

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ค.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

The Development of Thin Films Process by Sputtering Method.

โดย

นายสุรสิงห์ ไชยคุณ

นายนิรันดร์ วัฑฒอนันต์

นายสกุล ศรีญาณลักษณ์

นายจักรพันธ์ ทาวรรีธา

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

26 ส.ค. 2552

249247

BK 0060297.

เริ่มบริการ

31 ส.ค. 2552

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

มหาวิทยาลัยบูรพา

ประจำปีงบประมาณ 2540

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

The Development of Thin Films Process by Sputtering Method.

โดย

นายสุรสิงห์ ไชยคุณ
นายนิรันดร์ วิทิตอนันต์
นายสกุล ศรีญาณลักษณ์
นายจักรพันธ์ ถาวรชिरา
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

มหาวิทยาลัยบูรพา

ประจำปีงบประมาณ 2540

ประกาศคุณูปการ

โครงการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง" เป็นโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจาก หมวดเงินอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยบูรพา ปีงบประมาณ 2540 โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดีโดยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูงได้แก่ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้การสนับสนุนการโครงการวิจัยนี้ ทำให้คณะผู้วิจัยได้มีโอกาสเริ่มต้นดำเนินการวิจัยและประสบความสำเร็จในที่สุด คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิมสุวรรณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัยตั้งแต่เริ่มตลอดจนให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าแก่คณะผู้วิจัยจนเสร็จสิ้นโครงการ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่สนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อศึกษาหลักการทํางาน และเทคนิคในการออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง แบบดีซี แมกนีตอน ซึ่งมีขั้นตอนการศึกษาคือการออกแบบและสร้างระบบเคลือบ การทดสอบระบบเคลือบและการทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้ ระบบเคลือบที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีส่วนประกอบสำคัญคือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทดและเป่าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบป้อนแก๊ส ภาชนะสุญญากาศทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 3.0 มิลลิเมตร รูปทรงกระบอกมีปริมาตรประมาณ 9.14 ลิตร คาโทดมีพื้นที่เป่าสารเคลือบแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร พร้อมคาโทดซิลด์ ติดตั้งแม่เหล็กไว้ด้านหลังเป่าสารเคลือบและมีความเข้มสนามแม่เหล็กบนผิวเป่าสารเคลือบประมาณ 370 เกาส์ ระบบน้ำหล่อเย็นใช้หล่อเย็นคาโทด เป่าสารเคลือบและส่วนบนของเพดควาล์วของเครื่องสุบแพร้อ ระบบจ่ายไฟฟ้าเป็นระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง แบบฟูลเวฟ สามารถปรับโวลต์เตจ ช่วง 0-450 โวลต์ กระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 0-2 แอมป์ ระบบป้อนแก๊สควบคุมด้วยวาล์วเปิด-ปิด และวาล์วรูเข็มทำหน้าที่เปิด-ปิดและควบคุมปริมาณแก๊สที่เข้าสู่ระบบติดตั้งอยู่ที่แผ่นปิดบน และมีท่อนำแก๊สต่อเข้ากับคาโทดซิลด์

จากการทดสอบระบบเคลือบพบว่าระบบเคลือบสามารถทำความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำสุด 8.0×10^{-6} มิลลิบาร์ ในเวลา 60 นาที เมื่อทดสอบการเคลือบโดยใช้ไททานเนียมและทองแดงเคลือบบนกระจกสไลด์ พบว่าขณะเคลือบสีกาโทดโกลว์ของไททานเนียมจะมีสีเป็นสีฟ้าขาว ส่วนทองแดงจะเป็นสีฟ้าอมเขียว ฟิล์มที่ได้เมื่อสังเกตรด้วยสายตาพบว่ามีสีที่แวววาวของสารเคลือบและไม่ปรากฏสภาพหมองคล้ำของฟิล์มโลหะเหล่านี้ และเมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มบางโดยการขีดถูด้วยนิ้วมือ ขูดด้วยเล็บ พบว่าไม่สามารถทำให้ฟิล์มบางที่ได้หลุดออก และเมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ในอากาศพบว่าจะมีการเกิดออกไซด์เฉพาะฟิล์มบางทองแดงเท่านั้นส่วนฟิล์มบางของไททานเนียมจะยังคงสภาพเหมือนเดิม

สารบัญ

บทที่	หน้า
1. บทนำ	1
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
3. วิธีดำเนินการวิจัย	40
4. ผลและอภิปรายผลการวิจัย	43
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ บรรณานุกรม	55 60

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจำแนกองศาแห่งสูญญากาศ ตามความดันภายในระบบ	6
2.2	พลังงานขีดเริ่มของเป่าสารเคลือบชนิดต่างๆ	14
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของระบบหล่อเย็น ไม่เกิน 10°C	30
4.1	ค่า k และค่า n ของระบบเคลือบที่ความดันต่างๆ สำหรับเป่าโททานเนียมและทองแดง	52
4.2	ผลการเคลือบฟิล์มบางที่ได้	54

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด	5
2.2 ผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่มีความดัน 10^{-3} - 10^{-7} ทอรร	8
2.3 การไหลของแก๊สในระบบสุญญากาศ	9
2.4 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวหน้าวัสดุ	13
2.5 การเปลี่ยนแปลงค่ายึดติ่งของผิวทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานค่าต่างๆ	15
2.6 การเปลี่ยนแปลงค่ายึดติ่งของเป่าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่างๆ	16
2.7 การเปลี่ยนแปลงของยึดติ่งสปีดเตอริงเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV วิ่งชนเป่าของนิเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่างๆ เมื่อวัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป่า	16
2.8 ก) การกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสปีดเตอริงจากไอออนของแก๊ส Kr ที่พลังงานต่างๆ ข) เปรียบเทียบการกระจายค่าความเร็วของอะตอมทองแดงที่ได้จากการระเหยสารและจากการสปีดเตอริง	17
2.9 ก) พลังงานเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออนของไอออนของ Kr พลังงาน 1200 eV ที่ค่าพลังงานต่างๆ ข) ความเร็วเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออน Kr พลังงาน 1200 eV	18
2.10 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดี ซี โกลว์ ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สไนออนความดัน 1 ทอรร	19
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ทะลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (p) และระยะทางระหว่างอิเล็กโตรด (d)	20

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.12 การเกิดคอนอร์มอลโกลว์ดิสซาร์จ ของหลอดแก๊สนีออนยาว 50 เซนติเมตร ที่ความดัน 1 ทอร์	21
2.13 ระบบสปีดเตอร์ริงแบบ ดี ซี ไค โอค	23
2.14 ผลของความดันแก๊สในระบบสปีดเตอร์ริงที่มีผลต่ออัตราการเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบสปีดเตอร์ริงของนิกเกิลที่ใช้ความต่างศักย์ 3000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร	24
2.15 a, b, c การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว d และ e การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกัน ในลักษณะต่างๆ	25
2.16 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักร่อนของเป้าสารเคลือบ ในพลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง	27
2.17 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวทางเดินของอิเล็กตรอนบนผิวเป้าสารเคลือบ ที่คาโทด	28
2.18 โครงสร้างอาโนดหรือที่วางชิ้นงาน ที่ควบคุมอุณหภูมิได้	33
2.19 a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ดิซซาร์จของพลาสมาแมกนีตรอน คาโทดรูปสี่เหลี่ยม ที่ความดันแก๊สค่าต่างๆ	
b) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดิซซาร์จและความดัน เมื่อกระแสคงที่	41
4.1 ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง ที่สร้างขึ้น	43
4.2 ภาพขณะสุญญากาศของระบบเคลือบ	45
4.3 ลักษณะของคาโทดและเป้าสารเคลือบของระบบเคลือบ	46
4.4 ระบบน้ำหล่อเย็นของระบบเคลือบ	48
4.5 ภาชนะจ่ายไฟฟ้าของระบบเคลือบ	48
4.6 ชุดป้อนแก๊สของระบบเคลือบ	49

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.7 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของระบบ (ครั้งที่ 1)	50
4.8 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของระบบ (ครั้งที่ 2)	51
4.9 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของระบบ (ครั้งที่ 3)	51
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ไททานเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ	53
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบ	53
4.12 ระบบเคลือบขณะทำการเคลือบ	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการเคลือบผิววัสดุวิธีหนึ่งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่ดีขึ้น เช่น ให้มีความคงทน ทนทาน หรือสวยงามมากขึ้นรวมถึงเพื่อการใช้ประโยชน์ในงานอื่นๆ การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนผิวของวัสดุที่ต้องการ โดยเริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค แล้วจึงเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับเมื่อสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุรองรับก็เกิดการควบแน่นและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับในที่สุด ทั้งนี้ฟิล์มบาง (thin film) หมายถึง ชั้นของอะตอม หรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ การระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” อาจพิจารณาจากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือถ้าเป็นการใช้ สมบัติเชิงผิว (surface properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มหนา” ทั้งนี้จะเห็นว่าฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็น “ฟิล์มบาง” หรือ “ฟิล์มหนา” ก็ได้ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ

การเคลือบผิววัสดุนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการต่างๆ หลายวิธี สำหรับอุตสาหกรรมการเคลือบในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่จะใช้การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แต่วิธีนี้จะใช้สารละลายเคมีในกระบวนการมากที่สุดทำยากจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามก็ยังมีวิธีการเคลือบอีกวิธีหนึ่งซึ่งกำลังได้รับความสนใจในการทำวิจัยและพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทนวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้า นั่นคือ “การเคลือบในสุญญากาศ” เนื่องจากกระบวนการเคลือบนี้จะเกิดในสุญญากาศเท่านั้นทำให้ไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและยังให้ชั้นเคลือบที่มีคุณภาพสูงกว่าด้วย

การเคลือบในสุญญากาศยังแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ การเคลือบแบบ Chemical Vapor Deposition : CVD ซึ่งอาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ ได้แก่ วิธี plasma CVD และ วิธี laser CVD เป็นต้น และการเคลือบแบบ Physical Vapor Deposition : PVD ซึ่งอาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร และ วิธีสปัตเตอร์ริง เป็นต้น

ทั้งนี้การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี PVD นั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น

1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (evaporation) เป็นการเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยสารที่อุณหภูมิสูงแล้วเคลือบฟิล์มบางลงบนวัสดุรองรับ (substrate) ภายใต้สุญญากาศ การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้จะให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับไม่ค่อยดีนัก ต้องมีการพ่นทับด้วยแล็กเกอร์เพื่อให้ความคงทนสูงขึ้นแต่ก็นับว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่เสียค่าใช้จ่ายน้อย และไม่ต้องอาศัยกระบวนการทางเคมีใดๆ ในทุกขั้นตอนการเคลือบ นิยมใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไดอิเล็กตริก เช่น MgF_2 หรือ oxide ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสลงบนเลนส์ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตา และกระจกเลเซอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ อีกมาก

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ (sputtering) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สำคัญกระบวนการทางฟิสิกส์ซึ่งให้ความคงทนในการยึดเกาะของฟิล์มสูงกว่าวิธีระเหยสาร กระบวนการเคลือบนี้เกิดขึ้นภายใต้บรรยากาศความดันต่ำขนาดระหว่าง 10^{-3} - 10^{-1} ทอรร และอาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าของแก๊ส ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนจะถูกเร่งเข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบ ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500-10,000 โวลต์ สารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊สจะหลุดออกและวิ่งด้วยความเร็วสูงลงเคลือบลงบนวัสดุรองรับในทุกทิศทาง พลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมาจากกระบวนการสปัตเตอร์นี้สูงกว่าอนุภาคที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่อตกกระทบลงบนวัสดุรองรับจะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อวัสดุรองรับ และทำให้การยึดเกาะของฟิล์มดีมาก วัสดุที่เป็นสารเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์อาจเป็นโลหะหรือโลหะ และสารที่ต้องการถูกเคลือบอาจเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีที่วัสดุรองรับต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์มีข้อดีหลายข้อ เช่น สามารถเคลือบฟิล์มบางที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้ ในขณะที่การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารจำเป็นต้องหลอมสารเคลือบให้เป็นของเหลวเสียก่อน และถ้าสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวสูงมากก็จะไม่สามารถทำการเคลือบได้ด้วยวิธีระเหยสาร นอกจากนี้การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ยังสามารถทำได้ในสภาวะที่มีความดันสูงกว่าวิธีการระเหยสาร

สำหรับในวงการอุตสาหกรรมนั้นได้มีการนำเอาวิธีการเคลือบแบบสปัตเตอร์ไปใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องมือและวัสดุต่างๆ เช่น เลนส์ กระจกสะท้อนแสงและกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ กระจกเลเซอร์ สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ใช้วิธีเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ในการเคลือบแข็ง เช่น การเคลือบไททานเนียมไนไตรด์

สำหรับในแง่ของการวิจัย นักวิจัยสามารถใช้วิธีการเคลือบแบบสปีดเตอริงในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบได้ทำให้สามารถศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างในรูปของฟิล์มบางได้ซึ่งสมบัติบางประการดังกล่าวไม่สามารถวัดได้เมื่อวัตถุอยู่ในสภาพเป็นก้อนสมบัติทางฟิสิกส์ดังกล่าวเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม

จากรายละเอียดข้างต้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาวิจัยการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศด้วยวิธีสปีดเตอริง โดยเริ่มจากการศึกษาหลักและการสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเตอริง ซึ่งจากการศึกษานี้จะทำให้คณะผู้วิจัยทราบถึงเทคนิคและฟิสิกส์ของเครื่องมือชนิดนี้ อย่างละเอียด รวมถึงเทคนิคและวิธีการเคลือบฟิล์มบางต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่การวิจัยด้านวัสดุ อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาบุคลากรอันได้แก่คณะผู้วิจัยซึ่งจะได้นำความรู้และประสบการณ์ที่ได้นี้ถ่ายทอดแก่นิสิตและผู้สนใจต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานและเทคนิคในการออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอริง แบบดีซีแมกนีตรอน (D.C Magnetron Sputtering)
2. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการสปีดเตอริงสำหรับสารเคลือบชนิดต่างๆ
3. เพื่อพัฒนาบุคลากรทางด้านฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบด้วย วิธีสปีดเตอริงแบบ ดีซี แมกนีตรอน ที่สามารถเคลือบฟิล์มบางบนวัสดุได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องมือหลักที่ใช้ในการวิจัยฟิสิกส์ของวัสดุที่เป็นฟิล์มบาง
2. ได้เครื่องมือหลักที่ใช้ในการสอนวิชาด้านเทคโนโลยีสุญญากาศ
3. บุคลากรในหน่วยงานมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยคือศึกษาหลักการทำงานและเทคนิคในการออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง ในส่วนของเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งเป็น (1) ระบบสุญญากาศ (2) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (3) กระบวนการแก๊สดีสชาร์จ (4) การเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี สปัตเตอร์ริง (5) อุปกรณ์ในระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง และ (6) ลักษณะจำเพาะตัวของระบบสปัตเตอร์ริง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

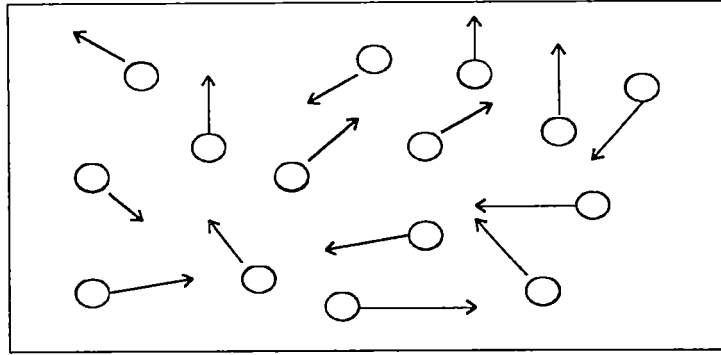
2.2 ระบบสุญญากาศ^{[1][2]}

"สุญญากาศ" (vacuum) เป็นภาษากรีก หมายถึง "ที่ว่าง" ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วถ้ามีภาชนะปิดอันหนึ่งแล้วสูบ อากาศ แก๊ส และไอของสารต่างๆ ในภาชนะนั้นออกก็จะเรียกสภาวะในภาชนะหลังการสูบว่า "สุญญากาศ" ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าความเป็นสุญญากาศของภาชนะจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นกับการสูบน้ำออกจากภาชนะนั้นได้มากน้อยเพียงใด หากสูบน้ำออกจากภาชนะได้มากความเป็นสุญญากาศของภาชนะก็มาก แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีระบบใดหรือภาชนะใดที่เป็นสุญญากาศได้อย่างสมบูรณ์ เพราะไม่มีเครื่องมือใดสามารถสูบน้ำ อากาศ แก๊ส และไอชนิดอื่นๆ ออกจากระบบหรือภาชนะได้หมด

2.2.1 ธรรมชาติของสุญญากาศ

"แก๊ส" ในสุญญากาศจะหมายถึง แก๊สที่ไม่กลั่นตัว (noncondensable gases) และไอ (vapors) ทุกชนิด โดย "แก๊สที่ไม่กลั่นตัว" หมายถึง แก๊สที่ไม่สามารถที่จะกลั่นตัวเป็นของเหลวหรืออัดตัวเป็นของแข็งได้ภายใต้สภาวะปกติ เช่น อากาศแห้งและไอน้ำก็เป็นตัวอย่างที่ดีของไอที่มีอยู่ในอากาศโดยทั่วไป

ตัวอย่างการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละโมเลกุลอาจจะมีอัตราเร็วต่างกันไป อย่างไรก็ตามก็สามารถพิจารณาได้ว่าโมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากันเรียกอัตราเร็วนี้ว่า "อัตราเร็วเฉลี่ย" นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโดยเฉลี่ยแล้วก็ยังถือได้ว่าจำนวนโมเลกุลที่เคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางเท่ากันอีกด้วย และเมื่อแก๊สในภาชนะได้รับความร้อนจาก



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด

ภายนอกอัตราเร็วเฉลี่ยนี้จะมีค่าสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอากาศ แก๊ส หรือไอของธาตุใด ก็ตาม ระยะระหว่างโมเลกุลจะมีค่ามากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลมากๆ และถ้ามีการสูบเอาแก๊สนั้นออกไปจากภาชนะปิดระยะระหว่างโมเลกุลนี้ก็จะมีค่ามากขึ้น

เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สจะวิ่งด้วยอัตราเร็วสูงในทิศทางต่างๆ กัน ซึ่งนอกจากจะทำให้โมเลกุลชนกันเองแล้วยังทำให้โมเลกุลเหล่านี้ชนผนังภาชนะอีกด้วย เมื่อโมเลกุลชนผนังภาชนะแล้วจะสะท้อนกลับมา โมเลกุลจะถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่ผนังทำให้เกิดแรงที่กระทำต่อผนังภาชนะ แรงที่โมเลกุลแก๊สกระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางหน่วยของผนังก็คือ ความดัน (pressure) ของแก๊สในภาชนะนั่นเอง ซึ่งความดันนี้เป็นปริมาณที่สำคัญมากในทางสุญญากาศ เมื่อมีการสูบเอาแก๊สออกจากภาชนะความดันก็จะลดลง เพราะจำนวนโมเลกุลที่ชนผนังภาชนะในหนึ่งหน่วยเวลาลดลง เมื่อมีการให้ความร้อนแก่แก๊สอุณหภูมิของแก๊สก็จะสูงขึ้น อันมีผลทำให้อัตราเร็วของโมเลกุลภายในมากขึ้นไปด้วยจำนวนครั้งที่โมเลกุลชนผนังภาชนะในหนึ่งหน่วยเวลาจึงเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น

2.2.2 หน่วยของความดัน

หน่วยของความดัน คือ หน่วยของ “แรง/พื้นที่” ทั้งนี้หน่วยของความดันในระบบ SI คือ นิวตัน/ตารางเมตร หรือ ปาสกาล มีการกำหนดค่าความดันของอากาศที่ระดับน้ำทะเลเมื่ออุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสว่าเท่ากับ ความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งความดันนี้มีค่าประมาณ 10^5 นิวตัน/ตารางเมตร ความดันขนาดนี้สามารถดันปรอทให้ขึ้นไปตามท่อสุญญากาศได้สูง 760 มิลลิเมตรจากการที่ความดันของอากาศสามารถดันให้ปรอทให้ขึ้นไปตามท่อสุญญากาศได้นี้เองจึงได้มีการใช้ความสูงของปรอทเป็นหน่วยวัดความดันอีกหน่วยหนึ่ง โดยความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 10^5 นิวตัน/ตารางเมตร มีค่าเท่ากับ 760 มิลลิเมตรของปรอท

นอกจากหน่วยวัดดังกล่าวแล้วยังมีการใช้หน่วยอื่นๆ ในการวัดความดันอีก เช่น

หน่วย ทอร์รี่ (torr)	โดย 1 ทอร์รี่	เท่ากับ 1 มิลลิเมตรของปรอท
หน่วย บาร์ (bar)	โดย 1 บาร์	เท่ากับ 750.06 มิลลิเมตรของปรอท
หน่วย ไมครอน (micron)	โดย 1 ไมครอน	เท่ากับ 10^{-3} ทอร์รี่

ในทางเทคนิคเกี่ยวกับสุญญากาศมักใช้หน่วย มิลลิเมตรของปรอท หรือ ทอร์รี่ หรือ บาร์ ในการวัดความดัน มากกว่าหน่วย นิวตัน/ตารางเมตร สำหรับปริมาณที่แสดงว่าระบบปิดหนึ่งๆ นั้นมีความเป็นสุญญากาศมากน้อยเพียงใดนั้นสามารถบอกได้ด้วยองศาแห่งสุญญากาศ ซึ่งสามารถจำแนกได้โดยการใช้ความดันภายในระบบนั้นๆ เป็นเกณฑ์

ตารางที่ 2.1 การจำแนกองศาแห่งสุญญากาศ ตามความดันภายในระบบ

องศาแห่งสุญญากาศ	ความดันภายในระบบ (มิลลิเมตรของปรอท)
ต่ำ (low vacuum)	760 - 25
ปานกลาง (medium vacuum)	25 - 10^{-3}
สูง (high vacuum)	10^{-3} - 10^{-6}
สูงมาก (very high vacuum)	10^{-3} - 10^{-9}
สูงอย่างมาก (ultra high vacuum)	10^{-9} และน้อยกว่า

2.2.3 ระยะปลอดการชน (Mean Free Path)

โมเลกุลแก๊สในภาชนะมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงและอาจชนกันเองก่อนที่จะชนผนังภาชนะ ถ้าพิจารณาโมเลกุลเฉพาะตัวโมเลกุลหนึ่งให้เป็นโมเลกุล A ระยะทางที่โมเลกุล A เคลื่อนที่ได้หลังการชนกับโมเลกุลอื่นแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาโมเลกุล B อีกตัวหนึ่งก็จะพบว่าระยะระหว่างการชนของ B ไม่เท่ากับของ A อย่างไรก็ตามเราสามารถหาค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างการชนของแต่ละโมเลกุลของแก๊สได้ เรียกระยะเฉลี่ยนี้ว่า "ระยะปลอดการชน"

ค่าของระยะปลอดการชนขึ้นกับความดัน กล่าวคือแก๊สที่มีความดันมากจะมีระยะปลอดการชนสั้น เพราะที่อุณหภูมิหนึ่งๆ แก๊สที่มีความดันมากจะมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูงกว่าแก๊สที่มีความดันต่ำ สำหรับระบบปิดอันหนึ่งๆ ถ้าความดันของแก๊สในระบบนั้นต่ำพอ โมเลกุลของแก๊สก็จะสามารถเคลื่อนที่จากผนังด้านหนึ่งของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่งได้โดยไม่มีการชนกับโมเลกุลอื่น เรียกความดันในสภาวะนี้ว่า ช่วงความดันของโมเลกุลอิสระ (free molecule pressure region) ซึ่งในสภาวะนี้ระยะปลอดการชนจะมีค่ายาวมากเมื่อเทียบกับขนาดของภาชนะที่ใส่แก๊ส ในทางกลับกันก็มีช่วงของความดันที่ระยะปลอดการชนมีค่าน้อยกว่าขนาดของภาชนะมาก กรณีเช่นนี้เมื่อโมเลกุลหนึ่งเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่ง โมเลกุลนั้นจะชนกับโมเลกุลอื่นหลายครั้ง หาก

แก๊สในสภาวะดังกล่าวนี้กำลังไหลอยู่ในท่อ การไหลจะมีลักษณะเหมือนการไหลของของเหลวที่มีความหนืดสูงจึงเรียกความดันในช่วงที่มีระยะปลอดการชนสั้นๆ นี้ว่า ช่วงหนืด (viscous region)

ค่าของระยะปลอดการชนของแก๊สแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยแก๊สที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีระยะปลอดการชนน้อยกว่าแก๊สที่มีโมเลกุลเล็กกว่า แม้ว่าอากาศจะประกอบด้วยแก๊สหลายชนิดก็สามารถหาค่าเฉลี่ยของระยะปลอดการชนของอากาศได้ตามสมการสมการ

$$\text{ระยะปลอดการชน (เซนติเมตร)} = 5/(\text{ความดันในหน่วยไมครอน}) \quad \dots\dots (2.1)$$

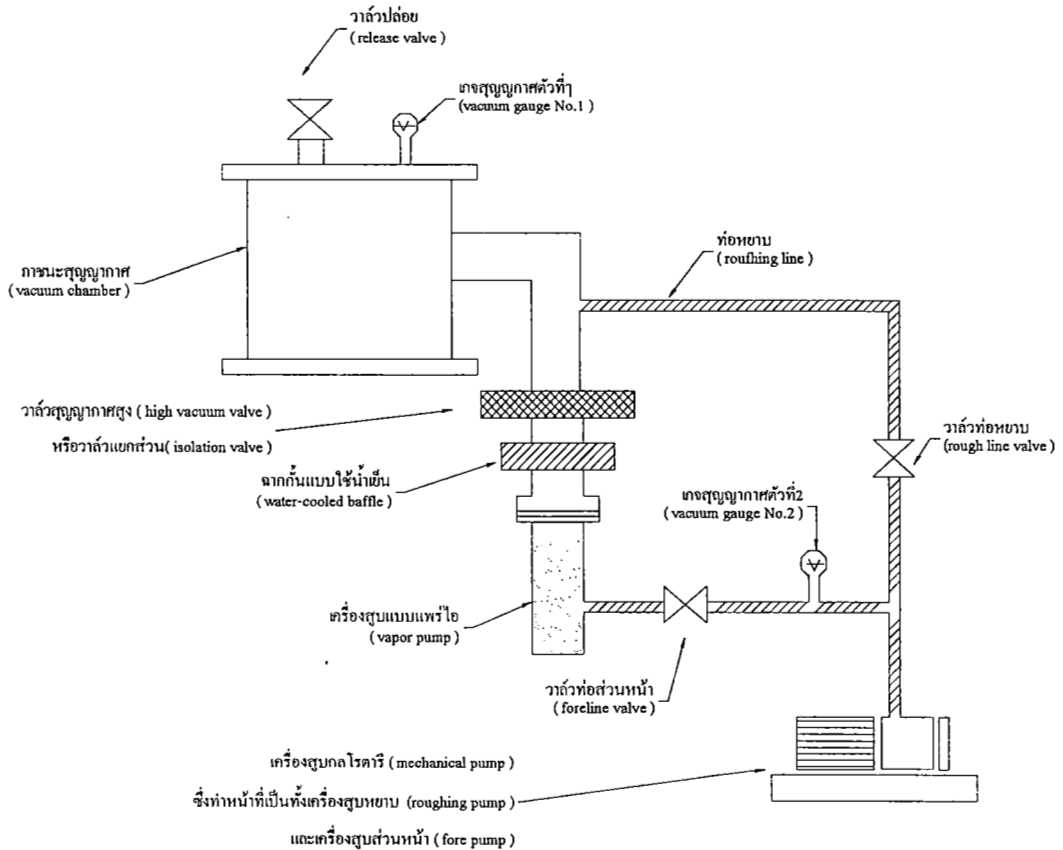
2.2.4 ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศทั้งหลายอาจจะมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกันขึ้นกับการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งาน อย่างไรก็ตามระบบสุญญากาศหนึ่งๆ จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้ (1) ภาชนะสุญญากาศ (2) ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ และ (3) ระบบท่อเชื่อมต่อ นอกจากนี้ส่วนประกอบหลักเหล่านี้แล้วอาจจะมีอุปกรณ์อื่นเพิ่มเติมเช่น วาล์ว (valve) ที่ดักไอ (trap) เป็นต้น ความจำเป็นและความต้องการอุปกรณ์เหล่านี้ขึ้นกับการออกแบบและการใช้งาน

ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการให้ภาชนะสุญญากาศมีความดัน 10^{-3} ทอร์หรือสูงกว่านั้นอาจทำได้โดยต่อภาชนะสุญญากาศเข้ากับเครื่องสูบลกลโรตารี (rotary mechanical pump) ก็เพียงพอ แต่ถ้าต้องการให้ภาชนะมีความดันต่ำกว่า 10^{-5} ทอร์ หรือต่ำกว่า ก็จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (vapor pump) ร่วมกับเครื่องสูบลกลโรตารี รูปที่ 2.2 แสดงผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่ให้ ความดันต่ำกว่า 10^{-5} ทอร์ ท่อหยาบ (roughing line) ในระบบเป็นท่อที่ต่อเชื่อมระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบลโดยตรง โดยก่อนที่จะใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอต้องใช้เครื่องสูบลจนความดันภายในภาชนะมีค่าประมาณ 10^{-3} ทอร์ก่อน ด้วยเหตุนี้จึงเรียกเครื่องสูบลในระบบนี้ว่า เครื่องสูบหยาบ (roughing pump)

ขณะที่เครื่องสูบลกลโรตารีทำงานต้องเปิดวาล์วท่อหยาบ (roughing line valve) พร้อมกับปิดวาล์วท่อส่วนหน้า (foreline valve) จนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่า 10^{-2} ถึง 10^{-3} ทอร์ ก่อนแล้วจึงทำการสูบลอากาศที่เหลือด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ โดยขณะนี้จะต้องปิดวาล์วท่อหยาบพร้อมกับเปิดวาล์วท่อส่วนหน้าและวาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valve) ซึ่งวาล์วตัวหลังนี้สามารถแยกภาชนะสุญญากาศออกจากส่วนที่เหลือของระบบ บางครั้งเรียกวาล์วนี้ว่า วาล์วแยกส่วน (isolation valve) อากาศที่เครื่องสูบบแบบแพร่ไอสูบลออกจากภาชนะจะไปรวมกันอยู่ที่ส่วนล่างของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอจากนั้นเครื่องสูบลกลโรตารีจะสูบลอากาศส่วนนี้ออกสู่ภายนอกอีกต่อหนึ่ง และเรียกเครื่องสูบลกลโรตารีที่ทำหน้าที่นี้ว่า เครื่องสูบลส่วนหน้า (fore pump) เรียกท่อที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบบแบบแพร่ไอกับเครื่องสูบลส่วนหน้าว่า ท่อส่วนหน้า (fore line) เรียกวาล์วปิด-เปิดท่อส่วนหน้าว่า วาล์ว

ท่ส่วนหน้า ระบบสุญญากาศบางระบบจะแยกเครื่องสูบลมโรตารีที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบลมส่วนหน้า และเครื่องสูบลมหายออกจากกัน แต่บางระบบก็ใช้เครื่องสูบลมเพียงตัวเดียวในการทำหน้าที่ทั้งสอง ระบบที่แสดงในรูปที่ 2.2 เป็นระบบที่ใช้เครื่องสูบลมโรตารีเพียงตัวเดียว วาล์วปล่อย (release valve) ที่รูป 2.2 ทำหน้าที่ปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะทำให้ความดันภายในภาชนะเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยจะเปิดวาล์วปล่อยนี้เมื่อไม่ต้องการให้สภาพภายในภาชนะไม่เป็นสุญญากาศ



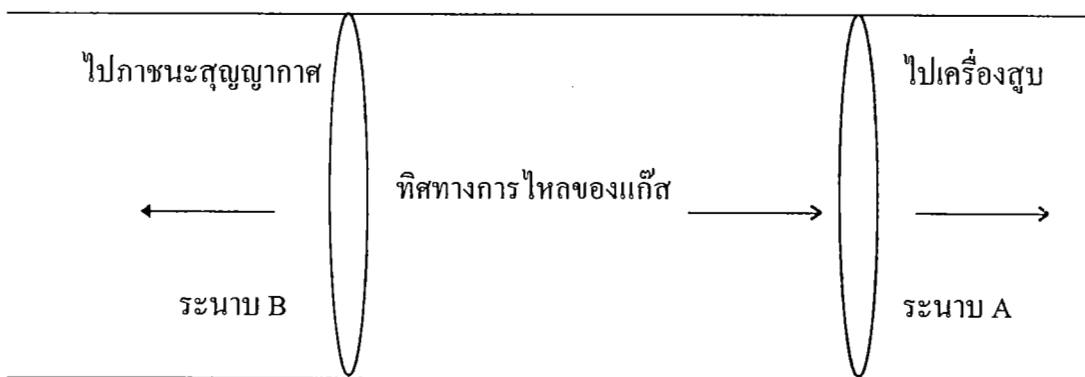
รูปที่ 2.2 ผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่มีความดัน 10^{-3} - 10^{-7} ทอรร

เครื่องมือวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศเรียกว่าเกจสุญญากาศ (vacuum gauge) ซึ่งระบบสุญญากาศที่แสดงในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยเครื่องวัดนี้ 2 ตัว คือ เกจสุญญากาศตัวที่หนึ่ง ต้องมีความสามารถวัดความดันต่ำได้ เพราะเครื่องวัดนี้ต้องวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-6} ทอร์รี่ ส่วนเกจตัวที่สองจะทำหน้าที่วัดความดันในท่อส่วนหน้าซึ่งเป็นบริเวณที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบบแบบแพร์ไอกับเครื่องสูบลโรตารี นอกจากเครื่องสูบอากาศ วาล์ว และเครื่องวัดความดันแล้ว ระบบสุญญากาศความดันต่ำยังประกอบไปด้วยฉากกั้น (baffle) ซึ่งถ้าเครื่องสูบอากาศแบบไอในระบบเป็นแบบที่ใช้ น้ำมันก็มักจะใช้ฉากกั้นแบบน้ำเย็น แต่ถ้าเครื่องสูบใช้ปรอทก็อาจจะต้องใช้ใน โตรเจนเหลวมาเป็นฉากกั้น

2.2.5 ปริมาณของแก๊สและแรงขับ

ปริมาณของแก๊ส (quantity of gas) เป็นผลคูณระหว่างความดันกับปริมาตรของแก๊สที่ปรากฏที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบนิยามของปริมาณแก๊สนี้กับกฎแก๊สจะเห็นได้ว่าค่าของปริมาณแก๊สนี้แปรผันโดยตรงกับจำนวนโมเลกุลของแก๊ส

นอกจากปริมาณของแก๊สแล้วยังมีการกำหนดปริมาณที่เรียกว่า แรงขับ (throughput) ขึ้นเพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหลของแก๊สโดยกำหนดว่า ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ แรงขับ ก็คือปริมาณของแก๊สที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของส่วนของระบบสุญญากาศในหนึ่งหน่วยเวลา



รูปที่ 2.3 การไหลของแก๊สในระบบสุญญากาศ

ในรูปที่ 2.3 การที่แก๊สจะไหลจากซ้ายไปขวาได้นั้น ความดันทางซ้ายจะต้องมากกว่า ความดันทางขวา ถ้าสามารถวัดปริมาณแก๊สที่ผ่านระนาบ A ได้โดยตรงว่ามีค่าเท่าใดในช่วงเวลา หนึ่งๆ ก็จะสามารถจะคำนวณค่าแรงขับได้โดยตรง โดยนำจำนวนของแก๊สนั้นหารด้วยเวลาที่ใช้ แต่ ในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดปริมาณของแก๊สได้โดยตรง ปริมาณที่สามารถวัดได้คือความดันที่จุด A และปริมาตรแก๊สที่ไหลผ่านระนาบ A ในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = \frac{PV}{t} \quad \text{..... (2.2)}$$

เมื่อ P เป็นความดันที่จุด A

V เป็นปริมาตรแก๊สที่ไหลผ่านระนาบ A ในเวลา t วินาที

Q เป็นแรงขับ (หน่วยของแรงขับในระบบ SI คือ ปาสคาล - เมตร³/วินาที)

2.2.6 การวัดความดันในระบบสุญญากาศ

เครื่องมือสำหรับใช้วัดความดันในระบบสุญญากาศเรียกว่า "เครื่องวัดความดัน" หรือ "เกจสุญญากาศ" (vacuum gauge) หรือ "เกจความดัน" (pressure gauge) เครื่องวัดนี้มีหลายแบบโดย แต่ละแบบมีความเหมาะสมที่จะวัดค่าความดันในช่วงที่ต่างกัน โดยทั่วไปการวัดความดันที่มีค่าสูงๆ จะใช้หลักการที่ให้ความต่างศักย์ของแก๊สกระทำต่อเครื่องวัดโดยตรง แล้วนำแรงนั้นมาแปลงผลเป็น ความดัน ส่วนการวัดความดันที่มีค่าต่ำๆ จะใช้สมบัติบางประการของแก๊สและไอ เช่นการนำความร้อนมาเป็นหลักในการวัด อาจจำแนกเครื่องวัดความดันออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

1. เครื่องวัดแบบไฮโดรสแตติก (hydrostatic gauge) เป็นเครื่องวัดความดันที่ใช้แรงดันจริงของแก๊สเป็นตัวหลักในการวัด เช่น มาโนมิเตอร์ (manometer) เกจแม็คคลาวด์ (McLeod gauge) เกจบัวดอง (bourdon gauge) เป็นต้น

2. เครื่องวัดแบบการนำความร้อน (thermal conductivity gauge) หลักการทำงานของ เครื่องวัดชนิดนี้มาจากความจริงที่ว่า ค่าการนำความร้อนของแก๊สขึ้นกับค่าความดัน ตัวอย่างเช่น เครื่องวัดแบบพิรานี (Pirani gauge) เครื่องวัดแบบเทอร์มอคัปเปิล (Thermocouple gauge) เป็นต้น เครื่องวัดประเภทนี้สามารถวัดความดันได้ในช่วง $760-10^{-3}$ ทอรร

3. เครื่องวัดแบบความหนืด (viscosity gauge) เครื่องวัดชนิดนี้ใช้หลักการที่ว่าเมื่อมี การเปลี่ยนแปลงความดันจะทำให้ความหนืดของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปด้วย ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิด นี้ได้แก่ เครื่องวัดแบบความหนืดแลงมัวร์ (Langmuir viscosity gauge)

4. เครื่องวัดแบบเรดิโอมิเตอร์ (radiometer gauge) ใช้หลักการว่า โมเลกุลที่มีอัตราเร็วสูง (คือมีอุณหภูมิสูง) สามารถก่อให้เกิดแรงได้มากกว่าโมเลกุลที่มีอัตราเร็วต่ำ (ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ) ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ เครื่องวัดคุดเซน (Knudsen gauge)

5. เครื่องวัดแบบไอออไนเซชัน (ionization gauge) เครื่องวัดชนิดนี้จะวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สแล้วแปลงเป็นความดันเช่น เครื่องวัดเทอร์โมอิกไอออไนเซชัน (thermionic ionization gauge) เครื่องวัดแบบเพนนิ่ง หรือ เครื่องวัดแบบฟิลลิป หรือ เครื่องวัดแบบคาโทดเย็น (penning or philips or cold cathode gauger) เครื่องวัดชนิดนี้จะใช้ในการวัดความดันต่ำ เช่น เครื่องวัดแบบเพนนิ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วง 10^{-2} ถึง 10^{-6} ทอรรี่ ในขณะที่เครื่องวัดแบบเทอร์โมอิกไอออไนเซชันวัดความดันได้ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-6} ทอรรี่

6. เครื่องวัดแบบหลอดคิสซาร์จ (discharge tube gauge) เครื่องวัดชนิดนี้มีหลักในการทำงานว่าเมื่อใส่สนามไฟฟ้าที่มากพอเข้าไปในแก๊สความดันต่างๆ กัน แก๊สนั้นสามารถเรืองแสงได้ โดยสีของแสงที่ได้ขึ้นกับค่าความดันของแก๊ส เครื่องวัดชนิดนี้วัดความดันได้ในช่วง 5 ถึง 0.10 ทอรรี่ และมักจะใช้เครื่องวัดชนิดนี้ในการตรวจสอบรอยรั่วของระบบสุญญากาศ

2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

2.3.1 กระบวนการเกิดการสปัตเตอริง¹³¹

กระบวนการสปัตเตอริง เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ ทั้งนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ กระบวนการสปัตเตอริงจำเป็นต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

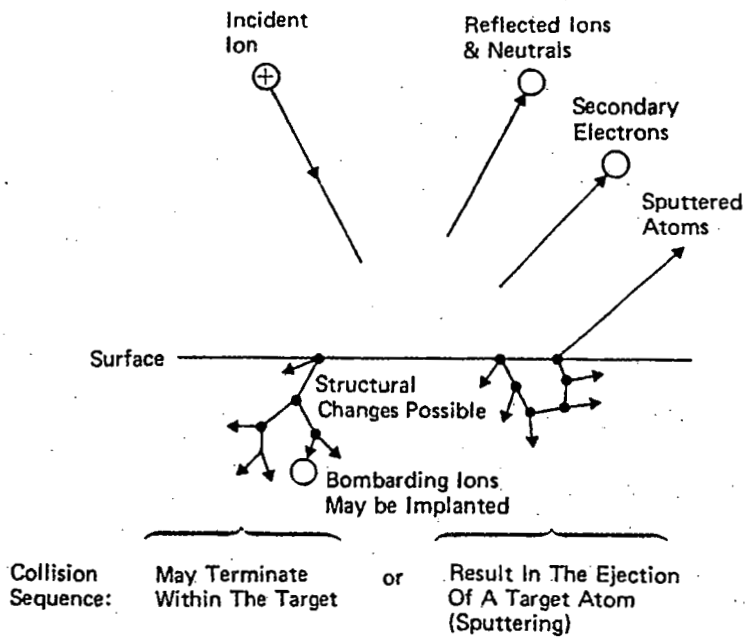
1. เป้าสารเคลือบ ที่จะทำหน้าที่เป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนเกิดกระบวนการสปัตเตอริงและมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบออกมา
2. อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมานั้น ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่างๆ ก็ได้ ทั้งนี้วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการสร้างทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงมากเพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงนั้นคือ การเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมากทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้ ทั้งนี้การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงเลือกเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอร์นี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบฟิล์มบางเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มตามต้องการ ซึ่งทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) หรือผลิตจากกระบวนการโคโลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) แต่ถึงแม้ว่าการใช้ปืนไอออนจะสามารถผลิตไอออนในอัตราสูง แต่ปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบดังนั้นกระบวนการสปัตเตอร์จึงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโคโลว์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูงมากกว่า

2.3.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวหน้าวัสดุ^[314]

เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าของวัสดุใดๆ (ต่อไปนี้จะเรียกว่าเป้า) ก็จะเกิดปรากฏการณ์อย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้คือ

1. การสะท้อนที่ผิวหน้าเป้าของไอออน ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าเป้า ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของเป้า
2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากเป้าเมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ
3. การฝังตัวของไอออน (ion implantation) ไอออนอาจฝังตัวลงในเป้าโดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานของไอออน
4. การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวหน้าเป้าทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวของเป้าใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect) และเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า altered surface layers
5. การสปัตเตอร์ (sputter) การชนของไอออนที่ผิวหน้าของเป้าอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้า แล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้า ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการสปัตเตอร์ (sputtering)



รูปที่ 2.4 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวหน้าวัสดุ^[4]

2.3.3 ค่าyield ของสปีดเตอริง (sputtering yield : S)^[3]

yield ของกระบวนการสปีดเตอริง มีค่าเท่ากับ "ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอม เป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค" มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน โดยค่า yield ของสปีดเตอริงจะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะต่างๆ ในกระบวนการสปีดเตอริงดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงตามค่าพลังงานของไอออน ทั้งนี้ในการชนตรงระหว่าง 2 อนุภาค การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคจะเป็นไปตามสมการ (2.3)

$$\Delta E = \frac{4mM}{(m + M)^2} \dots\dots (2.3)$$

- เมื่อ ΔE เป็นพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างอนุภาค
- m เป็นมวลอะตอมที่ถูกชน
- M เป็นมวลของอะตอมที่วิ่งเข้าชน

ทั้งนี้เมื่อพลังงานของไอออนมีค่าต่ำมาก ค่ายึดจากกระบวนการสปีดเตอร์ริงจะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป่าสารเคลือบได้ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นเกินกว่า 4 H (H คือค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอม ออกจากผิวสารเคลือบ) พลังงานของไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (threshold energies) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไประหว่างคู่การชนของอนุภาค (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 พลังงานขีดเริ่มของเป่าสารเคลือบชนิดต่างๆ^[5]

	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg		Ne	Ar	Kr	Xe	Hg
Be	12	15	15	15		Mo	24	24	28	27	32
Al	13	13	15	18	18	Rh	25	24	25	25	
Ti	22	20	17	18	25	Pd	20	20	20	15	20
C	21	23	25	28	25	Ag	12	15	15	17	
Cr	22	22	18	20	23	Ta	25	26	30	30	30
Fe	22	20	25	23	25	W	35	33	30	30	30
Co	20	25	22	22		Re	35	35	25	30	35
Ni	23	21	25	20		Pt	27	25	22	22	25
Cu	17	17	16	15	20	Au	20	20	20	18	
Ge	223	25	22	18	25	Th	20	24	25	25	
Zr	23	22	18	25	30	U	20	23	25	22	27
Nb	27	25	26	32							

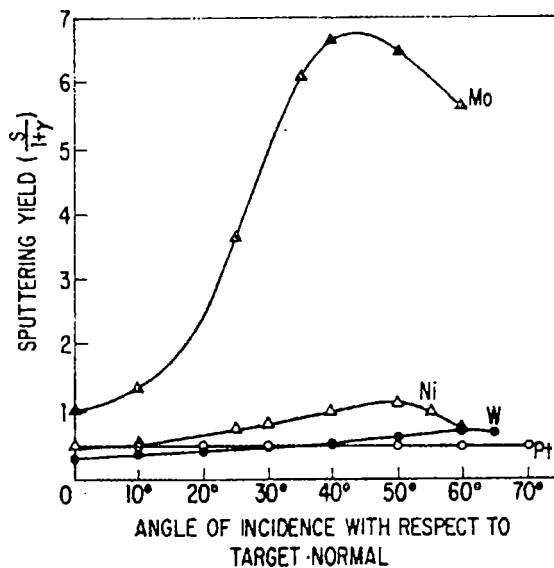
Boldface values are those for which the energy-transfer factor $4m_1m_2/(m_1+m_2)^2$ is 0.9 or higher

เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นยึดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (saturation) ของค่ายึด เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสในการฝังตัวบนผิวเป่าสารเคลือบสูงทำให้ยึดของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานของไอออนให้สูงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2. เปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึกของผิวเป่าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป่าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวค่ายึดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อไอออนชนเป่าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด และมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบาง ในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (face centered cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมสูงสุด ยึดจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่าพลังงานของไอออนในการชนค่าเดียวกัน ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มฝังตัวในเป่าสารเคลือบมากขึ้น

3. เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบ ค่าyield จากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกัน เมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไป แม้สมการ (2.3) จะแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกัน จะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากันแต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยว ดังนั้นจึงพบว่าyield มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้ารูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าyield นี้พบว่ามีค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากแก๊สเฉื่อย คือแก๊ส Ne , Ar , Kr , และ Xe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุด สาเหตุของการเกิดจุดสูงสุดของค่าyield เป็นช่วงๆ นี้ยังไม่มีคำอธิบายที่กระจ่าง

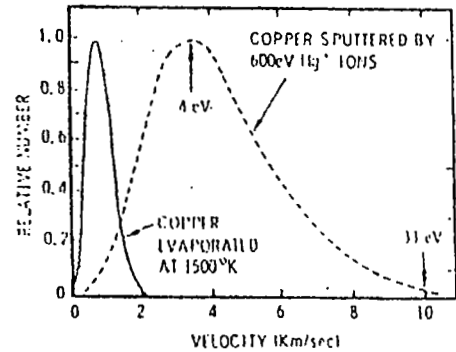
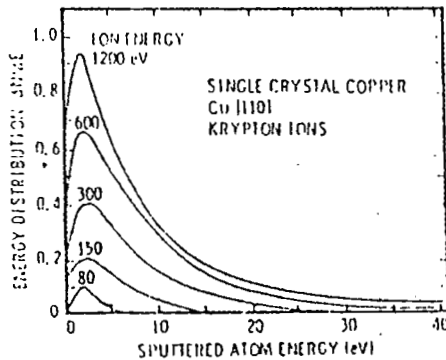
4. เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้า จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้ามามากขึ้น yield จะมีค่าสูงขึ้นตามมุมที่เอียงเนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงแบบ back scattering เป็น forward scattering ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่า ทำให้yield สูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้นyield จะมีค่าลดลงเมื่อมุมเอียงสูงขึ้น และเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของyield สเปคโตรริงเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่างๆ เมื่อวัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า [5]

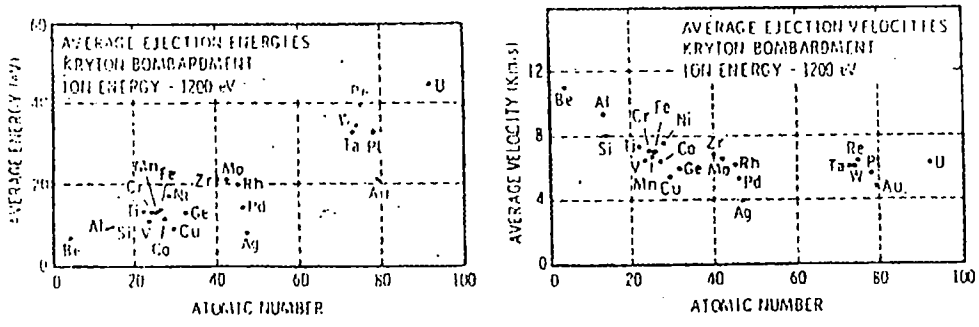
2.3.4 ความเร็วและพลังงานของสปีดเตอร์อะตอม^๒

อะตอมที่หลุดออกจากผิวหน้าสารเคลือบด้วยวิธีการสปีดเตอร์มีค่าพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารประมาณ 50-100 เท่า อะตอมมีการกระจายค่าพลังงานแบบ Maxwellian โดยที่พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีค่าพลังงานระหว่าง 10-40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีค่าพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปีดเตอร์จึงมีค่าสูงขึ้น จนเมื่อไอออนที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปีดเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นและเป้าที่มีค่ายึดสูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมาก อะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง (รูปที่ 2.8 และ รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.8 ก) การกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสปีดเตอร์จากไอออนของแก๊ส Kr ที่พลังงานต่างๆ

ข) เปรียบเทียบการกระจายค่าความเร็วของอะตอมทองแดงที่ได้จากการระเหยสารและจากการสปีดเตอร์^[7]



รูปที่ 2.9 ก) พลังงานเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออนของไอออนของ Kr พลังงาน 1200 eV ที่งานต่างๆ
 ข) ความเร็วเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออน Kr พลังงาน 1200 eV [7]

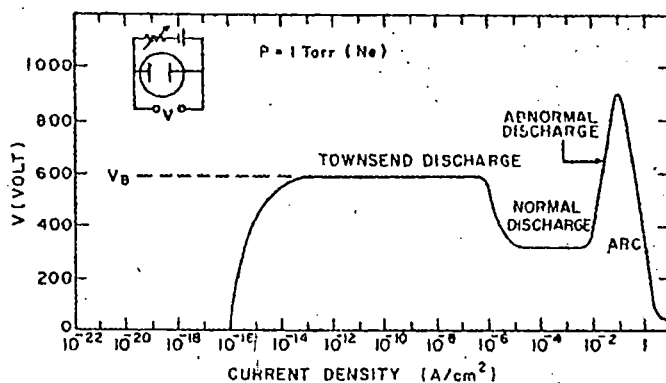
2.4 กระบวนการแก๊สดีสชาร์จ (gas discharge process) [3][4][5][6]

เมื่อป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ d ภายใต้ความดันประมาณ 1 ทอรรของแก๊สที่ไอออน พบว่าขณะแรกที่เพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสนี้มีค่าค่อนข้างคงที่เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นกับความเข้มข้นของรังสี เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทะลาย (breakdown voltage, V_B) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนซึ่งจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น

ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทดจนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง กระบวนการช่วงนี้เรียกว่า ทาวน์เซนต์ดีสชาร์จ (Townsend discharge) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงศักย์ไฟฟ้าทะลายจะเกิดกระบวนการอะวาแลนช์ (avalanche) ทำให้ไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดสูงขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมามากขึ้นด้วย ซึ่งอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้จะถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาอโนดซึ่งขณะที่วิ่งเข้าหาอโนดนั้นอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้จะมีการชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการผลิตไอออนออกมามากขึ้น และไอออนบวกที่เพิ่มมากขึ้นนี้ก็วิ่งเข้าชนคาโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้นตามมาก ซึ่งจะชนโมเลกุลแก๊สและผลิตไอออนเพิ่มขึ้นนี้ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดีสชาร์จได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก ในการผลิตไอออน ช่วงนี้แก๊สภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็ก

โตรคลดค่าลงและกระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกจุดนี้ว่าการเรืองแสงปกติหรือนอร์มอลโกลว์ (normal glow) โดยสภาวะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองต่ออัตราการชนของไอออนมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับวัสดุทำเป้าคาโทดทั่วไปคือประมาณ 0.1 โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสง (glow) การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนตำแหน่งไปมาได้ การชนของไอออนบนคาโทดไม่สม่ำเสมอ โดยมักจะมี ความเข้มของบริเวณ การเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (self-sustaining) ไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นแนวการชนของไอออนจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่

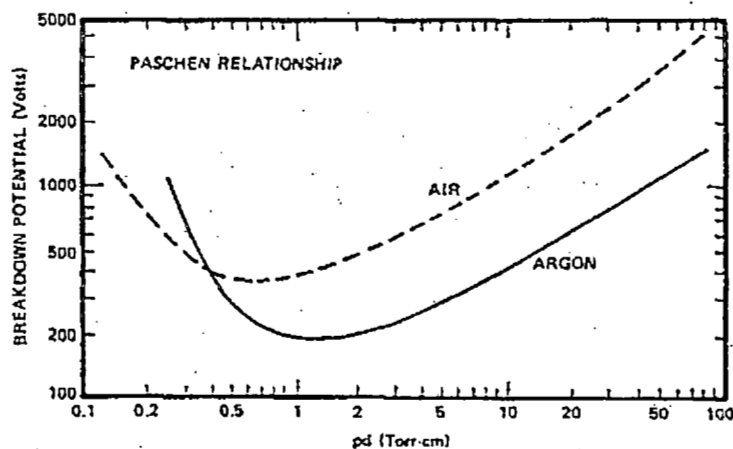
หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่าช่วงการเรืองแสงผิดปกติ การเปล่งแสงจ้าขึ้นหรือแอบนอร์มอลโกลว์ (abnormal glow) ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเตอริงและอีกหลายๆ ระบบของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโกลว์ดีสชาร์จ ในช่วงนี้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 อังสตรอมต่อตารางเซนติเมตร ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบนคาโทดจะเกิดขึ้นมากจนเกิดกระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (thermionic electron emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองและติดตามมาด้วยกระบวนการอะวาลานซ์อีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดตกลงมาก ในขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงและเปล่งประกายจ้าของการอาร์ค (arc discharge) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดี ซี โกลว์ ดีสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊ส นีออนความดัน 1 ทอร์ [6]

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายในกระบวนการ โกลว์ดิสชาร์จมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างอิเล็กโทรด และระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนชุดที่สองและโมเลกุลของแก๊ส (ระยะทางปลอดการชนของอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้แปรผกผันกับความดันแก๊สและมีความมากกว่าระยะทางปลอดการชนของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลแก๊ส) โดยปกติอิเล็กตรอนชุดที่สองแต่ละตัวควรมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการอะวาลานซ์ในช่วงของนอร์มอลโกลว์ ถ้าความดันแก๊สต่ำเกินไป (ระยะปลอดการชนยาวขึ้น) หรือระยะ d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอาโนด ถ้าความดันแก๊สสูงเกินไป (ระยะปลอดการชนสั้นลง) หรือระยะ d มากเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอในการไอออไนซ์แก๊สเมื่อเกิดการชนพลังงานจะถูกถ่ายเทให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายที่มีค่าค่อนข้างสูงโดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายต่ำที่สุดตามกฎของปาส์เชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (p) และระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด (d) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

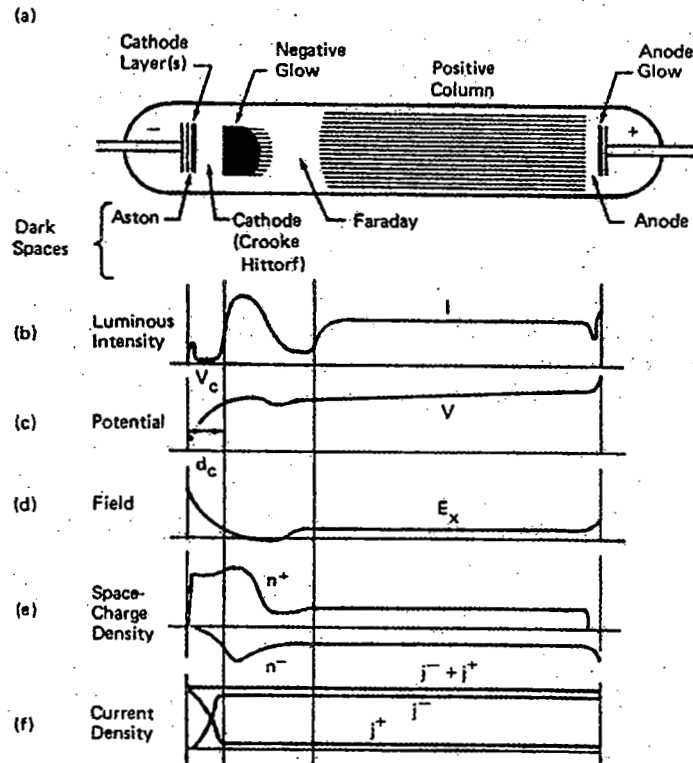
ในระบบสปัตเตอร์ริงทั่วไปการเกิดโกลว์ดิสชาร์จ จะอยู่ในช่วงที่ผลคูณของความดันแก๊สกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (pxd) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก จึงต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันแก๊สชั่วคราวเพื่อให้เริ่มการดิสชาร์จได้ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำลง



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (p) และระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด (d)^[7]

สำหรับส่วนต่างๆ ของกระบวนการโกลว์ดิซซาร์จ สามารถแสดงดังได้รูปที่ 2.12 ซึ่งแต่ละส่วนสามารถอธิบายได้ดังนี้ ช่วงแรก คือช่วงมืดแอสตัน (Aston dark space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากคาโทด ด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สได้ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดขึ้น ถัดออกมาจากผิวคาโทดเป็นบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมาก เรียกว่า คาโทดโกลว์ (cathode glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิซซาร์จและไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดมีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทด ด้วยกระบวนการต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของสารที่ทำคาโทดและของแก๊สที่ใช้ในระบบสปีดเตอร์ เช่น เมื่อคาโทดเป็นทองแดงจะให้สีเขียว ทองคำให้สีส้มแดง แก๊สอาร์กอนให้สีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนให้สีม่วงแดงเป็นต้น

ถัดจากคาโทดโกลว์ เรียกว่าช่วงมืดครุค หรือช่วงมืดคาโทด (Crook or cathode dark space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะทางเฉลี่ยตลอดการชนออกมา ทำให้บริเวณปราศจากการชนนั้นไม่มีกระบวนการไอออไนเซชันเกิดขึ้น การปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดขึ้นในช่วงนี้และกลายเป็นบริเวณมืด เมื่อเลขระยะตลอดการชนออกไปอิเล็กตรอนชุดที่สองจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สและไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้ระยะตลอดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (positive space charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากและมากเกินพอในการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สในเวลาถัดมาทำให้ภายหลังการเกิดนอร์มอลโกลว์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟในรูปที่ 2.10 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยออกไปจากบริเวณผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีค่าพลังงานลดลงมาก ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้น แม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยลงมาก รวมทั้งประจุบวกจากประจุสะสมของไอออนด้านซ้ายมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและมีการสะสมประจุลบบริเวณนี้จึงเรียกบริเวณนี้ว่า เนกาทีฟ โกลว์ (negative glow) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงมากจนไม่สามารถแม้แต่จะกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงขึ้นได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday dark space) ถัดจากช่วงนี้ กระบวนการที่เกิดขึ้นค่อนข้างคล้ายกับการดิซซาร์จของทาวน์เซนด์ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกรังเข้าได้สนามไฟฟ้าค่าต่ำๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอโนด และมีพลังงานสูงพอในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สหรือไอออไนซ์แก๊สได้และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอโนดโดยเร็ว ทำให้สภาวะพลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่าจึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (positive glow column)



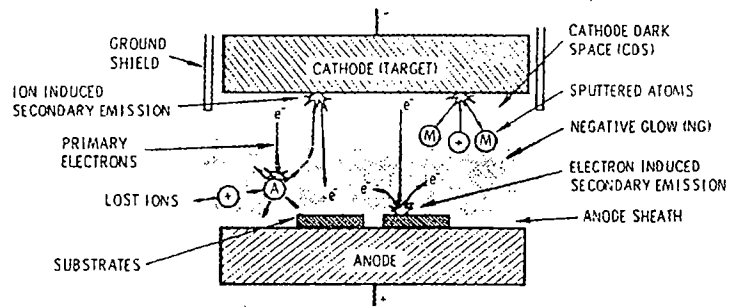
รูปที่ 2.12 การเกิดนอร์มอลโกลว์ดิซชาร์จ ของหลอดแก๊สนีออนยาว 50 เซนติเมตร ที่ความดัน 1 ทอร์รั^[4]

เนื่องจากการรักษาภาวะโกลว์ดิซชาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณเนกาทีฟโกลว์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอานอดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการโกลว์ดิซชาร์จต่อเมื่อเลื่อนอานอดเข้าหาคาโทดจนพ้นช่วงมืดฟาราเดย์และเข้าสู่เนกาทีฟโกลว์ จนเข้าสู่ช่วงคาโทดคาร์ค สเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนชุดที่สองมีปริมาณน้อยลง ในการรักษาภาวะโกลว์ดิซชาร์จไว้จำเป็นต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเร่งไอออนเข้าชนคาโทดด้วยพลังงานสูงและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองปริมาณสูงซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การโกลว์ลักษณะนี้เรียกว่า obstructed glow เมื่อเลื่อนอานอดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจากพื้นขอบของคาโทด คาร์ค สเปซ ซึ่งมีระยะทางสั้นกว่าระยะทางปลดการชนของอิเล็กตรอนจะไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการโกลว์ดิซชาร์จสิ้นสุด แม้จะเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นอีกเท่าใดก็ตามจะไม่สามารถคงสภาพโกลว์ดิซชาร์จไว้ได้ ถ้ามีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทดอาจเกิดการอาร์คขึ้นได้โดยไม่มีโกลว์ดิซชาร์จเกิดขึ้น

2.4 ระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง^[3]

2.4.1 ระบบ ดีซี สปัตเตอริง

ระบบสปัตเตอริงที่ง่ายที่สุด คือ ระบบ ดีซี สปัตเตอริง (รูปที่ 2.13) ระบบนี้จะประกอบด้วย คาโทดคือแผ่นเป้าสารเคลือบและแอโนดใช้เป็นทิวางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ โดยปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4-10 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกสู่ด้านข้างหรือผนังของภาชนะสุญญากาศมีค่าต่ำ โดยทั่วไประยะคาร์คสเปซมีค่าระหว่าง 1-4 เซนติเมตร โดยตำแหน่งแอโนดจะอยู่บริเวณการเกิดเนกาทีฟโกลด์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอมบอรัมอลโกลด์ดิซซาร์จ แก๊สที่ใช้จะเป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ค่ายึดสูงและต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ในขณะที่เกิดกระบวนการโกลด์ดิซซาร์จที่ความดันแก๊สค่าหนึ่ง กระบวนการไอออนไนเซชันจะรักษาสภาพโกลด์ดิซซาร์จไว้ตรวจวัดที่ระยะคาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและแอโนดเมื่อความดันแก๊สลดลงหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าสูงขึ้นระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้นทำให้ระยะคาร์คสเปซขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อย กระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงมีปริมาณลดลงตามปริมาณไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันแก๊สต่ำกว่า 10^{-2} ทอร์รี่ ระยะคาร์คสเปซ ยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด กระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปัตเตอริง



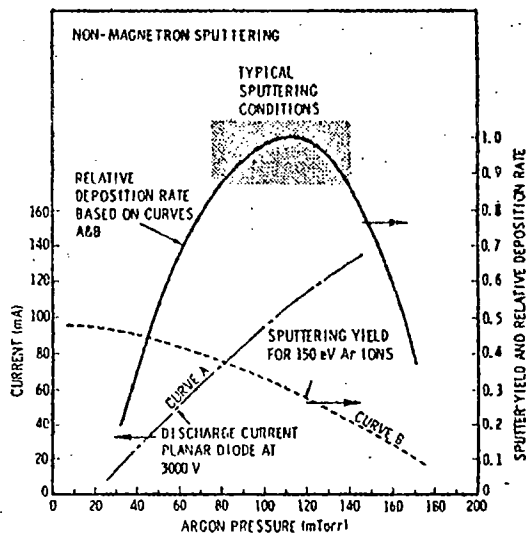
รูปที่ 2.13 ระบบสปัตเตอริงแบบ ดี ซี ไดโอด^[7]

ขณะความดันแก๊สสูงขึ้นระยะคาร์คสเปซจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงขึ้นตามความดันแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลดการชน

671.73
 ก ๕๑๖
 ๐.๖

249247

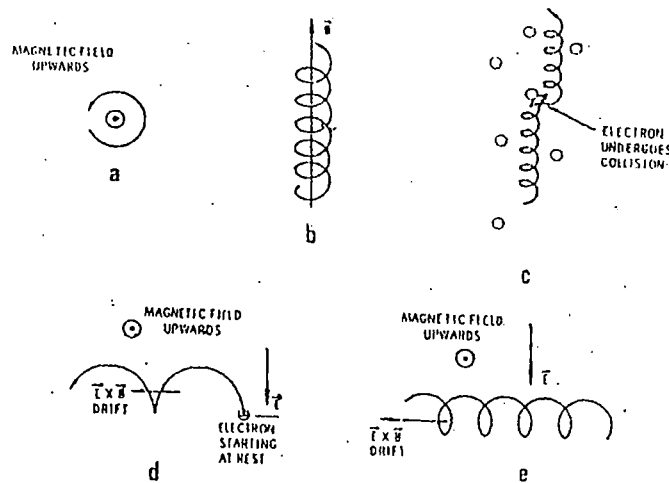
ระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลงอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านลงเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยาก จากการชนกับโมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบ หรือสูญเสียผู้ผนังสุญญากาศทำให้ค่าของyieldจากการสปีดเตอร์มีค่าลดลง เมื่อความดันสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่างyieldและกระแสไอออนทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่ง และพบว่าในการสปีดเตอร์นิกเกิล เมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้า 3000 โวลต์ ระหว่างอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตรในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดลงที่ความดันต่ำกว่า 20 มิลลิทอร์ร์และที่ความดันสูงกว่า 120 มิลลิทอร์ร์ อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุด และลดลงเมื่อความดันแก๊สสูงเกินกว่าค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปีดเตอร์จึง คือบริเวณที่ให้อัตราการเคลือบสูงและมีประสิทธิภาพดีที่สุด จากรูป 2.14 ความดันที่เหมาะสมในการเคลือบคือ 75 มิลลิทอร์ร์ โดยมีความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ด้วยอัตราการเคลือบสาร 360 อังสตรอม/นาทิจ ซึ่งเป็นอัตราการเคลือบที่ค่อนข้างต่ำมากในขณะที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่อนข้างสูงในระบบสปีดเตอร์ทั่วไปจะต่ออาโนดลงกราวด์ร่วมกับภาชนะสุญญากาศและปล่อยคาโทด ให้มีศักย์ไฟฟ้าลบโดยกันด้วยฉนวนระหว่างคาโทดกับผิวโลหะของภาชนะสุญญากาศ กราวด์ชิลด์ (ground shield) ในรูปที่ 2.13 เป็นผนังโลหะหุ้มรอบๆ ขอบของคาโทด โดยจัดระยะทางระหว่างคาโทดและกราวด์ชิลด์ให้สั้นกว่าระยะแคโรคสเปซ ดังนั้นแม้ว่าศักย์ไฟฟ้าของกราวด์ชิลด์จะมีค่าเท่ากับอาโนด กระบวนการโกลด์ดิสซาร์จและสปีดเตอร์จึง จะไม่สามารถเกิดขึ้นกับคาโทดในบริเวณที่มีกราวด์ชิลด์ห่อหุ้มอยู่ ทำให้สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการสปีดเตอร์ได้



รูปที่ 2.14 ผลของความดันแก๊สในระบบสปีดเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการเคลือบ ค่าyieldและกระแสไฟฟ้าในระบบสปีดเตอร์ของนิกเกิลที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร [6]

2.4.2 ระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง

เนื่องจากอัตราการเกิดสปีดเตอริงขึ้นกับผลคูณระหว่างยิลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการเกิดสปีดเตอริงนอกจากทำได้โดยการเพิ่มค่ายิลด์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ในระบบ ดีซี สปีดเตอริงสามารถทำได้เพียงการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดและความดันแก๊ส ซึ่งมีข้อจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร และความดันประมาณ 100 มิลลิทอรรี่ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบดีซี สปีดเตอริง อะตอมของแก๊สน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ที่เกิดการไอออไนซ์และความดันที่สูงมีผลทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มเคลือบมีค่าสูง



รูปที่ 2.15 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ โดยที่

a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่างๆ^[7]

อย่างไรก็ดีการเพิ่มอัตราการสปีดเตอริงของระบบ ดีซี สปีดเตอริง ปกตินั้นสามารถทำได้โดยใช้สนามแม่เหล็กช่วย ทำให้ได้ระบบใหม่อีกระบบหนึ่งคือ ระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กในการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากคาโทดสู่อโนดเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดไอออไนซ์เช่นกัน จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม รูปที่ (2.15a) ด้วยวิธี

$$r = \frac{3.37(w)^{1/2}}{B} \quad \dots\dots (2.4)$$

เมื่อ W คือ พลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV

B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วยเกาส์ (gauss)

หมุนด้วยความถี่ไซโครตรอน $\nu = 2.8 \times 10^6$ รอบ/วินาที

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 เกาส์ รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 เซนติเมตร และด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ 2.8×10^6 รอบ/วินาที ในรูปที่ (2.15b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส ในรูปที่ (2.15c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกันอำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า drift motion มีค่าเท่ากับ

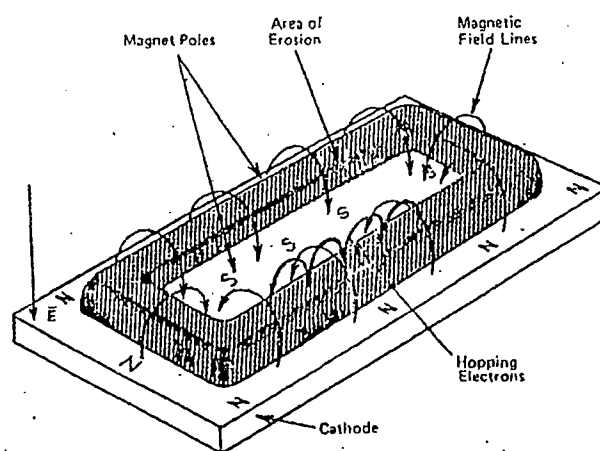
$$V_E = \frac{10^8 E}{B} \quad \dots\dots (2.5)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าหน่วยเป็น โวลต์/เซนติเมตร

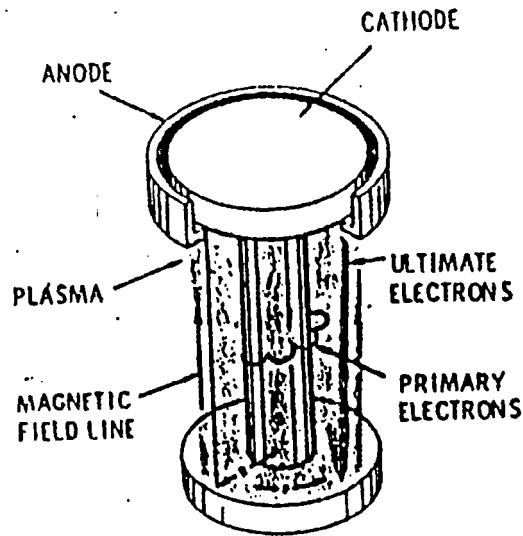
B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วยเกาส์

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณคาร์คสเปซมีค่าประมาณ 1,000 โวลต์/เซนติเมตรและสนามแม่เหล็ก 100 เกาส์ ให้ค่า drift velocity เท่ากับ 10,000 กิโลเมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง กรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูป cycloid ดังรูปที่ 2.15d ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบ drift motion จะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังรูปที่ 2.15e พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้เด่นชัดมาก แม้จะใช้สนามแม่เหล็กค่าน้อยระหว่าง 50-500 เกาส์ แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางการเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปัตเตอร์ริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า Longitudinal field จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์ดิซซาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า transverse field โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที่ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาอิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับรูปที่ 2.15d ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทด และ drift ตามแนวผิวหน้าของคาโทด (รูปที่ 2.16) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้น เป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดโกลด์ดิซซาร์จ ทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลดปล่อยการชนในไดโอดสปัตเตอร์ริงที่ความดันที่ใช้งานมากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์คสเปซในไดโอดสปัตเตอร์ริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงลดลง ทั่วไปจะมีค่าประมาณ 300-800 โวลต์ ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกเรียกว่าระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบทรงกระบอก (cylindrical magnetron sputtering) และเรียกว่าพลาเนร์แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (planar magnetron sputtering) ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบไดโอดสปัตเตอร์ริงที่ใช้เป้าแผ่นราบ



รูปที่ 2.16 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตัวของเป้าสารเคลือบ
ในพลาเนร์แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง^[4]



รูปที่ 2.17 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวทางเดินของอิเล็กตรอนบนผิวเป้าสารเคลือบที่คาโทด^[7]

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริงและพลาสมาที่เกิดเข้มมากบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอริงของระบบนี้มีค่าสูงขณะที่ความดันมีค่าต่ำ ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอริงแมกนีตรอน สปีดเตอริงแบบทรงกระบอก โดยทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอริงสูงกว่า 10,000 อังสตรอม/นาที่ และมีอัตราการเคลือบสูงกว่า 2,000 อังสตรอม/นาที่ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ 20 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร หรือสูงกว่าความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง 300-800 โวลต์ ที่ความดันประมาณ 4 มิลลิทอร์รี่ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปีดเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่ายและเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไตรโอดสปีดเตอริง ระบบสามารถเคลือบได้ที่มีความดันต่ำถึง 10^{-5} ทอร์รี่ ข้อเสียของระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริงคือความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเพื่อควบคุมคุณภาพฟิล์มเคลือบแต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบแมกนีตรอนสามารถควบคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็กจึงมีอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งเข้าสู่แผ่นรองรับปริมาณน้อยจึงลดปัญหาความร้อนบนวัสดุรองรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลงได้อย่างมาก

2.5 อุปกรณ์ในระบบ ดี ซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง^[3]

ในการออกแบบและสร้าง ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง นั้นปกติแล้วมีส่วนประกอบสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ ดังนี้คือ คาโทดและเป่าสารเคลือบ วัสดุรองรับระบบสุญญากาศ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ระบบป้อนแก๊ส ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 คาโทดและเป่าสารเคลือบ

ในการออกแบบคาโทดและการติดตั้งเป่าสารเคลือบให้มีรูปร่างต่างๆ เพื่อความเหมาะสมกับประเภทของงานมีสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ 5 ส่วน คือ ระบบหล่อเย็น ระบบฉนวนของไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อ สนามแม่เหล็ก คาโทดซีลด์ และวัสดุที่ใช้ในการสร้าง

1. ระบบหล่อเย็น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการสปีดเตอริงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาคจากเป่าสารเคลือบจะมีค่าประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพลังงานที่ใช้เปลี่ยนเป็นความร้อนที่เป่าสารเคลือบจากการชนของไอออนที่ผิวเป้าในกระบวนการสปีดเตอริงจะมีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เหลือคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สอง และทำให้เกิดพลาสมาในระบบซึ่งจะวิ้งชนและกลายเป็นพลังงานความร้อนบนวัสดุรองรับและผนังภาชนะสุญญากาศ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบนเป่าสารเคลือบนี้มีค่าสูงมากจนอาจจะละลายเป่าสารเคลือบได้ ทั้งสามารถก่อปัญหาเกิดการแพร่ที่แตกต่างกันของธาตุต่างชนิดในการเคลือบอัลลอย ทำให้ฟิล์มเคลือบมีปริมาณธาตุในอัลลอยแตกต่างจากเป่าสารเคลือบมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบหล่อเย็นเข้ากับคาโทดและเป่าสารเคลือบเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว การหล่อเย็นอาจใช้น้ำหรือน้ำมันเป็นวัสดุหล่อเย็น น้ำมันมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าดีกว่าน้ำและทำให้เกิดการกักร้อนของเนื้อวัสดุที่ใช้ทำคาโทดต่ำกว่าน้ำ แต่ประสิทธิภาพในการทำความเย็นน้อยกว่าน้ำและมีราคาแพงรวมทั้งมีความหนืดสูงทำให้ต้องใช้เครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่ และก่อให้เกิดความสกปรกแก่ระบบสุญญากาศได้ง่าย น้ำแม้จะมีความนำไฟฟ้าสูงกว่าและต้องใช้ร่วมกับระบบไฟฟ้าแรงสูงที่คาโทด แต่มีราคาถูก

การหล่อเย็นอาจให้เป่าสารเคลือบสัมผัสโดยตรงกับน้ำโดยซีลด์กันน้ำรั่วไหลด้วยแผ่นยางระหว่างคาโทดกับแผ่นเป่าสารเคลือบ หรืออาจออกแบบคาโทดปิดด้วยแผ่นปิดหลัง (backing plate) กันน้ำรั่วไหล และติดแผ่นเป่าสารเคลือบโดยการเชื่อมติดเข้ากับแผ่นปิดหลัง การยึดแผ่นเป่ากับแผ่นปิดหลังด้วย สกรูยึดทำให้การระบายความร้อนไม่ดีทุกผิวสัมผัส และทำให้เกิดการโค้งงอของแผ่นเป่าหนีการสัมผัสระบายความร้อนอันทำให้เกิดความเสียหายกับเป่าสารเคลือบได้ วัสดุทั่วไปที่ใช้ทำแผ่นปิดหลังของคาโทดคือทองแดงเนื่องจากนำความร้อนได้ดีและต้องมีความหนาเพียงพอในการทนความดันบรรยากาศและความดันน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นโดยไม่เกิดการโป่งนูนออก

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของระบบหล่อเย็นไม่เกิน 10°C

Power dissipated	Water flow rate		Power dissipated	Water flow rate	
(KW)	(liter/min)	(gal/min)	(KW)	(liter/min)	(gal/min)
2	2.8	0.74	15	21	5.6
4	5.6	1.5	20	28	7.4
6	8.4	2.2	15	35	9.3
6	11.2	3.0	30	42	11
10	14	3.7		21	

การออกแบบใช้น้ำหล่อเย็นจะนิยมควบคุมให้อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกแตกต่างกันไม่เกิน 10 °C อุณหภูมิของน้ำขณะหล่อเย็นควรมีค่าสูงกว่าจุดกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศเพื่อป้องกันการจับเกาะของไอน้ำขณะคาโทดถูกเปิดออกสัมผัสบรรยากาศอันเป็นสาเหตุให้เกิดการลัดวงจรหรือปัดความดันลงยากในการเคลือบครั้งต่อไป ความนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ควรมีค่าต่ำโดยมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า 10 กิโลโอห์ม-เซนติเมตร เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากขั้วคาโทดสู่กราวด์ของระบบน้ำหล่อเย็น ปริมาณของน้ำหล่อเย็นต่ำสุดที่ใช้กับระบบหล่อเย็นสัมพันธ์กับกำลังงานไฟฟ้าของระบบสปีดเตอริง (ตารางที่ 2.3)

2. ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อวงจรไฟฟ้า เนื่องจากคาโทดและเป่าสารเคลือบจะต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ขณะที่ภาชนะสุญญากาศเป็นกราวด์ ดังนั้นจึงต้องใช้ฉนวนไฟฟ้ากัน ฉนวนนี้ต้องมีคุณสมบัติในการชี้ระบบสุญญากาศได้ดี อาจใช้ซิลด์โลหะ-เซรามิค หรือใช้ เทฟลอน (TEFLON) และแผ่นยางซิลิโคนสุญญากาศร่วมกัน ท่อน้ำต้องใช้ท่ออย่างซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและควรมีความยาวมากสัมพันธ์กับขนาดท่อเพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าผ่านน้ำจากคาโทดสู่กราวด์ ถังน้ำหล่อเย็นควรต่อลงกราวด์และขั้วต่อไฟฟ้าแรงสูงควรมีฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันอันตราย ส่วนรอยต่อไฟฟ้าทุกจุดควรยึดด้วยโบลท์และนัทขันแน่นหรือเชื่อมติดกัน

3. สนามแม่เหล็ก พลาสมาแมกนีตรอนสปีดเตอริงจะมีโครงสร้างสนามแม่เหล็ก ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าทั้งหมดและการกักร้อนเกิดขึ้นสูงในบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีความเข้มสูง ดังนั้นการกักร้อนบนผิวเป่าสารเคลือบจะเป็นรูปตัววีลิ่งลงเป็นบางบริเวณ อายุการใช้งานของเป่าสารเคลือบจะสั้นสุดลงเมื่อร่องลึกปรากฏเท่ากับความหนาของเป่า ดังนั้นการจัดขั้วแม่เหล็กให้มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ย่อมสามารถทำให้การกักร้อนจากกระบวนการสปีดเตอริงกระจายออกทั่วแผ่นเป่าและลดความถี่เปลืองจากการใช้เป่าอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

สนามแม่เหล็กที่ใช้อาจใช้ได้ทั้งแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้าโดยติดตั้งไว้ภายนอกแต่แม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถติดตั้งชิดกับเป่าสารเคลือบได้ เนื่องจากไม่สามารถจุ่มขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ในระบบน้ำหล่อเย็นซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าค่าเดียวกับคาโทดได้ ดังนั้นจึงอาจติดตั้งไว้ภายนอกระบบหล่อเย็น ซึ่งจะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กบนผิวเป่าสารเคลือบมีค่าต่ำ เป็นผลให้อัตราการสปีดเตอริงลดลงแม้จะทำให้ความหนาของส่วนหล่อเย็นที่ติดกับเป่าสารเคลือบบางลงก็ตาม

การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็กนอกจากจะมีผลต่อการกัดกร่อนบนผิวเป่าสารเคลือบแล้ว ยังมีผลต่อความหนาของฟิล์มเคลือบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ด้วย การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็กที่ไม่ดีพอและการวางตำแหน่งวัสดุรองรับใกล้คาโทดมากเกินไปจะทำให้ความหนาฟิล์มเคลือบเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่กัดกร่อนบนเป่า การจัดให้ฟิล์มเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ อาจทำได้โดยการจัดตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมและใช้การเคลื่อนที่ของวัสดุรองรับร่วมด้วย เพื่อให้บริเวณที่เกิดอัตราการเคลือบเร็วและช้าได้กระจายสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าวัสดุรองรับหรือชิ้นงานนั้น

การปลดปล่อยอนุภาคจากกระบวนการสปีดเตอริง แม้ว่าอะตอมสารเคลือบจะชนกับโมเลกุลของแก๊สจนเปลี่ยนทิศทางไปมาจากจุดเริ่มต้น และถือเสมือนว่าเป็นกระบวนการแพร่ (diffusion) ลงเคลือบวัสดุรองรับในทุกทิศทางก็ตามฟิล์มเคลือบที่ได้ย่อมไม่สามารถทำให้ความหนาสม่ำเสมอได้ ถ้าการปลดปล่อยอนุภาคจากทุกจุดบนเป่าสารเคลือบไม่สม่ำเสมอกัน ทั้งนี้พบว่าในแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบพลาสมาวงกลม ฟิล์มเคลือบจะมีความสม่ำเสมอดีที่สุด เมื่อรัศมีภายในและภายนอกของวงพลาสมามีค่าเป็น 0.7 และ 0.8 ของระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบและวัสดุรองรับตามลำดับ เมื่อแผ่นเป่าวงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนวงแหวนพลาสมาของการเกิดสปีดเตอริงควรมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามขนาดของแผ่นเป่าเพื่อให้ความหนาฟิล์มเคลือบมีความสม่ำเสมอและเพื่อการใช้งานเป่าสารเคลือบอย่างมีประสิทธิภาพ

4. การชิลด์คาโทด ปกติกกระบวนการโกลด์ดิซซาร์จที่จะทำให้เกิดการสปีดเตอริงทุกบริเวณของคาโทดที่ปรากฏศักย์ไฟฟ้าลบต่อไอออน ดังนั้นเพื่อป้องกันการสปีดเตอริงในบางบริเวณที่มีได้ติดเป่าสารเคลือบไว้จึงหุ้มล้อมรอบคาโทดด้วยตัวนำไฟฟ้าซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอาโนดหรือกราวด์ เรียกว่า คาโทดชิลด์ โดยชิลด์มีระยะห่างจากคาโทดน้อยกว่าระยะคาร์คสเปซ ในบางกรณีชิลด์จะคลุมเลยขอบของเป่าสารเคลือบ เพื่อป้องกันมิให้เกิดการสปีดเตอริงสกรูยึดเป่าสารเคลือบ ทำให้การเคลือบฟิล์มมีความบริสุทธิ์ปราศจากสารปลอมปนจากสกรูยึดเป่าสารเคลือบนั้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการชิลด์จะป้องกันการสปีดเตอริงในบางบริเวณได้ บริเวณขอบปลายแหลมหรือฝุ่นผงและสิ่งสกปรกที่จับอยู่ระหว่างคาโทดและชิลด์อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอาร์คได้

5. วัสดุที่ใช้ทำคาโทด สามารถใช้ได้หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้มากกันที่สุด คือ เหล็ก สเตนเลสและทองแดง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการเกาะจับของแก๊สต่ำสามารถไล่แก๊สบนผิววัสดุภายใต้สุญญากาศ (degas) ได้ง่ายและมีความดันไอต่ำ เหล็กสเตนเลสทนการกัดกร่อนจากสารเคมีต่างๆ ได้ดี

แต่มีความนำความร้อนและไฟฟ้าที่เร็ว ส่วนทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี แต่ทนการกัดกร่อนของสารเคมีได้ไม่ดีนัก อย่างไรก็ตามจุดสำคัญในการสร้างคือให้คาโทดมีความคงทนการกัดกร่อนและการนำความร้อนที่ดีบริเวณ backing plate นอกจากนี้ถ้าคาโทดเป็นชนิดแมกนีตรอน backing plate ต้องไม่เป็นสารแม่เหล็ก มิฉะนั้นจะกันสนามแม่เหล็กมิให้มายังเป้าสารเคลือบ

6. วัสดุเป้าสารเคลือบ ควรเป็นวัสดุที่มีความบริสุทธิ์และความหนาแน่นสูงซึ่งผลิตจากกระบวนการ hot-pressed หรือจากการ sintering ในสุญญากาศของผงวัสดุบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับวัสดุต้น (bulk material) มากที่สุดเพื่อมิให้เนื้อโลหะมีแก๊สจับตัวอยู่ภายในมิฉะนั้นระหว่างกระบวนการสปัตเตอริงผิวเป้าสารเคลือบภายใต้อุณหภูมิค่อนข้างสูงจะปลดปล่อยอะตอมของแก๊ส (degas) ซึ่งมักเป็นแก๊สออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยาอันมีผลต่อคุณภาพฟิล์มเคลือบ

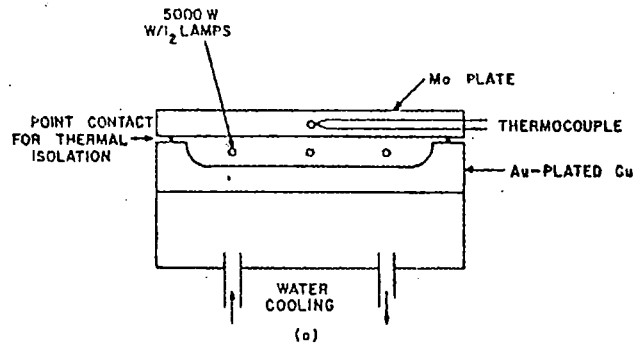
2.5.2 ที่วางชิ้นงาน

ในการเคลือบฟิล์มบางแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง อาโนดหรือที่วางชิ้นงานคือวัสดุชิ้นเดียวกันซึ่งอาจต่อลงกราวด์หรือแยกขั้วต่อเพื่อการบิดไบแอส (bias) ด้วยศักย์ไฟฟ้าลบได้ ขณะที่ภาชนะสุญญากาศมักสร้างด้วยโลหะและต่อลงกราวด์เพื่อป้องกันไฟฟ้าช็อค ดังนั้นภาชนะจึงทำหน้าที่เหมือนอาโนดขนาดใหญ่ในการดึงกระแสอิเล็กตรอนจากระบบในกระบวนการโคล์ดคิสซารจ ส่วนกระแสอิเล็กตรอนอีกส่วนหนึ่งซึ่งถูกดึงเข้าสู่ที่วางชิ้นงานพร้อมกับอะตอมพลังงานสูงจากกระบวนการสปัตเตอริง มีส่วนทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้อาจมีทั้งข้อดีและข้อเสียในการเคลือบชิ้นงานด้วยเป้าสารเคลือบต่างชนิดกันออกไป เช่นอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการเคลือบโลหะมีค่าลดลงกว่าขณะอุณหภูมิต่ำ ส่วนอัตราการเคลือบแบบรีแอคทีฟสปัตเตอริงมีแนวโน้มทางตรงข้าม ฟิล์มเคลือบของสารบางชนิดยึดเกาะกับชิ้นงานได้ดีเมื่อควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานในช่วงค่าหนึ่ง และบางครั้งการที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำลายสภาพความแข็งแรงของชิ้นงานได้เป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบที่วางชิ้นงานหรือวัสดุรองรับควรสามารถควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานให้เหมาะสมกับสภาพและคุณสมบัติของฟิล์มเคลือบที่ต้องการ ซึ่งส่วนใหญ่มักออกแบบให้มีทั้งระบบระบายความร้อนและเพิ่มความร้อนได้ในที่วางชิ้นงานชุดเดียวกัน (รูปที่ 2.18)

การระบายความร้อน สามารถทำได้โดยการใช้ น้ำหล่อเย็นเพราะมีราคาถูก นอกจากนี้ยังอาจใช้แก๊ส หรือไนโตรเจนเหลว ทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิและความรวดเร็วที่ต้องการใช้งาน ส่วนการเพิ่มความร้อนหรืออุณหภูมิของชิ้นงาน อาจใช้ของเหลวร้อน ขดลวดความร้อน (resistive heater) หรือหลอดรังสีความร้อน (infrared lamp) ในส่วนของกาตรวจอุณหภูมิอาจใช้เทอร์โมคัปเปิล infrared spectrometer หรือเทคนิคอื่นก็ได้ ขึ้นกับความละเอียดของการวัดที่ต้องการ

ในส่วนของที่วางวัสดุรองรับควรทำด้วยทองแดงหรือโมลิบดีนัมซึ่งนำความร้อนได้ดีภายใต้สุญญากาศการนำความร้อนจากที่วางชิ้นงานสู่ชิ้นงานเกิดขึ้นไม่ดีนัก เนื่องจากกระยะปลดการ

ชนของ โมเลกุลแก๊สสูงขึ้นมาจึงจำเป็นต้องทำให้ชิ้นงานและแผ่นรองชิ้นงานสัมผัสกัน ได้ดีที่สุดโดยการใช้สารนำความร้อน เช่น อาจใช้ไซลิโคน (silicone vacuum grease) นำความร้อนให้กับชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิที่ต้องการควบคุมไม่เกิน 100°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 450°C อาจใช้กัลเลียม (Ga), อินเดียม (In) หรือฟอสฟอรัสมิเนียมเป็นตัวนำความร้อนจากที่วางชิ้นงานสู่ชิ้นงาน



รูปที่ 2.18 โครงสร้างอาโนดหรือที่วางชิ้นงาน ที่ควบคุมอุณหภูมิได้

การทำให้อาโนดหรือแผ่นรองชิ้นงานมีขั้วแยกจากราวด์เพื่อป้องกันไบเอสได้ มีข้อดีหลายประการคือ (1) การป้องกันไบเอสด้วยไฟฟ้าลบค่าสูงช่วยให้ที่วางชิ้นงานและชิ้นงานทำตัวเสมือนเป็นคาโทด โดยมีผนังภาชนะสุญญากาศเป็นอาโนด ทำให้เกิดการสปัตเตอร์กัดกร่อน (sputtered etching) บนผิวหน้าชิ้นงานซึ่งจะเป็นการทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบ ซึ่งทำให้ฟิล์มยึดเกาะได้ดีขึ้น (2) การป้องกันไบเอสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบเล็กน้อยแก่ชิ้นงาน (-50 ถึง -200 โวลต์) ในระหว่างการเคลือบจะช่วยลดปริมาณการชนของอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นงานจะทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานไม่สูงมากนักและลดโอกาสที่อิเล็กตรอนจะทำลายผิวฟิล์มเคลือบจากการวิ่งชน (3) การป้องกันไบเอส ลบแก่ชิ้นงานจะทำให้ปริมาณแก๊สไวปฏิกิริยาที่ตกค้างในฟิล์มเคลือบมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดกระบวนการสปัตเตอร์ซ้ำ (resputtering) บนผิวฟิล์มเคลือบ ทำให้แก๊สไวปฏิกิริยาบางส่วนถูกสปัตเตอร์หลุดออกไปมากกว่าสารเคลือบ และฟิล์มมีความบริสุทธิ์มากขึ้น การขจัดแก๊สออกมากหรือน้อยขึ้นกับแรงยึดเกาะระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับวัสดุเคลือบ เมื่อเทียบกับแรงยึดเกาะกันเองของอะตอมวัสดุเคลือบ จากรายงานการทดลองพบว่าการป้องกันไบเอสลบให้กับชิ้นงานที่เคลือบบนแทนทาลัม (Ta) โมลิบดีนัม (Mo) และไนโอเบียม (Nb) ปริมาณออกซิเจนในฟิล์มเคลือบมีค่าต่ำกว่า ขณะที่ป้องกันไบเอสมาก แต่การป้องกันชิ้นงานเมื่อเคลือบอลูมิเนียม (Al) และ แมกนีเซียม (Mg) ไม่สามารถลดปริมาณออกซิเจนในฟิล์มเคลือบได้มากนัก เมื่อเทียบกับขณะที่ไม่มีไบเอส ทั้งนี้เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างออกซิเจนและอะตอมโลหะมีมากกว่าการยึดเกาะกันเองของอะตอมโลหะ

ข้อเสียของการป้อนไปแอสกับชิ้นงาน คือ การเพิ่มปริมาณแก๊สเฉื่อยที่ถูกจับในฟิล์มมากขึ้นตามกำลังสองของความต่างศักย์ไฟฟ้าไปแอส เนื่องจากไอออนของอาร์กอนมีโอกาสถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากไปแอสให้มีพลังงานสูงขึ้นและชนฝั่งตัวในเนื้อฟิล์มมากขึ้นตามพลังงานที่ได้รับ แต่ปริมาณ อาร์กอนในฟิล์มเคลือบนี้สามารถทำให้ลดลงได้เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น

2.5.3 ระบบสุญญากาศ (vacuum system)

เนื่องจากภายในระบบสุญญากาศทุกพื้นที่มี โอกาสถูกชนด้วยอะตอมสารเคลือบและไอออนพลังงานสูง เป็นเหตุให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สออกจากพื้นผิวที่ถูกชน (outgassing) ดังนั้นชิ้นส่วนต่างๆ ภายในระบบสุญญากาศควรมีการระบายความร้อนและต่อกราวด์ไว้ เพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สไปปฏิกิริยา แก๊สควรป้อนเข้าสู่ระบบและดูดผ่านเครื่องสูบตลอดเวลาเพื่อไล่แก๊สไปปฏิกิริยาออกจากระบบตลอดการสปีดเตอร์ทำให้ลดสารปลอมปน (contamination) ในฟิล์มเคลือบ การปล่อยปริมาณแก๊สบริสุทธิ์ของอาร์กอนไหลผ่านระบบด้วยอัตราสูงช่วยเจือจางแก๊สไปปฏิกิริยาในระบบและลดอุณหภูมิของระบบลงเนื่องจากปริมาณ outgas ในระบบมีค่าลดลงตามเวลา ดังนั้นจึงควรใช้แผ่นปิด (shutter) กั้นระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับเพื่อกั้นมิให้การเคลือบเกิดขึ้นระหว่างช่วงแรกที่มีปริมาณแก๊สไปปฏิกิริยาสูงรวมทั้งให้เวลาต่อระบบในการทำความสะอาดผิวเป้าสารเคลือบก่อนการเคลือบจริง (presputtering) จากนั้นจึงเปิดแผ่นปิดและเคลือบฟิล์มบางเมื่อภายในระบบสะอาดแล้ว

แม้ความดันแก๊สที่ใช้ในระบบสปีดเตอร์จะมีค่าระหว่าง 10^{-3} ถึง 10^{-1} ทอรร์ ก็ตามก่อนการสปีดเตอร์ทุกครั้งควรลดความดันในระบบให้อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-7} ถึง 10^{-6} ทอรร์ เพื่อขจัดแก๊สที่เกาะจับบนผิวชิ้นส่วนต่างๆ และผนังภาชนะออกให้มีปริมาณน้อยที่สุด และควรมีลดความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิผิวภายในผนังภาชนะเพื่อช่วยการ outgas ในระยะแรกเมื่อความดันลดต่ำพอจึงหยุดการให้ความร้อนและทำความเย็นผนังภาชนะสุญญากาศแทน ผนังภาชนะที่ทำจากเหล็กสเตนเลสและทองแดง outgas ง่ายและกั้นการรั่วซึมของแก๊สจากภายนอกได้ดี ผนังด้านหนึ่งของภาชนะสุญญากาศอาจทำเป็นช่องกระจกเพื่อดูกระบวนการสปีดเตอร์ภายในและเพื่อการควบคุมตำแหน่งแผ่นปิดและชิ้นส่วนต่างๆ ภายในระบบ

เครื่องสูบที่ใช้กับระบบสปีดเตอร์ส่วนใหญ่ได้แก่ เครื่องสูบแบบแพร่ไอ (diffusion pump) ซึ่งสามารถดึงความดันในระบบได้ถึง 5×10^{-7} ทอรร์ และมีประสิทธิภาพสูงที่ความดันต่ำ อย่างไรก็ตามที่ความดัน 10^{-3} ทอรร์ เครื่องสูบแบบแพร่ไอจะมีประสิทธิภาพลดลง และความดันค่าสูงเช่นนี้อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการฟุ้งของไอน้ำมันเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศตอนบนทำให้เกิดความสกปรกต่อฟิล์มเคลือบดังนั้นจึงมีขีดจำกัดของเครื่องสูบแบบแพร่ไอที่ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีอัตราการไหลของแก๊สสูงเกินไปและการใช้ต้องระวังมิให้ความดันบริเวณทางออกของเครื่องสูบแบบแพร่ไอสู่เครื่องสูบกล โรตารี มีค่าสูงเกินกว่าที่ผู้ผลิตกำหนดเพื่อป้องกันการเกิด back streaming

ภาชนะของระบบสุญญากาศควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดคาโทดพอสมควร เนื่องจากไอออนจากแก๊สที่อยู่อาจรวมกับอิเล็กตรอนเป็นกลางทางไฟฟ้าได้ที่ผนังภาชนะการที่ผนังภาชนะอยู่ใกล้คาโทดเกินควรอาจทำให้ไอออนส่วนใหญ่ที่ควรถูกเร่งเข้าชนคาโทดบริเวณขอบเป่าเมื่อแพร่ผ่านพลาสมาสู่คาโทดเกิดการชนกับผนังภาชนะแล้วกลายเป็นกลางทำให้สูญเสียปริมาณ ไอออนที่ควรวิ่งสู่คาโทดไปส่วนหนึ่ง เรียกว่า Wall losses และทำให้อัตราการเกิดสปัตเตอร์ลดลง

2.5.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power supply)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้กับระบบไดโอดสปัตเตอร์อาจใช้ไฟฟ้ากระแสตรงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำหรือความถี่สูง โดยไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำอาจใช้ในการสปัตเตอร์ที่มี 2 คาโทด โดยมีชิ้นงานอยู่ระหว่างกลางเพื่อให้การเคลื่อนเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของชิ้นงานในเวลาเดียวกันด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพียงชุดเดียว สำหรับระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ความต่างศักย์ที่ใช้งานมีค่าอยู่ระหว่าง 300-800 โวลต์ และกระแสควรมีค่าระหว่าง 10-100 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร บนคาโทด โดยมีระบบควบคุมกระแสที่แบบปรับค่าได้ ไฟฟ้าคิซีที่ใช้ อาจมีการกรองสัญญาณให้เรียบหรือไม่มีการกรองสัญญาณก็ได้ การกรองสัญญาณจะช่วยให้การสปัตเตอร์บนผิวสารเคลือบและสภาพโกลด์ดิซซาร์จมีความสม่ำเสมอ การไม่กรองสัญญาณไฟฟ้าช่วยลดความรุนแรงการอาร์คลง แหล่งกำเนิดไฟฟ้าควรสามารถทนต่อการเกิด high voltage rf transients ซึ่งเกิดจากพลาสมาในระบบแมกนีตรอนรวมทั้งการอาร์คของระบบด้วย การอาร์คเพียงเล็กน้อยอันเกิดจากสารเจือปน และ dielectric beakdown บนเป่าสารเคลือบ ซึ่งเกิดขึ้นชั่วขณะ ระบบป้องกันของเครื่องควรจำกัดกระแสการอาร์คนี้ไว้ได้โดยไม่ตัดวงจร แต่การอาร์ครุนแรงอันเกิดจากการหลุดลอกของฟิล์มเคลือบจากแผ่นซีลด์คาโทดและสัผัสคาโทดให้เกิดลัดวงจร ระบบป้องกันควรมีความไวสูงในการตัดแหล่งกำเนิดออกจากวงจร แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับระบบสปัตเตอร์มีหลายชนิดดังนี้

1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า คิซี (DC power supply) ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ นิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าออโตโต (auto transformer) ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรงด้วยบริดจ์เรกติฟายเออร์ (bridge rectifier) และควรมีขดลวดอินดักเตอร์ต่ออยู่เพื่อกันสัญญาณ อาร์ เอฟ สไปค์ (rf spikes) จากการอาร์คซึ่งอาจทำลายวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ได้ การมีชั้นที่แม่เหล็ก (magnetic shunting) ในตัวทรานส์ฟอร์มเมอร์ จะทำให้ทรานส์ฟอร์มเมอร์มีค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ (output impedance) สูง เมื่อเกิดการอาร์คขึ้น กระแสจากการอาร์คจะถูกป้อนกลับสู่ทรานส์ฟอร์มเมอร์และลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของทรานส์ฟอร์มเมอร์ลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วทำให้แหล่งกำเนิดป้องกันอันตรายตัวเองได้

เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นอาจใช้ชุด silicon control rectifier ในการควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทรานส์ฟอร์มเมอร์แบบ 3 เฟส โดยมีวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ 3 เฟส (3-phase bridge

rectifier) ต่ออยู่เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง นอกจากนี้ยังมีวงจรป้อนกลับ (feedback circuit) ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ หรือกระแสไฟฟ้าคงที่แล้วแต่ความต้องการตามชนิดของระบบสปีดเตอร์ เพื่อให้ระบบทำงานอย่างปลอดภัยจากการอาร์ค หรือการมีภาระเกิน (overload) รวมทั้งมีอุปกรณ์วัดละเอียด เช่น แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ เป็นต้น ซึ่งเสริมเข้ากับระบบเพื่อความสะดวกในการใช้งาน

2. แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูง (RF Power supply) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงนี้ นิยมใช้ที่ความถี่ 13.56 ± 0.00678 , 27.12 ± 0.0160 และ 40.68 ± 0.020 MHz ตามข้อตกลงของ International Agreement for Unlimited Radiation ซึ่งให้การรบกวนต่อระบบโทรคมนาคมน้อยและมีการผลิตในเชิงการค้าโดยทั่วไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงที่ผลิตขึ้นในเชิงการค้า มีค่าอิมพีแดนซ์เอาต์พุต ประมาณ 50 โอห์ม แต่กระบวนการโกลด์ดีสซาร์จมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่านี้มากจึงจำเป็นต้องใช้วงจรแมชซึ่งเพื่อสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งพลังงานสู่ระบบสปีดเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและในกรณีการทำไบแอสสปีดเตอร์กับระบบอาร์เอฟ จำเป็นต้องมีวงจรทูนนิ่ง (tuning network) ช่วยในการปรับเฟสของไฟฟ้าสลับที่เหมาะสมด้วยการทำไบแอสสปีดเตอร์ในระบบอาร์เอฟจึงค่อนข้างมีความยุ่งยากกว่าระบบดี ซี มาก

2.5.5 ระบบป้อนแก๊ส

แก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบสปีดเตอร์ควรมีหลายจุดเพื่อควบคุมความดันแก๊สมิให้แตกต่างกันในแต่ละส่วนที่เกิดกระบวนการสปีดเตอร์ ความไม่สม่ำเสมอของแก๊สอาร์กอนจะทำให้อัตราการสปีดเตอร์ที่เกิดบนผิวเป้าไม่สม่ำเสมอซึ่งมีผลต่อความหนาฟิล์มและอายุการใช้งานของเป้าสารเคลือบ การป้อนแก๊สไวพริกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ส่วนผสมของธาตุในฟิล์มเคลือบสารประกอบมีความแตกต่างกัน การป้อนแก๊สที่ความดันต่ำในระบบสปีดเตอร์ควรใช้วาล์วรูเข็มซึ่งสามารถส่งแก๊สเข้าสู่ระบบได้ที่ละน้อยและควบคุมความดันได้ละเอียดพอ และไม่ควรมีแก๊สจากถังเก็บแก๊สซึ่งมีความดันสูงผ่านวาล์วรูเข็มโดยตรง ควรมีการลดลำดับความดันด้วยวาล์วปรับความดัน (regulator value) เป็นช่วงๆ และควรมีเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (gas flow meter) ต่ออยู่ก่อนถึงวาล์วรูเข็ม ท่อส่งแก๊สไม่ควรมีความยาวมากเกินไป และเมื่อต่อกับระบบสุญญากาศต้องสามารถบีบความดันในท่อลงได้ต่ำถึง 1 มิลลิทอร์รี่ เพื่อการทำความสะอาดท่อโดยผ่านวาล์ว bypass ท่อควรทนความดันได้สูงถึง 200 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นอย่างน้อย เมื่อต่อกับถังแก๊สความดันสูง การป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบควรป้อนเข้าตอนบนของภาชนะ เพื่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแก๊สภายในระบบ ก่อนถูกดูดผ่านปั๊มซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณตอนล่าง การป้อนแก๊สใกล้บริเวณคาโทดอาจลดความสม่ำเสมอของความดันลงบ้าง แต่เป็นการป้องกันมิให้แก๊สที่รั่วเข้าสู่ระบบตามผนังภาชนะเข้าสู่บริเวณโกลด์ดีสซาร์จได้

2.6 ลักษณะจำเพาะตัวของระบบสปีดเตอริง^[3]

2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ความต่างศักย์คิซซาร์จและความดัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์คิซซาร์จในระบบสปีดเตอริงจะแสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชัน สภาพการคิซซาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้อย่างมีประสิทธิภาพจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์คิซซาร์จตามสมการ

$$I = kV^n \quad \text{..... (2.6)}$$

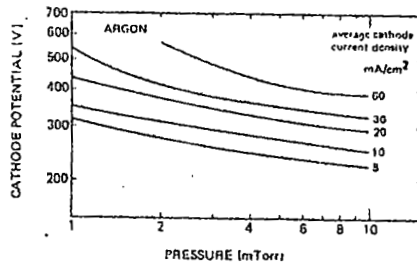
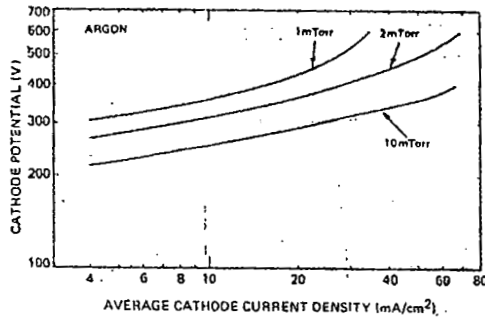
เมื่อ I คือกระแสของคาโทด

V คือความต่างศักย์คิซซาร์จ

n คือดัชนีแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ทั้งนี้ n จะขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก โดยปกติ n มีค่าระหว่าง 5 ถึง 9 ในแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบทรงกระบอกแต่อาจแตกต่างกันไปบ้าง เมื่อจัดแบบพลาเนียร์แมกนีตรอน k คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงกว้างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์คิซซาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์คิซซาร์จ ที่ความดันต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.19a จะเห็นว่า ณ ค่าความดัน 10 มิลลิทอร์รี่ พบว่า n เท่ากับ 4.6 และ k เท่ากับ 6×10^{-13} สำหรับคาโทดชนิดนี้การเปลี่ยนค่าของความชันกราฟ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้าค่าสูงขึ้นปริมาณไอออนของแก๊สถูกจำกัดด้วยความดันในระบบทำให้ปริมาณการผลิตอิเล็กตรอนและพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกระแสดังในรูป 2.19a การเบนโค้งนี้จะเริ่มที่กระแสสูงขึ้นถ้าความดันในระบบมีค่าสูงขึ้น ส่วนรูปที่ 2.19b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์คิซซาร์จของคาโทดและความดันที่กระแสไฟฟ้าคงที่ค่าต่างๆ การเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นอะตอมแก๊สเล็กลงเพิ่มขึ้น และยังผลให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เกิดจากการชนของไอออนบนเป้าสารเคลือบจึงมีปริมาณสูงขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าของการคิซซาร์จสูงขึ้นและความต่างศักย์คิซซาร์จมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ ความต่างศักย์คิซซาร์จจะมีค่าลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.19 a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์คิฮารังของฟลานาร์แมกนีตรอนคาโทดรูปสี่เหลี่ยม ที่ความดันค่าต่างๆ

b) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์คิฮารัง และความดันเมื่อกระแสคงที่^[6]

2.6.2 อัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบ

อัตราการสปีดเตอร์ของอะตอมสารเคลือบขึ้นกับปริมาณไอออนซึ่งแปรผันกับกระแสและพลังงานของไอออนซึ่งแปรผันกับความต่างศักย์คิฮารัง ดังนั้นจึงแปรผันโดยตรงกับกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ส่วนอัตราการเคลือบ (R) นอกจากแปรผันโดยตรงกับอัตราการสปีดเตอร์แล้วยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ คือพื้นที่ของการเกิดสปีดเตอร์ ระยะห่างระหว่างคาโทดและชิ้นงาน ค่ายึดและการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป่าสารเคลือบความดันแก๊สรวม และความดันย่อยของแก๊สไอปฏิกริยาภายในบริเวณเป่าสารเคลือบ ค่าการนำความร้อนของเป่าสารเคลือบอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเคลื่อนที่ชิ้นงานระหว่างการเคลือบมีผลต่อการลดอัตราการเคลือบลง ทั้งนี้ประสิทธิภาพของอัตราการเคลือบ (R_E ; อัตราส่วนระหว่างอัตราการเคลือบ และค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ใส่ต่อหน่วยพื้นที่) สามารถหาได้จากสมการ

$$R_E = \frac{R}{P} \quad \text{..... (2.9)}$$

ประสิทธิภาพของการเคลือบนี้จะช่วยในการกำหนดสภาพที่ดีที่สุดของกระบวนการเคลือบ ในระบบแมกนีตรอน ประสิทธิภาพการเคลือบทองแดงมีค่าระหว่าง $800-1200 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min}$

และอุณหภูมิเนื้อมีค่าระหว่าง 200 -650 A^o-cm²/W-min เป็นต้นทั้งนี้ระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริงนับว่าเป็นวิธีการเคลือบที่มีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีสปีดเตอริงอื่นๆ สามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ของค่าการคำนวณทางทฤษฎีและดีกว่า ดี ซี พลานาร์ สปีดเตอริงถึง 3 เท่าตัว

2.6.3 ขีดจำกัดของอัตราการเคลือบ

ปัจจัยที่สำคัญในการจำกัดอัตราการเคลือบคือปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เป่าสารเคลือบทนได้โดยไม่เกิดการแตกหรือระเหยออก ซึ่งสัมพันธ์กับสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป่าสารเคลือบและอัตราการระบายความร้อนของเป่าสารเคลือบ นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การขยายตัวและความหนาของเป่าสารเคลือบ ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราความร้อนที่เป่าสารเคลือบยอมรับได้ก่อนการแตกเนื่องจากความร้อนก็เป็นปัจจัยสำคัญอีกตัวหนึ่ง โครงสร้างเป่าสารเคลือบที่มีความเค้นคงค้าง (residual stress) ย่อมทนต่ออัตราการสปีดเตอริงที่ต่ำกว่าเป่าสารเคลือบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน (annealing) การระบายความร้อนโดยตรงแก่เป่าสารเคลือบทำให้สามารถทนต่ออัตราการสปีดเตอริงได้สูงกว่าการระบายความร้อนผ่านแผ่นปิดหลังของคาโทด เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

โครงการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง ทั้งนี้ขั้นตอนการวิจัยของโครงการนี้มีดังนี้คือ เริ่มจากการออกแบบและสร้างระบบเคลือบฟิล์มบาง และเมื่อสร้างระบบเคลือบฟิล์มบางเรียบร้อยแล้วจะได้ทำการทดสอบระบบเคลือบฟิล์มบางที่พัฒนาขึ้นตลอดจนทำการทดสอบการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น

3.2 การออกแบบและสร้างระบบเคลือบฟิล์มบาง

ระบบเคลือบฟิล์มบางที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการนี้เป็นแบบ ดี ซี แมกนีตรอนสปีดเทอริง โดยระบบเคลือบฟิล์มบางที่พัฒนาขึ้นนี้มีส่วนประกอบหลักๆ ที่สำคัญคือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทดและเป่าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า และระบบป้อนแก๊ส โดยชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาสร้างระบบเคลือบนี้จะมีทั้งที่คณะผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้นใหม่โดยใช้วัสดุภายในประเทศทั้งหมด บางส่วนเป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว และบางส่วนเป็นอุปกรณ์เก่าที่นำมาซ่อมและ/หรือปรับปรุงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ทั้งนี้ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว เกจวัดความดันต่างๆ ส่วนอุปกรณ์เก่าที่นำมาซ่อมให้ทำงานได้ คือ เครื่องสูบลมโรตารีสำหรับระบบสุญญากาศ ส่วนอุปกรณ์เก่าที่นำมาดัดแปลงได้แก่ระบบป้อนแก๊ส สำหรับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างขึ้นใหม่ทั้งหมด ได้แก่ คาโทดและเป่าสารเคลือบ ภาชนะสุญญากาศ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า

3.3 การทดสอบระบบเคลือบฟิล์มบาง

เพื่อทดสอบระบบเคลือบฟิล์มบางแบบที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถทำงานได้ในระดับใดจึงกำหนดให้มีการทดสอบระบบได้แก่ การทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบและการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ

3.3.1 การทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบ

เมื่อประกอบระบบเคลือบฟิล์มบางเข้ากับอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ แล้ว ก่อนใช้งานจำเป็นต้องมีการทดสอบความสามารถของระบบสุญญากาศก่อนว่าสามารถทำความดันต่ำสุดที่ได้ทำได้ โดยทำการสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศด้วยเครื่องสูบลมแบบโรตารีและเครื่องสูบบแบบแพร์ไอ ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เปิดเครื่องสูบลมแบบ โรตารีเพื่อสูบอากาศจากภาชนะสุญญากาศผ่านทางวาล์วหยาบจนได้ความดันเท่ากับ 10^{-2} มิลลิบาร์
2. ปิดวาล์วหยาบ และเปิดวาล์วส่วนหน้าเพื่อสูบอากาศออกจากเครื่องสูบบแบบแพร์ไอ และเริ่มตัมน้ำมัน รองนน้ำมันเคือด (สังเกตจากเสียง)
3. ปิดวาล์วส่วนหน้าชั่วคราว เปิดวาล์วหยาบทำความดันในภาชนะสุญญากาศอีกครั้งแล้วปิดวาล์วหยาบ จากนั้นเปิดวาล์วส่วนหน้าไปที่เครื่องสูบบแบบแพร์ไอ เปิดเพลตวาล์วเพื่อให้เครื่องสูบบแบบแพร์ไอสูบอากาศจากภาชนะสุญญากาศ
4. บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศทุก 1 นาที จนความดันคงที่
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-4 อีก 3 ครั้ง

3.3.2 การหาค่าความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์

เมื่อประกอบระบบเคลือบฟิล์มบางเข้ากับอุปกรณ์ประกอบและได้ทดสอบความสามารถของระบบสุญญากาศก่อนว่าสามารถทำความดันต่ำสุดทำได้แล้ว ได้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ เพื่อหาประสิทธิภาพของการเกิดไอออไนเซชันของระบบ โดยใช้เป้าสารเคลือบเป็น ไททานเนียมและทองแดง สำหรับความดันต่างๆ ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ติดตั้งเป้าสารเคลือบไททานเนียมที่ขั้วคาโทดแล้วปิดภาชนะสุญญากาศ โดยต่อขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับขั้วคาโทด และขั้วบวกต่อกับขั้วแอโนดหรือตัวถังภาชนะสุญญากาศ
2. ปิดวาล์วหยาบ และเปิดวาล์วส่วนหน้าเพื่อสูบอากาศออกจากเครื่องสูบบแบบแพร์ไอ และเริ่มตัมน้ำมัน รองนน้ำมันเคือด (สังเกตจากเสียง)
3. ปิดวาล์วส่วนหน้าชั่วคราว เปิดวาล์วหยาบทำความดันในภาชนะสุญญากาศอีกครั้งแล้วปิดวาล์วหยาบ จากนั้นเปิดวาล์วส่วนหน้าไปที่เครื่องสูบบแบบแพร์ไอ เปิดเพลตวาล์วเพื่อให้เครื่องสูบบแบบแพร์ไอสูบอากาศจากภาชนะสุญญากาศ
4. เมื่อความดันภายในภาชนะสุญญากาศอยู่ที่ประมาณ 3×10^{-5} มิลลิบาร์ จึงป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

5. เมื่อความดันภายในภาชนะสุญญากาศอยู่ที่ประมาณ 10^{-3} มิลลิบาร์ จึงเปิดแหล่งจ่ายไฟ จากนั้นเพิ่มความต่างศักย์ให้กับระบบจนเกิดการโกลว์ดิสชาร์จ บันทึกค่าความต่างศักย์และกระแส

6. จากนั้นให้เพิ่มค่าความต่างศักย์ให้กับระบบและบันทึกค่ากระแสที่ได้

7. ทำซ้ำข้อ 1-7 ที่ความดันต่างๆ

8. ทำซ้ำข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนเป้าสารเคลือบเป็นทองแดง

3.4 การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง

เมื่อประกอบระบบเคลือบฟิล์มบาง และทดสอบความสามารถของระบบสุญญากาศ และหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์แล้ว เพื่อทดสอบว่าระบบที่พัฒนาสามารถเคลือบฟิล์มบางได้ตามต้องการ ได้ทดสอบการเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ โดยใช้เป้าสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไททานเนียมและทองแดง ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ สำหรับใช้เป็นแผ่นวัสดุรองรับในการเคลือบ

2. ติดตั้งเป้าสารเคลือบไททานเนียมที่ขั้วคาโทด โดยมีซีลด์ปิดรอบคาโทดและสกรูยึดเป้าสารเคลือบ จากนั้นปิดภาชนะสุญญากาศ โดยต่อขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับขั้วคาโทด และขั้วบวกต่อกับขั้วแอโนดหรือตัวถังภาชนะสุญญากาศ

3. ปิดวาล์วหยาบ และเปิดวาล์วส่วนหน้าเพื่อสูบอากาศออกจากเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ และเริ่มตัมน้ำมัน รอนน้ำมันเดือด (สังเกตจากเสียง)

4. ปิดวาล์วส่วนหน้าชั่วคราว เปิดวาล์วหยาบทำความดันในภาชนะสุญญากาศอีกครั้งแล้วปิดวาล์วหยาบ จากนั้นเปิดวาล์วส่วนหน้าไปที่เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ เปิดเพลดวาล์วเพื่อให้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอสูบอากาศจากภาชนะสุญญากาศ

5. เมื่อความดันภายในภาชนะสุญญากาศอยู่ที่ประมาณ 3×10^{-6} มิลลิบาร์ จึงเริ่มป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ จากนั้นจึงเปิดแหล่งจ่ายไฟเพื่อทำโกลว์ดิสชาร์จ

6. ความดันขณะทำการสปัตเตอร์ (เมื่อป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ระบบ) ให้ควบคุมอยู่ที่ประมาณ 10^{-3} มิลลิบาร์ ทำการเคลือบฟิล์มบางบนแผ่นกระจกสไลด์เป็นเวลานาน 5 นาที

7. สังเกตสีที่เกิดขึ้นของโกลว์ดิสชาร์จ และค่ากระแสไฟฟ้าขณะเกิดโกลว์ดิสชาร์จ

8. ทดสอบฟิล์มบางที่ได้โดยการเช็ดถู และชูดด้วยเล็บ

9. ทำการทดลองใหม่ตั้งแต่ข้อ 1 ถึง ข้อ 5 โดยเปลี่ยนเป้าสารเคลือบเป็นทองแดง

บทที่ 4

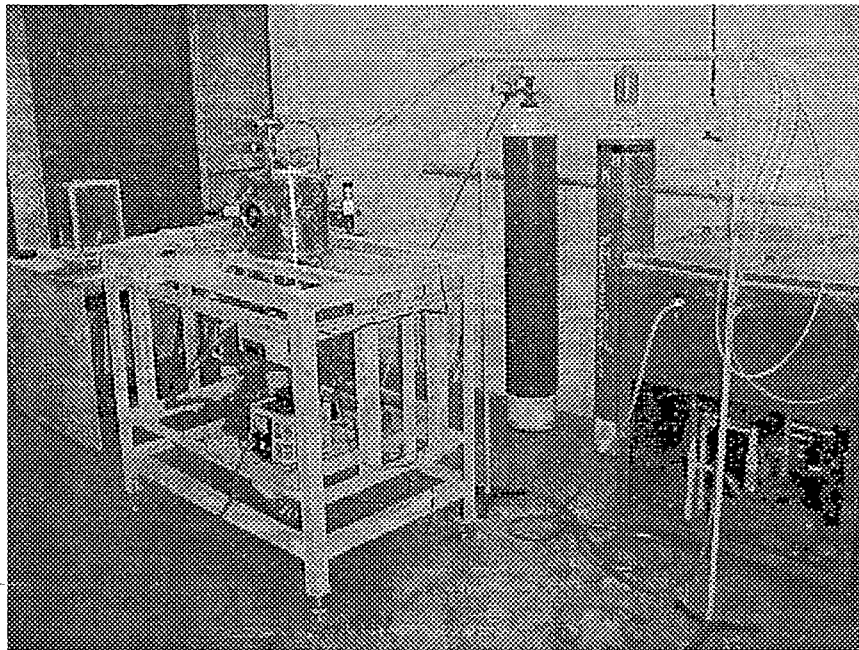
ผลและอภิปรายผลการศึกษา

4.1 บทนำ

ในส่วนผลและอภิปรายผลประกอบด้วย การออกแบบและสร้างระบบเคลือบฟิล์มบาง การทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ และการทดสอบการเคลือบฟิล์มบางซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2 การออกแบบและสร้างระบบเคลือบฟิล์มบาง

ระบบเคลือบที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการวิจัยนี้เป็น ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ ดี ซี แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทด และเป้าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า และระบบป้องกันแก๊ส (รูปที่ 4.1) แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.1 ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง ที่สร้างขึ้น

4.2.1 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศสำหรับทำความดันในโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ เครื่องสูบกแบบโรตารี มาตรการความดัน อุปกรณ์วาล์วและข้อต่อต่างๆ โดยระบบสุญญากาศที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้สามารถทำความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงถึง 9.1×10^{-6} มิลลิบาร์ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ใช้ของ Balzers รุ่น Oil Diffusion Pump DIF 063 L (air cooled) โดยใช้น้ำมัน DC704 (Tetraphenyl Tetramethyl Trisiloxane)

2. เครื่องสูบกแบบโรตารี ใช้ของ Edwards รุ่น E2M8 (2 state)

3. ระบบวัดความดัน วาล์วและข้อต่อ ส่วนใหญ่เป็นของ Balzers ซึ่งเป็นอุปกรณ์เดิมที่มีอยู่ แล้วยนำมาประกอบรวมกัน วาล์วและข้อต่อ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ระบบวัดความดัน ประกอบด้วย หน่วยควบคุมและหัววัด ประกอบด้วยมาตรวัดความดัน Balzers รุ่น TPG 300 เป็นหน่วยควบคุมและแสดงผล ซึ่งมีหัววัด 2 แบบ คือ

- หัววัดแบบเพนนิ่งของ Balzers รุ่น IKR050 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วงระหว่าง 5×10^{-3} - 2×10^{-9} มิลลิบาร์

- หัววัดแบบพิรานีของ Balzers รุ่น TPR010 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วงระหว่าง 1000 - 6×10^{-4} มิลลิบาร์

3.2 วาล์วและข้อต่อ ประกอบด้วยวาล์วต่างๆ ดังนี้คือ

- วาล์วต่อระหว่างเครื่องสูบกแบบโรตารีกับเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ และวาล์วต่อระหว่างเครื่องสูบกแบบโรตารีกับภาชนะสุญญากาศ (Angle valves) ของ Balzers รุ่น EVA016H

- วาล์วสุญญากาศสูง (High vacuum valves) ใช้ของ Balzers ซึ่งเป็นแบบ plate valve รุ่น PVA160H

- วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (Venting valve) ใช้ของ Balzers รุ่น FVA0101

- วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่โรตารี (air admittance valves) ใช้ของ Edwards รุ่น AV10K

- สำหรับข้อต่อที่ใช้ในระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ข้อต่อแบบงอได้ (Flexible bellows) ของ Balzers รุ่น DN16ISOK-KF

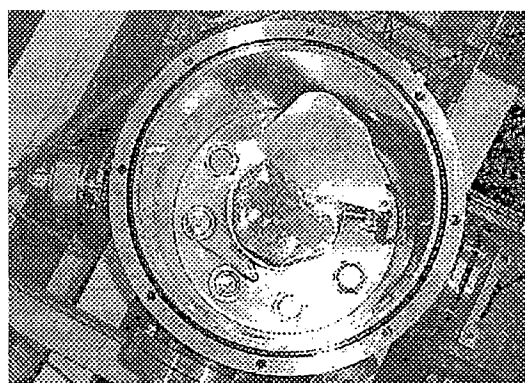
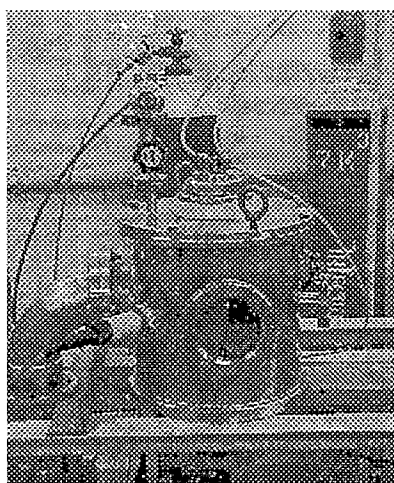
- ข้อต่อสามทาง (stainless steel AISI 316L KIN 1.4404) ใช้ของ Edwards รุ่น NW10

4.2.2 ภาชนะสุญญากาศ

ภาชนะสุญญากาศที่ออกแบบสร้างขึ้น ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 3.0 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 23.0 เซนติเมตร สูง 22.0 เซนติเมตร (ภาชนะสุญญากาศมีปริมาตรประมาณ 9.14 ลิตร) มีช่องหน้าต่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 เซนติเมตร จำนวน 1 ช่อง เพื่อสังเกตการณ์ปรากฏการณ์ต่างๆ ภายในภาชนะสุญญากาศ สำหรับฝาปิดบนของภาชนะสุญญากาศออกแบบให้มีช่องใส่คาโทดและช่องป้อนแก๊สด้วย (รูปที่ 4.2)

ทั้งนี้เพื่อให้สามารถติดตั้งระบบวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจึงได้ออกแบบให้ภาชนะสุญญากาศมีหน้าแปลนขนาด 4 เซนติเมตร (2 ช่อง) สำหรับใส่หัววัดแบบเพนนิ่ง และขนาด 3 เซนติเมตร (2 ช่อง) สำหรับใส่หัววัดแบบพิรานี ในส่วนของช่องเปิดสู่ระบบสุญญากาศนั้นได้ออกแบบให้ภาชนะสุญญากาศมีช่องเปิดสำหรับต่อเข้ากับเครื่องสูบบแบบแพร่ไอทางด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ ขนาด 13.5 เซนติเมตร (ใช้ต่อจากภาชนะสุญญากาศเข้าสู่เครื่องสูบบแบบแพร่ไออีกต่อหนึ่ง) สำหรับแผ่นฐาน (base plate) ของภาชนะสุญญากาศ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 7.0 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 25 เซนติเมตร และออกแบบมีช่องเปิดขนาด 2.5 เซนติเมตร จำนวน 8 ช่อง สำหรับต่ออุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น ขั้วไฟฟ้า ที่ป้อนแก๊ส ชัตเตอร์ ฯลฯ กลางแผ่นฐานมีหน้าแปลนขนาด 13 เซนติเมตร สำหรับใส่อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นรองชิ้นงานซึ่งสามารถปรับระยะได้

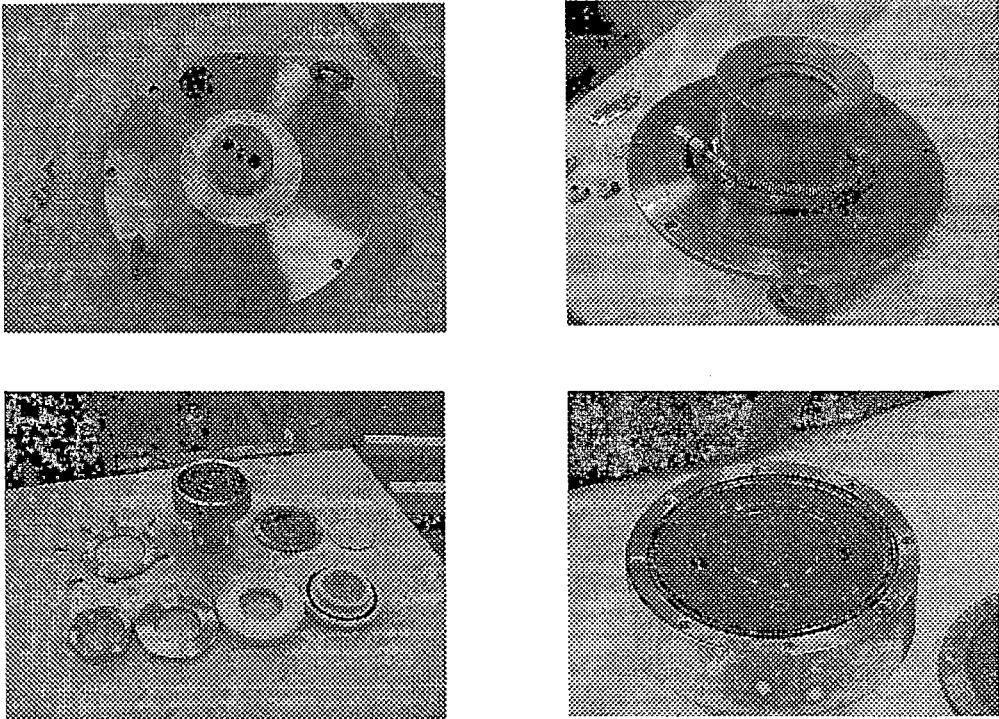
นอกจากส่วนประกอบหลักของระบบแล้ว ภายในภาชนะสุญญากาศยังมีแผ่นรองชิ้นงานสำหรับเคลื่อนนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ยึดติดกับแผ่นฐานซึ่งสามารถปรับระยะห่างจากผิวหน้าเป้าสารเคลื่อนได้ตั้งแต่ 4-10 เซนติเมตร



รูปที่ 4.2 ภาชนะสุญญากาศของระบบเคลื่อน

4.2.3 คาโทดและเป่าสารเคลือบ

คาโทดและเป่าสารเคลือบที่ออกแบบและสร้างขึ้นใช้ในโครงการวิจัยนี้โครงสร้างส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส (เพื่อป้องกันการเกิดสนิมจากระบบน้ำหล่อเย็น) ยกเว้นแกนเหล็กอ่อนที่เป็นขั้วแม่เหล็ก เทฟลอนซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและแผ่นปิดหลังคาโทดซึ่งทำจากทองแดง (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 ลักษณะของคาโทดและเป่าสารเคลือบของระบบเคลือบ

คาโทดที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 114 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการสปีดเตอร์ที่เป่าสารเคลือบเท่านั้น จึงได้ออกแบบให้มีคาโทดชนิดครอบตัวคาโทดไว้อีกชั้นหนึ่ง โดยคาโทดชนิดที่สร้างขึ้นนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 122 มิลลิเมตร และเนื่องจากได้ออกแบบให้มีการระบายความร้อนของคาโทดและเป่าสารเคลือบด้วยน้ำ ดังนั้นเพื่อให้สามารถระบายความร้อนได้ดีและเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็นจึงออกแบบให้มีแผ่นปิดหลังติดอยู่ด้านหลังของเป่าสารเคลือบ (ด้านหน้าแม่เหล็ก) ทำจากทองแดง มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 114 มิลลิเมตร โดยยึดด้วยสกรูรอบแผ่นปิดจำนวน 6 จุด สำหรับการยึดส่วนต่างๆ (แผ่นปิด แม่เหล็ก ตัวคาโทด) ให้ติดกันโดยใช้ตัวยึด (clamp) ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสมีลักษณะเป็นวงแหวน เส้นผ่าศูนย์กลาง 114 มิลลิเมตร สำหรับการยึดจะใช้สกรูยาว 6 จุด ร้อยผ่านแผ่นปิด แม่เหล็ก ตัวคาโทด ไปยังแผ่นปิดบน

การระบายความร้อนของคาโทดและเป่าสารเคลือบ เป็นการระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยออกแบบให้มีทางน้ำไหลผ่านเข้า-ออกอยู่ด้านบนของฝาปิดบน (เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร) โดยใช้ท่อสายยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 8 เมตร จำนวน 2 เส้น ต่อเข้าระบบน้ำหล่อเย็นซึ่งมีปั๊มน้ำ (อัตราการปั๊ม 42 ลิตรต่อนาที) เป็นตัวทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำ

การแยกขั้วไฟฟ้า ได้ใช้เทฟลอนเป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างคาโทดและผนังโลหะของภาชนะสุญญากาศ เนื่องจากเทฟลอนมีสมบัติในการดูดซับความชื้นและโมเลกุลของแก๊สต่ำกว่าพลาสติกชนิดอื่น มีลักษณะเป็นรูปวงแหวนหนา 1 เซนติเมตร โดยมีตัวยึดทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสยึดติดกับคาโทดและฝาปิดบน

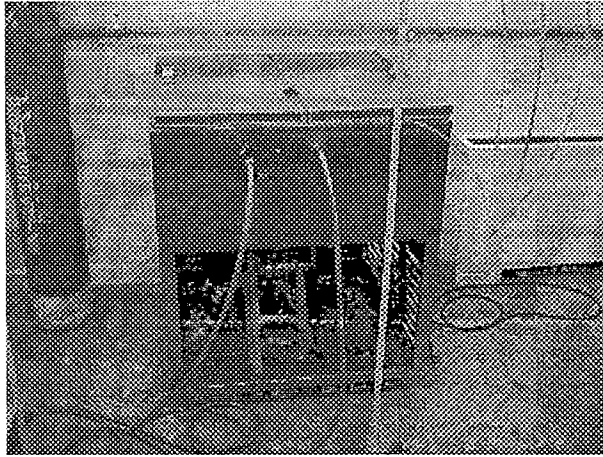
สนามแม่เหล็ก ใช้แม่เหล็กถาวรรูปวงแหวนวางติดกับคาโทดในระนาบของฝาปิดบน และใช้เหล็กอ่อนทรงกระบอกชุกชนิดเกิดเป็นทางนำสนามแม่เหล็กสู่เป่าสารเคลือบ การชุกชนิดเกิดเพื่อป้องกันไม่ให้เหล็กอ่อนเป็นสนิมได้ง่ายและช่วยป้องกันความสกปรกจากสนิมเหล็กในระบบสุญญากาศ การออกแบบนี้ทำให้สนามแม่เหล็กที่ผิวเป่าสารเคลือบมีค่าประมาณ 370 เกาส์

นอกจากนี้เพื่อให้แก๊สที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มมีความสม่ำเสมอจึงออกแบบให้มีการปล่อยแก๊สที่คาโทดซึ่งโดยจะมีท่อ นำแก๊สจากวาล์วต่อไปยังตัวคาโทดซึ่งทำให้แก๊สสามารถพุ่งกระจายอย่างสม่ำเสมอบริเวณเป่าสารเคลือบ

4.2.4 ระบบน้ำหล่อเย็น

ระบบน้ำหล่อเย็นที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในระบบนี้จะถูกนำไปใช้งาน 2 ส่วนหลัก คือ ใช้ในการหล่อเย็นคาโทดและเป่าสารเคลือบและส่วนบนของเพลตวาล์วของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ โดยระบบน้ำหล่อเย็นที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเครื่องทำความเย็นและถังน้ำ โดยในส่วนของเครื่องทำความเย็นประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ขนาด 0.5 แรงม้า เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตัวขยาย (expander) และเครื่องควบแน่น (condenser) ซึ่งประกอบด้วยแผงรังผึ้งและพัดลมสำหรับระบายความร้อนของท่อร้อน ท่อพักน้ำยา และตัวทำให้แห้ง (dryer) ติดต่อกันเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย

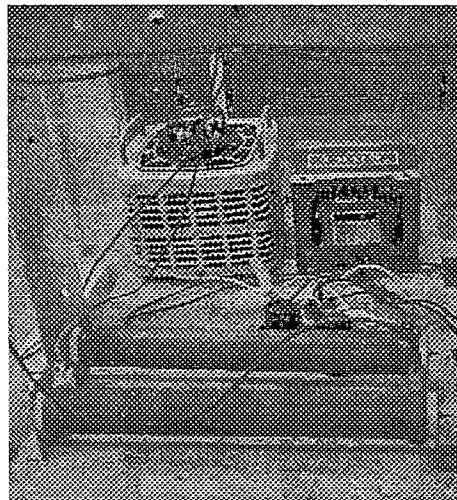
สำหรับถังน้ำทำด้วยสเตนเลสมีตัวถังขนาด 30x30x70 เซนติเมตร (ปริมาตร 63 ลิตร) โดยถังน้ำเย็นนี้จะบรรจุอยู่ในส่วนบนของโครงสร้างทำความเย็น ด้านบนมีฝาเปิด-ปิด ที่ผนังมีท่อน้ำเย็นเชื่อมต่อกับถังบรรจุน้ำ โดยท่อน้ำเย็นและผนังทั้ง 4 ตลอดจนด้านบนของถังจะหุ้มด้วยโฟมซึ่งเป็นฉนวน ด้านล่างของถังมีท่อน้ำซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องสูบน้ำและมีท่อน้ำทิ้ง ด้านบนมีท่อน้ำเข้า ท่อทุกท่อมีวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นระหว่างบริเวณที่ต้องการหล่อเย็นกับถังระบบน้ำหล่อเย็นจึงติดตั้งปั๊มน้ำขนาด 125 วัตต์ 220 โวลต์ 50 Hz (อัตราการหมุน 2850 รอบต่อนาที อัตราการปั๊มน้ำ 42 ลิตรต่อนาที)



รูปที่ 4.4 ระบบน้ำหล่อเย็นของระบบเคลื่อน

4.2.5 ระบบจ่ายไฟฟ้า

ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นจะใช้สำหรับในสถานการณ์เคลื่อนที่เท่านั้น ซึ่งจะให้คาโทดมีศักย์เป็นลบ ส่วนกราวด์และแผ่นรองชิ้นงานมีศักย์เป็นบวก โดยระบบจ่ายไฟฟ้าที่สร้างจะเป็นระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง แบบฟูลเวฟ (รูปที่ 4.5) สามารถปรับความต่างศักย์ได้ตั้งแต่ 0-450 โวลต์ กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 0-2 แอมป์

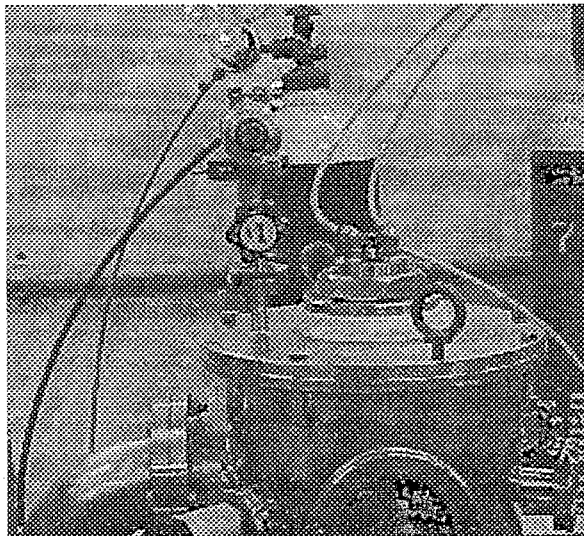


รูปที่ 4.5 ภาคจ่ายไฟฟ้าของระบบเคลื่อน

4.2.6 ระบบป้อนแก๊ส

ในการทำงานของระบบเคลือบที่พัฒนาขึ้นนั้นจำเป็นต้องใช้แก๊สในการทำให้เกิดกระบวนการสปีดเทอริงโดยแก๊สที่ใช้ในระบบเคลือบนี้คือแก๊สอาร์กอน สำหรับระบบป้อนแก๊สของระบบเคลือบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยวาล์ว 2 แบบคือ (1) วาล์ว 2 ทาง (วาล์วเปิด-ปิดแก๊ส) ของ nupro รุ่น SS-DSV51 ทำหน้าที่เปิด-ปิดการป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบ (วาล์วนี้เป็นของเก่าที่นำมาดัดแปลงใช้งาน) และ (2) วาล์วรูเข็ม (midle valve) ของ Edwards รุ่น FCV10K (Extra fine control needle valve) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณของแก๊สที่ปล่อยเข้าสู่ระบบเคลือบ

ทั้งนี้แก๊สอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะถูกป้อนผ่านวาล์วทั้ง 2 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่แผ่นปิดบน และมีท่อนำแก๊สต่อเข้ากับคาโทดชนิด (เป็นการปล่อยแก๊สใต้คาโทดชนิด) ซึ่งจะทำให้แก๊สอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบฟุ้งกระจายอยู่บริเวณด้านหน้าของเป่าสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการสปีดเทอริงที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบอย่างทั่วถึง

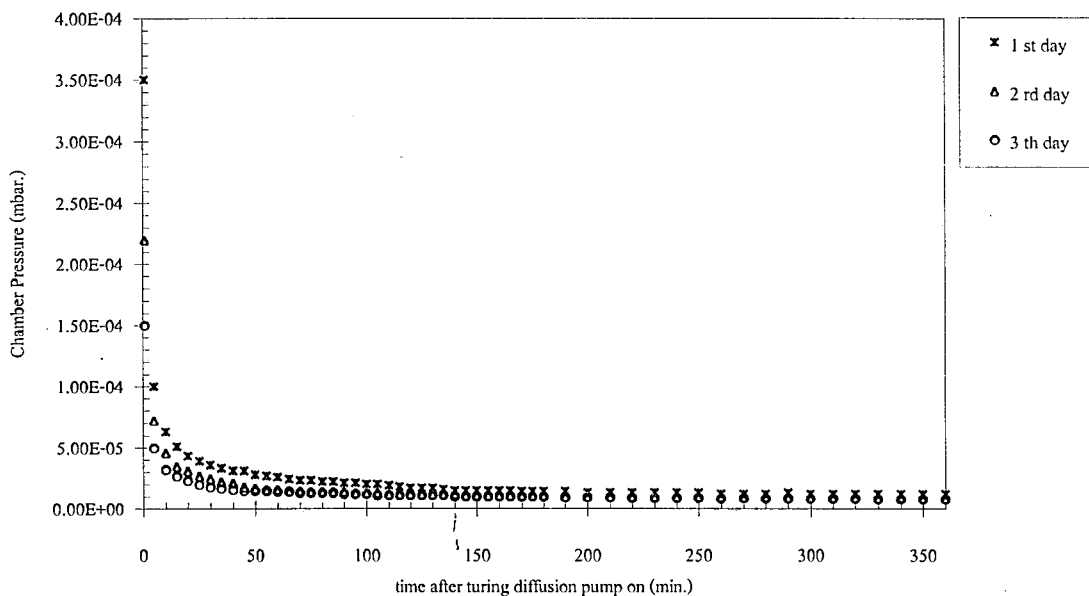


รูปที่ 4.6 ชุดป้อนแก๊สของระบบเคลือบ

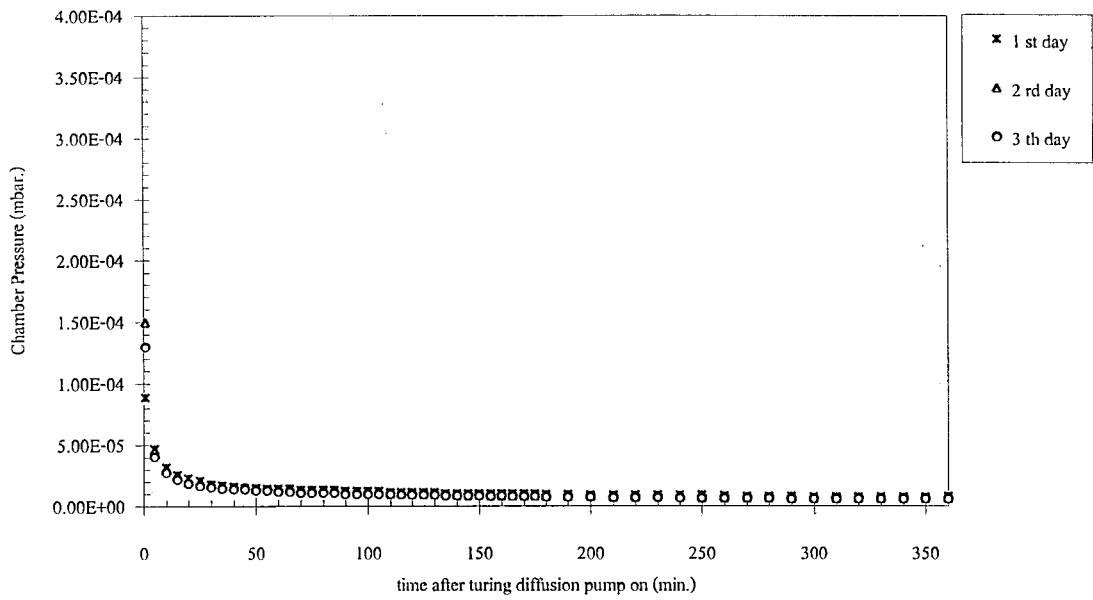
4.3 การทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบ

เมื่อประกอบระบบเคลือบเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องทำการทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบก่อนทำการเคลือบ เพื่อดูความสามารถของระบบด้านสุญญากาศ (ถ้าทำความดันได้ต่ำมาก ๆ แสดงว่าระบบเคลือบมีความบริสุทธิ์มากซึ่งจะมีผลต่อฟิล์มบางที่ได้) เนื่องจากการสร้างระบบเคลือบด้วยวิธีสปีดเทอริงนั้นความสะอาดของระบบเคลือบเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องที่จะต้องทำความสะอาดระบบเคลือบ โดยต้องทำความดันของระบบต่ำกว่า 10^{-6} มิลลิบาร์ (สำหรับความดันขณะเคลือบจะอยู่ที่ประมาณ 10^{-3} มิลลิบาร์)

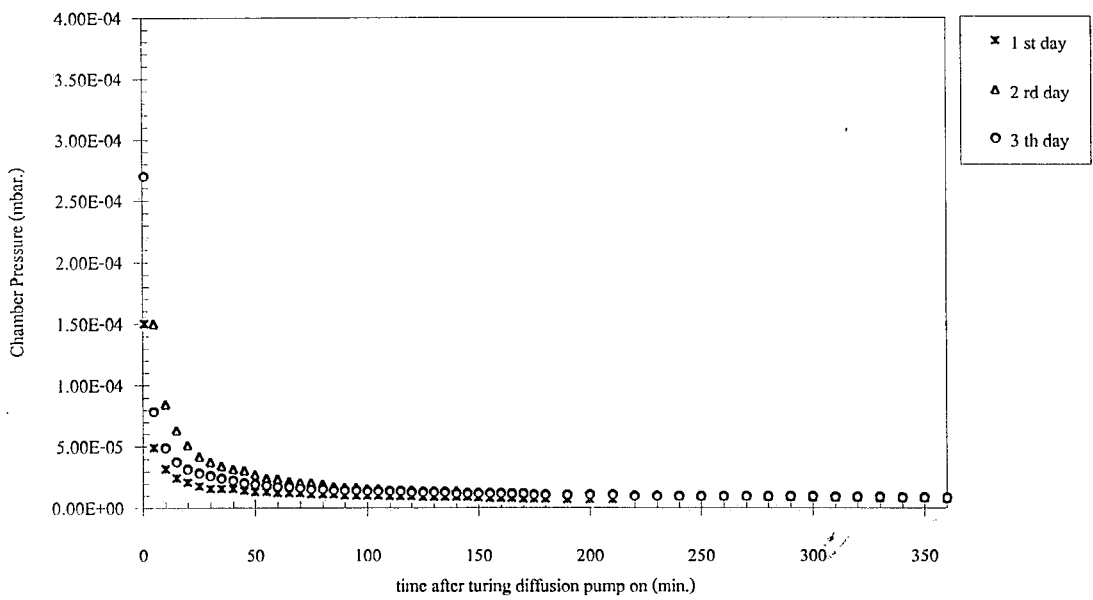
สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสร้างภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศโดยใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอของ Balzers รุ่น Oil Diffusion Pump DIF 063 L (air cooled) ซึ่งมีขนาดกำลัง 150 ลิตร/วินาที โดยใช้ร่วมกับเครื่องสูบกแบบโรตารีของ Edwards รุ่น E2M8 (2 state) ซึ่งสามารถทำความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ 1.31×10^{-5} มิลลิบาร์ โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที (ตั้งแต่เปิดเครื่องสูบอากาศ) และสามารถทำความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ถึง 8.0×10^{-6} มิลลิบาร์ เมื่อใช้เวลาประมาณ 60 นาที



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของระบบ (ครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของระบบ (ครั้งที่ 2)



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของระบบ (ครั้งที่ 3)

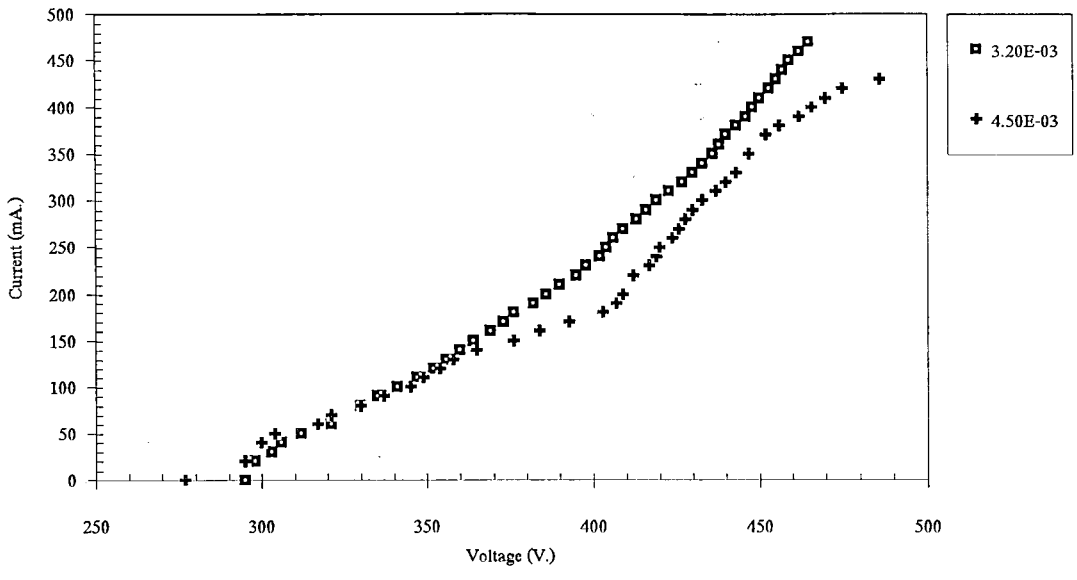
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ในการดิสชาร์จของระบบสปีดเตอริง แสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชันของระบบ โดยสภาพการดิสชาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้อย่างมีประสิทธิภาพจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันดิสชาร์จตามสมการ $I = kV^n$ ซึ่งค่า n จะขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก โดยปกติ n มีค่าระหว่าง 5 ถึง 9 ในแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบทรงกระบอก แต่อาจแตกต่างกันไปบ้างเมื่อจัดแบบพลาเนียร์แมกนีตรอน k คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงกว้างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ดิสชาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

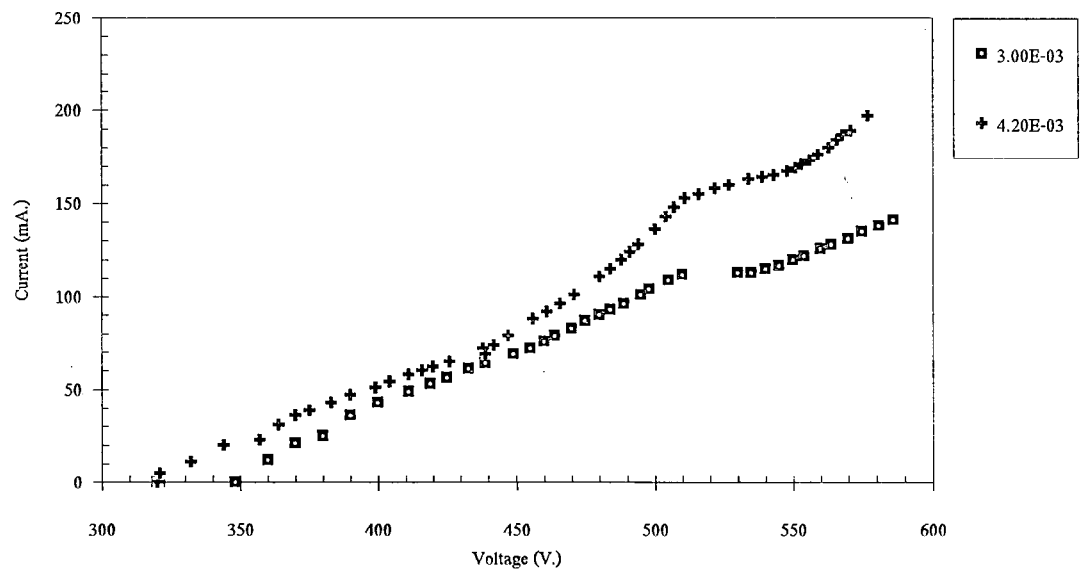
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ไททานเนียมและทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบพบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นพบว่าความชันกราฟจะเปลี่ยนค่าไป (รูปที่ 4.9-4.10) ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นนั้น ปริมาณไอออนของแก๊สจะถูกจำกัดด้วยความดันแก๊สในระบบซึ่งทำให้การผลิตอิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดตามไปด้วย ดังนั้น โวลเตจของคาโทดจึงสูงขึ้นเพื่อเร่งไอออนให้ชนคาโทดด้วยพลังงานที่สูงขึ้นสำหรับสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกราฟดังรูปที่ 4.9-4.10 โดยค่า k และ ค่า n ของระบบเคลือบที่ความดันต่างๆ สำหรับเป้าสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไททานเนียมและทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า k และ ค่า n ของระบบเคลือบที่ความดันต่างๆ สำหรับเป้าไททานเนียมและทองแดง

เป้าสารเคลือบ	ความดัน (mbar)	k	n
ไททานเนียม	3.2×10^{-3}	8.25×10^{-17}	7.08
	4.5×10^{-3}	2.44×10^{-15}	6.48
ทองแดง	3.0×10^{-3}	8.97×10^{-13}	5.19
	4.2×10^{-3}	2.14×10^{-11}	4.73



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ
เมื่อใช้ไททานเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ
เมื่อใช้ทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบ

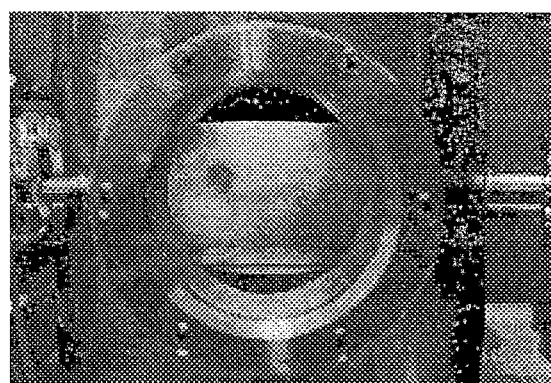
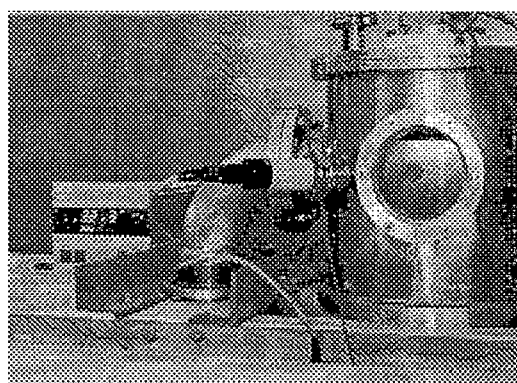
4.5 การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง

เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการเคลือบฟิล์มบางของระบบเคลือบที่ออกแบบสร้างขึ้น จึงได้กำหนดให้มีการทดลองเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ โดยใช้เป่าสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไททานเนียมและทองแดง การทดลองเริ่มจากการสูบลมออกจากภาชนะสูญญากาศจนได้ความดันประมาณ 2.5×10^{-5} มิลลิบาร์ (เพื่อให้ระบบเคลือบมีความบริสุทธิ์เพียงพอซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้) แล้วจึงเริ่มป้อนแก๊สอาร์กอนเพื่อทำการสปัดเตอร์ริง สำหรับความดันของระบบขณะเคลือบจะอยู่ในระดับ 10^{-3} มิลลิบาร์ โดยใช้โวลเตจขณะเคลือบเท่ากับ 500 โวลต์

จากการศึกษาพบว่าขณะทำการเคลือบสีกาโทดโกลว์ของไททานเนียมจะมีสีเป็นสีฟ้าขาว ส่วนของทองแดงจะเป็นสีฟ้าอมเขียว ในส่วนของฟิล์มบางที่ได้พบว่าผลการเคลือบเป็นที่น่าพอใจทั้งนี้เมื่อสังเกตด้วยสายตาพบว่าฟิล์มบางที่ได้มีสีที่แวววาว ซึ่งเป็นสีของเป่าสารเคลือบ และไม่ปรากฏสภาพหมองคล้ำของฟิล์มบางจากโลหะเหล่านี้ และเมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มบางโดยการเช็ดถูด้วยนิ้วมือ ขูดด้วยเล็บ พบว่าทั้งการเช็ดถูและขูดด้วยเล็บไม่สามารถทำให้ฟิล์มบางที่ได้หลุดออก และเมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ในอากาศพบว่าจะมีการเกิดออกไซด์เฉพาะฟิล์มบางทองแดงเท่านั้น ส่วนฟิล์มบางของไททานเนียมจะยังคงสภาพเหมือนเดิม

ตารางที่ 4.2 ผลการเคลือบฟิล์มบางที่ได้

เป่าสารเคลือบ	ความต่างศักย์ (V)	สีของกาโทดโกลว์	การยึดติดของฟิล์มบาง
ไททานเนียม	500	ฟ้าขาว	เช็ดถูไม่ออก ทั้งไว้ไม่ปรากฏออกไซด์
ทองแดง	500	ฟ้าอมเขียว	เช็ดถูไม่ออก ทั้งไว้ปรากฏออกไซด์



รูปที่ 4.12 ระบบเคลือบขณะทำการเคลือบ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

ปัจจุบันการเคลือบฟิล์มบางบนผิววัสดุเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญทั้งในทางอุตสาหกรรม การแพทย์และการวิจัยด้านวัสดุ ทั้งนี้การเคลือบฟิล์มบางอาจทำได้ด้วยกระบวนการทางเคมีหรือฟิสิกส์ก็ได้ แต่การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมีนั้นต้องใช้สารละลายเคมีซึ่งมักก่อให้เกิดสารเคมีที่เหลือใช้และยากแก่การกำจัดอีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษแก่สิ่งแวดล้อมด้วย ทั้งนี้การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศโดยวิธีสปัตเตอร์ริง โดยเริ่มจากการศึกษาหลักการรวมถึงการสร้างเครื่องเคลือบแบบสปัตเตอร์ริงจะทำให้คณะผู้วิจัยทราบถึงเทคนิคและฟิสิกส์ของเครื่องมือชนิดนี้อย่างละเอียด รวมถึงเทคนิคและวิธีการเคลือบฟิล์มบางต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่การวิจัยด้านวัสดุ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการดังนี้คือ (1) เพื่อศึกษาหลักการทำงานและเทคนิคในการออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง แบบดีซี แมกนีตรอน (D.C Magnctron Sputtering) (2) เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการสปัตเตอร์สำหรับสารเคลือบชนิดต่างๆ และ (3) เพื่อพัฒนาบุคลากรทางด้านฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ ซึ่งโครงการวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ช่วง (เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี) ในรายงานฉบับนี้เป็นรายงานในช่วงแรกซึ่งเน้นในด้าน การออกแบบและสร้างระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง มีขั้นตอนการดำเนินงานโดยสรุปดังนี้

1. การออกแบบและสร้างระบบเคลือบ ระบบเคลือบฟิล์มบางที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการนี้เป็นแบบ ดี ซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญดังนี้คือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทดและเป่าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า และระบบป้อนแก๊ส สำหรับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่นำมาสร้างระบบเคลือบนี้มีทั้งที่คณะผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้นใหม่โดยใช้วัสดุภายในประเทศ บางส่วนเป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว และบางส่วนเป็นอุปกรณ์เก่าที่นำมาซ่อมและ/หรือปรับปรุงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้อุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วได้แก่ เจกวัด ความดันต่างๆ ส่วนอุปกรณ์เก่าที่นำมาซ่อมให้ทำงานได้ คือ เครื่องสูบลมโรตารีสำหรับระบบสุญญากาศ ส่วนอุปกรณ์เก่าที่นำมาดัดแปลงได้แก่ ระบบป้อนแก๊ส สำหรับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างขึ้นใหม่ทั้งหมด ได้แก่ คาโทดและเป่าสารเคลือบ ภาชนะสุญญากาศ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า

2. การทดสอบระบบเคลือบ เพื่อทดสอบการทำงานของระบบเคลือบที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถทำงานได้ในระดับใด ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงกำหนดให้มีการทดสอบระบบได้แก่การทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบเป็นการทดสอบด้านสุญญากาศของระบบเคลือบฟิล์มบางที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้จะขึ้นกับความสะอาดของระบบเคลือบโดยตรง และการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบเพื่อหาประสิทธิภาพของการเกิดไอออไนเซชันของระบบ โดยใช้ไททานเนียมและทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบสำหรับความดันต่างๆ

3. การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง เมื่อประกอบระบบเคลือบฟิล์มบาง และทดสอบความสามารถของระบบสุญญากาศ และหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์แล้ว เพื่อทดสอบว่าระบบที่พัฒนาสามารถเคลือบฟิล์มบางได้ตามต้องการ ได้ทดสอบการเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ โดยใช้เป้าสารเคลือบ 2 ชนิด ได้แก่ ไททานเนียมและทองแดง

5.2 สรุปผล

ผลการศึกษาในโครงการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.2.1 การออกแบบและสร้างระบบเคลือบ

ระบบเคลือบที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการวิจัยนี้เป็น ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ ดี ซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทด และเป้าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า และระบบป้องกันแก๊ส

1. ระบบสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ของ Balzers รุ่น Oil Diffusion Pump DIF 063 L เครื่องสูบลูกแบบโรตารี ใช้ของ Edwards รุ่น E2M8 (2 state) ระบบวัดความดัน ใช้ของ Balzers โดยหัววัดแบบเพนนิ่งคือ รุ่น IKR050 และหัววัดแบบพิรามิดคือ รุ่น TPR010 สำหรับวาล์วและข้อต่อส่วนใหญ่เป็นของ Balzers ซึ่งเป็นอุปกรณ์เดิมที่มีอยู่แล้วนำมาประกอบกัน โดยระบบสุญญากาศที่ออกแบบสร้างสามารถทำความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงถึง 9.1×10^{-6} มิลลิบาร์

2. ภาชนะสุญญากาศ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 3.0 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง ขนาด 23.0 เซนติเมตร สูง 22.0 เซนติเมตร (ปริมาตรประมาณ 9.14 ลิตร) มีช่องหน้าต่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 เซนติเมตร จำนวน 1 ช่อง ฝาปิดบนของภาชนะสุญญากาศมีช่องสำหรับใส่คาโทดและช่องป้องกันแก๊ส นอกจากนี้ภาชนะสุญญากาศมีหน้าแปลนขนาด 4 เซนติเมตร (2 ช่อง) สำหรับใส่หัววัดแบบเพนนิ่ง และขนาด 3 เซนติเมตร (2 ช่อง) สำหรับใส่หัววัดแบบพิรามิด ในส่วนของช่องเปิดสู่ระบบสุญญากาศมีขนาด 13.5 เซนติเมตร อยู่ด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ เพื่อต่อเข้ากับเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ สำหรับแผ่นฐานของภาชนะสุญญากาศ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 7.0 มิลลิเมตร เส้นผ่า

ศูนย์กลางขนาด 25 เซนติเมตร มีช่องเปิดขนาด 2.5 เซนติเมตร จำนวน 8 ช่อง สำหรับต่ออุปกรณ์เพิ่มเติม กลางแผ่นฐานมีหน้าแปลนขนาด 13 เซนติเมตร สำหรับใส่อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นรองชิ้นงานซึ่งสามารถปรับระยะได้ นอกจากนี้ภายในภาชนะสุญญากาศยังมีแผ่นรองชิ้นงานสำหรับเคลือบนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สามารถปรับระยะห่างจากผิวหน้าเป่าสารเคลือบได้ตั้งแต่ 4-10 เซนติเมตร

3. คาโทดและเป่าสารเคลือบ โครงสร้างส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส ยกเว้นแกนเหล็กอ่อนที่ใช้เป็นขั้วแม่เหล็ก เทฟลอนซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและแผ่นปิดหลังซึ่งทำจากทองแดงเท่านั้น คาโทดที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 114 มิลลิเมตร มีคาโทดซีลด์เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 122 มิลลิเมตร มีการระบายความร้อนของคาโทดและเป่าสารเคลือบด้วยน้ำ โดยมีแผ่นปิดหลังติดอยู่ด้านหลังของเป่าสารเคลือบ (ด้านหน้าแม่เหล็ก) ทำจากทองแดง มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 114 มิลลิเมตร โดยยึดด้วยสกรูรอบแผ่นปิดจำนวน 6 จุด สำหรับการยึดส่วนต่างๆ (แผ่นปิด แม่เหล็ก ตัวคาโทด) ให้ติดกันโดยใช้ตัวยึดทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีลักษณะเป็นวงแหวน เส้นผ่าศูนย์กลาง 114 มิลลิเมตร สำหรับการยึดจะใช้สกรูยาว 6 จุด ร้อยผ่านแผ่นปิด แม่เหล็ก ตัวคาโทด ไปยังแผ่นปิดบนสำหรับกั้นแยกขั้วไฟฟ้าใช้เทฟลอนเป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างคาโทดและผนังโลหะของภาชนะสุญญากาศ ในส่วนของสนามแม่เหล็กได้ใช้แม่เหล็กถาวรรูปวงแหวนวางติดกับคาโทดในระนาบของฝาปิดบนและใช้เหล็กอ่อนทรงกระบอกชนิดเกลียวเป็นทางนำสนามแม่เหล็กสู่เป่าสารเคลือบ โดยการออกแบบนี้ทำให้สนามแม่เหล็กที่ผิวเป่าสารเคลือบมีค่าประมาณ 370 เกาส์

4. ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบน้ำหล่อเย็นที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในระบบนี้จะถูกนำไปใช้งาน 3 ส่วนหลัก คือ ใช้ในการหล่อเย็นคาโทดและเป่าสารเคลือบและส่วนบนของเพลดวาล์วของเครื่องสูบลมไฮโดร โดยระบบน้ำหล่อเย็นที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเครื่องทำความเย็นและถังน้ำขนาด 30x30x70 เซนติเมตร (ปริมาตร 63 ลิตร) โดยเครื่องทำความเย็นประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ขนาด 0.5 แรงม้า เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตัวขยายและเครื่องควบแน่น ซึ่งประกอบด้วยแผงรังผึ้งและพัดลมสำหรับระบายความร้อนของท่อร้อน ท่อพักน้ำยาและตัวทำให้แห้ง การไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นระหว่างบริเวณที่ต้องการกับถังน้ำหล่อเย็นทำได้โดยใช้ปั๊มน้ำขนาด 125 วัตต์ 220 โวลต์ 50 Hz (อัตราการหมุน 2850 รอบต่อนาที อัตราการปั๊มน้ำ 42 ลิตรต่อนาที) ด้านล่างของเครื่องได้ติดตั้งล้อเลื่อนเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย

5. ระบบจ่ายไฟฟ้า ใช้ในกระบวนการเคลือบเท่านั้น โดยให้คาโทดมีศักย์เป็นลบ ส่วนกราวด์และแผ่นรองชิ้นงานมีศักย์เป็นบวก ระบบจ่ายไฟฟ้าที่สร้างจะเป็นระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบฟูลเวฟ สามารถปรับความต่างศักย์ ช่วง 0-450 โวลต์ กระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 0-2 แอมป์

6. ระบบป้อนแก๊ส ประกอบด้วยวาล์ว 2 ทาง (วาล์วเปิด-ปิดแก๊ส) ของ nupro รุ่น SS-DSV51 ทำหน้าที่เปิด-ปิดการป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบ และ วาล์วรูเข็ม ของ Edwards รุ่น FCV10K (Extra fine control needle valve) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณของแก๊สที่ปล่อยเข้าสู่ระบบเคลือบ โดยแก๊สอาร์กอนที่เข้าสู่ระบบจะถูกป้อนผ่านวาล์วทั้ง 2 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่แผ่นปิดบนและมีท่อ นำแก๊สต่อเข้ากับคาโทดซีลด์ (เป็นการปล่อยแก๊สใส่คาโทดซีลด์) ทำให้แก๊สอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบพุ่งกระจายอยู่บริเวณด้านหน้าของเป่าสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอทำให้เกิดกระบวนการสปีดเตอริงที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบอย่างทั่วถึง

5.2.2 การทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบ

เมื่อประกอบระบบเคลือบเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องทำการทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบก่อนทำการเคลือบ เพื่อดูความสามารถของระบบด้านสุญญากาศ (ถ้าทำความดันได้ต่ำมากๆ แสดงว่าระบบเคลือบมีความบริสุทธิ์มากซึ่งจะมีผลต่อฟิล์มบางที่ได้) เนื่องจากการสร้างระบบเคลือบด้วยวิธีสปีดเตอริงนั้นความสะอาดของระบบเคลือบเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำความสะอาดระบบเคลือบโดยต้องทำความดันของระบบต่ำกว่า 10^{-6} มิลลิบาร์ (สำหรับความดันของระบบขณะเคลือบจะอยู่ที่ประมาณ 10^{-3} มิลลิบาร์)

สำหรับการศึกษานี้ได้ทำการสร้างภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศโดยใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอของ Balzers รุ่น Oil Diffusion Pump DIF 063 L (air cooled) ซึ่งมีขนาดกำลัง 150 ลิตร/วินาที โดยใช้ร่วมกับเครื่องสูบกแบบโรตารีของ Edwards รุ่น E2M8 (2 state) ซึ่งสามารถทำความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำสุด ถึง 8.0×10^{-6} มิลลิบาร์ ด้วยเวลา 60 นาที

5.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์อิสระของระบบสปีดเตอริงแสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออไนเซชันของระบบ จากการศึกษาพบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นพบว่าความชันกราฟจะเปลี่ยนค่าไป เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นนั้น ปริมาณไอออนของแก๊สจะถูกจำกัดด้วยความดันแก๊สในระบบซึ่งทำให้การผลิตอิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดตามไปด้วย ดังนั้นความต่างศักย์ของคาโทดจึงสูงขึ้นเพื่อเร่งไอออนให้ชนคาโทดด้วยพลังงานที่สูงขึ้นสำหรับสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกราฟ

บรรณานุกรม

1. โช สาทินัน, ฉัตรศักดิ์ ผลโกศล, บัญชา ศิลป์สกุลสุข และ สวัสดิ์ ปานเนา, 2536, การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบสารระบบสุญญากาศ (วิธีระเหยสาร). รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
2. Guthrie, A., 1963, Vacuum Technology, New York, John Wiley.
3. ศุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์, พิเชษฐ ถิมสุวรรณ และพิษณุ เจริญสมศักดิ์, 2529, “การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสเป็คโตริง,” รายงานการวิจัยประจำปี 2529 ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
4. Chapman, B., 1980, Glow Discharge Processes, New York, John Wiley & Sons.
5. Maissel, L.I. and R. Gland, 1970, Handbook of Thin Film Technology, New York, McGraw-Hill.
6. Vossen, J.L. and W. Kerns, 1978, Thin Film Processes, Academic Press, New York.
7. Bunshah, R.F., 1982, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, New Jersey, Noyes Publications.
8. Bunshah, R.F., 1994, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, 2nd ed, New Jersey, Noyes Publications.
9. พิเชษฐ ถิมสุวรรณและคณะ, 2531, เครื่องเคลือบสารแบบ ดีซี แมกนีตรอน, เอกสารวิชาการภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ในงานเทคโนโลยีครั้งที่ 5.
10. ชัยวิทย์ ศิลาวรรณาไนย์, 2526, ฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.
11. Aronson, A.J., 1978, Equipment for Sputtering, Solid State Technology.
12. Holland, L., 1970, Vacuum Deposition of Thin Films, 6th ed. London: Chapman and Hall.
13. Wasa, K. and Shigeru Hayakawa, 1992, Handbook of Sputter Deposition Technology : Principles, Technology and Applications, New Jersey, Noyes Publications.