

530.4275

ภ 417 ค

ร.3

สภาวะความดันแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธี
สปัตเตอริง

29 ต.ค. 2539

ปริญญานิพนธ์
ของ
ภารุจ บัณฑิตาวิทย์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์

มีนาคม 2539

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

B. 47512

คณะกรรมการควบคุมและกรรมการสอบได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
วิชาเอกฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

คณะกรรมการควบคุม

.....*พิเชฐ ลิ้มสุวรรณ*.....ประธาน
(รศ.ดร.พิเชฐ ลิ้มสุวรรณ)
.....*ผล โกล*.....กรรมการ
(ผศ.ดร.ณสรณ์ ผล โกล)

คณะกรรมการสอบ

.....*พิเชฐ ลิ้มสุวรรณ*.....ประธาน
(รศ.ดร.พิเชฐ ลิ้มสุวรรณ)
.....*ผล โกล*.....กรรมการ
(ผศ.ดร.ณสรณ์ ผล โกล)
.....*นพวิมล นิลประทีป*.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์บัญชา ศิลปสกุลสุข)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....*ดร.ศิริญา พูลสุวรรณ*.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ดร.ศิริญา พูลสุวรรณ)

วันที่ *๙* เดือน *มิถุนายน* พ.ศ. 2539

บัญชีตาราง

ตาราง

หน้า

1	อุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นมาตรฐาน.....	37
2	เปรียบเทียบปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับฟลักซ์และอุณหภูมิสีที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่ เท่ากับ 38 sccm.....	91
3	เปรียบเทียบปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับฟลักซ์และอุณหภูมิสีที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่ เท่ากับ 36 sccm.....	91
4	เปรียบเทียบปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับฟลักซ์และอุณหภูมิสีที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่ เท่ากับ 30 sccm.....	92
5	เปรียบเทียบปริมาณแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไนโตรเจน ณ จุดที่ทำปฏิกิริยากันแล้ว ให้ฟิล์ม เคลือบสีใกล้เคียงกับสีทองมากที่สุด ของการทดลองแต่ละตอน.....	92

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตาและความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร. พิเชษฐ์ ถิ่นสุวรรณ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณสรณ์ ผลโกก ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะแนวทาง รวมทั้งการตรวจแก้ไขตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ประสาทพร จรุงจา และคุณวิยะพล พัฒนะเศรษฐกุล ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในตลอดช่วงเวลาที่ทำการวิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์สุพจน์ มุศิริ และ อาจารย์วิชุดา สุบรรณ รุ่งพีที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยพิมพ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณอรัญญา ไสภณพิจิตรไพศาล และ คุณเพ็ญภา คีจรัส ที่ได้ช่วยพิมพ์และเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจในการศึกษาของผู้วิจัย

ภารุจ บัณฑิตาวิทย์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
จุดมุ่งหมายของงานวิจัย.....	5
ขอบเขตการวิจัย.....	5
2. ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	38
4 ผลการวิจัย.....	74
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	91
สรุป.....	97
อภิปรายผล.....	97
ข้อเสนอแนะ.....	98
บรรณานุกรม.....	99
ภาคผนวก.....	101
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	108

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	แผนภาพแสดงหลักการของสปีดเตอริง.....	7
2	แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	10
3	แสดงการจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักกร่อนของเป่าสารเคลือบในพลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอริง.....	11
4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เป่าสารเคลือบ แบบพลาสมาแมกนีตรอนสปีดเตอริงรูปสี่เหลี่ยมที่ค่าความดันแก๊สต่างๆ.....	13
5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความดันแก๊สที่มีความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าต่างๆ.....	13
6	แสดงขั้นตอนต่างๆของการเกิดฟิล์มสารประกอบในระบบบริเคคทีฟสปีดเตอริงซึ่งแสดงส่วน ที่ป้อนไวปฏิกิริยาเข้าไปในกระบวนการสปีดเตอริง.....	14
7	แสดงตำแหน่งของการรวมตัวระหว่างอะตอมสารเคลือบที่ระยะต่างๆในระบบบริเคคทีฟ- สปีดเตอริง.....	15
8	แสดงเทคนิคต่างๆที่ใช้แก้ปัญหาทาร์เกิดพอยชั้นนิง.....	16
9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจัดตัวของผลึกไทเทเนียมไนไตรด์กับความดันย่อยของ แก๊สไนโตรเจน.....	19
10	แสดงการทำฟิล์มสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	20
11	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ อัตราเร็วในการปั๊มของปั๊มสุญญากาศเป็น 0 และ 2000 ลิตรต่อนาที.....	21
12	แสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่ออัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนกับไทเทเนียม (N:Ti) โดยอัตราเร็วในการปั๊มมีค่า 2000 ลิตรต่อนาที.....	22
13	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์แสดงอัตราการไหลและความดันของแก๊สไนโตรเจนที่การ จัดวางตำแหน่งของการป้อนแก๊ส 3 แบบ เมื่ออัตราการปั๊มของระบบเป็น 2000 ลิตรต่อ นาที.....	23

14	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าแคโทดกับอัตราการไหลของแก๊ส ในโตรเจน ที่กำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับเป่าสารเคลือบต่างๆ โดย U และ $UdN_{2=0}$ คือค่าความ ต่างศักย์ไฟฟ้าแคโทดกรณีที่ป้อนและไม่ป้อนแก๊สในโตรเจนให้กับระบบตามลำดับ..24	24
15	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ค่ากำลัง ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบต่างๆ.....25	25
16	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ความดัน แก๊สอาร์กอนค่าต่างๆ.....26	26
17	แสดงลักษณะการกัดกร่อนที่เป่าสารเคลือบ.....27	27
18	เปรียบเทียบผลของเป่าสารเคลือบที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนที่มีต่อความสัมพันธ์ ระหว่างความดันกับอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน.....28	28
19	เปรียบเทียบผลของเป่าสารเคลือบที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนที่มีต่อความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันไฟฟ้าแคโทดกับอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน.....28	28
20	แสดงแผนภาพการทำงานของระบบควบคุม.....30	30
21	แผนภาพสี่ซึ่งได้มาจากระบบสี่ X,Y,Z.....32	32
22	กำลังงานของสี่ซึ่งกระจายออกมาจากวัตถุจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสี่ของวัตถุนั้น.....34	34
23	เส้นทางเคิน(logus) ของวัตถุค่า ในแผนภาพสี่ระบบสี่ x, y เส้นตรงสั้นๆที่ตัดผ่านเส้นทาง เคินของวัตถุค่า ตามที่แสดงไว้ในภาพนี้เรียกว่าเส้นสมอุณหภูมิ.....34	34
24	คุณลักษณะของแสงสีแหล่งกำเนิดที่ใช้มาตรฐาน.....36	36
25	แสดงแผนภาพของเครื่องสปีดเตอร์.....38	38
26	แสดงภาคตัดขวางของเครื่องสุบกลโรตารีแบบวน.....43	43
27	แสดงส่วนประกอบของระบบสุบอากาศด้านหน้า.....45	45
28	แสดงส่วนประกอบของระบบสุบอากาศด้านหลัง.....47	47
29	เครื่องสุบอากาศแบบเพอร์ไอน้ำมัน.....50	50
30	แสดงส่วนประกอบด้านหน้าของ ทีพีจี300.....53	53
31	การวัดอัตราการไหลของแก๊สโดยเครื่องแมสโฟลว์.....55	55
32	เครื่องแมสโฟลว์ส่วนที่เป็นตัววัดและควบคุมปริมาณการไหลของแก๊ส.....56	56

33	เครื่องแมสโฟลว์ส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแสดงผล.....	57
34	แสดงแผนภาพของแหล่งจ่ายไฟ.....	58
35	แสดงส่วนของ ที่คี่เอ 1185 เอ.....	59
36	แสดงส่วนควบคุมป้อนกลับ.....	60
37	แสดงวงจรของส่วนไฟฟ้าความต่างศักย์สูง.....	60
38	วงจรป้อนความต่างศักย์ย้อนกลับ.....	61
39	ประเภทการวัดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม.....	62
40	กราฟเปรียบเทียบการสะท้อนที่ความยาวคลื่นต่างๆของ เงิน,ทอง,ทองแดงและอะลูมิเนียม.....	63
41	แสดงการจัดอุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมขณะทำการวัดสี.....	64
42	แสดงการจัดอุปกรณ์ขณะทำโกส่วิศวชาญ.....	68
39	แสดงการจัดอุปกรณ์ขณะทำการทดลองเคลือบสาร.....	72
44	ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนเป็น 10.5 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm.....	75
45	ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนเป็น 11 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm.....	76
46	ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm.....	77
47	ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนเป็น 13 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm.....	78
48	ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm.....	79
49	ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm.....	80
50	ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนเป็น 10.5 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm.....	82
51	ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนเป็น 11.5	

เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm.....	83
52 ชิ้นงานของการคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 12.5	
เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm.....	84
53 ชิ้นงานของการคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 13	
เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm.....	85
54 ชิ้นงานของการคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 14	
เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm.....	86
55 ชิ้นงานของการคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 12.	
เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 30 sccm.....	88
56 ชิ้นงานของการคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 12.5	
เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 30 sccm.....	89
57 ชิ้นงานของการคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 13	
เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 30 sccm.....	90
58 กราฟของปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับอุณหภูมิที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ	
38 .sccm	93
59 กราฟของปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับอุณหภูมิที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ	
36 .sccm	94
60 กราฟของปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับอุณหภูมิที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ	
30 .sccm	95
61 .กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไนโตรเจนและปริมาณแก๊สอาร์กอน ณ จุดที่	
ทำปฏิกิริยากันดีที่สุด.....	96
62 วงจรเกจพิราณี.....	104
63 เกจเพนนิ่ง.....	106

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มของสารภายใต้ระบบสุญญากาศ ได้เข้ามามีบทบาทต่องานด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการเคลือบผิววัสดุโดยวิธีการทางฟิสิกส์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้เปรียบกว่าวิธีการเคลือบทางเคมีที่รู้จักกันดี คือ การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) อยู่หลายประการ เช่น ไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการทิ้งสารเคมี การควบคุมคุณสมบัติของฟิล์มเคลือบให้เป็นไปตามความต้องการกระทำได้ง่าย และสามารถเคลือบได้ทั้งวัสดุที่เป็นฉนวนและตัวนำไฟฟ้า สำหรับการเคลือบฟิล์มสารที่อาศัยกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ได้แก่ การเคลือบในระบบสุญญากาศ ซึ่งมี 2 วิธี คือ (สุพรรณพงษ์ คำนวณรัตน์ และคนอื่นๆ. 2531) การระเหยสาร (evaporating) และสปัตเตอริง (sputtering)

การเคลือบสารโดยวิธีระเหยสารนิยมใช้เคลือบสารลงบนไดอิเล็กทริก(dielectric) เช่น MgF_2 (สุพรรณพงษ์ คำนวณรัตน์ และคนอื่นๆ. 2531) ลงบนเลนส์เพื่อป้องกันการสะท้อนแสง เช่น กล้องถ่ายภาพและแว่นตา เป็นต้น ซึ่งวิธีนี้มักจะใช้เคลือบอุปกรณ์ทางแสงเป็นส่วนใหญ่

ส่วนการเคลือบสารโดยวิธีที่เรียกว่า สปัตเตอริง เป็นการเคลือบสารลงบนแผ่นรองรับ (substrate) ซึ่งอาจเป็นแผ่นแก้วหรือแผ่นโลหะใด ๆ ก็ได้ (สุพรรณพงษ์ คำนวณรัตน์ และคนอื่นๆ. 2531) ดังนั้นวิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการเคลือบโลหะในทางอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างของโลหะที่สามารถเคลือบได้โดยวิธีนี้ เช่น เงิน (Ag) , ทอง (Au) , ทองแดง(Cu) , อลูมิเนียม (Al) , โครเมียม (Cr) , นิกเกิล (Ni), เหล็กไนไตรด์และไทเทเนียม (Ti) เป็นต้น

สำหรับฟิล์มของโลหะไทเทเนียมจะมีสีดำ แต่ระหว่างที่ทำการเคลือบไทเทเนียมลงบนแผ่นที่รองรับ ถ้าเราป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) ที่ใช้เคลือบสาร จะปรากฏว่าไทเทเนียมจะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนได้เป็นไทเทเนียมไนไตรด์ (titaniumnitride, TiN) (สุพรรณพงษ์ คำนวณรัตน์ และคนอื่นๆ. 2531) ซึ่งวิธีนี้เรียกว่ารีแอคทีฟสปัตเตอริง (Reactive sputtering) ไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้เป็นเซรามิกส์ (เซรามิกส์คือสารประกอบโลหะ อโลหะ หรือสารอนินทรีย์ ที่ยึดจับกันด้วยพันธะไอออนิกเป็นส่วนใหญ่และส่วน

น้อยเป็นพันธะโควาเลนต์ ในกรณีของไทเทเนียมไนไตรด์จัดเป็นเซรามิกส์ใหม่ คือกลุ่มของเซรามิกส์ที่พัฒนาขึ้นมาในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา เซรามิกส์กลุ่มนี้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง ทนการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง และบางชนิดมีคุณสมบัติด้านการรับแรงที่สูงขึ้น เซรามิกส์กลุ่มนี้ในปัจจุบัน ยังจัดว่าเป็นวัสดุที่มีราคาแพง เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตที่ซับซ้อน ดังนั้นการนำเซรามิกส์กลุ่มนี้ไปใช้งาน สามารถพบเห็นได้ในงานที่จำเพาะ (คงเพ็ญ ศรีบัวงาม อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล : 121,151) คุณสมบัติเด่นหลายประการของไทเทเนียมไนไตรด์คือ

1. มีสีทองปลั่งใกล้เคียงทองคำบริสุทธิ์ (Schintlmeister and Pacher. 1975 : 743)
2. มีอุณหภูมิหลอมตัวสูง (Schintlmeister and Pacher. 1975 : 743)
3. มีความแข็งของวัสดุในสภาพฟิล์มบางสูงมากถึง 2,800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Hintermann. 1984 : 816)
4. มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (coefficient friction) ต่ำ (Nakamura. 1982 : 24)
5. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับโลหะผสม ทำให้ฟิล์มบางมากของไทเทเนียมไนไตรด์ซึ่งยอมให้แสงผ่านได้นั้น มีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีอินฟราเรดได้ดี (Nakamura. 1982 : 2445)
6. มีความเสถียรสูงทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี พบว่าไทเทเนียมไนไตรด์ถูกกัดกร่อนได้ด้วยสารเคมีกรดแก่ $\text{HF} + \text{HNO}_3$ หรือสารละลายกรดด่างแก่ KOH ที่อุณหภูมิสูง แต่ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยาในสภาวะอื่น (Schintlmeister and Pacher. 1975 : 743) ทนการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าสเตนเลส และโลหะผสมซูเปอร์อัลลอยที่ใช้ทำกังหัน (Lacey. 1986 : 24)

จากคุณสมบัติทั้งหลายที่กล่าวมานี้ทำให้ไทเทเนียมไนไตรด์เป็นจุดสนใจของการนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง สีทองปลั่งของไทเทเนียมไนไตรด์เหมาะสำหรับการใช้เคลือบเครื่องประดับ เช่น แหวนตุ้มหู กำไล ตัวเรือนนาฬิกา กรอบแว่นตา ซึ่งให้ฟิล์มเคลือบที่สวยงามทนต่อการขีดข่วนหรือกัดกร่อนของสารเคมี คุณสมบัติด้านการทนอุณหภูมิสูงมีสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานต่ำและความแข็งสูงเมื่อนำไปเคลือบบนอุปกรณ์ตัด เจาะ เช่น คอกสว่าน มีดพก จะลดอัตราการสึกหรอ ยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานขึ้น นอกจากนี้ผิวสัมผัสระหว่างมีดพกและชิ้นงานที่มีความฝืดน้อย ช่วยให้สามารถตัดเจาะด้วยอัตราที่สูงขึ้น ในขณะที่ใช้

กำลังงานของเครื่องจักรน้อยลงต่อหน่วยผลผลิต การนำไปเคลือบลงบนผิวด้วยไมลค์นิตพลาสติกพีวีซี ช่วยลดการกัดกร่อนของสารเคมีลงได้มาก นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานที่ต่ำกว่าเหลือถึง 3 เท่า สามารถลดแรงอัดในห้องฉีดพลาสติกได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ (Lacey, 1986 : 24)

งานวิจัยการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมในไตรคัลบีนผิวชิ้นงาน ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางทั้งในด้านการเตรียมโดยอาศัยวิธีการที่แตกต่างกัน รวมทั้งการศึกษาความเหมาะสมในการนำวิธีการเคลือบฟิล์มแต่ละวิธีมาใช้ให้เหมาะสมกับประเภทชิ้นงาน โดยไม่เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของชิ้นงานเดิม ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทางด้านการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมในไตรคัลบีนวิธีสปัตเตอริง ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการวิจัยและพัฒนา ดังนี้ (สุพัฒพงษ์ คำรงรัตน์ และคนอื่นๆ, 2531)

- พ.ศ. 2526 คณะผู้วิจัย จากภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ได้เริ่มสร้างเครื่องสปัตเตอริงแบบกระแสตรงโดยใช้โถแก้วกันดัดขัดเรียบ และปิดระบบสุญญากาศด้วยแผ่นยาง โดยใช้เครื่องสูบลมโรตารีเป็นอุปกรณ์ดึงความดันให้ต่ำลง ส่วนไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการคิสซาร์จ (discharge) อากาศ ทำจากวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ (bridge rectifier) แบบง่าย ๆ และควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยวาริแอค (variac) ส่วนขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดใช้วิธีปิดด้วยกาวซิลิโคน เนื่องจากยังไม่มีกระแสควบคุม จึงทำให้เกิดการอาร์คระหว่างขั้วไฟฟ้า ในระยะเริ่มแรกนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางของทองแดง
- พ.ศ. 2527 ทางคณะผู้วิจัยได้ปรับปรุงเครื่องสปัตเตอริงเก่า โดยแก้ปัญหาคาระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้ตัวต้านทานเป็นตัวจำกัดกระแสและเริ่มใช้สนามแม่เหล็กช่วยในการคิสซาร์จมีความเสถียรขึ้น
- พ.ศ. 2528 ทางคณะผู้วิจัยได้สร้างภาชนะสุญญากาศชุดใหม่ โดยใช้ถ้วยบิกเกอร์ไฟเร็กซ์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 6 นิ้ว มาตัดปากและกันออก พร้อมออกแบบส่วนประกอบต่างๆภายในระบบใหม่ ให้มีสนามแม่เหล็กช่วยให้เกิดการคิสซาร์จของแก๊สที่เสถียรที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำลง และเปลี่ยนทิศทางการป้อนแก๊สของระบบให้เหมาะสมขึ้นมีระบบหล่อเย็นให้กับแผ่นรองรับ แต่ยังไม่มียุบบหล่อเย็นที่เป่าสารเคลือบและยังใช้ระบบเครื่องสูบลมโรตารีในการควบคุมความดันแก๊ส

จากการทดลองเคลือบลงบนกระจกเพื่อใช้เป็นกระจกหลังของคาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์ ปรากฏว่ากระจกที่เตรียมไว้สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี ได้ทำการ ทดลองเคลือบทองแดง อะลูมิเนียม นิกเกิล และไทเทเนียม พบว่าการเคลือบ ไม่มีความบริสุทธิ์ ฟิล์มสารเคลือบที่ได้มีสีค้ำหรือคล้ำไม่สดใสเหมือนการเคลือบ ทอง ทำให้ทราบว่าระบบสุญญากาศไม่สะอาด ยังมีแก๊สที่ไวปฏิกิริยา เช่น แก๊ส ออกซิเจนและไนโตรเจนอยู่สูง แก๊สอาร์กอนที่ใช้มีความบริสุทธิ์ไม่มากพอ และเครื่องสุบกลโรตารีที่ใช้ในระบบสุญญากาศไม่สามารถกำจัดแก๊สไวปฏิกิริยาที่ เกาะอยู่บนผิวของภาชนะสุญญากาศออกได้หมด แม้จะเปลี่ยนใช้แก๊สอาร์กอน ที่บริสุทธิ์ขึ้น และระมัดระวังการรั่วของระบบมากขึ้น ก็ยังพบว่าการเคลือบ ทองแดงให้มีสีสดใสได้เพียงครั้งเดียวส่วนใหญ่จะให้สีทองแดงค้ำ ๆ เนื่อง จากการเกิดออกไซด์ของทองแดง ส่วนการเคลือบไทเทเนียมในไตรด์นั้น ได้เริ่มจากอุปกรณ์ชุดนี้ โดยการป้อนแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ ระบบ และคิซซาร์จแก๊สในระบบเมื่อแผ่นเป้าเป็นไทเทเนียมทำให้เห็นเป็นสีทอง อ่อน ๆ บนผิวเป้าสารเคลือบ จากการทำปฏิกิริยาของแผ่นไทเทเนียมและแก๊ส ไนโตรเจนในระหว่างการคิซซาร์จ ซึ่งเป็นสภาวะที่แก๊สไนโตรเจนไวต่อ ปฏิกิริยาในการเกิดไทเทเนียมไนไตรด์ แม้ว่าบนแผ่นรองรับจะมีฟิล์มเคลือบ บางมาก เนื่องจากอัตราการสปัตเตอร์ (sputter) ค่อนข้างต่ำเกินไป ก็ทำให้ เห็นความเป็นไปได้ในการออกแบบระบบงานใหม่เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

พ.ศ. 2529 สำนักกรรมการวิจัยแห่งชาติได้ให้เงินอุดหนุนแก่ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี เพื่อสร้างและพัฒนาเครื่องสปัตเตอร์แบบคิซซาร์ แมกนีตรอนขนาดใหญ่ ซึ่งภาชนะสุญญากาศทำด้วยสเตนเลส ขนาดเส้นผ่า ศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร สูง 45 เซนติเมตร ปริมาตร 28 ลิตร เครื่องสปัตเตอร์ ีเครื่องนี้ใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะชนิดต่างและเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์

พ.ศ. 2532 ทางศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ได้ให้เงินอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา การเคลือบฟิล์มบางของไทเทเนียมไนไตรด์ โดยใช้วิธีสปัตเตอร์เพื่อประยุกต์ ในการเคลือบผิวแข็ง เช่น ปลายดอกสว่าน, นาฬิกาสีทอง, กรอบแว่นตาสีทอง

พ.ศ. 2535 ได้ทำการสร้างเครื่องสปัตเตอร์แบบแมกนีตรอนรูปทรงกระบอก (Cylindrical

post magnetron sputtering) โดยภาชนะสุญญากาศเป็นตู้ขนาด 60x60x60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำด้วยสเตนเลส ส่วนเป้าหรือโลหะที่ต้องการเคลือบเป็นท่อทรงกระบอก เครื่องสปัตเตอร์ริงนี้มีขนาดใหญ่ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการเคลือบชิ้นงานจำนวนมาก ๆ ผลงานนี้ได้รับรางวัลผลงานคิดค้นหรือสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งเป็นประโยชน์แก่ประเทศชาติประจำปี พ.ศ. 2535 จากสภาวิจัยแห่งชาติ

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อศึกษาสภาวะความดันแก๊สที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงแบบ ดีซี พลาสมา แมกนีตรอน

ขอบเขตของการวิจัย

ทำการทดลองเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ โดยการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเคลือบคือ

1. ความดันเริ่มต้นในภาชนะสุญญากาศก่อนทำการเคลือบ
2. ความดันแก๊สไนโตรเจน
3. ความดันแก๊สอาร์กอน
4. ความดันรวมภายในภาชนะสุญญากาศหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจน เพื่อให้ได้ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีสีทองแวววาวและติดแน่นกับผิวชิ้นงานให้ได้เท่าที่จะทำได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

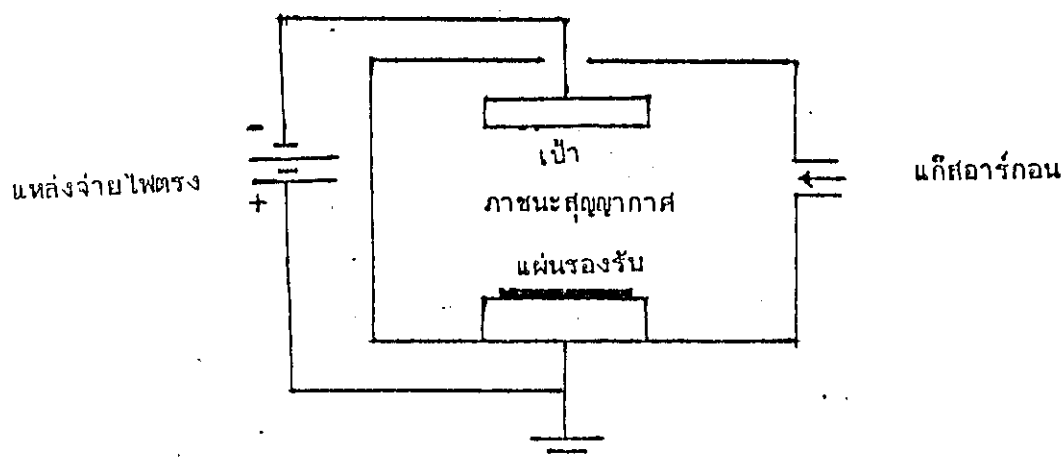
สปีดเตอริง(สุพัฒพงษ์ คำรงรัตน์ และคนอื่นๆ.2531) เป็นวิธีการเคลือบสารลงบนแผ่นรองรับหรือชิ้นงานในระบบสุญญากาศความดันต่ำ เพื่อลดสิ่งแปลกปลอมในฟิล์มเคลือบให้เหลือน้อยที่สุด โดยการแบ่งอนุภาคพลังงานสูงเข้าชนผิวหน้าของวัสดุสารเคลือบจนเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัม ทำให้อะตอมที่ผิวหน้าสารเคลือบหลุดออกมาและเคลือบบนวัสดุรองรับ(substrate)

2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปีดเตอริง

1. เป้าสารเคลือบ (target) ซึ่งเป็นตัวที่ถูกอนุภาคพลังงานสูงวิ่งชน ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงบนแผ่นรองรับ
2. อนุภาคพลังงานสูงที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ เพื่อให้อะตอมหรือโมเลกุลของเป้าสารเคลือบหลุดออก ต้องเลือกอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมหรือโมเลกุลของสารเคลือบ เพื่อให้เกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุด จึงเลือกใช้การเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาคที่วิ่งเข้าชนเป้าของสารเคลือบ
3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูง และการชนเป้าสารเคลือบเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการ

2.2 ดีซี ไดโอด สปีดเตอริง (D.C. diode sputtering)

ดีซี ไดโอด สปีดเตอริง เป็นระบบสปีดเตอริงแบบง่าย ประกอบด้วยเป้าสารเคลือบที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น แผ่นรองรับเป็นชิ้นงานที่ต้องการจะเคลือบจะวางห่างจากเป้าสารเคลือบ 4-10 เซนติเมตร เพื่อรองรับอะตอมที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากเป้าสารเคลือบ อุปกรณ์ทั้งหมดนี้บรรจุอยู่ในภาชนะสุญญากาศดังแสดงในภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แผนภาพแสดงหลักการของสปีดเตอริง

(Chapman, 1980: 187)

โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในระบบสปีดเตอริง $10^{-1} - 10^{-3}$ ทอร์ (สุพิณพงษ์ คำรงค์รัตน์ และคนอื่นๆ, 2531) แต่ถ้าต้องการให้ระบบสะอาดยิ่งขึ้นจะต้องลดความดันให้ต่ำลง $10^{-6} - 10^{-7}$ ทอร์ เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมออกจากระบบก่อนทำการเคลือบ โดยใช้เครื่องสูบกลแบบโรตารี (rotary pump) และเครื่องสูบน้ำมันแบบแพร่ไอ (diffusion pump) ทำงานร่วมกันเพื่อดึงความดันให้ต่ำลง อนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้ชนเป้าสารเคลือบนิยมใช้ไอออนของแก๊สเฉื่อย ซึ่งมีมวลสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบเพื่อให้ฟิล์มเคลือบมีความบริสุทธิ์สูง แก๊สเฉื่อยที่นิยมใช้คือแก๊สอาร์กอน (Argon, Ar) เพราะมวลปานกลาง ($A = 40$) เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สเฉื่อยด้วยกัน แก๊สอาร์กอนจะถูกป้อนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศใกล้ๆ กับเป้าสารเคลือบ ความดันย่อยของแก๊สอาร์กอนที่ใช้อยู่ในช่วง 1 - 100 มิลลิทอร์

การทำให้เกิดอนุภาคพลังงานสูงทำได้โดยการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode) 2 ขั้ว จึงเรียกระบบสปีดเตอริงแบบนี้ว่า คีซี โคโอด สปีดเตอริง เป้าสารเคลือบ (ซึ่งในที่นี้ คือ ไทเทเนียม) ต่อเข้ากับขั้วลบเพื่อทำหน้าที่เป็นแคโทด (Cathode) ส่วนแผ่นรองรับหรือที่วางแผ่นรองรับจะต่อเข้ากับไฟฟ้าบวกเพื่อทำหน้าที่เป็นแอโนด (Anode) มีการต่อแอโนดลงดิน (Ground) เพื่อป้องกันอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานเมื่อสัมผัสกับภาชนะสุญญากาศขณะทำการเคลือบ การป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (500 - 5,000 โวลต์) เข้าระหว่างขั้วไฟฟ้าจะทำให้เกิด

การร่งแสงอ่อนๆในภาชนะสุญญากาศภายใต้ความดันต่ำ เรียกร่งแสงนี้ว่า โกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) แก๊สแต่ละชนิดจะให้สีการร่งแสงต่างกันสำหรับแก๊สอาร์กอนจะให้สีการร่งแสงเป็นสีฟ้า การที่แก๊สอาร์กอนถูกคิซาร์จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน เรียกว่า พลาสมา (plasma)

ไอออนบวกจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบซึ่งเป็นขั้วลบ เป็นผลทำให้อะตอมที่ผิวสารเคลือบหลุดออกด้วยพลังงานสูงเนื่องจากการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัม พร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) ออกมา อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาจะฟุ้งกระจายทั่วภาชนะสุญญากาศไปติดบนวัสดุรองรับอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูง สามารถทำให้แก๊สอาร์กอนเกิดการแตกตัวให้อิเล็กตรอนได้อย่างต่อเนื่องรักษาสภาพการโกลว์ดิสชาร์จไว้ได้ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีพลังงานต่ำลงและวิ่งเข้าหาแอโนดเกิดกระแสไหลอย่างต่อเนืองครบวงจร

2.3 แมกนีตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering) (สุพัฒพงษ์ และคนอื่นๆ. 2531)

แมกนีตรอนสปัตเตอริง คือ การใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแคโทดไปยังแอโนด เพื่อเพิ่มการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สเฉื่อยจากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กพบว่า ถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่เป็นวงกลม ดังภาพประกอบ 2 ก ด้วยรัศมี

$$r = \frac{mv}{eB}$$

$$= \frac{2W}{vB}$$

$$r^2 = \frac{W}{\pi f B}$$

เมื่อ $f = 2.8 \times 10^8$ B รอบ/นาที เป็นการหมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน(cyclotron)

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

เมื่อ W คือพลังงานในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)

B คือความเข้มของสนามแม่เหล็กในหน่วย เกาส์ (gauss)

ดังนั้นถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 อิเล็กตรอนโวลต์และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 เกาส์ รัศมีการหมุนจะมีค่า 0.1 เซนติเมตร และความถี่ไซโคลตรอนจะมีค่า 2.8×10^8 รอบต่อวินาที ในภาพประกอบ 2 ข แสดงถึงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบสนามแม่เหล็กซึ่งมีเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่ง ระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนเกิดการชนกับอะตอมของแก๊สดังภาพประกอบ 2 ค แนวการควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน

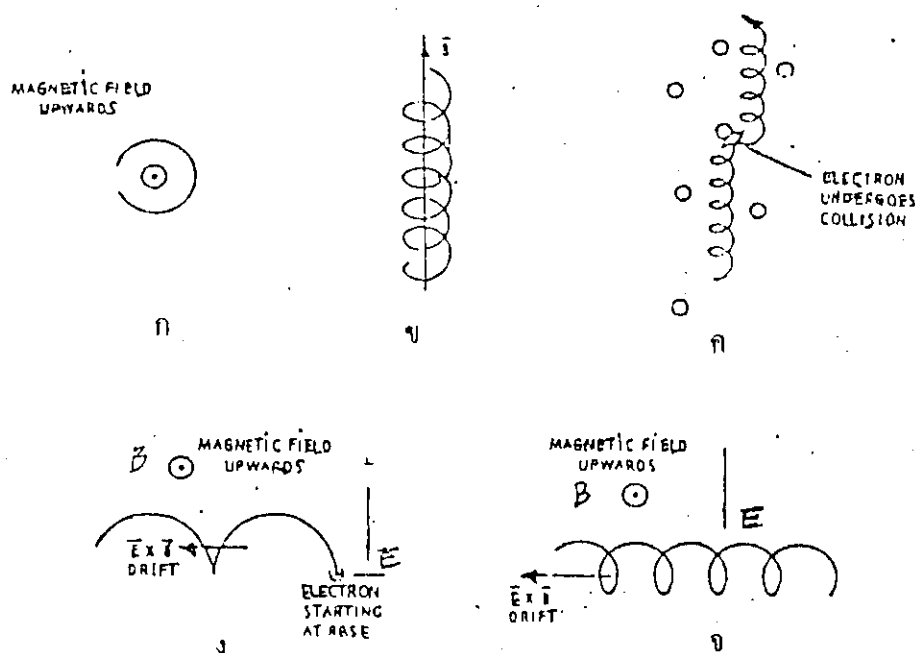
$$v_e = 10^4 \frac{E}{B} \quad \text{เมตร/วินาที} \quad (2)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร

B คือความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเกาส์

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณคาร์คสเปซ (dark space) มีค่าประมาณ 10 โวลต์ต่อเมตร และสนามแม่เหล็ก 100 เกาส์ ให้ค่าความเร็วลอยเลื่อน(drift velocity) 10^7 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าค่อนข้างสูง กรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูปเกลียว (cycloid) ดังภาพประกอบ 2 ง ถ้าอิเล็กตรอนพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน(drift motion)จะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังภาพประกอบ 2 จ พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้เด่นชัดมาก แม้จะใช้สนามแม่เหล็กค่าน้อยระหว่าง 50 - 500 เกาส์ แต่จะมีผลในทางเบี่ยงเบนแนวทางการเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปิตเตอร์ที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า (Longitudinal field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงมากนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลว์ดิสชาร์จ์เปลี่ยนแปลงไป และยังรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มเคลือบไว้ได้ดี ในกรณีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า (Transverse field) กระบวนการเพิ่มไอออนเกิดขึ้นดังนี้

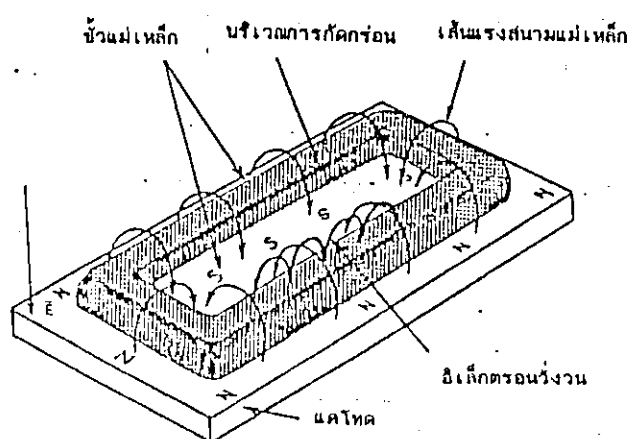


ภาพประกอบ 2 ก, ข, ค เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน ง, จ แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ

(Banchan, 1982 : 196)

หลังจากไอออนบวกชนเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพประกอบ 2 ง มีผลให้อิเล็กตรอนอยู่ในสนามแม่เหล็กใกล้แคโทดและไหลเลื่อนตามผิวหน้าของแคโทด ดังภาพประกอบ 3 ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลของแก๊สบริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบมากยิ่งขึ้น จนปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้น เป็นผลให้การผลิตไอออนบวกมีปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวแคโทด ซึ่งอาจจะสั้นกว่าระยะปลดปล่อยการชนในโคโอดสปัตเตอร์ซึ่งความดันใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมในบริเวณนี้ จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าในบริเวณคาร์คสเปซในโคโอดสปัตเตอร์ซึ่งขณะไม่มีสนาม

เป็นผลให้ความต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงลดลงมาก โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 300 - 800 โวลต์ ถ้าใช้กับสนามแม่เหล็กแมกนีตรอนทรงกระบอกเรียกว่า ไซลindrical แมกนีตรอนสปัตเตอริง (cylindrical magnetron sputtering) และเรียกพลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริง (planar magnetron sputtering) ถ้าใช้สนามแม่เหล็กแบบไดโอดสปัตเตอริงที่ใช้เป็นแผ่นราบดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แสดงการจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในพลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริง

(Chapman. 1980: 268)

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนสูงมากในระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง และพลาสมาที่เกิดขึ้นเข้มข้นมากบริเวณเป้าสารเคลือบ ทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงมากขณะที่ความดันในระบบมีค่าต่ำ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปัตเตอริงแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงรูปทรงกระบอก โดยทั่วไปอัตราการสปัตเตอริงสูงกว่า 10,000 แอมแปร์ต่อวินาที อัตราการเคลือบสูงกว่า 2,000 แอมแปร์ต่อวินาที ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่แคโทดมีค่าประมาณ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หรือสูงกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 300 - 800 โวลต์ ที่ค่าความดันประมาณ 4 มิลลิทอร์ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูงกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปัตเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่าย ข้อเสียเปรียบของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง คือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง

ข้าวไฟฟ้ามีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงเพื่อควบคุมคุณภาพของฟิล์มเคลือบ แต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริงสามารถควบคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ในกรอบสนามแม่เหล็ก จึงมีอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งเข้าสู่แผ่นรองรับปริมาณน้อย จึงลดปัญหาความร้อนบนแผ่นรองรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลงได้อย่างมาก

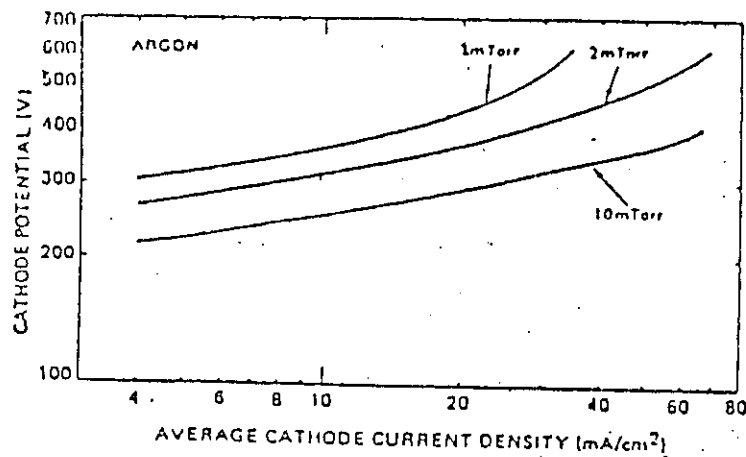
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ความต่างศักย์ไฟฟ้าคิซาร์จ และความดันแก๊สในระบบพลาสมาแมกนีตรอนสปีดเตอริง

โดยทั่วไปการทำงานของระบบพลาสมาแมกนีตรอนสปีดเตอริงใช้ความดันแก๊สอาร์กอนในช่วง 1 ถึง 10 มิลลิทอร์ ความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เป่าสารเคลือบอยู่ระหว่าง 300 - 400 โวลต์ และ 4 - 60 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบจึงอยู่ในช่วง 1 - 36 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อความเข้มและรูปร่างของสนามแม่เหล็กในระบบพลาสมาแมกนีตรอนถูกจัดไว้ โดยทำให้เกิดบริเวณการโคจรคิซาร์จที่เหมาะสม จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลดังสมการ (3)

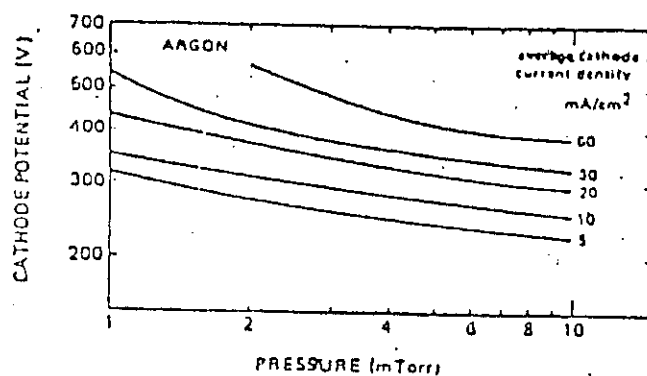
$$I = kV^N \quad (3)$$

- เมื่อ
- I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแคโทด
 - k คือ ค่าคงที่
 - V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแคโทด
 - N คือ ค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการกักเก็บอิเล็กตรอนให้อยู่ในบริเวณพลาสมา



ภาพประกอบ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้เป้าสารเคลือบแบบพลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริง รูปสี่เหลี่ยม ที่ค่าความดันแก๊สต่าง ๆ

(Howatson.1976 : 149)



ภาพประกอบ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความดันแก๊สที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

(Howatson.1976 : 149)

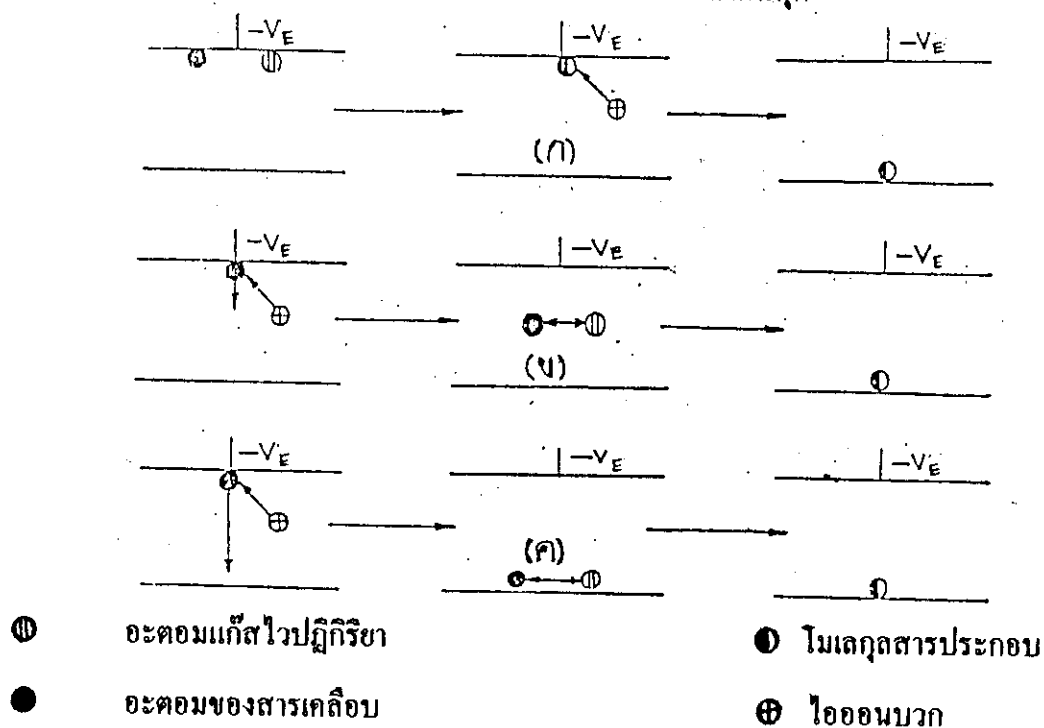
2.5 รีแอคทีฟ สปัตเตอริง (Reactive Sputtering)

เป็นกรรมวิธีการทำฟิล์มสารประกอบในระบบสปัตเตอริง สามารถทำได้โดยการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยาเข้าไปทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบระหว่างการโคจรวัดิสชาร์จ

ภาพประกอบ 7 ก การเกิดสารประกอบที่ผิวหน้าเป้าสารเคลือบนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ทาร์เกตพอยซันนิง (target poisoning) มีผลเสียคือทำให้อัตราการเคลือบลดลงเนื่องจากโมเลกุลของสารประกอบถูกสปีดเตอร์ให้หลุดไต่ยากกว่าอะตอมของสารเคลือบ แต่มีการทำปฏิกิริยาเกิดที่ผิวเป้าสารเคลือบมากที่สุด เนื่องจากมีพลาสมาเข้มข้นที่สุด

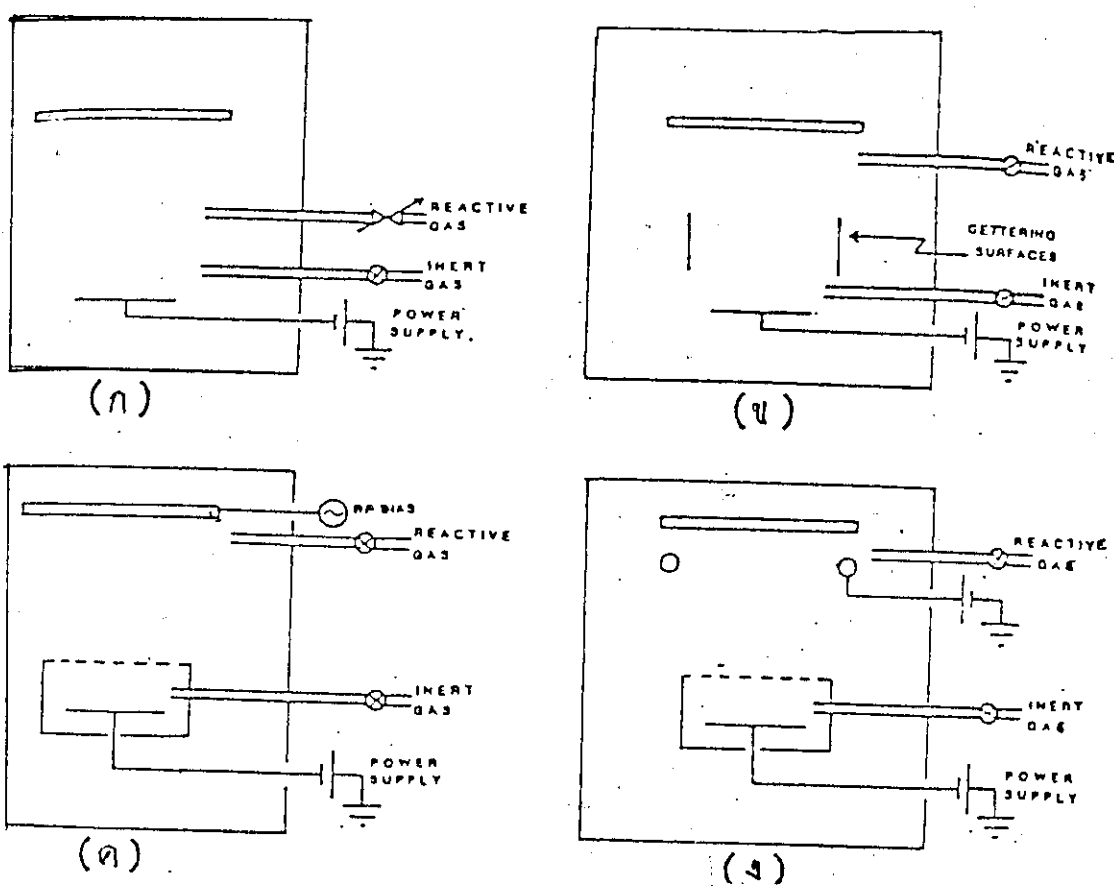
2. อะตอมสารเคลือบและอะตอมของแก๊สไวปฏิกิริยารวมกันเป็นสารประกอบ บริเวณระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับ แล้วเคลือบลงบนวัสดุรองรับ ดังภาพประกอบ 7 ข ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดไต่ยาก เนื่องจากสภาพการรวมตัวนั้นอนุรักษพลังงานและโมเมนตัมไต่ยาก เพราะว่าโอกาสที่อะตอมของสารเคลือบและอะตอมของแก๊สไวปฏิกิริยาจะเคลื่อนที่มาชนในแนวเดียวกันเป็นไปได้ได้น้อยมาก

3. อะตอมสารเคลือบรวมตัวกับอะตอมของแก๊สไวปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบบนผิวหน้าวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการให้เกิดมากที่สุด



ภาพประกอบ 7 แสดงตำแหน่งการรวมตัวระหว่างอะตอมของสารเคลือบที่ระยะต่าง ๆ ในระบบรีแอคทีฟสปีดเตอร์

จากลักษณะการรวมตัวกันระหว่างอะตอมเป้าสารเคลือบกับอะตอมแก๊สไวปฏิกิริยาทั้งตามลักษณะจะเห็นว่าเป็นผลมาจากปัจจัยบางอย่าง เช่น บริเวณการเกิดพลาสมาและทิศทางการป้อนแก๊ส ถ้าทิศทางการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยาอยู่ใกล้เป้าสารเคลือบมากเกินไปอาจทำให้เกิดทาร์เกตพอยชั้นนิ่ง วิธีการแก้ปัญหาทำได้โดยการป้อนแก๊สเฉื่อยเข้าใกล้ ๆ บริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (ทำให้เกิดพลาสมาบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบ) และป้อนแก๊สไวปฏิกิริยาเข้าใกล้ ๆ วัสดุรองรับ วิธีการแก้ปัญหาทาร์เกตพอยชั้นนิ่งโดยการจัดตำแหน่งการป้อนแก๊สที่เหมาะสมจะทำให้อัตราการเคลือบสูงขึ้น



ภาพประกอบ 8 แสดงเทคนิคต่างๆที่ช่วยแก้ปัญหาทาร์เกตพอยชั้นนิ่งในกระบวนการรีแอคทีฟสปีดเตอริง

(สุพัฒพงษ์ คำรงรัตน์ และคนอื่นๆ.2531)

ภาพประกอบ 8 ก แสดงการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยาเป็นช่วง ๆ (pulse) แต่มี
 ม่านแก๊สเฉื่อยซึ่งป้อนต่อเนื่องใกล้กับเป้าสารเคลือบ ไม่ทำให้เกิดการกระจายของแก๊สไวปฏิกิริยา

ภาพประกอบ 8 ข แสดงเทคนิคการจัดทิศทางของการป้อนแก๊สเฉื่อยบริเวณผิวหน้า
 เป้าสารเคลือบ และป้อนแก๊สไวปฏิกิริยาใกล้ผิวหน้าวัสดุรองรับและใช้ปั๊มเกดเตอร์ริง (gettering
 pump) ช่วยลดแก๊สไวปฏิกิริยาที่อาจกระจายเข้าใกล้บริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบเทคนิคนี้เริ่มใช้
 โดย ซิลเลอร์ (Schiller) และคณะ

ภาพประกอบ 8 ค แสดงเทคนิคการใช้กระแสแรง เพื่อช่วยลดปริมาณแก๊ส
 ไวปฏิกิริยาที่เข้าใกล้บริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบและทำการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าไบแอส(bias)
 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟความถี่สูงในช่วงความถี่วิทยุ (radio frequency) ให้แก่วัสดุรองรับ ทำให้ฟิล์ม
 สารประกอบมีความเร็วสูงขึ้น เทคนิคนี้พัฒนาโดย เวสต์วูด (Westwood) และคณะ

ภาพประกอบ 8 ง แสดงเทคนิคการใช้กระแสแรงเช่นเดียวกับรูป ค และใช้
 คีซีโกล์ดิสชาร์จ เพื่อช่วยเพิ่มปฏิกิริยาระหว่างอะตอมสารเคลือบกับแก๊สไวปฏิกิริยาให้เกิดใกล้กับ
 วัสดุรองรับ เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาโดย เชียร์เลอร์ (Scherrel) และคณะ

2.6 การศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มสารประกอบไทเทเนียม ไนไตรด์

ฟิล์มสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์เตรียมได้จากการทำรีแอคทีฟสปีดเตอร์ริง โดย
 ป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมสารประกอบไทเทเนียมระหว่างการโคล์ดิสชาร์จ
 และแก๊สไนโตรเจนที่ใช้มีความบริสุทธิ์สูง

2.6.1 ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน

จากการทดลองของวิทท์เมอร์ (Wittner) ที่ศึกษาผลของความดันย่อยของ
 แก๊สไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ในกระบวนการ
 เคลือบแบบเออาร์อี (ARE , Activiaed Reactive Evaporation) พบว่าโครงสร้างสารประกอบ
 ไทเทเนียมไนไตรด์เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของฟิล์มสารประกอบ เมื่อช่วงความดันของแก๊ส
 ไนโตรเจนมีค่าต่าง ๆ ดังนี้

2.6.1.1 ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่า 1×10^{-5} ทอร์ โครง
 สร้างสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์เป็นแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) โดยฟิล์มมีสีเงิน

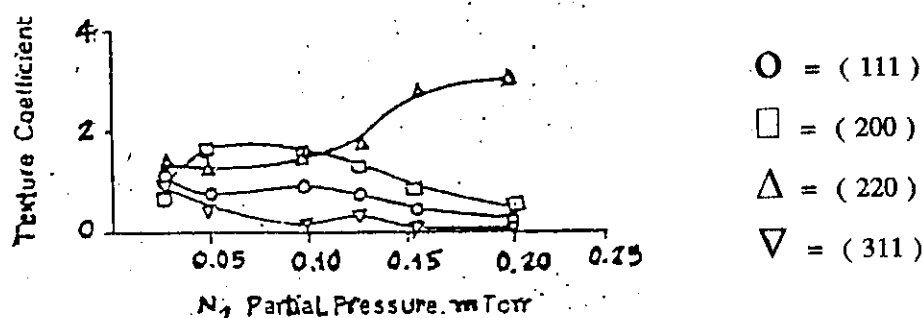
ซึ่งเป็นสีของไทเทเนียมบริสุทธิ์ เนื่องจากปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่แทรกตัวระหว่างช่องว่างของผลึกไทเทเนียมน้อยกว่าปริมาณที่ใช้ในการเรียงตัวเป็นไทเทเนียมไนไตรด์

2.6.1.2 ความดันย่อยของแก๊สอยู่ระหว่าง 1.5×10^{-5} ทอร์ ถึง 1.5×10^{-4} ทอร์ อะตอมไนโตรเจนสามารถรวมตัวกับอะตอมไทเทเนียมเกิดสารละลายของแข็ง (solid solution) โครงสร้างของผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลฟิล์มสารประกอบที่ได้มีสีเงิน แต่โครงสร้างของผลึกแข็งขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของไนโตรเจนให้มากยิ่งขึ้นจนกระทั่งอัตราส่วนระหว่าง Ti : N เท่ากับ 2 : 1 สีของฟิล์มเคลือบจะเปลี่ยนเป็นสีทองเหลือง

2.6.1.3 ความดันของแก๊สไนโตรเจนอยู่ระหว่าง 1.5×10^{-4} ทอร์ ถึง 2.0×10^{-4} ทอร์ ทำให้เกิดสารประกอบสองชนิด คือ Ti_2N และ TiN ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal) และเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (face center cubic) ตามลำดับ ฟิล์มของสารประกอบมีสีเข้ม และที่ค่าความดันย่อยเท่ากับ 2.4×10^{-4} ทอร์ ความแข็งของฟิล์มเคลือบมีค่าสูงสุด

2.6.1.4 ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีค่า 3.0×10^{-4} ทอร์ สารประกอบที่ได้คือ TiN ฟิล์มสารประกอบมีสีทองปลั่ง และเมื่อเพิ่มความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้นสีของฟิล์มของสารประกอบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล น้ำตาลบรอนซ์ และแดงตามลำดับ

ภาพประกอบ 9 แสดงระนาบการจัดตัวของหลักไทเทเนียมไนไตรด์เปลี่ยนแปลงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเปลี่ยนไป จากรูปจะเห็นว่าเมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีค่า 2.5×10^{-5} ทอร์ การจัดวางตัวของผลึกไทเทเนียมไนไตรด์ที่ระนาบ (220) มีจำนวนปานกลาง เมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีค่าสูงขึ้นเป็น 1.3×10^{-4} ทอร์ การจัดวางตัวของผลึกไทเทเนียมไนไตรด์จะมีค่า (220) จำนวนมากขึ้นอย่างช้า ๆ และเมื่อเพิ่มความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเป็น 1.6×10^{-4} ทอร์ และ 2.0×10^{-4} ทอร์ การจัดวางตัวของผลึกที่ระนาบ (220) จะมีค่ามากที่สุด

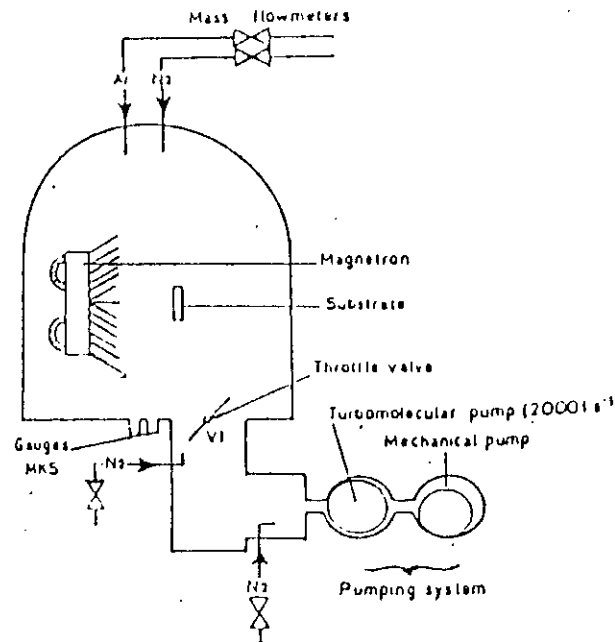


ภาพประกอบ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการจัดตัวของผลึกไทเทเนียมไนไตรด์กับความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน

(Sproul and others.1989 : 360)

ในกระบวนการเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงนั้น มีตัวแปรหลายชนิดที่มีผลต่อฟิล์มสารประกอบ การศึกษาถึงตัวแปรเหล่านี้จะช่วยลดปัญหาต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อฟิล์มสารประกอบเช่น ในการศึกษากระบวนการรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริงโดยวิธีสมดุลของมวล (mass balance) จำเป็นต้องรู้อัตราการไหลของแก๊สภายในระบบและปริมาณอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ สปัตเตอร์อีลด์และความดันแก๊สภายในระบบเป็นตัวชี้บ่งปริมาณอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ อัตราการปั๊มของระบบ อัตราการป้อนแก๊สเฉื่อยและแก๊สไวปฏิกิริยา รวมทั้งตำแหน่งของการป้อนแก๊สแต่ละชนิดเข้าสู่การป้อนระบบเป็นตัวชี้อัตราการไหลของแก๊สในระบบ

จากภาพประกอบ 10 ระบบประกอบด้วยเครื่องสูบลูเบอร์โบโมเลกุลาร์ (turbomolecular pump) โดยมีอัตราการปั๊ม 2,000 ลิตร/นาที สามารถดึงแก๊สให้มีความดันต่ำถึง 7.5×10^{-7} ทอร์ เป้าแคโทดรูปสี่เหลี่ยมมีขนาด 200 x 100 ตารางมิลลิเมตร หนา 7 มิลลิเมตร แก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในระบบมีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99.995 เปอร์เซนต์ (Danroc and others. 1987 : 84) ควบคุมความดันแก๊สโดยแมสโฟลว์มิเตอร์ (Mass flowmeter) และใช้เมมเบรนเกจ (membrane gauge) วัดความดันแก๊สภายในภาชนะสุญญากาศ



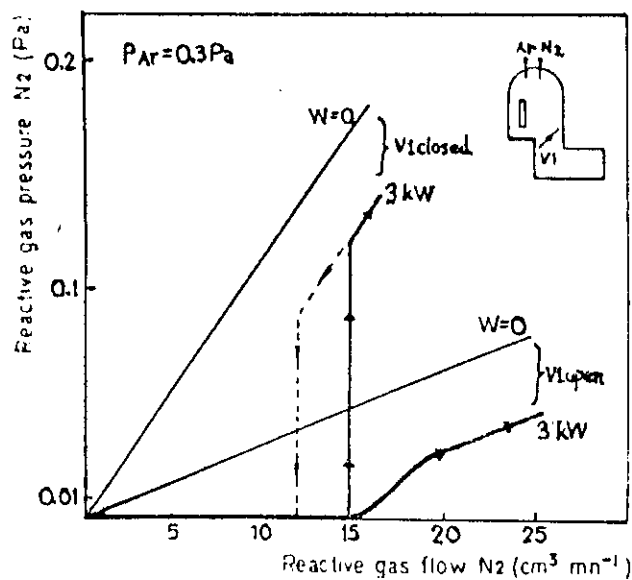
ภาพประกอบ 10 แสดงการทำฟิล์มสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ด้วยระบบแมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง

(Danroc and others. 1987 : 83-90)

2.6.2 อัตราการปั๊ม (Pumping speed)

พิจารณาถึงผลความเร็วในการดึงแก๊สของปั๊มสุญญากาศที่มีผลต่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน จากภาพประกอบ 11 จะเห็นว่าความดันแก๊สไนโตรเจนเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน โดยพิจารณาอัตราการปั๊มต่าง ๆ กัน ซึ่งสามารถควบคุมอัตราเร็วในการปั๊มวาล์ว V_1 ถ้าอัตราการปั๊มของระบบต่ำ (วาล์ว V_1 เปิดแคบ) ความดันแก๊สไนโตรเจนคงที่เมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่ำกว่า 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร / นาที จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงกว่า 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร / นาที ความดันแก๊สไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อความดันแก๊สไนโตรเจนมีค่ามากกว่า 9×10^{-4} ทอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนจะเป็นแบบเชิงเส้น (linear) เกิดสารประกอบไนไตรด์ที่เป่าสารเคลือบเรียกว่าทาร์เกตพอยชันนิง ทำให้การสปีดเตอร์ที่เป่าสารเคลือบลดลง ความดันแก๊สภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าสูง แต่ขณะที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนลงมาเกิดการทาร์เกตพอยชันนิง จะค่อยลดลงกราฟจึงมีลักษณะฮิสเตอร์ีซิสตามเส้นปะตามภาพประกอบ 11

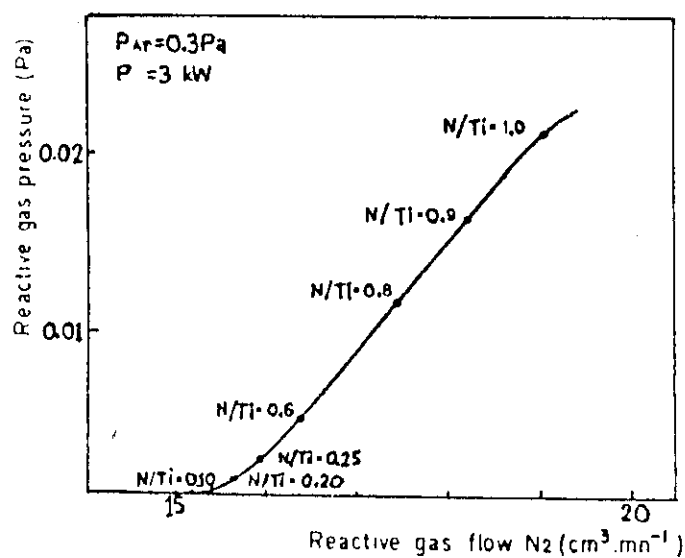
แต่เมื่ออัตราเร็วในการบีบสูงขึ้น (วาล์ว V_1 เปิด) ความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนจะเปลี่ยนแปลงช้าลง และปรากฏการณ์ฮีสเตอร์รีซิสจะหายไป



ภาพประกอบ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อัตราเร็วในการบีบของปั๊มสุญญากาศเป็น 0 และ 2000 ลิตร / นาที

(Danroc and others.1987 : 86)

เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการบีบจะทำให้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีค่าลดลงและเปลี่ยนแปลงช้าลง ทำให้การควบคุมค่า X ของ TiN_x เป็นไปได้ในช่วงที่ X มีค่าระหว่าง 0.6 และ 1.0 ดังแสดงให้เห็นในภาพประกอบที่ 12

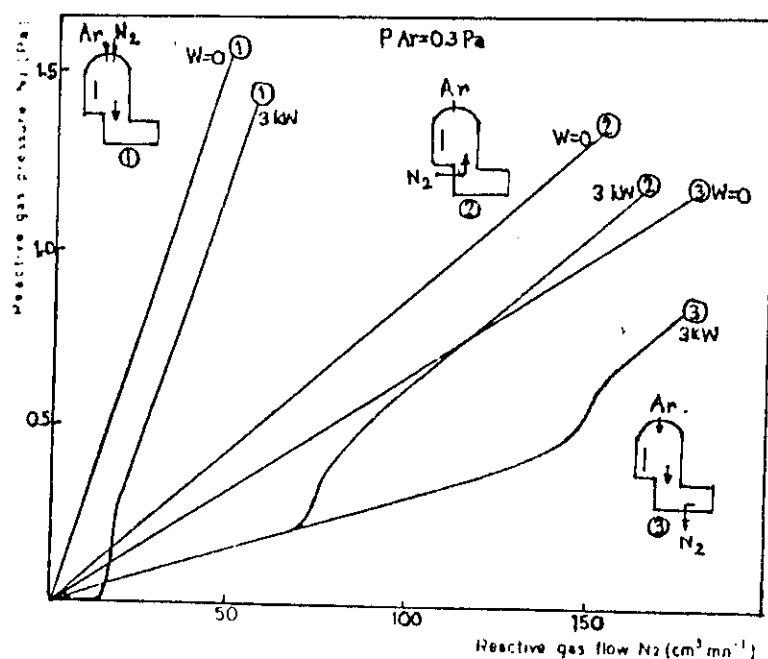


ภาพประกอบ 12 แสดงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่ออัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนกับไทเทเนียม (N:Ti) โดยอัตราเร็วในการปั๊มมีค่า 2000 ลิตร / นาที

(Danroc and others, 1987 : 86)

2.6.3 ตำแหน่งและทิศทางการป้อนแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas in let position) (Danroc and others, 1987)

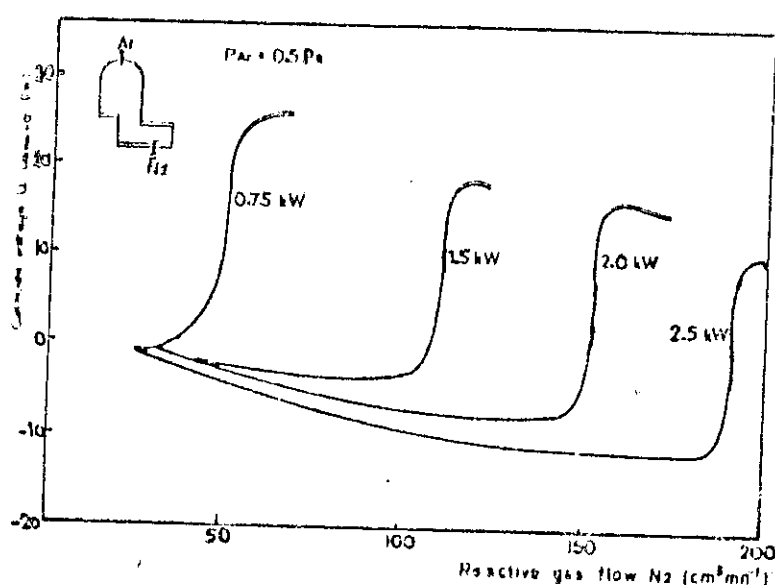
การเปลี่ยนแปลงจาก Ti ไปเป็น TiN เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่ออัตราการปั๊มเอาแก๊สไนโตรเจนออกมีค่าสูง ผลของตำแหน่งของการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่อการเปลี่ยนแปลง Ti เป็น TiN แสดงภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์อัตราการไหลและความดันแก๊สในโครเจนที่การจัดวางตำแหน่งของการป้อนแก๊ส 3 แบบ เมื่ออัตราการป้อนของระบบเป็น 2000 ลิตร / นาที (Danroc and others, 1987 : 87)

จากภาพประกอบ 13 ตามเส้นกราฟที่ 1 แก๊สในโครเจนมีทิศทางการไหลผ่านเป่าสารเคลือบ ทำให้มีการรวมตัวของ Ti กับ N เกิด TiN ปริมาณมาก โดย TiN ที่เกิดขึ้นจะเคลือบลงบนวัสดุรองรับ แต่มีบางส่วนกลับลงไปที่เป่าสารเคลือบเป็นผลให้เกิดการเกิดพอยชั้นนิงบนเป่าสารเคลือบ แต่เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนแก๊สไปติดตั้งใกล้กับทางออกสู่เครื่องสูบทอร์โบโมเลกุลาร์ แก๊สในโครเจนส่วนใหญ่จะไหลตรงไปยังปั๊มและมีเพียงบางส่วนแพร่ขึ้นไปสู่บริเวณเป่าสารเคลือบ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความดันของอะตอมในโครเจนบริเวณใกล้ปั๊มซึ่งมีปริมาณน้อย กับอะตอมของแก๊สคาร์บอนบริเวณเป่าสารเคลือบซึ่งมีปริมาณมาก อีกสาเหตุคือระยะปลอดการชนของไนโตรเจนมีค่าสั้น ทำให้โอกาสที่อะตอมของไนโตรเจนชนกับอะตอมของอาร์กอนมีมากจึงกระเจิงกลับไป การแพร่ของแก๊สในโครเจนเป็นไปได้ยาก การรวมตัวระหว่าง Ti กับ N จึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ สังเกตได้จากช่วงการเปลี่ยนแปลง Ti ไปเป็น TiN จากกราฟเส้นที่ 3 ซึ่งมีความชันน้อยกว่ากราฟเส้นที่ 1 และ 2 โอกาสที่จะเกิด

ทาร์เกตพอยชันนิงของการป้อนแก๊สในตำแหน่งที่ 3 จึงน้อยกว่า แต่สิ้นเปลืองแก๊สไนโตรเจนมากกว่า เพราะต้องเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนให้สูงขึ้นเพื่อทำให้เกิดสารประกอบ TiN ในปริมาณที่เท่ากับกรณีการป้อนแก๊สไนโตรเจนในตำแหน่งที่ 1 และ 2 สำหรับการป้อนแก๊สที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบ กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง



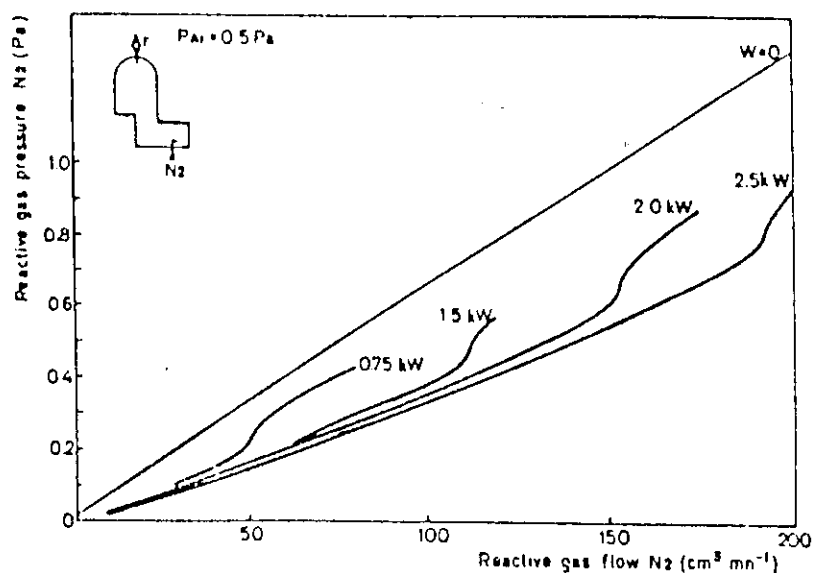
ภาพประกอบ 14 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าแคโทดกับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่กำลังไฟฟ้าให้กับเป้าสารเคลือบต่าง ๆ โดย U และ $U_{dN_{2=0}}$ คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแคโทดกรณีที่ไม่ป้อนและไม่ป้อนแก๊สไนโตรเจน ให้ระบบตามลำดับ

(Danroc.and others.1987 : 88)

2.6.4 กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเป้าสารเคลือบ (Power applied to the

target) (Danroc.and others.1987 : 88)

จากภาพประกอบ 14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบ โดยสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงจาก Ti ไปเป็น TiN พบว่า อัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นกับกำลังไฟฟ้า แสดงว่าถ้ากำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นอัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนจะต้องมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อที่จะให้อัตราส่วน Ti : TiN มีค่าเหมาะสมต่อการเกิด TiN ส่วนการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าแคโทดในช่วงการเปลี่ยนแปลง Ti ไปเป็น TiN ทาร์เกตพอยซันนิ่งไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเกิดสปีดเตอร์กล่าวคือ ศักย์ไฟฟ้าแคโทดเปลี่ยนแปลงด้วยค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเกิดทาร์เกตพอยซันนิ่งตามภาพประกอบ 15

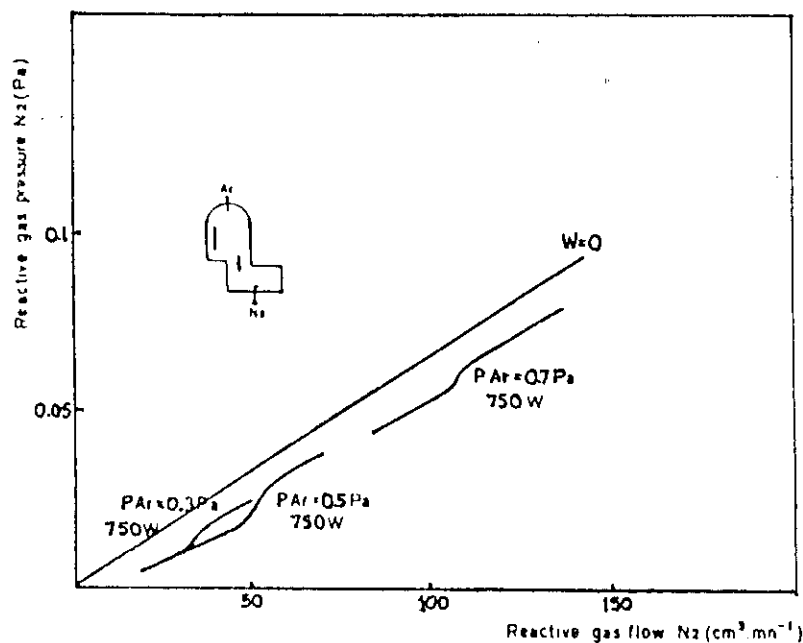


ภาพประกอบ 15 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการใช้ของแก๊สไนโตรเจนที่ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป่าสารเคลือบต่าง ๆ

(Danroc. and others. 1987 : 88)

2.6.5 อิทธิพลของแก๊สอาร์กอนต่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (Danroc.and others.1987)

เมื่อความดันแก๊สอาร์กอนภายในระบบสูงขึ้น ความแตกต่างของแก๊สไนโตรเจนระหว่างปั๊มและเป่าสารเคลือบมีค่าสูงขึ้น ดังภาพประกอบ 16 เมื่อจุดป้อนแก๊สไนโตรเจนอยู่ใกล้เครื่องสูบลูทอร์โบโมเลกูลาร์ ความดันแก๊สอาร์กอนที่สูงขึ้นมีผลทำให้ระยะปลดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สสั้นเข้า การแพร่ของแก๊สไนโตรเจนถึงจุดป้อนแก๊สสู่เป่าสารเคลือบสามารถทำได้โดยการเพิ่มความแตกต่างความดันแก๊สไนโตรเจนระหว่างจุดป้อนแก๊สและเป่าสารเคลือบให้สูงขึ้น เมื่ออัตราการแพร่แก๊สไนโตรเจนสู่เป่าสารเคลือบมีค่าสูง สัมพันธ์กับอัตราการสปีดเตอร์ของไทเทเนียมทาร์เกตพอยซันนิ่ง หรือการเปลี่ยนจาก Ti ไปเป็น TiN ณ เป่าสารเคลือบจะเกิดขึ้น ทำให้ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในระบบเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 16 พบว่าถ้าความดันของแก๊สไนโตรเจนในระบบมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นที่ความดันของแก๊สอาร์กอนมีค่าสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การนำไปใช้ประโยชน์ของไนโตรเจนมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 16 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันแก๊สอาร์กอนค่าต่าง ๆ

(Danroc.and others.1987 : 88)

2.6.6 อิทธิพลการใช้เป้าสารเคลือบที่ถูกกัดกร่อนต่อการเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์

(Danroc.and others.1987)

ในการศึกษาอิทธิพลการใช้เป้าสารเคลือบต่อการเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ จำเป็นต้องศึกษาช่วงการเปลี่ยนแปลงจาก Ti ไปเป็น TiN ที่อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบเมื่อเคลือบด้วยแผ่นเป้าใหม่ และยังไม่มีการกัดกร่อนแต่อย่างใด



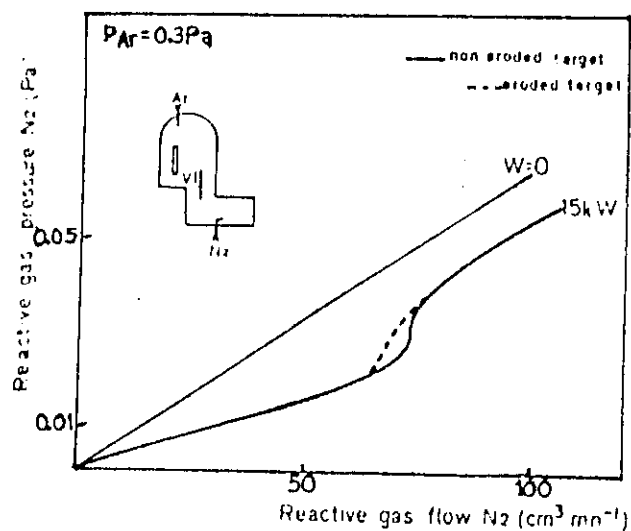
เป้าที่ถูกกัดกร่อนแล้ว



เป้าที่ยังไม่ถูกกัดกร่อน

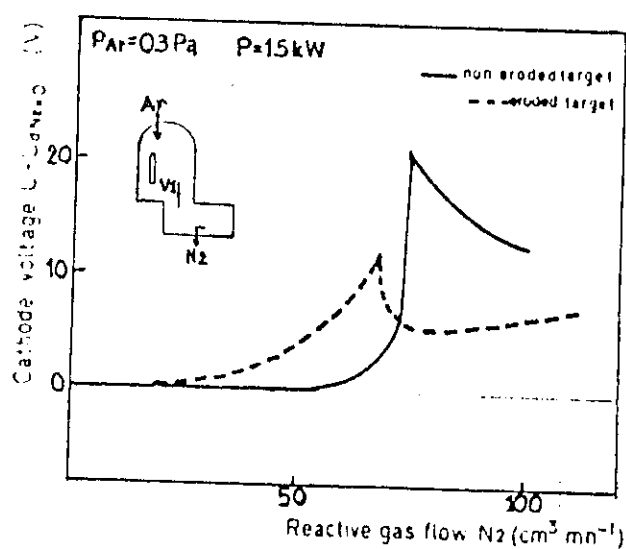
ภาพประกอบ 17 แสดงลักษณะการกัดกร่อนที่เป้าสารเคลือบ (Danroc.and others.1987)

จากภาพประกอบ 17 พบว่าแผ่นที่ถูกกัดกร่อนแล้วจะเริ่มการเปลี่ยนแปลงจาก Ti ไปเป็น TiN ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่ำกว่าส่วนจุดสิ้นสุดของการเปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงจาก Ti ไปเป็น TiN กว้างกว่า มีความชันของการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า ทำให้การควบคุมการเกิดสารประกอบ TiN ได้ง่าย ดังแสดงในภาพประกอบ 18 และ 19 จากการสังเกตนี้สามารถอธิบายได้ว่า เป้าสารเคลือบที่ถูกกัดกร่อนเป็นร่องลึก จะมีความเข้มพลาสมาและอัตราการสปัตเตอร์สูงสุด ณ จุดที่ถูกกัดกร่อนลึกที่สุด และพบว่าการเกิดสีทองของ TiN บนเป้าสารเคลือบจะเริ่มเกิดที่ขอบพลาสมาก่อน แล้วจึงขยายไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นของพลาสมาสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สสูงขึ้น



ภาพประกอบ 18 เปรียบเทียบผลของเป้าสารเคลือบที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

(Danroc.and others.1987:89)



ภาพประกอบ 19 เปรียบเทียบผลของเป้าสารเคลือบที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าแคโทดกับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

(Danroc.and others.1987:89)

2.7 ทฤษฎีการควบคุมความดัน

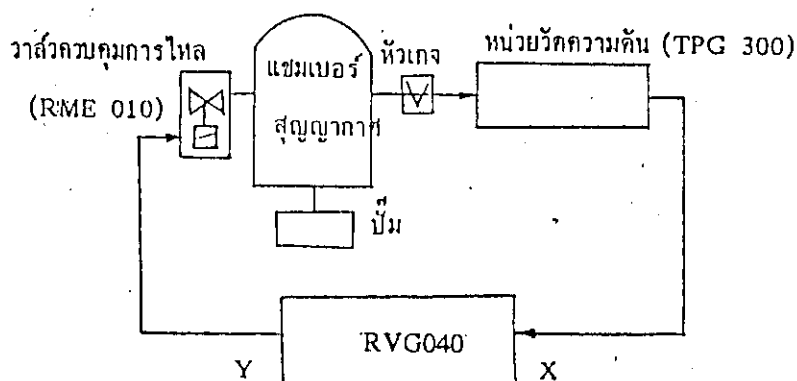
เนื่องจากระบบสปัตเตอร์เป็นระบบที่จะต้องเคลือบสารภายในภาชนะสุญญากาศที่มีความดันในช่วง 10^{-7} มิลลิบาร์ - 10^{-3} มิลลิบาร์ ซึ่งความดันนี้เป็นความดันรวมหลังจากป้อนแก๊สอาร์กอน (Ar) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) เข้าไปผสมกันภายในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งจะมีความดันรวมที่ต้องการเคลือบอยู่ในช่วง 10^{-4} มิลลิบาร์ - 10^{-3} มิลลิบาร์ และเพื่อต้องการให้อัตราการเคลือบและสีของการเคลือบมีความคงที่ตลอด ขณะทำการเคลือบจึงต้องควบคุมความดันรวม ความดันย่อย(ความดันของแก๊สไนโตรเจนและความดันของแก๊สอาร์กอน)ให้คงที่ ค่ากระแสแคโทดและความต่างศักย์ของแคโทดให้คงที่ตลอดเวลาการเคลือบ ในกรณีที่ต้องการเคลือบหลาย ๆ ครั้ง ให้ได้คุณสมบัติของสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์เหมือนกันทุกครั้ง ก็จะต้องควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ให้มีค่าเท่ากันทุกครั้งของการเคลือบ

ในการศึกษาการเคลือบฟิล์มสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์โดยกระบวนการรีแอคทีฟสปัตเตอร์นี้ พบว่าในการเคลือบแต่ละครั้งค่าความดันรวม(ความดันอาร์กอน+ความดันไนโตรเจน)มีค่าไม่คงที่ ดังนั้นจึงมีผลต่อสีของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนฟิล์ม

พิจารณาเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ทำให้ความดันไม่คงที่

- 1) อัตราการปั๊มออกมากกว่าอัตราการป้อนแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจน(กรณีนี้ไม่คิดการรั่วเข้าไปในภาชนะ) ทำให้ความดันรวมต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้
- 2) อัตราการปั๊มออกน้อยกว่าอัตราการป้อนแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจน ทำให้ความดันรวมสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้

ดังนั้นเมื่อต้องการให้ความดันรวมมีค่าคงที่ ก็จะต้องให้อัตราการปั๊มออกเท่ากับอัตราการปล่อยแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนให้ไหลเข้าไปในภาชนะสุญญากาศในอัตราที่เท่ากับอัตราการปั๊มออก ซึ่งหน่วยควบคุมความดันและเครื่องวัดความดันจะต้องทำงานประสานกัน ซึ่งจะแสดงเป็นแผนภาพดังภาพประกอบ 20



x = สัญญาณควบคุมความดัน

y = สัญญาณควบคุมการไหลของแก๊ส

ภาพประกอบ 20 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบควบคุม

พิจารณาภาพประกอบ 20 หัวเกจอ่านค่าความดันแล้วส่งสัญญาณไปยังหน่วยวัดความดัน (TPG 300) หน่วยนี้จะทำการแปลงสัญญาณเป็นตัวเลข (digital) เพื่อแสดงค่าความดันให้เห็นและขณะเดียวกัน ก็จะส่งสัญญาณเอาต์พุตซึ่งเป็นสัญญาณควบคุม (สัญญาณ x) ไปยังหน่วยควบคุมความดัน (RVG 040) โดยสัญญาณที่ส่งไปนี้จะเป็ค่าความต่างศักย์ต่างๆ โดยค่าความต่างศักย์นี้จะแปรผันตรงกับความดัน เช่น ถ้าความดันเป็นบรรยากาศค่าความต่างศักย์ก็จะเป็นค่าสูงสุด ดังนั้นหน่วยควบคุมความดันจะแปลงสัญญาณควบคุม (สัญญาณ x) เป็นสัญญาณควบคุมวาล์วควบคุมการไหลของแก๊สเป็ค่าน้อยต่าง ๆ ตามสัญญาณควบคุมโดยทั่วไปแล้ว จะพบว่า สัญญาณควบคุมวาล์วควบคุมการไหล(สัญญาณ y) $\propto 1 / \text{สัญญาณควบคุม (สัญญาณ } x)$ การตั้งค่าความดันเพื่อให้ระบบภาชนะสุญญากาศมีความดันที่ที่ค่าใดค่านึงนั้น จะตั้งค่าที่หน่วยควบคุมความดัน (RVG 040)

พิจารณาในกรณีค่าความดันในภาชนะสุญญากาศต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ หัวเกจจะส่งสัญญาณไปยังหน่วยวัดความดัน (TPG300) เพื่อแปลงสัญญาณให้เป็นตัวเลข ขณะเดียวกันก็ให้เอาต์พุตออกมาเป็นสัญญาณควบคุม (สัญญาณ x) และสัญญาณนี้จะเป็สัญญาณอินพุตให้กับ

หน่วยควบคุมความดัน (RVG 040) หน่วยควบคุมความดันจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่เข้าไปกับค่าที่กำหนดไว้ ถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศต่ำกว่าค่าความดันที่กำหนดไว้ หน่วยควบคุมความดันจะส่งสัญญาณควบคุมการไหลของแก๊ส (สัญญาณ Y) เป็นความต่างศักย์สูงเพื่อให้วาล์วเปิดมาก ทำให้แก๊สไหลเข้าไปในภาชนะสุญญากาศซึ่งจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้น

พิจารณากรณีค่าความดันในภาชนะสุญญากาศสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ เมื่อหัวแก๊สส่งสัญญาณไปยังหน่วยวัดความดัน (TPG 300) เพื่อแปลงสัญญาณเป็นระบบตัวเลขและขณะเดียวกันก็ส่งสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณควบคุม(สัญญาณ X) ไปยังหน่วยควบคุมความดัน(RVG040) หน่วยนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าความดันในภาชนะสุญญากาศกับค่าที่กำหนดไว้ ถ้าค่าความดันในภาชนะสุญญากาศสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ก็จะส่งสัญญาณควบคุมไปยังวาล์วควบคุมการไหลโดยมีค่าความต่างศักย์ต่ำ เพื่อให้วาล์วเปิดน้อยและให้ปั๊มทำการปั๊มเอาแก๊สออกไปมากกว่าอัตราการป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะทำให้ความดันต่ำลงให้ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้

2.8 ทฤษฎีสี

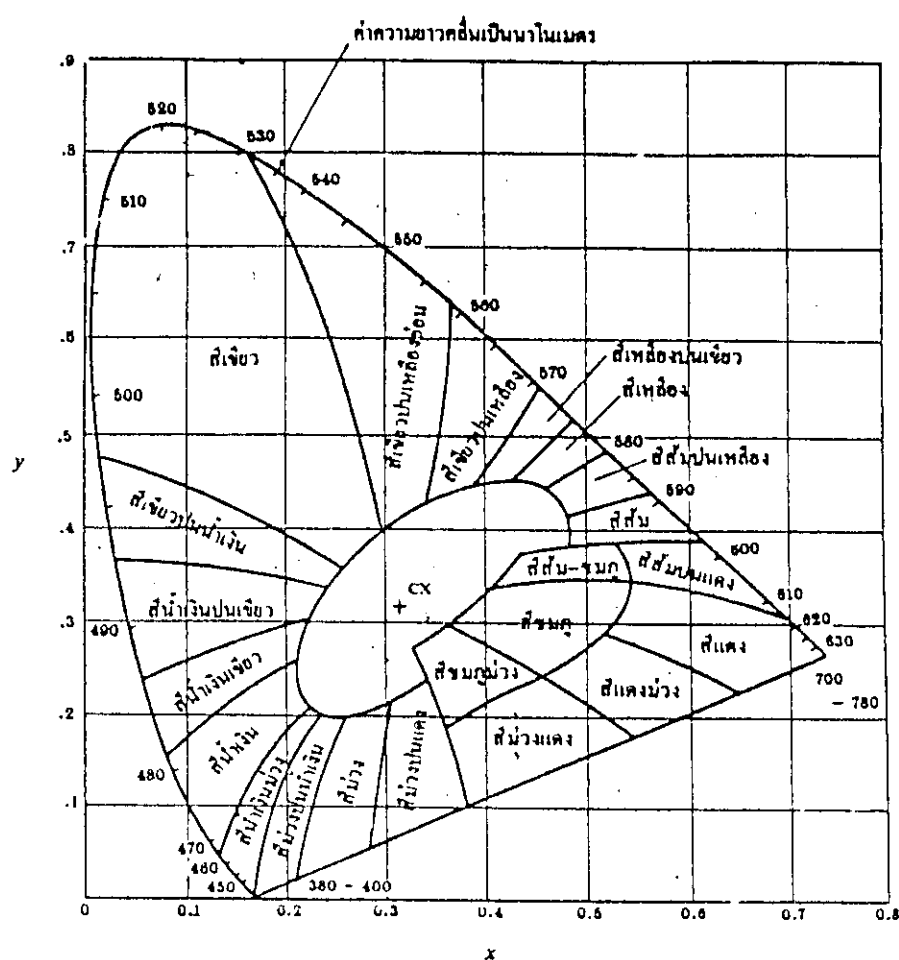
2.8.1 แผนภาพสี (chromaticity diagram)

ในการวัดสีของชิ้นงานไทเทเนียมไนไตรด์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyser) ซึ่งเครื่องจะบอกค่าของสีออกมาเป็นตัวเลขของพิกัด x และ y จะต้องนำค่าที่เครื่องอ่านได้ไปเทียบกับแผนภาพสี (chromaticity diagram) อีกที จึงจะบอกได้ว่าสีที่เครื่องอ่านได้เป็นสีใดบ้าง แผนผังสีมาตรฐานเป็นของคณะกรรมการส่องสว่างระหว่างประเทศ (International Committee on Illumination หรือ Commission Internationale de l'Eclairage ,CIE) โดยซีไออีได้กำหนดความยาวคลื่นของแสงสีจากแม่สีทั้งสามดังนี้

แสงสีแดง	มีความยาวคลื่น	700 นาโนเมตร
แสงสีเขียว	มีความยาวคลื่น	546.1 นาโนเมตร
แสงสีน้ำเงิน	มีความยาวคลื่น	435.8 นาโนเมตร

โดยซีไออีเปลี่ยนระบบพิกัดของแสงสีแดง(Red, R) ,สีเขียว(Green, G)และสีน้ำเงิน(Blue, B) มาเป็นระบบพิกัดของแสงสี X, Y, Z ซึ่งค่าของ X, Y, Z เป็นค่าที่สมมติขึ้น และมีแต่ค่าบวกทั้งสิ้น ในระบบสี X, Y, Z นี้ สี X, Z นี้จะให้ความรู้สึกในเรื่องสีล้วน (hue) กับความอิ่มตัวของแสงสี (saturation) เท่านั้น ส่วนความรู้สึกในความสว่าง (brightness) จะ

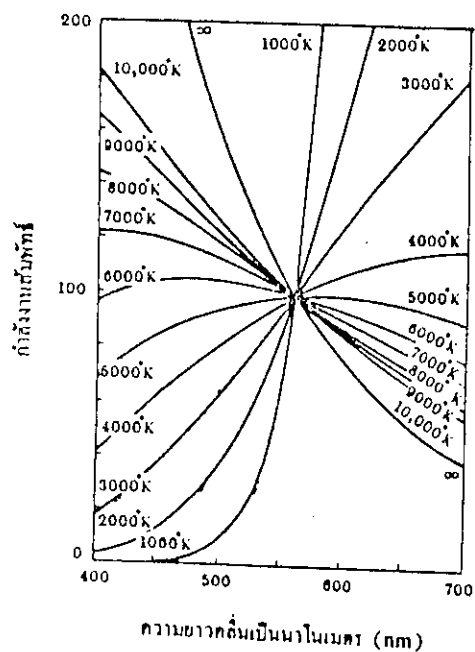
มีอยู่แต่เฉพาะในแสงสี Y เท่านั้น การเลือกระบบสี X, Y, Z ในระบบสามมิติเช่นนี้ หากต้องการจำแนกสีตั้งแต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่รวมถึงความเข้มตัวของแสงสีอาจทำได้โดยการจัดทำแกนพิกัด x, y ขึ้นตามภาพประกอบ 21 ซึ่งเป็นแกนพิกัดสองมิติ และมีประโยชน์ในการศึกษาเรื่องสีสำหรับรายละเอียดการแปลงพิกัดของสีดูได้จาก ภาคผนวก ก



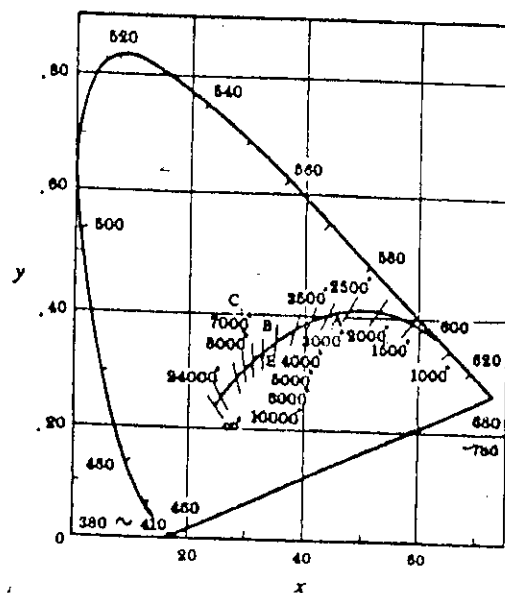
ภาพประกอบ 21 แผนภาพสีพิกัด $x-y$ (ชวัช เมฆสวรรค์ และ โยชิโกะชิ ซาวามูระ. 2538 : 15)

2.8.2 อุณหภูมิสี (colour temperature)

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมนอกจากจะบอกค่าพิกัด x, y ของสีแล้ว ยังบอกค่าของอุณหภูมิสี T_c ด้วย โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อวัตถุมีความร้อน ก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีการกระจายพลังงานของแสง (spectral distribution of light) ค่าการกระจายพลังงานของแสงนี้ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับการกระจายพลังงานจากเทหวัตถุที่มีสีดำ (radiation from a black body) วัตถุดำนี้เป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วจะดูดซึมพลังงานแสงสีทุกอย่างที่ตกกระทบเอาไว้หมด แล้วจะกระจายพลังงานนั้นออกมาในรูปความร้อน พลังงานแสงสีที่กระจายจากวัตถุดำนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุดำนั้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 22 ที่อุณหภูมิต่างๆ กำลังงานส่วนใหญ่จะมาจากแสงสีแดง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการกระจายกำลังงานของแสงสีจะเริ่มเป็นเอกรูป (uniform) มากขึ้น และกำลังงานส่วนใหญ่จะมาจากแสงสีน้ำเงิน ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับการกระจายกำลังงานแสงสีจากหลอดไฟฟ้าที่มีไส้หลอด ซึ่งเรียกการกระจายกำลังงานของแสงสีแบบนี้ว่า อุณหภูมิสี (colour temperature) เมื่อนำมาเขียนภาพลงในแผนภาพสีในภาพประกอบ 21 ซึ่งจะได้เป็นเส้นโค้ง เรียกว่าเส้นทางเดินของวัตถุดำ (black body locus) ตามที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 23 เส้นตรงสั้นๆ ที่ตัดผ่านของเส้นทางเดินของวัตถุดำเรียกว่าเส้นสมอุณหภูมิ (isothermperature line) จุดต่างๆ ที่อยู่บนเส้นสมอุณหภูมิเดียวกันจะแสดงว่า วัตถุนั้นจะมีอุณหภูมิเท่ากัน ถึงแม้ว่าจุดที่กล่าวถึงนั้นจะเป็นจุดที่ไม่ได้อยู่บนเส้นทางเดินของวัตถุดำก็ตาม

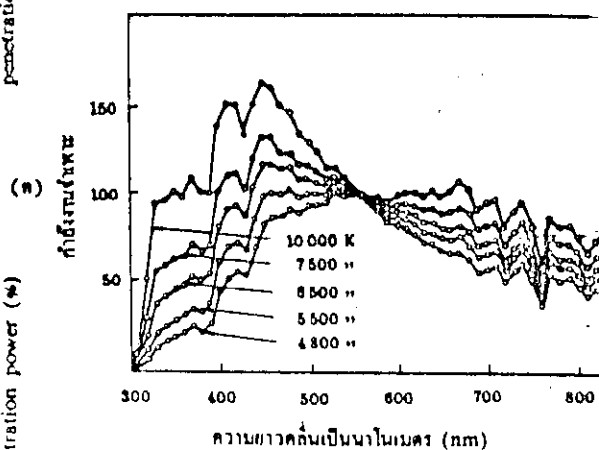
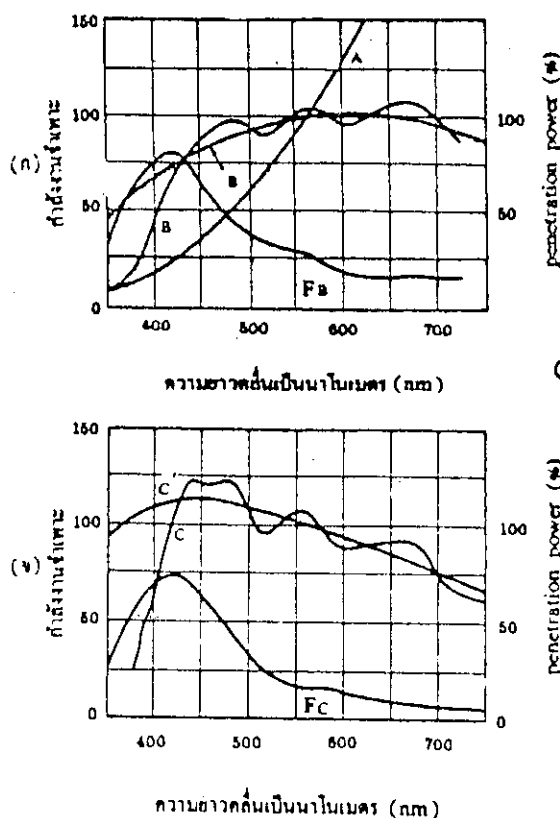


ภาพประกอบ 22 กำลังงานของสีที่กระจายออกจากวัตถุจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสีของวัตถุนั้น
(รัช เมฆสวรรค์ และ โยชิโกะชิ ซาวามูระ. 2538 : 15)



ภาพประกอบ 23 เส้นทางเดิน (logus) ของวัตถุ ในแผนภาพสีระบบสี x,y เส้นตรงสั้นๆ
ที่ตัดผ่านเส้นทางเดินของวัตถุ ตามที่แสดงไว้ในภาพนี้เรียกว่าเส้นสมอุณหภูมิ
(รัช เมฆสวรรค์ และ โยชิโกะชิ ซาวามูระ. 2538 : 16)

ภาพประกอบ 24 แสดงถึงแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นมาตรฐานต่างๆ ที่มี
 อุณหภูมิของสีและมีการกระจายกำลังงานของสีต่างๆกัน ภาพประกอบ 24 ก และ ข นั้น A
 เป็นคุณลักษณะสีที่ได้จากหลอดไฟฟ้ามาตรฐานชนิดไส้หลอดทั้งตะเตนที่มีอุณหภูมิสี 2,856
 องศาเคลวิน ส่วน B และ C นั้นเป็นคุณลักษณะสีที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์แสงบางชนิดกับแหล่ง
 กำเนิดแสงของเส้นโค้งซึ่งมีอุณหภูมิสี 4,874 กับ 6,774 องศาเคลวินตามลำดับ เส้นโค้ง
 B', C' แสดงคุณลักษณะการกระจายกำลังงานของสีจากวัตถุค่าที่มีเท่ากับอุณหภูมิสีของเส้นโค้ง
 A และ C ส่วนภาพประกอบที่ 24 ค แสดงให้เห็นคุณลักษณะสีของแหล่งกำเนิดแสง ที่มี
 อุณหภูมิสีสูงๆดังแสดงไว้ในตาราง 1



(ก), (ข) Standard light sources, A, B' and C.

(ค) Various light sources of D.

- A : หลอดไฟฟ้านาตรฐานชนิดไส้หลอดทั้งหลอดที่มีอุณหภูมิแสงสี 2856 องศาเคลวิน
- B, C : แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานที่ได้จาก A โดยผ่านฟิลเตอร์แสงบางชนิด
- B', C' : การกระจายกำลังงานแสงจากเทอร์โมลูเซนต์ไส้หลอดที่มีอุณหภูมิแสงสีเท่ากับอุณหภูมิแสงสีของ B, C ตามลำดับ
- F_B, F_C : คุณลักษณะแสงสีของฟิลเตอร์แสงบางชนิด
- D : การกระจายกำลังงานแสงมาตรฐาน ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแสงสีที่กำหนดให้
(ยกตัวอย่างเช่น D₅₀, D₇₅ เป็นต้น)

ภาพประกอบ 24 คุณลักษณะของแสงสีแหล่งกำเนิดที่ใช้เป็นมาตรฐาน

ก, ข แสดงคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดแสง A, B, C ซึ่งสามารถจัดทำขึ้นได้

ค แสดงคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดแสง D ที่มีอุณหภูมิสีสูงๆ

(รัช เมฆสวรรค์ และ โยชิโกะชิ ซาวามุระ. 2538 : 17)

ตาราง 1 อุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นมาตรฐาน(ธวัช เมฆสวรรค์ และ โยชิคะชิ
ซาวามุระ. 2538 : 17)

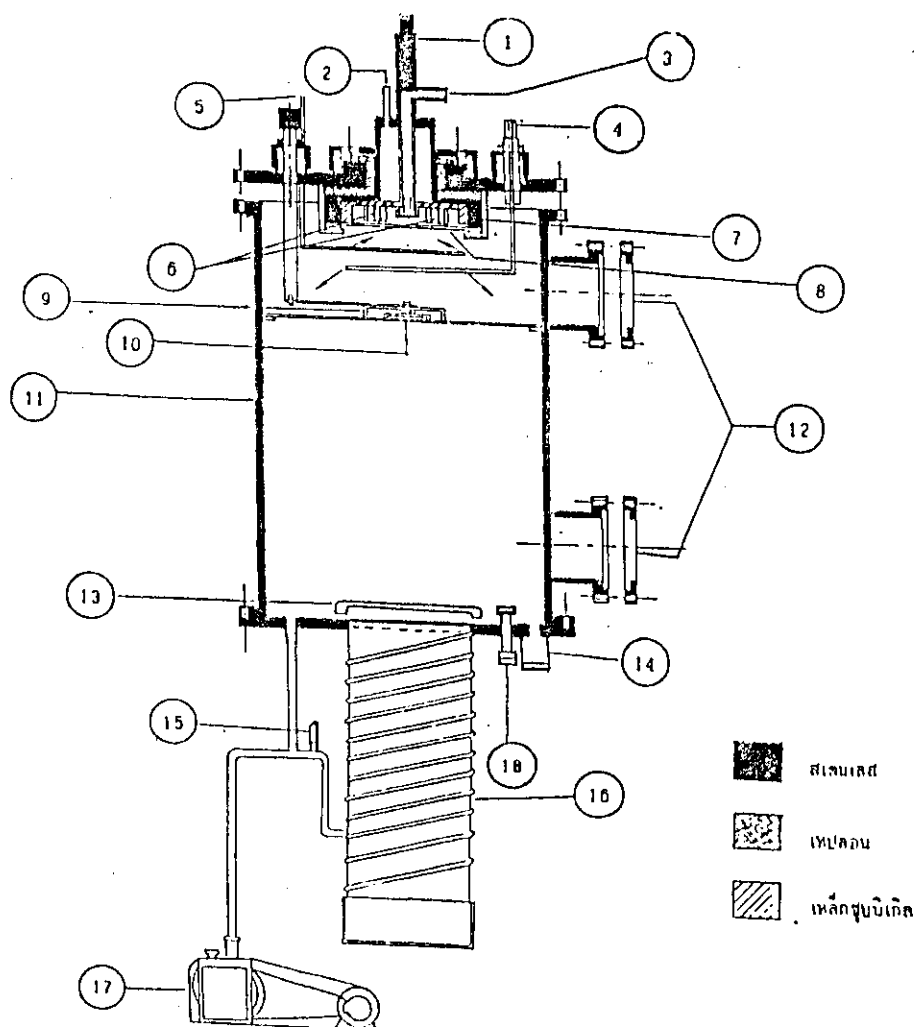
แหล่งกำเนิดแสงที่เลือกใช้เป็นมาตรฐาน	อุณหภูมิของสีเป็นองศาเคลวิน
A	2856
B	4874
C	6774
D ₅₅	5503
D ₆₅	6504
D ₇₅	7504

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบพลาสมา แมกนีตรอน สปีดเตอริง



ภาพประกอบ 25 แสดงแผนภาพของเครื่องสปีดเตอริง

จากภาพประกอบ 25 แสดงอุปกรณ์ดังนี้

1. ขั้วต่อไฟฟ้าแรงสูงของแคโทด
2. น้ำหล่อเย็นออก
3. น้ำหล่อเย็นเข้า
4. ท่อแก๊สอาร์กอน
5. ท่อไนโตรเจน
6. แม่เหล็ก
7. แคโทด
8. เป่าสารเคลือบ
9. แผ่นปิดชิ้นงาน
10. แผ่นชิ้นงาน
11. ผนังภาชนะสุญญากาศ
12. หน้ากระจก
13. วาล์วใหญ่ของระบบปั๊ม
14. เกจแบบเพนนิ่ง
15. เกจแบบพิรานิ
16. เครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน
17. เครื่องสูบกกลโรตารี
18. ขั้วต่อไฟฟ้าสำหรับการทำโกลด์คิสซาร์จและการป้องกันความต่างศักย์ย้อนกลับ

3.1.4 แม่เหล็ก (Magnet)

ในระบบพลาสมาแม่เหล็กนิวตรอนสปีดเตอร์จึงต้องมีส่วนที่เป็นแม่เหล็กถาวร เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าทั้งหมดเพื่อช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนที่ผลิตจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมของแก๊สเฉื่อยมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในลักษณะชนผิวเป้าสารเคลือบซ้ำๆ ต่อเนื่องกันไป

3.1.5 แคโทด (Cathode)

เป็นโครงสร้างแคโทดแบบพลาสมาแม่เหล็กนิวตรอนที่ออกแบบและสร้างด้วยสเตนเลส โดยมีพื้นที่ครอบคลุมเป้าสารเคลือบเป็นรูปร่างกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร มีซิลด์แคโทดป้องกันมิให้เกิดการสปีดเตอร์นอกบริเวณเป้าสารเคลือบ เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับต่อไฟลบจากต่อไฟลบจากแหล่งจ่ายไฟในการทำการทดลอง

3.1.6 เป้าสารเคลือบ (target)

เป็นเป้าสารเคลือบไทเทเนียม ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร หนา 3 เซนติเมตร ติดตั้งอยู่ที่ฝาภาชนะสุญญากาศด้านบน มีระบบน้ำหล่อเย็นไหลเข้าออก เพื่อทำการระบายความร้อนจากเป้าสารเคลือบขณะทำการทดลอง

3.1.7 แผ่นปิดชิ้นงาน (Shutter)

แผ่นปิดชิ้นงาน ทำจากโลหะอลูมิเนียม เพื่อใช้ปิดชิ้นงานมิให้ถูกเคลือบในขณะที่กำลังเคลือบหรือเพื่อเลือกปิดบนชิ้นงานมิให้ถูกเคลือบในขณะที่ทำการเคลือบชิ้นงานอื่นในสถานะที่ต่างกัน

3.1.8 แผ่นชิ้นงาน (Substate)

แผ่นชิ้นงานในการทดลองเลือกใช้แผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นอลูมิเนียมที่ขัดผิวจนเรียบ ก่อนทำการทดลองต้องทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตนหรือ อัลกอฮอล์ เพื่อกำจัดคราบไขมันและฝุ่นละอองที่บริเวณผิวด้านหน้าที่ต้องการเคลือบ

3.1.9 ขั้วต่อไฟฟ้าสำหรับป้องกันความต่างศักย์ย้อนกลับและทำการโกลว์ดีสชาร์จ

ขั้วต่อไฟฟ้าสำหรับการทำโกลว์ดีสชาร์จ เพื่อทำความสะอาดชิ้นงานที่ต้องการเคลือบและเป็นขั้วสำหรับต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับในขณะที่ทำการเคลือบ เป็นขั้วไฟฟ้าจากทองแดงติดตั้งอยู่ที่ส่วนล่างของภาชนะสุญญากาศ และมีสายลวดทองแดงร้อยต่อ

ต่อเชื่อมไปสู่บริเวณแท่นวางชิ้นงานด้านบน

3.1.10 เครื่องสูบลมโรตารี (Rotary Pump)

เครื่องสูบลมโรตารี ทำหน้าที่ในการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่อง คือ ซีล ฟลันนาร์ แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง

3.1.1 ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber)

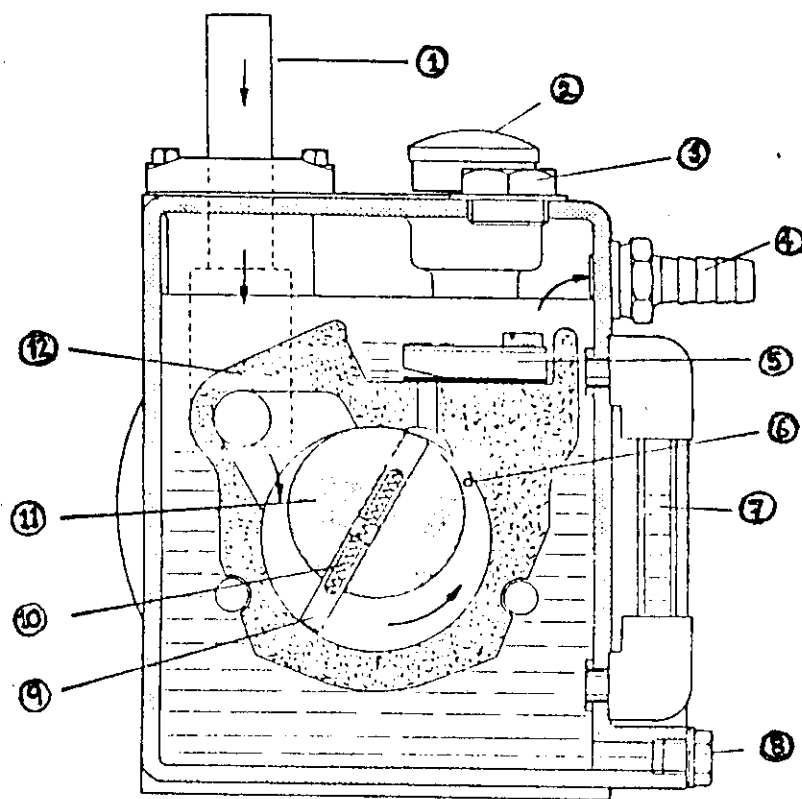
ภาชนะสุญญากาศที่สร้างขึ้นทำจากเหล็กไร้สนิมสเตนเลส หน้า 3.5 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 28.5 เซนติเมตร และ สูง 45 เซนติเมตร ทำให้ปริมาตรของระบบสุญญากาศ มีค่าประมาณ 28 ลิตร มีช่องหน้าต่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร 2 ช่อง เพื่อสังเกตดู กระบวนการสปีดเตอร์ริง และควบคุมภายในในระบบสปีดเตอร์ริง เช่น คู่มือของการเกิดโกลว์ คิสซาร์จ ลักษณะพลาสมา การเลื่อนตำแหน่ง ชัตเตอร์(shutter) การจัดตำแหน่งชิ้นงาน และท่อป้อนแก๊ส เป็นต้น การออกแบบเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อลดควอดรอลลอสส์(wall loss) และที่ ขนาดเหมาะสมกับเบสเพลต (base plate) ของระบบสุญญากาศที่มีอยู่ การออกแบบให้มีความสูงถึง 45 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้กับระบบสปีดเตอร์ริงแบบคิซี แมกนีตรอน ฝาครอบบนของระบบสุญญากาศออกแบบให้มีช่องใส่แคโทด และช่องป้อนแก๊ส 3 ช่อง ช่องใส่แกนชัตเตอร์ 2 ช่อง ช่องระบบน้ำหล่อเย็น 2 ช่อง และขั้วต่อไฟฟ้าแรงสูงของ แคโทด ซึ่งช่องเหล่านี้สามารถดัดแปลงใช้สอดคล้องกับอุปกรณ์ควบคุมอื่นๆได้

3.1.2 ระบบหล่อเย็นเข้าและออกจากเป่าสารเคลือบ

โดยใช้ปั๊มน้ำยี่ห้อซัมไฮ รุ่น PMD-311 ซึ่งมีอัตราการปั๊มน้ำ 10 ลิตรต่อนาที ต่อ สายยางเข้าสู่ระบบน้ำหล่อเย็นที่ฝาครอบบนของระบบสุญญากาศ เพื่อให้เกิดการไหลเวียน ของน้ำเย็นระหว่างเป่าสารเคลือบ และดึงน้ำหล่อเย็นสเตนเลส ขนาดกว้าง 23 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร

3.1.3 ท่อป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน

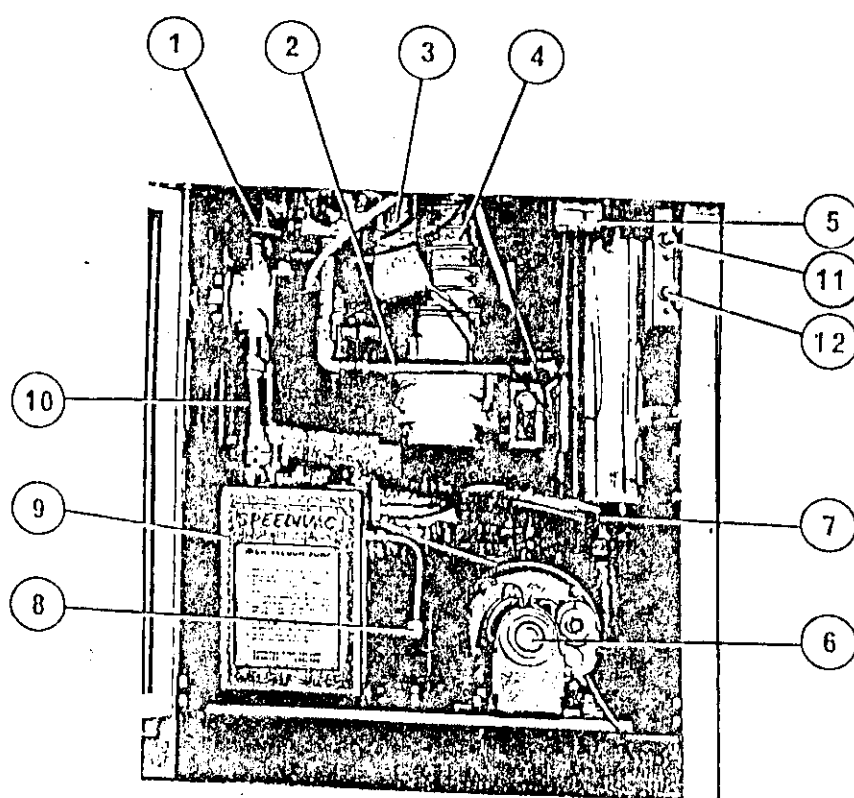
ท่อป้อนแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนทำจากท่ออะลูมิเนียมขดเป็นวงแหวน เจาะรูหลายรู เพื่อให้แก๊สถูกป้อนจากหลายๆ จุด และกระจายสม่ำเสมอตลอดวงแหวน ท่อ ป้อนแก๊สอาร์กอนจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนยาวกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงแหวน ของท่อป้อนแก๊สไนโตรเจน และมีทางไหลของแก๊สจากวงแหวนผ่านรูเล็กๆพุ่งเข้าสู่ผิวหน้า



ภาพประกอบ 26 แสดงภาคตัดขวางของเครื่องสูบลมโรตารีแบบแวน (ชัยวิทย์.2526 : 10)

จากภาพประกอบ 26 แสดงส่วนประกอบของเครื่องสูบลมโรตารีดังนี้

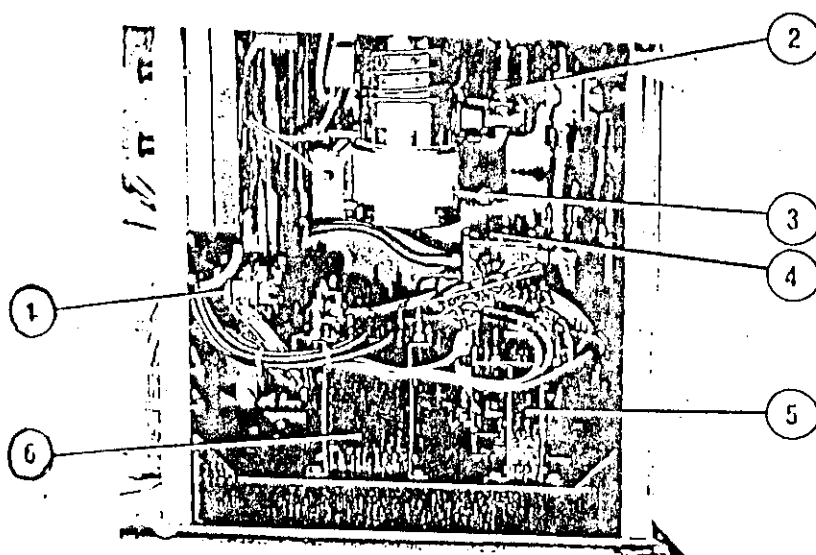
1. ท่อต่อกับระบบสุญญากาศ
2. วาล์วแก๊สบัลลัสต์
3. วาล์วปล่อยแก๊สออก
4. ช่องสำหรับอากาศเข้าเมื่อใช้แก๊สบัลลัสต์
5. ที่ดูดระดับน้ำมัน
6. ช่องปล่อยน้ำมันออก
7. ไบมีค
8. สปริง
9. โรเตอร์
10. สเตเตอร์



ภาพประกอบ 27 แสดงส่วนประกอบของระบบสุญญากาศด้านหน้า

จากภาพประกอบ 27 แสดงส่วนประกอบด้านหน้าของระบบสูบน้ำอากาศ ดังนี้

1. ท่อดักแก๊สส่วนหน้า (Foreline trap)
2. ท่อน้ำมันกลับ (Backing volume pipeline)
3. วาล์วหยาบ (Roughing valve)
4. เครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอ้ (Diffusion pump)
5. ประตูไมโครสวิตช์ด้านหน้า (Front door microswitch)
6. มอเตอร์เครื่องสูบลูกโรตารี (Rotary pump motor)
7. ท่อสูบลูกโรตารี (Rotary pump exhaust line)
8. ช่องระบายอากาศเครื่องสูบลูกโรตารี (Rotary pump drain port)
9. เครื่องสูบลูกโรตารี (Rotary pump)
10. ท่อสูบลูกอ่อน (Flexible pumping line)
11. วงจรเบรกเกอร์ 1 (Circuit breaker 1)
12. วงจรเบรกเกอร์ 2 (Circuit breaker 2)



ภาพประกอบ 28 แสดงส่วนประกอบด้านหลังระบบสุญญากาศ

จากภาพประกอบ 28 แสดงส่วนประกอบของด้านหลังระบบสุญญากาศ ดังนี้

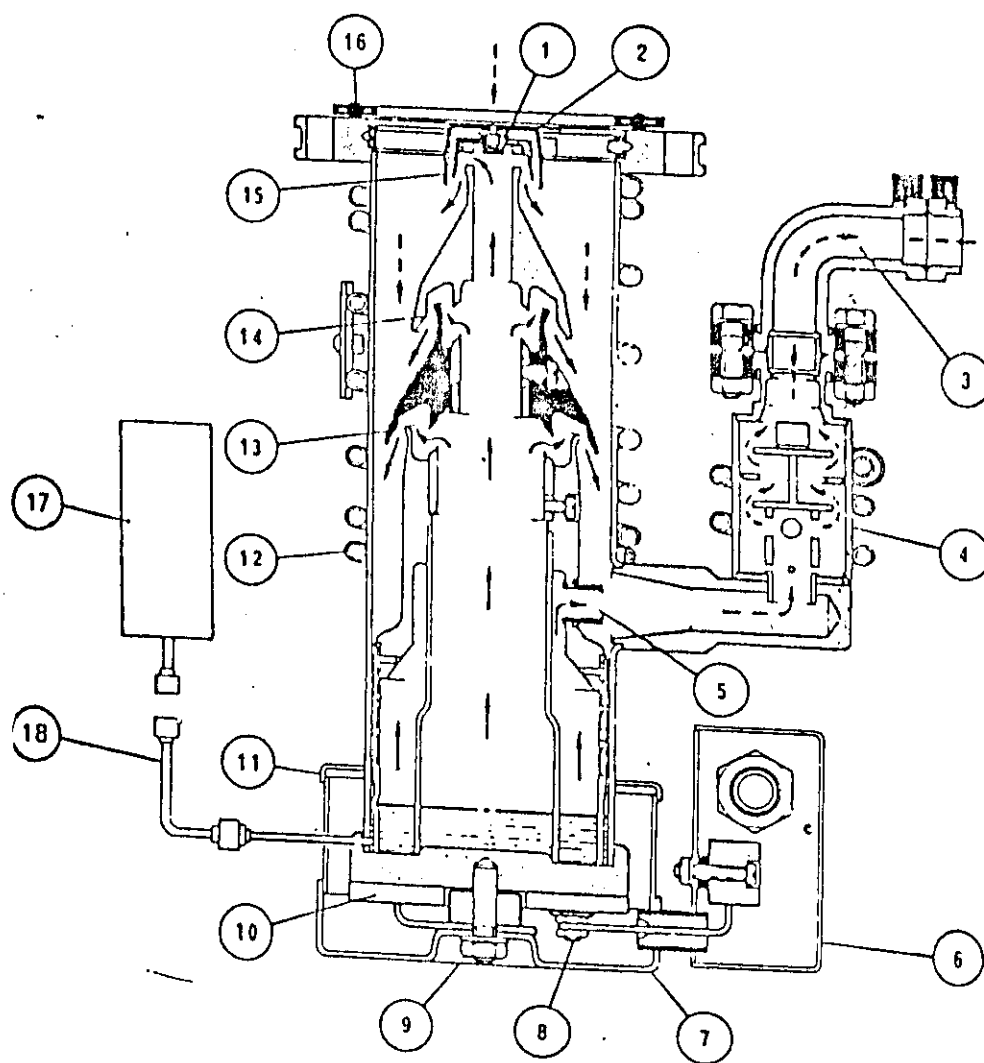
1. ออยมิสต์ฟیلเตอร์ (Oil mist filter)
2. ช่องกลับเครื่องสูดอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน (Diffusion pump backing port)
3. ช่องระบายแก๊สเครื่องสูดอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน (Diffusion pump drain port)
4. วาล์วแก๊สบาลาสต์เครื่องสูบกลโรตารี (Rotaray pump gas ballast valve)
5. หม้อแปลงเอชที (HT transformer)
6. หม้อแปลงแอลที (LT transformer)

เครื่องสูบลมโรตารีของเฮ็คควาร์ดหมายเลข16ประกอบด้วย

1. มอเตอร์เครื่องสูบลมโรตารี (Rotary pump moter) ใช้เป็นตัวขับโรเตอร์ (Roter) ในเครื่องสูบลมโรตารี ซึ่งเกิดจากการหมุนตามเข็มนาฬิกาทำให้อากาศถูกดูดออกจากภาชนะสุญญากาศ
2. ท่อสูบลมอากาศเครื่องสูบลมโรตารี (Rotary pump exhaust line) ใช้เป็นท่อขับอากาศออก
3. ท่อสูบลมอากาศอ่อน (Flexible pumping line) สำหรับต่อกับระบบสุญญากาศ
4. แก๊สบาลาสต์ (Gas ballast) เป็นขั้นตอนในการกำจัดไอน้ำหรือไอของของเหลวที่ละลายอยู่ในน้ำมันปั๊ม โดยการเพิ่มความดันแก๊สรวมให้สูงกว่าความดันย่อยของไอน้ำหรือไอของของเหลว วิธีการก็คือการเปิดวาล์วให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปในส่วนล่างของสเตเตอร์ (stator) ที่เป็นช่วงอัดของความดันย่อยของของเหลวจะลดลง เมื่อความดันย่อยลดลงไอของของเหลวจะไม่ควบแน่นในน้ำมันแต่จะถูกขับไปพร้อมกับแก๊สและอากาศ

3.1.11 เครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมัน (Diffusion pump)

เครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมันเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของระบบสุญญากาศ หลักการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมัน คือ น้ำมันปื้มที่อยู่กันที่ท่อเหล็กทรงกระบอกจะถูกเผาให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าจนร้อน น้ำมันจะเดือดและระเหยเป็นไอลอยตัวขึ้นไปตามช่องกลางของตัวปั๊ม ไอน้ำมันจะออกมาทางช่องเจ็ทที่ระดับต่างๆกัน แล้วถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ประกอบกับส่วนบนของท่อทรงกระบอกจะถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ เมื่อไอน้ำมันสูญเสียพลังงานความร้อนทำให้พลังงานจลน์ลดลงมันก็จะวิ่งลงมาตามทิศทางที่บังคับแล้วเกิดการปะทะกับโมเลกุลของแก๊สที่บริเวณตอนบนในทิศทางลง ทำให้โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงมาล่าง ตามหลักความถาวรของโมเมนตัม เสมือนว่าหยดน้ำมันปริมาณมากกว่าโมเลกุลของแก๊สลงมาอย่างต่อเนื่อง เมื่อโมเลกุลของแก๊สที่มาออกันอยู่ที่ยังล่างจะทำให้ความดันของแก๊สส่วนล่างมากกว่าส่วนบนความดันตรงทางออกของเครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมันเรียกว่าความดันท้าย ณ ตำแหน่งนี้เราจะใช้เครื่องสูบลูโรตารีดูดออกมาจากเครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมัน เครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมันจะเป็นตัวดึงความดันภายในภาชนะสุญญากาศจนถึงความดันที่ต้องการ สำหรับระบบหล่อเย็นของเครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมันจะใช้เครื่องสูบน้ำยี่ห้อฮิตาชิ (HITASHI) สูบน้ำจากเครื่องทำความเย็น (cooling) ผ่านท่อพีวีซี (PVC) เข้าสู่ทางเดินของน้ำหล่อเย็นที่พันรอบท่อกลางของเครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมันโดยใช้ท่อทองแดงเป็นท่อหล่อเย็น เพราะท่อทองแดงมีการถ่ายเทความร้อนได้ดี สามารถที่จะตัดให้โค้งล้อมท่อทรงกระบอกของเครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมันได้ง่าย และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น ๆ น้ำหล่อเย็นที่ใช้จะไหลเข้าทางตอนบนและไหลออกทางตอนล่างของเครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมัน ที่ทำเช่นนี้เพราะตอนบนของปั๊มต้องการความเย็นสูงเพื่อคักไอน้ำมันตอนบนไม่ให้พุ่งขึ้นไปยังภาชนะสุญญากาศด้านท้ายของไอพุ่งกระจายจะมีท่อต่อเชื่อมกับเครื่องสูบลูโรตารี เพื่อดึงโมเลกุลของอากาศออกด้านท้ายของเครื่องสูบน้ำแบบแพร่ไอน้ำมัน



ภาพประกอบ 29 เครื่องสูบน้ำแบบเพอร์โวน้ำมัน (ชัยวิทย์, 2526 : 26)

จากภาพประกอบ 29 แสดงส่วนประกอบของเครื่องสูบลมอากาศแบบเพอร์ไอน้ำมัน ดังนี้

1. สปริงยึด (Top jet retraining spring)
2. วงแหวนกำบังไอน้ำมัน (Graud ring)
3. ท่อต่อกับเครื่องสูบลมโรตารี (Backing connexion)
4. ที่คักไอน้ำมัน (Backing spout)
5. ปลายท่อน้ำข้าง (Side nozzle)
6. กล่องต่อสายไฟฟ้า (Terminal box)
7. แผ่นกำบังความร้อนด้านล่าง (Bottom radiation shield)
8. ขั้วต่อหลอดทำความร้อน (Heater terminal)
9. น็อตยึดหลอดทำความร้อน (Heater securing nut)
10. หลอดทำความร้อน (Heater)
11. แผ่นกำบังความร้อนด้านบน (Top radiation shield)
12. ท่อน้ำระบายความร้อน (Cooling water coil)
13. ปลายท่อน้ำคั่นด้านล่าง (Lower jet nozzle)
14. ปลายท่อน้ำคั่นตรงกลาง (Center jet nozzle)
15. ปลายท่อน้ำคั่นด้านบน (Top jet nozzle)
16. วงแหวนยาง (O-ring)
17. กล่องเติมน้ำมัน (Filling Funnel)
18. ท่อเติมน้ำมัน (Drain/fill tube)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันในระบบสุญญากาศ

3.2.1 เกจพิรานี (Pirani gauge) เป็นเกจที่ใช้วัดความดันในช่วงดันๆ โดยใช้วัดความดันในช่วง $760-10^{-3}$ มิลลิบาร์ รายละเอียดของเกจพิรานีดูได้จากภาคผนวก ข

3.2.2 เกจเพนนิ่ง (Penning gauge) เป็นเกจที่ใช้งานในช่วงความดันต่ำกว่าเกจแบบพิรานีโดยใช้ความดันในช่วง $10^{-2} - 10^{-7}$ มิลลิบาร์ รายละเอียดของเกจเพนนิ่งดูได้จากภาคผนวก ค

3.3 วาล์วที่ใช้ในระบบสุญญากาศ

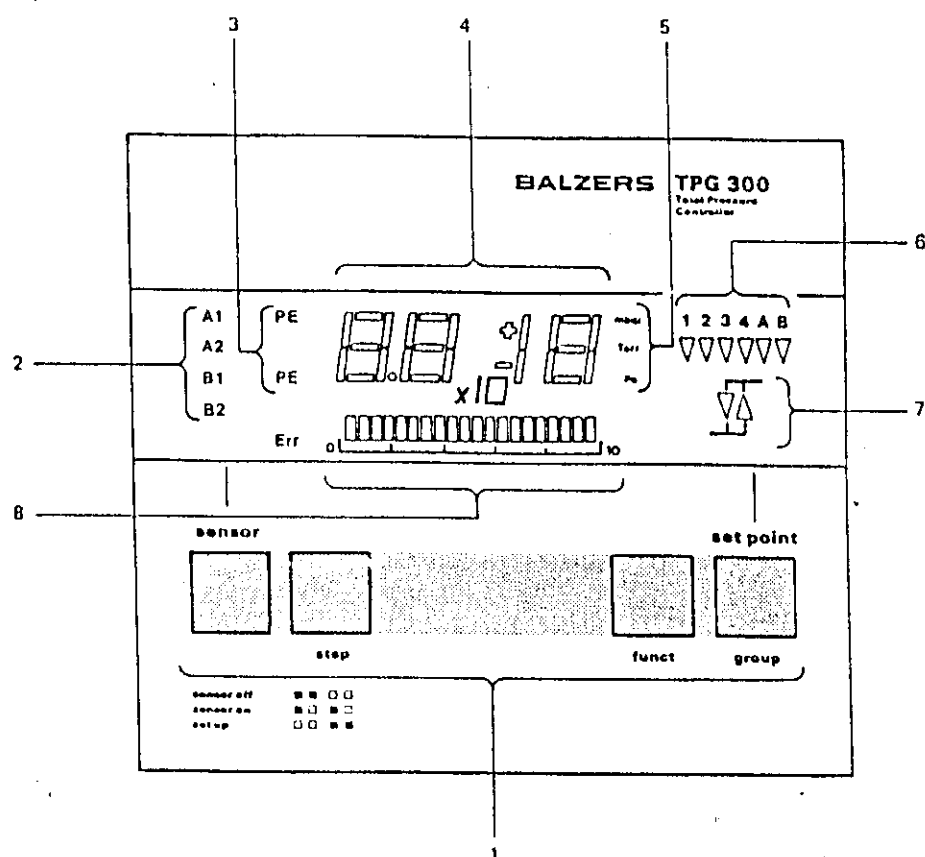
3.3.1 แบกกิงวาล์ว (Backing valve) ใช้เมื่อต้องการเปิดให้ดูความดันท้ายของเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน

3.3.2 รัฟวิงวาล์ว (Roughing valve) ใช้เมื่อต้องการให้ภาชนะสุญญากาศมีความเป็นสุญญากาศในระดับดัน โดยใช้เครื่องสูบกลดโรตารีเป็นตัวดึงอากาศภายในภาชนะสุญญากาศ

3.3.3 ไอโซเลชันวาล์ว (Isolation valve) เป็นวาล์วใหญ่ที่กั้นระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบอากาศแบบแพร่ไอน้ำมัน ซึ่งทำหน้าที่เปิดปิดโดยการยกตัวขึ้นลงตามการหมุนของวาล์วเลเวอร์ (valve lever)

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการอ่านค่าความดันและควบคุมการป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบ

3.4.1 เครื่องอ่านค่าความดัน (Total Pressure Gauge and Controller หรือ TPG 300) เครื่องอ่านค่าความดันที่ใช้ในชุดเครื่องมือนี้เป็นของบริษัทบาลเซอร์ (BALZER) โดยเครื่องอ่านค่าความดันนี้มีช่องเพื่อต่อเข้ากับหัววัดความดันในระบบสุญญากาศได้หลายช่องดังภาพประกอบ 30 โดยสามารถต่อกับหัววัดความดันแบบเพนนิ่ง หัววัดความดันแบบพิรานีได้



ภาพประกอบ 30 แสดงส่วนประกอบด้านหน้าของ ทีพีจี 300

ส่วนประกอบด้านหน้าของเครื่อง ทีพีจี 300

1. คีย์บอร์ด (Key board)
2. แสดงตำแหน่งตรวจวัด (Sensor position indicator)
3. แสดงการตรวจวัดการทำงานของเพนนิ่ง (Penning-sensor : Operation indicator)
- 4 ส่วนแสดงผลเป็นตัวเลข (Digital display)
5. หน่วยความดัน (Pressure unit)
6. แสดงจุดสวิทช์ (Switchpoint indicator)
7. สวิตช์ปรับบนล่าง (Upper/lower threshold of a switchch point)
8. แสดงผลกราฟแท่ง (Bargraph display)

3.4.2 เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเอ็มเคเอสแมสโฟลว์ (MKS mass flow)

3.4.2.1 หลักการของแมสโฟลว์

เครื่องเอ็มเคเอสแมสโฟลว์เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบสร้างมาเพื่อวัดและควบคุมอัตราการไหลของแก๊สในช่วง 0.1 sccm ถึง 200 slm เมื่อ sccm และ slm เป็นหน่วยการวัด sccm คือ ลูกบาศก์เซนติเมตรมาตรฐานต่อนาที (Standard Cubic Centimeter per minute)

slm คือ ลูกบาศก์ลิตรมาตรฐานต่อนาที (Standard Cubic Liter per minute)

เครื่องเอ็มเคเอสแมสโฟลว์มิเตอร์และเครื่องควบคุมเอ็มเคเอสแมสโฟลว์ จะให้ผลการวัดทางไฟฟ้าและควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส โดยสามารถปรับละเอียดได้ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์ของค่าการวัดสูงสุด ค่าการวัดของเครื่องแมสโฟลว์จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของแก๊สที่ไหลเข้าสู่เครื่องวัด

เครื่องแมสโฟลว์จะวัดอัตราการไหลของมวลแก๊สโดยตรง ไม่ใช่เป็นการวัดปริมาตรของแก๊สที่ไหลเกินไปเท่านั้น ซึ่งการวัดอัตราการไหลของมวลแก๊สจะมีความสำคัญในการนำไปใช้งาน ในการวัดอัตราการไหลของแก๊สโดยทั่วไปที่วัดอัตราการไหลของแก๊สเป็นหน่วยปริมาตรมีข้อดีน้อยกว่าการวัดแบบ แมสโฟลว์เนื่องจากการวัดออกมาเป็นหน่วยปริมาตรอาจขาดความแม่นยำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิและความดัน แต่ในการวัดแบบแมสโฟลว์จะให้ประสิทธิภาพในการวัดที่ดีกว่าในกระบวนการที่มีการทำซ้ำหลายๆ ครั้ง เช่น ในกระบวนการผลิตแบบแมสโปรดักต์ (mass product)

อัตราการไหลของแก๊สที่วัดโดยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สโดยทั่วไปจะมีความสะดวกที่จะวัดอัตราการไหลของแก๊สออกมาเป็นหน่วยของปริมาตร เมื่อปริมาตรของแก๊สที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิและความดัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ของปริมาตรค่าหนึ่งที่อุณหภูมิและความดันอ้างอิงค่าหนึ่ง คือที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หรือ 273.118 เคลวิน และที่ความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 760 มิลลิเมตรปรอท หรือ 113.25 มิลลิบาร์ เพื่อเป็นค่าเปรียบเทียบกับอุณหภูมิและความดันจริงเมื่อเกิดการเปลี่ยนค่าปริมาตรการไหลของแก๊ส

การหาค่าปริมาตรของการไหลของแก๊ส หาได้จากสมการ

$$Q_s = \frac{Q_a \times P_a \times T_s}{P_s \times T_a} \quad \text{————— (4)}$$

Q_g = อัตราการไหลของแก๊สในหน่วย ลิตร ต่อนาที

Q_a = อัตราการไหลของแก๊สจริงในหน่วยลิตร ต่อนาที

P_a = ความดันอ้างอิง (1013.25 มิลลิบาร์)

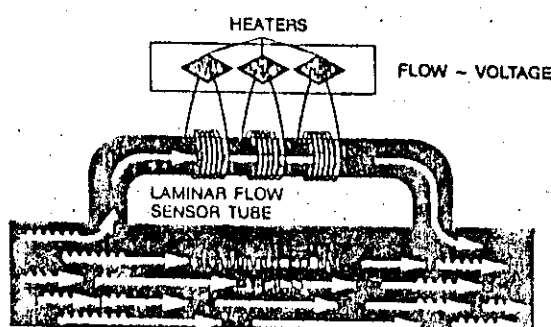
P_g = ความดันจริง (มิลลิบาร์)

T_g = อุณหภูมิอ้างอิง (273.18 เคลวิน)

T_a = อุณหภูมิจริง (เคลวิน)

3.4.2.2 ลักษณะพิเศษของการวัดโดยใช้เครื่องเอ็มเคเอสแมสโฟล์

อัตราการไหลของแก๊สจะพิจารณาโดยการวัดค่าความร้อนในการรักษาอุณหภูมิของท่อตรวจวัดการไหลลามินาร์ (Laminar flow sensor tube) สำหรับการไหลของแก๊สในช่วงที่ทำการวัด การไหลของแก๊สจะเป็นสัดส่วนกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดเพื่อรักษาค่าอุณหภูมิในท่อให้คงที่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากการไหลผ่านของแก๊สเทคนิคการวัดของเครื่องเอ็มเคเอสแมสโฟล์จะมีขดลวดความร้อน 3 ขด ที่พันรอบท่อที่ต้องการเพื่อสร้างอุณหภูมิต่างกันให้กับท่อตรวจวัดการไหลลามินาร์ และรักษาค่าความร้อนนั้นตลอดการไหลของแก๊สตลอดท่อโดยวิธีวงจรบริดจ์สมดุลอัตโนมัติ

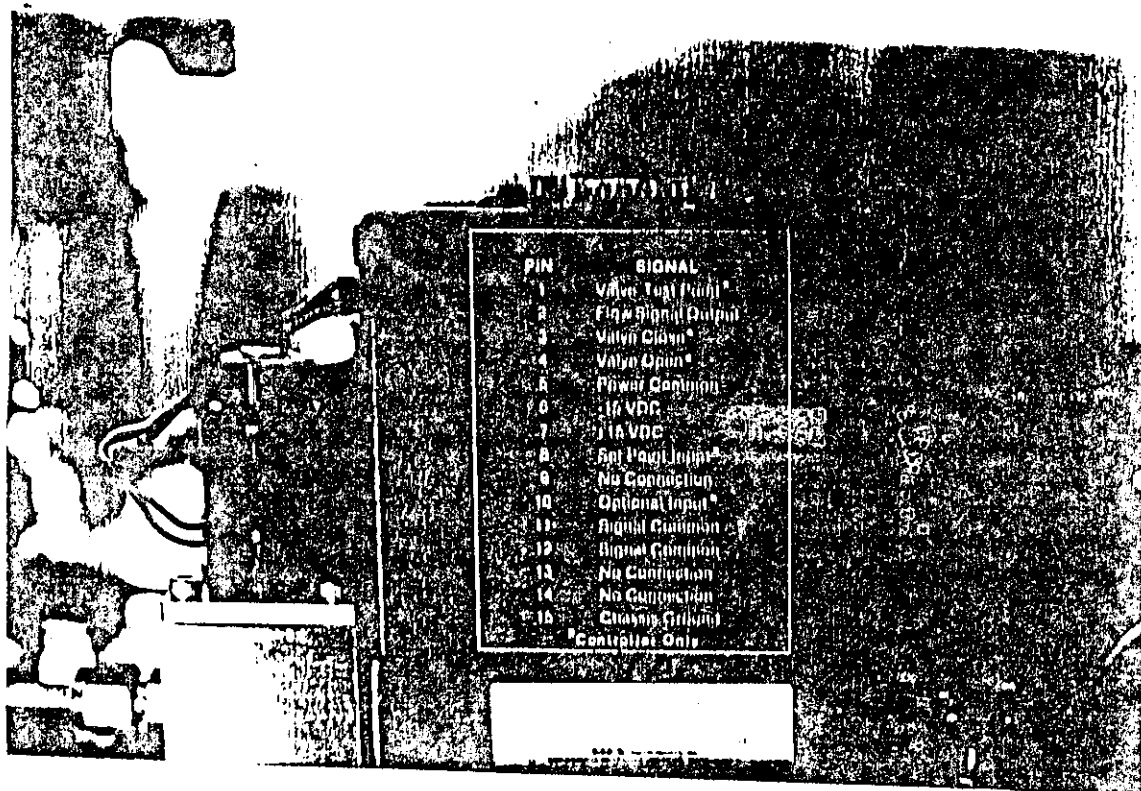


ภาพประกอบ 31 การวัดอัตราการไหลของแก๊สโดยใช้เครื่องแมสโฟล์

ในการใช้งานของเครื่องแมสโฟล์ในการทดลองมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน

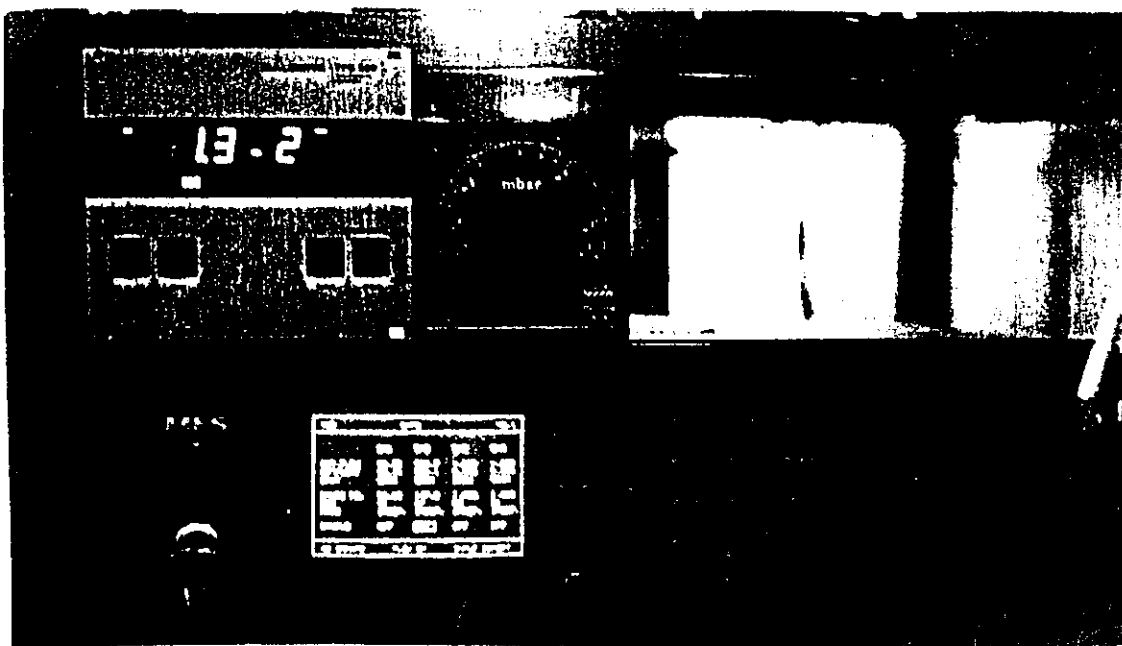
1 ส่วนที่เป็นตัววัดและควบคุม (Meter and Controller) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัววัดปริมาณการไหลของแก๊สตามวิธีที่กล่าวไปแล้วข้างต้น และทำหน้าที่ในการควบคุม

ปริมาณการไหลของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบในการทดลองให้เป็นไปตามปริมาณที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ที่ใช้เป็นแบบ 1259 ที่ถูกออกแบบมาเพื่อการใช้งานในช่วง 0.1 sccm ถึง 10.slm มีความละเอียดของการใช้งาน 0.8 เปอร์เซ็นต์ของค่าการวัดสูงสุด



ภาพประกอบ 32 เครื่องแมสโฟลว์ ส่วนที่เป็นตัววัดและควบคุมปริมาณการไหลของแก๊ส

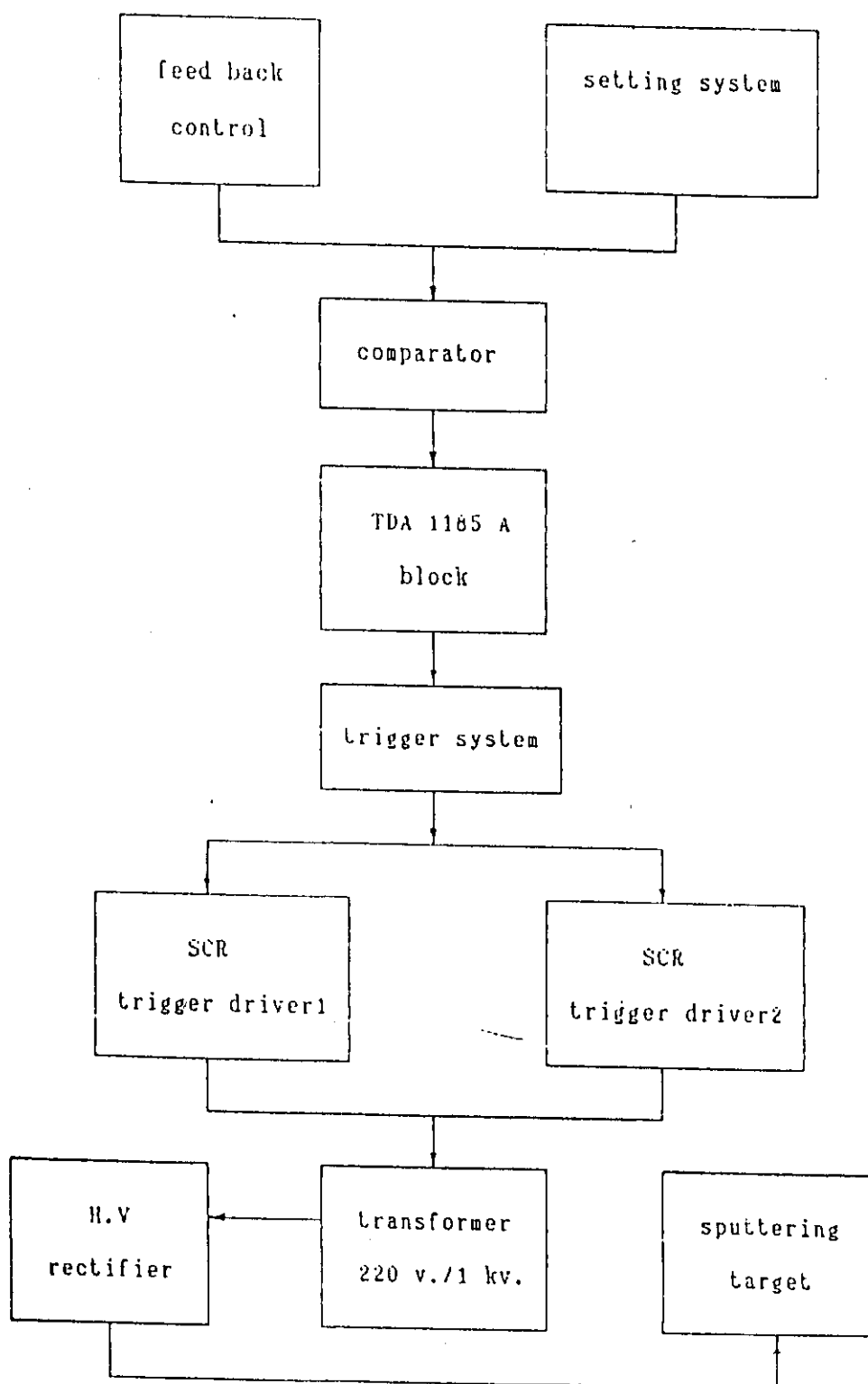
2. ส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแสดงผลการวัดที่อ่านได้ (Power Supply and Readout Units) นอกจากนี้ยังเป็นส่วนที่ใช้ป้อนข้อมูลหรือกำหนดปริมาณแก๊สที่ต้องการให้ไหลเข้าสู่ระบบในการทดลอง ชุดอุปกรณ์ที่ใช้เป็นแบบ 147



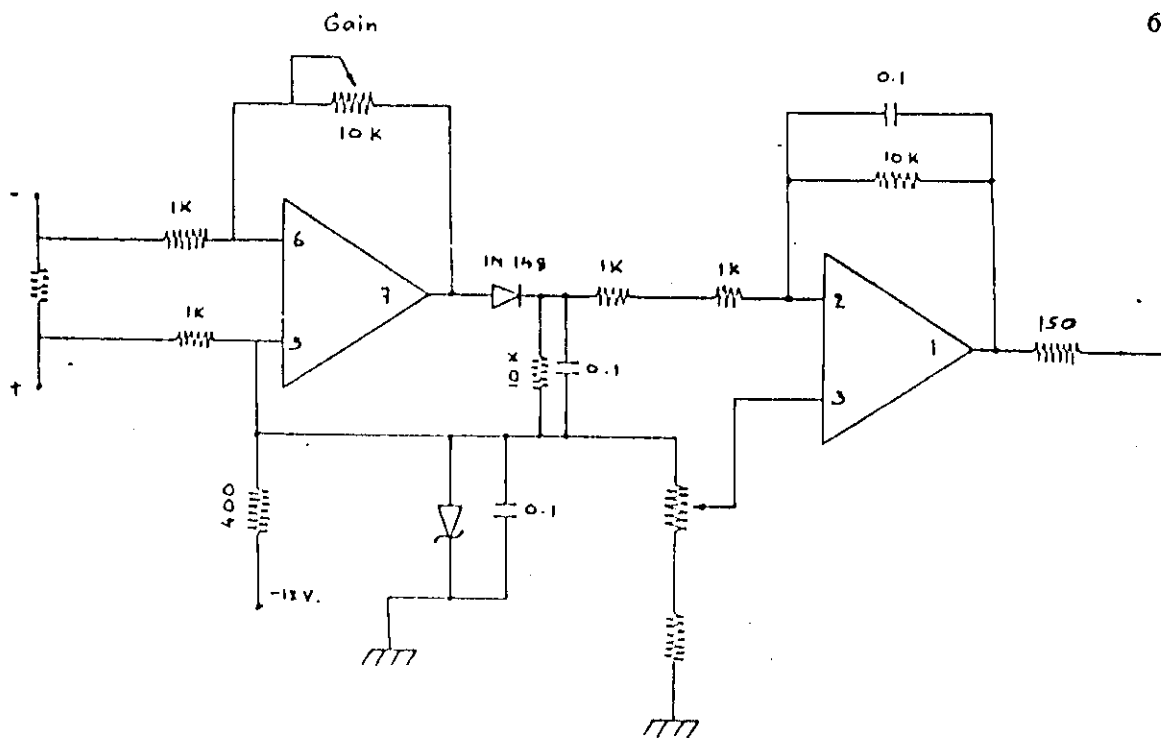
ภาพประกอบ 33 เครื่องแมสโฟลว์ส่วนที่แสดงแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแสดงผล

3.5 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Power Supply)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับระบบสปีดเตอริงได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบการเคลือบ ในการออกแบบได้ใช้ ไอซี 1185 เอ ซึ่งช่วยลดขั้นตอนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงมาก และสามารถใช้เป็นเฟสสามขั้ว (triac phase angle controller) ได้ทันทีและนอกจากนี้ยังมีระบบซอฟต์สตาร์ท (soft start) ช่วยให้การเริ่มต้นสปีดเตอริงเป็นไปอย่างช้า ๆ จนเกิดอันตรกิริยาครบถ้วนจึงจะเพิ่มกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และยังใช้ระบบความต่างศักย์ไฟฟ้าป้อนกลับเข้ามาช่วยควบคุมในส่วนของอุปกรณ์เปรียบเทียบออปแอมป์ (Op-Am comparator) ช่วยควบคุมให้กระแสทางแรงดันสูงมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งรายละเอียดเขียนเป็นแผนภาพดังภาพประกอบ 34



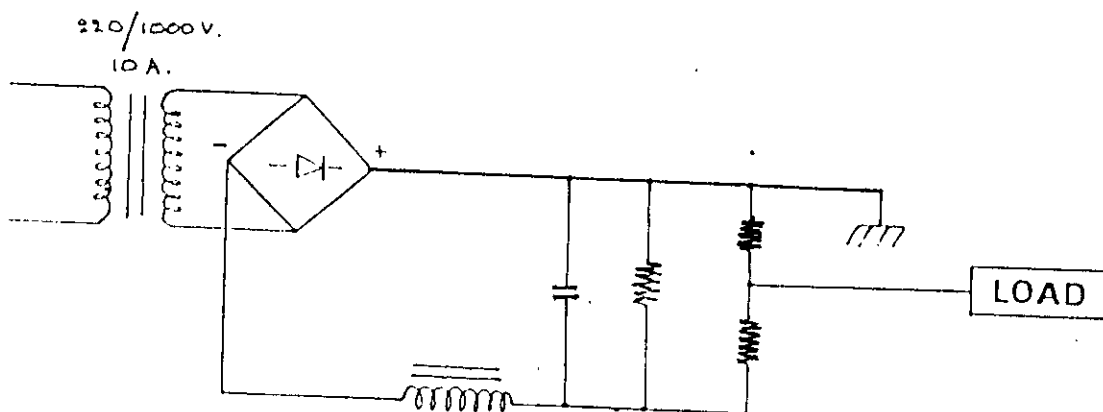
ภาพประกอบ 34 แสดงแผนภาพของแหล่งจ่ายไฟ



แรงดันไฟฟ้าป้อนกลับสูงสุด -3.0 โวลต์
ใช้ไอซีเบอร์ 1448

ภาพประกอบ 36 แสดงส่วนควบคุมป้อนกลับ

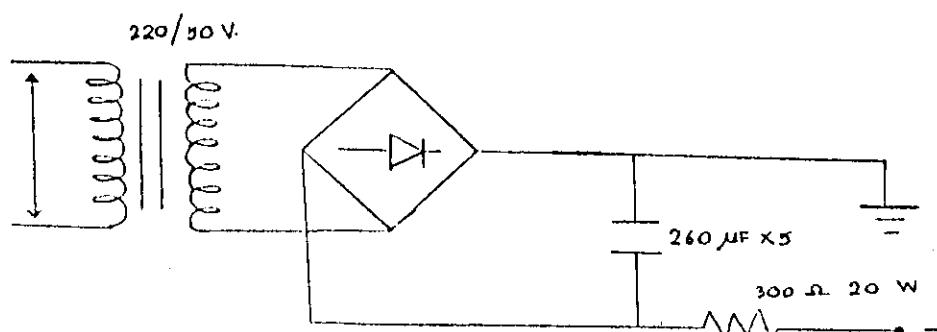
3.5.3 ส่วนไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High Voltage Part)



ภาพประกอบ 37 แสดงวงจรของส่วนไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

วงจรไฟฟ้าที่ผ่านการควบคุมโดยเอสซีอาร์ผ่านทางหม้อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความต่างศักย์สูง 1000 โวลต์ อาร์เอ็มเอส (rms) จากนั้นก็ผ่านบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier) และตัวจุกกรอง (Capacitor Filter) เพื่อให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูง จากนั้นจะผ่านตัวต้านทานเพื่อจำกัดกระแสและผ่านตัวเหนี่ยวนำกรอง (Inductance Filter) เพื่อลดการกระชากของกระแสในวงจร หลังจากนั้นจะผ่านตัวต้านทานป้อนกลับ เพื่อป้อนกลับความต่างศักย์สำหรับควบคุมกระแส เมื่อเทียบกับจุดปรับตั้ง (Setting Point) ไฟบวกต่อลงดิน ส่วนไฟลบต่อเข้ากับเป้าสารเคลือบ

3.6 วงจรป้อนความต่างศักย์ย้อนกลับ (Bias Voltage)



ภาพประกอบ 38 วงจรป้อนความต่างศักย์ย้อนกลับ

การป้อนความต่างศักย์ย้อนกลับให้กลับขึ้นงานในการทดลอง มีผลในการกระตุ้นให้เกิดฟิล์มที่ขึ้นงานและช่วยลดช่องว่างของสารเคลือบบนผิวหน้าชิ้นงาน

3.7 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyser)

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องมือที่สามารถเลือกรูปแบบของการวัดแสงได้หลายประเภท คือ

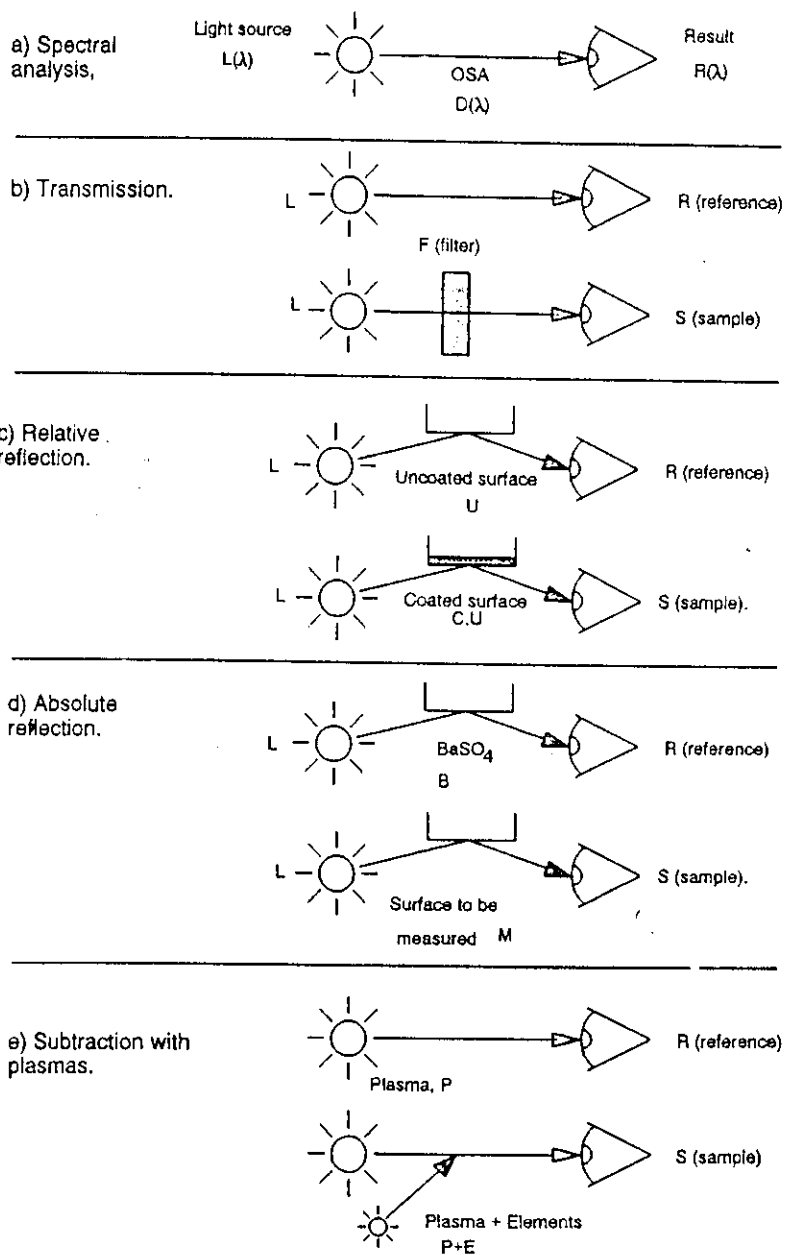
1. การวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectral analysis)
2. การวิเคราะห์น้ำหนักสเปกตรัม (Weight spectral analysis)
3. การทะลุผ่าน (Transmission)
4. การสะท้อนสัมพัทธ์ (Relative reflection)

5. การสะท้อนสัมบูรณ์ (Absolute reflection)

6. การดูดกลืน (Absorption)

7. การหักล้างกับพลาสมา (Subtraction with plasmas)

Figure 2. Measurement Types.



ภาพประกอบ 39 ประเภทการวัดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

แต่ในการวัดสีชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบจากเครื่องเคลือบพลาสมาอาร์แมกนีตรอนสเปคโตริง จะใช้หลักการสะท้อนของแสง โดยการวัดแสงสะท้อนที่ออกมาจากผิวชิ้นงานเปรียบเทียบกับแสงสะท้อนที่ออกมาจากผิวของสารที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง (reference) ซึ่งมีการวัดได้ 2 วิธี คือ

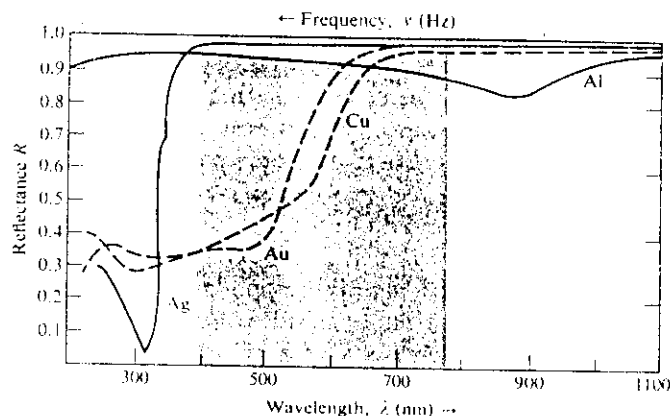
1. การสะท้อนสัมพัทธ์ (Relative reflectance) เป็นการวัดแสงสะท้อนจากผิวชิ้นงานเทียบกับผิววัตถุอ้างอิงที่สามารถสะท้อนแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่ตาคนเราปกติสามารถมองเห็นได้ (visible light) ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 390 นาโนเมตร ถึง 780 นาโนเมตร วัตถุที่สะท้อนความยาวคลื่นในช่วงนี้ได้ดี ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น ดังกราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน R เทียบกับความยาวคลื่น ดังแสดงในภาพประกอบ 40 โดยที่

$$R = \left[\frac{n_t - n_I}{n_t + n_I} \right]^2 \quad \text{—————} \quad (5)$$

n_t คือ ดัชนีการหักเหของตัวกลางที่แสงทะลุผ่าน

n_I คือ ดัชนีการหักเหของตัวกลางที่แสงตกกระทบ

การพิสูจน์สมการ (4) ดูได้จากภาคผนวก ง



ภาพประกอบ 40 กราฟเปรียบเทียบการสะท้อนที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของเงิน, ทอง, ทองแดง และ อะลูมิเนียม

(Hecht, 1987 : 113)

จากกราฟในภาพประกอบ 40 พบว่าสีของทอง (Au) มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะต่ำในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีเขียว คือ ช่วง 492-577 นาโนเมตร แต่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การ

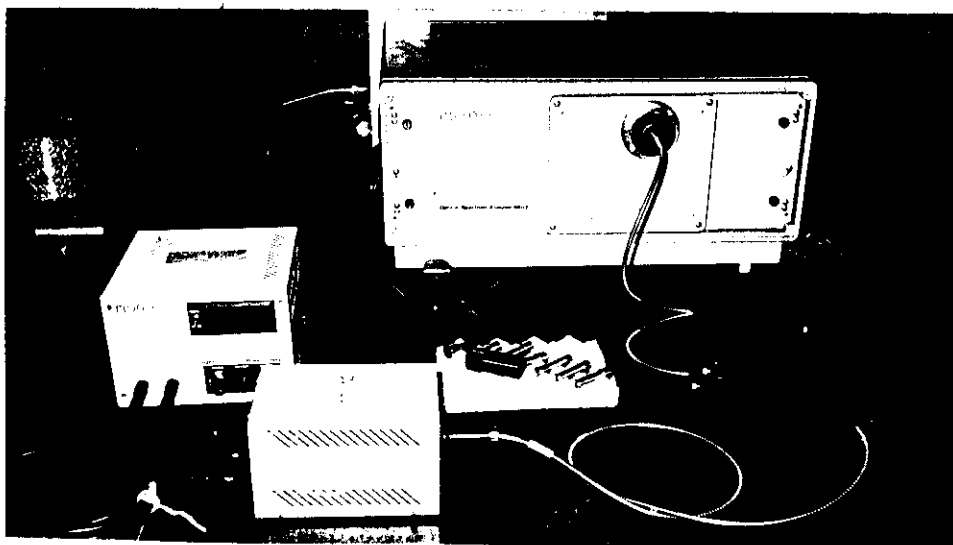
สะท้อนสูงในช่วงตั้งแต่ความยาวคลื่นของแสงสีเหลืองเป็นต้นไปจนถึงช่วงอินฟราเรด ในการทดลองเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ให้มีสีใกล้เคียงกับทองจริง ก็ควรจะไดักราฟของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนคล้ายกับทองแต่จะไม่เหมือนกันทีเดียว จากการทดลองพบว่าไทเทเนียมไนไตรด์มีการสะท้อนแสงในช่วงอินฟราเรดได้ดีเหมือนทอง ในการวัดการสะท้อนสัมพัทธ์จะบอกให้ทราบค่าของสีได้คร่าว ๆ แต่จะบอกความแวววาวของชิ้นงานได้ดี โดยดูจากเปอร์เซ็นต์การสะท้อนสัมพัทธ์ ถ้าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนสัมพัทธ์มีค่าสูงชิ้นงานก็จะมีความแวววาวมาก

2. การสะท้อนสัมบูรณ์ (Absolute reflectance) เป็นการวัดการสะท้อนจากผิวชิ้นงานเทียบกับผิววัตถุอ้างอิงซึ่งต้องเป็นสารที่มีสีขาวบริสุทธิ์ เช่น แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) เพื่อทำการเปรียบเทียบสีที่ได้จากแสงสะท้อนทั้งสองผิว ซึ่งการวัดการสะท้อนแบบนี้เครื่องจะแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขของค่าฟลักซ์และอุณหภูมิสี จะต้องนำค่าฟลักซ์และอุณหภูมิสีที่ได้ไปเทียบกับแผนภาพสีทำให้ทราบสีของชิ้นงานได้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวัดสีจากการวิธีนี้

ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัทโมโนไลท์ (Monolight) ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟ 6262-100 (6260-100 Power supply)
2. แหล่งกำเนิดแสง 6262-100 (6262-100 Light source)
3. เครื่องคอมพิวเตอร์
4. เครื่องตรวจวัด 6601/2 (6601/2 Detector)



ภาพประกอบ 41 แสดงการจัดอุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมขณะทำการวัดสี

3.7 วิธีใช้เครื่องสปีดเตอร์แบบคิซีฟลานวาร์แมกนิตรอน

เมื่อเครื่องสปีดเตอร์อยู่ในสภาพปกติที่ไม่ได้ใช้งานวาล์วเลเวอร์(valve lever)ที่อยู่บริเวณด้านหน้าของเครื่อง (ดูเครื่องหมายที่ปลายลูกศร) จะชี้ที่ตำแหน่งวาล์วโคลส(valve closed) หมายความว่าวาล์วทุกตัวในระบบจะปิดหมดและสวิตช์วงจรเบรกเกอร์(circuit breaker)ปุ่มสีดำทั้งสองปุ่มจะปิดอยู่ คือ ไม่ได้ถูกกด

วงจรเบรกเกอร์ 2 ปุ่ม มีหน้าที่ดังนี้

1. ปุ่มบนจ่ายไฟให้เครื่องสูบลูกโรตารี เครื่องสูบลูกแบบแพร่ไอน้ำมันและแอร์แอดมิต (air admit)
2. ปุ่มล่างจ่ายไฟให้กับเครื่องวัดที่อยู่บนหน้าปัดของเครื่อง

3.7.1 ขั้นตอนการสูบลูกออก

1. เปิดระบบทำความเย็น (cooling system) เพื่อปั้มน้ำออกมาทำความเย็นให้กับเครื่องทำความร้อน (heater) ของเครื่องสูบลูกแบบแพร่ไอน้ำมัน
2. กดปุ่มวงจรเบรกเกอร์ (circuit breaker) ทั้งสองปุ่ม จะเห็นไฟแดงติดขึ้นที่เมน(main)
3. กดปุ่มเปิดเครื่องสูบลูกกลโรตารีจะเห็นไฟสีแดงติดขึ้นที่โรตารี
4. ปิดวาล์วเลเวอร์ (valve lever) จากโคลส (closed) หมุนไปทางขวาที่รฟวิง(roughing)
5. กดปุ่มเปิดเครื่องสูบลูกแบบแพร่ไอน้ำมัน ไฟสีแดงจะติดที่ดิฟฟิวชัน(diffusion)
6. เมื่อปั้มน้ำที่รฟวิงเครื่องสูบลูกกลโรตารีจะดูดอากาศที่อยู่ในท่อที่ต่อระหว่างรฟวิงวาล์วและแบกกิงวาล์วไปจนถึงระดับความดันในช่วง 10^{-2} มิลลิบาร์ หรือเมื่อเวลาผ่านไป 20 ถึง 30 นาที หลังจากเปิดเครื่องสูบลูกแบบแพร่ไอน้ำมัน เพื่อให้ น้ำมันปั้มเดือดกลายเป็นไอ แล้วจึงปิดวาล์วกลับมากที่แบกกิงวาล์ว หมุนตามเข็มนาฬิกาไปจนสุดที่รฟวิงไอโซเลทวาล์ว (roughing isolate valve) จะเปิดได้สุดพอดี เพื่อให้เครื่องสูบลูกแบบแพร่ไอน้ำมันเริ่มดูดอากาศภายในสถานะสุญญากาศ

7. สูบลูกออกไปเรื่อย ๆ จนได้ความดันที่ต้องการ (1.9×10^{-3} มิลลิบาร์)

ในช่วงแรกของการเริ่มสูบลูกออกโดยใช้เครื่องสูบลูกกลโรตารี ควรเปิดแก๊สบัลลาสต์ (gas ballast) เพื่อปล่อยอากาศภายนอกไล่ฟองอากาศภายในตัวเครื่องสูบลูกโรตารีออกและสังเกตความดันแบกกิงที่เครื่องวัด ที่อยู่บริเวณด้านบนเครื่องว่าลดลงหรือไม่ ถ้าสังเกตเห็นว่าความดันเริ่มลดลงจนกระทั่ง แล้วจึงปิดแก๊สบัลลาสต์หรือเปิดเพียงเล็กน้อยทิ้งไว้เลยก็ได้

5. ป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 500 - 600 โวลต์ แล้วจะสังเกตเห็นการเรืองแสงภายในภาชนะสุญญากาศ เกิดแสงสี มีวงระหว่างเป้าสารเคลือบและชิ้นงาน
6. ทำการโกลว์ดิสชาร์จประมาณ 10 - 15 นาที
7. เมื่อครบเวลา ปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟ
8. หยุดป้อนแก๊สอาร์กอน โดยการกดปุ่มออฟ (off) ที่เครื่องแมสโฟลว์
9. เริ่มทำการปั๊มระบบสุญญากาศใหม่เพื่อให้ได้ความดันที่ต้องการ สำหรับการทดลองต่อไป

ข้อควรระวังในการทำโกลว์ดิสชาร์จ

1. ในการป้องกันความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทำโกลว์ดิสชาร์จ ต้องค่อย ๆ ปรับมุมเพื่อเพิ่มอย่างช้า ๆ จนถึงความต่างศักย์ในระดับ 500 - 600 โวลต์ แต่กระแสจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก การปรับเพิ่มความต่างศักย์ถ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจทำให้เกิดการอาร์คทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเป็นศูนย์ สถานะการเช่นนี้อาจทำให้ระบบแหล่งจ่ายไฟเกิดความเสียหายได้
2. ปริมาณแก๊สอาร์กอนที่ป้อนให้ในการทำโกลว์ดิสชาร์จ อาจเปลี่ยนแปลงได้ โดยอาจลดปริมาณของแก๊สอาร์กอนลงประมาณ 5 sccm เพื่อเพิ่มพลังงานให้กับอะตอมแต่ละตัวให้มีค่ามาก เพื่อให้มีผลดีในการทำความสะดวกชิ้นงาน
3. เมื่อป้อนความต่างศักย์ให้กับระบบในการทำโกลว์ดิสชาร์จ ต้องระวังการอาร์คที่ขั้วไฟฟ้าที่ต่อไว้ที่ข้างล่างของภาชนะสุญญากาศ อย่างให้เกิดการเรืองแสงที่ผิดปกติที่ขั้วไฟฟ้า เพราะอาจทำให้หลอดแก้วที่ครอบไว้ที่ขั้วไฟฟ้าเกิดร้าวแตก หรือถ้าเกิดการอาร์คที่แรงมาก ๆ อาจถึงขนาดที่ทำให้ครอบแก้วแตกได้

จากภาพประกอบ 42 แสดงส่วนประกอบในการทำโกลว์ดิสซาร์จดังนี้

1. ภาชนะสุญญากาศ
2. หัววัดพิรานี
3. หัววัดเพนนิ่ง
4. ขั้วแคโทด
5. ท่อป้อนแก๊สอาร์กอน
6. ท่อป้อนแก๊สไนโตรเจน
7. ท่อน้ำหล่อเย็นเข้า
8. ท่อน้ำหล่อเย็นออก
9. เครื่องวัดและควบคุมการไหลของมวล (mass flow meter and controller)
10. เครื่อง mass flow power supply and readout
11. แก๊สอาร์กอน
12. ถังแก๊สไนโตรเจน
13. เครื่องสูบน้ำของระบบหล่อเย็น
14. ถังน้ำระบบหล่อเย็น
15. แหล่งจ่ายไฟ
16. สายทองแดงร้อยท่อเซรามิกส์ต่อระหว่างแท่นวางชิ้นงานไฟฟ้า
17. เครื่องอ่านค่าความดัน
18. ขั้วไฟฟ้า
19. แท่นวางชิ้นงาน

3.8 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนในการทดลองแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ ขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ และขั้นตอนในการวัดสีชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบจากขั้นตอนแรก ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนนี้

3.8.1 ขั้นตอนการเคลือบชิ้นงาน

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ และแผ่นสแตนเลสด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดไขมันและเช็ดทำความสะอาดให้แห้ง
2. วางกระจกสไลด์ลงบนที่วางชิ้นงานในภาชนะสุญญากาศ จัดตำแหน่งของท่อแก๊ส

อาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยให้ท่อแก๊สอาร์กอนอยู่ด้านบนใกล้กับเป่าสารเคลือบ ส่วนท่อไนโตรเจนอยู่ด้านล่างถัดลงมา

3. ปิดฝาด้านบนของภาชนะสุญญากาศให้สนิท ต้องระวังการบิดเบี้ยวของยางวงแหวน
4. เริ่มทำการสูบอากาศออกนอกภาชนะสุญญากาศ ตามขั้นตอนการเปิดเครื่อง
5. เมื่อความดันลดลงหลังจากที่เราเริ่มเปิดไอโซเลทวาล์ว แล้วให้ทำการโกลว์คิสซาร์จ (ขณะทำการโกลว์คิสซาร์จชุดเตอร์ที่ปิดชิ้นงานจะเปิดอยู่)
6. หลังจากการทำโกลว์คิสซาร์จเริ่มทำการปั๊มใหม่จนได้ความดันที่ต้องการ
7. ต่อไฟฟ้าขั้วลบจากแหล่งจ่ายไฟ เข้าที่ขั้วแคโทดด้านบนของภาชนะสุญญากาศ ส่วนสายดินต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศและต่อวงจรไบแอสเข้ากับขั้วไฟฟ้าด้านล่างของภาชนะสุญญากาศ สายดินของวงจรไบแอสต่อเข้ากับผนังภาชนะสุญญากาศและเลื่อนแผ่นชุดเตอร์มาปิดชิ้นงานที่วางอยู่ในภาชนะสุญญากาศ
8. เมื่อทำการสูบอากาศออกจนได้ความดันที่ต้องการ เพื่อเป็นความดันเริ่มต้นในการทดลอง แล้ว กำหนดปริมาณแก๊สอาร์กอนที่ต้องการแล้วกำหนดปริมาณแก๊สไนโตรเจน โดยคิดเทียบเป็นอัตราส่วนจากปริมาณแก๊สไนโตรเจน แล้วตั้งค่าที่กำหนดไว้โดยใช้เครื่องควบคุมการไหลของมวล
9. เปิดวาล์วที่หัวถังแก๊ส และเปิดวาล์วระหว่างเครื่องควบคุมการไหลของมวลทั้งสองข้าง
10. ป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ แล้วบันทึกค่าความดันที่ได้เมื่อความดันคงที่
11. หยุดป้อนแก๊สไนโตรเจนแล้วป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ระบบ แล้วบันทึกค่าความดันที่ได้เมื่อความดันแก๊สคงที่แล้ว
12. ป้อนแก๊สไนโตรเจนพร้อมกับแก๊สอาร์กอน แล้วบันทึกค่าความดันรวมของแก๊สที่ได้
13. เมื่อความดันรวมของแก๊สเริ่มคงที่ เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟวงจรป้อนความต่างศักย์ย้อนกลับ เปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นเข้าและออกจากเป่าสารเคลือบ
14. ป้อนกระแสที่กำหนดให้กับระบบ จะเริ่มสังเกตเห็นการเรืองแสงของแก๊สภายในภาชนะสุญญากาศ เมื่อเวลาผ่านไป 1 - 2 นาที หลังจากเกิดการเรืองแสงในภาชนะสุญญากาศเลื่อนชุดเตอร์ที่ปิดหน้าชิ้นงานออก
15. สังเกตคูสีของพลาสมาที่เกิดขึ้น การเกิดฟิล์มบางของไทเทเนียมไนไตรด์ที่ผิวหน้าของชิ้นงาน สีของฟิล์มที่ได้ ความดันรวมของแก๊สว่าลดลงจากก่อนทำการทดลองหรือไม่ ความต่างศักย์และกระแสมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างไร แล้วบันทึกค่าที่ได้ไว้
16. เมื่อทำการทดลองจนครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ ปิดแหล่งจ่ายไฟ ปิดการจ่ายความต่างศักย์ย้อนกลับแกว่งจร ปิดวาล์วของท่อน้ำหล่อเย็นเข้าและออก หยุดการป้อนแก๊สทั้งสองชนิด

17. บิดาตัวเลเวอร์กลับมาที่เบกกิง หลังกดปุ่มแอร์แอดมิตเพื่อให้อากาศภายนอกเข้าสู่ระบบ จนเราสามารถเปิดฝาภาชนะสุญญากาศออกได้ แล้วหยิบชิ้นงานออกมาข้างนอก

18. ก่อนนำชิ้นงานใหม่ใส่ลงในภาชนะสุญญากาศเพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป ต้องทำความสะอาดท่อป้อนแก๊สที่วางชิ้นงานอัตโนมัติและคาร์ดที่เป่าสารเคลือบ เพราะถ้าชิ้นส่วนเหล่านี้เกิดความสกปรกที่อาจเกิดจากการทดลองในครั้งก่อน ถ้าไม่ทำความสะอาดก่อนอาจทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอหรือเกิดร่องรอยที่ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานไม่เรียบในการทำการทดลองครั้งต่อไปได้

19. เมื่อใส่ชิ้นงานชิ้นใหม่เรียบร้อยแล้ว ปิดฝาของภาชนะสุญญากาศ แล้วเริ่มทำการสูบน้ำออกใหม่ เพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป

3.8.2 ขั้นตอนการวัดสีชิ้นงานโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

1. เปิดสวิทช์แหล่งจ่ายไฟของเครื่อง 6260-100 เพาเวอร์ซัพพลาย (6260-100 Power supply) รออุ่นเครื่องประมาณ 2-3 นาที เครื่อง 6260-100 นี้จะทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับเครื่องแหล่งกำเนิดแสง 6262-100 ไลต์ซอร์ซ (6262 -100 Light source) ซึ่งให้แหล่งกำเนิดแสงสีขาวจากไส้หลอดทั้งสี่เตา ขนาด 12 โวลต์ 100 วัตต์

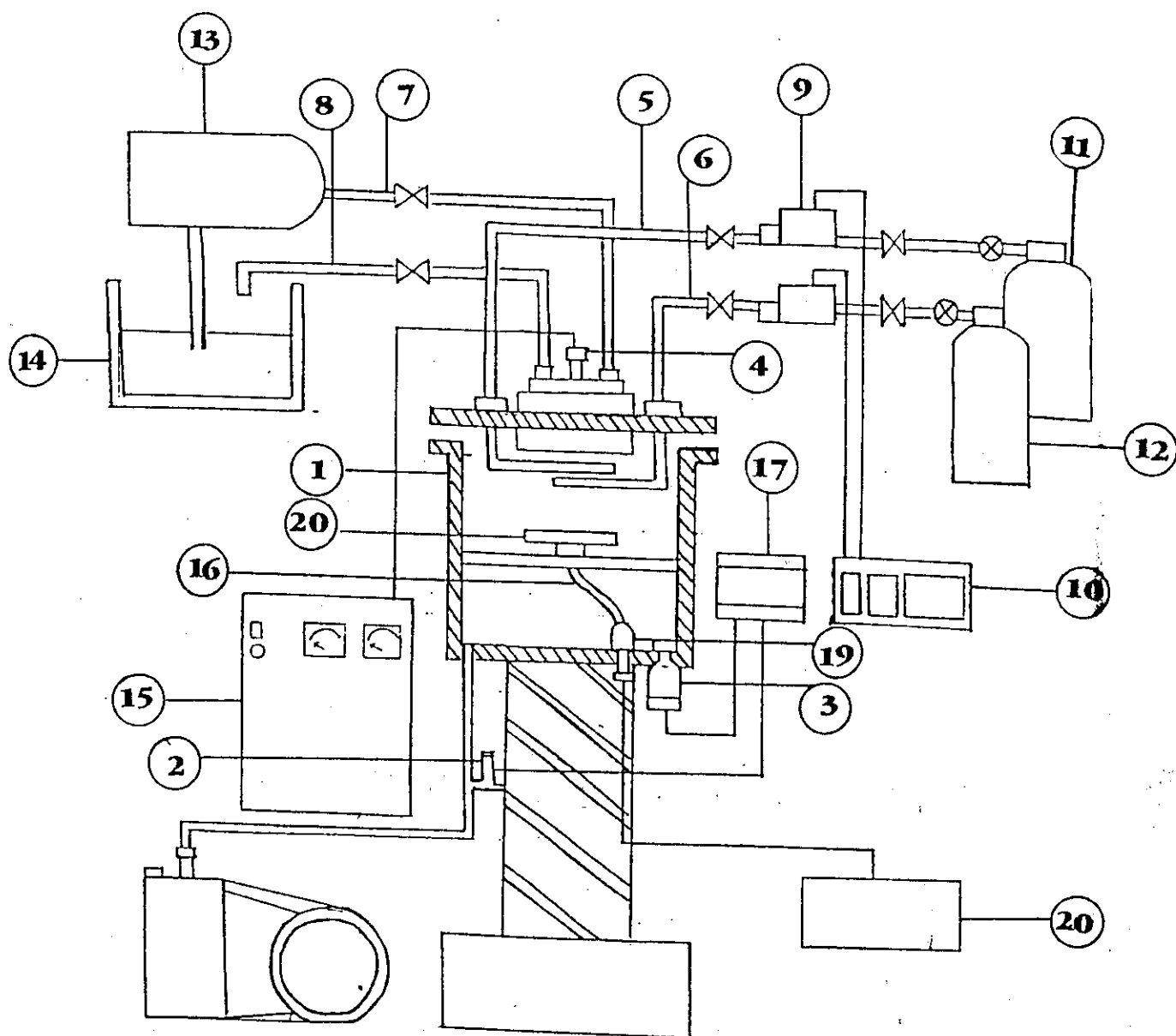
2. ตั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่อง 6260-100 ไว้ประมาณ 11 โวลต์ จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สูงสุดไม่เกิน 12 โวลต์ โดยค่อย ๆ ปรับความต่างศักย์ขึ้นทีละ 1 โวลต์ จนถึงค่าที่ตั้งไว้ จะสังเกตเห็นแสงสว่างที่เครื่อง 6262-100 เข้มขึ้น แสงขาวนี้จะถูกส่งไปตามท่อใยแก้วนำแสง ซึ่งแสงนี้จะไปสะท้อนกับผิวชิ้นงานทำมุมตกกระทบและมุมสะท้อน 45 องศา กับเส้นปกติ เข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

3. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์จะปรากฏเมนูหลักบนจอภาพ แอปพลิเคชันจะอยู่ที่เซตอัพ (Setup) ให้เลื่อนแอปพลิเคชันมาที่ เวฟเลนจ์คาลิเบรชัน (Wavelength calibration) แล้วกดปุ่มเอ็นเทอร์ (Enter)

4. กลับมาที่เมนูหลักเลือกแอคไควร์ (Acquire) แล้วเลื่อนแถบแสงลงมาที่แอปโซลูทรีเฟล็กชัน (Absolute reflection) กดปุ่มเอ็นเทอร์ เพื่อทำการวัดสีโดยใช้หลักการสะท้อนสัมบูรณ์

5. นำแผ่นแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ซึ่งเป็นสารสีขาวนวลมาใช้เป็นตัวอ้างอิง (reference) โดยนำมาวางให้แสงสะท้อนผ่านผิวหน้าของสาร เครื่องจะอ่านค่าแล้วเก็บไว้เปรียบเทียบกับสีของชิ้นงาน

6. หลังจากนั้นกลับมาที่เมนูหลักเลือกกราฟ (Graph) เครื่องจะแสดงผลออกมาเป็นกราฟและค่าของพิกัดสี และอุณหภูมิ หลังจากนั้นถ้าต้องการทำการทดลองต่อก็เปลี่ยนเฉพาะชิ้นงานอย่างเดียว



ภาพประกอบ 43 แสดงการจัดอุปกรณ์ขณะทำการทดลองเคลือบสาร

จากภาพประกอบ 43 แสดงส่วนประกอบในการทดลอง ดังนี้

1. ภาชนะสุญญากาศ
2. เกจพิราณี
3. เกจเพนนิ่ง
4. ขั้วแคโทด
5. ท่อป้อนแก๊สอาร์กอน
6. ท่อป้อนแก๊สไนโตรเจน
7. ท่อน้ำหล่อเย็นเข้า
8. ท่อน้ำหล่อเย็นออก
9. เครื่องวัดและควบคุมการไหลของมวล
10. เครื่อง mass flow power supply and readout
11. ถังแก๊สอาร์กอน
12. ถังแก๊สไนโตรเจน
13. เครื่องสูบน้ำของระบบหล่อเย็น
14. ถังน้ำของระบบหล่อเย็น
15. แหล่งจ่ายไฟ
16. สายทองแดงร้อยท่อเซรามิคต่อระหว่างแท่นวางชิ้นงานและขั้วไฟฟ้า
17. เครื่องอ่านค่าความดัน ทีพีจี 300
18. วงจรป้อนความต่างศักย์ย้อนกลับ
19. ขั้วไฟฟ้า
20. แท่นวางชิ้นงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัย

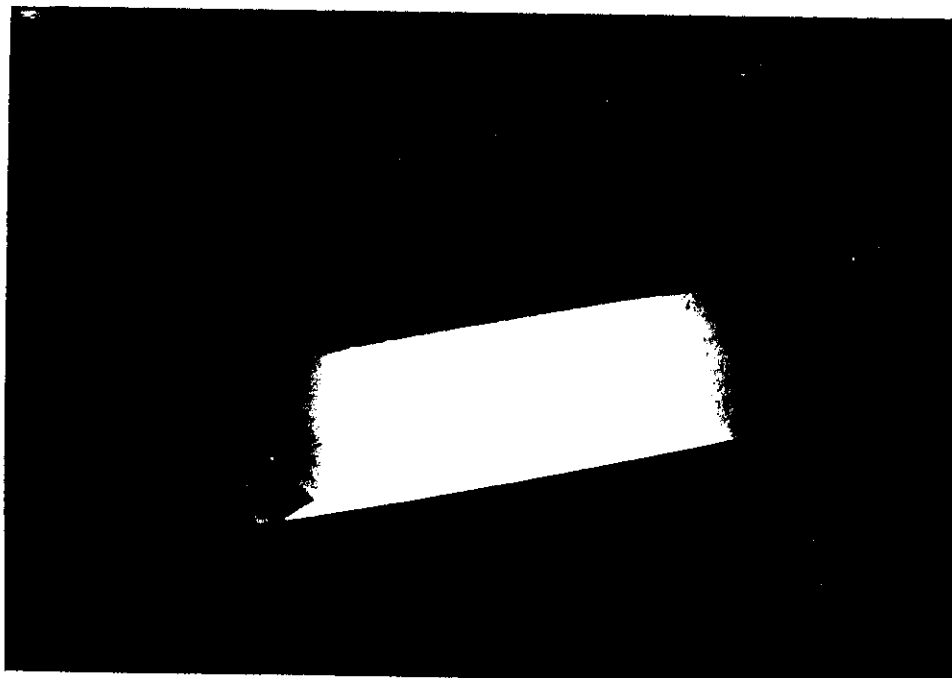
4.1 การศึกษาสีของฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณแก๊สไนโตรเจนต่อปริมาณแก๊สอาร์กอนที่ 38 sccm

4.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองตามขั้นตอนการทดลองที่ 3.8 ในบทที่ 3
2. กำหนดปริมาณแก๊สอาร์กอน 38 sccm แล้วเปรียบเทียบหาปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็นอัตราส่วนของปริมาณแก๊สอาร์กอนที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้
 - 2.1 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 4.00 sccm คิดเป็น 10.50 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.2 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 4.18 sccm คิดเป็น 11.00 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.3 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 4.56 sccm คิดเป็น 12.00 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.4 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 4.94 sccm คิดเป็น 13.00 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.5 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 5.32 sccm คิดเป็น 14.00 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.6 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 5.70 sccm คิดเป็น 15.00 % ของแก๊สอาร์กอน
3. ทำการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 โดยในแต่ละครั้งทำการทดลองที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนปริมาณต่างๆ ที่กำหนดไว้ในข้อ 2 ส่วนค่าตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณแก๊สอาร์กอน ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับที่ป้อนให้กับระบบในการทดลอง ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง ความดันเริ่มต้นในการทดลองหรือองค์ประกอบอื่น ๆ ให้ใช้ค่าเดียวกันหมด
4. ขณะทำการทดลองสังเกตดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแล้วบันทึกค่าตัวแปรอื่น ๆ ไว้เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้

ผลการทดลองที่ 4.1 ครั้งที่ 1

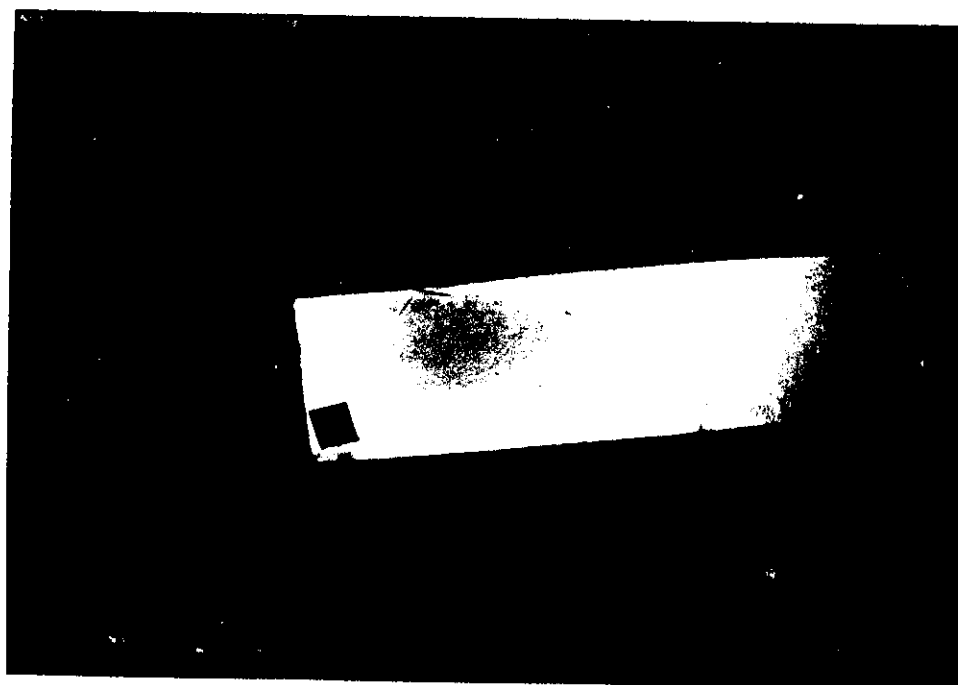
ความดันเริ่มต้น	1.9×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	38.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	4.00	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	6.5×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	2.0×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.4×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.7	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	430	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
พิกัดสีแกน x	0.3401	
พิกัดสีแกน y	0.3580	
อุณหภูมิ	5204	เคลวิน



ภาพประกอบ 44 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 10.5 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm

ผลการทดลองที่ 4.1 ครั้งที่ 2

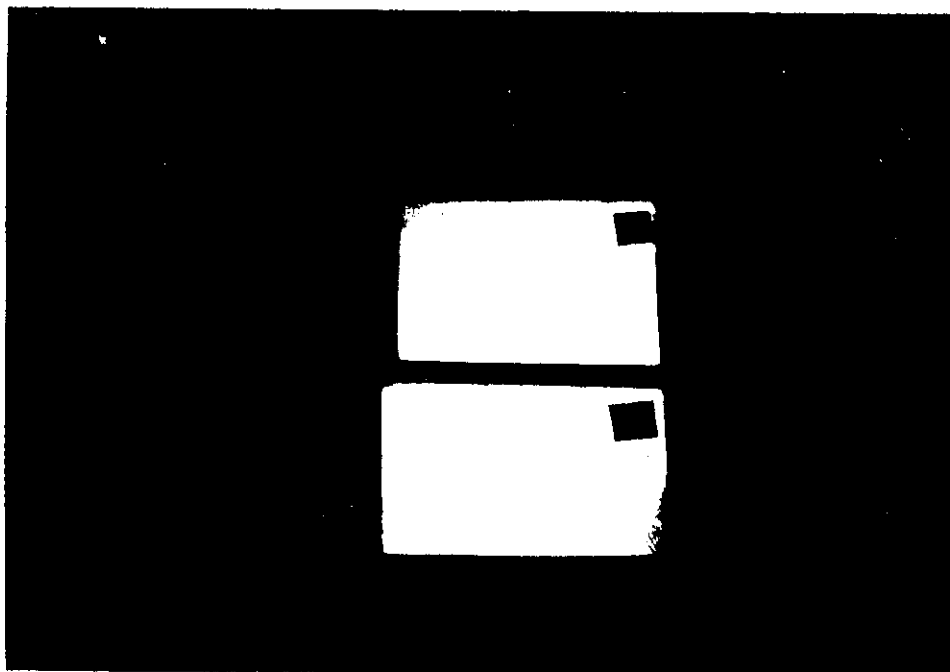
ความดันเริ่มต้น	1.9×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	38.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	4.18	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.9×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	2.0×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.6×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.7	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	430	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
พิกัดสีแกน x	0.3849	
พิกัดสีแกน y	0.3814	
อุณหภูมิ	3919	เคลวิน



ภาพประกอบ 45 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 11 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm

ผลการทดลองที่ 4.1 ครั้งที่ 3

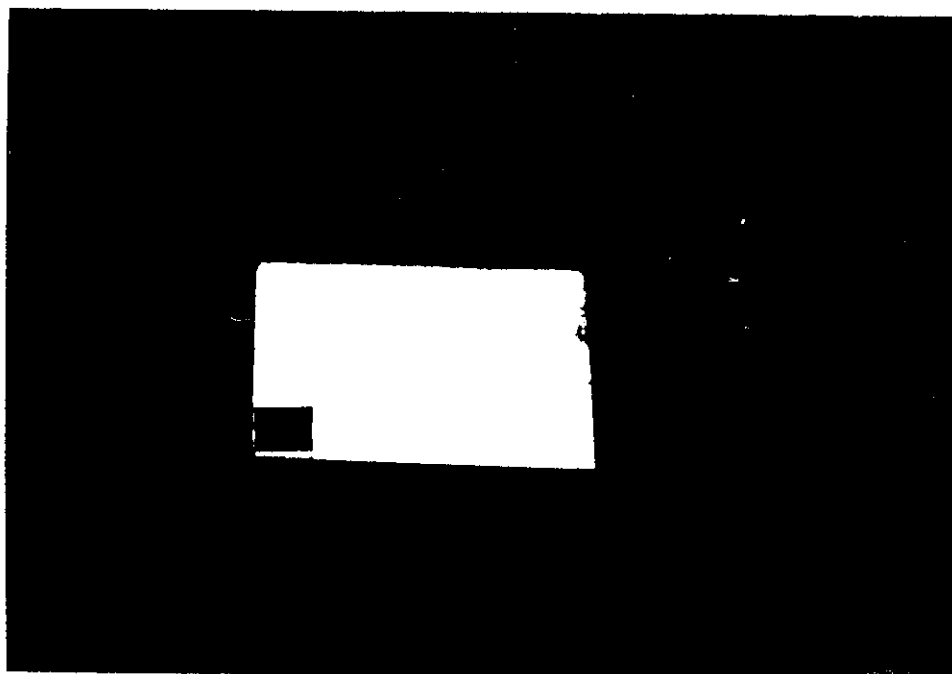
ความดันเริ่มต้น	2.0×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	38.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	4.56	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.9×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	2.0×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.8×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.7	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	440	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
พิกัดสีแกน x	0.3939	
พิกัดสีแกน y	0.3886	
อุณหภูมิ	3919	เคลวิน



ภาพประกอบ 46 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm

ผลการทดลองที่ 4.1 ครั้งที่ 5

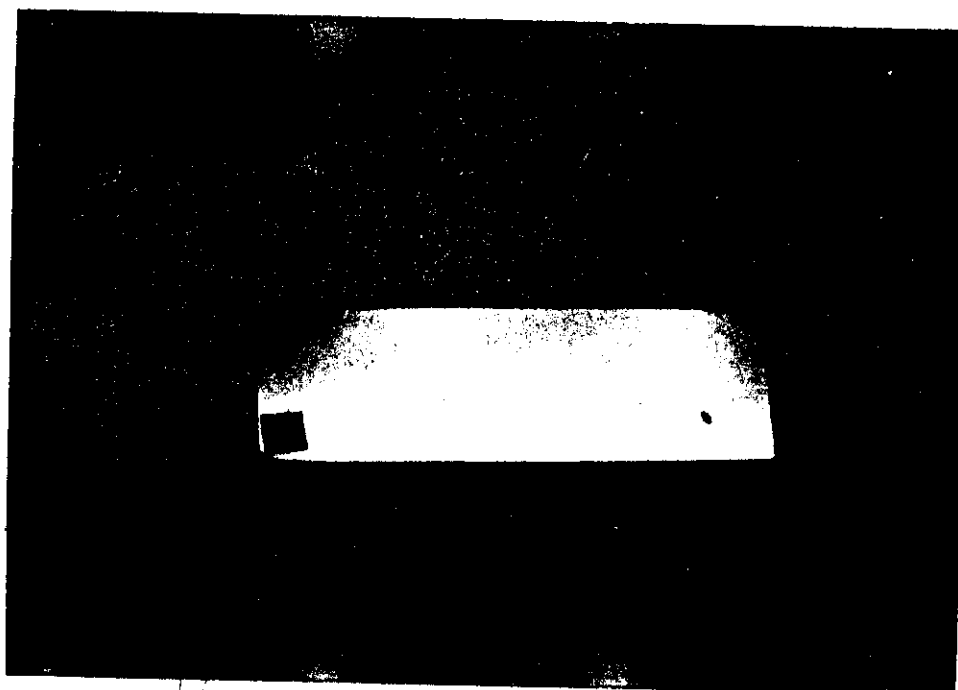
ความดันเริ่มต้น	1.9×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	38.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	5.32	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	9.2×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	2.0×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.9×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.7	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	440	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
พิกัดสีแกน x	0.3801	
พิกัดสีแกน y	0.3781	
อุณหภูมิ	4015	เคลวิน



ภาพประกอบ 48 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm

ผลการทดลองที่ 4.1 ครั้งที่ 6

ความดันเริ่มต้น	2.0×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	38.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	5.70	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	9.9×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	2.0×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	3.8×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.7	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	444	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
พิกัดสีแกน x	0.3656	
พิกัดสีแกน y	0.3597	
อุณหภูมิ (T _c)	4315	เคลวิน



ภาพประกอบ 48 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 38 sccm

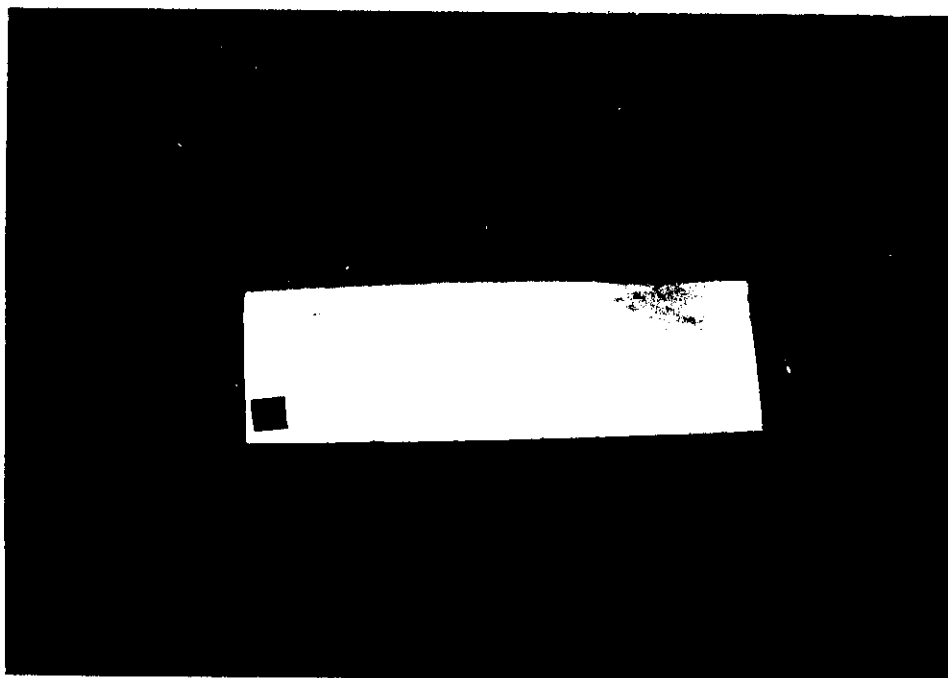
4.2 การศึกษาของฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณแก๊สไนโตรเจนต่อปริมาณแก๊สอาร์กอนที่ 36 sccm

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองตามขั้นตอนการทดลองที่ 3.8 ในบทที่ 3
2. กำหนดปริมาณแก๊สอาร์กอน 36 sccm แล้วเปรียบเทียบหาปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็นอัตราส่วนของปริมาณแก๊สอาร์กอนที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้
 - 2.1 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 3.76 sccm คิดเป็น 10.50 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.2 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 4.14 sccm คิดเป็น 11.50 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.3 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 4.50 sccm คิดเป็น 12.50 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.4 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 4.68 sccm คิดเป็น 13.00 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.5 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 5.40 sccm คิดเป็น 14.00 % ของแก๊สอาร์กอน
3. ทำการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 โดยในแต่ละครั้งทำการทดลองที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนปริมาณต่างๆ ที่กำหนดไว้ในข้อ 2 ส่วนค่าตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณแก๊สอาร์กอน ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับที่ป้อนให้กับระบบในการทดลอง ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง ความดันเริ่มต้นในการทดลองหรือองค์ประกอบอื่น ๆ ให้ใช้ค่าเดียวกันหมด
4. ขณะทำการทดลองสังเกตดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแล้วบันทึกค่าตัวแปรอื่น ๆ ไว้เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้

ผลการทดลองที่ 4.2 ครั้งที่ 1

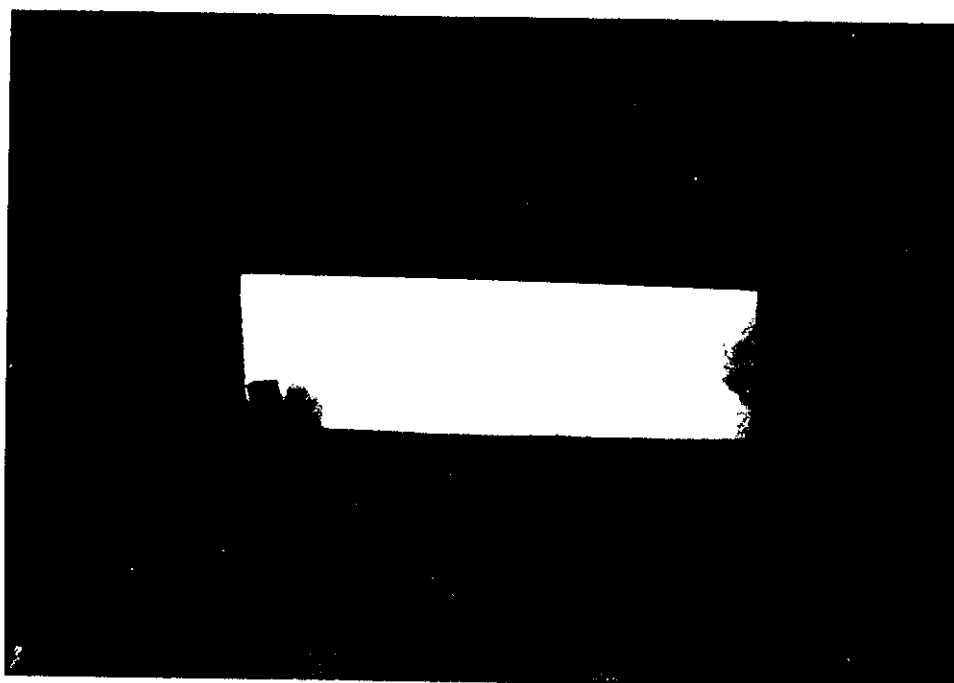
ความดันเริ่มต้น	1.9×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	36.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	3.78	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	6.7×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	1.8×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.3×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.5	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	430	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
พิกัดสีแกน x	0.3921	
พิกัดสีแกน y	0.3888	
อุณหภูมิ	3796	เคลวิน



ภาพประกอบ 50 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 10.5 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm

ผลการทดลองที่ 4.2 ครั้งที่ 2

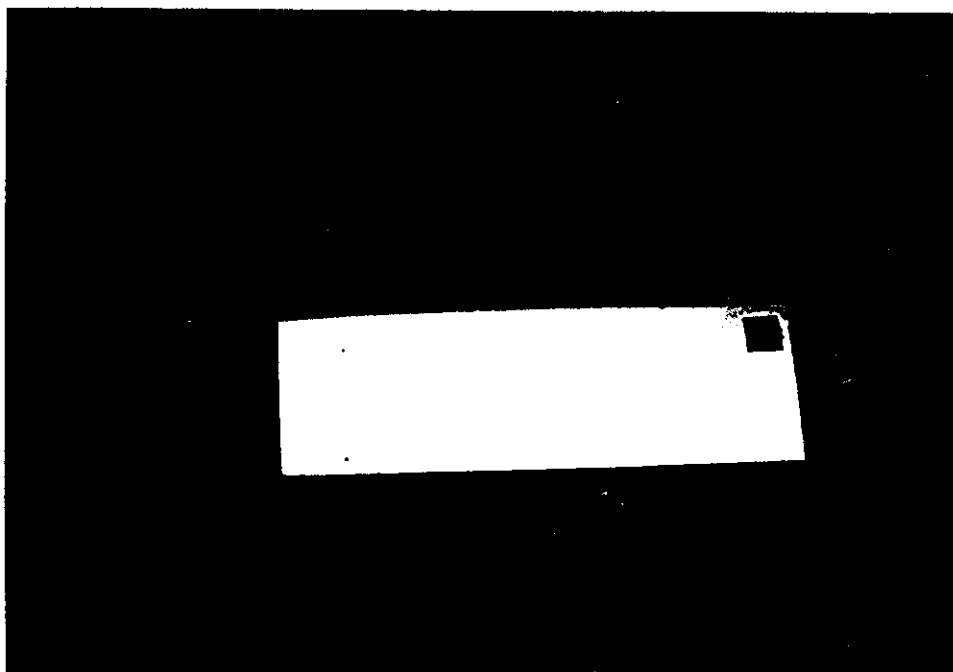
ความดันเริ่มต้น	2.0×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	36.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	4.14	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.6×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	1.8×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.3×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.5	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	430	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
ฟิสิกส์แกน x	0.3676	
ฟิสิกส์แกน y	0.3690	
อุณหภูมิ	4315	เคลวิน



ภาพประกอบ 51 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 11.5 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm

ผลการทดลองที่ 4.2 ครั้งที่ 3

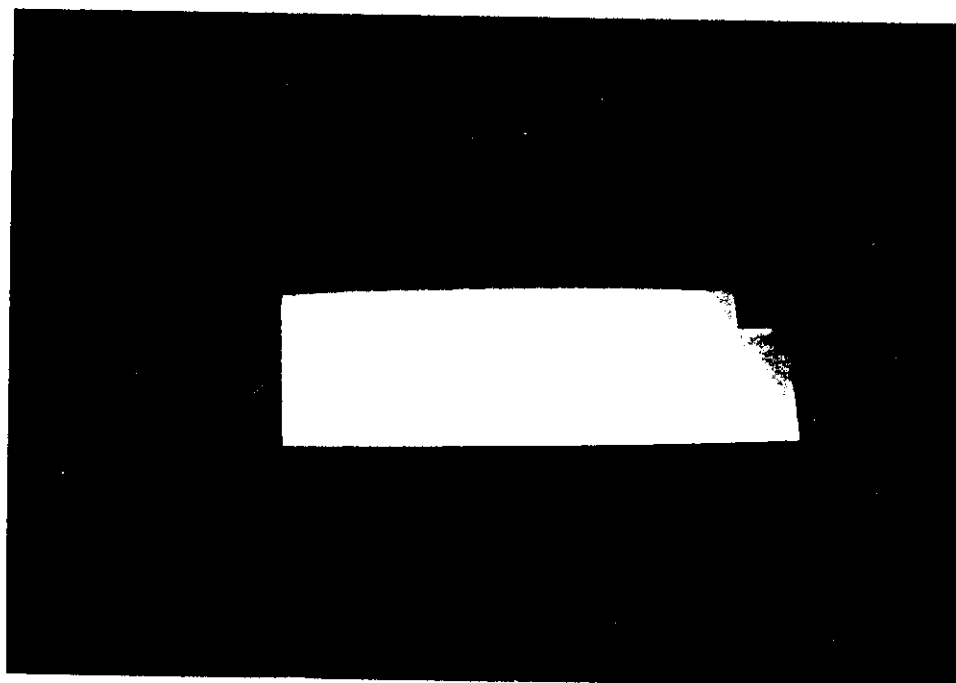
ความดันเริ่มต้น	1.9×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	36.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	4.50	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.8×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	1.8×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.3×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.5	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	430	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
พิกัดสีแกน x	0.3573	
พิกัดสีแกน y	0.3575	
อุณหภูมิ	4589	เคลวิน



ภาพประกอบ 52 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 12.5 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm

ผลการทดลองที่ 4.2 ครั้งที่ 4

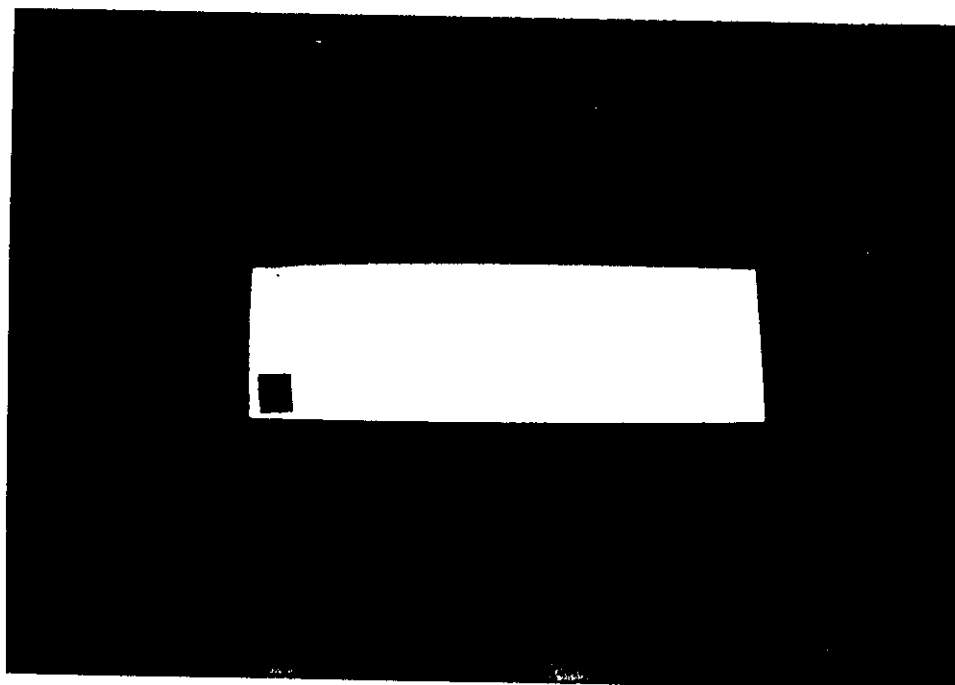
ความดันเริ่มต้น	1.9×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	36.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	4.68	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.9×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	1.8×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.3×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.5	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	430	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
ฟลักซ์แก๊ส x	0.3403	
ฟลักซ์แก๊ส y	0.3580	
อุณหภูมิ	5204	4 เคลวิน



ภาพประกอบ 53 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 13 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm

ผลการทดลองที่ 4.2 ครั้งที่ 5

ความดันเริ่มต้น	1.9×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	36.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	5.04	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.9×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	1.8×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.3×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.5	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	420	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	160	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30	นาที
พิกัดสีแกน x	0.3437	
พิกัดสีแกน y	0.3609	
อุณหภูมิ	5081	เคลวิน



ภาพประกอบ 54 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 36 sccm

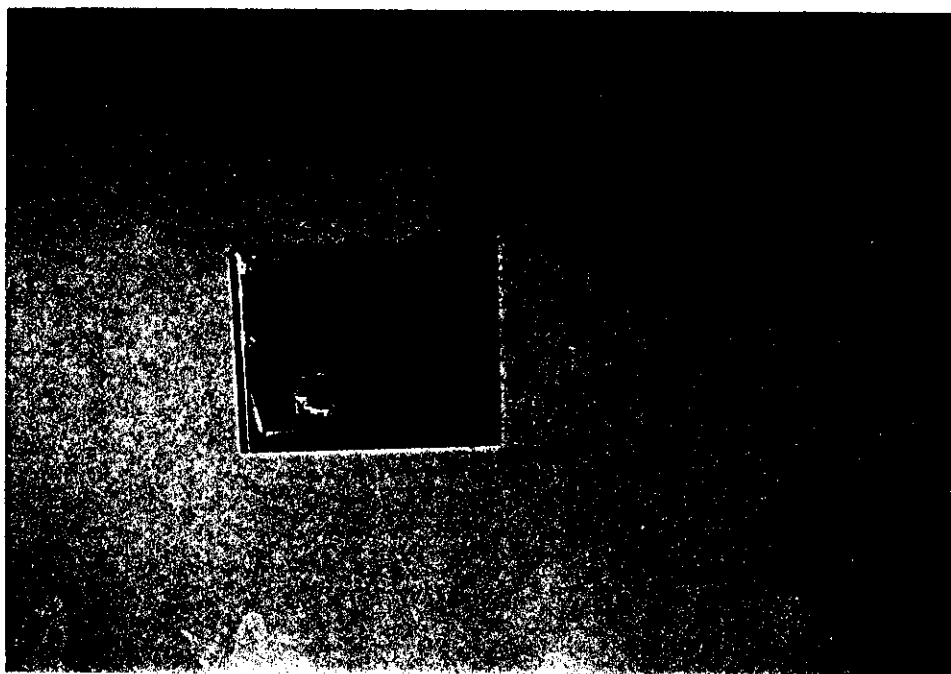
4.3 การศึกษาของฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนปริมาณแก๊สไนโตรเจนต่อปริมาณแก๊สอาร์กอนที่ 30 sccm

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองตามขั้นตอนการทดลองที่ 3.8 ในบทที่ 3
2. กำหนดปริมาณแก๊สอาร์กอน 30 sccm แล้วเปรียบเทียบหาปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็นอัตราส่วนของปริมาณแก๊สอาร์กอนที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้
 - 2.1 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 3.60 sccm คิดเป็น 12.00 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.2 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 3.75 sccm คิดเป็น 12.50 % ของแก๊สอาร์กอน
 - 2.3 ปริมาณแก๊สไนโตรเจน 3.90 sccm คิดเป็น 13.00 % ของแก๊สอาร์กอน
3. ทำการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 โดยในแต่ละครั้งทำการทดลองที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนปริมาณต่างๆ ที่กำหนดไว้ในข้อ 2 ส่วนค่าตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณแก๊สอาร์กอน ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับที่ป้อนให้กับระบบในการทดลอง ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง ความดันเริ่มต้นในการทดลองหรือองค์ประกอบอื่น ๆ ให้ใช้ค่าเดียวกันหมด
4. ขณะทำการทดลองสังเกตดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแล้วบันทึกค่าตัวแปรอื่น ๆ ไว้เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้

ผลการทดลองที่ 4.3 ครั้งที่ 1

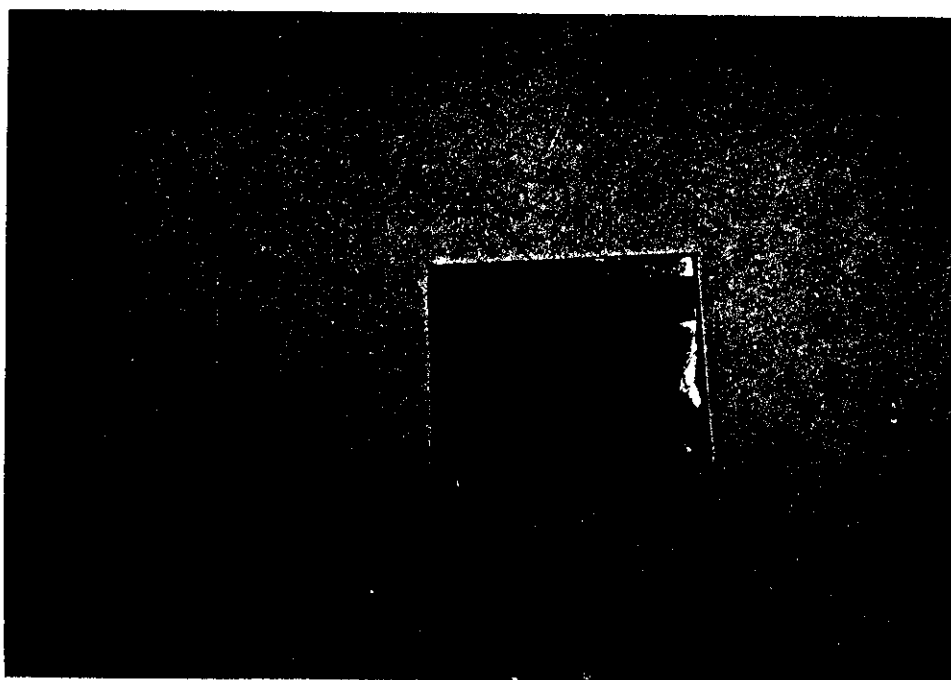
ความดันเริ่มต้น	1.4×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	30.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	3.60	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.7×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	1.5×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.0×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.80	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	420	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	200	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	15	นาที
พิกัดสีแกน x	0.4510	
พิกัดสีแกน y	0.4238	
อุณหภูมิ	2935	เคลวิน



ภาพประกอบ 55 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 12.00 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 30 sccm

ผลการทดลองที่ 4.3 ครั้งที่ 2

ความดันเริ่มต้น	1.4×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	30.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	3.75	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.8×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	1.5×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.0×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.80	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	420	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	200	โวลต์
เวลาที่ใส่ในการทดลอง	15	นาที
พารามิเตอร์ x	0.4112	
พารามิเตอร์ y	0.4066	
อุณหภูมิ	3495	เคลวิน



ภาพประกอบ 56 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 12.50 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 30 sccm

ผลการทดลองที่ 4.3 ครั้งที่ 3

ความดันเริ่มต้น	1.2×10^{-5}	มิลลิบาร์
ปริมาณแก๊สอาร์กอน	30.00	sccm
ปริมาณแก๊สไนโตรเจน	3.90	sccm
ความดันหลังป้อนแก๊สไนโตรเจน	7.1×10^{-4}	มิลลิบาร์
ความดันหลังป้อนแก๊สอาร์กอน	1.5×10^{-3}	มิลลิบาร์
ความดันรวมหลังป้อนแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน	2.0×10^{-3}	มิลลิบาร์
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	1.80	แอมแปร์
ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทด	410	โวลต์
ความต่างศักย์ย้อนกลับที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้า	200	โวลต์
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	20	นาที
พิกัดสีแกน x	0.4143	
พิกัดสีแกน y	0.4070	
อุณหภูมิ	3440	เคลวิน



ภาพประกอบ 57 ชิ้นงานของการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 13.00 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน โดยปริมาณแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 30 sccm

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับฟลักซ์และอุณหภูมิที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 38 sccm

ครั้งที่	ปริมาณแก๊ส ไนโตรเจน(sccm)	ฟลักซ์แกน x	ฟลักซ์แกน y	อุณหภูมิ (เคลวิน)
1	4.00	0.3401	0.3580	5204
2	4.18	0.3849	0.3814	3919
3	4.56	0.3939	0.3886	3741
4	4.94	0.3783	0.3762	4056
5	5.32	0.3801	0.3781	4015
6	5.70	0.3656	0.3597	4315

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับฟลักซ์และอุณหภูมิที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 36 sccm

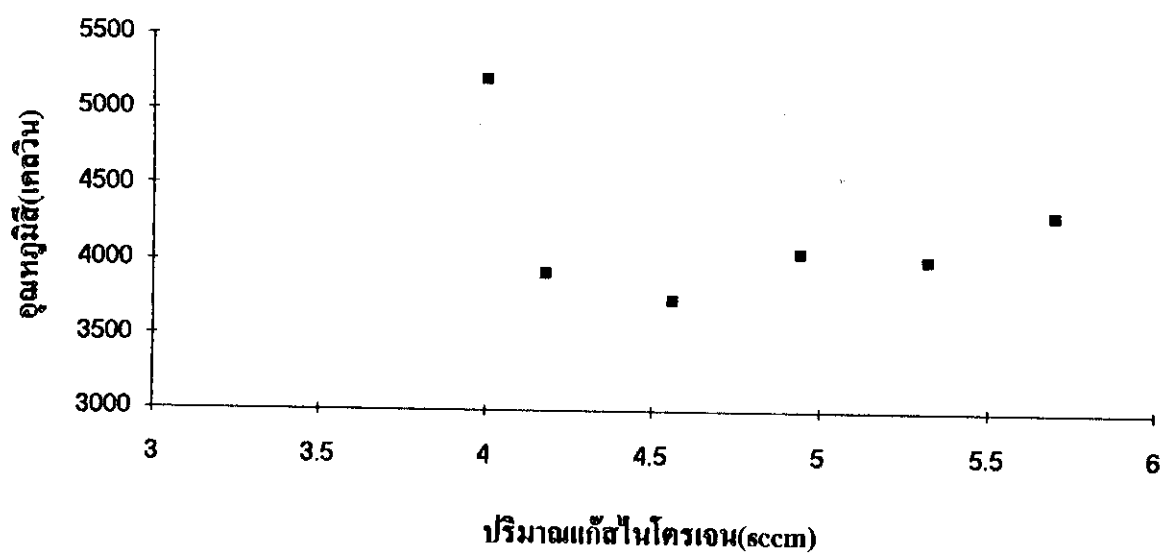
ครั้งที่	ปริมาณแก๊ส ไนโตรเจน(sccm)	ฟลักซ์แกน x	ฟลักซ์แกน y	อุณหภูมิ (เคลวิน)
1	3.78	0.3921	0.3888	3796
2	4.14	0.3676	0.3690	4315
3	4.50	0.3573	0.3575	4589
4	4.68	0.3403	0.3580	5204
5	5.04	0.3437	0.3609	5081

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับฟลักซ์และอุณหภูมิที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 30 sccm

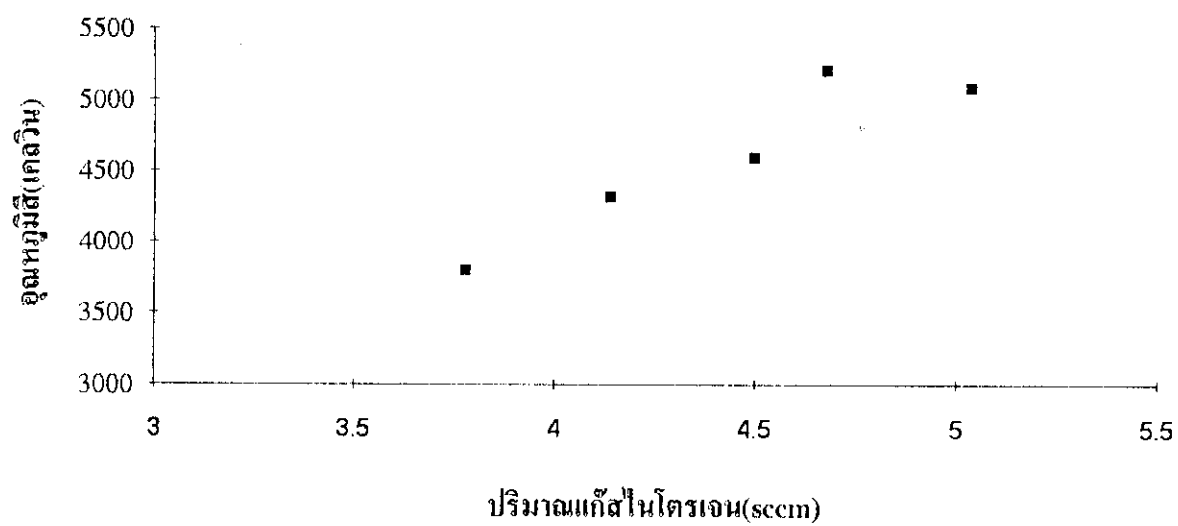
ครั้งที่	ปริมาณแก๊ส ไนโตรเจน(sccm)	ฟลักซ์แกน x	ฟลักซ์แกน y	อุณหภูมิ (เคลวิน)
1	3.60	0.4510	0.4238	2935
2	3.75	0.4112	0.4066	3495
3	3.90	0.4143	0.4070	3440

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบปริมาณแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไนโตรเจน ณ จุดที่ทำปฏิกิริยากันแล้วให้ฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์เป็นสีใกล้เคียงกับสีทองมากที่สุด ของการทดลองแต่ละตอน

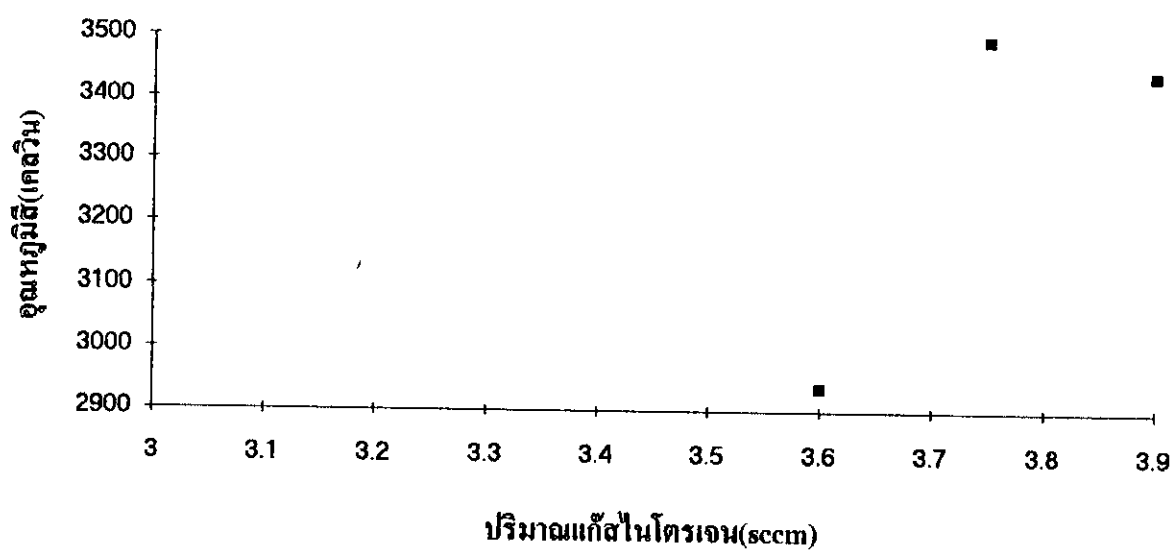
การทดลอง ตอนที่	ปริมาณแก๊ส อาร์กอน (sccm)	ปริมาณแก๊ส ไนโตรเจน (sccm)	ฟลักซ์แกน x	ฟลักซ์แกน y	อุณหภูมิ (เคลวิน)
4.1	38	4.56	0.3939	0.3886	3741
4.2	36	3.78	0.3921	0.3888	3796
4.3	30	3.75	0.4112	0.4066	3495



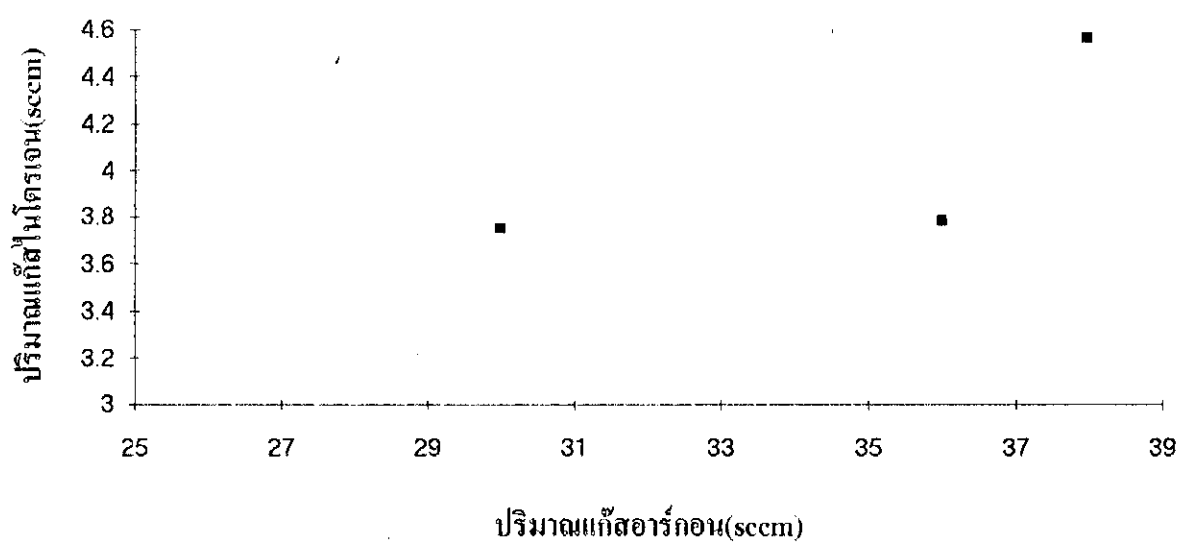
ภาพประกอบ 58 กราฟของปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับอุณหภูมิ ที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 38 sccm



ภาพประกอบ 59 กราฟของปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับอุณหภูมิ ที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 36 sccm



ภาพประกอบ 60 กราฟของปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับอุณหภูมิ ที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 30 sccm



ภาพประกอบ 61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไนโตรเจนและปริมาณแก๊สอาร์กอน ณ จุดที่ทำปฏิกิริยากันดีที่สุด

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการทดลองเมื่อคงค่าตัวแปรอื่นๆไว้ จะให้ผลของสีของฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์บนผิวชิ้นงานที่แตกต่างกัน ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่น้อยกว่าจะให้สีของฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์บนผิวชิ้นงานที่แตกต่างกัน ปริมาณแก๊สที่น้อยกว่าจะให้สีของฟิล์มที่ออกเป็นสีเหลืองอ่อนหรือออกเป็นสีขาวเมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ใช้มีค่าน้อยมาก ส่วนในชิ้นงานทดลองที่ใช้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนมากกว่า จะให้สีของฟิล์มเคลือบที่มีสีเหลืองเข้มกว่าหรือออกเป็นสีออกเขียวหรือเป็นสีทองแดงมากกว่า ดังกราฟของปริมาณแก๊สไนโตรเจนกับอุณหภูมิสีในภาพประกอบ 58, 59 และ 60 เมื่อเทียบกับกราฟของอุณหภูมิสีในภาพประกอบ 23

เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณแก๊สอาร์กอนเป็น 38 sccm ถ้าใช้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 4.56 sccm หรือเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน จะเป็นจุดที่แก๊สทำปฏิกิริยากันดีที่สุดคือให้ฟิล์มเคลือบที่ได้ออกมาเป็นสีเหลืองใกล้เคียงกับทอง แต่ถ้าปริมาณแก๊สอาร์กอนเป็น 36 sccm ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ใช้เป็น 3.78 sccm หรือเป็น 10.5 เปอร์เซ็นต์ของแก๊สอาร์กอน จะเป็นจุดที่แก๊สทำปฏิกิริยากันดีที่สุด สีของฟิล์มเคลือบที่ได้จะคล้ายกับสีทอง แต่ถ้าปริมาณแก๊สอาร์กอนเป็น 30 sccm ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ใช้เป็น 3.75 sccm หรือเป็น 12.5 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นจุดที่แก๊สทำปฏิกิริยากันดีที่สุด สีของฟิล์มเคลือบที่ได้จะคล้ายกับสีทอง ถ้าเทียบปริมาณแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน ณ จุดที่แก๊สทำปฏิกิริยากันดีที่สุดในการทดลองทั้งสามตอนพบว่า ถ้าลดปริมาณแก๊สอาร์กอน ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ทำปฏิกิริยากันดีที่สุดจะลดลงตามไปด้วย เพราะปริมาณของไทเทเนียมที่หลุดออกมาเนื่องจากถูกอาร์กอนไอออนจะน้อยลง ทำให้ใช้แก๊สไนโตรเจนในการจับตัวเป็นไทเทเนียมไนไตรด์น้อยลง ดังกราฟในภาพประกอบ 61

อภิปรายผล

สาเหตุของผลการทดลองที่ได้ในชิ้นงานที่ใช้แก๊สไนโตรเจนน้อยคาดว่าปริมาณแก๊สไนโตรเจนอาจไม่เพียงพอปริมาณสารไทเทเนียมที่ถูกแก๊สอาร์กอนสปีดเตอร์ออกมา มีจำนวนมากกว่าเป็นจำนวนมาก ฟิล์มบางที่เกิดขึ้นอาจไม่ใช่สารไทเทเนียมไนไตรด์เพียงอย่างเดียว อาจมีแค่ฟิล์มของสารไทเทเนียมเพียงอย่างเดียว ซึ่งฟิล์มของสารไทเทเนียมจะมีสีเป็นสีขาวหรือสีเงินมากกว่าเป็นสีทอง ส่วนในกรณีการทดลองที่ใช้แก๊สไนโตรเจนปริมาณมาก คาดว่าปริมาณแก๊สไนโตรเจนอาจมีปริมาณที่มากเกินไปที่จะใช้ในการรวมตัวกับไทเทเนียมที่หลุดออกมา การรวมตัวของสารสองชนิดนี้อาจเปลี่ยนแปลงไปจากปกติที่การจับตัวของสารไทเทเนียม 1 อะตอมกับไนโตรเจน 1 อะตอม เกิดเป็นสารไทเทเนียมไนไตรด์ แต่เมื่อมีปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่มากกว่าการรวมตัวจึงอาจเปลี่ยนเป็นสารไทเทเนียม 1 อะตอมกับไนโตรเจน 2 อะตอม เกิดเป็นสารประกอบชนิดอื่นขึ้นมา สีของฟิล์มเคลือบที่ได้จึงเปลี่ยนไป

ข้อเสนอแนะ

ขณะทำการทดลองพบว่าความดันรวมของแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนก่อนป้อนกระแสและความดันขณะทำการทดลองไม่คงที่ เนื่องจากขณะทำการทดลองแก๊สไนโตรเจนจะถูกนำไปใช้เพื่อรวมตัวกับสารไทเทเนียมที่หลุดออกมาจากการเข้าชนของอนุภาคพลังงานสูงของแก๊สอาร์กอน ความดันรวมที่เหลืออยู่ในขณะทำการทดลองจึงควรที่จะเป็นความดันของแก๊สอาร์กอนที่ป้อนให้ก่อนทำการทดลอง แต่ในการทดลองพบว่าความดันที่เหลืออยู่ยังมีค่ามากกว่าความดันแก๊สอาร์กอน แสดงว่าแก๊สไนโตรเจนไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยารวมกับสารไทเทเนียมทั้งหมด สำหรับสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ไม่สามารถสรุปได้แน่นอนเนื่องจากไม่สามารถทราบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการทดลองได้ ถ้าต้องการทราบถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นจะต้องมีเครื่องตรวจวัดแบบพิเศษเพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สที่มีในการทดลองได้

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ชัยวิทย์ ศิลาวรรณาโนย. ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ภาพพิมพ์, 2526.
- ธวัชชัย เมฆสุวรรณค์ และ โยจิกะชี ชาวามูระ. เทคนิคการซ่อมเครื่องรับโทรทัศน์สี. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ดวงกมล, 2538.
- ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และ อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล. วัสดุโลหะ. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2537
- สุพัฒพงษ์ คำรงรัตน์, พิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ และ พินิจ เจริญสมศักดิ์. การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสเป็คเตอรืง. รายงานเสนอสภาวิจัยแห่งชาติ . กรุงเทพฯ : ภาควิชาฟิสิกส์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, พฤศจิกายน 2531.
- Bunshan, R.F. Deposition Technologies for Film and Coatings Developments and Application. New Jersey : Noyes Publications : 1982.
- Chapman, B. Glow Discharge Process Sputtering and Plasma Etching. New York : John Wiley and Sons : 1980.
- Danroc, J., Albert, A. and R, Gillet. J. Surface and Coatings Technology : 33 : 83-90 : 1987.
- Hecth, E. Optics : New York. Addison-Wesley : 1987.
- Hintermann, H.E. J. Vac. Sci. Tech. 2 : 816 : 1984.
- Howatson, A.M. An Introduction to Gas Discharges. Grate Britain : Pergamon press : 1976.
- Hunt, R.W.G. Measuring Colour. London : Ellis Horwood : 1991.
- Lacey, P. Finishing. 10 : 24 : 1986.
- Nakamura, K. and others. Titanium and Titanium Alloys. 3 : 2445 : 1982.
- Schintlmeister, W. and Pacher, O. J. Vac. Sci. Tech. 12 : 743 : 1975.
- Sproul, W.D, Rudnik, P.J and Gogal, G.A. Thin Solid Film : 1989.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สูตรการแปลงพิกัด

การแปลงจาก R,G,B ไปเป็น X,Y,Z (Hunt.1991 : 52)

$$X = 0.49R + 0.31G + 0.20B$$

$$Y = 0.17697R + 0.8140G + 0.01063B$$

$$Z = 0.00R + 0.01G + 0.99B$$

เมื่อ R คือ ช่วงความยาวคลื่นของแสงสีแดง

G คือ ช่วงความยาวคลื่นของแสงสีเขียว

B คือ ช่วงความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน

พิกัดสี (Chromaticity Co-ordination) (Hunt.1991 : 62)

$$x = X / (X+Y+Z)$$

$$y = Y / (X+Y+Z)$$

$$z = Z / (X+Y+Z)$$

เมื่อ X คือ สีต้นของแสง

Y คือ ความสว่างของแสงสี

Z คือ ความเข้มตัวของแสงสี

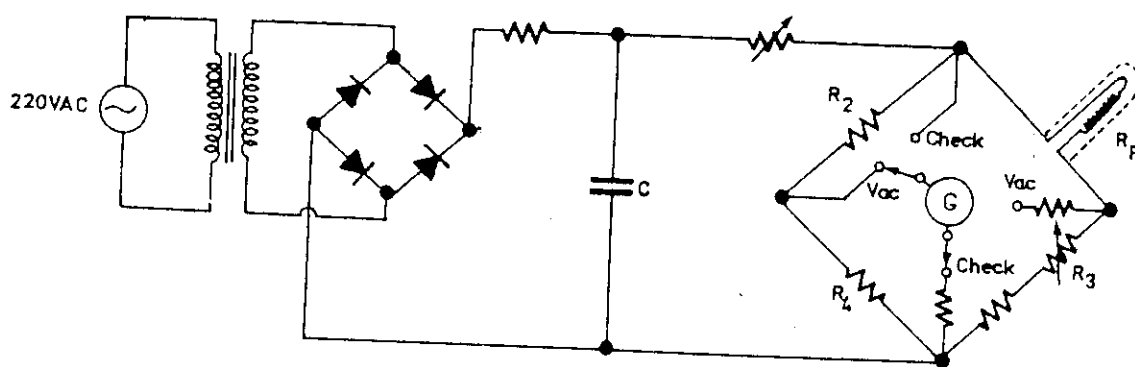
ภาคผนวก ข

เกจพิราณี

गेजพิรานี

หลักการของเกจพิรานี คือ การนำความร้อนของแก๊สทำให้อุณหภูมิของลวดร้อนเปลี่ยนแปลง มีผลทำให้ความต้านทานของลวดเปลี่ยนไปด้วย ค่าความดันที่เปลี่ยนไปจึงขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊ส ลักษณะหัววัดของเกจจะเป็นหลอดแก้วหรือหลอดโลหะ ภายในมีเส้นลวดซึ่งเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าอุณหภูมิของเส้นลวดจะเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากความร้อนถูกพาไปโดยโมเลกุลของแก๊สที่มาปะทะ การสูญเสียความร้อนจะมากที่ความดันสูง ที่ความดันต่ำอุณหภูมิของลวดจะสูงขึ้น ความต้านทานของลวดก็จะสูงขึ้นด้วย

ความต้านทานของเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ วัดได้โดยวงจรวีตสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ดังภาพประกอบ 62



ภาพประกอบ 62 วงจรเกจพิรานี (ชัยวิทย์.2526 : 57)

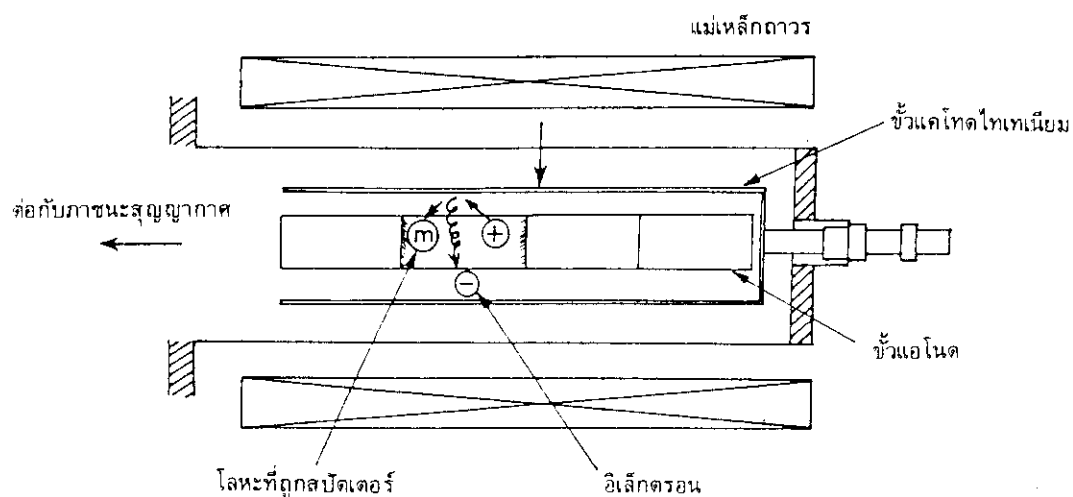
ภาคผนวก ค

เกอเพนนิ่ง

เกจเพนนิ่ง

เกจเพนนิ่งอาจเรียกชื่ออื่นได้ คือ เกจฟิลิปไอออไนเซชัน (Philip ionization gauge) เกจหัวแคโทดเย็น (Cold cathode ionisation gauge)

หลักการคือสนามไฟฟ้าระหว่างหัวแคโทดเย็น (หัวที่ไม่ต้องเผาให้ร้อนเพื่อปลดปล่อยอิเล็กตรอน) จะทำให้แก๊สแตกตัวดังภาพประกอบ 63 หัวแคโทดเป็นโลหะไทเทเนียมรูปทรงกระบอกกลวง ภายในมีหัวแอโนดซ้อนกัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างหัวมีค่าประมาณ 2 กิโลโวลต์ รอบนอกทรงกระบอกสุญญากาศเป็นแม่เหล็กถาวร ขนาด 400 เกาส์ อิเล็กตรอนที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะถูกเร่งไปยังหัวแอโนดโดยวิถีวงโคจรเป็นรูปเกลียว และจะถูกบังคับให้วิ่งกลับไปกลับมาระหว่างหัวแคโทดกับหัวแอโนดโดยสนามแม่เหล็กจนกระทั่งถูกจับไว้โดยหัวแอโนด ส่วนไอออนประจุบวกจะวิ่งไปปะทะหัวแคโทด แล้วปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และอะตอมเป็นกลาง อะตอมไทเทเนียมนี้จะไปเกาะกับผนังของทรงกระบอกโดยรอบ ทำหน้าที่ดูดกลืนแก๊สได้อีก



ภาพประกอบ 63 เกจเพนนิ่ง (ชัยวิทย์. 2529 : 59)

ประวัติของผู้วิจัย

ชื่อ นายภารุจ ชื้อสกุล บัณฑิตธาคาวิชย์

เกิดวันที่ 17 เดือนกรกฎาคม พุทธศักราช 2512

สถานที่เกิด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 613 หมู่ 1 ตำบลบางแก้ว อำเภอบางพลี
จังหวัดสมุทรปราการ 10540 โทร 3858171

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน อาจารย์ 3

สถานที่ทำงานปัจจุบัน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520
โทร 3266055-101

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2529 มัธยมปลาย(แผนกวิทยาศาสตร์) จากโรงเรียนปทุมคงคา กรุงเทพมหานคร

พ.ศ. 2533 วท.บ.(วิชาเอกฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง

พ.ศ. 2538 วท.ม.(วิชาเอกฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

สภาวะความดันแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธี
สปัตเตอร์ริง

บทคัดย่อ
ของ
ภารจ บัณฑิตาวิทย์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์
มีนาคม 2539

กระบวนการสปีดเตอริง เป็นวิธีการเคลือบสารลงบนชิ้นงานในระบบสุญญากาศความดันต่ำ โดยการปลดปล่อยอนุภาคจากเป้าสารเคลือบการถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง แล้วทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของสารเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ซึ่งเป็นสารประกอบเซรามิกส์ที่มีสีทองมีความแข็งทนทานต่อการกัดกร่อน นำไปประยุกต์ใช้ในงานได้อย่างกว้างขวาง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความดันแก๊สที่เหมาะสมในการเคลือบสารไทเทเนียมไนไตรด์ โดยเครื่องสปีดเตอริงแบบ คีซี พลานาร์ แมกนีตรอน

จากการทดลองพบว่าสีของสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์จะมีลักษณะที่แตกต่างขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีในการเคลือบแบบสปีดเตอริง ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มเคลือบกับความดันแก๊สไนโตรเจนและอาร์กอน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ที่จะได้ฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

OPTIMUM GAS PRESSURE CONDITION FOR DEPOSITION OF TITANIUMNITRIDE
THIN FILMS BY SPUTTERING METHOD

AN ABSTRACT
BY
PARUT BANTITADAWIT

Presented in partial fulfillment of the requirements for the
Master of Science Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
March 1996

The sputtering process are the method which uses to deposite substrate in vacuum by discharging deposited particle, by colliding with higher energy particle in the form of a single atom and depositing target. In this research, using thin films of titaniumnitride , golden-colored ceramics compound, which is durable , resistant to corrosion and has many application uses. This research also study the optimum gas pressure which is suitable for desposition of titaniumnitride in sputtering DC. planar magnetron.

From the experiment , we found that when changing factors in the sputtering processes the color of titaniumnitride has been deferent too are found that changing the sputtering factors changes the color of titaniumnitride result of changing color of deposited films due changing of pressure of Nitrogen and Argon was also studies in order to get the optimum value for making films with most practical use.