

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมฟิล์มนิเกิลโดยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

Preparation of Nickel Films using Electroplating method



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมฟิล์มนิเกิลโดยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

Preparation of Nickel Films using Electroplating method



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเตรียมฟิล์มนิกเกิลโดยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

นาย สุรศักดิ์ มนัสสง รหัส 46015246



(ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การเตรียมฟิล์ม निकเกิดด้วยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า
นักศึกษา	นายสุรศักดิ์ มนต์ชง รหัส 46015246
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์
ระดับการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ภาควิชา	อิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2548

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต


(ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมฟิล์มนิเกิลโดยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

นายสุรศักดิ์ มนต์สง รหัส 46015246
ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นการเตรียมโลหะนิเกิล (Nickel) โดยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เพื่อใช้ในการเตรียมโลหะตัวเร่งสำหรับควบคุมตำแหน่งของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ขึ้นตามลวดลายที่ต้องการ ในส่วนแรกจะเป็นการสร้างแผ่นลายนิเกิลเพื่อใช้เป็นหน้ากาก (Mask) สำหรับเตรียมโลหะตัวเร่งที่เตรียมจากวิธีระเหยสาร (Evaporation Deposition) หรือวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ในส่วนที่สองจะเป็นการเตรียมอนุภาคของนิเกิลบนฐานรองโดยจะควบคุมตำแหน่ง และความหนาแน่นของอนุภาค เพื่อใช้เป็นโลหะตัวเร่งในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotubes :CNTs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of Nickel Films using Electroplating method

Mr. Surasak Manassong ID: 46015246

Dr. Sutichai Chaisitsak Advisor

Educational Year 2005

ABSTRACT

In this report the deposition of Nickel Films using electroplating method was carried out for the preparation of catalyst for synthesis of patterned carbon nanotubes. In the first part of the report patterned nickel thick films was fabricated for use as a mask in the evaporation or sputtering deposition. The second part the formation of nickel particles on the substrate was studied by controlling point and density of the particles. The nickel particles were used as a catalyst for carbon nanotubes (CNTs) synthesis.

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของปริญญาบัตรในครั้งนี้ เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของ ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ ในการให้คำแนะนำปรึกษา แนวทางในการแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนในทุกด้านขอขอบคุณ คณะทำงานของ TMEC, Pata Chemical & Machinery co.,ltd, รุ่นพี. โทและห้องปฏิบัติการ NEMD LAB. ที่ให้ใช้เครื่องมือต่าง ๆ ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ข้าพเจ้า ในคำแนะนำที่ดีในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีคาร์บอนนาโนทิวป์	3
2.1 ประวัติความเป็นมาของคาร์บอนนาโนทิวป์	3
2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของ CNTs	4
2.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	6
2.4 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	6
2.4.1. วิธีอาร์กดีสชาร์จ (Arc discharge)	7
2.4.2. วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser vaporization)	8
2.4.3. วิธี Chemical vapor deposition (CVD)	8
บทที่ 3 โลหะตัวเร่ง (Catalyst)	11
3.1. โลหะตัวเร่ง (Catalyst)	11
3.2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)	13
3.2.1 วิธีการระเหย (Evaporation Deposition)	13
3.2.2. วิธีการ Sputtering	15
3.2.3. วิธีเคลือบด้วยสปินเนอร์ (Spin coating)	18
3.2.4. วิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)	18
3.3 สรุป	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)	22
4.1. หลักการของการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	22
4.2. ชนิดของโลหะที่ชุบเคลือบ	23
4.3. อุปกรณ์ที่สำคัญในการชุบเคลือบ	24
4.3.1. สารละลาย	24
4.3.2. ตัวล่อ (Anode)	25
4.3.3. แหล่งจ่ายไฟ	26
4.3.4. อุปกรณ์อื่น ๆ	26
4.4. การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	27
4.4.1. การกำจัดไขมันด้วยไอระเหย (Vapor Degreasing)	27
4.4.2. การล้างด้วยน้ำค้างร้อน (Soak clean)	27
4.4.3. การล้างด้วยไฟฟ้า (Electro Clean)	28
4.4.4. การทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic clean)	28
4.4.5. การทำความสะอาดด้วยกรด (Pickling and Dipping)	28
4.5. ขั้นตอนการชุบอย่างง่าย	29
4.6. วิธีการแก้ไขและตรวจสอบ	29
4.6.1. วิธีการกำจัดเหล็กออกจากน้ำยาชุบนิเกิล	29
4.6.2. วิธีการกำจัดทองแดง สังกะสี และตะกั่วในถังนิเกิล	29
4.6.3. การแก้ไขปัญหาในการชุบนิเกิล	29
4.6.4. การทดสอบน้ำยาชุบโลหะด้วยฮัลเซลล์ (Hull Cell)	31
บทที่ 5 การทำหน้ากาก (Mask)	35
5.1. Mask คือ	35
5.2 การสร้างมาร์ส	35
5.3. น้ำยาไวแสงหรือสารไวแสง (Photo resist)	36
5.4 การออกแบบมาร์ส (Mask design)	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

5.5. วิธีการทำมาร์สด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	37
5.5.1. วัตถุประสงค์	37
5.5.2. อุปกรณ์และสารเคมี	38
5.5.3. วิธีการทดลอง	38
5.5.4. ขั้นตอนการทดลอง	42
5.5.5. ผลการทดลอง	43
- การร่อนของนิกเกิล	43
- จุดตามค	44
- ลายเส้นบนนิกเกิล	45
- ขนาดของลายนิกเกิล	46
- แผ่นนิกเกิล	47
5.5.6. สรุปผลการทดลอง	48
บทที่ 6 การเตรียมตัวเร่งโลหะด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	49
6.1 บทนำ	49
6.2 การทดลอง	49
6.3 ผลการทดลอง	49
6.3.1. การชุบแผ่น Stainless	50
6.3.2. การชุบแผ่น Silicon	52
6.4. สรุปผลการทดลอง	60
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	57
หนังสืออ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพชร	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแกรไฟต์	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน	4
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของคาร์บอนหกสปี (C ₆₀)	4
รูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบSWCNTs (ซ้าย) และแบบMWCNTs (ขวา)	5
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์	6
รูปที่ 2.7 วิธีอาร์กคิสซาร์จ	7
รูปที่ 2.8 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์	8
รูปที่ 3.1 ตารางธาตุ	12
รูปที่ 3.2 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	13
รูปที่ 3.3 การเคลือบชนิดการระเหย	14
รูปที่ 3.4 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องเคลือบด้วยวิธีสปีดเตอริง	16
รูปที่ 3.5 การเคลือบแบบ Spin coating	18
รูปที่ 3.6 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	19
รูปที่ 4.1 แสดงระบบของ Electroplating	22
รูปที่ 4.2 ตัวล่อนิกเกิล	25
รูปที่ 4.3 การล้างด้วยไฟฟ้า	28
รูปที่ 4.4 เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic)	29
รูปที่ 4.5 ก่องอัลเซสดี	32
รูปที่ 4.6 แผ่นที่ใช้ในการทดสอบ	34
รูปที่ 5.1 การใช้งานมาร์ส	35
รูปที่ 5.2 การสร้างมาร์ส	37
รูปที่ 5.3 การออกแบบมาร์ส	39
รูปที่ 5.4 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการชุบ	40
รูปที่ 5.5 การฉายแสง	40
รูปที่ 5.6 ลายที่ได้หลังจาก Developer	43
รูปที่ 5.7 นิกเกิลแผ่น	44
รูปที่ 5.8 ผลที่เกิดจากค่าพีเอชและการแก้ไข	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 5.9 ภาพรอยตามคบนผิว निकเกิด	46
รูปที่ 5.10 ภาพลายเส้นบนผิว निकเกิด	47
รูปที่ 6.1 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Stainless ที่กระแสด่าง ๆ (a)	50
รูปที่ 6.1 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Stainless ที่กระแสด่าง ๆ (b)	51
รูปที่ 6.1 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Stainless ที่กระแสด่าง ๆ (c)	51
รูปที่ 6.1 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Stainless ที่กระแสด่าง ๆ (d)	51
รูปที่ 6.1 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Stainless ที่กระแสด่าง ๆ (e)	52
รูปที่ 6.2 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Silicon ที่กระแสด่าง ๆ (a)	53
รูปที่ 6.2 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Silicon ที่กระแสด่าง ๆ (b)	53
รูปที่ 6.2 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Silicon ที่กระแสด่าง ๆ (c)	54
รูปที่ 6.2 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Silicon ที่กระแสด่าง ๆ (d)	54
รูปที่ 6.3 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Silicon ที่เวลาต่างกัน (a)	55
รูปที่ 6.3 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Silicon ที่เวลาต่างกัน (b)	55
รูปที่ 6.3 พื้นผิวของ निकเกิดบนแผ่น Silicon ที่เวลาต่างกัน (c)	56

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ผลทางเคมีได้ตัวของกระแสไฟตรง	20
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการชုပ် สาเหตุ และการแก้ไข	30
ตารางที่ 4.2 บอกถึงชนิดของน้ำยาที่ทดสอบ กระแสที่ใช้ และเวลาในการทดสอบ	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

คาร์บอน (Carbon) เป็นธาตุหลักหนึ่งในสี่แห่งสิ่งมีชีวิต (ธาตุที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตบนโลกคือ ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน) สิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลกใบนี้ถือได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตในรูปแบบ Carbon-Based คือ มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานของชีวิต หรืออาจกล่าวได้ว่า โมเลกุลที่ได้ชื่อว่าเป็นสารอินทรีย์ทุกชนิดนั้น มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และหากจะพูดกลับกัน สิ่งมีชีวิตทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียที่ซุกตัวอยู่ลึกหลายกิโลเมตรจากผิวโลก จุลินทรีย์จากน้ำพุร้อนหรือปล่องร้อนใต้สมุทรที่ร้อนกว่าอุณหภูมิน้ำเดือด หรือแม้แต่ชีวิตเล็กจิ๋วที่เคยชินอยู่แต่กับความเย็นกลางก้อนน้ำแข็งบริเวณขั้วโลก ก็ล้วนแล้วแต่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ คาร์บอนยังมีอยู่ในอาหารที่เรารับประทาน เสื้อผ้าที่เราสวมใส่ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับรถยนต์ และในสิ่งอื่นๆ อีกมากมาย

อะตอมคาร์บอนเหล่านี้เชื่อมโยงในลักษณะของตาข่ายที่มีรูปหกเหลี่ยม นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจแผ่นคาร์บอนนี้มาก เพราะเมื่อมันเป็นหลอดหรือท่อแล้ว มันมีคุณสมบัติที่พิเศษหลายประการ เป็นวัสดุที่แข็งแรงที่สุดเท่าที่เคยสร้างขึ้นมา ไม่เพียงแต่มีความแข็งแรงแต่ยังมีความยืดหยุ่นและเบา ปัจจุบันคาร์บอนในรูปแบบอื่น ๆ ได้นำไปผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้กันอยู่ คุณสมบัติของคาร์บอนทางด้านไฟฟ้าสามารถส่งกระแสไฟฟ้าผ่าน Nanotube โดยแทบจะไม่มีแรงต้านไฟฟ้าเลย นั่นแสดงว่าสามารถที่จะสร้างเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ และยังมีอีกว่ามีคุณสมบัติที่เป็นสารกึ่งตัวนำได้เช่นกัน

ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถที่จะสังเคราะห์ได้หลายวิธีด้วยกันเช่นวิธีอาร์กคิซชาร์จ (Arc discharge), วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser vaporization) และ วิธี Chemical vapor deposition (CVD) โดยท่อคาร์บอนที่ได้ในแต่ละวิธีนั้นจะได้คุณภาพของท่อคาร์บอนที่แตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ กันไปในการสังเคราะห์แต่ละวิธี ในการที่สังเคราะห์นั้นจะต้องมีการเตรียมสิ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์โดยจะมีดังนี้

- สารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ เช่น แอลกอฮอล์ เป็นต้น
- โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ขึ้นกับวิธีที่จะใช้ในการสังเคราะห์โดยจะมีการเตรียมได้หลายวิธี
- อื่น ๆ ขึ้นกับวิธีการที่จะเลือกในการสังเคราะห์

การเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจะมีหลายวิธีด้วยกันในการที่จะใช้เคลือบบนผิวของ

ฐานรองคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) เช่น วิธี Plasma CVD, วิธี Laser CVD และการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

2. การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition: PVD) เช่น วิธีระเหยอะตอม (Evaporation), วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

โดยวิธีการที่เลือกใช้นั้นเป็นวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า(Electroplating) เพื่อที่จะนำโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากวิธีนี้ไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยสารละลายที่ใช้ในการทำเป็นโลหะตัวเร่งนั้นจะใช้สารละลายคือ สารละลายนิกเกิล (Nickel Solutions) โดยผลที่ต้องการนั้นจะเป็นการที่สามารถจะควบคุมตำแหน่งของนิกเกิลให้เกาะในตำแหน่งตามที่ต้องการได้ เพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้เพื่อดูการเกาะของโลหะนิกเกิลบนผิวของฐานรอง แล้วนำไปเป็น Catalyst เพื่อนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ คาดว่าคาร์บอนที่ได้ออกมานั้นจะเกิดในตำแหน่งที่มีการเกาะของโลหะตัวเร่งที่เป็นนิกเกิลเท่านั้น เพราะวิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจจะมีคุณภาพแตกต่างกัน

บทที่ 2

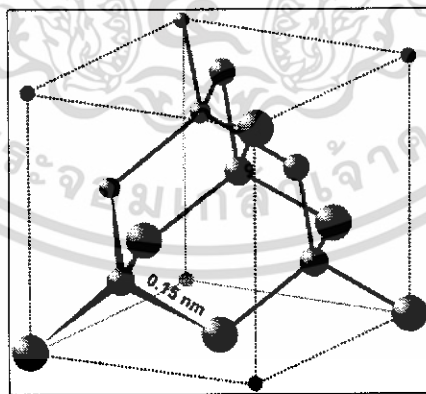
ทฤษฎีคาร์บอนนาโนทิวป์

2.1 ประวัติความเป็นมาของคาร์บอนนาโนทิวป์

ท่อนาโนคาร์บอน(Carbon Nanotubes) ค้นพบครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.2534 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima) [18] ด้วยคุณสมบัติที่ขุดเยื่อมทั้งในทางกลและทางอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวคือมันมีความแข็งแรงที่วัดได้ค่ามากกว่าเหล็กกล้าถึงร้อยเท่า และคุณสมบัติของคาร์บอนทางด้านไฟฟ้าสามารถส่งกระแสไฟฟ้าผ่าน Nanotube โดยแทบจะไม่มีแรงต้านไฟฟ้าเลย นั่นแสดงว่าสามารถที่จะสร้างเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ และยังมีอีกว่ามีคุณสมบัติที่เป็นสารกึ่งตัวนำได้เช่นกัน อาจพูดได้ว่าสักวันหนึ่ง มันจะถูกนำไปใส่แทนที่ซิลิคอนชิปหรือพวกไอซีต่างๆ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์ทั้งหลาย ที่เรากำลังใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ นั่นก็หมายถึงว่า สักวันหนึ่งมัน อาจจะทำให้ซิลิคอนชิปกลายเป็นสิ่งที่ล้าสมัยไปเลยทีเดียว ดังนั้น

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีลักษณะพิเศษสามารถพบได้ในหลายๆ รูปแบบโครงสร้าง (Allotropic forms) ซึ่งแบ่งออกได้ เป็นสี่ชนิดหลักๆ ดังนี้

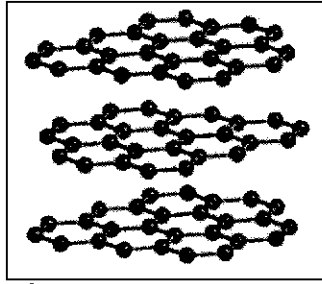
1. อะตอมของ คาร์บอนทั้งหมดจะเกาะยึดด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) (รูปที่ 2.1) มีลักษณะอย่างเดียวกับที่พบได้ในรูปของอัญมณีราคาแพง คือเพชร (Diamond) ซึ่งมีความสวยงามและมีความแข็งที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหลาย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเพชร

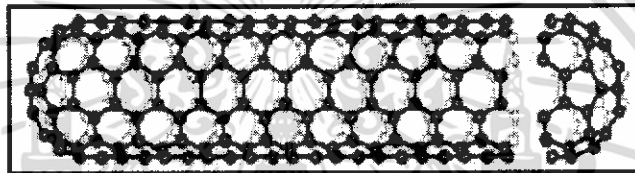
2. แผ่นสองมิติที่วางซ้อนทับและยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงที่ต่ำกว่า คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) พบว่าเป็นโครงสร้าง ของแกรไฟต์ เช่นไส้ดินสอดที่เราใช้กันดี (รูปที่ 2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



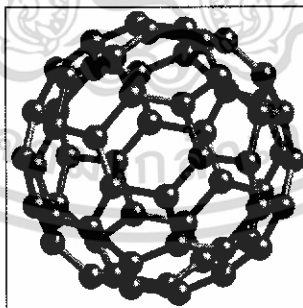
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแกรไฟต์

3. ลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก เลย์ทำให้มันดูเหมือนเป็น เส้นยาว ๆ ในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอน (รูปที่ 2.3) ซึ่งเป็นโครงสร้างของคาร์บอนแบบใหม่ที่เพิ่งค้นพบ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

4. แบบเป็นก้อนขนาดเล็ก จนอาจถือว่ามันเป็น จุดที่ไม่มีมิติหรือศูนย์มิติ เรียกว่าฟูลเลอร์ีนส์ (fullerenes) ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอนหกสิบ (C₆₀) ที่แต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอม มาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แล้วได้รูปทรงเป็นแบบก้อน ทรงกลมกลวงคล้ายๆ ลูกตะกร้อหรือลูกบอลขนาดจิ๋ว (รูปที่ 2.4)

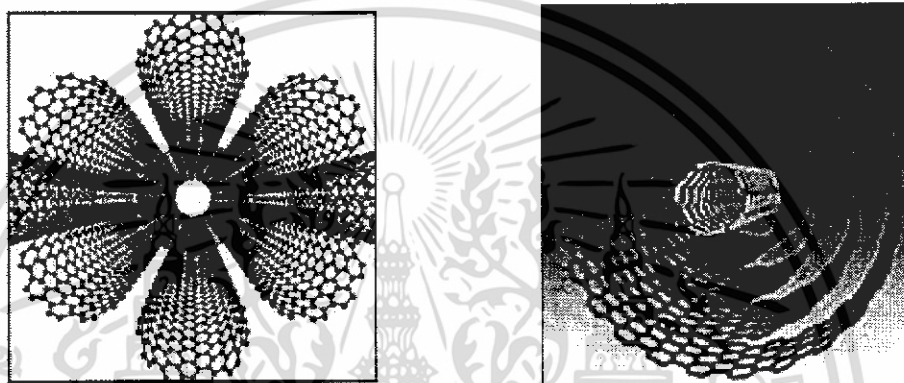


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของคาร์บอนหกสิบ (C₆₀)

2.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของ CNTs

ท่อนาโนคาร์บอนอาจแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตามจำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่า"ท่อนาโนผนังชั้นเดียว" (Single-Walled Nanotubes: SWNTs) เกิดจากการที่แผ่นกราฟีนซึ่งเป็นแผ่นมีลักษณะ โค้งงอจับกันเป็นท่อจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 – 20 nm และอาจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากถึง 100 nm ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า"ท่อนาโนผนังหลายชั้น"(Multiple-Walled Nanotubes: MWNTs) จะเป็นการซ้อนทับกันหลาย ๆ ชั้นของคาร์บอนนาโนทิวป์ ส่วนใหญ่ขนาดของท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่สองนาโนเมตร ไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาวไปจนถึงหลายร้อยไมโครเมตร และเป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณีท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.33-0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของแกรไฟต์ (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบSWCNTs (ซ้าย) และแบบMWCNTs (ขวา)

คุณสมบัติทั้งทางกลและอิเล็กทรอนิกส์ของท่อนาโนคาร์บอนนั้น จะสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและทิศทางการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม (Helicity หรือ Chirality) ที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อ(Chiral angle) ด้วยเหตุนี้เอง มันจึงสามารถสร้างให้มีคุณสมบัติที่เป็นได้ทั้งโลหะ และสารกึ่งตัวนำ หรือแม้กระทั่งว่ามันอาจจะแสดงสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีความเป็นไปได้ด้วยการเติมสารเจือ (Doping) บางอย่างเข้าไป โครงสร้างท่อที่สังเคราะห์ได้จะถูกตรวจสอบขนาดและรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำผ่าน (Transmission Electron Microscope:TEM) ส่วนสมบัติทางกลหรือโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's modulus) วัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope:AFM) ค่าที่วัดได้จะ อยู่ในช่วงของ 1×10^{12} นิวตันต่อตารางเมตร

ในการทดลองหลายระดับของการทดสอบ SWCNTs ได้มีการระบุว่า คาร์บอนนั้นมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้าเกินกว่า 50 เท่า และสามารถยืดหยุ่นได้ถึงจะมีการโค้งงอแต่มันสามารถที่จะคืนตัวกลับสู่สภาพเดิมของมันเองได้ตามปกติ มันมีค่า young's modulus ประมาณ 1 TPa (10^{12} N/m^2) สามารถทนความร้อนได้ 2800°C ในสุญญากาศ และในอากาศประมาณ 700°C มีค่าความนำ

ความร้อน (Thermal Conductivity) สูงที่สุดในบรรดาวัสดุต่าง ๆ ทั้งหมด(SWCNTs มากกว่า 6,000 W/mk และ MWCNTs มากกว่า 3,000 W/mk)

การตรวจสอบสมบัติทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้ โดยการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscope:SEM) ซึ่งพบว่าค่าความนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง(Quantized conductance) ก็จะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบคล้ายโลหะและสารกึ่งตัวนำ

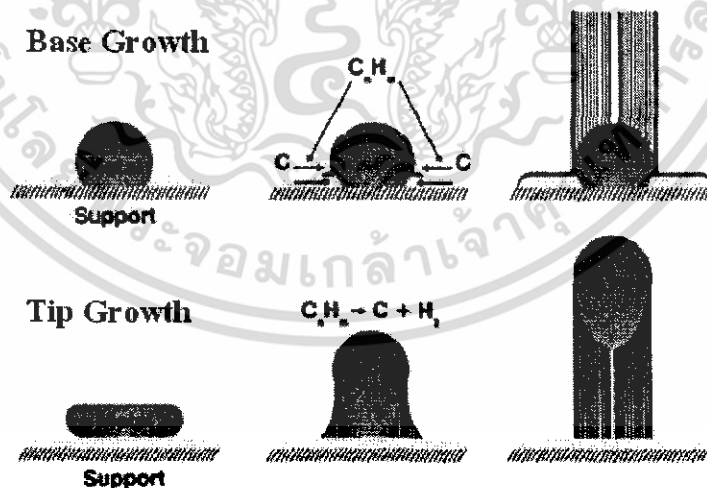
2.3 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.3.1. Base Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยการเกิดแบบนี้เป็นเพราะที่ฐานรองมีอุณหภูมิสูงกว่าทางด้านบนจึงทำให้อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจากแหล่งจ่ายนั้นไปเกาะรวมกันบนตัวเร่งบนแผ่น substrate คาร์บอนที่ได้ออกมานั้นมีลักษณะเกาะสูงขึ้น โดยมีตัวเร่งอยู่ด้านล่าง

2.3.2. Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิวป์ ในแบบนี้อุณหภูมิทางด้านบนของ Substrate นั้นสูงกว่าทางด้านล่างการรวมตัวของอะตอมคาร์บอนที่ได้มานั้นจึงเกาะใต้ตัวเร่งแล้วดันตัวให้สูงขึ้น



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์

2.4 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

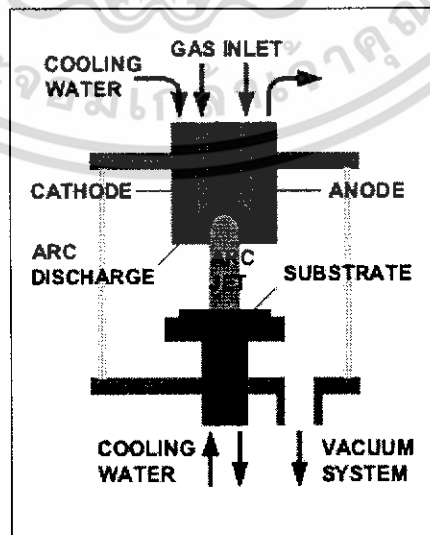
ปัญหาที่พบและยังเป็นสิ่งท้าทายต่อนักวิจัยในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้น ก็คือ ขั้นตอนการควบคุมการผลิตเพื่อให้ได้ทั้งคุณสมบัติ, ขนาด, รูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอนและเอกสารก็เป็นอีกสิ่งที่ลงมือได้ยากยิ่ง เพราะการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการสังเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ, ความดัน, เวลา, และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำให้มีความบริสุทธิ์ คือไม่ให้มีเขม่าหรือผงเม็ดคาร์บอนหรือมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ ใดๆ ก็ตาม นักวิทยาศาสตร์พบว่าวิธีหลักๆ ที่สามารถสร้างและควบคุมการผลิตท่อนาโนคาร์บอนให้ได้ตามต้องการในระดับหนึ่งได้ดังนี้

2.4.1. วิธีอาร์กดิซชาร์จ (Arc discharge)

เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงประมาณ 100 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ 18 โวลต์ ต่อก่อระหว่างแท่งกราไฟต์สองแท่ง จะทำให้เกิดประกายไฟหรือเกิดสถานะพลาสมาขึ้นระหว่างแท่งแกรไฟต์นี้ โดยเลือกใช้ขนาดของแท่งแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน คือให้มีขนาด 6 มม. และ 9 มม. ตามลำดับ เมื่อวางไว้ใกล้ๆ กันในระยะห่างประมาณ 1 มม. ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม ที่ความดัน 500 มม.ปรอท จะให้ผลลัพธ์คือได้ท่อนาโนคาร์บอนตรงบริเวณกลางๆ ขั้วของแท่งแกรไฟต์อันใหญ่ที่ต่อให้เป็นขั้วลบ ส่วนการควบคุมขนาดและความยาวของท่อนั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของพลาสมา

คาร์บอนนาโนทิวป์จะเกิดการก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัววิธีนี้มีทั้งที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งจะได้เป็น Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs) และที่ไม่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งจะเป็น Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) โดยวิธี Arc Discharge เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายน้อย แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก มีประสิทธิภาพของผลผลิต 30-90% โดยวิธีการที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) ที่ส่งผลให้มีการสังเคราะห์ SWCNTs ถูกค้นพบโดย Iijima [18] และ Ichihashi โดยมีเสนอรายงานในปี 1993 เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดบ่อนนาโนทิวป์ที่ได้เท่ากับ 1 nm โดยมีการนำเสนอโลหะที่ผสมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีส่วนผสม คือ นิกเกิล (Ni) 2.6% , ฟรานเซียม (Fr) 0.7% , เหล็ก (Fe) 0.75% ผลการสังเคราะห์พบว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้มากกว่า 1 กรัมต่อชั่วโมง



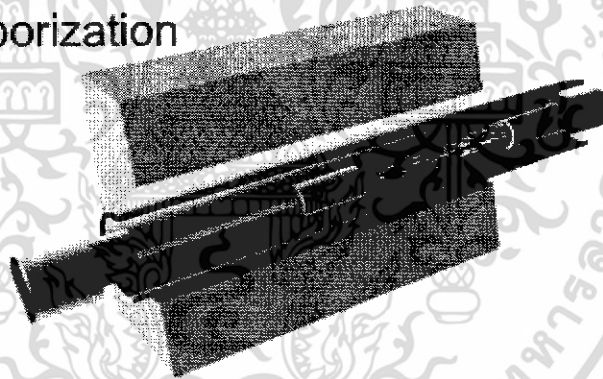
รูปที่ 2.7. วิธีอาร์กดิซชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2. วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser vaporization)

วิธีนี้ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ Prof. Smalley โดยใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงกระทบกับแท่งคาร์บอนผสมโลหะที่อยู่ในเตาอบซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ $1,200^{\circ}\text{C}$ ทำให้เกิดคาร์บอนแก๊สและคาร์บอนอะตอมที่ร้อนขึ้น คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้จะแตกต่างจากวิธี Arc Discharge ตรงที่คาร์บอนนาโนทิวป์มีความบริสุทธิ์สูงแต่ใช้จ่ายค่อนข้างสูง โดยเริ่มแรกเป็นวิธีที่จะสังเคราะห์ฟูลเลอร์ิน ต่อมาได้มีการพัฒนาที่จะผลิต MWCNTs โดยใช้เลเซอร์พลังงานสูงกระทบกับแท่งคาร์บอน โดยกระบวนการขั้นแรกนี้จะผลิต MWCNTs ได้เพียงอย่างเดียวต่อมาได้มีการผสมโลหะเข้าไปในแท่งของคาร์บอนโลหะผสม ได้แก่ โคบอลต์(Co), นิกเกิลและพาลเดียม(Rh) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถผลิต SWCNTs ได้ที่มีขนาด 5-20 nm โดยงานวิจัยของ Zhang และ Iijima[18] ใช้ลำแสงเลเซอร์เป็นตัวให้ความร้อนสูงกับแกรไฟต์ที่ผสมด้วยผงเม็ดละเอียดของโลหะโคบอลต์และนิกเกิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย

Pulsed Laser
Vaporization



Nanotube "Felt" Growing
Along Tip of Collector

รูปที่ 2.8 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์

2.4.3. วิธี Chemical vapor deposition (CVD)

Chemical vapor deposition (CVD) เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยให้ก๊าซที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนไหลผ่านใช้แหล่งกำเนิดความร้อนเช่นขดลวดความร้อนหรือพลาสมา(plasma) เพื่อถ่ายพลังงานไปทำให้โมเลกุลของก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ เช่น แอลกอฮอล์ มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แตกตัวเกิดเป็นอะตอมคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง แล้วเกิดจับตัวกันเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ โดยมีโลหะตัวเร่งช่วยเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการพื้นฐานของวิธี CVD แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิควิธีการต่างๆกันออกไปในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ สามารถแยกได้เป็น 5 วิธีใหญ่ คือ Thermal CVD, Plasma enhance CVD (PE-CVD), Hot-filament enhance CVD (HF-CVD), Vapor phase growth และ High pressure CO disproportionate process

1. Thermal chemical vapor deposition

วิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมชั้นออกไซด์ของซิลิคอน (Si) และเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งชนิด SWCNTs และ MWCNTs ใช้โลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก(Fe) , โคบอล(Co) , นิกเกิล(Ni) , โมลิบดีนัม(Mo) หรือ อัลลอย ของโลหะเหล่านี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีขนาดยาวอยู่ในช่วง 0.6-4 nm

2. Plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD)

วิธี Plasma CVD เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C โลหะตัวเร่งที่ใช้คือ เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และ โคบอล (Co) นอกจากนี้วิธีนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถกำหนดทิศทางการเกิดของทิวป์ให้ทิวป์ตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด MWCNTs ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิด SWCNTs ได้ แต่ปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิด SWCNTs ได้แล้ว

3. Vapor phase growth

วิธีนี้เป็นการสังเคราะห์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นก๊าซของโลหะ เช่น Ferrocene ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ครั้งละเป็นจำนวนมากๆ และทิวป์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวมาก ๆ (มากกว่า 20 μm) และ มีความบริสุทธิ์มากกว่า 80 % แต่เนื่องจากวิธีนี้มักจะใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายจึงต้องระมัดระวังอย่างมากนอกจากนี้ยังเป็นการยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดทิวป์อีกด้วย

4. High pressure CO disproportionate process

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

5. Hot filament enhance CVD (HF-CVD)

สำหรับวิธีนี้จะมีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament)

ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ก๊าซ ที่ใช้ซึ่งมีส่วนผสมของคาร์บอนวิธี HF-CVD นี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

หลักการคือใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้หลอดความร้อนเพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่หลอดมีฐานรองสำหรับวางโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก(Fe) และ โคบอล(Co) ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา(Chamber) จะมีท่อนำก๊าซซึ่งเป็นก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ เช่น ไอของแอลกอฮอล์หรือมีเทน (CH_4) เป็นต้น เข้ามาภายในระบบ ความร้อนจากหลอดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ $1600\text{--}2000^\circ\text{C}$ จะทำให้โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิสูงและถูกเร่งปฏิกิริยาโดยโลหะตัวเร่งอะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆจะแตกตัวออกจากโมเลกุลของก๊าซและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

โดยทั่วไปวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นได้มีการนำไปใช้งานจริง โดยจะขึ้นกับความต้องการในการใช้งานหรือการวิจัยศึกษาทางด้านนี้ในแต่ละวิธีการสังเคราะห์นั้นจะมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันไป แต่สุดท้ายนี้คงได้คาดหวังกันว่าคาร์บอนนาโนทิวป์นี้จะเป็นวัสดุใหม่ที่ได้สามารถนำมาใช้งานได้จริงในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

โลหะตั้งเร่ง (Catalyst)

3.1. โลหะตัวเร่ง (Catalyst)

คำว่าคะตาไลซิส(Catalysis) มาจากคำภาษากรีกสองคำได้แก่คำว่า คะตะ (Cata) หมายถึง การหัก (down) ส่วนไลซิสมาจากคำว่า ไลไซน์ (Lysein) หมายถึง การแยกหรือการแตก (Split or break) ดังนั้น “ตัวเร่งปฏิกิริยา” จึงมีความหมายว่าเป็นตัวที่ทำให้เกิดการแตกหักของแรงที่เกิดขึ้นบนโมเลกุลและเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็น โมเลกุลขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเบอร์เซเลียสได้ให้คำจำกัดความของตัวเร่งปฏิกิริยาไว้อีกแห่งหนึ่งว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร่งโดยไม่เกิดการสูญเสียในกระบวนการ”

ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการค้นพบในต้นศตวรรษที่ 19 เริ่มจากการค้นพบว่ากรดปริมาณน้อยๆ สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือปฏิกิริยาย่อยสลายแป้ง และต่อมาไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) แสดงให้เห็นว่าแพลทินัมพรม (Pt-sponge) สามารถช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(oxidation) ต่อเอทานอล (ethanol) ที่มีสภาพเป็นไอ หลังจากนั้นเคอเบอโรเนอร์ (J.W.Dobereiner) ค้นพบโลหะแพลทินัม(Pt) สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อแก๊สไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามได้มีการนำเอาแพลทินัมพรมผสมดินเหนียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่มีตัวยึดเกาะหรือตัวพอง(support) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นครั้งแรก ลักษณะทั่วไปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวพองนั้นพบว่าตัวพองสามารถเป็นตัวสนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเพิ่มความสามารถในปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดตัวพองเพิ่มมากขึ้นซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานี้ ได้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะเคลือบบนผิวของซีโอไลต์(Zeolite) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจึงไวต่อปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ในปี ค.ศ.1831 เพเรกรีนฟิลลิปส์(Peregrine Phillips) ได้ทำการทดลองโดยใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO₂) ซึ่งต่อมาสารตัวนี้ได้กลายเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญสำหรับการผลิตกรดซัลฟูริกในทางอุตสาหกรรมในปี ค.ศ. 1836 เบอร์เซเลียส(J.J.Berzelius) ได้กล่าวถึงตัวเร่งปฏิกิริยาว่าเป็นพลังงานตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถแยกส่วนต่างๆของสารประกอบโดยแรงทางเคมี

ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์นั้นแต่ละวิธีก็จะมีการเตรียมกรรมวิธีและเครื่องมือที่จะใช้ในการสังเคราะห์โดยขึ้นกับว่าจะใช้วิธีใด โดยหลักแล้วจะมีการวิเคราะห์ว่าในแต่ละวิธีนั้นจะใช้สารตั้งต้นอะไรเช่น แก๊สอะเซทอลีน (C₂H₂), แอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นต้น แล้วสามารถที่จะสังเคราะห์ได้มาก ในหลาย ๆ วิธีจะต้องมีการเตรียมโลหะตัวเร่ง (Catalyst) เพื่อเป็นฐานรองที่มีสารตัวเร่งโลหะเคลือบอยู่บนผิวหน้าของฐานรอง (substrate) โดยสารตัวเร่งนั้นจะมีหลายชนิดที่ใช้กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni), โคบอลต์ (Co) เป็นต้น ในการที่จะทำฐานรองที่มีตัวเร่งโลหะเคลือบอยู่บนผิวหน้านั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน โดยสารที่เคลือบอยู่บนฐานรองนั้นจะมองแล้วก็เหมือนเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บาง ๆ สารที่สามารถนำมาเป็นโลหะตัวเร่งได้นั้นจะแสดงในตารางธาตุ (รูปที่ 3.1)

H																He																													
Li	He															B	C	N	O	F	Ne																								
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar																								
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																												
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																												
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																												
Fr	Ra	Ac	Unq	Unp	Unh																																								
<table border="1"> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table>																		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																

รูปที่ 3.1 ตารางธาตุ

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในตารางนั้นจะบอกความหมายว่าธาตุชนิดนั้นมีความสามารถที่จะนำมาใช้ในการเป็นโลหะตัวเร่งในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ดีหรือไม่

- สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยม (■) จะบอกถึงว่าธาตุตัวนั้นเมื่อตัวมันเกิดการทำปฏิกิริยาบางอย่างแล้วสามารถที่จะรวมตัวกับก๊าซที่มีสารประกอบของคาร์บอนได้โดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายก็จะได้อาตุนั้นประกอบกับคาร์บอนที่ไปรวมตัวอยู่ ในการที่นำมาเป็นโลหะตัวเร่งในการสังเคราะห์นั้นจะมีโอกาสที่จะเกิดทิวป์ แต่จากการทดลองใช้จริงปรากฏว่ามีการเกิดน้อยมากเกือบจะไม่มีเลย

- สัญลักษณ์รูปข้ามหลามตัด (◆) บอกถึงว่าธาตุชนิดนี้ทำปฏิกิริยาแล้วเมื่อมีก๊าซที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนเข้ามาจะรวมตัวกับธาตุนั้น โดยจะเป็นสารประกอบที่เข้ากันไม่ได้เป็นเนื้อเดียว ผลของการทดลองนำไปสังเคราะห์ปรากฏว่าทิวป์นั้นไม่เกิด

- สัญลักษณ์รูปดาวมีด (★) จะบอกถึงว่าธาตุนั้นเมื่อนำมาเป็นโลหะตัวเร่งในการสังเคราะห์แล้วจะมีอัตราการเกิดของทิวป์ได้ แต่มีความหนาแน่นของทิวป์น้อย

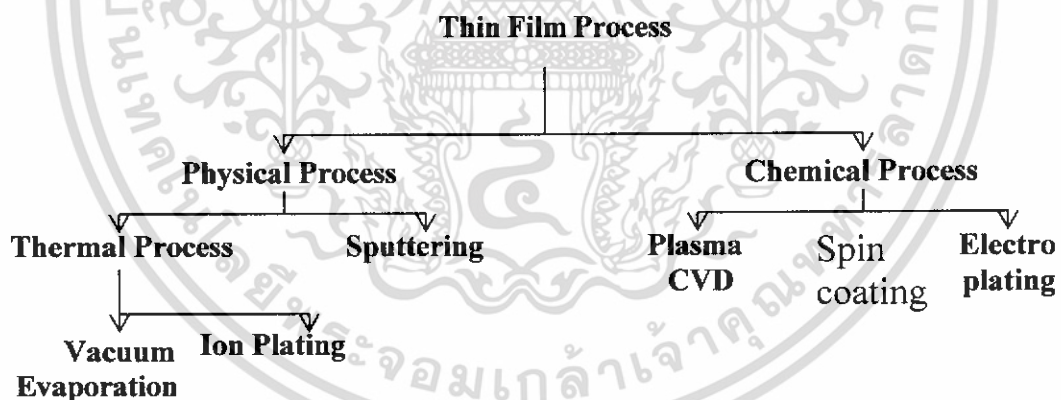
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญลักษณ์รูปดาวใส (☆) ธาตุในจำพวกนี้จะเป็นธาตุที่มีการรวมตัวกับคาร์บอนได้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนผสมอยู่ เมื่อนำไปเป็นโลหะตัวเร่งแล้วอัตราการเกิดนั้นมีมาก จึงเป็นที่นิยมที่จะธาตุจำพวกนี้ในการที่เป็นตัวเร่ง

ในส่วนนี้จะนำนิคมเกิดมาเป็นโลหะตัวเร่งเพราะคาดว่าจะเป็นตัวที่ทำให้ทวีปที่เกิดมีความหนาแน่นมาก และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย

3.2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

การเคลือบผิวเพื่อทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีวิธีการทำได้หลายวิธีโดยการเคลือบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ (1) การเคลือบด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical process) หรือ Chemical Vapor Deposition (CVD) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (new species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี plasma CVD และ วิธี laser CVD เป็นต้น และ (2) การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (physical process) หรือ Physical Vapor Deposition (PVD) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (evaporation) และ วิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering) เป็นต้น

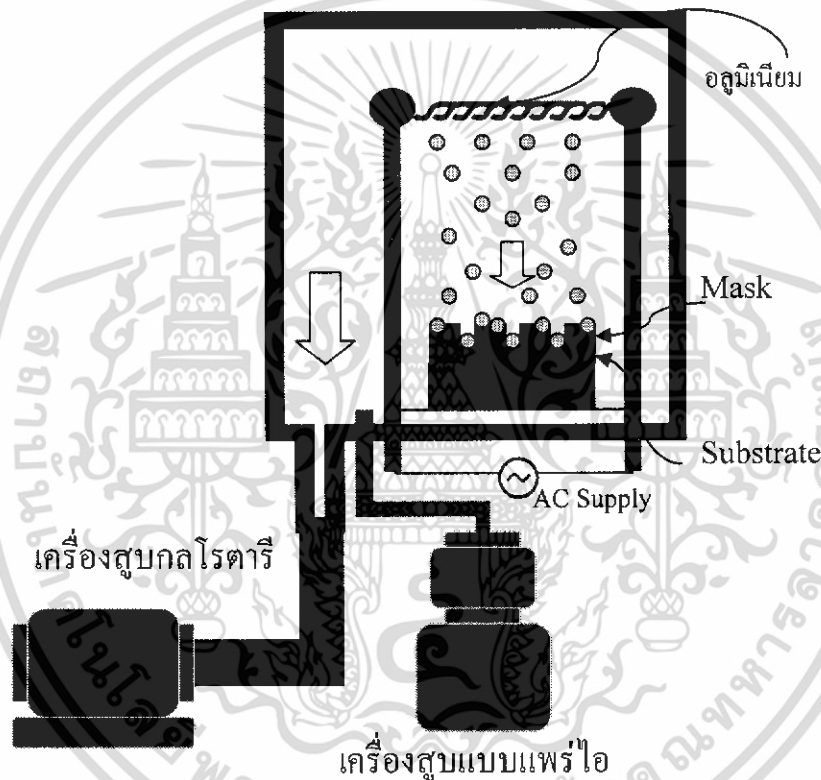


รูปที่ 3.2 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

3.2.1. วิธีการระเหย (Evaporation Deposition)

ในกระบวนการระเหย ไอเกิดขึ้นจากวัสดุที่วางอยู่ในแหล่งที่ถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยวิธีต่างๆ แหล่งการระเหยเป็นที่ที่ให้อัตราการระเหย ส่วนวัสดุพื้น (substrate) วางอยู่ในระยะที่เหมาะสม หน้าหน้าเข้าหาแหล่งการระเหย การเหนี่ยวนำไฟฟ้า การอาร์คลำอิเล็กตรอนหรือเลเซอร์ คือแหล่งความร้อนที่ทำให้วัสดุระเหย วัสดุพื้นจะร้อนขึ้นและทำให้เกิดความดันที่กำหนดและเหมาะสม โดยใช้แหล่งไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง การระเหยจะกระทำในสุญญากาศที่มีความเอกลักษณะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัน 1.3×10^{-3} ถึง 1.3×10^{-5} Pa อะตอมที่ระเหยจากวัสดุเคลือบจะเคลื่อนย้ายเป็นแนวเส้นตรง โดยไม่ชนกันก่อนจะกลั่นตัวบนวัสดุพื้น ทำให้ความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยจะมีตัวจับชั้นงานซึ่งมีแกนเอียงหมุนรอบจับชั้นงานหมุนเพื่อให้วัสดุพื้นเรียบขึ้นขณะทำการเคลือบแบบไอระเหย ในบางกรณีอาจปล่อยแก๊สอาร์กอน(Ar) ที่ความดัน 0.7–30 Pa อัดเข้าไปในห้องเคลือบสุญญากาศ เพื่อให้ไอของอะตอมเกิดการชนกันระหว่างการเคลื่อนย้ายไอจากแหล่งสู่วัสดุพื้น เพื่อสร้างชั้นเคลือบที่มีความหนาสม่ำเสมอบนวัสดุพื้น เทคนิคนี้เรียกว่า “การระเหยแก๊สกระเจิง” หรือ “การเคลือบแบบความดัน”



รูปที่ 3.3 การเคลือบชนิดการระเหย

ด้วยอัตราการเคลือบที่เหมาะสม (100 – 1,000 nm/min) ระยะห่างจากแหล่งถึงวัสดุพื้น 200 mm. ความดันควรอยู่ที่ประมาณ 1.3 Pa โดยควรปรับแต่งความร้อนจากแหล่งความร้อนที่ให้ ความดันไอขนาดนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้โลหะระเหย แสดงแหล่งความร้อนจากเครื่องจ่ายไฟรูปเรือ (Boat Supply) ที่ได้จากไฟกระแสสลับ (ไฟตามบ้าน) วิธีการระเหยที่นิยมที่สุดคือ ลำโพงอิเล็คตรอนที่จะโฟกัสและสแกนบนผิวโลหะ โดยจะมี crucible รองรับโลหะหลอมเหลว (melt) และจะหล่อเย็นด้วยน้ำ จึงมีอายุใช้งานยาวนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการระเหยอีกวิธีหนึ่งที่นิยมกันคือ การอาร์ค(Arc) เพื่อให้ความร้อนแก่โลหะที่เป็นวัสดุเคลือบ โดยการอาร์คจะทำให้อุณหภูมิสูงมากและความร้อนที่ได้จะสม่ำเสมอ โลหะจึงระเหยโดยตรงเกือบจะไม่เป็นของเหลว ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้เบ้า (crucible) รองรับโลหะหลอมเหลว แหล่งที่ทำให้เกิดไอจึงสามารถวางได้ตามสะดวก เช่น เียงหรือคว่ำ แทนที่จะหันขึ้นบน

ระบบการเคลือบแบบอาร์คหลายจุด ซึ่งแสดงเครื่องมือที่จ่ายไฟฟ้า(Discharge) ระหว่างชิ้นงานกับห้องเคลือบสุญญากาศเกิด plasma ของ inert gas เป็นอออนบวก (Cation) และอิเล็กตรอน เนื่องจากวัสดุพื้น (Substrate) เป็นขั้วลบ (Cathode) อออนบวกของวัสดุเคลือบจึงวิ่งชนวัสดุพื้น เคลือบติดที่ชิ้นงานและขณะทำการเคลือบจะต้องหมุนชิ้นงานอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ ข้อดีของการเคลือบด้วยวิธีนี้คือผิวเคลือบจะมีการเกาะติดแน่น โดยคุณสมบัติจะดีขึ้นถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น

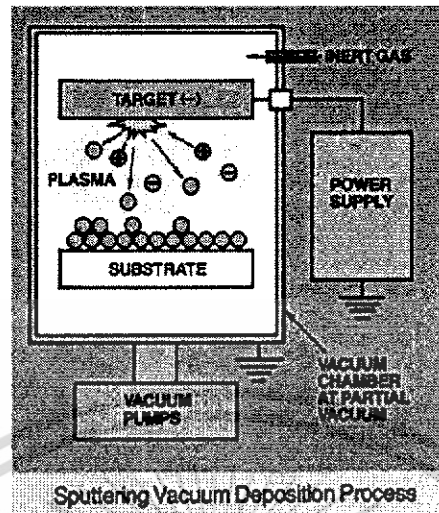
3.2.2. วิธีการ Sputtering

Sputtering เป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทโมเมนตัมจากวัสดุที่ขยับเคลื่อน(projectile) ที่มีพลังงานอยู่ไปยังเป้า (target) ของแข็งหรือของเหลว ก่อให้เกิดการขับอะตอมหรือ โมเลกุลที่ผิว ในกระบวนการเคลือบแบบสปัตเตอร์เป้า(แหล่งวัสดุเคลือบ)และวัสดุพื้นถูกวางอยู่ในสถานะสุญญากาศที่มีความดันในช่วง $13 - 0.013 \text{ MPa}$ ($0.1 - 10^{-4} \text{ mtorr}$) โดย target ต่ออยู่กับขั้วลบ (cathode) ที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าขั้วลบ โดยทั่วไปวัสดุพื้นจะหันหน้าเข้าหา target เมื่อปล่อยแก๊สเฉื่อย(ปกติโดยทั่วไปคือ Ar)เข้าไปในห้องสุญญากาศ ความดันของ Ar อยู่ในช่วง $3 - 20 \text{ Pa}$ จะเกิดการเปล่งแสง (glow discharge) ขึ้น อัตราการหลุดออกของ target (R) หน่วยเป็น อังสตรอมต่อนาที ($\text{\AA}/\text{min}$) คำนวณได้ตามสูตร

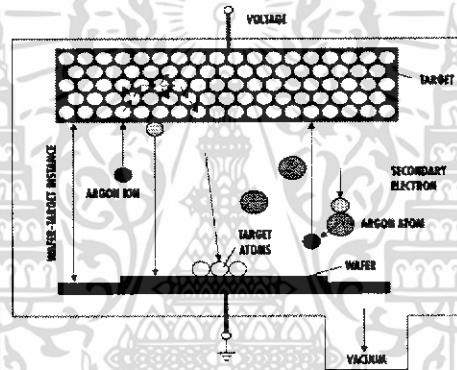
$$R = (62.3) J S Ma P^{-1}$$

โดย

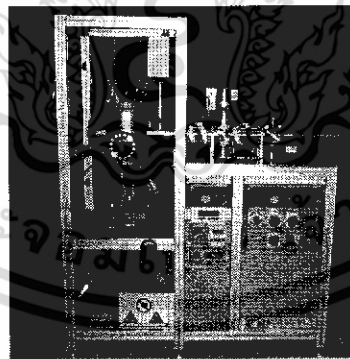
- R = อัตราการหลุดออกของ target
- J = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของอออน (mA/cm^2)
- S = ผลลัพธ์ของสปัตเตอร์ริง (atom/ion)
- Ma = น้ำหนักอะตอม (g)
- p = ความหนาแน่นของ target (g/cm^3)



(a.)



(b.)



(c.)

รูปที่ 3.4 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

หลักการเคลือบ Sputtering แบบธรรมดา ประกอบด้วย Cathode (target) และ Anode ที่หันหน้าเข้าหากันวัสดุพื้น (substrate) วางอยู่บน Anode โดยเป้าหรือ target (ซึ่งมักมีน้ำหล่อเย็น) ทำหน้าที่สองอย่างระหว่างกระบวนการอย่างแรกคือเป็นแหล่งวัสดุเคลือบและอีกอย่างคือเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่คอยจ่ายไฟฟ้าให้เปล่งแสงอย่างต่อเนื่องระหว่างระหว่าง Cathode กับ Anode โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 50 – 100 mm

กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาเพิ่มขึ้นตามความดันไฟฟ้าที่ป้อนให้จึงเพิ่มอัตราการสปีดเตอริง แต่กระแสไฟฟ้าไม่ได้แปรผันตรงตามความดันไฟฟ้าโดยตลอด แต่อัตราการสปีดเตอริงเพิ่มขึ้นได้ ถ้าความดันแก๊สทำงานเพิ่มขึ้นที่ความดันไฟฟ้าที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม อัตราการเคลือบเริ่มลดลงที่ความดันแก๊สสูง เนื่องจากเกิดการกระเจิงของแก๊สทำให้อะตอมหลุดออกมา สามารถหาค่าอัตราการเคลือบได้จากความหนาแน่นของกำลังที่ผิวเป้า ขนาดพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะออก ระยะห่างของ แหล่งกับวัสดุพื้น ความดันแก๊ส (Working gas) ปัจจัยเหล่านี้บางตัวก็มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เช่น ความดันกับ ความหนาแน่นของกำลังไฟ ดังนั้นเงื่อนไขที่จะทำงานได้เหมาะสมที่สุดจึงเป็นการควบคุมตัวแปรต่างๆ เพื่อให้ได้ พลังงานที่มากที่สุดที่จะให้กับเป้าได้โดยไม่ทำให้แตกเสียหาย ไม่ระเหิดหรือละลาย โดยพลังงานสามารถเพิ่มขึ้น ได้ถ้าอัตราการหล่อเย็น (cooling) ของเป้าเพิ่มขึ้น โดยการออกแบบการไหลของสารหล่อเย็นอย่างเหมาะสม และการ ปรับปรุงการนำความร้อนระหว่างเป้าและแผ่นวัสดุที่ติดอยู่กับเป้า

แม้ว่าเทคนิคการเคลือบ Sputtering แบบธรรมดา นี้ จะมีการใช้กันกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายในการผลิตเป้าวัสดุต่างๆ แต่ก็มีข้อเสียหลายประการ คือ อัตราการเคลือบต่ำ วัสดุพื้นร้อนขึ้นจากการชนของอนุภาค ที่มีพลังงานสูง และพื้นที่ผิวเคลือบที่ได้มีขนาดเล็ก

การเคลือบแบบลำไอออน (Ion sputtering) เป็นการพัฒนาการเคลือบ Sputtering แบบใหม่ เรียกว่า “สปีดเตอริงแบบลำไอออน” ลักษณะการเคลือบที่ได้นั้นจะมีการเคลือบที่ติดแน่นมากขึ้น

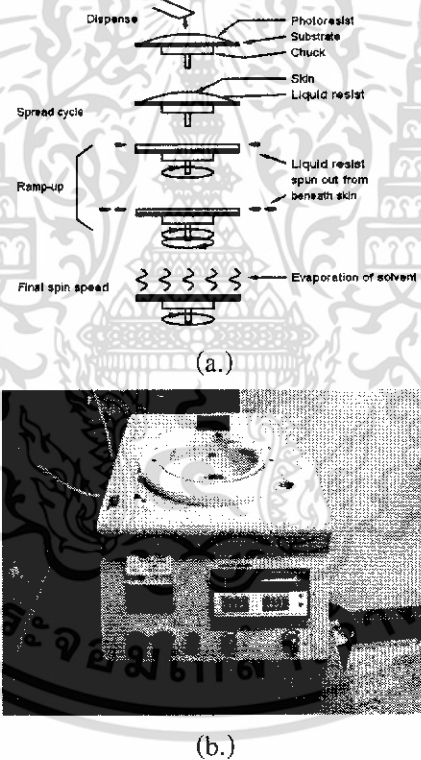
สำหรับการเคลือบ โดยวิธีนี้ ลำไอออนที่มีพลังงานสูง (หลายร้อยถึงหลายพัน eV) จากแหล่งไอออนถูกส่งไปเป้า ทำ sputter ของวัสดุที่กำหนด ใช้แก๊สเฉื่อย วัสดุพื้นวางอยู่ในที่เหมาะสมเพื่อรวมเอา species ที่ถูก sputter จากเป้า (รูปที่ 3.4) ใช้แหล่งไอออนปฐมภูมิ (primary ion) สองแหล่งในการเคลือบฟิล์มบาง

จากการที่วัสดุพื้นแยกออกจากแหล่งสร้างพลาสมา การเคลือบแบบลำไอออนจึงควบคุมอุณหภูมิของวัสดุพื้น ความดันแก๊สและชนิดของอนุภาคที่ชนฟิล์มที่กำลังโตขึ้นได้ นอกจากนี้ยังควบคุมพลังงานและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเป้าอย่างอิสระได้ด้วยเทคนิคนี้

โดยทั่วไปอัตราการเคลือบในสปีดเตอริงแบบลำไอออน (50 nm/min) มีค่าต่ำกว่าสปีดเตอริงแบบเก่า พื้นที่การเคลือบที่มีขนาดเล็กเนื่องจากขนาดลำไอออนเล็ก (ประมาณ 10 mm.) เป็นข้อเสียอีกข้อหนึ่งของสปีดเตอริงแบบลำไอออน แต่ได้มีการปรับปรุงเครื่องกำเนิดไอออนเพื่อให้มีขนาดลำไอออนเพิ่มขึ้นเป็น 100 mm.

3.2.3. วิธีเคลือบด้วยสปินเนอร์ (Spin coating)

ในการเคลือบทางด้านการผลิตวงจรรวมจะนิยมวิธีนี้กันมากสำหรับใช้ในการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นซิลิคอน จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุนหรือ สปินเนอร์ (Spinner) โดยเป็นแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์รอบสูง โดยแผ่นที่ต้องการเคลือบนั้นจะถูกวางลงบนแท่น และจะถูกยึดติดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นก็จะหยคน้ำยาที่ต้องการเคลือบลงบริเวณตรงกลางของแผ่นด้วยปริมาณที่พอเหมาะ ด้วยความเร็วที่ใช้นั้นน้ำยาจะถูกแรงเหวี่ยงทำให้กระจายออกไปโดยรอบ (รูปที่ 3.5) เป็นฟิล์มบาง เคลือบบนแผ่น ความหนาของชั้นเคลือบนั้นขึ้นกับความเร็วยรอบที่ใช้ในการหมุน และโดยบริเวณที่ทำการเคลือบควรทำความสะอาดให้ดีที่สุดเพื่อป้องกันการเคลือบของผิวในแต่ละจุดนั้นมีความหนาไม่เท่ากัน ความเร็วที่ใช้อยู่จะประมาณ 2,000 รอบต่อนาที

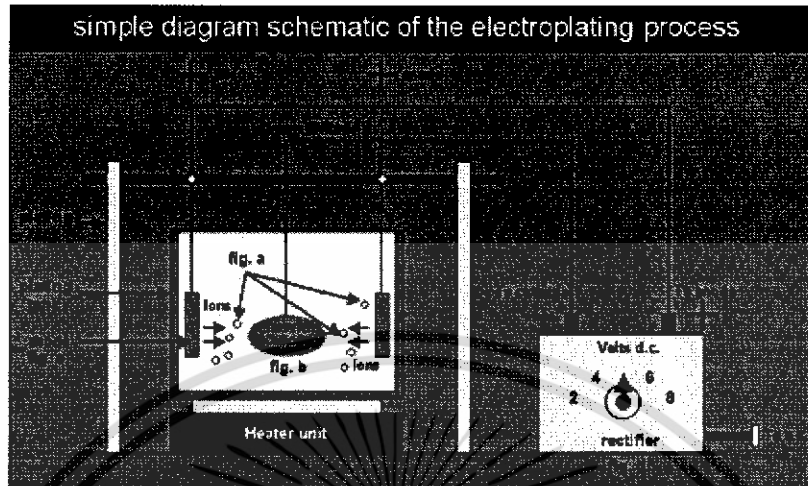


รูปที่ 3.5 การเคลือบแบบ Spin coating

3.2.4. วิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

วิธีนี้จะเป็นการเคลือบโดยใช้ไฟฟ้าโดยจะเป็นการให้การแตกตัวของไอออนบวกและลบในสารละลายที่ใช้เพื่อให้โมเลกุลของโลหะที่ได้ออกมาไปเกาะบนแผ่นฐานรอง (Substrate) หลักการของวิธีนี้จะใช้สารละลายที่มีโลหะผสมอยู่แล้วใช้กระแสไฟฟ้าจ่ายให้เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น (รูปที่ 3.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

ที่ขั้วลบ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าผ่านสารละลายแล้วจะทำให้ไอออนบวกเคลื่อนไปหาขั้วลบจะเคลื่อนไปหาขั้วลบ โมเลกุลของน้ำจะจับ Electron จากขั้วลบ แยกตัวเป็น hydrogen atom และเกิดเป็น hydrogen gas เหลือ hydroxide ions อยู่ในสารละลาย



ดังนั้นสารละลายที่อยู่ใกล้กับขั้วลบ จะมีคุณสมบัติเป็นด่าง (Alkaline) H_2 ที่เกิดขึ้นจะเป็นฟองขนาดเล็ก เกิดขึ้นเร็ว

ที่ขั้วบวก ไอออนที่มาจากจะเป็นไอออนลบที่ได้จากสารละลายเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านที่ขั้วบวกนั้นไอออนลบของสารละลายจะปล่อยอิเล็กตรอน และเปลี่ยนเป็น Neutral atoms ซึ่งเกิดเป็นก๊าซบางส่วนจะเข้าไปปฏิกิริยากับน้ำดังนั้นสารละลายที่อยู่ใกล้กับขั้วบวกจะเปลี่ยนเป็นกรด ฟองอากาศของ O_2 ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และเกิดขึ้นช้า

ผลของรูปคลื่นต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ขั้ว

1. กระแสสลับ หรือ Pulsed current ผลทางเคมีจะเกิดขึ้นน้อยกว่ากระแสไฟตรง
2. Biphasic waveform ชนิด balanced charge ที่มี zero net DC component คือมีพื้นที่ใน phase บวก เท่ากับพื้นที่ใน phase ลบ ทำให้ไม่เกิดผลของขั้ว (net polar effect) ขึ้นจึงไม่มีประจุบวกและประจุลบสะสมได้ขั้วเป็นเวลานาน ทำให้ไม่เกิดภาวะความเป็นกรด-ด่างได้ขั้ว

ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

ปริมาณของปฏิกิริยาทางเคมีจะแปรผันตามปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน ซึ่งสัมพันธ์กับ

1. ความเข้มของกระแส: ความเข้มสูง ปริมาณกระแสมาก
2. ชนิดของกระแส (เช่น เป็นกระแสไฟตรง, กระแสแบบ pulsed) ถ้าความเข้มของกระแส

เท่ากัน กระแสไฟตรงจะมีปริมาณกระแสไหลผ่านมากกว่ากระแส pulse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ระยะเวลาที่กระแสไหล

ผลทางเคมีของกระแสไฟฟ้ายังสามารถใช้ประโยชน์ในแง่ของการทดสอบขั้ว ในกรณีที่ไม่ทราบชนิดของขั้ว ซึ่งสามารถทดสอบได้ 2 วิธี คือ

1. โดยการจุ่มขั้วลงในน้ำที่มีสารละลาย และสังเกตฟองอากาศที่เกิดขึ้น
 - ฟองอากาศขนาดเล็ก เกิดเร็ว แสดงว่าเป็นขั้วลบ
 - ฟองอากาศขนาดใหญ่เกิดช้า แสดงว่าเป็นขั้วบวก
2. โดยการใช้กระดาษลิตมัสจุ่มน้ำ และวางขั้วกระดุนลงบนกระดาษลิตมัส
 - ถ้ากระดาษลิตมัสเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่าเกิดต่าง ขั้วนั้น เป็นขั้วลบ
 - ถ้ากระดาษลิตมัสเปลี่ยนเป็นสีแดง แสดงว่าเกิดกรด ขั้วนั้น เป็นขั้วบวก

ตารางที่ 3.1 ผลทางเคมีได้ขั้วของกระแสไฟตรง

ผลที่เกิดขึ้น	ได้ขั้วบวก	ได้ขั้วลบ
อ็อนที่วิ่งเข้าหา	อ็อนลบ	อ็อนบวก
ความเป็นกรด / ต่าง	กรด	ต่าง
gas ที่เกิดได้ขั้ว (ถ้าใช้น้ำเป็นตัวกลาง)	O ₂	H ₂
ผลในการดูดซึมน้ำเข้า-ออกเนื้อเยื่อ	ผลึกน้ำออก	ดูดซึมน้ำเข้า

3.3 รูป

Catalyst เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบที่ใช้ในการสร้างคาร์บอนนาโนทิวป์ ในการเตรียมโลหะตัวเร่่งนั้นสามารถที่จะสร้างได้หลายวิธีโดยจะมีการสร้างโลหะให้ทั่วผิวหน้าของฐานรอง อาจจะเป็นการทำด้วยวิธีสปีดเตอริงหรือการสปิ้นนิ่ง แต่เมื่อเราต้องการที่จะบังคับให้ส่วนใดส่วนหนึ่งบนผิวหน้าของฐานรองมีโมเลกุลของโลหะตัวเร่่งเกาะอยู่เราก็สามารถที่จะทำได้โดยการใช้สารไวแสงหรือ Resist ที่ใช้การป้องกันโดยทำเป็นช่องหรือลายที่ต้องการให้มีโมเลกุลของตัวเร่่งอยู่ อาจจะเป็นการใช้วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าหรือใช้การระเหยอะตอมสาร โดยวิธีในการเตรียมโลหะตัวเร่่งสามารถเลือกได้ว่าจะใช้วิธีใดขึ้นกับความต้องการ เพราะในแต่ละวิธีการทำนั้นก็จะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป ในส่วนนี้จะเป็นการเน้นในการเตรียมด้วยวิธีการหุบเคลือบด้วยไฟฟ้า เป็นหลักในการทำเพราะวิธีนี้เป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายเวลา และลดความยุ่งยากในกระบวนการทำได้มากกว่าวิธีอื่น



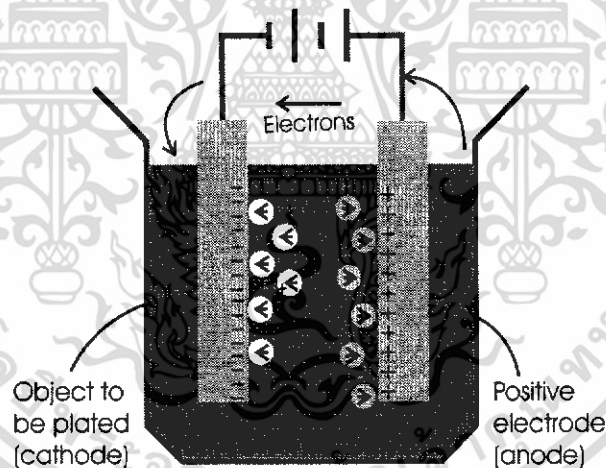
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

4.1. หลักการของการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

เมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์ อนุภาคเล็ก ๆ พวกหนึ่งของอิเล็กโทรไลต์จะวิ่งไปยังแอโนด (Anode) หรือขั้วบวก อนุภาคเล็ก ๆ อีกพวกหนึ่งจะวิ่งไปยังแคโทด (Cathode) อนุภาคเล็ก ๆ อิเล็กโทรไลต์ที่วิ่งไปเกาะที่ขั้วบวกหรือลบบนั้นเรียกว่า อีออน (Ions) แต่ละอีออนจะมีประจุไฟฟ้าประจำตัวอยู่ อีออนที่วิ่งไปที่ขั้วบวกเรียกว่า แอนไอออน (Anions) จะมีประจุไฟฟ้าลบ (-) ส่วนอีออนที่วิ่งไปยังขั้วลบเรียกว่า แคทไอออน (Cations) จะมีประจุไฟฟ้าบวก (+) (รูปที่ 4.1) ขณะที่เกิดการแตกตัวในสารละลายนั้น เราจะมองไม่เห็นปฏิกิริยาใด ๆ เกิดขึ้นในสารละลาย แต่จะไปเห็นปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ขั้วลบ หรือขั้วบวก โดยจะปรากฏว่ามีฟองแก๊ส ออกซิเจนเกิดขึ้นที่ขั้วบวก และมีฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วลบ เป็นต้น



รูปที่ 4.1 แสดงระบบของ Electroplating

การทำให้โลหะนั้นไปเคลือบบนโลหะอีกชนิดหนึ่งโดยกรรมวิธีเคมี - ไฟฟ้า โดยจุ่มชิ้นงานที่ต้องการลงไปชุบในสารละลาย แล้วต่อเข้ากับขั้วลบ (-) ของกระแสไฟฟ้าตรง (D.C. Current) ที่ผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ซึ่งเรียกว่าขั้วลบและมีการต่อตัวต่อ (Anode) ต่อเข้ากับขั้วบวกของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า แล้วปรับปริมาณทางไฟฟ้าคือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) และกระแสไฟฟ้า (Current) ให้เหมาะสม ก็จะทำให้อีออนของโลหะที่ต้องการจะเคลือบวิ่งไปขั้วลบที่มีชิ้นงานอยู่แล้วบนผิวจะมีโลหะที่ต้องการเคลือบอยู่ ส่วนขั้วบวกถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับโลหะที่ไปเคลือบที่ผิวก็จะละลายอยู่ในรูปไอออนบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎฟาราเดย์ (Faraday 'Law)

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยขั้วแคโทดและแอโนด โลหะจะละลายจากแอโนดหรือมีออกซิเจนเกิดขึ้นที่แอโนด และจะได้โลหะมาเกาะจับที่แคโทดหรือมีไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่แคโทด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย และระยะเวลาของการปล่อยให้กระแสผ่าน ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสองไว้ดังนี้

กฎข้อที่หนึ่ง น้ำหนักของไอออนที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระ โดยกระแสไฟฟ้าข้อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้

กฎข้อที่สอง น้ำหนักของไอออนชนิดต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระ โดยปริมาณไฟฟ้าเท่า ๆ กันข้อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลเคมีของไอออนเหล่านั้น

จากกฎข้อที่หนึ่ง สามารถนำมาใช้ในการชุบเคลือบได้ คือเราต้องการให้โลหะมาเกาะจับมีความหนาเราอาจจะทำได้ 2 วิธีคือ ใช้กระแสไฟฟ้าน้อย แล้วใช้เวลานาน หรือเราให้กระแสมากแต่ใช้เวลาสั้น ก็จะได้โลหะไปเกาะจับที่แคโทดมีปริมาณที่เท่ากัน

จากกฎข้อที่สอง โลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายไม่เหมือนกันคือ ในปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่า ๆ กัน โลหะแต่ละชนิดจะแตกตัวออกมาปริมาณไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดจะมีการแตกตัวทางเคมีออกมาน้อย โลหะบางชนิดออกมามาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหรือสมมูลเคมีของโลหะนั้น ๆ

4.2. ชนิดของโลหะที่ชุบเคลือบ

ในการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้านั้นได้มีการนำไปใช้งานมากในทางด้านอุตสาหกรรมของยานยนต์ และทางเครื่องประดับต่าง ๆ เพราะเป็นวิธีการที่ง่ายและราคาถูก แม้การเกาะติดของผิวที่ทำการเคลือบนั้นจะมีการเกาะติดไม่ดีเท่าการใช้วิธีสัปดาห์หรือวิธีอื่น ๆ เมื่อเทียบแล้ววิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าจะมีการเตรียมขบวนการง่ายและ ประหยัด ในการชุบนั้นได้นำมาใช้ในหลายด้าน โดยจะมีการนำไปชุบได้หลายแบบด้วยกันดังเช่น

- การชุบทองแดง
- การชุบนิกเกิล
- การชุบทอง
- การชุบโครเมียม
- การชุบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์
- อื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชุบที่นำไปใช้ในหลาย ๆ ด้านนั้นจะมีการทำไปเพื่อให้วัตถุนั้นมีความคงทนในการใช้งานเพื่อความสวยงามของชิ้นงาน การเกาะติดของการชุบในแต่ละชนิดของโลหะที่ใช้ใช้นั้นจะมีกรรมวิธีการทำที่ไม่แตกต่างกันมากนักแต่จะมีความแตกต่างทางด้านเทคนิคในการทำของแต่ละบุคคล ในส่วนนี้จะเป็นการนำวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้านั้นมาประยุกต์ใช้ในการทำมาร์สตามต้นแบบหรือลวดลายที่ต้องการ

4.3. อุปกรณ์ที่สำคัญในการชุบเคลือบ

4.3.1. สารละลาย

สารละลายที่ทำการชุบจะต้องนำไฟฟ้าได้จึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ครบวงจรฉะนั้นในสารละลายจึงมีสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนบวกและลบเมื่อละลายน้ำ ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเป็นตัวนำไฟฟ้าให้ไหลครบวงจร คือไอออนบวกก็จะนำกระแสไปยังขั้วลบเพื่อรับอิเล็กตรอน ส่วนไอออนลบจะวิ่งไปยังขั้วบวกเพื่อจ่ายอิเล็กตรอนให้กับขั้วบวก ปรากฏการณ์เหล่านี้จะเกิดภายในตลอดขณะทำการชุบ สารละลายที่ใช้ชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าจะประกอบด้วยสารเคมีที่สำคัญคือ

- สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะ สารละลายแต่ละชนิดมีตัวกำเนิดโลหะ ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับว่าต้องการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะชนิดใดหรือต้องการชุบด้วยนิเกิลก็ต้องมีนิเกิลซัลเฟต (NiSO_4) หรือนิเกิลคลอไรด์ (NiCl_2) ละลายอยู่ในน้ำเพราะสารเหล่านี้จะแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ Ni^{2+} จะเป็นตัวเคลื่อนไปเคลือบบนชิ้นงานที่เป็น โลหะ

- สารที่ช่วยเพิ่มในการนำไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเป็นพวกกรดหรือด่างเช่น กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจะช่วยทำให้อัตราเร็วในการเคลือบผิวดีขึ้น

- สารควบคุมระดับ pH การที่สารละลายอยู่ในสภาพการใช้งานจะต้องมีค่า pH ที่เหมาะสมของแต่ละชนิด ฉะนั้นจึงควรที่จะต้องมีสารที่ควบคุมระดับ pH ลงไป กรดบอริกจะทำหน้าที่ดูดซึมไฮโดรเจนไอออนซึ่งที่มากเกินไปและเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออนซึ่งเป็นสภาพกรดบอริกที่ไม่แยกสลายตัวหรือเปลี่ยนไฮดรอกซิลด์ไอออนซึ่งให้เป็นบอเทอไอออนซ์และน้ำ

- น้ำยาเงา (Brightener) ในการชุบจะต้องเติมน้ำยาเงาลงไปเพื่อให้ชิ้นงานมีลักษณะแวววาว

- สารรักษาระดับการเคลือบให้สม่ำเสมอ (Leveler) จะเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีซัลเฟอร์รวมอยู่ได้แก่ คูมาริน (Coumarin) ซึ่งจะช่วยให้ลดความเป็นรูบนชิ้นงาน

- สารเพิ่มความชื้น (Wetting agent) เป็นสารที่สำคัญในการชุบมากในการชุบโลหะเงา เพราะจะลดแรงตึงผิวของสารละลายลง โดยปกติแล้วน้ำยาเงา สารรักษาระดับ และสารเพิ่มความชื้น เรียกรวม ๆ กันว่า น้ำยาเงา

4.3.2. ตัวล่อ (Anode)

ในการชุบด้วยโลหะต่างๆ นั้นจะต้องมีองค์ประกอบหลักคือตัวล่อที่จะมีไว้ที่ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อเป็นตัวที่ทำปฏิกิริยา และอีกส่วนที่มีความสำคัญมากคือสารละลายหรืออิเล็กโทรไลต์ที่มีส่วนผสมของโลหะที่ต้องการชุบ ในส่วนนี้จะเน้นวิธีการที่จะใช้โลหะนิกเกิลในการชุบ โดยน้ำยาชุบจะต้องประกอบด้วยเกลือนิกเกิลแล้วตัวล่อจะต้องเป็นโลหะนิกเกิลด้วย ซึ่งโลหะนิกเกิลนี้จะต้องผ่านการถลุงมาจากโรงงาน และทำออกมาเป็นหลายลักษณะเช่น นิกเกิล Strip, นิกเกิล Oval, นิกเกิล Squares, นิกเกิล Round, นิกเกิล Pellets (รูปที่4.2)



รูปที่ 4.2 ตัวล่อนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของนิกเกิล Squares, นิกเกิล Round, นิกเกิล Pellets เวลาใช้งานนั้นต้องตะกร้าตีเคเนี่ยมแล้วทำการสวมใส่ถุงผ้าอีกชั้นเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกที่จะร่วงออกมาจากตัวล่อนิกเกิลเป็นเหตุทำให้น้ำยาชุบเกิดความสกปรกขึ้น

4.3.3. แหล่งจ่ายไฟ

การชุบนั้นแหล่งจ่ายไฟเป็นสิ่งที่เป็นตัวที่ใช้ในการควบคุมการกำหนดว่าต้องการความหนาของชั้นเคลือบโดยจะกำหนดอยู่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าในการชุบ จากกฎของฟาราเดย์ที่กล่าวไว้ข้างต้น จะมีการแปรผันกันระหว่างกระแสที่จ่ายให้ในระหว่างการชุบกับเวลาที่ใช้ โดยในการที่เราใช้นั้นจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นส่วนใหญ่เพราะมีการเกาะตัวของโลหะในสารละลายได้ดีกว่าการที่จะใช้การจ่ายเป็นแบบพัลส์ ในการที่จะทำการจ่ายกระแสให้กับการชุบนั้นเราต้องกำหนดว่าเราต้องการที่จะให้กระแสที่มีลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (mA/cm²) จากนั้นทำการหาค่ากระแสของพื้นที่ที่ต้องการทั้งหมดเพื่อจะจ่ายให้ในการชุบ โดยจะหาได้จากสูตรของการหากระแสดังนี้

$$I = \frac{J}{A}$$

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์: A)

J = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ (A/cm²)

A = ขนาดของพื้นที่ (cm²)

4.3.4. อุปกรณ์อื่น ๆ

ถังที่ใช้ในการชุบการเลือกถังที่ใช้นั้นถ้าสารละลายมีส่วนผสมของกรดที่กัดโลหะต้องเลือกถังที่เป็นพลาสติกที่ป้องกันความร้อนได้สูงหรือเป็นแก้ว เพื่อป้องกันการที่น้ำยาชุบไปทำปฏิกิริยากับถังชุบ ขนาดของถังนั้นจะต้องเลือกให้มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงาน โดยดูจากชิ้นงานที่ทำการชุบมีว่าขนาดใหญ่หรือเล็กและลักษณะของชิ้นงาน ให้ถังชุบมีความสูงพอประมาณไม่เตี้ยเกินไป

ตัวกวนน้ำยาชุบจะใช้เป็นการแรงลมใช้ในการกวนน้ำยาชุบให้มีการทำปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง โดยจะใช้ปั๊มลมเป็นตัวที่เป่าลมเข้าไป การกวนน้ำยา จะทำให้ใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้ชุบได้หนาโดยเวลาน้อยลง และทำให้ความเข้มข้นของน้ำยาเท่ากันตลอดถัง

คานแขวนจะเป็นโลหะหรือแท่งแก้วตันก็ได้โดยจะใช้เพื่อให้เป็นขั้วไฟฟ้าที่จะต่อกับชิ้นงานที่นำไปแขวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4. การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

ความสะอาดของชิ้นงานเป็นสิ่งจำเป็นมากการชุบ ถ้าหากชิ้นงานไม่ได้ผ่านการทำความสะอาดที่ถูกต้องแล้ว อาจจะทำให้ผลการชุบออกมาไม่ได้ผลเท่าที่ควร ดังนั้นการทำความสะอาดอย่างหมจดจึงนับว่าสำคัญ ประสิทธิภาพของการชุบนั้นขึ้นกับการเกาะติดแน่นของเนื้อโลหะกับชิ้นงานที่ทำการชุบ การทำความสะอาดชิ้นงานแต่ละกรรมวิธีที่ทำให้ผิวสะอาดคือการกำจัดคราบไขมัน, น้ำมัน และรอยเปื้อน การชุบเคลือบบนผิวที่สกปรกจะทำให้ผิวงานที่ผ่านการชุบนั้นลอกออกง่ายการทำความสะอาดและกรรมวิธีของการเตรียมชิ้นงานก่อนการชุบนั้นมีวิธีการหลากหลายดังนี้

- การกำจัดไขมัน หรือการทำความสะอาดขั้นแรก (Degreasing)
- การล้างด้วยน้ำต่างร้อน (Soak clean)
- การล้างด้วยไฟฟ้า (Electro-clean)
- การทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic clean)
- การทำความสะอาดด้วยกรด หรือจุ่มล้างชิ้นงานให้เป็นเงา (Pickling and Dipping)

4.4.1. การกำจัดไขมันด้วยไอระเหย (Vapor Degreasing)

การเอาน้ำมันหรือไขมันออกจากชิ้นงานที่ทำการชุบด้วยการนำเอาชิ้นงานลงในไตรคลอโรเอททีลีน (Trichloroethylene) ซึ่งไตรคลอโรเอททีลีนนั้นต้องบรรจุในถังซึ่งมีเครื่องทำความร้อนอยู่ได้ถัง และมีท่อขดทำความเย็นอยู่บริเวณของปากถัง เวลาใช้งานไตรคลอโรเอททีลีนต้องให้ความร้อนซึ่งมีจุดเดือดที่ 86 องศา เมื่อถึงจุดเดือดก็จะเป็น ไอระเหยขึ้นมากระทบกับความเย็นก็กลั่นตัวโดยท่อขดที่ทำความเย็นกลับสู่ในถังอีก เมื่อจุ่มชิ้นงานลงในไตรคลอโรเอททีลีน ไอระเหยจะถูกกลั่นตัวบนผิวงาน ทำการชำระล้างไขมันหรือน้ำมันลงสู่ถัง

4.4.2. การล้างด้วยน้ำต่างร้อน (Soak clean)

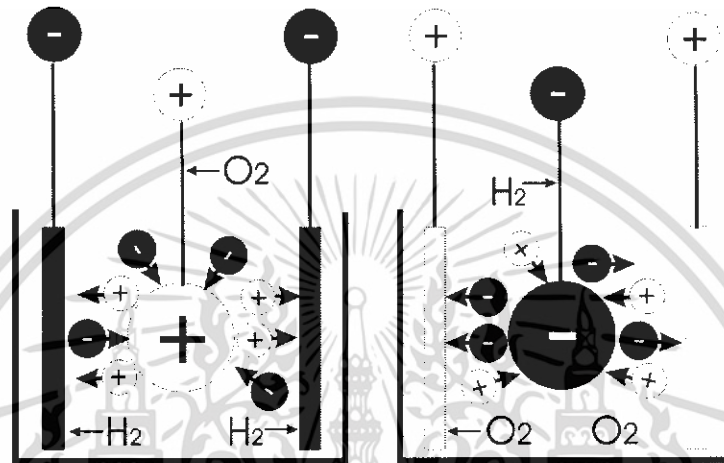
วิธีนี้เป็น การล้างขั้นแรก โดยงานที่ผ่านจากการขัดเตรียมผิวมาแล้ว ควรที่จะล้างด้วยต่างร้อนเสียขั้นหนึ่งก่อน เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดหมดจดในการล้างขั้นต่อไป ถังที่ใช้บรรจุนั้นทำด้วยเหล็กหรือสแตนเลส ภายในติดตั้งเครื่องให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า โดยจะมีบ้ำสำหรับให้ฟองล้นออก และสิ่งสกปรก ฟองที่ลอยอยู่บนผิวของน้ำจะไม่เกาะที่ผิวชิ้นงาน น้ำยาผสมได้ตามสูตรดังนี้

โซเดียมไฮดรอกไซด์	15	กรัม/ลิตร
ไตรโซเดียมฟอสเฟต	25	กรัม/ลิตร
โซเดียมคาร์บอเนต	25	กรัม/ลิตร
โซเดียมเมตาซัลไฟด์	8	กรัม/ลิตร
อุณหภูมิ	60-70	องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3. การล้างด้วยไฟฟ้า (Electro Clean)

การทำทำความสะอาดด้วยไฟฟ้าคือการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านลงไปใต้น้ำยาอ่างที่ร้อน ประมาณ 60-90 องศาเซลเซียส การทำความสะอาดด้วยไฟฟ้าไม่เหมาะต่อการใช้ทำความสะอาดสะอาดครั้งละมาก ๆ ส่วนผสมของน้ำยาอาจใช้อาจใช้น้ำยาที่ผสมสำเร็จหรือผสมเอง (รูปที่ 4.3)

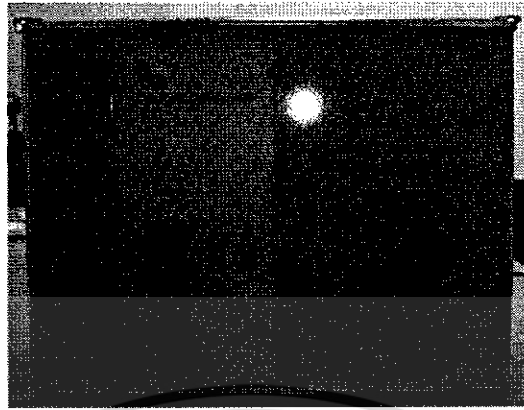


รูปที่ 4.3 การล้างด้วยไฟฟ้า

การล้างโดยใช้ให้ชิ้นงานเป็นขั้วลบ และขั้วบวกเป็นแผ่นเหล็ก เรียกว่า Cathode clean ส่วนการล้างโดยใช้ชิ้นงานเป็นขั้วบวกและ ขั้วลบเป็นแผ่นเหล็กเรียกว่า Anode clean โดยความหนาแน่นที่ใช้ในการล้างด้วยไฟฟ้า โดยงานทั่วไปใช้ประมาณ 5-10 A/dm² เวลา 1-2 นาที ส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าประมาณ 4-6 Volt การทำความสะอาดด้วยงานที่เป็นขั้วบวก ถ้าใช้แรงเคลื่อนและกระแสสูงเกินกว่ากำหนด จะทำให้ผิวงานเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนหรือผิวเปลี่ยนสีไป ถ้าเกิดการเปลี่ยนสีควรที่จะลดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลง

4.4.4. การทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค(Ultrasonic clean)

การทำทำความสะอาดด้วยระบบความถี่สั้นแรงของคลื่นอย่างสูง ประโยชน์ของการทำความสะอาดแบบนี้ส่วนมากใช้กับงานที่เป็นชิ้นเล็ก ๆ (รูปที่ 4.5)



รูปที่ 4.4 เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic)

4.4.5. การทำความสะอาดด้วยกรด หรือจุ่มล้างชิ้นงานให้เป็นเงา (Pickling and Dipping)

การกัดด้วยกรดกำมะถันเจือจางใช้สำหรับกัดสนิมเหล็กบาง ๆ เหล็กกล้า, ทองแดง, ทองเหลือง, นิกเกิลเงา, และทองแดงผสมอื่น ๆ การกัดด้วยกรดเกลือใช้กัดสนิมได้ดีมาก

4.5. ขั้นตอนการชุบอย่างง่าย

ในการชุบเคลือบนั้นจะต้องมีการเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการชุบให้เรียบร้อย จากนั้นทำการเตรียมชิ้นงานนำชิ้นงานที่ต้องการชุบมาทำความสะอาด โดยดูถึงความสะอาดของชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานมีความสกปรกมากให้ทำการขัดชิ้นงานให้รอยสนิมหรือคราบสกปรกออกให้หมด แล้วนำชิ้นงานไปทำความสะอาดขจัดคราบน้ำมันตามวิธีต่างๆ ข้างต้น การที่จะสังเกตถึงความสะอาดของชิ้นงานว่าสะอาดจะดูได้จากน้ำที่ใช้ล้างถ้าสะอาดจะไม่มีรอยคราบใด ๆ ติดบนผิวหน้าของชิ้นงาน หลังจากได้ชิ้นงานที่สะอาดแล้ว ทำการเตรียมถังที่ใช้ชุบพร้อมน้ำยาชุบที่ต้องการเช่น ชุบทอง, นิกเกิล, โครเมียม และอื่น ๆ โดยส่วนผสมของน้ำยาชุบที่จะใช้มีส่วนผสมที่ต่าง ๆ กัน ในการชุบนั้นจะนำชิ้นงานที่ต้องการไว้ที่ตำแหน่งของจั่วลอบ และขั้วลอบนั้นจะเป็นตัวล่อตามชนิดของการชุบ การชุบในแต่ละครั้งจะต้องมีการตรวจสอบน้ำยาชุบทั้งก่อนและหลังจากการชุบทุกครั้ง เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ดีไม่เกิดปัญหาบนผิวของชิ้นงาน

4.6. วิธีการแก้ไขและตรวจสอบ

4.6.1. วิธีการกำจัดเหล็กออกจากน้ำยาชุบนิกเกิล

ในน้ำยาชุบหากมีเศษโลหะที่เป็นเหล็กตกลงไปในน้ำยาชุบนิกเกิลมาก ๆ จะทำให้ผิวนิกเกิลที่ได้ออกมานั้นเปราะฉะนั้นในการชุบต้องระมัดระวังอย่าให้สิ่งสกปรกหรือโลหะต่าง ๆ ตกกลงไปปะปนกับน้ำยาชุบ ถ้าตกลงไปให้รีบเอาออกทันทีอย่าปล่อยให้ทิ้งไว้นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีสังเกตถ้าหากเหล็กตกลงไปถึงขุบนิกเกิดจะเห็นว่าที่ถุงใส่ขุบนิกเกิดจะเป็นสีสนิมแดงเมื่อเป็นเช่นนี้ควรที่จะต้องกำจัดออกโดยการกรองน้ำยาพร้อมปรับค่า pH ด้วยโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางหรือเติมขุบนิกเกิดคาร์บอนเนต และทำการล้างถังพร้อมถุงผ้าให้สะอาดมากที่สุด

4.6.2. วิธีกำจัดทองแดง สังกะสี และตะกั่วในถังขุบนิกเกิด

ทองแดงที่ตกลงไปอยู่ในถังขุบนิกเกิด เวลานำชิ้นงานไปขุบนิกเกิด สิ่งเหล่านี้ก็จะมาติดที่ชิ้นงานในขณะที่ทำการขุบเป็นสีดำ หรือด้านตรงบริเวณที่ชิ้นงานได้รับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า น้อย วิธีกำจัดกระทำโดยทำดัมมี่ (Dummy)

ดัมมี่ (Dummy) คือเอาแผ่นเหล็กตัดเป็นลอนลูกฟูกล้างให้สะอาดแล้วนำลงแช่ในถังขุบนิกเกิด โดยจ่ายกระแสเหมือนกับขั้นตอนในการขุบทุกประการเมื่อมีรอยคราบสีดำก็นำมาเช็ดล้างและก็ทำเช่นเดิม โดยทำไปจนกว่าที่จะไม่มีรอยสีดำเกาะบนแผ่นเหล็ก

4.6.3. การแก้ไขปัญหาในการขุบนิกเกิด

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการขุบ สาเหตุ และการแก้ไข

ผลการขุบ	สาเหตุ	การแก้ไข
1. ผิวขุบเคลือบไม่ดีปรากฏว่าชิ้นงานลอกผิวขุบล่อนออก	1. น้ำยามีความเป็นด่างมากเกินไปผิวขุบเป็นสีดำ 2. น้ำยาเป็นกรดมากเกินไป 3. มีสิ่งสกปรกปนในน้ำยาขุบ 4. มีความต่างเคลือบบนชิ้นงาน 5. มีโลหะชนิดอื่นมาปะปนใน	1. ตรวจสอบค่าพีเอช ถ้าสูงไปให้เติมกำมะถันเพื่อปรับให้ค่าพีเอชต่ำลง 2. ตรวจสอบโดยการเติมขุบนิกเกิดคาร์บอนเนต 3. ตรวจสอบขั้นตอนในการล้างทำความสะอาดชิ้นงาน, น้ำยาขุบและภาชนะที่ใช้ในการใส่ 4. ตรวจสอบน้ำล้างก่อนการขุบอย่าแช่ชิ้นงานในถังขุบนิกเกิดนานเกินไป 5. ใช้วิธีการทำความสะอาดน้ำยาขุบโดยวิธีดัมมี่ (Dummy) 6. ตรวจสอบข้อต่อในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับกระบวนการ

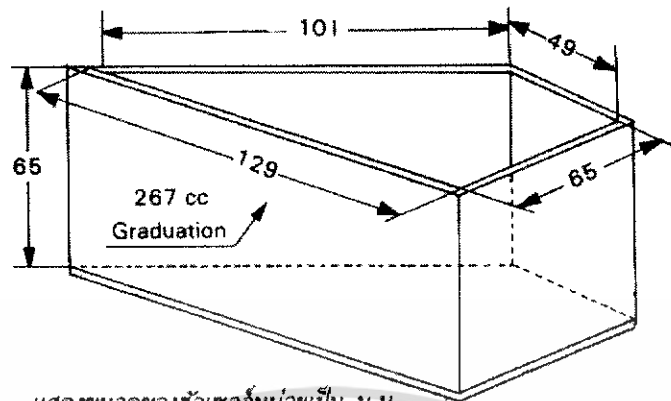
	<p>น้ำยาชุบ</p> <p>6. กระแสไฟฟ้าหยุดชะงักระหว่างทำการชุบ</p> <p>7. ผิวชิ้นงานหมอง</p>	<p>ชุบ</p> <p>7. อย่าปล่อยให้ชิ้นงานไว้ในอากาศนานเกินไปและต้องแน่ใจว่าน้ำยาล้างไม่มีน้ำยาอื่นมาปะปน</p>
<p>2. ผิวชุบนิกเกิลเป็นเม็ด (pitting)</p>	<p>1. อาจมีรูเล็กๆ ที่ผิวชิ้นงาน</p> <p>2. ค่าพีเอช ต่ำเกินไปเกิดไฮโดรเจนมากที่ผิวชิ้นงานทำให้นิกเกิลเคลือบปิดฟองไว้</p> <p>3. มีไขมันในน้ำยาชุบ</p> <p>4. น้ำยาชุบสกปรกมีสิ่งปะปน</p>	<p>ตรวจสอบที่ตัวล่อว่ามีกระแสสูงฝ้ามืดซิดหรือไม่เพราะในขณะที่ทำการชุบอาจจะมีสิ่งสกปรกที่ตัวล่อหลุดออกมาก่อนที่จะนิกเกิลจะมาเกาะและตรวจสอบพื้นผิวที่ทำการชุบ</p>
<p>3. ผิวชุบมีรอยดำเป็นลาย</p>	<p>โลหะผสมในน้ำยาชุบนิกเกิล</p>	<p>ใช้วิธีดัมมี่ (Dummy)</p>
<p>4. ผิวชุบหยาบ</p>	<p>กระแสที่ใช้มากเกินไป</p>	<p>ปรับค่ากระแสไฟฟ้า</p>
<p>5. ชุบไม่ติด</p>	<p>- กระแสไฟฟ้าเดินไม่สะดวก</p> <p>- ชิ้นงานมีคราบไขมันมากเกินไป</p> <p>- น้ำยาชุบหมดสภาพ</p>	<p>ตรวจสอบทางเดินกระแสไฟฟ้าและดูกระบวนการทำความสะอาดทำการตรวจสอบน้ำยาชุบว่าอยู่ในระดับใดโดยใช้วิธีทางเคมีหรือฮัลเซลล์(Hull Cell)</p>

4.6.4. การทดสอบน้ำยาชุบโลหะด้วยฮัลเซลล์ (Hull Cell)

การทดสอบน้ำยาชุบโลหะด้วยวิธีฮัลเซลล์ เป็นการทดสอบสภาพน้ำยาชุบโลหะว่ามีความสมบูรณ์แค่ไหน มีน้ำยาเจือปนหรือไม่ และเป็นการทดสอบว่าในน้ำยาชุบโลหะมีโลหะอื่น ๆ เจือปนอยู่หรือไม่ (Metallic impurities) เพื่อจะได้แก้ไขและปรับปรุงน้ำยาชุบให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ การทดสอบด้วยฮัลเซลล์นี้สามารถทดสอบน้ำยาชุบได้ทุกประเภทเช่นน้ำยาชุบนิกเกิล, โครเมียม, สังกะสี, ทอง, เงิน เป็นต้น

เครื่องแปลงไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดสอบควรใช้แรงดันประมาณ 8-10 Volt ให้กระแสสูงประมาณ 10 Amp. ก่อตั้งฮัลเซลล์ (รูปที่ 4.5) นี้ทำด้วยพลาสติกใสมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูทางด้านที่กว้าง 65 มม. เป็นด้านที่วางตัวล่อ ส่วนแผ่นทดลองวางทางด้าน 101 มม. ซึ่งเป็นด้านเฉียงและมีท่อสำหรับเสียบสายปั๊มลมเล็ก ๆ เพื่อให้เป็นลมกวนน้ำยาขณะทดสอบ และถ้ามีเครื่องให้ความร้อนติดด้วยก็ยิ่งดีเพื่อสะดวกในการให้อุณหภูมิ เพราะเวลาทดสอบน้ำยาชุบโลหะควรจะมีอุณหภูมิเท่ากับงานจริง ๆ ด้วย จำนวนน้ำยาที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 267 มล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงขนาดของฮัลเซลล์หน่วยเป็น มม.

รูปที่ 4.5 กล้องฮัลเซลล์

ตัวอย่างสำหรับฮัลเซลล์กว้าง 6 ซม. ยาว 10 ซม. แผ่นตัวอย่างที่จะทำการทดสอบนั้นต้องทำความสะอาดแผ่นทดสอบดังนี้

- ขัดแผ่นทดสอบให้เงา
- ล้างด้วยน้ำยาด่างหรือน้ำยาล้าง
- ล้างน้ำทำความสะอาด
- จุ่มกรดเกลือ 5-10 %
- ล้างน้ำ
- ใช้ทดสอบ

การใช้กระแสไฟฟ้าและเวลาในการทดสอบ (Current and Duration of test) สำหรับน้ำยาชุบชนิดที่ใช้น้ำยาเงา เช่น น้ำยานิกเกิล, น้ำยาแคดเมียม, น้ำยาสังกะสี และน้ำยาทองแดงกรด ปรกติใช้กระแส 2 แอมแปร์ เวลาทดสอบ 10 นาที แต่จะทดสอบหา Metallic impurities จะต้องใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ สำหรับหาสิ่งเจือปน (impurity) ในน้ำยาชุบนิกเกิลกระแส 1 แอมแปร์ เวลาทดสอบ 15 – 20 นาที

ตารางที่ 4.2 บอกถึงชนิดของน้ำยาที่ทดสอบ กระแสที่ใช้ และเวลาในการทดสอบ

น้ำยาชุบโลหะ (Electrolyte)	กระแสที่ใช้ (Amperes)	เวลาทดสอบ (Min.)	Cathode Panel
น้ำยาชุบทองเหลือง (ถังกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบทองเหลือง (ถังแขวน)	2	3	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบแคดเมียม (ถังกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบแคดเมียม (ถังแขวน)	3	3	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบโครเมียม	5	3	แผ่นทองเหลืองชุบนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำยาชุบทองแดง (ถังกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบทองแดง (ถังแขวน)	2	5	แผ่นทองเหลือง
น้ำยาชุบทอง	1	5	แผ่นทองเหลืองชุบนิกเกิล
น้ำยาชุบนิกเกิล (ถังกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบนิกเกิล (ถังแขวน)	3	5	แผ่นทองเหลือง
น้ำยาชุบเงิน (ถังกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบเงิน(ถังแขวน)	2	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบคิบุก (ถังกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบคิบุก(ถังแขวน)	2	3	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบสังกะสี (ถังกลิ้ง)	1	5	แผ่นเหล็ก
น้ำยาชุบสังกะสี (ถังแขวน)	3	3	แผ่นเหล็ก

การทดสอบผลที่แสดงออกมาบนแผ่นทดสอบ ถ้าหากทดสอบนั้นมีความเงาสม่ำเสมอทั้งแผ่นแสดงว่าน้ำยาชุบนั้นอยู่ในสภาพที่ดี แต่ถ้าหากแผ่นทดสอบมีรอยไหม้มากตรงบริเวณที่ได้รับกระแสไฟฟ้าสูง แสดงว่าน้ำยาเจือจางลงมากจำเป็นต้องทำการแก้ไข แต่ถ้าหากบนแผ่นทดสอบนั้นมีรอยดำ ๆ เกิดขึ้นมาก แสดงว่ามีโลหะอื่น ๆ ปนอยู่ในน้ำยาจะต้องแก้ไขโดยวิธีต้มมีหรือกรอง และถ้าแผ่นทดสอบไม่มีความเงาแสดงว่าน้ำยาชุบขาดน้ำยาเงาหรือน้ำยาหมดสภาพควรปรับน้ำยาใหม่

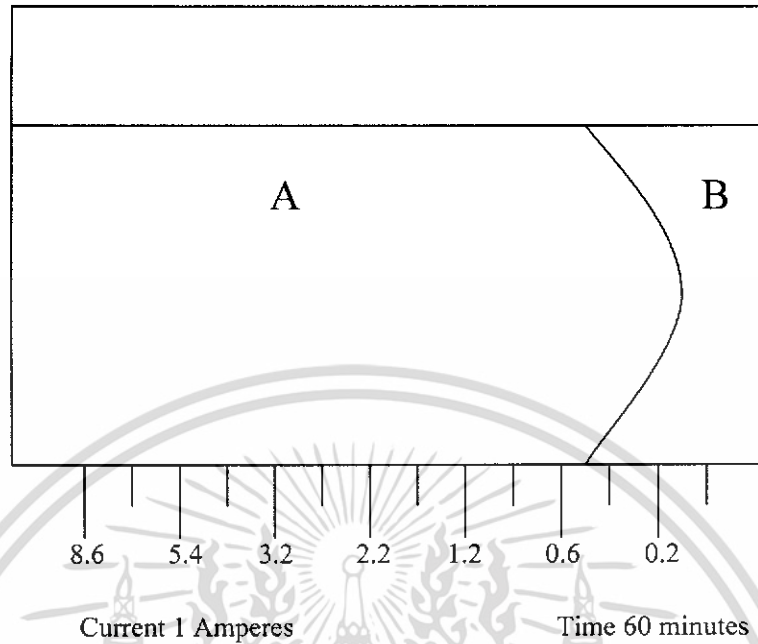
ตัวอย่างแผ่นทดสอบ

บริเวณที่ได้รับ
กระแสมาก



บริเวณที่ได้รับ
กระแสน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แผ่นที่ใช้ในการทดสอบ

A = ตำแหน่งบริเวณที่มีความเงาและการเกาะติดที่สม่ำเสมอ

B = ตำแหน่งบริเวณที่มีการเกาะติดแต่น้อยกว่าส่วนของ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

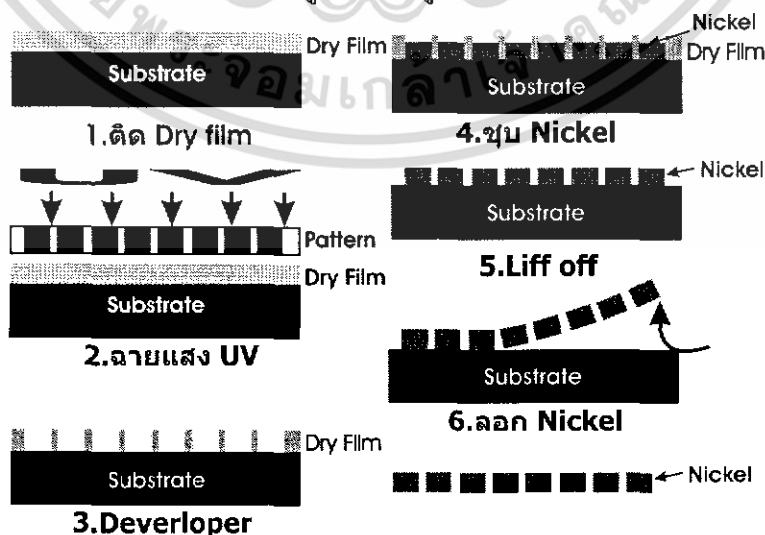
การทำหน้ากาก (Mask)

5.1. Mask คือ

มาร์สจะเป็นส่วนที่ใช้ในการป้องกันผิวหน้าของชิ้นงานที่ต้องการ ในทางด้านการสร้างวงจรรวมจะมีการใช้มาก เช่นการสร้างมอสเฟตภายในชิป หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ในส่วนที่จะทำนี้จะเป็นการทำมาร์สที่เอาไว้ทำลวดลายต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบ ในการเคลือบด้วยวิธีการชุบนั้นเราต้องการทำให้ได้มาร์สตามลายที่ออกแบบไว้เพื่อทำการกำหนดลายให้ได้ตามที่เราต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้เกิดตามที่ต้องการได้

5.2 การสร้างมาร์ส

การสร้างมาร์สสามารถที่จะทำได้หลายแบบด้วยกันเช่นการใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ให้ทำหน้าที่เหมือนมาร์สป้องกันในระหว่างการได้ปัสสาร หรือว่าจะใช้ Photo resist ทำเป็นมาร์สโดยตรง การทำมาร์สในการสร้างวงจรรวมนั้นบางขั้นตอนจะเป็นการให้ซิลิคอนไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นมาร์สกันในช่วงของการได้ปัสสามารถทำได้โดยการนำแผ่นซิลิคอนนั้นไปสร้างชั้นออกไซด์ให้มีความหนาพอที่จะไม่ให้สารซึมผ่าน ไปโดนส่วนที่ไม่ต้องการ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ได้มานั้นไปทำการเคลือบน้ำยาไวแสงโดยวิธีการสปินนิ่งให้สารไวแสงเคลือบอยู่บนซิลิคอนไดออกไซด์ จากนั้นนำไปทำขบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) เพื่อทำลวดลายในชั้นตอนนี้จะได้ลายที่ต้องการ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนไปทำการสกัด(Etching) ส่วนของน้ำยาไวแสงที่ไม่ต้องการออกเราจะได้แผ่นที่มีซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ด้านบน (รูปที่ 5.1)



รูปที่ 5.1 การสร้างมาร์ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3. น้ำยาไวแสงหรือสารไวแสง (Photo resist)

สารไวแสงซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยากับแสงได้โดยฟิล์มบางสารไวแสงนี้ จะถูกนำมาใช้ทำหน้าที่ป้องกัน ปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุใด ๆ กับสารเคมีบางชนิดที่เป็น “สารตัวกัด” (Etch ant) เพราะฟิล์มบางชนิดของสารไวแสงนี้จะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารไวแสงที่ปิดไว้ หากบริเวณใดที่ต้องการให้คงอยู่ก็ใช้ฟิล์มบางไวแสงนี้บังหรือปกคลุมไว้ ส่วนบริเวณใดที่ต้องการคัดออกจะต้องไม่มีสารไวแสงปิดไว้ การทำหน้าที่ของสารไวแสงเพื่อป้องกันหรือต้านทานการทำปฏิกิริยา ที่จะเกิดขึ้นกับฐานรอง (Substrate) นี้ อาจถูกนำมาใช้เรียกชื่อของสารไวแสงนี้ว่า “ชั้นต้านทานไวแสง” หรือ Photo resist film และนิยมเรียกว่า Resist

ชนิดของสารไวแสง

น้ำยาไวแสงที่นำมาใช้จะประกอบด้วยสารวัสดุที่เป็นสารไวแสง (Photo sensitive material) ส่วนที่เป็นสารละลาย (Solvent) และที่เป็นส่วนสารเพื่อช่วยในการยึดติดกับผิวใด ๆ (Epoxy) โดยน้ำยาไวแสงนั้นจะมีแบบเปียก (Wet film) และแบบแห้ง (Dry film) แบบเปียกนั้นจะเป็นสารละลายของเหลวเมื่อเวลาใช้งานก็จะใช้ทำการเคลือบบนผิวหน้าของ substrate เพื่อทำเป็นชั้นป้องกันส่วนมาจะใช้การเคลือบฟิล์มชนิดเปียกโดยการสปิน (spin coating) เราสามารถจำแนกน้ำยาไวแสงออกเป็นได้ 2 ชนิดคือ

5.3.1. น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photo resists)

น้ำยาไวแสงที่เมื่อถูกฉายด้วยแสง และมีปฏิกิริยาเคมีแสงเกิดขึ้นแล้ว จะทำให้คุณสมบัติของสารละลายในสารตัวละลาย หรือน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) เปลี่ยนแปลงไปโดยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับแสง จะสามารถละลายได้ดีในสารตัวทำละลาย และเมื่อถูกแสงแล้ว จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป คือ ไม่สามารถละลายได้ น้ำยาไวแสงชนิดลบนี้จะเป็นชนิดเดียวกับฟิล์มถ่ายรูป โดยภาพที่ปรากฏบนฟิล์ม จะมีลักษณะเป็นภาพเนกาตีฟ (Negative image) คือจะมีสภาพตรงข้ามกับต้นแบบคือภาพที่เป็นสีขาวจะเปลี่ยนเป็นสีดำ หรือส่วนที่เป็นสีดำจะเป็นสีขาว

5.3.2. น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photo resists)

น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะประกอบด้วยวัสดุสารไวแสงซึ่งมีคุณสมบัติปฏิกิริยาเคมีแสง ที่แตกต่างกับกรณีของของน้ำยาไวแสงชนิดลบโดยจะให้ผลตรงข้าม คือเมื่อทำปฏิกิริยากับแสงจะมีคุณสมบัติไม่ละลายในสารตัวทำละลาย หรือน้ำยาล้างฟิล์ม แต่เมื่อถูกแสงคุณสมบัติจะเปลี่ยนแปลงไปคือสามารถละลายได้ดีในน้ำยาล้าง น้ำยาไวแสงแบบนี้จะเหมือนกับฟิล์มสไลด์ (Slid film) ซึ่งจะให้ภาพบนฟิล์มมีลักษณะที่เป็นภาพโพสิตีฟ (Positive image) ซึ่งเป็นภาพจริงเหมือนกับภาพต้นแบบ คือภาพที่เป็นสีขาวหรือดำบนฟิล์มที่ได้ก็จะเป็นสีขาวหรือดำเหมือนกัน

5.4 การออกแบบมาร์ส (Mask design)

ในช่วงแรกของการออกแบบวงจรรวมนั้นจะมีการออกแบบลายมาร์สโดยการเขียนด้วยมือ ลงบนกระดาษกราฟขนาดประมาณ 1m x 1m แล้วไปทำการตัดบนฟิล์มจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ออกมา นั้นไปฉายย่อขนาดลงบนกระจก โดยกระจกต้นแบบนี้จะมีที่แผ่นขึ้นอยู่กับการที่จะทำอุปกรณ์ เช่น มอสทรานซิสเตอร์ ไบโพลาร์ ไดโอด เป็นต้น แต่ในปัจจุบันการออกแบบจะใช้คอมพิวเตอร์ ช่วยจึงเป็นการง่ายในการออกแบบวงจรที่มีอุปกรณ์มาก ๆ ในการออกแบบอุปกรณ์แต่ละตัวนั้นจะมีค่าระยะห่างที่ขึ้นกับผู้ออกแบบเอง ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบมาร์สเพื่อทดสอบถึงขนาดที่สามารถทำได้เล็กสุด (รูปที่ 5.2)



รูปที่ 5.2 การออกแบบมาร์ส

จากนั้นเป็นมาร์สที่ออกแบบมาทดสอบขนาดที่ทำได้โดยขนาดเล็กที่สุดที่ออกแบบที่ 20 μm และที่มีขนาดใหญ่สุดที่ 600 μm

5.5. วิธีการทำมาร์สด้วยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

5.5.1. วัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

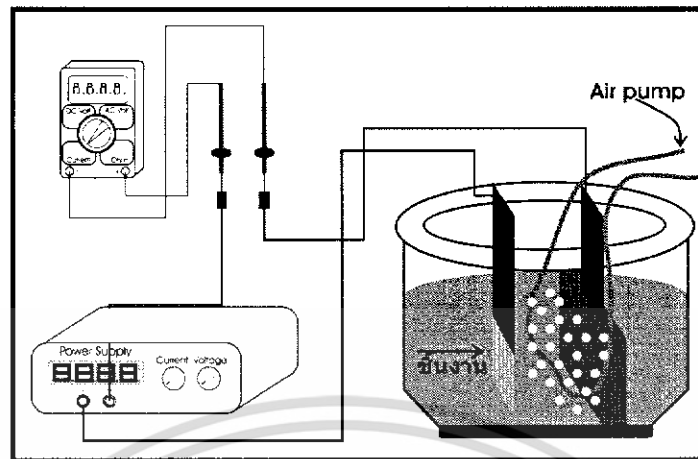
- เพื่อทำการทดสอบหารูปแบบของการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดขึ้นและการแก้ไข
- เพื่อที่จะนำผลที่ได้จากการชุบไปตรวจสอบคุณสมบัติในการเกาะของนิกเกิลถึงความหนาบางของชั้นผิวของนิกเกิล
- เพื่อที่จะนำฟิล์มนิกเกิลที่ได้มาประยุกต์ใช้งานในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

5.5.2. อุปกรณ์และสารเคมี

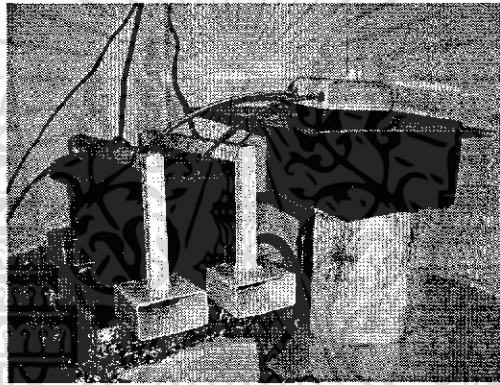
1. น้ำยานิกเกิลเงา
2. Bubble
3. Power Supply
4. Amp Meter
5. อ่างแก้ว
6. Dry Film
7. แผ่น substrate
8. น้ำ DI
9. ราวแขวน
10. น้ำยา Develop
11. น้ำยาสร้างชั้น Oxide
12. น้ำยาล้างฟิล์ม
13. ตะแกรงตีเตนนิช, ถุงผ้า และตัวล่อนิกเกิล

5.5.3. วิธีการทดลอง

การทำมาร์สโดยใช้วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าขั้นตอนในการทำการจะต้องมีการเตรียมส่วนประกอบสารเคมีต่าง ๆ ของน้ำยาชุบและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการชุบ ในการชุบส่วนนี้ใช้สารละลายโลหะที่มีส่วนผสมของโลหะนิกเกิล ในตอนแรกทำการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการชุบไว้(รูปที่ 5.3) หลังจากเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการชุบแล้ว ต่อไปก็ทำการเตรียมชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานมาทำความสะอาดในวิธีการต่างๆ



(a)

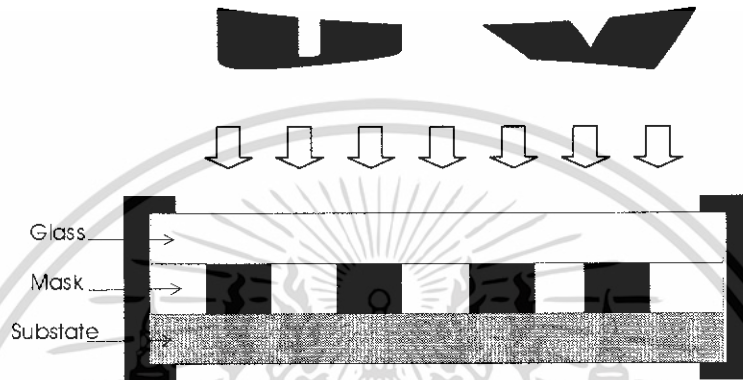


(b)

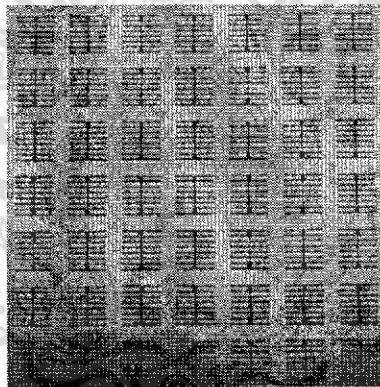
รูปที่ 5.3 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการชุบ

ในการทดลองนี้จะทำความสะอาดแผ่นโลหะโดยการนำไปขัดเอาสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำไปสั่นด้วยความถี่สูงด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ประมาณ 15 นาที จะสังเกตเห็นว่าคราบฝุ่นที่เกาะบนผิวหน้าของโลหะนั้นหลุดออกไป แล้วนำแผ่นโลหะมาเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) เป่าให้แห้งสนิท จากนั้นนำแผ่นโลหะมาทำการติดฟิล์ม โดยจะใช้ฟิล์มชนิดแห้ง (Dry film) เป็นแบบ Negative ในการติดฟิล์มนี้จะมีพลาสติกใสติดอยู่ทั้งสองด้านของฟิล์ม โดยให้ทำการลอกพลาสติกด้านที่ลอกง่ายที่สุดเพียงด้านเดียวออก แล้วติดลงบนแผ่นโลหะในการติดฟิล์มนั้นควรใช้ผ้าลีนมาทำการถูที่ละน้อยจนทั่วทั้งแผ่นแล้วไล่อากาศออกด้วยการนำไปปรืดที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เพื่อให้ฟิล์มติดกับแผ่นโลหะแน่นขึ้น การติดฟิล์มเพื่อให้ได้ลวดลายที่ออกมาดีควรติดให้มีฟองอากาศน้อยที่สุด หรือไม่มีเลย หลังจากที่ได้แผ่นโลหะที่มีการติดฟิล์มเรียบร้อยแล้วก็นำลายของมาร์สที่ต้องการมาวางด้านบนของฟิล์ม โดยให้ลายของมาร์สติดกับฟิล์มแล้วใช้กระจกใสมาวางซ้อนทับเพื่อให้เกิดความแนบสนิท จากนั้นนำไปฉายแสง UV ประมาณ 1 นาที (รูปที่ 5.4) โดยจะสังเกตเห็นได้จากฟิล์มที่มีการเปลี่ยนสีเมื่อโดนแสง UV เมื่อทำการฉายแสงเสร็จแล้วนำกระจกและมาร์สออกจะเห็นฟิล์มเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดลายตามมาร์ส โดยฟิล์มที่โดนแสงนั้นจะทำปฏิกิริยากับแสงทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้นส่วนที่ถูกปิดกั้นนั้นจะคงสภาพเดิมอยู่ลวดลายที่ติดอีกด้านออกจากรันนำชิ้นงานไป Developer เอาฟิล์มส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยน้ำยา developer (โซเดียมคาร์บอเนต) ประมาณ 30 วินาที แล้วจุ่มล้างด้วยน้ำ DI สลับไปจนกว่าฟิล์มจะหลุดออกหมด หลังจากทำการ developer แล้วก็จะเหลือแต่ฟิล์มที่ทำปฏิกิริยากับแสงไว้ตามลวดลาย



รูปที่ 5.4 การฉายแสง



รูปที่ 5.5 ลายที่ได้หลังจาก Developer

การเตรียมน้ำยาชุบนิกเกิลจะมีส่วนผสมของโลหะอยู่ในน้ำยาชุบโดยส่วนประกอบของน้ำยานั้นจะประกอบด้วย

ส่วนผสมของน้ำยานิกเกิลเงา

- นิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4)	240-300 กรัม/ลิตร
- นิกเกิลคลอไรด์ (NiCl_2)	40-60 กรัม/ลิตร
- กรดบอริก (H_3BO_3)	35-45 กรัม/ลิตร
- น้ำยาพื้น นิกเกิล	10-15 ซีซี/ลิตร
- น้ำยาเงานิกเกิล	1-3 ซีซี/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า pH	3.0-4.8
- ตัวล่อ	ใช้นิกเกิล
- การกวนน้ำยา	ใช้ลมกวนน้ำยาหรือการโยกขึ้นงาน
- การกรองน้ำยา	กระดาษกรอง, ผงกรองคาร์บอน

หน้าที่ส่วนของส่วนผสมต่าง ๆ

นิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4) เป็นเกลือให้นิกเกิลไอออนในสารละลาย นิกเกิลไอออนจะเป็นตัวโลหะนิกเกิลที่ไปจับเคลือบบนชิ้นงานที่ทำการชุบ

นิกเกิลคลอไรด์ (NiCl_2) หน้าที่สำคัญของนิกเกิลคลอไรด์คือให้นิกเกิลไอออนและคลอไรด์ไอออน คลอไรด์เป็นตัวทำให้การละลายของขั้วบวกดีขึ้น ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำยาชุบ นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มกำลังการชุบเคลือบผิวอันเป็นผลต่อเนื่องมาจากการเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วลบ

กรดบอริก (H_3BO_3) ทำหน้าที่เป็นตัวปะทะในน้ำยาชุบนิกเกิล ก็จะเป็นตัวควบคุมค่า pH ของน้ำยาชุบให้คงที่ ถ้าไม่มีกรดบอริกค่า pH ของน้ำยาจะเปลี่ยนแปลงไปได้ง่ายซึ่งค่า pH นี้มีความสำคัญต่อน้ำยาชุบนิกเกิลมาก

น้ำยาเงา (Brightener) เป็นตัวเพิ่มความเงาให้กับผิวงานที่ชุบ โดยการทำให้อะตอมผิวของนิกเกิลเรียงตัวกับอยู่เป็นชั้น ๆ บาง บนผิวของชิ้นงาน ความสำคัญของสถานะการทำงานของน้ำยาชุบ

ส่วนของการผสมน้ำยาชุบนั้นเป็นส่วนที่สำคัญมากเช่นกันเพราะการผสมที่ไม่ดีอาจมีผลต่อผิวที่ชุบออกมาได้ จากการสอบถามวิธีการผสมน้ำยาชุบนั้นแต่ละบริษัทนั้นก็จะมีวิธีการผสมที่แตกต่างกันแต่ส่วนผสมนั้นยังคงเหมือนกันอยู่โดยจะมีวิธีการผสมได้ดังนี้

ในการผสมน้ำยาชุบนั้นจะมีส่วนผสมเหมือนกันแต่ที่จะแตกต่างกันจะเป็นวิธีการผสมน้ำยาชุบ โดยในการที่จะผสมจะเป็นเทคนิคของแต่ละบริษัทหรือตามร้าน โดยจะแสดงให้ดูได้ดังนี้

วิธีผสมน้ำยาชุบ 1

1. ใส่น้ำกลั่นลงไปจนถึงประมาณ 2/3 ของความจุให้ความร้อนประมาณ 60 องศาเซลเซียส
2. ใส่กรดบอริกลงไปทีละน้อย กวนน้ำยาให้กรดบอริกละลายหมด
3. ใส่นิกเกิลซัลเฟต กวนให้นิกเกิลซัลเฟตละลายหมด
4. ใส่นิกเกิลคลอไรด์ กวนให้ละลาย
5. ใส่ผงคาร์บอน 2 กรัม/ลิตร หรือโปตัสเซียมเปอร์มันงานาต 0.125 กรัม/ลิตร แล้วกวน

ตลอดเวลาประมาณ ครึ่งชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่มีในน้ำยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กรองน้ำยาให้สะอาด
7. ใส่น้ำยาเงา
8. ปรับค่าน้ำยาโดยเติมจนได้ปริมาณตามต้องการ

วิธีผสมน้ำยาชุบ 2

1. ใส่น้ำกลั่นลงในถังที่เตรียมไว้ประมาณ 1 ใน 3 ส่วนของถังที่จะผสม
2. เทนิกเกิลซัลเฟต, นิกเกิลคลอไรด์ ให้ครบตามอัตราส่วนที่เตรียมไว้ แล้วกวนน้ำยาให้เคมีละลายให้หมด
3. ส่วนกรดบอริก แยกละลายโดยใช้อุณหภูมิของน้ำที่จะผสม ประมาณ 60-80 องศาเซลเซียส แล้วกวนให้ละลายให้หมด
4. นำกรดบอริก ที่ละลายหมดแล้วเทรวมกับน้ำยาที่ละลายนิกเกิลซัลเฟต, นิกเกิลคลอไรด์
5. ใส่น้ำผงคาร์บอน และผงกรองขาว อย่างละประมาณ 3 กรัม/ลิตร กวนน้ำยาต่อเนื่อง ประมาณ 1 ชั่วโมง
6. กรองน้ำยาให้สะอาด โดยใช้เครื่องกรอง กรองเข้าถังหรือใช้กระดาษกรอง ปรับเติมน้ำให้ครบปริมาณที่ต้องการ
7. เติมน้ำยาเงานิกเกิล ให้ครบตามอัตราส่วนที่เตรียมไว้

หลังจากการผสมน้ำยาชุบแล้วก็ทำการทดสอบน้ำยาที่ผสมเสร็จว่ามีความสมบูรณ์และค่าพีเอชสูงหรือต่ำ เพราะค่าพีเอช มีความสำคัญที่สุดในน้ำยาชุบนิกเกิล ถ้ารักษาค่าพีเอชไม่ถูกต้องแล้วจะทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ในการชุบจึงควรจะต้องตรวจสอบค่าพีเอชทุกวัน เมื่อมีการชุบปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปก็อาจจะทำให้เกิดกำลังการชุบเคลือบผิวไม่ดี ประสิทธิภาพของขั้วลบ การเกาะเคลือบผิวขรุขระเปราะหรือเป็นหลุมถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 3.5 การชุบจะไม่ขึ้นเงาและไม่เรียบ ถ้าค่าพีเอช สูงเกินกว่า 4.5 นิกเกิลที่ชุบจะเปราะ การปรับค่าพีเอช.

การลดค่าของพีเอชให้ต่ำลงทำได้โดยเติมกรดกำมะถันเจือจางลงไป ในน้ำยาชุบ โดยนำกรดกำมะถันผสมน้ำ 3-4 เท่า การเพิ่มค่าพีเอช ทำได้โดยการเติมโซดาไฟ (โซเดียมไฮดรอกไซด์) 5 เปอร์เซ็นต์ โดยเอาโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับน้ำยาชุบนิกเกิลในอัตราส่วน 50 กรัมต่อลิตร หรือเติมนิกเกิลคาร์บอเนต โดยเอานิกเกิลคาร์บอเนตละลายด้วยน้ำร้อนก่อน

หลังจากที่ได้น้ำยาชุบชิ้นงานและตัวล่อที่ใช้พร้อมแล้วก็เริ่มทำการติดแผ่นชิ้นงานให้เรียบร้อยโดยต่อขั้วออกมาจากชิ้นงานเพื่อต่อกับขั้วไฟฟ้าจากนั้นใส่น้ำยาที่ผสมเสร็จลงในถังชุบให้ชิ้นงานจมนมดพอดี

5.5.4. ขั้นตอนการทดลอง

1. หลังจากทำการเตรียมสวดลายที่ต้องการแล้วให้เทน้ำยาชุบให้จมแผ่นชิ้นงาน
2. ทำการเปิดปั๊มลมเพื่อกวนน้ำยาชุบให้ทั่ว
3. เริ่มทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ชิ้นงานกับตัวต่อ ในช่วงนี้จะมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น การจ่ายกระแสจะเป็นไป 3 ระดับคือ

$I_1 = 150 \text{ mA}$ ใช้เวลาในการชุบ 45 นาที

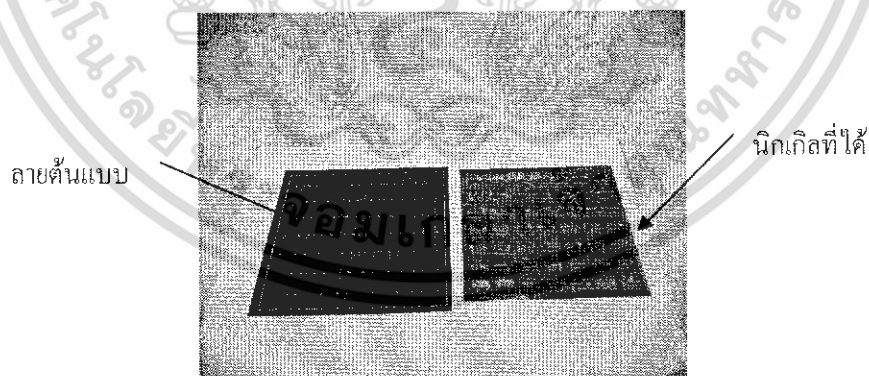
$I_2 = 300 \text{ mA}$ ใช้เวลาในการชุบ 45 นาที

$I_3 = 600 \text{ mA}$ ใช้เวลาในการชุบ 2-3 ชั่วโมง

4. หลังจากชุบเสร็จก็นำไปทำการล้างฟิล์มออกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.5.5. ผลการทดลอง

จากการทดลองสังเกตได้จากนิกเกิลที่เกาะที่แผ่น โลหะในช่วงแรกของการทำการจ่ายกระแสต่ำไปจะเป็นการเคลือบของ โมเลกุลของนิกเกิลที่มีขนาดเล็กมาเกาะที่ผิว โดยขนาดของโมเลกุลที่จะไปเกาะนั้นจะขึ้นกับกระแสที่จ่ายให้ ถ้ากระแสสูงขึ้น โมเลกุลที่เกาะก็จะมีขนาดใหญ่ ทำให้มีผลต่อผิวของนิกเกิล การที่ทำการจ่ายกระแสในช่วงแรกนั้นจะเป็นการรองพื้นผิวหน้าของโลหะให้มีโลหะนิกเกิลบาง ๆ อยู่จากนั้นเมื่อเพิ่มกระแสให้ก็จะเป็นการชุบเพื่อให้มีความหนาเกิดขึ้น และที่กระแสที่จ่ายในสุดท้ายจะเป็นการชุบที่ต้องการความหนาและปรับความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ โดยในการหลังจากการชุบได้ลายของนิกเกิลที่มีลักษณะเหมือนกับต้นแบบ (รูปที่ 5.6)



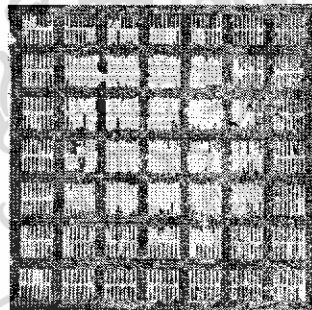
รูปที่ 5.6 นิกเกิลแผ่น

การที่แผ่นนิกเกิลที่ลอกออกมานั้นมีความหนาไม่สม่ำเสมออันนั้นเป็นผลมาจากการที่การวางแผ่น โลหะที่ต้องการชุบนั้นไม่ขนานกับตัวต่อทำให้กระแสที่ได้รับในแต่ละจุดของผิวหน้าโลหะ นั้นมีกระแสไม่เท่ากัน

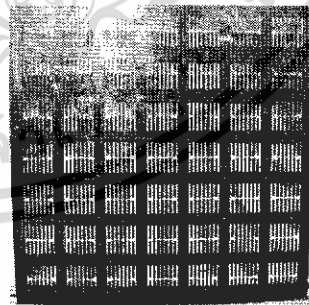
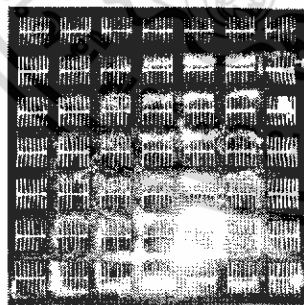
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองของผิวนิกเกิล

1. การร่อนของนิกเกิล การทดลองที่ได้ทำในครั้งแรกหลังจากการผสมน้ำยาชุบแล้วทำตามขั้นตอนดังกล่าวผลที่ได้ออกมานั้นจากการชุบนั้นจะเห็นได้ว่าผิวของนิกเกิลที่ได้ออกมานั้นมีการเกาะติดของนิกเกิลไม่ทั่วทั้งแผ่นและมีการเกาะไม่ดีเกิดการร่อน โดยส่วนมากจะมาเกาะหนาแน่นที่บริเวณของแผ่นโลหะ โดยสาเหตุที่เกิดขึ้นนั้นเกิดมาจากค่าพีเอชของน้ำยาชุบนั้น ไม่ได้ตามกำหนด โดยหลังจากการที่นำไปเช็คค่าพีเอชแล้วอยู่ประมาณ 5.0 – 6.0 แต่ที่น้ำยาชุบนั้นต้องมีค่าพีเอชอยู่ที่ 3.0 – 4.8 โดยผลของที่ค่าพีเอชสูงหรือต่ำนั้นเป็นผลให้การเกาะติดของโลหะมาเกาะและการทำปฏิกิริยาของน้ำยาระหว่างทำการชุบด้วย โดยการแก้ไขในส่วนนี้คือนำน้ำยาชุบนั้น ไปปรับค่าพีเอช โดยการนำ โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับน้ำยาชุบนิกเกิล ในน้ำยาชุบนั้นจะมีกรดบอริกผสมอยู่บอริกนี้จะเป็นตัวที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในน้ำยาชุบ จากนั้นนำน้ำยาที่ได้ตรวจสอบให้แน่นอนว่ามีค่าพีเอชที่ตรงตามที่ต้องการ โดยผลที่ได้ออกมาหลังจากการปรับค่าพีเอชนั้นเห็นว่านิกเกิลที่ได้ออกมามีการเกาะติดที่ดีขึ้น ไม่เกิดการร่อนของผิวของโลหะนิกเกิลที่มาเกาะแสดงได้ (รูปที่ 5.7)



(a.) ก่อนปรับค่าพีเอช

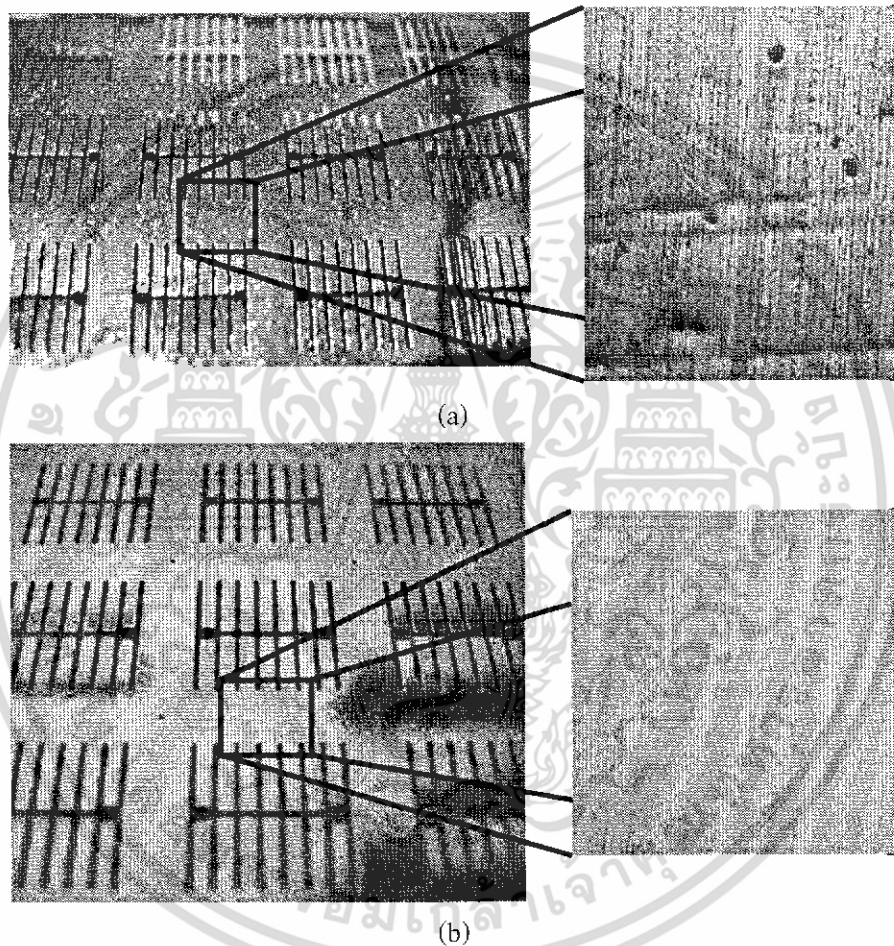


(b.) หลังปรับค่าพีเอช

รูปที่ 5.7 ผลที่เกิดจากค่าพีเอชและการแก้ไข

2. จุดตามค หลังจากการทดลองในครั้งต่อไปได้นำแผ่นนิกเกิลที่ได้ออกมาไปส่องกล้องจุลทรรศน์สังเกตุเห็นหลุมเล็ก ๆ บริเวณทั่วแผ่นของนิกเกิลเมื่อส่องดูกับแสงไฟสังเกตุเห็นเป็นช่องที่สามารถส่องผ่านได้ แสดงว่าผิวที่ได้ออกมาแล้วยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ สาเหตุที่เกิดจากรอยตามค นั้นได้ตรวจสอบพบว่าเกิดจากการน้ำยาชุบนั้นมีความสกปรกโดยมีส่วนผสมอื่นไปผสมอยู่เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดง, อลูมิเนียมเป็นต้น การแก้ไขในส่วนนี้โดยน้ำยาชุบไปทำการทำความสะอาดโดยการกรองเอาสิ่งที่จะปนอยู่ออกด้วยกระดาษกรองและวิธีต้มมีจากการที่ได้กรองน้ำยาชุบแล้วสังเกตที่กระดาษกรองมีคราบสีน้ำตาลเกาะติดเป็นจำนวนมากโดยสังเกตได้ชัดเจนน้ำยาก่อนชุบกับหลังชุบมาเทียบ โดยจะดูการส่องผ่านจะเห็นสีที่แตกต่างกันจากนั้นทำการกรองให้สะอาดที่สุดประมาณ 2 – 3 ครั้ง แล้วนำไปทดลองชุบผลที่ได้เอากมานั้นเมื่อนำไปส่องกล้องแล้วรูเล็ก ๆ ที่เคยเกิดก่อนการกรองน้ำยานั้นหมดไปแสดงได้ (รูปที่ 5.8)

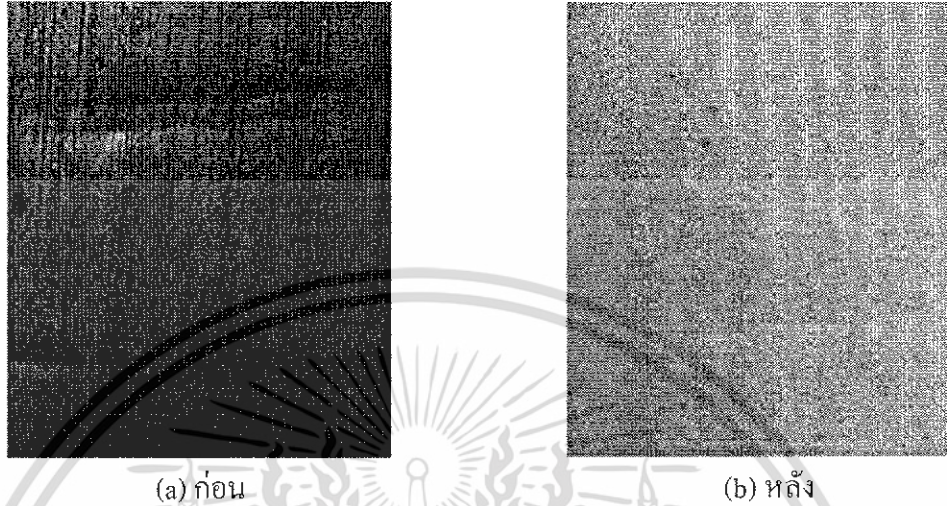


รูปที่ 5.8 ภาพรอยตามดผิว निकเกิล

3. ฉายเส้นบนนิกเกิล แผ่นนิกเกิลที่ได้มาจากการชุบแล้วจะสังเกตว่าบริเวณผิวหน้าของนิกเกิลนั้นจะมีรอยมากไม่เรียบคือเป็นลายเส้นที่เหมือนกับผิวหน้าของโลหะฐานรอง สาเหตุนี้มาจากการที่ทำการขัดที่ไม่เรียบพอหรือในขั้นตอนของการทำความสะอาดแผ่นโลหะ เช่น อาจจะมีการชุบน้ำมันติดอยู่ การแก้ไขนั้นการขัดนั้นควรขัดเป็นรูปเลขแปด การขัดแบบนี้จะทำให้แผ่นมีความสม่ำเสมอจากนั้นก็นำไปล้างด้วย Acetone เพื่อจะทำความสะอาดคราบไขมันแล้วนำ

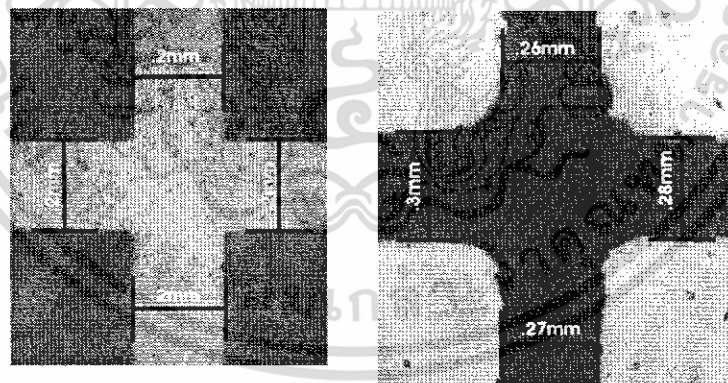
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อล้าง Acetone ออกผลจากการที่ได้ทำการทดลองใหม่จะแสดงได้ (รูปที่ 5.9)

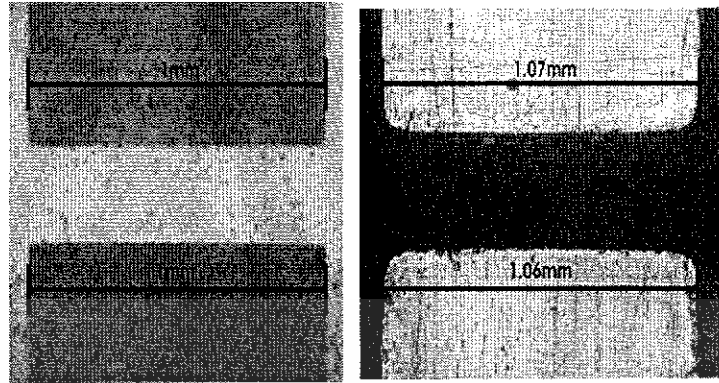


รูปที่ 5.9 ภาพลายเส้นบนนิกเกิล

4. ขนาดของลายนิกเกิล แผ่นนิกเกิลที่ได้จากการชุบนั่นเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์แล้ว จะเห็นความแตกต่างของลายจากต้นแบบกับแผ่นที่ได้ ลายที่ได้ออกมานั้นจะมีขนาดใหญ่กว่า ต้นแบบประมาณ 20-40 % โดยความผิดพลาดนี้จะเกิดจากขั้นตอนในการนำไปฉายแสง และอาจ เป็นเพราะมารัสกับฟิล์มไม่แนบสนิทพอดีโดยแสดงได้ (รูปที่ 5.10)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ขนาดของอิเล็กโทรดที่ขุดได้เทียบกับมาร์สดันแบบ

5. แผ่นอิเล็กโทรด ในการที่ได้ทำการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นจะได้แผ่นอิเล็กโทรดที่สมบูรณ์ที่สุด โดยแผ่นอิเล็กโทรดที่ได้มานั้นมีความเงา เรียบสม่ำเสมอ และมีความใกล้เคียงกับ Pattern มาก ประมาณ 70-90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนขนาดของช่องว่างนั้นอาจมีการผิดพลาดประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์

5.5.6. สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้จะเสนอในเรื่องของการทำมาร์สนิเกิลเพื่อที่จะนำมาร์สที่ได้ไปดำเนินการในวิธีการอื่นต่อไปคือการระเหยอะตอมสาร (Vapor Evaporation) หรือนำไปประยุกต์ใช้ในการทำโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อใช้ในสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยวิธีที่ใช้ในการทำมาร์สนั้นจะเสนอวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งเป็นวิธีที่มีขบวนการทำที่ไม่ยุ่งยาก ประหยัด และง่าย เมื่อเทียบกับวิธีอื่น ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ที่เลือกมาใช้คือการที่เราจะทำได้ตามที่ต้องการ การที่เลือกใช้นิเกิลในการทำเพราะนิเกิลเป็นโลหะชนิดหนึ่งสามารถทำเป็นโลหะตัวเร่งในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ โดยในการสร้างนั้นเราจะต้องออกแบบลวดลายที่ต้องการที่จะทำแล้วก็เริ่มทำการลวดลายที่ต้องการบนแผ่นที่เราต้องการชุบ โดยส่วนสำคัญที่มีผลต่อการชุบนั้นจะมาจากน้ำยาชุบ เพราะถ้าหากน้ำยาชุบนั้นมีประสิทธิภาพที่ต่ำก็จะทำให้มีผลต่อการชุบมากฉะนั้นควรที่จะทำการบำรุงรักษาน้ำยาชุบอยู่ตลอดเวลาที่ไม่ได้ใช้งานนาน และตรวจสอบก่อนการใช้งานทุกครั้งให้อยู่ในสภาพที่ปรกติตลอดเวลา น้ำยาชุบนั้นเมื่อใช้นานแล้วผลที่จะเกิดคือทำให้ปฏิกิริยาภายในน้ำยาชุบนั้นลดลงหรือเจือจางลงมากหรือน้ำยาหมดสภาพในการทำปฏิกิริยาแล้วอาจต้องผสมน้ำยาใหม่ แล้วทำการปรับน้ำยาตามที่ได้ทำมา

จากการทดลองวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้านั้นในแต่ละขั้นตอนของการทดลองต้องมีการเตรียมความพร้อม และรวมถึงความสะอาด เพราะในแต่ละขั้นตอนนั้นอาจจะส่งผลถ้าขั้นตอนผิดพลาดไปอาจมีผลถึงผลสุดท้ายด้วย โดยการที่ในการทำความสะอาดฐานรองนั้นถ้าฐานรองที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปใช้นั้นยังมีคราบสกปรกอยู่แล้วจะทำให้ निकел ที่มาเกาะนั้นร้อนออกได้ง่าย จากสาเหตุและการแก้ไขเช่น รอยตามค ,การร่อนของ निकел ,ขนาดของ निकел เป็นต้นนั้น จากผลที่เกิดและแก้ไขแล้วนั้นทำให้ได้แผ่นมาร์ส निकел ที่ออกมาดีขึ้น การที่ได้มาร์ส निकел ดันแบบนี้แล้วก็จะนำไปตรวจสอบถึงความเรียบและพื้นผิวของ निकел ที่ได้ ออกมาก็จะสรุปได้ว่าวิธีการที่ได้ทำนั้นมีการแก้ไขข้อบกพร่องปัญหาต่างๆ แล้วทำให้สามารถที่จะนำวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าไปใช้งานและนำไปประยุกต์ใช้ในการที่จะชุบฟิล์ม निकел ในการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในการชุบในแต่ละครั้งนั้นอาจจะมีบางส่วนของขนาดและเกินในระหว่างขั้นตอนการทำโดยอุปสรรคเหล่านี้ส่วนมากจะเกิดขึ้นที่ผู้ปฏิบัติงาน การที่จะไปทำฟิล์มบางนั้นความหนาของฟิล์มมีความสำคัญ เพราะการที่ निकел เกาะกันเป็นแผ่นนั้นคือการที่อะตอมของ निकел นั้นเกาะรวมกันเป็นผลึกขึ้นแล้ว การที่จะทำเป็นโลหะตัวเร่งได้นั้นจะต้องเป็นอะตอมของ निकел ที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ ฟิล์ม निकел นั้นต้องบางมากอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการเกาะที่ไม่สม่ำเสมอของ निकел และกระแสที่ใช้ในการชุบโดยจะเกี่ยวกับการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การเตรียมโลหะตัวเร่งโดยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

6.1 บทนำ

การทำโลหะตัวเร่งโลหะนั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยโลหะตัวเร่งนี้จะเป็นตัวทำให้คาร์บอนที่ทำปฏิกิริยาแล้วมาเกาะที่ตัวโลหะ วัสดุที่ใช้เป็นโลหะนั้นมีหลายชนิดเช่น นิกเกิล(Ni), เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co) เป็นต้น วัสดุแต่ละชนิดที่ใช้เป็นโลหะตัวเร่งนั้นแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติที่จะทำให้เกิดของคาร์บอนนั้นแตกต่างกัน ในการทดลองนี้โลหะที่ใช้นั้นจะเป็นนิกเกิล เพราะคาร์บอนที่ได้ออกมานั้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและมีเส้นที่ตรง ในส่วนของวิธีการที่ใช้ในการทำนั้นจะเป็นวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยผลที่คาดไว้นั้นอาจจะเป็นการที่เราสามารถบังคับการเกิดของคาร์บอนด้วยการที่ควบคุมตำแหน่งของโลหะตัวเร่งให้เกิดตามลวดลายได้ ในส่วนของการสังเคราะห์คาร์บอนนั้นจะใช้วิธีทางความร้อน (Chemical vapor deposition :CVD) ในวิธีนี้สามารถแยกได้หลากหลายแต่ในส่วนการทดลองจะใช้วิธี Thermal chemical vapor deposition ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและสามารถผลิตคาร์บอนได้ในปริมาณที่มากที่สุด SWCNTs และ MWCNTs

6.2 การทดลอง

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองชุบนิกเกิลโดยจะตรวจสอบดูบริเวณพื้นผิวที่นิกเกิลมาเกาะเพื่อที่จะได้สังเกตว่านิกเกิลที่มาเกาะนั้นมีลักษณะแตกต่างกันอย่างไร โดยในการชุบนั้นจะทำการชุบที่โดยจะมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์คือ กระแสและเวลา จากนั้นนำผลที่ได้ไปวัดด้วยเครื่อง AFM ที่ใช้ในการวัดดูพื้นผิวของวัสดุ ในการทดลองนั้นการที่เลือกใช้แผ่น Stainless นั้นเป็นเพราะการที่จะทำการชุบด้วยไฟฟ้านั้นแผ่นชิ้นงานที่จะต้องใช้จะได้นำไฟฟ้าได้จึงจะมีโลหะมาเกาะติดที่ผิวเมื่อทำการชุบ โดยผลของการเกาะติดของนิกเกิลนั้นจะดีไม่ดีขึ้นกับค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนโดยจะเป็นกระแสและเวลาที่ใช้ ผลสำเร็จของการทดลองนี้จะเป็นการที่เราได้ฟิล์มบางของโลหะนิกเกิลที่บางและมีขนาดของอะตอมที่มาเกาะเล็กที่สุด โดยเมื่อได้ในส่วนนี้แล้วจะสามารถที่จะนำวิธีการเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในการทำโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

6.3. ผลการทดลอง

ในการทดลองส่วนนี้จะเป็นการประยุกต์วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้ามาใช้ในการทำฟิล์มบางและการนำไปเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการทดลองนั้นจะแบ่งการใช้แผ่นฐานรองที่ต่างกันโดยเป้าหมายในการทำส่วนนี้จะเป็นการทำบนแผ่น Silicon เพราะสามารถทนความร้อนได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูง และมีผิวหน้าที่เรียบ แต่ในส่วนแรกในการชุบแผ่น Silicon นั้นไม่สามารถชุบได้เพราะแผ่น Silicon นั้นมีสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่าตัวนำ ทำให้เป็นอุปสรรคในการชุบ ฉะนั้นจึงเลือกที่นำแผ่น Stainless มาใช้แทนเพราะมีการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าแผ่น Silicon และสามารถที่จะทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายที่ใช้ในการชุบ การทดลองได้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

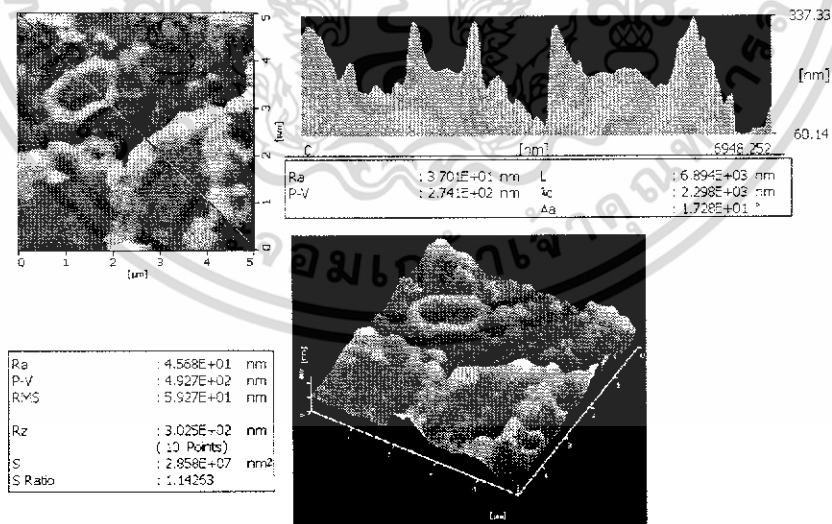
6.3.1. การชุบแผ่น Stainless

ในการนำแผ่น Stainless มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ 2 ส่วนคือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ และเวลาที่ใช้ในการชุบ ในส่วนแรกนั้นจะทำการปรับค่ากระแสที่ใช้เพราะจาก กฎของฟาราเดย์ ข้อหนึ่งที่ว่า “น้ำหนักของไอออนที่ถูกปล่อยให้เป็นอิสระ โดยกระแสไฟฟ้ายอมเป็นส่วน โดยตรงกับ ปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้” เพราะคิดว่าถ้าเราทำการใช้เวลาน้อยแล้วทำการคงที่แล้วทำการปรับกระแสจะทำให้การเกาะของนิเกิลมีปริมาณที่ต่างกัน ตามกระแส แล้วจากนั้นก็จะเป็นการนำผลการชุบที่ได้ไปตรวจสอบดูผิวหน้าที่มีนิเกิลมาเกาะเพื่อดูขนาดและความหนาแน่นของนิเกิลที่ได้ออกมา โดยการใช้ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM) เป็นกล้องที่ทำงานด้วย อุปกรณ์ตรวจหรือ โพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็กซึ่งติดอยู่กับคันที่มีการ โกงงอตัวได้แม้ว่าแรงที่กระทำที่ปลายจะมีขนาดน้อยมากในระดับอะตอม

- กรณีที่ให้เวลาที่ 30 วินาที แล้วปรับค่ากระแสที่ 20, 30, 40, 50 mA/cm²

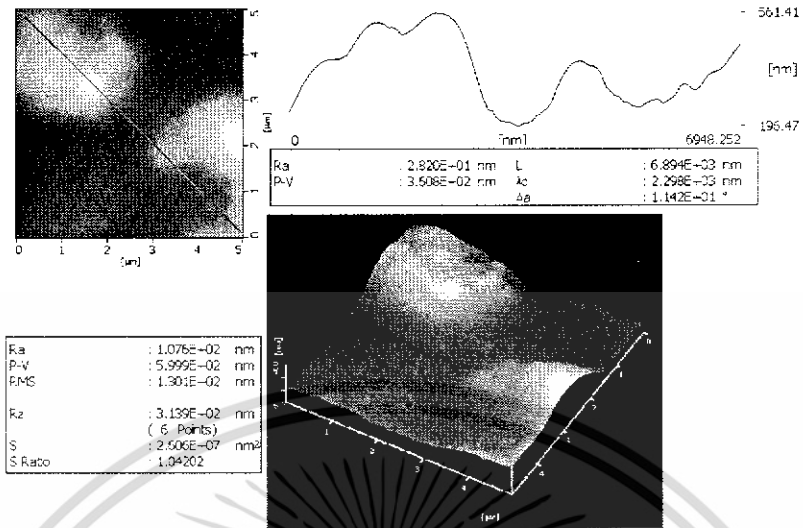
ผลจากการที่นำแผ่น Stainless ที่ผ่านการชุบที่กระแสต่าง ๆ ไปทำการวิเคราะห์พื้นผิวได้

(รูปที่ 6.1)

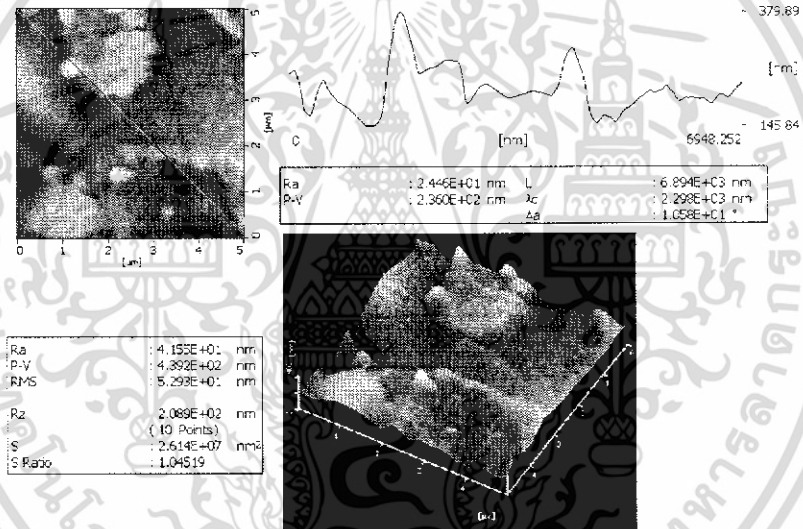


(a) ที่กระแส 20 mA/cm² ที่เวลา 30 sec

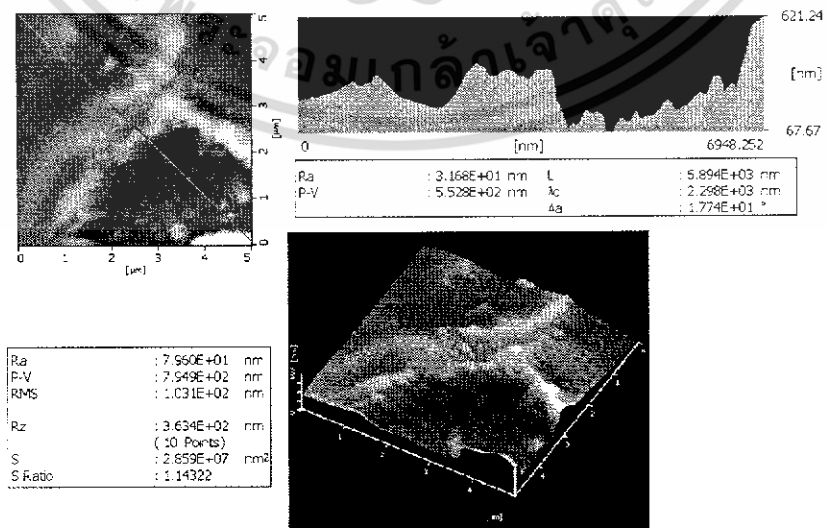
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) ที่กระแส 30 mA/cm² ที่เวลา 30 sec

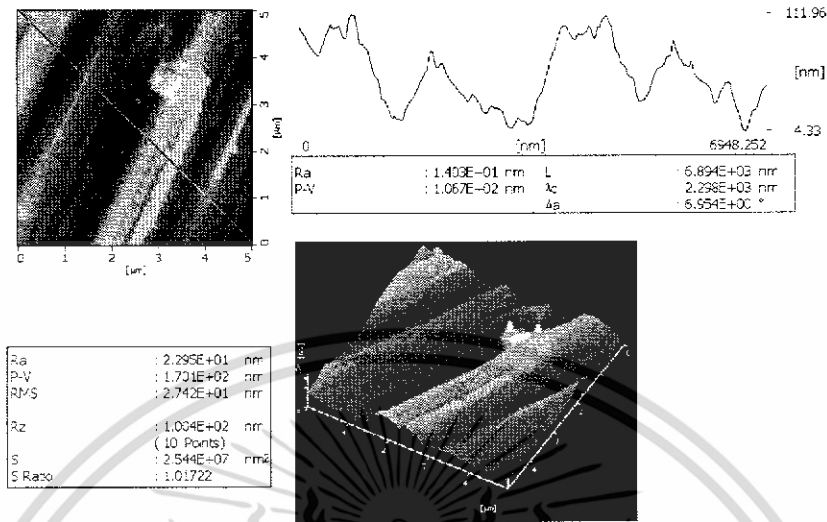


(c) ที่กระแส 40 mA/cm² ที่เวลา 30 sec



(d) ที่กระแส 50 mA/cm² ที่เวลา 30 sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) ไม่มีการชุบ

รูปที่ 6.1 พื้นผิวของนิกเกิลบนแผ่น Stainless ที่กระแสต่าง ๆ

โดยจากผลที่ได้เอ้าออกมา นั้นเห็นว่าการที่ใช้แผ่น โลหะที่เป็นตัวนำ นั้นจะทำให้การเกาะของ นิกเกิลเกาะได้ดีเมื่อดูจากความหนาของนิกเกิลที่ทอลองและความหนาของนิกเกิลนั้นจะเพิ่มขึ้นตาม ค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงไปมากจึงทำให้ผลที่ต้องการคือ การทำให้โลหะนิกเกิลมาเกาะบนฐานรอง เป็นฟิล์มบางนั้นทำได้ยาก โดยการสังเกตจากค่า RMS คือค่า Roughness ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่บอกถึง ความหยาบของพื้นผิวทั้งหมดที่ทำกรวัด โดยค่า RMS ที่มีค่าต่ำนั้นแสดงถึงความสม่ำเสมอของผิว ส่วนค่า RMS ที่สูงนั้นจะมีความหยาบของผิวหรือผลต่างของความสูงที่วัดได้มาก

6.3.2. การชุบแผ่น Silicon

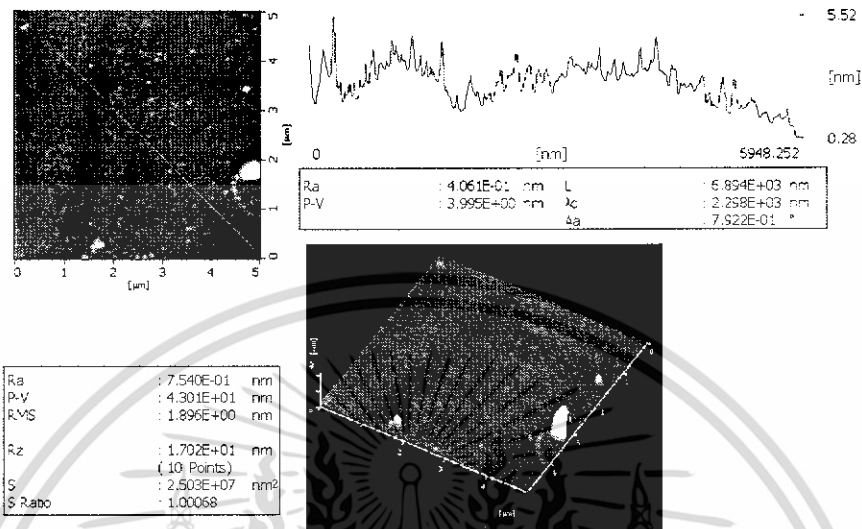
ส่วนนี้จะเป็นการที่นำแผ่น Silicon มาทำการชุบแทนแผ่น Stainless ที่มีความราบเรียบของ ผิวขณะที่ยังไม่ชุบน้อย จึงทำการทอลองในส่วนของการชุบแผ่น Silicon เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ และนำไปใช้เป็นโลหะตัวเร่ง โดยจะแบ่งทำเป็น 2 ส่วนคือ การปรับค่ากระแส โดยเวลาคงที่ และการ ปรับเวลาที่ใช้โดยให้กระแสคงที่

- การปรับค่ากระแส 20, 30, 40, 50 mA/cm² ที่เวลาคงที่

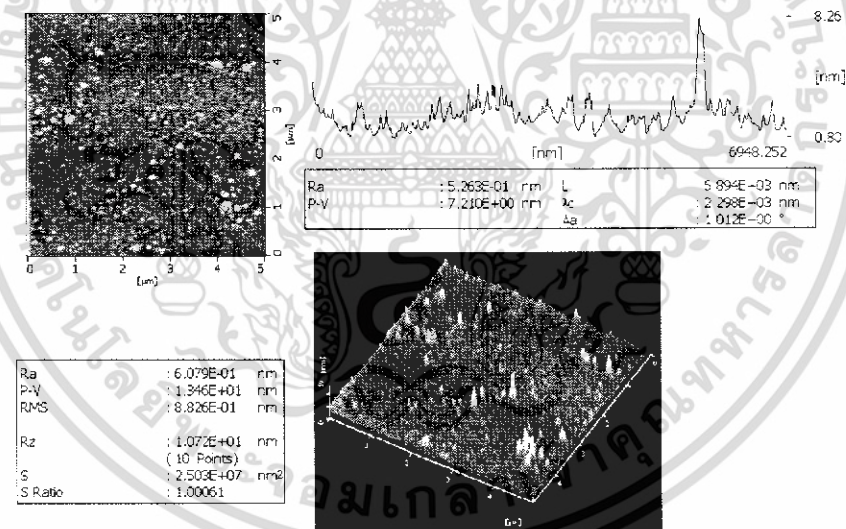
โดยจะมีขบวนการเหมือนกับการชุบของ Stainless แต่จะเปลี่ยนฐานรองเป็น Silicon เพราะ มีความราบเรียบกว่า ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลที่ได้ แผ่น Silicon ที่ใช้นี้จะเป็นแผ่น Silicon ชนิด บางที่สามารถนำไฟฟ้าได้งายกว่า แบบแผ่นหนา โดยมีระนาบ <100> โดยจะใช้ขนาดประมาณ 1 x 1 cm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีสี่ให้เวลาที่ 30 วินาที แล้วปรับค่ากระแสที่ 20, 30, 40, 50 mA/cm²

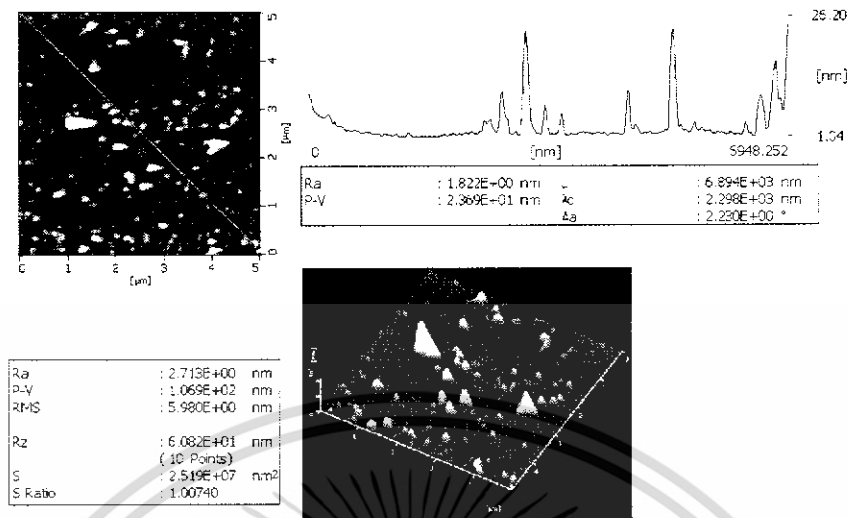
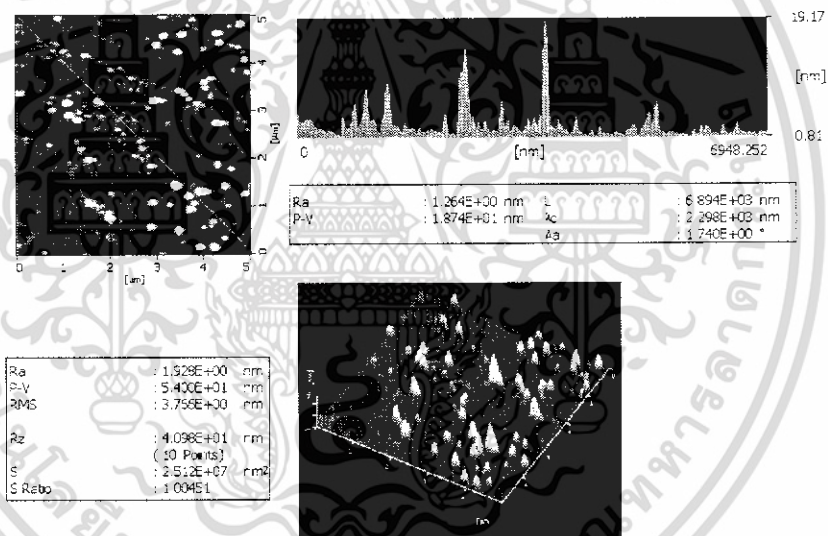


(a) ที่กระแส 20 mA/cm² ที่เวลา 30 sec



(b) ที่กระแส 30 mA/cm² ที่เวลา 30 sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

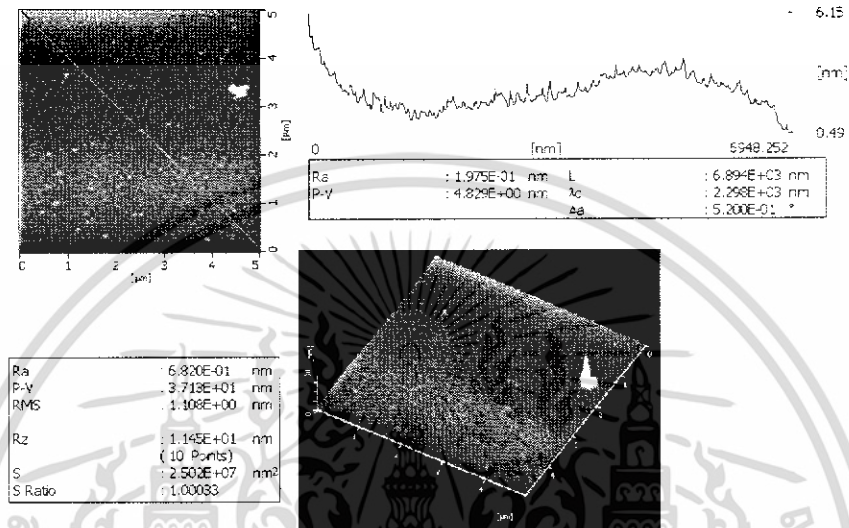
(c) ที่กระแส 40 mA/cm² ที่เวลา 30 sec(d) ที่กระแส 50 mA/cm² ที่เวลา 30 sec**รูปที่ 6.2** พื้นผิวของนิกเกิลบนแผ่น Silicon ที่กระแสต่างกัน

จากผลที่ทำการวัดแล้วนั้นเห็นว่านิกเกิลที่ได้ออกมานั้นเห็นชัดกว่าการใช้แผ่น Stainless และเห็นความราบเรียบได้ง่ายขึ้น โดยสังเกตจากค่า RMS ที่วัดได้โดยจะส่วนที่ใกล้กับความต้อการ ก็อยากให้การเกาะของนิกเกิลเป็นตำแหน่งที่ไม่อยู่ชิดติดกัน ส่วนในการทดลองต่อไปนั้นจะเป็น การหิบบเอากระแสค่าหนึ่งจากการทดลองนี้ที่คาดว่าตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ

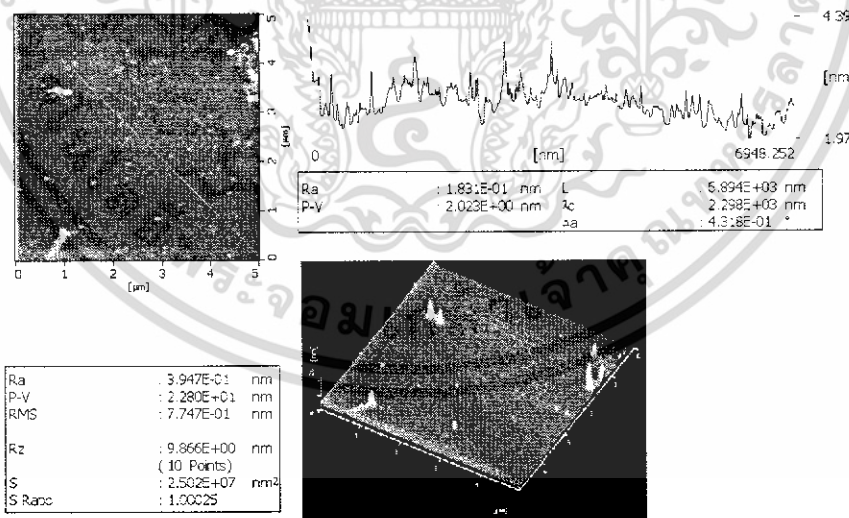
- กรณีที่ปรับเวลาที่ใช้ 10, 20, 30 วินาที ที่กระแส 50 mA/cm²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกที่ค่ากระแส 50 mA/cm^2 โดยดูผลจากการทดลองครั้งก่อนจะเห็นว่ามีการเกิดมาเกาะบน Silicon ในปริมาณที่พอเหมาะมีการจับตัวรวมกันน้อย ฉะนั้นจึงเลือกใช้กระแสในส่วนนี้ไว้ผลที่ได้จากการทดลอง (รูปที่ 6.3)

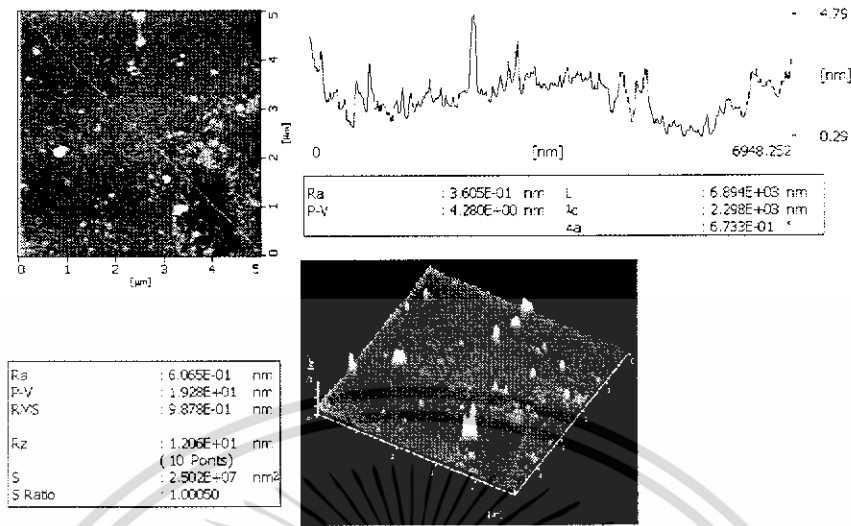


a) ที่กระแส 50 mA/cm^2 ที่เวลา 10 sec



b) ที่กระแส 50 mA/cm^2 ที่เวลา 20 sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



c) ที่กระแส 50 mA/cm^2 ที่เวลา 30 sec

รูปที่ 6.3 พื้นผิวของนิกเกิลบนแผ่น Silicon ที่เวลาต่างกัน

โดยจากผลที่ได้ที่เห็นว่าเวลาที่แตกต่างกันนั้นการเกาะของนิกเกิลก็จะลดลง อาจเป็นเพราะการชุบที่เวลาน้อยนั้นการทำปฏิกิริยาระหว่างขั้วกับโลหะที่แตกตัวจากสารละลายนั้นเกิดไวเกินไป ทำให้โลหะที่มาเกาะนั้นมีน้อยมาก แต่เมื่อเพิ่มเวลามากขึ้นก็จะมีนิกเกิลปรากฏมากขึ้นตามไปด้วย

6.4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองนั้นเห็นได้ว่าการที่จะทำการชุบนั้นการนำไฟฟ้าของฐานรองที่จะใช้ก็มีส่วนที่ทำให้การเกาะนั้นเกิดขึ้นได้มากหรือน้อย โดยการทดลองที่ผ่านมานั้นก็ยังไม่สามารถที่จะเจาะจงถึงค่ากระแสและเวลาที่แน่นอนในการชุบให้ได้แผ่นฟิล์มบางนิกเกิลที่มีความหนาที่ต้องการ โดยอาจอันเนื่องมาจาก ในการชุบแต่ละครั้งนั้นเราได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการเปลี่ยนแปลงแล้ว เมื่อปฏิบัติงานจริงส่วนที่อาจมีส่วนอื่นคือการที่น้ำยานั้นมีการเปลี่ยนแปลงสภาพจากการชุบครั้งก่อนหน้านี้มากน้อยแค่ไหน ส่วนนี้จึงเป็นส่วนที่เราไม่สามารถกำหนดได้ยาก โดยในการแก้ไขในส่วนนี้จะทำการปรับเทียบและปรับปรุงน้ำยาอยู่ตลอดก่อนที่จะทำการทดลอง เช่น การวัดค่า pH, การกรองน้ำยาเอาสิ่งปะปนออก และการปรับสภาพโดยการเติมสารตั้งต้นของโลหะนิกเกิลผสมลงไปตามปริมาณการสูญเสีย

บทที่ 7

บทสรุปและวิจารณ์

การทดลองนี้จะเป็นการสร้างฟิล์มบางนิกเกิลด้วยวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) โดยจะเป็นวิธีทางเคมี ในการทำฟิล์มขึ้นมานั้น ได้มีการทดสอบวิธีการชุบ หาสาเหตุและข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้น โดยผลที่ประสบได้ดำเนินการแก้ไขจนได้ผลออกมาที่ดีที่สุด การที่สามารถทำขบวนการชุบเป็นผลสำเร็จแล้วก็จะเป็นการที่นำวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้านี้ไปประยุกต์การใช้งาน ในที่นี้จะนำไปประยุกต์ใช้ในด้านของการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อที่จะนำโลหะตัวเร่งที่ได้ขึ้นไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon Nanotubes: CNTs) การใช้วิธีนี้ในการทำโลหะตัวเร่งนี้เป็นวิธีที่ง่าย ประหยัด ไม่ยุ่งยาก และเป็นการแก้ไข ปัญหาที่เกิดจากวิธีการที่ใช้ก่อนหน้านี้คือวิธีการสปิน (Spin coating) วิธีนี้จะใช้การที่ใช้โลหะตัวเร่ง เป็นสารประกอบของเหลวแล้วหยดลงบนแผ่นฐานรอง แล้วใช้มอเตอร์ในการหมุน ผลที่ได้นี้โลหะ ตัวเร่งนั้นจะไม่อยู่เป็นระเบียบและความหนาแน่นของโลหะตัวเร่งบนบนรองก็ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ ส่งผลไปสู่การสังเคราะห์และการเกิดคาร์บอน วิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้านั้นเราสามารถที่จะทำให้ โลหะตัวเร่งนั้นไปอยู่ในตำแหน่งที่เราต้องการได้

ผลที่ได้จากการทดลองนั้นสาเหตุแรกที่เกิดจะเป็นการร่อนของแผ่นนิกเกิลที่มากาะบน ฐานรอง โดยสาเหตุที่พบเป็นเพราะความสมบูรณ์ของน้ำยาชุบนั้นไม่เพียงพอจึงได้ทำการปรับปรุง น้ำยาชุบใหม่ แล้วอีกสาเหตุที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการเกิดรอยตามคที่ผิวของนิกเกิลที่ชุบมาได้โดยจะทำ ให้นิกเกิลที่ได้มีรูเล็ก ๆ อยู่โดยสาเหตุเกิดจากที่น้ำยานั้นมีโลหะอย่างอื่นปะปนอยู่ในน้ำยาชุบ แก้ไข โดยการนำไปกรองเอาโลหะอื่นออก ข้อบกพร่องต่อไปคือการที่ผิวที่ได้ ออกมานั้นมีรอยมากมาย สาเหตุเกิดจากการที่มีการขัดผิวหน้าไม่เรียบและสะอาดพอ ปัญหาสุดท้ายก็เป็นการที่ขนาดของ นิกเกิลที่ทำได้นั้นเมื่อเทียบกับต้นแบบแล้วมีขนาดใหญ่กว่า สามารถทำให้ลายมีความใกล้เคียงที่สุด โดยการเนบฐานรองกับต้นแบบให้ทับซ้อนสนิทมากที่สุด และใช้แสงยูวีที่มีความสม่ำเสมอทุกจุด ที่สองมา ทั้งหมดนี้จะได้ว่าขั้นตอนและขบวนการต่าง ๆ ที่ทำนั้นต้องมีการตรวจสอบทุกช่วงของ การทำ วิธีการเหล่านี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานทำเป็นโลหะตัวเร่งได้ โดยอาจจะเปลี่ยน จากการทำบนโลหะไปทำบนแผ่นซิลิคอนแทน

ผลในการที่นำวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้านั้นไปใช้ในการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สามารถทำได้แต่ต้องมีการหากรณีในการทำและการกำหนดพารามิเตอร์ที่แน่นอนในการที่จะได้ ความหนาของฟิล์ม โดยในส่วนนี้ไม่สามารถที่จะสรุปค่ากระแสที่ใช้ทำได้อย่างแน่นอนเนื่องจาก เกิดปัญหาหลายอย่างเช่น น้ำยาชุบนั้นมีการเปลี่ยนแปลง, กระแสที่ใช้นั้น ไม่คงที่ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางแก้ไขและดำเนินงานต่อไป

- ทำการทดสอบหาความหนาเฉลี่ยของนิกเกิลที่ทำการชุบที่กระแสเดียวหลาย ๆ ครั้งเพื่อที่จะหาช่วงความหนา
- ทำการปรับพารามิเตอร์ให้มีช่วงในการทดสอบกว้างมากขึ้นเช่น การปรับความเข้มข้นของสารละลาย, ค่า pH, กระแสและเวลา เป็นต้น
- ทำการนำโลหะตัวเร้งนิกเกิลที่ได้จากการทดลองที่กรณีต่าง ๆ นั้นไปทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อดูผลของคาร์บอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] การชุบและเคลือบผิว, http://mylesson.swu.ac.th/gj437/O_Body1.html
- [2] การวิเคราะห์ทดสอบ, <http://www.pcd.go.th>
- [3] กองแผนงานและพัฒนา สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน, ผลการสำรวจ
อุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะและพลาสติก, 2538
- [4] ท่อนาโนคาร์บอน, <http://www.technologymedia.com/article/detail.asp?arid=2484&pid=257>
- [5] นักวิจัยไทยก้าวไกลวิจัยคาร์บอนนาโนทิวป์, คอลัมน์มองไทย, นิตยสารอเพคท ปีที่ 20 ฉบับที่
211 เมษายน 2548
- [6] ผศ.พรพิมล จันทร์วีโรจน์, Electrochemical Effects, <http://www.rsu.ac.th/therapy>
- [7] พิธิษฐ์ สิงห์ใจ, “ท่อนาโนคาร์บอน”, *Industrial Technology Review* ฉบับที่ 69 2 เมษายน 2543,
หน้า 98 – 100
- [8] รศ.ดร.วิทยา เรืองพรวิสุทธ์, ปฏิกริยาเร่ง, สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมเสริมเทคโนโลยี (ไทย
ญี่ปุ่น). พฤษภาคม 2547
- [9] สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ และ ดร.จิตติ หนูแก้ว, “งานวิจัยการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี
CVD ที่กำลังเริ่มในไทย”, วารสาร LAB.TODAY วารสารเพื่อห้องปฏิบัติการ วัต-
ทดสอบ วิเคราะห์-วิจัย และควบคุมคุณภาพ, ฉบับที่ 13, 2547, หน้า 14-20
- [10] สุวัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์, พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และพิชญ เจริญสมศักดิ์, 2529, การวิจัยและ
พัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอริง, รายงานการวิจัยประจำปี 2529 ของ
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, หน้า 115
- [11] สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิหิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ดาวรรชิตรา, 2543, การ
ออกแบบและสร้างระบบเคลือบสุญญากาศแบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง. ใน การ
ประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38. 271-278
- [12] อนันต์ ทองมอญ “ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า”, 2531, หน้า 2-222
- [13] อิศรา สระมาตา, Nanomaterials, Namotec in 4 Magazine, ปีที่1 ฉบับที่ 4 เมษายน 2548,
หน้า 6
- [14] Bunshah, Handbook of deposition technologies for films and coatings. Noyes Publications,
New Jersey, R.F. 1994, page 861
- [15] Catalyst effect on carbon nanotubes synthesized, <http://www.elsevier.com/locate/cplett>
- [16] D. Harvey, “Modern Analytical Chemistry”, 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] Jaemyung Kin and Kwangsoo No, "Growth and field of carbon nanotube on electroplated Ni catalyst coated on glass substrates", September 2001
- [18] S. Iijima, Nature (London) 354 (1991), page 56-58
- [19] Smith, D.L. 1995. Thin-film deposition: principle and practice, McGraw-Hill, Inc., New York, page 616
- [20] Wasa, K. and Shigeru Hayakawa. 1992. Handbook of sputter deposition technology: principles, technology and applications, Noyes Publications, New Jersey, page 304



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓ สมบัติทางกายภาพของสารที่นำมาใช้พื้นฐานรองในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

สาร	จุดหลอมเหลว (°C)	ค่าคงที่แลตทิซ (Å)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความนำความร้อน (W/cm deg)	สัมประสิทธิ์การกระจาย	พลังงานพื้นผิว(Jm ⁻²)	ความต้านทาน (μΩcm)	ฟังก์ชันงาน (eV)
Si	1412	5.42	2.33	0.83	24	1.46(111)	3.5x10 ¹¹	4.1
Al	660	4.04	2.7	2038	23.8	1.085/0.939	2.45	3.74
Cu	1083	3.61	8.96	4.16	16.8	2.08(100)	1.56	4.47
Pt	1769	3.92	21.45	0.699	9.0	2.691/2.055	9.81	5.29
W	3380	3.16	19.3	1.69	4.4	3.468/2.487	4.9	4.50
Mo	2615	3.14	10.22	1.38	5.1	2.877/2.116	5.2	4.27
Au	1063	4.07	19.3	3.11	14.2	1.626/1.345	2.04	4.58