

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



นายธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

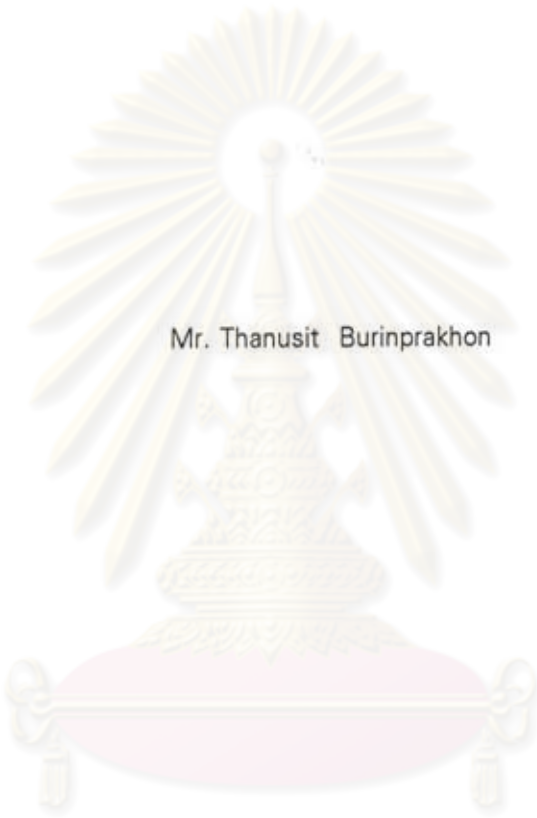
พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-934-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

16๗๐๐1๖๘

Preparation of Thin Films by DC Magnetron Sputtering



Mr. Thanusit Burinprakhon

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-631-934-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์  
โดย  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
ภาควิชา

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนิตรอนสปีดเตอริง  
นายธนูสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี  
ฟิสิกส์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

*ลันติ งามสุวรรณ*

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลันติ งามสุวรรณ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

*สมพงษ์ ฉัตรภรณ์*

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์)

*ขจรยศ อยู่ดี*

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)

*ภียโย ปันยารชุน*

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภียโย ปันยารชุน)

*วิจิตร เส็งหะพันธุ์*

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เส็งหะพันธุ์)



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน : การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกเนตรอนสปัตเตอร์ริง (PREPARATION OF THIN FILMS BY DC MAGNETRON SPUTTERING) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, 192 หน้า. ISBN 974-631-934-5

ได้สร้างระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดีซีแมกเนตรอนสปัตเตอร์ริงซึ่งมีแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบแมกเนตรอนระนาบวงกลมที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ และใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของโลหะโมลิบดีนัมและฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมบนวัสดุรองรับซึ่งเป็นกระจก จากการวัดลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของระบบ พบว่า ลักษณะสื่อนี้ได้รับอิทธิพลจากความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผิวเข้ามา และมีความสอดคล้องกับสมการทั่วไปในรูป  $I = \beta(V - V_0)^2$  ในช่วงความดันกาซที่จำกัดเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่

ฟิล์มบางของโลหะโมลิบดีนัมถูกเตรียมขึ้นจากการสปัตเตอร์เป้าโมลิบดีนัมบริสุทธิ์ ฟิล์มบางของโมลิบดีนัมที่เรียบ สะท้อนแสงดี และสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำประมาณ 20 ไมโครโอห์ม-เซนติเมตรสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิของวัสดุรองรับ 100 °C ความดันของกาซอาร์กอนต่ำกว่า 30 มิลลิทอร์ร์ และความต่างศักย์สูงกว่า 450 โวลท์ ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงว่าฟิล์มบางเหล่านี้เป็นผลึกพหุที่จัดเรียงตัวโดยหันระนาบ (110) ขนานกับระนาบของวัสดุรองรับ

ฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมถูกเตรียมขึ้นจากการสปัตเตอร์เป้าทองแดงที่ฝังอินเดียมบนพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์ในอัตราส่วนต่างๆ กัน คือ 22, 38, และ 63 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะในการเตรียมฟิล์มเดียวกัน พบว่า สภาพต้านทานของฟิล์มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ของอินเดียมบนเป้าเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางทั้งสามชุด เปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางของทองแดงและฟิล์มบางของอินเดียม พบว่า ฟิล์มบางที่ได้เป็นโลหะผสมในเฟสอัลฟาของทองแดงที่มีเปอร์เซ็นต์ของอินเดียมในเนื้อฟิล์มเป็น 6.9, 10.4, และ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... ฟิสิกส์  
สาขาวิชา ..... ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา ..... 2537.....

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....



## C325454 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: THIN FILM DEPOSITION / GLOW DISCHARGE / MAGNETRON SPUTTERING

THANUSIT BURINPRAKHON : PREPARATION OF THIN FILMS BY DC MAGNETRON SPUTTERING. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. KAJORNYOD YOODEE, Ph.D. 192 pp.

ISBN 974-631-934-5

A dc magnetron sputtering system for thin film coating with an air-cooled circular planar magnetron sputtering source was constructed and used for preparation of molybdenum thin films and Cu-In alloy thin films on glass substrates. I-V characteristics of the system were measured and found to be strongly influenced by the magnetic field intensity at the target surface. The I-V relation was fitted to a general expression  $I = \beta(V - V_0)^2$  within a limited range of argon pressures as the magnetic field intensity was kept constant.

Thin films of molybdenum were prepared from sputtering of a pure molybdenum target. The films of high smoothness, good reflectivity, and low resistivity of about  $20 \mu\Omega\text{-cm}$  were obtained under sputtering conditions with a substrate temperature of  $100^\circ\text{C}$ , a pressure lower than 30 mtorr, and a discharge voltage higher than 450 volts. XRD patterns showed that these good quality thin films were polycrystalline with a strong (110) preferred orientation.

Thin films of Cu-In alloy were prepared from sputtering of three Cu-In composite targets, which were designed to contain In in an effective sputtered area with the ratio of 22%, 38%, and 63%, under the same conditions. Resistivity of the thin films obtained was found to increase as the area ratio increased. It was shown, by comparing XRD patterns of these films to those of individual Cu and In films, that all films contained  $\alpha$ -phase Cu with a corresponding content of 6.9, 10.4, and 12.5 atomic percent of In, respectively.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....ฟิสิกส์.....

สาขาวิชา.....ฟิสิกส์.....

ปีการศึกษา.....2537.....

ลายมือชื่อนิสิต.....*Thanusit Burinprakhon*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*Kajornyod Yoodee*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตรภรณ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ติดตามและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิดรวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับการสนับสนุนอย่างดีจากอาจารย์พงษ์ ทรงพงษ์ และคณะวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับวิชาการด้านฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ชนะ มีवल่อง อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการออกแบบวงจร อิเล็กทรอนิกส์พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหอย่างใกล้ชิด

ตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนศึกษาอยู่ทั้งในระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตและ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ผู้เขียนได้รับการอนุเคราะห์ทุนการศึกษาจากโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี(พสวท). จึงใคร่ขอขอบพระคุณ มา ณ ที่นี้

ในระหว่างปฏิบัติงานวิจัยผู้เขียนได้รับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายส่วนหนึ่ง จากโครงการ ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง ซึ่งดำเนินการวิจัยโดยคณะวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ คุณประเสริฐ เขียวพิมพา เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาธรณีวิทยา ที่ให้ คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณสมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์ และคุณชาญวิทย์ จิตยุทธการ นิสิตปริญญา มหาบัณฑิตที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนการออกแบบสร้างเครื่องมือ รวมทั้งคำเสนอแนะในการ แก้ไขปัญหา

ท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจตลอดเวลาจน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ดิซีโกลวดิสซาร์จ.....	4
การกำเนิดดิซีโกลวดิสซาร์จ.....	5
อันตรกิริยาของอนุภาคในโกลวดิสซาร์จและการรักษาสภาพการดิซซาร์จ.....	11
1. การชนกันของอนุภาคภายในโกลวดิสซาร์จ.....	11
2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ.....	15
3. กลไกรักษาสภาพการดิซซาร์จ.....	20
การกระจายความต่างศักย์และสนามไฟฟ้าในดิซีโกลวดิสซาร์จ.....	21
ลักษณะส่อกระแส ความต่างศักย์ และความดันของดิซีโกลวดิสซาร์จ.....	27
ดิซีโกลวดิสซาร์จภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก.....	31
1. สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับผิวคาโธด.....	33
2. สนามแม่เหล็กขนานกับผิวคาโธด.....	35
บทที่ 3 การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง.....	39
ทฤษฎีเบื้องต้นของสปัตเตอร์ริง.....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1. อันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกกับพื้นผิว .....	39
2. กลไกสปีดเตอริง .....	41
3. อัตราสปีดเตอริง .....	42
4. เทคนิคสปีดเตอริงและการประยุกต์ .....	47
การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปีดเตอริง .....	48
1. หลักการเบื้องต้น .....	48
2. โครงสร้างระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปีดเตอริง .....	50
3. อัตราเคลือบฟิล์ม .....	52
4. โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง .....	54
ระบบสปีดเตอริงแบบดีซีแมกนีตรอน .....	58
1. อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่อลักษณะสอของการดิสชาร์จ .....	58
2. อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่ออัตราเคลือบฟิล์ม .....	60
3. ประเภทของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง .....	60
4. ลักษณะสอกระแสและความต่างศักย์ของระบบสปีดเตอริง แบบดีซีแมกนีตรอน .....	65
รายละเอียดเชิงปฏิบัติการของระบบสปีดเตอริงแบบดีซีแมกนีตรอน .....	70
1. แหล่งกำเนิดการสปีดเตอริง .....	70
2. ก๊าซสำหรับการสปีดเตอริงและระบบสุญญากาศ .....	71
3. แท่นวางวัสดุรองรับ .....	72
4. การเลือกสภาวะการสปีดเตอริง .....	72



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การสร้างเครื่องมือ .....	73
ภาชนะสุญญากาศ .....	74
1. ผนังด้านข้าง .....	75
2. ฝาครอบด้านบน .....	75
3. ฐานรอง .....	76
4. แหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์ .....	80
5. แท่นวางวัสดุรองรับ .....	85
6. หน้ากาก .....	86
ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง .....	88
1. หลักการทำงานของวงจรจำกัดกระแส .....	89
2. การทดสอบการทำงานของวงจรจำกัดกระแส .....	92
ระบบสุญญากาศ .....	94
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง .....	95
การศึกษาลักษณะส่อของกระแส ความต่างศักย์และความดัน	
ของการดิสชาร์จ .....	95
1. อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่อการดิสชาร์จ .....	96
1.1 ข้อมูลจำเพาะของแม่เหล็ก .....	96
1.2 ความต่างศักย์พังทลาย .....	101
1.3 สถานะหลังการพังทลายและการควบคุม .....	103
1.4 ขอบเขตการเพิ่มกระแสและลดความดันก๊าซ .....	104
1.5 สรุปผลเบื้องต้น .....	107

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2. การวัดลักษณะส่อของกระแส ความต่างศักย์ และความดัน .....	108
2.1 ข้อมูลจากการทดลอง .....	108
2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ .....	116
3. สรุป .....	123
การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโมลิบดีนัม .....	124
1. การเตรียมวัสดุรองรับฟิล์ม .....	124
2. การสเป็คเตอร์เคลือบฟิล์ม .....	125
3. การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม .....	126
3.1 การคำนวณความหนาของฟิล์ม .....	126
3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม .....	127
3.3 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์ม .....	128
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าและองค์ประกอบของฟิล์ม .....	128
4. ผลการทดลอง .....	128
4.1 อัตราการเคลือบฟิล์ม .....	128
4.2 การเกาะตัวของฟิล์ม .....	129
4.3 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม .....	130
4.4 โครงสร้างผลึก ลักษณะผิวหน้าและส่วนประกอบของฟิล์ม .....	131
5. การอภิปรายและสรุปผล .....	134

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางของโลหะผสมทองแดงกับอินเดียม .....	135
1. การสร้างเป้าของการสเปคเตอร์ .....	135
2. สภาพะของการเคลือบฟิล์ม .....	138
3. ผลการทดลอง .....	139
3.1 ความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์ม .....	139
3.2 ลักษณะผิวหน้าและสภาพด้านทานของฟิล์มบาง .....	140
3.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ .....	141
4. การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง .....	143
5. สรุปผลการทดลอง .....	145
บทที่ 6 สรุป .....	147
รายการอ้างอิง .....	150
ภาคผนวก .....	156
ภาคผนวก ก แบบจำลองลูกบิลเลียด .....	157
ภาคผนวก ข ระบบวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก .....	164
ภาคผนวก ค การวัดความหนาฟิล์มบางโดยวิธีโทลนสกี .....	166
ประวัติผู้เขียน .....	170

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเนื่องจากการชนของไอออนบวกของอาร์กอนบนเป้า 4 ชนิดคือ โมลิบดีนัม(Mo) ทังสแตน(W) ซิลิกอนระนาบ(110) และ นิเกิลระนาบ(111) ซิลิกอนระนาบ(110) และ นิเกิลระนาบ(111) .....	15
ตารางที่ 2.2 ค่า $B$ และ $V_0$ ของกราฟที่ได้จากการ fit ข้อมูลตามรูปที่ 2.14 .....	31
ตารางที่ 3.1 พลังงานขีดเริ่มของการสปีดเตอร์ (อิเล็กตรอนโวลท์) ( $H$ คือ พลังงานสำหรับการระเหิด) .....	45
ตารางที่ 3.2 อัตราสปีดเตอร์จริงของโลหะซึ่งชนด้วยไอออนบวกของนิออนและอาร์กอน .....	46
ตารางที่ 3.3 ค่า $\beta$ และ $V_0$ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ลักษณะส่อกระแส และความต่างศักย์ของโกลวดิสชาร์จในระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์จริง แบบ rectangular-planar magnetron และ Research-S Gun ที่ความดันกาซอาร์กอนต่างๆกัน .....	69
ตารางที่ 5.1 ขนาดของแม่เหล็กวงแหวนที่จะใช้กับแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 1 .....	96
ตารางที่ 5.2 ความต่างศักย์พังทลายของการดิสชาร์จที่ความดันต่างๆกันภายใต้สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กอันที่ 2 .....	101
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความดันต่ำสุดที่ยังสามารถให้กระแสการดิสชาร์จขนาด 50 มิลลิแอมแปร์ .....	105
ตารางที่ 5.4 แสดงค่า $\beta$ และ $V_0$ ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุดสำหรับข้อมูลในรูปที่ 5.7 และ รูปที่ 5.8 .....	117
ตารางที่ 5.5 แสดงค่า $\beta$ และ $V_0$ ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุดสำหรับข้อมูลในรูปที่ 5.9 และ รูปที่ 5.10 .....	118

## สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 5.6 แสดงค่า $\beta$ และ $V_0$ ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุด สำหรับข้อมูลในรูปที่ 5.12 และ รูปที่ 5.13 .....	119
ตารางที่ 5.7 ความหนาและอัตราเคลือบฟิล์ม .....	140
ตารางที่ 5.8 ค่าคงที่ของผลึกที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในรูปที่ 5.30ข รูปที่ 5.30ค และรูปที่ 5.30ง .....	144
ตารางที่ 5.9 เปอร์เซ็นต์ของอินเดียมในเนื้อฟิล์มที่ได้จาก เป้าที่ฝังอินเดียมทั้งสามอัตราส่วน .....	145

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จอย่างง่าย .....	5
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ ของดีซีโกลวดิสชาร์จในระบบซึ่งใช้กาซไนออนความดัน 1 Torr. ....	6
รูปที่ 2.3 เส้นโค้งพาสเซนแสดงความต่างศักย์ฟังก์ชันของกาซระหว่างขั้วไฟฟ้า สองขั้วอยู่ห่างกันเป็นระยะ $d$ (cm) ที่ความดัน $P$ (torr) คำนวณจาก สมการที่ (2.2) เส้นที่ 1 ได้จากค่า $A=2500$ Volt/(torr x cm) $C=2.18$ เส้นที่ 2 ได้จาก $A=2250$ Volt/(torr x cm) $C= 1.98$ และเส้นที่ 3 ได้จาก $A=2000$ Volt/(torr x cm) $C=1.78$ .....	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะของดีซีโกลวดิสชาร์จขณะที่สามารถรักษาสภาพการดีสชาร์จ ได้เอง (ความเข้มของการแรงแสดงถึงความเข้มของการโกลว) .....	10
รูปที่ 2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากโลหะ ทั้งสแตนและโมลิบดีนัม เมื่อชนด้วยไอออนบวกของกาซเฉื่อยพลังงาน 0-1000 อิเล็กตรอนโวลท์ .....	16
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของ $\gamma$ ตามพลังงานในการชนของไอออนบวกของ อาร์กอนบนผิวโลหะที่หันหน้าระนาบต่างๆกัน คือ (111) (100) และ (110) a) นิเกิล b) อลูมิเนียม c) เงิน d) โมลิบดีนัม .....	17
รูปที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนสำหรับการชนของไอออนบวก ฮีเลียมและนออนบนผิวทั้งสแตน ขณะที่เกิดขึ้นเดี่ยวของไนโตรเจน .....	18
รูปที่ 2.8 สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนสำหรับการชนของไอออนบวก อาร์กอนบนผิวทั้งสแตนบริสุทธิ์และบนผิวทั้งสแตนที่ปกคลุมด้วยชั้นเดี่ยว ของไนโตรเจน .....	18

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.9 การกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากผิวโลหะ โมลิบดีนัม เนื่องจากการชนโดยไอออนบวกของก๊าซเฉื่อย พลังงาน 40 อิเล็กตรอนโวลต์ .....	19
รูปที่ 2.10 การกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากผิวโลหะ โมลิบดีนัมเนื่องจากการชนด้วยไอออนบวกของฮีเลียมพลังงาน ระหว่าง 10-1000 อิเล็กตรอนโวลต์ .....	19
รูปที่ 2.11 แสดงชั้นของ positive space charge ใน sheath region (รูปบน) และ floating potential ( $V_f$ ) บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา (รูปล่าง) .....	24
รูปที่ 2.12 แสดงศักย์ไฟฟ้าในส่วนต่างๆของดีซีโกลวดิสชาร์จรวมทั้งระดับของ floating potential บนผิวที่ไม่เชื่อมต่องานไฟฟ้าที่วางให้สัมผัสกับ การดิสชาร์จ .....	26
รูปที่ 2.13 ลักษณะสนามไฟฟ้าในดีซีโกลวดิสชาร์จ .....	28
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของ ดีซีโกลวดิสชาร์จในบรรยากาศอาร์กอน และออกซิเจนความดันต่างๆกัน เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎีตามสมการ $V = BJ^{2/3} + V_0$ .....	30
รูปที่ 2.15 ขนาดและทิศทางของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอน ซึ่งมีความเร็ว $v$ ทำมุม $\theta$ กับสนามแม่เหล็ก ( $B$ ) (ความเร็วอิเล็กตรอนและ สนามแม่เหล็กอยู่บนระนาบของหน้ากระดาษ) .....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 2.16	อิทธิพลของสนามไฟฟ้า( $\vec{E}$ ) และสนามแม่เหล็ก( $\vec{B}$ )ต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	
	ก. อิเล็กตรอนถูกเร่งตรงไปยังอานอดเมื่อ $\vec{B}$ ขนานกับ $\vec{E}$ และ $\theta=0$	
	ข. อิเล็กตรอนโคจรเป็น helix ระยะ pitch เพิ่มขึ้น เมื่อ $\vec{B}$ ขนานกับ $\vec{E}$ และ $\theta \neq 0$	
	ค. อิเล็กตรอนโคจรเป็น helix ระยะ pitch คงที่ เมื่อ $\vec{B} \neq 0$ , $\vec{E} = 0$ และ $\theta \neq 0$	34
รูปที่ 2.17	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งหลุดจากผิวคาโรดด้วยความเร็ว $\vec{v}$ เข้าสู่บริเวณของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ซึ่งมีทิศขนานกับผิวคาโรด (พุ่งเข้าหน้ากระดาษ) และสมมุติว่าไม่มีสนามไฟฟ้า	35
รูปที่ 2.18	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งหลุดจากผิวคาโรดด้วยความเร็ว $\vec{v}$ เข้าสู่บริเวณของสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ซึ่งมีความเข้มคงที่และทิศขนานกับผิวคาโรด (พุ่งเข้าหน้ากระดาษ) และสนามไฟฟ้าซึ่งขนาดลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะจากคาโรดและทิศพุ่งเข้าหาคาโรด	36
รูปที่ 3.1	กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนกับผิวเป้า	40
รูปที่ 3.2	การสับเตเตอร์เปรียบเทียบกับการเล่นบิลเลียด	41
รูปที่ 3.3	การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสับเตอริง	42
รูปที่ 3.4	ลักษณะแบบฉบับของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสับเตอริงกับพลังงานไอออนบวก	44
รูปที่ 3.5	ระบบดีซีไดโอดสับเตอริง	49
รูปที่ 3.6	ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางโดยการสับเตอริง	51
รูปที่ 3.7	อัตราเคลือบฟิล์มในระบบสับเตอริงแบบแมกนีตรอนระนาบ	54



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8 แบบจำลองโซน(Zone model)แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุรองรับ และความดันกาซอาร์กอน ที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางของโลหะที่ เคลือบโดยวิธีสปัตเตอริง .....	55
รูปที่ 3.9 ก. แหล่งกำเนิดการสปัตเตอริงแบบ cylindrical-post magnetron ข. ระบบเคลือบฟิล์มที่ใช้ cylindrical-post magnetron .....	61
รูปที่ 3.10 แหล่งกำเนิดการสปัตเตอริงแบบ cylindrical-hollow magnetron .....	62
รูปที่ 3.11 แหล่งกำเนิดการสปัตเตอริงแบบ circular-planar magnetron ก. ภาพภาคตัดขวางแสดงการวางแม่เหล็กและแนวเส้นแรงแม่เหล็ก ข. แสดงแนวของ $\vec{E} \times \vec{B}$ บนผิวเป้า .....	63
รูปที่ 3.12 การกระจายความหนาของฟิล์มบางจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอริง แบบแมกนีตรอนระนาบวงกลมบนระนาบของวัสดุรองรับที่ห่างจาก ผิวเป้าระยะต่างๆกัน .....	63
รูปที่ 3.13 แหล่งกำเนิดการสปัตเตอริงแบบ rectangular-planar magnetron .....	64
รูปที่ 3.14 ระบบเคลือบฟิล์มบางบนพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งใช้แหล่งกำเนิด การสปัตเตอริงแบบ rectangular-planar magnetron เป็นชุด .....	64
รูปที่ 3.15 ภาพภาคตัดขวางของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอริง แบบ conical magnetron หรือ S-GUN .....	65
รูปที่ 3.16 ภาพภาคตัดขวางของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอริงแบบ แมกนีตรอนระนาบวงกลม .....	71
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง .....	74
รูปที่ 4.2 ขนาดของท่อแก้วที่ใช้เป็นผนังด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ .....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 ภาพภาคตัดขวางของฝาครอบด้านบน .....	76
รูปที่ 4.4 ภาพภาคตัดขวางของฐานรอง .....	76
รูปที่ 4.5 การติดตั้งท่อนำก๊าซอาร์กอน .....	77
รูปที่ 4.6 ช่องติดหัววัดความดันก๊าซและการติดตั้งบนฐานรอง .....	78
รูปที่ 4.7 การติดตั้งท่อน้ำระบายความร้อน .....	79
รูปที่ 4.8 ขั้วต่อไฟฟ้าและการติดตั้งบนฐานรอง .....	79
รูปที่ 4.9 แหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 1 .....	80
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายแสดงเป้าที่ติดเรียบร้อยแล้ว .....	81
รูปที่ 4.11 การติดตั้งแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 1 .....	81
รูปที่ 4.12 (บน) แหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 2 (ล่าง) การติดตั้งบนฝาครอบด้านบน .....	82
รูปที่ 4.13 แหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 3 .....	83
รูปที่ 4.14 การติดตั้งแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 3 .....	84
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายของแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 3 ซึ่งติดตั้งบนฝาครอบบนของภาชนะสุญญากาศ .....	85
รูปที่ 4.16 ภาพภาคตัดขวางของแท่นวางวัสดุรองรับ .....	86
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายของแท่นวางวัสดุรองรับและหน้ากากที่ติดตั้งอยู่ใน ภาชนะสุญญากาศ .....	87
รูปที่ 4.18 ภาพวาดหน้ากาก .....	87
รูปที่ 4.19 วงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูง .....	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 วงจรเครื่องจำกัดกระแส .....	89
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายวงจรจำกัดกระแสซึ่งประกอบสำเร็จ .....	91
รูปที่ 4.22 การต่อวงจรจำกัดกระแสกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูง และขั้วของการดิสชาร์จ .....	91
รูปที่ 5.1 การระบุตำแหน่งในการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก .....	97
รูปที่ 5.2 กราฟแสดง $B_x$ และ $B_y$ ของแม่เหล็ก 1 (ไม่มีแกนเหล็ก) .....	97
รูปที่ 5.3 กราฟแสดง $B_x$ และ $B_y$ ของแม่เหล็ก 2 (ไม่มีแกนเหล็ก) .....	98
รูปที่ 5.4ก กราฟแสดง $B_x$ และ $B_y$ ของแม่เหล็ก 3 (ไม่มีแกนเหล็ก) .....	98
รูปที่ 5.4ข กราฟแสดง $B_x$ และ $B_y$ ของแม่เหล็ก 3 (มีแกนเหล็ก) .....	99
รูปที่ 5.5ก กราฟแสดง $B_x$ และ $B_y$ ของแม่เหล็ก A (ไม่มีแกนเหล็ก) .....	99
รูปที่ 5.5ข กราฟแสดง $B_x$ และ $B_y$ ของแม่เหล็ก A (มีแกนเหล็ก) [50,51] .....	100
รูปที่ 5.6 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณเหนือผิวเป้า .....	100
รูปที่ 5.7 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสับเตอร์แบบที่ 1 และแม่เหล็ก 1 ที่ความดัน 90 มิลลิทอร์รี่ .....	108
รูปที่ 5.8 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสับเตอร์แบบที่ 1 และแม่เหล็ก 2 ที่ความดันกาซอาร์กอน 90, 70, 50, 35 และ 30 มิลลิทอร์รี่ .....	109
รูปที่ 5.9 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสับเตอร์แบบที่ 2 เมื่อเป้า โมลิบดีนัมหนา 0.2 มิลลิเมตร ที่ความดัน กาซอาร์กอน 1, 10, 20, 30, และ 50 มิลลิทอร์รี่ .....	111

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.10 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 2 เป้าโมลิบดีนัม หนา 2 มิลลิเมตร ที่ความดันกาซอาร์กอน 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิลิตร	111
รูปที่ 5.11 การวางตัวคั่นระหว่างแม่เหล็กกับแท่นยึดเป้าบนแหล่ง กำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 2	112
รูปที่ 5.12 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 2 เมื่อเป้าโมลิบดีนัม หนา 0.2 มิลลิเมตร ที่ความดัน 20 มิลลิลิตร และยกแม่เหล็กด้วยตัวคั่นขนาด 0.8, 1.0 และ 1.2 มิลลิเมตร	113
รูปที่ 5.13 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์แบบที่ 2 เมื่อเป้าโมลิบดีนัม หนา 0.2 มิลลิเมตร ที่ความดัน 30 มิลลิลิตร และยกแม่เหล็กด้วยตัวคั่นขนาด 0.8, 1.0 และ 1.2 มิลลิเมตร	113
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบลักษณะส่อ I-V ที่ความดัน 90 มิลลิลิตร ระหว่างข้อมูล จากรูปที่ 5.7 ( $B_x$ สูงสุด 165 เกาส์) กับข้อมูลจากรูป 5.8 ( $B_x$ สูงสุด 278 เกาส์)	115
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบลักษณะส่อ I-V ที่ความดัน 20, 30 และ 50 มิลลิลิตร ระหว่างข้อมูลจากรูปที่ 5.9 ( $B_x$ สูงสุด 500 เกาส์) กับข้อมูลจากรูป 5.10 ( $B_x$ สูงสุด 300 เกาส์)	115
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของรูปที่ 5.10 ที่ความดัน 20 มิลลิลิตร กับลักษณะส่อที่สอดคล้องดีที่สุดซึ่งได้ จาก $\beta$ และ $V_0$ ตามตารางที่ 5.6	120
รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของรูปที่ 5.8 ที่ความดัน 50 มิลลิลิตร กับลักษณะส่อที่สอดคล้องดีที่สุดซึ่งได้ จาก $\beta$ และ $V_0$ ตามตารางที่ 5.4	121



สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.27ค ภาพถ่ายของเป้าทองแดงที่ฝังอินเดียม 38 เปอร์เซ็นต์ บนพื้นที่ยังผลของการสปีดเตอร์ .....	137
รูปที่ 5.27ง ภาพถ่ายของเป้าทองแดงที่ฝังอินเดียม 63 เปอร์เซ็นต์ บนพื้นที่ยังผล ของการสปีดเตอร์ (ขณะติดบนแหล่งกำเนิดการสปีดเตอร์) .....	137
รูปที่ 5.28 ภาพวาดแสดงการวางวัสดุรองรับเมื่อมองจากด้านบน .....	139
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มกับพื้นที่ อินเดียมบนเป้า .....	141
รูปที่ 5.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางจากเป้าแบบต่างๆ .....	142
รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ผลึกของทองแดงกับเปอร์เซ็นต์ ของอะตอมอินเดียมที่เป็นตัวถูกละลาย .....	144
รูปที่ ผ-1 ภาพจำลองการชนของอนุภาคทรงกลมแข็ง 2 อนุภาค ตามแบบจำลองลูกบิลเลียด .....	157
รูปที่ ผ-2 ภาพจำลองการชนแบบไม่ยืดหยุ่น .....	160
รูปที่ ผ-3 ภาพถ่ายของอุปกรณ์วัดความเข้มสนามแม่เหล็ก .....	164
รูปที่ ผ-4 แสดงการวางหัววัดแม่เหล็กเพื่อวัด $B_x$ .....	165
รูปที่ ผ-5 แสดงการวางหัววัดแม่เหล็กเพื่อวัด $B_y$ .....	165
รูปที่ ผ-6 หลักการจัดอุปกรณ์วัดความหนาโดยวิธีโทลานสกี .....	166
รูปที่ ผ-7 ภาพถ่ายของระบบวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีโทลานสกี .....	168
รูปที่ ผ-8 ผลการระบุตำแหน่งของวีวรอยการแทรกสอดจากการอ่าน บนจอคอมพิวเตอร์ .....	168