

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี ดี.ซี. พลาสมา แมกนีตรอน สเป็คเตอริง  
DEPOSITION OF THIN FILM BY D.C. PLANAR MAGNETRON  
SPUTTERING



นายโชคชัย หาญธนชาติ  
MR. CHOKCHAI HANTANACHART

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

ISBN 974-621-971-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DEPOSITION OF THIN FILM BY D.C. PLANAR MAGNETRON  
SPUTTERING**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
1997**

**ISBN 974-621-971-5**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี ดี.ซี. พลาสมา แมกนีตรอน  
สปีดเตอริง  
นักศึกษา นายโชคชัย หาญธนาชาติ  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ. จงรักษ์ บุญเส็ง  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร. พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ  
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2540

### บทคัดย่อ

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี ดีซี พลาสมา แมกนีตรอนสปีดเตอริง เป็นวิธีการเคลือบฟิล์มบางที่อาศัยขบวนการดิสชาร์จทางไฟฟ้าของก๊าซ โดยมีสารเคลือบเป็นเป้าภายใต้บรรยากาศความดันต่ำ โดยใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 1,000 เกาส์ ดัดไว้ที่ขั้วคาโทดเพื่อช่วยในการเพิ่มอัตราการสปีดเตอริง โดยมีทิศทางสนามแม่เหล็กขนานกับผิวหน้าของแผ่นเป้าสารเคลือบ ในการทำการทดลองได้ทำการปรับระบบแคมเบอร์สูญญากาศ โดยสามารถลดความดันถึงค่า  $8 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์ ทำให้ระบบมีความสะอาดเพียงพอที่จะทำการเคลือบ และได้ออกแบบสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับระบบก๊าซดิสชาร์จที่สามารถจ่ายกระแสคงที่ได้สูงสุด 2 แอมแปร์ สำหรับจ่ายให้ระบบเพื่อหาค่ากระแสกับแรงดันดิสชาร์จของเป้าสารเคลือบโลหะที่ใช้ทดลอง 4 ชนิด ได้แก่ ไททาเนียม , ทองแดง , สแตนเลส และอลูมิเนียม เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า โดยผลของค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะความสัมพันธ์กับค่าอัตราการเคลือบเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถหาค่าประสิทธิภาพของอัตราการเคลือบของระบบสปีดเตอริงนี้ได้จากการคำนวณค่าความชันของความสัมพันธ์ที่ค่าความดันนั้น และได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ก๊าซดิสชาร์จของระบบสปีดเตอริง โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันของค่ากระแสดิสชาร์จ , ค่าแรงดันดิสชาร์จ , ค่ากำลังไฟฟ้า , ค่าอัตราการเคลือบ และค่าความดันของก๊าซภายในระบบที่ได้จากผลการทดลอง

<b>THESIS TITLE</b>	<b>DEPOSITION OF THIN FILM BY D.C. PLANAR MAGNETRON SPUTTERING</b>
<b>STUDENT</b>	<b>MR. CHOKCHAI HANTANACHART</b>
<b>THESIS ADVISER</b>	<b>ASSIS. PROF. JONGRAK BOONSENG</b>
<b>THESIS CO-ADVISOR</b>	<b>ASSOC. PROF. DR. PICHET LIMSUWAN</b>
<b>LEVEL OF STUDY</b>	<b>MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING</b>
<b>DEPARTMENT</b>	<b>ELECTRICAL , KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG</b>
<b>YEAR</b>	<b>1997</b>

### ABSTRACT

D.C. planar magnetron sputtering on electrical discharge process of gas with depositor material target under low atmosphere pressure is the method used for the deposition of thin film. In order to acquire the real relation between sputtering power and deposition rate in different matters and conditions, a 1,000 gauss permanent magnet is placed on the cathode to increase the sputtering rate so that its magnetic field is parallel with the target surface. Next, decrease the mbar pressure by  $8 \times 10^{-3}$  or more in the vacuum chamber to adequately clean the deposition. Then, design the 0 up to 2 ampere D.C. power supply source for a gas discharge system. Next, adjust the current in the target surface and the pressure in the vacuum chamber for Titanium, Copper, Stainless Steel and Aluminium. Then, measure the discharge current, discharge voltage, gas pressure in the vacuum chamber and the deposition rate. After that, compute the power of electricity and the efficiency of the deposition rate. Finally, check the relation between sputtering power and deposition rate that can follow with the planar magnetron sputtering theory and suggest the most facile methode for people to commercially implement it.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน แม้ว่าจะพบกับอุปสรรคในการทำงานมากมาย อย่างไรก็ตามงานวิทยานิพนธ์นี้ก็สามารถสำเร็จลุล่วงมาได้ ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศส.จรงค์ษ์ บุญเส็ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ แห่งห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเลเซอร์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (National Electronics and Computer Technology Center) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ศส.ประภาส ไพรสุวรรณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คุณสพพรรณ เนาวรัตน์พงษ์ คุณชววิทย์ โภกบุตร คุณชนม์เจริญ ทิพย์สุวรรณ และคุณวิยะพล พัฒนเศรษฐกุล แห่งห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเลเซอร์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ช่วยเหลือและแนะนำมาตลอด นอกจากนี้ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ของศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอขอบพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่เคยอดรม สั่งสอน ตั้งแต่เด็กจนโต ตลอดจนเพื่อนๆ และนิสิตรุ่นน้องที่ทำให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณผู้ที่เคยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และสุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่ทำให้การเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

โชคชัย หาญธนาชาติ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญภาพ .....	VII
คำย่อและสัญลักษณ์ .....	XIII
<b>บทที่</b>	
<b>1</b>	
บทนำ .....	1
กล่าวนำ .....	1
ผลผลิตที่ได้จากการใช้วิธีสปีดเตอริง .....	2
<b>2</b>	
ทฤษฎีการเคลื่อนที่ลึ่มบางโดยวิธีสปีดเตอริง .....	6
บทนำ .....	6
ขบวนการเกิดปรากฏการณ์สปีดเตอริง .....	7
ขบวนการก๊าซดิสซาร์จ .....	26
ระบบสปีดเตอริงแบบ ดีซี ไค โอค สปีดเตอริง .....	37
การเพิ่มอัตราการสปีดเตอริง .....	41
<b>3</b>	
องค์ประกอบที่ใช้ในระบบ ดีซี ฟลานาร์ แมกนิตรอน สปีดเตอริง .....	54
การออกแบบสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง .....	54
การออกแบบสร้างวงจรควบคุมกระแสตรงที่ .....	60
การออกแบบสร้างวงจรซอฟต์แวร์ .....	61
ส่วนประกอบของขั้วคาโทดและเป้าสารเคลื่อน .....	70
<b>4</b>	
การทดลองทำการเคลื่อนที่ลึ่มบางโลหะลงบนชิ้นงาน .....	86
การทดลองหาค่าความดันต่ำสุดของระบบ .....	86
การทดลองหาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า .....	89
วิธีการทดลองและการจัดอุปกรณ์ในการทดสอบเคลื่อนที่ลึ่มบางโลหะ .....	94

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล .....	98
ผลการทดลองการหาค่าความดันต่ำสุดของระบบ .....	98
ผลการทดลองหาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า .....	101
ผลการทดลองการทดสอบเคลือบฟิล์มบางโลหะ .....	110
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	129
บรรณานุกรม .....	133
ภาคผนวก .....	134
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง .....	135
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ .....	147
ประวัติผู้เขียน .....	156

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงข้อมูลของค่าพลังงานเทอร์ชไฮลด์ของการสปัตเตอร์ริง .....	12
2	แสดงค่า Sputter Yield .....	15
3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง $\gamma$ .....	16
4	แสดงค่าพลังงาน Work Function ( $W_\phi$ ) สำหรับธาตุโลหะชนิดต่างๆ .....	27
5	แสดงผลการทดสอบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของวงจร .....	63
6	เปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นกับระบบเดิมที่เคยใช้อยู่ .....	69
7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของระบบหล่อเย็นไม่เกิน $10^\circ\text{C}$ .....	71
8	แสดงอัตราการเคลือบและประสิทธิภาพของการเคลือบของ DC Planar Magnetron Sputtering ของเป้าสารเคลือบชนิดต่างๆ .....	83
9	แสดงผลการทดลองหาอัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบของเป้าสารเคลือบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร ชนิดต่างๆ .....	125

## สารบัญญภาพ

หน้า

1.	แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าyieldที่สัมพันธ์กับพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ .....	8
2.	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการวัดค่าพลังงานเทรซไฮสต์ .....	10
3.	แสดงความสัมพันธ์ของค่าyieldของการสปีดเตอร์กับค่าพลังงานของไอออน .....	11
4.	แสดงค่า Sputter Yields ที่เป็นฟังก์ชันกับค่าพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ .....	11
5.	แสดงการจัดวางอุปกรณ์การทดลองของ Wehner's สำหรับการวัดค่าyieldของการสปีดเตอร์ .....	13
6.	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Sputter Yields กับค่า Atomic Number เมื่อทำการเร่งไอออน $Ar^+$ , $Ne^+$ และ $Hg^+$ เข้าชนเป้าที่ทำจากธาตุชนิดต่างๆ .....	14
7.	แสดงค่าyieldของการสปีดเตอร์ ที่สัมพันธ์กับค่ามุมตกกระทบของไอออนที่เข้าชน .....	17
8.	แสดงการกระจายเชิงมุมของอะตอม Si ที่หลุดออกเมื่อถูกชนด้วยไอออน $Ar^+$ ที่พลังงาน 3 keV โดยมีมุมตกกระทบ $60^\circ$ .....	18
9.	แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองสปีดเตอร์ริง สำหรับใช้วัดการกระจายเชิงมุม .....	18
10.	แสดงการกระจายเชิงมุมของอะตอมที่หลุดออกจากการสปีดเตอร์ .....	19
11.	แสดงค่าyieldของการสปีดเตอร์ริงที่แตกต่างกันเมื่อไอออนของก๊าซ $Ar^+$ วิ่งชนเป้า Cu ในระนาบที่แตกต่างกัน .....	19
12.	แสดงการกระจายพลังงานของอะตอม Cu ที่ถูกสปีดเตอร์ด้วยไอออนของก๊าซ Kr ที่ตกกระทบด้วยค่าพลังงานต่างๆ .....	21
13.	แสดงการกระจายพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์ โดยไอออนตกกระทบชนิดต่างๆ .....	22
14.	แสดงการกระจายพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์ โดยไอออน $Kr^+$ ที่ค่าพลังงานต่างๆ .....	22
15.	แสดงพลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์ .....	23
16.	แสดงโมเดลของการหาค่า free path .....	24
17.	แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ .....	25
18.	แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรด .....	28

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
19. แสดงกำแพงศักย์ (Potential Barrier) ที่ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก .....	31
20. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าพังทลายและผลคูณระหว่างความดัน ก๊าซ (p) กับระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด (d) .....	34
21. แสดงการเกิด Normal Glow Discharge ของหลอดก๊าซนีออนขาว 50 เซนติเมตร ที่ความดัน 1 torr ความเข้มของการเรืองแสงแสดงด้วยแถบดำในรูป .....	35
22. แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของระบบสเป็คเตอริงชนิดต่างๆ .....	38
23. แสดงระบบสเป็คเตอริงแบบ DC diode sputtering system .....	39
24. แสดงผลของความดันก๊าซในระบบสเป็คเตอริงที่มีผลต่ออัตราการเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบสเป็คเตอริงของนิคเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร .....	40
25. แสดงส่วนประกอบตำแหน่งของอิเล็กโทรด แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ thermionic เป็นสารเคลือบและแผ่นรองรับของระบบ triode sputtering .....	43
26. แสดงแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า F ซึ่งตั้งฉากกับ V และ B .....	46
27. แสดงผลกระทบของสนามแม่เหล็ก .....	47
28. แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า .....	49
29. แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อหลุดออกมาจากผิวเป้าด้วยความเร็ว v เข้าไปในบริเวณพื้นที่ของสนามแม่เหล็ก B ที่มีทิศทางขนานไปกับผิวเป้า .....	50
30. แสดงการจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตร้อนของเป้าสารเคลือบใน Planar magnetron sputtering .....	52
31. แสดงแนวการกักตร้อนแผ่นเป้าสารเคลือบไททานเนียมลึกลงเป็นรูปตัว V .....	53
32. แสดงขนาดอัตราส่วนแกนหม้อแปลง E .....	57
33. วงจรไฟฟ้ารวมของระบบสเป็คเตอริง .....	59
34. รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอินพุต .....	64
35. รูปคลื่นสัญญาณกระแสอินพุต .....	64
36. รูปคลื่นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตขนาด 310 โวลต์.....	65
37. รูปคลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตขนาด 2 แอมแปร์ .....	65

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
38. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอทพุทกับแรงดันอินพุท .....	66
39. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอทพุทกับแรงดันเอทพุท .....	66
40. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอทพุทกับกระแสอินพุท .....	67
41. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอทพุทกับกำลังเอทพุท .....	67
42. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอทพุทกับกำลังอินพุท .....	68
43. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอทพุทกับประสิทธิภาพ .....	68
44. แสดงขนาดรายละเอียดของแอมเบอร์สูญญากาศที่ทำจากเหล็กกล้าสแตนเลส โดยมีหน้าตาต่างกระจก 1 ช่อง .....	73
45. แสดงภาคตัดขวางของโครงสร้างขั้วคาโทดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร .....	74
46. แสดงการติดตั้งแม่เหล็กถาวรขนาด 1,000 เกาส์ ที่ขั้วคาโทด .....	75
47. แสดงการติดตั้งเป้าสารเคลือบลงบนขั้วคาโทด .....	76
48. แสดงแนวการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าบริเวณขอบคาโทดและซึลด์อันเป็นสาเหตุให้เกิดการสปัดเตอร์บริเวณขอบสูงกว่าตอนกลางเป้า .....	77
49. การลดอัตราการสปัดเตอร์ขอบเป้าโดยการทำซึลด์ .....	77
50. ขั้วคาโทดเมื่อได้รับการติดตั้งเป้าสารเคลือบและคาโทดซึลด์เสร็จเรียบร้อยแล้ว .....	79
51. แสดงอัตราการเคลือบของเป้าชนิดต่างๆ ที่เป็นฟังก์ชันกับกำลังไฟฟ้าของระบบ Planar magnetron sputtering .....	80
52. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จของระบบ Planar magnetron sputtering คาโทดรูปสี่เหลี่ยม ที่ความดันก๊าซค่าต่างๆ .....	81
53. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จและความดันก๊าซเมื่อกระแสมีค่าคงที่ โดยเป้าสารเคลือบสี่เหลี่ยมมีขนาด $37.5 \times 12.1 \text{ cm}^2$ และสปัดเตอร์ในแนวพลาสมาวงแหวน .....	82
54. เป้าสารเคลือบโลหะไททาเนียม .....	84
55. เป้าสารเคลือบโลหะสแตนเลส .....	84
56. เป้าสารเคลือบโลหะทองแดง .....	85
57. เป้าสารเคลือบโลหะอลูมิเนียม .....	85

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
58. แสดงส่วนประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ ดีซี พลาสมา แมกนีตรอน สปีดเตอริง .....	88
59. แสดงระบบสปีดเตอริงที่ใช้งาน .....	89
60. แสดงส่วนควบคุม Isolation valve, Backing valve และ Roughing valve แบบ Manual .....	92
61. แสดงหน้าจอเมนูหลักของเครื่อง MKS Mass Flow Meter .....	93
62. แสดงหน้าจอเมนูย่อยเพื่อใช้ควบคุม Mass Flow ของก๊าซอาร์กอน .....	94
63. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการปั๊มกับความดันภายในแชมเบอร์ สูญญากาศเมื่อใช้ปั๊มกลโรตารีสร้างความดันขั้นต้น .....	98
64. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการปั๊มกับความดันภายในแชมเบอร์ เมื่อใช้ปั๊มไอฟุ้งกระจาย .....	99
65. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซชาร์จกับแรงดันดิซชาร์จของเป้าสแตนเลส .....	101
66. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันของเป้าสแตนเลสที่กระแสต่างๆ .....	101
67. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซชาร์จกับแรงดันดิซชาร์จของเป้าอลูมิเนียม .....	102
68. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันของเป้าอลูมิเนียมที่กระแสต่างๆ .....	102
69. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซชาร์จกับแรงดันดิซชาร์จของเป้าไททาเนียม .....	103
70. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันของเป้าไททาเนียมที่กระแสต่างๆ .....	103
71. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซชาร์จกับแรงดันดิซชาร์จของเป้าทองแดง .....	104
72. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันของเป้าทองแดงที่กระแสต่างๆ .....	104
73. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันดิซชาร์จของเป้า 4 ชนิดที่ ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar .....	105
74. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันดิซชาร์จของเป้า 4 ชนิดที่ ความดัน $3.0 \times 10^{-3}$ mbar .....	105
75. กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log V$ กับ $\log I$ ของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar .....	107
76. กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log V$ กับ $\log I$ ของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน	

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

		หน้า
	3.0 x 10 <sup>-3</sup> mbar .....	107
77.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซาร์จกับอัตราการเคลือบของเป้าสแตนเลส .....	110
78.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซาร์จกับอัตราการเคลือบของเป้าอลูมิเนียม .....	110
79.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซาร์จกับอัตราการเคลือบของเป้าไททาเนียม ....	111
80.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซาร์จกับอัตราการเคลือบของเป้าทองแดง .....	111
81.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเคลือบของเป้าสแตนเลส ที่กระแสค่าต่างๆ .....	112
82.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเคลือบของเป้าอลูมิเนียม ที่กระแสค่าต่างๆ .....	112
83.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเคลือบของเป้าไททาเนียม ที่กระแสค่าต่างๆ .....	113
84.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเคลือบของเป้าทองแดง ที่กระแสค่าต่างๆ .....	113
85.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าสแตนเลส .....	114
86.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าอลูมิเนียม .....	114
87.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าไททาเนียม .....	115
88.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าทองแดง .....	115
89.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับแรงดันดิซาร์จของเป้า 4 ชนิด ที่ความดัน 2.0 x 10 <sup>-3</sup> mbar .....	116
90.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับแรงดันดิซาร์จของเป้า 4 ชนิด ที่ความดัน 3.0 x 10 <sup>-3</sup> mbar .....	116
91.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซาร์จกับอัตราการเคลือบของเป้า สารเคลือบทั้ง 4 ชนิด ที่ความดัน 2.0 x 10 <sup>-3</sup> mbar .....	117
92.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซาร์จกับอัตราการเคลือบของเป้า สารเคลือบทั้ง 4 ชนิด ที่ความดัน 3.0 x 10 <sup>-3</sup> mbar .....	117
93.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าสาร	

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
เคลือบ 4 ชนิดที่ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar .....	118
94. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป่าสาร เคลือบ 4 ชนิดที่ความดัน $3.0 \times 10^{-3}$ mbar .....	118
95. ภาพการเกิดโกลว์ดิสชาร์จของเป่าสแตนเลส .....	119
96. ภาพการเกิดโกลว์ดิสชาร์จของเป่าอลูมิเนียม .....	119
97. ภาพการเกิดโกลว์ดิสชาร์จของเป่าไททานเนียม .....	120
98. ภาพการเกิดโกลว์ดิสชาร์จของเป่าทองแดง .....	120
99. ภาพชิ้นงานกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยโลหะสแตนเลส .....	121
100. ภาพชิ้นงานกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยโลหะอลูมิเนียม .....	121
101. ภาพชิ้นงานกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยโลหะไททานเนียม .....	122
102. ภาพชิ้นงานกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยโลหะทองแดง .....	122
103. อนุภาคสปัตเตอร์ริงขณะตกลงเคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ .....	123

## คำย่อและสัญลักษณ์

- S หมายถึง ค่าขีดเคี้ยวของการสปีดเตอริง มีหน่วยเป็น อะตอมค่อไอออน
- A หมายถึง เลขอะตอม (atomic number)
- $\gamma$  หมายถึง สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง
- $Ar^+$  หมายถึง ก๊าซอาร์กอนที่อยู่ในสถานะประจุบวก
- $Ne^+$  หมายถึง ก๊าซนีออนที่อยู่ในสถานะประจุบวก
- eV หมายถึง หน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์
- $\bar{\lambda}$  หมายถึง ค่า mean free path
- N หมายถึง จำนวนโมเลกุลของก๊าซ
- $V_B$  หมายถึง ค่าแรงดันไฟฟ้าพังทลาย (breakdown voltage)
- $W_s$  หมายถึง ค่าพลังงาน work function
- $\gamma_0$  หมายถึง ความถี่ของแสงโฟตรอน
- m หมายถึง มวลของอิเล็กตรอน
- $u_e$  หมายถึง ความเร็วของอิเล็กตรอน
- $h\gamma_0$  หมายถึง ค่าพลังงานวิกฤติ (critical energy)
- p หมายถึง ความดันของก๊าซ
- d หมายถึง ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด
- $n^+$  หมายถึง จำนวนของไอออนบวก
- $n^-$  หมายถึง จำนวนของอิเล็กตรอน
- $j^+$  หมายถึง กระแสไอออนบวก
- $j^-$  หมายถึง กระแสอิเล็กตรอน
- mtorr หมายถึง หน่วยเป็นมิลลิทอร์ของความดันก๊าซ
- $W_0$  หมายถึง จำนวนของอนุภาคสปีดเตอริงจากพื้นที่ต่อหน่วยของคาโทด
- e หมายถึง ประจุอิเล็กตรอน
- $A^\circ$  หมายถึง หน่วยของความหนาเป็นอังสตรอม
- min หมายถึง หน่วยของเวลาเป็นนาที่
- F หมายถึง แรง
- B หมายถึง ค่าสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

q	หมายถึง	ค่าประจุหน่วยเป็นคูลอมบ์
r.f.	หมายถึง	radio frequency
$E_m$	หมายถึง	ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ
w	หมายถึง	ความเร็วเชิงมุม
$\mu$	หมายถึง	ค่า mobility ของอิเล็กตรอน
L	หมายถึง	ระยะทาง
$m_e$	หมายถึง	มวลของอิเล็กตรอน
r	หมายถึง	รัศมี
v	หมายถึง	ความเร็วของอิเล็กตรอน
E	หมายถึง	ค่าสนามไฟฟ้า
AC	หมายถึง	ไฟฟ้ากระแสสลับ
DC	หมายถึง	ไฟฟ้ากระแสตรง
kV	หมายถึง	หน่วยแรงดันไฟฟ้าเป็นกิโลโวลต์
I	หมายถึง	กระแสไฟฟ้า
V	หมายถึง	แรงดันไฟฟ้า
P	หมายถึง	กำลังไฟฟ้า
$A_w$	หมายถึง	พื้นที่สำหรับพันเส้นลวด
$I_{dc}$	หมายถึง	กระแสไฟฟ้ากระแสตรง
$V_{dc}$	หมายถึง	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
C	หมายถึง	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
$C_F$	หมายถึง	ค่าความจุไฟฟ้ากรองแรงดันของตัวเก็บประจุ
$V_m$	หมายถึง	ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
f	หมายถึง	ค่าความถี่ไฟฟ้า
$E_{gen}$	หมายถึง	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของวงจร
$\Omega$	หมายถึง	หน่วยของความต้านทานไฟฟ้าเป็นโอห์ม
LED	หมายถึง	ไฟแสดงสถานะของวงจร
$R_{int}$	หมายถึง	ความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ **xiv** เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

- $V_o$  หมายถึง แรงดันเอาต์พุทของวงจร  
 $VR$  หมายถึง ความต้านปรับค่าได้  
 $D$  หมายถึง ไดโอด  
 $IC$  หมายถึง วงจรรวม (integrate circuit)  
 $SW$  หมายถึง สวิตช์  
 $R_E$  หมายถึง ประสิทธิภาพของอัตรการเคลื่อน  
 $R$  หมายถึง อัตรการเคลื่อน



# บทที่ 1

## บทนำ

### กล่าวนำ

ในอดีต เซอร์ ไอแซค นิวตัน (Sir Isaac Newton) ได้เคยบรรยายไว้ในหนังสือ Optiks ถึงสาเหตุของการเกิดสีฟองสบู่ตั้งแต่ปี ค.ศ.1704 ซึ่งเป็นฟิล์มบางแสงที่พบเห็นกันในชีวิตประจำวัน จนกระทั่งในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 กองทัพเยอรมันพบว่ากล้องส่องทางไกลที่มีเคลือบกันสะท้อนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนซึ่งนับว่าเป็นการนำฟิล์มบางแสงมาใช้งานได้จริงเป็นครั้งแรก ในปัจจุบันการเคลือบสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี แต่วิธีการเคลือบที่ให้ฟิล์มบางที่มีความบางมากๆ และมีคุณภาพดียังต้องอาศัยวิธีการเคลือบในสุญญากาศแทบทั้งสิ้น ในประเทศไทยอุตสาหกรรมการเคลือบฟิล์มบาง ส่วนใหญ่เป็นขบวนการทางเคมี โดยเฉพาะวิธีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นการเคลือบด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี (electroplating) ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาตามมาให้แก่สิ่งแวดล้อม มีอันตรายสูงต่อคนงานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารเคมีเหล่านั้น ส่วนอีกวิธีหนึ่งเป็นการระเหยสารที่อุณหภูมิสูง (Thermal Evaporation) แล้วเคลือบลงบนแผ่นรองรับภายใต้สุญญากาศ ซึ่งใช้ในการเคลือบโคมไฟหน้ารถยนต์, กระจกหลังรถยนต์ และโคมสะท้อนของกระบอกไฟฉาย โดยทั่วไปการเคลือบด้วยวิธีนี้จะให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบและแผ่นรองรับได้ไม่ค่อยดีนัก ต้องมีการพ่นทับด้วยแล็กเกอร์เพื่อให้ได้ความคงทนสูงขึ้นนับเป็นวิธีการที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยและไม่ต้องอาศัยขบวนการทางเคมีใดๆ ในทุกขั้นตอนการเคลือบ สำหรับวิธีการใหม่ในการเคลือบเลนส์แว่นตาพลาสติกเรียกว่า Ion Assisted Deposition (IAD) ซึ่งเป็นวิธีใหม่ที่เพิ่งจะได้รับการพัฒนาเมื่อในระยะเวลาไม่กี่ปีมานี้เอง โดยใช้วิธียิงก๊าซอาร์กอน (Ar) หรือก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ลงไปบนฟิล์มในขณะที่ทำการระเหยสารเคลือบโดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง ทำให้วิธีการนี้ใช้ได้กับเลนส์แว่นตาพลาสติกซึ่งทนความร้อนไม่สูงเหมือนแก้ว ส่วนวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เกิดขึ้นเมื่อตั้งแต่ตอนที่กำลังค้นคว้าเกี่ยวกับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ใหม่ๆ พบว่าเมื่อให้อิออนของแก๊สพุ่งเข้าชนเป้าโลหะภายในของหลอดแก้วสุญญากาศจะเกิดฟิล์มโลหะเคลือบที่ผิวในของหลอดแก้วทำให้เกิดการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศซึ่งต่อมาได้เรียกว่าวิธีสปัตเตอร์ริง ซึ่งให้ความคงทนในยึดเกาะของฟิล์มสูงกว่าวิธีระเหยสาร โดยทั่วไปขบวนการเคลือบเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นภายใต้บรรยากาศความดันต่ำขนาดระหว่าง  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-1}$  torr (1 torr = ความดัน 1 มิลลิปรอท) และอาศัยการดิซชาร์จไฟฟ้าของก๊าซทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน จากนั้นไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนแผ่นสารเคลือบ (target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงขนาด 500-10,000 โวลต์ ประสิทธิภาพของสปีดเตอริงอาจเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มสนามแม่เหล็กในบริเวณใกล้กับเป้า เมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนที่มีประจุเมื่อวิ่งไปในสนามแม่เหล็กก็จะถูกแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่มีลักษณะคล้ายวงสว่าง ทำให้ก๊าซอาร์กอนแตกตัวเป็นไอออนมากขึ้น จึงเป็นผลให้มีอัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นด้วย สารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของก๊าซจะหลุดออกและวิ่งด้วยความเร็วสูงลงเคลือบบนแผ่นรองรับในทุกทิศทาง พลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมาจากขบวนการสปีดเตอริงนี้สูงกว่าอนุภาคที่หลุดออกด้วยวิธีระเหยสารมาก วัสดุที่ต้องการเคลือบด้วยวิธีสปีดเตอริงอาจเป็นโลหะหรือโลหะ และสารที่ต้องการเคลือบอาจเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีที่แผ่นรองรับจะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำเครื่องสปีดเตอริงมาใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และขนาดกลางเป็นอันมาก เพื่อลดการนำเข้าปริมาณสินค้าที่เคลือบด้วยวิธีสปีดเตอริงที่มีปริมาณสูงขึ้นเรื่อยๆ เช่น กระจกสะท้อนความร้อนที่ติดตามผนังอาคารขนาดใหญ่อันมีคุณสมบัติยอมให้คลื่นแสงส่องผ่านเข้าสู่อาคาร แต่จะทำการสะท้อนรังสีอินฟราเรดออกภายนอกอาคาร ทำให้ประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตแสงสว่าง และในระบบทำความเย็นภายในอาคารเป็นอย่างมาก โดยรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ผ่านได้จะเหลือเพียง 10-20% โดยเมื่อก่อนนี้เคลือบสะท้อนความร้อนของกระจกอาคารจะเป็นเพียงเคลือบฟิล์มชั้นเดียวส่วนใหญ่จะเป็นฟิล์มโลหะบางๆ เช่น โลหะพวกที่มีสีเทาๆ เช่น โครเมียม นิกเกิล เหล็กแอสเดนเลสไร้สนิม หรือโลหะพวกที่มีสี เช่น เงิน ทอง หรือทองแดง ฟิล์มโลหะเหล่านี้เมื่อเคลือบในสุญญากาศให้มีความบางเป็นพิเศษหรือความหนาน้อยกว่า 20 nm จะยอมให้แสงส่องผ่านในช่วงความยาวคลื่นขาว และจะเกิดการดูดกลืนและสะท้อนรังสีความร้อนเนื่องจากการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนที่อยู่ในฟิล์มโลหะ

## ผลผลิตที่ได้จากการใช้วิธีสปีดเตอริง

### อุปกรณ์ทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบฟิล์มตัวต้านทาน ซึ่งได้แก่ ฟิล์มของนิเกิล, โครเมียม, แทนทาลัม, ไททาเนียม ในไตรด์ ซึ่งเป็นฟิล์มความต้านทานที่มีความเสถียรสูง

การเคลือบฟิล์มตัวเก็บประจุ ซึ่งได้แก่การเคลือบสารไดอิเล็กตริกของแทนทาลัมออกไซด์, แบเรียมไททานเนต, ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ทำให้ตัวเก็บประจุมีขนาดเล็กและราคาถูก

การเคลือบฟิล์มในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, วงจรรวม (Integrated circuit), การเคลือบซิลิกอนมอนอกไซด์ลงบนผิวเคลือบบนเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้ปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านมีค่าสูงสุด

การเคลือบฟิล์มแม่เหล็ก ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์บันทึกความจำ เช่น เทป, แผ่นดิสก์, แผ่น CD ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์

การเคลือบผิวโฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductor) เช่น วัสดุที่ใช้ตรวจวัดรังสีอินฟราเรด มักจะเคลือบผิวด้วยตะกั่วซัลไฟด์, ตะกั่วเทลลูไรด์, ตะกั่วเทลลูไรด์ ซึ่งจะนำไฟฟ้าเมื่อรังสีที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นเกินกว่า 10 ไมครอน

การเคลือบฟิล์มบางตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor)

การเคลือบอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้กับรังสีอินฟราเรดหรือแสงเลเซอร์ เช่น ตัววัดความถี่เสียง, ตัววัดอุณหภูมิ, ตัววัดรังสี, เลเซอร์สำหรับวัฏระยะหรือระบบนำวิถีที่ใช้ในการทหาร, ระบบถ่ายภาพของดาวเทียม

## อุปกรณ์ทางแสง

การเคลือบเลนส์และกระจกเลเซอร์ ในกรณีของคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์( $\text{CO}_2$ ) กระจกหลังต้องมีคุณสมบัติสะท้อนรังสีความร้อน 100% กระจกดังกล่าวจะสร้างขึ้นจากการขัดผิวของโลหะแข็ง เช่น โมลิบดีนัมหรือทังสเตน จากนั้นจึงเคลือบด้วยทองคำซึ่งจะสะท้อนรังสีความร้อนได้ดีถึง 99.8%

การเคลือบกระจกจนวนกันความร้อน โดยทำการเคลือบสารที่สะท้อนรังสีความร้อนเป็นชั้นบางๆ และเนื่องจากวัสดุนี้บางมาก จึงยังยอมให้แสงส่องผ่านไปได้ เช่น การเคลือบทองคำ, ไททาเนียมไนไตรด์, อลูมิเนียม บางๆลงบนกระจก ทำให้มีคุณสมบัติสะท้อนรังสีความร้อนได้

การเคลือบแบบเลือกความถี่ คือ การเคลือบเพื่อให้ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางช่วงสามารถส่งผ่านได้ และดูดกลืนหรือสะท้อนบางความถี่ออกไป ซึ่งมีใช้มากในการเคลือบกระจกพิเศษแบบต่างๆ เช่น กระจกเย็น (Cold mirror), กระจกกรองความถี่บางช่วง (Band pass filter), เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจกตัดความถี่สูงหรือต่ำออก (edge filter), หรือกระจกกรองให้ผ่านได้เพียงความถี่แคบๆ (line filter)

การเคลือบกันสะท้อน เช่น กล้องถ่ายรูป เลนส์จุ่ม กล้องวิดีโอ กล้องทีวี หรือกล้องส่องทางไกลสมัยใหม่ที่มีคุณภาพสูง มักจะประกอบด้วยระบบเลนส์และปริซึมถึง 5-6 ตัวขึ้นไป ถ้าขอมให้เกิดการสูญเสียถึง 4-8% ทุกครั้งที่แสงในอากาศผ่านผิวแก้ว ปริมาณแสงที่ไปถึงจอร์รับภาพก็จะลดลงไปมากทีเดียว

### อุปกรณ์ที่ต้องการปรับสมบัติเชิงกลที่ผิวของวัสดุ

การเคลือบแข็ง (Hard coatings) ทนทานต่อการสึกหรอ ของใบมีด, ดอกสว่าน, แบริ่ง สำหรับเครื่องตัดเจาะ, เคลือบทนอุณหภูมิสูงสำหรับใบพัดไอพ่น เช่น เคลือบด้วยโลหะไททานเนียม ไนไตรด์, โลหะคาไบด์หรือเซอร์โคเนียมออกไซด์

การเคลือบแข็งด้วยฟิล์มเพชรหรือการเคลือบอ่อน (Soft coating) ด้วยโลหะผสมเพื่อลดการเสียดทานในการขัดสีระหว่างผิวของชิ้นส่วน โลหะที่สัมผัสกัน

การเคลือบเพื่อกันการกัดกร่อนด้วยสารที่กัดกร่อนยาก เช่น การเคลือบโลหะสแตนเลสลงบนตัวถังรถยนต์ เป็นต้น

### อุปกรณ์ทางเคมี

การเคลือบกันสนิมจาก ให้น้ำเค็มหรือเหงื่อไคล สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในทะเล

การเคลือบกันการกัดกร่อนของสารเคมี

การเคลือบผิวด้วยสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic coating)

### ชิ้นส่วนเครื่องประดับอัญมณีและชิ้นส่วนเครื่องสุขภัณฑ์

การเคลือบฟิล์มสีลงบนวัสดุ เช่น การเคลือบสีทองของโททานิยมไนไตรด์หรือสีเงินของโททานิยมคาร์ไบด์ ลงบนสายตัวเรือนนาฬิกา, กรอบแว่นตา, สร้อย, กำไล ซึ่งให้ทั้งความสวยงามและผิวที่แข็งแกร่งการขีดข่วน

### การเคลือบชิ้นส่วนอวัยวะเทียมที่ใช้ภายในร่างกายมนุษย์

การเคลือบโครเมียมลงบนพลาสติก เช่น ตะแกรงหน้ารถยนต์, การเคลือบชิ้นส่วนของเด็กเล่น เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง

#### บทนำ

การเกิดปรากฏการณ์สปัตเตอริง (Sputtering) ได้ถูกสังเกตพบครั้งแรกในหลอด ดีซี ก๊าซดิสชาร์จ (DC discharge tube) โดย Grove ในปี ค.ศ. 1852 ซึ่งเขาได้เป็นผู้ค้นพบ Cathode Surface ของหลอดก๊าซดิสชาร์จ ขณะถูกสปัตเตอริง จากไอออนที่มีพลังงานสูง (energetic ions) ที่เกิดจากการดิสชาร์จของก๊าซกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วคาโทดทำให้เกิดการเคลื่อนขึ้นที่บริเวณผิวด้านในของหลอดก๊าซดิสชาร์จ

ซึ่งในขณะนั้น ปรากฏการณ์สปัตเตอริง ถูกมองว่าเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงปรารถนา เนื่องจากคาโทดและกริด (grid) ในหลอดก๊าซดิสชาร์จจะถูกทำลาย อย่างไรก็ตามจนถึงขณะนี้ปรากฏการณ์สปัตเตอริงได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง สำหรับการทำความสะอาดพื้นผิว (Surface cleaning) และการทำ etching , การเคลือบฟิล์มบาง , การวิเคราะห์ผิวและชั้นผิว (Surface layer analysis) , และการสร้างแหล่งกำเนิด sputter ions

สปัตเตอริง เป็นขบวนการที่อะตอมที่ผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ ขบวนการนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในขบวนการสปัตเตอริง ก็คือ

1. มีสารเคลือบเป็นเป้า (Target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอม ของสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นรองรับ

2. มีอนุภาคพลังงานสูงวิ่งชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 อีเลคตรอนโวลต์ (eV) เพื่อใช้ในขบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ โดยทั่วไป คือ การเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามความต้องการ อีเลคตรอนเป็นอนุภาคประจุชนิดหนึ่งที่ยืดต่อการผลิตและเร่งให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัม ต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้ขบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้ การชนกันระหว่าง 2 อนุภาค ที่ให้การส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุด ก็คือเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเกือบเท่ากันหรือเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนบวกของก๊าซในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาคที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยของเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ขบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มเคลือบตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือผลิตได้จากขบวนการโกลว์ดีสชาร์จ (Glow discharge) เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ ดังนั้นขบวนการสปัตเตอริงในระดับอุตสาหกรรมทั่วไป จึงเป็นที่นิยมใช้วิธีขบวนการโกลว์ดีสชาร์จ ซึ่งได้ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ด้วย

### ขบวนการเกิดปรากฏการณ์สปัตเตอริง

ขบวนการเกิดปรากฏการณ์สปัตเตอริง จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

#### ค่าyieldของการสปัตเตอริง (Sputter Yields)

ค่าyieldของการสปัตเตอริง คือ ค่าเฉลี่ยของการหลุดออกของอะตอมที่ผิวเป้าสารเคลือบ เนื่องจากการเข้าชนของไอออน ซึ่งสามารถกำหนดเป็น ค่าเฉลี่ยของจำนวนอะตอมที่หลุดออกจากผิวของเป้าสารเคลือบต่อค่าเฉลี่ยของจำนวนไอออนที่ตกกระทบเป้าสารเคลือบ มีหน่วยเป็น atom ต่อ ion

$$S = \frac{\text{atoms - removed}}{\text{incident - ions}} \quad (1)$$

โดยที่ S เป็นค่าyieldของการสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าyieldของการสปีดเตอร์ S สามารถวัดออกมาได้โดยวิธีเหล่านี้ คือ

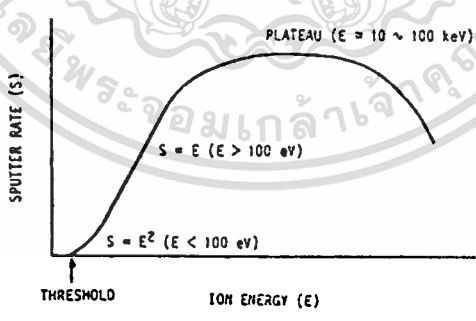
1. หาน้ำหนักที่ลดลงของเป้าสารเคลือบ
2. หาจากความหนาที่ลดลงของเป้าสารเคลือบ
3. หาจากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปีดเตอร์
4. หาจากการตรวจวัดอนุภาคสปีดเตอร์ ในขณะที่ยังฟุ้งกระจายอยู่

สปีดเตอร์จึงมีสาเหตุมาจากอันตรกิริยาระหว่าง อนุภาคที่มากกระทบกับอะตอมที่ผิวเป้าสารเคลือบ ดังนั้นค่าyieldของการสปีดเตอร์จะแปรเปลี่ยนไปตามแฟกเตอร์ต่อไปนี้คือ

พลังงานของไอออนที่ตกกระทบเป้าสารเคลือบ จากภาพที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Sputter Yield กับค่า Incident Ion Energy จากรูปทำให้ทราบว่า

- 1) ในขณะที่พลังงานของไอออนมีค่าต่ำมาก ค่าyieldของการสปีดเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้
- 2) ค่าyieldของการสปีดเตอร์จึงมีค่าสูงสุดในบริเวณที่พลังงานไอออนมีค่าสูง แต่เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมากขึ้นอีกจะทำให้ค่าyieldมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการฝังตัวของไอออนบนผิวเป้าสารเคลือบเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 1



แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าyieldที่สัมพันธ์กับพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ

ผู้ที่ค้นพบค่าพลังงานเทอร์ชโฮลด์ของการสปีดเตอร์ริง (Sputtering Threshold) หรือค่าพลังงานของไอออนที่สูงมากพอในการทำให้เกิดขบวนการชนอย่างต่อเนื่องและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบ ก็คือ Hull ในปี คศ.1923 เขาพบว่าในขณะที่ทดลอง ด้วยหลอดบรรจุก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีขั้วคาโทดแบบ TH-W thermionic จะถูกทำลายโดยการพุ่งเข้าชนอย่างต่อเนื่องของไอออน เมื่อไอออนเหล่านี้ มีพลังงานเกินค่าวิกฤติ หรืออยู่ในช่วง 20 ถึง 30 eV ซึ่งก็คือค่า พลังงานเทอร์ชโวลต์ของคาโทดกับก๊าซที่บรรจุอยู่ในหลอดนั่นเอง จากนั้นมา ก็มีผู้ศึกษาอย่างมากมายเกี่ยวกับค่าพลังงานเทอร์ชโวลต์ โดยเขาเหล่านั้นสามารถหาค่าพลังงานเทอร์ชโวลต์ระหว่างคาโทดกับก๊าซที่ใช้ชนิดต่างๆ ได้ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 300 eV ค่าพลังงานเทอร์ชโวลต์นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วมาก ถ้าหากเกิดมีสิ่งเปอะเปื้อนขึ้นที่บริเวณพื้นผิวคาโทด

ในปี คศ.1962 Stuart และ Wehner ได้ทำการวัดหาค่าพลังงานเทอร์ชโวลต์ที่เหมาะสมโดยใช้วิธี Spectroscopic เขาพบว่าค่าพลังงานเทอร์ชโวลต์จะอยู่ในช่วง 15 ถึง 30 eV ซึ่งตรงกันกับผลของ Hull

หลอดก๊าซดิสชาร์จที่ Stuart และ Wehner ใช้นั้นแสดงดังในภาพที่ 2 โดยที่เป่าอยู่ในช่วงลำพลาสมา ซึ่งเกิดจากการดิสชาร์จของก๊าซเฉื่อยที่มีความดันต่ำ ภายในหลอดเมอร์คิวรี (Mercury) ความดันประมาณ  $10^{-5}$  ทอร์ หรือน้อยกว่า และอุณหภูมิของเป่าจะต้องรักษาไว้ไม่ให้เกิน 300 องศาเซลเซียส อะตอมของเป่าสารเคลือบที่ถูกสปัตเตอร์จะปลดปล่อยสเปกตรัมออกมาเฉพาะช่วงหนึ่งๆ

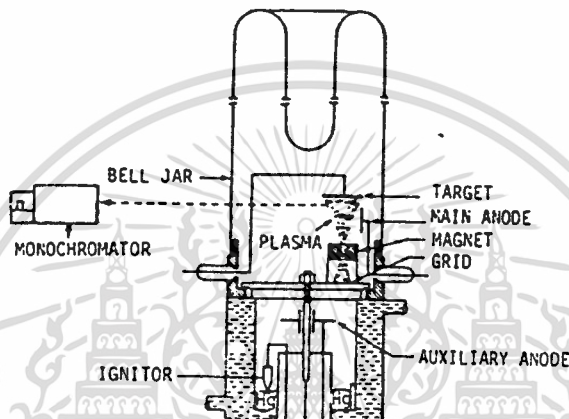
ค่าyieldของการสปัตเตอร์ (Sputter Yields) ของเป่าสารเคลือบชนิดต่างๆ ซึ่งทำการวัดหาค่ามาโดย Stuart และ Wehner จะแสดงดังในภาพที่ 3 พร้อมทั้งค่าพลังงานเทอร์ชโวลต์จะกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วงของค่าyieldของการสปัตเตอร์ประมาณ  $10^4$  ถึง  $10^5$  อะตอมต่อไอออน ดังนั้นจะได้ตารางที่ 1 ออกมาซึ่งเป็นผลสรุปของค่าพลังงานเทอร์ชโวลต์ของการสปัตเตอร์ของวัสดุที่ใช้ทำเป่าชนิดต่างๆ ที่วัดได้โดยใช้วิธี Spectroscopic

จากภาพที่ 3 เราพบว่าที่บริเวณที่ไอออนมีพลังงานต่ำ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าyieldของการสปัตเตอร์ S กับค่าพลังงานของไอออน E จะมีความสัมพันธ์เป็น  $S \propto E^2$  และที่บริเวณพลังงานไอออนมีค่าเป็น 100 eV ขึ้นไป ค่าความสัมพันธ์จะเป็น  $S \propto E$  เนื่องจาก ไอออนที่เข้าชนกับอะตอมที่ผิวเป่าสารเคลือบ จะมีพลังงานสูงมากพอที่จะทำให้จำนวนอะตอมเป่าสารเคลือบที่หลุดออกไปเนื่องจากการชน จะเป็นสัดส่วนกันกับค่าพลังงานไอออนที่เข้าชน

ที่พลังงานไอออนมีค่าสูงระหว่าง 10 ถึง 100 keV ไอออนเหล่านี้จะเข้าชนลึกลงไปภายใต้ผิวเป่าสารเคลือบ และทำให้การปลดปล่อยอะตอมของเป่าสารเคลือบไม่เกิดที่บริเวณผิว แต่มันจะเกิดขึ้นภายในเป่าสารเคลือบที่ลึกลงไป และถ้าไอออนมีพลังงานสูงกว่า 100 keV การปลดปล่อยอะตอมจะลดลง เนื่องจากการสูญเสียพลังงานของไอออนที่ตกกระทบแล้วฝังลึกลงในเนื้อเป่าสารเคลือบ

ค่าสูงสุดของค่าyieldของการสปีดเตอร์ (Maximum Sputter Yields) จะสามารถดูได้จากบริเวณที่พลังงานไอออนมีค่าประมาณ 10 keV ดังแสดงในภาพที่ 4 เป็นผลสรุปของค่าyieldของการสปีดเตอร์ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานไอออนระหว่าง 100 eV ถึง  $10^3$  keV ซึ่งทำการหาออกมาโดย Sigmund

ภาพที่ 2



แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการวัดค่าพลังงานเทรซโซลด์

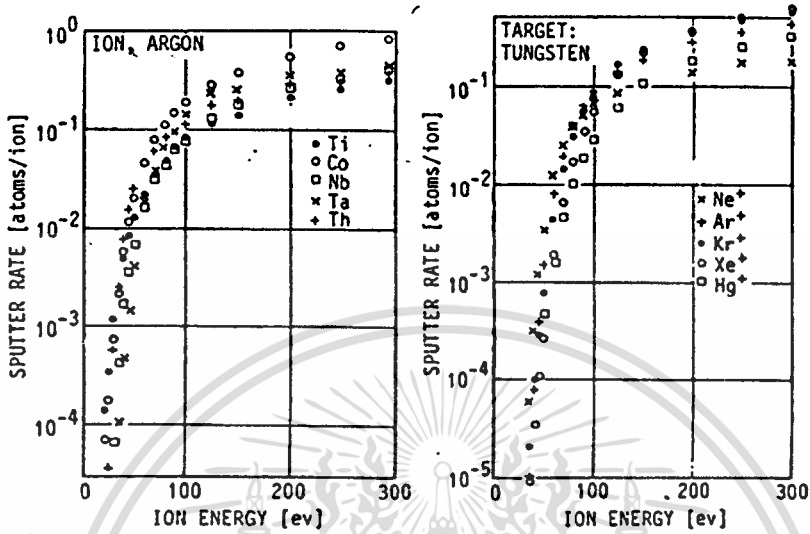
วัสดุที่ใช้ทำเป้าสารเคลือบและชนิดของ ไอออนที่ตกกระทบ ข้อมูลค่าyieldของการสปีดเตอร์ที่เก็บรวบรวมไว้ นี้ จะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับเรื่อง Gas Discharge , Sputter Deposition , Etching , Surface Analysis และ Radiation Damage

Laegreid และ Wehner ได้จัดรวบรวมข้อมูลที่เหมาะสมของค่าyieldของการสปีดเตอร์ ในหลอดก๊าซดิสชาร์จความดันต่ำ โดยค่าyieldที่ได้ยังเป็นข้อมูลที่กว้างๆ ภาพที่ 5 แสดงการจัดวางของระบบสปีดเตอร์ของ Wehner's โดยอาศัยหลักการเดียวกับระบบหลอดดิสชาร์จของปรอท (Mercury discharge tube) โดยทำการดิสชาร์จที่ค่าความดันก๊าซต่ำๆ และมีคาโทดเป็นแบบ Thermionic Mercury จากนั้นจึงทำการดิสชาร์จก๊าซ Hg ที่ความดัน  $1 \times 10^{-3}$  torr แล้วจึงเปลี่ยนก๊าซเป็นก๊าซชนิดอื่นๆ ตามนี้ คือ ดิสชาร์จก๊าซ Ar ที่  $2 \sim 5 \times 10^{-3}$  torr , Ne ที่  $4 \times 10^{-2}$  torr จะได้ค่าyieldของสปีดเตอร์เป็น

$$S = 10^5 (W/AIt) \quad (2)$$

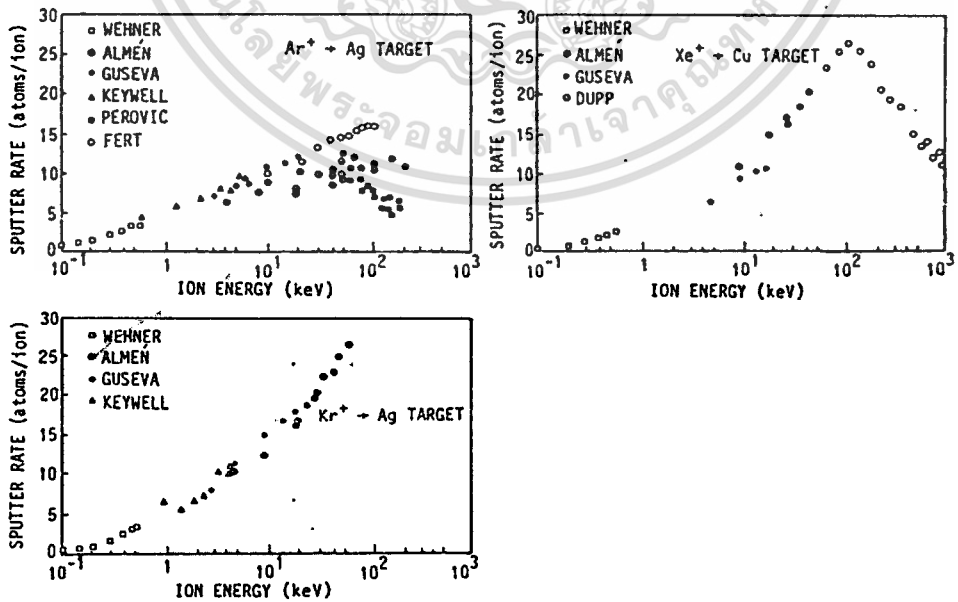
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3



แสดงความสัมพันธ์ของค่าyieldของการสปีดเตอร์กับค่าพลังงานของไอออน

ภาพที่ 4



แสดงค่า Sputter Yields ที่เป็นฟังก์ชันกับค่าพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1  
แสดงข้อมูลของค่าพลังงานเทรชโฮลด์ของการสปีดเตอริง

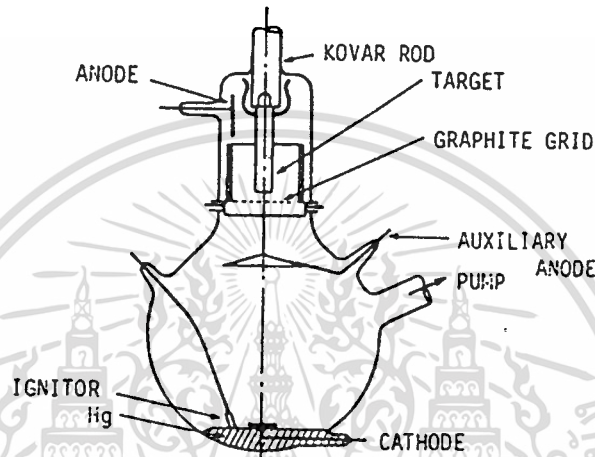
(eV)	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	H
Be	12	15	15	15	-	-
Al	13	13	15	18	18	-
Ti	22	20	17	18	25	4.40
V	21	23	25	28	25	5.28
Cr	22	22	18	20	23	4.03
Fe	22	20	25	23	25	4.12
Co	20	25	25	22	-	4.40
Ni	23	21	25	20	-	4.41
Cu	17	17	16	15	20	3.53
Ge	23	25	22	18	25	4.07
Zr	23	22	18	25	30	6.14
Nb	27	25	26	32	-	7.71
Mo	24	24	28	27	32	6.15
Rh	25	24	25	25	-	5.98
Pd	20	20	20	15	20	4.08
Ag	12	15	15	17	-	3.35
Ta	25	26	30	30	30	8.02
W	35	33	30	30	30	8.80
Re	35	35	25	30	35	-
Pt	27	25	22	22	25	5.60
Au	20	20	20	18	-	3.90
Th	20	24	25	25	-	7.07
U	20	23	25	22	27	9.57
Ir		(8)				5.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $W$  เป็นน้ำหนักที่หายไปของเป้าสารเคลือบ ระหว่างทำการสปีดเตอริงเป็นเวลา  $t$  ด้วยกระแสไอออน  $I$  ที่ไหลผ่านเป้าสารเคลือบ

$A$  เป็น Atomic number ของวัสดุที่ใช้ทำเป้าสารเคลือบ

ภาพที่ 5



แสดงการจัดวางอุปกรณ์การทดลองของ Wehner's สำหรับการวัดค่าyield ของการสปีดเตอริง

ผลลัพธ์การทดลอง จะแสดงในภาพที่ 6 และในตารางที่ 2 ซึ่งในการชนตรงระหว่าง 2 อนุภาค

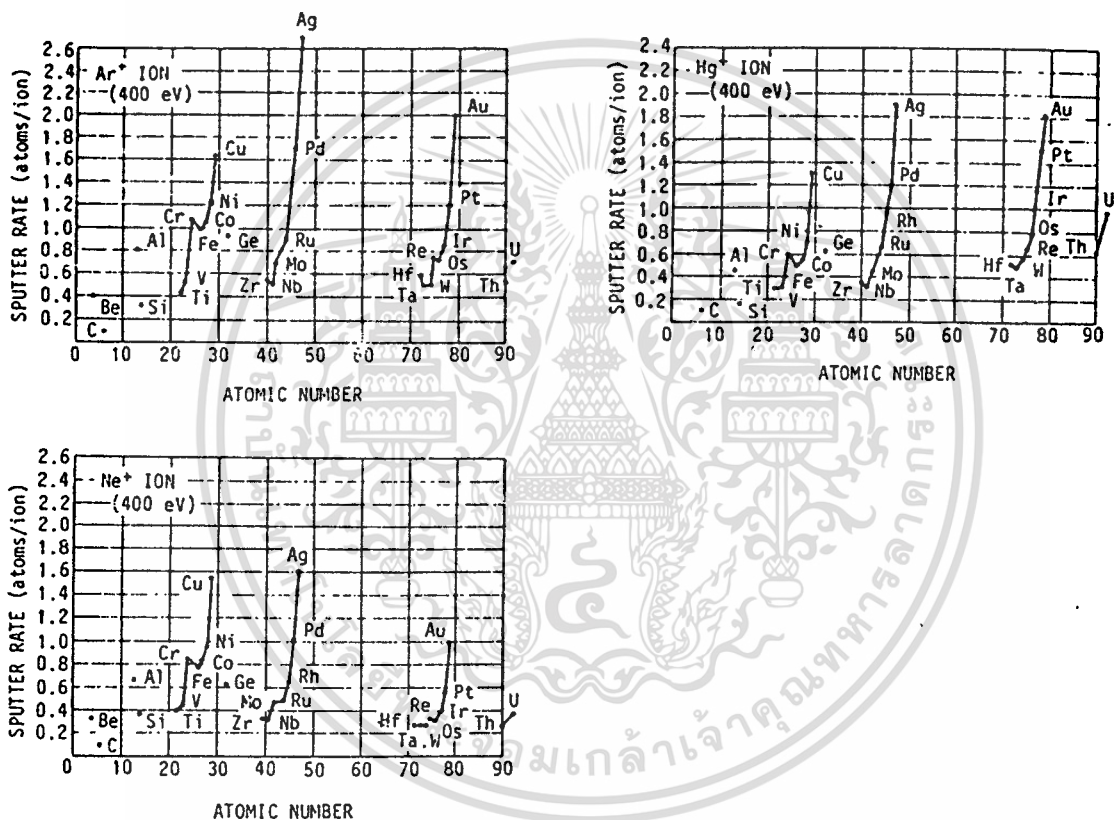
$$\text{การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาค} = \frac{4mM}{(m+M)^2} \quad (3)$$

เมื่อ  $m$  = มวลของอะตอมที่ถูกชน ,  $M$  = มวลของอะตอมที่วิ่งชน

จากสมการจะแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาค ที่เกิดการชนกันจะมีค่าสูงสุด เมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียง จึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยว ดังนั้น จึงพบว่า yield จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบ ดังนั้น ค่า yield ที่บันทึกในตารางที่ 2 จะมีค่าตรงกันกับค่า  $S/(1+\gamma)$  โดยที่  $\gamma$  เป็นสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary Electron Emission Coefficient) ของวัสดุที่ใช้เป็นเป้าสารเคลือบ ซึ่งค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์  $\gamma$  นี้เกิดจากการรวมเข้าด้วยกันของไอออนที่เข้าชนกับวัสดุที่ใช้เป็นเป้าสารเคลือบชนิดต่างๆ แล้วปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ดังแสดงในตารางที่ 3 สำหรับการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ชนิดนี้ ค่าพลังงานของไอออนที่เข้าชนจะอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่า 1,000 eV โดยมีสัมประสิทธิ์  $\gamma \cong 0.1$  สำหรับก๊าซ  $\text{Ar}^+$  และค่าผิดพลาดทางข้อมูลของ Wehner's จะมีค่าน้อยกว่า 10 % ถึงแม้ว่า ผลของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองจะไม่ถูกนำมาพิจารณาด้วยก็ตาม

ภาพที่ 6



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Sputter Yields กับค่า Atomic Number เมื่อทำการเร่งไอออน  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ne}^+$  และ  $\text{Hg}^+$  เข้าชนเป้าที่ทำจากธาตุชนิดต่างๆ

เมื่อเร็วๆ นี้ เทคนิค PIXE ได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าซีลด์ของการสปัตเตอร์ของ Cr, S (Cr) โดยจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จาก Wehner. Sartwell ได้นำเอาเทคนิค PIXE มาใช้วัดหาค่าซีลด์ของ S(Cr) ได้เท่ากับ 0.93 อะตอม/ไอออน ที่พลังงานไอออน  $\text{Ar}^+$  มีค่า 1.0 keV สำหรับ Wehner ได้ทำรายงานค่าซีลด์ของ  $S(\text{Cr}) = 1.18$  อะตอม/ไอออน ที่ 500 eV ดังแสดงในภาพที่ 6 และตารางที่ 2 โดยจะมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จากเทคนิค PIXE 1.5 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2  
แสดงค่า Sputter Yield

Target	Ne <sup>+</sup> (eV)				Ar <sup>+</sup> (eV)			
	100	200	300	600	100	200	300	600
Be	0.012	0.10	0.26	0.56	0.074	0.18	0.29	0.80
Al	0.031	0.24	0.43	0.83	0.11	0.35	0.65	1.24
Si	0.034	0.13	0.25	0.54	0.07	0.18	0.31	0.53
Ti	0.08	0.22	0.30	0.45	0.081	0.22	0.33	0.58
V	0.06	0.17	0.36	0.55	0.11	0.31	0.41	0.70
Cr	0.18	0.49	0.73	1.05	0.30	0.67	0.87	1.30
Fe	0.18	0.38	0.62	0.97	0.20	0.53	0.76	1.26
Co	0.084	0.41	0.64	0.99	0.15	0.57	0.81	1.36
Ni	0.22	0.46	0.65	1.34	0.28	0.66	0.95	1.52
Cu	0.26	0.84	1.20	2.00	0.48	1.10	1.59	2.30
Ge	0.12	0.32	0.48	0.82	0.22	0.50	0.74	1.22
Zr	0.054	0.17	0.27	0.42	0.12	0.28	0.41	0.75
Nb	0.051	0.16	0.23	0.42	0.068	0.25	0.40	0.65
Mo	0.10	0.24	0.34	0.54	0.13	0.40	0.58	0.93
Ru	0.078	0.26	0.38	0.67	0.14	0.41	0.68	1.30
Rh	0.081	0.36	0.52	0.77	0.19	0.55	0.86	1.46
Pd	0.14	0.59	0.82	1.32	0.42	1.00	1.44	2.39
Ag	0.27	1.00	1.30	1.98	0.63	1.58	2.20	3.40
Hf	0.057	0.15	0.22	0.39	0.16	0.35	0.48	0.83
Ta	0.056	0.13	0.18	0.30	0.10	0.28	0.41	0.62
W	0.038	0.13	0.18	0.32	0.068	0.29	0.40	0.62
Re	0.04	0.15	0.24	0.42	0.10	0.37	0.56	0.91
Os	0.032	0.16	0.24	0.41	0.057	0.36	0.56	0.95
Ir	0.069	0.21	0.30	0.46	0.12	0.43	0.70	1.17
Pt	0.12	0.31	0.44	0.70	0.20	0.63	0.95	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 6 ซึ่งให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าyieldของการสปีดเตอริงนี้พบว่ามีค่าสูงสุดเป็นช่วงๆ ณ ตำแหน่งเลขอะตอมของธาตุ Cu , Ag และ Au ส่วนสาเหตุของการเกิดจุดสูงสุดของค่าyieldเป็นช่วงๆ นี้ยังไม่คำอธิบายที่กระจ่าง

### ตารางที่ 3

แสดงค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง  $\gamma$

Target Materials	Incident Ion	Ion Energy (eV)		
		200	600	1000
W	He <sup>+</sup>	0.524	0.24	0.258
	Ne <sup>+</sup>	0.258	0.25	0.25
	Ar <sup>+</sup>	0.1	0.104	0.108
	Kr <sup>+</sup>	0.05	0.054	0.058
	Xe <sup>+</sup>	0.016	0.016	0.016
Mo	He <sup>+</sup>	0.215	0.225	0.245
	He <sup>++</sup>	0.715	0.77	0.77
Ni	He <sup>+</sup>		0.6	0.84
	Ne <sup>+</sup>			0.53
	Ar <sup>+</sup>		0.09	0.156

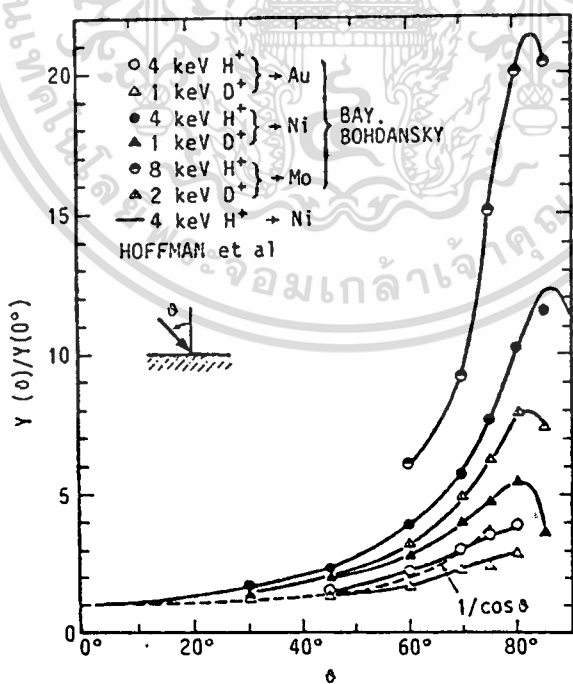
ผลของมุมเข้าชนของไอออน ค่าyieldของการสปีดเตอริงจะแปรเปลี่ยนไปตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ Fetz ได้ทำการศึกษาผลกระทบบของไอออนที่ตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1942 และหลังจากนั้น Wehner ก็เป็นผู้เข้ามาศึกษาในเรื่องนี้ต่อมา เขาพบว่าโลหะที่ใช้ทำเป้าที่ทำจาก Au , Ag , Cu และ Pt ซึ่งมีค่าyieldของการสปีดเตอริงสูง จะมีผลเนื่องจากมุมตกกระทบน้อยมาก ส่วนโลหะที่ใช้ทำเป้าที่เป็น Fe , Ta และ Mo จะมีค่าyieldของการสปีดเตอริงต่ำ จะมีผลเนื่องจากมุมตกกระทบอยู่มากและค่าyieldจะมีค่าสูงขึ้นตามค่ามุมตกกระทบ จนจะมีค่าสูงสุดอยู่ระหว่างมุมตกกระทบที่มีค่าเป็น 60° และ 80° และจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากขึ้นจนถึง 90° ผลกระทบบเนื่องจากมุมตกกระทบส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่โครงสร้างของผิวเป้าสารเคลือบ ได้มีการทำการศึกษาทฤษฎีหลายทฤษฎีจากหลายๆ คน จนเมื่อเร็วๆ นี้สามารถหาผลลัพธ์เกี่ยวกับเรื่องมุมตกกระทบของไอออน โดย Bay และ Bohdansky ดังแสดงในภาพที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 8 แสดงการกระจายเชิงมุมของอะตอมที่หลุดออกมา เนื่องจากการสปีดเตอร์ริง สำหรับการพุ่งเข้าชนของไอออนที่ทำมุมเอียง  $60^\circ$  โดยทำการวัดโดย Okutani et al และอะตอมที่หลุดออกมานี้จะมีทิศทางเป็นแบบ forward direction การกระจายเชิงมุมของอะตอมที่หลุดออกมา เนื่องจากการเข้าชนแบบปกติของไอออน ได้ถูกศึกษาในช่วงต่างๆ ของพลังงานไอออน Seeliger และ Somermeyer ได้ทำการวัดข้อมูลในช่วงของพลังงานไอออนมีค่าสูงประมาณ 10 keV การทดลองนี้ได้ทำการหาค่าการกระจายเชิงมุมออกมา โดยใช้กฎของ Knudsen's cosine law. Wehner และ Rosenberg ได้ทำการวัดการกระจายเชิงมุมของไอออนที่มีพลังงานต่ำๆ ในช่วง 100 ถึง 1,000 eV ในหลอดคิสซาร์จความดันต่ำเมอร์คูรี ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยมีเป้าสารเคลือบเป็นชั้นขี้ขาว วางอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแก้วทรงกระบอก ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของอะตอมที่หลุดออกมาจากการถูกสปีดเตอร์ริงครอบคลุมทั้งหมด  $180^\circ$  ของการกระจายเชิงมุม ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะแสดงอยู่ในภาพที่ 10 จากรูปพบว่าการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบ จะมีทิศทางไปทางด้านข้างของเป้าหมายมากกว่าหลุดออกมาจากผิว

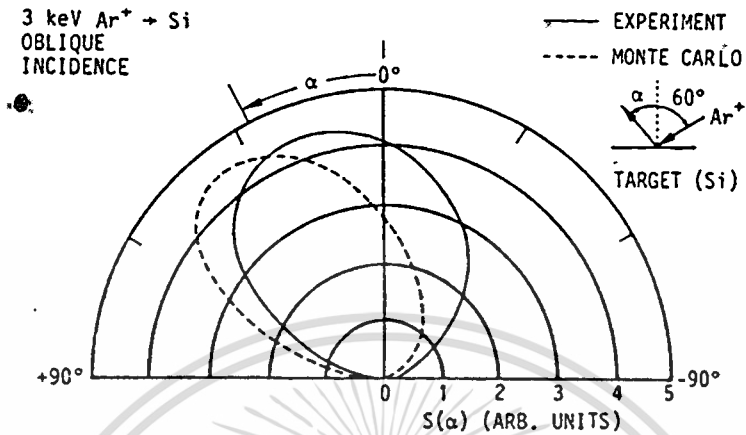
ภาพที่ 7



แสดงค่าปัดซ์ของการสปีดเตอร์ ที่สัมพันธ์กับค่ามุมตกกระทบของไอออนที่เข้าชน

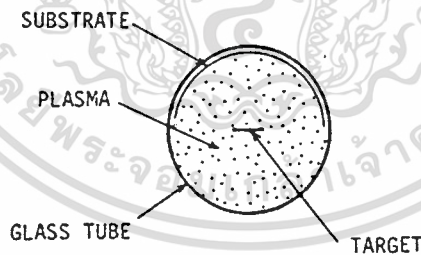
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 8



แสดงการกระจายเชิงมุมของอะตอม Si ที่หลุดออกเมื่อถูกชนด้วยไอออน Ar<sup>+</sup>  
ที่พลังงาน 3.keV โดยมีมุมตกกระทบ 60°

ภาพที่ 9



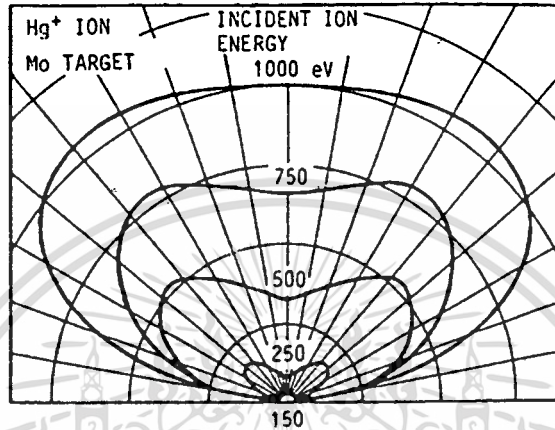
แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองสเปคโตริง สำหรับใช้วัดการกระจายเชิงมุม

โครงสร้างของผลึกผิวเป่าสารเคลือบ ค่าซิลด์จะแปรเปลี่ยนไปตามระนาบผลึกของผิวเป่าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป่าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยว ค่าซิลด์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อไอออนชนเป่าในแนวระนาบที่มีอะตอมอยู่หนาแน่นที่สุด และจะมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบาง ในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (face centered cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมสูงสุด ยังผลให้ซิลด์มีค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่าพลังงานของไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

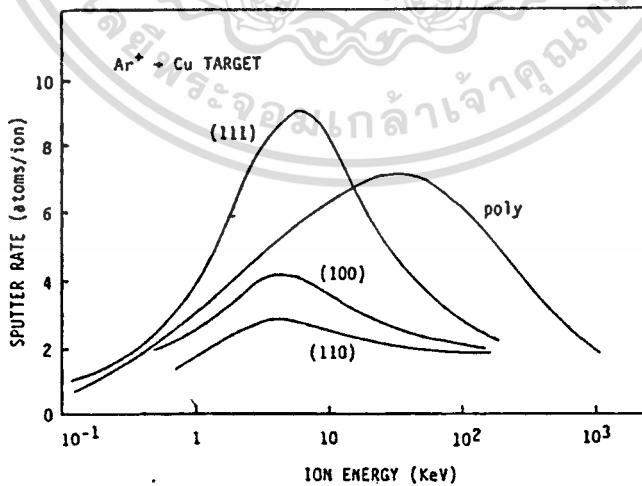
ในการชนค่าเดียวกัน ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนจะมีแนวโน้มวิ่งฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น

ภาพที่ 10



แสดงการกระจายเชิงมุมของอะตอมที่หลุดออกจากการสปีดเตอร์

ภาพที่ 11



แสดงค่าขีดของการสปีดเตอร์ที่แตกต่างกันเมื่อไอออนของก๊าซ  $\text{Ar}^+$  วิ่งชนเป้า Cu ในระนาบที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อะตอมสปัตเตอร์ริง (Sputtered Atom)

ลักษณะของอะตอมสปัตเตอร์ ในระบบสปัตเตอร์ริงนั้นอะตอมสปัตเตอร์ โดยปกติจะมีประจุเป็นนิวทรัล และเป็นอะตอมเดี่ยวของวัตถุนิคเดียวกับที่ใช้ทำเป้าสารเคลือบ แต่จะมีอะตอมสปัตเตอร์บางส่วนที่ถูกไอออนไนซ์ โดยอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์มีอยู่ไม่กี่เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าน้อยมากที่ตกอยู่ในพื้นที่ที่เกิดการดิซซาร์จทางไฟฟ้าอยู่ภายในระบบสปัตเตอร์ริง

Woodyard และ Cooper ได้ศึกษาลักษณะของอะตอม Cu ที่ถูกสปัตเตอร์ภายใต้การเข้าชนของไอออนของก๊าซ Ar พลังงาน 100 eV โดยใช้เครื่อง mass spectrometer เขาพบว่า 95% ของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์จะเป็นอะตอมเดี่ยวของ Cu และส่วนที่เหลืออีก 5% จะเป็นโมเลกุลของ  $Cu_2$

ภายใต้การเข้าชนของไอออนที่มีพลังงานสูงๆ พบว่า อะตอมสปัตเตอร์จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มโมเลกุลใหญ่ๆ Herzog ได้แสดงให้เห็นว่าอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ที่หลุดจากเป้าที่ทำด้วย Al เมื่อถูกชนด้วยไอออนของก๊าซ Ar พลังงาน 12 keV จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มอะตอมของ Al<sub>7</sub> และถ้าเปลี่ยนไอออนที่เข้าชนเป็น Xe จะได้กลุ่มอะตอมเป็น Al<sub>13</sub>

สำหรับเป้าที่ทำจากอัลลอยด์ ลักษณะของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์จะมีลักษณะคล้ายๆ กันกับของเป้าที่เป็นอะตอมเดี่ยว (single atom) เมื่ออยู่ภายใต้การตกกระทบของไอออนที่มีพลังงานต่ำ อะตอมสปัตเตอร์จะมีลักษณะเป็นอะตอมเดี่ยวของธาตุอัลลอยด์นั้นๆ และจะมีลักษณะเป็นกลุ่มอะตอม เมื่อไอออนที่เข้าชนมีพลังงานสูงกว่า 10 keV

ความเร็วและพลังงานของอะตอมสปัตเตอร์ พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมาด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง จะมีค่าพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกมาด้วยวิธีการระเหยสาร (Evaporation) ประมาณ 50 - 100 เท่า อะตอมมีการกระจายค่าพลังงานเป็นแบบ Maxwellian โดยที่พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีค่าพลังงานระหว่าง 10 - 40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีค่าพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปัตเตอร์ริงจะมีค่าสูงขึ้นด้วย จนเมื่อไอออนที่วิ่งเข้าชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปัตเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นอีก และเป้าที่มีค่าซีลด์สูงจะมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำ เนื่องจากไอออนที่วิ่งเข้าชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมาก อะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง

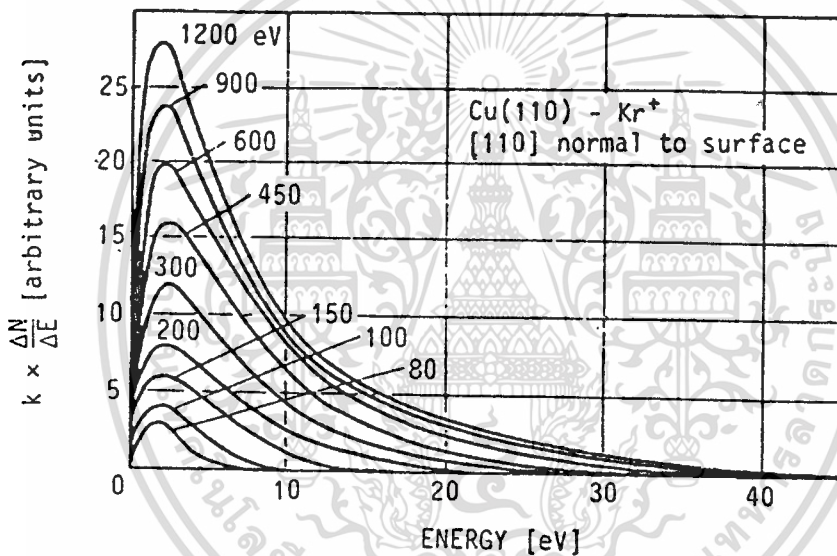
จากภาพที่ 12 แสดงผลการตกกระทบของไอออนก๊าซ Kr ลงบนเป้า Cu โดยแสดงค่าพลังงานจลน์ของอะตอมที่หลุดออกมาเนื่องจากการถูกสปัตเตอร์อยู่ในช่วง 0 ถึง 40 eV เมื่อถูกตกกระทบด้วยไอออนของก๊าซ Kr ที่มีพลังงานตั้งแต่ค่า 80 ถึง 1,200 eV จากรูปค่าสูงสุดของการกระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ่ายพลังงานจะอยู่ที่ พลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์หลุดออกมีค่าพลังงาน eV น้อยๆ และมากกว่า 90% ของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์หลุดออกมาจะมีพลังงานจลน์มากกว่า 1 eV

พลังงานของอะตอมที่หลุดออกเนื่องจากการสปีดเตอร์จริง จะขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่ตกกระทบและมุมตกกระทบของไอออน โดยจะมีผลดังแสดงในภาพที่ 13 และ 14 ส่วนภาพที่ 15 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์หลุดออกมา ที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ

ภาพที่ 12

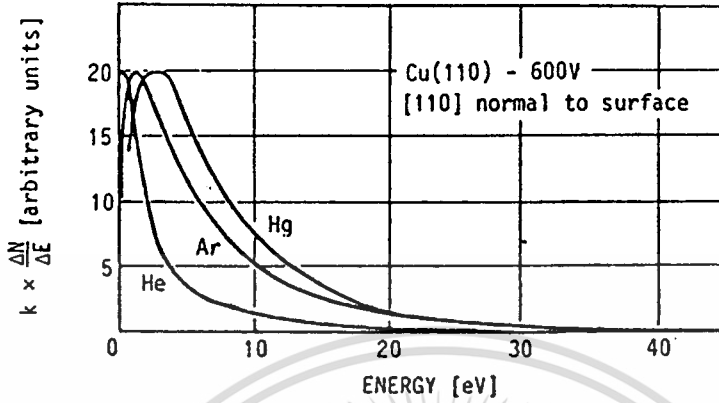


แสดงการกระจายพลังงานของอะตอม Cu ที่ถูกสปีดเตอร์ด้วยไอออนของก๊าซ Kr ที่ตกกระทบด้วยค่าพลังงานต่างๆ

ผลที่ได้จากภาพที่ 15 ทำให้ทราบว่า เมื่อไอออนที่เข้าชนเป่ามีค่าพลังงานสูงขึ้น ค่าพลังงานสูญเสียภายในเป่าก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้พลังงานของไอออนที่ตกกระทบไม่มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานไปยังอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์ โดยไอออนที่ตกกระทบที่มีพลังงานเกิน 1 keV จะทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากว่า เมื่อไอออนมีพลังงานจลน์สูงๆ เข้ามาตกกระทบ จะทำให้ไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอที่จะผ่านเข้าไปในเนื้อเป่าสารเคลือบได้ยิ่งลึกลงไปในตัวเป่า ทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นไปตามความลึกของไอออนนั่นเอง

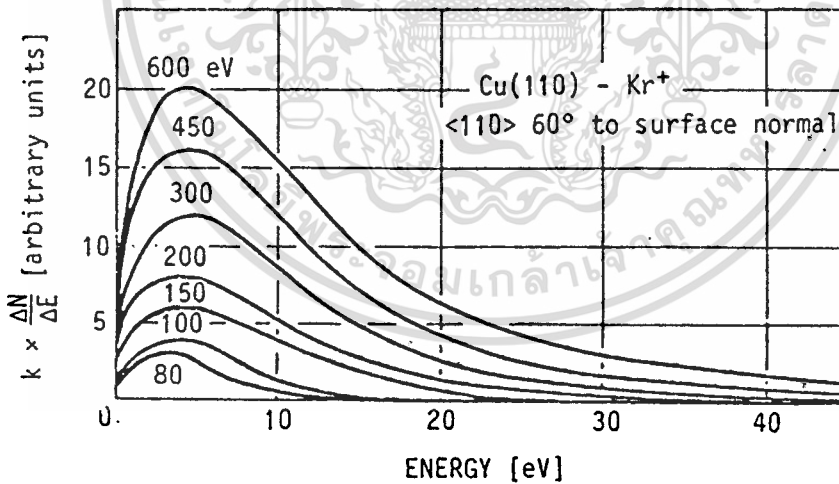
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 13



แสดงการกระจายพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์ โดยไอออนตกกระทบชนิดต่างๆ

ภาพที่ 14

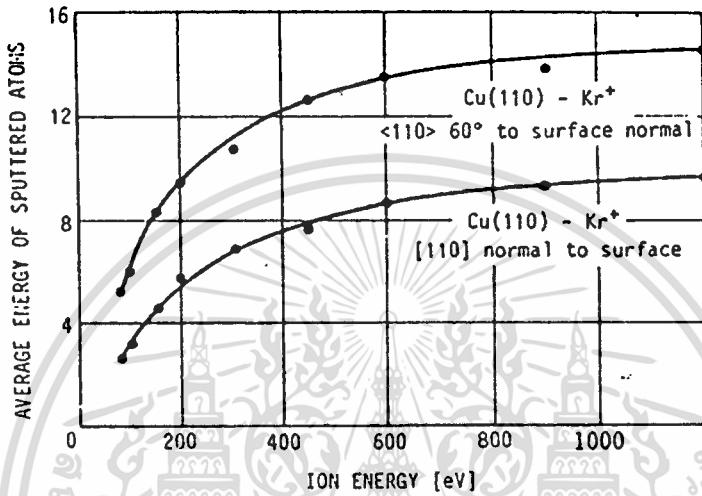


แสดงการกระจายพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์ โดยไอออน  $Kr^+$  ที่ค่าพลังงานต่างๆ

Mean Free Path ( $\bar{\lambda}$ ) จะเป็นการศึกษาการกระจายของค่า free path ด้วยการสมมุติโมเดลง่ายๆ ให้เป็นแบบ "ballistic" ดังในภาพที่ 16 สำหรับค่า free path นี้จะถูกกำหนดให้เป็นระยะทางระหว่างโมเลกุลหรือระยะทางระหว่างอนุภาคที่เคลื่อนที่มาชนกัน และเป็นค่าสุ่มขึ้นมา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลานำมาใช้เราจะใช้เป็นค่าระยะเฉลี่ย หรือเรียกว่า “mean free path” ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของอนุภาคหรือโมเลกุลภายในแชมเบอร์

ภาพที่ 15



แสดงพลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์

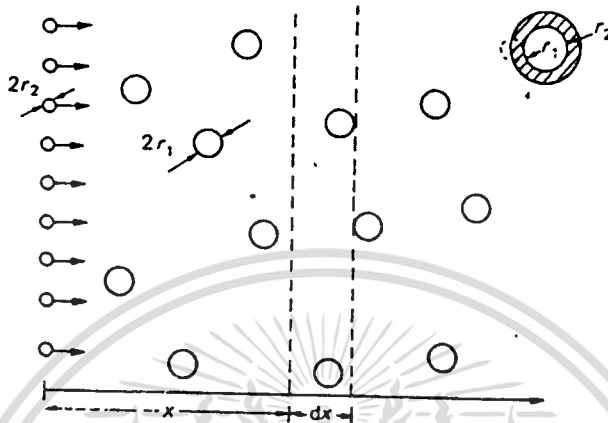
อะตอมที่ถูกสปีดเตอร์แล้วหลุดออกมา ส่วนใหญ่จะเดินทางผ่านตลอดช่วง discharge space ในรูปของ neutral atoms ดังนั้นค่า mean free path ( $\bar{\lambda}$ ) จะเป็นค่าที่สมมุติให้เป็น ระยะระหว่างรัศมีของโมเลกุลที่ไม่เคลื่อนที่  $r_1$  กับรัศมีของอนุภาคที่เล็กกว่า  $r_2$  ที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในภาพที่ 16 ถ้าเราสมมุติให้รูปร่างของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชน และโมเลกุลที่อยู่กับที่มีลักษณะเป็นของแข็งทรงกลมคล้ายลูกบิลเลียด ดังนั้นการชนกันจะเกิดขึ้นเมื่อ จุดศูนย์กลางของทั้งสองอนุภาคมาถึงค่าที่อยู่ภายในระยะ  $r_1 + r_2$  เพราะฉะนั้นพื้นที่ที่เกิดการชนกันทั้งหมดจะมีค่าเป็น  $\pi(r_1 + r_2)^2$  สำหรับหนึ่งโมเลกุลของก๊าซ แต่สำหรับปริมาณทั้งหมด ที่มีจำนวนโมเลกุลของก๊าซเป็น  $N$  จะมีค่าพื้นที่ที่เกิดการชนกันทั้งหมดเป็น  $N\pi(r_1 + r_2)^2$  และเราเรียกพื้นที่ของการชนกันนี้ว่า Effective area

ถ้าเราลองพิจารณาชั้นบางๆ  $dx$  ดังในภาพที่ 16 ซึ่งเป็นระยะทางที่ต่อจากระยะ  $x$  ที่เริ่มจากจุดกำเนิดศูนย์ และ  $n(x)$  เป็นจำนวนอนุภาคที่หลุดออกไปจากระยะ  $x$  ดังนั้นการลดลงของจำนวนอนุภาคเนื่องจากการกระจัดกระจาย (Scattering) ในชั้นบางๆ  $dx$  จะมีค่าเป็น

$$dn = -n(x)N\pi(r_1 + r_2)^2 dx \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 16



แสดงโมเดลของการหาค่า free path

สมมติให้จำนวนอนุภาคที่ผ่านเข้ามาในโมเดลนี้ (ที่  $x=0$ ) เป็น  $n_0$  เพราะฉะนั้นทำการอินทิเกรตสมการข้างบนจะได้

$$n(x) = n_0 e^{-N\pi(r_1 + r_2)^2 x} \quad (5)$$

probability ของ free path ในระยะ  $x$  จะมีค่าเท่ากับ probability ของการชนกันระหว่างอนุภาคกับโมเลกุล ในระยะ  $x$  ถึง  $x+dx$  และให้ค่า mean free path  $\bar{\lambda} = \bar{x}$  ซึ่งจะหาค่านี้ต่อไปได้ด้วยวิธีการต่อไปนี้

ทำการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ (5) เราจะได้

$$f(x) = \frac{dn}{n_0} = -N\pi(r_1 + r_2)^2 e^{-N\pi(r_1 + r_2)^2 x} dx \quad (6)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่า mean free path เป็น

$$\bar{x} = \bar{\lambda} = \int_{x=0}^{\infty} x f(x) dx$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= N\pi(r_1 + r_2)^2 \int_{x=0}^{\alpha} x e^{-N\pi(r_1+r_2)^2 x} dx$$

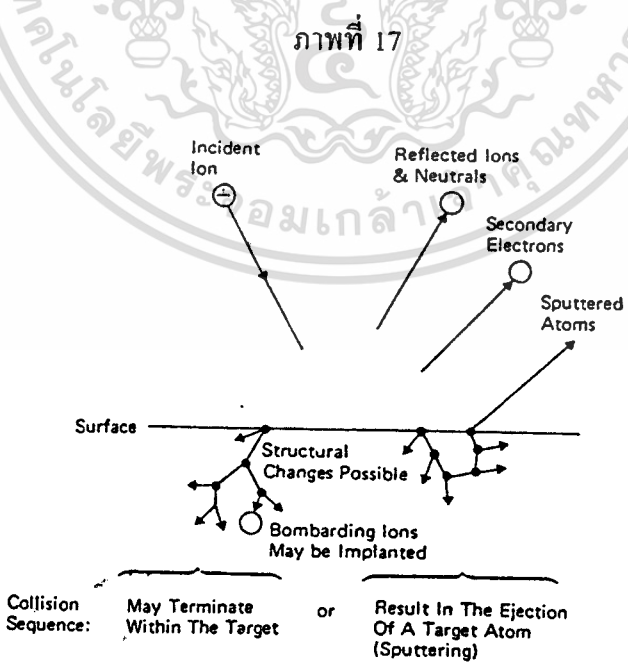
$$= \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2} \tag{7}$$

สำหรับการชนกันระหว่างอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้ามาชนกับโมเลกุลที่อยู่หนึ่ง อาจจะทำให้เกิดขบวนการ Ionization , Attachment , Excitation และอื่นๆ อีก

ในกรณีของการพุ่งเข้าชนของไอออนก๊าซ Ar บนเป้าทองแดง โดยมีค่า  $r_1 = 1.82 \times 10^{-8}$  cm ,  $r_2 = 0.96 \times 10^{-8}$  cm และ  $N = 3.5 \times 10^{16}$  /cm<sup>3</sup> (ที่ 0 °c , 1 torr ) จะได้ค่า  $\lambda = 11.7 \times 10^{-3}$  cm ค่า mean free path ที่ประมาณออกมาได้นี้เหล่านี้ จะมีค่ามากกว่าค่า mean free path ของการชนกันระหว่าง neutral gas molecules ที่อุณหภูมิห้องปกติ

กลไกของการสปีดเตอริง

อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ (Interactions of ions with surface)



**แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขบวนการเกิดปรากฏการณ์สปีดเตอริง ได้แบ่งช่วงของพลังงานไอออนที่ตกกระทบออกเป็น 3 ช่วงที่แตกต่างกัน คือ

1. Threshold region ( $<100$  eV)
2. Low energy region (0.1 keV)
3. High energy region (10 ~ 60 keV)

เมื่อไอออนซึ่งวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป้าสารเคลือบ อาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้คือ

- ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้า (Reflected ions & Neutrals) ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

- อาจเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary electron emission) ออกจากเป้าสารเคลือบ เมื่อไอออนที่เข้าชนมีพลังงานสูงพอ

- ไอออนอาจฝังตัวลงในผิวสารเคลือบ (Ion implantation) ระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานของไอออน ซึ่งมีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง

- อาจเกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Structural changes possible) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผลึกผิวหน้านี้อีกว่า Altered surface layers

- อาจเกิดขบวนการชนแบบต่อเนื่อง ระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบกับไอออนหลายครั้ง จนในที่สุดสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของผลึกเป้าสารเคลือบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมออกจากเป้าสารเคลือบ ซึ่งเราเรียกว่า ขบวนการสปีดเตอริง (Sputtering)

### ขบวนการก๊าซดิสชาร์จ (Gas Discharge Process)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะทาง  $d$  ภายใต้ความดันก๊าซประมาณ 1 torr ของก๊าซ Ne พบว่าระยะแรกที่ทำกรเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และไอออนของก๊าซที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องมาจากการชนของรังสีคอสมิก และถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าค่อนข้างคงที่ เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสี

เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ค่าแรงดันไฟฟ้าพังทะลาย (Breakdown Voltage,  $V_B$ ) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า จะมีค่าสูงขึ้นมากจนสามารถชนโมเลกุลของก๊าซให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก และอิเล็กตรอนซึ่งจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนขั้วคาโทดจนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary electron) ขบวนการช่วงนี้เรียกว่า ทาวนด์เซนส์ดีสชาร์จ (Townsend discharge)

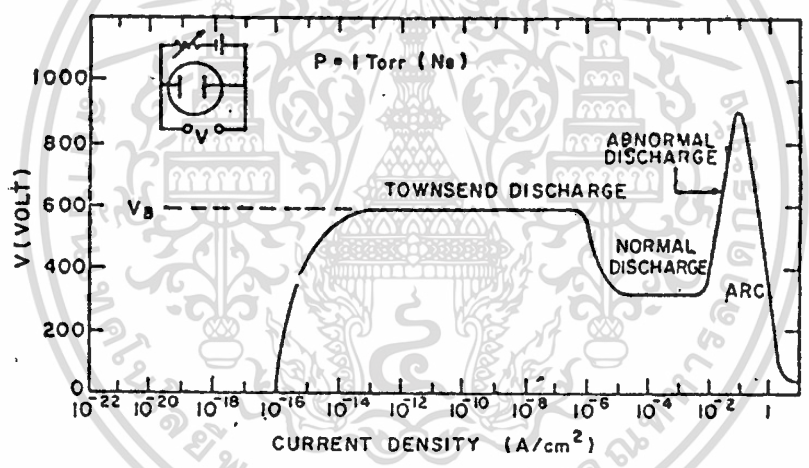
เมื่อแรงดันไฟฟ้ายังคงถูกเพิ่มขึ้นจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าพังทะลาย จะเกิดขบวนการอะวาลานช์ (Avalanche) ขึ้น ไอออนบวกจะวิ่งชนขั้วคาโทดมากขึ้นพร้อมกันกับจะมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง ซึ่งจะถูกร่งเข้าหาขั้วแอโนดและผลิตไอออนมากยิ่งขึ้น จากการชนกับโมเลกุลของก๊าซในระหว่างทาง ทำให้เกิดไอออนบวกที่เพิ่มมากขึ้นและจะถูกเร่งเข้าชนคาโทด ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองเพิ่มขึ้น และอิเล็กตรอนเหล่านี้ก็จะถูกร่งเข้าชนโมเลกุลของก๊าซและผลิตไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดีสชาร์จได้โดยตัวเอง (Self - sustained continuous current) โดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอกในการผลิตไอออน ก๊าซภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างอิเล็กโทรดจะลดค่าลง และกระแสจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ณ จุดนี้เราเรียกว่า การเรืองแสงปกติหรือนอร์มอลโกลว์ (Normal glow) ดังแสดงในภาพที่ 18 โดยสภาวะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง ต่ออัตราการชนของไอออนจะมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับวัสดุทำเป้าคาโทดทั่วไป คือประมาณ 0.1 โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงอาจเลื่อนตำแหน่งไปมาได้ และการชนของไอออนชนคาโทดไม่มีความสม่ำเสมอ โดยมักจะมีมุมของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาสภาพการโกลว์ดีสชาร์จแบบประทุตัวเองได้ (Self-sustaining discharge) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามียิ่งเพิ่มขึ้น แนวการชนของไอออนจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นของกระแสเท่ากันตลอด โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ (ช่วงการเรืองแสงปกติที่ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงนี้ เรามักนำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างหลอดควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ Voltage regulator tube)

หลังจากที่การชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ของคาโทดจนหมดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามียิ่งเพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติของขบวนการเกิด DC glow discharge ในหลอดบรรจุก๊าซ Ne ความดัน 1 torr เปล่งแสงจ้าขึ้น หรือช่วงแอบนอร์มอลโกลว์ (Abnormal glow) ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมใช้กับระบบสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอีกหลายๆ ระบบของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโกลด์ดิซชาร์จ ในช่วงนี้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทด เพิ่มขึ้นสูงประมาณ  $0.1 \text{ A/cm}^2$  ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบนผิวคาโทดจะเกิดขึ้นอย่างมาก จนเกิดขบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (Thermionic electron emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง และติดตามมาด้วยขบวนการอะวาลานซ์อีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของก๊าซในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดจะตกลงมาอย่างรวดเร็ว ในขณะที่กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นสูง และเกิดการเปล่งประกายจ้าของการอาร์ค (Arc discharge) ดังแสดงในภาพที่ 18

ภาพที่ 18



แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรด

ขบวนการต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ก๊าซดิซชาร์จมีดังต่อไปนี้

**ขบวนการคาโทดและการปลดปล่อยลำดับที่สอง (Cathode Process Secondary Effect)**

สำหรับที่ขั้วคาโทดจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากที่จะทำให้เกิดการดิซชาร์จขึ้นในก๊าซ ด้วยการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเริ่มแรกขึ้นที่คาโทด ภายใต้สภาวะปกติ อิเล็กตรอนจะถูกขัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหลุดออกจากขั้วโลหะ ด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างอิเล็กตรอนและไอออนบวกในโครงสร้างของผลึกโลหะ พลังงานที่ต้องการสำหรับการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนออกจากระดับพลังงาน Fermi level (เป็นระดับพลังงานสุดท้ายที่ดึงดูดอิเล็กตรอนไว้กับอะตอมโลหะ) เราเรียกว่าพลังงาน Work function ( $W_0$ ) และเป็นค่าพลังงานจำเพาะของอะตอมโลหะแต่ละชนิดที่ใช้เป็นขั้วคาโทด ซึ่งค่าพลังงาน  $W_0$  นี้ก็คือ พลังงานที่ต้องการที่ต้องจ่ายเข้าไปในอิเล็กโตรด เพื่อใช้ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วคาโทดนั่นเอง

### Photoelectric Emission

โฟตรอนที่ตกกระทบบนผิวขั้วคาโทด ถ้ามีพลังงานมากกว่าค่า  $W_0$  ( $h\nu > W_0$ ) อาจจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวคาโทดได้ สำหรับโลหะส่วนมากจะสามารถรับความถี่ของแสงโฟตรอน  $\gamma_0$  ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ของแสงอุลตราไวโอเลตได้ เมื่อพลังงานโฟตรอนมีค่าเกิน  $W_0$  อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะมีพลังงานของตัวมันเองที่เกิดจากการเหลือของพลังงานโฟตรอนที่เอาชนะพลังงาน  $W_0$  ซึ่งพลังงานส่วนที่เกินมานี้ อาจจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Einstein คือ

$$\frac{(mu_e)^2}{2} = h\nu - h\nu_0 \quad (8)$$

เมื่อ  $m$  เป็นมวลของอิเล็กตรอน

$u_e$  เป็นความเร็วของอิเล็กตรอน

$h\nu_0$  เป็นพลังงานวิกฤติ (Critical energy) ที่ต้องการใช้สำหรับเคลื่อนที่อิเล็กตรอนออกจากผิวคาโทด และมีค่าเท่ากับ  $W_0$

### ตารางที่ 4

แสดงค่าพลังงาน work function ( $W_0$ ) สำหรับธาตุโลหะชนิดต่างๆ

ธาตุ	Ag	Al	Cu	Fe	W
$W_0$ (eV)	4.74	2.95-4.43	4.07-4.7	3.91-4.6	4.35-4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองเนื่องจากการตกกระทบของไอออนบวก

อิเล็กตรอนอาจจะหลุดออกจากผิวโลหะโดยการชนของไอออนบวก สาเหตุของการหลุดออกของอิเล็กตรอนลำดับที่สองนี้ เกิดจากการที่ไอออนบวกจะพุ่งเข้าชนข้าวกาโทด โดยที่ไม่สามารถจะไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซที่อยู่ก่อนถึงคาโทดได้ เพราะว่าไอออนบวกมีมวลมากจึงเคลื่อนที่ได้ช้า พลังงานจลน์จึงมีค่าน้อย ไม่พอเพียงต่อการไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซได้ แต่ไอออนบวกมีพลังงานศักย์พอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวคาโทดได้ก็ต่อเมื่อ ค่าพลังงานต่ำสุดของไอออนบวกจะต้องมีค่าเป็นสองเท่าของค่าพลังงาน work function ( $W_w$ ) หรือ  $W_k + W_p \geq 2W_w$  เมื่อ  $W_k$  และ  $W_p$  เป็นค่าพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของไอออนบวกที่ตกกระทบตามลำดับ การที่อิเล็กตรอนลำดับที่สองหลุดออกจากผิวคาโทดนี้ ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากไอออนบวกตกกระทบคาโทด ทำให้กลไกนี้มีความสำคัญต่อกลไกการดิซชาร์จของ Townsend เป็นอย่างมาก และมีความสำคัญต่อการปลดปล่อยอะตอมสปัตเตอร์ (Sputtered atom) ที่ถูกตกกระทบด้วยไอออนบวกเช่นกัน

## การปลดปล่อยเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field Emission)

อิเล็กตรอนอาจจะเคลื่อนตัวออกจากผิวโลหะได้ โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงๆ โดยจะไปเปลี่ยนแปลงกำแพงศักย์ไฟฟ้า (potential barrier) ของผิวโลหะ หรืออาจกล่าวได้ว่ามีผลทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานสูงๆ เข้าใกล้ระดับพลังงาน fermi level ทำให้มีโอกาสสูงที่อิเล็กตรอนตัวนี้สามารถผ่านทะลุกำแพงศักย์ไฟฟ้านี้ออกไปได้ซึ่งเรียกผลที่เกิดขึ้นนี้ว่า "Tunnel effect"

ที่มาของกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อย (emission current) สามารถหาได้โดยให้เราพิจารณาจากอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวคาโทดในทิศทาง  $x$  ดังแสดงในภาพที่ 19 เมื่อพิจารณากำแพงศักย์ (Potential barrier) ที่ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก  $E$  และค่าพลังงานศักย์ (Potential energy) จะมีค่าเป็นศูนย์ ที่ระยะห่างจากผิวโลหะมากๆ (ระยะ  $x$  เข้าใกล้อินฟินิตี้) ดังแสดงในภาพที่ 19

ถ้าคำนวณสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีประจุ  $-e$  ที่หลุดออกมาจากผิวโลหะ กับประจุ  $+e$  ที่อยู่ลึกลงไปในเนื้อโลหะที่อยู่ห่างจากผิวโลหะเป็นระยะ  $-x$  นั่นคือผิวโลหะเป็นศักย์ไฟฟ้าเท่า

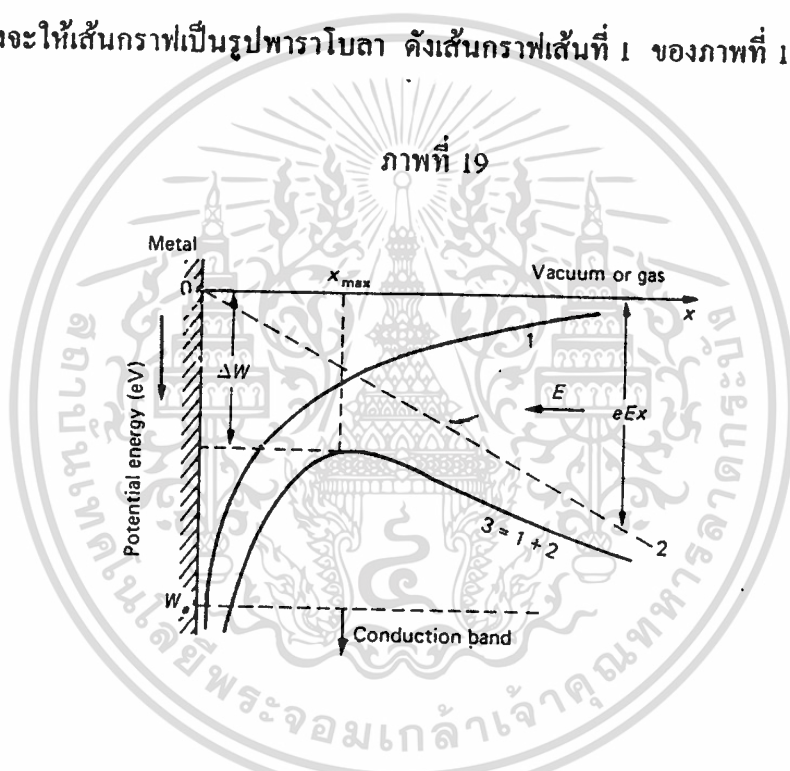
โดยอาศัยกฎของคูลอมบ์เราจะได้แรงระหว่างอิเล็กตรอนเป็น

$$F(x) = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = \frac{-e^2}{16\pi\epsilon_0x^2} \quad (9)$$

พลังงานศักย์ไฟฟ้าที่ระยะ  $x$  สามารถหาออกมาได้ โดยการอินทิเกรตสมการข้างบนจาก  $\infty$  ถึง  $x$  จะได้

$$W_{e1} = \frac{-e^2}{16\pi\epsilon_0x} \quad (10)$$

ซึ่งจะให้เส้นกราฟเป็นรูปพาราโบลา ดังเส้นกราฟเส้นที่ 1 ของภาพที่ 19



แสดงกำแพงศักย์ (Potential Barrier) ที่ต่ำลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก

- 1) พลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอก
- 2) พลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่ป้อนให้
- 3) พลังงานศักย์ทั้งหมด

ผลของการเร่งอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ที่ป้อนเข้าไปในแนวตั้งฉากกับผิวโลหะขั้วคาโทด จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ที่ระยะ  $x$  ใดๆ เป็น

$$w_E = -eEx \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีลักษณะเส้นกราฟเป็นเส้นตรง ดังกราฟเส้นที่ 2 ของภาพที่ 19  
ดังนั้น จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าทั้งหมดเป็น

$$W = w_a + w_E = -\left(\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x}\right) - eEx \quad (12)$$

ซึ่งจะได้เส้นกราฟเป็นเส้นที่ 3 ของภาพที่ 19

จะเห็นได้ว่าค่ากำแพงศักย์ (potential barrier) จะลดลง  $\Delta W$  จะเกิดที่จุด  $x_m$  ดังเส้นกราฟ  
เส้นที่ 3 เพื่อทำการหาค่า  $x_m$  เราจะทำการดิฟเฟอเรนเชียล  $\frac{dW}{dx}$  แล้วให้เท่ากับศูนย์ เพื่อหาจุดสูง  
สุดของกราฟ

$$\frac{dW}{dx} = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 x_m^2} - eE = 0 \quad (13)$$

จะได้

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_0 E}} \quad (14)$$

แทนค่า  $x_m$  ลงในสมการ (12) จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าสูงสุด  $\Delta W$  เป็น

$$\Delta W = -e\sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (15)$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพ (effective) ของค่า work function จะเป็น

$$W_{eff} = W_a - \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (16)$$

นอกจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทั้งสามแบบแล้ว ยังมีการปลดปล่อยแบบเทอร์มิออนิก  
(Thermionic electron emission) อีก ซึ่งจะขอไม่นำมากล่าว ณ ที่นี้

ค่าแรงดันไฟฟ้าพังทะลาย (Breakdown voltage) ในขบวนการโกลด์สไตน์จะมีค่า  
เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง  $d$  ระหว่างอิเล็กโทรด และระยะทางปลดปล่อยระหว่างอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอนลำดับที่สองและโมเลกุลของก๊าซ (ระยะทางปลอดการชนของอิเล็กตรอนลำดับที่สองนี้จะแปรผกผันกับความดันก๊าซและมีค่ามากกว่าระยะทางปลอดการชนของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลก๊าซ) โดยปกติอิเล็กตรอนลำดับที่สองแต่ละตัวควรมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดขบวนการอะวาลานซ์ในช่วงของ Normal Glow

1. ที่ค่า  $pd < (pd)_{\min}$  ถ้าความดันก๊าซต่ำเกินไป (ระยะปลอดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง  $d$  มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนลำดับที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอะโนด เนื่องจากจะมีอิเล็กตรอนที่กำลังวิ่งข้ามเก็บแล้วเกิดการชนกันกับโมเลกุลก๊าซไม่มากนัก

2. ที่ค่า  $pd > (pd)_{\min}$  ความดันก๊าซสูงเกินไป (ระยะปลอดการชนสั้นลง) หรือระยะทาง  $d$  มากเกินไป เนื่องจากมีโมเลกุลของก๊าซอยู่มากภายในช่องเก็บ ดังนั้นอิเล็กตรอนลำดับที่สองจะไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอในการไอออไนซ์ก๊าซเมื่อเกิดการชนพลังงานจะถูกถ่ายเทให้โมเลกุลก๊าซในรูปการกระตุ้น (excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นแทน ทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นโอกาสของการเกิดการไอออไนเซชันจึงมีค่าต่ำกว่าที่ค่า  $(pd)_{\min}$  นอกเสียจากว่าโวลเตจที่ป้อนเข้าไปจะมีค่าเพิ่มขึ้น

3. เพราะฉะนั้นที่จุด  $(pd)_{\min}$  จะเป็นจุดที่เกิดประสิทธิภาพของการเกิดไอออไนเซชันสูงสุด

ดังนั้นทั้งสองกรณีนี้ จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าพังทะลายที่มีค่าค่อนข้างสูง โดยมีจุดจุดหนึ่งระหว่างนี้  $(pd)_{\min}$  ที่ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าพังทะลายต่ำสุด ตามกฎของปาสเชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าพังทะลาย และผลคูณระหว่างความดันก๊าซ ( $p$ ) กับระยะทางระหว่างอิเล็กโทรด ( $d$ ) ดังแสดงในภาพที่ .20

ในระบบสปัตเตอริงทั่วไปสภาวะของการเกิด glow discharge จะกระทำในช่วงที่ผลคูณ  $p \times d$  มีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำจะทำให้ฟิล์มเคลือบมีคุณภาพดี การแทรกตัวของก๊าซในเนื้อฟิล์มน้อย และลดปริมาณสารปลอมปนในฟิล์มเคลือบ) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันก๊าซชั่วคราว เพื่อให้เริ่มการดีสชาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำลง

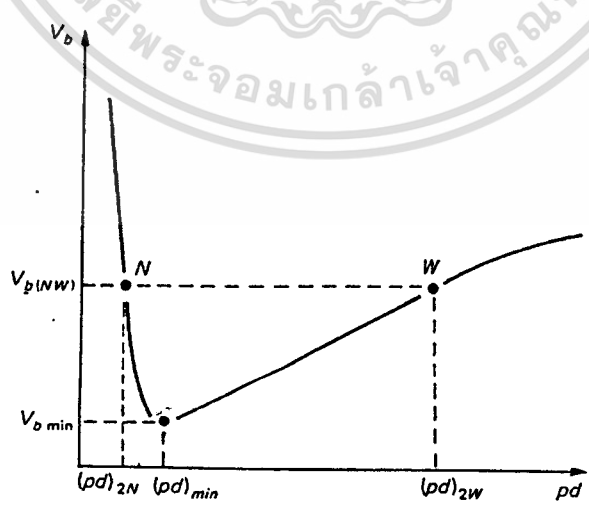
ปรากฏการณ์ glow discharge ถูกอธิบายว่าเป็นการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากขั้วคาโทดภายใต้การเข้าชนของอนุภาคและกลุ่มพลังงานแสงจากก๊าซ ประจุบวกค้าง (positive space charge) มีความสำคัญอย่างมากต่อการกำหนดค่าสนามไฟฟ้าที่คาโทด ส่วนปรากฏการณ์ Thermal effect และปรากฏการณ์อื่นๆ จะมีผลค่อนข้างน้อยในการรักษาสภาวะการโกลว์ดีสชาร์จให้คงไว้

ปรากฏการณ์ glow discharge ถูกนำมาใช้เรียกจากบริเวณที่เกิดเปล่งแสงเจิดจ้าที่ถูกค้นพบบริเวณใกล้ๆ กับขั้วคาโทด และอยู่ระหว่างบริเวณช่วงมืดทั้งสองข้าง (dark space) เมื่อเกิดการ

โกลว์ดิสชาร์จของกระแสตรงขึ้นภายในหลอดทรงกระบอกยาวที่มีความดันอยู่ในช่วง 0.1 - 1 mm Hg. แสงสว่างจากการโกลว์ดิสชาร์จจะกระจายครอบคลุมตลอดความยาวของหลอดดังแสดงในภาพที่ 21 เริ่มที่คาโทดเราจะพบว่าจะมีช่วงมืดแคบมากๆ ติดอยู่ที่คาโทด เราเรียกว่า ช่วงมืดแอสตัน (Aston's darkspace) ต่อจากนั้นจะพบการเรืองแสงเป็นแผ่นบางๆ เราเรียกว่า Cathode glow และตามมาด้วยช่วงมืดที่เรียกว่า Cathode dark space ทั้งช่วงมืด Aston's และช่วง Cathode glow จะมองไม่เห็นได้อย่างชัดเจนนัก ส่วนที่ช่วง Cathode dark space จะถูกแยกออกจากช่วง Negative glow อย่างชัดเจนและคมชัด ส่วนที่ช่วงการเรืองแสงของ Negative glow จะค่อยๆ ลดการเรืองแสงลงเรื่อยๆ ไปจนถึงช่วง Faraday dark space ส่วนที่อยู่ใกล้กับขั้วแอโนดจะเป็นส่วนของช่วง Positive column ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการเรืองแสงค่อนข้างสม่ำเสมอและกว้างยาวที่สุดตลอดแนว และที่จุดปลายของช่วง Positive column บางครั้งเราอาจจะสังเกตเห็นเป็นช่วงมืดบางๆ เราเรียกว่าช่วง Anode dark space และติดตามมาด้วยช่วงบางๆ ของการเรืองแสงเราเรียกว่าช่วง Anode glow ซึ่งอยู่ติดกับแอโนดนั่นเอง

การเกิดปรากฏการณ์ Glow discharge ที่เรืองแสงขึ้นนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของก๊าซที่ใช้ในการดิสชาร์จ , ความดันก๊าซในหลอดก๊าซดิสชาร์จ, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดสุญญากาศ , ชนิดของอิเล็กโตรด , ขนาดอิเล็กโตรด , ระยะห่างของอิเล็กโตรดทั้งสองและชนิดของโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโตรด

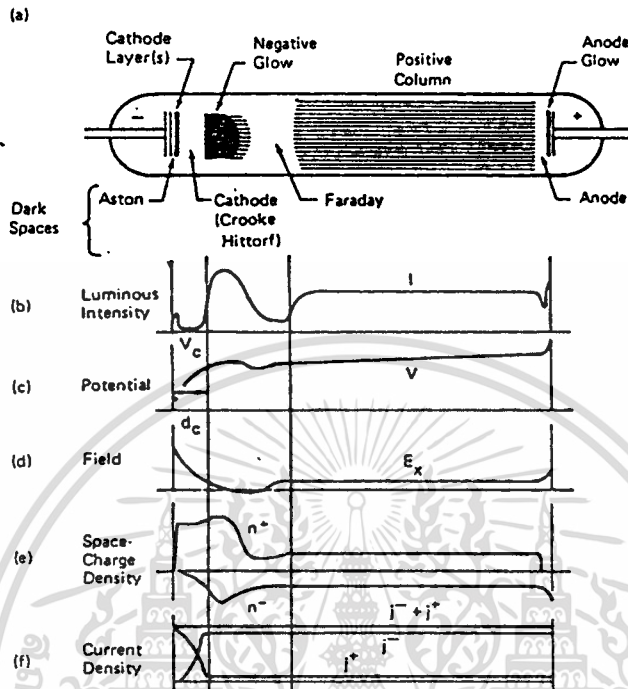
ภาพที่ 20



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าพังทะลาย (Breakdown Voltage,  $V_B$ ) และผลคูณระหว่างความดันก๊าซ (p) กับระยะทางระหว่างอิเล็กโตรด (d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาพที่ 21



- a) แสดงการเกิด Normal glow discharge ของหลอดก๊าซนีออนยาว 50 เซนติเมตร ที่ความดัน 1 torr ความเข้มของการเรืองแสงแสดงด้วยแถบดำในรูป
- b) แสดงความเข้มการส่องสว่าง
- c) แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า
- d) สนามไฟฟ้า
- e) ความหนาแน่นของประจุค้าง
- f) ความหนาแน่นกระแส

ที่แต่ละส่วนของหลอด glow discharge (โดยที่  $n^+$  เป็นจำนวนของไอออนบวก,  $n^-$  เป็นจำนวนของอิเล็กตรอน,  $j^+$  เป็นกระแสไอออนบวก,  $j^-$  เป็นกระแสอิเล็กตรอน)

จากภาพที่ 21 แสดงส่วนต่างๆ ของขบวนการ glow discharge ซึ่งแต่ละส่วนสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้ดังนี้ ช่วงแรก คือ ช่วงมืดแอสตัน (Aston dark space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกจากคาโทดด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถกระตุ้น (excite) หรือไอออไนซ์ (ionize) โมเลกุลของก๊าซได้ ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดขึ้น ช่วงที่สอง เป็นช่วงที่ถัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาจากผิวคาโทด เป็นบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมาก เรียกว่า ช่วงคาโทดโกลว์ (Cathode glow) เป็นบริเวณที่ไอออนบวกของก๊าซจากขบวนการดิสชาร์จและไอออนบวกของอะตอมสารเคลือบ ซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดเกิดการรวมตัวกันเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยขบวนการต่างๆ มากมาย ทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของสารที่ใช้ทำคาโทด และของก๊าซที่ใช้ในระบบสปิดเตอริง เช่น เมื่อคาโทดเป็นทองแดง (Cu) การเรืองแสงของช่วงคาโทดโกลว์จะให้แสงสีเขียว , ทองคำให้แสงสีส้มแดง , ก๊าซอาร์กอน (Ar) ให้แสงสีน้ำเงินฟ้า , และก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) ให้แสงสีม่วงแดง เป็นต้น ช่วงที่สาม ถัดจากช่วงคาโทดโกลว์ เรียกว่า ช่วงมืดครุคหรือช่วงมืดคาโทด (Crook or Cathode dark space) พลังงานของอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซ เนื่องจากถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะทางเฉลี่ยปลอดการชนออกมา ทำให้เป็นช่วงที่ปราศจากการชน จึงไม่มีขบวนการกระตุ้น (excite) หรือขบวนการไอออไนซ์ (ionize) เกิดขึ้น การปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดขึ้นในช่วงนี้เลยและกลายเป็นบริเวณมืด เลยระยะปลอดการชนออกไปอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary electron) จะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซและไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (positive space charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะคดครอบบริเวณ Cathode dark space นี้ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงชันมากและมากเกินพอในการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซในเวลาถัดมา ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยออกไปจากบริเวณผลิตไอออนของ dark space แล้วจะมีค่าพลังงานลดลงมาก ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของก๊าซและเกิดการเรืองแสงขึ้น แม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยลงมาก รวมทั้งประจุบวกจากประจุสะสมของไอออนทางด้านซ้ายมือในบริเวณ dark space ทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้น และมีการสะสมประจุลบบริเวณนี้ จึงเรียกรวมบริเวณนี้ว่า เนกาทีฟ โกลว์ (Negative glow) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงมากจนไม่สามารถแม้แต่กระตุ้นโมเลกุลของก๊าซให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday dark space) ถัดจากช่วงมืดฟาราเดย์ ขบวนการที่เกิดขึ้นค่อนข้างคล้ายกับการดิสชาร์จของทาวน์เซนด์ ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอนโนด และมีพลังงานสูงพอในการกระตุ้นโมเลกุลของก๊าซหรือไอออไนซ์ก๊าซได้และจึงเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอนโนดโดยเร็ว ทำให้สภาวะพลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่า จึงเรียกว่า คัมเรืองแสงไฟฟ้าบวก (Positive glow column)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการรักษาภาวะโกลว์ดิสชาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดที่เกิดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณ Negative glow จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอาโนดเพียงเล็กน้อยมิได้มีผลต่อขบวนการโกลว์ดิสชาร์จ ต่อเมื่อเลื่อนอาโนดเข้าหาคาโทดจนพ้นช่วงมืดฟาราเดย์และเข้าสู่ Negative glow จนเข้าสู่ช่วง Cathode dark space ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนชุดที่สองมีปริมาณน้อยลง ในการรักษาภาวะ glow discharge ให้คงไว้จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเร่งไอออนเข้าชนคาโทดด้วยพลังงานสูงและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองปริมาณสูงขึ้นอันจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การโกลว์ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Obstructed glow เมื่อเลื่อนอาโนดเข้าใกล้คาโทดยิ่งขึ้นจนพ้นขอบของ Cathode dark space ซึ่งมีระยะทางสั้นกว่าระยะทางปลดการชนของอิเล็กตรอน จะไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นเลย และขบวนการ glow discharge ก็จะสิ้นสุดลง ทั้งนี้แม้ว่าจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นอีกเท่าใดก็ตาม ก็จะไม่สามารถคงสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ได้ถ้ามีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทด การอาร์คอาจเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการโกลว์ดิสชาร์จเกิดขึ้น

### ระบบสปัตเตอริงแบบ ดีซี ไคโอด สปัตเตอริง (D.C. diode sputtering)

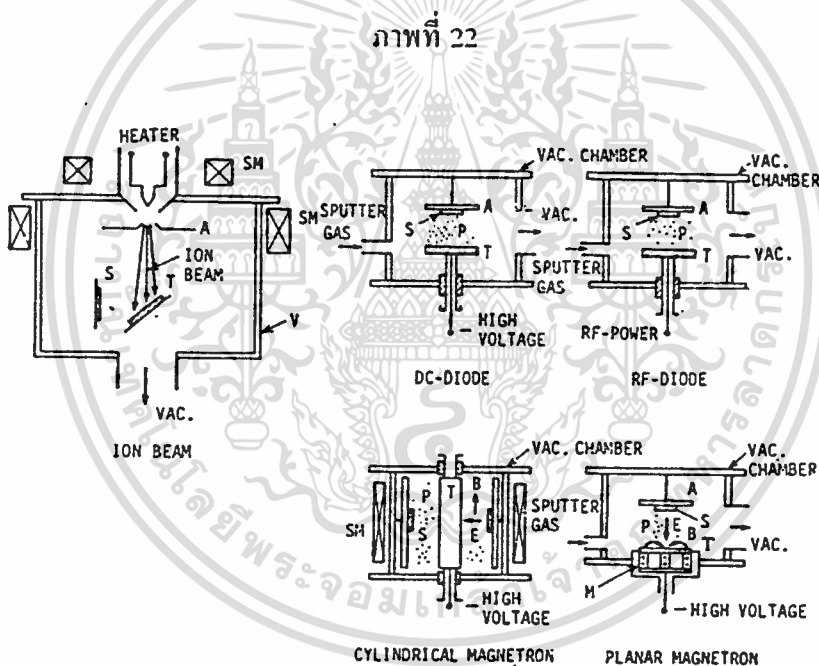
ในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงนั้น ได้มีการพัฒนาให้มีระบบการเคลือบอยู่ด้วยกันหลายระบบดังแสดงในภาพที่ 22 ในระบบสปัตเตอริงเหล่านี้ ระบบที่ใช้เป็นรูปแบบพื้นฐานก็คือ ระบบ ดีซี ไคโอด สปัตเตอริง ส่วนระบบสปัตเตอริงอื่นๆ ได้รับการปรับปรุงและพัฒนามาจากระบบ ดีซี ไคโอด สปัตเตอริง นั้นเอง

จากภาพที่ 23 แสดงระบบ ดีซี ไคโอด สปัตเตอริง แบบง่ายที่สุด คาโทด คือ แผ่นเป้าสารเคลือบ (target) และอาโนดใช้เป็นที่วางแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ (substrate) โดยปกติระยะระหว่างคาโทดและแผ่นรองรับจะอยู่ระหว่าง 4-10 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกสู่ด้านข้างหรือผนังของแชมเบอร์สุญญากาศ (vacuum chamber) มีค่าต่ำ ระยะคาร์ค สเปซ (dark space) ในระบบโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 1 ถึง 4 เซนติเมตร โดยตำแหน่งของอาโนดอยู่ในบริเวณการเกิดเนกาทีฟโกลว์ (negative glow) อุปกรณ์ทำงานอยู่ในช่วงแอบนอร์มอลโกลว์ ดิสชาร์จ (abnormal glow discharge) ก๊าซที่ใช้ในระบบมักใช้ก๊าซเฉื่อยซึ่งให้ค่าอิเล็กสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบโดยนิยมใช้ก๊าซอาร์กอน(Argon,Ar)เนื่องจากมีราคาถูกกว่าก๊าซเฉื่อยชนิดอื่นๆ ในขณะที่เกิดขบวนการโกลว์ดิสชาร์จที่ความดันก๊าซค่าหนึ่ง ขบวนการไอออไนซ์จะรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ ทรายไคที่ระยะคาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทดและอาโนดเมื่อความดันก๊าซลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าสูงขึ้นระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะคาร์ค สเปซ ขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อย กระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปิตเตอร์มีปริมาณลดลงตามปริมาณไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันก๊าซต่ำกว่า  $10^{-2}$  torr ระยะคาร์คสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด กระแสไฟฟ้าจะลดลงสู่ศูนย์ขบวนการผลิตไอออนจะสิ้นสุดลงและจะไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป่าสารเคลือบเนื่องจากการสปิตเตอร์ ณะความดันก๊าซสูงขึ้นระยะคาร์คสเปซจะหดสั้นลง บริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้น และขบวนการสปิตเตอร์เกิดขึ้นในอัตราสูงขึ้นตามความดันก๊าซ ดังแสดงอยู่ในภาพที่ 24 เส้นกราฟ A

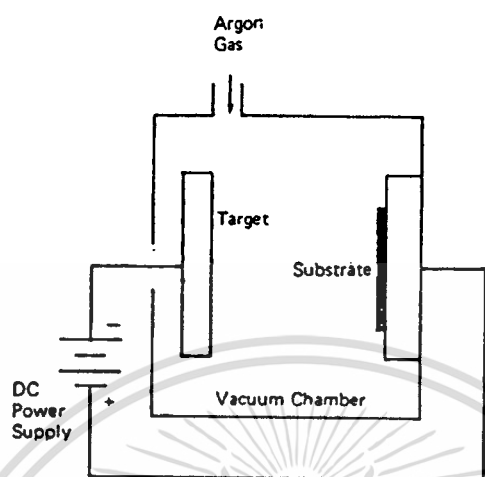


แสดงลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของระบบสปิตเตอร์ชนิดต่างๆ

ณะที่ความดันก๊าซในระบบสูงขึ้น ระยะทางปลดการชนระหว่างโมเลกุลของก๊าซมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป่าจะส่งผ่านลงเคลือบบนแผ่นรองรับได้ยาก เนื่องจากการชนกันกับ โมเลกุลของก๊าซระหว่างทางและเกิดการสะท้อนกลับสู่เป่าสารเคลือบ หรือเกิดการสูญเสียสู่ผนังแชมเบอร์สุญญากาศ ทำให้ค่ายึดของการสปิตเตอร์มีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 24 เส้นกราฟ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

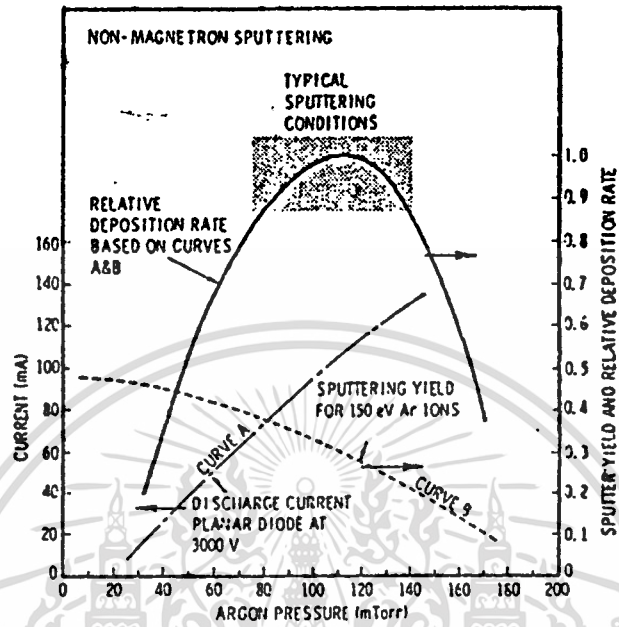
ภาพที่ 23



แสดงระบบสปัตเตอริงแบบ DC diode sputtering system

ผลรวมระหว่างค่าซีลด์และกระแสไอออนทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่ง และพบว่าในการสปัตเตอริงเกิดขึ้น เมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้า 3,000 โวลต์ ป้อนระหว่างอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร ในก๊าซอาร์กอน (Ar) การเคลือบจะหยุดลงที่ความดันต่ำกว่า 20 mtorr และที่ความดันสูงกว่า 120 mtorr อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดและจะลดลงเมื่อความดันก๊าซสูงเกินกว่าค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับขบวนการสปัตเตอริง คือ บริเวณที่ให้อัตราการเคลือบสูงและมีประสิทธิภาพดีที่สุด จากภาพที่ 24 ความดันที่เหมาะสมในการเคลือบ คือ 75 mtorr โดยมีความหนาแน่นกระแส 1 mA/cm<sup>2</sup> ด้วยอัตราการเคลือบสาร 360 อังสตรอม/นาที (Å/min) ซึ่งเป็นอัตราการเคลือบที่ค่อนข้างต่ำมากในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง ในระบบสปัตเตอริงต่างๆ ไปเรานิยมต่อขั้วอานโตนลงกราวด์รวมเข้ากับแชมเบอร์สุญญากาศ และปล่อยคาโทดให้มีศักย์ไฟฟ้าลบ โดยกันดั้ยจนวนระหว่างคาโทดกับผิวโลหะของแชมเบอร์สุญญากาศ เราเรียกว่า กราวด์ชีลด์ (ground shield) ดังในภาพที่ 23 เป็นผนังโลหะหุ้มรอบ ๆ ขอบของคาโทด โดยจัดระยะทางระหว่างคาโทดและกราวด์ชีลด์ให้สั้นกว่าระยะคาร์คสเปซ ดังนั้นแม้ว่าศักย์ไฟฟ้าของกราวด์ชีลด์จะมีค่าเท่ากับอานโตน ขบวนการโกสวดีสซาร์จและสปัตเตอริงจะไม่สามารถเกิดขึ้นกับคาโทดในบริเวณที่มีกราวด์ชีลด์ห่อหุ้มอยู่ได้ ทำให้สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการสปัตเตอริงได้

ภาพที่ 24



แสดงผลของความดันก๊าซในระบบสปัตเตอริงที่มีผลต่ออัตราการเคลือบ ค่าyield และ กระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิกเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 โวลต์ ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 เซนติเมตร

ในระบบ ดีซี ไดโอด สปัตเตอริง อนุภาคสปัตเตอร์จะชนกับ โมเลกุลของก๊าซในแชมเบอร์ และในที่สุดก็จะพุ่งกระจายไปสู่แผ่นรองรับชิ้นงาน (substrate) ดังนั้นจำนวนของโลหะสปัตเตอร์ ที่เคลือบลงบนพื้นที่ต่อหน่วยของแผ่นรองรับชิ้นงาน  $W$  จะมีค่าเป็น

$$W \cong k_1 W_0 / p d \quad (17)$$

และอัตราการเคลือบ  $R$  จะมีค่าเป็น

$$R = W/t \quad (18)$$

โดยที่  $k_1$  เป็นค่าคงที่

$W_0$  เป็นจำนวนของอนุภาคสปัตเตอร์จากพื้นที่ต่อหน่วยของคาโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- P เป็นความดันก๊าซดิสชาร์จ  
 d เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด  
 W เป็นความหนาแน่นของฟิล์มสปีดเตอร์  
 t เป็นเวลาที่ใช้ในการสปีดเตอร์  
 จำนวนอนุภาคสปีดเตอร์ จากพื้นที่ต่อหน่วยของคาโทด  $W_0$  จะมีค่าเป็น

$$W_0 = (j_e/e)St(A/N) \quad (19)$$

โดยที่  $j_e$  เป็นความหนาแน่นกระแสไอออนที่คาโทด

e เป็นประจุอิเล็กตรอน

S เป็นค่าซีลด์สปีดเตอร์

A เป็นน้ำหนักอะตอมของโลหะสปีดเตอร์

N เป็นเลข Avogadro's

ไดโอดสปีดเตอร์นี้คาโทดและอานโนดอาจทำเป็นแผ่นราบ เรียกว่า พลาเนอร์สปีดเตอร์ (Planar sputtering) หรือทำเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน เรียกว่า สปีดเตอร์แบบทรงกระบอก (Cylindrical sputtering หรือ Post sputtering) ข้อเสียของระบบไดโอดสปีดเตอร์ก็คือ ไม่สามารถควบคุมปริมาณของไอออนและพลังงานของไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบให้เป็นอิสระจากกันได้ เนื่องจากพลังงานของไอออนขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไประหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเพื่อเร่งอนุภาค ในขณะที่เดียวกันแรงดันไฟฟ้านี้ถ้ามีค่าสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าหรือปริมาณไอออนที่ ถูกผลิตขึ้นในระบบจะมีปริมาณสูงขึ้นตามไปด้วย

### การเพิ่มอัตราการเกิดสปีดเตอร์

อัตราการเกิดสปีดเตอร์ ขึ้นกับผลคูณระหว่างค่าซีลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ วิธีการเพิ่มค่าซีลด์ของเป้าสารเคลือบได้พูดมาบ้างแล้วจึงขอเบนความสนใจมาสู่การเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ในระบบ dc diode sputtering สามารถทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดและความดันก๊าซซึ่งมีข้อจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ  $1 \text{ mA/cm}^2$  และความดันก๊าซประมาณ 100 mtorr เราพบว่าในระบบ dc diode sputtering อะตอมของก๊าซน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ที่เกิดการไอออไนซ์และความดันก๊าซที่สูงมีผลทำให้ปริมาณก๊าซที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทรกตัวในฟิล์มเคลือบมีค่าสูง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบสปัตเตอร์เพื่อที่จะให้สามารถเคลือบฟิล์มได้ที่มีความดันต่ำ และให้อัตราการสปัตเตอร์สูง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ใหญ่ๆ 3 วิธี คือ

1. Triode sputtering
2. Radio frequency or R.F. sputtering
3. Magnetron sputtering

### Triode sputtering system

คือการเพิ่มปริมาณไอออนให้กับระบบสปัตเตอร์ โดยการเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอนของระบบด้วยวิธีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (thermionic electron emission) ซึ่งมีโครงสร้างของระบบแสดงไว้ในภาพที่ 25 อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากการเผาหลอดทั้งสแตนด์ด้วยปริมาณสูงจะถูกเร่งเข้าสู่แอโนด ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าบวกระหว่าง 50-100 โวลต์ ผ่านอะตอมของก๊าซภายในระบบและผลิตไอออนปริมาณสูงระหว่างเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับศักย์ไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อเข้าระหว่างเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับ จะดึงแยกไอออนเร่งเข้าสู่เป้าสารเคลือบและเกิดขบวนการสปัตเตอร์ขึ้น แผ่นรองรับการเคลือบวางใกล้กับคาโทดเพื่อลดการสูญเสียอะตอมสารเคลือบ วิธีการนี้มีขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว โดยใช้กราวด์ร่วมกันคู่หนึ่ง จึงเรียกว่า Triode sputtering สามารถทำงานเคลือบได้ที่มีความดันก๊าซต่ำถึง 1 mtorr ในอัตราการเคลือบสูงกว่า 3,000 Å/min และสูงกว่าระบบ diode sputtering ที่กล่าวมาแล้วประมาณ 10 เท่าตัว นอกจากนี้ระบบ triode sputtering ยังมีข้อดีเหนือ diode sputtering ที่สามารถควบคุมปริมาณไอออน (จากปริมาณ thermionic electron emission และศักย์ไฟฟ้าที่แอโนด) และพลังงานของไอออน (จากศักย์ไฟฟ้าของเป้าสารเคลือบ) ที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบแยกเป็นอิสระจากกันได้ ในกรณีที่ภายในระบบมีก๊าซซึ่งอาจทำปฏิกิริยากับหลอดความร้อนทั้งสแตนด์ หรือระบบมีขนาดใหญ่ วิธีของ triode sputtering ย่อมไม่เหมาะสม ทำให้ต้องใช้วิธีการอื่นแทน

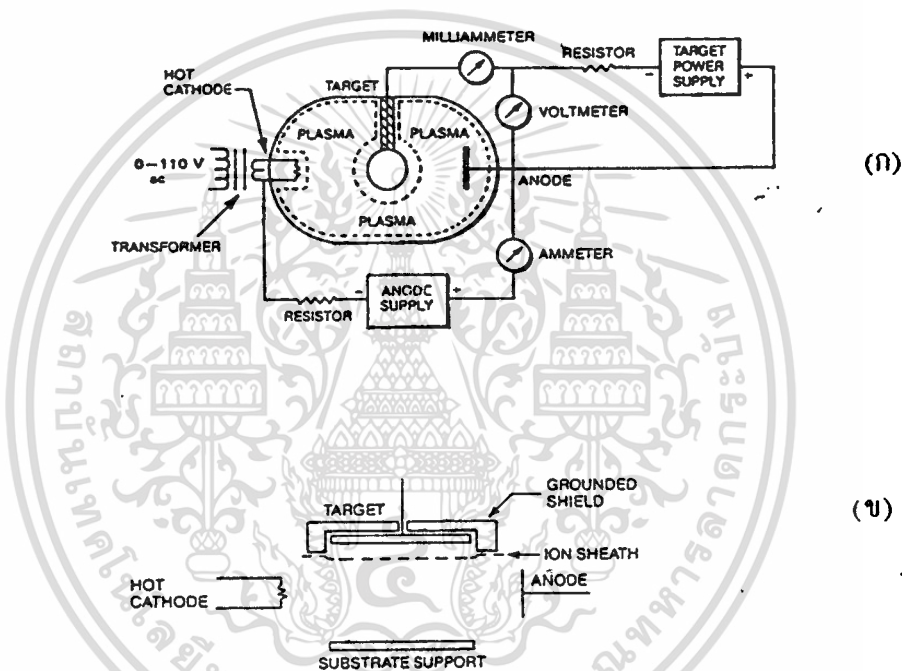
### Radio frequency or R.F. sputtering

คือการใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง เพิ่มปริมาณไอออนให้กับระบบ เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าระหว่างคู่อิเล็กโตรดซึ่งขนาดเท่ากัน dark space จะปรากฏขึ้นที่ผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโตรดทั้งสอง ซึ่งในความเป็นจริงก็คือสภาพ dc glow discharge ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาสั้นๆ สลับกันไปมา เมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับยังมีค่าต่ำ แต่แต่ละครึ่งไซเคิลมีเวลายาวนานพอที่จะขบวนการเกิด dc glow discharge โดย glow discharge ที่เกิดขึ้นยังอาศัยอิเล็กตรอนชุดที่สองที่ถูกผลิตขึ้นจากอิเล็กโตรดแต่ละด้าน เพื่อรักษาสภาพดิสชาร์จไว้และการดิสชาร์จจะไม่เกิดขึ้นเมื่อความดันก๊าซภายในระบบต่ำกว่า 20 mtorr เช่นเดียวกับใน dc glow discharge

ภาพที่ 25



- ก) แสดงส่วนประกอบตำแหน่งของอิเล็กโตรด แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ thermionic เป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับของระบบ triode sputtering
- ข) แสดงส่วนประกอบทางไฟฟ้าของระบบ ไตร โอดสปัตเตอริง

เมื่อความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงกว่า 50 kHz พบว่าความดันก๊าซต่ำสุดที่ยังคงรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ได้มีค่าลดลงอย่างช้าๆ และลดลงมากขึ้นเมื่อความถี่สูงมาอยู่ในระดับ Mhz แสดงถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากอิเล็กตรอนชุดที่สองที่ถูกผลิตจากผิวอิเล็กโตรด ซึ่งเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนสามารถรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าความถี่สูงและไอออนโมเลกุลของก๊าซได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่าอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กความถี่สูง สามารถรับพลังงานจากสนามและสั่นตัว (oscillate) ด้วยเฟสของความเร็วต่างจากสนามไฟฟ้า  $90^\circ$  ในสถานะนี้อิเล็กตรอนจะรับพลังงานเฉลี่ยจากสนามเป็นศูนย์ถ้าระหว่างช่วงการรับพลังงานจากสนามอิเล็กตรอนเกิดการชนกับโมเลกุลของก๊าซ พลังงานจะถูกถ่ายเทให้กับโมเลกุลของก๊าซก่อนการรับพลังงานในช่วงลบของไซเคิลและถ้าการรับพลังงานจากสนามและการส่งถ่ายพลังงานสู่โมเลกุลของก๊าซมีความสัมพันธ์ที่เหมาะสม พลังงานจากสนามไฟฟ้าจะถูกสะสมในโมเลกุลของก๊าซ และถูกเปลี่ยนเป็นการไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซแทน เราพบว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นโอกาสการเกิดไอออนในเซชันจะสูงขึ้นตามไปด้วย ที่ความถี่คงที่ปริมาณการเกิดไอออนในเซชันจะแปรผันตามกำลังสองของความเข้มสนามไฟฟ้าสลับนี้ และเนื่องจากการคิซซาร์จที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นกับปริมาณอิเล็กตรอนชุดที่สองจากอิเล็กโตรด แม้แรงดันไฟฟ้าค่าต่ำมากก็สามารถทำให้ขบวนการ r.f. glow discharge เกิดขึ้นได้ และความดันต่ำสุดที่รักษาสภาพ r.f. glow discharge ไว้ได้มีค่าต่ำประมาณ 0.5 mtorr

การใช้สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะช่วยลดการสูญเสียของอิเล็กตรอนจากบริเวณพลาสมา เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตส่วนใหญ่จะถูกกักบริเวณการเคลื่อนที่ไว้ได้ด้วยสนามแม่เหล็กและเพิ่มประสิทธิภาพการคิซซาร์จ ในขณะที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเหมาะกับการเพิ่มประสิทธิภาพใน d.c. glow discharge

สภาพพลาสมาที่ผลิตจากขบวนการ r.f. glow discharge จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกสูงกว่าใน d.c. glow discharge เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนมากและสามารถเคลื่อนเข้าสู่อิเล็กโตรดได้เป็นส่วนใหญ่ในแต่ละครึ่งไซเคิลของไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะที่ไอออนต้องใช้เวลาหลายไซเคิลในการเคลื่อนที่สู่อิเล็กโตรด ดังนั้นกระแสส่วนใหญ่ใน r.f. discharge คือ กระแสอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่สู่อิเล็กโตรดในแต่ละครึ่งไซเคิล คือ อิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากผิวอิเล็กโตรดภายในระยะทาง  $L$  เมื่อเริ่มต้นไซเคิล

$$\text{ขนาดของแอมพลิจูด } L = \mu E_m / w \quad (20)$$

เมื่อ  $\mu$  คือค่า mobility ของอิเล็กตรอนที่ความดันก๊าซขณะใช้งาน

$E_m$  คือค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ

$w$  คือความเร็วเชิงมุมของไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อให้การคิซซาร์จเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ

การทำ r.f. sputtering ยังสามารถใช้กับการสปัตเตอร์สารไดอิเล็กตริก หรือ ฉนวนไฟฟ้าได้ในขณะที่ d.c. sputtering ทำไม่ได้ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนสารไดอิเล็กตริกในระบบ d.c. จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะสมศักย์ไฟฟ้าบวกที่ผิวหน้าของฉนวนจนมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอานอด และทำให้ขบวนการสปัดเตอรืงลืงสุดลง ส่วนระบบ r.f. จะพาอืเลคตรอนเข้าสู่ผิวไดอืเลคตริคทำให้ผิวหน้าเป็นกลางหรือเป็นลบในช่วงไซเคลิบวกเพื่อพร้อมที่จะเกิดขบวนการสปัดเตอรืงได้อืกในช่วงไซเคลลบดัดไป

ควมดืที่ใช้ในระบบ r.f. sputtering คื 13.56 , 27.12 และ 40.68 Mhz ซึ่งเป็นเครื่องกำเนดที่ผลดืขึ้นในทางการค้ำ และรบบควมระบบโทรคมนาคนนอยที่สดุ ในขณะท่ให้ประสทธิภพการเกิดไอออนในเซชนสูง มีควมสามารถท่ให้เกิดขบวนการดิสซาร์จที่ควมดัน 0.5 mtorr และเพิ่มอัตราการสปัดเตอรื ให้กับสารเคลือบได้สูงถึง 20 เท่าค้ว ของระบบ d.c. diode sputtering

โดยปกตการใช้สัณญูณ r.f. กับระบบสปัดเตอรืง การออกแบบจำเป็นดองมีวงจรมชขังเพื่อให้ประสทธิภพของการสปัดเตอรืงสูงสดุ สายค่อที่ยาวเกนไปจะเพิ่มค้ำ inductive reactance ให้กับวงจร กรวาค์ซิลที่มีระยะห่างจากคาโทคแบบและเคยใช้งานได้ค้กับระบบไฟฟ้า d.c.จะเป็นกรวาค์ซิลค้ที่เลวในระบบ r.f. เนองจากจะประพดค้ค้วเป็นคาปาซิเตอรืที่มีค้ำการสูญเสยพลังงานสูง จำเป็นดองใช้ควมระม้คระวังในการออกแบบสูงขัง

### Magnetron sputtering

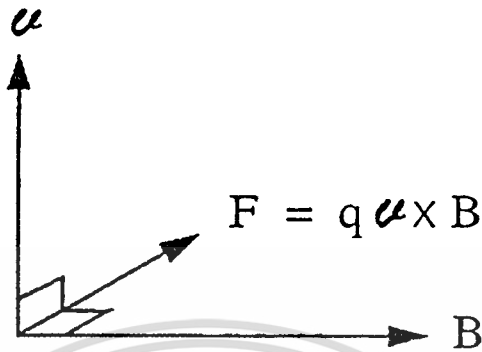
ผลการใช้สนามแม่เหล็กในระบบสปัดเตอรืงมือยู่ม่นอย โดยได้ประโยชนม์ในด้นการเพิ่มอัตราการสปัดเตอรืง (sputtering rate) และยังช้ชวลด electron bombardment ที่แผ่นรองขังงาน แต่ก้พบปัญหาควมไม่สมำเสมอของการดิสซาร์จบริเวณเป้ำ

ปฏิกิริยขังแรกของอนุภคที่มีประจุ  $q$  และมืควมเร็ว  $v$  ที่สนามแม่เหล็ก  $B$  จะท่ให้เกิดแรงกระทำบนอนุภคเป็น  $F$  โดยมีขนาด  $F = Bqv$  ทิศทางของแรง  $F$  จะตั้งฉากกับทั้งทิศทางสนามแม่เหล็กและทิศทางของควมเร็วคังภพที่ 26 ซึ่งสามารถแสดงออกมได้เป็นรูปเวคเตอรืแรงนี้จะสร้งควมเร่ง ซึ่งจะแปรผันตรงข้มกับควมวลของประจุนั้น สำหรับแม่เหล็กท่ใช้ในระบบสปัดเตอรืงส่วนใหญ่จะมีขนาดมกกว่ 100 gauss ซึ่งจะมีแต่อืเลคตรอนเทำนันท่จะได้รับผลกระทบของแรงนี้ สำหรับไอออนจะมีวลมกไปจิงไม่ได้รับผลของแรงนี้ค้ว

จุดประสงค้ของการใช้สนามแม่เหล็กในระบบสปัดเตอรืงก้ท่จะทำการเพิ่มประสทธิภพในการใช้อืเลคตรอนให้มกขัง ในการเพิ่มผลผลดให้เกิดขบวนการไอออนในเซชนมกขัง ในระบบโกลวดิสซาร์จแบบเดม้นัน จะสูญเสยอืเลคตรอนอย่งรวดเร็วโดยการ recombination ที่บริเวณผนงภษนะสูญญูณภค เพื่อให้เกิดการสูญเสยอืเลคตรอนให้น้อยที่สดุ เรวจิงหาหนทางใหม่โดยการใช้สนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารท่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเทำนัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชนด้นการค้ำ  
ไม่วำกรณืใดๆขังลัน อืกขังห้ามมืให้ค้ดแบบงเนื่อหา และดองอ้งอึงถึงเจำของเอกสารทุกคร้งท่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 26



แสดงแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า  $F$  ซึ่งตั้งฉากกับ  $u$  และ  $B$

แกนสนามแม่เหล็กถูกนำมาใช้ในการโคจรวิถีซาร์จของระบบ planar diode sputtering และการดิซาร์จของระบบ triode sputtering สำหรับจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความยาวของเส้นทางเดินอิเล็กตรอนก่อนที่จะถูกเข้าไปรวมกันอยู่ที่อานอด และการสูญเสียอิเล็กตรอนในระหว่างเส้นทางไปอานอด เนื่องจากการรวมตัวกันที่ผนังของแชมเบอร์สุญญากาศ เราจะแสดงผลที่เกิดกับระบบใส่หลอดร้อนที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (ดังแสดงในภาพที่ 27a) อิเล็กตรอนจะเดินทางไปตามทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งทำให้ไม่ได้รับผลของแรงจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้น  $B$  และ  $v$  จะมีทิศทางขนานกันไปตลอด และผลลัพท์ทางเวกเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าคำนึงถึงอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นมุม  $\theta$  กับทิศทางสนามแม่เหล็ก (ดังแสดงในภาพที่ 27b) ดังนั้นจะเกิดแรงกระทำบนอิเล็กตรอนเป็น  $Bev \sin \theta$  มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก แต่ในทางปฏิบัติมันจะไม่เป็นอย่างนั้นเนื่องจากอิเล็กตรอนอาจจะเกิดการชนกับโมเลกุลก๊าซขึ้นบ้าง เราจะสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในลักษณะวงกลมรอบๆ สนามแม่เหล็ก  $B$  โดยมีรัศมีเป็น

$$\frac{m_e (v \sin \theta)^2}{r} = Bev \sin \theta \quad (21)$$

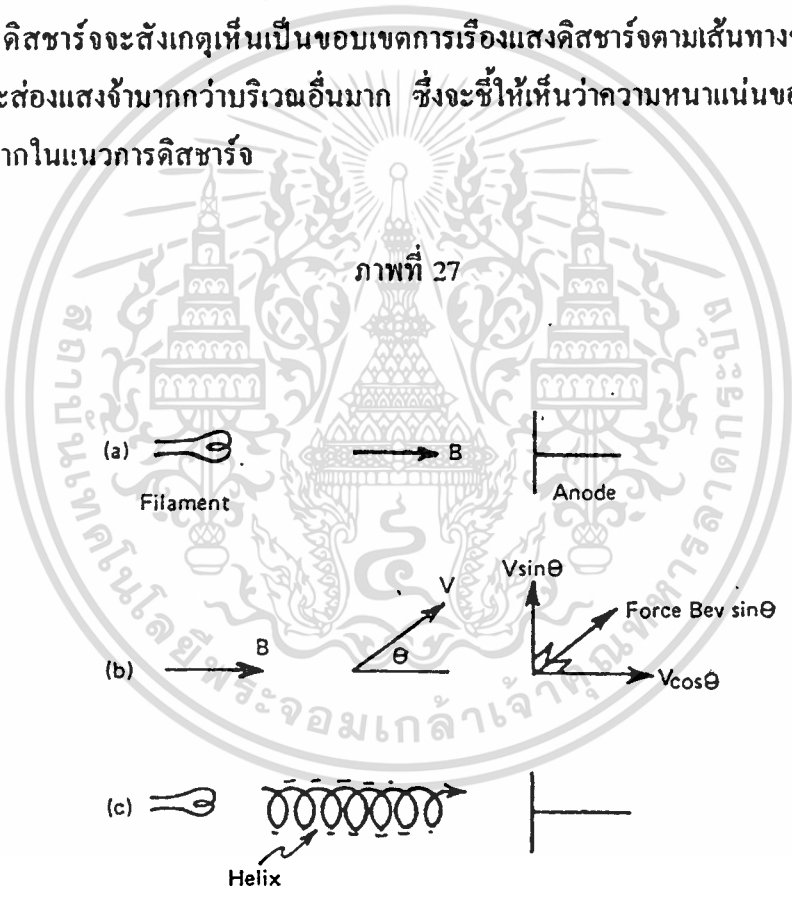
หรือ

$$\frac{m_e v \sin \theta}{Be} = r \quad (22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการที่ความเร็ว  $v \cos \theta$  ขนานคู่ไปกับสนามแม่เหล็ก B จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นแบบวงสว่าง (helix) ดังแสดงในภาพที่ 27c

หลังจากแต่ละรอบของ helix อิเล็กตรอนจะย้อนกลับมาที่ตำแหน่งเดิมและรัศมีเดิม ผลของสนามแม่เหล็กจะไปช่วยลดความเร็วสุทธิของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางไปทางผนังแคทออดให้เป็นศูนย์ ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากการ recombination ที่บริเวณผนังแคทออดจะลดลง ผลกระทบอีกอย่างของการเคลื่อนที่แบบ helical ก็จะช่วยเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่ไปสู่แอโนด ทำให้สามารถไปทำให้เกิดการ ionization และ excitation โมเลกุลของก๊าซได้มากยิ่งขึ้น ผลกระทบนี้จะปรากฏอย่างชัดเจนเมื่อระบบนำสนามแม่เหล็กมาใช้ ถ้าสังเกตดูปรากฏการณ์การดิสชาร์จจะสังเกตเห็นเป็นขอบเขตการเรืองแสงดิสชาร์จตามเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็ก และจะส่องแสงจ้ามากกว่าบริเวณอื่นมาก ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มอย่างมากในแนวการดิสชาร์จ



แสดงผลกระทบของสนามแม่เหล็ก

- a) การดิสชาร์จของไส้หลอดร้อนกับแกนสนามแม่เหล็ก B
- b) แรงที่เกิดบนอนุภาคที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v โดยมีทิศทางเป็นมุม  $\theta$  กับแกนสนามแม่เหล็ก
- c) การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบ helical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรายังสามารถใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า กับระบบสปีดเตอริงแบบไส้หลอดร้อน 3 ขั้ว (hot filament triode system) ซึ่งตามปกติระบบนี้สามารถทำงานได้ที่ความดันเป็นมิลลิทอร์นน้อยๆ ได้ ซึ่งเป็นจุดที่แหล่งจ่ายอิเล็กตรอนแบบ thermionic จะมีประสิทธิภาพ และสามารถขยายช่วงความดันการทำงานให้ต่ำลงไปได้จนถึง  $10^{-5}$  torr โดยประมาณ

ในปัจจุบันเราได้ใช้ระบบสปีดเตอริงแบบ magnetic มากกว่าระบบสปีดเตอริงแบบ cold cathode diode sputtering system แบบเดิม อีกทั้งผลของสนามแม่เหล็กสามารถทำให้ระบบสปีดเตอริงใช้ความดันได้ต่ำกว่าเดิม ซึ่งส่งผลให้ระบบสะอาดมากยิ่งขึ้น โอกาสที่ไอออนจะพุ่งชนและทำให้เกิดการหลุดออกสูงขึ้น ทำให้กระแสไอออนมีค่าสูงขึ้น ค่าอัตราสปีดเตอริงสูงขึ้นไป ความดันก๊าซคงที่ แต่ผลของสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการคิซาร์จเฉพาะบริเวณ และบางทีอาจจะเป็นสาเหตุของความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบบนแผ่นรองชิ้นงาน แต่ถึงแม้ว่าจะมีข้อเสียนี้อยู่ การนำเอาแกนสนามแม่เหล็กมาใช้กันอย่างมากมายก็เป็นข้อพิสูจน์ให้เห็นว่าในการปฏิบัติวิธีนี้ มีประโยชน์มากมาย

เราจะมาทำการศึกษาระบบ magnetron อีกครั้งตามหลักทฤษฎีสถิตสนามแม่เหล็ก เพื่อที่จะเพิ่มการไอออนในเซชันด้วยการใช้สนามแม่เหล็กเข้าไป พร้อมกับศึกษาผลกระทบที่มีต่ออิเล็กตรอนบริเวณเป้าที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าให้ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

พิจารณาการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความเร็ว  $v$  จากผิวเป้าไปสู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก  $B$  (ดังภาพที่ 29a) ที่ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ พบว่าอิเล็กตรอนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่เป็นแบบครึ่งทรงกลม (semicicly) ด้วยรัศมี  $r$  ที่มีค่าเท่ากับ

$$\frac{m_e v^2}{r} = Bev \quad (23)$$

เพราะฉะนั้น

$$r = \frac{m_e v}{Be} \quad (24)$$

หรือ

$$r = \frac{3.37(W)^{\frac{1}{2}}}{B} \quad (25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $r$  เป็นรัศมีการเคลื่อนที่วงกลมของอิเล็กตรอน

$m_e$  เป็นมวลของอิเล็กตรอน

$v$  เป็นความเร็วของอิเล็กตรอน

$e$  เป็นประจุอิเล็กตรอน

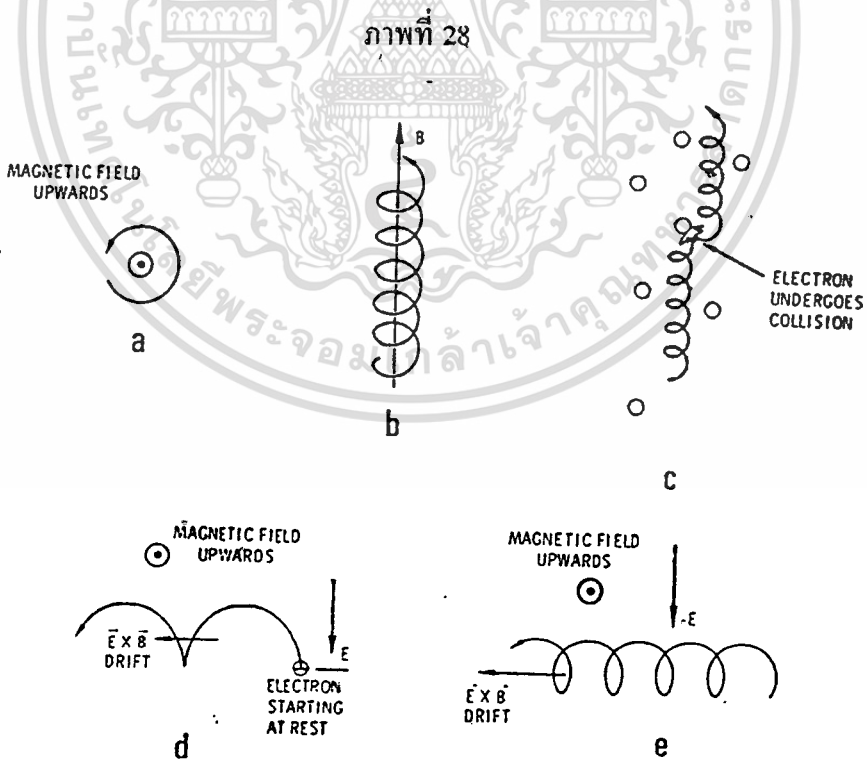
$B$  เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

$W$  เป็นค่าพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV

และหมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน

$$\omega = 2.8 \times 10^6 B \text{ รอบ/วินาที} \quad (26)$$

ด้วยเงื่อนไขว่าอิเล็กตรอนจะไม่มีการชนในระหว่างการเคลื่อนที่ และจะย้อนกลับไปสู่ผิวเป้าด้วยความเร็ว  $v$  ดังนั้นผลของสนามแม่เหล็ก ก็จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางในบริเวณใกล้เคียงกับผิวเป้า ซึ่งจะทำให้เกิดการปลดปล่อยสูงยิ่งขึ้น



a, b, c แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว

d, e แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าพร้อมกัน ในลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

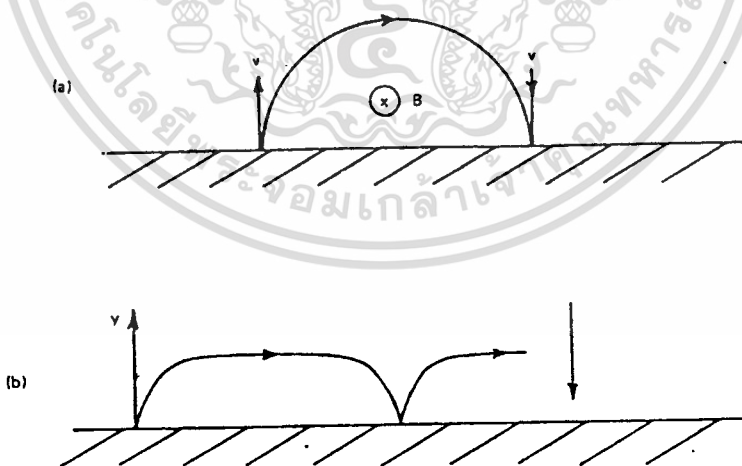
ดังนั้นถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า  $10 \text{ eV}$  และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม  $100 \text{ เกาส์}$  รัศมีการหมุนจะมีค่าเท่ากับ  $0.1 \text{ เซนติเมตร}$  และด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ  $2.8 \times 10^8 \text{ รอบ/วินาที}$  ในภาพที่ 28b แสดงถึงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่ง ระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนเกิดการชนกับอะตอมของก๊าซดังในภาพที่ 28c แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เรียกว่า drift motion ความเร็วนี้มีค่า

$$v_E = 10^8 E/B \quad \text{เซนติเมตร/วินาที} \quad (27)$$

เมื่อ  $E$  คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น โวลต์/เซนติเมตร

$B$  คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วยเกาส์

ภาพที่ 29



แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อหลุดออกมาจากผิวเป้าด้วยความเร็ว  $v$

เข้าไปในบริเวณพื้นที่ของสนามแม่เหล็ก  $B$  ที่มีทิศทางขนานไปกับผิวเป้า

a) เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า

b) เมื่อมีสนามไฟฟ้าที่มีค่าลดลงอย่างเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีสนามไฟฟ้าบริเวณ dark space มีค่าประมาณ 1,000 โวลต์/เซนติเมตร และสนามแม่เหล็กมีค่า 100 เกาส์ จะให้ค่า drift velocity = 10,000 กิโลเมตร/วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง กรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูป cycloid ดังแสดงในภาพที่ 28d ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบ drift motion จะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงในภาพที่ 28e พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้เด่นชัดมาก แม้จะใช้สนามแม่เหล็กค่าน้อยๆ ที่มีค่าระหว่าง 50 ถึง 500 เกาส์ แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางการเคลื่อนที่ของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

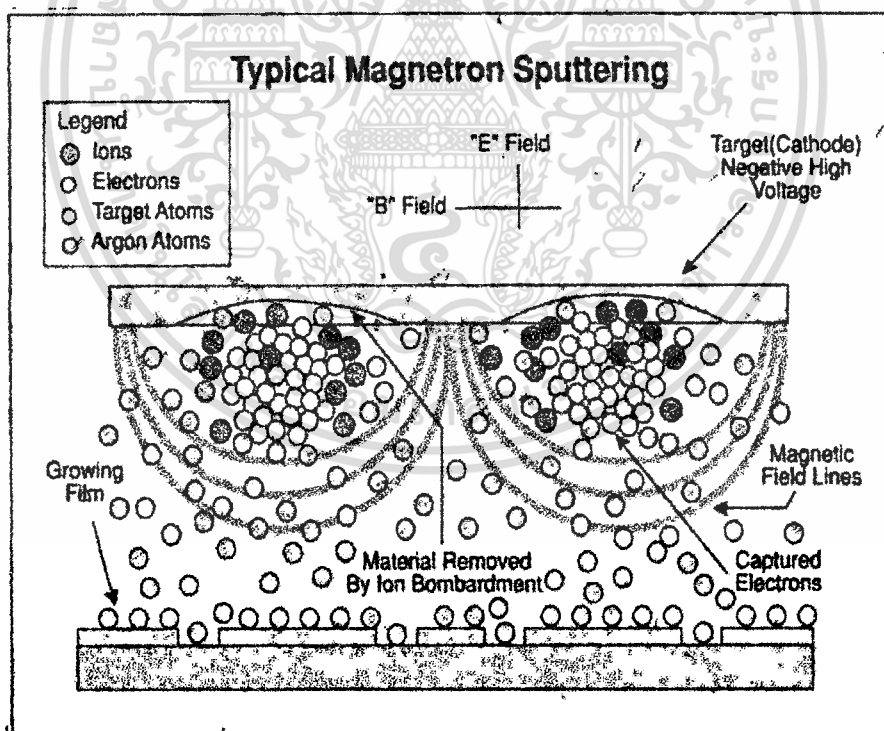
ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า จะเรียกว่า longitudinal field จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนัก แต่จะไม่ทำให้แนวการโคจรดิซซาร์จเปลี่ยนไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบไว้ได้ดี ในกรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า จะเรียกว่า transverse field ขบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที่ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุดที่สองนี้จะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ (2.28d) มีผลทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้ผิวคาโทด และ drift ตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ดูภาพที่ 30) มีผลทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลก๊าซบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากยิ่งขึ้น จนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของก๊าซจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้น เป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวคาโทด ทำให้เกิด space charge จากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลดการชนในไดโอดสปัตเตอริง ณ ความดันที่ใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมในบริเวณนี้ และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณ dark space ในไดโอดสปัตเตอริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมาก ผลนี้ทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงลดลงมาก โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 300 ถึง 800 โวลต์ ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอก จะเรียกว่า cylindrical magnetron sputtering และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบไดโอดสปัตเตอริงที่ใช้เป้าแผ่นราบ จะเรียกว่า planar magnetron sputtering

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบ magnetron และพลาสมาที่เกิดเข้มข้นมากในบริเวณเป้าสารเคลือบ ทำให้อัตราการสปัตเตอริงของระบบนี้มีค่าสูงขณะที่ความดันก๊าซในระบบจะมีค่าต่ำ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปัตเตอริง ระบบ cylindrical magnetron sputtering โดยทั่วไปจะมีอัตราการสปัตเตอริงสูงกว่า 10,000 A/min อัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่สูงกว่า 2,000 A/min ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ผิวคาโทดจะประมาณ 20 mA/cm<sup>2</sup> หรือสูงกว่า แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าระหว่าง 300 ถึง 800 โวลต์ ที่ความดันก๊าซประมาณ 4 มิลลิทอร์ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนที่สูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปีดเตอร์ริงขนาดใหญ่ได้ง่าย และเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับระบบ triode sputtering ระบบสามารถทำงานเคลื่อนได้ที่ความดันก๊าซต่ำถึง 10<sup>-5</sup> ทอร์ ข้อเสียเปรียบของระบบ magnetron sputtering คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลื่อนวัสดุบางชนิดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อควบคุมคุณภาพฟิล์มเคลื่อน แต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบ magnetron sputtering สามารถควบคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็ก จึงมีอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งเข้าสู่แผ่นรองรับปริมาณน้อย สามารถช่วยลดปัญหาความร้อนบนแผ่นรองรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลงได้อย่างมาก

ภาพที่ 30

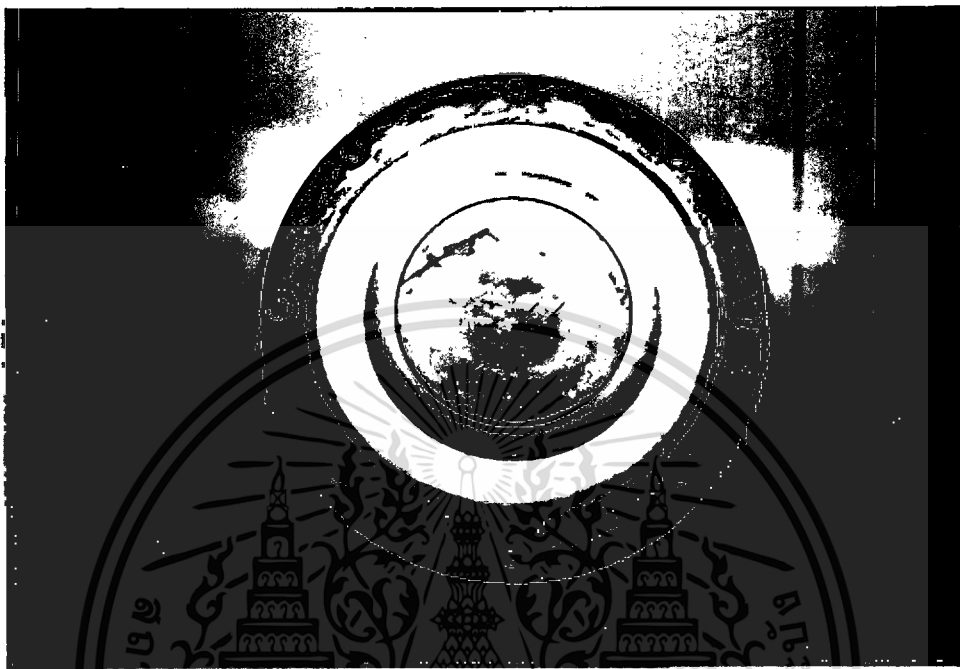


แสดงการจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตร้อนของเป้าสารเคลื่อนใน

planar magnetron sputtering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 31



แสดงแนวการกัดกร่อนแผ่นเป่าสารเคลือบไททาเนียมสีลงเป็นรูปตัว V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## องค์ประกอบที่ใช้ในระบบ ดีซี พลาสมา แมกนีตรอน สปีดเตอริง

### การออกแบบสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้กับระบบไดโอดสปีดเตอริง (Diode sputtering) อาจใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ (AC) หรือความถี่สูง (RF) ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำอาจใช้ในการสปีดเตอริงที่มี 2 คาโทด โดยมีชิ้นงานอยู่ระหว่างกลางเพื่อให้การเคลื่อนเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของชิ้นงานในเวลาเดียวกัน โดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าชุดเดียว

ในการออกแบบเครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้งานจำเป็นต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ถ้าระบบสปีดเตอริงเป็นชนิด ดีซี ไดโอด (D.C. diode sputtering) ควรใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 1 - 5 กิโลโวลต์ โดยมีระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่แบบปรับค่าได้ และกระแสไฟฟ้าควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1 - 5 mA/cm<sup>2</sup> บนคาโทด แต่เมื่อเป็นชนิดพลาสมาแมกนีตรอนสปีดเตอริง (Planar magnetron sputtering) แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานจะมีค่าอยู่ระหว่าง 300 - 800 โวลต์ และกระแสควรมีค่าอยู่ระหว่าง 10 - 100 mA/cm<sup>2</sup> บนคาโทด โดยมีระบบควบคุมกระแสคงที่แบบปรับค่าได้ สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ อาจจะมีการกรองสัญญาณให้เรียบหรือไม่มีการกรองสัญญาณก็ได้ การกรองสัญญาณจะช่วยให้การสปีดเตอริงบนผิวสารเคลือบและสภาพโกลด์ดิสชาร์จมีความสม่ำเสมอ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าควรสามารถทนต่อการเกิด high voltage rf transients ซึ่งเกิดจากพลาสมาในระบบแมกนีตรอนรวมทั้งการอาร์คของระบบด้วย การอาร์คเพียงเล็กน้อยอันเกิดจากสารเจือปน และ dielectric breakdown บนเป่าสารเคลือบ ซึ่งเกิดขึ้นชั่วขณะระบบป้องกันของเครื่องควรจำกัดกระแสการอาร์คนี้ไว้ได้โดยไม่ต้องวงจร

### การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง ( $S_{sc}$ ) ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{sec} = I_{sec} \times I_{sec} \quad (28)$$

โดยที่  $S_{sec}$  คือกำลังไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิ หน่วยเป็น โวลต์-แอมแปร์

$I_{sec}$  คือแรงดันที่คร่อมขดทุติยภูมิ หน่วยเป็น โวลต์

$I_{sec}$  คือกระแสที่ไหลผ่านในขดทุติยภูมิ หน่วยเป็น แอมแปร์

จากสมการที่ (28) เมื่อต้องการค่ากระแสไฟฟ้าของโหลดสูงสุดเป็น 2 แอมแปร์ ดังนั้นค่ากระแสสูงสุดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะประมาณ 3 แอมแปร์ สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิเป็น  $S_{sec} = 600 \times 3 = 1800$  โวลต์-แอมแปร์

หาค่ากระแสอินพุทของหม้อแปลงได้จาก

$$I_1 = \frac{I_2}{a} \quad (29)$$

$$= \frac{3 \times 600}{220}$$

หาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก E

$$A = \frac{\sqrt{P}}{5.58} \quad (30)$$

$$= \frac{\sqrt{1800}}{5.58} = 7.6 \text{ ตารางนิ้ว}$$

แต่ 1 ตารางนิ้ว เท่ากับ  $6.4516 \times 10^{-4}$  ตารางเมตร ดังนั้น 7.6 ตารางนิ้ว จะเท่ากับ  $4.9 \times 10^{-3}$  ตารางเมตร

$$\frac{V}{n} = 4.44 \times f \times B_{max} \times F_s \times A \quad (31)$$

กำหนดค่า stacking factor ( $F_s$ ) = 0.9 ดังนั้นจะได้

$$\frac{V}{n} = 4.44 \times 50 \times 1 \times 0.9 \times 4.9 \times 10^{-3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.98 \text{ โวลต์ / รอบ}$$

ดังนั้นจำนวนรอบทางด้าน primary ของหม้อแปลงจะเป็น  $N_p = 220/0.98 = 225$  รอบ  
และจำนวนรอบทางด้าน secondary ของหม้อแปลงจะเป็น  $N_s = 600/0.98 = 612$  รอบ

หา  $A_p$  จาก  $I_1 = 8.2$  แอมป์ แปลงเป็น circulamil  $= I_1 \times 500 = 8.2 \times 500 = 4100$   
นำไปเปิดตารางภาคผนวกที่ 1 จะได้ขนาดของลวดเบอร์ S.W.G. 16 โดยมี  $A_p = 2.112$  ตาราง  
มิลลิเมตร

หา  $A_s$  จาก  $I_2 = 3$  แอมป์ แปลงเป็น circulamil  $= I_2 \times 500 = 3 \times 500 = 1500$   
นำไปเปิดตารางภาคผนวกที่ 1 จะได้ขนาดของลวดเบอร์ S.W.G. 19 โดยมี  $A_s = 0.625$  ตาราง  
มิลลิเมตร

หาพื้นที่สำหรับพันเส้นลวด  $A_w$  ได้จาก

$$A_w = \left( \frac{N_p A_p + N_s A_s}{F_w} \right) \quad (32)$$

กำหนดแฟคเตอร์ของขดลวดเมื่อมีช่องว่างเหลือ  $F_w$  ให้เท่ากับ 0.6 จะได้

$$A_w = \left( \frac{225 \times 2.112 + 612 \times 0.625}{0.6} \right)$$

$$= 1429.5 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

หาขนาด I จาก

$$3I(I) = A_w$$

$$I = \sqrt{\frac{1429.5}{3}}$$

$$= 21.83 \text{ มิลลิเมตร}$$

จาก  $I = 21.83$  มิลลิเมตร  $= 0.86$  นิ้ว จะได้ขนาดแกนกลาง  $E = 2I = 1.72$  นิ้ว ดังนั้นจะเลือกขนาด  $E = 2$  นิ้ว ดังนั้นจะเลือกค่า  $I = 1$  นิ้ว

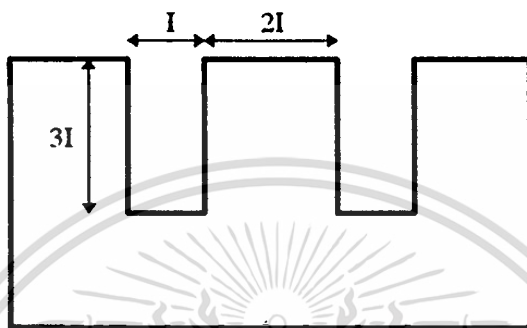
และจาก  $3I(I) = A_w$  ดังนั้นจะได้  $A_w$  เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_w = 3 \times 1^3$$

$$= 3 \text{ ตารางนิ้ว} = 1935.48 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

ภาพที่ 32



แสดงขนาดอัตราส่วนแกนหม้อแปลง E

หาขนาดความลึกของแกน E ได้จาก

$$2I \times D = A$$

$$2(1) \times D = 7.6 \text{ ตารางนิ้ว}$$

$$D = 3.8 \text{ นิ้ว}$$

เพราะฉะนั้นสามารถออกแบบ bobbin ให้มีขนาดกว้าง 3.8 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว

ในภาพที่ 33a เป็นวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันเอาต์พุตขนาด  $600\sqrt{2}$  V<sub>DC</sub> โดยใช้หม้อแปลงแบบ step-up แรงดันไฟฟ้าจาก 220 V<sub>AC</sub> เป็น 600 V<sub>AC</sub> ส่งกระแสไฟฟ้าต่อไปยัง ส่วนของวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier) เพื่อทำการเรียงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงขนาด 0-2 แอมแปร์ โดยมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ V<sub>DC</sub> = 0.637 V<sub>m</sub> เมื่อ V<sub>m</sub> เป็นค่าแรงดันสูงสุด (maximum voltage) จากนั้นจึงทำการกรองสัญญาณไฟฟ้าด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor filter) C<sub>F</sub> ซึ่งมีขนาด 684 ไมโครฟารัด ซึ่งหาได้จากสมการ

$$r = \frac{2.9I_{dc}}{CV_{dc}} \times 100\% \quad (33)$$

โดยที่  $r$  เป็นค่าเปอร์เซ็นต์รีปเปิลโวลเตจ

$I_{dc}$  เป็นค่าเฉลี่ยกระแสโหลด (มิลลิแอมแปร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C$  เป็นค่าความจุไฟฟ้ากรองแรงดัน (ไมโครฟารัด)

$V_{dc}$  เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (โวลต์)

กำหนดให้ค่า ripple เท่ากับ 1% กระแส  $I_L$  เท่ากับ 2 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เท่ากับ 848.5 โวลต์ เพราะฉะนั้นจะได้ค่าความจุไฟฟ้า  $C_F$  เท่ากับ 684 ไมโครฟารัด โดยมีค่าแรงดัน ripple ( $V_{rms}$ ) = 6.84 โวลต์

แต่เนื่องจากก๊าซในแชนเบอร์ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าแรงดันเอาท์พุทปกติ เพื่อใช้ในการเอาชนะแรงดันเบรคดาวน์ (Breakdown voltage) ของก๊าซภายในแชนเบอร์ ซึ่งจะทำให้ก๊าซเปลี่ยนคุณสมบัติจากสภาวะ Negative resistance ไปเป็น Positive resistance ได้โดยใช้เทคนิคทวีแรงดัน (Voltage multiplier) ดังแสดงในวงจรภาพที่ 33a ซึ่งในการใช้งานได้ทำการต่อชุดทวีแรงดัน 3 เท่าของแรงดันปกติ โดยตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรทวีแรงดัน คือ  $C_1, C_2, C_3$  ซึ่งแต่ละตัวจะมีแรงดันเก็บประจุได้เท่ากับ  $2V_m$

หาค่ากระแสเริ่มต้นคิซซาร์จ  $I$  จาก

$$n = \sqrt{\frac{fCV_{\max}}{I}} \quad (34)$$

เมื่อ  $n = 3, V_{\max} = 600$  โวลต์,  $f = 50$  Hz,  $C = 0.1 \mu\text{F}$  จะได้  $I \cong 0.5$  mA ดังนั้น ค่าแรงดันสูงสุดที่ได้จากวงจร voltage multiplier เป็น

$$V_{L\max} = 2nV_{\max} - \frac{2n^3 I}{3fC} \quad (35)$$

เมื่อ  $n = 3, V_{\max} = 600$  โวลต์,  $I = 0.5$  mA,  $f = 50$  Hz,  $C = 0.1 \mu\text{F}$  จะได้  $V_{L\max} = 3,000$  โวลต์ เพื่อใช้ในการเอาชนะค่าแรงดันพังทลายของก๊าซอาร์กอน

จากภาพที่ 33 สามารถแสดงค่าปริมาณของอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้คือ

LED<sub>1</sub> = Operate State

LED<sub>2</sub> = Soft Start State

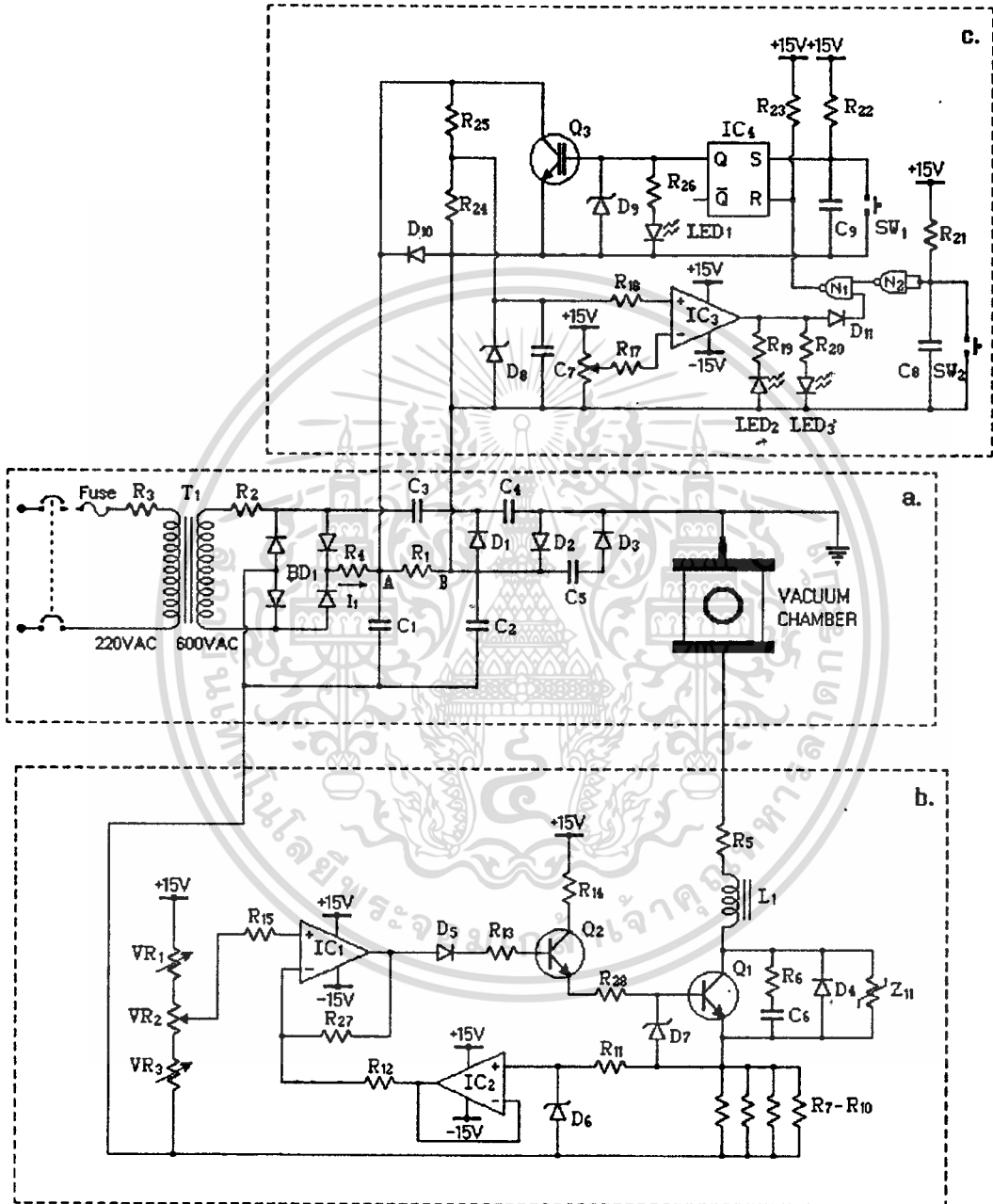
LED<sub>3</sub> = Ready State

VR<sub>1</sub> = 470 kΩ, VR<sub>2</sub> = 100 kΩ, VR<sub>3</sub> = 20 kΩ

R<sub>11</sub> = R<sub>12</sub> = R<sub>15</sub> = R<sub>18</sub> = R<sub>19</sub> = R<sub>20</sub> = R<sub>21</sub> = R<sub>22</sub> = R<sub>23</sub> = R<sub>26</sub> = 10 kΩ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 33



### วงจรไฟฟ้ารวมของระบบสปีดเตอร์

- (a) เป็นส่วนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง
- (b) เป็นส่วนควบคุมกระแสตรงที่
- (c) เป็นส่วนวงจรรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = R_{17} = R_{25} = R_{27} = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_{13} = R_{14} = R_{24} = R_{28} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_7 = R_8 = R_9 = R_{10} = 4 \text{ }\Omega$$

$$R_4 = R_5 = 100 \text{ }\Omega$$

$$R_2 = R_3 = 33 \text{ }\Omega$$

$$R_6 = 50 \text{ }\Omega$$

$$C_1 = C_3 = C_4 = C_5 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}, 2 \text{ kV}$$

$$C_7 = C_8 = C_9 = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C_2 = 684 \text{ }\mu\text{F}, 1,350 \text{ V}$$

$$C_6 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}, 1 \text{ kV}$$

### การออกแบบสร้างวงจรควบคุมกระแสคงที่

จากภาพที่ 33b เป็นวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้หลักการนำสัญญาณแรงดันป้อนกลับ (feedback) ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_7$  ถึง  $R_{10}$  ขนาด 1 โอห์ม 40 วัตต์ ผ่านวงจร Voltage Follower เพื่อให้แรงดันที่เอาต์พุตของออปแอมป์  $IC_2$  มีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน  $R_{11}$  และ  $R_7 - R_{10}$  โดยมีความต้านทาน  $R_{11}$  ทางด้านอินพุตของวงจรสูงมาก ทำให้ดึงกระแสจากแรงดันอ้างอิงน้อยมาก ตัวอย่างเช่น แหล่งจ่ายไฟของวงจร ( $E_{gen}$ ) มีแรงดัน 1 โวลต์ มีความต้านทานภายในวงจรแหล่งจ่ายไฟ ( $R_{int}$ ) เท่ากับ 90 กิโลโอห์ม ต่ออยู่กับขาอินพุต จากคุณสมบัติของวงจรขยายทั่วไปที่กล่าวว่า กระแสไหลเข้าขาอินพุตของออปแอมป์น้อยมากจนถือว่าไม่มีกระแสไหล ดังนั้นแรงดันทางด้านอินพุตของวงจรขยายจึงเท่ากับ  $E_{gen}$  และจากคุณสมบัติอีกข้อของวงจรขยาย คือ แรงดันของขาอินพุตทั้ง 2 จะเท่ากัน ดังนั้น ความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุตทั้งสองเป็น 0 โวลต์ ดังนั้นแรงดันที่ขาลบ ซึ่งลัดวงจรอยู่กับเอาต์พุตจะเท่ากับที่ขาบวก ดังนั้น

$$V_o = E_i = E_{gen} \quad (36)$$

เพราะฉะนั้นอัตราขยายของวงจรนี้จะเท่ากับ 1 ดังสมการ

$$A_{CL} = V_o/E_i = 1 \quad (37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $A_{CL}$  เป็นอัตราขยายของวงจร

สัญญาณจากวงจร voltage follower นี้จะส่งผ่านมายังส่วนเปรียบเทียบแรงดัน ในวงจร คือ  $IC_1$  โดยสามารถปรับค่ากระแสที่ไหลผ่านแอมเพอร์สัญญาณให้คงที่ ณ ค่าที่ต้องการได้ โดยการปรับค่าความต้านทาน  $VR_2$  (variable resistor) ซึ่งมีความต้านทาน  $VR_3$  เป็นตัวปรับค่ากระแสต่ำสุดเริ่มต้นของความต้านทาน  $VR_2$  ส่วนความต้านทาน  $VR_1$  เป็นตัวปรับค่ากระแสสูงสุดของความต้านทาน  $VR_2$  ที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบแรงดันที่ขาอินพุทของออปแอมป์  $IC_1$  ทำให้แรงดันเอาต์พุทของออปแอมป์  $IC_1$  ที่ออกมาจะมีแรงดันเปลี่ยนแปลงไปตามการปรับค่าความต้านทาน  $VR_2$  ผ่านไดโอด  $D_1$  ออกมาไบแอสให้ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ทำงานเพื่อจ่ายกระแสมาไบแอสให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ (power transistor)  $Q_1$  ทำงานอีกที ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  สามารถควบคุมกระแสที่ไหลผ่านแอมเพอร์สัญญาณได้อย่างสม่ำเสมอตามต้องการตลอดจนการเคลื่อนที่สิ้นสุดลง

### การออกแบบสร้างวงจรซอฟต์แวร์

จากวงจรในภาพที่ 33c คือส่วนของวงจร soft start เพื่อใช้ในการช่วยให้คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการกรองแรงดัน  $C_2$  ค่อยๆ เก็บประจุ โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าน้อยๆ ไหลผ่านความต้านทาน  $R_1$  ที่มีค่าความต้านทานค่าสูงๆ มาประจุให้คาปาซิเตอร์  $C_2$  เรื่อยๆ จนเต็ม โดยมีคาปาซิเตอร์  $C_1$  ขนาด 0.01 ไมโครฟารัด ค่อยๆ อยู่ในวงจรเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบแรงดันที่จุด A และจุด B จนคาปาซิเตอร์  $C_2$  เก็บประจุจนเต็มจะทำให้แรงดันที่จุด A และ B มีค่าเกือบเท่ากัน ทำให้เอาต์พุทของออปแอมป์  $IC_3$  มีค่าแรงดันเปรียบเทียบของขาอินพุทชนิด non-inverting สูงกว่าขาอินพุทชนิด inverting เอาต์พุทที่ออกมาจึงมีค่าแรงดันเท่ากับ  $+V_{sat}$  ซึ่งจะ ทำให้  $LED_3$  ติดสว่าง (แสดงสถานะว่าพร้อมที่จะ on เครื่องได้) จากนั้นสัญญาณ  $+V_{sat}$  จะถูกส่งต่อไปยังแนกเกท  $N_1$  ซึ่งเป็นขณะเดียวกับที่เรากดปุ่มสวิทช์  $SW_2$  ให้ on เพื่อทำการ operate เครื่องเพาเวอร์ซัพพลาย ทำให้ได้สัญญาณที่อินพุทของแนกเกท  $N_1$  เป็น 1 ทั้งคู่ จึงทำให้วงจร flip-flop ที่  $IC_4$  ถูกทำการ set ดังนั้นเอาต์พุท Q ของ flip-flop จึงมีสัญญาณเอาต์พุทออกมาขับขาเกตของ IGBT  $Q_3$  ให้ on นำกระแสจากขา collector ผ่านไปยังขา emitter ของ IGBT ได้ตามต้องการ

นอกจากนี้แล้ววงจร soft-start ยังสามารถนำเอาสัญญาณเอาต์พุท Q จาก flip-flop  $IC_4$  ไปสั่งให้วงจรควบคุมกระแสคงที่ (constant current) เริ่มทำงานในขณะที่ on สวิทช์  $SW_2$  ได้อีก และที่ขา set ของ flip-flop  $IC_4$  ยังสามารถใช้ต่อกับวงจรส่วนของระบบป้องกัน (Protection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

system) ได้อีก อย่างเช่น วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์เพาเวอร์โมดูลของวงจรกระแสคงที่ไม่ให้ เกิดแรงดันตกคร่อมที่ขา collector และขา emitter สูงเกินกว่ากำลังที่ทรานซิสเตอร์เพาเวอร์โมดูล จะทนได้ หรือจะต่อเข้ากับสวิตช์ฉุกเฉิน (Emergency switch) SW<sub>1</sub> ก็ได้ ซึ่งสัญญาณของทั้งสอง นี้จะทำการ reset flip-flop IC<sub>4</sub> ทำให้ IGBT Q<sub>3</sub> หยุดนำกระแส ซึ่งก็คือทำให้แหล่งจ่ายไฟหยุดจ่าย กระแสไฟฟ้านั่นเอง

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจรที่ได้ทำการออกแบบสร้างสามารถหาได้จาก การบันทึกผลการทดสอบซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 5

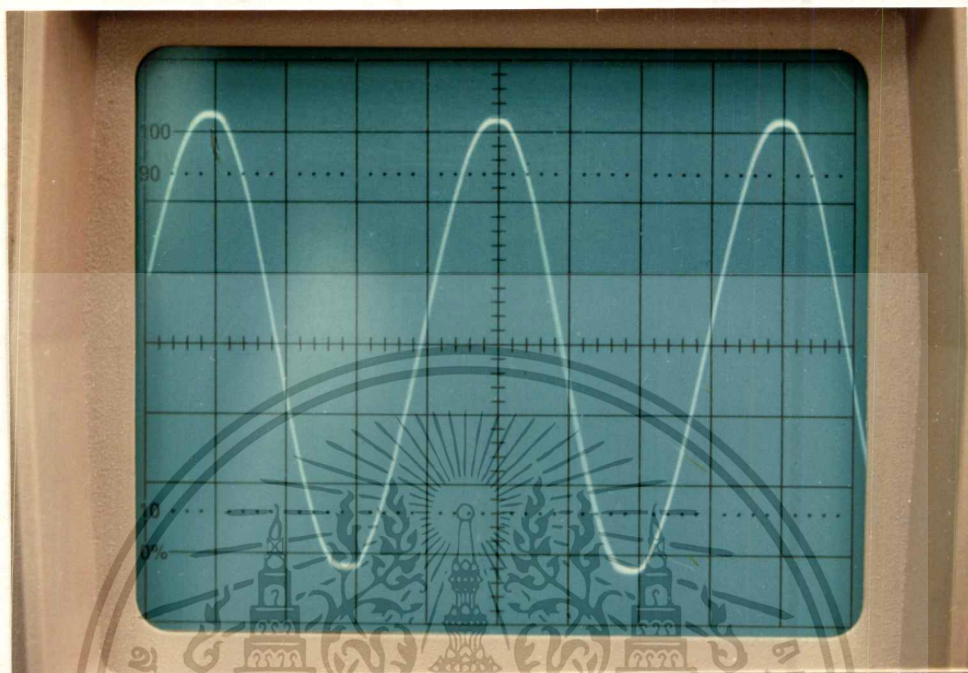


ตารางที่ 5  
แสดงผลการทดสอบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของวงจร

Output current (amp)	Input current (amp)	Output voltage (volt)	Input voltage (volt)	Output power (watt)	Input power (watt)	Efficiency $P_{out}/P_{in}$ (%)
0	0.9	0	233.3	0	41	0
0.1	1.34	217	233.3	21.7	362	6
0.2	1.75	229	233.3	45.8	379	12
0.3	2.05	246	233.3	73.8	393	18.8
0.4	2.4	260	233.3	104	423	24.6
0.5	2.75	270	233.3	135	472	28.6
0.6	3.0	275	233.3	165	509	32.4
0.7	3.33	282	233.3	197.4	567	34.8
0.8	3.58	286	233.3	228.8	625	36.6
0.9	3.82	290	233.3	261	683	38.2
1.0	4.24	294	233.3	294	750	39.2
1.1	4.54	296	233.3	325.6	822	39.6
1.2	4.87	300	233.3	360	893	40.3
1.3	5.1	303	233.3	393.9	970	40.6
1.4	5.51	305	233.3	427	1047	40.8
1.5	5.84	307	233.3	460.5	1118	41.2
1.6	6.07	310	233.3	496	1195	41.5
1.7	6.36	312	233.3	530.4	1275	41.6
1.8	6.68	314	233.3	565.2	1349	41.9
1.9	7.01	316	233.3	600.4	1426	42.1
2.0	7.38	319	233.3	638	1512	42.2

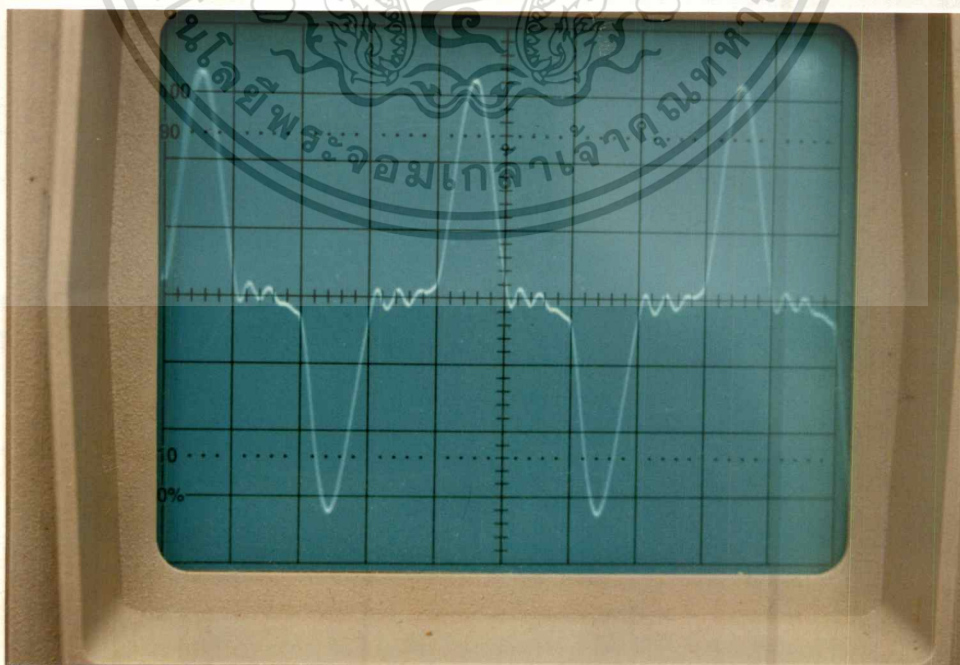
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 34



รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอินพุต

ภาพที่ 35



รูปคลื่นสัญญาณกระแสอินพุต

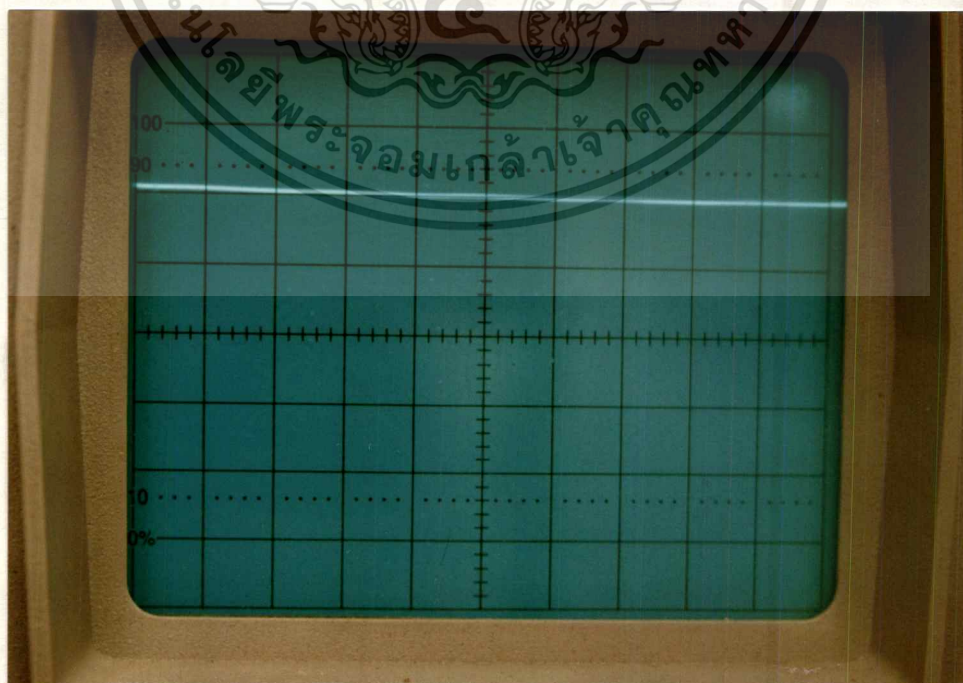
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 36



รูปคลื่นสัญญาณแรงดันเอาต์พุตขนาด 310 โวลต์

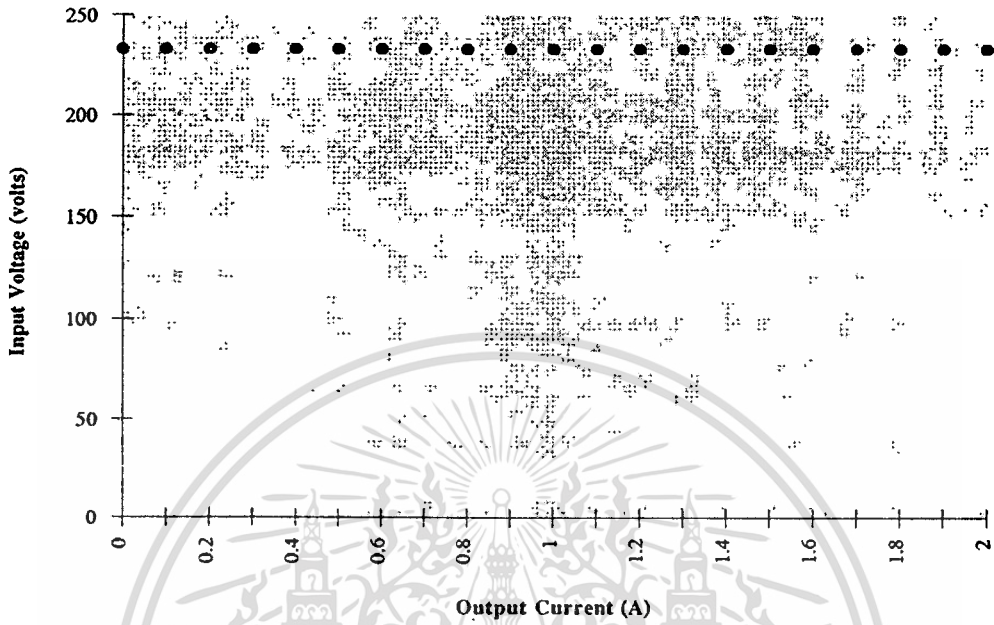
ภาพที่ 37



รูปคลื่นสัญญาณกระแสเอาต์พุตขนาด 2 แอมแปร์

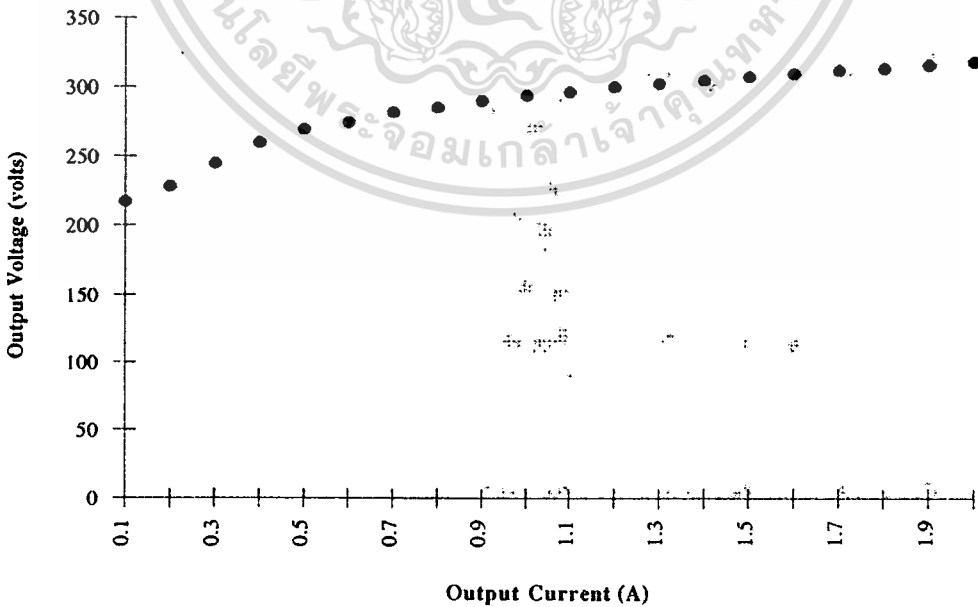
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 38



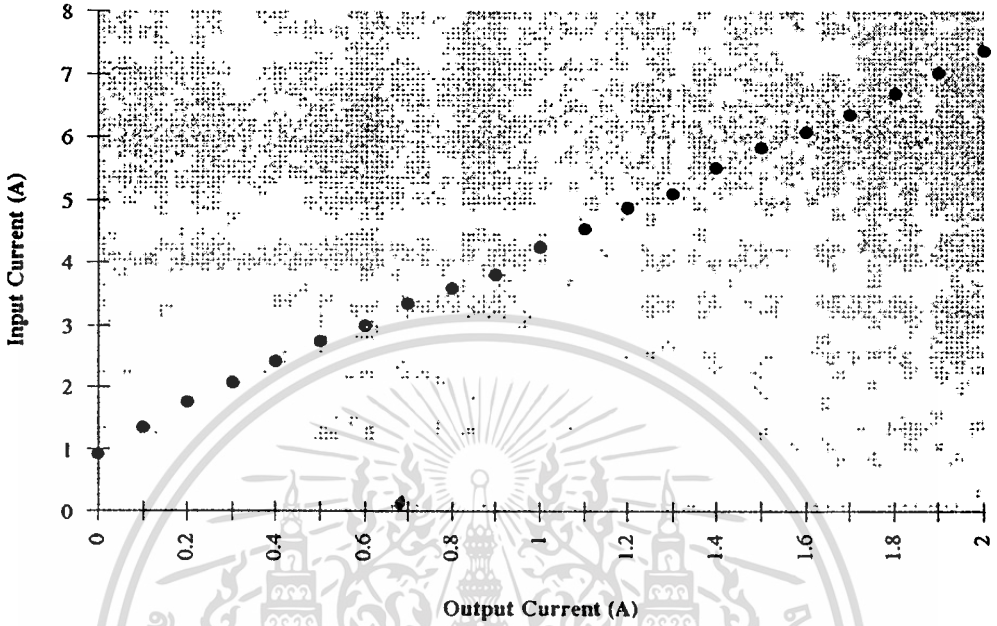
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกับแรงดันอินพุต

ภาพที่ 39



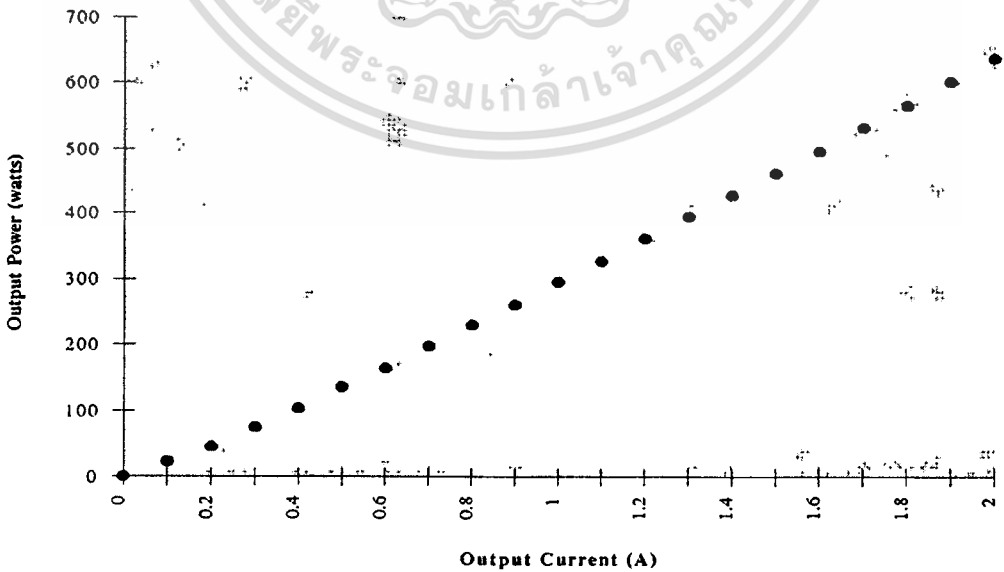
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกับแรงดันเอาต์พุต

ภาพที่ 40



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับกระแสอินพุตของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

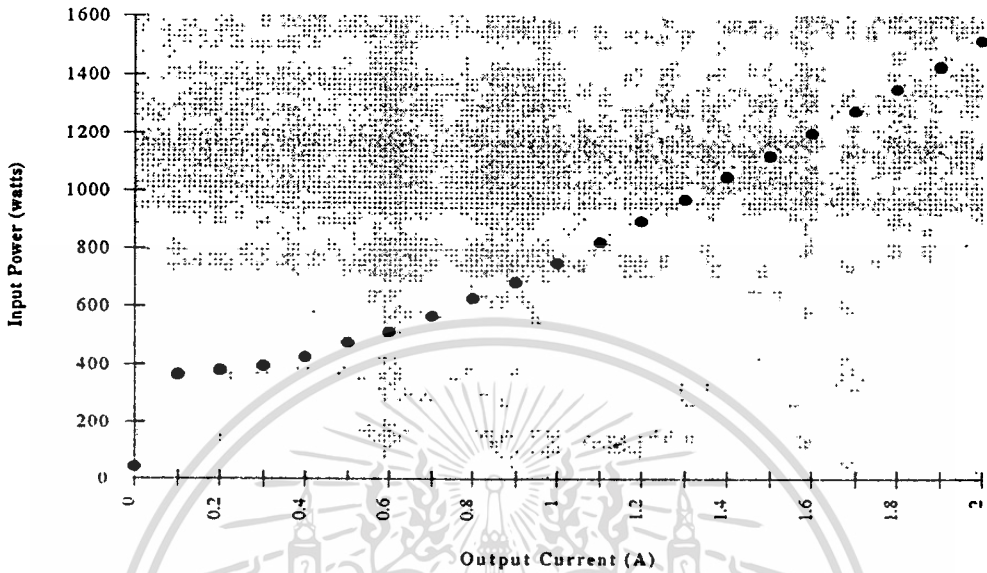
ภาพที่ 41



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับกำลังเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

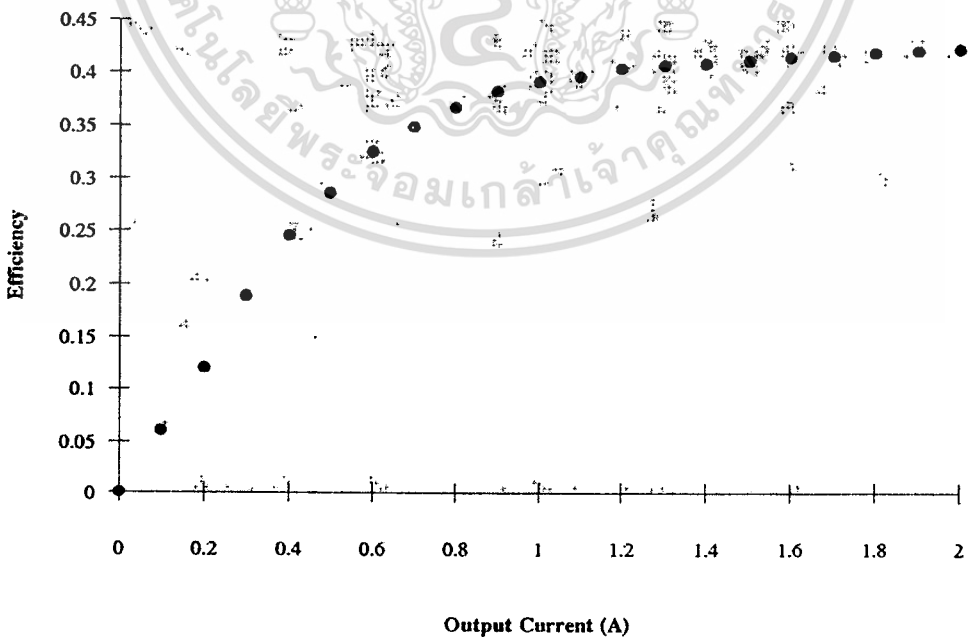
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 42



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับกำลังอินพุตของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ภาพที่ 43

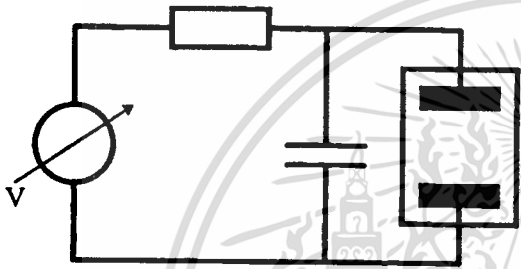
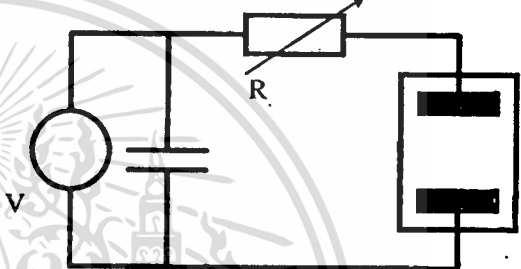


แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6

เปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้นกับระบบเดิมที่เคยใช้อยู่

แหล่งจ่ายแบบเดิม	แหล่งจ่ายที่สร้างขึ้นใหม่
<p>เป็นแบบโวลเตจเอนท์ทุกครั้งที่ แต่กระแสเอาท์ทุกไม่คงที่ (Voltage Source) โดยวงจรจะใช้วิธีเฟสคอนโทรล หรือใช้วารีแอกต์คอปปรับ ดังรูป</p>	<p>เป็นแบบกระสงเอาท์ทุกครั้งที่ แต่แรงดันเอาท์ทุกไม่คงที่ (Current Source) โดยวงจรจะใช้วิธีเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน R ของ power transistor</p>
	
<p>เมื่อใกล้เกิดอาร์คระหว่างอิเล็กโตรด ถึงแม้ว่าวงจรจะหยุดจ่ายแรงดันแล้วก็ตาม แต่คาปาซิเตอร์ของวงจรจะทำการจ่ายกระแสต่อไปยังโหลดทำให้การควบคุมเพื่อไม่ให้เกิดการอาร์คเป็นไปได้ยาก</p>	<p>เมื่อใกล้เกิดอาร์คระหว่างอิเล็กโตรด ค่าแรงดันของแหล่งจ่ายจะสูงอยู่ตลอด แต่ค่าความต้านทาน R จะคอยปรับให้กระแสไหลลดลงที่ ค่าที่ต้องการ ทำให้เกิดการอาร์คได้ยากและระดับของการดิสชาร์จได้ยาก</p>
<p>เมื่อใกล้เกิดการดับของการดิสชาร์จ ค่าแรงดันที่จ่ายจะคงที่ แต่ค่าอิมพีแดนซ์ของแชนเบอร์จะมีค่าสูงขึ้นอย่างกะทันหัน ทำให้กระแสจะหยุดไหล เนื่องจากจำนวนไอออนในแชนเบอร์ไม่เพียงพอต่อการประหังตัวเองของการดิสชาร์จ จึงทำให้สิ้นสุดการดิสชาร์จลง</p>	

## ส่วนประกอบของขั้วคาโทดและเป่าสารเคลือบ

การออกแบบคาโทดได้ออกแบบให้มีระบบน้ำหล่อเย็นในชุดคาโทด เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็น คาโทดจึงถูกออกแบบให้มีแผ่นปิด (backing plate) โดยมีการเชื่อมติดเข้ากับคาโทด และระบายความร้อนจากเป่าสารเคลือบผ่าน backing plate ส่วนน้ำหล่อเย็นโดยการยึดแผ่นเป่าสารเคลือบด้วยสกรูรอบๆ 8 จุด การที่คาโทดมีขนาดเล็กใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ และการยึดด้วยสกรูมากจุด ทำให้การระบายความร้อนเร็วเพียงพอกับอัตราการผลิตความร้อนบนเป่าสารเคลือบ

ในการออกแบบคาโทด และการติดตั้งเป่าสารเคลือบให้มีรูปร่างต่างๆ เพื่อความเหมาะสมกับประเภทของงานนั้น มีสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาในการออกแบบ 5 อย่าง คือ ระบบหล่อเย็น, ระบบฉนวนของไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อ, สนามแม่เหล็ก, คาโทดซิลด์, และวัสดุที่ใช้ในการสร้าง

### ระบบหล่อเย็น (Cooling system)

โดยการประมาณในขบวนการสปีดเตอริง พลังงานเพียง 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่ถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนที่เป่าสารเคลือบจากการชนของไอออนที่ผิวเป่าในขบวนการสปีดเตอริง ส่วนที่เหลือคือ พลังงานที่ใช้ในการผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สอง และทำให้เกิดพลาสมาในระบบซึ่งจะวิ่งชนและกลายเป็นพลังงานความร้อนบนแผ่นรองรับและผนังแชมเบอร์สุญญากาศ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบนเป่าสารเคลือบนี้มีค่าสูงมากจนอาจละลายเป่าสารเคลือบได้ ทั้งสามารถก่อปัญหาให้เกิดการแปรที่แตกต่างกันของธาตุต่างชนิดในการเคลือบอัลลอย ทำให้ฟิล์มเคลือบที่ปริมาณธาตุต่างๆ ในอัลลอยแตกต่างจากเป่าสารเคลือบมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบหล่อเย็นเข้าที่คาโทดและเป่าสารเคลือบเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว การหล่อเย็นอาจใช้น้ำหรือน้ำมันเป็นวัสดุหล่อเย็น น้ำมันมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าดีกว่าน้ำ และทำให้เกิดการกัดกร่อน (corrosion) ของเนื้อวัสดุที่ใช้ทำคาโทดต่ำกว่าน้ำ แต่ประสิทธิภาพในการทำความร้อนน้อยกว่าน้ำ และมีราคาแพงรวมทั้งมีความหนืดสูงทำให้ต้องใช้ปั๊มขนาดใหญ่ และก่อให้เกิดความสกปรกแก่ระบบสุญญากาศได้ง่าย น้ำแม้จะมีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าและต้องใช้ร่วมกับระบบไฟฟ้าแรงสูงที่คาโทดแต่ก็มีราคาถูกกว่ามาก

การหล่อเย็นอาจให้เป่าสารเคลือบสัมผัสโดยตรงกับน้ำโดยซีล (seal) กันน้ำรั่วไหลด้วยแผ่นยางระหว่างคาโทดกับแผ่นเป่าสารเคลือบ หรืออาจเป็นแบบคาโทดปิดด้วย backing plate กันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำรั่วไหล และติดแผ่นสารเคลือบโดยการเชื่อมติด (soldering) เข้ากับ backing plate การยึดแผ่นเป่ากับ backing plate ด้วยสกรูยึดทำให้การระบายความร้อนไม่ดีทุกผิวสัมผัส และทำให้เกิดการโค้งงอของแผ่นเป่าหนีการสัมผัสระบายความร้อน อันทำให้เกิดความเสียหายกับเป่าสารเคลือบได้ วัสดุทั่วไปที่ใช้ทำ backing plate ของคาโทดคือทองแดง เนื่องจากนำความร้อนได้ดีและต้องมีความหนาเพียงพอในการทนความดันบรรยากาศและความดันน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นโดยไม่เกิดการโป่งนูนออก

การออกแบบใช้น้ำหล่อเย็นจะนิยมควบคุมให้อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกแตกต่างกันไม่เกิน  $10^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิของน้ำขณะหล่อเย็นควรมีค่าสูงกว่าจุดกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศเพื่อป้องกันการจับเกาะของไอน้ำขณะคาโทดถูกเปิดออกสัมผัสบรรยากาศอันเป็นสาเหตุให้เกิดการลัดวงจรหรือปัดความดันลงยากในการเคลือบครั้งต่อไป สภาพนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ควรมีค่าต่ำโดยมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า 10 กิโลโอห์ม-เซนติเมตร ( $\text{k}\Omega\text{-cm}$ ) เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากขั้วคาโทดสู่กราวด์ของระบบน้ำหล่อเย็น ปริมาณของน้ำหล่อเย็นต่ำสุดที่ใช้กับระบบหล่อเย็นสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าของระบบสปีดเตอริง แสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของระบบหล่อเย็นไม่เกิน  $10^{\circ}\text{C}$

Power dissipate (kW)	Water flow rate (liter/min)	Water flow rate (gal/min)
2	2.8	0.74
4	5.6	1.5
6	8.4	2.2
8	11.2	3.04
10	14	3.7
15	21	5.6
20	28	7.4
25	35	9.3
30	42	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อวงจรไฟฟ้า

เนื่องจากคาโทดและเป้าสารเคลือบถูกต่อเข้ากับสัคย์ไฟฟ้าแรงสูงในขณะที่แชนเบอร์สุญญากาศเป็นกราวด์ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ฉนวนไฟฟ้าที่ฉนวนนี้ต้องมีคุณสมบัติในการซีลระบบสุญญากาศได้ดี อาจใช้ซิลโลหะ-เซรามิก หรือใช้เทฟลอน (teflon) และแผ่นยางซีลสุญญากาศร่วมกัน (ถ้าใช้สัคย์อนุกรมอาร์ เอพ ฉนวนทุกจุดควรมีความหนามาก เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในฉนวนไฟฟ้าจากความถี่สูง) ท่อน้ำต้องใช้อย่างซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและควรมีความยาวมากสัมพันธ์กับขนาดท่อเพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าผ่านน้ำจากคาโทดสู่กราวด์ถึงน้ำหล่อเย็นควรต่อลงกราวด์ และขั้วต่อไฟฟ้าแรงสูงควรมีฉนวนหุ้ม เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าช็อต ส่วนรอยต่อไฟฟ้าทุกจุดควรมียึดด้วยโบลท์และนัทขันแน่นหรือเชื่อมติดกัน (solder)

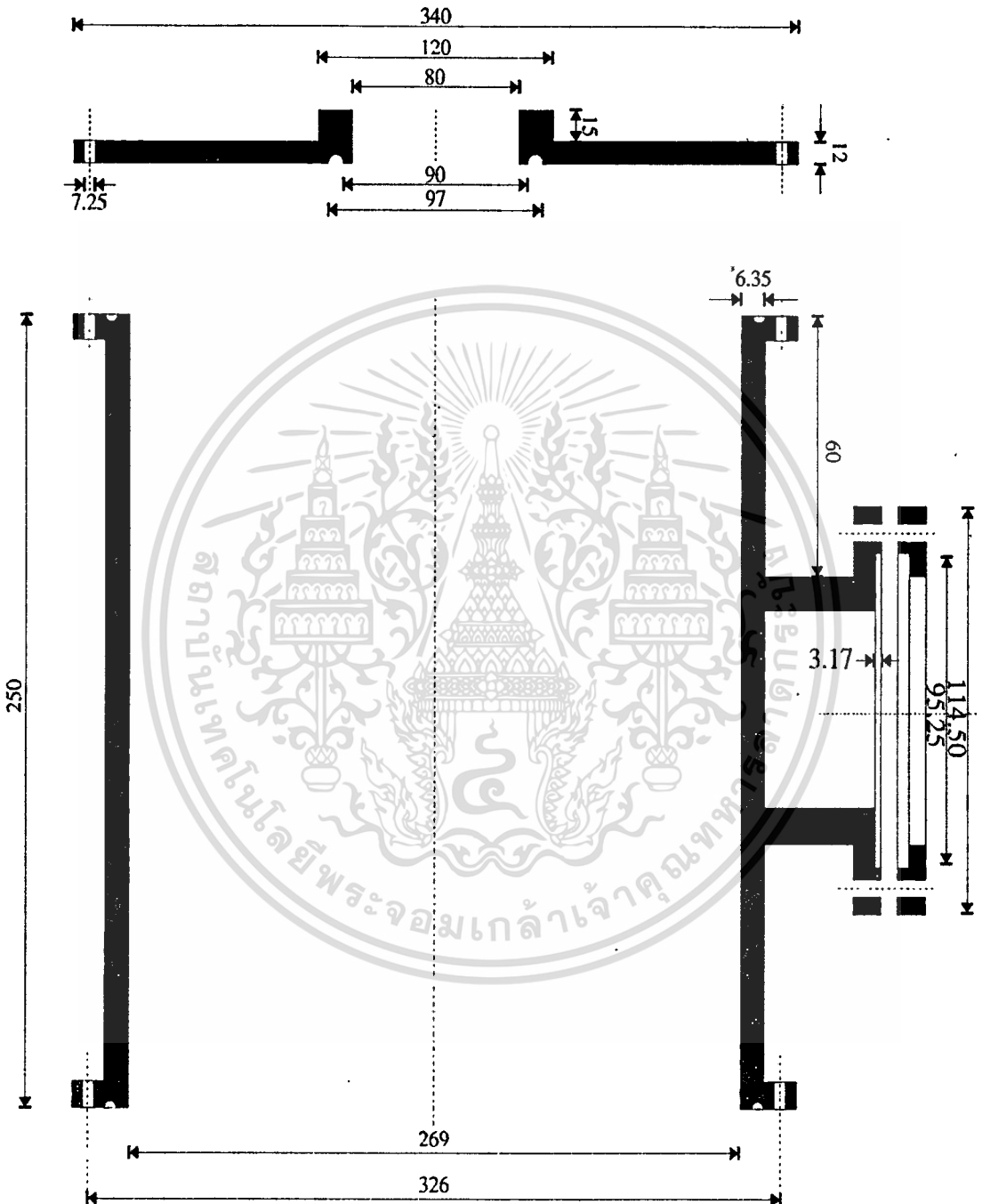
## สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)

พลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Planar magnetron sputtering) จะมีโครงสร้างสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าและการกักร่อนเกิดขึ้นสูงในบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีความเข้มสูง ดังนั้นการกักร่อนบนผิวเป้าสารเคลือบจะเป็นรูปตัว V ลึกลงเป็นบางบริเวณ อายุการใช้งานของเป้าสารเคลือบจะสั้นสุดลงเมื่อร่องลึกปรากฏเท่ากับความหนาของเป้า ดังนั้นการจัดขั้วแม่เหล็กให้มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ย่อมสามารถทำให้การกักร่อนจากการสปัตเตอริงกระจายออกทั่วแผ่นเป้า และลดความเสียหายจากการใช้เป้าอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

สนามแม่เหล็กที่ใช้อาจใช้ได้ทั้งแม่เหล็กถาวร และแม่เหล็กไฟฟ้า โดยติดตั้งไว้ภายนอกแต่แม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถติดตั้งชิดกับเป้าสารเคลือบได้ เนื่องจากไม่สามารถจุ่มขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ในระบบน้ำเย็นหล่อเย็น ซึ่งมีสัคย์ไฟฟ้าค่าเดียวกับคาโทดได้ ดังนั้นจึงอาจติดตั้งไว้ภายนอกระบบหล่อเย็น ทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กบนผิวเป้าสารเคลือบมีค่าต่ำและลดอัตราการสปัตเตอริงลง แม้จะทำให้ความหนาของส่วนหล่อเย็นที่ติดกับเป้าสารเคลือบบางลงก็ตาม

การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็ก นอกจากจะมีผลต่อการกักร่อนบนผิวเป้าสารเคลือบแล้ว ยังมีผลต่อความหนาของฟิล์มเคลือบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ด้วย การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็กที่ไม่ดีพอและการวางตำแหน่งแผ่นรองรับใกล้คาโทดมากเกินไปจะทำให้ความหนาฟิล์มเคลือบเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่กักร่อนบนเป้า การจัดให้ฟิล์มเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ อาจทำได้โดยการจัด

ภาพที่ 44

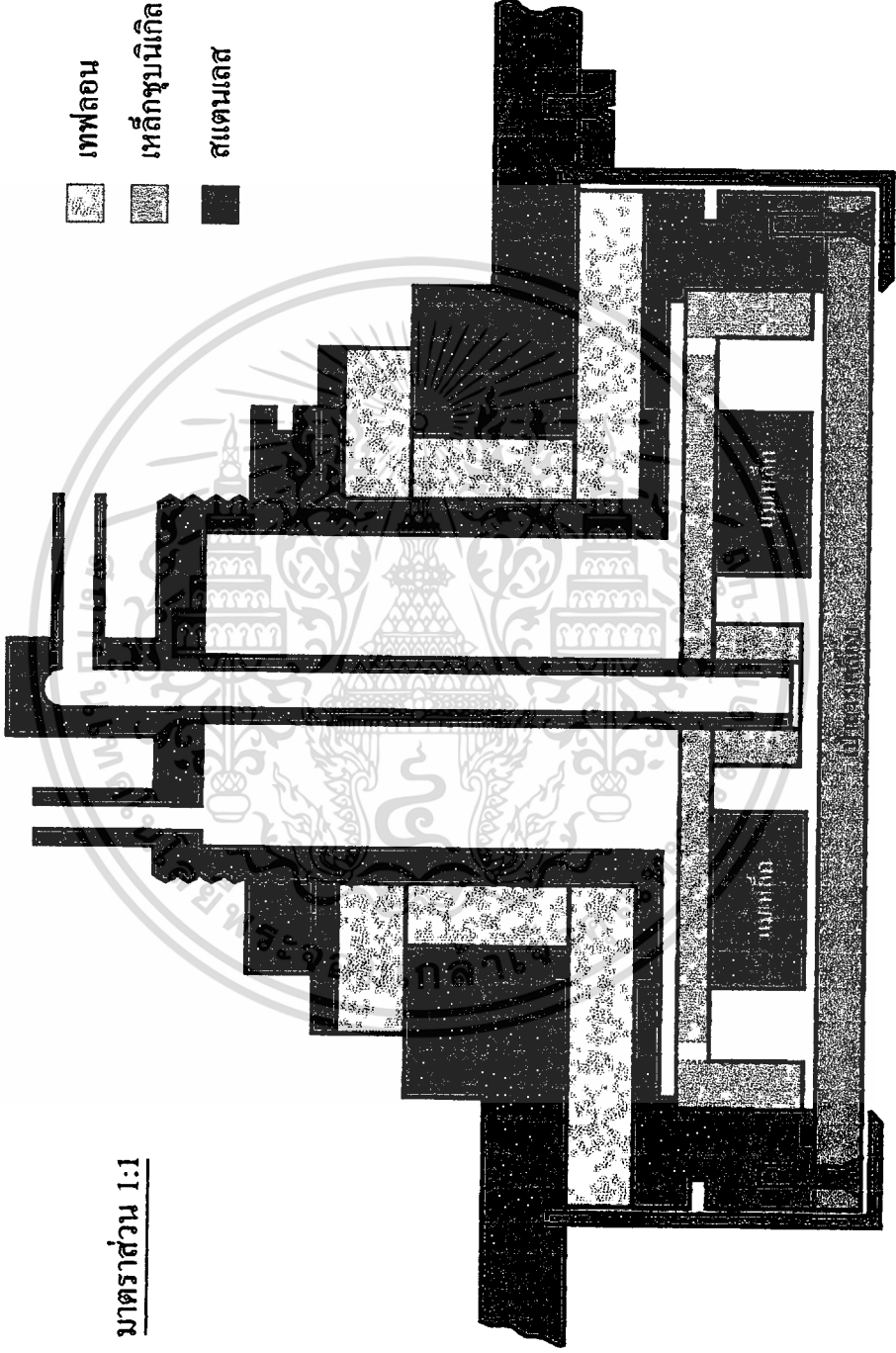


แสดงขนาดรายละเอียดของแฉกเบอร์สัญญาภาคที่ทำจากเหล็กกล้าสแตนเลส  
โดยมีหน้าต่ากระจก 1 ซอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45

มาตราส่วน 1:1



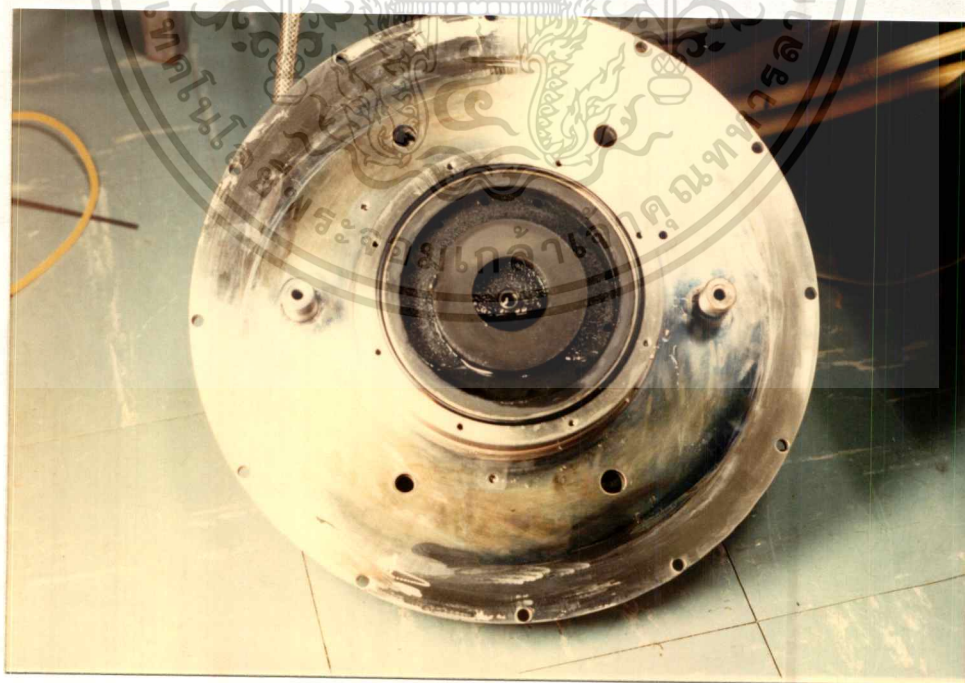
แสดงภาคตัดขวางของโครงสร้างวิชาโทขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมและใช้การเคลื่อนที่ของแผ่นรองรับร่วมด้วย เพื่อให้บริเวณที่เกิดอัตราการเคลื่อนเร็วและช้าได้กระจายสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าแผ่นรองรับหรือชิ้นงานนั้น

การปลดปล่อยอนุภาคจากขบวนการสปีดเตอริง แม้ว่าอะตอมสารเคลื่อนจะชนกับโมเลกุลของก๊าซจนเปลี่ยนทิศทางไปมาจากจุดเริ่มต้น และถือเสมือนว่าเป็นขบวนการแพร่ (diffusion) ลงเคลื่อนแผ่นรองรับในทุกทิศทางก็ตามฟิล์มเคลื่อนที่ได้ย่อมไม่สามารถทำให้ความหนาสม่ำเสมอได้ ถ้าการปลดปล่อยอนุภาคจากทุกจุดบนเป้าสารเคลื่อนไม่สม่ำเสมอกัน Glang พบว่าในแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบพลาสมาวงกลม ฟิล์มเคลื่อนจะมีความสม่ำเสมอดีที่สุด เมื่อรัศมีภายในและภายนอกของวงพลาสมา มีค่าเป็น 0.7 และ 0.8 ของระยะระหว่างเป้าสารเคลื่อนและแผ่นรองรับตามลำดับ เมื่อแผ่นเป้าวงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนวงแหวนพลาสมาของการเกิดสปีดเตอริงควรมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามขนาดของแผ่นเป้าเพื่อให้ความหนาฟิล์มเคลื่อนมีความสม่ำเสมอ และเพื่อการใช้งานเป้าสารเคลื่อนอย่างมีประสิทธิภาพ

ภาพที่ 46

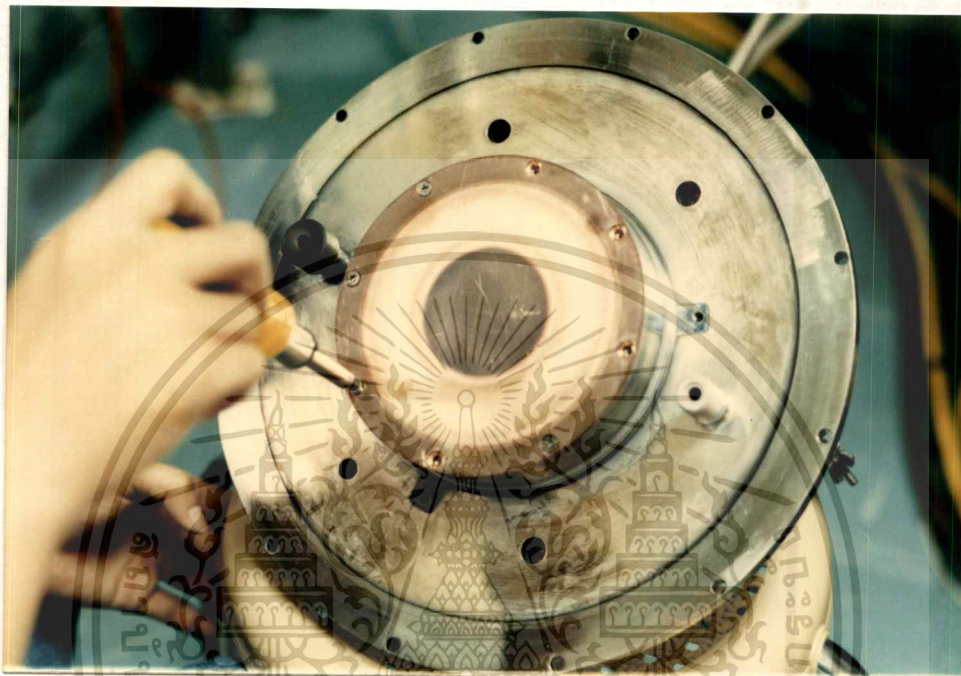


แสดงการติดตั้งแม่เหล็กถาวรขนาด 1,000 เกาส์ ที่ขั้วคาโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 47



แสดงการติดตั้งเป้าสารเคลือบลงบนขั้วคาโทด

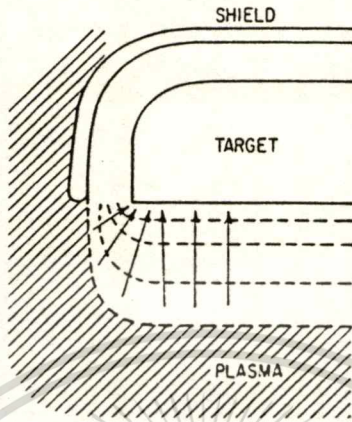
### ชิลด์คาโทดและความสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบ (Cathode shielding and uniformity of the deposit)

ปกติขบวนการ โกลด์วิซซาร์จทำให้เกิดการสปีดเตอร์ทุกบริเวณของคาโทดที่ปรากฏศักย์ไฟฟ้าลบต่อไอออน ดังนั้นเพื่อป้องกันการสปีดเตอร์บางบริเวณที่มีได้ติดเป้าสารเคลือบไว้จึงหุ้มล้อมรอบคาโทดด้วยตัวนำไฟฟ้า ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอานอดหรือกราวด์ เรียกว่า คาโทดชิลด์ โดยชิลด์มีระยะห่างจากคาโทดน้อยกว่าระยะดาร์คสเปซ ในบางกรณีชิลด์จะคลุมเลขขอบของเป้าสารเคลือบเพื่อป้องกันมิให้เกิดการสปีดเตอร์สกรูยึดเป้าสารเคลือบทำให้การเคลือบฟิล์มมีความบริสุทธิ์ ปราศจากสารปลอมปนจากสกรูยึดเป้าสารเคลือบนั้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการชิลด์จะป้องกันการสปีดเตอร์ในบางบริเวณได้บริเวณขอบปลายแหลมหรือฝุ่นผงสิ่งสกปรกที่จับอยู่ระหว่างคาโทดและชิลด์อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอาร์คได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

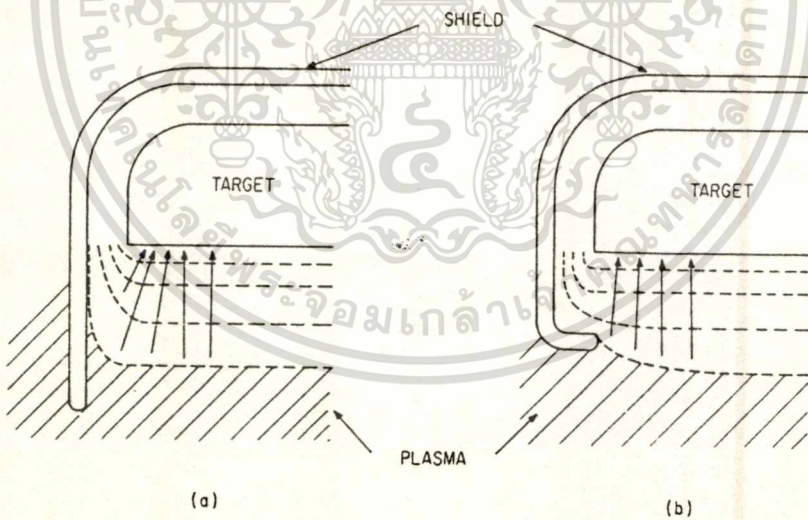
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 48



แสดงแนวการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าบริเวณขอบคาโทดและชีลด์อันเป็นสาเหตุให้เกิดการสปัตเตอร์บริเวณขอบสูงกว่าตอนกลางของเป้า แนวสีขาวในภาพคือระยะคาร์คสเปซ

ภาพที่ 49



- (a) การลดอัตราการสปัตเตอร์ขอบเป้าโดยการทำให้ชีลด์ให้ยาวออก
- (b) การลดอัตราการสปัตเตอร์ขอบเป้าโดยการคลุมขอบเป้าด้วยชีลด์

จากการทดลองหาระยะคาร์คสเปซในขบวนการโกลว์ดีสชาร์จของก๊าซ Ar ที่ความดัน  $6 \times 10^{-2}$  torr พบว่ามีค่า 10 mm ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จระหว่าง 200 ถึง 1,000 โวลต์ และระยะคาร์คสเปซนี้แปรผกผันกับความดัน จึงได้ออกแบบคาโทดชีลด์ห่างจากผิวคาโทด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 mm ซึ่งเป็นระยะที่ปลอดภัยไม่ทำให้เกิดขบวนการสปัตเตอริงนอกผิวสารเคลือบได้ถึงความดัน  $6 \times 10^{-3}$  torr และปลอดภัยต่อการที่กราวซีลด์เลื่อนออกจากตำแหน่งศูนย์กลางเข้าสัมผัสกับคาโทด ส่วนปลายคาโทดซีลด์ยึดต่อกับวงแหวนซีลด์เพื่อให้คลุมบริเวณสกรูยึดเป่ามิให้เกิดการสปัตเตอริงที่สกรูยึดเป่าอันเป็นสาเหตุของความไม่บริสุทธิ์บนฟิล์มเคลือบ

การปลดปล่อยอะตอมจากเป่าสารเคลือบด้วยการชนของไอออนในแนวตั้งฉาก อะตอมสารเคลือบบางส่วน อาจหลุดออกในแนวที่ทำมุมกับผิวเป่าแคบมาก และเคลื่อนที่ออกนอกแนวเคลือบ การชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้อะตอมสารเคลือบเบนกลับสู่แนวเคลือบบางส่วน แต่ความสูญเสียบางส่วนยังคงมีอยู่ โดยเฉพาะถ้าระยะห่างระหว่างคาโทดและแผ่นรองรับมีค่าสูงขึ้น อัตราการสูญเสียอะตอมเป่าสารเคลือบย่อมมีค่าสูงขึ้นด้วย

### วัสดุที่ใช้ทำคาโทด

ใช้ได้หลายชนิด แต่ที่ใช้มากที่สุด คือ เหล็กสแตนเลส เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการเกาะจับของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายใต้สุญญากาศ (Degas) ได้ง่ายและมีความดันไอต่ำ เหล็กสแตนเลสทนการกัดกร่อนจากสารเคมีต่างๆ ได้ดี แต่มีสภาพนำความร้อน และไฟฟ้าที่เลวอย่างไรก็ตามจุดสำคัญในการสร้าง คือ ให้คาโทดมีความคงทนการกัดกร่อนและการนำความร้อนที่ดี

### วัสดุเป่าสารเคลือบ

การเป็นวัสดุที่มีความบริสุทธิ์และความหนาแน่นสูงซึ่งผลิตจากขบวนการ hot - pressed หรือจากการ sintering ในสุญญากาศของผงวัสดุบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับวัสดุต้น (bulk material) มากที่สุด เพื่อมิให้เนื้อโลหะมีก๊าซจับตัวอยู่ภายใน มิฉะนั้นระหว่างขบวนการสปัตเตอริง ผิวเป่าสารเคลือบภายใต้อุณหภูมิค่อนข้างสูงจะปลดปล่อยอะตอมของก๊าซ (degas) ซึ่งมักเป็นก๊าซออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยาอันมีผลต่อคุณภาพฟิล์มเคลือบ

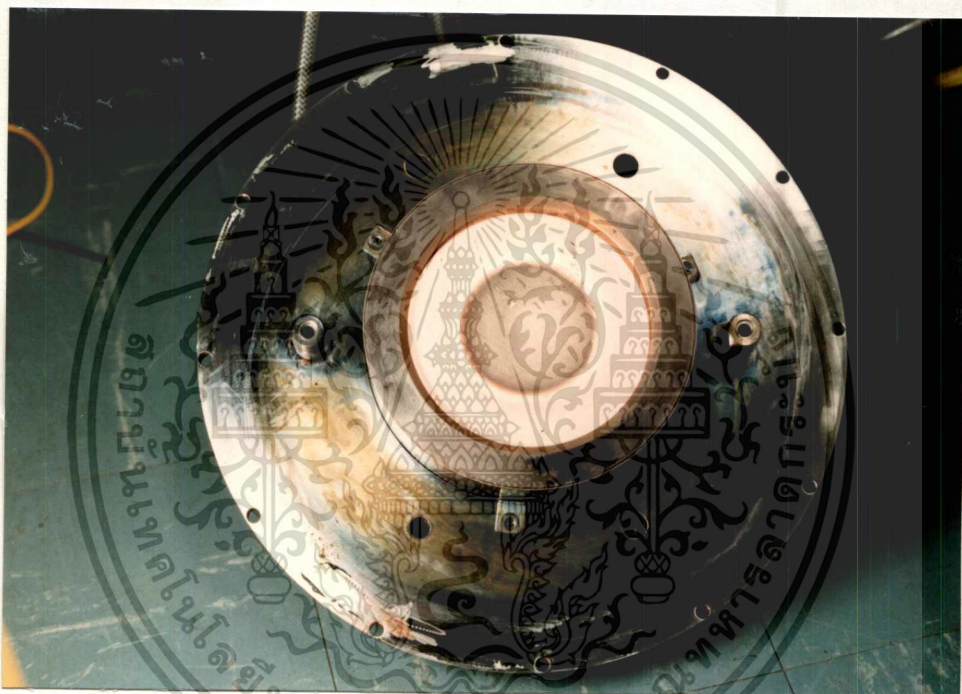
ในระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงจะทำการเคลือบภายใต้ความดันระหว่าง  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-3}$  torr และถ้าอนุภาคสปัตเตอริงสามารถผ่านช่วงคิสซาร์จไปได้โดยไม่เกิดการชน จะได้อัตราการเคลือบ (Deposition rate) R อย่างคร่าวๆ เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R \cong \phi W + C \quad (38)$$

โดยที่  $\phi, C$  เป็นค่าคงที่สำหรับเป้าแต่ละชนิดที่ความดันค่าหนึ่งๆ ของก๊าซแต่ละชนิด

ภาพที่ 50



ขั้วคาโทดเมื่อได้รับการติดตั้งเป้าสารเคลือบและคาโทดซิลด์เสร็จเรียบร้อยแล้ว

และเมื่อทำการทดลองเคลือบจะได้ผลการทดลอง ซึ่งได้มายังสมการที่ (38) ดังในภาพที่ 51 นั้นเอง ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดิซาร์จในระบบสปิตเตอร์ริง แสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออไนเซชัน สภาพการดิซาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้อย่างมีประสิทธิภาพจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันดิซาร์จตามสมการ

$$I = aV^n \quad (39)$$

เมื่อ  $I$  เป็นกระแสดิซาร์จของคาโทด

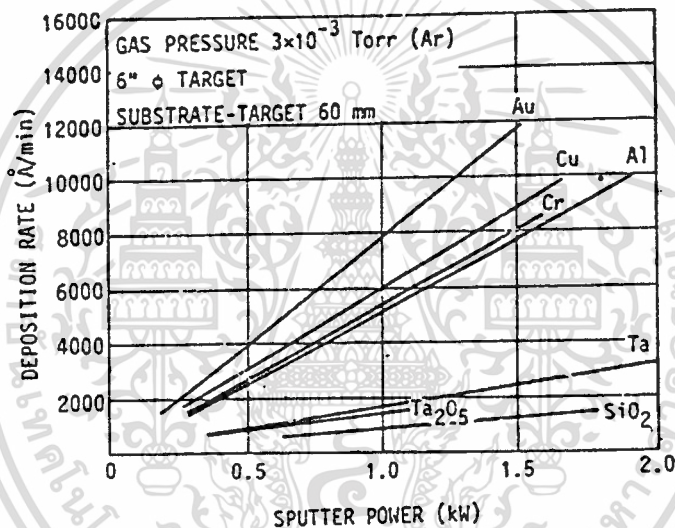
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V เป็นแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ

$\eta$  เป็นดัชนีแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ซึ่งขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก โดยปกติ  $\eta$  มีค่าระหว่าง 5 ถึง 9 ในระบบ Cylindrical magnetron sputtering แต่อาจแตกต่างกันไปบ้างเมื่อเป็นระบบ Planar magnetron sputtering

$\alpha$  เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์

ภาพที่ 51



แสดงอัตราการเคลือบของเป้าหมายต่างๆ ที่เป็นฟังก์ชันกับกำลังไฟฟ้าของระบบ Planar magnetron sputtering

สำหรับคาโทดชนิดต่างๆ การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงกว้างๆ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

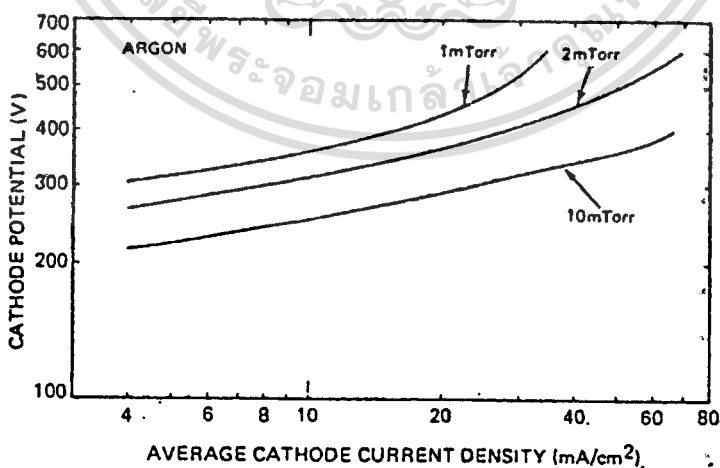
ภาพที่ 52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่ความดันก๊าซค่าต่างๆ ณ ค่าความดัน 10 mtorr พบว่า  $n = 4.6$  และ  $\alpha = 9 \times 10^{-13}$  สำหรับคาโทดชนิดนี้ การเปลี่ยนค่าของความชันกราฟเมื่อกระแสไฟฟ้ามามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้าค่าสูงขึ้น ปริมาณไอออนของก๊าซถูกจำกัดด้วยความดันก๊าซในระบบทำให้ปริมาณการผลิตอิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดค่าตามไปด้วย ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของคาโทดจึงสูงขึ้นเพียงเร่งไอออนให้ชนคา

โทดด้วยพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของ กระแสในภาพที่ 52 การเบนโค้งนี้จะเริ่มที่กระแสดูสูงขึ้นถ้าความดันก๊าซในระบบมีค่าสูงขึ้น

ภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคิซาร์จของคาโทดและความดันก๊าซที่ กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ การเพิ่มความดันก๊าซทำให้ความหนาแน่นอะตอมก๊าซเฉื่อยเพิ่มขึ้น และ ยังผลให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อิเล็กตรอนชุดที่สองอันเกิดจาก การชนของไอออนบนเป้าสารเคลือบจึงมีปริมาณสูงขึ้น ทำให้ความนำไฟฟ้าของการคิซาร์จสูงขึ้น และแรงดันไฟฟ้าคิซาร์จมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าคิซาร์จจะมีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น

อัตราการสปีดเตอร์ของอะตอมสารเคลือบ ขึ้นกับปริมาณไอออนซึ่งแปรผันกับกระแสและ พลังงานของไอออน ซึ่งแปรผันกับแรงดันคิซาร์จ ดังนั้นจึงแปรผันโดยตรงกับกำลังงานไฟฟ้าที่ จ่ายให้กับระบบ ( $P = \alpha V^{n+1}$ ) ส่วนอัตราการเคลือบ R นอกจากแปรผันโดยตรงกับอัตราการสปีด เตอร์แล้วยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก คือ พื้นที่ของการเกิดสปีดเตอรืง, ระยะห่างระหว่างคาโทดและ ชีงงาน, ค่าซีลด์และการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป้าสารเคลือบ, ความดันก๊าซร่วมและความ ดันย่อยของก๊าซวเปกฏิกิริยาภายในบริเวณเป้าสารเคลือบ ค่าการนำความร้อนของเป้าสารเคลือบอาจ เป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเคลื่อนที่ชีงงานระหว่างการเคลือบมีผล ต่อการลดอัตราการเคลือบลง

ภาพที่ 52

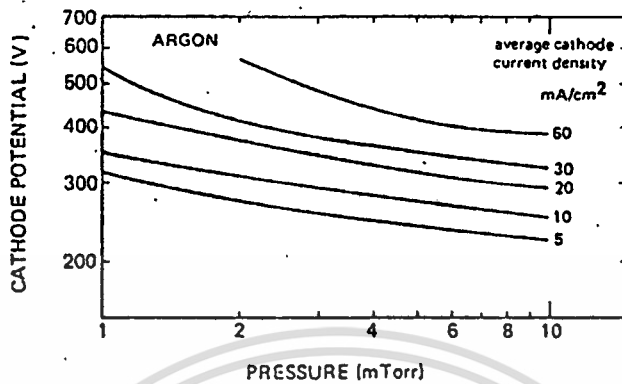


แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าคิซาร์จของระบบ Planar

Magnetron Sputtering คาโทดรูปสี่เหลี่ยม ที่ความดันก๊าซค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 53



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าคิซาร์จและความดันก๊าซเมื่อกระแสไอมีค่าคงที่ โดยเป่าสารเคลือบสี่เหลี่ยมมีขนาด  $37.5 \times 12.1 \text{ cm}^2$  และสปัดเตอร์ในแนวพลาสมาวงแหวน

ประสิทธิภาพของอัตราการเคลือบ ( $R_E$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการเคลือบและค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อหน่วยพื้นที่

$$R_E = \frac{R}{P} \quad (40)$$

เมื่อ  $R$  เป็นอัตราการเคลือบ ( $\text{Å}^0/\text{min}$ )

$P$  เป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อหน่วยพื้นที่ ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )

ประสิทธิภาพของการเคลือบนี้ช่วยในการกำหนดสภาพที่ดีที่สุดของขบวนการเคลือบ ในระบบ Planar magnetron ประสิทธิภาพการเคลือบของทองแดง (Cu) มีค่าระหว่าง  $800\text{-}1200 \text{ Å}^0\text{-cm}^2/\text{W-min}$  และของอลูมิเนียม (Al) มีค่าระหว่าง  $200\text{-}650 \text{ Å}^0\text{-cm}^2/\text{W-min}$  เป็นต้น

ระบบ magnetron sputtering นับว่าเป็นวิธีการเคลือบที่มีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีสปัดเตอร์ริงอื่นๆ สามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 60% ของค่าการคำนวณทางทฤษฎีและดีกว่า dc planar sputtering

ภาพที่ 54 และ 55 แสดงเป่าสารเคลือบที่ใช้ทำการสปัดเตอร์ในการทำวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ไททาเนียม , เหล็กแอสเดนเลส , ทองแดง และอลูมิเนียม ตามลำดับ ซึ่งเป่าทั้ง 4 ชนิดจะมีขนาดเท่ากันทุกประการ

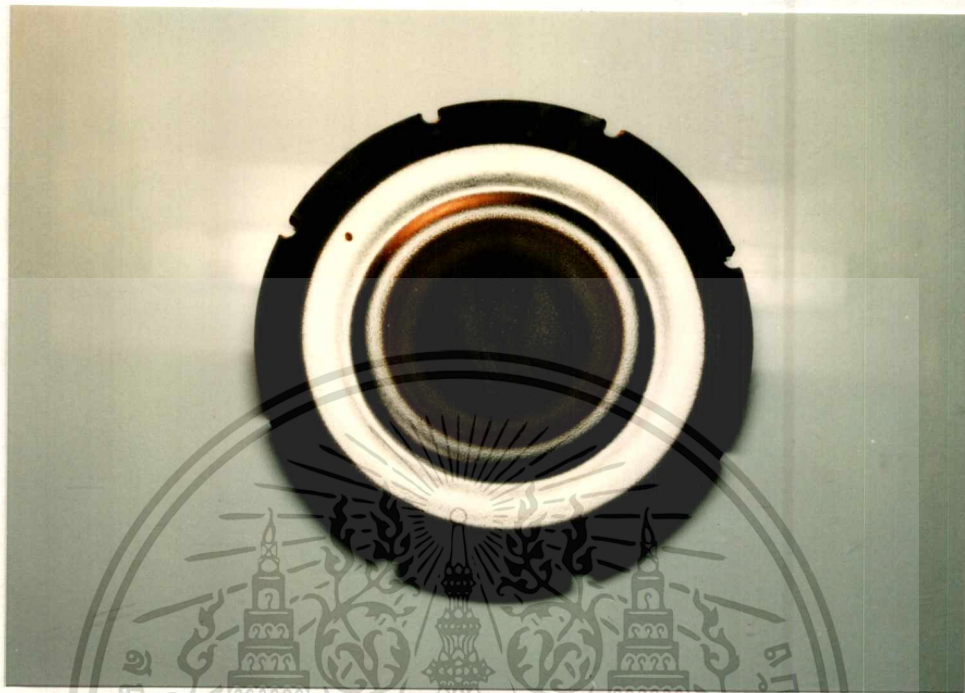
## ตารางที่ 8

แสดงอัตราการเคลือบและประสิทธิภาพของการเคลือบของ DC Planar  
Magnetron Sputtering ของเป้าสารเคลือบชนิดต่างๆ

cathode material	R (kA <sup>0</sup> /min)	R <sub>E</sub> (A <sup>0</sup> cm <sup>2</sup> /minW)	Av.power density (W/cm <sup>2</sup> )	source-substrate distance (cm)	argon pressure (mtorr)	cathode dimension (cm)
Cu	10.7	1020				
Al	5.5	520	10.5	5	4	9x21
Ti	3.9	370				
Au	20	1250				
Cu	20	1250				
Cr	10	630	16	not reported	not reported	15x41
Al	7	440				
Ti	4	250				
Cu	25	780				diam.
Al	11	340	30	5	3-5	14 (est.)
Au	17	1100				
Cu	13	840				
Cr	10	650	15.5	not reported	not reported	13x30
Al	10	650				
Ti	3.3	210				
Al	2	185	10.8	7	11	10x25

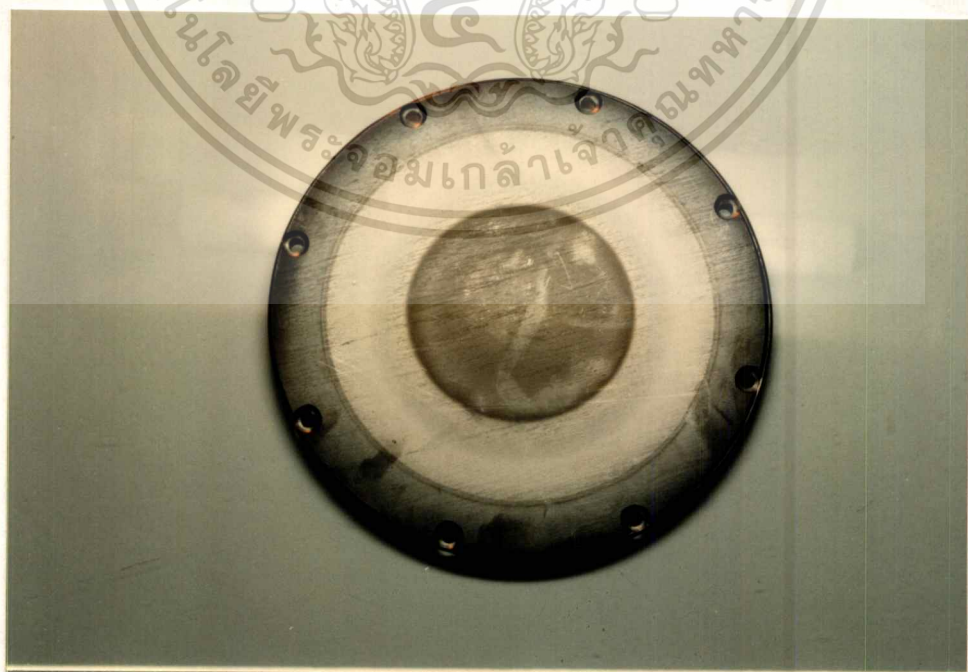
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 54



แปาสารเคลือบโลหะไททานเนียม

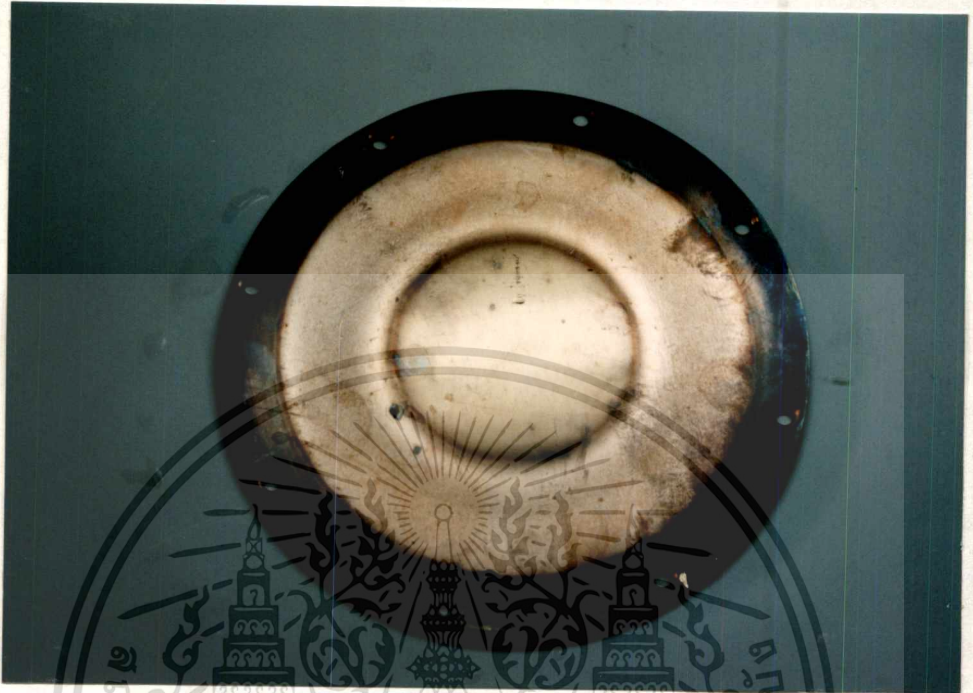
ภาพที่ 55



แปาสารเคลือบโลหะสแตนเลส

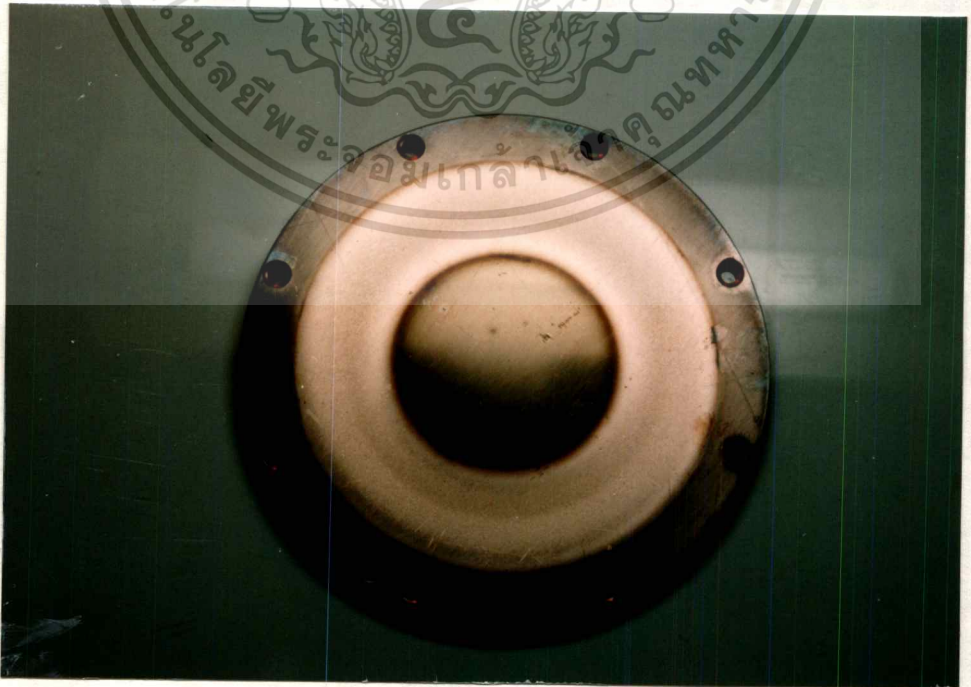
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 56



เป่าสารเคลือบ โลหะทองแดง

ภาพที่ 57



เป่าสารเคลือบ โลหะอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองทำการเคลือบฟิล์มบางโลหะลงบนชิ้นงาน

#### การทดลองหาค่าความดันต่ำสุดของระบบ

เมื่อทำการประกอบเครื่องสเปคโตรริงให้ทำงานร่วมกับระบบปั๊ม, ระบบป้อนก๊าซ, อุปกรณ์วัดอัตราการเคลือบบนชิ้นงานแล้ว จำเป็นต้องมีการทดสอบการทำงานของระบบปั๊มและระบบสุญญากาศก่อนทำการเคลือบฟิล์มบางโลหะ โดยจะทำการทดลองปั๊มแชมเบอร์สุญญากาศที่มีปริมาตร  $\pi(28.5/2)^2 \times 25 = 16$  ลิตร ด้วยปั๊มกลโรตารีเพื่อหาความดันต่ำสุดที่สามารถทำได้ แล้วจึงทำการทดลองปั๊มแชมเบอร์สุญญากาศขนาดเดียวกัน ด้วยปั๊มกลโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อหาความดันต่ำสุดที่สามารถทำได้

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. เปิดปั๊มกลโรตารีให้ทำงาน ในขณะที่ Control valve อยู่ในตำแหน่ง Close
2. เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นให้กับระบบปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion pump)
3. เปิดปั๊มไอฟุ้งกระจายให้ทำการดมน้ำมันให้เดือดก่อน โดยใช้เวลารอให้น้ำมันเดือดประมาณ 15-20 นาที

4. ทำการสับ Control valve หมุนกลับไปหยุดที่ตำแหน่ง Roughing valve ทำการปั๊มแชมเบอร์สุญญากาศ ทำการวัดความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศได้จาก Pirani gauge รุ่น TPR 010 ของบริษัท Balzers พร้อมทั้งทำการจดบันทึกค่าความดันที่อ่านได้จาก TPG 300 เทียบกับเวลาที่ใช้ในการปั๊ม

5. นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันภายในแชมเบอร์กับเวลาที่ใช้ในการปั๊ม

6. เมื่อน้ำมันปั๊มไอฟุ้งกระจายเดือด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเสียงที่ดังของน้ำมันที่เดือดหรือหยดน้ำที่เริ่มก่อตัวรอบๆ ท่อน้ำหล่อเย็นของปั๊มไอฟุ้งกระจาย แล้วจึงทำการสับ Control valve มาที่ตำแหน่ง Backing valve เพื่อทำการปั๊มความดันท้ายของปั๊มไอฟุ้งกระจายด้วยปั๊มกลโรตารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนได้ความดันท้ายประมาณ  $10^{-2}$  mbar โดยทำการวัดได้จาก Pirani gauge รุ่น PRM 10K บริษัท Edwards ที่ใช้วัดความดันท้ายของปั๊มไอฟุ้งกระจาย ซึ่งจะแสดงผลทางเครื่องวัดความดันแบบเข็มของบริษัท Edwards

7. ทำการสับ Control valve หมุนกลับไปตำแหน่ง Backing valve จากนั้นทำการดึงคันบังคับ Control valve ขึ้นเพื่อทำการเริ่มเปิด Isolation valve จากนั้นค่อยๆ หมุน Control valve ตามทิศทางเข็มนาฬิกา เพื่อทำการเปิด Isolation valve โดยจะต้องหยุดหมุนเมื่อความดันภายในแชมเบอร์สูงขึ้นไปเกิน  $10^{-2}$  mbar เพื่อป้องกันการการทำงานหนักเกินไปของปั๊มกลโรตารี และจึงค่อยๆ ทำการหมุนต่อจน Isolation valve เปิดจนสุด

12. ทำการปั๊มระบบสุญญากาศ พร้อมกับทำการวัดความดันภายในแชมเบอร์ด้วย Penning gauge ซึ่งแสดงผลออกมาที่ TPG 300 พร้อมกับจดบันทึกค่าความดันต่างๆ เทียบกับเวลาที่ใช้ในการปั๊มจนถึงความดันต่ำสุดที่สามารถทำได้

13. นำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาที่ใช้ในการปั๊ม

14. สับ control valve ให้หมุนทวนเข็มนาฬิกากลับมาที่ตำแหน่ง Backing valve เพื่อทำการปิด Isolation valve

15. ปิดเครื่องวัดความดัน Penning gauge

16. กดปุ่มให้ก๊าซเข้าสู่แชมเบอร์ โดยผ่านทาง Solenoid valve

17. เมื่อต้องการเลิกการทำงาน ให้ทำการกดปุ่ม off ปั๊มไอฟุ้งกระจาย แล้วรอจนน้ำมันเย็นประมาณ 15-20 นาที

18. หมุนทวนเข็มนาฬิกา control valve มาอยู่ที่ตำแหน่ง close valve จึงทำการปิดปั๊มกลโรตารี

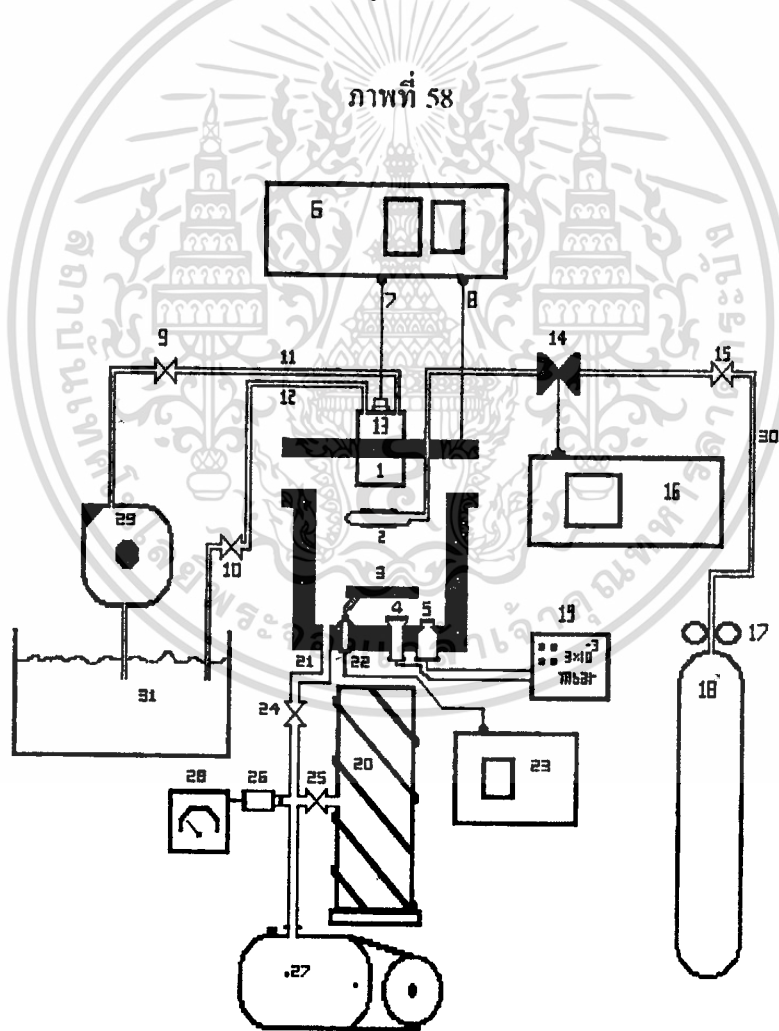
19. ทำการปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นปั๊มไอฟุ้งกระจาย

จากภาพที่ 58 สามารถจำแนกส่วนต่างๆ ออกได้เป็นดังนี้ คือ

1. ขั้วคาโทด (Cathode Electrode)
2. ท่อวงกลมเจาะรูโดยรอบสำหรับปล่อยก๊าซอาร์กอน
3. แผ่นรองรับชิ้นงาน (Substrate)
4. หัววัดเกจพิรานีรุ่น TPR 010 ของบริษัท Balzers
5. หัววัดเกจเพนนิ่งรุ่น IKR 020 ของบริษัท Balzers
6. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
7. สายส่งกระแสไฟฟ้าขั้วลบ
8. สายส่งกระแสไฟฟ้าขั้วบวก
9. วาล์วควบคุมการเปิด-ปิดน้ำเข้า
10. วาล์วควบคุมการเปิด-ปิดน้ำออก
11. สายยางส่งน้ำเข้าหล่อเย็นขั้วคาโทด
12. สายยางส่งน้ำออกจากการหล่อเย็นขั้วคาโทด
13. ขั้วต่อระหว่างหัวคาโทดกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
14. Mass Flow Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. วาล์วเลื่อน (Slide Valve) 16. Mass Flow Meters  
 17. เกจบิวคอง (Bourdon gauge) 18. ถังบรรจุก๊าซอาร์กอน  
 19. เครื่องอ่านค่าความดัน TPG300 20. ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion Pump)  
 21. ท่อสแตนเลสสำหรับดูดอากาศภายในแชมเบอร์โดยใช้โรตารีปั๊ม  
 22. ตัวตรวจจับความหนาของฟิล์มเคลือบแบบ Crystal oscillator  
 23. Thickness monitor 24. Roughing Valve  
 25. Backing Valve 26. เกจพิรานีรุ่น PRM10K ของบริษัท Edwards  
 27. โรตารีปั๊ม (Rotary Pump) 28. เครื่องอ่านค่าความดันท้ายปั๊มไอฟุ้งกระจายแบบเข็ม  
 29. ปั๊มน้ำหล่อเย็น 30. ท่อส่งก๊าซอาร์กอนเข้าสู่แชมเบอร์ 31. ถังน้ำหล่อเย็น

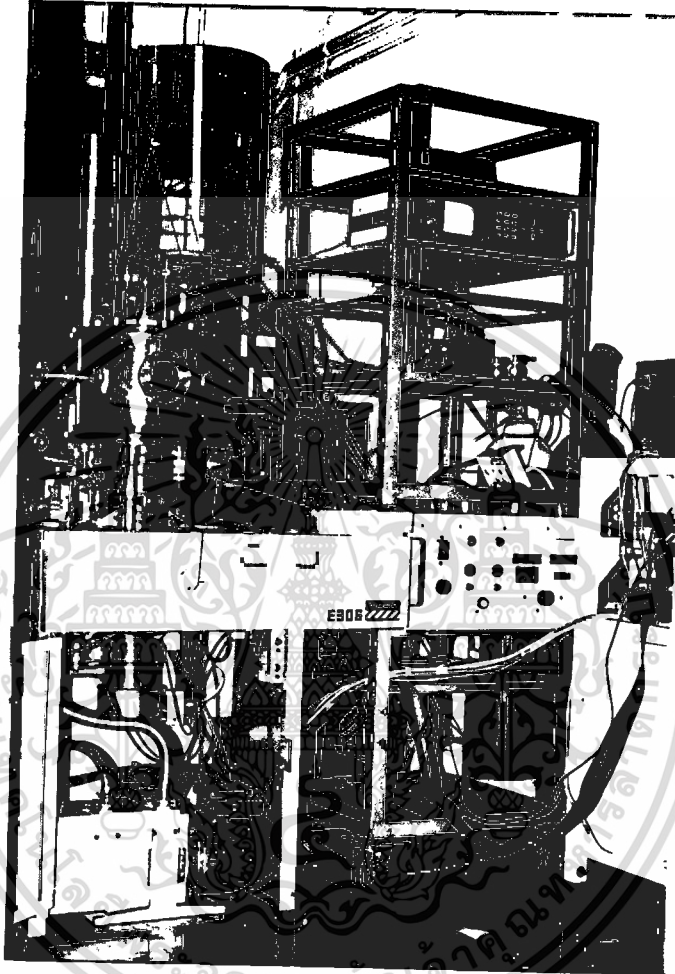


แสดงส่วนประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ ดีซี พลาสมา แมกนีตรอน สปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเขียวระเบียนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 59



แสดงระบบสปีดเตอริงที่ใช้งาน

### การทดลองหาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า

เมื่อทำการทดลองหาค่าความดันต่ำสุดของระบบได้แล้ว เพื่อให้สามารถเกิดความสนใจในปลอดภัยเมื่อจะต้องทำการป้อนกระแสไฟฟ้าแรงสูงเข้าสู่ระบบขณะทำการสปีดเตอริง ดังนั้นขั้นตอนสุดท้ายก่อนจะนำเอาชิ้นงานมาทำการเคลื่อน จำเป็นต้องศึกษาการทำงานของระบบกักเก็บประจุในระบบ ดีซี แมกนิตรอน สปีดเตอริง โดยการทำการทดลองป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด 848.5 โวลต์ และกระแสสูงสุด 2 แอมแปร์ เพื่อให้เกิดความแน่ใจในระบบสำหรับผู้ปฏิบัติการและอุปกรณ์ใช้งานที่อาจได้รับผลจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเพื่อความปลอดภัยจำเป็นต้องตรวจสอบระบบการต่อลงกราวด์ของแชมเบอร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าว่าอยู่ในสภาพดีหรือไม่ เมื่อระบบสามารถทำงานได้ตามปกติแล้ว จึงค่อยทำการเปลี่ยนเป่าสารเคลือบจนครบทั้ง 4 ชนิด และศึกษาพฤติกรรมทางการดิซชาร์จของเป่าชนิดต่างๆ กับก๊าซอาร์กอน (Ar)

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำความสะอาดเป่าสารเคลือบเพื่อไม่ให้เกิดสิ่งสกปรก ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอาร์ค (Arc) ขึ้นระหว่างทำการป้อนกระแสไฟฟ้า พร้อมทั้งทำความสะอาดผิวเป่าสารเคลือบเพื่อไม่ให้เกิดการดูดซับก๊าซ (Adsorption) ซึ่งเป็นผลทำให้ไม่สามารถทำการปั๊มลงได้ในเวลาอันรวดเร็ว จากนั้นจึงทำการติดตั้งเป่าสารเคลือบลงบนขั้วคาโทด
2. ทดสอบว่าเป่าสารเคลือบติดแน่นกับขั้วคาโทดหรือไม่ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็น ซึ่งจะเป่าสารเคลือบทำให้เกิดการอาร์ค หรือทำให้น้ำไหลเข้าผสมกับน้ำมันของระบบปั๊ม โดยการเปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นขั้วคาโทดทิ้งไว้ประมาณ 3-5 นาที พร้อมกับสังเกตการรั่วซึม
3. ทำการเช็คว่าขั้วคาโทดกับแชมเบอร์ถูกแยกจากกันอย่างแน่นอน โดยการใช้มิเตอร์ไฟฟ้าวัด
4. ทำการปิดชัตเตอร์ (Shutter) เพื่อป้องกันการเกิดการเคลือบลงบนแผ่นรองรับชิ้นงาน (Substrate)
5. นำเอาจาระบีสุญญากาศทาบบริเวณกระจกหน้าต่างต่างๆ เพื่อป้องกันการเคลือบลงบนผิวกระจกหน้าต่าง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ยากแก่การล้างออก
6. เปิดปั๊มกลโรตารีให้ทำงาน ในขณะที่ Control valve อยู่ในตำแหน่ง Close
7. เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นให้กับระบบปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion pump)
8. เปิดปั๊มไอฟุ้งกระจายให้ทำการดื่มน้ำมันให้เดือดก่อน โดยใช้เวลารอให้น้ำมันเดือดประมาณ 15-20 นาที
9. เมื่อน้ำมันปั๊มไอฟุ้งกระจายเดือด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเสียงที่ดังของน้ำมันที่เดือดหรือหยดน้ำที่เริ่มก่อตัวรอบๆ ท่อน้ำหล่อเย็นของปั๊มไอฟุ้งกระจาย แล้วจึงทำการสับ Control valve มาที่ตำแหน่ง Backing valve เพื่อทำการปั๊มความดันท้ายของปั๊มไอฟุ้งกระจายด้วยปั๊มกลโรตารีจนได้ความดันท้ายประมาณ  $10^{-2}$  mbar โดยทำการวัดได้จาก Pirani gauge รุ่น TPR 010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทำการสับ Control valve หมุนกลับไปหยุดที่ตำแหน่ง Roughing valve ทำการปั๊ม แชมเบอร์สุญญากาศจนได้ความดันประมาณ  $10^{-2}$  mbar โดยทำการวัดได้จาก Pirani gauge รุ่น PRM 10K

11. ทำการสับ Control valve หมุนกลับไปตำแหน่ง Backing valve จากนั้นทำการดึงคัม บังคับ Control valve ขึ้นเพื่อทำการเริ่มเปิด Isolation valve จากนั้นค่อยๆ หมุน Control valve ตามทิศทางเข็มนาฬิกา เพื่อทำการเปิด Isolation valve โดยจะต้องหยุดหมุนเมื่อความดันภายใน แชมเบอร์สูงขึ้นจนเกิน  $10^{-2}$  mbar เพื่อป้องกันการการทำงานหนักเกินไปของปั๊มกลโรตารี และจึง ค่อยๆ ทำการหมุนต่อจน Isolation valve เปิดจนสุด

12. ทำการปั๊มระบบสุญญากาศจนได้ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  mbar โดยทำการวัดได้จาก Penning gauge

13. ต่อขั้วไฟฟ้าโดยขั้วลบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเข้ากับขั้วคาโทดและขั้วบวกของแหล่ง จ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเข้ากับขั้วแอโนดหรือตัวถังแชมเบอร์สุญญากาศ

14. เปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นขั้วคาโทด และจำเป็นต้องทำการเช็คเสมอว่าท่อน้ำหล่อเย็น ไม่มี ระเบิด

15. เปิด MKS-Mass flow ให้ทำงาน โดยเลือกเมนูหน้าจอหมายเลข (3) เพื่อเริ่มทำการ ควบคุมการป้อนก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าสู่แชมเบอร์

16. เข้าสู่เมนูหมายเลข (3) แล้ว จึงทำการเลือกขนาด mass flow ที่จะทำการป้อนก๊าซ อาร์กอนเข้าสู่แชมเบอร์ โดยทำการป้อนค่า 26.0 sccm ในแถว setpoint คอลัมน์ที่ CH2 ซึ่งเป็นค่าที่ ทำให้ระบบสุญญากาศมีความดันลดต่ำลงจนถึง  $3 \times 10^{-3}$  mbar ตามที่ต้องการ เมื่อก๊าซเริ่มผ่านเข้าสู่ แชมเบอร์แถว ACT.FLOW คอลัมน์ที่ CH2 จะค่อยๆ มีตัวเลขเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 26.0 sccm แสดง ว่าก๊าซเข้าสู่แชมเบอร์สุญญากาศตามค่าที่ต้องการแล้ว

17. เมื่อความดันภายในระบบสุญญากาศอยู่ที่ประมาณ  $3 \times 10^{-3}$  mbar หรือต่ำกว่า จึงทำการ เริ่มป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ โดยเริ่มเปิด main circuit breaker คว่ามีไฟเข้าสู่แหล่งจ่ายกำลัง ไฟฟ้าหรือไม่ กดปุ่ม on จะทำให้ส่วนวงจร soft start ทำงาน รอจนวงจร soft start ทำงานเสร็จ โดยดูจากไฟเขียวของหลอด soft start แล้วจึงเริ่มกดปุ่ม start หมุนปุ่มปรับกระแสไฟฟ้าเล็กน้อย แล้วสังเกตดูจากหน้าต่างแชมเบอร์สุญญากาศว่าเกิดการโกลว์ดิสชาร์จหรือยัง ถ้ายังไม่เกิดเราจะใช้ เทคนิค โดยการเพิ่มความดันในระบบสุญญากาศโดยการหมุนคัมบังคับ control valve ให้ทำการ ปิดลงทีละน้อย พร้อมกับสังเกตดูว่าเกิดการโกลว์ดิสชาร์จหรือยัง เมื่อแชมเบอร์เกิดการโกลว์ดิส ชาร์จแล้ว จึงเปิด Isolation valve จนสุด พร้อมกับปรับกระแสไฟฟ้าไปตามค่าที่ต้องการ

18. ทำการเก็บผลการทดลองดังนี้คือ บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (Discharge Voltage) ตามการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่เริ่มจาก 100, 200, 300, ..., 2000 mA

19. ทำการเปลี่ยนค่าความดันก๊าซของระบบสุญญากาศ ดังวิธีตามข้อที่ 16. พร้อมทั้งลดความดันก๊าซอาร์กอนลงเรื่อยๆ จนความดันภายในแชมเบอร์ลดลงจนไม่สามารถเกิดขบวนการโกลว์ดิสชาร์จได้ ทำการเก็บผลการทดลองที่ค่าความดันต่างๆ ตามวิธีข้อที่ 18 มาสัก 5 ความดันต่อเป้าหนึ่งชนิด

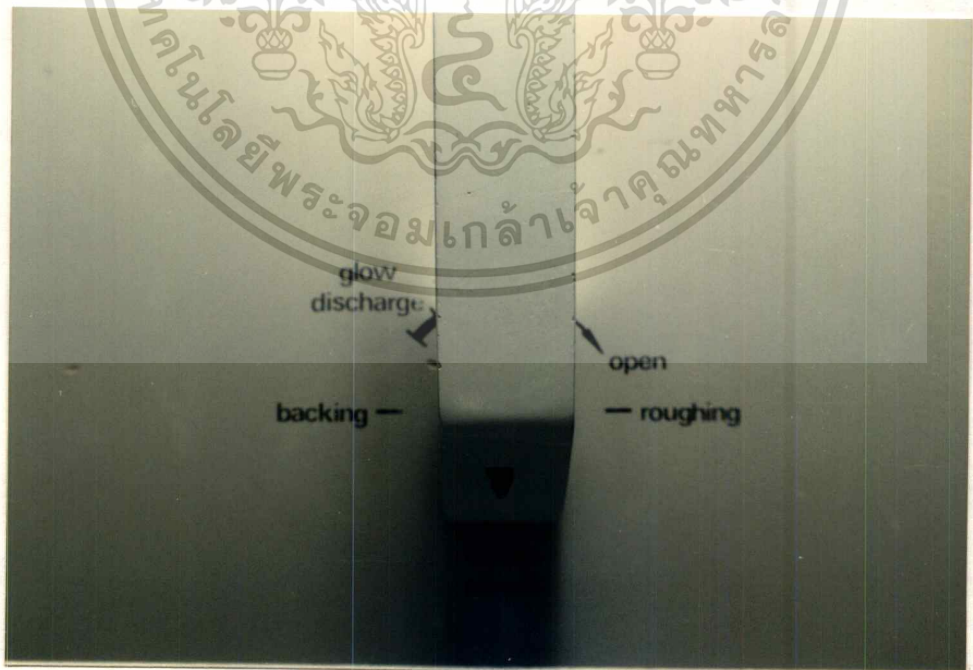
20. เมื่อเก็บผลการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้วหนึ่งเป้า ให้ทำการปิดระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าลง โดยเริ่มจากกดปุ่ม off แล้วจึงสับ main circuit breaker ปิดลง

21. นำมิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้ามาวัดที่ขั้วคาโทดกับแอนโนด ดูว่าแรงดันที่ยังค้างอยู่ในคาปาซิเตอร์หมดหรือยัง

22. เมื่อไม่มีแรงดันหลงเหลืออีก ให้ทำการปิดน้ำหล่อเย็นขั้วคาโทด

23. สับ control valve ให้หมუნทวนเข็มนาฬิกากลับมาที่ตำแหน่ง Backing valve เพื่อทำการปิด Isolation valve

ภาพที่ 60



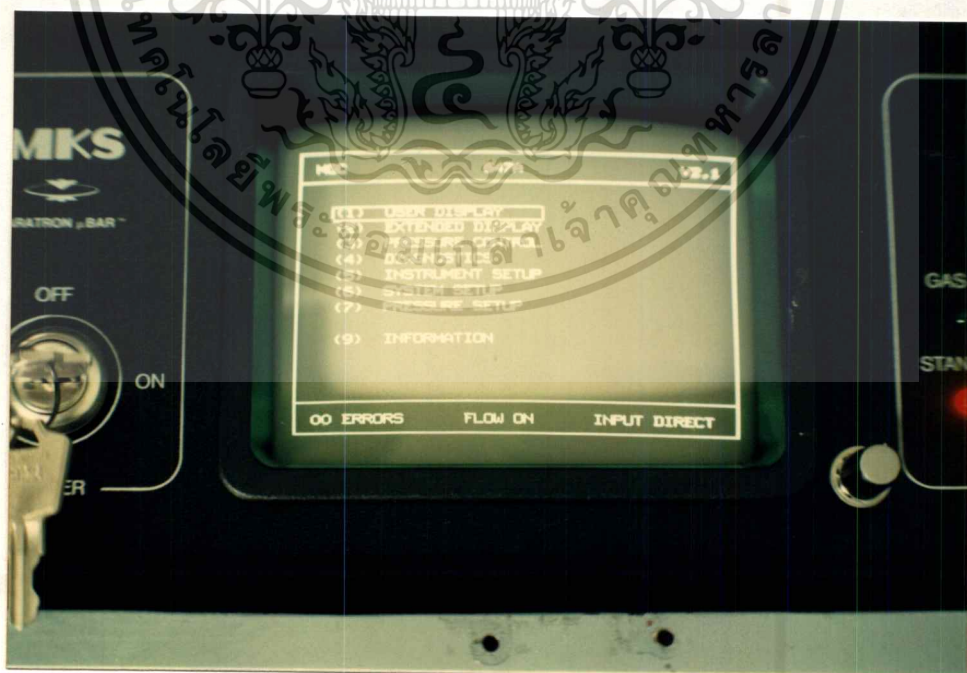
แสดงส่วนควบคุม Isolation valve, Backing valve และ Roughing valve แบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. ปิดเครื่องวัดความดัน Penning gauge
25. หยุดการป้อนก๊าซอาร์กอน โดยเลื่อนคำสั่งมาที่แถว status คอลัมน์ที่ CH2 แล้วจึงสั่งให้ off
26. กดปุ่มให้ก๊าซเข้าสู่แชมเบอร์ โดยผ่านทาง Solenoid valve
27. ทำการขันน็อตเปิดฝาแชมเบอร์สุญญากาศออก เพื่อทำการเปลี่ยนเป้าสารเคลือบชนิดใหม่
28. ทำการทดสอบเหมือนเดิม พร้อมกับทำการเปลี่ยนเป้าสารเคลือบจนครบทั้ง 4 ชนิด
29. เมื่อต้องการเลิกการทำงาน ต่อจากข้อที่ 26 ให้ทำการกดปุ่ม off ปุ่มไอฟุ้งกระจาย แล้วรอจนน้ำมันเย็นประมาณ 15-20 นาที
30. หมุนทวนเข็มนาฬิกา control valve มาอยู่ที่ตำแหน่ง close valve จึงทำการปิดปั๊มกลโรตารี
31. ทำการปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นปั๊มไอฟุ้งกระจาย

ภาพที่ 61



### แสดงหน้าจอเมนูหลักของเครื่อง MKS Mass Flow Meter

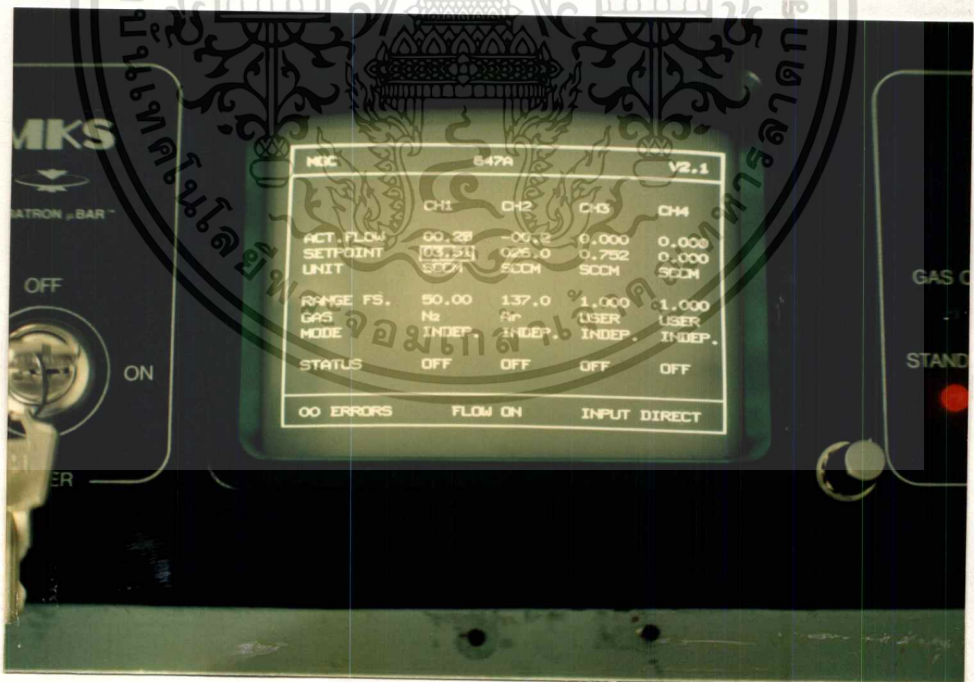
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการทดลองและการจัดอุปกรณ์ในการทดสอบเคลือบฟิล์มบางโลหะ

เมื่อผ่านการทดลองหาค่าความดันต่ำสุดของระบบและการทดลองวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าออกมาแล้ว ทำให้สามารถเริ่มทำการทดลองเคลือบฟิล์มบางโลหะ ซึ่งได้แก่ การทดลองเคลือบทองแดง (Cu), อลูมิเนียม (Al), ไททาเนียม (Ti) และเหล็กกล้าสแตนเลส ในช่วงความดันก๊าซอาร์กอน (Ar) ระหว่าง  $1 \times 10^{-3}$  mbar จนถึง  $4 \times 10^{-3}$  mbar และทำการปรับค่ากระแสจาก 100, 200, 300, ..., 2000 mA พร้อมทำการวัดอัตราการเคลือบในหน่วยอังสตรอมต่อวินาที (Å/sec) ด้วยเครื่อง Thickness monitor โดยจะทำการเคลือบลงบนชิ้นงานกระจกสไลด์ โดยมีลำดับขั้นตอนการทดลองดังนี้

ภาพที่ 62



แสดงหน้าจอเมนูย่อยเพื่อใช้ควบคุม Mass Flow ของก๊าซอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำความสะอาดเป่าสารเคลือบเพื่อไม่ให้เกิดสิ่งสกปรก ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอาร์ค (Arc) ขึ้นระหว่างทำการป้อนกระแสไฟฟ้า พร้อมทั้งทำความสะอาดผิวเป่าสารเคลือบเพื่อไม่ให้เกิดการดูดซับก๊าซ (Adsorption) ซึ่งเป็นผลทำให้ไม่สามารถทำการปั๊มลงได้ในเวลาอันรวดเร็ว จากนั้นจึงทำการติดตั้งเป่าสารเคลือบลงบนขั้วคาโทด

2. ทดสอบว่าเป่าสารเคลือบติดแน่นกับขั้วคาโทดหรือไม่ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็น ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการอาร์ค หรือทำให้น้ำไหลเข้าผสมกับน้ำมันของระบบปั๊ม โดยการเปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นขั้วคาโทดทิ้งไว้ประมาณ 3-5 นาที พร้อมกับสังเกตการรั่วซึม

3. ทำการเช็คว่าขั้วคาโทดกับแชมเบอร์ถูกแยกจากกันอย่างแน่นอน โดยการใช้มิเตอร์ไฟฟ้าวัด

4. ทำความสะอาดกระจกสไลด์หรือชิ้นงาน ในเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก (Ultrasonic) และนำยาอะซีโตน เสร็จแล้วนำไปวางบนแผ่นรองรับชิ้นงาน

5. ทำการปิดชัตเตอร์ (Shutter) เพื่อป้องกันการเกิดการเคลือบลงบนชิ้นงาน (Substrate) ก่อนที่การโกลว์ดีสชาร์จจะสมบูรณ์

6. นำเอากระจกบิสยูญากาสาทบริเวณกระจกหน้าต่างต่างๆ เพื่อป้องกันการเคลือบลงบนผิวกระจกหน้าต่าง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ยากแก่การล้างออก

7. เปิดปั๊มกลโรตารีให้ทำงาน ในขณะที่ Control valve อยู่ในตำแหน่ง Close

8. เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นให้กับระบบปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion pump)

9. เปิดปั๊มไอฟุ้งกระจายให้ทำการดื่มน้ำมันให้เดือดก่อน โดยใช้เวลารอให้น้ำมันเดือดประมาณ 15-20 นาที

10. เมื่อน้ำมันปั๊มไอฟุ้งกระจายเดือด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเสียงที่ดังของน้ำมันที่เดือด หรือหยดน้ำที่เริ่มก่อตัวรอบๆ ท่อน้ำหล่อเย็นของปั๊มไอฟุ้งกระจาย แล้วจึงทำการสับ Control valve มาที่ตำแหน่ง Backing valve เพื่อทำการปั๊มความดันท้ายของปั๊มไอฟุ้งกระจายด้วยปั๊มกลโรตารี จนได้ความดันท้ายประมาณ  $10^{-2}$  mbar โดยทำการวัดได้จาก Pirani gauge

11. ทำการสับ Control valve หมุนกลับไปหยุดที่ตำแหน่ง Roughing valve ทำการปั๊มแชมเบอร์สุญญากาศจนได้ความดันประมาณ  $10^{-2}$  mbar โดยทำการวัดได้จาก Pirani gauge

12. ทำการสับ Control valve หมุนกลับไปตำแหน่ง Backing valve จากนั้นทำการดึงคัตบับ Control valve ขึ้นเพื่อทำการเริ่มเปิด Isolation valve จากนั้นค่อยๆ หมุน Control valve ตามทิศทางเข็มนาฬิกา เพื่อทำการเปิด Isolation valve โดยจะต้องหยุดหมุนเมื่อความดันภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แชนเบอร์สูงขึ้นจนเกิน  $10^{-2}$  mbar เพื่อป้องกันการการทำงานหนักเกินไปของปั๊มกลโรตารี และจึงค่อยๆ ทำการหมุนต่อจน Isolation valve เปิดจนสุด

13. ทำการปั๊มระบบสุญญากาศจนได้ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  mbar โดยทำการวัดได้จาก Penning gauge

14. ต่อขั้วไฟฟ้าโดยขั้วลบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเข้ากับขั้วคาโทดและขั้วบวกของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อเข้ากับขั้วแอโนดหรือตัวถังแชนเบอร์สุญญากาศ

15. เปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นขั้วคาโทด และจำเป็นต้องทำการเช็คเสมอว่าท่อน้ำหล่อเย็นไม่มีอะไรอุดตัน

16. เปิด MKS-Mass flow ให้ทำงาน โดยเลือกเมนูหน้าจอหมายเลข (3) เพื่อเริ่มทำการควบคุมการป้อนก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าสู่แชนเบอร์

17: เข้าสู่เมนูหมายเลข (3) แล้ว จึงทำการเลือกขนาด mass flow ที่จะทำการป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่แชนเบอร์ โดยทำการป้อนค่า 26.0 sccm ในแถว setpoint คอลัมน์ที่ CH2 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ระบบสุญญากาศมีความดันลดต่ำลงจนถึง  $3 \times 10^{-3}$  mbar ตามที่ต้องการ เมื่อก๊าซเริ่มผ่านเข้าสู่แชนเบอร์แถว ACT.FLOW คอลัมน์ที่ CH2 จะค่อยๆ มีตัวเลขเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 26.0 sccm แสดงว่าก๊าซเข้าสู่แชนเบอร์สุญญากาศตามค่าที่ต้องการแล้ว

18. เมื่อความดันภายในระบบสุญญากาศอยู่ที่ประมาณ  $3 \times 10^{-3}$  mbar หรือต่ำกว่า จึงทำการเริ่มป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ โดยเริ่มเปิด main circuit breaker ดูว่ามีไฟเข้าสู่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือไม่ กดปุ่ม on จะทำให้ส่วนวงจร soft start ทำงาน รอจนวงจร soft start ทำงานเสร็จ โดยดูจากไฟเขียวของหลอด soft start แล้วจึงเริ่มกดปุ่ม start หมุนปุ่มปรับกระแสไฟฟ้าเล็กน้อย แล้วสังเกตดูจากหน้าต่างแชนเบอร์สุญญากาศว่าเกิดการโกลว์ดิสชาร์จหรือยัง ถ้ายังไม่เกิดเราจะใช้เทคนิค โดยการเพิ่มความดันในระบบสุญญากาศโดยการหมุนคั่นบังคับ control valve ให้ทำการปิดลงทีละน้อย พร้อมกับสังเกตดูว่าเกิดการโกลว์ดิสชาร์จหรือยัง เมื่อแชนเบอร์เกิดการโกลว์ดิสชาร์จแล้ว จึงเปิด Isolation valve จนสุด พร้อมกับปรับกระแสไฟฟ้าไปตามค่าที่ต้องการ

19. เปิดชุดเตอร์ออก เพื่อเริ่มทำการเคลือบ

20. ทำการเก็บผลการทดลอง ดังนี้คือ บันทึกค่า mass flow ที่ค่าความดันที่ต้องการ และวัดค่าอัตราการเคลือบเป็นอังสตรอมต่อวินาที ตามการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่เริ่มจาก 100, 200, 300, ..., 2000 mA

21. ทำการเปลี่ยนค่าความดันก๊าซของระบบสุญญากาศ ดังวิธีตามข้อที่ 17 พร้อมทั้งลดความดันก๊าซอาร์กอนลงเรื่อยๆ จนความดันภายในแชนเบอร์ลดลง จนไม่สามารถเกิดขบวนการ

โกลว์ดิสซาร์จได้ ทำการเก็บผลการทดลองที่ค่าความดันต่างๆ ตามวิธีข้อที่ 20 มาสัก 5 ความดันต่อเป่าหนึ่งชนิด

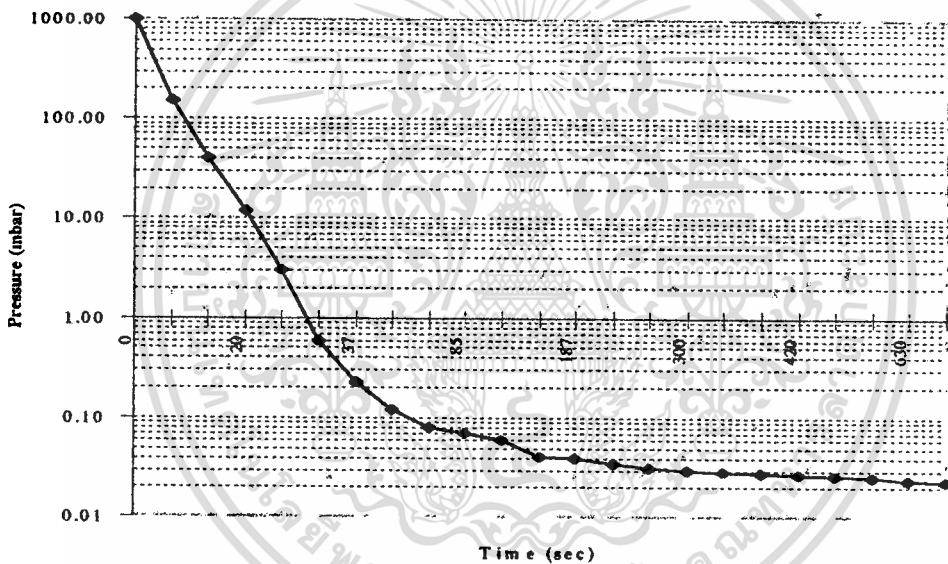
22. ปิดชุดเตอร์ เพื่อเริ่มนำชิ้นงานออก
23. เมื่อเก็บผลการทดลองเสร็จเรียบร้อยหนึ่งเป่า ให้ทำการปิดระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าลง โดยเริ่มจากกดปุ่ม off แล้วจึงสับ main circuit breaker ปิดลง
24. นำมิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้ามาวัดที่ขั้วคาโทดกับอานโนด ดูว่าแรงดันที่ยังค้างอยู่ในคาปาซิเตอร์หมดหรือยัง
25. เมื่อไม่มีแรงดันหลงเหลืออีก ให้ทำการปิดน้ำหล่อเย็นขั้วคาโทด
26. สับ control valve ให้หมუნทวนเข็มนาฬิกากลับมาที่ตำแหน่ง Backing valve เพื่อทำการปิด Isolation valve
27. ปิดเครื่องวัดความดัน Penning gauge
28. หยุดการป้อนก๊าซอาร์กอน โดยเลื่อนคำสั่งมาที่แถว status กดปุ่มที่ CH2 แล้วจึงสั่งให้ off
29. กดปุ่มให้ก๊าซเข้าสู่แชมเบอร์ โดยผ่านทาง Solenoid valve
30. ทำการขันน็อตเปิดฝาแชมเบอร์สุญญากาศออก เพื่อทำการเปลี่ยนเป่าสารเคลือบชนิดใหม่ พร้อมนำกระจกสไลด์ชิ้นงานออก
31. ทำการทดลองเหมือนเดิม พร้อมกับทำการเปลี่ยนเป่าสารเคลือบจนครบทั้ง 4 ชนิด
32. เมื่อต้องการเลิกการทำงาน ต่อจากข้อที่ 26 ให้ทำการกดปุ่ม off ปุ่มไอฟุ้งกระจาย แล้วรอนน้ำมันเย็นประมาณ 15-20 นาที
33. หมุนทวนเข็มนาฬิกา control valve มาอยู่ที่ตำแหน่ง close valve จึงทำการปิดปั๊มกลโรตารี
34. ทำการปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นปั๊มไอฟุ้งกระจาย

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

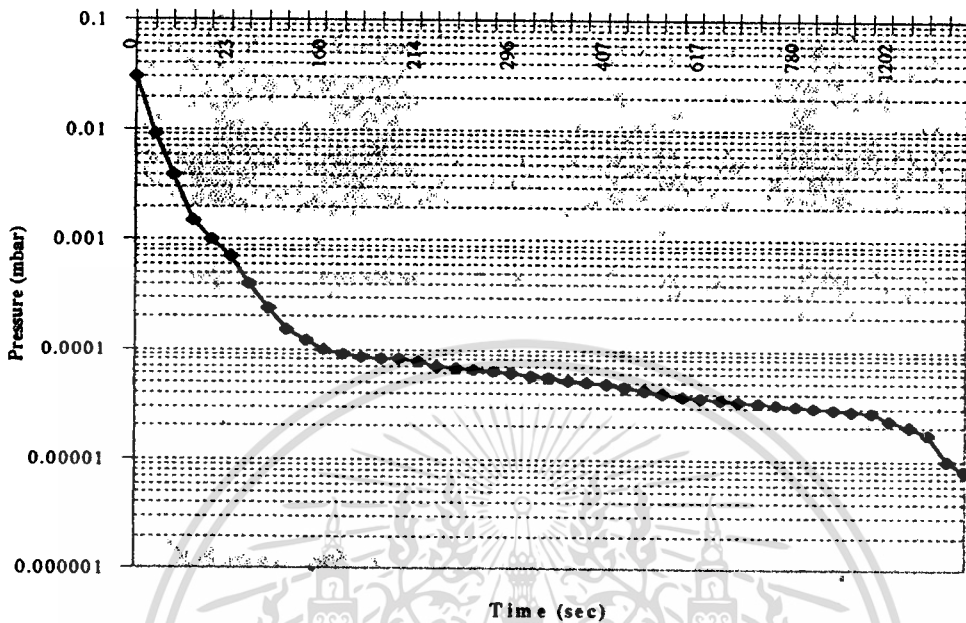
#### ผลการทดลองการหาค่าความดันต่ำสุดของระบบ

ภาพที่ 63



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการปั๊มกับความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศ  
เมื่อใช้ปั๊มกล โรตารี สร้างความดันขึ้นต้น

ภาพที่ 64



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันภายในแชมเบอร์เมื่อใช้ปั๊มไอฟุ้งกระจาย

#### วิเคราะห์ผลการทดลองการหาค่าความดันต่ำสุดของระบบ

ในการสร้างระบบเคลือบสารด้วยวิธีสปีดเทอริง ความสะอาดของระบบเคลือบเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อคุณภาพฟิล์มเคลือบที่ปรากฏ แม้ความดันก๊าซขณะเคลือบจะมีค่าประมาณ  $10^{-3}$  mbar แต่ระบบจำเป็นต้องผ่านการปั๊มทำความสะอาดระบบสุญญากาศให้ถึงความดันต่ำกว่า  $10^{-6}$  mbar เพื่อให้แน่ใจว่ามีอัตราการรั่วไหลของก๊าซจากภายนอกเข้าสู่ระบบสุญญากาศมีค่าต่ำหรือก๊าซที่ติดอยู่ตามผนังด้านในของภาชนะสุญญากาศหรือส่วนประกอบสุญญากาศ ซึ่งก๊าซที่รั่วไหลเข้ามาส่วนใหญ่นั้นจะเป็นก๊าซที่ไวต่อปฏิกิริยา เช่น ก๊าซออกซิเจน  $O_2$  เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ฟิล์มเคลือบกลายเป็นฟิล์มออกไซด์ของเป้าหมายนั้นๆ ได้บนแผ่นชิ้นงาน

จากกราฟภาพที่ 63 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการปั๊มกับความดันที่ได้เมื่อใช้แค่เพียงปั๊มกลโรตารีรุ่น D25B ของบริษัท Leybold เพียงอย่างเดียว ในการปั๊มแชมเบอร์สุญญากาศซึ่งเป็นการปั๊มเพื่อสร้างสุญญากาศขั้นต้นแทนปั๊มไอฟุ้งกระจาย เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้จากการใช้ปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อสร้างสุญญากาศขั้นต้น จะเห็นปั๊มกลโรตารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

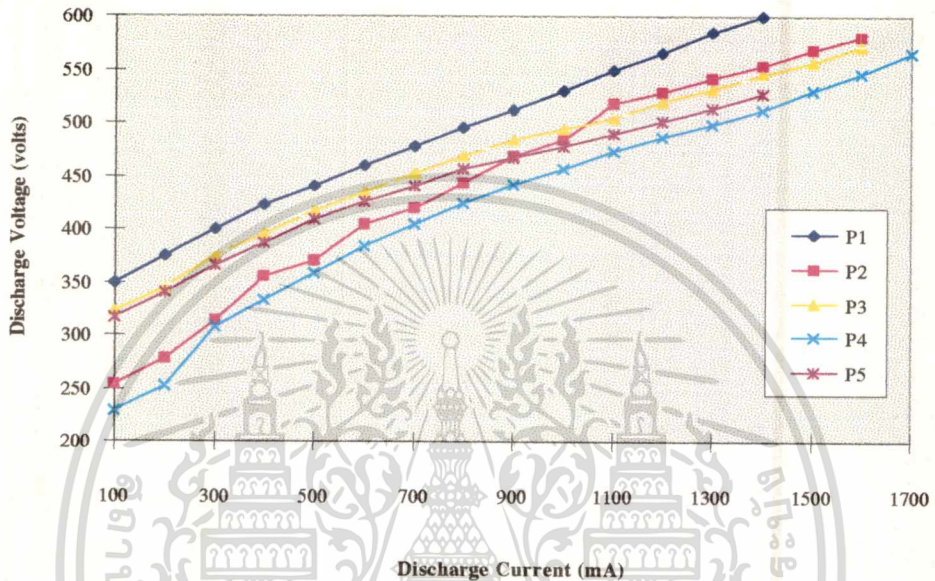
อย่างเคียวสามารถสร้างความดันสุญญากาศได้ต่ำสุดคือ  $2.3 \times 10^{-3}$  mbar ด้วยเวลา 720 วินาที หรือ 12 นาที ซึ่งเพียงพอต่อการสร้างความดันสุญญากาศขั้นต้นให้กับระบบสปีดเตอริง แต่ถ้ามีการทำความสะอาดระบบสุญญากาศให้ดี เช่น การทำการคลีน (clean) อุปกรณ์ประกอบส่วนต่างๆ ของระบบด้วยเครื่อง Ultrasonic และน้ำยาอะซิโตน เป็นต้น จะทำให้การสร้างความดันสุญญากาศขั้นต้นสามารถสร้างความดันได้ต่ำกว่า  $2.3 \times 10^{-3}$  mbar ลงอีก จากกราฟภาพที่ 63 บี้มกลโรตารีจะทำงานได้อย่างรวดเร็วมากในช่วงความดันระหว่าง  $10^3$  mbar ถึง  $10^1$  mbar ด้วยเวลาเพียง 60 วินาที โดยประมาณ จากนั้นจะเริ่มทำการบี้มความดันได้ช้าลงโดยมีความเร็วในการบี้มใกล้เคียงกัน

และภาพที่ 64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบี้มกับค่าความดันที่ได้เมื่อใช้บี้มไอฟุ้งกระจายรุ่น E04K ของบริษัท Edwards ทำการบี้มเพื่อสร้างสุญญากาศความดันต่ำ โดยมีบี้มกลโรตารีทำการสร้างสุญญากาศขั้นต้นให้แล้ว จากกราฟพบว่ากราฟจะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกจากความดันประมาณ  $3 \times 10^3$  ถึง  $2.4 \times 10^4$  mbar ซึ่งเป็นช่วงที่รวดเร็วมากเมื่อเริ่มทำการเปิดวาล์ว Isolation จะใช้เวลาเพียง 35 วินาที ในการบี้มเท่านั้น แต่พอหลังจากความดัน  $2.4 \times 10^4$  mbar ลงไปแล้วบี้มไอฟุ้งกระจายจะทำการลดความดันในแชมเบอร์สุญญากาศได้ช้าลงโดยใช้เวลาในการบี้มความดันจาก  $2.4 \times 10^3$  mbar จนถึง  $8 \times 10^{-6}$  mbar ประมาณ 2136 วินาที หรือ 35.6 นาที แต่ถ้ายังคงทำการบี้มต่อไปอีกจะสามารถสร้างความดันได้ต่ำลงถึงประมาณ  $5 \times 10^{-6}$  mbar ซึ่งเป็นช่วงที่สองที่จะมีความเร็วในการบี้มใกล้เคียงกันในแต่ละช่วงความดัน

การที่ต้องใช้เวลาในการบี้มเพื่อสร้างสุญญากาศความดันต่ำนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการรั่วซึมของก๊าซจากภายนอกเข้าสู่ระบบและจากการดูดซับของก๊าซของผิวด้านในภาชนะสุญญากาศ ดังนั้นจึงได้นำเอาเทคนิคการปล่อยก๊าซเข้าสู่แชมเบอร์สุญญากาศ มาใช้เพื่อทำการขับก๊าซที่ยึดติดอยู่กับผนังด้านในของภาชนะสุญญากาศออก โดยก่อนทำการสปีดเตอริงจะทำการบี้มด้วยบี้ม ไอฟุ้งกระจายตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วจากบทที่ 4. รอจนความดันภายในแชมเบอร์ไม่ลดลงได้อีกหรือลดลงช้ามาก จึงทำการป้อนก๊าซอาร์กอนจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วจึงหยุดการป้อนก๊าซอย่างรวดเร็ว ก๊าซอาร์กอนที่ป้อนเข้าไปจะเข้าชนกับโมเลกุลก๊าซที่ติดอยู่ตามภาชนะสุญญากาศ จะทำให้ก๊าซไวปฏิกิริยาต่างๆ ที่ถูกดูดซับบนผิวภาชนะต่างๆ ภายในระบบสุญญากาศหลุดออกมาเกือบหมด ทำให้สามารถทำการบี้มระบบให้มีความดันต่ำลงมาถึง  $5 \times 10^{-6}$  mbar ได้ด้วยเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในการทำความสะอาดสุญญากาศก่อนทำเคลือบด้วยวิธีสปีดเตอริง

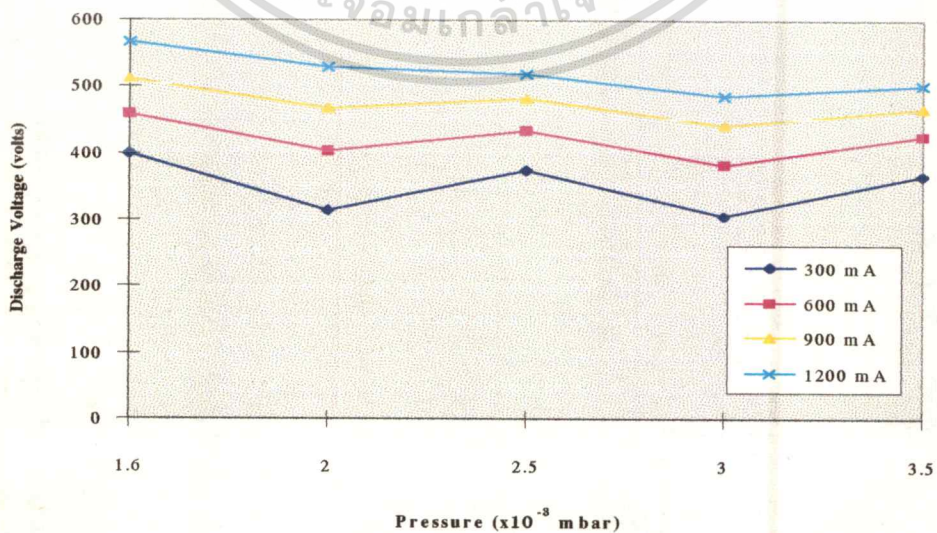
ผลการทดลองวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า

ภาพที่ 65



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดีสชาร์จกับแรงดันดีสชาร์จของเป้าสแตนเลสโดยคกเคก  
 $P1 = 1.6 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 3.5 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 66

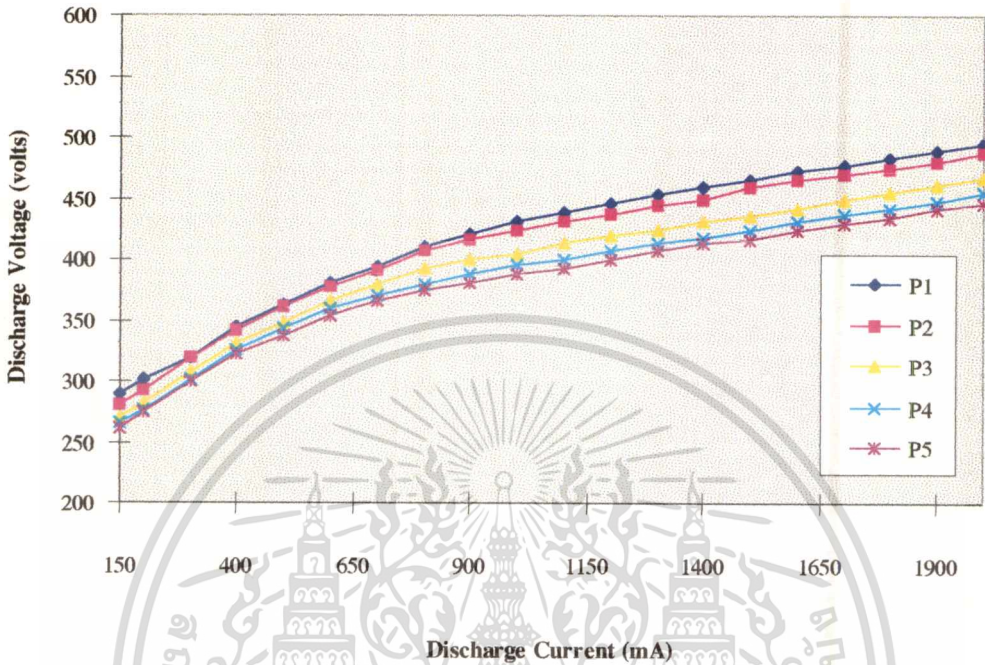


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันของเป้าสแตนเลสที่กระแสค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ มีผลใช้บังคับเมื่อมีขึ้นโดยมีเงื่อนไขว่าผู้รับใช้เอกสารนี้เป็นการดำเนินการค้า

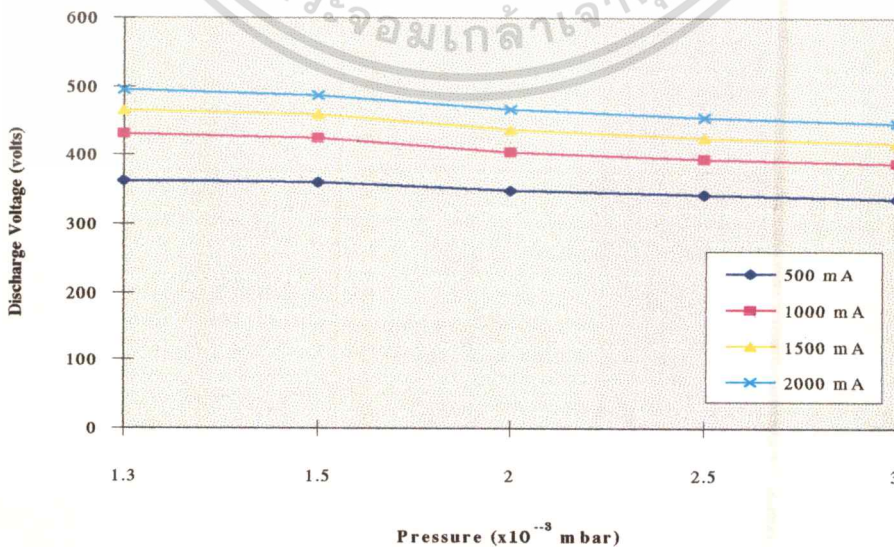
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 67



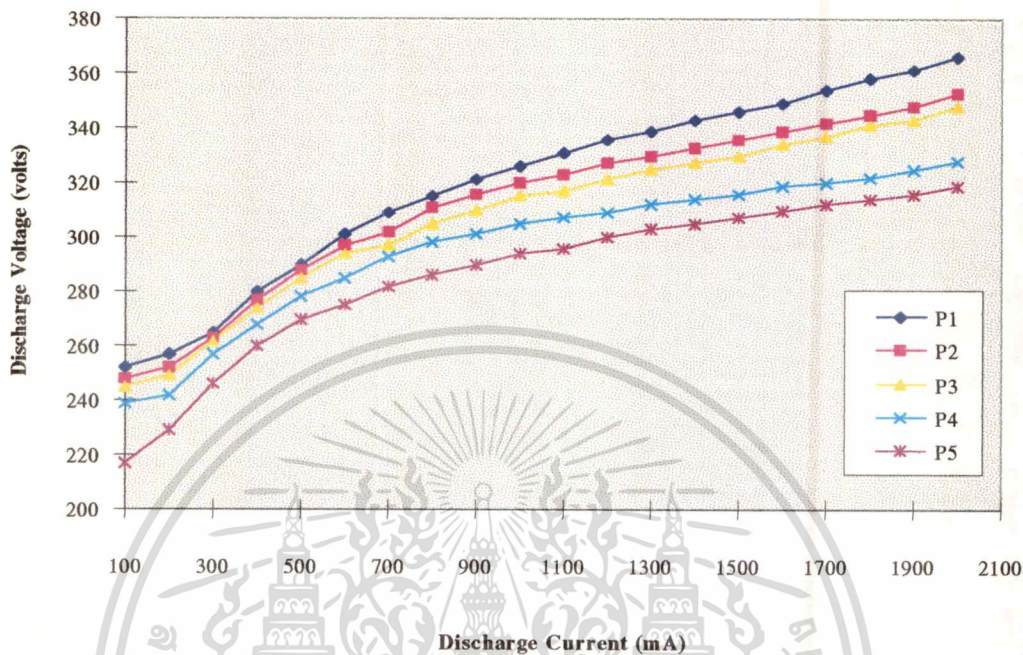
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสชาร์จกับแรงดันชาร์จของเป่าลูมิเนียม โดย  
 $P1 = 1.3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 2.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 3 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 68



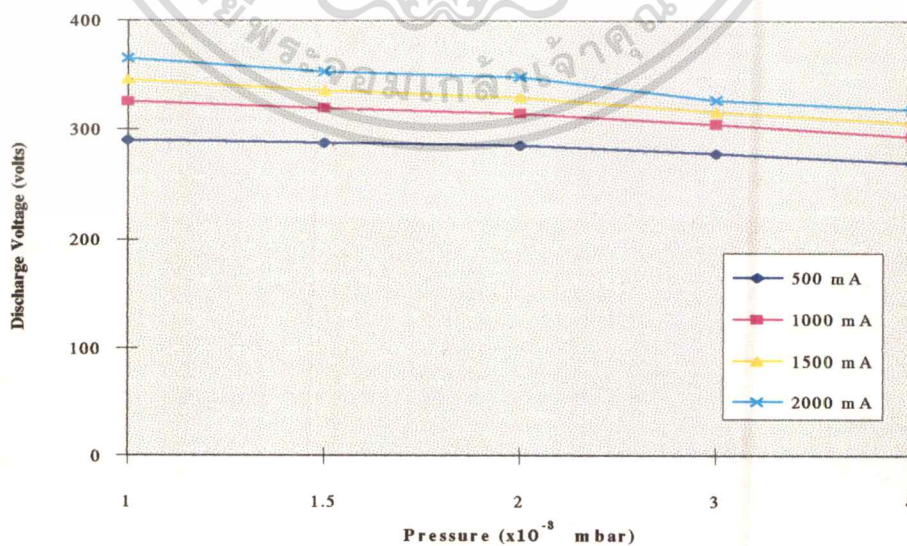
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงพาณิชย์เท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่เห็นประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 69



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตัวชาร์จกับแรงดันตัวชาร์จของเป้าไททาเนียมโดย  
 $P1 = 1.0 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 4 \times 10^{-3}$  mbar

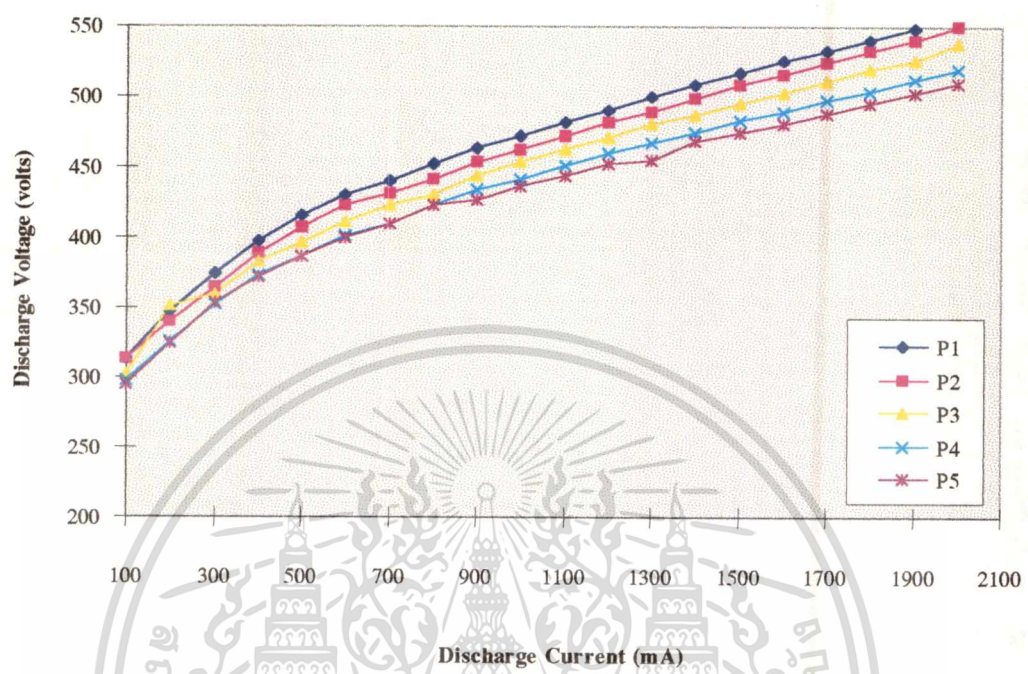
ภาพที่ 70



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันของเป้าไททาเนียมที่กระแสค่าต่างๆ

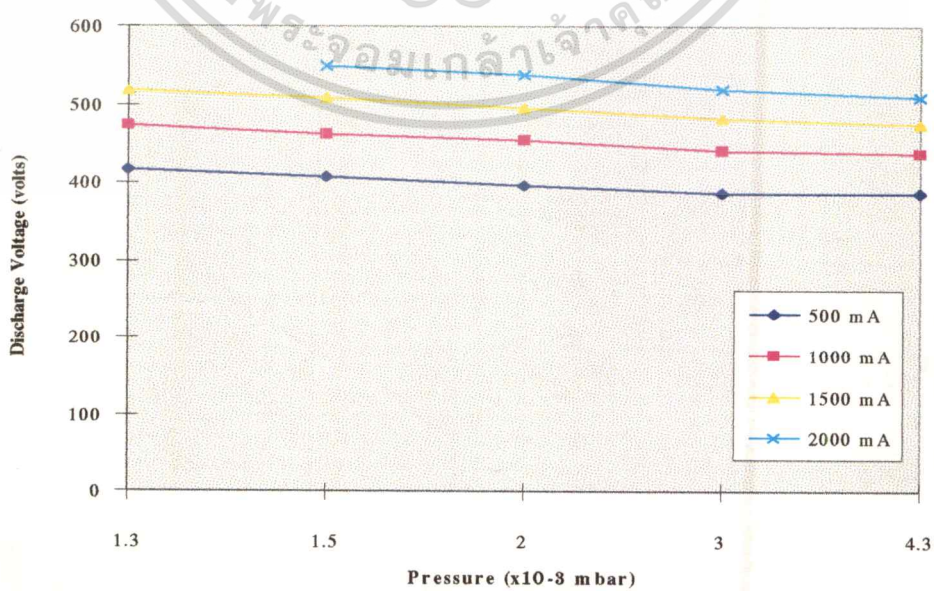
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 71



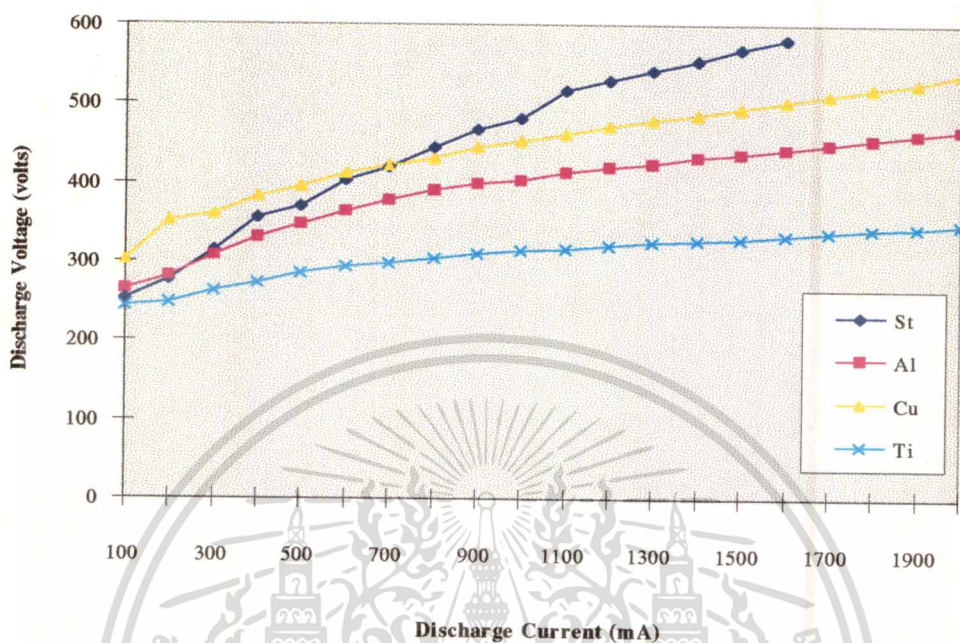
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสขารกับแรงดันสขารของเป่าทองแดงโดย  
 $P1 = 1.3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 4.3 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 72



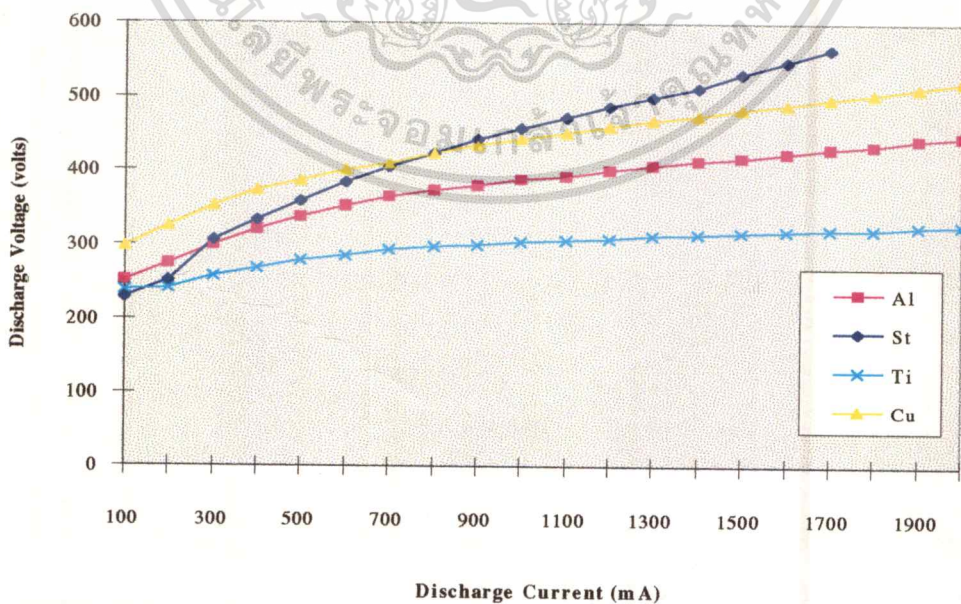
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับแรงดันของเป่าทองแดงที่กระแสค่าต่างๆขึ้นด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 73



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันดิสชาร์จของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน  $2.0 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 74



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดิสชาร์จของเป้าทั้ง 4 ชนิดที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิเคราะห์ผลการทดลองหาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันคิซาร์จในระบบสปีดเตอริง แสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชัน สภาพการคิซาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้อย่างมีประสิทธิภาพจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันคิซาร์จตามสมการที่ (39) คือ

$$I = aV^n$$

เมื่อ  $I$  คือกระแสคิซาร์จของคาโทด

คือแรงดันคิซาร์จระหว่างคาโทดและอานอด

$n$  คือดัชนีแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ซึ่งขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก โดยปกติ  $n$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 9 ในแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบทรงกระบอก แต่อาจแตกต่างกันไปบ้างเมื่อจัดเป็นแบบพลาเนียร์แมกนีตรอนสปีดเตอริง

$a$  คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์

สำหรับคาโทดชุดหนึ่งๆ การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงกว้างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าคิซาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เพื่อทำการคำนวณหาค่า  $n$  และ  $a$  จึงต้องทำการพล็อตค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (mA) และแรงดันไฟฟ้า (volt) ที่ใช้ในการคิซาร์จในสเกล  $\log - \log$  ดังภาพที่ 75 กับ 76 เมื่อแทนสูตรความสัมพันธ์จากสมการที่ (39) ให้อยู่ในรูปสมการ  $\log$  จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการต่อไปนี้คือ

$$\log I = \log a + n \log V \quad (40)$$

เมื่อ  $I$  อยู่ในหน่วยมิลลิแอมแปร์ และ อยู่ในหน่วยโวลต์ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์หาค่า  $n$  และ  $a$  สำหรับเป้าทั้ง 4 ชนิด ที่ความดัน  $2.0 \times 10^{-3}$  mbar และที่  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ได้เป็น

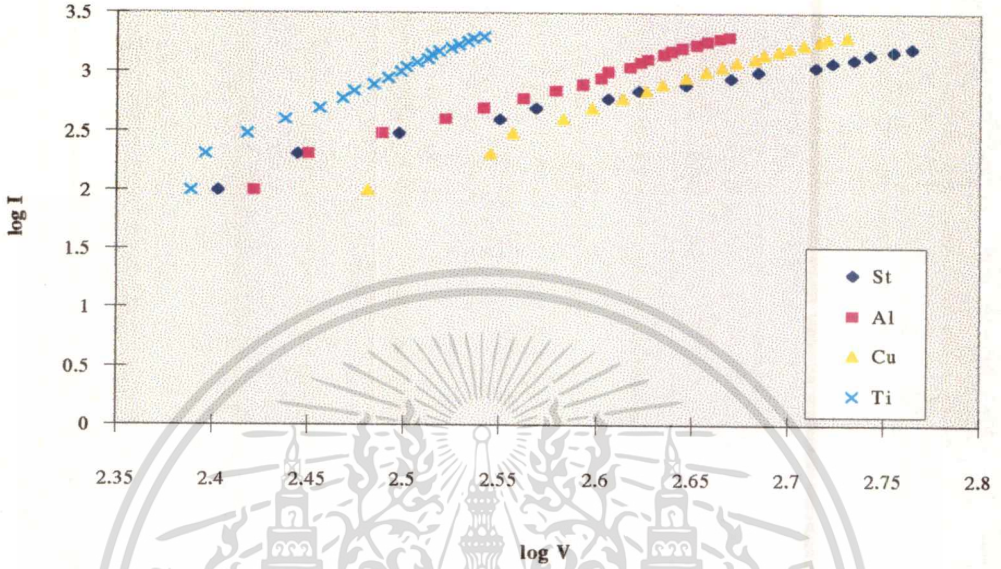
จากภาพที่ 75 เป็นเป้าสแตนเลส ที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar จะมีค่าความชันของกราฟเป็น

$$n = \frac{3.176 - 2.954}{2.755 - 2.67} = 2.6118$$

และจากสมการที่ (40) จะได้  $2.954 = \log a + (2.6118 \times 2.67)$

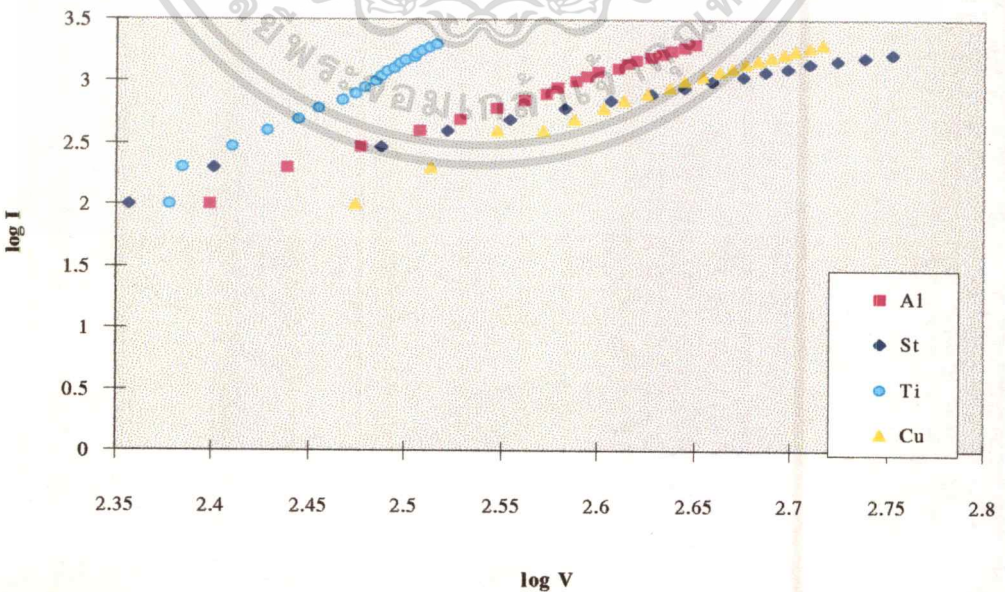
ดังนั้นจะได้  $a = 9.563 \times 10^{-5}$

ภาพที่ 75



กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log V กับ log I ของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน 2.0 x 10<sup>-3</sup> mbar

ภาพที่ 76



กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log V กับ log I ของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน 3.0 x 10<sup>-3</sup> mbar  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 75 เป็นเป่าลูมิเนียม ที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar จะมีค่าความชันของกราฟเป็น  

$$n = \frac{3.23 - 3}{2.652 - 2.606} = 5$$
 และจากสมการที่ (40) จะได้  $3.23 = \log a + (5 \times 2.652)$  ดังนั้นจะได้  

$$a = 9.3325 \times 10^{-11}$$

จากภาพที่ 75 เป็นเป่าทองแดง ที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar จะมีค่าความชันของกราฟเป็น  

$$n = \frac{3.176 - 2.778}{2.695 - 2.614} = 4.9136$$
 และจากสมการที่ (40) จะได้  $3.176 = \log a + (4.9136 \times 2.695)$   
 ดังนั้นจะได้  $a = 8.587 \times 10^{-11}$

จากภาพที่ 75 เป็นเป่าไททานเนียม ที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar จะมีค่าความชันของกราฟ  
 เป็น  $n = \frac{3.255 - 2.845}{2.533 - 2.473} = 6.83$  และจากสมการที่ (40) จะได้  $3.176 = \log a + (4.9136 \times$   
 $2.695)$  ดังนั้นจะได้  $a = 8.587 \times 10^{-11}$

จากภาพที่ 76 เป็นเป่าสแตนเลส ที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar จะมีค่าความชันของกราฟเป็น  

$$n = \frac{3.375 - 2.18}{2.8 - 2.35} = 2.656$$
 และจากสมการที่ (40) จะได้  $2.18 = \log a + (2.656 \times 2.35)$  ดังนั้น  
 จะได้  $a = 7.914 \times 10^{-5}$

จากภาพที่ 76 เป็นเป่าลูมิเนียม ที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar จะมีค่าความชันของกราฟเป็น  

$$n = \frac{3.3 - 1.875}{2.65 - 2.35} = 4.75$$
 และจากสมการที่ (40) จะได้  $1.875 = \log a + (4.75 \times 2.35)$  ดังนั้นจะ  
 ได้  $a = 4.70435 \times 10^{-10}$

จากภาพที่ 76 เป็นเป่าทองแดง ที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar จะมีค่าความชันของกราฟเป็น  

$$n = \frac{3.5 - 2.07}{2.75 - 2.45} = 4.767$$
 และจากสมการที่ (40) จะได้  $3.5 = \log a + (4.767 \times 2.75)$  ดังนั้นจะ  
 ได้  $a = 2.45895 \times 10^{-10}$

จากภาพที่ 76 เป็นเป่าไททานเนียม ที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar จะมีค่าความชันของกราฟ  
 เป็น  $n = \frac{3.301 - 2.602}{2.516 - 2.428} = 7.943$  และจากสมการที่ (40) จะได้  $3.301 = \log a + (7.943 \times 2.$   
 $516)$  ดังนั้นจะได้  $a = 2.07 \times 10^{-17}$

จากภาพที่ 65, 67, 69 และ 71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าคิซซาร์จและ  
 กระแสไฟฟ้าที่ความดันก๊าซค่าต่างๆ การเปลี่ยนค่าของความชันกราฟ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น  
 เนื่องจากว่าขณะที่กระแสไฟฟ้าค่าสูงขึ้น ปริมาณไอออนของก๊าซถูกจำกัดด้วยความดันก๊าซในระบบทำให้ปริมาณการผลิตอิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดค่าตามไปด้วย ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของคา  
 โทดจึงสูงขึ้นเพียงเร่งไอออนให้ชนคาโทดด้วยพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างอิเล็กตรอนชุดที่  
 สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกระแสดังในภาพที่ 65, 67, 69 และ 71 การเบนโค้งนี้จะ  
 เริ่มที่กระแสสูงขึ้นไปถ้าความดันก๊าซในระบบมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟภาพที่ 65 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิซาร์จกับแรงดันดิซาร์จของเป้าสแตนเลสที่ความดันค่าต่าง ๆ จะพบว่าแนวเส้นกราฟจะแตกต่างจากเป้าชนิดอื่น แสดงให้เห็นว่าสแตนเลสเป็นสารเนื้อผสมและมีโครงสร้างของธาตุหลายชนิด

จากภาพที่ 66 , 68 , 70 และ 72 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดิซาร์จของคาโทดและความดันก๊าซที่กระแสไฟฟ้าคงที่ค่าต่างๆ ของเป้าทีละชนิด พบว่าการเพิ่มความดันก๊าซทำให้ความหนาแน่นอะตอมก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้น และยังผลให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อิเล็กตรอนชุดที่สองที่เกิดจากการชนของไอออนบนเป้าสารเคลือบจึงปริมาณสูงขึ้น ทำให้ความนำไฟฟ้าของการดิซาร์จสูงขึ้น และแรงดันไฟฟ้าดิซาร์จมีค่าลดลงเมื่อความดันมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าดิซาร์จจะมีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น

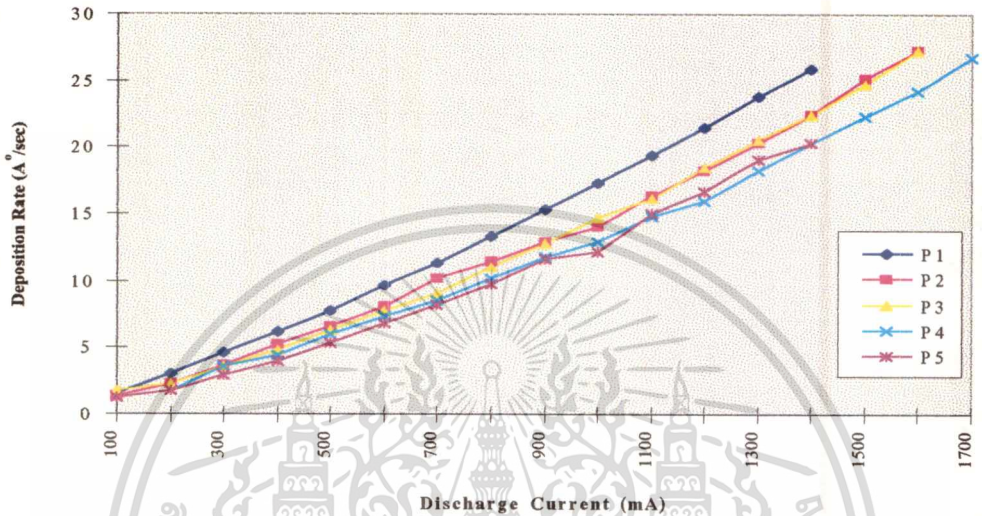
จากค่าความดันต่ำสุดของระบบที่สามารถทำได้ คือ  $5 \times 10^{-6}$  mbar ทำให้ระบบมีความสะอาดมากพอที่จะทำให้ฟิล์มเคลือบที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง โดยค่าคงที่  $a$  และ  $n$  นั้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังเช่น ความเข้มและแนวของเส้นแรงสนามแม่เหล็ก, วัสดุที่ใช้ทำเป้าสารเคลือบ ได้แก่ รูปร่าง ชนิด ความบริสุทธิ์ของเป้า เป็นต้น และความดันที่ใช้ขณะทำการสปัตเตอริง โดยจะเป็นค่าคงที่ที่เฉพาะสำหรับองค์ประกอบของระบบสปัตเตอริงหนึ่งๆ และค่าคงที่  $a$  และ  $n$  จะมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับเป้าชนิดเดียวกัน ที่ค่าความดันในการสปัตเตอริงต่างกัน สำหรับค่ากำลังไฟฟ้า ( $P$ ) ซึ่งหาได้จากผลคูณระหว่างแรงดันดิซาร์จกับกระแสดิซาร์จ ดังนั้นจากสมการที่ (39) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันดิซาร์จในรูปของค่าคงที่  $a$  และ  $n$  ได้เป็น

$$P = aV^{n+1} \quad (42)$$

จากภาพที่ 73 และ 74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดิซาร์จกับกระแสดิซาร์จของเป้าสารเคลือบทั้ง 4 ชนิดเปรียบเทียบกับที่ค่าความดันเดียวกัน พบว่าเส้นกราฟของเป้าโลหะสแตนเลสจะมีแนวโน้มข้อมูลแตกต่างจากเป้าสารเคลือบโลหะชนิดอื่น เนื่องจากว่าเป้าสแตนเลสเป็นสารเนื้อผสมซึ่งมีโครงสร้างการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลแตกต่างจากเป้าสารเคลือบชนิดอื่นที่เป็นสารเนื้อเดียว โดยจะมีแนวเส้นกราฟข้อมูลแรงดันที่ใช้ในการดิซาร์จอยู่ในช่วงกว้างมากครอบคลุมตลอดช่วงของเป้าสารเคลือบอีก 3 ชนิด

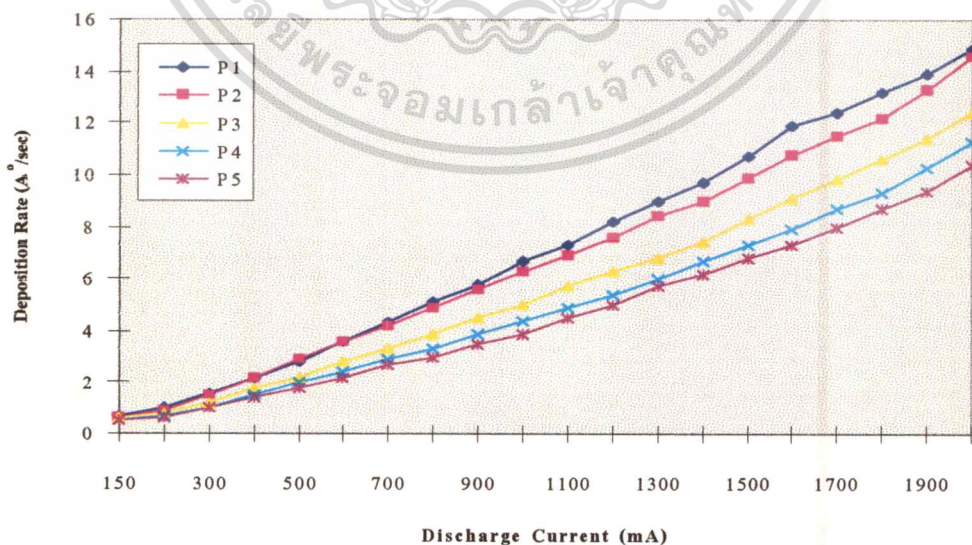
## ผลการทดลองการทดสอบเคลือบฟิล์มบางโลหะ

ภาพที่ 77



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราการเคลือบของเป่าสแตนเลสโดย  
 $P1 = 1.6 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 3.5 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 78



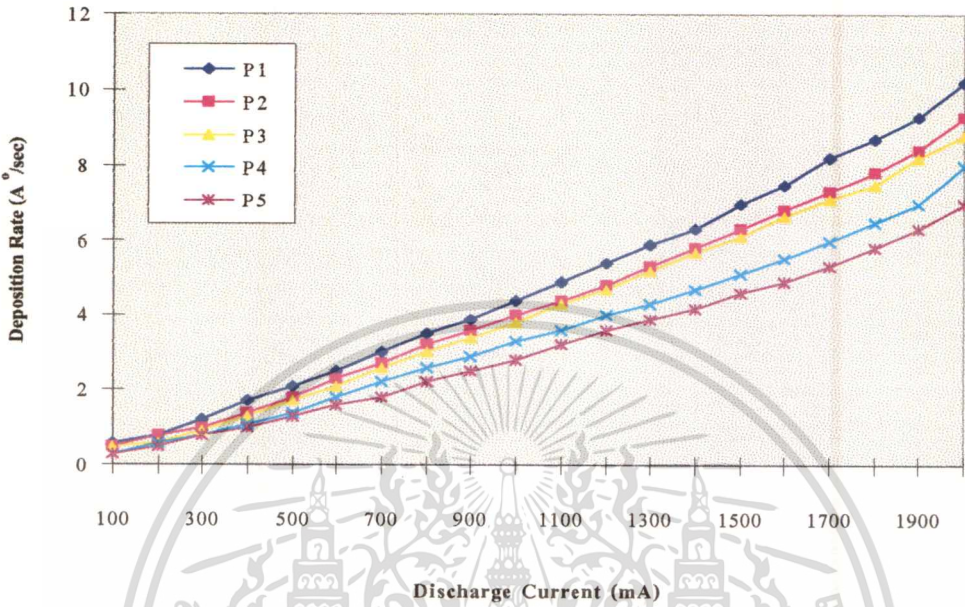
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราการเคลือบของเป่าลูมิเนียม โดย

$P1 = 1.3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 2.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 3 \times 10^{-3}$  mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

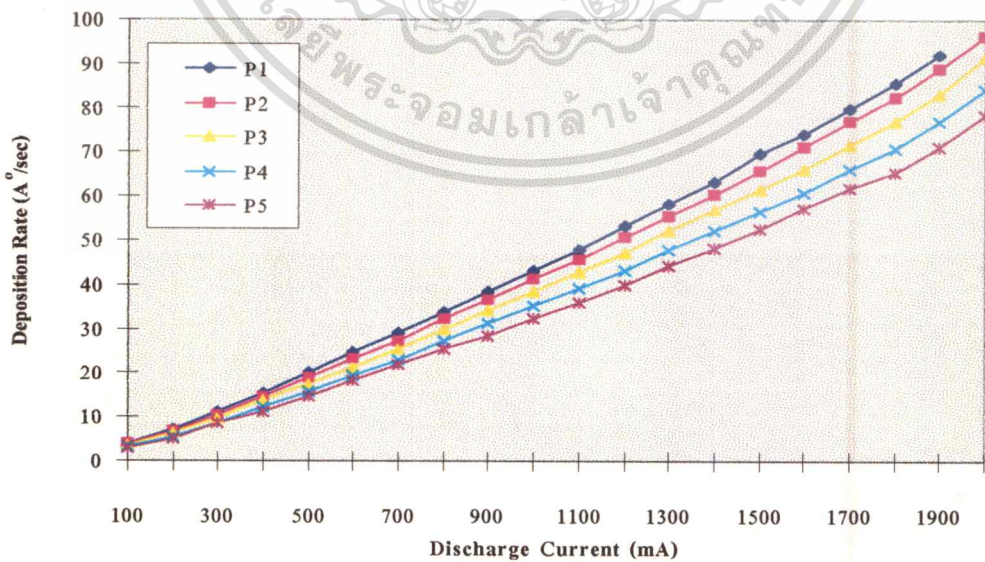
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 79



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตัวชาร์จกับอัตราการเคลือบของเป้าไททานเนียมโดย  
 $P1 = 1 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 4 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 80



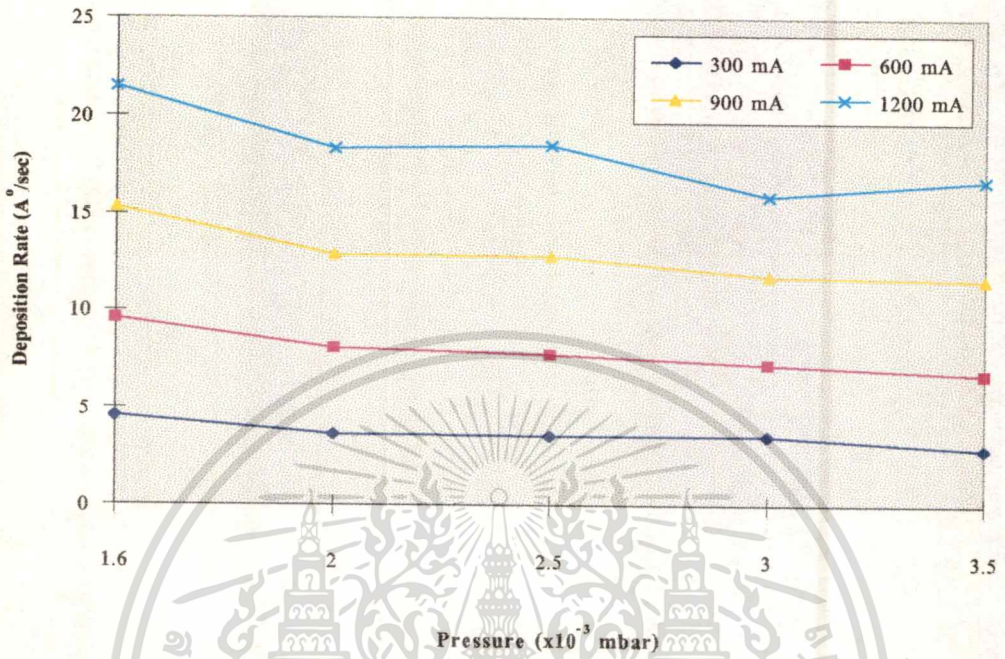
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตัวชาร์จกับอัตราการเคลือบของเป้าทองแดงโดย

$P1 = 1.3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 4.3 \times 10^{-3}$  mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

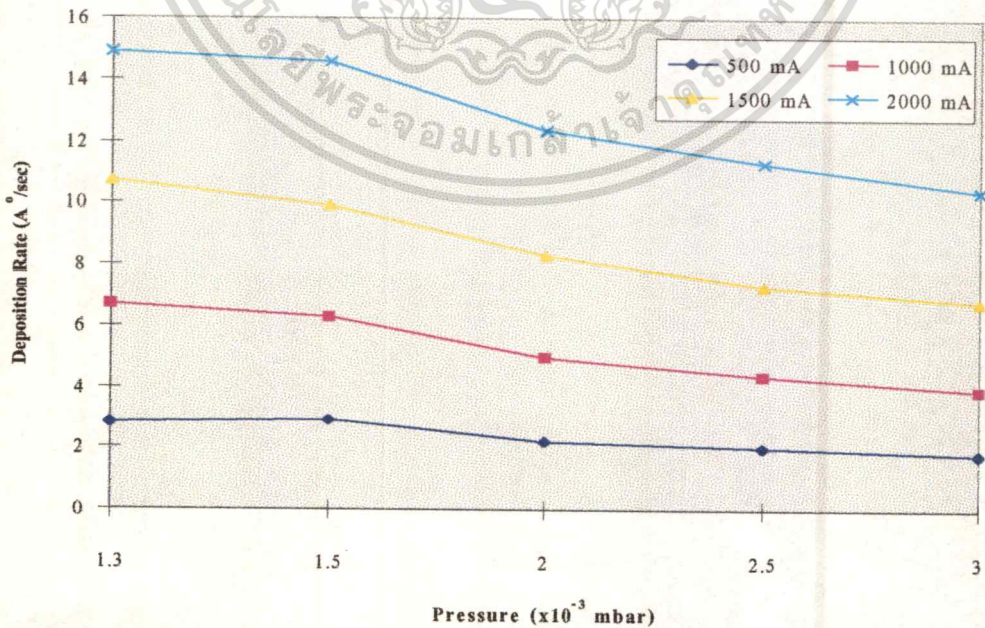
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 81



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเคลือบของเป้าสแตนเลสที่กระแสค่าต่างๆ

ภาพที่ 82

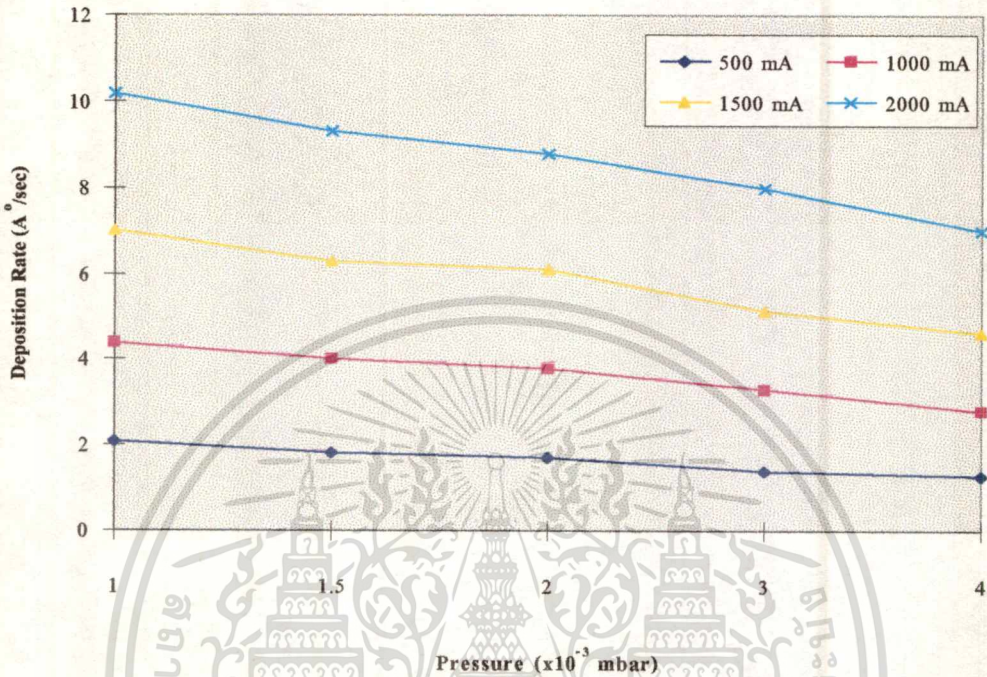


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเคลือบของเป้าลุมิเนียมที่กระแสค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

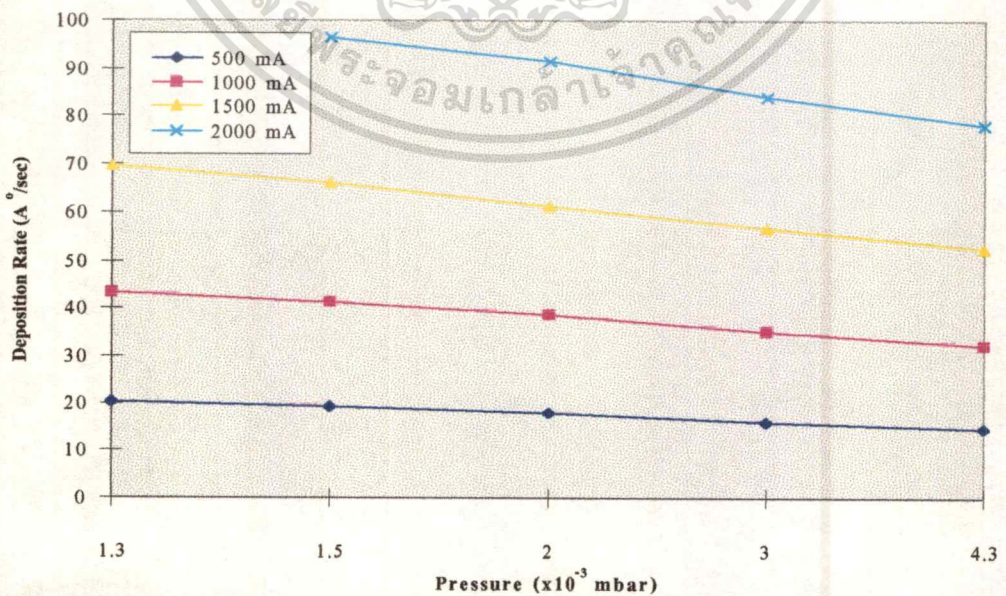
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 83



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเคลือบของเป้าไททานเนียมที่กระแสค่าต่างๆ

ภาพที่ 84

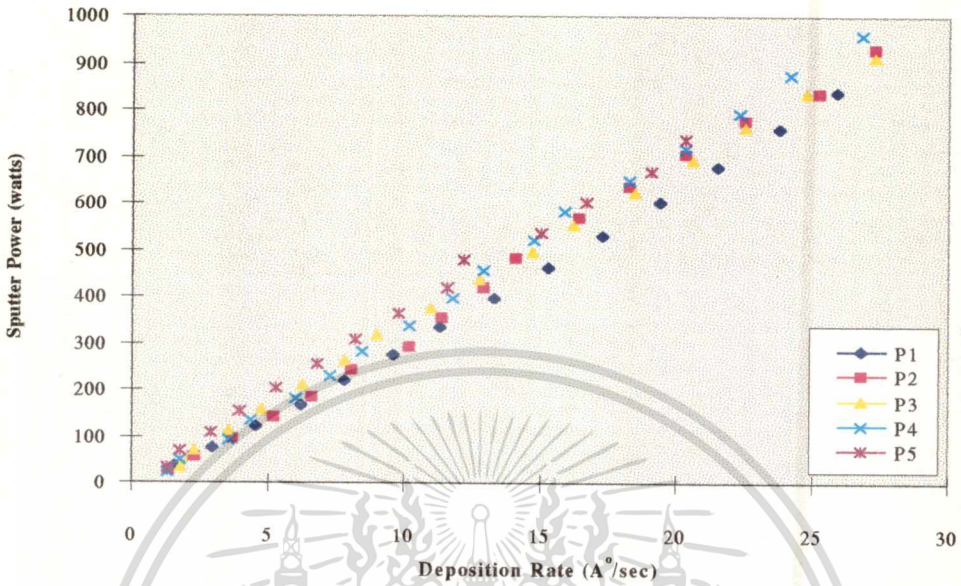


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเคลือบของเป้าทองแดงที่กระแสค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

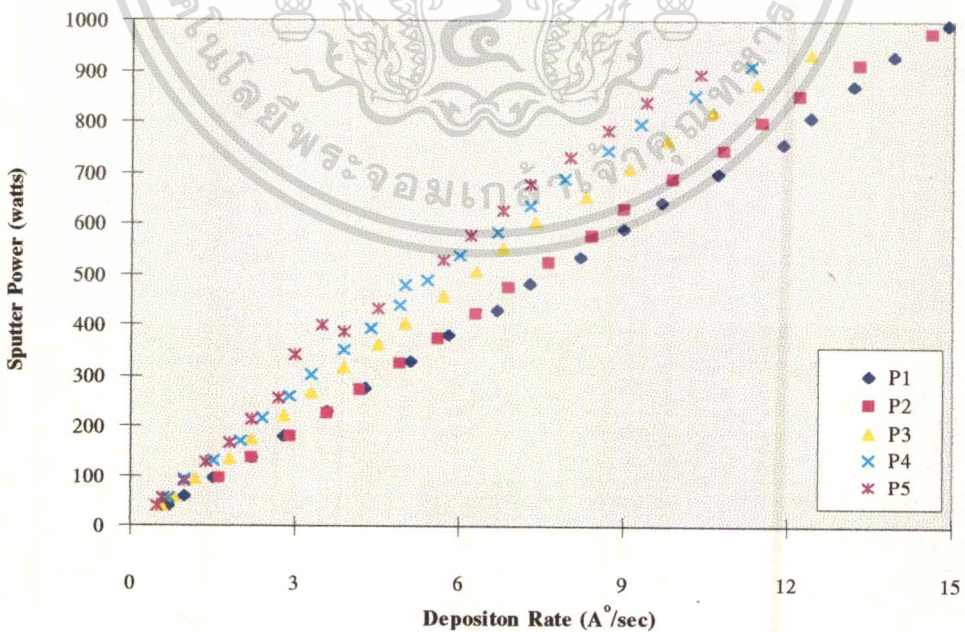
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 85



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าสแตนเลสโดย  
 $P1 = 1.6 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 3.5 \times 10^{-3}$  mbar

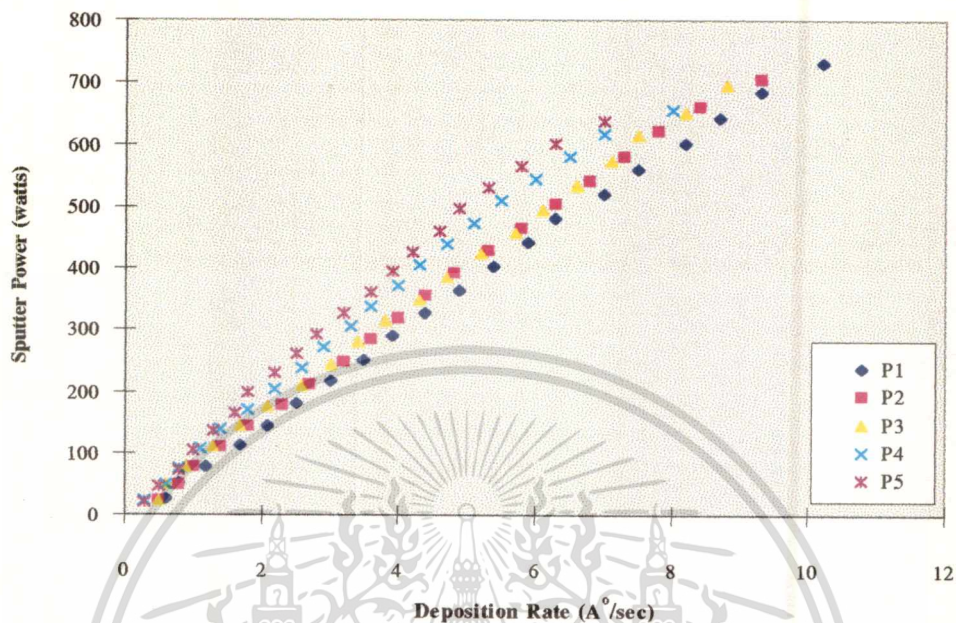
ภาพที่ 86



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าอลูมิเนียมโดย  
 $P1 = 1.3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 2.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 3 \times 10^{-3}$  mbar

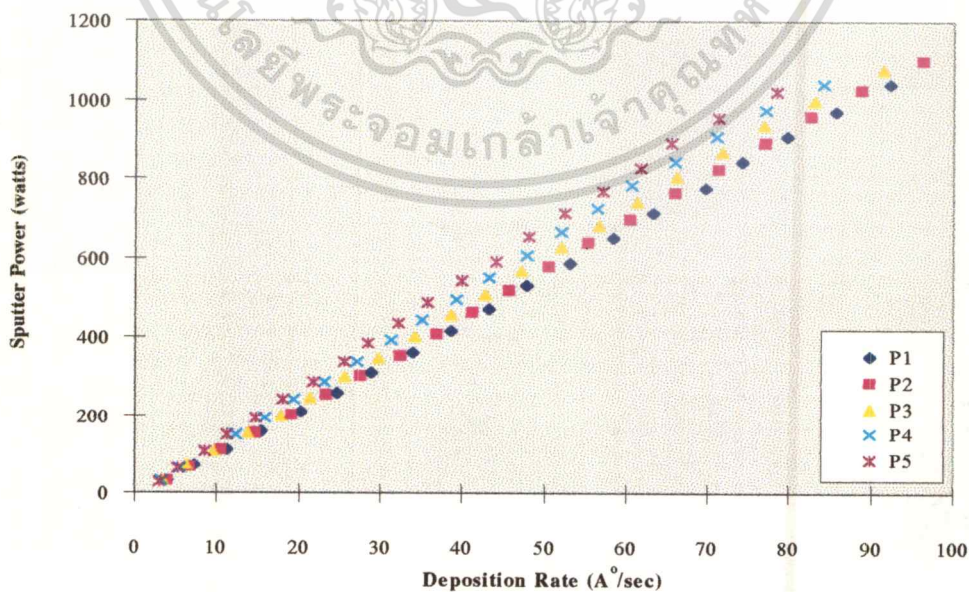
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 87



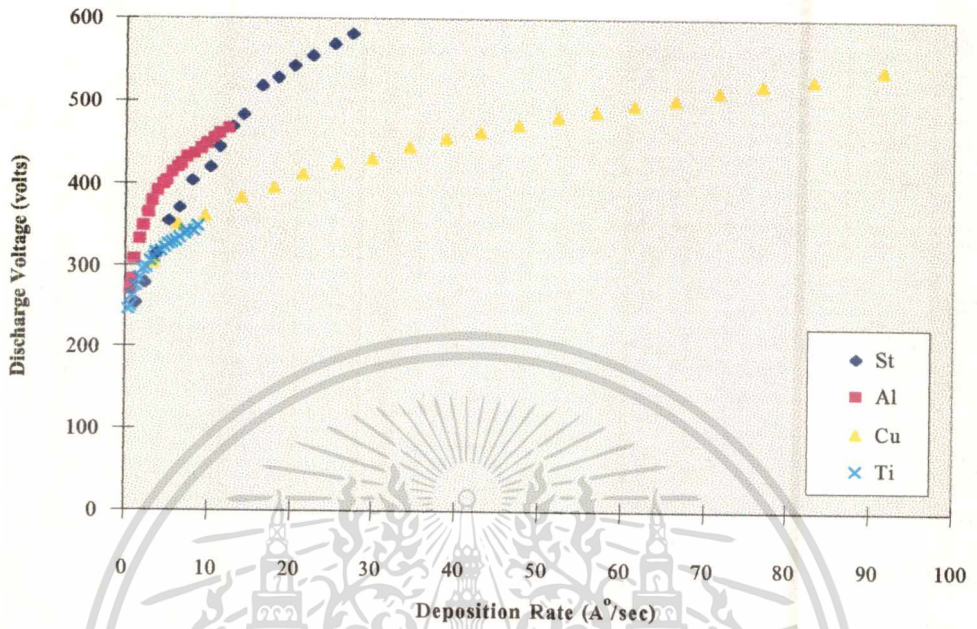
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าไททาเนียมโดย  
 $P1 = 1 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 4 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 88



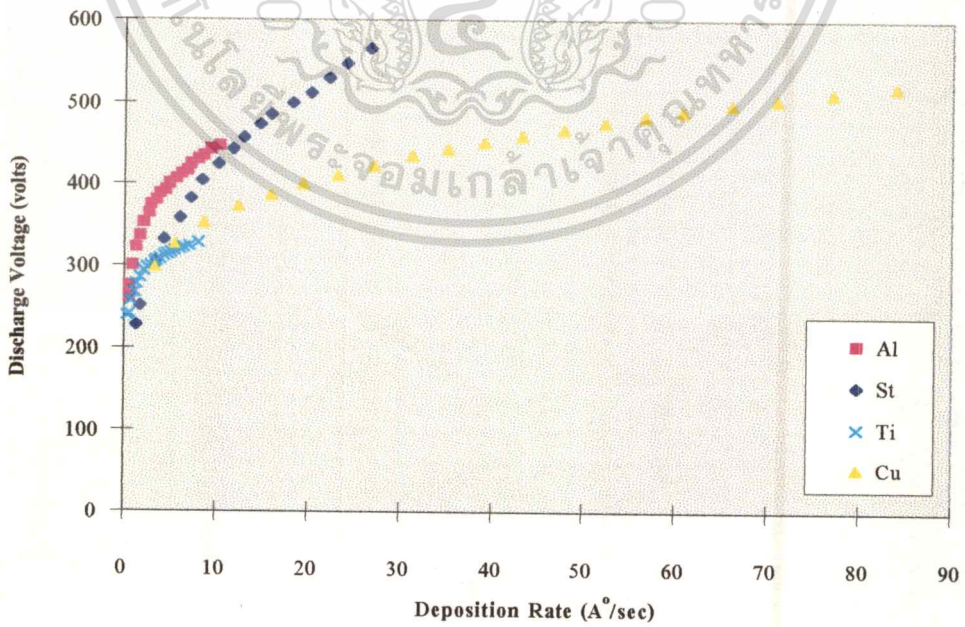
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้าทองแดงโดย  
 $P1 = 1.3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P2 = 1.5 \times 10^{-3}$  mbar,  $P3 = 2 \times 10^{-3}$  mbar,  $P4 = 3 \times 10^{-3}$  mbar,  $P5 = 4.3 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 89



ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับแรงดันคิสซาร์จของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 90

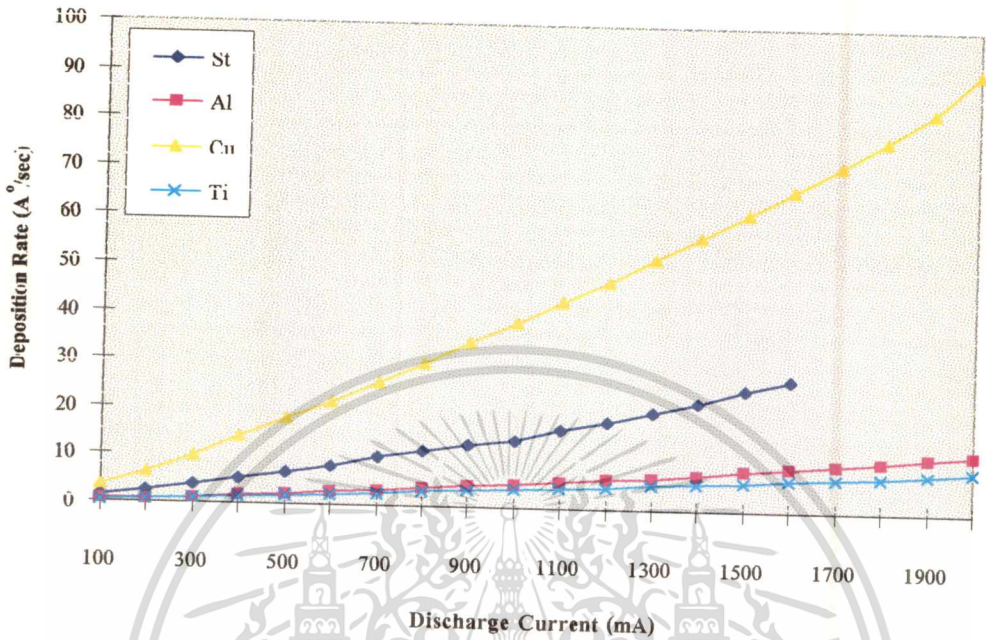


ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับแรงดันคิสซาร์จของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

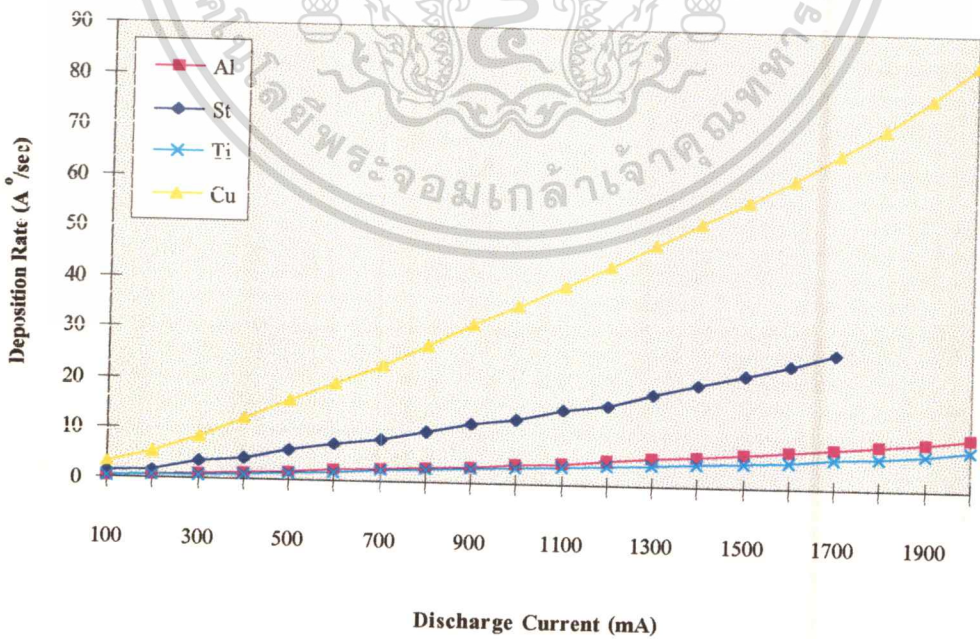
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 91



ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับอัตราการเคลือบของเป่าสารเคลือบ 4 ชนิดที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar

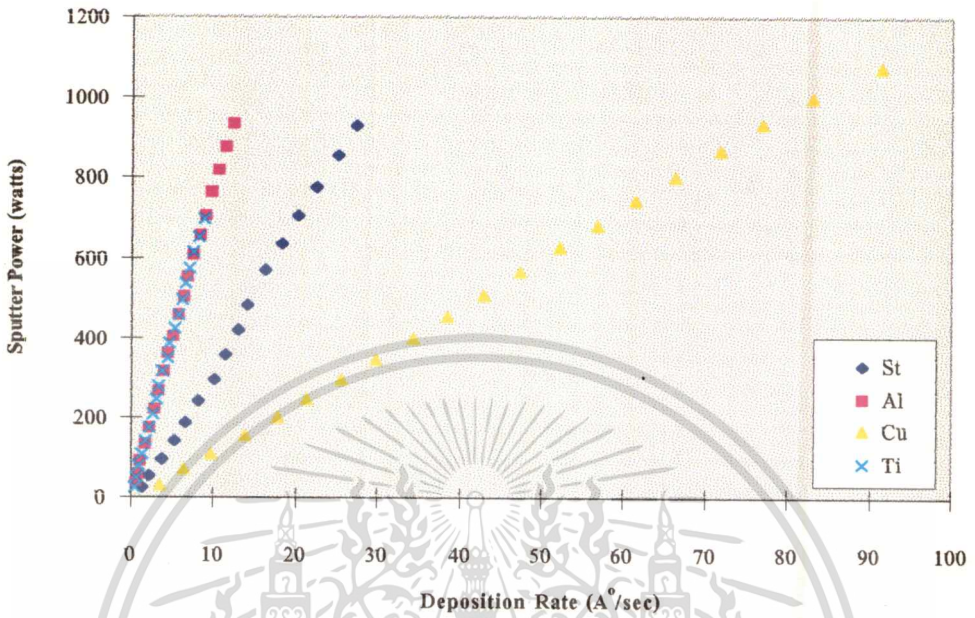
ภาพที่ 92



ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับอัตราการเคลือบของเป่าสารเคลือบ 4 ชนิดที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar

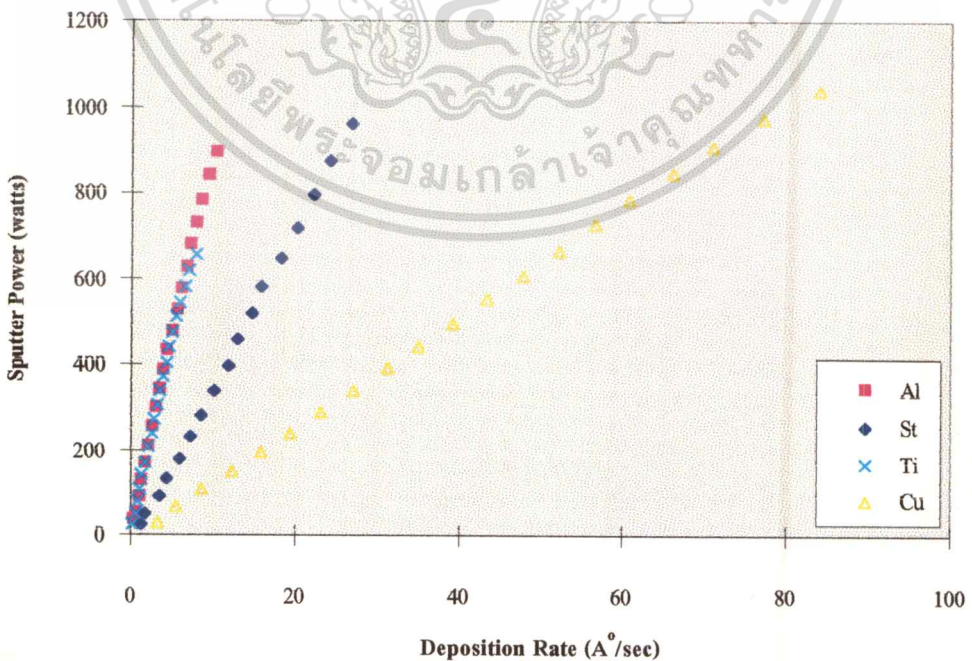
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 93



ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน  $2.0 \times 10^{-3}$  mbar

ภาพที่ 94



ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าของเป้า 4 ชนิดที่ความดัน  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

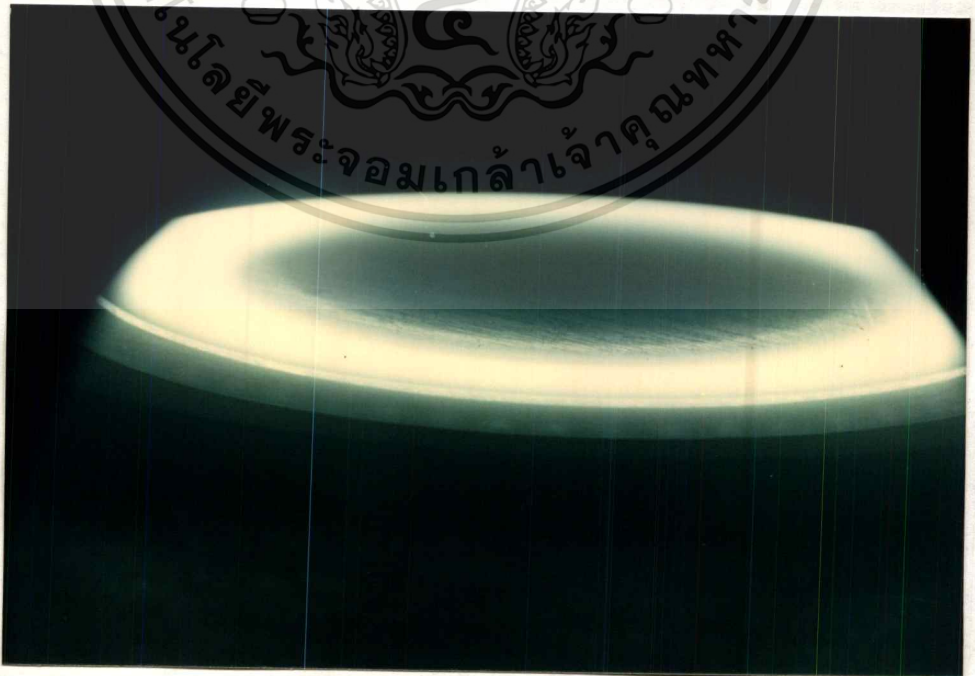
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 95



ภาพการเกิด โกลว์ดิซซาร์จของเป่าสมแตนเลส

ภาพที่ 96



ภาพการเกิด โกลว์ดิซซาร์จของเป่าอลูมิเนียม

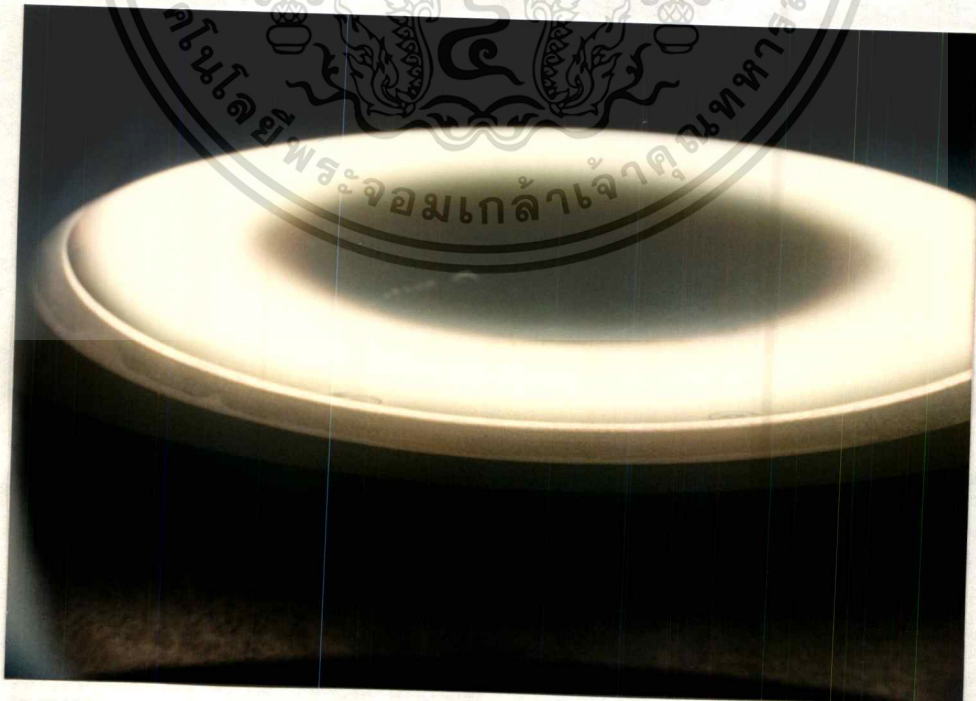
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 97



ภาพการเกิดโกลว์ดิซาร์จของเป่าไททาเนียม

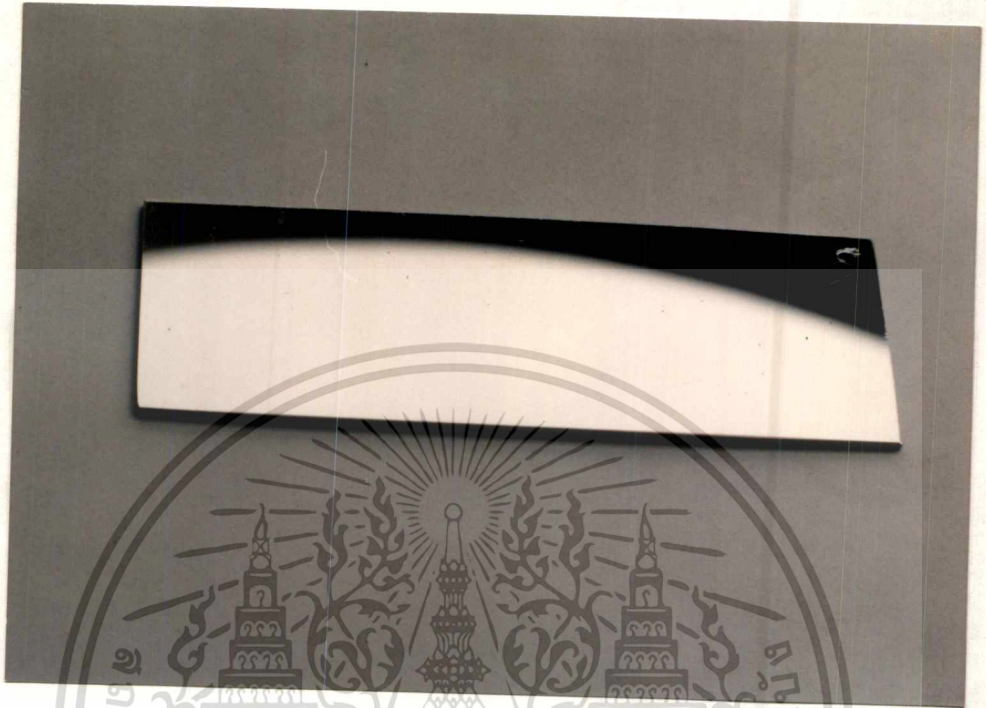
ภาพที่ 98



ภาพการเกิดโกลว์ดิซาร์จของเป่าทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 99



ภาพชิ้นงานกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยโลหะสแตนเลส

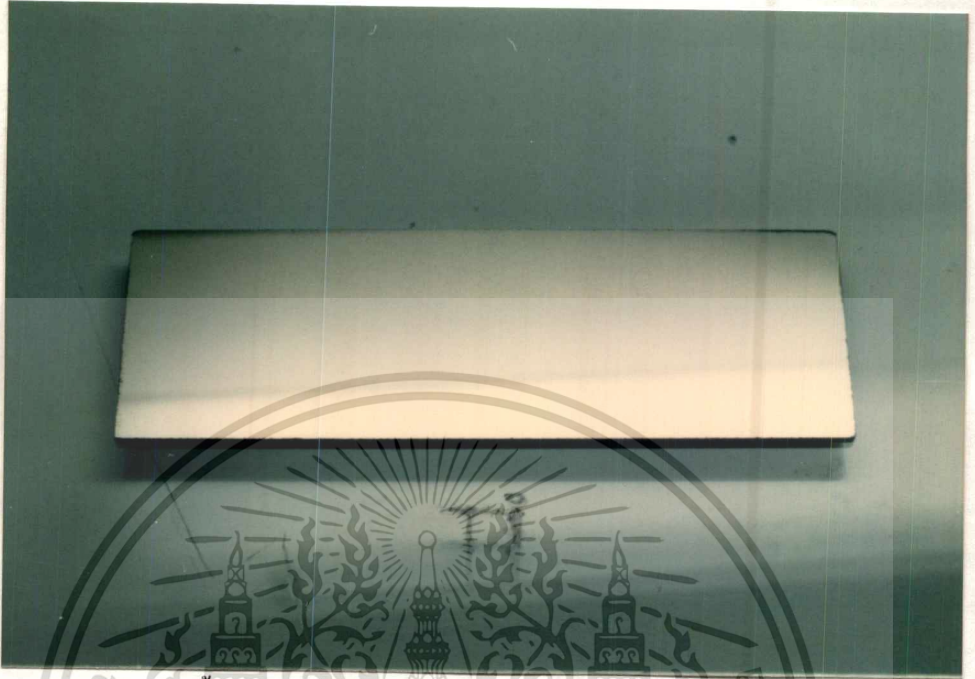
ภาพที่ 100



ภาพชิ้นงานกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยโลหะอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 101



ภาพชิ้นงานกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยโลหะไททานเนียม

ภาพที่ 102



ภาพชิ้นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยโลหะทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาพที่ 103



อนุภาค สปีดเตอริงขณะตกลงเคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์

วิเคราะห์ผลการทดลองการทดสอบเคลือบฟิล์มบางโลหะ

เมื่อทำการปั๊มระบบสุญญากาศจนได้ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-6}$  mbar แล้วจึงทำการป้อนก๊าซอาร์กอนเพื่อทำการสปีดเตอริงด้วยค่ากระแสต่างๆ โดยใช้เป้าโลหะ 4 ชนิด คือ สแตนเลส , อลูมิเนียม , ไททานเนียม และทองแดง เพื่อทดสอบความสะอาดของระบบและความบริสุทธิ์ของฟิล์มเคลือบที่ได้ ผลการเคลือบเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากฟิล์มเคลือบมีสีที่แวววาว สภาพมองเห็นของฟิล์มเคลือบจากโลหะเหล่านี้ไม่ปรากฏให้เห็นด้วยสายตา ดังแสดงในภาพที่ 99 ถึง 102

อัตราการสปีดเตอริงจะถูกกำหนดด้วยค่าความหนาแน่นกระแสไอออนที่เป้าเป็นหลักและยังขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนด้วย ซึ่งแปรผันกับแรงดันดิสชาร์จ ดังนั้นจึงแปรผันโดยตรงกับกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบ ตามสมการที่ (42) ในทางปฏิบัติสำหรับระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริงพบว่า อัตราการเคลือบจะแปรผันโดยตรงกับกำลังไฟฟ้าที่เป้าสารเคลือบ ดังแสดงในภาพที่ 93 และ 94 โดยจะขึ้นกับแฟคเตอร์ต่างๆ คือ ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในบริเวณที่เกิดการชน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(W/cm<sup>2</sup>) , ขนาดของพื้นที่ของการสปีดเตอริง , ระยะห่างระหว่างคาโทดกับขั้วงาน , วัสดุที่ใช้ทำเป่า , ค่าฮิลด์และการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป่าสารเคลือบ , ค่าความดันก๊าซรวม , ความดันย่อยของก๊าซไวปฏิกิริยาภายในบริเวณเป่าสารเคลือบและการนำความร้อนของเป่าสารเคลือบ พารามิเตอร์เหล่านี้จะมีค่าโดยประมาณและมีผลต่ออัตราการเคลือบตามลำดับความสำคัญ แต่จะมีความสัมพันธ์ต่อกัน ดังเช่น ความดัน , ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และขนาดของพื้นที่ที่เกิดการสปีดเตอริง ส่วนโครงสร้างทาง Thermal และทางเชิงกลของเป่าสารเคลือบอาจจะเป็นแพดเตอร์ที่จำกัดอัตราการเคลือบสูงสุดที่จะได้

ประสิทธิภาพของอัตราการเคลือบ ( $R_E$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการเคลือบและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ (W/cm<sup>2</sup>) ซึ่งก็คือค่าความชันของกราฟอัตราการเคลือบและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้านั่นเอง

$$R_E = \frac{R(A^\circ / \text{min})}{P(W / \text{cm}^2)} \quad (43)$$

ประสิทธิภาพของการเคลือบนี้ช่วยในการกำหนดสภาพที่ดีที่สุดของขบวนการเคลือบของระบบหนึ่งๆ ดังนั้นในระบบพลาสมา แมกนีตรอน สปีดเตอริงนี้ จะสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของเป่าทั้ง 4 ชนิด ที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar และที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar ได้ดังนี้คือ

จากภาพที่ 93 สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพอัตราการเคลือบ ( $R_E$ ) ของเป่าทองแดง ที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar จะได้ค่า  $R_E = \frac{47.3 - 9.7}{565.2 - 108} \times 60 \times 6.5^2 \times \pi = 654.95 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min}$

, สำหรับเป่าอลูมิเนียมที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar จะได้ค่า  $R_E = \frac{9.8 - 2.2}{763.3 - 174} \times 60 \times 6.5^2 \times \pi =$

$02.7 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min}$  , สำหรับเป่าไททาเนียมที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$  mbar จะได้ค่า  $R_E = \frac{6.1 - 2.1}{495 - 176.4} \times 60 \times 6.5^2 \times \pi = 99.97 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min}$  , สำหรับเป่าสแตนเลสที่ความดัน  $2 \times 10^{-3}$

mbar จะได้ค่า  $R_E = \frac{22.5 - 5.2}{775.6 - 14.2} \times 60 \times 6.5^2 \times \pi = 217.5 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min}$

จากภาพที่ 94 สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพอัตราการเคลือบ ( $R_E$ ) ของเป่าทองแดง ที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar ได้เป็น  $R_E = \frac{43.3 - 8.6}{552 - 105.9} \times 60 \times 6.5^2 \times \pi = 619.477 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min}$  ,

สำหรับเป่าอลูมิเนียมที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar ได้ค่า  $R_E = \frac{8 - 1.8}{731 - 168.5} \times 60 \times 6.5^2 \times \pi =$

$87.78 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min}$  , สำหรับเป่าไททาเนียมที่ความดัน  $3 \times 10^{-3}$  mbar จะได้ค่า  $R_E =$

$$\frac{5.1-1.8}{474-171} \times 60 \times 6.5^2 \times \pi = 86.7 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min} , \text{ สำหรับเป้าสแตนเลสที่ความดัน } 3 \times 10^{-3}$$

$$\text{mbar จะได้ค่า } R_E = \frac{20.3-4.4}{716.8-133.2} \times 60 \times 6.5^2 \times \pi = 216.97 \text{ A}^\circ\text{-cm}^2/\text{W-min}$$

### ตารางที่ 9

แสดงผลการทดลองหาอัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบของเป้าสารเคลือบ  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตรชนิดต่างๆ

Cathode material	Reported rate at 1 amp (A°/min)	Calculation efficiency (A° cm <sup>2</sup> /Wmin)	power density at 1 amp (W/cm <sup>2</sup> )	Source-substrate distance (cm)	Argon pressure (mbar)
Cu	38.6	654.95	3.42	10.9	2 x 10 <sup>-3</sup>
Al	5	102.7	3.04	10.9	2 x 10 <sup>-3</sup>
Ti	3.8	99.97	2.37	10.9	2 x 10 <sup>-3</sup>
Stainless	14.1	217.5	3.64	10.9	2 x 10 <sup>-3</sup>
Cu	35.1	619.477	3.33	10.9	3 x 10 <sup>-3</sup>
Al	3.9	87.78	2.92	10.9	3 x 10 <sup>-3</sup>
Ti	3.3	86.7	2.30	10.9	3 x 10 <sup>-3</sup>
Stainless	12.9	216.97	3.44	10.9	3 x 10 <sup>-3</sup>

จากข้อมูลในตารางที่ 9 พบว่าเป้าสารเคลือบโลหะทั้ง 4 ชนิด จะให้ค่าประสิทธิภาพอัตราการเคลือบที่ความดัน 3.0 x 10<sup>-3</sup> mbar ต่ำกว่าที่ความดัน 2.0 x 10<sup>-3</sup> mbar โดยเป้าทองแดงจะมีเปอร์เซ็นต์ของค่าประสิทธิภาพอัตราการเคลือบที่ความดัน 3.0 x 10<sup>-3</sup> mbar ต่ำกว่าที่ความดัน 2.0 x 10<sup>-3</sup> mbar อยู่ 5.42 % , เป้าอลูมิเนียมจะมีเปอร์เซ็นต์ของค่าประสิทธิภาพอัตราการเคลือบที่ความดัน 3.0 x 10<sup>-3</sup> mbar ต่ำกว่าที่ความดัน 2.0 x 10<sup>-3</sup> mbar อยู่ 14.53 % , เป้าไททาเนียมจะมีเปอร์เซ็นต์ของค่าประสิทธิภาพอัตราการเคลือบที่ความดัน 3.0 x 10<sup>-3</sup> mbar ต่ำกว่าที่ความดัน 2.0 x 10<sup>-3</sup> mbar อยู่ 13.27 % , เป้าสแตนเลสจะมีเปอร์เซ็นต์ของค่าประสิทธิภาพอัตราการเคลือบที่ความดัน 3.0 x 10<sup>-3</sup> mbar ต่ำกว่าที่ความดัน 2.0 x 10<sup>-3</sup> mbar อยู่ 0.24 % ดังนั้นจากเปอร์เซ็นต์ที่ได้เหล่านี้จะชี้ให้เห็นว่าผลของความดันที่ลดลงจาก 3.0 x 10<sup>-3</sup> mbar ไปเป็น 2.0 x 10<sup>-3</sup> mbar จะมีผลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการใช้ของเป้าสารเคลือบโลหะทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเป้าสารเคลือบอลูมิเนียมจะมีเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นสูงสุด รองลงมาด้วยเป้าสารเคลือบไททาเนียม ทองแดง และสแตนเลส ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าที่ความดัน  $2.0 \times 10^{-3}$  mbar จะมีประสิทธิภาพในการเคลือบสูงกว่าที่ความดัน  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ซึ่งก็คือจะเป็นค่าความดันที่เหมาะสมของขบวนการเคลือบซึ่งมีค่าที่สูงกว่าที่ความดัน  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ตามคำนิยามของค่า  $R_E$  ที่กล่าวมาแล้วนั่นเอง

จากรูปที่ 81 ถึง 84 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในของระบบสปีดเตอริงกับค่าอัตราการใช้ จะพบว่าทั้ง 4 รูปมีแนวโน้มข้อมูลในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้นแล้ว ค่าอัตราการใช้จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งหมายความว่าความดันจะแปรผกผันกับอัตราการใช้ สิ่งที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ว่า เมื่อความดันมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากช่วงหนึ่งที่เราเรียกว่า ช่วงความดันที่ถูกเลือก (Choosing the pressure range) ซึ่งเป็นช่วงที่พอเหมาะสมควรจะทำการเคลือบ โดยจะได้อัตราการใช้ที่สูงที่สุด โดยถ้าความดันมีค่าต่ำกว่าจุดนี้ลงไปการเกิดขบวนการไอออไนเซชันเพื่อผลิตไอออนบวกของก๊าซ ก็จะน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสแคโทดาร์ลดลง เป็นผลให้อัตราการใช้สปีดเตอริงลดลง แต่ถ้าความดันมีค่าสูงกว่าจุดนี้ขึ้นไป จะเป็นผลทำให้โมเลกุลหรืออะตอมของเป้าสารเคลือบที่หลุดออกมาจากการสปีดเตอริงอาจจะเกิดการชนกันกับอะตอมของก๊าซภายในแชมเบอร์ ทำให้เกิดการกระเด็นสะท้อนเปลี่ยนทิศทางแทนที่จะตกลงเคลือบบนแผ่นชิ้นงาน บางทีก็กลับสะท้อนกลับ (Backscattered) ไปเคลือบบนเป้าสารเคลือบแทน โดยปกติแล้วจะพบการสะท้อนกลับ ไปเคลือบบนเป้าสารเคลือบสูงก็เมื่อความดันอยู่ในช่วง  $10^{-2}$  mbar

อัตราการใช้ของเป้าถูกกำหนดโดย จำนวนของไอออน พลังงานอนุภาคที่เป็นกลาง และค่าสปีดเตอริง โดยที่กระแสที่เกิดที่เป้าจะหมายถึงกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนลำดับที่สอง และจำนวนอนุภาคที่เข้าชนเป้าสารเคลือบได้แก่อนุภาคที่เป็นกลางและไอออนบวก ในการใช้ระบบสปีดเตอริงแบบไดโอดนั้นจะต้องใช้แรงดันสูงเป็น kV ทำให้เกิดอันตรายและเกิดการผลิตรังสี X-rays ดังนั้นการที่เราทำกราฟความสัมพันธ์ I -V ของระบบพลาสมา แมกนีตรอน ขึ้นมาจุดประสงค์หนึ่งก็เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าความดันที่ใช้ ที่จะทำให้ลดค่าแรงดันในการสปีดเตอริงลง โดยจากภาพที่ 65 , 67 , 69 และ 71 เมื่อเปลี่ยนค่าความดันก๊าซอาร์กอน จะทำให้กราฟ I-V curve เปลี่ยนแปลงตำแหน่งไป ทำให้สามารถนำแนวโน้มเหล่านี้ไปทำการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขึ้นมาใหม่ให้ได้ขนาดกระแสและแรงดันตามต้องการได้ ที่ช่วงความดันที่เลือกไว้ใช้งาน โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาท์พุทยังคงเท่าเดิมถึงแม้ว่าจะทำการลดแรงดันแคโทดาร์ลงให้ได้ตามต้องการ เพียงแต่จะไปเพิ่มในส

จากภาพที่ 65 , 67 , 69 และ 71 ความสัมพันธ์ V-I curve ที่ได้ไม่ได้หมายถึงว่า I จะเป็นจำนวนของอนุภาคสปีดเตอริงทั้งหมด ซึ่งบางทีอาจจะเป็นอิเล็กตรอน ไอออน หรืออนุภาคที่เป็นกลาง และยังไม่ได้หมายความว่าอนุภาคสปีดเตอริงจะมีพลังงานเป็น V อิเล็กตรอนโวลต์ เนื่องจากอนุภาคสปีดเตอริงส่วนหนึ่งจะมีช่วงพลังงานที่กว้างกว่าค่าสูงสุดของแรงดัน V ในกราฟมาก เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้ขณะกำลังตกลงมาจะชนกับอะตอมก๊าซอาร์กอนหรืออิเล็กตรอน ซึ่งปกติอะตอมก๊าซเหล่านี้จะเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ อยู่ในในแฮมเบอร์เนื่องจากเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้อนุภาคสปีดเตอริงมีพลังงานสูงขึ้นและมีหลายช่วงพลังงานที่กว้างมาก

จากภาพที่ 85 ถึง 88 จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลื่อนที่กับกำลังไฟฟ้าที่เป่าคาโทด จากแนวเส้นกราฟที่ค่าความดันต่างๆ จะทำให้เราสามารถเลือกค่าความดันที่จะให้ขนาดกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะไม่ทำความร้อนมากเกินไปที่เป่าคาโทดได้ โดยยังให้ค่าอัตราการเคลื่อนที่ได้ตามที่ต้องการ ทำให้การเคลื่อนที่ขึ้นงานได้ความหนาตามที่ต้องการขณะเปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่ทำการเคลื่อนที่ที่กำหนด

จากภาพที่ 89 และ 90 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลื่อนที่กับแรงดันดิสชาร์จของเป้า 4 ชนิด ซึ่งจากแนวเส้นกราฟในภาพที่ 89 และ 90 ที่การปรับกระแสจาก 100, 200, ..., 2000 mA พบว่าเป้าไททาเนียมจะมีช่วงการใช้แรงดันดิสชาร์จในการสปีดเตอริงที่แคบที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 307.95 โวลต์ และ 296.9 โวลต์ ที่ความดัน  $2.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ตามลำดับ รองลงมาคือเป้าอลูมิเนียม โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 393.7 โวลต์ และ 378.15 โวลต์ ที่ความดัน  $2.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ตามลำดับ , รองลงมาคือเป้าสแตนเลส โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 442.56 โวลต์ และ 423.53 โวลต์ ที่ความดัน  $2.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar ตามลำดับ และเป้าทองแดงซึ่งมีช่วงการใช้แรงดันดิสชาร์จในการสปีดเตอริงกว้างที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 447.45 โวลต์ และ 435.25 โวลต์ ที่ความดัน  $2.0 \times 10^{-3}$  mbar และ  $3.0 \times 10^{-3}$  mbar

เมื่อทำการวิเคราะห์จากภาพที่ 89 และ 90 จะพบว่าเป้าทองแดง (Cu) จะต้องใช้แรงดันดิสชาร์จที่มีค่าสูงกว่าเป้าไททาเนียมและอลูมิเนียม ดังนั้นไอออนที่ผลิตได้จากขบวนการไอออไนซ์จึงมีพลังงานสูง (volt) เมื่อเข้าชนเป้าจึงเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาได้จำนวนมาก ดังผลที่ได้ออกมาเป็นอัตราการเคลื่อนที่ แต่อะตอมที่หลุดออกมาแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง และจากคำนิยามที่ให้ไว้ก่อนแล้วว่า ค่าyieldของการสปีดเตอริง (Sputtering Yields) คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลื่อนที่ต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค มีหน่วยเป็น Atom/Ion ดังนั้นจากกราฟภาพที่ 89 และ 90 จะพบได้เลยว่าเป้าทองแดงจะให้การหลุดออกของอะตอมสปีดเตอริงสูงสุดต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค รองลงมาคือเป้าอลูมิเนียม และเป้าไททาเนียม ตามลำดับ ส่วนเป้าสแตนเลสจะไม่นำมาพิจารณาเพราะเป็นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผสมไม่มีค่าขีดที่แน่นอน ดังนั้นจากผลการทดลองนี้แสดงว่าค่าขีดของเป่าทองแดงจะมีค่าสูงสุด รองมาด้วยเป่าอลูมิเนียมและไททาเนียม ตามลำดับ ซึ่งจะตรงกับผลการทดลองของ Laegried และ Wehner ดังในตารางที่ 2 ที่กล่าวมาแล้ว

จากภาพที่ 77 ถึง 80 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสชาจรกับอัตราการเคลื่อนของเป่าที่ความดันค่าต่างๆ จากแนวเส้นกราฟจะพบว่าที่ความดันค่าต่ำกว่า จะได้ค่าอัตราการเคลื่อนที่มีค่าสูงกว่า เมื่อใช้กระแสที่ค่าเดียวกัน สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ว่าอนุภาคสปัดเตอร์ที่หลุดออกมาจากเป่าสารเคลือบนั้น ส่วนหนึ่งจะชนกับอะตอมของก๊าซอาร์กอนที่ลอยอยู่ในแชมเบอร์ทำให้เกิดการสะท้อน (Scattering) ดังนั้นเมื่อความดันก๊าซอาร์กอนภายในแชมเบอร์มีค่าสูงขึ้น โอกาสที่อนุภาคสปัดเตอร์จะตกลงมาชนกับอะตอมก๊าซอาร์กอนก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ทำให้อัตราการเคลื่อนลดลง ดังนั้นสิ่งที่ได้เหล่านี้ทำให้เราสามารถกำหนดระยะห่างระหว่างคาโทดกับแผ่นรองชิ้นงานได้ เพื่อที่จะลดการสูญเสียอนุภาคสารเคลือบลง จำเป็นต้องลดระยะห่างดังกล่าวให้น้อยลงตามไปด้วย แต่ผลที่ได้ตามมาก็คือความร้อนที่จะปรากฏสูงขึ้นที่แผ่นรองชิ้นงานและชิ้นงานเนื่องจากอนุภาคสปัดเตอร์ยังคงมีพลังงานสูงอยู่เมื่อตกลงมาสู่แผ่นรองชิ้นงานหรือชิ้นงานนั่นเอง

จากภาพที่ 93 และ 94 พบว่าเป่าทองแดงมีกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่เป่าคาโทดสูงสุดรองมาคือเป่าสแตนเลส , เป่าอลูมิเนียม และเป่าไททาเนียม ตามลำดับ ดังนั้นการระบายความร้อนด้วยน้ำที่คาโทดก็จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเป่าแต่ละชนิดที่แตกต่างกันด้วย ดังปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการจำกัดค่าอัตราการเคลื่อน คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เป่าสารเคลือบทนได้โดยไม่เกิดการแตกหรือระเหยออก ซึ่งสัมพันธ์กับสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป่าสารเคลือบ และอัตราการระบายความร้อนของเป่าสารเคลือบ นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การขยายตัวและความหนาของเป่าสารเคลือบ ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราความร้อนที่เป่าสารเคลือบยอมรับได้ก่อนการแตกเนื่องจากความร้อนก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ

ของพื้นที่เป่าทั้งหมด และเมื่อใช้งานเป่าสารเคลือบไปนานๆ จะทำให้เกิดการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็นที่คาโทดเข้าสู่ระบบสุญญากาศ เนื่องจากเกิดร่องลึกของการหลุดออกของอะตอมที่เป่าสารเคลือบทำให้เป่าบริเวณนั้นมีความบางมาก และเมื่อน้ำเหล่านี้เข้าสู่ระบบจะทำให้ความดันภายในระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดการอาร์คทางไฟฟ้าอย่างรุนแรงที่บริเวณเป่า และสุดท้ายก็อาจจะต้องสูญเสียน้ำมันปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกับเป่าสารเคลือบในที่สุด ดังนั้นการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการเคลือบให้สูงขึ้น จึงจำเป็นต้องหาขนาดและรูปร่างแม่เหล็กถาวรที่มีขนาดครอบคลุมเป่าสารเคลือบให้เกิดขบวนการ โกลว์ดีสซาร์จให้ได้พื้นที่มากที่สุด

สำหรับทิศทางการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้อย่างมาก เนื่องจากสภาวะการเกิด โกลว์ดีสซาร์จที่จำเป็นต้องมีความสม่ำเสมอ และการกระจายอะตอมอาร์กอนในแชมเบอร์จะทำให้การตกลงมาของอนุภาคสปิตเตอร์ลงมาเคลือบชิ้นงานมีความสม่ำเสมอด้วย

สำหรับระบบนี้ยังคงต้องมีการปรับปรุงเพิ่มเติมในบางส่วน อย่างเช่น การเพิ่มแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแรงดันต่ำประมาณ 310 โวลต์ โดยมีขั้วลบต่ออยู่กับแผ่นรองชิ้นงาน ส่วนขั้วบวกต่อเข้ากับกรวดตัวถังแชมเบอร์ ก็เพื่อทำหน้าที่ไบแอสแรงดันในการเร่งอนุภาคสปิตเตอร์ที่หล่นลงมาให้มีพลังงานสูงพอที่จะเข้าชนชิ้นงานทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดีขึ้นและยังทำให้การสูญเสียอนุภาคสปิตเตอร์ไปสู่ผนังแชมเบอร์น้อยลงด้วย เนื่องจากว่าอนุภาคสปิตเตอร์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสภาวะ โกลว์ดีสซาร์จ โมเลกุลส่วนใหญ่จะถูก Excite และจะมีอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งหลุดออกไป ดังนั้นเมื่อตกลงมาจึงมีสถานะเป็นประจุบวกอยู่ จึงถูกเร่งจากขั้วลบของแรงดันไบแอสเข้าชนแผ่นรองชิ้นงาน ในการใช้แม่เหล็กถาวรที่ทำมาจากเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เป็นสนิมแต่จะให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำ ดังนั้นเพื่อให้อัตราการสปิตเตอร์สูงขึ้นจึงจำเป็นต้องหาแม่เหล็กชนิดอื่นที่ให้ค่าความเข้มที่สูงกว่ามาทดแทน โดยอาจจะใช้แม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ถาวร แต่จะทำได้สนิมขึ้นได้ , การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานซึ่งก็ถือว่ามีความจำเป็นสูง เนื่องจากว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเคลื่อนตัวของอะตอมสารเคลือบภายหลังการตกลงเคลือบบนชิ้นงานแล้ว ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึกในขณะที่ยังคงสามารถเคลื่อนที่ได้คล้ายของเหลวทำให้เกิดการเสถียรของการยึดเกาะ โมเลกุลสูงขึ้น แต่เมื่อเย็นตัวลงแล้วก็จะไม่สามารถจัดโครงสร้างผลึกได้อีก ดังนั้นจึงสามารถให้ความร้อนแก่ชิ้นงานได้ด้วยการใช้สวดความร้อนที่ส่งอยู่ในเซรามิกสัทนความร้อนสูงเพื่อใช้เป็นแผ่นรองชิ้นงาน หรือใช้การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Induction heating) โดยให้ขดลวดเหนี่ยวนำครอบชิ้นงาน โดยชิ้นงานจะต้องมีสถานะเป็นตัวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ด้วย เป็นต้น , จากกราฟในรูปที่ 5.15 ถึง 5.18 จะพบว่าถ้าเกิดความดันภายในระบบสุญญากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยในขณะที่กระแสจากแหล่งจ่ายยังคงเดิม จะทำให้อัตราการเคลือบเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทันที ดังนั้นในระบบอุตสาหกรรมเราจำเป็นต้องควบคุมในจุดนี้ เพื่อลดการสูญเสียผลผลิตลง ดังนั้นจึงควรได้มีการออกแบบระบบควบคุมกระแสที่ป้อนให้ระบบอย่างอัตโนมัติเพื่อตอบสนองการเปลี่ยนแปลงค่าความดันของระบบอย่างทันที , แผ่นรองชิ้นงานควรจะสามารถหมุนได้ทุกทิศทางรวมทั้งขยับขึ้นลงได้ตามความต้องการด้วยการใช้มอเตอร์ควบคุมจากภายนอก , ทำการลดข้อต่อที่ใช้ในระบบให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อลดการรั่วซึมของก๊าซจากภายนอกเข้าสู่ระบบ

ในการออกแบบระบบที่จะใช้ในงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการทำงานที่ลดต้นทุนมากที่สุด ดังนั้นในการพัฒนาเพื่อออกแบบต่อไปจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงข้อนี้ที่สำคัญ โดยใช้ระบบที่ได้ทำการทดลองมาแล้วเป็นต้นแบบในการออกแบบสร้างต่อไป ในการที่จะประหยัดการสูญเสียวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ นั้น เราจำเป็นต้องคำนึงถึงการสร้างระบบสุญญากาศที่มีขนาดใหญ่ และสามารถนำชิ้นงานที่ต้องการเคลื่อนเข้าและออกได้อย่างรวดเร็วและไม่ต้องการบีบระบบขึ้นมาใหม่อีกครั้ง ดังนั้นจึงได้มีบริษัทหลายบริษัทที่ทำการเคลื่อนกระจกสะท้อนความร้อน โดยจะประกอบด้วยห้องสุญญากาศหลายห้องเรียงติดต่อกัน ระหว่างห้องจะมีประตูหรือวาล์วสุญญากาศกันอยู่ ทำให้สุญญากาศในแต่ละห้องแยกจากกันได้ ห้องตรงกลางเป็นบริเวณที่ใช้ทำการเคลื่อนฟิล์มจะอยู่ในภาวะสุญญากาศเสมอ ห้องแรกและห้องสุดท้ายใช้สำหรับเตรียมแผ่นกระจกก่อนเข้าและก่อนออกจากภาวะสุญญากาศตามลำดับ แผ่นกระจกที่เตรียมไว้จะถูกส่งเข้าไปทำการเคลื่อนที่ละชั้นตอน เมื่อบรรจุแผ่นกระจกเข้าไปในเครื่องเคลื่อนแล้วก็ลดความดันภายในห้องแรกลงจนเท่ากับความดันภายในห้องตรงกลางแล้วประตูระหว่างห้องจะเปิดออกแผ่นกระจกจะถูกเลื่อนเข้าไปภายในห้องสุญญากาศเพื่อทำการเคลื่อน ภายในห้องเคลื่อนจะมีสปีดเตอริงคาโทดอยู่หลายหัว เพื่อการเคลื่อนฟิล์มที่ละชั้นตามแบบที่ต้องการ หลังจากเคลื่อนเสร็จแล้วแผ่นกระจกก็就会被ส่งออกไปยังห้องสุดท้าย ประตูห้องเคลื่อนก็ถูกปิดลงอากาศภายนอกจะถูกปล่อยเข้าจนภายในห้องสุญญากาศสุดท้ายจนมีความดันเท่ากับบรรยากาศข้างนอก แผ่นกระจกที่ผ่านการเคลื่อนจึงถูกนำออกทางปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่องเคลื่อน ในการเคลื่อนระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้ระบบห้องสุญญากาศหลายห้องดังกล่าว เพราะไม่ต้องเสียเวลาในการ Pump Down หลายครั้ง

## บรรณานุกรม

- [1] Balzers Aktiengesellschaft, "Vacuum components edition 86/88," Balzers, Switzerland, 1988.
- [2] M. Berry, W. Robert, M. Hall Peter and T. Harris Murray, "Thin film technology," D. Van Nostrand Company, New Jersey, 1968.
- [3] H. Biederman and R. P. Howson, "Polymer and carbon films deposition by dc planar magnetron," Vacuum, vol. 39, No 1, 1989.
- [4] F. Rointan, Bunshah, "Deposition Technologies for Films and Coatings," New Jersey, Noyes Publications, 1982.
- [5] Brian Chapman, "Glow Discharge Processes," New York, John Wiley & Sons, 1980.
- [6] Edwards High Vacuum International, "Edwards Vacuum Coater Model 306," Crawley, Edwards High Vacuum International, 1975.
- [7] Edwards High Vacuum International, "Edwards Vacuum Products," Crawley, Edwards High Vacuum International, 1989.
- [8] Harris Nigel, "Modern Vacuum Practice," London, Mcgraw-Hill Book Company, 1989.
- [9] D. Hucknall, "Vacuum Technology and Applications," Oxford, Butterworth-Heinemann, 1991.
- [10] E. Kuffeland amd W.S. Zaengl, "High Voltage Engineering," Oxford, Pergamon Press, 1984.
- [11] Leybold-Heraeus GMBH, "Angebot Offer" Bonner Strabe, Leybold-Heraeus GMBH.
- [12] I. L. Maissel and Reinhard Glang, "Handbook of Thin Film Technology," New York, Mcgraw-Hill Book Company, 1970.
- [13] A. Rizk, "Effects of different glow discharge conditionon deposition rates of copper in a dc magnetron sputtering system," Vacuum, vol. 39 No.5, 1989
- [14] K. K. Schuegraf, "Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques," New Jersey, Noyes Publications, 1988.
- [15] L. J. Vossen and W. Kern, "Thin Film Processes," New York, Academic Press, 1978.
- [16] Kiyotaka Wasa and Shigeru Hayakawa, "Handbook of Sputter Deposition Technology," New Jersey, Noyes Publications, 1992.



# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางภาคผนวกที่ 1  
แสดงขนาดของสวดเบอร์ต่างๆ

เบอร์ S.W.G.	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	พื้นที่หน้าตัด (เซอร์กิวลาร์มิล)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	เบอร์ A.W.G.
0	8.23	108372.64	54.186	
1	7.62	90000.00	64.451	0
2	7.06	79749.76	39.874	1
3	6.4	65536.00	32.763	2
4	5.39	52630.00	27.763	3
5	5.3	44944.00	23.151	4
6	4.88	38103	18.251	5
7	4.46	30976	15.913	-
8	4.06	25600	13.206	6
9	3.66	21432.96	10.716	7
10	3.24	16384	8.398	8
11	2.94	13456	6.914	9
12	2.642	10816	5.584	10
13	2.333	8464	5.5	11
14	2.03	8100	3.296	12
15	1.828	5346	2.673	13
16	1.625	4096	2.112	14
17	1.422	3257	1.617	15
-	1.270	2583	-	16
18	1.131	2048	1.231	17
19	1.061	1801	.625	18
20	0.934	1296	.338	19
21	0.9	1269	.527	20
22	0.711	784	.404	21
23	0.61	576	.297	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 2  
ผลการทดลองวัดค่าความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศเมื่อทำการปั๊มด้วย  
ปั๊มกลโรตารีรุ่น D25B บริษัท Leybold

เวลา (second)	ความดัน (mbar)	เวลา (second)	ความดัน (mbar)	เวลา (second)	ความดัน (mbar)
0	$1 \times 10^3$	75	$8 \times 10^{-2}$	330	$2.9 \times 10^{-2}$
5	$1.5 \times 10^2$	85	$7 \times 10^{-2}$	370	$2.8 \times 10^{-2}$
15	$4 \times 10^1$	102	$6 \times 10^{-2}$	420	$2.7 \times 10^{-2}$
20	$1.2 \times 10^1$	130	$5 \times 10^{-2}$	480	$2.6 \times 10^{-2}$
23	$3 \times 10^0$	187	$4 \times 10^{-2}$	550	$2.5 \times 10^{-2}$
30	$6 \times 10^{-1}$	226	$3.5 \times 10^{-2}$	630	$2.4 \times 10^{-2}$
37	$2.3 \times 10^{-1}$	260	$3.2 \times 10^{-2}$	720	$2.3 \times 10^{-2}$
57	$1.2 \times 10^{-1}$	300	$3 \times 10^{-2}$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 3  
ผลการทดลองวัดค่าความดันภายในแชมเบอร์สุญญากาศเมื่อทำการปั๊มด้วย  
ปั๊มไอฟุ้งกระจาย รุ่น E04K บริษัท Edwards

เวลา (second)	ความดัน (mbar)	เวลา (second)	ความดัน (mbar)	เวลา (second)	ความดัน (mbar)
0	$3 \times 10^{-2}$	214	$7.5 \times 10^{-5}$	617	$3.6 \times 10^{-5}$
4	$9 \times 10^{-3}$	237	$7 \times 10^{-5}$	640	$3.5 \times 10^{-5}$
8	$4 \times 10^{-3}$	248	$6.7 \times 10^{-5}$	673	$3.4 \times 10^{-5}$
10	$1.5 \times 10^{-2}$	263	$6.5 \times 10^{-5}$	705	$3.3 \times 10^{-5}$
14	$1 \times 10^{-3}$	282	$6.2 \times 10^{-5}$	740	$3.2 \times 10^{-5}$
23	$7 \times 10^{-4}$	296	$6 \times 10^{-5}$	780	$3.1 \times 10^{-5}$
31	$4 \times 10^{-4}$	320	$5.7 \times 10^{-5}$	825	$3 \times 10^{-5}$
35	$2.4 \times 10^{-4}$	337	$5.5 \times 10^{-5}$	870	$2.9 \times 10^{-5}$
126	$1.5 \times 10^{-4}$	364	$5.2 \times 10^{-5}$	917	$2.8 \times 10^{-5}$
144	$1.2 \times 10^{-4}$	382	$5 \times 10^{-5}$	970	$2.7 \times 10^{-5}$
160	$9.9 \times 10^{-5}$	407	$4.8 \times 10^{-5}$	1202	$2.3 \times 10^{-5}$
164	$9 \times 10^{-5}$	449	$4.5 \times 10^{-5}$	1376	$2 \times 10^{-5}$
178	$8.5 \times 10^{-5}$	487	$4.2 \times 10^{-5}$	1560	$1.7 \times 10^{-5}$
187	$8.2 \times 10^{-5}$	525	$4 \times 10^{-5}$	2000	$1 \times 10^{-5}$
195	$8 \times 10^{-5}$	568	$3.8 \times 10^{-5}$	2136	$8 \times 10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 4  
 แสดงผลการทดลองระหว่างแรงดันไฟฟ้าคิซาร์จกับกระแสคิซาร์จที่  
 ความดันค่าต่างๆ ของเป้าสแตนเลส

แรงดัน (V) กระแส(mA)	ที่ความดัน $1.6 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3.5 \times 10^{-3}$ mbar
100	352	253	323	228	316
200	374	278	345	252	341
300	400	314	374	307	366
400	422	355	395	333	386
500	440	370	417	358	409
600	459	404	435	383	426
700	477	419	452	404	441
800	495	444	469	424	457
900	512	468	483	442	467
1000	530	483	494	457	478
1100	549	518	505	473	489
1200	566	529	520	486	502
1300	585	542	532	499	514
1400	600	554	545	512	527
1500	-	569	557	530	-
1600	-	581	572	547	-
1700	-	-	-	565	-
1800	-	-	-	-	-
1900	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 5  
แสดงผลการทดลองระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จกับกระแสดิซชาร์จที่  
ความดันค่าต่างๆ ของเป้าอลูมิเนียม (Al)

แรงดัน (V) กระแส(mA)	ที่ความดัน $1.3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $1.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3.0 \times 10^{-3}$ mbar
150	290	280	270	266	261
200	301	293	282	276	275
300	320	319	308	301	300
400	345	342	332	326	322
500	362	361	348	343	337
600	380	377	365	360	353
700	394	391	379	370	365
800	411	407	392	379	374
900	421	417	400	388	380
1000	431	424	404	395	388
1100	439	431	414	400	393
1200	446	438	420	407	400
1300	453	445	424	413	407
1400	460	450	432	418	413
1500	466	459	436	424	417
1600	473	465	442	431	424
1700	477	470	449	437	430
1800	484	474	455	442	435
1900	490	481	461	448	442
2000	496	488	467	455	447

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 6  
แสดงผลการทดลองระหว่างแรงดันไฟฟ้าคิซาร์จกับกระแสคิซาร์จที่  
ความดันค่าต่างๆ ของเป้าไททาเนียม (Ti)

แรงดัน (V) กระแส(mA)	ที่ความดัน $1.0 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $1.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $4.0 \times 10^{-3}$ mbar
100	252	248	245	239	217
200	257	252	249	242	229
300	265	263	262	257	246
400	280	277	274	268	260
500	290	288	285	278	270
600	301	297	294	285	275
700	309	302	297	293	282
800	315	311	305	298	286
900	321	316	310	301	290
1000	326	320	315	305	294
1100	331	323	317	307	296
1200	336	327	321	309	300
1300	339	330	325	312	303
1400	343	333	327	314	305
1500	346	336	330	316	307
1600	349	339	334	319	310
1700	354	342	337	320	312
1800	358	345	341	322	314
1900	361	348	343	325	316
2000	366	353	348	328	319

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 7  
แสดงผลการทดลองระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิซชาร์จกับกระแสดิซชาร์จที่  
ความดันค่าต่างๆ ของเป่าทองแดง (Cu)

แรงดัน (V) กระแส(mA)	ที่ความดัน $1.3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $1.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $4.3 \times 10^{-3}$ mbar
100	313	314	303	298	295
200	347	340	351	326	325
300	374	365	360	353	354
400	398	389	383	373	372
500	416	407	396	387	387
600	430	423	411	401	400
700	440	432	423	410	410
800	452	442	431	423	423
900	464	454	444	434	427
1000	472	462	454	442	437
1100	482	472	462	451	444
1200	490	482	471	460	453
1300	500	489	481	467	455
1400	509	499	487	475	468
1500	517	509	495	483	475
1600	526	516	502	489	481
1700	533	525	511	497	488
1800	540	533	520	504	495
1900	549	540	526	512	502
2000	-	550	538	520	510

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 8  
แสดงผลการทดลองที่ได้ระหว่างค่ากระแสตัวชี้วัดกับค่าอัตราการเคลือบ  
ที่ความดันก๊าซค่าต่างๆ ของเป้าสแตนเลส

อัตราการเคลือบ ( $\text{Å}$ )	ที่ความดัน $1.6 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3.5 \times 10^{-3}$ mbar
กระแส (mA)					
100	1.6	1.4	1.8	1.3	1.3
200	3	2.3	2.3	1.8	1.8
300	4.6	3.7	3.6	3.6	2.9
400	6.2	5.2	4.8	4.4	4
500	7.8	6.6	6.3	6	5.3
600	9.6	8.1	7.8	7.3	6.8
700	11.3	10.2	9	8.5	8.2
800	13.3	11.4	11	10.2	9.8
900	15.3	12.9	12.8	11.8	11.6
1000	17.3	14.1	14.7	12.9	12.2
1100	19.4	16.4	16.2	14.8	15
1200	21.5	18.3	18.5	15.9	16.7
1300	23.8	20.3	20.6	18.3	19.1
1400	25.9	22.5	22.5	20.3	20.3
1500	-	25.2	24.8	22.3	-
1600	-	27.3	27.3	24.2	-
1700	-	-	-	26.8	-
1800	-	-	-	-	-
1900	-	-	-	-	-
2000	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 9  
 แสดงผลการทดลองที่ได้ระหว่างค่ากระแสดิซาร์จกับค่าอัตราการเคลือบ  
 ที่ความดันก๊าซค่าต่างๆ ของเป็ออลูมิเนียม (Al)

อัตราการเคลือบ ( $\text{Å}$ )	ที่ความดัน $1.3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $1.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3.0 \times 10^{-3}$ mbar
กระแส (mA)					
150	0.7	-	0.6	0.5	0.5
200	1	-	0.8	0.7	0.6
300	1.5	1.6	1.2	1	1
400	2.2	2.2	1.8	1.5	1.4
500	2.8	2.9	2.2	2	1.8
600	3.6	3.6	2.8	2.4	2.2
700	4.3	4.2	3.3	2.9	2.7
800	5.1	4.9	3.9	3.3	3
900	5.8	5.6	4.5	3.9	3.5
1000	6.7	6.3	5	4.4	3.9
1100	7.3	6.9	5.7	4.9	4.5
1200	8.2	7.6	6.3	5.4	5
1300	9	8.4	6.8	6	5.7
1400	9.7	9	7.4	6.7	6.2
1500	10.7	9.9	8.3	7.3	6.8
1600	11.9	10.8	9.1	7.9	7.3
1700	12.4	11.5	9.8	8.7	8
1800	13.2	12.2	10.6	9.3	8.7
1900	13.9	13.3	11.4	10.3	9.4
2000	14.9	14.6	12.4	11.3	10.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 10  
แสดงผลการทดลองที่ได้ระหว่างค่ากระแสสัตซ์กับค่าอัตราการเคลือบ  
ที่ความดันก๊าซค่าต่างๆ ของเป้าไททานเนียม (Ti)

อัตราการเคลือบ ( $\text{Å}$ )	ที่ความดัน $1.0 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $1.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $4.0 \times 10^{-3}$ mbar
กระแส (mA)					
100	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3
200	0.8	0.8	0.6	0.6	0.5
300	1.2	1	0.9	0.8	0.8
400	1.7	1.4	1.3	1.1	1
500	2.1	1.8	1.7	1.4	1.3
600	2.5	2.3	2.1	1.8	1.6
700	3	2.7	2.6	2.2	1.8
800	3.5	3.2	3	2.6	2.2
900	3.9	3.6	3.4	2.9	2.5
1000	4.4	4	3.8	3.3	2.8
1100	4.9	4.4	4.3	3.6	3.2
1200	5.4	4.8	4.7	4	3.6
1300	5.9	5.3	5.2	4.3	3.9
1400	6.3	5.8	5.7	4.7	4.2
1500	7	6.3	6.1	5.1	4.6
1600	7.5	6.8	6.6	5.5	4.9
1700	8.2	7.3	7.1	6	5.3
1800	8.7	7.8	7.5	6.5	5.8
1900	9.3	8.4	8.2	7	6.3
2000	10.2	9.3	8.8	8	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 11  
 แสดงผลการทดลองที่ได้ระหว่างค่ากระแสดีสชาร์จกับค่าอัตราการเคลือบ  
 ที่ความดันก๊าซค่าต่างๆ ของเป้าทองแดง (Cu)

อัตราการเคลือบ (A°)	ที่ความดัน $1.3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $1.5 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $2.0 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $3 \times 10^{-3}$ mbar	ที่ความดัน $4.3 \times 10^{-3}$ mbar
กระแส (mA)					
100	4	3.9	3.6	3.3	3
200	7.2	6.9	6.3	5.5	5.2
300	11.3	10.6	9.7	8.6	8.5
400	15.5	14.9	13.9	12.3	11.3
500	20.3	19.1	17.8	15.9	14.8
600	24.8	23.5	21.4	19.4	18.2
700	29	27.5	25.6	23.1	21.8
800	33.9	32.4	29.8	27.2	25.7
900	38.6	36.8	34.3	31.3	28.4
1000	43.2	41.3	38.6	35.1	32.3
1100	47.8	45.8	42.9	39.2	35.8
1200	53.2	50.6	47.3	43.3	39.9
1300	58.4	55.4	52.2	47.8	44.2
1400	63.4	60.5	56.8	52.2	48.2
1500	69.8	66	61.4	56.6	52.6
1600	74.2	71.2	66.3	60.8	57.1
1700	79.8	77	71.7	66.1	61.7
1800	85.7	82.5	76.9	71	65.6
1900	92.2	88.8	83	77	71.4
2000	-	96.3	91.4	84	78.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง

## Deposition of Titanium Nitride Thin Film by Sputtering

โชคชัย หาญธนาชาติ\*

ผศ.จงรักษ์ บุญเส็ง\*\*

รศ.ดร.พิษณุ ลิ้มสุวรรณ\*\*\*

## บทคัดย่อ

ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นสารประกอบเซรามิกสี มีสีทอง มีความแข็งของวัสดุในสภาพฟิล์มบางสูงมากและมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการ จึงเป็นที่สนใจโดยทั่วไป ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางของไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยเครื่องสปัตเตอริงแบบ ดีซี รีแอคทีฟ พลาสมา แมกนีตรอน โดยทำการเคลือบที่กระแสที่ 1.6 แอมแปร์ ที่ความดัน  $1.9 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ พบว่าการป้อนไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้สี ของฟิล์มเคลือบเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีช่วงหนึ่งที่ก๊าซไนโตรเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากันพอดีกับไททาเนียม เกิดเป็นไททาเนียมไนไตรด์ ให้ฟิล์มเคลือบออกมาเป็นสีทองตามต้องการ ช่วงความดันที่เกิดขึ้นจะเป็นช่วงที่แคบมาก และไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง

## ABSTRACT

Titanium nitride is a ceramic compound. It has gold color, hard material in the form of thin film and other eminent properties which are very attractive to be used in various applications. In this research work the titanium nitride thin films have been deposited by the d.c. reactive planar magnetron sputtering system. By varying the partial pressure of nitrogen while the current is being kept constant at 1.6 A and under pressure of  $1.9 \times 10^{-3}$  mbar, it is found that, the color of titanium nitride film is changed. At the proper reaction of titanium and nitrogen, the gold-like color of titanium nitride film is obtained. However, the range of pressure to yield good reaction is very narrow.

## 1. บทนำ

ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นวัสดุเซรามิกที่มีความเสถียรทางเคมีสูง ทนอุณหภูมิสูง (Refractory material) มีความแข็งแรง (High yield strength and hardness) มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวสัมผัสต่ำ นำไฟฟ้าได้ และมีสีทองปลั่งใกล้เคียงทองคำบริสุทธิ์ รวมทั้งยังถูกกัดกร่อนได้ด้วยสารละลายกรดแก่  $\text{HF} + \text{HNO}_3$  หรือสารละลายด่างแก่ KOH ที่อุณหภูมิสูง แต่ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยาในสภาวะอื่นๆ และทนการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าสแตนเลสและโลหะผสมซูเปอร์อัลลอยที่ใช้ทำกังหันเทอร์ไบน์ มีความแข็งของวัสดุในสภาพฟิล์มบางสูงมากถึง 2800 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อทำเป็นฟิล์มบางมากของไททาเนียมไนไตรด์ จะยอมให้แสงส่งผ่านได้ แต่จะมีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีอินฟราเรดได้ดี จากที่กล่าวมาจึงทำให้มีคุณสมบัติที่น่าสนใจในการกั้นคว่ำ และนำมาประยุกต์ใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น คุณสมบัติด้านความแข็ง อาจนำมาใช้ในการเคลือบโมลด์โลหะและเคลือบอุปกรณ์โลหะให้มีอายุการใช้งานสูงขึ้น มีดกึ่งและดอกสว่านขณะใช้งานมีอุณหภูมิสูงจากการขัดสีกันระหว่างชิ้นงานกับดอกสว่านหรือมีดกึ่ง การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์จะช่วยลดการสึกหรอและอุณหภูมิของเนื้อดอกสว่านภายใน ทำให้อายุขี้อายุการใช้งานถึง 2 ถึง 10 เท่าตัว สีทองปลั่งของไททาเนียมไนไตรด์เหมาะสำหรับการใช้เคลือบเครื่องประดับ เช่น กำไล ตัวเรือนนาฬิกา กรอบแว่นตา แหวน กำไล เป็นต้น ซึ่งให้ฟิล์มเคลือบที่สวยงามคงทนต่อการขีดข่วนหรือการกัดกร่อนของสารเคมี ถ้าเคลือบลงบนโม่โคบอลต์จะเพิ่มอายุความคมของโม่โคบอลต์ให้ยาวนานขึ้น เพราะเป็นสารที่ทนต่อการกัดกร่อน การนำไปเคลือบบนผิวด้วยโมลด์ฉีดพลาสติก พิวีซี จะช่วยลดการกัดกร่อนของสารเคมีลงได้มาก นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานที่ต่ำกว่าเหล็กถึง 3 เท่า สามารถลดแรงอัดในห้องฉีดพลาสติกได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังใช้ในการเคลือบเป็นขั้วต่อตัวนำกับสารกึ่งตัวนำก่อนถึงชั้นของอูมิเนียม เนื่องจากคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ และเป็นแนวกันมิให้ขั้วต่อตัวนำอูมิเนียมเกิดการแพร่ผสมกับสารกึ่งตัวนำเมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงอันจะเป็นสาเหตุให้สารกึ่งตัวนำเสื่อมสภาพการทำงานเร็ว

สปัตเตอริง เป็นขบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีกระแสไอออนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ ดังกล่าว ขบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรืออนุภาคมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในขบวนการสปัตเตอริง คือ

\* นักศึกษาปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*\* อาจารย์ประจำ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*\*\* อาจารย์ประจำ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใบเขียวระบุชื่อหนังสือพิมพ์

# การเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

## Deposition of Titanium Nitride Thin Film by Sputtering

โรชชัย หาญธนาชาติ<sup>\*</sup>

ศศ.จรงค์ชัย บุญสูง<sup>\*\*</sup>

รศ.ดร.พิเชษฐ อิ่มสุวรรณ<sup>\*\*\*</sup>

### บทคัดย่อ

ไททานเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นสารประกอบเซรามิกสี มีสีทอง มีความแข็งแรงของวัสดุในสภาพฟิล์มบางสูงมากและมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการ จึงเป็นที่สนใจโดยทั่วไป ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางของไททานเนียมไนไตรด์ ด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริงแบบ ดีซี รีแอกทีฟพลาสมา แมกนีตรอน โดยทำการเคลือบที่กระแสคงที่ 1.6 แอมแปร์ ที่ความดัน  $1.9 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ พบว่าการป้อนไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้สี ของฟิล์มเคลือบเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีช่วงหนึ่งที่ก๊าซไนโตรเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากันพอดีกับไททานเนียม เกิดเป็นไททานเนียมไนไตรด์ ให้ฟิล์มเคลือบออกมาเป็นสีทองตามต้องการ ช่วงความดันที่เกิดขึ้นจะเป็นช่วงที่แคบมาก และไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง

### ABSTRACT

Titanium nitride is a ceramic compound. It has gold color, hard material in the form of thin film and other eminent properties which are very attractive to be used in various applications. In this research work the titanium nitride thin films have been deposited by the d.c. reactive planar magnetron sputtering system. By varying the partial pressure of nitrogen while the current is being kept constant at 1.6 A and under pressure of  $1.9 \times 10^{-3}$  mbar, it is found that, the color of titanium nitride film is changed. At the proper reaction of titanium and nitrogen, the gold-like color of titanium nitride film is obtained. However, the range of pressure to yield good reaction is very narrow.

### 1. บทนำ

ไททานเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นวัสดุเซรามิกที่มีความเสถียรทางเคมีสูง ทนอุณหภูมิสูง (Refractory material) มีความแข็งแรงสูง (High yield strength and hardness) มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวสัมผัสต่ำ นำไฟฟ้าได้ และมีสีทองปลั่งใกล้เคียงทองคำบริสุทธิ์ รวมทั้งยังถูกกัดกร่อนได้ด้วยสารละลายกรดแก่ HF+HNO<sub>3</sub> หรือสารละลายด่างแก่ KOH ที่อุณหภูมิสูง แต่ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยาในสภาวะอื่นๆ และทนการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าสแตนเลสและโลหะผสมซูเปอร์อัลลอยที่ใช้ทำกังหันเทอร์โบ มีค่าความแข็งแรงของวัสดุในสภาพฟิล์มบางสูงมากถึง 2800 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อทำเป็นฟิล์มบางมากของไททานเนียมไนไตรด์ จะยอมให้แสงส่งผ่านได้ แต่จะมีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีอินฟราเรดได้ดี จากที่กล่าวมาจึงทำให้มีคุณสมบัติที่น่าสนใจในการค้นคว้า และนำมาประยุกต์ใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น คุณสมบัติด้านความแข็ง อาจนำมาใช้ในการเคลือบโมลด์โลหะและเคลือบอุปกรณ์โลหะให้มีอายุการใช้งานสูงขึ้น บัดกรีและคอกสว่านขณะใช้งานมีอุณหภูมิสูงจากการขัดถูกันระหว่างชิ้นงานกับคอกสว่านหรือมีดกัด การเคลือบไททานเนียมไนไตรด์จะช่วยลดการสึกหรอและอุณหภูมิของเนื้อคอกสว่านภายใน ทำให้อายุขัยอายุการใช้งานถึง 2 ถึง 10 เท่าตัว สีทองปลั่งของไททานเนียมไนไตรด์เหมาะสำหรับการใช้เคลือบเครื่องประดับ เช่น กำไล ตัวเรือนนาฬิกา กรอบแว่นตา แหวน สุ่มหู เป็นต้น ซึ่งให้ฟิล์มเคลือบที่สวยงามคงทนต่อการขีดขีดหรือการกัดกร่อนของสารเคมี ถ้าเคลือบลงบนโบบีคโคนจะเพิ่มอายุความคมของโบบีคให้ยาวนานขึ้น เพราะเป็นสารที่ทนต่อการกัดกร่อน การนำไปเคลือบบนผิวด้วยโมลด์ฉีดพลาสติก พิวีซี จะช่วยลดการกัดกร่อนของสารเคมีลงได้มาก นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานที่ต่ำกว่าเหล็กถึง 3 เท่า สามารถลดแรงอัดในห้องฉีดพลาสติกได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังใช้ในการเคลือบเป็นขั้วต่อตัวนำกับสารกึ่งตัวนำก่อนถึงชั้นของอลูมิเนียม เนื่องจากคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ และเป็นแนวกันมิให้ขั้วต่อตัวนำอลูมิเนียมเกิดการแพร่ผสมกับสารกึ่งตัวนำเมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงอันจะเป็นสาเหตุให้สารกึ่งตัวนำเสื่อมสภาพการทำงานเร็ว

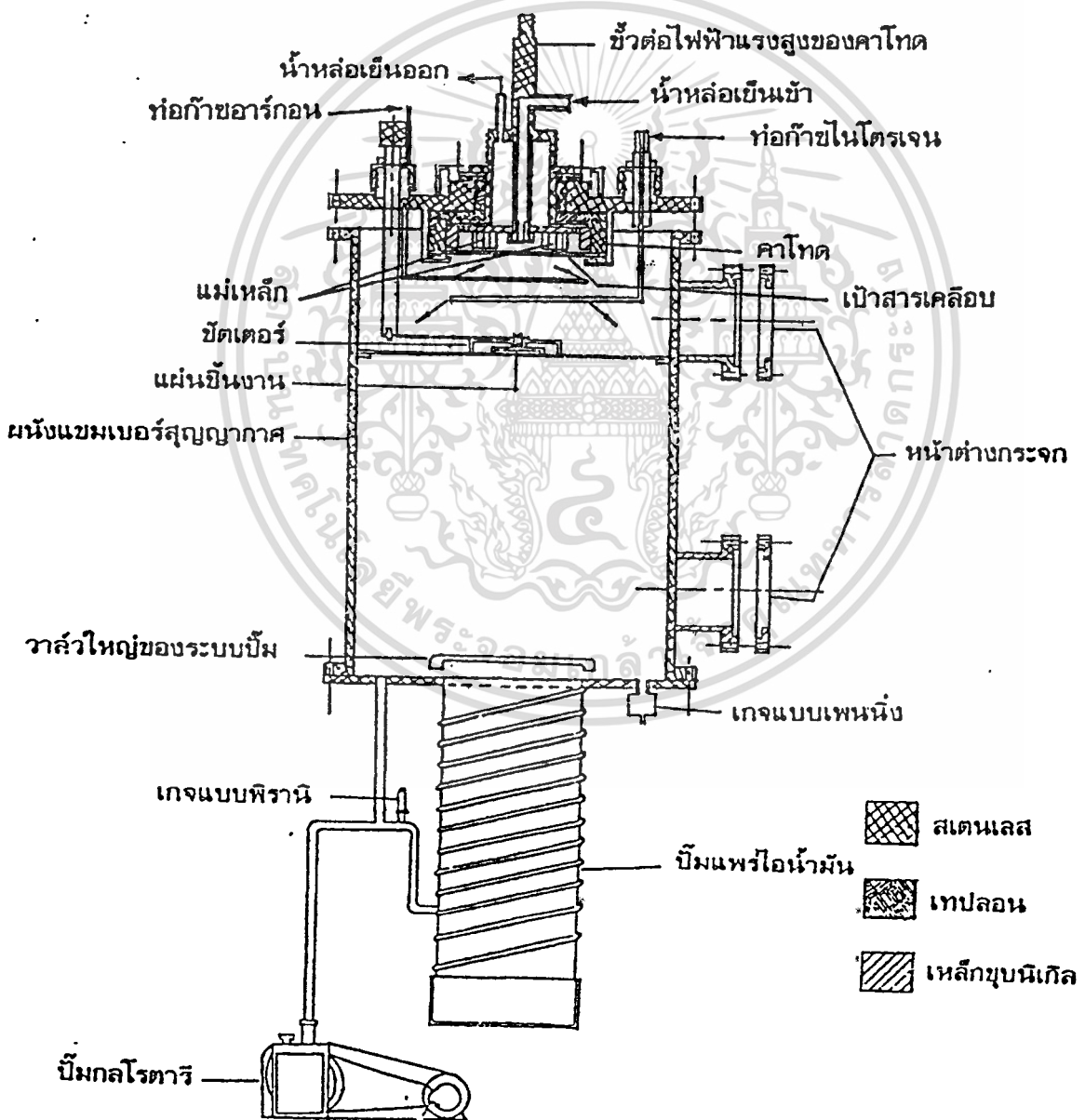
<sup>\*</sup> นักศึกษาปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>\*\*</sup> อาจารย์ประจำ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>\*\*\*</sup> อาจารย์ประจำ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยเจ้าของเอกสารเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มีสารเคลือบเป็นเป้า (Target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นรองรับ

2. มีอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจจะเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงระหว่าง 10 ถึง 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อใช้ในการสเปกโตรริงทำได้อ่อนข้างยาก เราจึงใช้วิธีการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้าแทน ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุชนิดหนึ่งที่ย่างต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของเป้าสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้ขบวนการสเปกโตรริงเกิดขึ้นได้ ดังนั้น การชนระหว่างสองอนุภาค ที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนบวกของก๊าซในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ขบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มเคลือบตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัย ขบวนการไอออริสซาร์จ (Cic + Discharge)

การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) เราใช้โลหะไททาเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูงเป็นเป้าสารเคลือบ ส่วนก๊าซในระบบจะเป็นก๊าซผสมระหว่างไนโตรเจนและอาร์กอน โดยไอออนของอาร์กอนมีหน้าที่ ทำให้การสเปกโตรริงเกิดขึ้นในอัตราสูง ส่วนไนโตรเจนซึ่งอยู่ในสภาวะพลาสมาของการดิสซาร์จไฟฟ้าจะมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูง จึงเข้าร่วมตัวกับไททาเนียมบนผิวชิ้นงาน เกิดเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ขึ้น โดยก๊าซอาร์กอนจะช่วยเจือจางก๊าซไนโตรเจนให้มีปริมาณที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้ เราได้ช่วยสนามแม่เหล็กให้มีทิศทาง ขนานกับผิวหน้าของแผ่นเป้าสารเคลือบและมีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนในอวกาศ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณไอออนของก๊าซที่ถูกผลิตจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมของก๊าซอาร์กอนจึงมีปริมาณสูงขึ้น นอกจากนี้ สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในลักษณะวนผิวเป้าสารเคลือบซ้ำๆ อย่างต่อเนื่อง และผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาในปริมาณมากขึ้นอีก ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กเพียง 500 เกาส์ จะทำให้การเคลือบด้วยระบบนี้มีอัตราการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่า เราเรียกกระบวนการเคลือบแบบนี้ว่า Magnetron Sputtering

## 2. วัสดุอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ จะประกอบด้วยส่วนประกอบเพื่อการศึกษาดังนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักใหญ่ๆ 7 ส่วน โดยมีรายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 1. และสามารถแยกรายละเอียดแต่ละส่วนได้ดังนี้

2.1 ปัมพ์สุญญากาศ เพื่อใช้ในการปั๊มลดความดันบรรยากาศในระบบให้มีค่าต่ำมากๆ เพื่อให้ระบบเกิดความสะอาดเนื่องจากมีก๊าซอื่นอยู่มากที่สุด โดยเราใช้ปั๊มลดสุญญากาศ แบบโรตารีชนิดแวน (Rotary Vane Pump) ของบริษัท Edward No.16 ซึ่งให้ความดันขั้นต้นแก่ระบบสุญญากาศต่ำประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  mbar หลังจากนั้นใช้ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion Pump) ของ Edward รุ่น E306 ซึ่งมีกำลังปั๊ม 600 ลิตรต่อวินาที ทำให้สามารถลดความดันของระบบได้ต่ำสุดถึง  $3 \times 10^{-4}$  mbar

2.2 แชนเบอร์สุญญากาศ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.5 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร มีช่องหน้าต่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร 2 ช่อง

2.3 คาโทดและเป้าสารเคลือบ มีโครงสร้างของคาโทดเป็นแบบ Planar Magnetron ที่ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเหล็กกล้าสเตนเลส โดยมีพื้นที่เป้าสารเคลือบเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร มีความบริสุทธิ์ 99.5% มีแม่เหล็กถาวรมีค่าความเข้ม 500 เกาส์ ช่วยให้การดิสซาร์จในการสเปกโตรริงเกิดขึ้นที่ความดันเพียง  $1.9 \times 10^{-3}$  mbar

2.4 ระบบระบายความร้อน สำหรับหัวคาโทดเราจะใช้น้ำกลั่น โดยมีปริมาณ 10 ลิตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส ส่วนระบบระบายความร้อนของปั๊ม ไอฟุ้งกระจายจะใช้ถังน้ำเย็นขนาด 0.5 ลูกบาศก์เมตร

2.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง สร้างขึ้นใช้เองสามารถปรับค่ากระแสในคงที่ได้ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0-2 แอมป์ และสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 850 โวลต์

2.6 ระบบป้อนก๊าซไนโตรเจนและก๊าซอาร์กอน เราใช้เครื่อง Mass-Flow Gas Measurement and Control Instrument ซึ่งใช้สำหรับวัดและควบคุมก๊าซที่ป้อนเข้าไปในแชนเบอร์สุญญากาศ โดยมีหน่วยอัตราการป้อนก๊าซเข้าไปเป็น Sccm โดยใช้ Control Valve 2 ตัว โดยที่ตัวหนึ่งใช้ควบคุมอัตราการป้อน (Flow Rate) ของก๊าซไนโตรเจน โดยมีอัตราการป้อนตั้งแต่ 0 ถึง 50 Sccm ส่วนตัวที่สองใช้ควบคุมอัตราการป้อนก๊าซอาร์กอน โดยมีอัตราการป้อนตั้งแต่ 0 ถึง 100 Sccm

2.7 อุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ และส่วนประกอบในระบบสุญญากาศ เช่น วัคเคอรัสำหรับเปิดปิดชิ้นงานทั้งก่อนและหลังเคลือบเสร็จ , ท่อป้อนก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจนที่แยกจากกันในแชนเบอร์ โดยที่ก๊าซอาร์กอนจะใช้เป็นท่อวงกลมกลวง เจาะรูโดยรอบเพื่อให้ก๊าซอาร์กอนถูกขับออกมาอย่างสม่ำเสมอรอบแชนเบอร์ทุกทิศทาง, เกจเพนนิ่งใช้วัดความดันภายในแชนเบอร์ และเกจพิรามิใช้วัดความท้ายของปั๊มไอฟุ้งกระจาย เป็นต้น

3. การทดลอง

มีลำดับขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์หรือชิ้นงานอื่นๆ มาทำความสะอาดด้วยอะซิโตน แล้วนำมาวางลงบนที่วางชิ้นงานในแชมเบอร์ โดยวางห่างจากผิวเป่าสารเคลือบ 8 เซนติเมตร
2. ถัดมาเปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศให้สนิทเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกตกลงบนชิ้นงานก่อนทำการเคลือบ
3. ปิดฝาแชมเบอร์ให้สนิท
4. เปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย ทำการปั๊มความดันท้ายของปั๊มไอฟุ้งกระจายด้วยปั๊มกลโรตารี จนได้ความดันท้ายประมาณ  $10^{-2}$  mbar พร้อมกับเปิดปั๊มน้ำเย็นให้แก่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
5. เปิด Roughing Valve เพื่อทำการปั๊มภายในแชมเบอร์จนได้ความดันประมาณ  $10^{-2}$  mbar
6. ปิด Roughing Valve ในขณะที่ปั๊มไอฟุ้งกระจายทำงานได้อย่างเต็มที่แล้ว จึงเปิด Backing Valve ทำการปั๊มความดันท้ายของปั๊มไอฟุ้งกระจายแล้วจึงเปิด Isolation Valve ที่กั้นระหว่างภาชนะสุญญากาศกับปั๊มไอฟุ้งกระจายออก ทำการปั๊มภายในแชมเบอร์ จนได้ความดันเท่ากับ  $3 \times 10^{-4}$  mbar
7. ป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่แชมเบอร์ เปิดระบบไฟฟ้าให้กับระบบโดยให้ขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟต่อกับแผ่นรองชิ้นงาน ขั้วบวกคือเข้ากับภาชนะสุญญากาศ เปิดจัมเปอร์ออก ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อทำการ โกลด์รีดสารจึงทำความสะอาดให้กับชิ้นงานเป็นเวลาประมาณ 15 นาที
8. ปิดระบบไฟฟ้า หดป้อนก๊าซอาร์กอน ทำการปั๊มจนความดันกลับมามีที่  $3 \times 10^{-4}$  mbar
9. เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นให้กับขั้ววาทอด ป้อนก๊าซอาร์กอนและก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ โดยการเปิดเครื่อง Mass-Flow Measurement and Control Instrumentation โดยทำการบันทึกค่า อัตราการป้อน (Flow Rate) ของก๊าซทั้งสองที่ป้อนเข้าไปพร้อมกับบันทึกความดันของระบบที่คงที่แล้วหลังจากป้อนก๊าซทั้งสอง
10. เปิดชุดเครื่องที่ปิดชิ้นงานออก
11. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ โดยขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟต่อเข้ากับขั้ววาทอด และขั้วบวกคือเข้ากับตัวถังแชมเบอร์ ซึ่งต่ออยู่กับกราวด์อีกทีหนึ่ง ทำการบันทึกค่ากระแสที่ปรับแล้วคงที่ไว้ และในขณะที่เคียวกันเราทำการป้อนโวลต์โดยไบแอสให้กับแผ่นรองชิ้นงาน โดยมีค่าแรงดันประมาณ 160 โวลต์ กระแส 10 มิลลิแอมป์ กระแสตรง โดยขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นรองชิ้นงาน และขั้วบวกคือเข้ากับกราวด์ของระบบ
12. ทำการเคลื่อนเป็นเวลา 20 นาที ถึง 50 นาที
13. ปิดชุดเครื่องให้บังชิ้นงานให้สนิทพอดี
14. หดป้อนกระแสไฟฟ้าให้ระบบ
15. หดป้อนก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจน ปิด Isolation Valve

16. ปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย และปั๊มกลโรตารีตามลำดับ และปิดน้ำหล่อเย็นทั้งหมด
17. รอให้ชิ้นงานเย็นประมาณ 30 นาที แล้วจึงปล่อยอากาศเข้าสู่แชมเบอร์ จึงเปิดฝาแชมเบอร์ นำชิ้นงานออกมาตรวจสอบ
18. ทำการทดลองตามขั้นตอนเดิม กับชิ้นงานใหม่ แต่ทำการป้อนก๊าซไนโตรเจนที่ค่าอัตราการป้อน (Flow Rate) ใหม่เข้าสู่ระบบโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย ทำการทดลองเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เสร็จแล้วต้องเปลี่ยนค่ากระแสคงที่ที่ค่าใหม่ดูบ้าง พร้อมกับป้อนก๊าซไนโตรเจนที่ค่าอัตราการป้อน (Flow Rate) ที่ค่าต่างๆ บ้าง

4. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

ในรูปที่ 2.a เป็นวงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเอาต์พุตขนาด  $600\sqrt{2}$  V<sub>DC</sub> โดยใช้หม้อแปลงแปลงไฟ 220 V<sub>AC</sub> เป็น 600 V<sub>AC</sub> ส่งสัญญาณต่อไปยัง วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier) เพื่อเรียงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง โดยมีเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ  $V_{DC} = 0.636 V_m$  แล้วทำการกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor filter) C<sub>2</sub> มีขนาด 500 ไมโครฟารัด ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\delta V = \frac{I_L}{C_F f} \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ  $\delta V$  เป็นค่าเปอร์เซ็นต์รีปเปลโวลเตจ  
 $I_L$  เป็นค่ากระแสที่ออกจากหม้อแปลง  
 $C_f$  เป็นค่าความจุไฟฟ้ากรองแรงดัน  
 $f$  เป็นค่าความถี่ที่ใช้งาน  
กำหนดให้ ค่า ripple เท่ากับ 1% และกระแส  $I_L$  เท่ากับ 2 แอมแปร์ ที่ความถี่ 50 HZ ของไฟกระแสสลับ เพราะฉะนั้นจะได้ค่าความจุ  $C_F$  เท่ากับ 471 ไมโครฟารัด โดยมีค่าแรงดัน ripple เท่ากับ 8.5 Volts แต่เนื่องจากก๊าซไนโตรเจน chamber ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าแรงดันเอาต์พุตปกติ เพื่อใช้ในการเอาชนะแรงดันเบรคดาวน์ (Break down voltage) ของก๊าซไนโตรเจน chamber ซึ่งจะทำให้ก๊าซเปลี่ยนจากคุณสมบัติจาก Negative Resistance ไปเป็น Positive Resistance ได้ โดยใช้เทคนิค voltage multiplier ดังวงจรในรูปที่ 2.a ซึ่งในการใช้งานเราต่อขั้วทวีแรงดันถึง 3 เท่าของแรงดันปกติ ซึ่งสามารถทำให้ได้แรงดันเพิ่มขึ้น 3 เท่าของแรงดันเอาต์พุตสูงสุด ( $V_m$ ) โดยตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรทวีแรงดันคือ C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> โดยแต่ละตัว จะเก็บประจุได้เท่ากับ 2V<sub>m</sub>

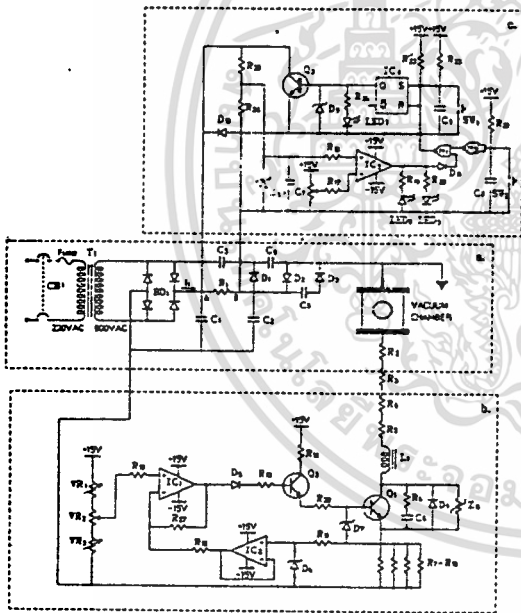
4.1 การควบคุมกระแสไฟคงที่

จากรูปที่ 2.b เป็นวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้หลักการ feedback จากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R<sub>5</sub> ถึง R<sub>10</sub> ขนาด 1 Ω, 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดค่าผ่านวงจร Voltage Follower แล้วจึงนำมาซึ่งตัวเปรียบเทียบแรงดัน ในวงจรคือตัว IC<sub>1</sub> โดยสามารถปรับค่ากระแสที่ไหลผ่าน chamber ให้คงที่ ณจุดที่ต้องการได้ โดยการปรับค่าความต้านทาน VR<sub>2</sub> (variable resistor) ซึ่งมีความต้านทาน VR<sub>3</sub> เป็นตัวปรับค่ากระแสต่ำสุดเริ่มต้นของค่า VR<sub>2</sub> ส่วนความต้านทาน VR<sub>1</sub> เป็นตัวปรับค่ากระแสสูงสุดของค่า VR<sub>2</sub> ที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบแรงดันที่ขา input ของ IC<sub>1</sub> ทำให้ output ของ IC<sub>1</sub> ที่ออกมาจะมีแรงดันเปลี่ยนแปลงตามการปรับค่าความต้านทาน VR<sub>2</sub> ผ่าน diode D<sub>5</sub> มา bias ให้ transistor Q<sub>2</sub> เพื่อจ่ายกระแสมา bias ให้ power transistor Q<sub>1</sub> อีกที ซึ่งจะทำให้ transistor Q<sub>1</sub> สามารถควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน chamber ได้สม่ำเสมอตลอดจนการเคลื่อนที่สิ้นสุดลง



รูปที่ 2. แสดงวงจรไฟฟ้าของระบบสปีดเซอร์  
 a. เป็นส่วนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง  
 b. เป็นส่วนควบคุมกระแสที่  
 c. เป็นส่วนวงจร Soft Start

4.2 วงจร soft start

จากวงจรในรูปที่ 2.c คือ ส่วนของวงจร Soft Start เพื่อใช้ในการช่วยให้ค่าปาดิเตอร์กรองแรงดัน C<sub>2</sub> ค่อยๆเก็บประจุ โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าที่น้อยๆไหลผ่านความต้านทาน R<sub>1</sub> ที่มีค่าความต้านทานสูงๆ มาประจุให้คาปาซิเตอร์ C<sub>2</sub> เรืออย่างงั้น โดยมีการคาปาซิเตอร์ C<sub>1</sub> ขนาด 0.01 ไมโครฟารัด ค่อยๆในวงจร เพื่อใช้เปรียบเทียบแรงดันที่จุด

A และจุด B จนคาปาซิเตอร์ C<sub>2</sub> เก็บประจุจนเต็มจะทำให้แรงดันที่จุด A และ B มีค่าเกือบเท่ากัน ทำให้เอาท์พุทของ IC<sub>3</sub> มีค่าแรงดันเปรียบเทียบของขาอินพุทบวกสูงกว่าขาอินพุทลบ เอาท์พุทที่ออกมาจึงมีค่าแรงดันเท่ากับ +V<sub>cc</sub> ซึ่งจะทำให้ LED<sub>2</sub> สว่างจากนั้นสัญญาณ +V<sub>cc</sub> จะถูกส่งต่อไปยังเนกเกต N<sub>1</sub> ซึ่งเป็นขั้วเดียวกับสวิทช์ SW<sub>2</sub> on เพื่อทำการ operate เครื่อง ทำให้ได้สัญญาณที่อินพุทของเนกเกต N<sub>1</sub> เป็น 1 ทั้งคู่จึงทำให้ flip-flop IC<sub>4</sub> ถูก set ดังนั้นเอาท์พุท Q จึงมีสัญญาณเอาท์พุทออกมาขับ IGBT ให้ on นำกระแสจากขาคอลเลกเตอร์ผ่านไปยังขาอินพุทได้ค่านที่ต้องการ นอกจากนี้แล้ววงจรมีเรายังสามารถนำเอาสัญญาณเอาท์พุท Q ไปส่งให้วงจรควบคุมกระแสคงที่ (Constant current) ทำงานในขณะที่ on สวิทช์ SW<sub>2</sub> ได้คือ และที่ขา set ของ flip-flop IC<sub>4</sub> ยังสามารถใช้ต่อกับวงจรส่วนระบบป้องกัน (Protection System) ได้อีก อย่างเช่น วงจรป้องกันทรานซิสเตอร์เพาเวอร์โมดูล ไม่ให้เกิดแรงดันตกคร่อม ที่ขาคอลเลกเตอร์ และขาอินพุทสูงเกินกว่ากำลังที่ทรานซิสเตอร์เพาเวอร์โมดูลจะทนได้ หรือจะต่อเข้ากับสวิทช์ฉุกเฉิน (Emergency Switch) SW<sub>1</sub> ก็ได้คือ ซึ่งสัญญาณของทั้งสองนี้จะทำการ reset flip-flop IC<sub>4</sub> ทำให้ IGBT Q<sub>3</sub> ไม่นำกระแส

- จากรูปที่ 2. ค่าเชิงปริมาณของตัวแปรต่างแสดงได้ดังนี้
- LED<sub>2</sub> = Soft Start
  - LED<sub>3</sub> = Ready
  - VR<sub>1</sub> = 470 kΩ , VR<sub>2</sub> = 100 kΩ , VR<sub>3</sub> = 20 kΩ
  - R<sub>11</sub> = R<sub>12</sub> = R<sub>15</sub> = R<sub>18</sub> = R<sub>19</sub> = R<sub>20</sub> = R<sub>21</sub> = R<sub>22</sub> = R<sub>23</sub> = R<sub>26</sub> = 10 kΩ
  - R<sub>1</sub> = R<sub>17</sub> = R<sub>25</sub> = R<sub>27</sub> = 100 kΩ
  - R<sub>13</sub> = R<sub>14</sub> = R<sub>24</sub> = R<sub>25</sub> = 1 kΩ
  - R<sub>7</sub> = R<sub>8</sub> = R<sub>9</sub> = R<sub>10</sub> = 4 Ω
  - R<sub>4</sub> = R<sub>5</sub> = 100 Ω
  - R<sub>2</sub> = R<sub>3</sub> = 33 Ω
  - R<sub>6</sub> = 50 Ω
  - C<sub>1</sub> = C<sub>3</sub> = C<sub>4</sub> = C<sub>5</sub> = 0.01 μF , 2 kV
  - C<sub>7</sub> = C<sub>8</sub> = C<sub>9</sub> = 0.01 μF
  - C<sub>2</sub> = 500 μF , 1.350 V
  - C<sub>6</sub> = 0.1 μF , 1 kV

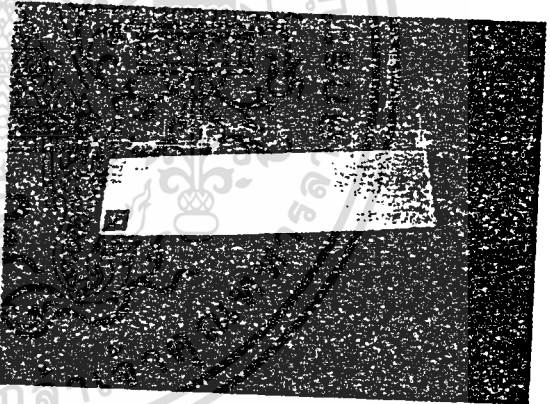
5. ผลการทดลอง

ที่เป่าสารเคลือบจะเป็นโททาเนียม ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.5% โดยจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกควมวิธีวิเคราะห์เอกซ์-เรย์ สเปกโทรสโกปีเป็นแบบ Hexagonal เมื่อจ่ายแรงดันให้ก๊าซอาร์กอน : เลกต์วเป็นไอออนบวกเข้าชนเป้าโททาเนียม ทำให้โททาเนียมหลุดออกมาทำปฏิกิริยากับไนโคโรเจน และ ถ้าเราป้อนให้ปริมาณก๊าซไนโคโรเจนมีค่าน้อย ๆ อยู่ ก็จะเกิดแค่เพียงการเรียงตัวของก๊าซอาร์กอนและโททาเนียมที่หลุดออกมาซึ่งจะมีผลการเรียงแสงค่อนข้างจะเป็นสีน้ำเงินแกมม่วง ซึ่งจะทำให้ที่ชิ้นงานมีสีเงินเข้มของโททาเนียมเคลือบอยู่ เมื่อไม่ทำการฉีดใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

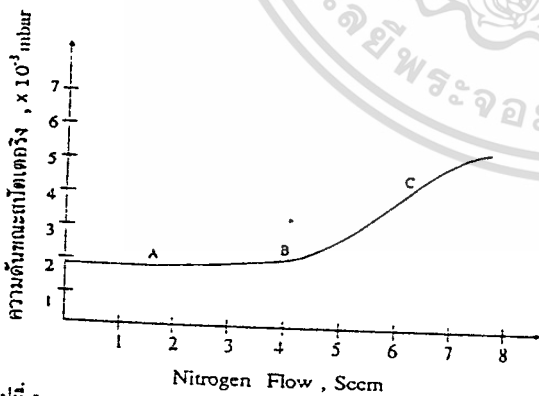
เพิ่มก๊าซไนโตรเจนมากขึ้น โททานเนียมที่หลุดออกมาจะเข้าทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนสูงขึ้น ซึ่งจุดที่ไนโตรเจนเข้าทำปฏิกิริยากับโททานเนียมพอดี คือจุดที่ไนโตรเจนถูกป้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนค่าความดันรวมของระบบเริ่มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสารประกอบ TiN และ Ti<sub>2</sub>N ขึ้นระหว่างนี้ ทำให้ชิ้นงานมีสีเปลี่ยนเป็นสีทองปลั่ง และที่จุดนี้การเรียงแสงของระบบจะมีสีเขียวแกมชมพู ซึ่งที่จุดนี้จะมี ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูงมาก ทำให้ยากต่อการควบคุม เพราะเป็น ช่วงที่เกิดขึ้นกับค่าความดันของก๊าซไนโตรเจนที่ป้อนให้แคบมาก โดย มีโครงสร้างของผลึก TiN เป็นแบบ Face Centered Cubic แต่ถ้ายัง เพิ่มการป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบอีกจะทำให้ก๊าซไนโตรเจนเหลือ จากการทำปฏิกิริยาหมดมากขึ้น ดังนั้นสีของการเรียงแสงของระบบจะ ออกเป็นค่อนข้างสีแสดแกมชมพูมากขึ้นเรื่อยๆ และทำให้ชิ้นงานมีสี ทองแดง สีม่วงแดงและสีม่วงน้ำเงินเกิดขึ้น เมื่อถึงจุดๆ หนึ่งที่ป้อน ก๊าซไนโตรเจนให้ระบบสูงเกินหมอก จะทำให้เกิดสารประกอบก่อตัว ขึ้นในรูปของโททานเนียมและไนไตรด์ ไปปกคลุมอยู่ที่บริเวณผิวหน้า ของปีศาจเสียบไททานเนียม ซึ่งถึงแม้จะเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ สูงขึ้น แต่อัตราการเกิดการชนกันของไอออนบวกอาร์กอน กับเป้า โททานเนียมไม่สูงขึ้น เนื่องจากการถูกบดบังจากสารประกอบเหล่านี้ เรา เรียกสารประกอบเหล่านี้ว่า Poisoned

- โดยที่ PB = base pressure (mbar)
- FN<sub>2</sub> = Nitrogen flow (Sccm)
- FAr = Argon flow (mbar)
- PN<sub>2</sub> = ความดันหลัง feed Nitrogen เทียบกับ PB (mbar)
- PAr = ความดันหลัง feed Argon เทียบกับ PB (mbar).
- PS = ความดันหลังจากทำการสปัดเคอริง (mbar)
- FGAr = Argon flow เพื่อทำการ โกลว์ดีสชาร์จ (Sccm)
- IS = กระแสขณะทำการสปัดเคอริง (Amp)
- VBi = แรงดันไบแอสที่ป้อนให้แก่ร่องชิ้นงาน (Volt)
- TS = เวลาที่ทำการสปัดเคอริง (min)
- VS = แรงดันไฟฟ้าขณะทำการสปัดเคอริง (Volt)
- IBi = กระแสไบแอสขณะทำการสปัดเคอริง (mA)
- PG = ความดันขณะทำการ โกลว์ดีสชาร์จ (mbar)
- TG = เวลาที่ทำการ โกลว์ดีสชาร์จ (min)
- PT = ความดันหลัง feed Nitrogen และ Argon เทียบกับ PB (mbar)

Sccm = Standard cubic centimeter per minute



รูปที่ 4. แสดงรูปถ่ายฟิล์มบางโททานเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนกระจก สไลด์



รูปที่ 3. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันรวมของระบบขณะทำการสปัดเคอริงกับค่า Nitrogen Flow

จากรูปที่ 3. ที่จุด B เป็นบริเวณที่เกิดการทำปฏิกิริยาทั้งหมดพอดีระหว่างโททานเนียมกับก๊าซไนโตรเจน ถ้าป้อนก๊าซไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นอีกจะทำให้เหลือก๊าซไนโตรเจนในระบบ ผลทำให้ความดันในระบบสูงขึ้นดังบริเวณเส้นกราฟที่จุด C ส่วนที่บริเวณเส้นกราฟที่จุด A จะมีค่าความดันค่อนข้างคงที่ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาหมดของก๊าซไนโตรเจน

ตารางที่ 1. แสดงการบันทึกผลการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงที่ไนโตรเจนทำปฏิกิริยาจนหมดกับโททานเนียม

ครั้งที่	PB	FN <sub>2</sub>	PN <sub>2</sub>	FAr	PAr	PT	PS	FGAr	PG	TG	VS	IS	TS	VBi	IBi
1	1.0x10 <sup>-4</sup>	4.23	7.6x10 <sup>-3</sup>	36.0	2.0x10 <sup>-3</sup>	2.5x10 <sup>-3</sup>	2.0x10 <sup>-3</sup>	36.0	2.2x10 <sup>-2</sup>	30	41 <sup>o</sup>	1.6	20	-160	10
2	1.6x10 <sup>-4</sup>	4.14	7.1x10 <sup>-3</sup>	36.0	1.9x10 <sup>-3</sup>	2.5x10 <sup>-3</sup>	1.9x10 <sup>-3</sup>	36.0	2.4x10 <sup>-2</sup>	1 <sup>o</sup>	42 <sup>o</sup>	1.6	1 <sup>o</sup>	-160	10
3	1.0x10 <sup>-4</sup>	3.96	6.9x10 <sup>-3</sup>	36.0	1.9x10 <sup>-3</sup>	2.4x10 <sup>-3</sup>	1.9x10 <sup>-3</sup>	40.0	5.7x10 <sup>-2</sup>	30	41 <sup>o</sup>	1.6	30	-160	10

## 6. บทสรุป

การหาจุดที่โททานิยมเข้าทำปฏิกิริยาออกซิกับไนโตรเจน ก่อนข้างอากาศสำหรับระบบหนึ่งๆ ซึ่งจุดที่เกิดปฏิกิริยาเหมาะสมนี้ ค่าความดันช่วงนี้จะมีช่วงแคบมาก ต้องอาศัยความชำนาญ และอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความละเอียดเที่ยงพอ สำหรับระบบนี้สามารถทำความดันได้ต่ำสุดถึง  $3 \times 10^{-6}$  mbar ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้ระบบสะอาดเพียงพอ การป้อนก๊าซไนโตรเจน และอาร์กอนมีความละเอียดพอเพียง และสามารถควบคุมได้ดีเมื่อใช้เครื่อง Mass-Flow Gas Measurement and Control Instrumentation ซึ่งให้อัตราการป้อนก๊าซ (Flow Rate) มีหน่วยเป็น Sccm ทำให้สามารถปรับละเอียดได้เมื่อต้องการเพิ่มหรือลดการป้อนก๊าซไนโตรเจนในแต่ละครั้งที่ทำการทดลอง เพื่อหาจุดที่เกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม ส่วนผลที่ได้ออกมาเราพบว่าได้การเคลือบที่ค่อนข้างเป็นสีทองปลั่งตามต้องการ พิสูจน์เคลือบติดแน่นกับชิ้นงานดีเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งต่อไปถ้าเราสามารถทำการวัดค่าความดันย่อย (Partial Pressure) ของก๊าซไนโตรเจนในระบบได้ ก็จะสามารถหาช่วงความดันที่พอเหมาะในการทำปฏิกิริยาของก๊าซไนโตรเจนในระบบได้ โดยการหาออกมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Partial Pressure ของก๊าซไนโตรเจนในระบบกับอัตราการป้อนก๊าซไนโตรเจนออกมา

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. ดร.สุวัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์ , “การเคลือบโททานิยมไนโตรดส์ด้วยวิธีสปัลเตอร์” , เอกสารวิชาการ ภาควิชาฟิสิกส์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี นิตยสารเทคโนโลยีครั้งที่ 6 , pp.92-102 , October 1991 ,
2. W.D.Sproul, Birt, Northwestern University, Evanston, IL, “Control of a Reactive Sputtering Process for Large Systems” , Society of Vacuum Coaters, pp.504-509,36th Annual Technical Conference Proceedings(1993)
3. William D. Sproul, “ High Rate Reactive Sputtering Process Control ” Surface and Coatings Technology, pp.73-81, 1987

## 8. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สำเร็จได้ด้วยความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบคุณ รศ.ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ , ผศ.จงรักษ์ บุญตั้ง , คุณสมศักดิ์ ชีระวัฒน์สุข , คุณชูวิทย์ โภกบุตร ,คุณสหธรรม เนาวัฒน์พงษ์ แห่งห้องปฏิบัติการเลเซอร์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (National Electronics and Computer Technology Center) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องเครื่องมือและความช่วยเหลือมาโดยตลอด

## ประวัติผู้เขียน

นายโชคชัย หาญธนาชาติ เกิดเมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2513 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2534 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับ นอกจากงานวิทยานิพนธ์ จำนวน 2 เรื่อง ได้แก่ การออกแบบสร้างคาปาซิเตอร์แรงดันสูง 24 kV และการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปีดเทอริง ประสบการณ์ในการทำงาน วิศวกรไฟฟ้าบริษัท ที.ริช. อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำกัด วิศวกรไฟฟ้าบริษัท แอดวานซ์ไมโครดีไวซ์ (ประเทศไทย) จำกัด และปัจจุบันดำรงตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัยระดับ 4 ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง