between CNT electrodes [11]. Depends on each application, the sizes of CNT films for devices are in both nano and micro scale. Besides selectively growing CNT on 2D electrodes, controllable CNT deposition processes on 3D patterns have also been reported [12-13]. It is expected that successful deposition of CNT films in specific targeted areas will enable fabrication of practical CNT-based micro and nano devices. In addition, growing CNT on or across the gaps between surfaces of 3D microstructures will extend possibility of realizing better devices in the future. In this paper, a new method of growing CNT in selective Ni areas using Cu as a masking layer is demonstrated.

II. SUBSTRATE PREPARATION

Selective areas on which the CNT will grow are defined in a form of Ni interdigital electrodes fabricated on Cu substrate. Fabrication of a Ni/Cu substrate started with cutting and cleaning of a 500 micron-thick Cu foil into square pieces. AZ1512 positive-tone photoresist was deposited on a side of Cu foil by spin-coating at 2,000 rpm for 30 seconds. The sample was dried by soft baking on a hot plate at 95 °C for 1 minute. A negative pattern of interdigital electrodes with 80 μm line-width and 160 μm spacing was transferred onto the photoresist film by standard UV lithography. After pattern development, the resulting electrode image (holes) was cleaned by O₂ plasma at RF power of 50 W for 1 minute. Ni was then electroplated into the photoresist mold to form Ni electrodes. Finally, the photoresist mold was removed by washing the sample in acetone and the Ni interdigital electrode

This project was funded by Thailand Research Fund.

*Contacting Author: Toempong Phetchakul is with the Electronic Department, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. (E-mail:kptoempo@kmitl.ac.th).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เป็นเชิงพาณิชย์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

patterns on a Cu background was obtained as shown in Fig. 1. Although the line-width and spacing of these preliminary Ni electrodes are quite large compared to the size of CNT, they can be scaled down to submicron range later when we study CNT synthesis across the gaps between electrodes in future work. Fig. 2 shows the closed-up surface of Ni electrodes on which CNT will be deposited.

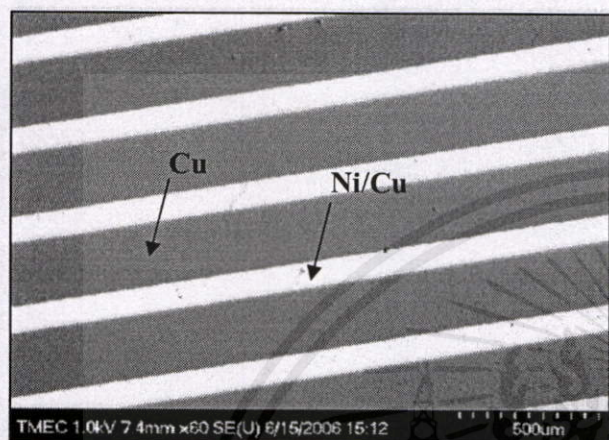


Figure 1. SEM image of Ni electrode patterns on Cu background.

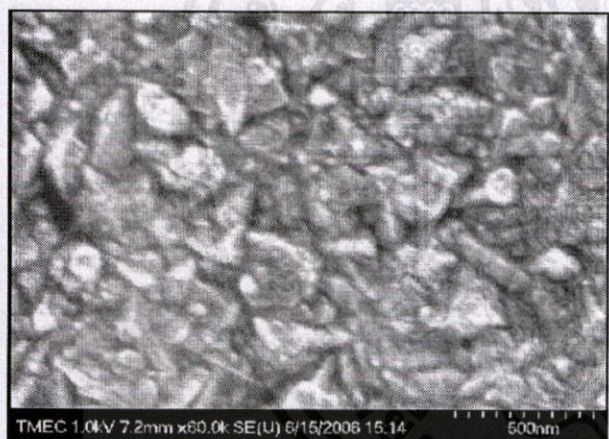


Figure 2. SEM image showing surface of Ni electrodes.

III. CNT SYNTHESIS

CNT films were grown on the Ni/Cu substrates by HFCVD at atmospheric pressure [14] using apparatus setup as shown in Fig. 3. This self-contraction system uses ethanol vapor and H_2 gas as starting sources. H_2 gas supply was splitted in two paths, 90% of which directly flows to the Pyrex™ glass chamber while another 10% passes through bubbling container to carry ethanol vapor before joining the first path. Gas flow rate in

each path was separately controlled by a flow meter. The substrate was heated to temperature 700-850 °C by a tungsten filament hanging 3 mm above the substrate. The same system can also be used in diamond thin film deposition [14].

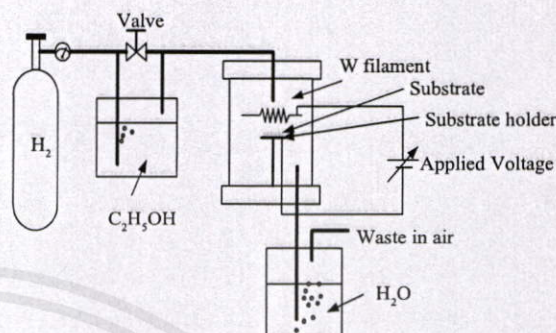


Figure 3. Schematic diagram of HFCVD apparatus.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

The CNT films were grown on Ni/Cu substrate by HFCVD apparatus as described. We observed that CNT films were grown in the areas with Ni catalyst only. No CNT film was obtained at all in an area of Cu background. Fig. 4a shows an SEM image of a CNT film which is selectively grown on a surface of Ni electrodes. CNT films at some edge areas of Ni electrodes were unintentionally removed mechanically during sample handling. This image clearly shows that Cu layer can be used as a masking material for selective CNT deposition the same way as Pt masking layer reported by [15].

Fig. 4b shows the boundary between Ni electrode and Cu background. It can be seen that area-selective quality of CNT growth depends on patterning quality of Ni electrodes. Therefore, high area-selective quality of this growing technique can be improved by scaling the pattern size down to the limit of photolithography process. A closed-up view of resulting CNT film after synthesis for 45 minutes is shown in Fig. 4c. In this photo, the sizes of CNT are mixed between small and large diameters. When CNT film was grown using higher ethanol flow rate and lower substrate temperature, CNT films of smaller diameters were obtained as shown in Fig. 5. Comparing CNT films in Fig. 4c and Fig. 5, differences in diameter, uniformity and density are clearly observed.

In order to confirm the resulting CNT film, it was analyzed through Raman spectrum measurement. Fig. 6 shows a spectrum of CNT shown in Fig 5. According to the Raman spectrum, only two peaks were observed at wave numbers of $1,600\text{ cm}^{-1}$ (G-band) and $1,360\text{ cm}^{-1}$ (D-band). The peaks indicate presence of graphitic CNTs and defective structures,

respectively. Higher intensity of G-band compared to that of D-band implies high quality and low defective properties of obtained CNT film. This confirms the quality of HFCVD used in this work.

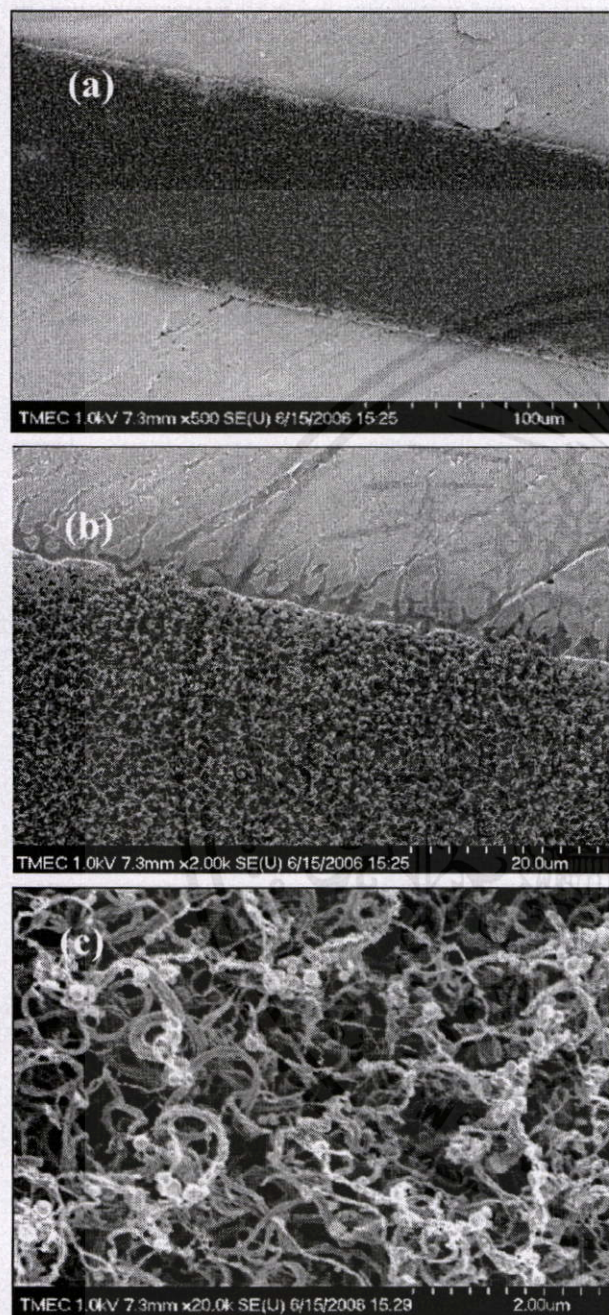


Figure 4. SEM images showing (a) CNT on Ni pattern at low resolution, (b) at electrode boundary, and (c) a closed-up view of CNT film.

In addition to Raman spectrum, EDX analysis was also performed on the substrate before and after CNT synthesis.

The results of EDX analysis shown in Fig 7(a) confirm presence of both Ni and Cu on the substrate before CNT synthesis. The peaks of Ni and Cu in this photo are almost superimposed. After CNT deposition, a high peak of carbon was observed along with the existing Ni and Cu peaks as shown in Figure 7(b). This also confirms the presence of CNT films.

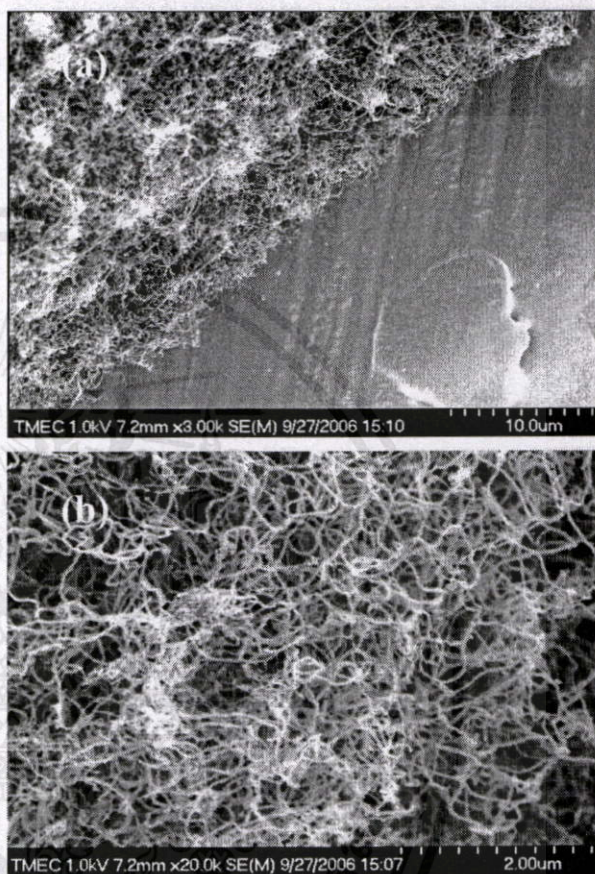


Figure 5. SEM image of CNT film grown at higher ethanol flow rate and lower substrate temperature, (a) at electrode boundary, (b) at the middle of electrode.

Since CNT synthesis cannot be grown on a copper surface, one can use this finding to selectively grow CNT films in predefined non-conductive areas by scarcely sputter-deposits Ni catalyst atoms on such substrate followed by deposition and patterning of Cu layer. The area not covered by Cu can be then used for selective growth of CNT films. Since masking conductive substrate with Cu layer has been demonstrated in this paper, Cu masking on non-conductive substrates will be done in future work along with growing CNT across the gaps between 3D high-aspect-ratio Ni microstructures fabricated by LIGA processes as shown in Fig. 8. Considering CNT synthesis on such 3D microstructures, Cu masking layer can also be used to protect the bonding pads of Ni electrodes from being covered by CNT during synthesis step. This will ease wire bonding process when devices are packaged.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

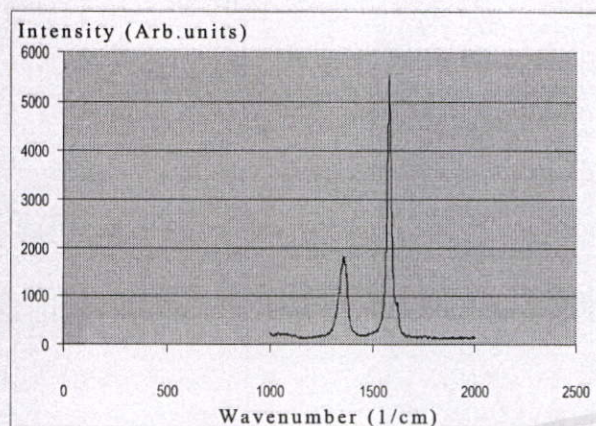


Figure 6. Raman spectrum of CNT film.

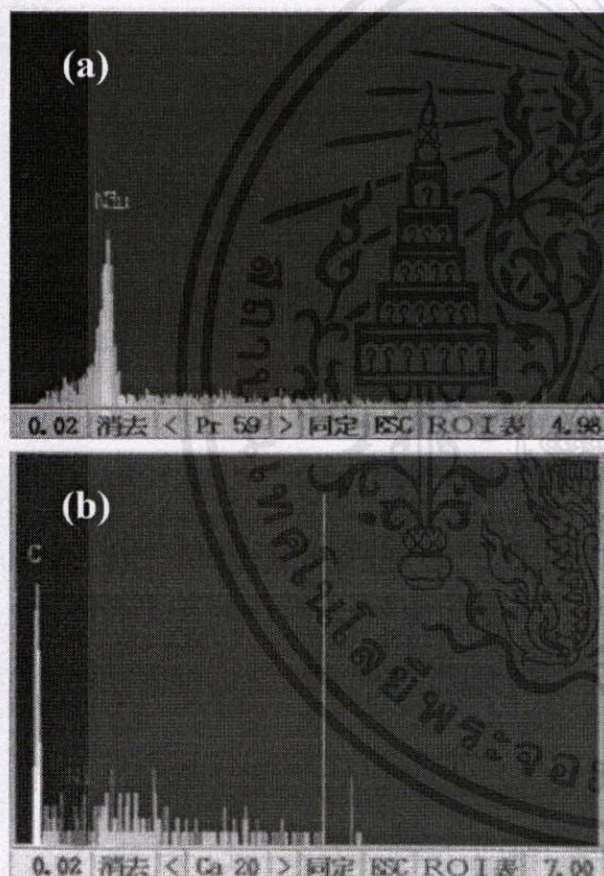


Figure 7. EDX spectrum of the substrate, (a) before and (b) after CNT synthesis.

V. CONCLUSION

A method for selective growth of CNT on Ni/Cu conductive substrates has been demonstrated. Experiment results lead to a finding that CNT cannot be grown on copper surface.

Hence, Cu can be used as a masking material similar to the case of Pt reported by other researchers. Based on experiments done in this paper, CNT selective growing will be tested on both 2D and 3D microstructures in the near future.

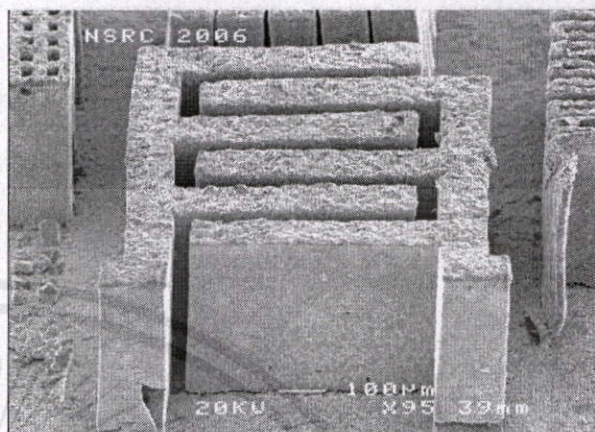


Figure 8. photo of high-aspect-ratio 3D Ni electrodes made of electroplated Ni which was fabricated using the Thai LIGA processes developed at the National Synchrotron Research Center, Thailand. These microstructures were prepared for study of CNT synthesis across the gaps between Ni electrodes which will be done in future work.

ACKNOWLEDGMENT

Special thanks go to the National Synchrotron Research Center (NSRC), Thailand, for its X-ray lithography and microfabrication facilities, as well as partial financial and staff supports. The 3D electrodes shown in Fig. 8 were realized using the Thai LIGA processes developed by NSRC staffs. We appreciate SUT graduate students for their helps on fabrication of Ni/Cu substrates.

REFERENCES

- [1] N. Hamada, *Mater. Sci. Eng. B*, 19, p.181, 1993.
- [2] R.F. Service, *Science*, 271, p 1232, 1996.
- [3] Fischer E.John, Johnson T. Alan, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 4 (1999) 28.
- [4] M. Buongiorno Nardelli, J.-L. Fattebert, D. Orlikowski, C.Roland, Q. Zhao, J. Bernholc, *Carbon* 38 (2000) 1703.
- [5] J. Weber, A. Kumar, A. Kumar, and S. Bhansali, "Novel lactate and pH biosensor for skin and sweat analysis based on single walled carbon nanotubes." *Sens. Actuators B*, vol. 117, pp.308-313, 2006.
- [6] J. Suchiro, H. Imakiire, S. Hidaka, W. Ding, G. Zhou, K. Imasaka and M. Hava, "Shottky - type response of carbon nanotube NO₂ gas sensor fabricated onto aluminum electrodes by dielectrophoresis," *Sens. Actuators B*, vol. 114, pp. 943-949, 2006.
- [7] C. S. Huany, B. R. Huang, Y. H. Jang, M.S. Tsai, and C. Y. Yeh, "Three-terminal CNTs gas sensor for N₂ detection." *Diamond Relat. Mater.*, vol 14, pp. 1872-1875, 2005.
- [8] Y. Abdi, J. Koohsorkhi, J. Derakhshandeh, S. Mohajerzadeh, H. Hoseinzadegan, M.D. Robertson, J.C. Bennett, X. Wu, and H. Radamson, "PECVD-grown carbon nanotubes on silicon substrates with a nickel-seeded tip-growth structure," *Mater. Sci. Eng.*, vol. 26, pp. 1219-1223, 2006.
- [9] L. Heh-nan, C. Yu-Hsien, Y.Jung-Hsien, H. Ju-Hung, L. Ing-Chi, H. Min-Hsiung, "Selective growth of vertically aligned carbon nanotubes on

ไม่ว่าใครมีใจๆทั้งคืน อีกทั้งทำผมให้ลดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- nickel oxide nanostructures created by atomic force microscope nano-oxidation," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 399 pp. 422-425, 2005.
- [10] G. Y. Liu, D. Y. Zhong, S. H. Xia, S. F. Cheng, Y. G. Ding, Y. J. Lu, Y. J. Shao, H. Y. Li, L. J. Hangfu and E. G. Wang, "CNTs grown on the surface of various material by large volume MP- CVD for VME application" *Appl. Surf. Sci.*, vol. 215 pp. 209-213, 2003.
- [11] Chen-Chun Lin, Po-Lin Chen, Chi-Ting Lin and Cheng-Tzu Kuo, "Selective growth of horizontally-oriented carbon nanotube bridges on patterned silicon wafers by electroless plating Ni catalysts" *Diamond Relat Mater.*, vol. 14, pp. 1867-1871, 2005.
- [12] X. Wang, Y. Liu, P. Hu, G. Yu, K. Xiao, D. Zhu, *Adv. Mater.* 14 (2002) 1557.
- [13] S. Huang, "Controllable 3D architectures of aligned carbon nanotube arrays by multi-step processes" *Chem. Phys. Lett.*, vol. 374 pp. 157-163, 2003.
- [14] S. Phetchakul, S. Cheisirikul, and S. Supadech, "The 10th International Conference on New Diamond Science and Technology (ICNDST-10), Japan, 2005.
- [15] L. Valentini, I. Armentano, J.M. Kenny, L. Lozzi, and S. Suntucci, "Controllable fabrication of aligned carbon nanotubes by pulsed plasma selective positioning and electrical transport phenomena," *Materials Letters*, 58, pp. 470-473, 2004



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 24 ฉบับที่ 3

กันยายน 2550

1. วงจรสะท้อนกระแสปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้หลักการทรานสลิเนียร์
ยงยุทธ หงษ์พงษ์ พิพัฒน์ พรหมมี มนต์รี สมดุลยกันก สมยศ จุณณะปิยะ 1
2. การตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิฟิเคชันด้วยระยะห่างของ
อิเล็กโทรดมีขนาดกว้าง
สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อิศระ ศรีธนชัย สัณญา คุณขาว 6
3. การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารแหล่งจ่าย แคตะไลต์ และ
ฐานรองต่างชนิดกัน
รัฐพงษ์ นาคาไชย เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล สมศักดิ์ เขียวศิริกุล สมเกียรติ ศุภเดช 12
เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์
4. การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์ Electronic Data Capture ด้วย SSL Protocol สำหรับระบบชำระเงิน
ยุทธนา สรวลสวรรค์ ศักดิ์ชัย ทิพย์จักขุรัตน์ สมศักดิ์ มิตะดา 18
5. เครื่องกำเนิดไอโซนที่สนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูงโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกำลังต่ำ
แรงดันสูง ความถี่สูง
สุตาพร ขาดำพุทธิสวรรค์ วิจิตร กิณเรศ 24
6. การแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสามเฟสโดยอาศัยหลักการทวีแรงดันแบบขนานซึ่งมีการควบคุม
แบบเวคเตอร์
องอาจ เกษภษา วิจิตร กิณเรศ 30
7. การหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดของงานเจียรในผิวด้านนอกชิ้นงานที่มีลักษณะทรงกระบอก
อนุสรณ์ วัชรวิไล มิ่ง ไลกิจแสงทอง 36
8. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเดียว
มนต์ศักดิ์ พิมสาร ธีรพัฒน์ ชมภูคำ 42
9. การออกแบบพัฒนากล่องเครื่องมือของโปรแกรมแมทแลปสำหรับการประมวลผลข้อมูลทางแสงของ
ดวงโคมไฟถนน
ยุทธนา อัจฉริยะโพธา มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ศุภี บรรจงจิตร 48
10. การถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกใสติดฟิล์มที่ส่งผลต่อการอนุรักษ์พลังงาน
อำพล พิชัยเชิด บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ 54
11. จลนพลศาสตร์เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม
ชินนทร์ จินตนาวงศ์ ณัฐพงษ์ เสาะแสวงหา รัฐพงษ์ ไรดาการ ประกอบ กิจไชยา 60

การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารแหล่งจ่าย แคตะไลต์ และฐานรองต่างชนิดกัน

Study on Quality of CNTs by Different Preparations of Vapor Source, Catalyst and Substrate

รัฐพงษ์ นาคาไชย¹ เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล¹ สมศักดิ์ เชียรศิริกุล¹ สมเกียรติ สุขเกษ¹ เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ²
¹ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
²ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอถึงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ลงบนแผ่นซิลิคอนและทองแดง เพื่อจะศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน โดยมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นที่สนใจ ได้แก่ สารแหล่งจ่าย (เอทานอล, อะซิโตน) แคตะไลต์ (นิเกิล, ผงเหล็ก) และฐานรอง (ทองแดง, ซิลิคอน) คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย Raman Spectroscopy เพื่อศึกษาถึงคุณภาพที่ได้ และ SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อดูขนาดของท่อนาโนคาร์บอน ผลการทดลองปรากฏว่า ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน (อุณหภูมิฐานรอง เวลาในการสังเคราะห์ และอัตราส่วนของไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่าย) สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ในกรณีของฐานรองซิลิคอนนั้น เมื่อใช้แคตะไลต์นิเกิลและสารแหล่งจ่ายเป็นอะซิโตน พบว่ามีอัตราการเกิดที่ดีและขนาดของท่อที่ใหญ่ แต่คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนจะดีที่สุดที่สุดในกรณีที่ใช้แคตะไลต์นิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล ส่วนกรณีของฐานรองทองแดง มีอัตราการเกิดที่ดีใกล้เคียงกันและขนาดของท่อไม่ต่างกันมากนัก แต่คุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนจะดีที่สุดที่สุดในกรณีที่ใช้แคตะไลต์นิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอล

Abstract

This paper proposes the synthesis of carbon nanotubes (CNTs) on Si and Cu substrates for studying the quality of carbon nanotubes from Hot Filament Chemical Vapor Deposition. The important parameters are sources (ethanol, acetone), catalysts (Ni, Fe) and substrates (Cu, Si). CNTs were investigated by Raman Spectroscopy for quality and Scanning Electron Microscope for diameter. At the same condition, CNTs can be grown on various parameters. In case of Ni catalyst and acetone source on Si substrate, it is found that the growth rate is good and large diameter but the best quality is that the case of Ni catalyst and ethanol source. For Cu substrate, it shows the same rate of growth and diameter and the best quality is the case of Ni catalyst and ethanol source.

1. บทนำ

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotubes) ที่ถูกค้นพบในปี 1991 นั้น ในปัจจุบัน ได้เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่นักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจและพยายามคิดค้นพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่างๆมากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของตัวมัน เช่น นำไฟฟ้าได้ดีเยี่ยม มีความแข็งแรงยืดหยุ่นสูง [1,2] ไวต่อสิ่งเร้าที่นำมาทำปฏิกิริยาและอื่นๆอีกมาก คุณสมบัติเหล่านี้ เหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีวิธีหลักๆด้วยกัน 3 วิธี คือ วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge) วิธีระเหิดด้วยเลเซอร์ (Laser Ablation) และวิธี CVD (Chemical Vapor Deposition) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด แต่คุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ ยังไม่ค่อยดีนัก การสังเคราะห์ทั้ง 3 วิธีนี้ จะได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีคุณสมบัติที่พิเศษเหมือนกันและมีลักษณะ 2 แบบหลักๆคือ แบบเป็นท่อที่มีลักษณะของผนังเดี่ยว (Single-walled) และแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled) [3-6]

ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการศึกษาคุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน ที่ความดันบรรยากาศ จะมีแผ่นตัวอย่างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเตรียมแผ่นที่มาจาก การเปลี่ยนแปลงตัวแปร 3 ชนิดคือ สารแหล่งจ่าย (เอทานอล, อะซีโตน) แคลตะไลต์ (นิกเกิล, ผงเหล็ก) และฐานรอง (ทองแดง, ซิลิคอน) โดยทำการวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย Raman Spectroscopy ทั้งนี้ การศึกษาเงื่อนไขที่ทำให้ได้คุณภาพของฟิล์มที่ดีนั้นเพื่อจุดประสงค์ในการนำมาวิเคราะห์และพัฒนาสำหรับการไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆต่อไป

2. วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ ใช้แผ่นตัวอย่างที่ต้องการนำมาสังเคราะห์ทั้งหมด 8 แผ่น โดยจะแบ่งชนิดของฐานรองออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ฐานรองซิลิคอนและฐานรองทองแดง ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ ในการ

เลือกที่จะศึกษาฐานรอง 2 ชนิดนี้ เพราะสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้เฉพาะทาง โดยกรณีแผ่นทองแดงที่สามารถบัดกรีและม้วนไปมาได้ นั้น เหมาะสำหรับการที่จะนำมาทำเป็นอุปกรณ์ประเภทฟิล์มบางต่างๆหรืออุปกรณ์พิเศษบางชนิด ส่วนกรณีฐานรองซิลิคอนเหมาะสำหรับอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์รวมไปถึงการนำมาพัฒนาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีวงจรรวมได้ เป็นต้น

แผ่นฐานรองทองแดงจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรก แผ่นที่หนึ่งจะถูกนำมาเคลือบแคลตะไลต์ในสารละลายระหว่างเหล็กไนเตรต $Fe(NO_3)_2$ กับเอทานอล จากนั้นจะปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ส่วนแผ่นที่สองจะถูกนำมาเคลือบแคลตะไลต์นี้เกิดด้วยวิธีการสปัตเตอร์จนเกิดเป็นฟิล์มบาง ในกลุ่มแรกนี้ เมื่อนำมาสังเคราะห์จะใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอล ส่วนกลุ่มที่สอง จะมีขั้นตอนการเตรียมแผ่นตัวอย่างเหมือนกับกลุ่มแรก เพียงแต่เปลี่ยนสารแหล่งจ่ายจากเอทานอลมา เป็นอะซีโตน

ตารางที่ 1 แผ่นตัวอย่างที่ได้จากการเตรียม บนฐานรอง Si

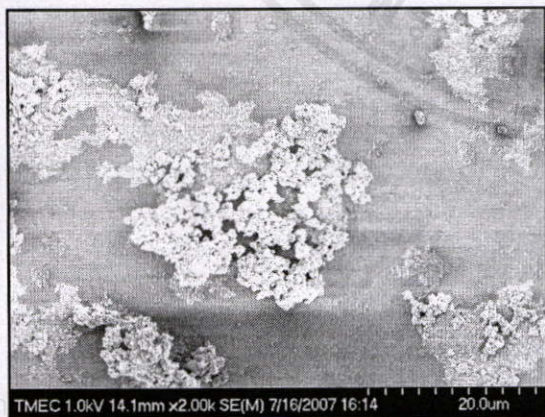
สารแหล่งจ่าย แคลตะไลต์	เอทานอล	อะซีโตน
ผงเหล็ก	1. ซิลิคอนเคลือบ ผงเหล็ก/เอทานอล	2. ซิลิคอนเคลือบ ผงเหล็ก/อะซีโตน
นิกเกิล	3. ซิลิคอนเคลือบ นิกเกิล/เอทานอล	4. ซิลิคอนเคลือบ นิกเกิล/อะซีโตน

ตารางที่ 2 แผ่นตัวอย่างที่ได้จากการเตรียม บนฐานรอง Cu

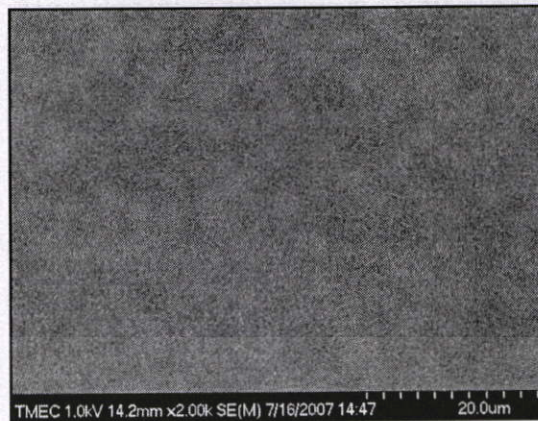
สารแหล่งจ่าย แคลตะไลต์	เอทานอล	อะซีโตน
ผงเหล็ก	5. ทองแดงเคลือบ ผงเหล็ก/เอทานอล	6. ทองแดงเคลือบ ผงเหล็ก/อะซีโตน
นิกเกิล	7. ทองแดงเคลือบ นิกเกิล/เอทานอล	8. ทองแดงเคลือบ นิกเกิล/อะซีโตน

แผ่นฐานรองซิลิคอนจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มเช่นกัน โดยกลุ่มแรก แผ่นที่หนึ่งจะนำมาเคลือบแคตะไลต์ในสารละลายระหว่างเหล็กไนเตรต $Fe(NO_3)_2$ กับเอทานอล จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง สังเกตจะพบว่าลักษณะการกระจายตัวของผงเหล็กหลังจากการเคลือบนั้น มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มไม่กระจายตัวเหมือนในกรณีของฐานรองที่เป็นทองแดง อีกทั้งการยึดเกาะของตัวแคตะไลต์บนผิวหน้าของฐานรองก็ไม่ค่อยดี อาจเป็นเพราะลักษณะพื้นผิวที่มันวาวของซิลิคอน ซึ่งเป็นผลทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่ำและเกิดไม่ทั่วทั้งพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 1 ในรูปที่ 2 เป็นกรณีของแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยผงเหล็ก พบว่ามีการยึดเกาะของตัวแคตะไลต์บนผิวหน้าของฐานรองค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนแผ่นที่สองจะนำมาเคลือบแคตะไลต์นี้เกิดด้วยวิธีการสปีดเตอร์จนเกิดเป็นฟิล์มบาง กลุ่มแรกนี้ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอล ส่วนกลุ่มที่สอง จะมีขั้นตอนการเตรียมแผ่นตัวอย่างเหมือนกับกลุ่มแรก เพียงแต่เปลี่ยนสารแหล่งจ่ายจากเอทานอลเป็นอะซิโตน

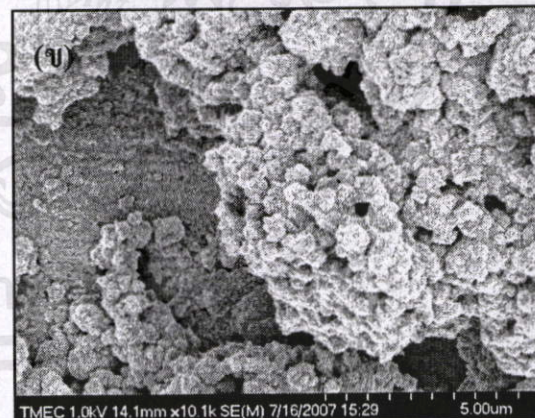
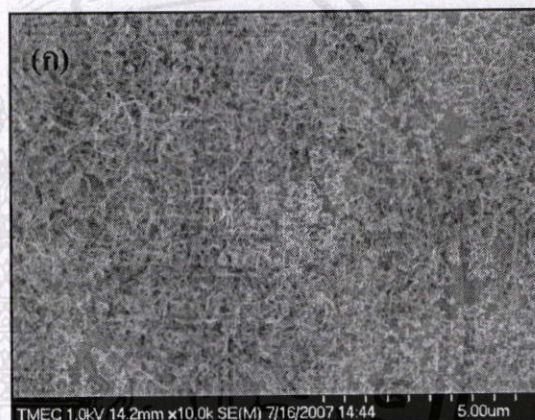
เงื่อนไขในการสังเคราะห์แผ่นตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้งหมดนั้น จะถูกนำมาสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบควบคุมความร้อน ระบบที่ใช้เป็นระบบที่สร้างขึ้นเอง [7, 8] กระทำที่อุณหภูมิพื้นผิวฐานรองอยู่ในช่วง 550-750 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ มีอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายต่อไฮโดรเจนรวมคือ 9 - 10 % โดยปริมาตร ใช้เวลาสังเคราะห์ประมาณ 40 - 45 นาที



รูปที่ 1 ภาพถ่ายจาก SEM ของตัวแคตะไลต์ผงเหล็กที่เคลือบบนฐานรองซิลิคอน



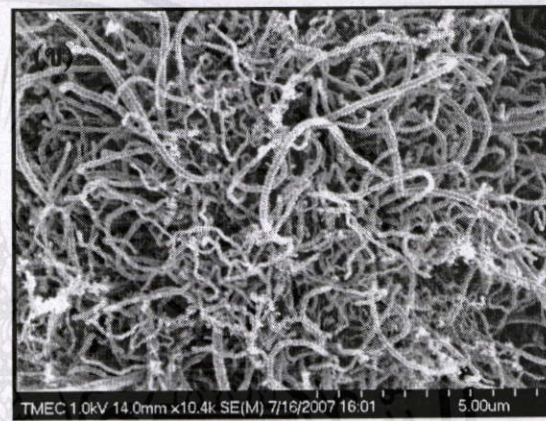
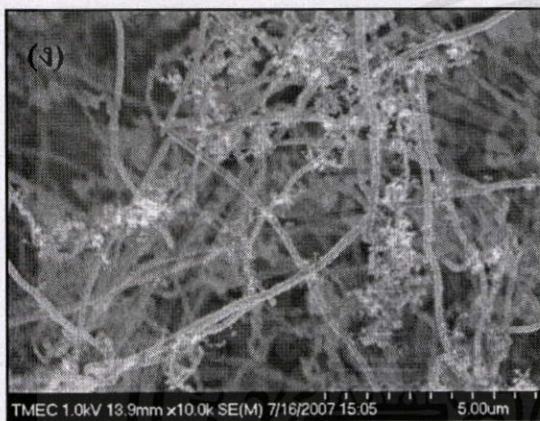
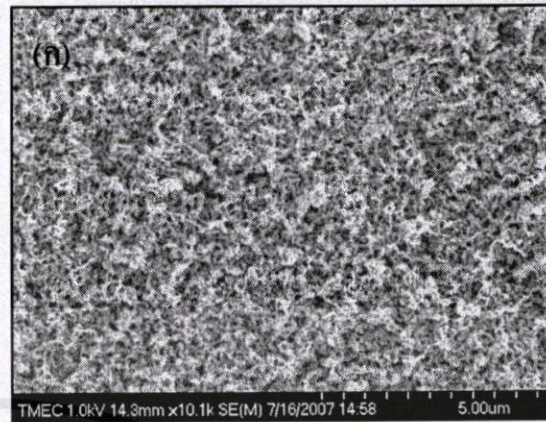
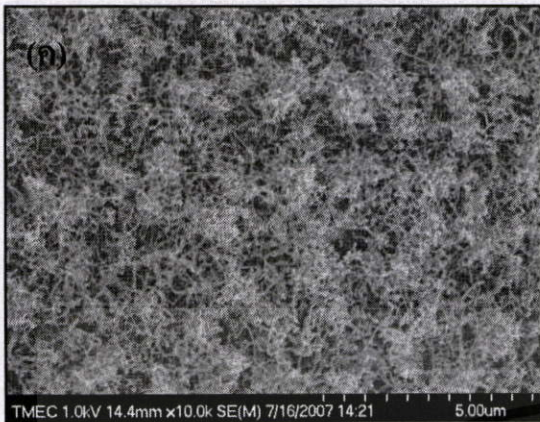
รูปที่ 2 ภาพถ่ายจาก SEM ของตัวแคตะไลต์ผงเหล็กที่เคลือบบนฐานรองทองแดง



รูปที่ 3 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองซิลิคอน

(ก) เคลือบด้วยแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล

(ข) เคลือบด้วยแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซิโตน



รูปที่ 3(ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบน
ฐานรองซิลิคอน

(ค) เคลือบด้วยแคตะไลต์นี้เกิดและใช้สารแหล่ง
จ่ายเอทานอล

(ง) เคลือบด้วยแคตะไลต์นี้เกิดและใช้สารแหล่ง
จ่ายอะซีโตน

รูปที่ 4 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบน
ฐานรองทองแดง

(ก) เคลือบด้วยแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่ง
จ่ายเอทานอล

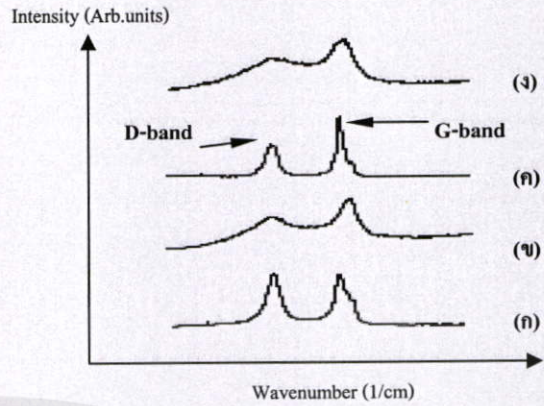
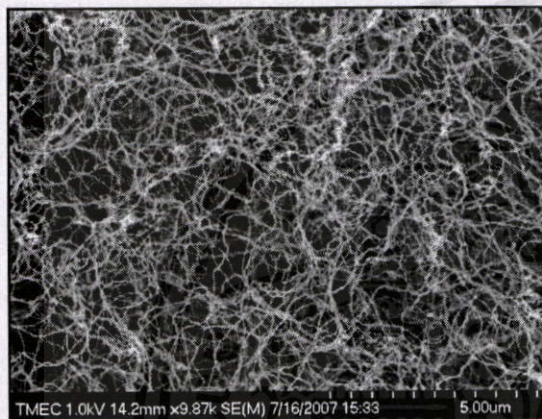
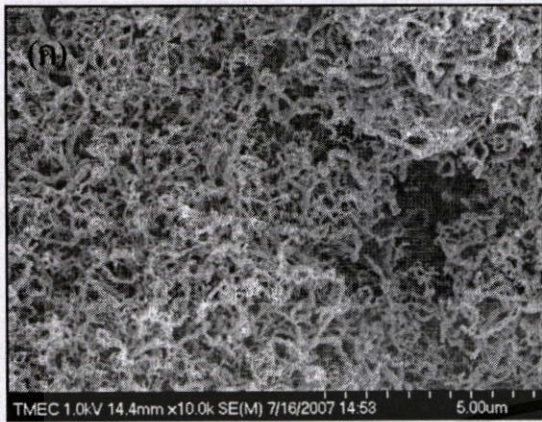
(ข) เคลือบด้วยแคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่ง
จ่ายอะซีโตน

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

รูปที่ 3 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนในกำลังขยายที่เท่ากัน (10000 เท่า) ซึ่งได้สังเคราะห์ลงบนฐานรองซิลิคอนที่มาจากการเตรียมแคตะไลต์และใช้สารแหล่งจ่ายต่างชนิดกัน แต่เงื่อนไขในการสังเคราะห์เดียวกัน รูปที่ 3(ก) เป็นท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดการเตรียมผงเหล็กบนพื้นผิวมันวาว ซึ่งอัตราการเกิดค่อนข้างต่ำ รูปที่ 3(ข) สังเกตจะพบว่าเกิดอะมอร์ฟัสคาร์บอนเป็นส่วนมากและไม่ปกคลุมทั่วพื้นผิวของฐานรอง รูปที่ 3(ค) ท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นทั่วทั้งพื้นผิวแต่มีขนาดของท่อค่อนข้างเล็ก ส่วน

รูปที่ 3(ง) พบว่าขนาดของท่อนาโนคาร์บอนค่อนข้างจะใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 3(ค) ที่ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอล แสดงว่าสารแหล่งจ่ายอาจมีผลต่อขนาดของท่อด้วย อีกทั้งความหนาแน่นก็มากด้วยเช่นกัน

รูปที่ 4 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยายเท่ากันบนฐานรองทองแดงที่มีการเตรียมฐานรองเหมือนในกรณีของซิลิคอน รูปที่ 4(ก) ท่อนาโนคาร์บอนเกิดปกคลุมทั่วทั้งพื้นผิว ลักษณะของท่อค่อนข้างจะเล็กมาก รูปที่ 4(ข) สังเกตจะเห็นเป็นท่อชัดเจน มีความหนาแน่นการเกิดที่ดี รูปที่ 4(ค) และ (ง) มีอัตราการเกิดที่ดีและมีขนาดของท่อไม่ใหญ่มาก

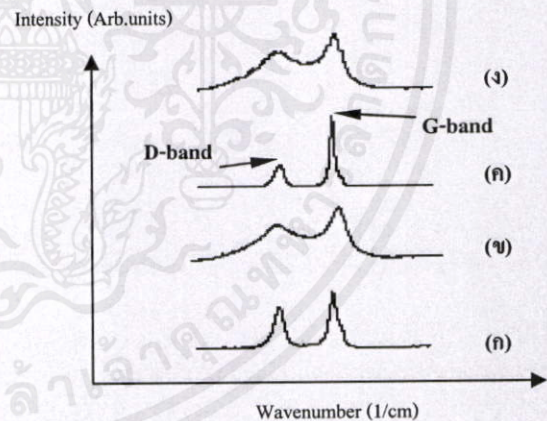


รูปที่ 5 รามานสเปกตรัมของ CNTs บนฐานรอง Si

- (ก) แคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
- (ข) แคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน
- (ค) แคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
- (ง) แคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

รูปที่ 4(ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองทองแดง

- (ค) เคลือบด้วยแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
- (ง) เคลือบด้วยแคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน



รูปที่ 6 รามานสเปกตรัมของ CNTs บนฐานรอง Cu

- (ก) แคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
- (ข) แคตะไลต์ผงเหล็กและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน
- (ค) แคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล
- (ง) แคตะไลต์นิกเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายอะซีโตน

รูปที่ 5 และ 6 แสดงรามานสเปกตรัมที่บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งพีค G แสดงถึงพันธะของกราฟไฟต์ที่สมบูรณ์ พีค D เป็นพีคที่เกิดจากคาร์บอนที่มีพันธะไม่สมบูรณ์ ดังนั้น การหาคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดูจากอัตราส่วนของ G/D ซึ่งคำนวณได้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟของพีค G ต่อพีค D พบว่า ในกรณีของฐานรองซิลิคอน ดังรูปที่ 5(ค) อัตราส่วนความเข้มของพื้นที่พีค G ต่อพื้นที่พีค D มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับฐานรองที่เป็นซิลิคอนด้วยกัน ส่วนกรณีฐานรองทองแดง รูปที่ 6(ค) อัตราส่วนความเข้มของพื้นที่พีค G ต่อ

พื้นที่พิกัด D จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับฐานรองที่เป็นทองแดงด้วยกัน (ในกรณีของกราฟปรมาณที่ได้จากการใช้สารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตนของทั้งสองฐานรองนั้น พบว่าลักษณะของกราฟตรงช่วงบริเวณระหว่างพิกัดของ G กับพิกัดของ D กลับมีค่าสูง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่อาจจะมีการประกอบอื่นๆปะปนรวมอยู่ด้วยนอกเหนือจากธาตุคาร์บอน)

4. สรุปผลการทดลอง

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD แล้วได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่เป็นสารแหล่งจ่าย (เอทานอล, อะซีโตน) แคลตะไลต์ (นิเกิล, ฟงเหล็ก) และฐานรอง (ทองแดง, ซิลิคอน) ซึ่งจะเตรียมแผ่นตัวอย่างได้ทั้งหมด 8 แผ่น กระทำด้วยเงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด ผลปรากฏว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ทั้งหมด กรณีของฐานรองซิลิคอน อัตราความหนาแน่นการเกิดที่ดี ขนาดของท่อที่ใหญ่ นั้น จะสังเคราะห์ได้จากการใช้แคลตะไลต์เป็นนิเกิลและสารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตน แต่คุณภาพของท่อคาร์บอนจะดีที่สุดในกรณีที่มีแคลตะไลต์เป็นนิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอล ส่วนกรณีของฐานรองทองแดง พบว่ามีอัตราความหนาแน่นการเกิดที่ดี ขนาดของท่อที่ใหญ่ นั้น จะสังเคราะห์ได้จากการใช้แคลตะไลต์เป็นฟงเหล็กและสารแหล่งจ่ายเป็นอะซีโตน แต่คุณภาพของท่อคาร์บอนจะดีที่สุดในกรณีที่มีแคลตะไลต์เป็นนิเกิลและใช้สารแหล่งจ่ายเอทานอล ซึ่งเหมือนกับกรณีของซิลิคอน แสดงว่าแคลตะไลต์นิเกิลและสารแหล่งจ่ายเอทานอลเป็นตัวแปรที่เหมาะสมจะนำมาศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต้องการคุณภาพสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนด้าน

การเงินเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (1993) 181.

[2] R. F. Service, Science 271 (1996) 1232

[3] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388, (1997) 756.

[4] Z.F.Ren, Z..P.Huang, J.H.Wang.M.P.Siegal, P.N.Provencio, Sience 282 (1998) 1105.

[5] A.Thess, Science 273 (1996) 483.

[6] C.J.Lee, D.W.Kim, Y.H. Lee, J.M. Kim, Chem. Phys. Lett.299(1999) 97.

[7] เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุขเกษ และรัฐพงษ์ นาคาไชย “การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 เดือนตุลาคม 2548, หน้า 1145 -1148

[8] รัฐพงษ์ นาคาไชย, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล, สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล, สมเกียรติ สุขเกษ ,เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ นิमित ขมนาวัง และ รังสรรค์ เมืองเหลือ “การเลือกปลูกคาร์บอนนาโนทิวบ์จากการสร้างลดความด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 เดือนพฤศจิกายน 2549, หน้า 729-732

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายรัฐพงษ์ นาคาไชย
วัน เดือน ปี เกิด	20 กรกฎาคม พ.ศ.2523
ที่อยู่	185/13 หมู่ 2 ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2546

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ระหว่างศึกษาปริญญาโท

1. T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech and **R. Nakachai** "Synthesis of Carbon Nanotube by HFCVD for Electronic Devices" 28th Electrical Engineering Conference, October 20-21, 2005, Thailand.
2. **R. Nakachai**, T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S. Supadech, E. Ratanaudomphisut and N. Chomnawang "Selective Growth of Carbon Nanotube by HFCVD" 29th Electrical Engineering Conference, November 9-10, 2006, Thailand.
3. T. Phetchakul, N. Chomnawang, S. Cheirsirikul, **R. Nakachai**, E. Ratanaudomphisut and P. Songsiriritthigul "Selective Growth of CNT on Ni/Cu Substrate" Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, January 16-19, 2007, Bangkok, Thailand.
4. **รัฐพงษ์ นาคาไชย** เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สมศักดิ์ เขียร์ศิริกุล สมเกียรติ สุขเดช และ เอกกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารแหล่งจ่าย แคตะไลต์ และฐานรองต่างชนิดกัน, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 24 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2550 (12-17).
5. **รัฐพงษ์ นาคาไชย** เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สมศักดิ์ เขียร์ศิริกุล สมเกียรติ สุขเดช และ เอกกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, การศึกษาคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากการเตรียมสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวรองรับต่างชนิดกัน, การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 29 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551 (175-182).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้