



รายงานโครงการฉบับสมบูรณ์

โครงการการวิจัยและพัฒนา การเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสเปตเตอริง ตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2

โดย

รศ.ดร.พิเศษฐ ลิ้มสุวรรณ

หัวหน้าโครงการ

นายธน์ธนา รัตนะ

ผู้ช่วยวิจัย

กันยายน 2547

รายงานโครงการฉบับสมบูรณ์

โครงการการวิจัยและพัฒนา การเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสเปตเตอริง ตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2

คณะผู้ดำเนินงาน	สังกัด
1. รศ.ดร.พิเชษฐ ลิมสุวรรณ	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. นายธนาธิป รัตนะ	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดย
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
ร่วมกับ
สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สารบัญ

	หน้า
สรุปโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ง
Abstract	ง
1. บทนำ	1
1.2 ความเป็นมาของโครงการ	5
1.3 ปัญหาของผู้ประกอบการ	6
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	6
2. ทฤษฎี	
2.1 สปัตเตอริง	7
2.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ	8
2.3 ค่ายึดของสปัตเตอริง	8
2.4 ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปัตเตอริง	12
2.5 ขบวนการกาซดิสชาร์จ	15
2.6 ระบบการสปัตเตอริงแบบ ดี ซี ไดโอดสปัตเตอริง	20
2.7 การเพิ่มอัตราการเกิดสปัตเตอริง	22
ก. ไตรโอดสปัตเตอริง	22
ข. แมกนีตรอนสปัตเตอริง	23
ค. อาร์ เอฟ สปัตเตอริง	26
2.8 การเคลือบสารหลายชนิดพร้อมกัน	30
2.9 รีแอคทีฟ สปัตเตอริง	31
2.10 ขบวนการไอออนเพลทติง	33
2.11 การเคลือบสารแบบ Activated Reactive Evaporation	35
2.12 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบพลาสมา แมกนีตรอนสปัตเตอริง และอิทธิพลต่อคุณสมบัติฟิล์มเคลือบ	36
2.12.1 ส่วนประกอบของคาโทดและเป้าสารเคลือบ	36
2.12.1.1 ระบบน้ำหล่อเย็น	36
2.12.1.2 ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง และรอยต่อวงจรไฟฟ้า	38
2.12.1.3 สนามแม่เหล็ก	38
2.12.1.4 ซีลด์คาโทด และสม่าเสมอของฟิล์มเคลือบ	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12.1.5 วัสดุที่ใช้ทำคาโทด	43
2.12.1.6 วัสดุทำเป้าสารเคลือบ	43
2.12.2 การออกแบบที่วางชิ้นงานหรือแผ่นรองรับ	44
2.12.3 ระบบสุญญากาศ	46
2.12.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า	47
2.12.4.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดี ซี	48
2.12.4.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูง	48
2.12.5 ระบบป้องกันและอิทธิพลต่อคุณสมบัติฟิล์ม	49
2.13 ลักษณะจำเพาะตัวของระบบสปีดเตอริง	53
2.13.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ กระแสไฟฟ้า และ ความดันก๊าซในระบบพลาสมา แมกนีตรอนสปีดเตอริง	53
2.13.2 อัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบ	55
2.13.3 ขีดจำกัดของอัตราการเคลือบ	57
2.14 คุณสมบัติ โครงสร้างสารประกอบของไททาเนียมไนไตรด์และการประยุกต์ใช้งาน	59
2.14.1 สีและโครงสร้างสารประกอบของไททาเนียมไนไตรด์	59
2.14.2 ความต้านทานไฟฟ้าและโครงสร้างของไททาเนียมไนไตรด์	63
2.14.3 ความแข็งและทนต่อการสึกหรอของไททาเนียมไนไตรด์	64
2.14.4 คุณสมบัติอื่น ๆ ของไททาเนียมไนไตรด์และการประยุกต์ใช้งาน	69
2.15 สถานภาพการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	70
3. การออกแบบสร้างและการทดสอบระบบ	
3.1 รายละเอียดของเครื่องสปีดเตอริงสำหรับงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ	76
3.2 การทดลองระบบสุญญากาศ	79
3.3 การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	83
3.4 ผลการทดลองเมื่อใช้เป้าอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว	85
3.5 ผลการทดลองเมื่อใช้เป้าอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว	89
3.6 ผลการทดลองเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการให้ศักย์ ไฟฟ้าไบแอส (V_{bias}) ชิ้นงานในระหว่างการเคลือบฟิล์ม	91
3.7 ผลการทดลองการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแม่เหล็กให้มีความเข้มสนามแม่เหล็กในคาโทดสูงขึ้น	92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8	การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ (TiN)	96
3.9	ผลของอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน	96
3.10	โครงสร้างภาคตัดขวางของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์	98
3.11	การวัดสีของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์	102
3.12	การศึกษาการจับกันทางพันธะเคมีระหว่างไททาเนียม กับ ไนโตรเจนของไททาเนียมไนไตรด์	103
3.13	ความแข็งระดับนาโนเมตรของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์	104
3.14	การเคลือบฟิล์มบางทองคำ	109
4.	การออกแบบสร้างเครื่องสปีดเตอริงขนาดอุตสาหกรรม	
4.1	การออกแบบ	110
4.2	การสร้างภาชนะสุญญากาศ	117
4.3	ระบบของเครื่องสปีดเตอริง	120
4.4	ขั้นตอนการประกอบส่วนต่าง ๆ เป็นระบบสปีดเตอริง	123
4.5	ขั้นตอนการตรวจสอบรอยรั่วของระบบสุญญากาศ	128
5.	รายละเอียดของเครื่องสปีดเตอริง	
5.1	ภาชนะสุญญากาศ (Chamber) และหัวคาโทด (Cathode)	133
5.2	ระบบปั๊มสุญญากาศ	134
5.3	วาล์วและข้อต่อต่าง ๆ	136
5.4	ระบบควบคุมระบบปั๊มสุญญากาศ	137
5.5	ระบบวัดความดัน	140
5.6	ระบบป้อนแก๊ส	143
5.7	ระบบควบคุมการจ่ายไฟฟ้า	144
5.8	ระบบนิวมาติก	145
5.9	ระบบน้ำหล่อเย็น	146

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6. ขั้นตอนการทำงานของเครื่อง	
6.1 วิธีการสร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ	148
ตอนที่ 1 การเปิดระบบควบคุมและตรวจสอบสถานะเริ่มต้นของระบบควบคุม	148
ตอนที่ 2 การสร้างสภาวะสุญญากาศปานกลาง (10^{-2} mbar)	149
ตอนที่ 3 การสร้างสภาวะสุญญากาศสูง (10^{-6} mbar)	152
ตอนที่ 4 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง	156
ตอนที่ 5 ขั้นตอนการปิดเครื่อง	158
6.2 การทดลองเคลือบฟิล์มบางโลหะ	159
เอกสารอ้างอิง	163

สรุปโครงการ (Executives Summary)

1. ชื่อโครงการ การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสปีดเตอริง
2. หัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด
 รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิมสุวรรณ
 Assoc. Prof. Dr.Pichet Limsuwan
 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 91 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม.10140
3. สาขาที่ทำการวิจัย การพัฒนาความเข้มแข็งของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับไทย
4. งบประมาณทั้งโครงการ -
5. ระยะเวลาดำเนินงาน 36 เดือน

6. ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

6.1 ความเป็นมาของโครงการ

คณะผู้วิจัยโดย ดร.พิเชษฐ ลิมสุวรรณ จากภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศด้วยวิธีต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 2526 มาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เช่นวิธีการระเหยสารในสุญญากาศ วิธีสปีดเตอริงและวิธีใช้ไอออนช่วย โดยแต่ละวิธีอาจจะเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานแต่ละด้าน เช่น การระเหยสารและวิธีใช้ไอออนช่วยจะเหมาะกับการเคลือบฟิล์มบางบนอุปกรณ์หรือชิ้นงานทางด้านแสง ส่วนสปีดเตอริงจะเหมาะกับการเคลือบฟิล์มโลหะหรือการเคลือบผิวแข็ง

ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเซรามิกที่มีความแข็ง ทนทานต่อสารเคมี และความเสียดทาน นอกจากนั้นยังเป็นสีทองที่สวยงาม จากคุณสมบัติเหล่านี้ ไททาเนียมไนไตรด์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมากมาย โดยการเคลือบฟิล์มบางของไททาเนียมไนไตรด์ลงบนชิ้นงาน เช่นการเคลือบผิวแข็งของดอกสว่านและมีดกึ่ง ส่วนคุณสมบัติที่เป็นสี

ทองของไททาเนียมไนไตรด์ได้ถูกนำมาใช้ในการเคลือบเครื่องประดับ เช่น เข็มกลัด ตุ่มหู สร้อย สายนาฬิกา และกรอบแว่นตา เป็นต้น ซึ่งให้ทั้งสีทองที่สวยงามและผิวแข็งทนทานต่อการขีดข่วน

การเคลือบผิวแข็งของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ได้ดำเนินการวิจัยระดับห้องปฏิบัติการโดย รศ.ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ มาตั้งแต่ปี 2530 และประสบความสำเร็จเมื่อไม่นานมานี้ แต่เนื่องจากว่าเครื่องเคลือบมีขนาดเล็กเพราะเป็นเพียงระดับงานวิจัย ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความพร้อมที่จะพัฒนาการเคลือบเข้าสู่ระดับอุตสาหกรรมหรือพัฒนาเครื่องเคลือบให้มีขนาดใหญ่ได้ทันที ซึ่งเป็นการนำ know how ต่าง ๆ ที่ได้เรียนรู้มาจากงานวิจัยในอดีตมาใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ลงบนเครื่องประดับด้วยวิธีสแปตเตอร์ซึ่งเป็นกระบวนการเคลือบชิ้นงานในระบบสุญญากาศ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะแกสิ่งแวดล้อม เหมือนเช่นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) เพราะวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมี และภายหลังการเคลือบของเสียต่าง ๆ ทางโรงงานจะต้องทิ้งลงตามแหล่งน้ำตามลำคลองหรือแม่น้ำ ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษแกสิ่งแวดล้อม ดังที่เป็นข่าวกันเป็นประจำ

ในอุตสาหกรรมการชุบเคลือบในปัจจุบัน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมจะมีการควบคุมมลพิษในกระบวนการผลิตอย่างเข้มงวดยิ่งขึ้น ในอนาคต ISO 14000 จะมีผลทำให้กระบวนการผลิตได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง กระบวนการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสแปตเตอร์จะเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

6.2 ปัญหาของผู้ประกอบการ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมกำลังได้รับความสนใจทั้งภายในประเทศและในต่างประเทศ ในส่วนของประเทศไทย จะเห็นว่าทุกโครงการจะต้องได้รับการตรวจสอบและได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติก่อนจึงจะดำเนินการได้

โรงงานอุตสาหกรรมได้ชื่อว่าเป็นส่วนสำคัญ ที่ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศและในแหล่งน้ำ อุตสาหกรรมการชุบเคลือบเครื่องประดับในประเทศโดยทั่วไปที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบันใช้วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในแหล่งน้ำ ตามแม่น้ำและลำคลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นเช่นนี้ ในต่างประเทศได้มีการตื่นตัวกันมาและได้มีมาตรการป้องกันในหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งจากการที่โรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนหนึ่งของแหล่งที่ก่อให้เกิดมลพิษ โดยเฉพาะโรงงานชุบเคลือบ ดังนั้นทางประเทศในทวีปยุโรป จึงสั่งห้ามนำเข้าสู่ระดับที่มีนิกเกิล (nikel) เป็นพื้นรอง (ซึ่งก็คือการเคลือบด้วยไฟฟ้า หรือ electroplating นั่นเอง) โดยที่ข้อสั่งห้ามนี้ได้ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมการชุบเคลือบเครื่องประดับโดยตรง

ดังนั้นทางโรงงานอุตสาหกรรมการชุบเคลือบ จำเป็นต้องหาวิธีการชุบเคลือบอื่น ๆ ที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ การชุบเคลือบด้วยวิธีสัปดาห์เตอริงจะสนองความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี ยิ่งกว่านั้นคุณภาพของการชุบเคลือบด้วยวิธีสัปดาห์เตอริงยังดีกว่าวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้ามาก อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการชุบเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสัปดาห์เตอริงกล่าวได้ว่ายังเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับอุตสาหกรรมไทย ปัญหาของผู้ประกอบการก็คือ ถ้าสั่งซื้อเครื่องสำเร็จจากต่างประเทศมาใช้งานจะมีราคา 20 ล้านบาทขึ้นไป และยิ่งกว่านั้นทางโรงงานยังขาดบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถที่จะดูแลบำรุงรักษาเครื่องเหล่านี้ได้ คณะผู้ขอทุนมีประสบการณ์ทางด้านการชุบเคลือบในสุญญากาศ ในระดับห้องปฏิบัติการมาเป็นระยะเวลาพอสมควร จึงเสนอขอเสนอโครงการวิจัยนี้เพื่อสร้างเครื่องเคลือบขนาดอุตสาหกรรมสำหรับงานเคลือบผิวสวยงามและความคงทนของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

7. วัตถุประสงค์

7.1 เพื่อสร้างและพัฒนาเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสัปดาห์เตอริงขนาดระดับอุตสาหกรรมสำหรับใช้ในการเคลือบเครื่องประดับ

7.2 เพื่อศึกษาการวิจัยการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์, ฟิล์มทองคำและฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ลงบนเครื่องประดับ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องสputtering ขนาดอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 6 ส่วน คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ (2) ระบบปั๊มสุญญากาศ (3) ชุดจ่ายกำลังไฟฟ้า (4) คาโทดและเป้าสารเคลือบ (5) ชุดควบคุมการไหลของก๊าซ และ (6) ระบบน้ำหล่อเย็น ภาชนะสุญญากาศทำจากสแตนเลสหนา 20 มิลลิเมตร และมีปริมาตรประมาณ 257 ลิตร เป้าสารเคลือบมี 2 เป้า แต่ละเป้าหมายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว และติดอยู่บนคาโทดแต่ละตัวในด้านตรงข้ามกันภายในภาชนะสุญญากาศ ระบบปั๊มสุญญากาศประกอบด้วย โรตารีปั๊ม (รุ่น Edwards 28) และปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (รุ่น Leybold 3000) โดยสามารถปั๊มให้ได้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศลงถึง 10^{-5} มิลลิบาร์ ภายในเวลา 30 นาที สputtering ก๊าซที่ใช้เป็นก๊าซอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 % ส่วนก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99.99 % ถูกใช้เป็นรีแอคทีฟก๊าซในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ และไททาเนียมไนไตรด์ ตามลำดับ ในการควบคุมการไหลของก๊าซทั้ง 3 ชนิด ได้ใช้ mass flow controller (รุ่น MKS 254) ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ถูกนำมาวิเคราะห์โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์และรามานสเปกโตรมิเตอร์

Abstract

A d.c. planar magnetron sputtering system of industrial scale has been designed and developed . The sputtering system consists of six main parts .i.e. vacuum chamber . vacuum pumping system , d.c. power supply , cathodes and targets , gas flow controller and water cooling system . The vacuum chamber was constructed from stainless steel, 20 mm thick , and the volume of the chamber was approximately 257 litre . Two sputtering targets , each of 5 in. diameter . were attached oppositely on two cathodes of the vacuum chamber . Pumping was done with and Edwards 28 rotary pump and a Leybold 3000 oil diffusion . This system was capable of reaching 10^{-5} mbar chamber pressure after 30 min. Argon of 99.999% purity was used as the sputtering gas . Oxygen and nitrogen of 99.99 % putiry were used as t reactive gas for Al_2O_3 and Tin thin film coating , respectively . All three gas flow rates were controlled by MKS 247 mass flow controller . The Al_2O_3 and Tin thin films were, then, characterized by XRD and Raman spectrometer .

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันการเคลือบสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ทั้งโดยอาศัยขบวนการทางเคมี และอาศัยขบวนการทางฟิสิกส์ในการเคลือบ ในประเทศไทยอุตสาหกรรมการเคลือบฟิล์มบาง ส่วนใหญ่เป็นขบวนการทางเคมี โดยเฉพาะวิธีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นการเคลือบด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี (electroplating) ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลภาวะแก๊สแวลล์อ้อม มีอันตรายสูงต่อคนงาน และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารเคมีเหล่านั้น อีกวิธีหนึ่งคือการเคลือบสารโดยอาศัยขบวนการทางฟิสิกส์ ด้วยวิธีระเหยสารที่อุณหภูมิสูงแล้วเคลือบลงบนแผ่นรองรับ (substrate) ภายใต้สุญญากาศประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมเคลือบฟิล์มด้วยวิธีการระเหยสารขนาดเล็กไม่ถึง 10 โรงงาน ซึ่งใช้ในการเคลือบโคมไฟนํ้ารยยนต์, กระจกมองหลังรถยนต์ และโคมสะท้อนของกระบอกไฟฉายโดยทั่วไปการเคลือบสารด้วยวิธีนี้จะให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบและแผ่นรองรับไม่ค่อยดีนักต้องมีการพ่นทับด้วยแล็กเกอร์ เพื่อให้ความคงทนสูงขึ้น และนับเป็นวิธีการหนึ่งที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยและไม่ต้องอาศัยขบวนการทางเคมีใด ๆ ในทุกขั้นตอนการเคลือบ ส่วนวิธีการเคลือบแบบสปัตเตอริง (sputtering) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่อาศัยขบวนการทางฟิสิกส์ และให้ความคงทนในการยึดเกาะของฟิล์มสูงกว่าวิธีระเหยสารโดยทั่วไป ขบวนการเคลือบเกิดขึ้นภายใต้บรรยากาศความดันต่ำขนาดระหว่าง $10^{-3} - 10^{-1}$ (1 ทอร์ = ความดัน 1 มิลลิเมตรปรอท) และอาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าก๊าซ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนจะถูกเร่งเข้าชนแผ่นสารเคลือบ (target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 - 10,000 โวลต์ สารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของก๊าซ จะหลุดออกและวิ่งด้วยความเร็วสูงลงเคลือบแผ่นรองรับในทุกทิศทาง พลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมาจากขบวนการสปัตเตอริงนี้สูงกว่าอนุภาคที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่อตกกระทบลงบนแผ่นรองรับจะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อแผ่นรองรับและทำให้การยึดเกาะของฟิล์มเคลือบดีขึ้นมาก วัสดุที่ต้องการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงอาจเป็นโลหะหรืออโลหะ และสารที่ต้องการเคลือบอาจเป็นโลหะหรือก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีที่แผ่นรองรับต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีเครื่องสปัตเตอริงใช้ในระดับอุตสาหกรรมของประเทศ แต่มีการนำเข้าสินค้าที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นปริมาณสูงขึ้นเรื่อย ๆ เช่น กระจกสะท้อนความร้อนที่ติดผนังอาคารขนาดใหญ่อันมีคุณสมบัติยอมให้คลื่นแสงส่งผ่านเข้าสู่ตัวอาคาร แต่สะท้อนรังสีอินฟราเรดออกภายนอกทำให้ประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตแสงสว่าง และในระบบทำความเย็นตัวอาคารในเวลาเดียวกันเล็บมีดกึ่งและดอกสว่านที่เคลือบสีทองของ

ไททาเนียมไนไตรด์ ก็เป็นผลผลิตทางอุตสาหกรรมอีกชนิดหนึ่งที่อาศัยหลักการของสปีดเตอริง นอกจากนี้การเคลือบสารแบบสปีดเตอริงได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้

(1) อุปกรณ์ทางแสง

- การเคลือบเลนส์และกระจกเลเซอร์ ในกรณีของคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์กระจกหลังต้องมีคุณสมบัติสะท้อนรังสีความร้อน 100% กระจกดังกล่าวจะสร้างขึ้นจากการขัดผิวของโลหะแข็ง เช่น โมลิบดีนัม หรือทังสเตน จากนั้นจึงเคลือบด้วยทองคำ ซึ่งสะท้อนรังสีความร้อนได้ดีถึง 99.8% ส่วนกระจกหน้าซึ่งยอมให้รังสีผ่านได้ตามจำนวนที่ต้องการโดยอาศัยการเคลือบฟิล์มหลายชั้น เพื่อให้เกิดการสอดแทรกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้ได้ปริมาณการส่งผ่านของรังสีตามที่ต้องการ

- การเคลือบแบบเลือกความถี่ คือการเคลือบเพื่อให้ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางช่วงสามารถส่งผ่านได้ และดูดกลืนหรือสะท้อนบางความถี่ออกไป ซึ่งมีใช้มากในการเคลือบกระจกพิเศษแบบต่าง ๆ เช่น กระจกเย็น (cold mirror) กระจกกรองความถี่บางช่วง (band pass filter) กระจกตัดความถี่สูงหรือต่ำออก (edge filter) หรือกระจกกรองให้ผ่านได้เพียงความถี่แคบ ๆ (line filter) เป็นต้น

- การเคลือบกระจกฉนวนกันความร้อน โดยทำการเคลือบสารที่สะท้อนรังสีความร้อนเป็นชั้นบาง ๆ และเนื่องจากวัสดุนี้บางมาก จึงยังคงยอมให้แสงส่องผ่านไปได้ เช่น การเคลือบทองคำ หรือไททาเนียมไนไตรด์ชั้นบาง ๆ บนแผ่นกระจก ทำให้มีคุณสมบัติสะท้อนรังสีความร้อนได้

- การเคลือบกระจกเพื่อลดการสะท้อนที่ผิว เพื่อให้ปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านมีค่าสูงสุด เช่น การเคลือบซิลิกอนมอนอกไซด์ ลงบนผิวเคลือบบนแสงอาทิตย์ เป็นต้น

(2) อุปกรณ์ไฟฟ้า

- การเคลือบฟิล์มตัวต้านทาน ซึ่งได้แก่ฟิล์มของนิเกิล, โครเมียม, แทนทาลัมหรือไททาเนียมไนไตรด์ ซึ่งเป็นฟิล์มความต้านทานที่มีความเสถียรสูง

- การเคลือบฟิล์มตัวเก็บประจุ ซึ่งได้แก่ การเคลือบไดอิเล็กตริกของแทนทาลัมออกไซด์หรือแบเรียมไททาเนต ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ทำให้ตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก และราคาถูก

- การเคลือบในการทำงานวงจรรวม (integrated circuit)

- การเคลือบฟิล์มแม่เหล็ก ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์บันทึกความจำ เช่น เทป หรือแผ่นดิสก์ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์

- การเคลือบฟิล์มเรืองแสง ของสังกะสีซัลไฟด์ เป็นต้น

- การเคลือบผิวโฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) เช่น วัสดุที่ใช้ตรวจวัดรังสีอินฟราเรด มักเคลือบด้วยตะกั่วซัลไฟด์, ตะกั่วเซลีนไนด์, ตะกั่วเทลลูไรด์ ซึ่งจะนำไฟฟ้าเมื่อรังสีที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นเกินกว่า 10 ไมครอน

- การเคลือบอุปกรณ์ตรวจสอบแบบฟิล์มตรวจสอบแบบฟิล์มบาง (thin film sensor) ต่าง ๆ เช่น ตัววัดความถี่เสียง, ตัวอุณหภูมิ, ตัววัดรังสี เป็นต้น

- การเคลือบฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเป็นที่สนใจมากในปัจจุบัน

(3) อุปกรณ์ทางด้านเครื่องจักรกล

- การเคลือบผิวแข็งทนทานต่อการสึกหรอ อุปกรณ์บางชิ้นของเครื่องจักรกลที่มีอัตราการสึกหรอสูง และใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใบพัด, ใบมีด, ดอกสว่าน และ แบริ่ง เมื่อนำมาเคลือบผิวด้วยวัสดุที่มีความแข็งและทนต่ออุณหภูมิสูงจะสามารถยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนนั้น เช่น การเคลือบโลหะไนไตรด์, โลหะคาไบด์ หรือเซอโคเนียมออกไซด์ ไททาเนียมไนไตรด์มีคุณสมบัติแข็งทนอุณหภูมิสูง และให้สัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำ จึงเหมาะกับการเคลือบแบริ่ง, มีดกลึง ดอกสว่าน เซอโคเนียมออกไซด์แข็งทนอุณหภูมิสูง และยึดเกาะกับเนื้อเหล็กได้ดีทุกช่วงอุณหภูมิ และมีแนวโน้มทำให้เครื่องยนต์เซรามิคเกิดขึ้นได้ในอนาคต

- การเคลือบเพื่อกันการกัดกร่อนด้วยสารที่กัดกร่อนยาก เช่น การเคลือบโลหะสเตนเลสลงบนตัวถังรถยนต์ เป็นต้น

(4) อุปกรณ์ทางเคมี

- การเคลือบผิวอุปกรณ์ที่ใช้ในทะเล (marine equipment)

- การเคลือบผิวทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี (corrosion resistance coatings)

- การเคลือบผิวด้วยสารตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic coatings)

(5) เครื่องประดับ

- การเคลือบโครเมียมลงบนพลาสติก เช่น ตะแกรงหน้ารถยนต์ ซึ่งเป็นการลดน้ำหนักของรถยนต์ การเคลือบชิ้นส่วนของเด็กเล่น เป็นต้น

- การเคลือบฟิล์มสีลงบนวัสดุ เช่น การเคลือบสีทองของไททาเนียมไนไตรด์สีเงินของไททาเนียมคาร์ไบด์ ลงบนสายและตัวเรือนนาฬิกา, กรอบแว่นตา, ตู้หนู, สร้อย ซึ่งให้ทั้งความสวยงาม และผิวที่แข็งทนทานต่อการขีดข่วน

จากการประยุกต์ใช้งานได้ค่อนข้างกว้างขวางของเครื่องสปีดเตอร์ริง ทำให้คณะวิจัยซึ่งเดิมเป็นที่งานที่ค้นคว้าและวิจัยเรื่องเลเซอร์ และการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารในสุญญากาศ เริ่มเบนความสนใจมาสู่การเคลือบด้วยระบบสปีดเตอร์ริง โดยระยะเริ่มแรกในปี พ.ศ.2526 ขณะโครงการเลเซอร์กำลังดำเนินการอยู่ ทางคณะผู้วิจัยได้สั่งซื้อกระจกหลัง

ซึ่งเป็นโลหะเคลือบทอง ในราคาชิ้นละ 40,000 บาท ซึ่งราคาค่อนข้างสูงถ้ามีการใช้อย่างไม่ระมัดระวัง โดยการจับต้องกระจกหลัง จะสูญเสียสภาพการใช้งาน ซึ่งการเสี่ยงในลักษณะนี้ ขณะที่ทดลองยังมีปัญหาหลายด้าน ย่อมเป็นการลงทุนที่ไม่คุ้มค่า จึงได้คิดกันว่าจะทำกระจกหลังเลเซอร์เอง โดยการเคลือบทองลงบนแผ่นกระจกใวก่อน แต่วิธีระเหยสารให้การยึดฟิล์มทองบนแผ่นกระจกไม่ดีพอเพียงใช้นิ้วสัมผัสก็ทำให้ฟิล์มที่เคลือบหลุดออก จึงได้เริ่มต้นโครงการสร้างระบบสเป็คเตอรังขึ้น

ระยะแรกใช้โถแก้วตัดกันขัดเรียบ และใช้ระบบสุญญากาศด้วยแผ่นยาง โดยใช้ปั๊มกลโรตารี เป็นอุปกรณ์ดึงความดันในระบบให้ต่ำลง ส่วนไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการดิสชาร์จอากาศทำจากวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (bridge rectifier) แบบง่าย และควบคุมการปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยแวลวียา (variac) ส่วนขั้วไฟฟ้าอาโนดและคาโทด ใช้วิธีซีลด้วยการซีลโคน เนื่องจากยังไม่มีเครื่องควบคุมกระแส จึงทำให้เกิดการอาร์คระหว่างขั้วไฟฟ้า ในปี 2527 ได้แก้ปัญหาการอาร์คระหว่างขั้วไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานเป็นตัวจำกัดกระแส และเริ่มใช้สนามแม่เหล็กช่วยให้การดิสชาร์จมีความเสถียรขึ้น ปี 2528 สร้างแชมเบอร์ (chamber) สุญญากาศชุดใหม่โดยการนำถ้วยปีเคอร์ไฟเร็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว มาตัดปากและกันออกพร้อมออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในระบบใหม่ให้มีสนามแม่เหล็กช่วยให้การดิสชาร์จของก๊าซเสถียรที่แรงดันไฟฟ้าต่ำลง และเปลี่ยนทิศทางการป้อนก๊าซของระบบให้เหมาะสมขึ้น มีระบบน้ำหล่อเย็นให้กับแผ่นรองรับแต่ยังไม่มีระบบน้ำหล่อเย็นที่เป่าสารเคลือบ และยังคงใช้โรตารีปั๊มในการควบคุมความดันก๊าซ ขณะนี้เครื่องสามารถทำงานเคลือบทองลงบนแผ่นกระจกและใช้เป็นกระจกหลังของระบบเลเซอร์ได้ทดลอง ทำงานได้โดยให้กำลังต่ำประมาณ 50 วัตต์ ซึ่งนับเป็นความสำเร็จขั้นเริ่มต้น ในระหว่างนี้ ทดลองเคลือบทองแดง, อลูมิเนียม, นิเกิล และไททาเนียม พบว่าการเคลือบไม่มีความบริสุทธิ์ ฟิล์มสารเคลือบที่ได้มีสีดำหรือคล้ำไม่สดใสเหมือนเคลือบทอง ทำให้ทราบว่ระบบสุญญากาศไม่สะอาด พอมีก๊าซที่ไวต่อปฏิกิริยา เช่น ออกซิเจนและไนโตรเจนอยู่สูง ก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการทำสเป็คเตอรังมีความบริสุทธิ์ไม่มากพอ และปั๊มกลโรตารีที่ใช้กับระบบสุญญากาศไม่สามารถขจัดก๊าซไวปฏิกิริยาที่เกาะติดอยู่บนผิวของแชมเบอร์สุญญากาศออกได้หมด แม้จะเปลี่ยนใช้ก๊าซอาร์กอนที่บริสุทธิ์ขึ้น และระมัดระวังการรั่วของระบบมากขึ้น ก็ยังพบว่าการเคลือบทองแดงให้สีทองแดงสดใสเพียงบางครั้ง และส่วนใหญ่จะออกสีทองแดงด้าน ๆ อันเนื่องมาจากผลของการเกิดออกไซด์ของทองแดง ส่วนการเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ได้เริ่มจากอุปกรณ์ชุดนี้ โดยการป้อนก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ และดิสชาร์จก๊าซในระบบ เมื่อแผ่นเป่าเป็นไททาเนียม ทำให้ได้เห็นสีทองอ่อน ๆ บนผิวเป่าสารเคลือบจากการทำปฏิกิริยาของแผ่นไททาเนียมกับก๊าซไนโตรเจนในระหว่างการดิสชาร์จ ซึ่งเป็นสถานะที่ก๊าซไนโตรเจนไวต่อปฏิกิริยาในการเกิดไททาเนียมไนไตรด์ แม้ว่าบนแผ่นรองรับ

จะพบว่ามีฟิล์มเคลือบบางมาก เนื่องจากอัตราการสปีดเตอร์ค่อนข้างต่ำเกินไป ก็ทำให้เห็นความเป็นไปได้ในการออกแบบระบบขึ้นใหม่เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น

1.2 ความเป็นมาของโครงการ

คณะผู้วิจัยโดย ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ จากภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศด้วยวิธีต่าง ๆ ตั้งแต่ปี 2526 มาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เช่นวิธีการระเหยสารในสุญญากาศ วิธีสปีดเตอร์ริงและวิธีใช้ไอออนช่วย โดยแต่ละวิธีอาจจะเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานแต่ละด้าน เช่นการระเหยสารและวิธีใช้ไอออนช่วย จะเหมาะกับการเคลือบฟิล์มบางบนอุปกรณ์หรือชิ้นงานทางด้านแสง ส่วนสปีดเตอร์ริงจะเหมาะกับการเคลือบฟิล์มโลหะหรือการเคลือบผิวแข็ง

ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเซรามิกที่มีความแข็ง ทนทานต่อสารเคมี และความเสียดทาน นอกจากนั้นยังเป็นสีทองสีสวยงาม จากคุณสมบัติเหล่านี้ ไททาเนียมไนไตรด์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมากมาย โดยการเคลือบฟิล์มบางของไททาเนียมไนไตรด์ลงบนชิ้นงาน เช่นการเคลือบผิวแข็งของดอกสว่านและมีดกึ่ง ส่วนคุณสมบัติที่เป็นสีทองของไททาเนียมไนไตรด์ได้ถูกนำมาใช้ในการเคลือบเครื่องประดับ เช่น เข็มกลัด ตุ้มหู สร้อย สายนาฬิกา และกรอบแว่นตา เป็นต้น ซึ่งให้ทั้งสีทองที่สวยงามและผิวแข็งทนทานต่อการขีดข่วน

การเคลือบผิวแข็งของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ได้ดำเนินการวิจัยระดับห้องปฏิบัติการโดย ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณมาตั้งแต่ปี 2530 และประสบความสำเร็จเมื่อไม่นานมานี้ แต่เนื่องจากว่าเครื่องเคลือบมีขนาดเล็กเพราะเป็นเพียงระดับงานวิจัย ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความพร้อมที่จะพัฒนาการเคลือบเข้าสู่ระดับอุตสาหกรรมหรือพัฒนาเครื่องเคลือบให้มีขนาดใหญ่ได้ทันที ซึ่งเป็นการนำ know how ต่าง ๆ ที่ได้เรียนรู้มาจากงานวิจัยในอดีตมาใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ลงบนเครื่องประดับด้วยวิธีสปีดเตอร์ริงซึ่งเป็นการเคลือบชิ้นงานในระบบสุญญากาศ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะแกสิ่งแวดล้อม เหมือนเช่นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) เพราะวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับ การใช้สารเคมี และภายหลังการเคลือบของเสียต่าง ๆ ทางโรงงานจะต้องทิ้งลงตามแหล่งน้ำตามลำคลองหรือแม่น้ำ ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษแกสิ่งแวดล้อม ดังที่เป็นข่าวกันเป็นประจำ

ในอุตสาหกรรมการชุบเคลือบในปัจจุบัน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมจะมีการควบคุมมลพิษในกระบวนการผลิตอย่างเข้มงวดยิ่งขึ้น ในอนาคต ISO 14000 จะมีผลทำให้กระบวนการผลิตได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง กระบวนการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสปีดเตอร์ริงจะเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

1.3 ปัญหาของผู้ประกอบการ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมกำลังได้รับความสนใจทั้งภายในประเทศและในต่างประเทศ ในส่วนของประเทศไทย จะเห็นว่าทุกโครงการจะต้องได้รับการตรวจสอบและได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติก่อนจึงจะดำเนินการได้

โรงงานอุตสาหกรรมได้ชื่อว่าเป็นส่วนสำคัญ ที่ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศและในแหล่งน้ำ อุตสาหกรรมการชุบเคลือบเครื่องประดับในประเทศโดยทั่วไปที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบันใช้วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในแหล่งน้ำ ตามแม่น้ำและลำคลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นเช่นนี้ ในต่างประเทศได้มีการตื่นตัวกันมาและได้มีมาตรการป้องกันในหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งจากการที่โรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนหนึ่งของแหล่งที่ก่อให้เกิดมลพิษ โดยเฉพาะโรงงานชุบเคลือบ ดังนั้นทางประเทศในทวีปยุโรป จึงสั่งห้ามนำเข้าสิ่งประดับที่มีนิเกิล (nikel) เป็นพื้นรอง (ซึ่งก็คือการเคลือบด้วยไฟฟ้า หรือ electroplating นั่นเอง) โดยที่ข้อสั่งห้ามนี้ได้ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมการชุบเคลือบเครื่องประดับโดยตรง

ดังนั้นทางโรงงานอุตสาหกรรมการชุบเคลือบ จำเป็นต้องหาวิธีการชุบเคลือบอื่น ๆ ที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ การชุบเคลือบด้วยวิธีสแปตเตอริงจะสนองความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมได้ เป็นอย่างดี ยิ่งกว่านั้นคุณภาพของการชุบเคลือบด้วยวิธีสแปตเตอริงยังดีกว่าวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้ามาก อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการชุบเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสแปตเตอริงกล่าวได้ว่ายังเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับอุตสาหกรรมไทย ปัญหาของผู้ประกอบการก็คือ ถ้าสั่งซื้อเครื่องสำเร็จจากต่างประเทศมาใช้งานจะมีราคา 20 ล้านบาทขึ้นไป ทำให้ผู้ประกอบการรายย่อยหรือ SME ไม่สามารถลงทุนซื้อเครื่องสแปตเตอริงได้ และยิ่งกว่านั้นทางโรงงานยังขาดบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถที่จะดูแลบำรุงรักษาเครื่องเหล่านี้ได้

โดยเหตุผลดังกล่าว กระทรวงอุตสาหกรรม ได้อนุมัติให้ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ดำเนินการโครงการภายใต้แผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมระยะที่ 2 ผ่านสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ในโครงการ “การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีสแปตเตอริง” โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- (1) เพื่อสร้างและพัฒนาเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสแปตเตอริงในระดับอุตสาหกรรม
- (2) เพื่อหาวิธีการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ ฟิล์มทองคำ และฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ลงบนเครื่องประดับ

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 สปัตเตอร์ (1-6)

เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว ขบวนการนี้อ่อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในขบวนการสปัตเตอร์ คือ

1. มีสารเคลือบเป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงบนแผ่นรองรับ

2. มีอนุภาคพลังงานสูงวิ่งชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) เพื่อใช้ในขบวนการสปัตเตอร์ทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยมทั่วไปคือ การเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุชนิดหนึ่งที่ย่อยต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้ขบวนการสปัตเตอร์เกิดขึ้นได้ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์ การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่ให้การส่งถ่ายพลังงาน และโมเมนตัมดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของก๊าซในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ขบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มเคลือบตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือผลิตได้จากขบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูง และให้ไอออนในพื้นที่แคบขบวนการ สปัตเตอร์ทั่ว ๆ ไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้ขบวนการโกลว์ดิสชาร์จซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ (interactions of ions with surfaces)

เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าผิวหน้าเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังนี้

รูปที่ 2.1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ (1, หน้า 178)

- ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้า ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ
- การชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) ออกจากเป้าสารเคลือบ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ
- ไอออนอาจฝังตัวลงในผิวสารเคลือบ (ion implantation) ระดับความลึกของการฝังด้วยตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานของไอออน ซึ่งมีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง
- การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า altered surface layers
- การชนของไอออนอาจทำให้เกิดขบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบ ซึ่งเรียกว่าขบวนการสปัตเตอริง (sputtering)

2.3 ค่าyield ของสปัตเตอริง (sputtering yield, s)

yield ของขบวนการสปัตเตอริง คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค มีหน่วยเป็น atoms/ion พบว่าค่า yield แปรเปลี่ยนไปตามสภาวะต่าง ๆ ในขบวนการสปัตเตอริง ดังนี้

ก) ค่าอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงตามค่าพลังงานของไอออน ในการชนตรงระหว่าง

$$2 \text{ อนุภาค การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาค} = \frac{4mM}{(m+M)^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ m = มวลของอะตอมที่ถูกชน, M = มวลของอะตอมที่วิ่งชน เราพบว่าเมื่อพลังงานของไอออนมีค่าต่ำมาก ค่าอิเล็กตรอนจากการสับเปลี่ยนมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นเกินกว่า $4H$ (H คือค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอม ออกจากผิวสารเคลือบ) พลังงานของไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดขบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบ และเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบ เรียกพลังงานเทรชโฮลด์ (threshold energies) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไประหว่างคู่การชนของอนุภาค ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพลังงานเทรชโฮลด์ของเป้าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออน จากก๊าซเฉื่อยและไฮโดรเจน (หน้า 2, หน้า 3 - 19)

	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
						.					
V...	21	23	25	28	25	Ag...	12	15	15	17	
Cr....	22	22	18	20	23	Tn...	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...	23	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							

เมื่อเพิ่มพลังงานของไอออนให้สูงขึ้นยิลด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential) ในช่วงแรกและจะเปลี่ยนเป็นเชิงเส้น (linear) จากนั้นจึงเริ่มมีการอิ่มตัว (saturation) ของค่ายิลด์เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสดังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้น ทำให้ยิลด์ของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานของไอออนให้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนค่ายิลด์ของผิวทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากก๊าซอาร์กอน ที่พลังงานค่าต่าง ๆ (2, หน้า 3 - 16)

ข) ยิลด์แปรเปลี่ยนไปตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยว ค่ายิลด์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด และมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบาง ในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (face centered cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมสูงสุดยังผลให้ยิลด์มีค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่าพลังงานของไอออนในการชนค่าเดียวกัน ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มวิ่งฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น รูปที่ 2.2 แสดงค่ายิลด์ที่แตกต่างกันเมื่อไอออนของก๊าซอาร์กอนชนเป้าในระนาบที่แตกต่างกัน

ค) ค่ายิลด์จากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกัน เมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไป แม้สมการ (2.1) จะแสดงให้เห็นว่าการถ่ายพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่เกิดการ

ชนกันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียง จึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยว ดังนั้นจึงพบว่าอิเล็กตรอนมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่าของอะตอมเป้า ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าอิเล็กตรอนนี้พบว่ามีค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากก๊าซเฉื่อย (noble - gas ion) คือ ก๊าซ Ne, Ar, Kr และ Xe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุด สาเหตุของการเกิดจุดสูงสุดของค่าอิเล็กตรอนเป็นช่วง ๆ นี้ยังไม่มีคำอธิบายที่กระจ่าง

รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิเล็กตรอนของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และ แทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number) ค่าต่าง ๆ (2, หน้า 3 - 16)

ง) ค่าอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงไปตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้า จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้าหมายมากขึ้น อิเล็กตรอนจะมีค่าสูงขึ้นตามมุมที่เอียงมากขึ้น เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงแบบ back scattering เป็น forward scattering ซึ่งเป็นขบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่าทำให้อิเล็กตรอนสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้นอิเล็กตรอนจะมีค่าลดลงเมื่อมุมเอียงสูงขึ้น และเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นแสดงในรูปที่ 2.4 ตัวอย่างค่าอิเล็กตรอน สเปกตรัมของธาตุต่าง ๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออนของก๊าซเฉื่อยชนิดต่าง ๆ พลังงาน 500 eV แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของยิลด์สปีดเตอร์ริงเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV วิ่งชนเป้าของนิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และ ทองคำขาว (Pt) ที่มุมการกระหับค่าต่าง ๆ เมื่อวัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า (2, หน้า 3 - 17)

2.4 ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์

อะตอมที่หลุดออกจากผิวหน้าสารเคลือบด้วยวิธีการสปีดเตอร์ มีค่าพลังงานจลน์ค่อนข้างสูง และมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหิดสารประมาณ 50 - 100 เท่า อะตอมมีการกระจายค่าพลังงานแบบ Maxwellian ถ้าไอออนที่ใช้มีค่าพลังงานสูงขึ้น พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีค่าพลังงานระหว่าง 10-40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีค่าพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 KeV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปีดเตอร์ไม่เพิ่มขึ้น และเป้าที่มีค่ายิลด์สูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมออกมามีต่ำ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมาก อะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง ดูรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าyieldส์ปฏิกิริยาของธาตุต่าง ๆ เมื่อถูกยิงด้วยไอออนก๊าซเฉื่อยชนิดต่าง ๆ ที่ค่าพลังงาน 500 eV (3, หน้า 15)

Gas Element	He	Ne	Ar	Kr	Xe
Be	0.24	0.42	0.51	0.48	0.35
C	0.07	-	0.12	0.13	0.17
Al	0.16	0.73	1.05	0.96	0.82
Si	0.13	0.48	0.50	0.50	0.42
Ti	0.07	0.43	0.51	0.48	0.43
V	0.06	0.48	0.65	0.62	0.61
Cr	0.17	0.99	1.18	1.39	1.55
Mn	-	-	-	1.39	1.43
Mn	-	-	1.90	-	-
Bi	-	-	6.64	-	-
Fe	0.15	0.88	1.10	1.07	1.00
Fe	-	0.61	0.84	0.77	0.88
Co	0.13	0.90	1.22	1.08	1.08
Ni	0.16	1.10	1.45	1.30	1.22
Ni	-	0.99	1.33	1.06	1.22
Cu	0.24	1.80	2.35	2.35	2.05
Cu	-	1.35	2.0	1.91	1.91
Cu(III)	-	2.1	-	2.50	3.9
Ge	0.08	0.68	1.1	1.12	1.04
Y	0.05	0.46	0.68	0.66	0.48
Zr	0.02	0.38	0.65	0.51	0.58
Nb	0.03	0.33	0.60	0.55	0.53
Mo	0.03	0.48	0.80	0.87	0.87
Mo	-	0.24	0.64	0.59	0.72
Ru	-	0.57	1.15	1.27	1.20
Ag	0.20	1.77	3.12	3.27	3.32
Ag	1.0	1.70	2.4	3.1	-
Sm	0.05	0.67	0.80	1.09	1.28
Gd	0.03	0.48	0.83	1.12	1.20
Dy	0.03	0.55	0.88	1.15	1.29
Er	0.03	0.52	0.77	1.07	1.07
Hf	0.01	0.32	0.70	0.08	-
Ta	0.01	0.28	0.57	0.87	0.88
W	0.01	0.28	0.57	0.91	1.01
Re	0.01	0.37	0.87	1.25	-
Os	0.01	0.37	0.87	1.27	1.33
Ir	0.01	0.43	1.01	1.35	1.56
Pt	0.03	0.63	1.40	1.82	1.93
Au	0.07	1.08	2.40	3.06	3.01
Au	0.10	1.3	2.5	-	7.7
Pb	1.1	-	2.7	-	-
Th	0.0	0.28	0.62	0.96	1.05
U	-	0.45	0.85	1.30	0.81
Sn	-	-	2.83	-	-

- (ก) (ข)
- รูปที่ 2.5** ก) แสดงการกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสับเตอร์จากไอออนของ
ก๊าซ Kr ที่ค่าพลังงานต่าง ๆ
- ข) เปรียบเทียบการกระจายค่าความเร็วของอะตอมทองแดงที่ได้จากการระเหยและ
จากการสับเตอร์ริง (4, หน้า 188)

- (ก) (ข)
- รูปที่ 2.6** ก) แสดงพลังงานเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบมีค่าเลขอะตอมต่าง ๆ เมื่อถูกชนด้วย
ไอออนของ Kr พลังงาน 1200 eV
- ข) แสดงความเร็วเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่าง ๆ เมื่อถูก
ชนด้วยไอออนของ Kr พลังงาน 1200 eV (4, หน้า 189)

2.5 ขบวนการก๊าซดิสชาร์จ (gas discharge process) (1 - 5)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโตรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะทาง d ภายใต้ความดันประมาณ 1 ทอร์ ของก๊าซนีออน พบว่าขณะที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของก๊าซที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศ เนื่องจากการชนของรังสีคอสมิก เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โวลต์ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (breakdown voltage, V_B) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของก๊าซให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกอิเล็กตรอน และจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชน และการเกิดการไอออนไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทดจนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) ขบวนการช่วงนี้เรียกว่าทาวนด์ดิสชาร์จ (Townsend discharge) เมื่อแรงดันไฟฟ้าถูกเพิ่มจนถึงศักย์ไฟฟ้าทะลายจะเกิดขบวนการอะวาลานซ์ (avalanche) ขึ้น ไอออนบวกวิ่งชนคาโทดสูงขึ้นมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง ซึ่งถูกเร่งเข้าหาแอโนดและผลิตไอออนมากขึ้นจากการชนกับโมเลกุลของก๊าซ และไอออนบวกที่เพิ่มมากขึ้นวิ่งชนคาโทดเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ซึ่งจะชนโมเลกุลก๊าซและผลิตไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดิสชาร์จได้โดยตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอกในการผลิตไอออน ก๊าซภายในระบบเกิดการเรืองแสง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างอิเล็กโตรดลดต่ำลง และกระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ณ จุดนี้เราเรียกว่าการเรืองแสงปกติ หรือ นอร์มอลโกลว์ (normal glow) โดยสภาวะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองต่ออัตราการชนของไอออนมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับวัสดุทำเป้าคาโทดทั่วไปคือประมาณ 0.1 โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์ (glow) แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนตำแหน่งไปมาได้ และการชนของไอออนบนคาโทดไม่มีความสม่ำเสมอ โดยมักจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่สนามไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (self-sustaining) บางบริเวณไว้เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แนวการชนของไอออนจะค่อย ๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่ (ช่วงการเรืองแสงปกติที่ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงนี้เรานำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างหลอดควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ voltage regulator tube หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ของคาโทดแล้วการเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติเปล่งแสงจ้าขึ้น หรือ แอบนอร์มอลโกลว์ (abnormal glow) ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมใช้กับระบบสับเตอรังและอีกหลาย ๆ

ระบบของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโกลว์ดิสชาร์จ ในช่วงนี้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นประมาณ 0.1 แอมป์/ตารางเซนติเมตร ความร้อนที่เกิดจากชนของไอออนบวกบนผิวคาโทดจะเกิดขึ้นมากจนเกิดขบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (thermionic electron emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง และติดตามมาด้วยขบวนการอะวาลานซ์อีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของก๊าซในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดตกลงมากในขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูง และเปล่งประกายจ้าของการอาร์ค (arc discharge) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว

อิเล็กโตรดของขบวนการเกิด ดี ซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุก๊าซนีออนความดัน 1 ทอร์ (3, หน้า 25)

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายในขบวนการโกลว์ดิสชาร์จมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง D ระหว่างอิเล็กโตรด และระยะทางปลดปล่อยการชนระหว่างอิเล็กตรอนชุดที่สอง และโมเลกุลของก๊าซ (ระยะทางปลดปล่อยการชนของอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้แปรผกผันกับความดันก๊าซ และมีค่ามากกว่าระยะทางปลดปล่อยการชนของกันเองระหว่างโมเลกุลก๊าซ) ระยะโดยปกติอิเล็กตรอนชุดที่สองแต่ละตัวควรมีความสามารถผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดขบวนการอะวาลานซ์ในช่วงนอร์มอลโกลว์ ถ้าความดันก๊าซต่ำเกินไป (ระยะปลดปล่อยการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอาโนด ถ้าความดันก๊าซสูงเกินไป (ระยะปลดปล่อยการชนสั้นลง) หรือระยะทาง d มากเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอในการ

ไอออนไนซ์ก๊าซเมื่อเกิดการชน พลังงานจะถูกถ่ายทอดให้โมเลกุลก๊าซในรูปการกระตุ้น (excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าทะลายที่มีค่าค่อนข้างสูง โดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลายต่ำที่สุดตามกฎของปาสเชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดันก๊าซ (p) และระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด (d) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลาย (breakdown voltage, V_B) และผลคูณระหว่างความดันก๊าซ (p) และระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด (d) (4, หน้า 40)

ในระบบสับเตอร์ริงทั่วไปสภาวะของการเกิดโกลว์ดิสชาร์จ จะกระทำในช่วงที่ผลคูณ $p \times d$ มีค่าต่ำกว่าจุดสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำ ทำให้ฟิล์มเคลือบมีคุณภาพดี การแทรกตัวของก๊าซในเนื้อฟิล์มน้อย และลดปริมาณสารปลอมปนในฟิล์มเคลือบ) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันก๊าซชั่วขณะเพื่อให้เริ่มการดิสชาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำลง

รูปที่ 2.9 แสดงส่วนต่าง ๆ ของขบวนการโกลว์ดิสชาร์จ ซึ่งแต่ละส่วนอธิบายได้ดังนี้ช่วงแรก คือช่วงมืดแอสตัน (Aston dark space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกจากคาโทดด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถกระตุ้น หรือไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซได้ ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดขึ้น ถัดออกมาจากผิวคาโทดเป็นบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมาก เรียกว่าคาโทดโกลว์ (cathode glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของก๊าซจากการดิสชาร์จ

และไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทด เกิดการรวมตัวเป็นกลางกับ อิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยขบวนการต่าง ๆ มากมาย ทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงซึ่งเป็น ความถี่เฉพาะของสารที่ทำคาโทดและก๊าซที่ใช้ในระบบสปัตเตอร์ เช่น เมื่อคาโทดเป็นทองแดง การเรืองแสงของคาโทดโกลวให้สีเขียว ทองคำให้สีส้มแดง ก๊าซอาร์กอนให้สีน้ำเงินฟ้า และ ก๊าซไนโตรเจนให้สีม่วงแดง เป็นต้น

รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดนอร์มอลโกลวดีสชาร์จ์ของหลอดก๊าซนีออนยาว 50 เซนติเมตรที่ความดัน 1 ทอร์ ความเข้มการเรืองแสงแสดงด้วยแถบดำในรูป นอกจากนี้ยังคงถึงศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า ความหนาแน่นสเปซชาร์จ์และความหนาแน่นกระแสที่แต่ละส่วนของหลอดโกลวดีสชาร์จ์ (1 หน้า 79)

ถัดจากคาโทดโกลว์ เรียกว่าช่วงมืดครูดหรือช่วงมืดคาโทด (Crook, or cathode dark space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะทางเฉลี่ยปลดการชนออกมา ทำให้บริเวณปราศจากการชนนั้นไม่มีขบวนการกระตุ้นหรือไอออนไนเซชันเกิดขึ้นการปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดขึ้นในช่วงนี้กลายเป็นบริเวณมืด ระยะระยะปลดการชนออกไปอิเล็กตรอนชุดที่สองจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซและไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (positive space charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดดาร์คสเปซนี้ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากเกินพอในการเร่งอิเล็กตรอนชน และไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซในเวลาถัดมา จึงทำให้ภายหลังการเกิดออร์มอลโกลว์แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟในรูปที่ 2.7 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่ออิเล็กตรอนเมื่อเลยออกไปจากบริเวณผลิตไอออนของ ดาร์ค สเปซแล้วจะมีค่าพลังงานลดลงมาก ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของก๊าซ และเกิดการเรืองแสงขึ้นแม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็ว แต่พลังงานที่เหลือน้อยลงมาก รวมทั้งประจุบวกจากประจุสะสมของไอออนด้านซ้ายมือในบริเวณดาร์ค สเปซ ทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงที่ผ่านช่วงเรืองแสงขึ้นนานขึ้น และมีการสะสมประจุบริเวณนี้จึงเรียกบริเวณนี้ว่า เนกาทีฟ โกลว์ (negative glow) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงมาจนไม่สามารถ แม้แต่จะกระตุ้นโมเลกุลของก๊าซให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday dark space) ถัดจากช่วงมืดฟาราเดย์ ขบวนการที่เกิดขึ้นค่อนข้างคล้ายกับการดิสชาร์จของทาวนด์เซนด์ ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่อาโนดและมีพลังงานสูงพอในการกระตุ้นโมเลกุลของก๊าซ หรือไอออนไนซ์ก๊าซได้ และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่อาโนดโดยเร็ว ทำให้สภาวะพลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่า จึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (positive glow column)

เนื่องจากการรักษาสภาวะโกลว์ดิสชาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ผลิตขึ้นบริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณ เนกาทีฟโกลว์ จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอาโนดเพียงเล็กน้อยมิได้มีผลขบวนการโกลว์ดิสชาร์จต่อเมื่อเลื่อนอาโนดเข้าหาคาโทดจนพ้นช่วงมืดฟาราเดย์ และเข้าสู่เนกาทีฟโกลว์ จนเข้าสู่ช่วงคาโทดดาร์ค สเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนชุดที่สองมีปริมาณน้อยลง ในการรักษาสภาวะโกลว์ดิสชาร์จไว้จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเร่งไอออนเข้าชนคาโทดด้วยพลังงานสูงและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองปริมาณสูงขึ้น อันจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การ

โกลว์ลักษณะนี้เรียกว่า obstructed glow เมื่อเล็อนาโนดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจนพื้นขอบของคาโทด ดาร์ค สเปซ ซึ่งระยะทางสั้นกว่าระยะทางปลดการชนของอิเล็กตรอนไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นเลย และขบวนการโกลว์ดิสชาร์จสิ้นสุด ทั้งนี้แม้ว่าจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นอีกเท่าใดก็ตาม จะไม่สามารถคงสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ได้ถ้ามีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทด การอาร์คอาจเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการโกลว์ดิสชาร์จเกิดขึ้น

2.6 ระบบการเคลือบสารแบบ ดี ซี ไดโอดสปีดเตอริง (DC diode sputtering)

รูปที่ 2.10 แสดงระบบสปีดเตอริงแบบ ดี ซี ไดโอด (4, หน้า 190)

จากรูปแสดงระบบ ดี ซี ไดโอด สปีดเตอริงแบบง่ายที่สุด คาโทดคือแผ่นเป้าสารเคลือบ และอานโนดใช้เป็นทิว่งแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ โดยปกติระยะระหว่างคาโทดและแผ่นรองรับจะอยู่ระหว่าง 4 - 10 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกสู่ด้านข้างหรือผนังของแชมเบอร์สุญญากาศ (vacuum chamber) มีค่าต่ำระยะดาร์คสเปซในระบบ โดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 1 ถึง 4 เซนติเมตร โดยตำแหน่งของอานโนดอยู่ในบริเวณการเกิดเนกาทีฟโกลว์ อุปกรณ์ทำงานอยู่ในช่วงแอมบอร์มอลโกลว์ดิสชาร์จ ก๊าซที่ใช้ในระบบมักใช้ก๊าซเฉื่อยซึ่งให้ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ โดยนิยมใช้ก๊าซอาร์กอนเนื่องจากมีราคาถูกกว่าก๊าซเฉื่อยชนิดอื่น ๆ ในขณะที่เกิดขบวนการโกลว์ดิสชาร์จที่ความดันก๊าซค่าหนึ่งขบวนการไอออนไนเซชันจะรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ตราบใดที่ระยะดาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอานโนด เมื่อความดันก๊าซลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดที่มีค่าสูงขึ้นระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะดาร์คสเปซขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยกระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงมีปริมาณไอออนลดลงตามปริมาณและกระแสไฟฟ้าในระบบที่ความดันก๊าซต่ำกว่า 10^{-2} ทอร์

ระยะดาร์คสเปซยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด กระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ขบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสับเตอริง ขณะความดันก๊าซสูงขึ้นระยะดาร์คสเปซหดสั้นลง บริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้น และขบวนการ สับเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงขึ้นตามความดันก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (เส้นกราฟ A) ขณะที่ความดันก๊าซในระบบสูงขึ้น ระยะทางปลดการชนระหว่างโมเลกุลของก๊าซมีค่าลดลงอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านลงเคลือบบนแผ่นรองรับได้ยากจากการชนกับโมเลกุลของก๊าซและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบ หรือสูญเสียสู่ผนังสุญญากาศทำให้ค่าของยิลด์จากการ สับเตอริงมีค่าลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (เส้นกราฟ B) ผลรวมระหว่างยิลด์และกระแสไอออนทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่งและพบว่าในการ สับเตอริงนิคเกิลเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้า 3000 V ระหว่างอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตรใน ก๊าซอาร์กอน การเคลือบจะหยุดลงที่ความดันต่ำกว่า 20 มิลลิทอร์ และที่ความดันสูงกว่า 120 มิลลิทอร์ อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุด และลดลงเมื่อความดันก๊าซสูงเกินกว่าค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับขบวนการสับเตอริง คือ บริเวณที่ให้อัตราการเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุด จากรูปที่ 2.11 ความดันที่เหมาะสมในการเคลือบคือ 75 มิลลิทอร์ โดยมีความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร (A/cm^2) ด้วยอัตราการเคลือบสาร 360 อังสตรอม/นาที่ (A°/min) ซึ่งเป็นอัตราการเคลือบที่ค่อนข้างต่ำมาก ในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง ในระบบสับเตอริงทั่วไปเรานิยมต่ออาโนดลงกราวด์รวมกับแชมเบอร์สุญญากาศ และปล่อยคาโทดให้ศักย์ไฟฟ้าลบโดยกันด้วยฉนวนระหว่างคาโทดกับผิวโลหะของแชมเบอร์สุญญากาศ กราวด์ชีลด์ (ground shield) ในรูปที่ 2.10 เป็นผนังโลหะหุ้มรอบ ๆ ขอบของคาโทด โดยจัดระยะทางระหว่างคาโทดและกราวด์ชีลด์ให้สั้นกว่าระยะดาร์คสเปซ ดังนั้นแม้ว่าศักย์ไฟฟ้าของกราวด์ชีลด์จะมีค่าเท่ากับอาโนด ขบวนการไอออไนซ์และสับเตอริงจะไม่สามารถเกิดขึ้นกับคาโทดในบริเวณที่มีกราวด์ชีลด์ห่อหุ้มอยู่ทำให้สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการสับเตอริงได้ และไดโอดสับเตอริงนี้คาโทดอาจทำเป็นแผ่นราบเรียกว่า พลาแนร์สับเตอริง (planar sputtering) หรือทำเป็นทรงกระบอกซ้อนกันเรียกว่าสับเตอริงทรงกระบอก (cylindrical sputtering or post sputtering) ข้อเสียของระบบไดโอดสับเตอริงคือไม่สามารถควบคุมปริมาณของไอออน และพลังงานของไอออนที่วิ่งชนเป้าเป็นอิสระจากกันเนื่องจากพลังงานของไอออนขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดเพื่อเร่งอนุภาค ในขณะเดียวกันแรงดันไฟฟ้านี้ถ้ามีค่าสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณไอออนที่ถูกผลิตขึ้นในระบบจะมีปริมาณสูงขึ้นตามไปด้วย

รูปที่ 2.11 แสดงผลของความดันก๊าซในระบบสปัตเตอริงที่มีผลต่ออัตราการเคลือบ ค่าเยิลด์ และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิคเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร (3, หน้า 77)

2.7 การเพิ่มอัตราการเกิดสปัตเตอริง

อัตราการเกิดสปัตเตอริง ขึ้นกับผลคูณระหว่างเยิลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ วิธีการเพิ่มค่าเยิลด์ของเป้าสารเคลือบ ได้พูดมาบ้างแล้วจึงขอเบนความสนใจมาสู่การเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ใน ดี ซี ไดโอด สปัตเตอริงสามารถทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดและความดันก๊าซ ซึ่งมีข้อจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันก๊าซประมาณ 100 มิลลิทอร์ เราพบว่าในไดโอดสปัตเตอริงอะตอมของก๊าซน้อยกว่า 1 เปอร์เซนต์ที่เกิดการไอออนไนซ์ และความดันก๊าซที่สูงมีผลทำให้ปริมาณก๊าซที่แทรกตัวในฟิล์มเคลือบมีค่าสูง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบสปัตเตอริงเพื่อให้สามารถเคลือบฟิล์มได้ที่มีความดันต่ำและให้อัตราการสปัตเตอริงสูง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ใหญ่ ๆ 3 วิธี คือ

ก. ไตรโอด สปัตเตอริง (triode sputtering) คือการเพิ่มปริมาณไอออนให้กับระบบสปัตเตอริงโดยการเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอนของระบบด้วยวิธีปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (thermionic electron emission) ซึ่งมีโครงสร้างของระบบแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยจากการเผาผลาญทั้งสเต็มด้วยปริมาณสูงถูกเร่งเข้าสู่อาโนด ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าบวกระหว่าง 50 - 100 โวลต์ ผ่านอะตอมของก๊าซภายในระบบและผลิตไอออนปริมาณสูงระหว่างเป้าสารเคลือบ และแผ่นรองรับศักย์ไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อเข้าระหว่างเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับจะดึงแยกไอออนเร่งเข้าสู่เป้าสารเคลือบ และเกิดขบวนการสปัตเตอริงขึ้นแผ่นรองรับการเคลือบวางใกล้กับคาโทดเพื่อลดการสูญเสียอะตอมสารเคลือบ วิธีการนี้ใช้ไฟฟ้า 3 ขั้ว โดยใช้กราวด์ร่วมกันคู่หนึ่งจึงเรียกว่า ไตรโอด สปัตเตอริง สามารถทำงานเคลือบได้ที่มีความดัน

ก๊าซต่ำถึง 1 มิลลิทอร์ ในอัตราเคลือบสูงกว่า 3000 และสูงกว่าระบบไดโอด สปีดเตอริงที่กล่าวแล้วประมาณ 10 เท่าตัว นอกจากนี้ไตรโอด สปีดเตอริงยังมีข้อดีเหนือไดโอด สปีดเตอริงที่สามารถควบคุมปริมาณไอออน (จากปริมาณเทอร์มิออนิก อิเล็กตรอน และศักย์ไฟฟ้าที่แอโนด) และ

รูปที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบ ตำแหน่งของอิเล็กโตรด แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก เป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับของระบบไตรโอดสปีดเตอริง (4, หน้า 193)

พลังงานของไอออน (จากศักย์ไฟฟ้าของเป้าสารเคลือบ) ที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบแยกเป็นอิสระจากกันได้ ในกรณีที่ภายในระบบมีก๊าซซึ่งอาจทำปฏิกิริยากับลดความร้อนทั้งสเต็ม หรือระบบมีขนาดใหญ่ วิธีของไตรโอดสปีดเตอริงย่อมไม่เหมาะสม ทำให้ต้องใช้วิธีการอื่นแทน

ข. แมกนีตรอน สปีดเตอริง (magnetron sputtering) คือการใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากคาโทดสู่แอโนดเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดไอออนไนซ์เซชัน จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนี้เคลื่อนที่ในแนววงกลม รูปที่ (2.13 a) ด้วยรัศมี

$$r = \frac{1}{3.37W^{1/2}} \quad \text{เซนติเมตร}$$

(2.2)

เมื่อ W คือพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV และ B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย เกาส์ (gauss) และหมุนด้วยความถี่ไซโครตรอน

$$v = 2.8 \times 10^6 B \quad \text{รอบ/วินาที}$$

(2.3)

รูปที่ 2.13 a,b,c แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว d และ e แสดง

การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ (4, หน้า 196)

ดังนั้น ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 เกาส์ รัศมีการหมุนมีค่า $= 0.1$ เซนติเมตร และด้วยความถี่การหมุน $= 2.8 \times 10^8$ รอบ/วินาที ในรูปที่ (2.13 b) แสดงถึงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควบรอบแนวสนามแม่เหล็กซึ่งมีจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่ง ระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนเกิดการชนกับอะตอมก๊าซดังรูปที่ (2.13 c) แนวการหมุนควบรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและ สนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสอง นอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เรียกว่า drift motion ความเร็วนี้มีค่า

$$V_E = 10^8 / B \quad \text{เซนติเมตร/วินาที}$$

(2.4)

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็นโวลต์/เซนติเมตร และ B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย เกาส์ กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณดาร์คสเปซมีค่าประมาณ 1,000 โวลต์/เซนติเมตร และสนามแม่เหล็ก 100 เกาส์ ให้ค่า drift velocity $= 10,000$ กิโลเมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง

กรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูป cycloid ดังในรูปที่ (2.13 d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบ drift motion จะอยู่ในแนวทวนวงกลมซ้อนกัน ดังในรูปที่ (2.13 e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้เด่นชัดมาก แม้จะใช้สนามแม่เหล็ก คำน้อยระหว่าง 50 ถึง 500 เกาส์ แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า longitudinal field จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโดลว์ดิสชาร์จเปลี่ยนแปลงไป และยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบไว้ได้ดี ในกรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า transverse field ขบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที่ไอออนบวชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับรูปที่ (2.13 d) มีผลทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทด และ drift ตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ดูรูปที่ 2.14) มีผลทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลกาซบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของกาซจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้น เป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมาก และเกิดการใกล้ผิวคาโทดของระบบแมกนีตรอน

สปัตเตอริง ซึ่งอาจสันนิษฐานว่าระบะปลดการชนในไดโอด สปัตเตอริง ณ ความดันที่ใช้สูงมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมในบริเวณนี้ และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณดาร์คสเปซ ในไดโอดสปัตเตอริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมาก โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 300 ถึง 800 โวลต์ ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอก เรียกว่า ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบ ทรงกระบอก (cylindrical magnetron sputtering) และเรียกว่า ลานาร์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (planar magnetron sputtering) ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบไดโอด สปัตเตอริงที่ใช้เป้าแผ่นราบ

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดเข้มมากบริเวณเป้าสารเคลือบ ทำให้อัตราการสปัตเตอริงของระบบนี้มีค่าสูงขึ้นขณะที่ ความดันกาซในระบบจะมีค่าต่ำ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปัตเตอริงแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทรงกระบอก โดยทั่วไปมีอัตราการสปัตเตอริงสูงกว่า 10,000 $\text{\AA}/\text{min}$ อัตราการเคลือบสูงกว่า 2,000 $\text{\AA}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ผิวคาโทดประมาณ 20 mA/cm^2 หรือสูงกว่า แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง 300 ถึง 800

โวลต์ ที่ความดันก๊าซประมาณ 4 มิลลิทอร์ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูง ขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลให้กับระบบสปัตเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่าย และเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไตรโอดสปัตเตอริง ระบบสามารถทำงานเคลือบได้ที่ความดัน ก๊าซต่ำถึง 10^{-5} ทอร์ ข้อเสียเปรียบของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิ เล็กโตรดมีค่าต่ำ จึงจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อควบคุมคุณ ภาพฟิล์มเคลือบแต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบแมกนีตรอนสามารถควบคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ ทำ ให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทดให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็กจึงมีอิเล็กตรอนที่ หลุดออกมาและวิ่งเข้าสู่แผ่นรองรับปริมาณน้อย จึงลดปัญหาความร้อนบนแผ่นรองรับเนื่องจาก การชนของอิเล็กตรอนลงได้อย่างมาก

ค. อาร์ เอฟ สปัตเตอริง (Radio Frequency or R.F. sputtering) คือการใช้ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสลับความถี่สูง เพิ่มปริมาณไอออนให้กับระบบ เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้า ระหว่างคู่อิเล็กโตรดซึ่งมีขนาดเท่ากัน ดาร์ค สเปซ จะปรากฏขึ้นที่ผิวหน้าอิเล็กโตรดทั้งสองซึ่ง ในความเป็นจริงสภาพ ดี ซี โกลว์ ดิสชาร์จ เกิดขึ้นแต่ละช่วงเวลาสั้น ๆ สลับกันไปมา เมื่อ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับยังมีค่าต่ำ แต่ละครึ่งไซเคิลมีเวลายาวนานพอับชบวนการเกิด ดี ซี โกลว์ ดิสชาร์จ โดยโกลว์ดิสชาร์จที่เกิดขึ้นยังอาศัยอิเล็กตรอนชุดที่ถูกผลิตจากอิเล็กโตรดแต่ ละด้าน เพื่อรักษาสภาพดิสชาร์จไว้และการดิสชาร์จจะไม่เกิดขึ้นเมื่อความดันก๊าซภายในระบบ ต่ำกว่า 20 มิลลิทอร์ เช่นเดียวกับใน ดี ซี ดิสชาร์จ

เมื่อความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงกว่า 50 kHz พบว่าความดันก๊าซต่ำสุดที่ ยังคงรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ได้มีค่าลดลงอย่างช้า ๆ และลดลงมากขึ้นเมื่อความถี่สูงใน ระดับ MHz แสดงถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากอิเล็กตรอนชุดที่ถูกผลิต จากผิวอิเล็กโตรด ซึ่งเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนสามารถรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าความถี่สูง และ ไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซได้

รูปที่ 2.14 แสดงการจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตัวของเป้าสารเคลือบใน
พลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอริง (1, หน้า 286)

รูปที่ 2.15 แสดงการจัดสนามแม่เหล็กและแนวทางเดินอิเล็กตรอนบนผิวเป้าสารเคลือบ
ที่คาโทด กรณีนี้อาโนด คือ ผนังแชมเบอร์สุญญากาศทรงกระบอกซึ่งได้
แสดง ให้เห็นในรูป (4, หน้า 195)

เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กความถี่สูง
สามารถรับพลังงานจากสนามและสั่นตัว (oscillate) ด้วยเฟสของความเร็วต่างจากสนามไฟฟ้า
90° ในสภาวะนี้อิเล็กตรอนจะรับพลังงานเฉลี่ยจากสนามเป็นศูนย์ ถ้าระหว่างช่วงการรับพลัง
งานจากสนามอิเล็กตรอนเกิดการชนกับโมเลกุลของก๊าซ พลังงานจะถูกถ่ายทอดให้กับโมเลกุล
ของ ก๊าซก่อนการรับพลังงานในช่วงลบของไซเคิล และถ้าการรับพลังงานจากสนามและ
การส่งถ่ายพลังงานสู่โมเลกุลของก๊าซมีความสัมพันธ์ที่เหมาะสม พลังงานจากสนามไฟฟ้าจะถูก
สะสมในโมเลกุลของก๊าซ และถูกเปลี่ยนเป็นการไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซแทน เราพบว่าเมื่อ
ความถี่สูงขึ้น โอกาสการเกิดไอออนไนซ์จะสูงขึ้นตามไปด้วย ที่ความถี่ปริมาณการเกิด
ไอออนไนซ์จะขึ้นแปรผันตามกำลังสองของความเข้มสนามไฟฟ้าสลับนี้ และเนื่องจากการดิส
ชาร์จที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นกับปริมาณอิเล็กตรอนชุดที่สองจากอิเล็กโตรด แม้แรงดันไฟฟ้าค่าต่ำมาก
สามารถทำให้ขบวนการ อาร์ เอฟ โกลว์ เกิดขึ้นได้ และความดันต่ำสุดที่รักษาภาพ อาร์ เอฟ
โกลว์ ไว้ได้มีค่าต่ำประมาณ 0.5 มิลลิทอร์

การใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่าทิศทางขนานสนามไฟฟ้าช่วยลดการสูญเสียของอิเล็กตรอน
จากบริเวณพลาสมา เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตส่วนใหญ่จะถูกกักบริเวณการเคลื่อนที่ไว้ได้
ด้วยสนามแม่เหล็กและเพิ่มประสิทธิภาพการดิสชาร์จ สนามแม่เหล็กชนิดนี้เหมาะกับขบวนการ

อาร์ เอฟ โกลว์ดิสชาร์จ ในขณะที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเหมาะกับการเพิ่มประสิทธิภาพใน ดี ซี โกลว์ดิสชาร์จ

สภาพพลาสมาที่ผลิตจากขบวนการ อาร์ เอฟ โกลว์ ดิสชาร์จ จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกสูงกว่าใน ดี ซี โกลว์ ดิสชาร์จ เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนมากและสามารถเคลื่อนเข้าสู่อิเล็กโทรดได้เป็นส่วนใหญ่ในแต่ละครึ่งไซเคิลของไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะที่ไอออนใช้เวลาหลายไซเคิลในการเคลื่อนที่สู่อิเล็กโทรด ดังนั้นกระแสส่วนใหญ่ใน อาร์ เอฟ ดิสชาร์จคือ กระแสอิเล็กตรอนเคลื่อนที่สู่อิเล็กโทรดในแต่ละครึ่งไซเคิล คืออิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากผิว อิเล็กโทรดภายในระยะทาง L เมื่อเริ่มต้นไซเคิล

ขนาดของแอมพลิจูด

$$L = \frac{\mu E_m}{W}$$

(2.5)

เมื่อ μ คือค่า mobility ของอิเล็กตรอนที่ความดันก๊าซขณะใช้งาน E_m คือ ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าสลับ และ W คือความเร็วเชิงมุมของไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้การดิสชาร์จเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ระยะระหว่างอิเล็กโทรด d ควรมีค่าสูงกว่า $2L$ มิฉะนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นจาก อาร์ เอฟ ดิสชาร์จ จะถูกกวาดเข้าสู่อิเล็กโทรดทั้งหมดในหนึ่งไซเคิล

สภาพพลาสมาอาร์ เอฟ ดิสชาร์จมีความสูงเข้มสูงภายในระยะทาง $d-2L$ ซึ่งห่างจากผิว

อิเล็กโทรดแต่ละด้านเป็นระยะทาง L และมีปริมาณอิเล็กตรอนคงที่ปริมาณอิเล็กตรอนลดลงอย่างรวดเร็วระยะทาง L จากผิวอิเล็กโทรด ในแต่ละครึ่งไซเคิลของการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของพลาสมามีค่าเป็นบวก แปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขั้วอิเล็กโทรด และแปรผกผันกับความดันก๊าซภายในระบบ

ไอออนที่เกิดขึ้นในพลาสมาภายในระยะทาง L จากขั้วอิเล็กโทรดใดจะวิ่งเข้าหาอิเล็กโทรดด้านนั้นด้วยสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด และสเปซชาร์จที่เกิดขึ้นในแต่ละครึ่งไซเคิลลบของอิเล็กโทรด ส่วนในครึ่งไซเคิลบวกไอออนมิได้ถูกผลักออกจากอิเล็กโทรด เนื่องจากสภาพพลาสมาครอบคลุมมาถึงอิเล็กโทรดด้วยจึงทำให้ไอออนยังคงเคลื่อนตัวเข้าหาอิเล็กโทรดเดิมโดยเกิดการหนีจากสนามไฟฟ้าของพลาสมาน้อยมาก ขณะที่ไอออนถึงขั้วอิเล็กโทรดพลังงานของไอออนอาจมีค่าสูงเป็น 2 เท่า ของศักย์ไฟฟ้าสูงสุดจากแหล่งกำเนิด อาร์ เอฟ

จากสภาวะที่เกิดขึ้น ขบวนการสเปซชาร์จเกิดขึ้นบนผิวของทั้งสองอิเล็กโทรดในปริมาณเท่ากัน การเพิ่มพื้นที่ของอิเล็กโทรดด้านหนึ่งสูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนลดลงผกผันกับพื้นที่ที่เพิ่มขึ้น แต่ลดความหนาแน่นกระแสไอออนลงต่ำกว่านั้นมาก พบว่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมในอาร์ค สเปซ แต่ละด้านมีความสัมพันธ์พื้นที่ของอิเล็กโทรด ตามสมการ

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^4$$

(2.6)

เมื่อ V_1 และ V_2 คือศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมดาร์ค สเปซ ของอิเล็กโทรด 1 และ 2 ส่วน A_1 และ A_2 คือพื้นที่ของอิเล็กโทรด 1 และ 2 ตามลำดับ อันยังผลให้อัตราการสปีดเตอร์ที่ผิวอิเล็กโทรดทั้งสองแตกต่างกันสูงมาก โดยสเปซซาร์จที่ผิวของอิเล็กโทรดทั้งสองประพุดิตัวเสมือนเป็น คาปาซิเตอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ และอิมพีแดนซ์จากคาปาซิเตอร์แต่ละตัว กำหนดอัตราการเกิดสปีดเตอร์ที่ผิวอิเล็กโทรด การสร้างให้พื้นที่อิเล็กโทรดแตกต่างกันนี้มีได้เป็นวิธีเดียวในการทำให้สปีดเตอร์เกิดที่อิเล็กโทรดด้านเดียว การใช้ฉนวนไฟฟ้าติดบนอิเล็กโทรดหนึ่งเพื่อเพิ่มความหนา และลดคาปาซิแตนซ์ หรือการใช้วงจรแมทชิง (matching network) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้การสปีดเตอร์เกิดขึ้นอย่างเข้มข้นที่ผิวอิเล็กโทรดเพียงด้านเดียว ทำให้สามารถควบคุมสิ่งสกปรกอันเกิดจากการสปีดเตอร์ที่ผิวอิเล็กโทรดอีกด้านหนึ่งได้

การทำ อาร์ เอฟ สปีดเตอร์ ยังสามารถใช้กับการสปีดเตอร์สารไดอิเล็กตริก หรือฉนวนไฟฟ้าได้ในขณะที่ ดี ซี สปีดเตอร์ทำไม่ได้ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนสารไดอิเล็กตริกในระบบ ดี ซี จะสะสมศักย์ไฟฟ้าบวกที่ผิวหน้าของฉนวนจนมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอาโนด และทำให้ขบวนการสปีดเตอร์สิ้นสุดลง ส่วนระบบ อาร์ เอฟ จะพาอิเล็กตรอนเข้าสู่ผิวไดอิเล็กตริกและทำให้ผิวหน้าเป็นกลาง หรือเป็นลบในช่วงไซเคิลบวกเพื่อพร้อมที่จะเกิดขบวนการสปีดเตอร์ได้อีกในช่วงไซเคิลลบถัดไป

สัญญาณ อาร์ เอฟ อาจจ่ายสู่ระบบสปีดเตอร์โดยใช้ขดลวดแยกจากอิเล็กโทรดได้ถ้าวัตถุประสงค์เพียงเพื่อเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอนในระบบเพียงอย่างเดียว ทำให้ใช้กำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิด อาร์ เอฟ ต่ำ โดยเป่าสารเคลือบยังคงอยู่กับไฟฟ้า ดี ซี ในการทำ สปีดเตอร์วิธีนี้จำกัดการเคลือบสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น การใช้สัญญาณ อาร์ เอฟ ต่อโดยตรงกับ อิเล็กโทรด เป่าสารเคลือบแม้จะช่วยให้สามารถเคลือบฉนวนไฟฟ้าได้ แต่เครื่อง อาร์ เอฟ จำเป็นต้องมีกำลังไฟฟ้าที่สูงเพียงพอ ดังนั้นวิธีแรกจึงค่อนข้างเป็นที่นิยมมากกว่า โดยเฉพาะในการทำ

รีแอคทีฟ สปีดเตอร์ (reactive sputtering) ที่ความดันก๊าซต่ำ ๆ

รูปที่ 2.16 ภาพ schematic พลาสมา อาร์ เอฟ ไดโอด สเป็คเตอริง (4, หน้า 206)

ความถี่ที่ใช้ในระบบ อาร์ เอฟ สเป็คเตอริง คือ 13.56 , 27.12 และ 40.68 MHz ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดที่ผลิตขึ้นในทางการค้า และระบบระบบโทรคมนาคมน้อยที่สุด ในขณะที่ให้ประสิทธิภาพการเกิดไอออนไนซ์เข้มข้นสูง มีความสามารถทำให้เกิดขบวนการทางเคมีที่ความดัน 0.5 มิลลิทอร์ และเพิ่มอัตราการสเป็คเตอริง ให้กับสารเคลือบได้สูงถึง 20 เท่าตัวของ ดี ซี ไดโอด สเป็คเตอริง

โดยปกติการใช้สัญญาณ อาร์ เอฟ กับระบบสเป็คเตอริง การออกแบบจำเป็นต้องมีวงจรแมชชิง เพื่อให้ประสิทธิภาพของการสเป็คเตอริงสูงสุด สายต่อที่ยาวเกินไปทำให้ค่าอินคัคทีฟ รีแอคแตนซ์กับให้วงจร กราวด์ชิลด์ที่มีระยะห่างจากคาโทดแคบและเคยใช้งานได้ดีกับระบบไฟฟ้า ดี ซี จะเป็นกราวด์ชิลด์ ที่เร็วในระบบ อาร์ เอฟ เนื่องจากประพัตติตัวเป็นคาปาซิเตอร์ที่มีค่าการสูญเสียพลังงานสูง จำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังในการออกแบบสูงขึ้น

2.8 การเคลือบสารหลายชนิดพร้อมกัน (sputtering of multicomponent materials)

คือการเคลือบสารหลายชนิดให้ผสมกันด้วยอัตราส่วนค่าหนึ่งภายในเนื้อกัน อาจทำได้โดยใช้เป้าคาโทดที่มีส่วนผสมของสารในอัตราส่วนที่ต้องการเคลือบฟิล์ม แม้ว่าธาตุแต่ละชนิดในส่วนผสมจะมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกัน เราจะพบว่าในช่วงแรกเท่านั้นที่ธาตุอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงถูกสเป็คเตอริงออกด้วย เปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าส่วนประกอบของเป้าแต่ในเวลาถัดมาปริมาณของธาตุอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงที่ผิวหน้าเป้าสารเคลือบจะลดลง และทำให้อัตราการหลุดออกของธาตุแต่ละชนิดของเป้าสารเคลือบมีอัตราส่วนเดียวกับส่วนผสมในเป้าสารเคลือบนั้น ถ้ามีการควบคุมอุณหภูมิของเป้าสารเคลือบมิให้อะตอมของธาตุบางชนิดเกิดการแพร่ (diffusion) ผ่านเนื้อวัสดุได้เร็วเกินไป Fisher และ Weber⁽⁸⁾ พบว่าอัตราส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ในเนื้อฟิล์มเคลือบมีค่าใกล้เคียงกับเป้าสารเคลือบมากในการเคลือบเหล็กสแตนเลส และทองเหลือง และ Hanau⁽⁹⁾ สรุปผลทำนองเดียวกันในการเคลือบ อัลลอยอะลูมิเนียมหลายชนิด

การเคลือบฟิล์มที่มีอัตราส่วนผสมของธาตุในฟิล์มเคลือบแตกต่างจากเป้าสารเคลือบ อาจเกิดได้จากสาเหตุหลายประการ ดังนี้

ก) คุณสมบัติของเป้าสารเคลือบสูงเกินไป ซึ่งไม่เพียงพอแต่ทำให้ธาตุบางชนิดแพร่เข้าสู่ altered layer ได้รวดเร็วกว่าชนิดอื่น ๆ แต่ยังสามารถทำให้ธาตุบางชนิดที่มีความดันไออ่อนต่ำเกิดการระเหิดตัวในอัตราที่ค่อนข้างสูง และทำให้ส่วนผสมของฟิล์มเคลือบแตกต่างจากส่วนผสมในเป้าสารเคลือบมาก

ข) มีก๊าซไวปฏิกิริยาหลงเหลือในแชมเบอร์สุญญากาศ และทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบกับธาตุบางชนิดบนผิวเป้าสารเคลือบ ทำให้การสputtering เกิดขึ้นกับสารประกอบในอัตราที่ช้ากว่าอัตราปกติมาก และทำให้สัดส่วนผสมของฟิล์มเคลือบผิดจากความต้องการ

ค) การเกิดสputtering ซ้ำ (resputtering) บนผิวชิ้นงานเคลือบจากการใส่ไบแอส (bias) หรือศักย์ไฟฟ้าลบให้กับชิ้นงานเคลือบ สารที่มีค่ายึดสูงจะถูกขบวนการ resputtering ในอัตราที่สูงกว่า

2.9 รีแอคทีฟ สputtering (reactive sputtering)

คือ ขบวนการสputtering ที่ป้อนก๊าซไวปฏิกิริยาเข้าสู่ระบบ เพื่อให้เกิดการประกอบของฟิล์มเคลือบบนชิ้นงานหรือแผ่นรองรับการสputtering ที่มีเป้าสารเคลือบเป็นโลหะบริสุทธิ์ และป้อน ก๊าซไวปฏิกิริยา (reactive gas) อาจทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนก๊าซไนโตรเจน อาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ป้อนก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือมีเทน (CH_4) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์การป้อนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ เป็นต้น โดยปกติความดันก๊าซไวปฏิกิริยาที่ใช้มีค่าค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสถานะปกติอย่าไรก็ตามคาดกันว่า อิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออนไนซ์ก๊าซ ไวปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าสถานะปกติมาก ก๊าซไวปฏิกิริยาอาจรวมตัวกับอะตอมโลหะและเกิดเป็นสารประกอบได้ 3 ลักษณะ คือ

ก) ก๊าซไวปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยากับอะตอมที่ผิวหน้าเป้าสารเคลือบเป็นสารประกอบแล้วถูกสputtering ให้ออกเคลือบลงบนแผ่นรองรับ ปฏิกิริยาส่วนนี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของก๊าซไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง พบว่าในการเคลือบไททาเนียมไนไตรด์เมื่อป้อน ก๊าซไนโตรเจนที่มีปริมาณเพียงพอในการเกิดไททาเนียมไนไตรด์บนฟิล์มเคลือบที่เป้าสารเคลือบส่วนที่มีอัตราการสputtering ต่ำจะปรากฏฟิล์มสีทองของไททาเนียมบริเวณนั้นปรากฏการณ์นี้เรียกว่า target poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง เนื่องจากยึดติดในการสputtering ไททาเนียมไนไตรด์มีค่าต่ำกว่ายึดของการสputtering โลหะไททาเนียม

ข) ก๊าซไวปฏิกิริยา รวมตัวกับอะตอมที่ถูกสputtering ในระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นรองรับแล้วลงเคลือบบนแผ่นรองรับ ขบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดได้น้อยมาก เนื่องจาก

สภาวะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและเอนทัลปี แต่เป็นไปได้ที่การรวมตัวของสารประกอบจะเกิดขึ้นในช่วงนี้

ค) ก๊าซไวปฏิกิริยารวมตัวกับสารเคลือบบนผิวรองรับหรือชิ้นงานการทำรีแอคทีฟเตอริง โดยทั่วไปความดันของก๊าซไวปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดขบวนการไกลด์ดิสซาร์จ ในขบวนการจึงใช้ก๊าซไวปฏิกิริยาผสมกับก๊าซเฉื่อย ทำให้รักษาสภาวะไกลด์ดิสซาร์จไว้ได้ในเวลาเดียวกันช่วยให้ค่าอีลด์จากการสเปคโตรสโกปีสูงขึ้นด้วยการทำรีแอคทีฟเตอริง ยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความดันย่อย

รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดปฏิกิริยารวมตัวเป็นสารประกอบก๊าซไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ

ของก๊าซไวปฏิกิริยาต้องมีค่าพอเหมาะกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ เช่น การเคลือบสารประกอบ ferroferric oxide (Fe_3O_4) ความดันก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในรีแอคทีฟเตอริงถูกจำกัดอยู่ในช่วงความดันแคบมาก ถ้าความดันย่อยของก๊าซออกซิเจนมากเกินไปจะเกิดสารประกอบของ ferric oxide (Fe_2O_3) ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสารประกอบ ferrous oxide (FeO) หรือฟิล์มของเหล็ก (Fe)

- ก๊าซที่ใช้ในระบบสเปคโตรสโกปีต้องมีความบริสุทธิ์สูง ถ้ามีก๊าซอื่นปนปลอมปนอยู่มากจะได้ฟิล์มเคลือบไม่ตรงชนิดที่ต้องการ

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้น มีปรากฏการณ์บางอย่างเกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนก๊าซไวปฏิกิริยาและอาร์กอนผสมกันเข้าสู่ระบบสเปคโตร เมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซไวปฏิกิริยาสูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง เรียกว่า critical injection rate ขณะที่อัตราการสเปคโตรมีค่าคงที่ จะพบว่าอัตราการเคลือบลดลงอย่างทันทีทันใด ในหลายกรณีพบว่าช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเมื่อฟลักซ์ของก๊าซไวปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกับฟลักซ์ของอะตอมที่ถูกสเปคโตรในระบบ และน่าแปลกใจที่ช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่ได้ขึ้นกับค่าความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ในระบบสเปคโตรสโกปี ไม่ขึ้นกับค่าความดันย่อยของก๊าซไวปฏิกิริยา และไม่ขึ้นกับพื้นที่ของเป้าสารเคลือบ ซึ่งสันนิษฐานว่าลดลง

ของอัตราการเคลือบเกิดจากการเกิดสารประกอบบนผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (target poisoning) เนื่องจากมีปริมาณก๊าซไวปฏิกิริยาสูงสารประกอบที่เกิดขึ้นมีค่าyieldจากการสเปกเตอร์ลดลง แต่ให้ผลการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ที่สองในปริมาณสูงขึ้น อันเป็นสาเหตุทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าลดลงจากการเพิ่มความนำไฟฟ้าของระบบ

2.10 ขบวนการไอออนเพลทติง (ion plating)

คือ ขบวนการเคลือบฟิล์มที่รวมขบวนการระเหยสารและสปัตเตอริงเข้าด้วยกัน ซึ่ง Don Mattox⁽¹⁰⁾ เป็นผู้พัฒนาขึ้นโดยการยึดแผ่นรองรับการเคลือบฟิล์มเข้ากับคาโทด ซึ่งต่อกับแรงดันไฟฟ้าลบแรงสูง โกลวดิสชาร์จช่วงแรกใช้ในการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นรองรับกระทำในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย จากนั้นจึงระเหยสารเคลือบขึ้นสู่แผ่นรองรับขณะสภาวะโกลวดิสชาร์จยังคงมีอยู่ ดังนั้นอะตอมของสารที่ถูกระเหยส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนสภาพเป็นไอออน Aisenberg และ Chabot⁽¹¹⁾ รายงานว่าประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ของอะตอมจากการระเหยจะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นไอออน เมื่อเทียบกับก๊าซเฉื่อยปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นในโกลวดิสชาร์จมีเพียง 0.01 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ดังนั้นไอออนที่เกิดจากสารเคลือบจึงมีปริมาณมากเพียงพอที่จะรักษาสภาพโกลวดิสชาร์จไว้โดยไม่ต้องอาศัยก๊าซเฉื่อยในระบบอีกต่อไป เมื่อปริมาณการระเหยสารมีค่าสูงเพียงพอและพบว่าการโกลวดิสชาร์จจะให้สีเฉพาะจากชนิดของสารเคลือบที่ถูกระเหยส่วนใหญ่ของอะตอมที่ถูกระเหยจะเคลื่อนที่เข้าเกาะแผ่นรองรับด้วยค่าพลังงานสูงจากความร้อน (thermal energy) ที่ใช้ในการระเหยอีกส่วนหนึ่ง การวิ่งชนจากไอออนพลังงานสูงของสารระเหยนั่น ส่วนหนึ่งจะทำให้เกิดขบวนการสปัตเตอริงให้ฟิล์มหลุดออก และอีกส่วนหนึ่งชนเกิดการฝังตัวบนเนื้อฟิล์มและเนื้อแผ่นรองรับ รวมทั้งการชนของอนุภาคพลังงานสูงนี้ทำให้อะตอมสารเคลือบที่เกาะกันอย่างหลวม ๆ จากการระเหยสารชนอัดตัวแน่นเข้าด้วยกันจนเกิดการยึดเกาะกับแผ่นรองรับ และยึดเกาะกันเองระหว่างอะตอมสารเคลือบดีขึ้น ถ้าปรับอัตราการระเหยสารให้สูงพอ การเคลือบจะเกิดขึ้นมากกว่าถูกสปัตเตอริง และฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการเคลือบที่เพิ่มขึ้น และพบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีนี้ให้การยึดเกาะของฟิล์มต่อแผ่นรองรับดีมาก Swaroop และ Adler⁽¹²⁾ พบว่าในการเคลือบทองแดงลงบนเหล็กด้วยวิธีไอออนเพลทติงอะตอมของทองแดงสามารถซึมลึก (implantation) ลงในเนื้อเหล็กได้ถึง 7-8 ไมครอน ซึ่งอธิบายได้ดีถึงคุณภาพการยึดเกาะของฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีไอออนเพลทติง

วิธีการไอออนเพลทติง เป็นขบวนการที่ให้อัตราการเคลือบสูงมาก 50 ไมครอน/นาที่ และทำให้ความดันจากอะตอมสารเคลือบมีค่าสูงถึง 10^{-4} ทอร์ ดังนั้นการชนกันเองระหว่างอะตอมและไอออนของสารเคลือบย่อมเกิดขึ้นได้มากระหว่างเคลื่อนที่เข้าสู่แผ่นรองรับ ทำให้

พลังงานของอะตอมที่ลงเคลือบมีค่าพลังงานเฉลี่ยค่อนข้างสูง และมีการเคลื่อนตัวได้ดีบนผิว

รูปที่ 2.18 แสดงแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จ, อัตราการเคลือบ และปริมาณการใช้ก๊าซไวนิลปฏิกิริยาเข้าเมื่อพล็อตเทียบกับปริมาณก๊าซไวนิลปฏิกิริยาเข้าสู่ระบบสปีดเตอริง แบบแมกนีตรอนทรงกระบอก ข้อมูลที่ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เมื่ออัตราการป้อนก๊าซไวนิลปฏิกิริยามีค่าสูงจุดหนึ่งปริมาณใช้ก๊าซปฏิกิริยา คือ ก๊าซไวนิลปฏิกิริยาที่ป้อนเข้าสู่ระบบแล้วไม่ผ่านออกสู่ระบบ บีม a) คือพลังงานอันเกิดจากปฏิกิริยาของ Cr-O ที่ค่า กระแสสปีดเตอริง 1A, ความดันก๊าซอาร์กอน 1 มิลลิทอร์ b) คือผลอันเกิดจากปฏิกิริยาของ Nb-N ที่กระแส สปีดเตอริง 10A ความดันก๊าซอาร์กอน 1.5 มิลลิทอร์ (3, หน้า 108)

รูปที่ 2.19 แสดงการจัดอุปกรณ์การเคลือบสารแบบไอออนเพลทติง (1, หน้า 276) แผ่นรองรับ เนื่องจากแผ่นรองรับมีอุณหภูมิสูงจากการถูกชนด้วยไอออน ดังนั้นอะตอมสามารถจัดเรียงตัวเองใหม่บนผิวแผ่นรองรับและปรับให้ความหนาของฟิล์มเคลือบกระจายได้ถึงชิ้นงาน

2.11 การเคลือบสารแบบ (Activated Reactive Evaporation) (ARE)

คือการเคลือบสารอีกวิธีหนึ่งที่อาศัยขบวนการโกลว์ดิสชาร์จ และการระเหยสารร่วมกัน ซึ่ง Rointan Bunshah และคณะ⁽⁴⁾ เป็นผู้พัฒนาขึ้น ภายในขบวนการเคลือบไอของโลหะอัลลอยจากการระเหยสารจะถูกผลิตขึ้นในบรรยากาศของก๊าซไวปฏิกิริยาภายใต้ขบวนการโกลว์ดิสชาร์จ ซึ่งเร่งให้เกิดการไอออนไนซ์ของก๊าซไวปฏิกิริยา และอะตอมของโลหะทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบได้ดีขึ้น สารประกอบนี้อาจในสถานะก๊าซหรือเกิดบนผิวของแผ่นรองรับซึ่งเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น แม้จะใช้ก๊าซไวปฏิกิริยาที่ความดันต่ำก็ตาม ในการใช้พลังงานความร้อนจากลำอิเล็กตรอนในการระเหยสาร เนื้อผิวสารเคลือบมีปริมาณอิเล็กตรอนอยู่มาก ดังนั้นการต่อศักย์ไฟฟ้าบวกค่าไม่สูงนัก (20-100V) จะช่วยดึงอิเล็กตรอนขึ้นสู่ตอนบนอิเล็กตรอนพลังงานต่ำนี้ให้ประสิทธิภาพในการไอออนไนซ์โมเลกุลของก๊าซและอะตอมของโลหะได้ดีและทำให้เกิดขบวนการโกลว์ดิสชาร์จขึ้น นอกจากนี้การชนกันระหว่างไอออนและอะตอมที่เป็นกลางภายในระบบทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าอันยังผลให้มีทั้งไอออน และอะตอมเป็นกลางที่มีพลังงานสูง ซึ่งเชื่อกันว่าอะตอมพลังงานสูงที่เคลือบบนแผ่นรองรับพร้อมกับไอออนนี้ช่วยเร่งปฏิกิริยาในการเกิดสารประกอบ และทำให้ปริมาณก๊าซไวปฏิกิริยาถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 2.20 แสดงการจัดอุปกรณ์ที่ใช้กับการเคลือบสาร

แบบ activated reactive evaporation (4, หน้า 126)

วิธีการเคลือบแบบ ARE นี้ สามารถใช้เคลือบฟิล์มของ Y_2O_3 , TiN, TiC, VC, ZrC, HfC, NbC และ TaC ด้วยอัตราการเคลือบที่สูงมากระหว่าง 3 ถึง 12 ไมครอน/นาที่ ภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเพียงประมาณ 0.5 มิลลิทอร์ เมื่ออาศัยการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นรองรับร่วมด้วยพบว่า ฟิล์มที่ได้ติดแน่นและมีความคงทนมาก ถ้าเพิ่มการจ่ายสนามไฟฟ้าเข้าระหว่างจตุระเหยสารและแผ่นรองรับเพื่อเร่งอนุภาคจากการไอออนไนซ์ให้มีพลังงานสูงขึ้นก่อนเข้าชนแผ่นรองรับ วิธีการนี้เรียกว่า activated reactive ion plating ซึ่งให้คุณสมบัติของฟิล์ม เคลือบที่มีความหนาแน่นสูงขึ้น และการยึดเกาะดีมาก นอกจากนี้เพิ่มสนามแม่เหล็กและสัญญาณ อาร์ เอฟ เข้าสู่ระบบมีส่วนช่วยให้การเคลือบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

วิธีการเคลือบสารแบบไอออนเพลทติง และ activated reactive evaporation นี้ แม้ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเคลือบสารด้วยวิธีสปัตเตอริง แต่การเคลือบไททาเนียไนไตรด์ใช้วิธีการเคลือบทั้ง 3 วิธีนี้เป็นหลัก จึงได้กล่าวนำไปเพื่อการเปรียบเทียบ

2.12 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบพลาสมาแมกนีตรอน สปัตเตอริงและอิทธิพลต่อคุณสมบัติฟิล์มเคลือบ

2.12.1 ส่วนประกอบของคาโทดและเป้าสารเคลือบ ในการออกแบบคาโทด และการติดตั้งเป้าสารเคลือบให้มีรูปร่างต่าง ๆ เพื่อความเหมาะสมกับประเภทของงานนั้นมีสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาในการออกแบบ 5 อย่าง คือ ระบบหล่อเย็น, ระบบฉนวนของไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อวงจรไฟฟ้า, สนามแม่เหล็ก, คาโทดยิลด์ และวัสดุที่ใช้ในการสร้าง

2.12.1.1 ระบบหล่อเย็น (cooling system) โดยการประมาณในขบวนการสปัตเตอริง พลังงานเพียง 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากเป้าสารเคลือบบนแผ่นรองรับ 75 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่ถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนที่เป้าสารเคลือบจากการชนของไอออนที่ผิวเป็นขบวนการสปัตเตอริง ส่วนที่เหลือคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สอง และทำให้เกิดพลาสมาในระบบซึ่งจะวิ่งชน และกลายเป็นพลังงานความร้อนบนแผ่นรองรับและผนัง 챔เบอร์สุญญากาศ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบนเป้าสารเคลือบนี้มีค่าสูงมากจนอาจจะละลายเป้าสารเคลือบได้ ทั้งสามารถก่อปัญหาให้เกิดการแพร่ที่แตกต่างกันของธาตุต่างชนิดในการเคลือบอัลลอย ทำให้ฟิล์มเคลือบมีปริมาณธาตุต่าง ๆ ในอัลลอยแตกต่างจากเป้าสารเคลือบมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบหล่อเย็นเข้ากับคาโทดและเป้าสารเคลือบเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว การหล่อเย็นอาจใช้น้ำมันเป็นวัสดุหล่อเย็น น้ำมันมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าดีกว่าน้ำ และทำให้เกิดการกัดกร่อน (corrosion) ของเนื้อวัสดุที่ใช้ทำคาโทดกว่า

น้ำ แต่ประสิทธิภาพในการทำควมเย็นน้อยกว่าน้ำ และมีราคาแพง รวมทั้งมีความหนืดสูงทำให้ต้องใช้ปั๊มขนาดใหญ่ และก่อให้เกิดความสกปรกแก่ระบบสุญญากาศได้ง่าย น้ำแม้จะมีสภาพ นำไฟฟ้าสูงกว่าและต้องใช้ร่วมกับระบบไฟฟ้าแรงสูงที่คาโอดแต่มีราคาถูก

การหล่อเย็นอาจให้เป่าสารเคลือบสัมผัสโดยตรงกับน้ำโดยซีล (seal) กันน้ำรั่วไหลด้วยแผ่นยางระหว่างคาโอดกับแผ่นเป่าสารเคลือบ หรืออาจเป็นแบบคาโอดปิดด้วย backing plate กันน้ำรั่วไหล และติดแผ่นสารเคลือบโดยการเชื่อมติด (soldering) เข้ากับ backing plate การยึดแผ่นเป่ากับ backing plate ด้วยสกรูยึดทำให้การระบายความร้อนไม่ดีทุกผิวสัมผัส และทำให้เกิดการโก่งงอของแผ่นเป่านี้การสัมผัสระบายความร้อนอันทำให้เกิดความเสียหายกับ เป่าสารเคลือบได้ วัสดุทั่วไปที่ใช้ทำ backing plate ของคาโอดคือทองแดง เนื่องจากนำความร้อนได้ดีและต้องมีความหนาเพียงพอในการทนความดันบรรยากาศ และ ความดันน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นโดยไม่เกิดการโป่งนูนออก

การออกแบบใช้น้ำหล่อเย็นจะนิยมควบคุมให้อุณหภูมิของขาเข้าและขาออกแตกต่างกันไม่เกิน 10°C อุณหภูมิขี้น้ำขณะหล่อเย็นควรมีค่าสูงกว่าจุดกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศเพื่อป้องกันการจับเกาะของไอน้ำขณะคาโอดถูกเปิดออกสัมผัสบรรยากาศ อันเป็นสาเหตุให้เกิดการลัดวงจรหรือปั๊มความดันลงยากในการเคลือบครั้งต่อไป ความนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ควรมีค่าต่ำโดยมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า 10 กิโลโอห์ม-เซนติเมตร ($\text{k}\Omega\text{-cm}$) เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากขั้วคาโอดสู่กราวด์ของระบบน้ำหล่อเย็น ปริมาณของน้ำหล่อเย็นต่ำสุดที่ใช้กับระบบหล่อเย็นสัมพันธ์กับกำลังงานไฟฟ้าของระบบสัปดาห์เตอริง แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่าง ๆ

ที่ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของระบบหล่อเย็นไม่เกิน 10°C

(3, หน้า 40)

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	3.04	30	42	11
10	14	3.7			

2.12.1.2 ระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อวงจรไฟฟ้า เนื่องจากคาโทดและเป้าสารเคลือบถูกต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าแรงสูงในขณะที่แทมเบอร์สุญญากาศเป็นกราวด์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ฉนวนไฟฟ้ากัน ฉนวนนี้ต้องมีคุณสมบัติในการซีลระบบสุญญากาศได้ดี อาจใช้ซีลโลหะเซรามิกหรือใช้เทฟลอน (teflon) และแผ่นยางซีลสุญญากาศร่วมกัน (ถ้าใช้สัญญาณอาร์เฟอ ฉนวนทุกจุดควรมีความหนามาก เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในฉนวนไฟฟ้าจากความถี่สูง ท่อน้ำต้องใช้ท่ออย่างซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า และควรให้มีความยาวมากสัมพันธ์กับขนาดท่อเพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าผ่านน้ำจากคาโทดสู่กราวด์ ถังน้ำหล่อเย็นควรต่อลงกราวด์และขั้วต่อไฟฟ้า แรงสูงควรมีฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าช็อต ส่วนรอยต่อไฟฟ้าทุกจุดควรยึดด้วยโบลท์และนัทขันแน่น หรือเชื่อม (solder) ติดกัน

2.12.1.3 สนามแม่เหล็ก (magnetic field) พลาสมาแมกนีตรอนสเป็คเตอรังจะมีโครงสร้างสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าทั้งหมด และการกักกร่อนเกิดขึ้นสูงในเป็นบางบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีความเข้มข้นสูง ดังนั้นการกักกร่อนบนผิวเป้าสารเคลือบจะเป็นรูปตัว V ลึกลงเป็นบางบริเวณ อายุการใช้ของเป้าสารเคลือบจะสิ้นสุดลงเมื่อร่องลึกปรากฏเท่ากับความหนาของเป้า ดังนั้นการจัดขั้วแม่เหล็กให้มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ย่อมสามารถทำให้การกักกร่อนจากการสเป็คเตอรังกระจายออกทั่วแผ่นเป้า และลดความสิ้นเปลืองจากการใช้เป้าอย่างไม่มีประสิทธิภาพสนามแม่เหล็กที่ใช้ อาจใช้ได้ทั้งแม่เหล็กถาวร และแม่เหล็กไฟฟ้า โดยติดตั้งไว้ภายนอกแต่แม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถติดตั้งชิดกับเป้าสารเคลือบได้ เนื่องจากไม่สามารถจุ่มขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ในระบบน้ำเย็นหล่อเย็นซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าค่าเดียวกับคาโทดได้ ดังนั้นจึงอาจติดตั้งไว้ภายนอกระบบหล่อเย็น ทำให้ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กบนผิวมีค่าต่ำและลดอัตราการสเป็คเตอรังลง แม้จะทำให้ความหนาของส่วนหล่อเย็นที่ติดกับเป้าสารเคลือบบางลงก็ตาม

การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็ก นอกจากจะมีผลต่อการกักกร่อนบนผิวเป้าสารเคลือบแล้วยังมีผลต่อความหนาของฟิล์มเคลือบ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วย การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็กที่ไม่ดีพอและการวางตำแหน่งแผ่นรองรับใกล้คาโทดมากเกินไปจะทำให้ความหนาฟิล์มเคลือบเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่กักกร่อนบนเป้า การจัดให้ฟิล์มเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ อาจทำได้โดยการจัดตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมและใช้การเคลื่อนที่ของแผ่นรองรับร่วมด้วย เพื่อให้บริเวณที่เกิดอัตราการเคลือบเร็วและช้าได้กระจายสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าแผ่นรองรับหรือชิ้นงานนั้น

การปลดปล่อยอนุภาคขบวนการสเป็คเตอรัง แม้ว่าอะตอมสารเคลือบจะชนกับโมเลกุลของก๊าซจนเปลี่ยนทิศทางไปมากจากจุดเริ่มต้น และถือเสมือนว่าเป็นขบวนการแพร่ (diffusion)

ลงเคลือบแผ่นรองรับในทุกทิศทางก็ตาม फिल्मเคลือบที่ได้ย่อมไม่สามารถทำให้ความหนาสม่ำเสมอได้ถ้าการปลดปล่อยภาคจากทุกจุดบนเป้าสารเคลือบไม่สม่ำเสมอกัน Glang⁽²⁾ พบว่าในแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบพลาสมาวงกลม फिल्मเคลือบจะมีความสม่ำเสมอดีที่สุด เมื่อรัศมีภายในและภายนอกของวงพลาสมามีค่าเป็น 0.7 และ 0.8 ของระยะระหว่างเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับตามลำดับ เมื่อแผ่นเป้าวงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนแหวนพลาสมาของการเกิดสปัตเตอริงควรมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามขนาดของแผ่นเป้าเพื่อให้ความหนาฟิล์มเคลือบมีความสม่ำเสมอ และเพื่อการใช้งานเป้าสารเคลือบอย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 2.21 แสดงแนวการกัดกร่อนจากตำแหน่งการวางหัวแม่เหล็ก รูปบน คือเป้า



รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 10 x 25 ตารางเซนติเมตร การกัดกร่อนแนวพลาสมา

วงแหวน ใช้กำลังงาน 7 วัตต์/ตารางเซนติเมตร แบบ เอฟ สปัตเตอริง ที่ความดันก๊าซอาร์กอน 1 มิลลิทอร์ รูปล่าง คือเป้า Al-4% Cu รูปสี่เหลี่ยมผืน

ผ้าขนาด 19 x 25 ตารางเซนติเมตร เกิดการกัดกร่อนแนววงแหวนพลาสมา

2 วง ใช้กำลังงานไฟฟ้า 5.6 วัตต์/ตารางเซนติเมตร แบบ ดี ซี สปัตเตอริง ที่ความดันก๊าซอาร์กอน 9 มิลลิทอร์ การกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบต่าง

เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นแม่เหล็ก (3, หน้า 141)

2.12.1.4 ซีลด์คาโทดและความสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบ (cathode shielding

and uniformity of the deposit) ปกติขบวนการโกลว์ดีสชาร์จทำให้เกิดการสัปดาห์ทุกบริเวณของคาโทดที่ปรากฏศักย์ไฟฟ้าลบต่อไอออน ดังนั้นเพื่อป้องกันการสัปดาห์ในบางบริเวณที่มีได้ติดเป้าสารเคลือบไว้จึงหุ้มล้อมรอบคาโทดด้วยตัวนำไฟฟ้า ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับคาโทด หรือกราวด์ เรียกว่า คาโทดซีลด์ โดยซีลด์มีระยะห่างจากคาโทดน้อยกว่าระยะดาร์คสเปซ ในบาง

กรณีซีลด์จะคลุมเลยขอบของเป้าสารเคลือบ เพื่อป้องกันมิให้เกิดการสัปดาห์สกรูยึดเป้าสารเคลือบทำให้การเคลือบฟิล์มมีความบริสุทธิ์ ปราศจากสารปลอมปนจากสกรูยึดเป้าสารเคลือบนั้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการซีลด์จะป้องกันการสัปดาห์ในบางบริเวณได้ บริเวณขอบปลายแหลมหรือฝุ่นผงสิ่งสกปรกที่จับอยู่ระหว่างคาโทดและซีลด์อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอาร์คได้

รูปที่ 2.22 แสดงผลคำนวณการกระจายความหนาแน่นของฟิล์มเคลือบจากแผ่นเป้าวงกลมความหนาสัมพัทธ์ พล็อตเทียบกับระยะทางจากจุดศูนย์กลางเป้าสารเคลือบสำหรับวงแหวนพลาสมา ตั้งแต่ 1 ถึง 4 วง เมื่อระยะทางระหว่างเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับ 5 เซนติเมตร ความกว้าง วงแหวนพลาสมา 2 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างวงแหวน 2 เซนติเมตร (3, หน้า 144)

การปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบด้วยชนของไอออนในแนวตั้งฉาก อะตอมสารเคลือบบางส่วนอาจหลุดออกในแนวที่ทำมุมกับผิวเป้าแคบมาก และเคลื่อนที่ออกแนวเคลือบ

การชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้อะตอมสารเคลือบเบนกลับสู่แนวเคลือบบางส่วน แต่ความสูญเสียบางส่วนยังคงมีอยู่ โดยเฉพาะถ้าระยะห่างระหว่างคาโทดและแผ่นรองรับมีค่าสูงขึ้น อัตราการสูญเสียอะตอมเป้าสารเคลือบย่อมมีค่าสูงขึ้นด้วย รูปที่ 2.23 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มเคลือบที่ได้จากการคำนวณของเป้าสารเคลือบแผ่นกลม จากสมมติฐานว่าอะตอมสารเคลือบหลุดออกด้วยการกระจายแบบ cosine เหมือนการกระเหยสารทุกอะตอมที่หลุดจากเป้าด้วยขบวนการ สปีดเตอร์ริงนี้ไม่เกิดการชนกับโมเลกุลของก๊าซในระบบ เมื่อลงเคลือบแล้วไม่เกิดการสะท้อนออกหรือก่อให้เกิดการสปีดเตอร์บนแผ่นรองรับอีก

รูปที่ 2.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์มเคลือบเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วน

ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางคาโทด และระยะระหว่างคาโทดกับแผ่นรองรับ
การเคลือบ (2, หน้า 4-14)

การกระจายความหนาของสารเคลือบบนแผ่นรองรับนี้ Schwartz และคณะ⁽¹⁴⁾ ได้ทดลองศึกษา โดยใช้เป้าสารเคลือบที่ติดสารเคลือบโลหะ 4 ชนิด ในแนววงแหวน 4 วง ที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน และเคลือบด้วยขบวนการสปีดเตอร์ริงแล้ววิเคราะห์ปริมาณสารเคลือบแต่ละชนิดบนแผ่นรองรับด้วยวิธี X-ray fluorescence ผลการวิเคราะห์จากอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อระยะทางระหว่างคาโทดและแผ่นรองรับเท่ากับ 6.8 แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 2.24 ความหนาของการเคลือบตอนกลางที่สูงกว่าบริเวณอื่นเกิดจากความหนาแน่นกระแสบริเวณตอนกลางเป้าสารเคลือบสูงกว่าบริเวณอื่น จุดที่น่าสนใจมาก คือความหนาของการเคลือบบริเวณของเป้าหมายมีความแตกต่างจากการทำนายของทฤษฎี และพบในการทดลองของนักวิจัยอื่นๆ หลายครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณขอบเป้าซึ่งมี สนามไฟฟ้าสูงตามลักษณะของคาโทดในรูปที่ 2.25 ทำให้ไอออนเข้าชนเป้าสารเคลือบบริเวณขอบสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ นอกจากนี้การเข้าชน

ในแนวมุมตกกระทบเฉียงทำให้ค่าซีลด์สูงขึ้น และอัตราการ เคลือบเกิดขึ้นสูงบริเวณขอบเป่า การเพิ่มความยาวของคาโทดซีลด์เพื่อเปลี่ยนความเข้มข้นไฟฟ้า และกันการตกกระทบของ ไอออนในแนวเฉียง ดังรูปที่ 2.26 a หรือการสร้างคาโทดซีลด์ให้คลุมของเป่าสารเคลือบ ดังรูป ที่ 2.26 b ช่วยแก้ปัญหานี้ได้

การใช้สนามแม่เหล็กแบบ longitudinal ช่วยทำให้การสปัตเตอร์ขอบเป่า (rim effect) สูงขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนชุดที่สองที่ออกจากเป่าในแนวขอบจะพุ่งออกตามแนวเฉียงจากผล ของ

รูปที่ 2.24 แสดงการกระจายของสารเคลือบของโลหะ 4 ชนิด ที่จัดในรูปวงแหวน 4 วง ซ้อนกัน จากแนวศูนย์กลางของเป่าสารเคลือบโดยการทดลองของ Schwartz และคณะ (2, หน้า 4-14)

รูปที่ 2.25 แสดงแนวการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าบริเวณของคาโทดและซีลด์ อันเป็นสาเหตุให้เกิดการสปัตเตอร์บริเวณขอบสูงกว่าตอนกลางของเป้า แนวสีขาวในภาพคือระยะคาร์คสเปซ (2, หน้า 4-14)

รูปที่ 2.26 a) การลดอัตราการสปัตเตอร์ขอบเป้าโดยการทำให้ซีลด์ยาวออก และ
b) โดยการคลุมขอบเป้าสารเคลือบด้วยซีลด์ (2, หน้า 4-15)

สนามไฟฟ้าของเป้าแร่ถูกกับบริเวณในสนามแม่เหล็ก และผลิตไอออนปริมาณสูงบริเวณของเป้าส่วนการเพิ่มความดันก๊าซช่วยลดการเกิด rim effect เนื่องจากเกิด back scattering ของอะตอมสารเคลือบกับโมเลกุลของก๊าซ

2.12.1.5 วัสดุที่ใช้ทำคาโทด ใช้ได้หลายชนิดแต่ที่ใช้มากที่สุดคือ เหล็กสเตนเลส และทองแดง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการเกาะจับของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายใต้สุญญากาศ (degas) ได้ง่ายและมีความดันไอต่ำ เหล็กสเตนเลสทนการกัดกร่อนจาก สารเคมีต่าง ๆ ได้ดี แต่มีสภาพนำความร้อนและไฟฟ้าที่เลว ส่วนทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีแต่ทนการกัดกร่อนของสารเคมีได้ไม่ดีนักและ machine ยาก เนื่องจากมีความอ่อนตัว อย่างไรก็ตามจุดสำคัญในการสร้างคือ ให้คาโทดมีความคงทนการกัดกร่อนและการนำความร้อนที่ดีบริเวณ backing plate นอกจากนี้ถ้าคาโทดเป็นชนิดแมกนีตรอนสปัตเตอร์จริง backing plate ต้องไม่เป็นสารเหล็ก มิฉะนั้นจะกันสนามแม่เหล็กมิให้มายังเป้าสารเคลือบไว้ทั้งหมด

2.12.1.6 วัสดุเป้าสารเคลือบ การเป็นวัสดุที่มีความบริสุทธิ์และความหนาแน่นสูงซึ่งผลิตจากขบวนการ hot-pressed หรือจากการ sintering ในสุญญากาศของผงวัสดุบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับวัสดุต้น (bulk material) มากที่สุด เพื่อมิให้เนื้อโลหะมีก๊าซจับตัวอยู่ภายใน มิฉะนั้นระหว่างขบวนการสปัตเตอร์จริง ผิวเป้าสารเคลือบภายใต้อุณหภูมิ

ค่อนข้างสูงจะปลดปล่อยอะตอมของก๊าซ (degas) ซึ่งมักเป็นก๊าซออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยาอันมีผลต่อคุณภาพฟิล์มเคลือบ

2.12.2 การออกแบบที่วางชิ้นงานหรือแผ่นรองรับ (substrate support)

ในการเคลือบสารแบบพลาสมาอาร์แมกนิตรอนสปัตเตอริง อาโนดหรือที่วางชิ้นงานคือวัสดุชิ้นเดียวกัน ซึ่งอาจต่อลงกราวด์หรือแยกขั้วต่อเพื่อการไบอัส (bias) ด้วยศักย์ไฟฟ้าลบได้ ในขณะที่ 챔เบอร์สุญญากาศมีสกรูด้วยโลหะแต่ต่อลงกราวด์เพื่อป้องกันไฟฟ้าช็อตผู้ทดลอง ดังนั้น 챔เบอร์จึงทำหน้าที่เสมือนอาโนดขนาดใหญ่ในการดึงกระแสอิเล็กตรอนจากระบบในขบวนการโกลด์ดิสชาร์จ ส่วนกระแสอิเล็กตรอนอีกส่วนหนึ่งซึ่งถูกดึงเข้าสู่ที่วางชิ้นงานพร้อมอะตอมพลังงานสูงจากขบวนการสปัตเตอริง มีส่วนทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้อาจมีทั้งข้อดีและข้อเสียในการเคลือบชิ้นงานด้วยเป่าสารเคลือบต่างชนิดกันออกไป เช่น อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการเคลือบโลหะมีค่าลดลงกว่าขณะอุณหภูมิต่ำ ส่วนอัตราการเคลือบแบบรีแอคทีฟสปัตเตอริงมีแนวโน้มในทางตรงข้าม ฟิล์มเคลือบของสารบางชนิดยึดเกาะกับชิ้นงานได้ดี เมื่อควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานได้ในช่วงค่าหนึ่งและบางครั้งที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำลายสภาพความแข็งแรงของชิ้นงาน เป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบที่วางชิ้นงานหรือแผ่นรองรับควรสามารถควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานให้เหมาะสมกับสภาพและคุณสมบัติของฟิล์มเคลือบที่ต้องการ ซึ่งส่วนใหญ่มักออกแบบให้มีระบบระบายความร้อนและเพิ่มความร้อนได้ในที่วางชิ้นงานชุดเดียวกัน

การระบายความร้อน ใช้น้ำหล่อเย็นเพราะมีราคาถูก นอกจากนี้อาจใช้ก๊าซ หรือไนโตรเจนเหลว ขึ้นกับอุณหภูมิและความรวดเร็วที่ต้องการใช้งาน ส่วนการเพิ่มความร้อนหรืออุณหภูมิของชิ้นงาน อาจใช้ของเหลวร้อน ขดลวดความร้อน (resistive heater) หรือหลอดรังสีความร้อน (infrared lamp) การวัดอุณหภูมิอาจใช้เทอร์โมคัปเปิล infrared spectrometer หรือเทคนิคอื่น ขึ้นกับความละเอียดการวัดที่ต้องการ ที่วางแผ่นรองรับควรทำด้วยทองแดงหรือโมลิบดีนัมซึ่งนำความร้อนได้ดี ภายใต้สุญญากาศการนำความร้อนจากที่วางชิ้นงานสู่ชิ้นงานเกิดขึ้นไม่มากนัก เนื่องจากกระยะปลดการชนของโมเลกุลก๊าซสูงขึ้นมาก จึงจำเป็นต้องทำให้ชิ้นงานและแผ่นรองชิ้นงานสัมผัสกันได้ดีที่สุดโดยการใช้สารต่อนำความร้อน เช่น อาจใช้ไซลิโคน (silicone vacuum grease) ต่อนำความร้อนให้กับชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิที่ต้องการควบคุมไม่เกิน 100°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 450°C อาจใช้กัลเลียม (Ga) , อินเดียม (In) หรือฟอสฟอรัสเหลวเป็นตัวต่อนำความร้อนที่วางชิ้นงานสูงานั้น ๆ

การทำให้อาโนดหรือแผ่นรองชิ้นงานมีขั้วแยกจากกราวด์เพื่อไบอัสได้ มีข้อดีหลายประการ คือ ประการแรก การไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบค่าสูงช่วยให้ที่วางชิ้นงานและชิ้น

งานทำตัวเสมือนเป็นคาโทด โดยมีผนังแฮมเบอร์สแตทเป็นอาโนด ทำให้เกิดการสputter เกิดการกัดกร่อน

(sputter etching) บนผิวหน้าชิ้นงานอันเป็นการทำความสะอาดผิวก่อนการเคลือบ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ฟิล์มยึดเกาะได้ดีขึ้น ประการที่สอง การป้อนไบแอสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบเล็กน้อยแก่ชิ้นงาน (-50 ถึง -200 โวลต์) ในระหว่างการเคลือบมีผลช่วยลดปริมาณการชนของอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นงานลงได้มาก อันลดผลการเพิ่มอุณหภูมิแก่ชิ้นงาน และลดโอกาสที่อิเล็กตรอนจะทำลายผิวฟิล์มเคลือบ

รูปที่ 2.27 แสดงโครงสร้างอาโนดหรือที่วางชิ้นงาน ที่ควบคุมอุณหภูมิได้สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ในที่นี้ใช้หลอดรังสีความร้อนช่วยเพิ่มอุณหภูมิ และน้ำหล่อเย็นใช้ระบายความร้อน ที่หลอดรังสีความร้อนแผ่สู่ด้านล่าง (3, หน้า 38)

จากการวิจัย ประการที่สาม การป้อนไบแอสลบให้แก่ชิ้นงานมีผลทำให้ปริมาณก๊าซไปฏิบัติที่ตกค้างในฟิล์มเคลือบมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดขบวนการสputterซ้ำ (resputtering) บนผิวฟิล์มเคลือบ ทำให้ก๊าซไปฏิบัติบางส่วนถูกสputterหลุดออกไปมากกว่าสารเคลือบ และฟิล์มมีความบริสุทธิ์มากขึ้น การขจัดก๊าซออกมากหรือน้อยขึ้นกับแรงยึดเกาะระหว่างก๊าซไปฏิบัติกับวัสดุเคลือบเมื่อเทียบกับแรงยึดเกาะกันเองของอะตอมวัสดุเคลือบ จากรายงานการทดลองพบว่า การป้อนไบแอสลบให้กับชิ้นงานที่เคลือบแทนทาลัม (Ta) โมลิบดีนัม (Mo) และไนโอเบียม (Nb) ปริมาณออกซิเจนในฟิล์มเคลือบมีค่าต่ำกว่าขณะไม่ป้อนไบแอสมาก แต่การไบแอสชิ้นงานเมื่อเคลือบอะลูมิเนียม (Al) และ แมกนีเซียม (Mg) ไม่สามารถลดปริมาณออกซิเจนฟิล์มเคลือบได้มากนัก เมื่อเทียบกับขณะไม่มีไบแอส ทั้งนี้เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างออกซิเจน และอะตอมโลหะมีมากกว่าการยึดเกาะกันเองของอะตอมโลหะ

ข้อเสียของการป้อนไบแอสลบกับชิ้นงาน คือ การเพิ่มปริมาณก๊าซเฉื่อยที่ถูกจับในฟิล์มมากขึ้นตามกำลังสองของแรงดันไฟฟ้าไบแอส เนื่องจากไอออนของอาร์กอนมีโอกาสถูกเร่งด้วย

สนามไฟฟ้าจากไบแอสให้มีพลังงานสูงขึ้นและชนฝั่งตัวในเนื้อฟิล์มมากขึ้นตามพลังงานที่ได้รับ แต่ปริมาณอาร์กอนในฟิล์มเคลือบนี้สามารถทำให้ลดลงได้ เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น

2.12.3 ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)

เนื่องจากภายในระบบสุญญากาศ ทุกพื้นที่มีโอกาสถูกชนด้วยอะตอมสารเคลือบและไอออนพลังงานสูงอันเป็นสาเหตุให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซออกจากพื้นผิวที่ถูกชน (outgassing) ภายในระบบสปีดเตอริงมากกว่าในระบบระเหยสาร ดังนั้นชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในถ้าเป็นไปได้ ควรมีการระบายความร้อนและต่อกราวด์ไว้ เพื่อลดปริมาณการปลดปล่อย ก๊าซไวนทรีย์ ก๊าซควรป้อนเข้าสู่ระบบและดูดผ่านปั๊มตลอดเวลา เพื่อไล่ก๊าซไวนทรีย์ออกจากระบบตลอดการสปีดเตอริงทำให้ลดสารปลอมปน (contamination) ในฟิล์มเคลือบ การปล่อยปริมาณก๊าซบริสุทธิ์ของอาร์กอนไหลผ่านระบบด้วยอัตราสูงช่วยเจือจางก๊าซไวนทรีย์ในระบบ และลดอุณหภูมิของระบบลงเองจากปริมาณ outgas ในระบบมีค่าลดลงตามเวลา ดังนั้นจึงควรใช้แผ่นปิด (shutter) กันระหว่างคาโทดและแผ่นรองรับเพื่อกันมิให้มีการเคลือบเกิดขึ้นระหว่างช่วงแรกที่มีปริมาณก๊าซไวนทรีย์สูง รวมทั้งให้เวลาต่อระบบในการทำความสะดวกผิวเป้าสารเคลือบก่อนการเคลือบจริง (เรียกว่า presputtering) จากนั้นจึงเปิด shutter และเคลือบสารเมื่อภายในระบบสะอาดแล้ว

แม้ความดันก๊าซที่ใช้ในระบบสปีดเตอริงจะมีค่าระหว่าง 10^{-3} ถึง 10^{-1} ทอร์ ก็ตาม ก่อนการสปีดเตอริงทุกครั้ง ควรปั๊มความดันก๊าซในระบบให้ลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-7} ถึง 10^{-6} ทอร์ เพื่อขจัดก๊าซที่เกาะจับบนผิวชิ้นส่วนต่าง ๆ และผนังแชมเบอร์ออกให้มีปริมาณน้อยที่สุด และควรมีลดความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิผิวภายในผนังแชมเบอร์เพื่อช่วยการ outgas ในระยะแรกเมื่อความดันลดต่ำพอจึงหยุดการให้ความร้อนและทำความเย็นผนังแชมเบอร์สุญญากาศแทน ผนังแชมเบอร์ที่ทำจากเหล็กสแตนเลสและทองแดง outgas ง่ายและการกันการรั่วซึมของก๊าซจากภายนอกระบบได้ผนังด้านหนึ่งของแชมเบอร์อาจทำเป็นช่องกระจกเพื่อดูขบวนการสปีดเตอริงภายใน และเพื่อการควบคุมตำแหน่ง shutter และชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในระบบปั๊มที่ใช้กับระบบสปีดเตอริงส่วนใหญ่ คือ ปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (diffusion pump) ซึ่งสามารถดึงความดันในระบบได้ถึง 5×10^{-7} ทอร์ และมีประสิทธิภาพการปั๊มสูงที่ความดันต่ำ อย่างไรก็ตามที่ความดัน 10^{-3} ทอร์ ซึ่งปั๊มแพร่ไอน้ำมันมีประสิทธิภาพลดลง และความดันก๊าซค่าสูงเช่นนี้ อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการฟุ้งของไอน้ำมันเข้าสู่แชมเบอร์สุญญากาศตอนบน (back streaming) อันเป็นสาเหตุก่อความสกปรกต่อฟิล์มเคลือบ ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดของปั๊มแพร่ไอน้ำมันที่ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีอัตราการไหลของก๊าซสูงเกินไป และการใช้ต้องระวังมิให้ความดันบริเวณทางออก (fore-pressure) ของปั๊มแพร่ไอน้ำมันสู่อุปกรณ์ (ratary

pump) มีค่าสูงเกินกว่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดเพื่อป้องกัน back streaming ปัมป์กังหันเทอร์ไบน์ (turbomolecular pump) เป็นปั๊มที่เหมาะสมกับระบบสเปกโตรสโกปี เนื่องจากสามารถดึงความดันได้ต่ำกว่า 10^{-6} ทอร์ ได้ในเวลารวดเร็ว มีอัตราการปั๊มสูงที่ความดันใช้งาน และไม่มีส่วนของไฮโดรคาร์บอนที่อาจก่อความสกปรกในแชมเบอร์สุญญากาศ แต่ราคาค่อนข้างแพง

บางระบบของสเปกโตรสโกปี ขบวนการสเปกโตรสโกปีอาจกระทำได้ในขณะที่วาล์วใหญ่ (main valve) ของระบบสุญญากาศปิดสนิทไม่มีการไหลของก๊าซในระบบ ถ้ามีปั๊มระเหิดไททาเนียม (titanium sublimation pump or gettering pump) อยู่ภายใน เนื่องจากปั๊มชนิดนี้จะปั๊มก๊าซไวพริกกิริยา เช่น ออกซิเจน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ออกจากระบบ แต่เกือบไม่มีผลในการปั๊มก๊าซเฉื่อย การสูญเสียปริมาณก๊าซเฉื่อยจากขบวนการสเปกโตรสโกปีของระบบ เนื่องจากการฝังติดในเนื้อฟิล์มเคลือบทำให้ความดันในระบบลดลงบ้างซึ่งสามารถแก้ได้ด้วยการปล่อยก๊าซเฉื่อยปริมาณเล็กน้อยเข้าสู่ระบบตลอดเวลา ทำให้ลดการสิ้นเปลืองก๊าซ

แชมเบอร์ของระบบสุญญากาศควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดคาโทดพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากไอออนจากก๊าซเฉื่อยอาจรวมกับอิเล็กตรอนเป็นกลางทางไฟฟ้าได้ที่ผนังแชมเบอร์ การที่ผนังแชมเบอร์อยู่ใกล้คาโทดเกินไป อาจทำให้ไอออนส่วนใหญ่ที่ควรถูกเร่งเข้าชนคาโทดบริเวณของเป้าเมื่อแพร่ผ่านพลาสมาสู่คาโทดเกิดการชนกับผนังแชมเบอร์แล้วกลายเป็นกลาง ทำให้สูญเสียปริมาณไอออนที่ควรวิ่งสู่คาโทดไปส่วนหนึ่ง เรียกว่า Wall losses และทำให้อัตราการเกิดสเปกโตรสโกปีลดลงระยะห่างระหว่างผนังแชมเบอร์สุญญากาศและคาโทด เพื่อลดการสูญเสียไอออนนี้มีค่าแปรผกผันกับความดันก๊าซในระบบ ที่ความดัน 5-50 ระยะ มิลลิทอร์ ระยะที่ปลอดภัยต่อการสูญเสียไอออนให้กับผนังแชมเบอร์ คือ 10 เซนติเมตร

2.12.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power supply)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้กับระบบไดโอดสเปกโตรสโกปีใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ (AC) หรือความถี่สูง (RF) ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำอาจใช้ในการสเปกโตรสโกปี 2 คาโทด โดยมีชิ้นงานอยู่ระหว่างกลางเพื่อให้การเคลื่อนเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของชิ้นงานในเวลาเดียวกัน โดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพียงชุดเดียว

ในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้งาน จำเป็นต้องคำนึงถึงค่ากำลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ถ้าระบบสเปกโตรสโกปีเป็นชนิด ดี ซี ไดโอด ควรใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 1-5 kV โดยมีระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่แบบปรับค่าได้ และกระแสควรมีค่าประมาณ 1-5 mA/cm² บนคาโทด แต่เมื่อเป็นชนิดพลาสมาอาร์แมกนีตรอนสเปกโตรสโกปี แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานมีค่าอยู่ระหว่าง 300-800 โวลต์ และกระแสควรมีค่าระหว่าง 10-100 mA/cm² บนคาโทด โดยมีระบบควบคุมกระแสคงที่แบบปรับค่าได้ ไฟฟ้า ดี ซี ที่ใช้อาจมีการกรองสัญญาณให้เรียบหรือไม่มีการกรองสัญญาณก็ได้ การกรองสัญญาณจะช่วยให้การสเปกโตรสโกปีบนผิวสารเคลือบ

และสภาพโกลว์ดิสซาร์จมีความสม่ำเสมอ การไม่กรองสัญญาณไฟฟ้าช่วยลดความรุนแรงการอาร์คลง แหล่งกำเนิดไฟฟ้าควรสามารถทนต่อการเกิด high voltage rf transients ซึ่งเกิดจากพลาสมาในระบบแมกนีตรอนรวมทั้งการอาร์คของระบบด้วย การอาร์คเพียงเล็กน้อยยังเกิดจากสารเจือปน และ dielectric breakdown บนเป้าสารเคลือบซึ่งเกิดขึ้นชั่วขณะ ระบบป้องกันของเครื่องควรจำกัดกระแสอาร์คนี้ได้โดยไม่ตัดวงจรแต่การอาร์ครุนแรงอันเกิดจากการหลุดลอกของฟิล์มเคลือบจากแผ่นซีลส์คาโทดและสัมผัสคาโทดให้เกิดลัดวงจร ระบบป้องกันควรมีความไวสูงในการตัดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าออกจากวงจร

2.12.4.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดี ซี (DC power supply) ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ใช้สูงไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ นิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าออโต (auto transformer) ควบคุมแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรงด้วยบริดจ์เรกติฟายเออร์ (bridge rectifier) และควรมีขดลวดอินคัตเตอร์ต่ออยู่เพื่อกันสัญญาณ อาร์ เอฟ สไปค์ (rf spikes) จากการอาร์คอันอาจทำลายวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ได้ การมีชั๊นท์แม่เหล็ก (magnetic shunting) ในตัวทรานส์ฟอร์เมอร์ ทำให้ทรานส์ฟอร์เมอร์มีค่าเอชทีพูอิมพีแดนซ์ (output impedance) สูง เมื่อเกิดการอาร์คขึ้น กระแสจากการอาร์คจะถูกป้อนกลับสู่ทรานส์ฟอร์เมอร์และลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของทรานส์ฟอร์เมอร์ลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว ทำให้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าป้องกันอันตรายตัวเองได้

เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นอาจใช้ชุด silicon control rectifier ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของทรานส์ฟอร์เมอร์แบบ 3 เฟส โดยมีวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ 3 เฟส (3 phase bridge rectifier) ต่ออยู่เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง นอกจากนี้อาจมีวงจรป้อนกลับ (feed back circuit) ควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ หรือกระแสไฟฟ้าคงที่แล้วแต่ความต้องการตามชนิดของระบบสปีดเตอริง เพื่อให้ระบบทำงานอย่างปลอดภัยจากการอาร์ค หรือการมีภาระเกิน (overload) รวมทั้งมีอุปกรณ์วัดละเอียด เช่น แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์เป็นต้น ซึ่งเสริมเข้ากับระบบเพื่อความสะดวกในการใช้งาน

2.12.4.2 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูง (RF power supply) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงนี้นิยมใช้ที่ความถี่ $13.56 + 0.00678$, $27.12 + 0.0160$ และ $40.68 + 0.020$ MHz ตามข้อตกลงของ International Agreement For Unlimited Radiation ซึ่งให้การบกพร่องระบบโทรคมนาคมน้อย และมีการผลิตในเชิงการค้า โดยทั่วไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงที่ผลิตขึ้นในเชิงการค้า มีค่าอิมพีแดนซ์ เอชทีพู ประมาณ 50 โอห์ม แต่ขบวนการโกลว์ดิสซาร์จมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่านี้มาก จึงจำเป็นต้องใช้วงจรแมชชิง เพื่อสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งถ่ายพลังงานสู่ระบบสปีดเตอริงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และในกรณีการทำไบแอสสปีดเตอริงกับระบบอาร์เอฟ จำเป็นต้องมีวงจรทูนนิ่ง (tuning

network) ช่วยในการปรับเฟสของไฟฟ้าสลับที่เหมาะสมด้วย การทำไบแอส สปีดเตอริงในระบบอาร์เอฟจึงค่อนข้างมีความยุ่งยากกว่าระบบดี ซี มาก

2.12.5 ระบบป้อนก๊าซและอิทธิพลต่อคุณสมบัติฟิล์ม

การที่ป้อนสู่ระบบสปีดเตอริงควรมีหลายจุดก๊าซที่ป้อนสู่ระบบสปีดเตอริง เพื่อควบคุมความดันก๊าซมิให้แตกต่างกันในแต่ละส่วนที่เกิดขบวนการสปีดเตอริง ความไม่สม่ำเสมอของก๊าซอาร์กอน ทำให้อัตราการสปีดเตอริงที่เกิดผิวเป้าไม่สม่ำเสมอหรือไม่สมมาตร อันมีผลต่อความหนาฟิล์มเคลือบ และอายุการใช้งานของเป้าสารเคลือบ การป้อนก๊าซไวปฏิกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ส่วนผสมของธาตุในฟิล์มเคลือบสารประกอบมีความแตกต่างกัน การป้อนก๊าซที่ความดันต่ำในระบบสปีดเตอริง ควรใช้วาล์วเข็ม (needle valve) ซึ่งสามารถส่งก๊าซเข้าสู่ระบบได้ที่ละน้อย และควบคุมความดันได้ละเอียดพอ และไม่ควรมีป้อนก๊าซจากถังเก็บก๊าซซึ่งมีความดันสูงผ่านวาล์วเข็มโดยตรงควรมีการลำดับความดันด้วยวาล์วปรับความดัน (regulator valve) เป็นช่วง ๆ ควรมีเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ (gas flow meter) ต่ออยู่ก่อนถึงวาล์วเข็ม ท่อส่งก๊าซไม่ควรมีความยาวมากเกินไป และเมื่อต่อระบบสุญญากาศต้องสามารถปั๊มความดันในท่อลงได้ต่ำถึง 1 มิลลิทอร์ เพื่อการทำความสะดวกท่อโดยผ่านวาล์ว bypass ท่อควรทนความดันได้สูงถึง 200 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นอย่างน้อย เมื่อต่อกันถึงก๊าซความดันสูง การป้อนก๊าซเข้าสู่ระบบควรป้อนเข้าตอนบนของแชมเบอร์เพื่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของก๊าซภายในระบบ ก่อนถูกดูดผ่านปั๊มซึ่งติดอยู่บริเวณตอนล่างการป้อนก๊าซใกล้บริเวณคาโทดอาจลดความสม่ำเสมอของความดันลงบ้าง แต่เป็นการป้องกันมิให้ก๊าซที่รั่วเข้าสู่ระบบตามผนังแชมเบอร์เข้าสู่บริเวณโกลด์ดีสชาร์จได้

ในการทำรีแอคทีฟ สปีดเตอริง โอกาสเกิดสารประกอบบนผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (target poisoning) มีมาก โดยเฉพาะบริเวณที่มีค่าอัตราการเคลือบต่ำในระบบพลาสมาแมกนีตรอนสปีดเตอริง การป้องกัน Target poisoning อาจทำได้โดยการจัดตำแหน่งป้อนก๊าซและควบคุมมิให้ก๊าซไวปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบบนเป้าสารเคลือบด้วยเทคนิคต่าง ๆ ในรูปที่ 2.28

อย่างไรก็ตามในการเคลือบแบบรีแอคทีฟ สปีดเตอริงที่ความดันก๊าซอาร์กอนคงที่ พบว่าเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไวปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จและอัตราการเคลือบ ลดลงจากการเกิดสารประกอบบนผิวหน้าเป้าสารเคลือบ และเมื่อลดอัตราการไหลของก๊าซลง แรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จและอัตราการเคลือบจะเพิ่มขึ้น แต่ความสัมพันธ์ของรูปกราฟไม่ซ้ำแนวเดิมจากผลของฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ดังในรูปที่ 2.29⁽²⁵⁾ กราฟที่ได้เป็นรูปร่างที่เกิดขึ้นทั่วไปกับการทำรีแอคทีฟสปีดเตอริง ค่าที่แท้จริงของอัตราการไหลของก๊าซไวปฏิกิริยาขึ้น

กับค่าความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนในระบบและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ จาก A ถึง B เป็นช่วงที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไพล์ทรี และเป่าสารเคลือบเป็นสารประกอบชั้นบาง ๆ บนผิวเป้า สารเคลือบ แต่เนื่องจากก๊าซไพล์ทรีมีปริมาณน้อย และอัตราการสับเตอรียังมีค่าสูงจึงให้การเกิดฟิล์มสารประกอบก่อตัวได้อย่างช้า ๆ พ้นจุด B ผ่าน C มาถึง D ปริมาณก๊าซไพล์ทรีมีค่าสูงพอในการทำปฏิกิริยาจนเกิดฟิล์มสารประกอบหนาขึ้นพร้อม ๆ กับที่อัตราการเคลือบลดลง เนื่องจากฟิล์มสารประกอบสับเตอรีย่อยากกว่าโลหะบริสุทธิ์

ดังนั้นความหนาของสารประกอบบนผิวเป้าสารจะเคลือบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแม้จะเพิ่มอัตราการไหลขึ้นอีกไม่มากนัก ที่จุด D การเกิดสารประกอบจะเป็นไปด้วยอัตราสูงและให้สารประกอบที่ทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ ต่อมาเมื่อลดอัตราการไหลของก๊าซไพล์ทรี เริ่มแรกจะทำให้อัตราการสับเตอรีย่อยากกว่าอัตราเกิดสารประกอบบนผิวเป้าสารเคลือบ และเมื่อคงค่าอัตราการไหลไว้ระยะหนึ่งจะทำให้อัตราการเกิดสารประกอบปรับตัวให้มีค่าเท่ากัน ในขณะนั้นชั้นของสารประกอบผิวเป้ายังคงมีค่าสูง ทำให้อัตราการสับเตอริมีค่าต่ำกว่าในช่วงเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ แม้ว่าอัตราการไหลของก๊าซจะมีค่าเท่ากันก็ตาม แต่ประวัติของผิวเป้าสารเคลือบไม่เหมือนกัน ดังนั้นความสัมพันธ์จะเปลี่ยนตามแนว D-E และกลับไปสู่ A ในอีกเส้นทางหนึ่ง

Sproul⁽¹⁶⁾ ได้ทดลองเคลือบฟิล์มของ TiN, ZrN และ HfN ด้วยวิธีแอคทีฟสับเตอรียิ่ง และพบว่าเมื่อพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนและความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนที่เหลืออยู่ในระบบสภาพอีเสเตอร์ซิส ปรากฏให้เห็นเช่นกัน ดังรูปที่ 2.30 ที่จุด A ความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนมีค่าต่ำมากเรียกว่า background pressure เนื่องจากความดันก๊าซมีค่าต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบผิวเป้าสารเคลือบและบนแผ่นรองรับ เมื่อ

อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนสูงขึ้นจากจุด A สู่จุด B มีการใช้ก๊าซไนโตรเจนบางส่วนในการทำปฏิกิริยาเกิดสารประกอบแผ่นรองรับ แต่ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบผิวเป้าสารเคลือบยังไม่รวดเร็วพอที่จะชนะอัตราการสับเตอรีย่อยากของอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้ ดังนั้นอัตราการสับเตอรีย่อยาก

ในรูป 2.29 จึงยังคงสูงอยู่ เมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนสูงกว่าจุด B ก๊าซไนโตรเจนที่ป้อนเข้าสู่ระบบเริ่มมีมากเกินไปกับปฏิกิริยาในขณะนั้น ทำให้มีก๊าซไนโตรเจนส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลือเพิ่มมากขึ้นและความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนในระบบมีค่าสูงขึ้นในช่วง BC และ CD ณ จุด D นี้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนต่อไป จะพบว่าความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง เพราะเป็นก๊าซส่วนเกินจากความต้องการในปฏิกิริยาที่เหลือทั้งหมด เมื่อลดอัตราการไหลลงต่ำกว่าจุด D การทำปฏิกิริยาที่ผิวของเป้าสารเคลือบซึ่งเป็นสารประกอบอยู่แล้วย่อมเป็นไปได้ยากเพราะมีชั้นสารประกอบกั้นอยู่ รวมทั้งอัตราการสับเตอรีย่อยาก

ในช่วงนี้มีค่าต่ำ ความต้องการก๊าซไนโตรเจนในการทำปฏิกิริยาที่เป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับ ย่อมลดน้อยลง จึงเหลือก๊าซไนโตรเจนอยู่มากภายในระบบ การเปลี่ยนแปลงนี้จะมาทับรอยเดิมอีกครั้งหนึ่ง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนลดลงมาถึงจุด A ซึ่งในขณะนั้นสารประกอบไนไตรด์บนผิวเป้า

รูปที่ 2.28 รูป schematic ของระบบการป้อนก๊าซเพื่อลดผลของ target poisoning (15)

ในกระบวนการ รีแอคทีฟ สปัตเตอริง (A) ใช้การป้อนก๊าซไวกซ์ปฏิกิริยาช่วงเริ่มใช้โดย Sproul และคณะ (B) ทำให้ความเข้มข้นก๊าซไวกซ์ปฏิกิริยาช่วงสูงบริเวณแผ่นรองรับและลดลงที่ผิวเป้าสารเคลือบ โดยการแยกชุดป้อนก๊าซและใช้ gettering pump ขจัดก๊าซไวกซ์ปฏิกิริยาบริเวณใกล้เป้าสารเคลือบวิธีนี้ได้รับการพัฒนาโดย Schille และคณะ (C) ใช้ตะแกรง (baffle) ช่วยลดความดันย่อยของก๊าซไวกซ์ปฏิกิริยาบริเวณเป้าสารเคลือบ และป้อนไบแอสสัญญาณ อาร์เอฟเพื่อเพิ่มความไวปฏิกิริยาในการเคลือบ พัฒนาโดย Westwood และคณะ (D) ใช้ตะแกรง (baffle) ลดปริมาณก๊าซไวกซ์ปฏิกิริยา

การเคลือบและใช้ ดี ซี โกลด์ดิสชาร์จ ช่วยเพิ่มปฏิกิริยาการเคลือบใกล้เคียง
รองรับ พัฒนาโดย Scherer และคณะ

รูปที่ 2.29⁽²⁵⁾ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และอัตราการเคลือบที่ค่า
กำลังไฟฟ้าและความดันก๊าซผสมคงที่เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีแอค
ตีฟกาซ

รูปที่ 2.30⁽¹⁶⁾ แสดงฮิสโตแกรมของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนและค่าความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนในระบบ จากการทำรีแอคทีฟสปีดเตอริงของสารประกอบไนไตรด์ เมื่อค่าของกำลังไฟฟ้าและความดันก๊าซผสมรวมมีค่าคงที่ จุด ABCD และ E สัมพันธ์กับกราฟรูปที่ 2.29⁽²⁵⁾

รูปที่ 2.31 แสดงการเกิด target poisoning บริเวณที่มีอัตราการสปีดเตอริงต่ำบนผิวคาโทด ของระบบพลาสมาแมกนีตรอน a) แสดงปริมาณสัมพันธ์ของกระแสหรืออัตราการสปีดเตอริงและปริมาณของก๊าซรีแอคทีฟ ที่บริเวณต่าง ๆ บนผิวเป้าสารเคลือบ b) แสดงปริมาณการเกิดสารประกอบที่บริเวณต่าง ๆ บนผิวเป้าสารเคลือบเมื่อมีอัตราการสปีดเตอริงต่ำ c) เมื่ออัตราการสปีดเตอริงสูงบางบริเวณจะไม่เกิดสารประกอบเลยบนผิวเป้าสารเคลือบ แต่บริเวณที่มีอัตราการสปีดเตอริงต่ำยังคงเกิด สารประกอบ d) ระบบสปีดเตอริงที่แยกการป้อนก๊าซเพื่อลด target poisoning (4, หน้า 235)

สารเคลือบถูกทำลายหมดไปจากการสปีดเตอริง และอัตราการสปีดเตอริงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาอีกครั้งหนึ่ง (ดูรูปที่ 2.29⁽²⁵⁾ และคำอธิบายรูปประกอบ)

2.13 ลักษณะจำเพาะตัวของระบบสปัตเตอริง (Characteristics of sputtering system)

2.13.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดิสชาร์จกระแสและความดันก๊าซในระบบพลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริง⁽³⁾

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันดิสชาร์จในระบบสปัตเตอริง แสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนไนเซชัน สภาพการดิสชาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันดิสชาร์จตามสมการ

$$I = kV^n$$

(2.7)

เมื่อ I คือกระแสของคาโทด V คือ แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ n คือ ดัชนีแสดงความสามารถในการกักเก็บอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กซึ่งขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก และการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก โดยปกติ n มีค่าระหว่าง 5 ถึง 9 ในแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบทรงกระบอก แต่อาจแตกต่างกันไปบ้างเมื่อจัดแบบพลาสมาแมกนีตรอน k คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ สำหรับคาโทดชุดหนึ่ง ๆ การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงกว้างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

รูปที่ 2.32 a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จของพลาสมาแมกนีตรอนคาโทดรูปสี่เหลี่ยมที่ความดันก๊าซค่าต่าง ๆ b) แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และความดันก๊าซเมื่อกระแสมีค่าคงที่ โดยเป้า สารเคลือบสี่เหลี่ยมมีขนาด 37.5×12.1 ตารางเซนติเมตร และสปีดเตอร์ในแนวพลาสมาวงแหวน (3, หน้า 149)

รูปที่ 2.32 a) แสดงให้เห็นว่าสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และกระแสไฟฟ้าที่ความดันก๊าซต่าง ๆ ณ ค่าความดัน 10 มิลลิทอร์ พบว่า $n = 4.6$ และ $k = 9 \times 10^{-13}$ สำหรับคาโทดชนิดนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าของความดันกราฟ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้าค่าสูงขึ้น ปริมาณไอออนของก๊าซถูกจำกัดด้วยความดันก๊าซในระบบทำให้ปริมาณการผลิตอิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดค่าตามไปด้วย ทั้งนี้ศักย์ไฟฟ้าของคาโทดจึงสูงขึ้นเพียงเร่งไอออนให้ชนคาโทดด้วยพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกระแส (ดังในรูป 2.32 a) การเบนโค้งนี้จะเริ่มที่กระแสสูงขึ้นถ้าความดัน

ก๊าซในระบบมีค่าสูง รูปที่ 2.32 b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดิสชาร์จของคาโทดและความดันก๊าซที่กระแสไฟฟ้าคงที่ต่าง ๆ การเพิ่มความดันก๊าซทำให้ความหนาแน่นอะตอมก๊าซเฉื่อยเพิ่มขึ้น และยังผลให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อิเล็กตรอนชุดที่สองอันเกิดจากการชนของไอออนบนเป้าสารเคลือบจึงมีปริมาณสูงขึ้น ทำให้ความนำไฟฟ้าของการดิสชาร์จสูงขึ้น และแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจะมีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น

2.13.2 อัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบ (deposition rates and efficiencies)

อัตราการสปีดเตอร์ของอะตอมสารเคลือบ ขึ้นกับปริมาณไอออนที่แปรผันกับกระแสและพลังงานของไอออน ซึ่งแปรผันกับแรงดันดิสชาร์จ ดังนั้นจึงแปรผันโดยตรงกับกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ($P = kV^{+1}$) ส่วนอัตราการเคลือบ (R) นอกจากแปรผันโดยตรงกับอัตราการสปีดเตอร์แล้วยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ คือ พื้นที่ของการเกิดสปีดเตอร์ ระยะเวลาห่างระหว่างคาโทดและชิ้นงาน ค่ายึดและการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป้าสารเคลือบ ความดันก๊าซรวมและความดันย่อยของก๊าซไอปฏิกิริยาภายในบริเวณเป้าสารเคลือบ ค่าการนำความร้อนของเป้าสารเคลือบอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ การเคลื่อนที่ชิ้นงานระหว่างการเคลือบมีผลต่อการลดอัตราการเคลือบลง

ประสิทธิภาพของอัตราการเคลือบ (R_E) คืออัตราส่วนระหว่างอัตราการเคลือบ และค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อหน่วยพื้นที่

$$R_E = R(A/min)/P(W/cm^2)$$

(2.8)

ประสิทธิภาพของการเคลือบนี้ ช่วยในการกำหนดสภาพที่ดีที่สุดของขบวนการเคลือบใน
 พลาสมาแมกนีตรอน ประสิทธิภาพการเคลือบของทองแดงมีค่าระหว่าง 800 - 1200
 $A^\circ - cm^2 / W-min$ และของอะลูมิเนียมมีค่าระหว่าง 200 - 650 $A^\circ - cm^2 / W - min$ เป็นต้น
 ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราการเคลือบ และประสิทธิภาพการเคลือบของเป้าสารชนิดต่าง ๆ
 ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบของ ดี ซี พลาสมา
 แมกนีตรอนสปัตเตอริง ของเป้าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ (3, หน้า 151)

Cathode material	Reported rate	Calculated efficiency	Av. Power density	Source- substrate distance	Argon Pressure	Cathode dimensions
	$\left(\frac{kA}{min} \right)$	$\left(\frac{A^\circ cm^2}{min W} \right)$	$\left(\frac{W}{cm^2} \right)$	[substrate motion] (cm)	(mTorr)	(cm)
Cu	10.7	1020				
Al	5.5	520	10.5	5	4	9 x 21
Ti	3.9	370		[static]		
Au	20	1250				
Cu	20	1250		not		
Cr	10	6.30	16	reported	not reported	15 x 41
Al	7	440		[static]		
Ti	4	250				
Cu	25	780		5		diam.
Al	11	340	30	[static]	3-5	14
Au	17	1100				
Cu	13	840		not		
Cr	10	650	15.5	reported	not reported	13 x 30

Al	10	650		[linear]		
Ti	3.3	210				
Al	2	185	10.8	7	11	10 x25
				[linear]		

ระบบแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง นับว่าเป็นวิธีการเคลือบที่มีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีสเป็คเตอรืงอื่น ๆ สามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 60% ของค่าการคำนวณทางทฤษฎีและดีกว่า ดี ซี พลานาร์ สเป็คเตอรืงถึง 3 เท่าตัว

2.13.3 ขีดจำกัดของอัตราการเคลือบ (Rate limitations)

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการจำกัดค่าอัตราการเคลือบ คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เป่าสารเคลือบทนได้โดยไม่เกิดการแตกหรือระเหยออก ซึ่งสัมพันธ์กับสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป่าสารเคลือบ และอัตราการระบายความร้อนของเป่าสารเคลือบ นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การขยายตัวและความหนาของเป่าสารเคลือบ ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราความร้อนที่เป่าสารเคลือบยอมรับได้ก่อนการแตกเนื่องจากความร้อนก็เป็นปัจจัยสำคัญอีกตัวหนึ่ง โครงสร้างเป่าสารเคลือบที่มีความเค้นคงค้าง (residual stress) ย่อมทนต่ออัตราการสเป็คเตอรืงที่ต่ำกว่าเป่าสารเคลือบที่ผ่านขบวนการอบอ่อน (annealing) การระบายความร้อนโดยตรงแก่เป่าสารเคลือบทำให้สามารถทนต่ออัตราการสเป็คเตอรืงได้สูงกว่าการระบายความร้อนผ่านแผ่น backing plate ของคาโทด เป็นต้น

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (W/cm^2) ที่พื่อเหมาะกับการเป่าสารเคลือบ เมื่อ
ยอมให้ความต่างอุณหภูมิระหว่างผิวสองด้านของเป่าสารเคลือบซึ่งหนา
1 เซนติเมตร มีค่าสูงถึง 100°C (3, หน้า 154)

		Power density	Metals/ semiconductors	Power density
Dielectrics	Glasses		Ag	427
	vitreous silica [fused quartz]	2-4	Cu	398
	and most borosilicate,		Au	315
	aluminosilicate and soda-lime		Al	237
	glasses		W	178
	80:20 PbO-SiO ₂	0.6	Si	149
	Oxides [polycrystalline]		Mo	138
	BeO	51	Cr	94
	Al ₂ O ₃	30	Ni	91
	MgO	8.7	In	82
	Oxides [single crystal]		Fe	80
	sapphire (Al ₂ O ₃)	7.7-8.3	Ge	76
	quartz (SiO ₂)	1.4-2.6	Pt	73
			Pd	72
Alloys	In-Sn 50:50	70 [est]	Sn	67
	Pb-Sn 60:40	47	Ta	58
	Pb-Sn 50:50	43	Pb	35
	stainless steel [300-series]	13.4-15.5	Ti	22
Conducting	molybdenum disilicide	31		
compounds	Ta, Ti, and Zr carbides	21		

2.14 คุณสมบัติ โครงสร้างสารประกอบของไททาเนียมไนไตรด์ และการประยุกต์ใช้งาน

2.14.1 สีและโครงสร้างสารประกอบของไททาเนียมไนไตรด์

Clarke⁽¹⁷⁾ ทดลองเคลือบฟิล์มของไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีแอคทีฟสปัตเตอริงที่แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 1000 โวลต์ และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์/ตารางเซนติเมตร โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมก๊าซไนโตรเจนและอาร์กอนที่ค่าต่าง ๆ พบว่าการเคลือบให้สีต่างกันตามอัตราส่วนผสม จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย x-ray diffraction และ scanning electron microscope เขาให้ข้อสรุปว่าที่ความดันย่อยก๊าซไนโตรเจนมีค่าต่ำ สีของฟิล์มเคลือบออกสีเงินของโลหะ ไททาเนียม เมื่อความดันย่อยก๊าซไนโตรเจนสูงขึ้นจะปรากฏสีเหลืองอ่อน และสารประกอบที่วิเคราะห์คือ TiN เมื่อเพิ่มความดันย่อยไนโตรเจนให้สูงขึ้นอีก สีจะเปลี่ยนเป็นสีทองและค่อย ๆ เข้มขึ้นจนเป็นสีแดงเข้ม สารประกอบคือ TiN_x เมื่อ $x > 1$ ทั้งนี้ Clarke มิได้ระบุว่า x มีค่าเท่าใด เมื่อเกิดสีทองและเปลี่ยนไปจนถึงสีแดงเข้ม (deep rose color)

Wittmer⁽¹⁸⁾ ทดลองเคลือบไททาเนียมไนไตรด์โดยใช้วิธีแอคทีฟสปัตเตอริงด้วย sputter gun และวิธี ARE เขาอธิบายการเกิดสีของฟิล์มเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ต่างจาก Clarke เล็กน้อย โดยอธิบายว่า เมื่อความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่า 1×10^{-5} ทอร์ ในขบวนการเคลือบแบบ ARE ฟิล์มเคลือบที่ได้ให้สีเงินของไททาเนียม (α -Ti) บริสุทธิ์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ hexagonal เมื่อความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 1.5×10^{-4} ถึง 1.5×10^4 ทอร์ จะเกิดสารละลายของแข็ง (solid solution) ระหว่าง Ti และ N_2 โดยอะตอมไนโตรเจนซึ่งมีขนาดเล็กจะแทรกตัวในระหว่างช่องว่างของผลึกไททาเนียม ซึ่งมีอยู่ 2 ตำแหน่ง ในหน่วยเซลล์แบบ hexagonal เนื่องจากอะตอมไนโตรเจนมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่าง เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ของโครงสร้างผลึก และทำให้ความเสถียรของโครงสร้างผลึกลดลง ในช่วงนี้สีเคลือบที่ปรากฏยังคงเป็นสีเงิน แต่ strain energy จากการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งอัตราส่วนระหว่าง Ti : N_2 เท่ากับ 2 : 1 ผลึกจะเปลี่ยนโครงสร้างจาก hexagonal เป็น fcc (fcc centered cubic) ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่เสถียรมากกว่า เนื่องจากหน่วยเซลล์ของโครงสร้างแบบ fcc มีไททาเนียม 4 อะตอม และมีช่องว่างในการแทรกตัวของไนโตรเจนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น 4 ช่องที่อัตราส่วนผสม Ti : $N_2 = 2:1$ นี้มีอะตอมไนโตรเจนเพียงครึ่งเดียวของจำนวนช่องว่าง การมีอะตอมอยู่ไม่เต็มทุกช่องว่างนี้ทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไปเล็กน้อย เป็นโครงสร้างแบบ tetragonal ของ Ti_2N ซึ่งมีความแข็งแรงสูง และให้สีเหลืองอ่อนของฟิล์มเคลือบ จากนั้นเมื่อเพิ่มความดันย่อยก๊าซไนโตรเจนระหว่าง $1.5-2.6 \times 10^{-4}$ ทอร์ สารประกอบเริ่มมี

อะตอมไนโตรเจนแทรกตัวมากขึ้น และเกิดสารประกอบ 2 ชนิด ของ Ti_2N และ TiN ซึ่งมีโครงสร้างแบบ tetragonal และ fcc ตามลำดับ ช่วงนี้ความแข็งของฟิล์มเคลือบมีค่าสูงสุด ที่ความดัน ก๊าซไนโตรเจน 2×10^{-4} ทอรั และสีเหลืองเข้มขึ้น จนกระทั่งความดันก๊าซไนโตรเจนสูงถึง 3×10^{-4} ทอรัและสีเหลืองเข้มขึ้น อะตอมไนโตรเจนจะแทรกตัวเต็มช่องว่างทั้งหมด และมีเพียงเฟส TiN เท่านั้น สีที่ได้ คือ สีทองปลั่ง การเพิ่มความดันไนโตรเจนสูงเกินไปทำให้เกิดการแทรกตัวของไนโตรเจนสูงกว่าสภาวะ stoichiometry และส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในโครงสร้างผลึก ทำให้สีฟิล์มเคลือบเปลี่ยนเป็น น้ำตาล น้ำตาลบรอนซ์ บรอนซ์ (สีแดงทองแดง) จนเปลี่ยนเป็นสีแดงในที่สุดเมื่อปริมาณไนโตรเจนมีมาก โดยสารประกอบที่ได้ คือ TiN_x เมื่อ $x > 1$ เมื่อนี้โดยทั่วไปในการวิเคราะห์เมื่อใช้ความดันก๊าซไนโตรเจนต่ำกว่า 1.5×10^{-4} ทอรั มักพบสารประกอบ 2 เฟส ระหว่าง $\alpha-Ti$ ที่มี N_2 ละลายตัวในสสารละลายของแข็ง และ Ti_2N ส่วนที่ความดันก๊าซไนโตรเจนสูงกว่า 1.5×10^{-4} ทอรั จะพบสารประกอบ 2 เฟส ของ $Ti_2N + TiN$

Ahn และคณะ⁽¹⁹⁾ ได้วัดค่าการสะท้อนแสง (reflectivity) ของฟิล์มเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่ได้จากขบวนการรีแอคทีฟสเปตเตอริงที่อัตราส่วนผสมของก๊าซไนโตรเจนอาร์กอน ค่าต่าง ๆ พบว่า เมื่อเคลือบสารบริสุทธิ์ไททาเนียม ($0\% N_2$) ค่าการสะท้อนแสงเกือบเท่ากันทุกค่า ความถี่ในช่วงที่ตามองเห็นอันเป็นสาเหตุของสีเงินที่ปรากฏที่ $15\% N_2$ สารประกอบที่ได้คือ $\alpha-Ti + Ti_2N$ แต่สีที่เห็นยังไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ที่ $20\% N_2$ สารประกอบที่ได้คือ $Ti_2N + TiN$ ค่าการสะท้อนแสงมีมากที่ความยาวคลื่นสูงกว่า 5000 อังสตรอม และเกิดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 5000 อังสตรอมไว้เกือบทั้งหมด ทำให้สีที่ปรากฏคือสีทองอันเกิดจากสเปกตรัมการสะท้อนที่มีค่าในช่วงสีเหลืองและแดง ที่ $25 - 36\% N_2$ สารประกอบที่ได้คือ TiN การสะท้อนแสงมีค่าสูงขึ้นแต่ยังมีรูปร่างกราฟคล้ายกัน ทำให้สีที่ปรากฏมีสีทองปลั่งขึ้น ค่าการสะท้อนแสงช่วงนี้ใกล้เคียงกับค่าการสะท้อนแสงของทอง (Au) มากหลังจากนั้นปริมาณ ก๊าซไนโตรเจนจะมีค่าสูงขึ้น และทำให้สเปกตรัมการสะท้อนแสงเลื่อนสู่สีแดงมากขึ้น และโทนสีเริ่มเปลี่ยนเป็น น้ำตาล ทองแดง และแดง ดังได้กล่าวมาแล้ว (ดูรูปที่ 2.34 ประกอบ)

Schintlmeister และ Pacher⁽²⁰⁾ แสดงผลการทดลองการเคลือบผสมระหว่าง TiN (ให้สีทอง) และ TiC (ซึ่งให้สีเงิน) เรียกว่า ไททาเนียมคาโบไนไตรด์ (Titanium carbonitride) และพบว่า ถ้าเปลี่ยนอัตราส่วนผสมการเคลือบของสารประกอบ 2 ชนิดนี้ ฟิล์มเคลือบที่ได้จะปรากฏสีต่าง ๆ ที่น่าสนใจในการใช้ประดับตกแต่ง ซึ่งแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.6

รูปที่ 2.33⁽¹⁸⁾ แสดงกราฟค่าการสะท้อนแสงเทียบกับความยาวคลื่น ของฟิล์มเคลือบไททาเนียม ไนไตรด์ จากขบวนการรีแอคทีฟ สปัตเตอริง ที่อัตราส่วนผสมของ ก๊าซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ ในกาซผสม

รูปที่ 2.34⁽¹⁸⁾ แสดงอัตราผสมของไนโตรเจน และไททาเนียมในฟิล์มเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ ที่ได้จากขบวนการรีแอคทีฟ สปัตเตอริง เป็นฟังก์ชันของปริมาณ ไนโตรเจนใน กาซผสมเมื่อควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับที่ 500°C

Valkonen และ Ribbing⁽²¹⁾ ทดลองเคลือบฟิล์มบางของไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ด้วยวิธี ดี ซี และอาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง ด้วยความหนาต่าง ๆ กันในช่วงระหว่าง

30 ถึง 310 อังสตรอม ฟิล์มเคลือบในช่วงความหนานี้ปรากฏสีน้ำเงินเทา ทั้งกรณีมองจากรังสีสะท้อนและรังสีส่งผ่าน เขาวัดค่าการสะท้อนแสง (reflectance) และค่าการส่งผ่านแสง

(transmittance) ในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ในช่วงกว้าง และพบว่าฟิล์มของไททาเนียมไนไตรด์

ตารางที่ 2.6⁽²⁰⁾ แสดงสีของไททาเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ที่อัตราส่วนผสมของไททาเนียมไนไตรด์

และไททาเนียมคาร์ไบด์ค่าต่าง ๆ

TiN % น้ำหนัก	TiC % น้ำหนัก	สีเคลือบ
100	0	สีเหลืองทอง (Yellow)
95	5	สีเหลืองน้ำตาล (Brownish yellow)
90	10	สีทองบรอนซ์ (golden bronze)
85	15	สีม่วงแดง (Red violet)
80	20	สีม่วง (Violet)
70	30	สีม่วงน้ำเงิน (Blue - violet)
60	40	สีน้ำเงินเทา (Gray - blue)
50	50	สีเงินเทา (Silver - gray with bluish tint)

มีคุณสมบัติยอมให้แสงช่วงที่ตามองเห็นส่งผ่าน และสะท้อนรังสีอินฟราเรดคล้ายกับฟิล์มบางของทองแต่มีคุณภาพด้อยกว่า เนื่องจากมีปริมาณดูดกลืนรังสีสูงกว่าทอง ผลการทดลองนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.35

รูปที่ 2.35⁽²¹⁾ แสดงการสะท้อน (reflectance) และการส่งผ่าน (transmittance) ของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์บาง ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในช่วงกว้าง เมื่อ ความหนาของฟิล์มมีค่า a) 30 อังสตรอม b) 50 อังสตรอม c) 127 อังสตรอม d) 213 อังสตรอม ตามลำดับ

2.14.2 ความต้านทานและโครงสร้างของไททาเนียมไนไตรด์

นอกจากการศึกษาการสะท้อนแสงของฟิล์มเคลือบไททาเนียมไนไตรด์แล้ว Wittmer (18) ได้ศึกษาคุณสมบัติความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเคลือบสารประกอบชนิดนี้ด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว ผลการทดลองปรากฏดังในรูปที่ 2.36 และ 2.37 ตามลำดับ ค่าของความต้านทานจำเพาะจากฟิล์มเคลือบ ในการเคลือบด้วยวิธี ARE (ดูรูปที่ 2.36) เริ่มจาก $70 \mu\Omega - \text{cm}$ เมื่อเป็นไททาเนียมบริสุทธิ์และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ $250 \mu\Omega - \text{cm}$ เมื่อความดัน ก๊าซไนโตรเจน มีค่า 2×10^{-4} โกล์จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก hexagonal $\alpha - \text{Ti}$ สู่ fcc TiN หรือในช่วงเกิดสารประกอบ Ti_2N นั่นเอง การเพิ่มความดันก๊าซไนโตรเจนสูงขึ้นอีกทำให้ความต้านทานจำเพาะลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่ $200 \mu\Omega - \text{cm}$ ณ จุดที่เกิดสารประกอบ TiN การเพิ่มความดันก๊าซไนโตรเจนต่อไปความต้านทานจำเพาะจะมีค่าสูงขึ้น ส่วนการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง ในรูปที่ 2.37 แสดงค่าสูงสุดของความต้านทานจำเพาะที่สารประกอบเป็น Ti_2N ณ และค่าต่ำสุดที่สารประกอบเป็น TiN อัตราส่วนผสมก๊าซไนโตรเจนมีค่า 22% (ดูรูปที่ 2.34 ประกอบ) ซึ่งจะเห็นได้ว่านอกจากสีการเคลือบจะช่วยบอกองค์ประกอบของสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์แล้วเรายังอาจใช้ค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้เป็นตัวบอกองค์ประกอบของสารเคลือบได้

รูปที่ 2.36⁽¹⁸⁾ แสดงค่าของความต้านทานจำเพาะ (ρ) ในหน่วย 10^{-6} โอห์ม เซนติเมตรเทียบกับความดันก๊าซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ ในการเคลือบไท

ทาเนียมไนไตรต์ด้วยวิธี ARE เมื่อควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ (Ts) ที่ค่า 300, 400 และ 500 °C ตามลำดับ สเกลทางขวามือของค่าความต้านทานจำเพาะเป็นการขยายสเกลเมื่อทำการทดลองเคลือบฟิล์มที่ค่า Ts = 500 °C

รูปที่ 2.37⁽¹⁸⁾ แสดงค่าความต้านทานจำเพาะและอัตราการเคลือบในการเคลือบไททาเนียมด้วยวิธีแอคทีฟสปีดเตอริงที่เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในกาซผสมค่าต่าง ๆ เมื่อใช้กำลังไฟฟ้า ดี ซี 1 กิโลวัตต์และไดแอสแผ่นรองรับด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่าง -90 ถึง -100 โวลต์ (ดูประกอบกับรูป 2.34)

จากคุณสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีของไททาเนียมไนไตรต์ การมีอุณหภูมิหลอมตัวสูง (2950°C) มีความเสถียรสูง และเป็นกำแพงกันการแพร่ของอะตอมโลหะชนิดต่าง ๆ ได้ดี เราอาจใช้ไททาเนียมไนไตรต์เป็นตัวนำของรอยต่อในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี เช่น การเคลือบชั้นไททาเนียมไนไตรต์คั่นสารกึ่งตัวนำและขั้วต่ออะลูมิเนียมจะช่วยป้องกันการแพร่ของอะตอม อะลูมิเนียมผ่านเข้าสู่สารกึ่งตัวนำได้ดี ทำให้อายุการใช้งานของสารกึ่งตัวนำสูงขึ้น วิธีการเช่นนี้มีความจำเป็นมากในสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาของแต่ละชั้นน้อยมาก เช่น รอยต่อของ Metal - Oxide - Semiconductor (MOS) เป็นต้น

2.14.3 ความแข็งและทนต่อการสึกหรอของไททาเนียมไนไตรด์ (hardness and ware resistance)

การวัดค่าความแข็งของไททาเนียมไนไตรด์ เมื่อเคลือบด้วยวิธี ARE ที่ค่าความดันกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ โดย Wittmer⁽¹⁸⁾ ในรูปที่ 2.38 แสดงให้เห็นว่าความแข็งมีค่าสูงสุด

เมื่อความดันก๊าซไนโตรเจนมีค่า 2×10^{-4} ทอร์ ขณะที่ฟิล์มเคลือบมีสารประกอบผสมระหว่าง Ti_2N และ TiN ซึ่งอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของความต้านทานจำเพาะมาก

Nakamura และคณะ⁽²²⁾ ทดลองเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ลงบนเหล็กกล้า mild steel

ด้วยวิธี ARE และ ได้พบเช่นกันว่าเมื่อปรับความดันก๊าซไนโตรเจนให้มีค่าเหมาะสมจนเกิดสาร

รูปที่ 2.38⁽¹⁸⁾ แสดงค่าความแข็ง (Vickers hardness) และอัตราการเคลือบของไททาเนียมไนไตรด์ เทียบกับความดันก๊าซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ ในการเคลือบด้วยวิธี ARE ของ Wittmer จุดที่บ คือ ผลการทดลองจากการระเหยสารของ Yoshihara และ Mori (ดูรูปที่ 2.36 ประกอบ)

ประกอบ $\text{Ti}_2\text{N}+\text{TiN}$ ความแข็งแรงของสารเคลือบมีค่าสูงกว่าสารประกอบ TiN เพียงอย่างเดียว (ดูตารางที่ 2.7) นอกจากนี้เขายังได้เคลือบไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธี low pressure plasma deposition (LPPD) ซึ่งต่างจากวิธีการ ARE เพียงการป้อนด้วยศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับแผ่นรองรับเท่านั้น และแสดงผลของสารประกอบฟิล์มเคลือบและความดันย่อยก๊าซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ (ดูตารางที่ 2.8)

Lee และ Bayer⁽²³⁾ ได้เปรียบเทียบความทนทานต่อการสึกหรอของฟิล์มเคลือบไททาเนียมไนไตรด์จากการเคลือบ 4 วิธี คือ

1) อาร์ เอฟ ไดโอด รีแอคทีฟ สเป็คตรัม ที่ความดันก๊าซผสม $Kr+N_2 = 30$ มิลลิทอร์ แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 200 โวลต์ และอุณหภูมิขึ้นงาน $500^{\circ}C$ ด้วยอัตราการเคลือบ 80 อังสตรอม/นาที่

2) ดี ซี แมกนีตรอน รีแอคทีฟสเป็คตรัม ที่ความดันก๊าซ $Ar+N_2 = 2.3$ มิลลิทอร์ ด้วยอัตราส่วนผสมก๊าซ $Ar:N_2 = 4:5$ ความเข้มสนามแม่เหล็ก 1200 เกาส์ และอุณหภูมิขึ้นงาน $190^{\circ}C$ ด้วยอัตราการเคลือบ 350 อังสตรอม/นาที่

3) ARE โดยระเหยสารด้วยการอาร์คไฟฟ้าและอุณหภูมิขึ้นงาน $190^{\circ}C$

4) รีแอคทีฟ ไอออนเพลทติง ที่ความดันก๊าซไนโตรเจน 2 มิลลิทอร์ และอุณหภูมิขึ้นงาน $250^{\circ}C$ ด้วยอัตราการเคลือบ 1900 อังสตรอม/นาที่

ตารางที่ 2.7⁽²²⁾ แสดงผลของความดันย่อยก๊าซไนโตรเจนและอุณหภูมิวัสดุเคลือบ ที่มีผลต่อองค์ประกอบของ Ti และ N₂ ในสารประกอบไททานเนียมไนไตรด์และความแข็ง โดยการเคลือบด้วยวิธี ARE ลงบนเหล็กกล้า mild steel

Sub. Temp. ($^{\circ}C$)	$PN_2 \times 10^{-3}$ (Torr)			
500	0.8	1.5	1.8	2.0
	HV = 1900 Ti_2N	1300 $TiN + (Ti_2N)$		
250	1700 $Ti_2N + (TiN)$	1900 TiN	1000 TiN	600 TiN
150	1500 TiN			

ตารางที่ 2.8⁽²²⁾ แสดงผลของความดันย่อยก๊าซไนโตรเจนต่อค่าความแข็งและองค์ประกอบสารเคลือบ Ti และ N ในสารประกอบไททานเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบลงบนเหล็กกล้าเบอร์ SKH-9 ที่ความหนาฟิล์มเคลือบค่าต่าง ๆ ด้วยวิธีเคลือบ LPPD เมื่อควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับที่ $300^{\circ}C$

PN_2 (Torr)	thick. (μ)	Hv (kg/mm^2)	phase
0.5×10^{-3}	6.5	2800	Ti_2N

1.3	4	1400	"
1.7	3	1300	"
2.2	3	650	TiN + (Ti ₂ N)
3.0	1.5	340	TiN
1.7	6.5	1400	TiN + (Ti ₂ N)
2.2	3.5	750	TiN
2.2	4	1000	"

และแสดงให้เห็นว่า วิธีรีแอคทีฟ ไอออนเพลทติง ให้ผลการทดลองดีที่สุดในด้านความคงทนต่อการสึกหรอโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความคงทนต่อการสึกหรอสัมพัทธ์ = 93 ในขณะที่การเคลือบด้วยวิธีอื่นให้ความคงทนต่ำกว่ามาก อย่างไรก็ตามวิธี ดี ซี แมกนิตรอน รีแอคทีฟสเปตริง ยังคงแสดงค่าความคงทนต่อการสึกหรอสูงกว่าวิธี อาร์ เอฟ รีแอคทีฟสเปตริงถึง 1.5 เท่า การทดลองนี้มิได้ระบุความหนาฟิล์มเคลือบ และชนิดสารประกอบที่เกิดขึ้นในฟิล์มเคลือบ

Hintermann⁽²⁸⁾ เคลือบไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีไอออนเพลทติงบนดอกสว่านทำจาก high speed steel ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และทดลองเจาะชิ้นเหล็กกล้าที่มีความแข็ง 100 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร ด้วยอัตราการเจาะและความเร็วการเจาะค่าต่าง ๆ เปรียบเทียบกับดอกสว่านที่ไม่ได้รับการเคลือบผิว และดอกสว่านที่ถูกขัดมันผิวหลังการเคลือบ พร้อมทั้งแสดงผลการทดลอง ในรูปที่ 2.40 พบว่าภายหลังการเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ผิวที่

รูปที่ 2.39⁽²⁴⁾ แสดงคงทนต่อการสึกหรอของฟิล์มเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีการต่าง ๆ 4 วิธี คือ 1. อาร์ เอฟ สปีดเตอริง 2. ดี ซี แมกนิตรอน ARE และ 4. ไอออน เพลทติง

แข็งขึ้น ความสามารถทนอุณหภูมิสูงขึ้นและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ลดลงของไททาเนียมไนไตรด์ช่วยให้ดอกสว่านสามารถทำงานด้วยอัตราความเร็วที่สูงขึ้นและระยะทางการเจาะที่มากขึ้นด้วย

- รูปที่ 2.40⁽²⁴⁾ ก) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการเจาะ (cutting speed และ ระยะทางการเจาะ (cutting distance) ที่อัตราการเจาะ 0.1 มิลลิเมตร/รอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างดอกสว่านที่เคลือบ TiN (coated) ดอกสว่านที่เคลือบ Tin เจียรนัยผิว (coated and reground) , ดอกสว่านที่ทำผิวเหล็กไนไตรด์ (nitrided) และดอกสว่าน high speed steel ที่มีได้เคลือบผิว (uncoated)
- ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเจาะและอัตราการเจาะ (feed rate) ที่มีความเร็วการเจาะ 25 เมตร/วินาที ของดอกสว่านที่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวในสภาวะต่าง ๆ กัน

2.14.4 คุณสมบัติอื่น ๆ ของไททาเนียมไนไตรด์และการประยุกต์ใช้งาน

ไททาเนียมไนไตรด์มีความทนทานต่อการกัดกร่อน (corrosion) สูงมากโดยจะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายกรดผสม $\text{HF} + \text{HNO}_3$ หรือสารละลาย KOH ที่อุณหภูมิสูง⁽²⁰⁾ และเกิดเป็นสารประกอบแอมโมเนีย แต่ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยาในสภาวะอื่น ไททาเนียมไนไตรด์นี้ทนการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าสเตนเลสและซูเปอร์อัลลอยที่ใช้ในกังหันเทอร์ไบน์⁽²⁴⁾ เหนือและผงซัพพอร์ทจะไม่มีผลในการทำลายฟิล์มแต่อย่างใด ไททาเนียมไนไตรด์มีสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานต่ำกว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า (และไททาเนียมคาร์ไบด์มีค่าต่ำกว่าไททาเนียมไนไตรด์) ร่วมกับการมีเนื้อผิวแข็ง เมื่อใช้เคลือบลงบนแบบอิง ทำให้สามารถรับภาระโหลดได้เพิ่มขึ้น ทำงานได้ที่ความเร็วรอบสูงขึ้นโดยมีอัตราการสึกหรอต่ำมาก ลื่นเปลืองน้ำมันหล่อลื่นน้อย การเคลือบลงบน tool ที่ใช้ในการกลึง ไส้ ตัด เจาะ ช่วยให้ผิวที่ได้รับการกลึง ไส้ ตัด เจาะ มีความเรียบสูงกว่า tool ที่ไม่มีการเคลือบไททาเนียม ไนไตรด์เนื่องจากค่าความเสียดทานต่ำและทนอุณหภูมิจึงลดแรงต้านทาน ทำให้สามารถทำงานที่ค่าอัตราการตัดเจาะสูงขึ้นและที่ความเร็วรอบสูงขึ้นได้เครื่องระบบ CNC (computed numerical control) ในปัจจุบันเป็นเครื่องที่ทำงานได้ด้วยความเร็วสูง และมีความแม่นยำสูงในการตั้งระยะทำงานการใช้ tool ที่เคลือบผิวแข็งด้วยไททาเนียมไนไตรด์สามารถทำงานตัดเจาะด้วยความเร็วรอบการหมุนสูงกว่า 10,000 รอบ/นาที และมีการสึกหรอต่ำ ทำให้ไม่ต้องตั้งเครื่องใหม่บ่อย ๆ เนื่องจากการสึกหรอความเสียหายที่เกิดกับชิ้น tool

การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์⁽²⁵⁾ ลงบนเกลียวชิ้นงาน สามารถรักษาความละเอียดและความเรียบของผิวเกลียวไว้ได้นาน การเคลือบลงบนเหล็กมีดกึ่งทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์และชิ้นขัดผิว (reamer) ทำจาก high speed steel จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานวัสดุได้ 3-6 เท่าตัว การเคลือบดอกสว่าน counter bores ทำให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น 2-4 เท่า การเคลือบดอกสว่าน milling จะยืดอายุการใช้งานได้ถึง 3-8 เท่า การเคลือบดอกสว่านคว้านรู (broaches) ช่วยเพิ่มอายุการใช้งานได้ 3-20 เท่า โดยช่วงของการยืดอายุใช้งานมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ถูกกลึง ใส ตัด เจาะ เหล่านั้น

การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ลงบนโมลด์ทำให้ผิวโมลด์แข็งแกร่งการกัดกร่อนเนื้อโมลด์ เช่น โมลด์ฉีด PVC ที่ใช้ในบ้านเรา ปัจจุบันผิวเคลือบ hard chrome ถูกกัดกร่อนจากสารเคมีใน PVC ระหว่างใช้งานค่อนข้างรวดเร็ว การเคลือบผิวไททาเนียมไนไตรด์จะช่วยทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลงมาก นอกจากนี้โมลด์แบบฉีด ที่เคลือบด้วยไททาเนียมไนไตรด์ ช่วยลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผิวเคลือบลง 3 เท่าตัว เมื่อเทียบกับผิวเหล็ก สามารถลดแรงอัดได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และช่วยให้การไหลตัวของวัสดุในแบบฉีดดีขึ้น⁽²⁵⁾

ในการเคลือบเพื่อความสวยงามและการเคลือบเพื่อทนทานต่อการสึกหรอ สภาพการเคลือบย่อมมีความแตกต่างกันออกไปบ้างเช่น จุดหลอมตัวของสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ที่ใช้กับการเคลือบเพื่อความสวยงามอาจไม่จำเป็นต้องสูงมากนัก แต่ความทนทานต่อการกัดกร่อน (corrosion) ในการเคลือบเพื่อความสวยงามควรดีมาก ๆ สีการเคลือบจำเป็นมากต่อความสวยงามในขณะที่การเคลือบเพื่อทนการสึกหรอ สีเคลือบไม่จำเป็นต้องสดใส คุณภาพความแข็งผิวชิ้นงานมีความสำคัญมากกว่าขนาด (grain) ในการเคลือบเพื่อทนการสึกหรอควรใหญ่ในระดับสูงกว่า 1 ไมครอนและไม่จำเป็นต้องขัดผิวให้มัน แต่การเคลือบเพื่อความสวยงามจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีเกรนละเอียดมากทำให้สามารถขัดมันวาวได้ง่าย ความหนาของการเคลือบทนการสึกหรอมีค่าความหนาในช่วง 5-20 ไมครอน ในขณะที่การเคลือบเพื่อความสวยงามต้องการความหนาเพียง 2-5 ไมครอน หรือต่ำกว่า ดังนั้นสภาพการเคลือบเมื่อใช้งานต่างกันจึงเป็นปัจจัยสำคัญส่วนหนึ่งในการออกแบบระบบเคลือบเพื่อผลิตสินค้าทางอุตสาหกรรมด้านนี้

2.15 สถานภาพการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์

Logothetidis, Alexandrou และ Kokou⁽²⁶⁾ ได้ศึกษาถึงผลของศักย์ไบแอส (bias voltage) และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนต่อการเกิดฟิล์มไททาเนียม พบว่า ศักย์ไบแอสมีผลต่อการหลุดออกของไนโตรเจนจากผิวของฟิล์ม และที่ศักย์ไบแอสมากกว่า 120 โวลต์ ไททาเนียมอะตอมจะถูกสปีดเตอร์ออกจากฟิล์ม จากผลของ XRD แสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของ

ก๊าซไนโตรเจน 2.2 sccm ฟิล์มจะมีโครงสร้าง TiN_x (111) และพบ TiN_x (200) ที่ $20 = 36.2^\circ$ และ 42.5° ตามลำดับ เมื่ออัตราการไหลเป็น 1.7 sccm พบโครงสร้าง Ti_2N จะเกิดเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนมีค่า 1.9 sccm

Hohl, Stock และ Mayr⁽²⁷⁾ พบว่าการเคลือบ TiN บนวัสดุผิวเรียบโดยให้ศักย์ไบแอสในช่วง -50 ถึง -100 โวลท์ จะได้ฟิล์มที่มีคอลัมน์ขนาดใหญ่ (coarse columnar) และเปลี่ยนเป็นเกรนขนาดเล็ก (fine-grained) เมื่อศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นในช่วงดังกล่าว แต่ถ้าเคลือบบนวัสดุผิวดิบจะพบโครงสร้างที่มีรอยแตกที่ไม่สม่ำเสมอ (irregular fracture) เมื่อศักย์ไบแอสเพิ่มสูงถึง -300 โวลท์ จะไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างฟิล์มทั้งบนวัสดุผิวเรียบและผิวดิบที่ความดันขณะสปัตเตอริงต่ำ (0.2 ปาสคาล) ฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุผิวเรียบจะมีโครงสร้างค่อนข้างแน่น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น (0.5 ปาสคาล) โครงสร้างของฟิล์มจะไม่เป็นระเบียบและค่อนข้างกลม

Richter และคณะ⁽²⁸⁾ พบว่าเมื่อเคลือบ TiN บนวัสดุรองรับซิลิคอนหรือทองเหลือง โดยให้ศักย์ไบแอสแก่วัดในช่วง +30 ถึง -200 โวลท์ เฟส stoichiometric TiN เกิดในทุกกรณี และขนาดเกรนโดยเฉลี่ยของโครงสร้างจะลดลงเมื่อศักย์ไบแอสค่าลบเพิ่มขึ้น ค่าความแข็ง Knoop สูงขึ้นเมื่อเกรนมีขนาดเล็กลง การเคลือบฟิล์ม TiN โดยที่ไม่มีการให้ศักย์ไบแอสค่าลบแก่วัดรองรับ พบว่าปริมาณออกซิเจนในฟิล์มสูง ทำให้ได้เกรนขนาดใหญ่ การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย KRD พบโครงสร้าง TiN (111) ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อระยะห่างระหว่างวัสดุกับเป้าหมายน้อยและวัสดุวางอยู่ในตำแหน่งใกล้แนวศูนย์กลางของเป้า

Valvoda⁽²⁹⁾ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสภาวะการเคลือบของฟิล์ม TiN ที่เคลือบด้วยกระบวนการรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ผลการทดลองพบว่าปริมาณของไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มเปลี่ยนโครงสร้างจาก hexagonal α -Ti เป็น cubic δ -phase ของ TiN และในบางกรณีอาจพบโครงสร้าง tetragonal ϵ - Ti_2N เกิดขึ้นด้วย ซึ่งความแข็งของฟิล์มจะมีค่าสูงสุดเมื่อฟิล์มเคลือบมีเฉพาะโครงสร้าง cubic δ -phase ของ TiN เท่านั้น

Chen และ Duh⁽³⁰⁾ ได้ศึกษาการเคลือบของฟิล์ม TiN โดยมีไททาเนียมเป็นสารกั้นระหว่างชั้น (interlayer) บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยวิธีแอพฟิฟอาร์แมกนีตรอนสปัตเตอริง ผลการทดลองพบว่าชั้นแรก ๆ ของไททาเนียมซึ่งเป็นสารกั้นระหว่างชั้น มีปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมกับออกซิเจน คาร์บอน และไนโตรเจน เมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับสูงขึ้น ส่วนชั้นนอกจะพบเฟส TiN การเกิดสารกั้นระหว่างชั้นนี้ทำให้ฟิล์มมีทิศทางการจัดเรียงตัว (orientation) โดยที่ระนาบ (111) ของ TiN เป็นทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศที่ชอบ (preferred orientation) นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออัตราการไหลของก๊าซรีแอคทีฟลดลง โครงสร้างของฟิล์มมีแนวโน้มที่มี

หลายผลึก (polycrystalline) ทำให้ความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส (interfacial stress) ลดลง และการยึดเกาะของฟิล์มแข็งแรงขึ้น

Santucci และคณะ⁽³¹⁾ ได้ศึกษาการโตของฟิล์ม TiN ที่ได้จากการทำงานไนโตรเดชัน (nitridation) ของผิวไททาเนียม โดยใช้ x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ x-ray diffraction (XRD) พบว่าสัดส่วนองค์ประกอบของฟิล์ม TiN ขึ้นกับเวลาในการอบแอนนัล (annealing time) เป็นสำคัญ เมื่อการอบแอนนัลผ่านไป 100 นาที บริเวณผิวของชิ้นงานเท่านั้นที่พบฟิล์ม TiN ที่เป็นผลึกทั้งหมดและชั้นของฟิล์มนี้จะขยายลึกเข้าไปในผิว การพบโครงสร้างผลึกซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนต่ำ $\text{TiN}_{0.3}$ เป็นผลมาจากการไนโตรเดชันที่ไม่สมบูรณ์ของชั้นที่อยู่ต่ำกว่า

Combadiere และ Machet^() ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิของแผ่นรองรับต่อโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะพื้นผิว (morphology) ของฟิล์ม โดยการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าที่ความดันย่อยก๊าซไนโตรเจนคงที่ โครงสร้างของฟิล์มจะแปรตามอุณหภูมิ การเพิ่มความดันย่อยก๊าซไนโตรเจน ฟิล์มมีแนวโน้มที่จะโตขึ้นในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด ซึ่งเป็นระนาบที่ขนานกับผิวดของแผ่นรองรับ เช่น (311), (111) และ (200) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 °C อัตราส่วน N/Ti จะมากกว่า ไนโตรเจนเกิดการหลุดออก (desorption) จากฟิล์ม

Duh และ Doong⁽³²⁾ พบว่า อัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซไนโตรเจนมีอิทธิพลอย่างเด่นชัดต่อเฟสและโครงสร้างของ TiN โดยที่อัตราส่วนการเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไนโตรเจนลดลง ผลของ XRD แสดงให้เห็นว่า TiN เกิดเมื่ออัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 90/10 ถึง 70/30 และที่อัตราส่วน 95/5 และ 60/40 ไม่พบเฟส TiN

2.16 คุณสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์และการประยุกต์ใช้งาน

ในเทคโนโลยีการเคลือบวัสดุสมัยใหม่ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นสารประกอบออกไซด์ตัวหนึ่งที่มีความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน โดยถูกนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น ในการเคลือบฟิล์มบาง บนผิววัสดุเพื่อให้วัสดุมีความทนทานต่อการขัดสี (wear resistance) หรือทนทานต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance) ที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เหมาะสมหลาย ๆ อย่างคือ จุดหลอมเหลวสูง ค่าความแข็ง (hardness) ที่สูงที่สุดในสารจำพวกออกไซด์ทั้งหมด มีเสถียรภาพทางกลและทางเคมีที่สูง (high stability mechanic and chemical) แม้ที่สภาวะอุณหภูมิสูงเกือบ 1000°C ตัวอย่างที่ใช้ในงานดังกล่าว เช่น เคลือบเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอในงาน cutting tool ^(34,35) หรือเคลือบผิวโลหะที่เป็นส่วนประกอบของใบพัดไอพ่น เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและการเกิดออกไซด์กับผิวขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง

นอกจากนี้อลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารไดอิเล็กทริก (dielectric) ที่สำคัญที่ใช้ในงานอุปกรณ์ไมโคร อิเลคทรอนิกส์ เช่น ใช้เป็นชั้นฉนวนแทนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในอุปกรณ์ metal-oxide-semiconductor หรือ (MOS) ⁽³⁶⁾ รวมทั้งใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (harddisk) และจากการที่อลูมิเนียมออกไซด์ยังเป็นสารไดอิเล็กทริกที่มีลักษณะที่ใส มีการส่งผ่านของแสงที่ดีตลอดช่วง visible light ทำให้ถูกนำไปใช้งานทางด้านแสงด้วยเช่นกัน เช่น ใช้เคลือบเพื่อปกป้องผิวกระจกหรือใช้เคลือบเป็นฟิล์มป้องกันสำหรับชั้นโลหะสะท้อนแสงในกระจกมืด (dark mirror)

โดยทั่วไปการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์สามารถเคลือบได้หลากหลายวิธีทั้งแบบ chemical vapor deposition (CVD) หรือแบบ physical vapor deposition (PVD) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน สเปตเตอริง (reactive dc magnetron sputtering) เป็นวิธีหนึ่งทาง PVD ที่มีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน มีการยึดติดของฟิล์มที่ดี อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเคลือบของชิ้นงานมีค่าไม่สูงมาก ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหายหรือเปลี่ยนรูปไปเนื่องจากผลของอุณหภูมิของชิ้นงานที่เกิดจากระบวนการเคลือบมีค่าสูงเกินไป ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่ใช้เคลือบมีความหลากหลายมากขึ้น เช่น สามารถเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์เพื่อเคลือบป้องกันผิวลงบนวัสดุประเภทพลาสติก หรือพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมบรรจุหีบห่อได้ ^(37,38) รวมทั้งไม่มีการใช้สารเคมีในการเคลือบซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดของเสียที่ตกค้างทางเคมี ที่จะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธี ดี.ซี. รีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอริง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม เพื่อที่จะได้ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสม เช่น ใส ไม่นำไฟฟ้า สำหรับที่จะสามารถนำไปใช้งาน

จริงต่อไปในอนาคต เช่นใช้เคลือบบนผิววัสดุ เช่น เครื่องประดับ เพื่อปกป้องผิววัสดุจากการใช้งานและจากการทำปฏิกิริยาเคมีกับสภาวะแวดล้อมทั่วไป เช่น น้ำหรืออากาศ ซึ่งจะทำให้เครื่องประดับมีสีที่หม่นลงไป เป็นต้น

2.17 สถานภาพการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์

Roth , Broszeit และ Kloops⁽³⁹⁾ ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บน cast iron ด้วยวิธี อาร์เอฟสปัตเตอริง พบว่าการใช้ก๊าซออกซิเจนเพิ่มเข้าไปในกระบวนการ sputter cleaning รวมทั้งเพิ่มระยะเวลาในการ sputter cleaning จะมีอัตราการการสึกหรอที่น้อยกว่าการ sputter cleaning ที่ใช้ก๊าซอาร์กอนเพียงอย่างเดียว ส่วนการลดความดันที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม จะช่วยปรับปรุงให้การสึกหรอของฟิล์มมีค่าที่ดีขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการที่ฟิล์มมีการยึดเกาะ (adhesion) ที่ดีขึ้นเนื่องจาก compressive residual stress ที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม

Chou , Adamson ,Mardinly ,และ Nieg⁽⁴⁰⁾ ได้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธี อาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้ผลวิเคราะห์ที่จากวิธี grazing angle X-ray diffraction ,nanoidentation และ transmission electron microscopy โดยฟิล์มบางที่ได้จะประกอบด้วย amorphous $\text{-Al}_2\text{O}_3$ และเฟส $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ มีค่า elastic modulus ประมาณ 150 GPa และความแข็งอยู่ระหว่าง 8.5-10 Gpa ผลการแอนนิล (anneal) ฟิล์มที่อุณหภูมิระหว่าง 800 – 1200°C ทำให้เกิดผลึกของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ขึ้น ใน amorphous- Al_2O_3 โดยจะเกิดบนระนาบ {400} และ {440} ของเฟส $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ โดยมีทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศที่ชอบ (preferred orientation) เป็น [001] และมีการเปลี่ยนแปลงเฟส จาก γ เป็น α เกิดขึ้น โดยจะขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการแอนนิลฟิล์ม การแอนนิลที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะพบว่าเกรนของเฟส $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ จะโตขึ้น มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 50 nm และเกิดการโตของเกรน $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ขึ้น โดยมีทิศทางการจัดเรียงตัวในทิศ [0001] และมีขนาดเกรนในช่วง 3-15 ไมครอน อยู่ใน matrix ของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งเป็น polycrystalline ที่มีขนาดเกรนที่ละเอียด โดยโครงสร้างจุลภาคของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ มีลักษณะกลมและเป็นชั้น ๆ และจะตั้งฉากซึ่งกันและกันและจะเรียงตัวในระนาบ {220} ของ γ -phase การเกิด nucleation ของ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ จะเกิดบนระนาบ {220} ของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ เพราะจะทำให้เกิด defect structure บนระนาบได้ง่ายในระหว่างการโตของ layer structure

Lynne M.และSubhash .H⁽⁴¹⁾ ได้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ลงบน ferrite, glass และ graphite ที่มีการปนเปื้อนของไอน้ำ (water vapor) หรือก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้น ในภาชนะสุญญากาศ(chamber) ในระหว่างการเคลือบฟิล์มบาง ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง ทำให้อัตราการเคลือบของฟิล์มลดลงและเกิดผลึกของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ เฟสเกิดขึ้น ซึ่งจะหนต่อการกัดกร่อนในสารละลาย H_3PO_4 ได้ดีกว่าฟิล์มที่เป็น amorphous- Al_2O_3 โดยผลจากการที่ก๊าซ

ออกซิเจนถูกดูดกลืนที่ผิวของเป่าเคลือบทำให้อัตราการเคลือบของฟิล์มลดลงเป็นผลให้เกิดการฟอร์มตัวของผลึก $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่บริเวณรอยต่อ (interface) ของฟิล์มและวัสดุรองรับ ซึ่งลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของเกรน (grain orientation) ของวัสดุรองรับจะมีผลต่อการโตของผลึก $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่บริเวณรอยต่อดังกล่าวด้วยเช่นกัน

Stauder ,Perry และ Frantz ⁽⁴²⁾ ได้ศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ที่สัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนในฟิล์มที่ความดันย่อยของก๊าซอาร์กอนมีค่าสูง(0.92 Pa) โดยพบว่าในช่วง 0-28 at %O ฟิล์มจะมีโครงสร้างเป็น metastable supersaturated f.c.c solid solution ($\alpha\text{-Al}$) และฟิล์มจะมีโครงสร้างเป็น amorphous เฟส ($\text{a-Al}_2\text{O}_{3-x}$) ตลอดช่วง 50-60 at %O โดยที่ค่า at %O ในระหว่างช่วงทั้งสอง จะมีโครงสร้างผสมกันระหว่าง ($\alpha\text{-Al}$) และ ($\text{a-Al}_2\text{O}_{3-x}$) นอกจากนี้การใช้พัลส์ไฟฟ้าที่มีความถี่ขนาดกลาง (medium frequency) เช่น 50 kHz จะช่วยลดการเกิด microarc ลงทำให้ลดจำนวนของ grow defect ที่ตกลงไปยังฟิล์มได้และในการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำ การใช้พัลส์ไฟฟ้าความถี่ต่ำจะช่วยให้กระบวนการเคลือบมีความเสถียรขึ้นทำให้สามารถควบคุมกระบวนการรีแอ็คทีฟสปีดเตอริงได้ ซึ่งจะลดผลกระทบของ hysteresis effect ที่เกิดขึ้น เมื่อความดันรวมหรือ pumping speed มีค่าลดลง

Schneider, Sproul , Chia , และ Matthews ⁽⁴³⁾ ได้พัฒนากระบวนการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ในด้าน hard coating ที่อุณหภูมิของวัสดุรองรับขึ้นงานมีค่าไม่เกิน 250°C เพื่อให้ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่มีค่าสูง โดยใช้ระบบเคลือบแบบดีซีพัลส์ และใช้การควบคุมแรงดันย่อยของก๊าซออกซิเจนที่มีความเที่ยงตรงสูง ทำให้ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่มีค่าสูงเป็น 76% ของอัตราการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียม โดยฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเป็น transparent alumina, fully dense, ค่าความแข็งของฟิล์มประมาณ 15 GPa และมีองค์ประกอบของฟิล์มที่ใกล้เคียงกับ stoichiometric Al_2O_3

Eva Fredriksson และ Jan-Otto Carlsson ⁽⁴⁴⁾ ได้เตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์บน silica ด้วยเทคนิค CVD จากกระบวนการ ใช้ $\text{AlCl}_3/\text{CO}_2/\text{H}_2$ ที่อุณหภูมิ 950-1080 °C ซึ่ง $\text{K-Al}_2\text{O}_3$ จะโตขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นและทิศทางการโตจะเปลี่ยนแปลงระหว่างทำ CVD จนเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งอัตราการเปลี่ยนเฟสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากการศึกษาผลของสิ่งปนเปื้อนด้วยเทคนิค XRD และการ วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว (morphology) ของชั้นอลูมิเนียมออกไซด์แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ $\text{AlCl}_3/\text{CO}_2/\text{H}_2$ จะไวต่อสิ่งปนเปื้อน ซึ่งการมีสิ่งปนเปื้อนและอัตราการรั่วของอากาศในระบบ CVD จะมีผลต่อปริมาณเฟส K/α และโครงสร้างพื้นผิว

บทที่ 3

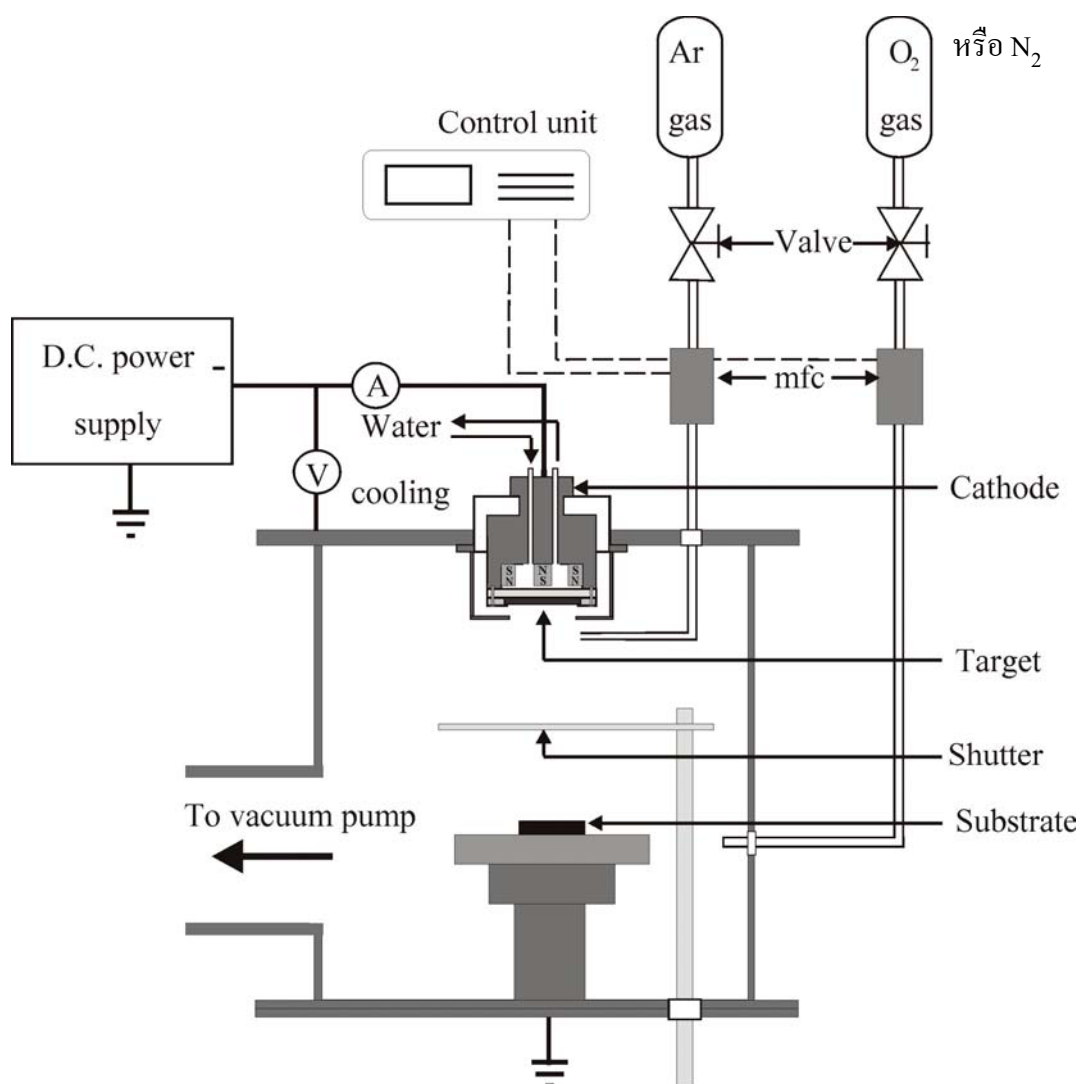
การออกแบบสร้างเครื่องสปีดเตอริง

เนื่องจากในโครงการวิจัยนี้ เน้นการพัฒนาเครื่องสปีดเตอริงขนาดอุตสาหกรรม ซึ่งมีขนาดใหญ่และใช้เวลาประมาณ 3 ปี ดังนั้นในช่วงเวลาเดียวกันกับการพัฒนาเครื่องสปีดเตอริงขนาดอุตสาหกรรม ทางคณะผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการสำหรับทดลองเคลือบ เพื่อศึกษาทางด้านการเคลือบ และวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ ฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ และ ฟิล์มทอง พร้อมกัน ดังนั้นในบทที่ 3 นี้ จะเป็นรายละเอียดของเครื่องสปีดเตอริงขนาดเล็กสำหรับงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ

3.1 รายละเอียดของเครื่องสปีดเตอริงสำหรับงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ

เครื่องสปีดเตอริงที่สร้างเป็นระบบเคลือบแบบดีซีอันทาลานซ์แมกนีตรอนสปีดเตอริง ดังแสดงโดยไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 6 ส่วน คือ

- (1) ระบบเครื่องสูบลูสุญญากาศ
- (2) ภาชนะสุญญากาศ
- (3) คาโทดและเป้าสารเคลือบ
- (4) ระบบน้ำหล่อเย็น
- (5) ระบบจ่ายไฟฟ้า
- (6) ระบบป้อนแก๊ส



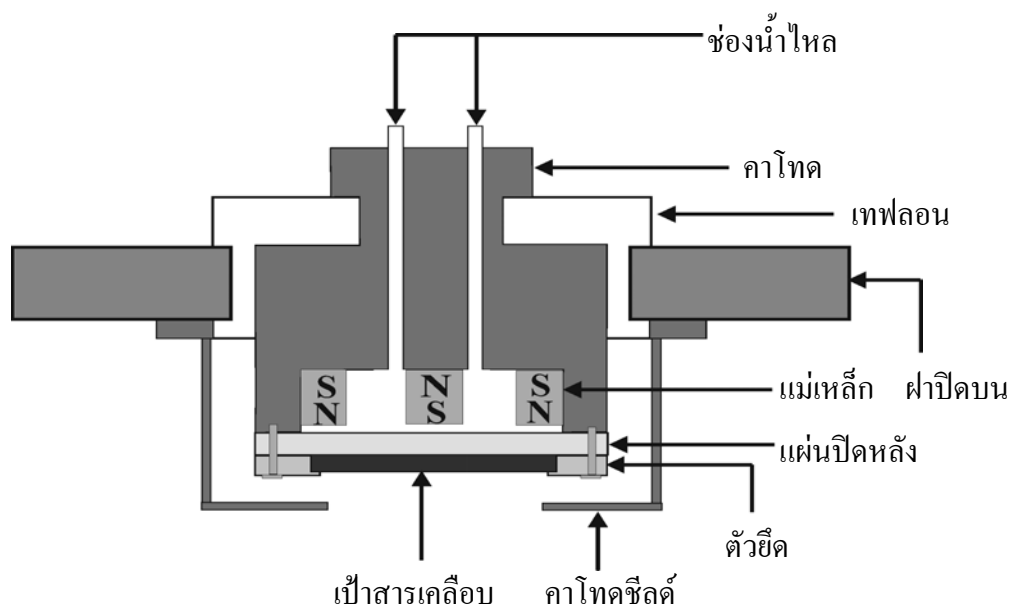
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมระบบเคลือบแบบ D.C. reactive magnetron sputtering

โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) **ระบบเครื่องสูบลูญากาศ** ทำหน้าที่สูบลูญากาศออกจากภาชนะลูญากาศ ประกอบด้วย rotary pump ของบริษัท Edwards รุ่น E2M8 (2 state) และ diffusion pump ของบริษัท Balzers รุ่น Oil Diffusion Pump DIF 063 L โดย rotary pump สามารถสูบลูญากาศ ออกจากภาชนะลูญากาศ จากความดันบรรยากาศจนถึง 10^{-2} mbar และ diffusion pump จะใช้ทำความดันจาก 10^{-2} mbar ไปจนถึง 10^{-6} mbar ในส่วนระบบวัดความดัน ประกอบด้วย หัววัดแบบพิรานีคือ รุ่น TPR010 เพื่อใช้วัดความดันในช่วงความดันบรรยากาศถึง 10^{-2} mbar หัววัดแบบเพนนิ่งคือ รุ่น IKR050 เพื่อใช้วัดความดันในช่วง 10^{-2} - 10^{-7} mbar และใช้หน่วย ควบคุมและแสดงผลรุ่น TPG300 ซึ่งเป็นของ บริษัท Balzers ทั้งหมด

(2) **ภาชนะสุญญากาศ** สำหรับเคลือบฟิล์มบางทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 23.0 cm สูง 22.0 cm ฝาปิดบนของภาชนะสุญญากาศมีช่องสำหรับใส่คาโทดและช่องป้อนแก๊ส ด้านข้างภาชนะสุญญากาศมีหน้าแปลน สำหรับใส่หัววัดแบบเพนนิ่งและแบบพิวานี ส่วนช่องเปิดสู่ระบบสุญญากาศอยู่ด้านข้างโดยต่อกับเครื่องสูบบแบบเพร้อกลาง แผ่นฐานภาชนะสุญญากาศได้ติดตั้งแท่นวางชิ้นงานเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 cm ซึ่งปรับระยะได้ตั้งแต่ 4.0-15.0 cm

(3) **คาโทดและเป้าสารเคลือบ** ของระบบที่ใช้ในการทดลองมี 2 ขนาด คือคาโทดที่ใช้สำหรับเป้าขนาด 2 นิ้ว และ ขนาด 3 นิ้ว โดยโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ยกเว้นเทฟลอนซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและแผ่นปิดหลัง (backing plate) คาโทดซึ่งทำจากทองแดง โดยตัวคาโทดมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีคาโทดชีลด์ (cathode shield) ครอบไว้อีกชั้นหนึ่งเพื่อให้การสปัตเตอร์เกิดบริเวณเป้าสารเคลือบเท่านั้น ส่วนบนของคาโทดมีทางน้ำไหลผ่านเข้า-ออกเพื่อใช้หล่อเย็นตัว คาโทดและเป้าสารเคลือบและมีแผ่นปิดหลังติดอยู่ด้านหลังของเป้าสารเคลือบ (ด้านหน้าแม่เหล็ก) เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็น การยึดส่วนต่าง ๆ (แผ่นปิดหลัง ตัวคาโทด เป้าสารเคลือบ) ใช้ตัวยึดที่มีลักษณะเป็นวงแหวนยึดกับสกรูที่ร้อยผ่านแผ่นปิดหลังแม่เหล็ก ไปยังตัวคาโทด ส่วนเทฟลอนจะใช้กั้นระหว่างคาโทดและผนังโลหะของภาชนะสุญญากาศเพื่อแยกข้อไฟฟ้าออกจากกัน ในส่วนของตัวแม่เหล็กจะใช้ชนิด NdFeB โดยวางแม่เหล็กที่แกนกลางและรอบนอกของคาโทด มีลักษณะเป็นวงแหวนเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้มีลักษณะไม่สมมาตร (unbalance) ขึ้น รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะภายในของคาโทดของระบบเคลือบ



รูปที่ 3.2 ลักษณะภายในของคาโทดของระบบเคลือบ

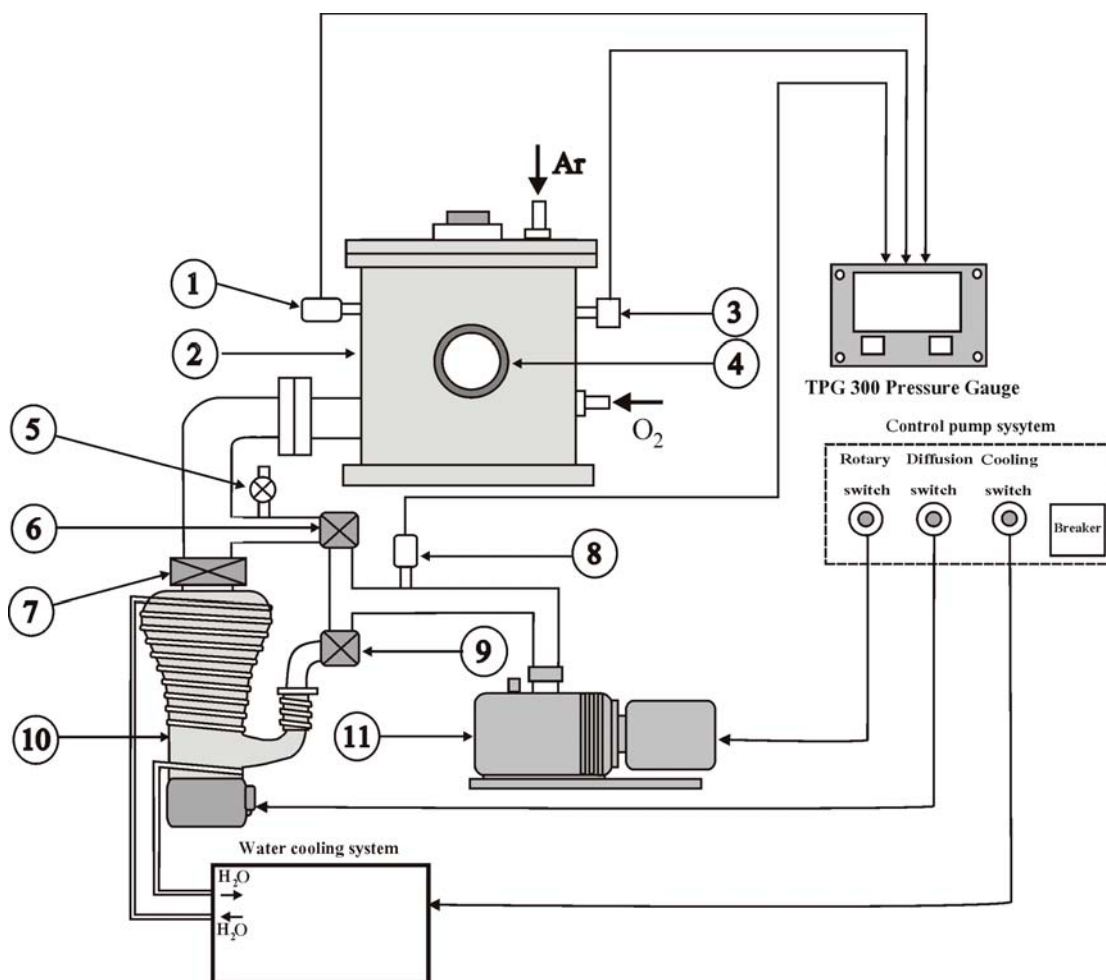
(4) **ระบบน้ำหล่อเย็น** ใช้สำหรับการหล่อเย็นคาโทด เป้าสารเคลือบ และส่วนบนของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องทำความเย็นและถังน้ำขนาด $6,300 \text{ cm}^3$ คอมเพรสเซอร์เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ส่วนการไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นจะใช้กำลังจากเครื่องสูบน้ำขนาด 125 W

(5) **ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า** จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงแบบพูลเวฟ สามารถปรับความต่างศักย์ได้ 0-700 V กระแสไฟฟ้า 0-2 A ใช้ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ตัวคาโทด เพื่อทำให้เกิดการโกลดิสซาร์จขึ้น

(6) **ระบบป้อนแก๊ส** ประกอบด้วยวาล์ว 2 ทาง ของ nupro รุ่น SS-DSV51 ทำหน้าที่เปิด-ปิดการป้อนแก๊สเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ และ mass flow controller รุ่น mks 2179 ที่ควบคุมการทำงานโดยผ่านตัว control unit ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณของแก๊สที่ปล่อยเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนที่เข้าสู่ระบบจะถูกป้อนจากถังแก๊สผ่านวาล์ว 2 ทางไปยัง mass flow controller ก่อนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ซึ่งแก๊สทั้งสองชนิดจะไหลผ่านท่อที่แยกออกจากกัน แก๊สอาร์กอนจะไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศบริเวณคาโทดซีลด์ (เป็นการปล่อยแก๊สใต้คาโทดซีลด์) ทำให้แก๊สอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบฟุ้งกระจายอยู่บริเวณด้านหน้าของเป้าสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอทำให้เกิดกระบวนการสเปกโตรริงที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบอย่างทั่วถึง ส่วนแก๊สออกซิเจนจะไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศบริเวณแท่นรองชิ้นงาน เพื่อที่สามารถทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบที่ตกไปยังชิ้นงานที่ได้ดียิ่งขึ้น

3.2 การทดลองระบบสุญญากาศ

ก่อนการเคลือบฟิล์มในภาชนะสุญญากาศด้วยวิธีสเปกโตรริง จำเป็นต้องทำความดันในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศที่ระดับ high vacuum (10^{-3} – 10^{-7} mbar) เพื่อที่จะลดการปนเปื้อนของฟิล์มที่เคลือบได้เนื่องจากการคงอยู่ของแก๊สในภาชนะสุญญากาศ (residual gas) โดยในการสร้างสภาวะสุญญากาศจะใช้ระบบปั๊มสุญญากาศ ที่ประกอบด้วย rotary pump และ diffusion pump ที่ต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศด้วยท่อและมีวาล์วควบคุมการปิด-เปิด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยในตอนต้นจะใช้ rotary pump เพื่อลดความดันในภาชนะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศเป็นความดันต่ำประมาณ 10^{-2} mbar ซึ่งสามารถอ่านค่าความดันที่ได้จากหัววัดแบบพิราณี ต่อมาจะใช้ diffusion pump เพื่อลดความดันในภาชนะสุญญากาศจาก 10^{-2} mbar ให้ลดลงอยู่ในช่วงความดัน 10^{-5} – 10^{-7} mbar โดยสามารถอ่านค่าความดันที่ได้จากหัววัดแบบเพนนิง



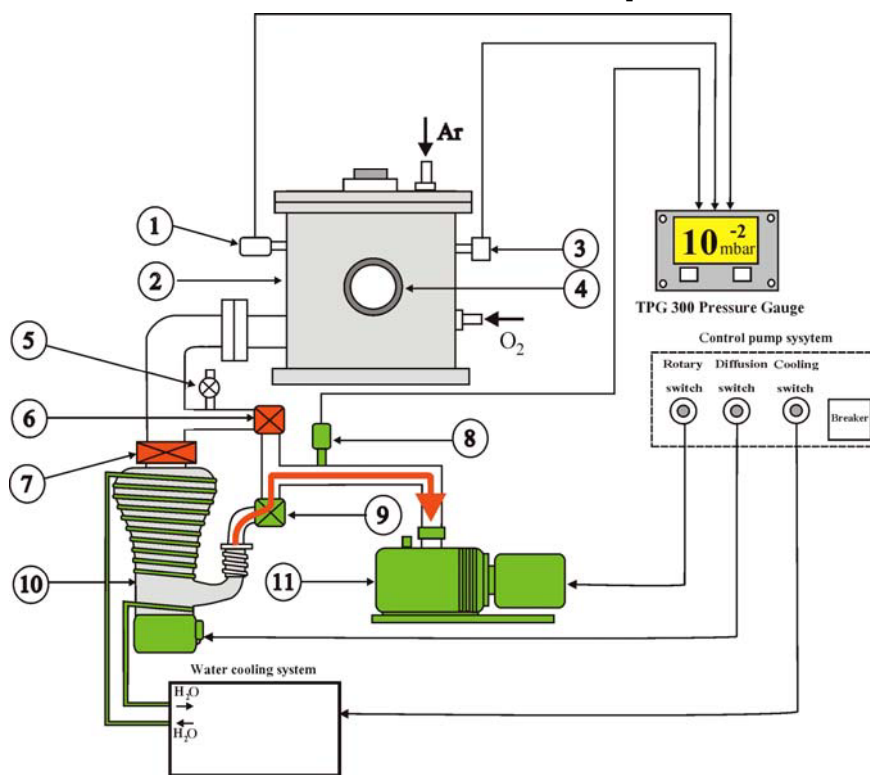
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมระบบปั๊มสุญญากาศ ของระบบเคลือบสเป็คเตอรีย

- | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 1. pirani gauge | 4. window | 7. plate valve | 10. diffusion pump |
| 2. vacuum chamber | 5. vent valve | 8. pirani gauge | 11. rotary pump |
| 3. penning gauge | 6. roughing valve | 9. backing valve | |

สำหรับขั้นตอนการสร้างภาวะสุญญากาศมีดังนี้

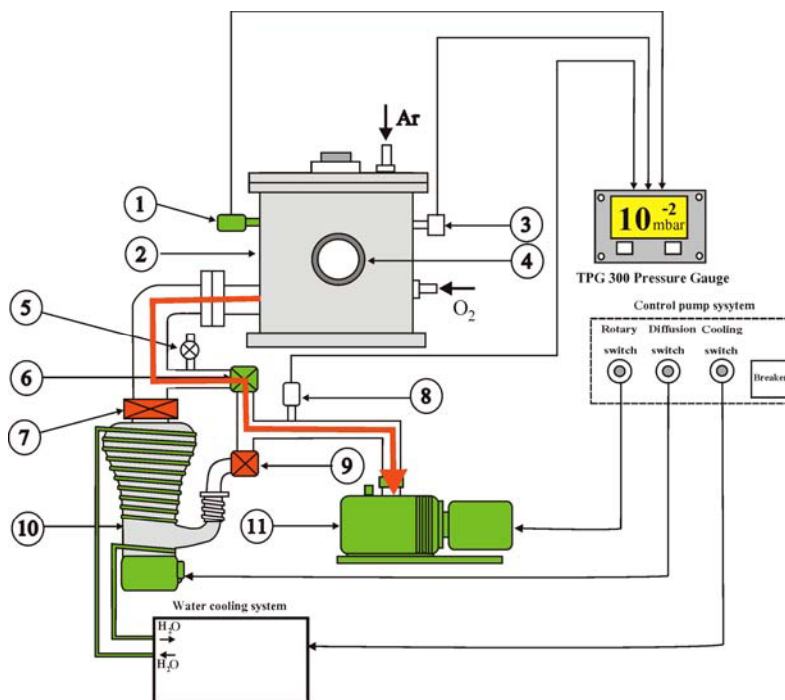
1. ตรวจเช็ค roughing valve (หมายเลข6), backing valve (หมายเลข9) และ plate valve (หมายเลข) ให้อยู่ในสภาพปิดทั้งหมด
2. เปิดสวิตช์ main breaker เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องสเป็คเตอรีย เช่น ระบบวัดความดันและระบบควบคุมการทำงานของระบบปั๊มสุญญากาศ เป็นต้น หลังจากนั้นเปิดสวิตช์ rotary เพื่อให้ rotary pump (หมายเลข 11) ให้ทำงาน
3. ทำการปั๊มอากาศออกจาก diffusion pump โดยใช้ rotary pump โดยเปิด backing valve เพื่อให้ rotary pump ปั๊มอากาศออกจาก diffusion pump (หมายเลข 10) จนความดัน diffusion pump เมื่ออ่านจาก pirani gauge (หมายเลข 8) มีค่าน้อย

กว่า 10^{-2} mbar ซึ่งเป็นความดันที่ diffusion pump สามารถทำงานได้ พร้อมทั้งเปิดสวิตช์ diffusion เพื่อให้ heater ของ diffusion pump ทำงานเพื่อเริ่มกระบวนการต้มน้ำมัน ใช้ประมาณ 20 นาที โดยรายละเอียดแสดงในรูปที่ 3.4



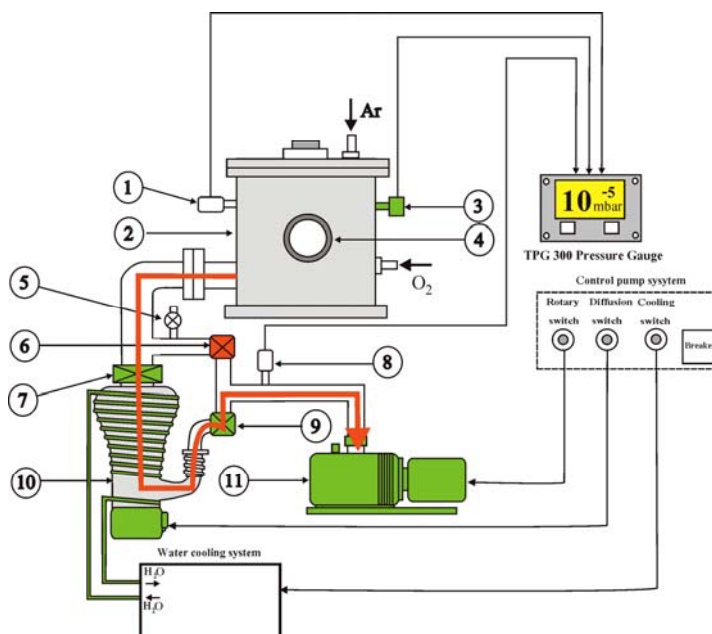
รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมการปั๊มอากาศออกจาก diffusion pump โดยใช้ rotary pump

4. ในระหว่างการต้มน้ำมัน นำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบไปวางในภาชนะสุญญากาศ โดยก่อนวางชิ้นงานต้องตรวจความดันในภาชนะสุญญากาศ ยังคงอยู่ในสภาวะเป็นสุญญากาศหรือไม่ ถ้ายังเป็นสุญญากาศ ก็ทำการเปิด vent valve เพื่อให้อากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ จนความดันในภาชนะสุญญากาศเท่ากับความดันบรรยากาศ หลังจากนั้นทำการเปิดฝาครอบภาชนะสุญญากาศออก นำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบไปวาง ปิดฝาครอบและปิด vent valve ให้สนิท
5. ทำการสร้างสภาวะสุญญากาศขั้นต้นในภาชนะสุญญากาศโดยใช้ rotary pump โดยการปิด backing valve แล้วเปิด roughing valve เพื่อให้ rotary pump ปั๊มอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ จนความดันในภาชนะสุญญากาศที่อ่านจาก pirani gauge (หมายเลข 1) มีค่าประมาณ 10^{-2} mbar ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมการสร้างสภาวะสุญญากาศขั้นต้นในภาชนะสุญญากาศ

- เมื่อเติมน้ำมันจนครบ 20 นาที ทำการสร้างสภาวะสุญญากาศสูง (high vacuum) ในภาชนะสุญญากาศ โดยใช้ diffusion pump โดยทำการปิด roughing valve แล้วเปิด backing valve หลังจากนั้นทำการเปิด plate valve เพื่อให้ diffusion pump สูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่อทำความดันในภาชนะสุญญากาศให้อยู่ในระดับ high vacuum หรืออยู่ในช่วง 10^{-5} - 10^{-6} mbar ตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมการสร้างสภาวะ high vacuum ในภาชนะสุญญากาศ

เปิดสวิตช์ cooling diffusion เพื่อให้ น้ำจากระบบหล่อเย็น (water cooling system) ไประบายความร้อนที่บริเวณผิวของ diffusion pump จับเวลาและรอจนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 5×10^{-5} mbar ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความดันต่ำสุด (base pressure) ก่อนเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์

3.3 การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

3.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

(1) เป้าสารเคลือบ (target) เป็นเป้าอลูมิเนียม มีลักษณะเป็นแผ่นกลมมี 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว มีความบริสุทธิ์ 99.99% จาก บริษัท K.J. Lasker ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป้าอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว มีความบริสุทธิ์ 99.97% จาก บริษัท บางกอกเอสเซ จำกัด กรุงเทพฯ

(2) วัสดุรองรับ (substrate) ที่ใช้มี 2 ชนิดคือ แผ่นแก้ว มีลักษณะใส ผิวเรียบมัน และแผ่นสเตนเลสสตีล เบอร์ 304 โดยแผ่นแก้วจะใช้เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มที่เคลือบได้ ส่วนสเตนเลสสตีล เบอร์ 304 จะใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ต่อไป

(3) แก๊สที่ใช้ประกอบด้วยแก๊ส 2 ชนิด คือแก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์ (99.999 %) และแก๊สออกซิเจนความบริสุทธิ์ (99.99 %) จากบริษัท ที ไอ จี จำกัด โดยแก๊สอาร์กอนจะใช้เป็นแก๊สสปัตเตอร์ (sputter gas) ส่วนแก๊สออกซิเจนใช้เป็นแก๊สไวปฏิกิริยา (reactive gas)

3.3.2 วิธีการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์

การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ในภาชนะสุญญากาศด้วยวิธี D.C. reactive magnetron sputtering ของงานวิจัยนี้ จะมีลักษณะตามรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดพอสรุปได้ดังนี้ แหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงถูกติดตั้งเข้ากับระบบเคลือบโดยต่อศักย์ไฟฟ้าลบเข้ากับขั้วคาโทดและต่อศักย์ไฟฟ้าบวก (หรือ ground) กับภาชนะสุญญากาศ เป้าอลูมิเนียมจะถูกติดตั้งกับขั้วคาโทด โดยด้านบนของคาโทดจะต่อกับระบบไหลเวียนน้ำเย็นเพื่อใช้ระบายความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณคาโทดจากการ สปัตเตอร์ของไอออนอาร์กอนที่บริเวณผิวหน้าเป้า ส่วนชิ้นงานถูกวางบนแผ่นรองรับที่ติดตั้งบนแท่นวางที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ โดยตัวแผ่นรองรับจะมีขั้วแยกจากกราวด์ ซึ่งสามารถต่อกับแหล่งจ่ายไฟเพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัส (bias voltage) แก่ชิ้นงานได้ ตัวชัตเตอร์ (shutter) ใช้สำหรับกั้นระหว่างชิ้นงานกับเป้าสารเคลือบ เพื่อป้องกันการเคลือบผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการทำความสะอาดหน้าเป้า (presputtering) ส่วนอุปกรณ์ control unit ที่เชื่อมต่อกับของ mass flow controller (mfc) ใช้บังคับการทำงานของ

mass flow controller เพื่อควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนที่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยค่าอัตราการไหลของแก๊สจะมีหน่วย เป็น cubic centimeter per minute at STP (sccm)

สำหรับขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์มีรายละเอียดดังนี้

1. นำชิ้นงาน คือ แผ่นแก้ว และแผ่นสแตนเลส 304 วางไว้บนแผ่นรองชิ้นงาน เพื่อใช้เป็นชิ้นงานเคลือบ โดยมีระยะห่างจากเป้าสารเคลือบเป็น 11 เซนติเมตร ปิดชุดเตอร์หน้าเป้าอลูมิเนียม เพื่อป้องกันการเคลือบแล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศให้สนิท
2. สร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2 จนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 5×10^{-5} mbar ซึ่งจะใช้เป็นค่าความดัน Base pressure (Bp) ของระบบก่อนที่จะทำการเคลือบฟิล์ม บันทึกค่าความดัน Bp ที่วัดได้
3. กำหนดค่าอัตราการไหลก๊าซอาร์กอนและแก๊สออกซิเจนที่ปล่อยเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศเพื่อใช้ในกระบวนการเคลือบ โดยป้อนค่าผ่านตัว control unit
4. ทำการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ ตามค่าที่กำหนดไว้
5. เปิดน้ำหล่อเย็นให้ไหลเวียนเพื่อระบายความร้อนแก่ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องเคลือบ ได้แก่ คาโทด เป้าสารเคลือบและเพลทวาล์ว
6. ป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้แก่คาโทด จนกระทั่งเกิดกระบวนการไอออไนซ์ขึ้นในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน โดยชุดเตอร์ยังคงปิดกั้นระหว่างคาโทดกับชิ้นงาน เพื่อให้ตรวจสอบปรอทที่เกาะหน้าเป้าหลุดออกไปเนื่องจากการสับเตอรืของไอออนแก๊สอาร์กอนบริเวณผิวหน้าของเป้าอลูมิเนียม โดยไม่มีการเคลือบเกิดขึ้นบนชิ้นงาน ซึ่งเป็นการทำความสะอาดผิวหน้าเป้าก่อนการเคลือบ (presputtering) ใช้เวลาประมาณ 3 นาที บันทึกผลค่า (V_{pre}) และ (I_{pre}) ที่เกิดขึ้นจากโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ที่ติดตั้งอยู่กับระบบเคลือบ
7. เริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ โดยทำการปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศตามค่าที่กำหนดไว้ หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ระบบประมาณ 30 วินาที ทำการเปิดชุดเตอร์ที่ปิดหน้าเป้าอลูมิเนียมออก เพื่อเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มลงบนชิ้นงาน พร้อมทั้งบันทึกผลค่าต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ค่ากระแสไฟฟ้า(I) และความดัน P_{coat} ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเคลือบฟิล์ม
8. ทำการเคลือบฟิล์ม ตามเวลา (t) ที่กำหนด

9. หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์ม ปิดชุดเตอร์ ปิดแหล่งจ่ายไฟ ปิดระบบน้ำหล่อเย็น และปิดแก๊สอาร์กอนและออกซิเจน เปิดอากาศเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ แล้วจึงนำชิ้นงานออกมา

3.4 ผลการทดลอง เมื่อใช้เป้าอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว

จากการทดลอง เมื่อทำการเคลือบฟิล์มโดยให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Ar_{flow}) มีค่าตั้งแต่ 1 - 3 sccm พบว่าไม่เกิดกระบวนการไกลวดีสซาร์จในภาชนะสุญญากาศได้โดยการไกลวดีสซาร์จจะเกิดขึ้น เมื่อให้ Ar_{flow} เป็น 4.0 sccm ซึ่งเป็นผลจากความดันแก๊สอาร์กอนในระบบภาชนะสุญญากาศมีค่าไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดกระบวนการไกลวดีสซาร์จได้ ดังนั้นในการทดลองที่ 1 จึงกำหนดให้ Ar_{flow} ที่ใช้มีค่าน้อยเป็น 4.0 sccm

ในการทดลองที่ 1 เป็นการเคลือบฟิล์มลงบนแผ่นแก้วและสแตนเลสเบอร์ 304 ที่อัตราการไหลแก๊สออกซิเจน (O_{2flow}) ที่ใช้มีค่าต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1.0-2.5 sccm โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Ar_{flow}) ที่ใช้มีค่าคงที่ 2 ค่า คือ 4.0 และ 5.0 sccm ตามลำดับ โดยชิ้นงานที่เป็นแก้ว จะนำไปศึกษาลักษณะความใสของฟิล์ม ส่วนสแตนเลสเบอร์ 304 จะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเครื่อง XRD ซึ่งข้อมูลผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 3.1 - 3.2

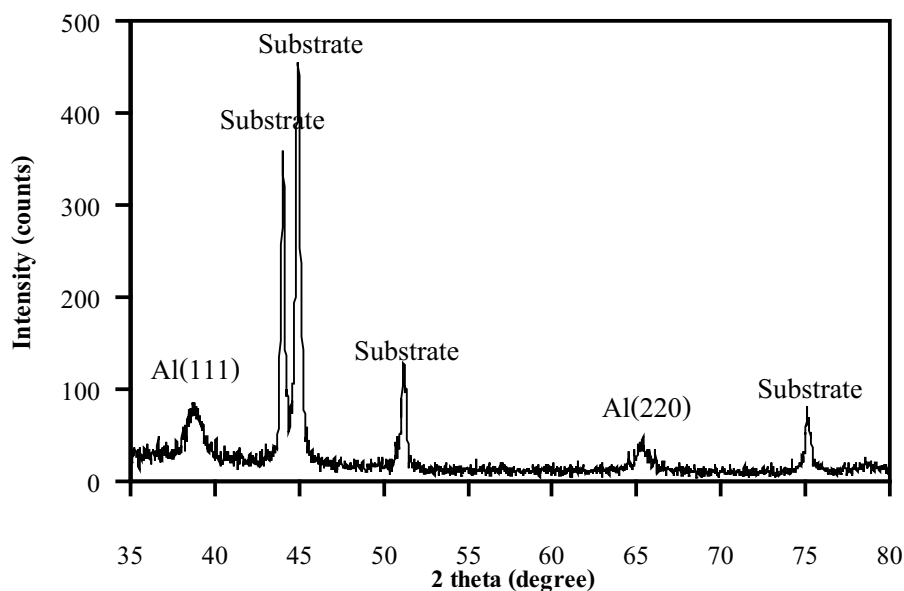
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลการเคลือบเมื่อให้ Ar_{flow} มีค่าเป็น 4.0 sccm และให้ O_{2flow} มีค่าต่าง ๆ กัน
($P_b = 5.0 \times 10^{-5}$ mbar , $V_{pre} = 500$ V , $I_{pre} = 250$ mA)

Sample No.	O_{2flow} (sccm)	P_{coat} (10^{-3} mbar)	V (V)	I (mA)	t (min)	ผลการวิเคราะห์ฟิล์ม	
						สีฟิล์มบนแก้ว	ผลการวัด XRD ของฟิล์มบนสแตนเลสเบอร์ 304
1	1.0	2.9	497	300	10	สีเงินคล้ำ	พบโครงสร้างผลึก Al
2	1.5	3.5	490	350	10	สีดำคล้ำ	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
3	2.0	3.2	468	450	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
4	2.5	3.6	290	1100	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3

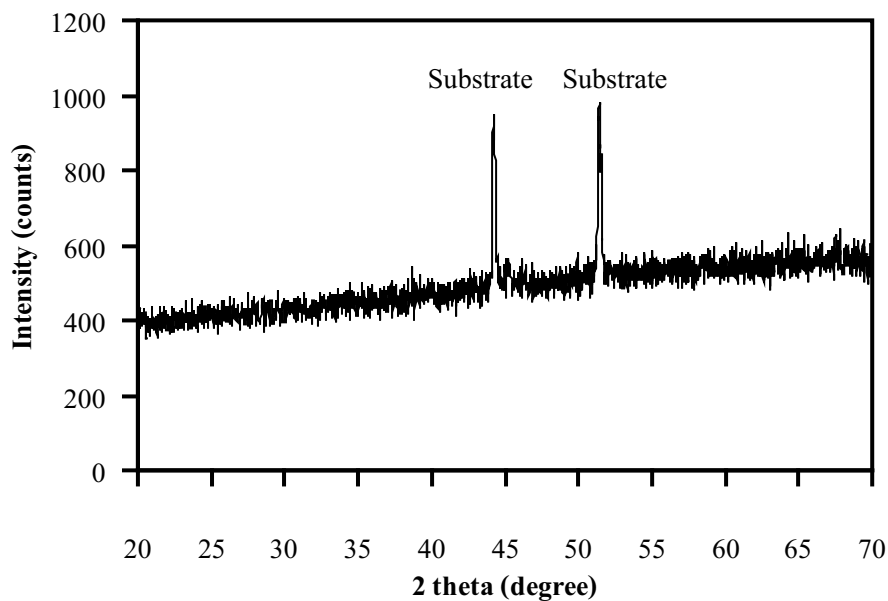
จากผลการทดลองในตารางที่ 3.1 พบว่า เมื่อ O_2 flow มีค่าเพิ่มขึ้น V ที่วัดได้มีค่าที่ลดลง ในขณะที่ I จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยค่า V และ I จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อ O_2 flow เป็น 2.5 sccm โดย V มีค่าประมาณ 290 โวลต์ และค่า I มีค่าประมาณ 1.1 แอมแปร์ ซึ่งเป็นผลจากการที่แก๊สรีแอคทีฟหรือ แก๊ส ออกซิเจนไปทำปฏิกิริยากับเป้าสารเคลือบเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์บริเวณหน้าเป้าหรือ target poisoning ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มเนื่องจากอัตราการเคลือบ (deposition rate) ของฟิล์มมีค่าที่ต่ำมาก

ในส่วนการสังเกตสีของฟิล์มที่เคลือบบนแก้วด้วยสายตา พบว่าสีของฟิล์มเปลี่ยนไปตาม O_2 flow ที่ใช้ โดยฟิล์มมีสีเงินคล้ำที่ O_2 flow 1.0 sccm เป็นสีดำที่ O_2 flow 1.5 sccm ส่วนที่ O_2 flow 2.0 และ 2.5 sccm ฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะที่ใส

ส่วนผลการวัด XRD ของฟิล์มที่เคลือบบนสแตนเลสเบอร์ 304 พบว่าในกรณีที่ O_2 flow ที่ใช้มีค่าต่ำ คือตัวอย่างฟิล์มเคลือบที่ 1 (O_2 flow 1.0 sccm) ผลการวัดในรูปที่ 3.7 พบโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียม คือ Al(111) และ Al (220) แต่ไม่พบโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียมออกไซด์ขึ้น ส่วนในกรณีที่ O_2 flow มีค่าเหมาะสมที่คาดว่าจะเคลือบแล้วได้ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ โดยพิจารณาจากชิ้นงานที่เคลือบบนแก้วแล้ว จะมีลักษณะที่ใส ไม่มีสี นั่นคือตัวอย่างฟิล์มเคลือบที่ 3 (O_2 flow 2.0 sccm) ซึ่งผลการวัดในรูปที่ 3.8 ไม่พบโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ตัวอย่างฟิล์มดังกล่าว



รูปที่ 3.7 XRD pattern บนสแตนเลสเบอร์ 304 ที่เงื่อนไข Ar_{flow} 4.0 sccm และ O_2 flow 1.0 sccm



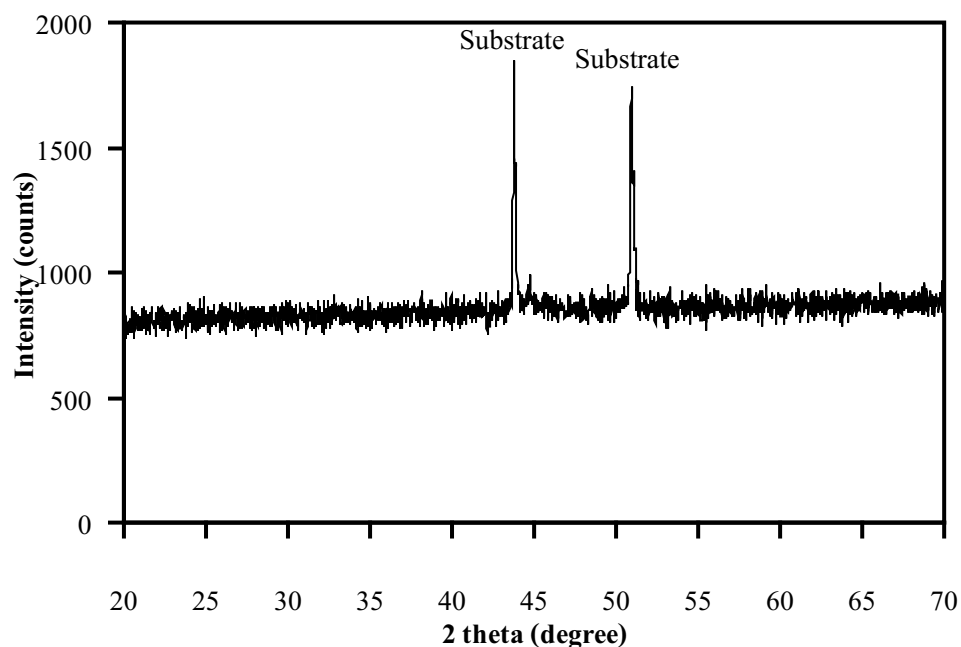
รูปที่ 3.8 XRD pattern บนสแตนเลสเบอร์ 304 ที่เงื่อนไข Ar_{flow} 4.0 sccm และ $O_{2 flow}$ 2.0 sccm

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการเคลือบเมื่อให้ Ar_{flow} มีค่าเป็น 5.0 sccm และให้ $O_{2 flow}$ มีค่าต่าง ๆ กัน ($Bp = 5.0 \times 10^{-5}$ mbar , $V_{pre} = 480$ V , $I_{pre} = 250$ mA)

Sample No.	$O_{2 flow}$ (sccm)	P_{coat} (10^{-3} mbar)	V (V)	I (mA)	t (min)	ผลการวิเคราะห์ฟิล์ม	
						สีฟิล์มบนแก้ว	ผลการวัด XRD ของฟิล์มบนสแตนเลสเบอร์ 304
1	1.0	3.0	470	300	10	น้ำตาล-ดำ	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
2	1.2	2.2	470	300	10	น้ำตาล-ดำ	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
3	1.5	2.7	463	350	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
4	1.7	2.9	450	400	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
5	1.8	2.1	276	1000	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
6	2.0	2.6	280	1200	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3

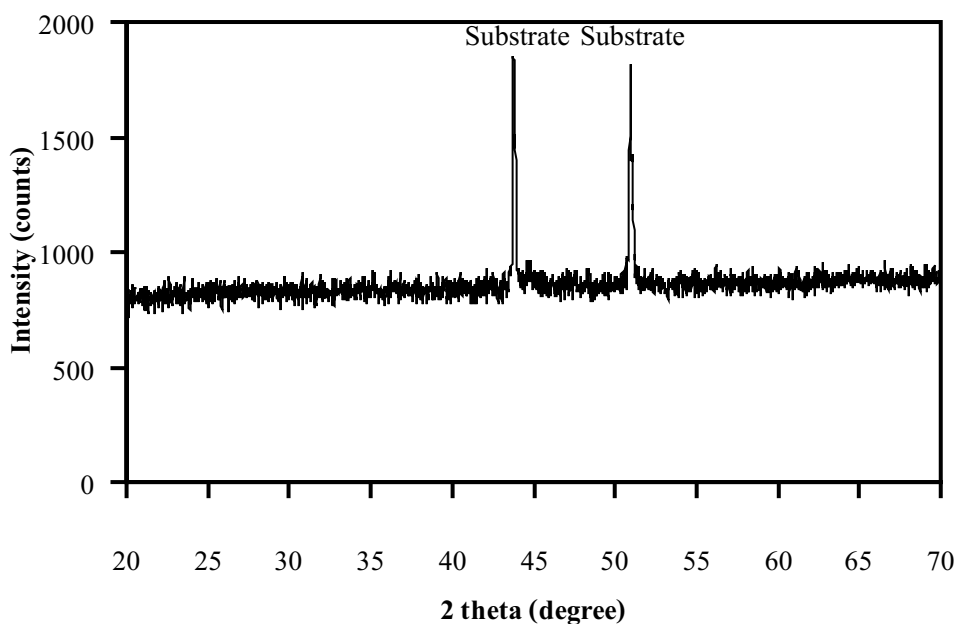
จากผลการทดลองในตารางที่ 3.2 พบว่าผลทดลองมีลักษณะเหมือนกับตารางที่ 3.1 โดย V ที่วัดได้มีค่าที่ลดลงในขณะที่ I จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อ $O_{2 flow}$ มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า V และ I จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่ $O_{2 flow}$ 1.8 sccm ($V \sim 270$ โวลต์ และ $I \sim 1$ แอมแปร์) ซึ่งเป็นสถานะที่เป้าสารเคลือบอยู่ในสถานะที่เป็นที่ poisoning

ในส่วนการสังเกตสีของฟิล์มที่เคลือบบนแก้วด้วยสายตา พบว่าสีของฟิล์มเปลี่ยนไปตาม $O_{2\text{ flow}}$ ที่ใช้ โดยฟิล์มจะมีสีน้ำตาลปนดำที่ $O_{2\text{ flow}}$ 1.0 และ 1.2 sccm เมื่อเพิ่ม $O_{2\text{ flow}}$ ให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.5-2.0 sccm ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะที่ใส



รูปที่ 3.9 XRD pattern บนสแตนเลสเบอร์ 304 ที่เงื่อนไข Ar_{flow} 5.0 sccm และ $O_{2\text{ flow}}$ 1.0 sccm

ส่วนผลการวัด XRD ของฟิล์มที่เคลือบบนสแตนเลสเบอร์ 304 พบว่าในกรณีที่ $O_{2\text{ flow}}$ ที่ใช้มีค่าต่ำคือตัวอย่างฟิล์มเคลือบที่ 1 ($O_{2\text{ flow}}$ 1.0 sccm) ในรูปที่ 3.9 และในกรณีที่ $O_{2\text{ flow}}$ มีค่าเหมาะสมที่ที่คาดว่าจะเคลือบแล้วได้ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ โดยขึ้นงานที่เคลือบบนแก้วจะมีลักษณะที่ใส ไม่มีสี นั่นคือตัวอย่างฟิล์มเคลือบที่ 3 ($O_{2\text{ flow}}$ 1.7 sccm) ในรูปที่ 3.10 ซึ่งผลการวัดไม่พบโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียมออกไซด์ในทั้งสองตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 XRD pattern บนสแตนเลสเบอร์ 304 ที่เงื่อนไข Ar_{flow} 5.0 sccm และ O_{2flow} 1.7 sccm

3.5 ผลการทดลอง เมื่อใช้เป้าอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว

จากการทดลอง เมื่อทำการเคลือบฟิล์มโดยให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Ar_{flow}) มีค่าตั้งแต่ 1 - 2 sccm พบว่าไม่เกิดกระบวนการไกลว์ดิสซาร์จในภาชนะสุญญากาศได้ โดยการไกลว์ดิสซาร์จจะเกิดขึ้น เมื่อให้ Ar_{flow} เป็น 3.0 sccm ซึ่งเป็นผลจากความดันแก๊สอาร์กอนในระบบภาชนะสุญญากาศมีค่าไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดกระบวนการไกลว์ดิสซาร์จได้ ดังนั้นในการทดลองที่ 2 จึงกำหนดให้ Ar_{flow} ที่ใช้มีค่าน้อยเป็น 3.0 sccm

ในการทดลองที่ 2 เป็นการเคลือบฟิล์มลงบนแผ่นรองรับที่เป็นแก้วและสแตนเลสเบอร์ 304 เมื่อเป้าสารเคลือบที่ใช้เป็นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วและเนื่องจากการที่เป้าสารเคลือบมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้กระแสที่ใช้ในการไกลว์ดิสซาร์จต้องมากขึ้น จึงต้องปรับ Ar ที่ใช้ให้มีค่าลดลงโดยในการทดลองนี้ค่าอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (Ar_{flow}) ที่ใช้มีค่าคงที่เป็น 3.0 sccm และทำการเคลือบฟิล์มโดยให้อัตราการไหลแก๊สออกซิเจน (O_{2flow}) ที่ใช้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-2.0 sccm โดยชิ้นงานที่เป็นแก้ว จะนำไปศึกษาลักษณะความใสของฟิล์ม ส่วนสแตนเลสเบอร์ 304 จะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเครื่อง XRD ซึ่งข้อมูลผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 3.3

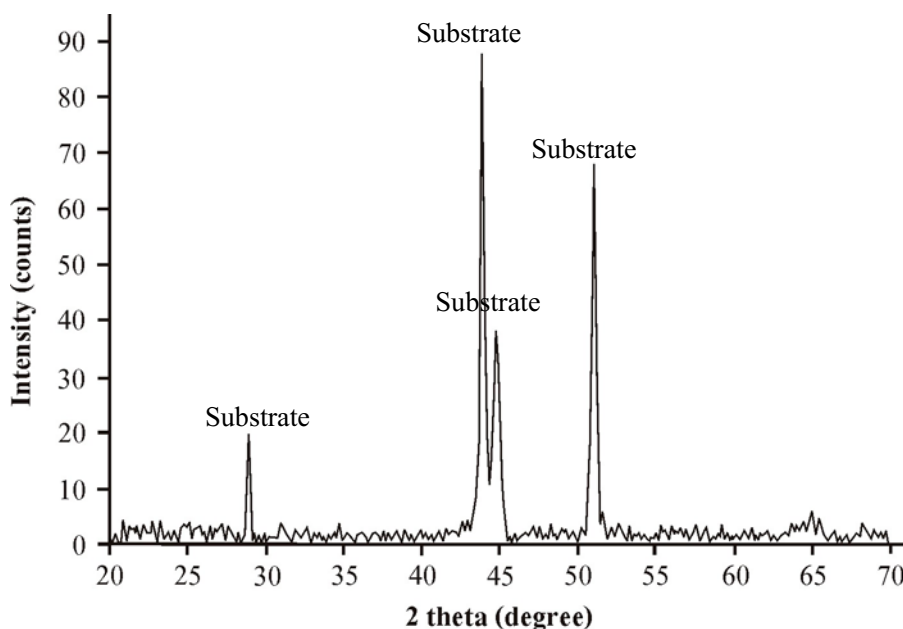
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการเคลือบเมื่อให้ Ar_{flow} มีค่าเป็น 3.0 sccm และให้ O_{2flow} มีค่าต่าง ๆ กัน
 $(Bp = 5.0 \times 10^{-5} \text{ mbar} , V_{pre} = 450 \text{ V} , I_{pre} = 200 \text{ mA})$

Sample No.	O_{2flow} (sccm)	P_{coat} (10^{-3} mbar)	V (V)	I (mA)	t (min)	ผลการวิเคราะห์ฟิล์ม	
						สีฟิล์มบนแก้ว	ผลการวัด XRD ของฟิล์มบนสแตนเลส
1	0.5	4.7	450	200	10	สีเงิน	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
2	1.0	4.0	450	200	10	สีเงินคล้ำ	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
3	1.2	4.1	440	230	10	สีดำ	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
4	1.4	3.3	430	250	10	สีน้ำตาล	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
5	1.6	3.9	390	400	35	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
6	1.8	3.5	370	450	20	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
7	2.0	4.7	270	900	30	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3

จากผลการทดลองที่ 2 ในตารางที่ 3.3 พบว่าสัมพันธ์ของค่า V และ I กับ O_{2flow} มีลักษณะที่เหมือนกันกับการทดลองที่ 1 โดย V จะมีค่าที่ลดลงและค่า I มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ O_{2flow} ที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น และจากการพิจารณาค่า V และ I พบว่าเป้าสารเคลือบอยู่ในสภาวะ poisoning ที่ O_{2flow} 2.0 sccm

ในส่วนการวิเคราะห์ฟิล์มเมื่อสังเกตสีของฟิล์มที่เคลือบบนแก้วด้วยสายตา พบว่าสีของฟิล์มเปลี่ยนไปตาม O_{2flow} เหมือนกับการทดลองที่ 1 โดยฟิล์มมีสีเงินที่ O_{2flow} 0.5 และ 1.0 sccm มีสีดำที่ O_{2flow} 1.2 sccm มีสีน้ำตาลที่ O_{2flow} 1.4 sccm และที่ O_{2flow} 1.6 - 2.0 sccm ฟิล์มที่ได้มีลักษณะที่ใส

ส่วนผลการวัด XRD ได้ทำการวัดตัวอย่างฟิล์มที่เคลือบบนสแตนเลสเบอร์ 304 ที่ O_2 flow 1.6 sccm ซึ่งเป็นกรณีที่คาดว่าจะเคลือบแล้วได้ฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ โดยขึ้นงานที่เคลือบบนแก้วมีลักษณะที่ใส ไม่มีสี ซึ่งผลการวัดในรูปที่ 3.11 ไม่พบโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียมออกไซด์



รูปที่ 3.11 XRD pattern บนสแตนเลสเบอร์ 304 ที่เงื่อนไข Ar_{flow} 3.0 sccm และ O_2 flow 1.6 sccm

3.6 ผลการทดลองเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการให้ศักย์ไฟฟ้าไบแอส (V_{bias}) ขึ้นงานในระหว่างการเคลือบฟิล์ม

การทดลองที่ 3 เป็นการทดลองโดยใช้เป้าเป็นอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว และกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนและออกซิเจนที่ใช้มีค่าเป็น 3.0 และ 1.6 sccm ตามลำดับ โดยมีการให้ศักย์ไฟฟ้าไบแอสที่เป็นลบแก่ชิ้นงานตลอดช่วงระยะเวลาการเคลือบฟิล์มเพื่อเพิ่มการ bombard ของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน โดยในการทดลองนี้จะทำการเคลือบฟิล์มที่ค่าศักย์ไบแอส 5 ค่าคือ -50, -100, -150 และ -200 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลการเคลือบค่า V_{bias} ต่างๆ กัน โดยให้ Ar_{flow} 3.0 sccm และ $\text{O}_{2\text{flow}}$ 1.6 sccm ($P_{\text{p}} = 5.0 \times 10^{-5}$ mbar, $V_{\text{pre}} = 450$ V, $I_{\text{pre}} = 200$ mA)

Sample No.	V_{bias} (V)	P_{coat} (10^{-3} mbar)	V (V)	I (mA)	t (min)	ผลการวิเคราะห์ฟิล์ม	
						สีฟิล์มบนแก้ว	ผลการวัด XRD ของฟิล์มบนสแตนเลสเบอร์ 304
1	-50	3.9	409	350	35	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
2	-100	4.0	383	500	35	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
3	-150	3.5	393	350	35	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
4	-200	4.0	408	400	35	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3

3.7 ผลการทดลองการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแม่เหล็กให้มีความเข้ม สนามแม่เหล็กในคาโทดสูงขึ้น

ในการทดลองที่ 4 เป็นการเคลือบฟิล์มลงบนแผ่นรองรับที่เป็นแก้วและสแตนเลสเบอร์ 304 โดยมีการเปลี่ยนชุดแม่เหล็กใหม่ที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงแทนที่ชุดแม่เหล็กเก่าที่ใช้ในการทดลองที่ 2 และ 3 เพื่อเพิ่มอัตราการสปีดเตอร์ที่ผิวหน้าเป้าโดยยังคงใช้เป้าอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วชุดเดิม โดยกำหนดให้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนคงที่ 3.0 sccm และทำการเคลือบฟิล์มที่อัตราการปล่อยแก๊สออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.5-2.7 sccm โดยชิ้นงานที่เป็นแก้ว จะนำไปศึกษาลักษณะความใสของฟิล์ม ส่วนสแตนเลสเบอร์ 304 จะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเครื่อง XRD ซึ่งข้อมูลผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลการเคลือบเมื่อให้ Ar_{flow} มีค่าเป็น 3.0 sccm และให้ O_{2flow} มีค่าต่างๆ กัน
หลังจาก การปรับปรุงคาโทดโดยใช้แม่เหล็กให้มีความเข้มข้น

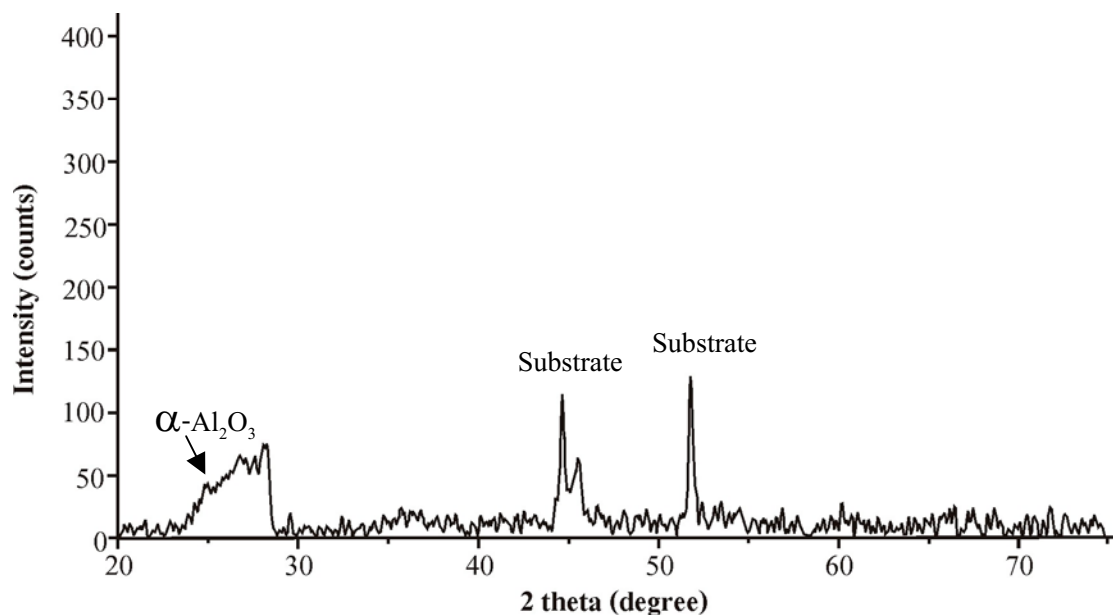
$$(B_p = 5.0 \times 10^{-5} \text{ mbar} , V_{pre} = 450 \text{ V} , I_{pre} = 200 \text{ mA})$$

Sample No.	O_{2flow} (sccm)	P_{coat} (10^{-3} mbar)	V (V)	I (mA)	t (min)	ผลการวิเคราะห์ฟิล์ม	
						สีฟิล์มบนแก้ว	ผลการวัด XRD ของฟิล์มบนสแตนเลสเบอร์ 304
1	0.5	3.5	350	200	10	น้ำตาล	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
2	0.9	3.7	348	250	10	น้ำตาล	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
3	1.1	3.8	343	300	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
4	1.2	3.9	336	300	10	ใส	พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
5	1.7	4.2	253	500	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3
6	2.7	4.2	238	650	10	ใส	ไม่พบโครงสร้างผลึก Al_2O_3

จากผลการทดลองที่ 4 ในตารางที่ 3.5 พบว่าความสัมพันธ์ของค่า V และ I ที่ O_{2flow} ค่าต่าง ๆ กันมีลักษณะที่เหมือนกันกับการทดลองที่ 1 และ 2 โดย V จะมีค่าที่ลดลงและค่า I มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ O_{2flow} ที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น และจากการพิจารณาค่า V และ I พบว่าเป้าสารเคลือบอยู่ในสภาวะ poisoning ที่ O_{2flow} มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1.7 sccm

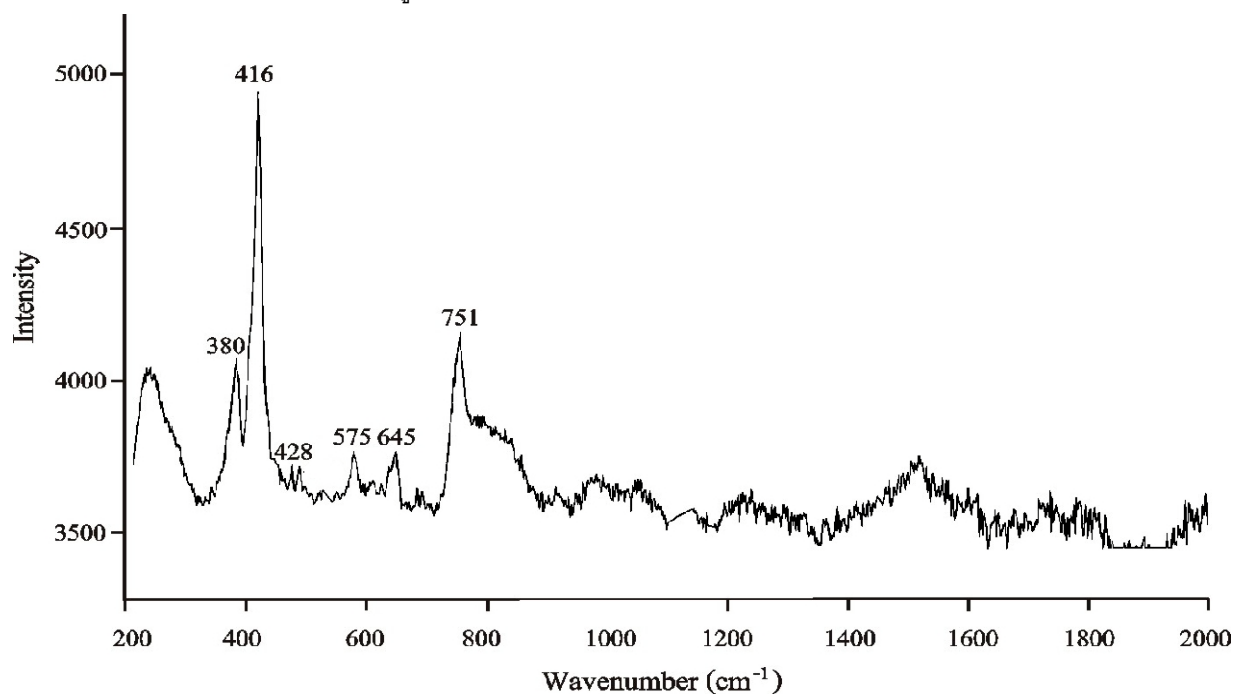
ในส่วนการวิเคราะห์ฟิล์มเมื่อสังเกตสีของฟิล์มที่เคลือบบนแก้วด้วยสายตา พบว่าสีของฟิล์มเปลี่ยนไปตาม O_{2flow} เหมือนกับการทดลองที่ 1-2 โดยฟิล์มมีสีน้ำตาลที่ O_{2flow} 0.5 sccm และ 0.9 sccm ส่วนที่ O_{2flow} 1.1-2.7 sccm ฟิล์มที่ได้มีลักษณะที่ใส

ส่วนผลการวัด XRD ได้ทำการวัดตัวอย่างฟิล์มที่เคลือบบนแก้วที่ O_{2flow} 1.1, 1.2, 1.7 และ 2.7 sccm ซึ่งเป็นกรณีที่คาดว่าจะเคลือบแล้วได้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยชิ้นงานที่เคลือบมีลักษณะที่ใส ปรากฏว่าที่ O_{2flow} 1.2 sccm จากการวิเคราะห์ฟิล์มด้วย XRD พบโครงสร้างผลึกเฟสของ $\alpha-Al_2O_3$ (Corundum) ในระนาบ (012) ที่มุม 2θ เท่ากับ 25.4 องศา โดยแสดงในรูปที่ 3.12

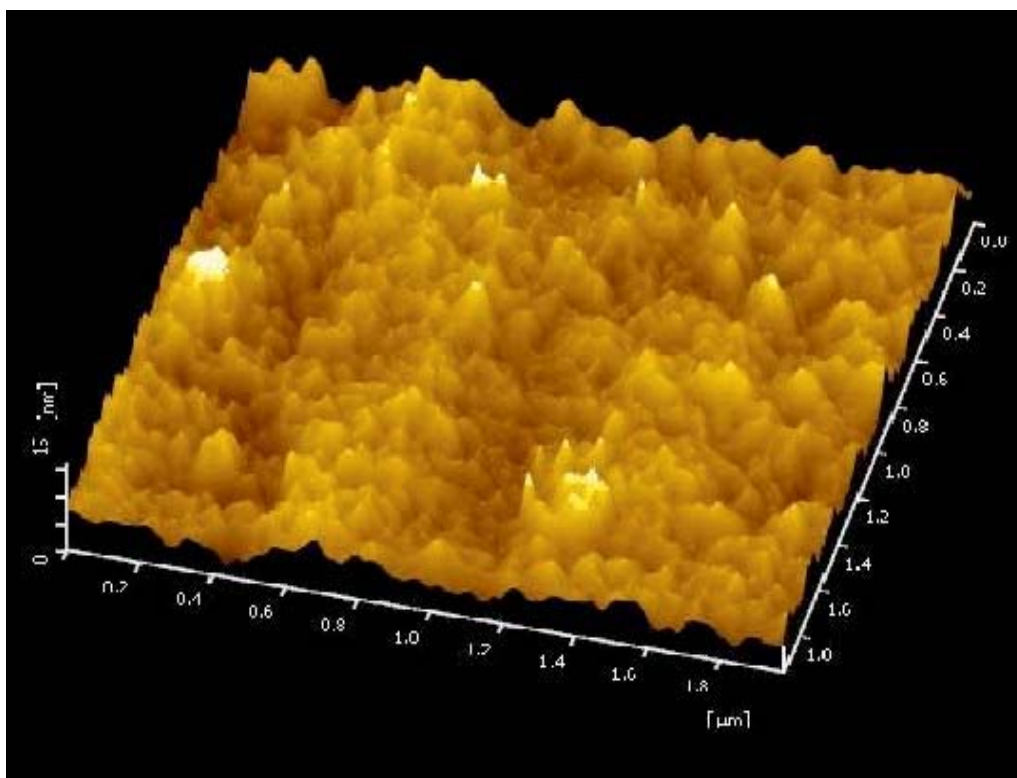


รูปที่ 3.12 XRD pattern ของฟิล์มบนสแตนเลสที่เงื่อนไข Ar_{flow} 3.0 sccm และ $O_{2 flow}$ 1.2 sccm

ซึ่งเมื่อนำฟิล์มที่เงื่อนไข Ar_{flow} 3.0 sccm และ $O_{2 flow}$ 1.2 sccm ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectrometer ที่ใช้อาร์กอนเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514 nm กำลัง 50 mW ยิ่งไปบนชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองตรวจพบสเปกตรัมของ α-Al₂O₃ ที่ค่าต่าง ๆ คือ 380 ,416 ,428 ,575 ,645 ,751 cm⁻¹ ตามลำดับ ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 Raman spectrum บนสแตนเลสเบอร์304 ที่เงื่อนไข Ar_{flow} 3.0 sccm และ $O_{2 flow}$ 1.2 sccm



รูปที่ 3.14 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบบนสแตนเลสที่เงื่อนไข Ar_{flow} 3.0 sccm และ $O_{2 flow}$ 1.2 sccm

นอกจากนี้ เมื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบบนสแตนเลสเบอร์ 304 ที่ Ar_{flow} 3.0 sccm และ $O_{2 flow}$ 1.2 sccm ด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) ของบริษัท Science Digital Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น Nanoscope III ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 3.14 โดยพื้นที่ในการวิเคราะห์เท่ากับ $2.0 \times 2.0 \mu m^2$ ซึ่งพื้นผิวของฟิล์มจะมีลักษณะโครงสร้างแบบ columnar ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยวิธีสเปตเตอริง นอกจากนี้ค่าความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) ของฟิล์มซึ่งอยู่ในรูปของค่า RMS (Root Mean Square) Roughness ที่วัดได้มีค่าเป็น 7.7 nm

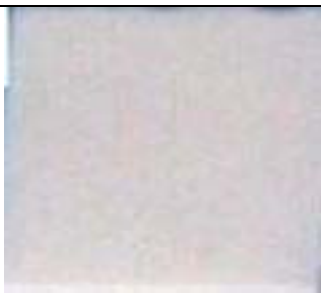
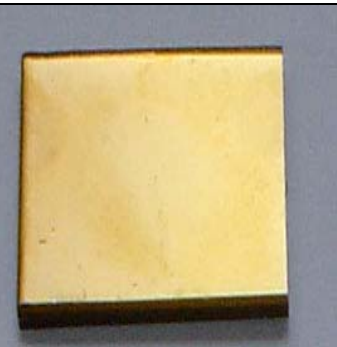
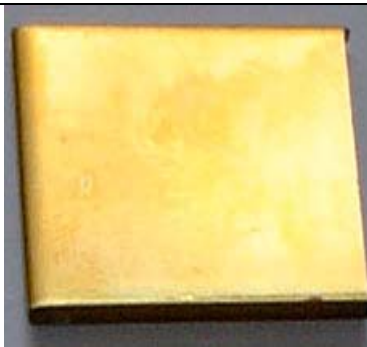
3.8 การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ (TiN)

ในขั้นตอนการเคลือบก็เหมือนกับการเคลือบอลูมิเนียมออกไซด์ เพียงแต่เปลี่ยนจากเป้า อลูมิเนียม (Al) มาเป็นเป้าไททาเนียม (Ti) โดยขนาดของเป้า Ti ที่ใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร และ reactive gas เดิมใช้ O_2 ก็เปลี่ยนเป็น N_2 วัสดุรองรับหรือ substrate ที่ใช้ยังคงเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมหรือสแตนเลสเบอร์ 304

นอกจากนั้นในการเคลือบฟิล์ม TiN จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่จะเคลือบหรือ substrate เพื่อให้ฟิล์มติดแน่น ดังนั้นในงานวิจัยส่วนนี้ จะมี heater สำหรับให้ความร้อนได้แผ่ดวง substrate โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ substrate ประมาณ $370^{\circ}C$ ดังนั้นในการทดลองเคลือบฟิล์ม TiN จะเคลือบที่อุณหภูมิของ substrate 3 ค่า คือ 250, 300 และ $370^{\circ}C$ ตามลำดับ

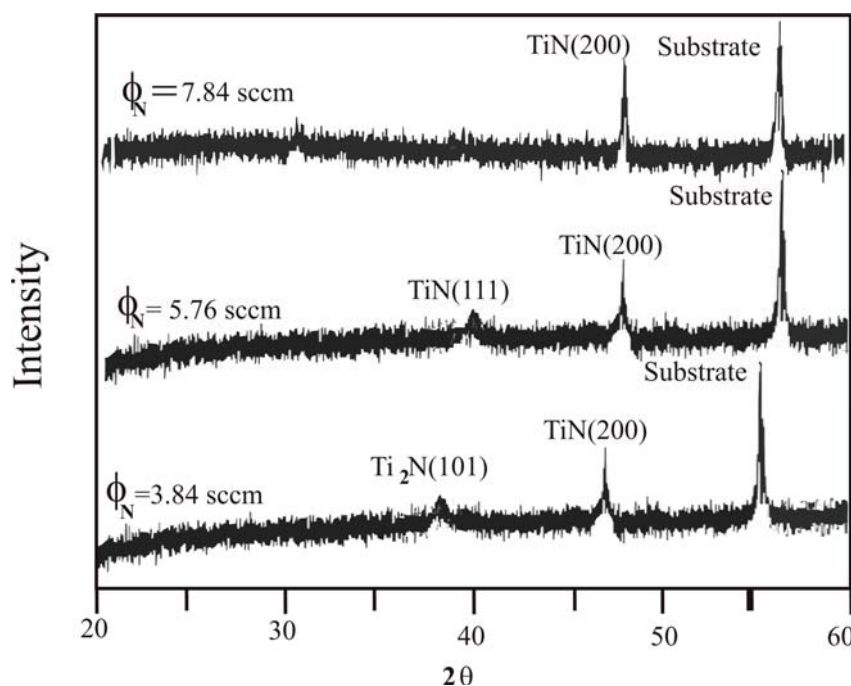
3.9 ผลของอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน

การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็น 3.38, 3.84, 4.16, 5.20 และ 7.80 sccm ตามลำดับ ให้ฟิล์มที่มีสีเหลืองทองซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก (รูปที่ 3.15)

		
แผ่นรองรับ(สแตนเลส)	3.38 sccm	3.84 sccm
		
4.16 sccm	5.20 sccm	7.80 sccm

รูปที่ 3.15 สีของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์

จากการศึกษาด้วย XRD ได้ผลเป็นดังรูปที่ 3.16 ที่อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 3.84 sccm พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction pattern) ของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ 2 เฟส คือเฟส Ti_2N (101) และ TiN (200) ที่มุม $2\theta = 38$ และ 46.5 องศา ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 5.20 sccm พบเฟส TiN (111) ที่ค่ามุม $2\theta \approx 39$ องศา และเฟส TiN (200) ที่ค่ามุม $2\theta \approx 47$ และที่อัตราการไหลของไนโตรเจนเป็น 7.80 sccm พบเฟส TiN (200) เพียงเฟสเดียว



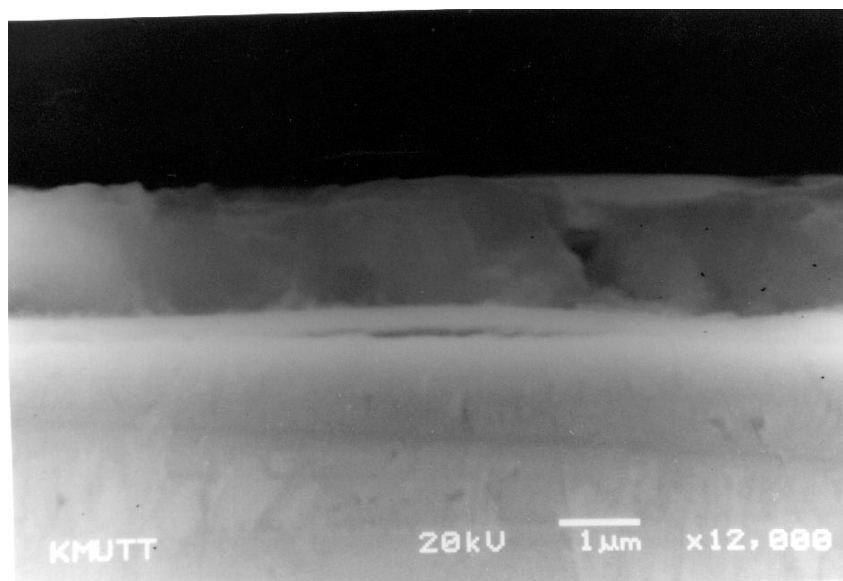
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction pattern) จากการทดลองเคลือบฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนเท่ากับ 3.84, 5.20 และ 7.80 sccm

3.10 โครงสร้างภาคตัดขวางของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์

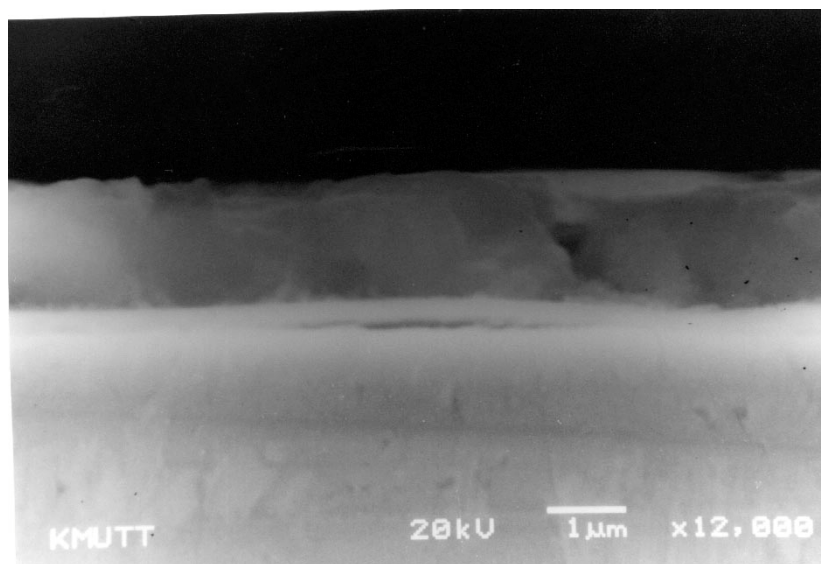
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยกล้อง SEM ผลิตภัณฑ์ของบริษัท JEOL รุ่น JEE-400 พบลักษณะของโครงสร้าง ดังรูปที่ 3.17



a) 250°C



b) 300°C

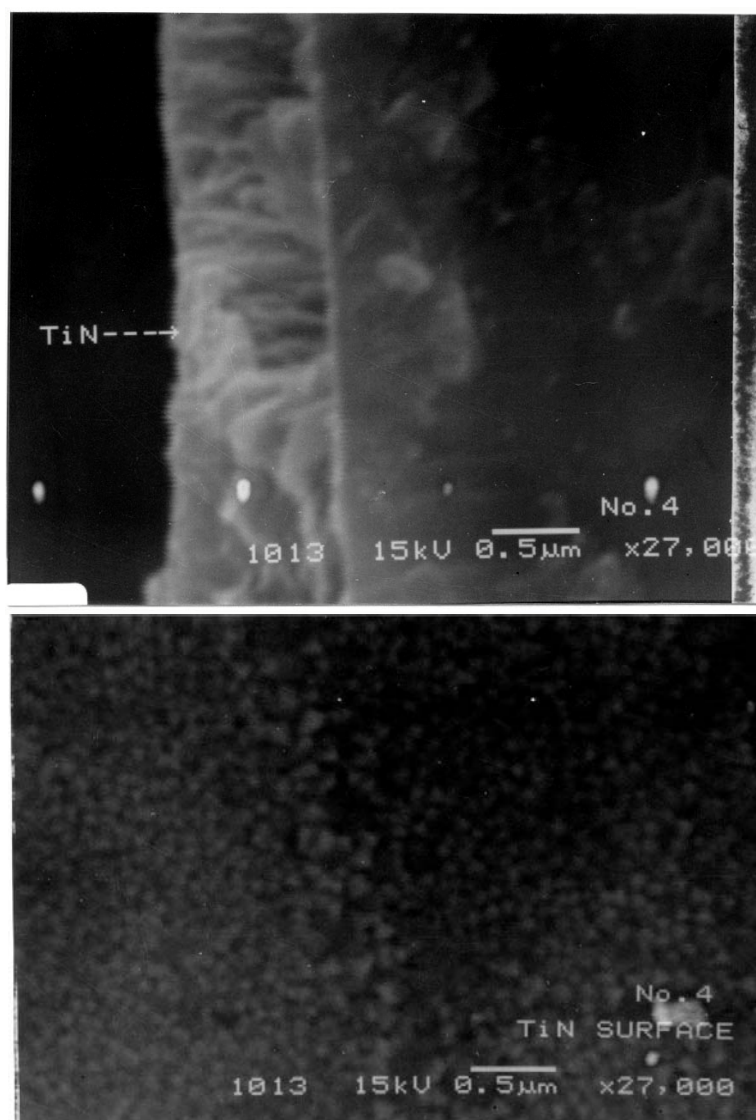


c) 370°C

รูปที่ 3.17 โครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ที่ได้จากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 12,000 เท่า

โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มที่พบโดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายภูเขาหัวตัดซ้อนทับกัน จากรูปพบว่าที่อุณหภูมิ 250°C โครงสร้างของฟิล์มมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ เห็นแนวร่องระหว่างเนื้อฟิล์มและบางบริเวณเห็นเป็นก้อน (ดูรูปที่ 3.17a) ที่อุณหภูมิ 300°C พบลักษณะโครงสร้างของฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอขึ้น แต่ยังมีร่องให้เห็นอยู่บ้าง (ดูรูปที่ 3.17b) และที่อุณหภูมิ 370°C โครงสร้างของฟิล์มมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและเนื้อฟิล์มแน่นขึ้นแต่ยังมี pin hole (ดูรูปที่ 3.17c)

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาโครงสร้างภาคตัดขวางของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ซึ่งเคลือบด้วยวิธีอีพอกซีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนกระจก ซึ่งจากการถ่ายภาพพื้นผิวด้วย SEM จะได้ภาพ ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 (รูปบน) โครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนกระจก, (รูปล่าง) ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ได้จากกล้อง SEM

จากรูปที่ 3.18 พบว่าฟิล์มมีโครงสร้างเป็นคอลัมน์ที่เรียงกันอย่างสม่ำเสมอ มีช่องระหว่างคอลัมน์จำนวนมาก ในขณะที่พื้นผิวของฟิล์ม (รูปล่าง) มองเห็น pin hole (จุดสีดำ) กระจายบนพื้นผิวของฟิล์ม ลักษณะโครงสร้างที่เห็นนี้เป็นไปตามทฤษฎี คือฟิล์มมีโครงสร้างเป็นเกรนคอลัมน์นาร์

นอกจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางของฟิล์มแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาลักษณะความขรุขระพื้นผิว (surface roughness) ของฟิล์มด้วย จากการศึกษาด้วยกล้อง SEM มองเห็นพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างราบเรียบ แต่เมื่อศึกษาด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.19