

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

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเคลือบสารต่างๆ ด้วยวิธีสปัตเตอริง
A Study of The Proper State for Material Coating by Sputtering Method.

โดย

นายสุรสิงห์ ไชยคุณ
นายนิรันดร์ วิทิตอนันต์
นายสกุล ศรีญาณลักษณะ
นายจักรพันธ์ ถาวรธิดา
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

27 ส.ค. 2548

139071

เริ่มบริจา

25 ก.ค. 2548

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

มหาวิทยาลัยบูรพา

ประจำปีงบประมาณ 2541

ประกาศคุณูปการ

โครงการวิจัย "การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเคลือบสารต่างๆ ด้วยวิธีสปัตเตอริง : A Study of The Proper State for Material Coating by Sputtering Method." เป็นโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก หมวดเงินอุดหนุนการวิจัยของ มหาวิทยาลัยบูรพา ปีงบประมาณ 2541 โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดีโดยความช่วยเหลือจากหลายฝ่ายซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ ได้แก่ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้การสนับสนุนการวิจัย โครงการวิจัยนี้ต่อจากปีงบประมาณ 2540 จนเสร็จสิ้นโครงการ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัยตั้งแต่เริ่มต้นโครงการ ตลอดจนให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าแก่คณะผู้วิจัยจนเสร็จสิ้นโครงการ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่สนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการสปัตเตอร์ริงสำหรับสารเคลือบชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นโครงการต่อเนื่องจากปีแรก โดยเป็นการปรับปรุงระบบเคลือบฟิล์มบาง การทดสอบอัตราเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบ ซึ่งมีผลการศึกษาคือได้ปรับปรุงระบบเคลือบเดิมซึ่งเป็นแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง มาเป็นแบบ ดีซี อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทดและเป่าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้าและระบบป้อนแก๊ส ภาชนะสุญญากาศทำจากเหล็กกล้า สเตนเลสทรงกระบอกมีปริมาตรประมาณ 9.14 ลิตร คาโทดมีพื้นที่เป่าสารเคลือบแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร พร้อมคาโทดชนิด พร้อมติดตั้งแม่เหล็กชนิด NdFeB ไว้ด้านหลังเป่าสารเคลือบเพื่อให้สนามแม่เหล็กมีลักษณะไม่สมมาตรจึงใช้แม่เหล็กวางทั้งแกนกลางและรอบนอกเป็นวงแหวน โดยสนามแม่เหล็กที่แกนกลางมีค่าประมาณ 1000 เกาส์ ส่วนบริเวณวงแหวนจะมีค่าประมาณ 490 เกาส์ ระบบน้ำหล่อเย็นใช้หล่อเย็นคาโทด เป่าสารเคลือบและส่วนบนของเพลาหัวล้อของเครื่องสูบลมไอรระบบจ่ายไฟฟ้าเป็นระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง แบบฟูลเวฟ สามารถปรับความต่างศักย์ ช่วง 0-500 โวลต์ กระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 0-2 แอมป์ ระบบป้อนแก๊สควบคุมด้วยวาล์วเปิด-ปิด และควบคุมปริมาณแก๊สที่เข้าสู่ระบบที่แผ่นปิดบนและมีท่อ นำแก๊สต่อเข้ากับคาโทดชนิด

จากการศึกษาการกระจายตัวของสารเคลือบของระบบเคลือบพบว่ามีลักษณะเป็นวงกลม โดยที่บริเวณกลางเป่าฟิล์มที่ได้จะหนาที่สุดและเบาบางลงตามแนวรัศมี โดยระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบและวัสดุรองรับที่เหมาะสมที่สุด 12 เซนติเมตรจากเป่าสารเคลือบ พื้นที่ที่ให้ฟิล์มสม่ำเสมอประมาณ 4x4 เซนติเมตร สำหรับอัตราการเคลือบฟิล์มของระบบพบว่าทองแดงมีอัตราการเคลือบสูงสุดคือ 0.047 ไมครอนต่อนาที รองลงมาได้แก่ อะลูมิเนียม ทอง และ ไททานเนียมตามลำดับ

จากการศึกษาพบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการเคลือบฟิล์มบางคือที่ระยะ 12 เซนติเมตร จากหน้าเป่าสารเคลือบ และใช้ความดันขณะเคลือบ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ โดยความต่างศักย์ที่ให้อยู่ในช่วง 350-550 โวลต์ และเมื่อทดลองเคลือบฟิล์มบางด้วยเป่าต่างกัน 4 ชนิด คือ อะลูมิเนียม ทอง ไททานเนียม และทองแดง พบว่าจะให้สีคาโทดโกลว์ของเป่าสารเคลือบต่างกัน โดยอะลูมิเนียมจะมีสีฟ้าอมเทา ทองจะมีสีฟ้าอมส้ม ไททานเนียมจะมีสีฟ้าขาว ส่วนของทองแดงมีสีฟ้าอมเขียว ส่วนฟิล์มบางที่ได้พบมีสีแวววาวของเป่าสารเคลือบ เมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มบางโดยการขีดถูด้วยนิ้วมือ ขูดด้วยเล็บ พบว่าไม่สามารถทำให้ฟิล์มที่ได้หลุดและเมื่อปล่อยทิ้งไว้ในอากาศพบว่าจะมีการเกิดออกไซด์เฉพาะฟิล์มบางทองแดงเท่านั้นส่วนฟิล์มบางอะลูมิเนียม ทอง และไททานเนียมจะยังคงสภาพเหมือนเดิม

สารบัญ

| บทที่ | หน้า |
|--------------------------------------|----------|
| 1. บทนำ | 1 |
| 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 3. วิธีดำเนินการวิจัย | 37 |
| 4. ผลและอภิปรายผลการวิจัย | 42 |
| 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ บรรณานุกรม | 58 64 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 2.1 | พลังงานจลน์เริ่มของเป่าสารเคลือบชนิดต่างๆ | 10 |
| 2.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของระบบหล่อเย็นไม่เกิน 10°C | 27 |
| 4.1 | อัตราเคลือบของฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ | 50 |
| 4.2 | อัตราการเคลือบของสารเคลือบชนิดต่างๆ | 51 |
| 4.3 | ค่า k และค่า n ของระบบเคลือบที่ความดันต่างๆ | 54 |
| 4.4 | ผลการเคลือบฟิล์มบางที่ได้ | 57 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การเกิดฟิล์มบาง | 6 |
| 2.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ | 9 |
| 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่ายึดค้ำของผิวทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานค่าต่างๆ | 11 |
| 2.4 การเปลี่ยนแปลงค่ายึดค้ำของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่างๆ | 11 |
| 2.5 การเปลี่ยนแปลงของยึดค้ำสปีดเตอร์ริงเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV วิ่งชนเป้าของนิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่างๆ เมื่อวัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า | 12 |
| 2.6 ก) การกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสปีดเตอร์จกไอออนของแก๊ส Kr ที่พลังงานต่างๆ ข) เปรียบเทียบการกระจายค่าความเร็วของอะตอมทองแดงที่ได้จากการระเหยสารและจากการสปีดเตอร์ริง | 13 |
| 2.7 ก) พลังงานเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออนของไอออนของ Kr พลังงาน 1200 eV ที่ค่าพลังงานต่างๆ ข) ความเร็วเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออน Kr พลังงาน 1200 eV | 14 |
| 2.8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดี ซี โกลว์ ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน ความดัน 1 ทอร์ | 15 |
| 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (p) และระยะทางระหว่างอิเล็กโตรด (d) | 16 |
| 2.10 การเกิดนอร์มอล โกลว์ ดิสชาร์จ ของหลอดแก๊สนีออนยาว 50 เซนติเมตร ที่ความดัน 1 ทอร์ | 18 |
| 2.11 ระบบสปีดเตอร์ริงแบบ ดี ซี ใดโอค | 19 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.12 ผลของความดันแก๊สในระบบสปัดเตอริงที่มีผลต่ออัตราการเคลือบ ค่ายีลด์ และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัดเตอริงของนิกเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร | 20 |
| 2.13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่างๆ | 21 |
| 2.14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป่าสารเคลือบ ในพลาสมาแมกนีตรอน สปัดเตอริง | 23 |
| 2.15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวทางเดินของอิเล็กตรอนบนผิวเป่าสารเคลือบ ที่คาโทด | 24 |
| 2.16 เปรียบเทียบลักษณะพลาสมาที่เกิดจากระบบบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัดเตอริง และอับบาลานซ์แมกนีตรอน สปัดเตอริง | 25 |
| 2.17 โครงสร้างอาโนดหรือที่วางชิ้นงาน ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ | 29 |
| 2.18 a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จของพลาสมาแมกนีตรอน คาโทดรูปสี่เหลี่ยม ที่ความดันแก๊สค่าต่างๆ b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ และความดันเมื่อกระแสคงที่ | 35 |
| 3.1 ไดอะแกรมของระบบเคลือบ | 38 |
| 4.1 ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบที่ใช้ในโครงการวิจัย | 42 |
| 4.2 ภาพระจุกของระบบเคลือบ | 44 |
| 4.3 ลักษณะของคาโทดและเป่าสารเคลือบของระบบเคลือบ | 45 |
| 4.4 ระบบนำหล่อเย็นของระบบเคลือบ | 47 |
| 4.5 ภาควัดจ่ายไฟฟ้าของระบบเคลือบ | 47 |
| 4.6 ชุดป้อนแก๊สของระบบเคลือบ | 48 |
| 4.7 การกระจายตัวของฟิล์มไททาเนียมบนกระจกขนาด 5"x5" | 49 |
| 4.8 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ | 50 |
| 4.9 อัตราการเคลือบของสารเคลือบชนิดต่างๆ | 51 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มอะลูมิเนียมที่ตำแหน่งและเวลาต่างกัน | 52 |
| 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มทองที่ตำแหน่งและเวลาต่างกัน | 52 |
| 4.12 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มไททานเนียมที่ตำแหน่งและเวลาต่างกัน | 53 |
| 4.13 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มทองแดงที่ตำแหน่งและเวลาต่างกัน | 53 |
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ | 55 |
| 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ทองเป็นเป้าสารเคลือบ | 55 |
| 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ไททานเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ | 56 |
| 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบ | 56 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการเคลือบผิววัสดุวิธีหนึ่งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่ให้ดีขึ้น เช่น ให้ความคงทน ทนทาน หรือสวยงามมากขึ้นรวมถึงเพื่อการใช้ประโยชน์ในงานอื่นๆ การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนผิวของวัสดุที่ต้องการ โดยเริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค แล้วจึงเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับเมื่อสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุรองรับก็เกิดการควบแน่นและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับในที่สุด

ทั้งนี้ฟิล์มบาง (thin film) หมายถึง ชั้นของอะตอม หรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ การระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” อาจพิจารณาจากลักษณะการใช้งานที่ใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือถ้าเป็นการใช้ สมบัติเชิงผิว (surface properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้ สมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มหนา” ทั้งนี้จะเห็นว่าฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็น “ฟิล์มบาง” หรือ “ฟิล์มหนา” ก็ได้ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ

การเคลือบผิววัสดุนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการต่างๆ หลายวิธี สำหรับอุตสาหกรรมการเคลือบในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่จะใช้การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แต่วิธีนี้จะใช้สารละลายเคมีในกระบวนการมากซึ่งสุดท้ายมักจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม 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 ซึ่งอาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วพุ่งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร และ วิธีสปัตเตอร์ริง เป็นต้น

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี PVD นั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น

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

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ (sputtering) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ต้องอาศัยกระบวนการทางฟิสิกส์ซึ่งให้ความคงทนในการยึดเกาะของฟิล์มสูงกว่าวิธีระเหยสาร กระบวนการเคลือบนี้เกิดขึ้นภายใต้บรรยากาศความดันต่ำขนาดระหว่าง 10^{-3} - 10^{-1} ทอรร และอาศัยการคิสร่างไฟฟ้าของแก๊ส ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนจะถูกเร่งเข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบ ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500-10,000 โวลต์ สารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊สจะหลุดออกและวิ่งด้วยความเร็วสูงลงเคลือบลงวัสดุรองรับในทุกทิศทาง พลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมาจากกระบวนการสปัตเตอร์นี้สูงกว่าอนุภาคที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารมากดังนั้นเมื่อตกกระทบลงบนวัสดุรองรับจะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อวัสดุรองรับ และทำให้การยึดเกาะของฟิล์มดีมาก วัสดุที่เป็นสารเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์อาจเป็นโลหะหรือโลหะ และสารที่ต้องการถูกเคลือบอาจเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีที่วัสดุรองรับต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์มีข้อดีอย่าง เช่น สามารถเคลือบสารที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้ ในขณะที่การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารจำเป็นต้องหลอมสารเคลือบให้เป็นของเหลวเสียก่อน และถ้าสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวสูงมากก็จะไม่สามารถทำการเคลือบได้ด้วยวิธีระเหยสาร นอกจากนี้การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ยังสามารถทำได้ในสภาวะที่มีความดันสูงกว่าวิธีการระเหยสาร

สำหรับในวงการอุตสาหกรรมนั้นได้มีการนำเอาวิธีการเคลือบแบบสปัตเตอร์ไปใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องมือและวัสดุต่างๆ เช่น เลนส์ กระจกสะท้อนแสงและกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ กระจกเลเซอร์ สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ใช้วิธีการเคลือบแบบสปัตเตอร์ในการเคลือบแข็ง เช่น การเคลือบไททานเนียมไนไตรด์ สำหรับในแง่ของการวิจัย นักวิจัยสามารถใช้วิธีการเคลือบแบบสปัตเตอร์ในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบได้ทำให้สามารถศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างในรูปของฟิล์มบางได้ซึ่ง

สมบัติบางประการดังกล่าวไม่สามารถวัดได้เมื่อวัตถุอยู่ในสภาพเป็นก้อนสมบัติทางฟิสิกส์ดังกล่าวเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม

จากรายละเอียดข้างต้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาวิจัยการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง โดยเริ่มจากการศึกษาหลักและการสร้างระบบเคลือบแบบสปีดเทอริงซึ่งได้ดำเนินการแล้วเสร็จในปี พ.ศ.2541 จากการศึกษาในครั้งนั้นทำให้คณะผู้วิจัยทราบถึงเทคนิคและฟิสิกส์ของระบบเคลือบฟิล์มบางชนิดนี้อย่างละเอียด และในโครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อเนื่องมาคือจะเป็นการศึกษาถึงเทคนิคและวิธีการเคลือบสารต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่การวิจัยด้านวัสดุ อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาบุคลากรอันได้แก่คณะผู้วิจัยซึ่งจะได้นำความรู้และประสบการณ์ที่ได้นี้ถ่ายทอดแก่นิสิตและผู้สนใจต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการสปีดเทอริงสำหรับสารเคลือบชนิดต่างๆ
2. เพื่อพัฒนาบุคลากรทางด้านฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ซึ่งเป็นโครงการต่อเนื่องจากปีงบประมาณพ.ศ.2540 จะเป็นการปรับปรุงและพัฒนา ระบบเคลือบที่ได้สร้างขึ้นเรียบร้อยแล้วเพื่อให้สามารถทำงานเคลือบได้ดียิ่งขึ้น โดยมุ่งเน้นการออกแบบในส่วนของคาโทดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยในโครงการนี้จะปรับปรุงระบบเคลือบจากเดิมเป็นระบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเทอริง เป็นระบบ ดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเทอริง รวมถึงศึกษาการเคลือบฟิล์มของสารเคลือบ 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ อะลูมิเนียม ทอง ไททานเนียม และทองแดง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องมือหลักที่ใช้ในการวิจัยฟิสิกส์ของวัสดุที่เป็นฟิล์มบาง
2. ได้เครื่องมือหลักที่ใช้ในการสอนวิชาด้านเทคโนโลยีสุญญากาศ
3. บุคลากรในหน่วยงานมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยคือศึกษาหลักการทํางานและเทคนิคในการออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง ในส่วนของเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งเป็น (1) เทคโนโลยีฟิล์มบาง (2) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปีดเทอริง (3) กระบวนการแก๊สดีสซาร์จ (4) ระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเทอริง (5) อุปกรณ์ในระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเทอริง และ (6) ลักษณะจำเพาะตัวของระบบสปีดเทอริง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2 เทคโนโลยีฟิล์มบาง

ฟิล์มบาง (thin film) หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่มาจับรวมกันเป็นชั้นบางๆ โดยขนาดความหนาของฟิล์มที่จะระบุว่าเป็นฟิล์มบางนั้นเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากอย่างไรก็ดีปัจจุบันได้มีวิธีระบุว่าฟิล์มมีความหนาเท่าใดจึงเรียกว่าฟิล์มบางโดยพิจารณาจากลักษณะการใช้งานฟิล์มนั้นว่าใช้งานด้วยสมบัติด้านใด กล่าวคือถ้าเป็นการใช้ สมบัติเชิงผิว (surface properties) ของฟิล์มนั้น เช่น electron emission, catalytic activity ก็จะเรียกฟิล์มนั้นว่า "ฟิล์มบาง (thin film)" แต่ถ้าใช้ฟิล์มนั้นด้วยสมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) ก็จะเรียกว่า "ฟิล์มหนา (thick film)" ซึ่งจะพบว่าฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็น "ฟิล์มบาง" หรือ "ฟิล์มหนา" ก็ได้ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ^[1]

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ.1852 ซึ่งแนวคิดพื้นฐานของขั้นตอนการเคลือบฟิล์มคือ ฟิล์มบางนั้นเป็นการเรียงตัว (fabricated) โดยการตกเคลือบ (deposition) ของสารเคลือบจากเป้าสารเคลือบ (target) ในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (substrate) โดยฟิล์มที่ได้จะบางมาก ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในด้านต่างๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน หรือ อุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบสำหรับใช้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างๆ ในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางประการไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม^[2]

2.2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (thin film deposition process)¹³

การเคลือบฟิล์มบาง (thin film deposition) เป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบ ตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการซึ่งสามารถทำได้ทั้งจากกระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางฟิสิกส์ ทั้งนี้โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน กล่าวคือ เริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค จากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ ซึ่งสุดท้ายสารเคลือบจะมีการควบแน่นและเกิดกระบวนการพอกพูน และโตของชั้นฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ

หากพิจารณาในรายละเอียดจะพบว่าสารเคลือบอาจอยู่ในของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊ส ก็ได้โดยที่สารเคลือบนี้จะต้องทำให้อยู่ในรูปของไอระเหย ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง บางครั้งสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของแก๊สหรือของเหลว ต่อมาเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบ (transport) โดยอาจเกิดขึ้นในสุญญากาศ ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรงไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหลซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นในภาชนะสุญญากาศบ้าง นอกจากนี้ยังอาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะของพลาสมาเนื่องจากพลาสมานั้นจะมีอนุภาคที่มีพลังงานสูงอยู่มาก ซึ่งที่สำคัญในการพิจารณาถึงการเคลื่อนย้ายสารเคลือบคือต้องให้ไอระเหยของสารเคลือบมีความสม่ำเสมอเพื่อที่จะทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอ สุดท้ายเป็นกระบวนการพอกพูนซึ่งจะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับ หรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานในการเคลือบ

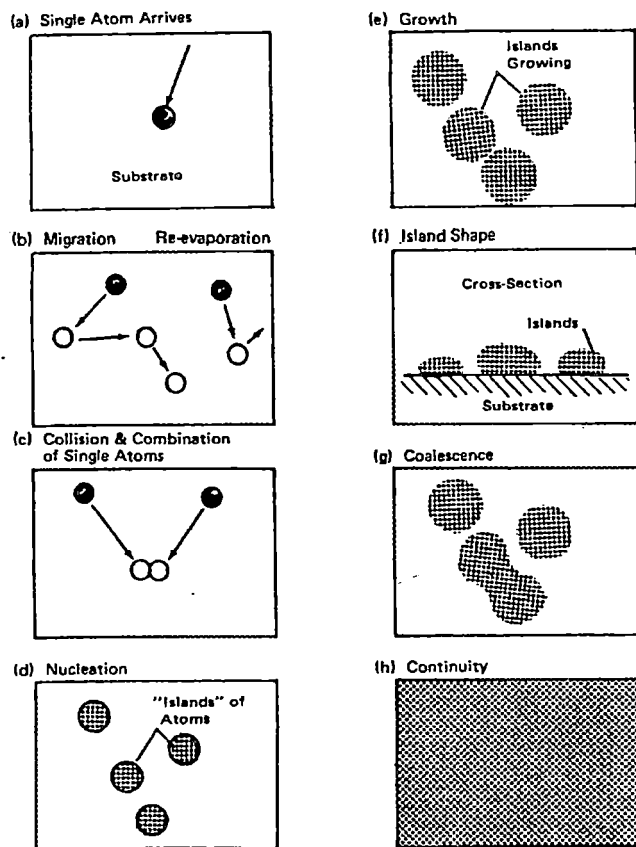
2.2.2 การเกิดฟิล์มบาง (thin film formation)¹⁴

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ สารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (รูปที่ 2.1a) โดยพลังงานพันธะ (bonding energy) ระหว่างอะตอมสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิ (substrate temperature) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (adsorption site) และเกิดการเกาะติด หรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (รูปที่ 2.1b) ในเวลาชั่วครู่อะตอมสารเคลือบอาจเกิดทั้งการระเหยกลับและการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่

เมื่ออะตอมรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (รูปที่ 2.1c) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ (deposition rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอม (triplets) หรือสี่อะตอม (quadruplets) หรืออื่นๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า สภาวะการเกิดนิวเคลียส (รูปที่ 2.1d) ทำ

ให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (quasi-stable islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (island growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 2.1e และ 2.1f) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งแต่ละกลุ่มชนกัน เรียกว่า การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (agglomeration หรือ coalescence) (รูปที่ 2.1g)

จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (liquid-like behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (crystallographic orientation) ด้วย การรวมกันเข้าเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งฟิล์มเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2.1h) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 400-500 อังสตรอม ลักษณะผิวโดยทั่วไปของฟิล์มขณะที่เกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินและหุบเขา



รูปที่ 2.1 การเกิดฟิล์มบาง^[4]

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสถานะที่เป็นกลุ่มอะตอม (island) พบว่า แต่ละกลุ่มอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรืออาจประกอบด้วยผลึกจำนวน 2-3 ผลึก ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านี้เคลื่อนบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหลายผลึกทิศทางการจัดเรียงตัวของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะนำไปโดยอิสระทำให้ได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านั้นตกเคลื่อนบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยวการจัดเรียงตัวของฟิล์มจะเป็นไปตามโครงสร้างของวัสดุรองรับ ดังนั้นเราจะได้ฟิล์มที่เป็นผลึกเดี่ยว ซึ่งเรียกการเกิดฟิล์มแบบผลึกเดี่ยวนี้ว่า epitaxy

ถ้าอะตอมที่ผิวมีพลังงานมันสามารถเคลื่อนที่เพื่อเลือกที่จะเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ และความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุรองรับสูงขึ้น การลดอัตราการเคลื่อนที่สามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้นเพราะอะตอมมีเวลาในการโตนานพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราการเคลื่อนต่ำจะได้ฟิล์มที่มีเกรนขนาดใหญ่ มีข้อบกพร่องในเกรนน้อยและได้ฟิล์มที่หนามากพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราการเคลื่อนสูงก็จะให้ผลเช่นเดียวกัน

2.3 การเคลื่อนฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปีดเตอริง

2.3.1 กระบวนการเกิดการสปีดเตอริง¹⁹

กระบวนการสปีดเตอริง เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ ทั้งนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ กระบวนการสปีดเตอริงจำเป็นต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

1. เป้าสารเคลื่อน สำหรับเป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนเกิดกระบวนการสปีดเตอริงและมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลื่อนออกมา

2. อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลื่อน แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลื่อนหลุดออกมานั้น ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่างๆ ก็ได้ ทั้งนี้วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการสร้างทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงมากเพื่อใช้ในกระบวนการสปีดเตอริงนั้นคือ การเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่ผลิตได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลื่อนมากทำให้ การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลื่อนเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปีดเตอริงเกิดขึ้นได้ ทั้งนี้การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึง

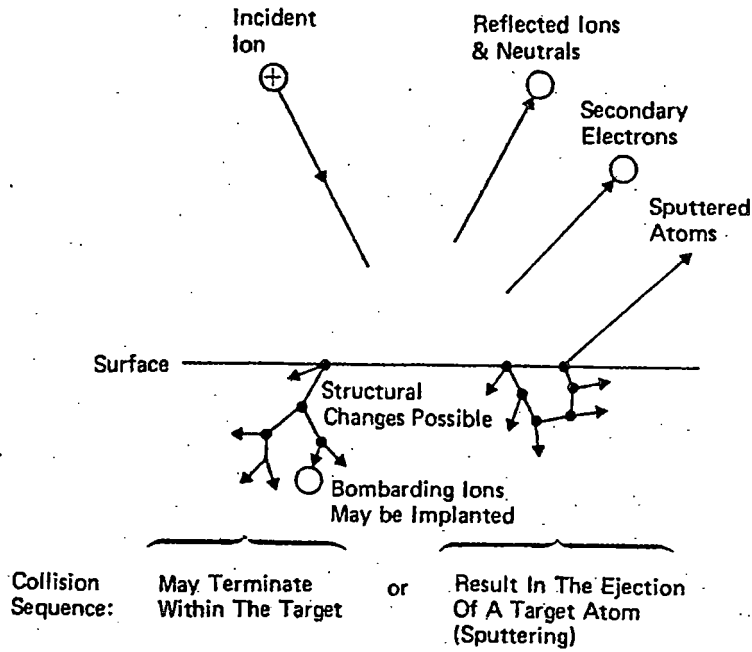
เลือกแรงไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบฟิล์มบางเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มตามต้องการ ซึ่งทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) หรือผลิตจากกระบวนการโคโลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) แต่ถึงแม้ว่าการใช้ปืนไอออนจะสามารถผลิตไอออนในอัตราสูง แต่ปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ ดังนั้นกระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโคโลว์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูงมากกว่า

2.3.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวหน้าวัสดุ^{[9][10]}

เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าของวัสดุใดๆ (ต่อไปนี้จะเรียกว่าเป้า) ก็จะเกิดปรากฏการณ์อย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้คือ

1. การสะท้อนที่ผิวหน้าเป้าของไอออน ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าเป้า ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของเป้า
2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าเมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ
3. การฝังตัวของไอออน (ion implantation) ไอออนอาจฝังตัวลงในเป้าโดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานของไอออน
4. การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวหน้าเป้าทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวของเป้าใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect) และเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า altered surface layers
5. การสปัตเตอริง (sputter) การชนของไอออนที่ผิวหน้าของเป้าอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้า แล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้า ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการสปัตเตอริง (sputtering)



รูปที่ 2.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวหน้าวัสดุ^[4]

2.3.3 ค่าyield ของสปัตเตอริง (sputtering yield : S)^[5]

yield ของกระบวนการสปัตเตอริง มีค่าเท่ากับ "ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอม เป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค" มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน โดยค่า yield ของสปัตเตอริงจะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะต่างๆ ในกระบวนการสปัตเตอริงดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงตามค่าพลังงานของไอออน ทั้งนี้ในการชนตรงระหว่าง 2 อนุภาค การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคจะเป็นไปตามสมการ (2.1)

$$\Delta E = \frac{4mM}{(m + M)^2} \dots\dots (2.1)$$

เมื่อ ΔE เป็นพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างอนุภาค

m เป็นมวลอะตอมที่ถูกชน

M เป็นมวลของอะตอมที่วิ่งเข้าชน

ทั้งนี้เมื่อพลังงานของไอออนมีค่าต่ำมาก ค่ายึดจากกระบวนการสปีดเตอริงจะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป่าสารเคลือบได้ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นเกินกว่า 4 H (H คือค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอม ออกจากผิวสารเคลือบ) พลังงานของไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (threshold energies) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไประหว่างคู่การชนของอนุภาค (ตารางที่ 2.1)

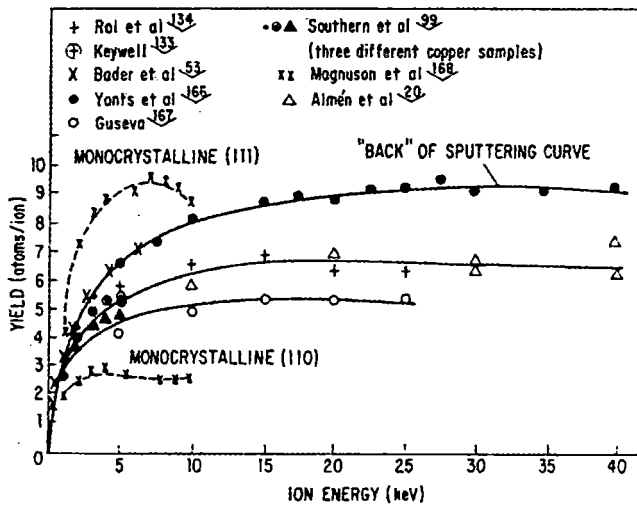
ตารางที่ 2.1 พลังงานขีดเริ่มของเป่าสารเคลือบชนิดต่างๆ^[7]

| | 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 | | | | | | | |

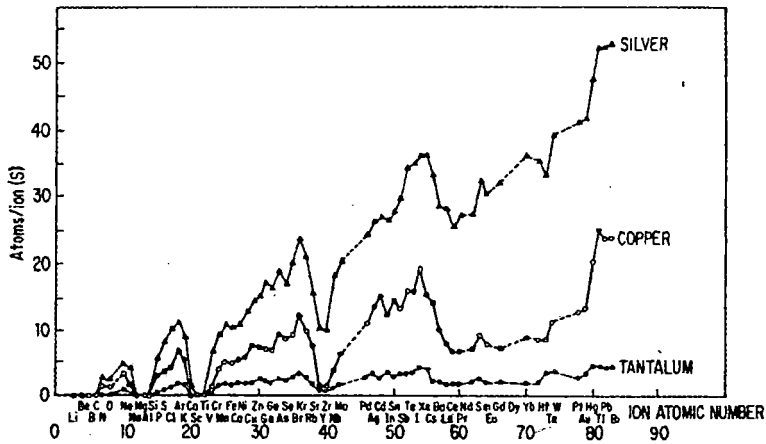
Boldface values are those for which the energy-transfer factor $4m_1m_2/(m_1+m_2)^2$ is 0.9 or higher

เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นยึดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (saturation) ของค่ายึด เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสในการฝังตัวบนผิวเป่าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้ยึดของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานของไอออนให้สูงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3

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



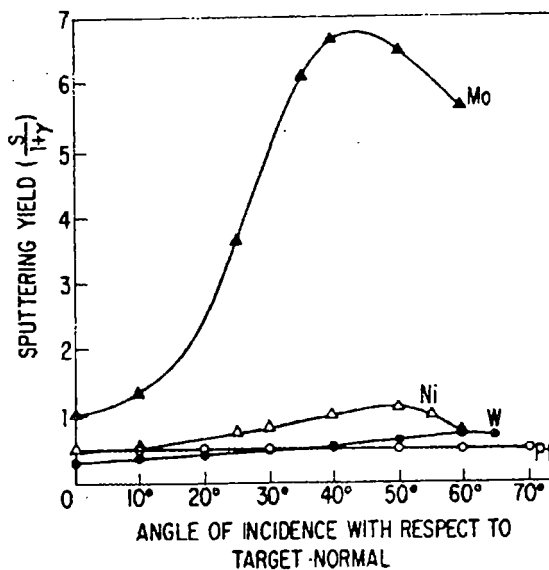
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงyield ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่างๆ^[7]



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงค่าyield ของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมต่างๆ^[7]

3. เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบ ค่ายึดจากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกัน เมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไป แม้สมการ (2.1) จะแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกัน จะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากันแต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิภาพสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยว ดังนั้นจึงพบว่ายึดค้มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้ารูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ายึดค้ที่พบว่ามีค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากแก๊สเฉื่อย คือแก๊ส Ne , Ar , Kr , และ Xe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุด สาเหตุของการเกิดจุดสูงสุดของค่ายึดค้เป็นช่วง ๆ นี้ยังไม่มีคำอธิบายที่กระจ่าง

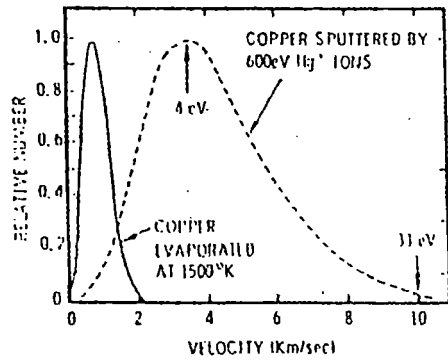
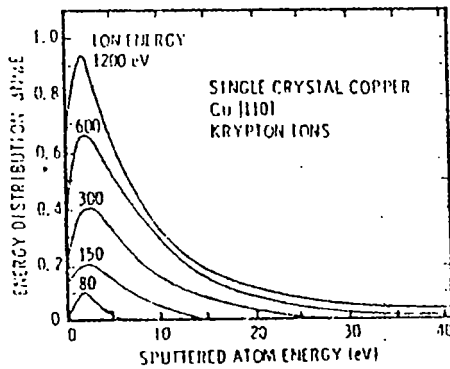
4. เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้า จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้ามามากขึ้น ยึดค้จะมีค่าสูงขึ้นตามมุมที่เอียงเนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงแบบ back scattering เป็น forward scattering ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่า ทำให้ยึดค้สูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้นยึดค้จะมีค่าลดลงเมื่อมุมเอียงสูงขึ้น และเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของยึดค้สปัตเตอร์ริงเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป่านิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่างๆ เมื่อวัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า^[7]

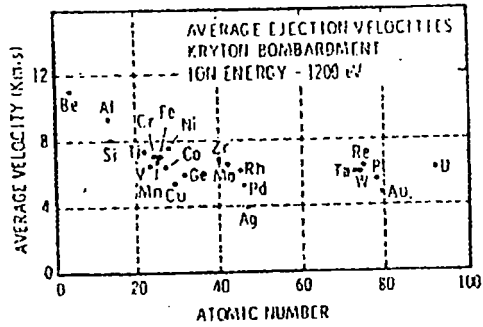
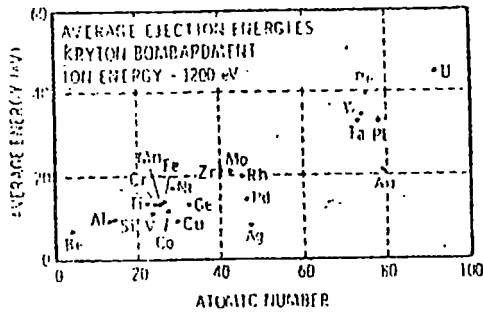
2.3.4 ความเร็วและพลังงานของสปัตเตอร์อะตอม ^[5]

อะตอมที่หลุดออกจากผิวหน้าสารเคลือบด้วยวิธีการสปัตเตอร์มีค่าพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารประมาณ 50-100 เท่า อะตอมมีการกระจายค่าพลังงานแบบ Maxwellian โดยที่พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีค่าพลังงานระหว่าง 10-40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีค่าพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปัตเตอร์จึงมีค่าสูงขึ้น จนเมื่อไอออนที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปัตเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นและเป้าที่มีค่ายึดค้สูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมา มีค่าต่ำ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมาก อะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง (รูปที่ 2.6 และ รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.6 ก) การกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสปัตเตอร์จาก ไอออนของแก๊ส Kr ที่พลังงานต่างๆ

ข) เปรียบเทียบการกระจายค่าความเร็วของอะตอมทองแดงที่ได้จากการระเหยสาร และจากการสปัตเตอร์ ^[8]



- รูปที่ 2.7 ก) พลังงานเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออนของไอออนของ Kr พลังงาน 1200 eV ที่ค่าพลังงานต่างๆ
- ข) ความเร็วเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออน Kr พลังงาน 1200 eV [8]

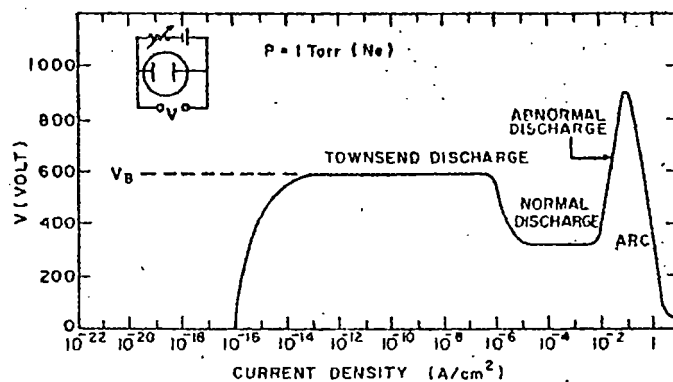
2.4 กระบวนการแก๊สดีสชาร์จ (gas discharge process) [4][5][6][7]

เมื่อป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ d ภายใต้ความดันประมาณ 1 ทอร์ของแก๊สไนออน พบว่าขณะแรกที่เพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรมีน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสนี้มีค่าค่อนข้างคงที่เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นกับความเข้มของรังสีเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ใกล้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทะลาย (breakdown voltage, V_B) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกรังภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น

ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทดจนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง กระบวนการช่วงนี้เรียกว่า ทาวนด์เซนดีสชาร์จ (Townsend discharge) เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงศักย์ไฟฟ้าทะลายจะเกิดกระบวนการอะวาลันช์ (avalanche) ทำให้ไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดสูงขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมามากขึ้นด้วย ซึ่งอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้จะถูกรังให้วิ่งเข้าหาแอนโนดซึ่งขณะที่วิ่งเข้าหาแอนโนดนั้นอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้จะมีการชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการผลิตไอออนออกมามากขึ้น และไอออนบวกที่เพิ่มมากขึ้นนี้ก็จะวิ่งเข้าชนคาโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้นตามมาก ซึ่งจะชนโมเลกุลแก๊สและผลิตไอออนเพิ่มขึ้นนี้ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดีสชาร์จได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก ในการผลิตไอออน ช่วงนี้แก๊สภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็ก

โตรคลดค่าลงและกระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกจุดนี้ว่าการเรืองแสงปกติหรือออร์มอลโกลว์ (normal glow) โดยสถานะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองต่ออัตราการชนของไอออนมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับวัสดุทำเป้าคาโทดทั่วไปคือประมาณ 0.1 โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสง (glow) การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนตำแหน่งไปมาได้ การชนของไอออนบนคาโทดไม่สม่ำเสมอ โดยมักจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (self-sustaining) ไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแนวการชนของไอออนจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่

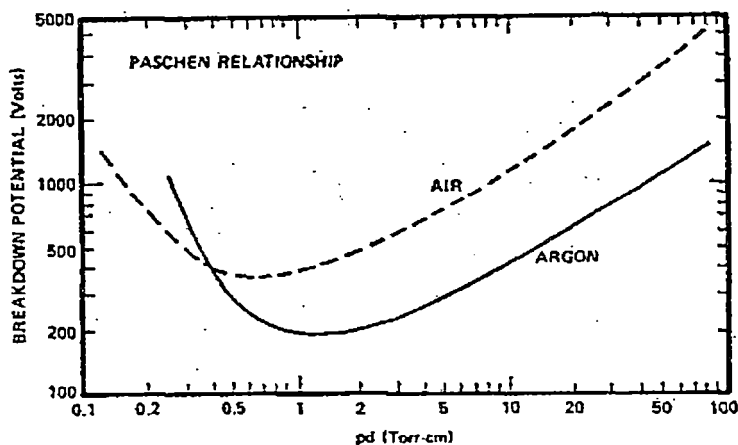
หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่าช่วงการเรืองแสงผิดปกติ การเปล่งแสงจ้าขึ้นหรือแอบนอร์มอลโกลว์ (abnormal glow) ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเตอรังและอีกหลายๆ ระบบของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโกลว์ดีสชาร์จ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



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ ดีสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออนความดัน 1 ทอร์รี่^[6]

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายในกระบวนการโกลว์ดิสซาร์จมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างอิเล็กโทรด และระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนชุดที่สองและโมเลกุลของแก๊ส (ระยะทางปลอดการชนของอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้แปรผกผันกับความดันแก๊สและมีค่ามากกว่าระยะทางปลอดการชนของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลแก๊ส) โดยปกติอิเล็กตรอนชุดที่สองแต่ละตัวควรมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการอะวาลานซ์ในช่วงของนอร์มอลโกลว์ ถ้าความดันแก๊สต่ำเกินไป (ระยะปลอดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับไอออน ถ้าความดันแก๊สสูงเกินไป (ระยะปลอดการชนสั้นลง) หรือระยะทาง d มากเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอในการไอออไนซ์แก๊สเมื่อเกิดการชน พลังงานจะถูกถ่ายเทให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้น (excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายที่มีค่าค่อนข้างสูงโดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายต่ำที่สุดตามกฎของปาส์เชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (p) และระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด (d) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

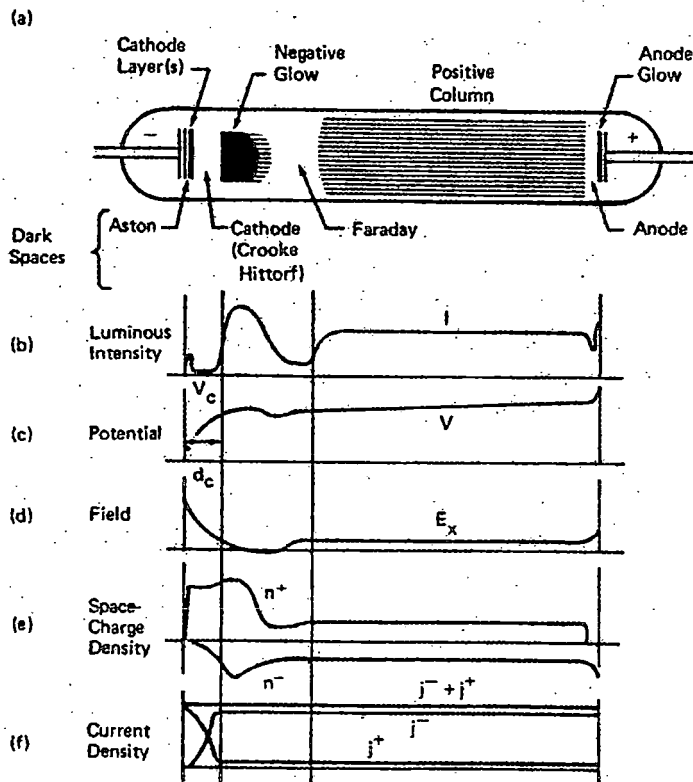
ในระบบสปีดเตอร์ริงทั่วไปการเกิดโกลว์ดิสซาร์จ จะอยู่ในช่วงที่ผลคูณของความดันแก๊สกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (pxd) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก จึงต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันแก๊สชั่วคราวเพื่อให้เริ่มการดิสซาร์จได้ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำลง



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (p) และระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด (d)^[8]

สำหรับส่วนต่างๆ ของกระบวนการโกล์วดิสซาร์จ สามารถแสดงดังได้รูปที่ 2.10 ซึ่งแต่ละส่วนสามารถอธิบายได้ดังนี้ ช่วงแรก คือช่วงมืดแอสตัน (Aston dark space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากคาโทด ด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สได้ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดขึ้น ถัดออกมาจากผิวคาโทดเป็นบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมาก เรียกว่า คาโทดโกล์ว (cathode glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิสซาร์จและไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดมีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทด ด้วยกระบวนการต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของสารที่ทำคาโทดและของแก๊สที่ใช้ในระบบสปัตเตอร์ เช่น เมื่อคาโทดเป็นทองแดงจะให้สีเขียว ทองคำให้สีส้มแดง แก๊สอาร์กอนให้สีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนให้สีม่วงแดงเป็นต้น

ถัดจากคาโทดโกล์ว เรียกว่าช่วงมืดครุค หรือช่วงมืดคาโทด (crook or cathode dark space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะทางเฉลี่ยตลอดการชนออกมา ทำให้บริเวณปราศจากการชนนั้นไม่มีกระบวนการไอออไนซ์ชั้นเกิดขึ้น การปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดขึ้นในช่วงนี้และกลายเป็นบริเวณมืด เมื่อเลยระยะตลอดการชนออกไปอิเล็กตรอนชุดที่สองจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สและไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้ระยะตลอดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (positive space charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากและมากเกินไปในการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สในเวลาถัดมาทำให้ภายหลังการเกิดนอร์มอลโกล์ว ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟในรูปที่ 2.8 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยออกไปจากบริเวณผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีค่าพลังงานลดลงมาก ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้น แม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยลงมาก รวมทั้งประจุบวกจากประจุสะสมของไอออนด้านซ้ายมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและมีการสะสมประจุบบริเวณนี้จึงเรียกรวมกันว่า เนกาทีฟ โกลว์ (negative glow) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงมากจนไม่สามารถแม้แต่จะกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงขึ้นได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday dark space) ถัดจากช่วงนี้ กระบวนการที่เกิดขึ้นค่อนข้างคล้ายกับการดิสซาร์จของทาวน์เซนด์ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอโนด และมีพลังงานสูงพอในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สหรือไอออไนซ์แก๊สได้และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอโนดโดยเร็ว ทำให้สภาวะพลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่าจึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (positive glow column)



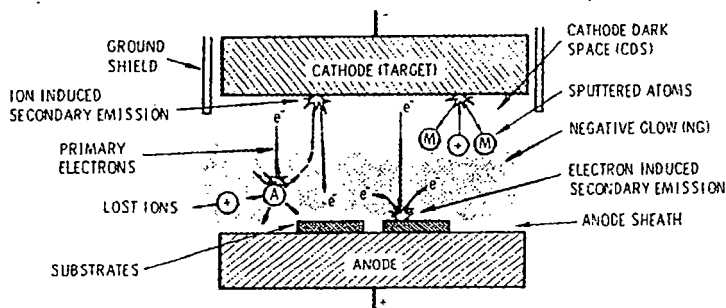
รูปที่ 2.10 การเกิดนอร์มอลโกลว์ดิซชาร์จ์ ของหลอดแก๊สนีออนยาว 50 เซนติเมตร ที่ความดัน 1 ทอร์รี่^[4]

เนื่องจากการรักษาภาวะโกลว์ดิซชาร์จ์ขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณแคโทดโกลว์ จึงพบว่า การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคาโนดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการโกลว์ดิซชาร์จ์ เมื่อเลื่อนคาโนดเข้าหาคาโทดจนพ้นช่วงมีดฟาราเดย์และเข้าสู่แคโทดโกลว์ จนเข้าสู่ช่วงคาโทดคาร์ค สเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนชุดที่สองมีปริมาณน้อยลง ในการรักษาภาวะโกลว์ดิซชาร์จ์ไว้จำเป็นต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเร่งไอออนเข้าชนคาโทดด้วยพลังงานสูงและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองปริมาณสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การโกลว์ลักษณะนี้เรียกว่า obstructed glow เมื่อเลื่อนคาโนดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจากพื้นขอบของคาโทด คาร์ค สเปซ ซึ่งมีระยะทางสั้นกว่าระยะทางตลอดการชนของอิเล็กตรอนจะไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการโกลว์ดิซชาร์จ์สิ้นสุด แม้จะเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่าใดก็ตามจะไม่สามารถคงสภาพโกลว์ดิซชาร์จ์ไว้ได้ ถ้าบริเวณคาโทดมีสิ่งสกปรกอาจทำให้เกิดการอาร์คได้โดยที่ไม่มีโกลว์ดิซชาร์จ์

2.5 ระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง ^[5]

2.5.1 ระบบ ดี ซี สปัตเตอริง

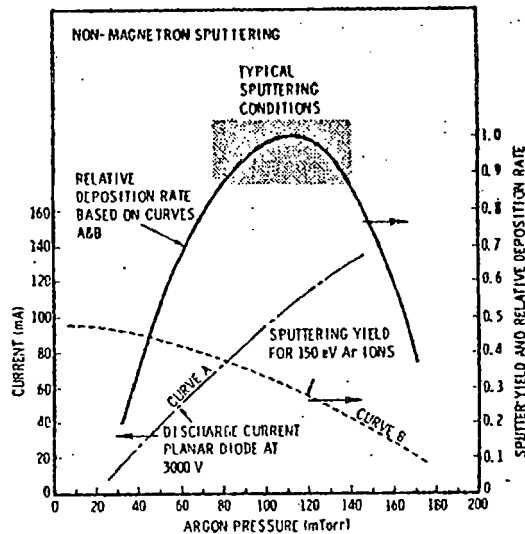
ระบบสปัตเตอริงที่ง่ายที่สุด คือ ระบบ ดี ซี สปัตเตอริง (รูปที่ 2.11) ระบบนี้จะประกอบด้วย คาโทดคือแผ่นเป้าสารเคลือบและแอโนดใช้เป็นที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ โดยปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4-10 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกสู่ด้านข้างหรือผนังของภาชนะสุญญากาศมีค่าต่ำ โดยทั่วไประยะคาร์คสเปซมีค่าระหว่าง 1-4 เซนติเมตร โดยตำแหน่งแอโนดจะอยู่บริเวณการเกิดเนกาทีฟโกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอมบอร์มอลโกลว์ดิซซาร์จ แก๊สที่ใช้จะเป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ค่ายึดสูงและต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ในขณะที่เกิดกระบวนการโกลว์ดิซซาร์จที่ความดันแก๊สค่าหนึ่ง กระบวนการไอออนไนเซชันจะรักษาสภาพโกลว์ดิซซาร์จไว้ตราบใดที่ระยะคาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและแอโนดเมื่อความดันแก๊สลดลงหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าสูงขึ้นระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้นทำให้ระยะคาร์คสเปซขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อย กระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงมีปริมาณลดลงตามปริมาณไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันแก๊สต่ำกว่า 10^{-2} ทอร์รี่ ระยะคาร์คสเปซ ยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด กระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปัตเตอริง



รูปที่ 2.11 ระบบสปัตเตอริงแบบ ดี ซี ไดโอด ^[8]

ขณะความดันแก๊สสูงขึ้นระยะคาร์คสเปซจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงขึ้นตามความดันแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลดการชน

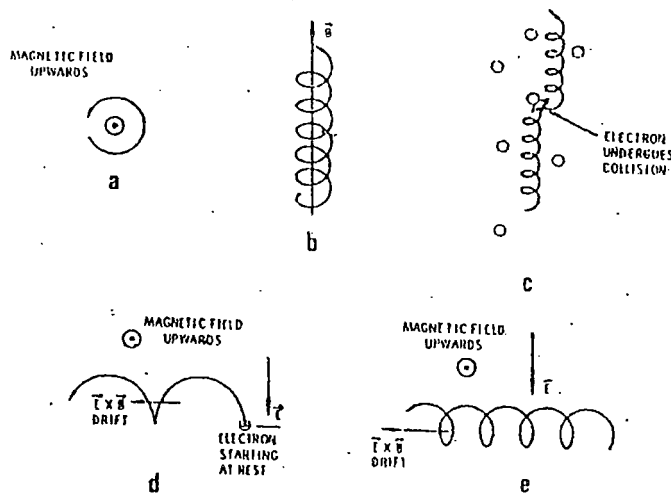
ระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลงอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านลงเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยาก จากการชนกับโมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบ หรือสูญเสียสู่ผนังสุญญากาศทำให้ค่าของyieldจากการสปีดเตอร์มีค่าลดลง เมื่อความดันสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เห็นกราฟ B ผลรวมระหว่างyieldและกระแสไอออนทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่ง และพบว่าในการสปีดเตอร์นิกเกิล เมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้า 3000 โวลต์ ระหว่างอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตรในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดลงที่ความดันต่ำกว่า 20 มิลลิทอร์ร์และที่ความดันสูงกว่า 120 มิลลิทอร์ร์ อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุด และลดลงเมื่อความดันแก๊สสูงเกินกว่าค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปีดเตอร์จึง คือบริเวณที่ให้อัตราการเคลือบสูงและมีประสิทธิภาพดีที่สุด จากรูป 2.12 ความดันที่เหมาะสมในการเคลือบคือ 75 มิลลิทอร์ร์ โดยมีความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ด้วยอัตราการเคลือบฟิล์มบาง 360 อังสตรอม/นาที่ ซึ่งเป็นอัตราการเคลือบที่ค่อนข้างต่ำมากในขณะที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่อนข้างสูงในระบบสปีดเตอร์ทั่วไปจะต่ออาโนดลงกราวด์ร่วมกับภาชนะสุญญากาศและปล่อยคาโทด ให้มีศักย์ไฟฟ้าลบโดยกันด้วยฉนวนระหว่างคาโทดกับผิวโลหะของภาชนะสุญญากาศ กราวด์ชิลด์ (ground shield) ในรูปที่ 2.11 เป็นผนังโลหะหุ้มรอบๆ ขอบของคาโทด โดยจัดระยะทางระหว่างคาโทดและกราวด์ชิลด์ให้สั้นกว่าระยะคาร์คสเปซ ดังนั้นแม้ว่าศักย์ไฟฟ้าของ กราวด์ชิลด์จะมีค่าเท่ากับอาโนด กระบวนการไอออไนเซชันและสปีดเตอร์จึงไม่สามารถเกิดขึ้นกับคาโทดในบริเวณที่มีกราวด์ชิลด์ห่อหุ้มอยู่ ทำให้สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการสปีดเตอร์ได้



รูปที่ 2.12 ผลของความดันแก๊สในระบบสปีดเตอร์ซึ่งมีผลต่ออัตราการเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบสปีดเตอร์ของนิกเกิลที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร [6]

2.5.2 ระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง

เนื่องจากอัตราการเกิดสปีดเตอริงขึ้นกับผลคูณระหว่างขีลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการเกิดสปีดเตอริงนอกจากทำได้โดยการเพิ่มค่าขีลด์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ในระบบ ดี ซี สปีดเตอริงสามารถทำได้เพียงการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดและความดัน ซึ่งมีข้อจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตรและความดันประมาณ 100 มิลลิทอรร์ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบดีซี สปีดเตอริง อะตอมแก๊สน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ที่เกิดการไอออไนซ์และความดันแก๊สที่สูงมีผลทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มเคลือบมีค่าสูง



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ โดยที่

a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่างๆ^[8]

อย่างไรก็ดีการเพิ่มอัตราการสปีดเตอริงของระบบ ดีซี สปีดเตอริง ปกตินั้นสามารถทำได้โดยการใช้แม่เหล็กช่วย ซึ่งจะทำได้ระบบใหม่อีกระบบหนึ่งคือ ระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง (magnetron sputtering) ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กในการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากคาโทดสู่อโนดเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดไอออไนซ์เซชัน จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม รูปที่ (2.13a) ด้วยรัศมี

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

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 (2.13b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส ในรูปที่ (2.13c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกันอำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า drift motion มีค่าเท่ากับ

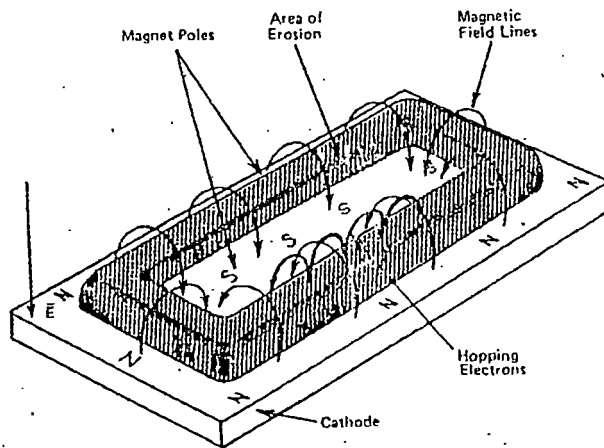
$$V_E = \frac{10^8 E}{B} \quad \text{..... (2.5)}$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าหน่วยเป็น โวลต์/เซนติเมตร

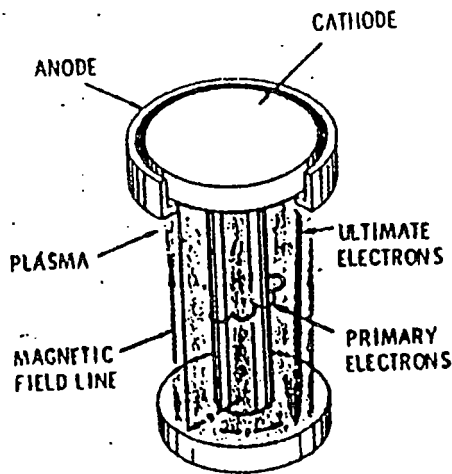
B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วยเกาส์

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณคาร์คสเปซมีค่าประมาณ 1,000 โวลต์/เซนติเมตรและสนามแม่เหล็ก 100 เกาส์ ให้ค่า drift velocity เท่ากับ 10,000 กิโลเมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง กรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูป cycloid ดังรูปที่ 2.13d ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบ drift motion จะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังรูปที่ 2.13e พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้เด่นชัดมาก แม้จะใช้สนามแม่เหล็กค่าน้อยระหว่าง 50-500 เกาส์ แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางการเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า Longitudinal field จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโคล์ดสพาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า transverse field โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที่ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาอิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับรูปที่ 2.13d ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทด และ drift ตามแนวผิวหน้าของคาโทด (รูปที่ 2.14) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้น เป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวคาโทด ทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลอดการชนในไดโอดสปัตเตอริงที่ความดันที่ใช้งานมากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์คสเปซในไดโอดสปัตเตอริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงลดลง ทั่วไปจะมีค่าประมาณ 300-800 โวลต์ ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกเรียกว่าระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทรงกระบอก (cylindrical magnetron sputtering) และเรียกว่าพลาเนียร์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (planar magnetron sputtering) ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบไดโอดสปัตเตอริงที่ใช้เป้าแผ่นราบ



รูปที่ 2.14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักคร่อนของเป้าสารเคลือบ
ในพลาเนียร์แมกนีตรอน สปัตเตอริง^[4]



รูปที่ 2.15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวทางเดินของอิเล็กตรอนบนผิวเป้าสารเคลือบที่คาโทด^[8]

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริงและพลาสมาที่เกิดขึ้นมากบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอริงของระบบนี้มีค่าสูงขณะที่ความดันมีค่าต่ำ ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอริงแมกนีตรอน สปีดเตอริงแบบทรงกระบอก โดยทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอริงสูงกว่า 10,000 อังสตรอม/นาที่ และมีอัตราการเคลือบสูงกว่า 2,000 อังสตรอม/นาที่ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ 20 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร หรือสูงกว่าความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง 300-800 โวลต์ ที่ความดันประมาณ 4 มิลลิทอร์รซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปีดเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่ายและเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไดร ไอคอสปีดเตอริง ระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง 10^{-5} ทอร์ร ข้อเสียของระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริงคือความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเพื่อควบคุมคุณภาพฟิล์มเคลือบแต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบแมกนีตรอนสามารถควบคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็กจึงมีอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งเข้าสู่แผ่นรองรับปริมาณน้อยจึงลดปัญหาความร้อนบนวัสดุรองรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลงได้อย่างมาก

2.5.3 ระบบอับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง^{[9][10]}

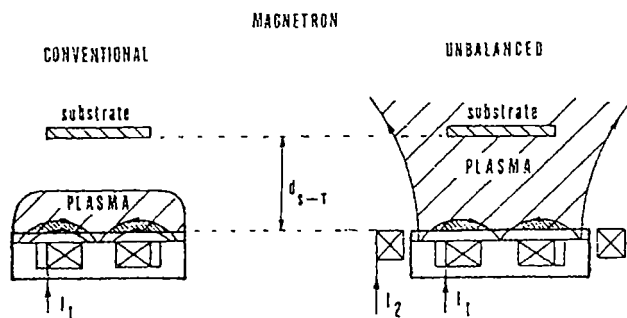
ระบบอับบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (unbalanced magnetron sputtering) ได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่าหากเพิ่มความเข้มของแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งแล้วทำให้สนามแม่เหล็กที่คาโทดไม่สมมาตร จะทำให้อิออนที่วิ่งเข้าชนวัสดุรองรับมีการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มที่ได้โดยตรง

หากพิจารณาระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบปกติ นั้น จะเห็นว่าส่วนของคาโทดจะมีการติดตั้งแม่เหล็กไว้ทั้งด้านนอกและส่วนกลางของคาโทด หากความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านนอกและส่วนมีขนาดเท่ากันอาจเรียกระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบนี้ว่าเป็นแบบสมมาตรหรือบาลานซ์ โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะมีการเชื่อมโยงถึงกันตลอดทั้งด้านนอกและส่วนกลาง

ถ้าแม่เหล็กที่ติดตั้งไว้ที่คาโทดนั้นมีความเข้มไม่เท่ากัน โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กส่วนกลางอาจเข้มกว่าด้านนอกหรือกลับกัน จะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นไม่สมมาตร และเรียกระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบนี้ว่าเป็นแบบอสมมาตรหรืออับบาลานซ์ อย่างไรก็ตามเส้นแรงแม่เหล็กนั้นก็ยังคงเชื่อมโยงกันตลอด แต่จะมีเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนที่มากกว่าปกติที่ไม่โยงไปหาขั้วใดขั้วหนึ่งซึ่งจะแผ่กระจายออกไปรอบข้างคาโทด

หากพิจารณาในระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปีดเตอริง พบว่าอิเล็กตรอนจะถูกอำนาจของสนามแม่เหล็กทำให้อิเล็กตรอนนั้นเคลื่อนที่เป็นทางโค้งอยู่ในสนามแม่เหล็กโดยอิเล็กตรอนที่ถูกจับนี้จะทำให้เกิดพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงบริเวณด้านหน้าของเป้าสารเคลือบซึ่งทำให้ระบบนี้มีอัตราการเคลือบสูงกว่าระบบดี ซี สปีดเตอริง ปกติ แต่อย่างไรก็ดีจะมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงซึ่งสามารถหลุดออกจากอำนาจของสนามแม่เหล็กนี้ได้จากนั้นจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนดโดยทันที

สำหรับในระบบอับบาลานซ์แมกนีตรอน สปีดเตอริง นั้น อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดจากสนามแม่เหล็กจะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบ แล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของแก๊สและเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาชุดที่สองขึ้นบริเวณวัสดุรองรับซึ่งมีผลให้ความหนาแน่นกระแสที่วัสดุรองรับมีค่าสูงมากกว่าระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง ปกติ โดยพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้จะมีส่วนช่วยในการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่า ion-assisted deposition ซึ่งจะให้ฟิล์มบางที่มีความหนาแน่นสูงและมีการยึดติดดีมาก



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบลักษณะพลาสมาที่เกิดจากระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปีดเตอริง และอับบาลานซ์แมกนีตรอน สปีดเตอริง^[9]

2.6 อุปกรณ์ในระบบ ดี ซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง¹⁹

ระบบ ดี ซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง มีส่วนประกอบสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ ดังนี้คือ คาโทดและเป่าสารเคลือบ ที่วางชิ้นงาน ระบบสุญญากาศ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ระบบป้อนแก๊ส ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 คาโทดและเป่าสารเคลือบ

ในการออกแบบคาโทดและการติดตั้งเป่าสารเคลือบให้มีรูปร่างต่างๆ เพื่อความเหมาะสมกับประเภทของงานมีสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ 5 ส่วน คือ ระบบหล่อเย็น ระบบฉนวนของไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อ สนามแม่เหล็ก คาโทดซีลด์ และวัสดุที่ใช้ในการสร้าง

1. ระบบหล่อเย็น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการสปีดเตอริงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาคจากเป่าสารเคลือบจะมีค่าประมาณ 1 เปอร์เซนต์ ส่วนพลังงานที่ใช้เปลี่ยนเป็นความร้อนที่เป่าสารเคลือบจากการชนของไอออนที่ผิวเป่าในกระบวนการสปีดเตอริงจะมีค่าประมาณ 75 เปอร์เซนต์ และส่วนที่เหลือคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สอง และทำให้เกิดพลาสมาในระบบซึ่งจะวิ่งชนและกลายเป็นพลังงานความร้อนบนวัสดุรองรับและผนังภาชนะสุญญากาศ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบนเป่าสารเคลือบนี้มีค่าสูงมากจนอาจละลายเป่าสารเคลือบได้ ทั้งสามารถก่อปัญหาเกิดการแปรที่แตกต่างกันของธาตุต่างชนิดในการเคลือบอัลลอย ทำให้ฟิล์มเคลือบมีปริมาณธาตุในอัลลอยแตกต่างจากเป่าสารเคลือบมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบหล่อเย็นเข้ากับคาโทดและเป่าสารเคลือบเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว การหล่อเย็นอาจใช้น้ำหรือน้ำมันเป็นวัสดุหล่อเย็น น้ำมันมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าดีกว่าน้ำและทำให้เกิดการกัดกร่อนของเนื้อวัสดุที่ใช้ทำคาโทดต่ำกว่าน้ำ แต่ประสิทธิภาพในการทำความเย็นน้อยกว่าน้ำและมีราคาแพงรวมทั้งมีความหนืดสูงทำให้ต้องใช้เครื่องสูบลูกขนาดใหญ่ และก่อให้เกิดความสกรปรกแก่ระบบสุญญากาศได้ง่าย น้ำแม้จะมีความนำไฟฟ้าสูงกว่าและต้องใช้ร่วมกับระบบไฟฟ้าแรงสูงที่คาโทด แต่มีราคาถูก

การหล่อเย็นอาจให้เป่าสารเคลือบสัมผัสโดยตรงกับน้ำโดยซีลด์กันน้ำรั่วไหลด้วยแผ่นยางระหว่างคาโทดกับแผ่นเป่าสารเคลือบ หรืออาจออกแบบคาโทดปิดด้วยแผ่นปิดหลังกันน้ำรั่วไหลและติดแผ่นเป่าสารเคลือบโดยการเชื่อมติดเข้ากับแผ่นปิดหลังการยึดแผ่นเป่ากับแผ่นปิดหลังด้วยสกรูยึดทำให้การระบายความร้อนไม่ดีทุกผิวสัมผัส และทำให้เกิดการโก่งงอของแผ่นเป่าหึงการสัมผัสระบายความร้อนอันทำให้เกิดความเสียหายกับเป่าสารเคลือบได้ วัสดุทั่วไปที่ใช้ทำแผ่นปิดหลังของคาโทดคือทองแดงเนื่องจากนำความร้อนได้ดีและต้องมีความหนาเพียงพอในการทนความดันบรรยากาศและความดันน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นโดยไม่เกิดการโป่งนูนออก

ตารางที่ 2.2 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 | 25 | 35 | 9.3 |
| 8 | 11.2 | 3.0 | 30 | 42 | 11 |
| 10 | 14 | 3.7 | | | |

การออกแบบใช้น้ำหล่อเย็นจะนิยมควบคุมให้อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกแตกต่างกันไม่เกิน 10 °C อุณหภูมิของน้ำขณะหล่อเย็นควรมีค่าสูงกว่าจุดกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศเพื่อป้องกันการจับเกาะของไอน้ำขณะคาโทดถูกเปิดออกสัมผัสบรรยากาศอันเป็นสาเหตุให้เกิดการลัดวงจรหรือปัดความดันลงยากในการเคลือบครั้งต่อไป ความนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ควรมีค่าต่ำโดยมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า 10 กิโลโห์ม-เซนติเมตร เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากขั้วคาโทดสู่กราวด์ของระบบน้ำหล่อเย็น ปริมาณของน้ำหล่อเย็นต่ำสุดที่ใช้กับระบบหล่อเย็นสัมพันธ์กับกำลังงานไฟฟ้าของระบบสปีดเตอริง (ตารางที่ 2.2)

2. ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อวงจรไฟฟ้า เนื่องจากคาโทดและเป่าสารเคลือบจะต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าแรงสูงขณะที่ภาชนะสูญญากาศเป็นกราวด์ดังนั้นจึงต้องใช้ฉนวนไฟฟ้ากัน ฉนวนนี้ต้องมีคุณสมบัติในการชีวะระบบสูญญากาศได้ดี อาจใช้ซิลด์โลหะ-เซรามิค หรือใช้ เทฟลอน (TEFLON) และแผ่นยางซิลสูญญากาศร่วมกัน ท่อน้ำต้องใช้ท่ออย่างซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและควรให้ความยาวมากสัมพันธ์กับขนาดท่อเพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าผ่านน้ำจากคาโทดสู่กราวด์ ถังน้ำหล่อเย็นควรต่อลงกราวด์และขั้วต่อไฟฟ้าแรงสูงควรมีฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันอันตราย ส่วนรอยต่อไฟฟ้าทุกจุดควรยึดด้วยโบลท์และนัทขันแน่นหรือเชื่อมติดกัน

3. สนามแม่เหล็ก พลานาร์แมกนีตรอนสปีดเตอริงจะมีโครงสร้างสนามแม่เหล็ก ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าทั้งหมดและการกักร่อนเกิดขึ้นสูงในบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีความเข้มสูง ดังนั้นการกักร่อนบนผิวเป่าสารเคลือบจะเป็นรูปตัววีลิ่งลงเป็นบางบริเวณ อายุการใช้งานของเป่าสารเคลือบจะสั้นสุดลงเมื่อร่องลึกปรากฏเท่ากับความหนาของเป่า ดังนั้นการจัดขั้วแม่เหล็กให้มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ย่อมสามารถทำให้การกักร่อนจากกระบวนการสปีดเตอริงกระจายออกทั่วแผ่นเป่าและลดความถี่เปลี่ยนจากการใช้เป่าอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

สนามแม่เหล็กที่ใช้อาจใช้ได้ทั้งแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้าโดยติดตั้งไว้ภายนอกแต่แม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถติดตั้งชิดกับเป้าสารเคลือบได้ เนื่องจากไม่สามารถจุ่มขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ในระบบน้ำหล่อเย็นซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าค่าเดียวกับคาโทดได้ ดังนั้นจึงอาจติดตั้งไว้ภายนอกระบบหล่อเย็น ซึ่งจะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กบนผิวเป้าสารเคลือบมีค่าต่ำ เป็นผลให้อัตราการสปีดเตอริงลดลงแม้จะทำให้ความหนาของส่วนหล่อเย็นที่ติดกับเป้าสารเคลือบบางลงก็ตาม

การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็กนอกจากจะมีผลต่อการกัดกร่อนบนผิวเป้าสารเคลือบแล้ว ยังมีผลต่อความหนาของฟิล์มเคลือบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ด้วย การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็กที่ไม่ดีพอและการวางตำแหน่งวัสดุรองรับใกล้คาโทดมากเกินไปจะทำให้ความหนาฟิล์มเคลือบเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่กัดกร่อนบนเป้า การจัดให้ฟิล์มเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ อาจทำได้โดยการจัดตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมและใช้การเคลื่อนที่ของวัสดุรองรับร่วมด้วย เพื่อให้บริเวณที่เกิดอัตราการเคลือบเร็วและช้าได้กระจายสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าวัสดุรองรับหรือชิ้นงานนั้น

การปลดปล่อยอนุภาคจากกระบวนการสปีดเตอริง แม้ว่าอะตอมสารเคลือบจะชนกับโมเลกุลของแก๊สจนเปลี่ยนทิศทางไปมาจากจุดเริ่มต้น และถือเสมือนว่าเป็นกระบวนการแพร่ (diffusion) ลงเคลือบวัสดุรองรับในทุกทิศทางก็ตามฟิล์มเคลือบที่ได้ย่อมไม่สามารถทำให้ความหนาสม่ำเสมอได้ ถ้าการปลดปล่อยอนุภาคจากทุกจุดบนเป้าสารเคลือบไม่สม่ำเสมอกัน ทั้งนี้พบว่าในแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบพลาสมาวงกลม ฟิล์มเคลือบจะมีความสม่ำเสมอดีที่สุด เมื่อรัศมีภายในและภายนอกของวงพลาสมามีค่าเป็น 0.7 และ 0.8 ของระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับตามลำดับ เมื่อแผ่นเป่าวงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนวงแหวนพลาสมาของการเกิดสปีดเตอริงควรมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามขนาดของแผ่นเป้าเพื่อให้ความหนาฟิล์มเคลือบมีความสม่ำเสมอและเพื่อการใช้งานเป้าสารเคลือบอย่างมีประสิทธิภาพ

4. การชิลด์คาโทด ปกติกระบวนการโกลด์ซิงการจี้จะทำให้เกิดการสปีดเตอริงทุกบริเวณของคาโทดที่ปรากฏศักย์ไฟฟ้าลบต่อไอออน ดังนั้นเพื่อป้องกันการสปีดเตอริงในบางบริเวณที่มีได้ติดเป้าสารเคลือบไว้จึงหุ้มล้อมรอบคาโทดด้วยตัวนำไฟฟ้าซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับแอนอดหรือกราวด์ เรียกว่า คาโทดชิลด์ โดยชิลด์มีระยะห่างจากคาโทดน้อยกว่าระยะคาร์คัสเปซ ในบางกรณีชิลด์จะคลุมเลขขอบของเป้าสารเคลือบ เพื่อป้องกันมิให้เกิดการสปีดเตอริงสกรูยึดเป้าสารเคลือบ ทำให้การเคลือบฟิล์มมีความบริสุทธิ์ปราศจากสารปลอมปนจากสกรูยึดเป้าสารเคลือบนั้น

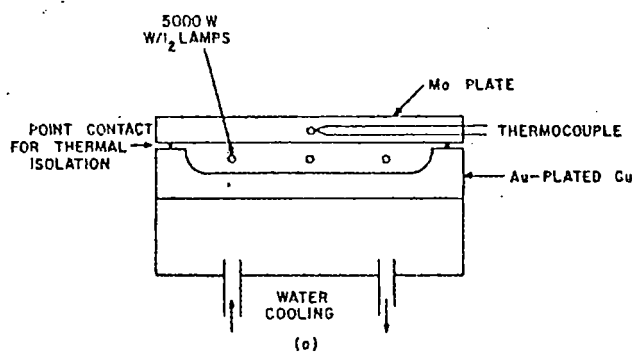
5. วัสดุที่ใช้ทำคาโทด สามารถใช้ได้หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เหล็ก สเตนเลสและทองแดง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการเกาะจับของแก๊สต่ำสามารถไล่แก๊สบนผิววัสดุภายใต้สุญญากาศ (degas) ได้ง่ายและมีความดันไอต่ำ เหล็กสเตนเลสทนการกัดกร่อนจากสารเคมีต่างๆ ได้ดี แต่มีความนำความร้อนและไฟฟ้าที่เร็ว ส่วนทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีแต่ทนการกัดกร่อนของสารเคมีได้ไม่ดีนักอย่างไรก็ตามจุดสำคัญในการสร้างคือให้คาโทดมีความคงทนการกัด

กร้อนและการนำความร้อนที่ดีบริเวณแผ่นปิดหลังนอกจากนี้ถ้าคาโทดเป็นชนิดแมกนีตรอนแผ่นปิดหลังต้องไม่เป็นสารแม่เหล็ก มิฉะนั้นจะกันสนามแม่เหล็กมิให้มายังเป้าสารเคลือบ

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

2.6.2 ที่วางชิ้นงาน

ในการเคลือบฟิล์มบางแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง อาโนดหรือที่วางชิ้นงานคือวัสดุชิ้นเดียวกันซึ่งอาจต่อลงกราวด์หรือแยกขั้วต่อเพื่อการบิดไบแอส (bias) ด้วยศักย์ไฟฟ้าลบได้ ขณะที่ภาชนะสุญญากาศมักสร้างด้วยโลหะและต่อลงกราวด์เพื่อป้องกันไฟฟ้าช็อคดังนั้นภาชนะจึงทำหน้าที่เหมือนอาโนดขนาดใหญ่ในการดึงกระแสอิเล็กตรอนจากระบบในกระบวนการโกลด์ดิสชาร์จ ส่วนกระแสอิเล็กตรอนอีกส่วนหนึ่งซึ่งถูกดึงเข้าสู่ที่วางชิ้นงานพร้อมกับอะตอมพลังงานสูงจากกระบวนการสปัตเตอริง มีส่วนทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้อาจมีทั้งข้อดีและข้อเสียในการเคลือบชิ้นงานด้วยเป้าสารเคลือบต่างชนิดกันออกไป เช่นอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการเคลือบโลหะมีค่าลดลงกว่าขณะอุณหภูมิต่ำ ส่วนอัตราการเคลือบแบบบริแอกติฟสปัตเตอริงมีแนวโน้มทางตรงข้าม ฟิล์มเคลือบของสารบางชนิดยึดเกาะกับชิ้นงานได้ดีเมื่อควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานในช่วงค่าหนึ่ง และบางครั้งการที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำลายสภาพความแข็งแรงของชิ้นงานได้เป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบที่วางชิ้นงานหรือวัสดุรองรับควรสามารถควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานให้เหมาะสมกับสภาพและคุณสมบัติของฟิล์มเคลือบที่ต้องการ ซึ่งส่วนใหญ่มักออกแบบให้มีทั้งระบบระบายความร้อนและเพิ่มความร้อนได้ในที่วางชิ้นงานชุดเดียวกัน (รูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 โครงสร้างอาโนดหรือที่วางชิ้นงาน ที่ควบคุมอุณหภูมิได้

การระบายความร้อน สามารถทำได้โดยการใช้ น้ำหล่อเย็น เพราะมีราคาถูก นอกจากนี้ยัง อาจใช้แก๊ส หรือ ไนโตรเจนเหลว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความรวดเร็วที่ต้องการใช้งาน ส่วนการเพิ่ม ความร้อนหรืออุณหภูมิของชิ้นงาน อาจใช้ของเหลวร้อน ขดลวดความร้อน (resistive heater) หรือ หลอดรังสีความร้อน (infrared lamp) ในส่วนของการวัดอุณหภูมิอาจใช้เทอร์โมคัปเปิล infrared spectrometer หรือเทคนิคอื่นก็ได้ ขึ้นกับความละเอียดของการวัดที่ต้องการ

ในส่วนของที่วางวัสดุรองรับควรทำด้วยทองแดงหรือ โมลิบดีนัมซึ่งนำความร้อนได้ดี ภายใต้อุณหภูมิการนำความร้อนจากที่วางชิ้นงานสู่ชิ้นงานเกิดขึ้นไม่ดัดนัก เนื่องจากกระยะปลอดภัย การชนของโมเลกุลแก๊สสูงขึ้นมาจึงจำเป็นต้องทำให้ชิ้นงานและแผ่นรองชิ้นงานสัมผัสกันได้ดีที่สุดโดย การใช้สารต่อต้านความร้อน เช่น อาจใช้ไซลิโคน (silicone vacuum grease) ต่อต้านความร้อนให้กับ ชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิที่ต้องการควบคุมไม่เกิน 100°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 450°C อาจใช้กัล เลียม (Ga), อินเดียม (In) หรือฟอสฟอรัมนิยมเป็นตัวต่อต้านความร้อนจากที่วางชิ้นงานสู่ชิ้นงาน

การทำให้อาโนดหรือแผ่นรองชิ้นงานมีขั้วแยกจากราวด์เพื่อป้องกันไบแอสได้ มีข้อดี หลายประการคือ (1) การป้องกันไบแอสด้วยไฟฟ้าลบค่าสูงช่วยให้ที่วางชิ้นงานและชิ้นงานทำตัวเสมือน เป็นคาโทด โดยมีผนังภาชนะสุญญากาศเป็นอาโนด ทำให้เกิดการสปัตเตอร์กัดกร่อน (spattered etching) บนผิวหน้าชิ้นงานซึ่งจะเป็นการทำทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนการเคลือบ ซึ่งทำให้ฟิล์มยึด เกาะได้ดีขึ้น (2) การป้องกันไบแอสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบเล็กน้อยแก่ชิ้นงาน (-50 ถึง -200 โวลต์) ใน ระหว่างการเคลือบจะช่วยลดปริมาณการชนของอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นงาน จะทำให้อุณหภูมิของชิ้น งานไม่สูงมากนักและลดโอกาสที่อิเล็กตรอนจะทำลายผิวฟิล์มเคลือบจากการวิ่งชน (3) การป้องกัน ไบแอส ลบแก่ชิ้นงานจะทำให้ปริมาณแก๊สไวปฏิกิริยาที่ตกค้างในฟิล์มเคลือบมีค่าลดลง เนื่องจากเกิด กระบวนการสปัตเตอร์ซ้ำ (resputtering) บนผิวฟิล์มเคลือบ ทำให้แก๊สไวปฏิกิริยาบางส่วนถูก สปัตเตอร์หลุดออกไปมากกว่าสารเคลือบ และฟิล์มมีความบริสุทธิ์มากขึ้น การขจัดแก๊สออกมากหรือน ้อยขึ้นกับแรงยึดเกาะระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับวัสดุเคลือบ เมื่อเทียบกับแรงยึดเกาะกันเองของ อะตอมวัสดุเคลือบ จากรายงานการทดลองพบว่า การป้องกันไบแอสลบให้กับชิ้นงานที่เคลือ บแทนทาลัม (Ta) โมลิบดีนัม (Mo) และไนโอเบียม (Nb) ปริมาณออกซิเจนในฟิล์มเคลือบมีค่าต่ำกว่า ขณะไม่ป้องกันไบแอสมาก แต่การป้องกันไบแอสชิ้นงานเมื่อเคลือบอลูมิเนียม (Al) และ แมกนีเซียม (Mg) ไม่ สามารถลดปริมาณออกซิเจนในฟิล์มเคลือบได้มากนัก เมื่อเทียบกับขณะไม่มีไบแอส ทั้งนี้เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างออกซิเจนและอะตอมโลหะมีมากกว่าการยึดเกาะกันเองของอะตอมโลหะ

ข้อเสียของการป้อนไบแอสให้กับชิ้นงาน คือ การเพิ่มปริมาณแก๊สเฉื่อยที่ถูกจับในฟิล์มมากขึ้นตามกำลังสองของความต่างศักย์ไฟฟ้าไบแอส เนื่องจากไอออนของอาร์กอนมีโอกาสดูกร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากไบแอสให้มีพลังงานสูงขึ้นและชนฝั่งตัวในเนื้อฟิล์มมากขึ้นตามพลังงานที่ได้รับ แต่ปริมาณ อาร์กอนในฟิล์มเคลือบนี้สามารถทำให้ลดลงได้เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น

2.6.3 ระบบสุญญากาศ (vacuum system)

เนื่องจากภายในระบบสุญญากาศทุกพื้นที่ที่มีโอกาสถูกชนด้วยอะตอมสารเคลือบและไอออนพลังงานสูง เป็นเหตุให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สออกจากพื้นผิวที่ถูกชน (outgassing) ดังนั้นชิ้นส่วนต่างๆ ภายในระบบสุญญากาศควรมีการระบายความร้อนและต่อกราวด์ไว้ เพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สไวปฏิกิริยา แก๊สควรป้อนเข้าสู่ระบบและดูดผ่านเครื่องสูบตลอดเวลาเพื่อไล่แก๊สไวปฏิกิริยาออกจากระบบตลอดการสปีดเตอร์ทำให้ลดสารปลอมปน (contamination) ในฟิล์มเคลือบ การปล่อยปริมาณแก๊สบริสุทธิ์ของอาร์กอนไหลผ่านระบบด้วยอัตราสูงช่วยเจือจางแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบและลดอุณหภูมิของระบบลงเนื่องจากปริมาณ outgas ในระบบมีค่าลดลงตามเวลา ดังนั้นจึงควรใช้แผ่นปิด (shutter) กันระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับเพื่อกั้นมิให้การเคลือบเกิดขึ้นระหว่างช่วงแรกที่มีปริมาณแก๊สไวปฏิกิริยาสูงรวมทั้งให้เวลาต่อระบบในการทำความสะอาดผิวเป้าสารเคลือบก่อนการเคลือบจริง (presputtering) จากนั้นจึงเปิดแผ่นปิดและเคลือบฟิล์มบางเมื่อภายในระบบสะอาดแล้ว

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

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

ลักษณะของระบบสุญญากาศควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดคาโทดพอสมควร เนื่องจากไอออนจากแก๊สเนื้ออาจรวมกับอิเล็กตรอนเป็นกลางทางไฟฟ้าได้ที่ผนังภาชนะการที่ผนังภาชนะอยู่ใกล้คาโทดเกินควรอาจทำให้ไอออนส่วนใหญ่ที่ควรถูกเร่งเข้าชนคาโทดบริเวณขอบเป่าเมื่อแพร์ผ่านพลาสมาสู่คาโทดเกิดการชนกับผนังภาชนะแล้วกลายเป็นกลางทำให้สูญเสียปริมาณไอออนที่ควรวิ่งสู่คาโทดไปส่วนหนึ่ง เรียกว่า Wall losses และทำให้อัตราการเกิดสปัตเตอร์ลดลง

2.6.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power supply)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้กับระบบไดโอดสปัตเตอร์อาจใช้ไฟฟ้ากระแสตรงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำหรือความถี่สูง โดยไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำอาจใช้ในการสปัตเตอร์ที่มี 2 คาโทด โดยมีชิ้นงานอยู่ระหว่างกลางเพื่อให้การเคลือบเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของชิ้นงานในเวลาเดียวกันด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพียงชุดเดียว สำหรับระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานมีค่าอยู่ระหว่าง 300-800 โวลต์ และกระแสควรมีค่าระหว่าง 10-100 mA/cm² บนคาโทด โดยมีระบบควบคุมกระแสที่แบบปรับค่าได้ ไฟฟ้า ดีซี ที่ใช้อาจมีการกรองสัญญาณให้เรียบหรือไม่มีการกรองสัญญาณก็ได้ การกรองสัญญาณจะช่วยให้การ สปัตเตอร์บนผิวสารเคลือบและสภาพโกลด์ลิตซาร์จมีความสม่ำเสมอ การไม่กรองสัญญาณไฟฟ้าช่วยลดความรุนแรงการอาร์คลง แหล่งกำเนิดไฟฟ้าควรสามารถทนต่อการเกิด high voltage rf transients ซึ่งเกิดจากพลาสมาในระบบแมกนีตรอนรวมทั้งการอาร์คของระบบด้วย การอาร์คเพียงเล็กน้อยอันเกิดจากสารเจือปน และ dielectric beakdown บนเป่าสารเคลือบ ซึ่งเกิดขึ้นชั่วขณะ ระบบป้องกันของเครื่องควรจำกัดกระแสการอาร์คนี้ไว้ได้โดยไม่ตัดวงจร แต่การอาร์ครุนแรงอันเกิดจากการหลุดลอกของฟิล์มเคลือบจากแผ่นซิลด์คาโทดและสัมผัสคาโทดให้เกิดลัดวงจร ระบบป้องกันควรมีความไวสูงในการตัดแหล่งกำเนิดออกจากวงจร แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับระบบสปัตเตอร์มีหลายชนิดดังนี้

1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดีซี (DC power supply) ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ไม่เกิน 10 กิโลวัตต์นิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าออโตโต (auto transformer) ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรงด้วยบริดจ์เรกติฟายเออร์ (bridge rectifier) และควรมีขดลวดอินดักเตอร์ต่ออยู่เพื่อกันสัญญาณ อาร์ เอฟ สไปค์ (rf spikes) จากการอาร์คซึ่งอาจทำลายวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ได้ การมีชั้นแม่เหล็ก (magnetic shunting) ในตัวทรานส์ฟอร์มเมอร์ จะทำให้ทรานส์ฟอร์มเมอร์มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (output impedance) สูง เมื่อเกิดการอาร์คขึ้น กระแสจากการอาร์คจะถูกป้อนกลับสู่ทรานส์ฟอร์มเมอร์และลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของทรานส์ฟอร์มเมอร์ลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วทำให้แหล่งกำเนิดป้องกันอันตรายตัวเองได้

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

rectifier) ต่ออยู่เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสกลับเป็นกระแสตรง นอกจากนี้อาจมีวงจรป้อนกลับ (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 แต่กระบวนการโคลด์คิสซาร์จมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่านี้มากจึงจำเป็นต้องใช้วงจรแมชซึ่งเพื่อสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งพลังงานสู่ระบบสปีดเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและในกรณีการทำไบแอสสปีดเตอร์กับระบบอาร์เอฟ จำเป็นต้องมีวงจรทูนนิ่ง (tuning network) ช่วยในการปรับเฟสของไฟฟ้าสลับที่เหมาะสมด้วยการทำไบแอสสปีดเตอร์ในระบบอาร์เอฟจึงค่อนข้างมีความยุ่งยากกว่าระบบดี ซี มาก

2.6.5 ระบบป้อนแก๊ส

แก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบสปีดเตอร์ควรมีหลายจุดเพื่อควบคุมความดันแก๊สมิให้แตกต่างกันในแต่ละส่วนที่เกิดกระบวนการสปีดเตอร์ ความไม่สม่ำเสมอของแก๊สอาร์กอนจะทำให้อัตราการสปีดเตอร์ที่เกิดบนผิวเป้าไม่สม่ำเสมอซึ่งมีผลต่อความหนาฟิล์มและอายุการใช้งานของเป้าสารเคลือบ การป้อนแก๊สไปปฏิริยาที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ส่วนผสมของธาตุในฟิล์มเคลือบฟิล์มบางประกอบมีความแตกต่างกัน การป้อนแก๊สที่ความดันต่ำในระบบสปีดเตอร์ควรใช้วาล์วเข็มซึ่งสามารถส่งแก๊สเข้าสู่ระบบได้ที่ละน้อยและควบคุมความดันได้ละเอียดพอ และไม่ควรร้อนแก๊สจากถังเก็บแก๊สซึ่งมีความดันสูงผ่านวาล์วเข็ม โดยตรง ควรมีการลดลำดับความดันด้วยวาล์วปรับความดัน (regulator valve) เป็นช่วงๆ และควรมีเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (gas flow meter) ต่ออยู่ก่อนถึงวาล์วเข็ม ท่อส่งแก๊สไม่ควรมีความยาวมากเกินไป และเมื่อต่อกับระบบสุญญากาศต้องสามารถปั๊มความดันในท่อลงได้ต่ำถึง 1 มิลลิทอร์ร เพื่อการทำความสะอาดท่อโดยผ่านวาล์ว bypass ท่อควรทนความดันได้สูงถึง 200 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นอย่างน้อย เมื่อต่อกับถังแก๊สความดันสูง การป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบควรป้อนเข้าตอนบนของภาชนะ เพื่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแก๊สภายในระบบ ก่อนถูกดูดผ่านปั๊มซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณตอนล่าง การป้อนแก๊สใกล้บริเวณคาโทดอาจลดความสม่ำเสมอของความดันลงบ้าง แต่เป็นการป้องกันมิให้แก๊สที่รั่วเข้าสู่ระบบตามผนังภาชนะเข้าสู่บริเวณ โกลด์คิสซาร์จได้

2.7 ลักษณะจำเพาะตัวของระบบสปีดเตอร์ริง^{15]}

2.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ความต่างศักย์ดิศซาร์จและความดัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ดิศซาร์จในระบบสปีดเตอร์ริงจะแสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชัน สภาพการดิศซาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ดิศซาร์จตามสมการ

$$I = kV^n \quad \text{..... (2.2)}$$

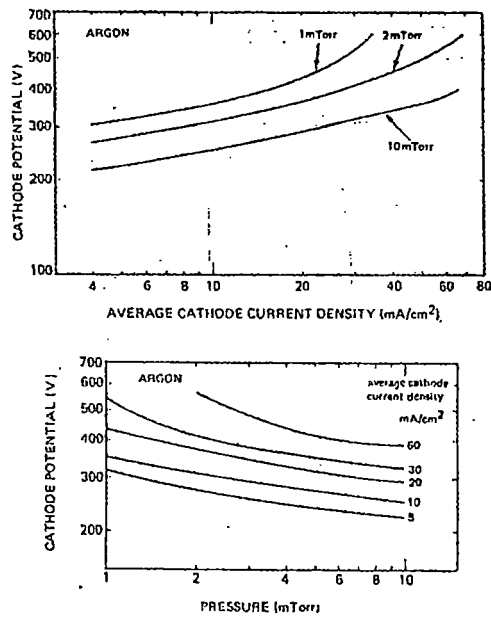
เมื่อ I คือกระแสของคาโทด

V คือความต่างศักย์ดิศซาร์จ

n คือดัชนีแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ทั้งนี้ n จะขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก โดยปกติ n มีค่าระหว่าง 5 ถึง 9 ในแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงแบบทรงกระบอกแต่อาจแตกต่างกันไปบ้าง เมื่อจัดแบบพลาเนียร์แมกนีตรอน k คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงกว้างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ดิศซาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ดิศซาร์จ ที่ความดันต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.18a จะเห็นว่า ณ ค่าความดัน 10 มิลลิทอร์รี่ พบว่า n เท่ากับ 4.6 และ k เท่ากับ 6×10^{-13} สำหรับคาโทดชนิดนี้การเปลี่ยนค่าของความชันกราฟ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้าค่าสูงขึ้นปริมาณไอออนของแก๊สถูกจำกัดด้วยความดันในระบบทำให้ปริมาณการผลิตอิเล็กตรอนและพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกระแสดังในรูป 2.18a การเบนโค้งนี้จะเริ่มที่กระแสสูงขึ้นถ้าความดันในระบบมีค่าสูงขึ้น ส่วนรูปที่ 2.18b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดิศซาร์จของคาโทดและความดันที่กระแสไฟฟ้าคงที่ค่าต่างๆ การเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นอะตอมแก๊สเพิ่มขึ้น และยังผลให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เกิดจากการชนของไอออนบนเป้าสารเคลือบจึงมีปริมาณสูงขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าของการดิศซาร์จสูงขึ้นและความต่างศักย์ดิศซาร์จมีค่าลดลงดังนั้นเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ ความต่างศักย์ดิศซาร์จจะมีค่าลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.18 a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์คิศจารจ์ของพลานาร์ แมกนีตรอนคาโทดรูปสี่เหลี่ยม ที่ความดันค่าต่างๆ

b) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์คิศจารจ์ และความดันเมื่อกระแสมีค่าคงที่^[6]

2.7.2 อัตราการเคลื่อนและประสิทธิภาพการเคลื่อน

อัตราการสปัดเตอร์ของอะตอมสารเคลื่อนขึ้นกับปริมาณไอออนซึ่งแปรผันกับกระแส และพลังงานของไอออนซึ่งแปรผันกับความต่างศักย์คิศจารจ์ ดังนั้นจึงแปรผันโดยตรงกับกำลังงาน ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ส่วนอัตราการเคลื่อน (R) นอกจากแปรผันโดยตรงกับอัตราการ สปัดเตอร์ แล้วยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ คือพื้นที่ของการเกิดสปัดเตอร์ ระยะห่างระหว่างคาโทดและชิ้นงาน ค่ายึดดี และการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป่าสารเคลื่อนความดันแก๊สรวม และความดันย่อยของแก๊สไอ ปฏิกริยาภายในบริเวณเป่าสารเคลื่อน ค่าการนำความร้อนของเป่าสารเคลื่อนอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ กำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเคลื่อนที่ชิ้นงานระหว่างเคลื่อนมีผลต่อการลดอัตราการ เคลื่อนลง ทั้งนี้ประสิทธิภาพของอัตราการเคลื่อน (R_E ; อัตราส่วนระหว่างอัตราการเคลื่อน และค่า กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อหน่วยพื้นที่) สามารถหาได้จากสมการ

$$R_E = \frac{R}{P} \quad \dots\dots (2.3)$$

ประสิทธิภาพของการเคลือบนี้จะช่วยในการกำหนดสภาพดีที่สุดของกระบวนการเคลือบ ในระบบแมกนีตรอน ประสิทธิภาพการเคลือบทองแดงมีค่าระหว่าง $800-1200 \text{ \AA}^{\circ}\text{-cm}^2/\text{W-min}$ และอลูมิเนียมมีค่าระหว่าง $200-650 \text{ \AA}^{\circ}\text{-cm}^2/\text{W-min}$ เป็นต้น ทั้งนี้ระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริงนับว่าเป็นวิธีการเคลือบที่มีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีสปีดเตอริงอื่นๆ สามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ของค่าการคำนวณทางทฤษฎีและดีกว่า ดี ซี ฟลานาร์ สปีดเตอริงถึง 3 เท่าตัว

2.7.3 ข้อจำกัดของอัตราการเคลือบ

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

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการต่อเนื่องจากที่ได้ดำเนินการแล้วเสร็จในปี พ.ศ.2541 ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง สำหรับโครงการวิจัยนี้ซึ่งเป็นการดำเนินงานต่อเนื่องมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาถึงเทคนิคและภาวะที่เหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบที่สร้างขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.2 การปรับปรุงระบบเคลือบฟิล์มบาง

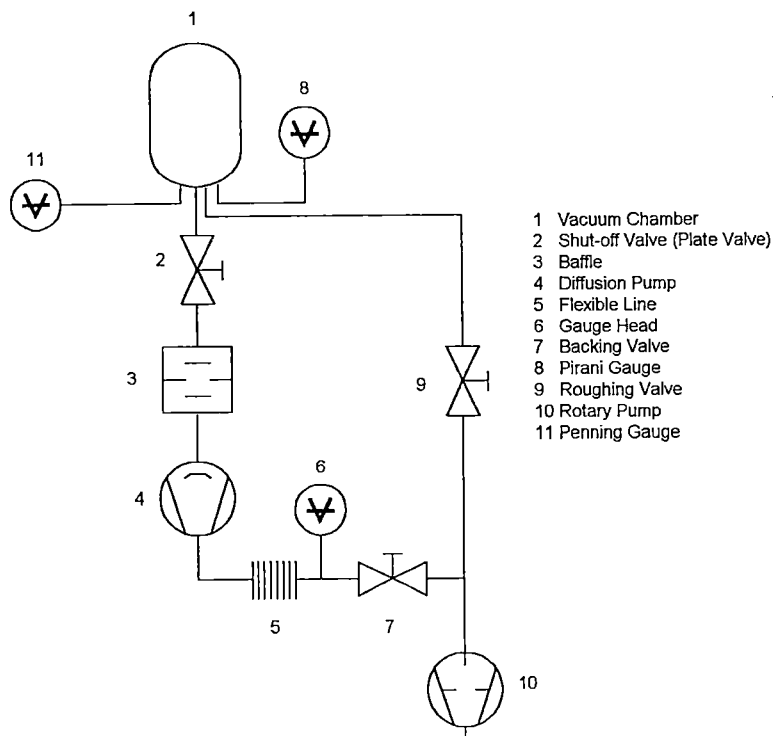
ระบบเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นระบบเคลือบฟิล์มบางที่คณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้นในปี พ.ศ.2541 เป็นระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเทอริง ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน คือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทด และเป้าสารเคลือบ ระบบนำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า และระบบป้อนแก๊ส ทั้งนี้จากการศึกษาและทดลองการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบเคลือบที่สร้างขึ้นโดยการใช้สารเคลือบชนิดต่างๆ พบว่าระบบเคลือบข้างต้นจะทำงานได้สมบูรณ์มากขึ้นถ้ามีการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ของระบบเคลือบ ในการศึกษานี้ได้ออกแบบคาโทดใหม่ทำให้ระบบเคลือบนี้เป็นระบบอเนกประสงค์ แมกนีตรอน

3.3 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง

ตอนที่ 1 การสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศในการวิจัยนี้ประกอบด้วยเครื่องสูบลมสุญญากาศ 2 ชนิด คือ เครื่องสูบลมแบบโรตารีและเครื่องสูบลมแบบแพร์ไอ โดยต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศ ทั้งนี้เครื่องสูบลมโรตารีสามารถทำให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศลดจากความดันปกติเป็นความดันต่ำถึง 10^{-3} มิลลิบาร์ ซึ่งสามารถอ่านค่าความดันได้จากหัววัดแบบพิรานี ส่วนเครื่องสูบลมแบบแพร์ไอมีความสามารถลดความดันจาก 10^{-3} ถึง 10^{-6} มิลลิบาร์และสามารถอ่านค่าความดันได้จากหัววัดแบบเพนนิ่ง (รูปที่ 3.1) สำหรับขั้นตอนการสร้างภาวะสุญญากาศทำได้ดังนี้

1. เปิดเครื่องสูบลมโรตารี และเครื่องสูบบางเพอร์ไอให้ทำงาน
2. เปิดภาชนะสุญญากาศ นำวัสดุรองรับที่เตรียมไว้วางบนที่วางในตำแหน่งที่ต้องการ ปิดภาชนะสุญญากาศให้สนิท
3. เปิด roughing valve ให้เครื่องสูบลมโรตารีสูบลมออกจากภาชนะสุญญากาศ ไปสู่บรรยากาศภายนอกอ่านค่าความดันได้ต่ำถึง 10^{-2} มิลลิบาร์จึงปิดวาล์ว
4. เปิด backing valve ให้เครื่องสูบบางเพอร์ไอต่อเนื่องกับเครื่องสูบลมโรตารี
5. เปิด plate valve เพื่อลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ โดยเครื่องสูบบางเพอร์ไอจะสูบลมออกจากภาชนะสุญญากาศผ่านเครื่องสูบลมโรตารีออกไปภายนอก ความดันภายในภาชนะสุญญากาศจะต่ำลงความดันที่อ่านได้เป็นความดันต่ำสุด (base pressure) ก่อนทำสปัตเตอร์ ความดันต่ำสุดของระบบในครั้งนี้อยู่ในระดับ 10^{-5} มิลลิบาร์



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของระบบเคลือบ

ตอนที่ 2 การสปีดเตอริง

เป็นการเคลือบฟิล์มบนวัสดุรองรับ โดยอาศัยการ โกลว์ดีสซาร์จตามขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบความดันภายในภาชนะสุญญากาศว่าได้ความดันต่ำสุดที่ต้องการหรือไม่
2. ป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าภาชนะสุญญากาศ โดยควบคุมให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะเคลือบเป็น 3.0×10^{-3} มิลลิบาร์
3. ต่อสัคย์ไฟฟ้าลบเข้ากับคาโทดของระบบ (เป่าสารเคลือบ) และให้ภาชนะสุญญากาศเป็นสัคย์ไฟฟ้าบวก (หรือ ground)
4. เปิดน้ำหล่อเย็นให้ไหลเวียนในระบบเพื่อระบายความร้อนแก่คาโทด
5. ป้อนสัคย์ไฟฟ้าลบให้แก่ระบบและปรับสัคย์ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ เพื่อให้เกิดการ โกลว์ดีสซาร์จ จากนั้นจึงเปิดชัตเตอร์ เพื่อให้เกิดการสปีดเตอริงเป่าสารเคลือบตลอดจนการเคลือบเป็นฟิล์มบางในขั้นนี้ใช้เวลาตามที่ต้องการ
6. เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ ปิดแหล่งจ่ายไฟ ปิดชัตเตอร์ ปิดระบบหล่อเย็นที่คาโทด และปิดแก๊สอาร์กอนเปิดอากาศเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ แล้วจึงนำชิ้นงานออกมา

3.4 การศึกษาอัตราเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบเคลือบ

ศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบซึ่งจะแสดงถึงความสม่ำเสมอของระบบเคลือบตลอดจนศึกษาถึงอัตราการเคลือบของระบบโดยใช้เป่าสารเคลือบจำนวน 4 ชนิด ได้แก่อะลูมิเนียม ทอง ไททานเนียม ทองแดง ซึ่งเคลือบในเวลาต่างๆ กัน

ตอนที่ 1 การกระจายตัวของสารเคลือบ

ขั้นนี้จะทำการทดลองเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบในลักษณะของภาพรวม โดยการเคลือบไททานเนียมลงบนกระจกขนาด 5X5 นิ้ว ที่ระยะระหว่างเป่าสารเคลือบและวัสดุรองรับในช่วง 4-13 เซนติเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อดูเปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน โดยพิจารณาว่าที่ความหนาหลายๆ เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านจะมีค่าน้อย

ตอนที่ 2 อัตราเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบเคลือบ

จากตอนที่ 1 จะทำให้ทราบว่าควรใช้ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับเท่าใด ในตอนนี้จะทำการเคลือบสารที่ระยะจากตอนที่ 1 บนกระจกปิดสไลด์ (ขนาด 2.2X2.2 เซนติเมตร) ซึ่งวางไว้ 2 แบบ คือ (1) วางเรียงจากซ้ายไปขวาจำนวน 5 ชั้น โดยชั้น กลางเป็นตำแหน่ง 0 และซ้ายเป็น -2 และ -4 ส่วนทางขวาเป็น 2 และ 4 (2) วางคลุมพื้นที่ที่คาดว่ามีการกระจายตัวของ

สารเคลือบเหมาะสมที่สุด จำนวน 4 ชั้น จากนั้นจึงนำฟิล์มที่ได้ไปหาความหนาโดยการชั่งมวล ซึ่งจะ ทำให้ได้อัตราการเคลือบของสารที่ระยะที่กำหนด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

3.5 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์

เมื่อประกอบระบบเคลือบฟิล์มบางเข้ากับอุปกรณ์ประกอบและได้ทดสอบความสามารถของระบบสุญญากาศก่อนว่าสามารถทำความดันต่ำสุดเท่าใดแล้ว ได้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ เพื่อหาประสิทธิภาพของการเกิดไอออไนเซชันของระบบ โดยใช้เป้าสารเคลือบจำนวน 4 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ทอง ไททเนียม ทองแดง สำหรับความดันต่างๆ ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ติดตั้งเป้าสารเคลือบ ไททเนียมที่ขั้วคาโทด แล้วปิดภาชนะสุญญากาศ โดยต่อขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับขั้วคาโทด และขั้วบวกต่อกับขั้วอานอดหรือตัวถังภาชนะสุญญากาศ
2. เริ่มสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ โดยเปิดเครื่องสูบลมแบบโรตารีเพื่อสูบลมจากภาชนะสุญญากาศจนได้ความดันเท่ากับ 10^{-2} มิลลิบาร์
3. ตัมน้ำมันสำหรับเครื่องสูบบแบบแปรไอและสูบลมจากเครื่องสูบบแบบแปรไอจนได้ความดันเท่ากับ 10^{-2} มิลลิบาร์
4. จากนั้นเปิด backing วาล์ว ไปที่เครื่องสูบบแบบแปรไอ เปิดเพดวาล์วเพื่อให้เครื่องสูบบแบบแปรไอสูบลมจากภาชนะสุญญากาศ
5. เมื่อความดันภายในภาชนะสุญญากาศอยู่ที่ประมาณ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ จึงป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ
6. เมื่อความดันภายในภาชนะสุญญากาศอยู่ที่ประมาณ 1×10^{-3} มิลลิบาร์ จึงเปิดแหล่งจ่ายไฟ จากนั้นเพิ่มความต่างศักย์ให้กับระบบจนเกิดการโคล์ดีสชาร์จ บันทึกค่า
7. จากนั้นให้เพิ่มความต่างศักย์ให้กับระบบและบันทึกค่ากระแสที่ได้
8. ทำซ้ำข้อ 1-7 ที่ความดัน 3×10^{-3} และ 5×10^{-3} มิลลิบาร์
9. ทำซ้ำข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนเป้าสารเคลือบเป็น อะลูมิเนียม ทอง และทองแดง

3.6 การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง

โครงการนี้ได้ทดสอบการเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์โดยใช้เป้าสารเคลือบ 4 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ทอง ไททเนียมและทองแดง ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ สำหรับใช้เป็นแผ่นวัสดุรองรับในการเคลือบ

2. ติดตั้งเป่าสารเคลือบอะลูมิเนียมที่ขั้วคาโทด โดยมีซีลด์ปิดรอบคาโทดและสกรูยึดเป่าสารเคลือบ จากนั้นปิดภาชนะสุญญากาศ โดยต่อขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับขั้วคาโทด และขั้วบวกต่อกับขั้วแอนโนดหรือตัวถังภาชนะสุญญากาศ

3. ปิดวาล์วหยาบ และเปิดวาล์วส่วนหน้าเพื่อสูบอากาศออกจากเครื่องสูบบแบบแพร์ไอ และเริ่มต้มน้ำมัน รองนํ้ามันเดือด (สังเกตจากเสียง)

4. ปิดวาล์วส่วนหน้าชั่วคราว เปิดวาล์วหยาบทำความสะอาดในภาชนะสุญญากาศอีกครั้งแล้วปิดวาล์วหยาบ จากนั้นเปิดวาล์วส่วนหน้าไปที่เครื่องสูบบแบบแพร์ไอ เปิดเพลตวาล์วเพื่อให้เครื่องสูบบแบบแพร์ไอสูบอากาศจากภาชนะสุญญากาศ

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

6. ความดันขณะทำการสปัดเตอร์ (เมื่อป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ระบบ) ให้ควบคุมอยู่ที่ประมาณ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ทำการเคลือบฟิล์มบางบนแผ่นกระจกสไลด์เป็นเวลานาน 10 นาที

7. สังเกตสีที่เกิดขึ้นของโกลด์ดีสซาร์จ บันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดทำการเคลือบ

8. ทดสอบฟิล์มบางที่ได้โดยการเช็ดถู และชูดด้วยเล็บ

9. ทำการทดลองใหม่ตั้งแต่ข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนเป่าสารเคลือบเป็น ทอง ไททานเนียม และ ทองแดง

บทที่ 4

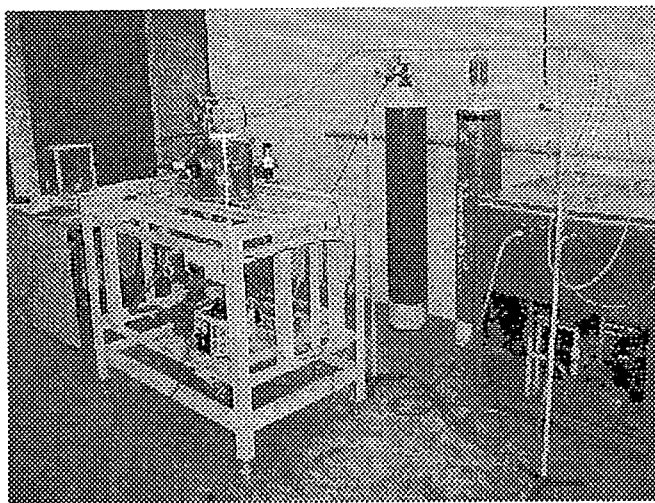
ผลและอภิปรายผลการศึกษา

4.1 บทนำ

ในส่วนผลและอภิปรายผลประกอบด้วย การปรับปรุงระบบเคลือบฟิล์มบาง การทดสอบหาอัตราการเคลือบระบบ ความสม่ำเสมอของระบบเคลือบ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบเคลือบ และการทดสอบการเคลือบฟิล์มบางซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2 การปรับปรุงระบบเคลือบฟิล์มบาง

ระบบเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นระบบเคลือบฟิล์มบางที่คณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้นในปี พ.ศ.2541 เป็นระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน คือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทด และเป้าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า และระบบป้อนแก๊ส (รูปที่ 4.1) ทั้งนี้จากการศึกษาและทดลองการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบเคลือบที่สร้างขึ้นโดยการใช้สารเคลือบชนิดต่างๆ พบว่าระบบเคลือบข้างต้นจะทำงานได้สมบูรณ์มากขึ้นถ้ามีการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ของระบบเคลือบในการศึกษานี้ได้ออกแบบคาโทดใหม่ทำให้ระบบเคลือบนี้เป็นระบบอันทาลานซ์ แมกนีตรอน ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.1 ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบที่ใช้ในโครงการวิจัย

4.2.1 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศสำหรับทำความดันในโครงการวิจัยนี้ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบเดิมคือประกอบด้วยเครื่องสูบลมแบบแพร่ไอ เครื่องสูบลมแบบโรตารี มาตรการวัดความดัน อุปกรณ์วาล์วและข้อต่อต่างๆ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

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

2. เครื่องสูบลมแบบโรตารี 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 ซึ่งสามารถวัดได้ในช่วง 5×10^{-3} - 2×10^{-9} มิลลิบาร์

- หัววัดแบบพิรานีของ Balzers รุ่น TPR010 ซึ่งสามารถวัดได้ในช่วง 1000 - $5,6 \times 10^{-4}$ มิลลิบาร์

3.2 วาล์วและข้อต่อ ประกอบด้วยวาล์วต่างๆ ดังนี้คือ

- วาล์วต่อระหว่างเครื่องสูบลมแบบโรตารีกับเครื่องสูบลมแบบแพร่ไอ และวาล์วต่อระหว่างเครื่องสูบลมแบบโรตารีกับภาชนะสุญญากาศ (Angle valves) ของ Balzers รุ่น EVA016H

- วาล์วสุญญากาศสูง (High vacuum valves) ของ Balzers เป็นแบบ plate valve รุ่น PVA160H

- วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (Venting valve) ของ Balzers รุ่น FVA0101

- วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่โรตารี (air admittance valves) ของ Edwards รุ่น AV10K

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

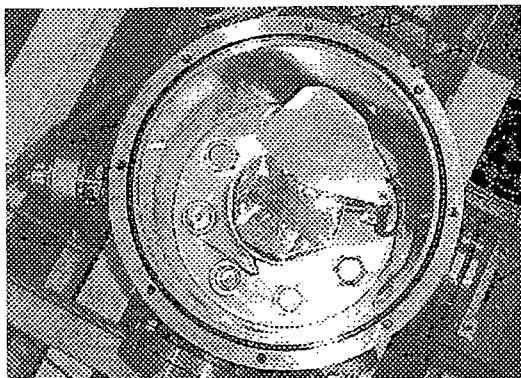
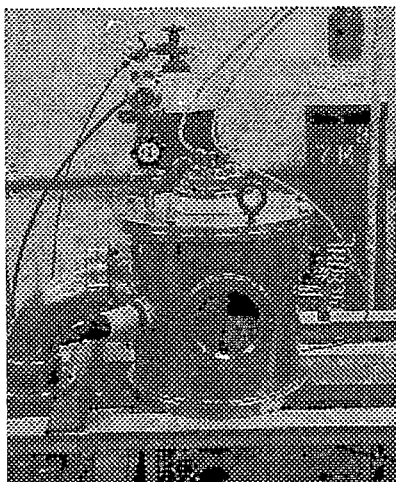
- ข้อต่อสามทาง (stainless steel AISI 316L KIN 1.4404) ของ Edwards รุ่น NW10

4.2.2 ภาชนะสุญญากาศ

ภาชนะสุญญากาศที่ออกแบบสร้างขึ้น ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 3.0 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 23.0 เซนติเมตร สูง 22.0 เซนติเมตร (ปริมาตรประมาณ 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 ในส่วนของช่องเปิดตู้ระบบสุญญากาศนั้นได้ออกแบบให้ภาชนะสุญญากาศมีช่องเปิดสำหรับต่อเข้ากับเครื่องสูบบแบบแพร่ไอทางด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ ขนาด 13.5 เซนติเมตร (ซึ่งใช้ข้อต่อจากภาชนะสุญญากาศเข้าสู่เครื่องสูบบแบบแพร่ไออีกต่อหนึ่ง) สำหรับแผ่นฐาน (base plate) ของภาชนะสุญญากาศ ทำจากสเตนเลสหนา 7.0 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 25 เซนติเมตร และออกแบบมีช่องเปิดขนาด 2.5 เซนติเมตร จำนวน 8 ช่อง สำหรับต่ออุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น ขั้วไฟฟ้า ที่ป้อนแก๊ส ชัตเตอร์ ฯลฯ และที่กลางแผ่นฐานมีหน้าแปลนขนาด 13 เซนติเมตร สำหรับใส่อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นรองชิ้นงานซึ่งสามารถปรับระยะได้

นอกจากส่วนประกอบหลักของระบบแล้ว ภายในภาชนะสุญญากาศยังมีแผ่นรองชิ้นงานสำหรับเคลื่อนนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ยึดติดกับแผ่นฐานซึ่งสามารถปรับระยะห่างจากผิวหน้าเป่าสารเคลื่อนได้ตั้งแต่ 4-15 เซนติเมตร

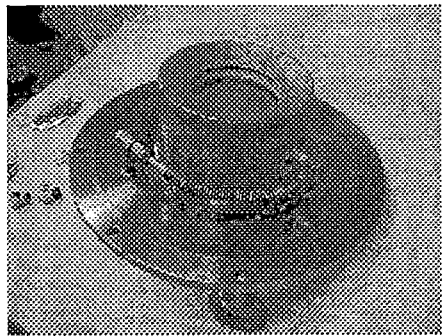
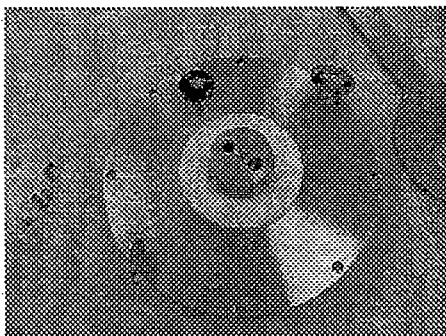


รูปที่ 4.2 ภาชนะสุญญากาศของระบบเคลื่อน

4.2.3 คาโทดและเป้าสารเคลือบ

ระบบเคลือบที่สร้างขึ้นในปีแรกนั้นเป็นระบบเคลือบแบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง ปกติซึ่งจะใช้เหล็กอ่อนเป็นขั้วแม่เหล็กทำให้เส้นแรงแม่เหล็กครบวงจร และมีสนามแม่เหล็กหน้าเป้าสารเคลือบเท่ากับ 370 เกาส์ ในโครงการวิจัยนี้ได้ออกแบบคาโทดใหม่ทำให้ระบบเคลือบเปลี่ยนเป็นระบบอัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (unbalanced magnetron sputtering) ซึ่งตีพิมพ์เผยแพร่ครั้งแรกโดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 มีหลักการดังนี้คือ หากเพิ่มความเข้มของแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งแล้วทำให้สนามแม่เหล็กที่คาโทดไม่สมมาตรจะทำให้ไอออนที่วิ่งเข้าชนวัสดุรองรับมีการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้โดยตรง

สำหรับคาโทดและเป้าสารเคลือบที่ออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ในโครงการวิจัยนี้โครงสร้างส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส (เพื่อป้องกันการเกิดสนิมจากระบบน้ำหล่อเย็น) ยกเว้นเพ็ลลอนซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า และแผ่นปิดหลังซึ่งทำจากทองแดงเท่านั้น (รูปที่ 4.3) โดยคาโทดที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส ทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 114 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการสปีดเตอริงที่เป้าสารเคลือบเท่านั้นจึงได้ออกแบบให้มีคาโทดชนิดครอบตัวคาโทดไว้อีกชั้นหนึ่ง โดยคาโทดชนิดที่สร้างขึ้นนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 122 มิลลิเมตร และเนื่องจากได้ออกแบบให้มีการระบายความร้อนของคาโทดและเป้าสารเคลือบด้วยน้ำ ดังนั้นเพื่อให้สามารถระบายความร้อนได้ดีและเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็นจึงออกแบบให้มีแผ่นปิดหลังติดอยู่ด้านหลังของเป้าสารเคลือบ (ด้านหน้าแม่เหล็ก) ทำจากทองแดง มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 114 มิลลิเมตร โดยยึดด้วยสกรูรอบแผ่นปิดจำนวน 6 จุด สำหรับการยึดส่วนต่างๆ (แผ่นปิดแม่เหล็ก ตัวคาโทด) ให้ติดกันโดยใช้ตัวยึด (clamp) ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสมีลักษณะเป็นวงแหวนเส้นผ่าศูนย์กลาง 114 มิลลิเมตร สำหรับการยึดจะใช้สกรูยาว 6 จุด ร้อยผ่านแผ่นปิด แม่เหล็ก คาโทดไปยังแผ่นปิดบน



รูปที่ 4.3 ลักษณะของคาโทดและเป้าสารเคลือบของระบบเคลือบ

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

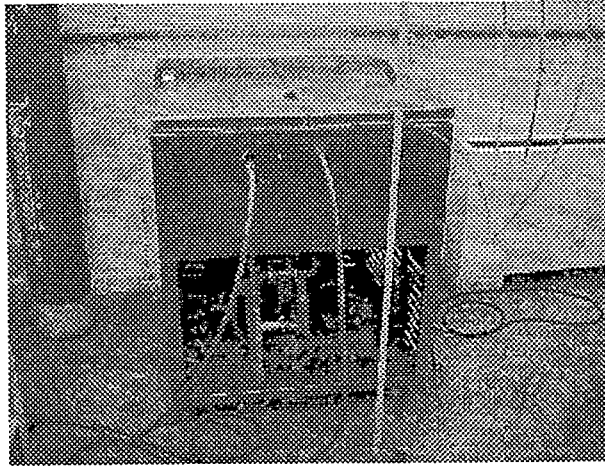
การแยกขั้วไฟฟ้า ได้ใช้เทฟลอนเป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างคาโทดและผนังของภาชนะสุญญากาศ มีลักษณะเป็นรูปวงแหวนหนา 1 เซนติเมตร โดยมีตัวยึดทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสยึดติดกับคาโทดและฝาปิดบน

สนามแม่เหล็ก ในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้แม่เหล็กแบบ NdFeB ในการสร้างสนามแม่เหล็ก และเพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สมมาตรจึงออกแบบให้การวางตัวของแม่เหล็กมีลักษณะดังนี้คือใช้แม่เหล็กวางทั้งแกนกลางของคาโทดและรอบนอกเป็นวงแหวน สำหรับค่าสนามแม่เหล็กวัดที่แผ่นปิดหลังบริเวณแกนกลางจะมีค่าประมาณ 1000 เกาส์ ส่วนบริเวณวงแหวนจะมีค่าประมาณ 490 เกาส์ นอกจากนี้เพื่อให้แก๊สที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มมีความสม่ำเสมอจึงออกแบบให้มีการปล่อยแก๊สที่คาโทซัลด์โดยจะมีท่อนำแก๊สจากวาล์วต่อไปยังตัวคาโทซัลด์เพื่อให้แก๊สสามารถฟุ้งกระจายอย่างสม่ำเสมอบริเวณเป่าสารเคลือบ

4.2.4 ระบบน้ำหล่อเย็น

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

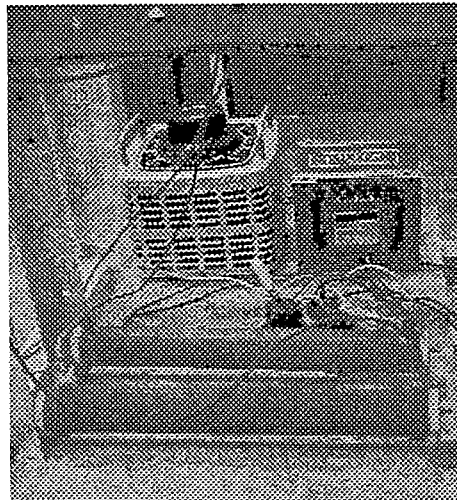
สำหรับถังน้ำทำด้วยสเตนเลสมีตัวถังขนาด 30x30x70 เซนติเมตร (ปริมาตร 63 ลิตร) โดยถังน้ำเย็นนี้จะบรรจุอยู่ในส่วนบนของโครงเครื่องทำความเย็น ด้านบนมีฝาเปิด-ปิด ที่ผนังมีท่อน้ำเย็นเชื่อมต่อกับถังบรรจุน้ำ โดยท่อน้ำเย็นและผนังทั้ง 4 ตลอดจนด้านบนของถังจะหุ้มด้วยโฟมซึ่งเป็นฉนวน ด้านล่างของถังมีท่อน้ำซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องสูบน้ำและมีท่อน้ำทิ้ง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



รูปที่ 4.4 ระบบน้ำหล่อเย็นของระบบเคลือบ

4.2.5 ระบบจ่ายไฟฟ้า

ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบเคลือบที่พัฒนาขึ้นจะใช้สำหรับในส่วนการเคลือบเท่านั้น ซึ่งจะให้คาโทดมีศักย์เป็นลบ ส่วนกราวด์และแผ่นรองชิ้นงานมีศักย์เป็นบวก โดยระบบจ่ายไฟฟ้าที่สร้างจะเป็นระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง แบบฟูลเวฟ (รูปที่ 4.5) ซึ่งสามารถปรับความต่างศักย์ ได้ตั้งแต่ 0-450 โวลต์ กระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 0-2 แอมป์

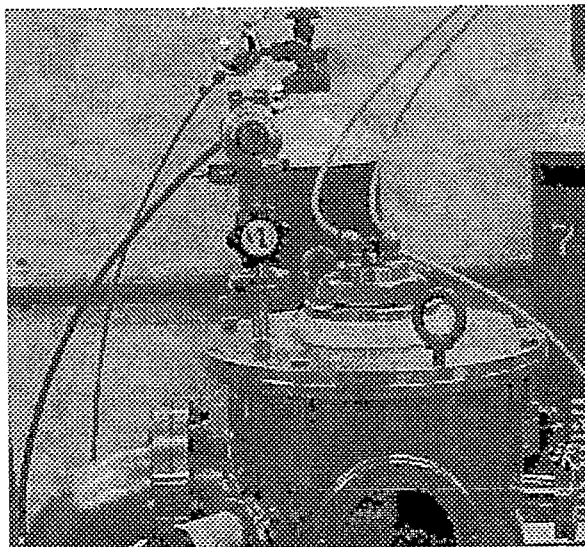


รูปที่ 4.5 ภาคจ่ายไฟฟ้าของระบบเคลือบ

4.2.6 ระบบป้อนแก๊ส

ในการทำงานของระบบเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นนั้นจำเป็นต้องใช้แก๊สในการทำให้เกิดกระบวนการสปีดเตอริงโดยแก๊สที่ใช้ในระบบเคลื่อนที่คือแก๊สอาร์กอน สำหรับระบบป้อนแก๊สของระบบเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยวาล์ว 2 แบบคือ (1) วาล์ว 2 ทาง (วาล์วเปิด-ปิดแก๊ส) ของ nupro รุ่น SS-DSV51 ทำหน้าที่เปิด-ปิดการป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบ (วาล์วนี้เป็นของเก่าที่นำมาดัดแปลงใช้งาน) และ (2) วาล์วรูเข็ม (nidle valve) ของ Edwards รุ่น FCV10K (Extra fine control needle valve) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณของแก๊สที่ปล่อยเข้าสู่ระบบเคลื่อนที่

ทั้งนี้แก๊สอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะถูกป้อนผ่านวาล์วทั้ง 2 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่แผ่นปิดบน และมีท่อนำแก๊สต่อเข้ากับคาโทดชนิด (เป็นการปล่อยแก๊สได้คาโทดชนิด) ซึ่งจะทำการปล่อยแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบฟุ้งกระจายอยู่บริเวณด้านหน้าของเป้าสารเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการสปีดเตอริงที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลื่อนที่อย่างทั่วถึง



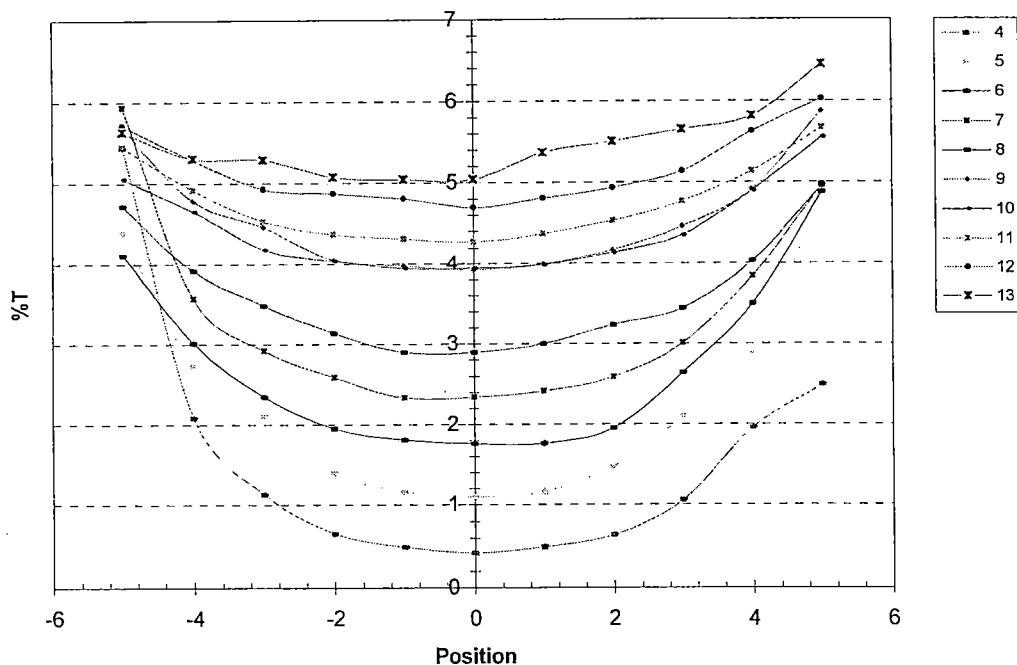
รูปที่ 4.6 ชุดป้อนแก๊สของระบบเคลื่อนที่

4.3 การกระจายตัวของสารเคลือบ

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง ซึ่งจะเป็นผลมาจากความสม่ำเสมอของระบบเคลือบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับคาโทดของระบบเป็นสำคัญ

ได้ทำการทดลองเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมลงบนกระจกขนาด 5"x5" ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบ-วัสดุรองรับ ตั้งแต่ 4-13 เซนติเมตรแล้วนำไปวิเคราะห์หาการส่งผ่านแสง โดยใช้เกณฑ์ดังนี้คือถ้าฟิล์มมีความหนาน้อยจะผ่านแสงได้มาก และถ้าฟิล์มมีความหนามากจะส่งผ่านแสงได้น้อย

จากการศึกษาพบว่าลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบที่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับจะมีการกระจายตัวเป็นวงกลม (โดยมีสมมาตรในแนวรัศมี) เมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่าพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้บริเวณแกนกลางของกระจกจะมีความหนามากที่สุดและเบาบางลงไปตามแนวรัศมี ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดสำหรับชั้นที่มีระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบ-วัสดุรองรับน้อย (ประมาณ 4-8 เซนติเมตร) และเมื่อระยะนี้เพิ่มมากขึ้นพบว่าการกระจายตัวของสารเคลือบเริ่มมีการกระจายมากขึ้น โดยระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบ-วัสดุรองรับ ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำการเคลือบคือที่ระยะเท่ากับ 12 เซนติเมตรจากเป้าสารเคลือบ (รูปที่ 4.7)

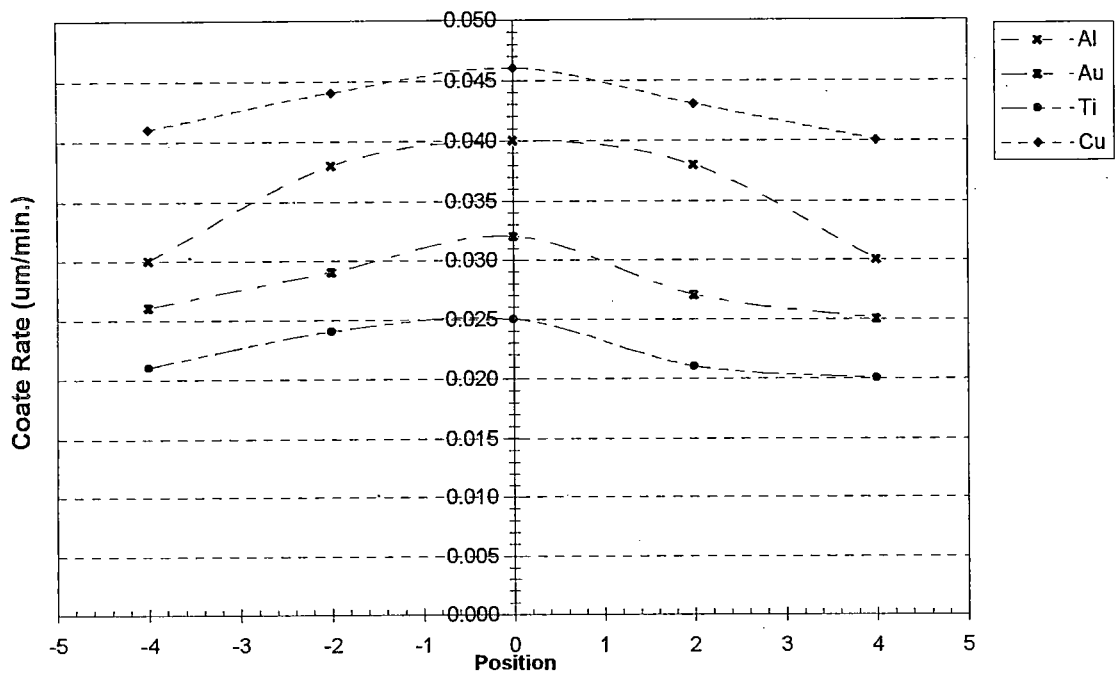


รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของฟิล์มไททาเนียมบนกระจกขนาด 5"x5"

จากการทดสอบการเคลือบฟิล์มไททาเนียมและทองบนกระจกปิดสไลด์ที่วางตามแนวรัศมี (จากซ้ายไปขวา) จำนวน 5 ชั้น พบว่าตำแหน่งที่ 0 (กลางที่วางวัสดุรองรับ) จะมีความหนามากที่สุดและจะลดลงเมื่อระยะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะห่างจากแกนกลางในแนวรัศมีเดียวกัน ความหนาที่ได้จะใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.8)

ตารางที่ 4.1 อัตราเคลือบของฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ

| เข้าสารเคลือบ | อัตราเคลือบของฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ | | | | |
|---------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | -4 | -2 | 0 | 2 | 4 |
| อะลูมิเนียม | 0.030 | 0.038 | 0.040 | 0.038 | 0.030 |
| ทอง | 0.026 | 0.029 | 0.032 | 0.027 | 0.025 |
| ไททาเนียม | 0.021 | 0.024 | 0.025 | 0.021 | 0.020 |
| ทองแดง | 0.041 | 0.044 | 0.046 | 0.043 | 0.040 |



รูปที่ 4.8 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ

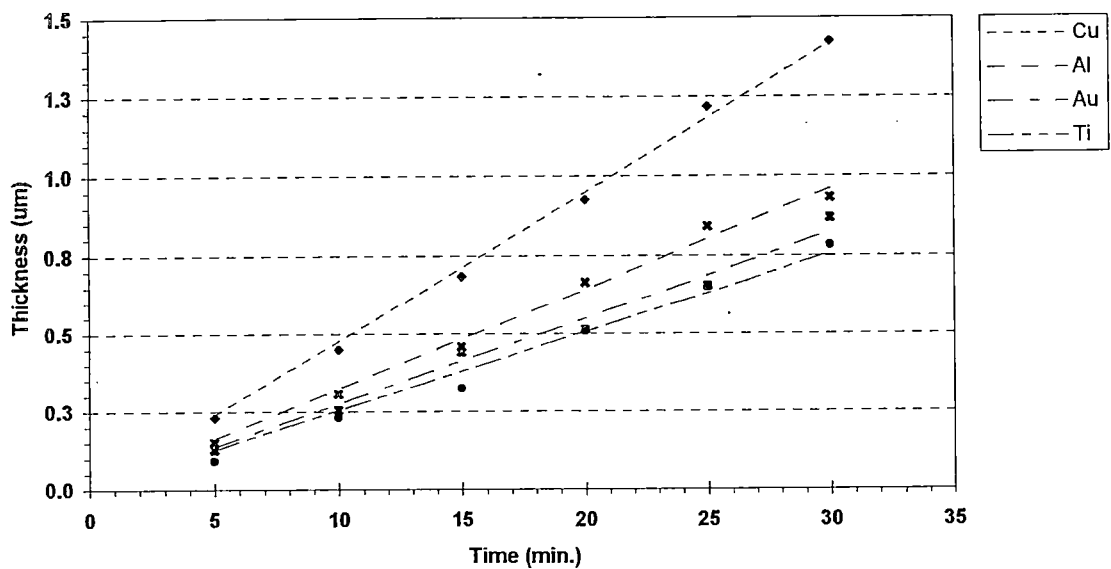
4.4 อัตราเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบเคลือบ

จากการทดลองเคลือบสารเคลือบต่างๆ 4 ชนิดที่ความดันเดียวกันคือ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ ที่ระยะห่างของสารเคลือบ-วัสดุรองรับเดียวกันคือ 12 เซนติเมตร พบว่าทองแดงจะมีอัตราการเคลือบสูงสุดคือประมาณ 0.047 ไมครอนต่อนาที รองลงมาคือ อะลูมิเนียม ทอง และไททานเนียมตามลำดับ

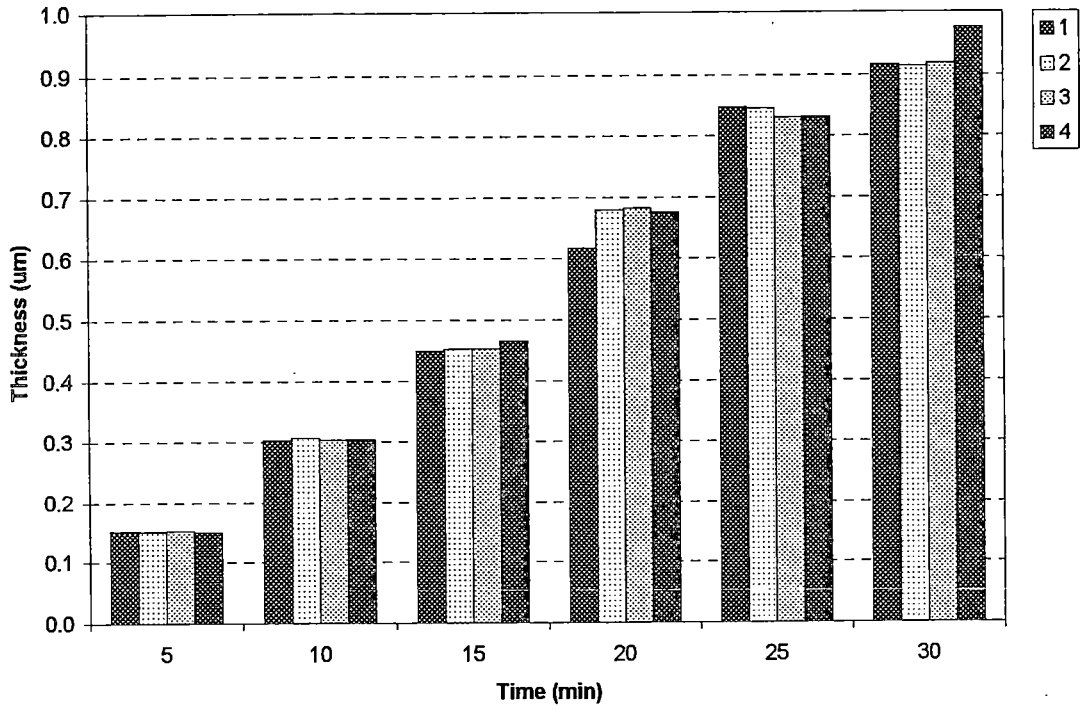
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการเคลือบมาพิจารณาความสม่ำเสมอของระบบเคลือบที่ระยะนี้ โดยใช้กระจกปิดสไลด์จำนวน 4 ชิ้น ในการทดสอบพบว่าความหนาของฟิล์มทั้ง 4 ชนิด ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.10-4.13) ซึ่งสรุปได้ว่าระบบเคลือบนี้ที่ระยะ 12 เซนติเมตรจากหน้าเป่าสารเคลือบจะมีพื้นที่ที่ให้ฟิล์มสม่ำเสมอประมาณ 4x4 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.2 อัตราการเคลือบของสารเคลือบชนิดต่างๆ

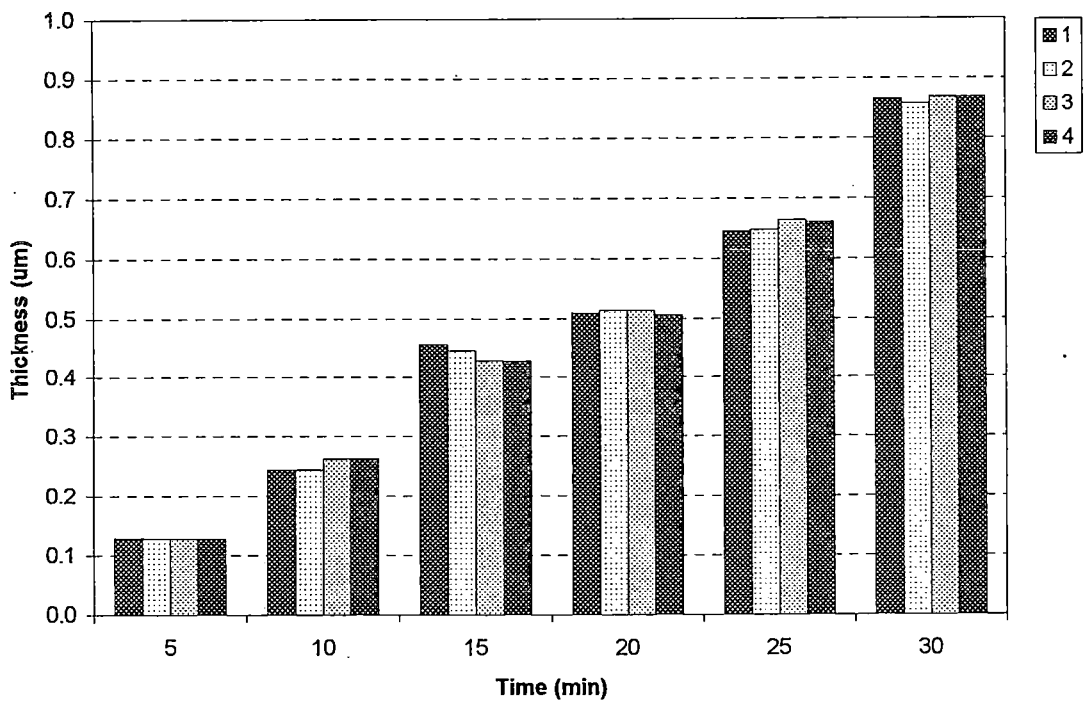
| สารเคลือบ | อัตราการเคลือบ (um/min.) |
|-------------|--------------------------|
| อะลูมิเนียม | 0.032 |
| ทอง | 0.027 |
| ไททานเนียม | 0.025 |
| ทองแดง | 0.047 |



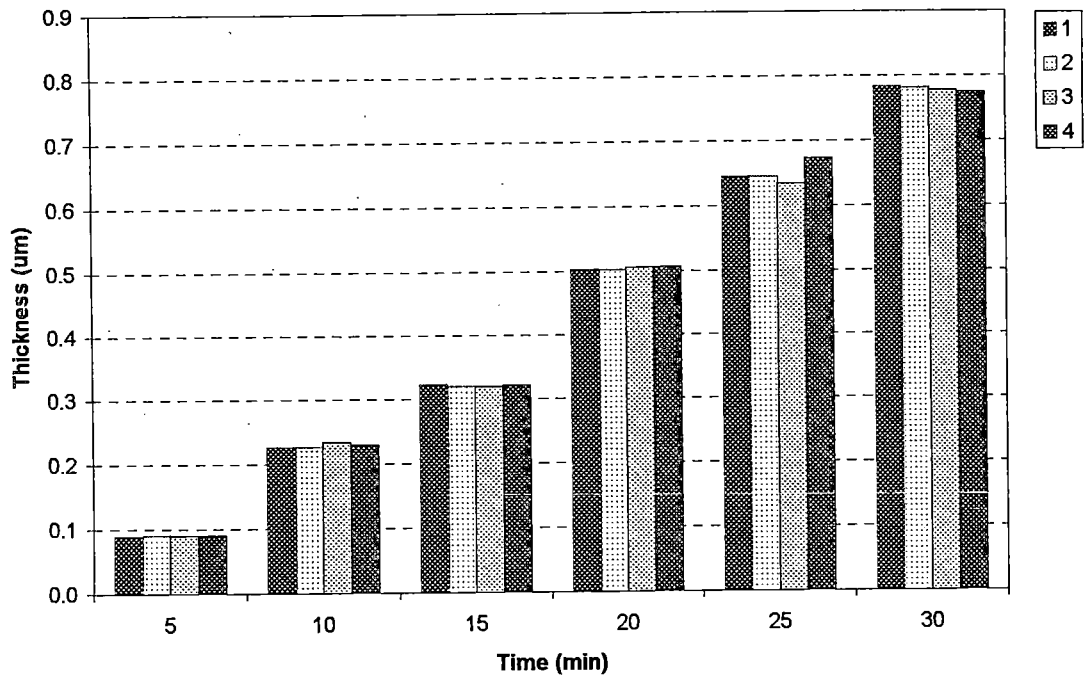
รูปที่ 4.9 อัตราการเคลือบของสารเคลือบชนิดต่างๆ



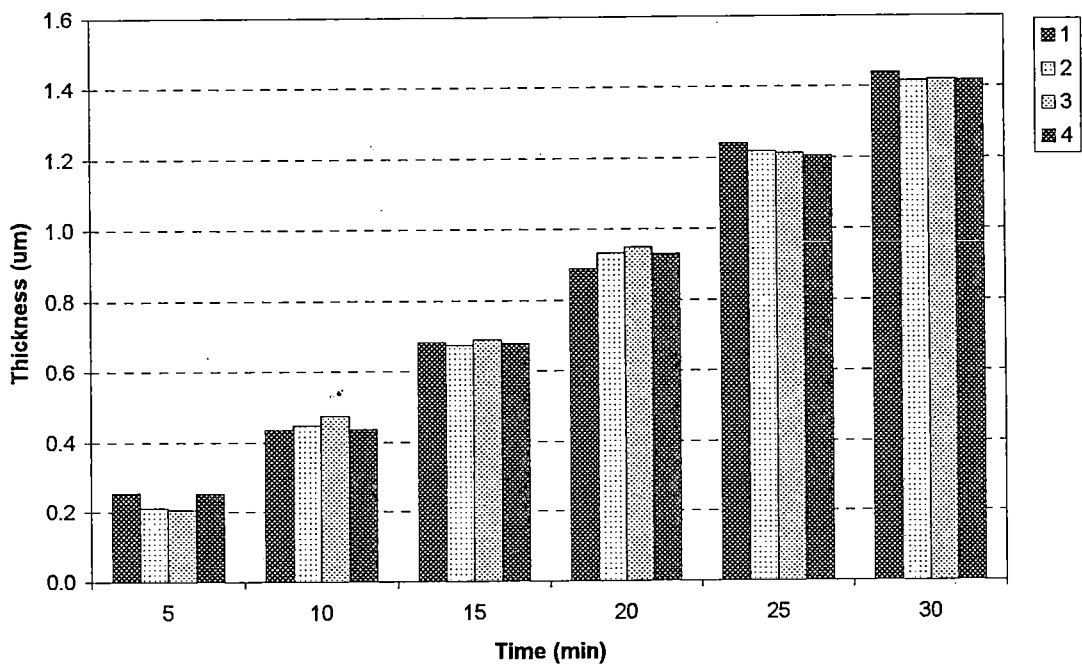
รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มอะลูมิเนียมที่ตำแหน่งและเวลาต่างกัน



รูปที่ 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มทองที่ตำแหน่งและเวลาต่างกัน



รูปที่ 4.12 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มไททานเนียมที่ตำแหน่งและเวลาต่างกัน



รูปที่ 4.13 ลักษณะการกระจายตัวของฟิล์มทองแดงที่ตำแหน่งและเวลาต่างกัน

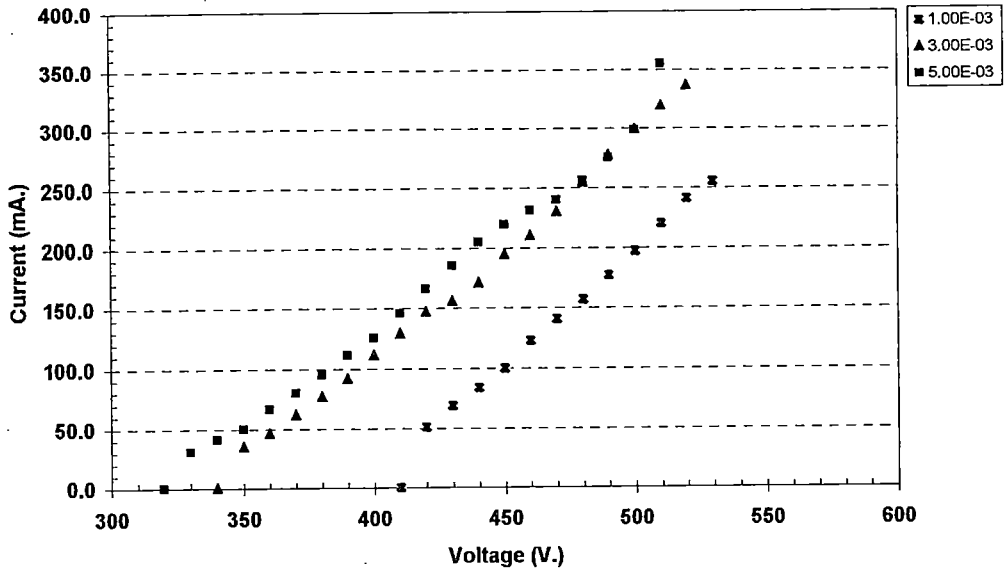
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ในการดิซชาร์จของระบบสปีดเตอร์ริงแสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชันของระบบ โดยสภาพการดิซชาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันดิซชาร์จตามสมการ $I = kV^n$ ทั้งนี้ n จะขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก โดยปกติ n มีค่าระหว่าง 5 ถึง 9 ในแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงแบบทรงกระบอก แต่อาจแตกต่างกันบ้างเมื่อจัดแบบพลาเนียร์แมกนีตรอน k คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงกว้างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ดิซชาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

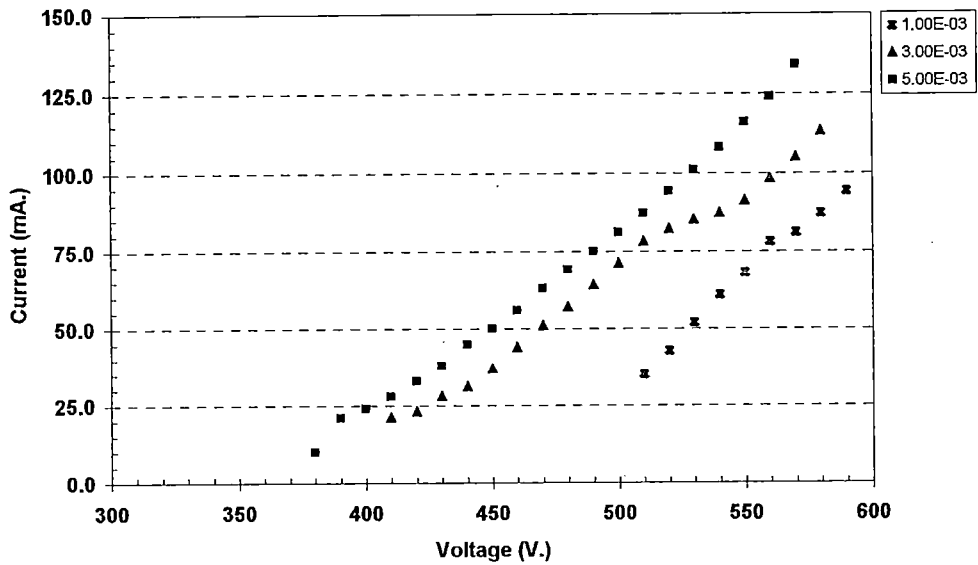
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ไททานเนียมและทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นพบว่าความชันกราฟจะเปลี่ยนค่าไป (รูปที่ 4.14-4.17) ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นนั้น ปริมาณไอออนของแก๊สจะถูกจำกัดด้วยความดันแก๊สในระบบซึ่งทำให้การผลิตอิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดตามไปด้วย ดังนั้นโวลเตจของคาโทดจึงสูงขึ้นเพื่อเร่งไอออนให้ชนคาโทดด้วยพลังงานที่สูงขึ้นสำหรับสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกราฟดังรูปที่ 4.14-4.17 โดยค่า k และ ค่า n ของระบบเคลือบที่ความดันต่างๆ สำหรับเป้าสารเคลือบทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า k และ ค่า n ของระบบเคลือบที่ความดันต่างๆ

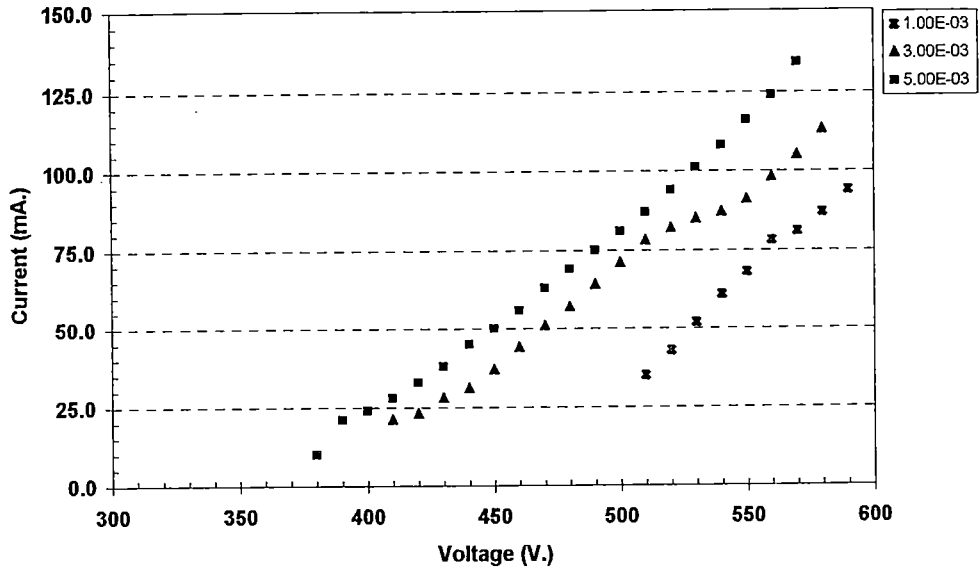
| เป้าสารเคลือบ | ความดัน (มิลลิบาร์) | k | n |
|---------------|---------------------|----------|------|
| อะลูมิเนียม | 1×10^{-3} | 1.57E-16 | 6.70 |
| | 3×10^{-3} | 1.00E-12 | 5.37 |
| | 5×10^{-3} | 4.03E-12 | 5.17 |
| ทอง | 1×10^{-3} | 4.71E-17 | 6.62 |
| | 3×10^{-3} | 4.34E-12 | 4.87 |
| | 5×10^{-3} | 3.09E-13 | 5.33 |
| ไททานเนียม | 1×10^{-3} | 3.54E-16 | 6.79 |
| | 3×10^{-3} | 6.46E-17 | 7.25 |
| | 5×10^{-3} | 3.30E-17 | 7.41 |
| ทองแดง | 1×10^{-3} | 6.14E-16 | 6.46 |
| | 3×10^{-3} | 1.17E-13 | 5.69 |
| | 5×10^{-3} | 6.56E-13 | 5.44 |



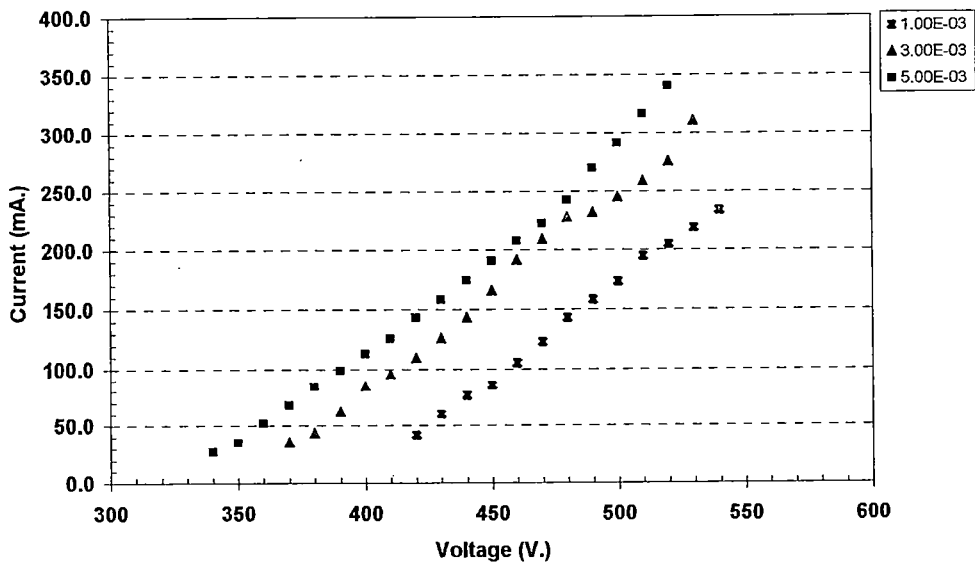
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ
เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ
เมื่อใช้ทองเป็นเป้าสารเคลือบ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ
เมื่อใช้ไททานเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ
เมื่อใช้ทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบ

4.6 การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง

จากการทดสอบเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ โดยใช้เป่าสารเคลือบ 4 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ทอง ไททานเนียมและทองแดง พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบและวัสดุรองรับเท่ากับ 12 เซนติเมตร สามารถเคลือบฟิล์มบางได้เมื่อใช้ความดันในช่วง 1×10^{-3} - 5×10^{-3} มิลลิบาร์ แต่ความดันขณะเคลือบที่เหมาะสมที่สุดคือ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบจะอยู่ในช่วง 350-550 โวลต์

สำหรับสีคาโทดโกลว์ขณะเคลือบของสารเคลือบแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดยอะลูมิเนียมจะมีสีฟ้าอมเทา ทองจะมีสีฟ้าอมส้ม ไททานเนียมจะมีสีฟ้าขาว ส่วนของทองแดงมีสีฟ้าอมเขียว ในส่วนของฟิล์มบางที่ได้พบว่าผลการเคลือบเป็นที่น่าพอใจทั้งนี้เมื่อสังเกตด้วยสายตาพบว่าฟิล์มบางที่ได้มีสีที่แวววาว ซึ่งเป็นสีของเป่าสารเคลือบ และไม่ปรากฏสภาพหมองคล้ำของฟิล์มบางจากโลหะเหล่านี้ และเมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มบางโดยการเช็ดถูด้วยนิ้วมือ ขูดด้วยเล็บ พบว่าทั้งการเช็ดถูและขูดด้วยเล็บไม่สามารถทำให้ฟิล์มบางที่ได้หลุดออก และเมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ในอากาศพบว่าจะมีการเกิดออกไซด์เฉพาะฟิล์มบางทองแดงเท่านั้นส่วนฟิล์มบางอะลูมิเนียม ทอง และไททานเนียมจะยังคงสภาพเหมือนเดิม

ตารางที่ 4.4 ผลการเคลือบฟิล์มบางที่ได้

| เป่าสารเคลือบ | สีของคาโทดโกลว์ | การยึดติดของฟิล์มบาง |
|---------------|-----------------|-------------------------------------|
| อะลูมิเนียม | ฟ้าอมเทา | เช็ดถูไม่ออก ทิ้งไว้ไม่ปรากฏออกไซด์ |
| ทอง | ฟ้าอมส้ม | เช็ดถูไม่ออก ทิ้งไว้ปรากฏออกไซด์ |
| ไททานเนียม | ฟ้าขาว | เช็ดถูไม่ออก ทิ้งไว้ไม่ปรากฏออกไซด์ |
| ทองแดง | ฟ้าอมเขียว | เช็ดถูไม่ออก ทิ้งไว้ปรากฏออกไซด์ |

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

การเคลือบฟิล์มบางบนผิววัสดุเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ต้องการเคลือบ เช่น ให้มีความคงทน ทนทาน หรือ สวมงามมากขึ้น รวมถึงเพื่อการใช้ประโยชน์ในงานอื่นๆ ปัจจุบันการเคลือบฟิล์มบางบนผิววัสดุนี้เป็นกระบวนการที่มีความในหลายด้าน โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการดังนี้คือ (1) เพื่อศึกษาหลักการทํางานและเทคนิคในการออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง แบบดีซี แมกนีตรอน (D.C Magnetron Sputtering) (2) เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการสปัตเตอร์ริงสำหรับสารเคลือบชนิดต่างๆ และ (3) เพื่อพัฒนาบุคลากรทางด้านฟิสิกส์และเทคโนโลยีสุญญากาศ ซึ่งโครงการวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ช่วง (เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี) สำหรับรายงานฉบับนี้เป็นรายงานในช่วงที่สองซึ่งจะเน้นด้านการศึกษาถึงการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบที่สร้างขึ้น อย่างไรก็ตามในปีที่สองนี้ ได้มีการปรับปรุงระบบเคลือบให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นด้วย สำหรับขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยสรุปมีดังนี้

1. การปรับปรุงระบบเคลือบฟิล์มบาง ส่วนนี้เป็นการปรับปรุงระบบเคลือบฟิล์มบางที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นในช่วงแรกซึ่งเป็นแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง โดยมีส่วนประกอบหลักสำคัญดังนี้คือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทดและเป้าสารเคลือบ ระบบนำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า และระบบป้อนแก๊ส ทั้งนี้ส่วนประกอบหลักได้แก่ คาโทด นั้นในโครงการนี้ได้ปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงคาโทดของระบบเคลือบ ทำให้ระบบที่ใช้ในระยะที่สองนี้เปลี่ยนจากระบบ ดีซี บาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง เป็นระบบ ดีซี อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง

สำหรับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการโครงการนี้ยังคงเหมือนในระยะแรกคือมีทั้งที่คณะผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้นใหม่โดยใช้วัสดุภายในประเทศ บางส่วนเป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว และบางส่วนเป็นอุปกรณ์เก่าที่นำมาซ่อมและ/หรือปรับปรุงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้อุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วได้แก่ เกจวัดความดันต่างๆ ส่วนอุปกรณ์เก่าที่นำมาซ่อมให้ทำงานได้ คือ เครื่องสูบลมโรตารี สำหรับระบบสุญญากาศ ส่วนอุปกรณ์เก่าที่นำมาดัดแปลงได้แก่ ระบบป้อนแก๊ส สำหรับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างขึ้นใหม่ทั้งหมด ได้แก่ คาโทดและเป้าสารเคลือบ ภาชนะสุญญากาศ ระบบนำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า

2. การหาอัตราเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบเคลือบฟิล์มบาง ชั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบซึ่งจะแสดงถึงความสม่ำเสมอของระบบเคลือบตลอดจนถึงอัตราการเคลือบของระบบโดยใช้เป้าสารเคลือบ 4 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ทองไทเทเนียม ทองแดง ซึ่งเคลือบในเวลาต่างๆ กัน โดยจะพิจารณา (1) การกระจายตัวของสารเคลือบเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบในลักษณะของภาพรวมโดยการเคลือบฟิล์มบางบนกระจกขนาด 5X5 นิ้ว ที่ระยะระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับในช่วง 4-13 เซนติเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อดูเปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน โดยพิจารณาว่าที่ความหนาหลายๆ เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านจะมีค่าน้อย (2) การหาอัตราเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบเคลือบจากตอนที่ 1 จะทำให้ทราบว่าควรใช้ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับเท่าใด ในตอนนี้จะทำการเคลือบสารที่ระยะจากตอนที่ 1 บนกระจกปิดสไลด์ซึ่งวางไว้ 2 แบบ คือตอนแรกวางเรียงจากซ้ายไปขวา 5 ชั้น โดยชั้นกลางเป็นตำแหน่ง 0 และซ้ายเป็น -2 และ -4 ส่วนทางขวาเป็น 2 และ 4 ตอนที่สองจะวางกระจกปิดสไลด์คลุมพื้นที่ที่คาดว่าจะมีการกระจายตัวของสารเคลือบเหมาะสมที่สุดจำนวน 4 ชั้นจากนั้นจึงนำฟิล์มที่ได้ไปอัตราเคลือบของสารที่ระยะที่กำหนดแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

3. การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ตอนนี้จะเป็นการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ เพื่อหาประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชันของระบบโดยใช้เป้าสารเคลือบ 4 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ทองไทเทเนียม ทองแดง ที่ความดันต่างๆ

4. การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง เป็นการทดสอบเคลือบฟิล์มบางที่สภาวะต่างๆ โดยใช้ความดันขณะเคลือบฟิล์มบางในช่วง 1×10^{-3} - 5×10^{-3} มิลลิบาร์ และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบในช่วง 300-600 โวลต์ โดยเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ โดยใช้เป้าสารเคลือบ 4 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ทองไทเทเนียมและทองแดง

5.2 สรุปผล

ผลการศึกษาในโครงการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.2.1 การออกแบบและสร้างระบบเคลือบ

ระบบเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นระบบเคลือบฟิล์มบางที่คณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้นในปี พ.ศ.2541 ซึ่งเป็นระบบเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน คือ ระบบสุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศ คาโทดและเป้าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า และระบบป้อนแก๊ส ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ออกแบบสร้างคาโทดของระบบ

เคลือบดังกล่าวใหม่เป็นระบบ ดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ระบบเคลือบที่ปรับปรุงแล้ว มีลักษณะพอสรุปได้ดังนี้คือ

1. ระบบสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ของ Balzers รุ่น Oil Diffusion Pump DIF 063 L เครื่องสูบกแบบโรตารี ใช้ของ Edwards รุ่น E2M8 (2 state) ระบบวัดความดัน ใช้ของ Balzers โดยหัววัดแบบเพนนิ่งคือ รุ่น IKR050 และหัววัดแบบพิรานีคือ รุ่น TPR010 สำหรับวาล์วและข้อต่อ ส่วนใหญ่เป็นของ Balzers ซึ่งเป็นอุปกรณ์เดิมที่มีอยู่แล้วนำมาประกอบรวมกัน โดยระบบสุญญากาศที่ออกแบบสร้างสามารถทำความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงถึง 9.1×10^{-6} มิลลิบาร์

2. ภาชนะสุญญากาศ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 3.0 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 23.0 เซนติเมตร สูง 22.0 เซนติเมตร (ปริมาตรประมาณ 9.14 ลิตร) มีช่องหน้าต่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 เซนติเมตร จำนวน 1 ช่อง ฝาปิดบนของภาชนะสุญญากาศมีช่องสำหรับใส่คาโทดและช่องป้อนแก๊ส นอกจากนี้ภาชนะสุญญากาศมีหน้าแปลนขนาด 4 เซนติเมตร (2 ช่อง) สำหรับใส่หัววัดแบบเพนนิ่ง และขนาด 3 เซนติเมตร (2 ช่อง) สำหรับใส่หัววัดแบบพิรานี ในส่วนของช่องเปิดสู่ระบบสุญญากาศมีขนาด 13.5 เซนติเมตร อยู่ด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ เพื่อต่อเข้ากับเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ สำหรับแผ่นฐานของภาชนะสุญญากาศ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 7.0 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 25 เซนติเมตร มีช่องเปิดขนาด 2.5 เซนติเมตร จำนวน 8 ช่อง สำหรับต่ออุปกรณ์เพิ่มเติม กลางแผ่นฐานมีหน้าแปลนขนาด 13 เซนติเมตร สำหรับใส่อุปกรณ์ติดตั้งแผ่นรองชิ้นงานซึ่งสามารถปรับระยะได้นอกจากนี้ภายในภาชนะสุญญากาศยังมีแผ่นรองชิ้นงานสำหรับเคลือบนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สามารถปรับระยะห่างจากผิวหน้าเป่าสารเคลือบได้ตั้งแต่ 4-15 เซนติเมตร

3. คาโทดและเป่าสารเคลือบ โครงสร้างส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสเช่นเดิม ในส่วนที่เปลี่ยนแปลงคือส่วนของแม่เหล็กซึ่งในโครงการนี้ใช้แม่เหล็กแบบ NdFeB และเพื่อให้สนามแม่เหล็กมีลักษณะไม่สมมาตรจึงออกแบบให้การวางตัวของแม่เหล็กมีลักษณะดังนี้ คือ ใช้แม่เหล็กวางทั้งแกนกลางของคาโทดและรอบนอกเป็นวงแหวน สำหรับสนามแม่เหล็กวัดที่ backing plate บริเวณแกนกลางจะมีค่าประมาณ 1000 เกาส์ ส่วนบริเวณวงแหวนจะมีค่าประมาณ 490 เกาส์ สำหรับส่วนอื่นยังคงมีลักษณะเช่นเดิม โดยคาโทดที่ปรับปรุงใหม่ยังคงสร้างขึ้นจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 114 มิลลิเมตร มีคาโทดชนิดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 122 มิลลิเมตร มีการระบายความร้อนของคาโทดและเป่าสารเคลือบด้วยน้ำ โดยมีแผ่นปิดหลังติดอยู่ด้านหลังของเป่าสารเคลือบ (ด้านหน้าแม่เหล็ก) ทำจากทองแดง มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 114 มิลลิเมตร โดยยึดด้วยสกรูรอบแผ่นปิดจำนวน 6 จุด สำหรับการยึดส่วนต่างๆ (แผ่นปิด แม่เหล็ก ตัวคาโทด) ให้ติดกันโดยใช้ตัวยึด (clamp) ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสมีลักษณะเป็นวงแหวน เส้นผ่า

ศูนย์กลาง 114 มิลลิเมตร สำหรับการยึดจะใช้สกรูยาว 6 จุด ร้อยผ่านแผ่นปิด แม่เหล็ก ตัวคาโทด ไปยังแผ่นปิดบนสำหรับการแยกขั้วไฟฟ้าใช้เพฟลอนเป็นฉนวนไฟฟ้ากันระหว่างคาโทดและผนังโลหะของภาชนะสุญญากาศ

4. ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบน้ำหล่อเย็นที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในระบบนี้จะถูกนำไปใช้งาน 3 ส่วนหลัก คือ ใช้ในการหล่อเย็นคาโทดและเป่าสารเคลือบและส่วนบนของ plate valve ของเครื่องสุบแพร์ไอ โดยระบบน้ำหล่อเย็นที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเครื่องทำความเย็นและถังน้ำขนาด 30x30x70 เซนติเมตร (ปริมาตร 63 ลิตร) โดยเครื่องทำความเย็นประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ขนาด 0.5 แรงม้า เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตัวขยายและเครื่องควบแน่น ซึ่งประกอบด้วยแผงรังผึ้งและพัดลมสำหรับระบายความร้อนของท่อร้อน ท่อพักน้ำยาและตัวทำให้แห้ง การไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นระหว่างบริเวณที่ต้องการกับถังน้ำหล่อเย็นทำได้โดยใช้ปั้มน้ำขนาด 125 วัตต์ 220 โวลต์ 50 Hz (อัตราการหมุน 2850 รอบต่อนาที อัตราการปั้มน้ำ 42 ลิตรต่อนาที) ด้านล่างของเครื่อง ได้ติดตั้งล้อเลื่อนเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย

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

6. ระบบป้อนแก๊ส ประกอบด้วยวาล์ว 2 ทาง (วาล์วเปิด-ปิดแก๊ส) ของ mupro รุ่น SS-DSV51 ทำหน้าที่เปิด-ปิดการป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบ และ วาล์วเข็ม ของ Edwards รุ่น FCV10K (Extra fine control needle valve) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณของแก๊สที่ปล่อยเข้าสู่ระบบเคลือบ โดยแก๊สอาร์กอนที่เข้าสู่ระบบจะถูกป้อนผ่านวาล์วทั้ง 2 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่แผ่นปิดบนและมีท่อนำแก๊สต่อเข้ากับคาโทดซิลด์ (เป็นการปล่อยแก๊สใต้คาโทดซิลด์) ทำให้แก๊สอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบฟุ้งกระจายอยู่บริเวณด้านหน้าของเป่าสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอร์ที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบอย่างทั่วถึง

5.2.2 อัตราการเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบเคลือบ

สมบัติที่สำคัญระบบเคลือบคืออัตราการเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบเคลือบ ซึ่งจากการศึกษาในโครงการนี้มีข้อสรุปดังนี้คือ

1. การกระจายตัวของสารเคลือบ ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่าลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบที่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับจะมีการกระจายตัวเป็นวงกลม (โดยมีสมมาตรในแนวรัศมี) เมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่าพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้บริเวณแกนกลางของกระจกจะมีความหนามากที่สุดและเบาบางลงไปตามแนวรัศมี โดยปรากฏการณ์นี้จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดสำหรับชิ้นที่มี

ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบ-วัสดุรองรับน้อย (ประมาณ 4-8 เซนติเมตร) และเมื่อระยะนี้เพิ่มมากขึ้นพบว่าการกระจายตัวของสารเคลือบเริ่มมีการกระจายมากขึ้นกล่าวคือมีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบ-วัสดุรองรับที่เหมาะสมที่สุด 12 เซนติเมตรจากเป่าสารเคลือบ

2. อัตราการเคลือบและความสม่ำเสมอของระบบเคลือบ จากการศึกษาพบว่าทองแดงจะมีอัตราการเคลือบสูงสุดคือ 0.047 ไมครอน/นาที่ รองลงมาคือ อะลูมิเนียม ทอง และไททาเนียม ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการเคลือบมาพิจารณาความสม่ำเสมอของระบบเคลือบที่ระยะนี้โดยใช้กระจกปิดสไลด์จำนวน 4 ชิ้น ในการทดสอบพบว่าความหนาของฟิล์มทั้ง 4 ชนิด ที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสรุปได้ว่าระบบเคลือบนี้ที่ระยะ 12 เซนติเมตรจากหน้าเป่าสารเคลือบจะมีพื้นที่ที่ให้ฟิล์มสม่ำเสมอประมาณ 4x4 เซนติเมตร

5.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ในการดิสชาร์จของระบบสปีดเตอริง แสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชันของระบบ จากการศึกษาพบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นพบว่าความชันกราฟจะเปลี่ยนค่าไป เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นนั้น ปริมาณไอออนของแก๊สจะถูกจำกัดด้วยความดันแก๊สในระบบซึ่งทำให้การผลิตอิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดตามไปด้วย ดังนั้นโวลเตจของคาโทดจึงสูงขึ้นเพื่อเร่งไอออนให้ชนคาโทดด้วยพลังงานที่สูงขึ้น สำหรับสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกราฟ

5.2.4 การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง

จากการทดสอบเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ โดยใช้เป่าสารเคลือบ 4 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ทอง ไททาเนียมและทองแดง พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบและวัสดุรองรับเท่ากับ 12 เซนติเมตร สามารถเคลือบฟิล์มบางได้เมื่อใช้ความดันในช่วง 1×10^{-3} - 5×10^{-3} มิลลิบาร์แต่ความดันขณะเคลือบที่เหมาะสมที่สุดคือ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบจะอยู่ในช่วง 350-550 โวลต์ สำหรับสีคาโทดโกลว์ขณะเคลือบของสารเคลือบแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดย อะลูมิเนียมจะมีสีฟ้าอมเทา ทองจะมีสีฟ้าอมส้ม ไททาเนียมจะมีสีฟ้าขาว ส่วนทองแดงมีสีฟ้าอมเขียว ในส่วนของฟิล์มบางที่ได้พบว่าผลการเคลือบเป็นที่น่าพอใจทั้งนี้เมื่อสังเกตด้วยสายตาพบว่าฟิล์มบางที่ได้มีสีที่แวววาว ซึ่งเป็นสีของเป่าสารเคลือบ และไม่ปรากฏสภาพหมองคล้ำของฟิล์มบางจากโลหะเหล่านี้ และเมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มบางโดยการขีดถูด้วยนิ้วมือ ขูดด้วยเล็บ พบว่าทั้งการขีดถูและขูดด้วยเล็บไม่สามารถทำให้ฟิล์มบางที่ได้หลุดออก และเมื่อปล่อยทิ้งไว้ในอากาศพบว่าจะมีการเกิดออกไซด์เฉพาะฟิล์มบางทองแดงเท่านั้นส่วนฟิล์มบางอะลูมิเนียม ทอง และไททาเนียมจะยังคงสภาพเหมือนเดิม

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาครั้งนี้มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. การศึกษาครั้งต่อไปควรรศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อการยึดติดของฟิล์ม เช่น อุณหภูมิของวัสดุรองรับ หรือการเตรียมผิวในลักษณะต่างๆ
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบฟูลเวฟธรรมดาไม่สามารถรักษากระแสให้คงที่ได้ ดังนั้นควรปรับปรุงแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้เป็นแบบรักษากระแสให้คงที่ได้เพราะจะมีผลต่อการดิสชาร์จ
3. Port ต่างๆ ของภาชนะสุญญากาศควรเป็นแบบ metal seal เพื่อให้สามารถเก็บภาวะสุญญากาศได้ดียิ่งขึ้น
4. ระบบน้ำหล่อเย็นที่ใช้ควรแยกเป็น 2 ชุดสำหรับ baffle ของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ และสำหรับคาโทด
5. ควรมีอุปกรณ์ควบคุมการปล่อยแก๊สอย่างละเอียด
6. น้ำมันสำหรับเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ควรใช้แบบ DC705 หรือ sentovac ซึ่งจะทำได้ดียิ่งขึ้น
7. ควรมีห้องปฏิบัติการเฉพาะที่เป็น clean room

139071

บรรณานุกรม

1. Wasa, K. and Shigeru Hayakawa, 1992, Handbook of sputter deposition technology : principles, technology and applications, New Jersey, Noyes Publications.
2. Bunshah, R.F., 1994, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, 2nd ed, New Jersey, Noyes Publications.
3. Smith, D.L., 1995, Thin-film deposition : principle and practice, McGraw-Hill, New York.
4. Chapman, B., 1980, Glow Discharge Processes, New York, John Wiley & Sons.
5. สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์, พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และพิชญ เจริญสมศักดิ์, 2529, “ การวิจัยและพัฒนากาเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์,” รายงานการวิจัยประจำปี 2529 ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
6. Vossen, J.L. and W. Kerns, 1978, Thin Film Processes, Academic Press, New York.
7. Maissel, L.I. and R. Gland, 1970, Handbook of Thin Film Technology, New York, McGraw-Hill.
8. Bunshah, R.F., 1982, Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, New Jersey, Noyes Publications.
9. Munz, W.D., 1991, "The Unbalanced Magnetron : Current Status of Development", Surf. Coat. Technol., Vol 48, pp.81-94.
10. Sproul, W.D., 1992, "Unbalanced Magnetron Sputtering", 35th Annual Technical Conference Proceedings, Society of Vacuum Coaters, pp.236-239.
11. Schuegraf K.K. 1988. Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques : Principles, methods, equipment, and applications. Noyes Publications. New Jersey.