

การเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์แบบโปร่งใสและนำไฟฟ้า

นาย คมกฤษณ์ นุ่นอุดม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-974-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ZINC OXIDE TRANSPARENT CONDUCTING FILMS.



Mr. Khomkrit Poonaudom.

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Graduate School

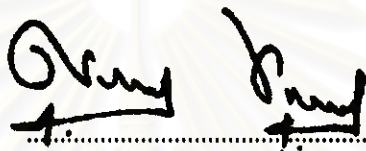
Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-974-2

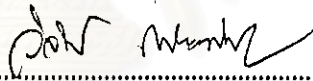
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การเตรียมฟิล์มเชิงคอกซ์ออกไซด์แบบโปร่งใสและนำไฟฟ้า  
โดย                              นาย คมกฤษณ์ ปุณอุดม  
ภาควิชา                              ฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภกรณ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย    อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต




.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภาวัฒน์ ชูติวงศ์ )

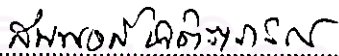
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เล็งทะพันธ์ )



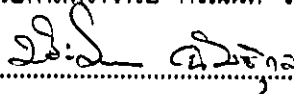
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี )



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภกรณ์ )



.....กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ )



.....กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพพรรณ ฉันทิกุล )

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

คคมกฤษณ์ ปุ่นอุดม : การเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์แบบโปร่งใสและนำไฟฟ้า (PREPARATION OF ZINC OXIDE TRANSPARENT CONDUCTING FILMS.) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ขจรยศ อยุธยา, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. สมพงษ์ ฉัตรวารณ, 143 หน้า. ISBN 974-638-974-2.

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แบบโปร่งใสและนำไฟฟ้าถูกเตรียมบนวัสดุรองรับกระจกที่ไม่มีสารเคลือบผิวโดยวิธีอาร์เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอร์ริง ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนจากเป้าซิงค์ออกไซด์แบบอัดร้อนที่ชื่อมา โดยมีการเจือด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ 2% โดยมวล สมบัติเชิงไฟฟ้าและแสงของฟิล์มเหล่านี้สามารถปรับได้โดยการควบคุมพารามิเตอร์ของการสปัตเตอร์ริง เช่น ความดัน กำลังไฟฟ้า ระยะทางและการจัดวางตัวของวัสดุรองรับที่กระทำกับผิวของเป้า สามารถผลิตฟิล์มบนวัสดุรองรับซึ่งถูกวางตั้งฉากกับผิวของเป้าโดยที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำประมาณ  $(9.41 \pm 0.88) \times 10^4$  โอห์ม-ซม. สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์  $15.9 \pm 6$  ซม.<sup>2</sup>/(โวลท์-วินาที) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสูงกว่า 90% ในช่วงความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-1000 นาโนเมตร

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่มีพื้นที่ใหญ่ได้ถูกเตรียมครั้งแรกจากเป้าที่มีขนาดเล็ก โดยการหมุนวัสดุรองรับกระจกที่มีขนาด  $4.85 \times 5.85$  ซม.<sup>2</sup> ฟิล์มที่ได้ถูกแบ่งออกเป็นแปดส่วนแต่ละส่วนถูกวิเคราะห์ทั้งในเชิงไฟฟ้าและแสง การกระจายตัวของสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่มีพื้นที่ใหญ่แสดงให้เห็นว่ามีความสม่ำเสมอรอบแกนหมุนของวัสดุรองรับ

เป้าซิงค์ออกไซด์แบบอัดเปียกแล้วเผาเจืออลูมิเนียมออกไซด์ตั้งแต่ 1 ถึง 5 % โดยมวล เตรียมจากผงซิงค์ออกไซด์ความบริสุทธิ์ 99.9995% และผงอลูมิเนียมออกไซด์ความบริสุทธิ์ 99.99% นำมาผสมแล้วอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสในอากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำได้จากการทำ อาร์เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอร์ริงด้วยเป้าซิงค์ออกไซด์แบบอัดเปียกแล้วเผาเจืออลูมิเนียมออกไซด์ 2 % โดยมวลที่มีราคาถูกโดยใช้สภาวะการสปัตเตอร์ริงเดียวกันกับเป้าซิงค์ออกไซด์แบบอัดร้อน สมบัติเชิงไฟฟ้าและแสงของฟิล์มใกล้เคียงกับการสปัตเตอร์ริงจากเป้าซิงค์ออกไซด์แบบอัดร้อน สมบัติเหล่านี้แสดงถึงความเหมาะสมที่จะนำเป้าซิงค์ออกไซด์แบบอัดเปียกแล้วเผาไปใช้เป็นเป้าสปัตเตอร์ริงในการผลิตฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียมแบบโปร่งใสและนำไฟฟ้า.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... ฟิลิสิกส์  
สาขาวิชา ..... ฟิลิสิกส์  
ปีการศึกษา ..... 2540

ลายมือชื่อนิติ ..... คคมกฤษณ์ ปุ่นอุดม  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ขจรยศ อยุธยา  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... สมพงษ์ ฉัตรวารณ

## C725736 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: ZnO / TRANSPARENT CONDUCTING FILMS / RF SPUTTERING

KHOMKRIT POONAUDOM : PREPARATION OF ZINC OXIDE TRANSPARENT  
CONDUCTING FILMS. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. KARJORN YODDEE,  
Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. SOMPHONG CHATRAPORN, M.S.  
143 pp. ISBN 974-638-974-2.

Conducting transparent ZnO thin films were prepared on unheated glass substrates by rf magnetron sputtering in an argon gas from a commercially available hot pressed ZnO target doped with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2 wt%. The electrical as well as optical properties of these films can be adjusted by controlling the sputtering parameters such as pressure, power, target-to-substrate distance and orientation. Films with resistivity as low as  $(9.41 \pm 0.88) \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ , Hall mobility as high as  $15.9 \pm 6 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ , and optical transmittance higher than 90% at the wavelength range 400-1000 nm can be produced on the substrate suspended perpendicular to the target surface.

A large area ZnO(Al) thin film using small area sputtering target was first obtained by rotating a glass substrate of  $4.85 \times 5.85 \text{ cm}^2$ . The film obtained were divided into 8 pieces and each of them was electrically and optically analyzed. The resistivity distribution for the large area film shows that it has homogeneity around the axis of rotation of the substrate holder.

Cold pressed ZnO targets with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dopant of 1 to 5 wt% were also prepared from powder mixtures of ZnO with a purity of 99.9995% and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with a purity of 99.99%. The desired mixture was molded by hydraulic press into a disc of 2 inches diameter and then sintered at 1100 °C for 12 hours in air. ZnO films with the minimum resistivity were obtained by rf magnetron sputtering of the much cheaper cold pressed ZnO target doped with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of 2 wt% using the same sputtering conditions as those for the hot pressed ZnO target. The electrical and optical properties of films were almost the same as those of sputtering from the hot press ZnO target. This shows the suitability of the cold press ZnO target as being used for the sputtering target producing ZnO(Al) conducting transparent thin films.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... PHYSICS

สาขาวิชา..... PHYSICS

ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิติ..... ดมกฤษณ์ ปูนอดม.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... รศ.โยธ อยุ่.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ธรรมสาร



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตรภรณ์ อาจารย์ ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ที่ได้ให้คำแนะนำติดตามและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ อาจารย์ พงษ์ ทรงพงษ์ ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาในการออกแบบโปรแกรมบันทึกอุณหภูมิเตา

ขอขอบคุณ คุณ บุญเหลือ เมธาวรชัย เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งให้ความช่วยเหลือด้านการวิเคราะห์ SEM และ EDX

ขอขอบคุณ คุณ วรชล แดงงาม เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ซึ่งให้ความช่วยเหลืองานตลอดการวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ ตลอดเวลาที่ศึกษาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ข
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. พลาสมาโกลดิสซาร์จ.....	4
ดีซีโกลดิสซาร์จ.....	4
1. กลไกการเกิด.....	5
2. การกระจายความต่างศักย์ สนามไฟฟ้า และการเสถียรภาพดีซีโกลดิสซาร์จ.....	9
3. ปัจจัยที่มีผลต่อการรักษาสภาพโกลดิสซาร์จ.....	15
3.1) การให้พลังงานที่มากพอแก่ระบบอย่างต่อเนื่อง.....	15
3.2) กระบวนการชน.....	16
3.2.1) กระบวนการชนกันเองระหว่างอนุภาค.....	16
3.2.2) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิของผิวคาโทด.....	20
อาร์เอฟโกลดิสซาร์จ.....	21
1. กลไกการเกิด.....	22
2. วงจรแมกซิง.....	26

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2. (ต่อ)	
3. การกระจายความต่างศักย์ในอาร์เอฟโกลวดิสซาร์จ.....	28
สภาพโกลวดิสซาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก.....	31
1. สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวคาโฮด.....	31
2. สนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวคาโฮด.....	31
3. การเคลื่อนฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง.....	34
ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปัตเตอร์.....	34
การเคลื่อนฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง.....	38
1. หลักการเบื้องต้น.....	38
2. โครงสร้างระบบเคลื่อนฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ริง.....	40
3. อัตราการเคลื่อนฟิล์ม.....	42
4. โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง.....	42
การสปัตเตอร์เป้าที่เป็นสารประกอบ.....	44
การก่อตัวเป็นฟิล์มจากการสปัตเตอร์เป้าของสารประกอบ.....	45
การสปัตเตอร์ด้วยแก๊สไวปฏิกิริยา.....	45
4. ทฤษฎีเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม.....	49
การวัดความหนาโดยเทคนิคโทลานสกี.....	49
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ ด้วยเทคนิคของแวนเดอร์พาว.....	51
การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	58
การตรวจสอบสภาพพื้นผิวและองค์ประกอบของฟิล์ม.....	62



สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4(ต่อ) การคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง.....	63
5. การดำเนินการและเครื่องมือในการวิจัย.....	68
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	68
<b>ระบบเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยวิธี รีแอคทีฟ-อาร์เอฟ</b>	
แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง.....	70
1. ระบบปั๊มสุญญากาศ.....	70
2. ระบบเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปีดเตอร์ริง.....	74
3. แท่นวางวัสดุรองรับ.....	80
6. การทดลอง.....	83
การเตรียมเป้าซิงค์ออกไซด์.....	83
การเตรียมวัสดุรองรับ.....	87
การสปีดเตอร์เคลือบฟิล์ม.....	88
การวัดสมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์.....	89
1. ความหนาของฟิล์ม.....	89
2. สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม.....	89
3. การตรวจสอบสภาพพื้นผิวและองค์ประกอบของฟิล์ม.....	90
4. การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์ม.....	90
5. การวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์ม.....	91

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
7. ผลการทดลอง.....	92
สมบัติของเป้าซิงค์ออกไซด์.....	92
สมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์.....	94
1. การวิเคราะห์หาสภาวะการสปีดเตอร์ที่เหมาะสมของระบบ.....	95
1.1) อัตราการเคลือบ.....	95
1.2) สมบัติทางไฟฟ้า.....	99
1.3) สมบัติของฟิล์มในสภาวะการเตรียมที่เหมาะสม.....	105
2. สมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากเป้าชนิดอัดเปียกแล้วเผา.....	117
2.1) สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมจากเป้า ที่มีสัดส่วนโดยมวลต่างๆ.....	117
2.2) การเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มที่เตรียมจาก เป้าอัดเปียกแล้วเผากับฟิล์มที่เตรียม จากเป้าอัดร้อน.....	120
3. การเตรียมฟิล์มให้มีพื้นที่กว้างมากขึ้น.....	133
8. สรุปผลการทดลอง.....	137
รายการอ้างอิง.....	139
ประวัติผู้เขียน.....	143

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างระหว่าง ความเร็วเฉลี่ย พลังงานจลน์ และความหนาแน่นกระแส ของอิเล็กตรอนและไอออนบวก สำหรับแก๊สอาร์กอนความดัน 10 mTorr อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	10
4.1 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กับค่ามุมแบรกก์ของ โครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite ของ ZnO.....	61
7.1 การหัดตัว ความหนาแน่น ความต้านทานในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง องค์ประกอบโดยมวลของเป้าซิงค์ออกไซด์.....	92
7.2 อัตราการเคลือบของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน ที่ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	105
7.3 สภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt และระยะ 6.5 cm.....	106
7.4 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นพาหะ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt และระยะ 6.5 cm.....	107
7.5 ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน ความดัน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm .....	116
7.6 อัตราการเคลือบของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน พื้นที่วัสดุรองรับ $4.85 \times 5.85 \text{ cm}^2$ ที่ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	134

## สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่

7.7 สภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน พื้นที่วัสดุรองรับ $4.85 \times 5.85 \text{ cm}^2$ ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ กำลัง 75 watt และระยะ 6.5 cm.....	135
7.8 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความหนาแน่นพาหะ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดร้อน พื้นที่วัสดุรองรับ $4.85 \times 5.85 \text{ cm}^2$ ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ กำลัง 75 watt และระยะ 6.5 cm.....	136

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	ระบบดิสก์โกลวดิสชาร์จแบบง่าย.....	5
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ ของระบบดิสก์โกลวดิสชาร์จที่ใช้แก๊สไนออน ความดัน 1 Torr.....	7
2.3	เส้นโค้งพาสเซนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฟังก์ทลายของแก๊สกับความดัน ในหน่วย Torr ที่ระยะ $d$ cm.....	8
2.4	ชั้น positive space charge ใน sheath region (รูปบน) และ floating potential( $V_f$ ) บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา(รูปล่าง).....	11
2.5	องค์ประกอบของดิสก์โกลวดิสชาร์จที่สามารถรักษาสภาพการดิสชาร์จได้เอง (บริเวณที่เข้มแสดงความหนาแน่นการไหล).....	13
2.6	ศักย์ไฟฟ้าในส่วนต่างๆของดิสก์โกลวดิสชาร์จ รวมทั้งระดับของ floating potential บนผิวที่ไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่ว่างสัมผัสกับสภาพโกลวดิสชาร์จ.....	13
2.7	ลักษณะสนามไฟฟ้าในสภาพดิสก์โกลวดิสชาร์จ.....	14
2.8	การสะสมประจุของเป้าที่เป็นฉนวน.....	21
2.9	การป้อนแรงดันไฟกระแสสลับให้กับสภาพโกลวดิสชาร์จ.....	22
2.10	วงจรมุมูลของสภาพโกลวดิสชาร์จความถี่สูง.....	23
2.11	รูปคลื่นความต่างศักย์และกระแสของเป้า เมื่อวงจรรูปที่ 2.10 ถูกป้อนด้วยคลื่นศักย์ไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม.....	23
2.12	รูปคลื่นความต่างศักย์ ที่แหล่งกำเนิด( $V_a$ ) และ ที่เป้า( $V_p$ ) เมื่อวงจรรูปที่ 2.10 ถูกป้อนด้วยคลื่นศักย์ไฟฟ้ารูปไซน์.....	24
2.13	การไบแอสตัวเองของเป้าที่เป็นฉนวน.....	25
2.14	วงจรเมซซิ่งในระบบอาร์เอฟสปัตเตอร์.....	26
2.15	(ก)วงจรมุมูลไฟฟ้ากระแสตรง (ข) วงจรมุมูลอาร์เอฟของรูปที่ 2.15.....	27

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 วงจรอาร์เอฟแมชซิ่ง.....	27
2.17 การกระจายความต่างศักย์ในสภาพอาร์เอฟโกลวดิสชาร์จ.....	28
2.18 ความต่างศักย์ของระบบอาร์เอฟ.....	30
2.19 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กในสภาพโกลวดิสชาร์จ	
(ก) บริเวณ cathode dark space	
(ข) บริเวณ negative glow.....	32
2.20 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กทิศมีทิศพุ่งเข้ากระดาน	
บริเวณผิวหน้าคาโทด (ก) ไม่มีสนามไฟฟ้า (ข) มีสนามไฟฟ้าทิศพุ่งเข้าสู่ผิวหน้าคาโทด.....	33
3.1 กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนผิวของเป้า.....	34
3.2 การสปีดเตอร์เปรียบเทียบกับการเล่นบิลเลียด.....	35
3.3 การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปีดเตอร์จริง.....	36
3.4 ลักษณะแบบฉบับของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสปีดเตอร์กับพลังงานไอออนบวก.....	37
3.5 ระบบอาร์เอฟไดโอดสปีดเตอร์จริง.....	39
3.6 ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปีดเตอร์จริง.....	40
3.7 แบบจำลองโครงสร้าง(Zone model)แสดงอิทธิพลของวัสดุรองรับ	
และความดันแก๊สอาร์กอน ที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางที่เคลือบโดยวิธีสปีดเตอร์จริง.....	43
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไอออนโมเลกุล ( $MO^+/M^++MO^+$ )	
กับ พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของโลหะออกไซด์.....	44
3.9 ลักษณะเส้นโค้งอิทธิพลของความดันของระบบ(บน)และศักย์ไฟฟ้าบริเวณเป้า(ล่าง)	
ที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สไว้ปฏิกิริยา.....	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

3.10	ลักษณะทั่วไปของระบบรีแอกทีฟ สปีดเตอริง	
	(1) แบบที่มีการนำแก๊สไวปฏิกิริยาเข้าบริเวณเป้า	
	(2) แบบที่มีการนำแก๊สไวปฏิกิริยาเข้าบริเวณวัสดุรองรับ.....	48
4.1	การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคโทลนสกี.....	49
4.2	วิธีการแทรกสอดจากภาพที่ขยายโดยคอมพิวเตอร์.....	50
4.3	สารตัวอย่างแผ่นแบนรูปทรงใดๆ.....	51
4.4	ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ F และค่า $R_{12,34} / R_{23,41}$ .....	53
4.5	การวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์.....	53
4.6	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบภายในผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์.....	58
4.7	โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์.....	61
4.8	การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	62
4.9	การส่งผ่านแสงและการสะท้อน.....	63
4.10	การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง.....	67
5.1	แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	69
5.2	ขั้นตอนการทำงานของระบบปั๊มสุญญากาศ.....	71
5.3	ส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศ.....	73
5.4	โครงสร้างของระบบอาร์เอฟ-แมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	75
5.5	โครงสร้างของแหล่งกำเนิดการสปีดเตอริงปรวยหรือ S-Gun.....	76

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 การระบุตำแหน่งในการวัดสนามแม่เหล็ก (a) และแนวเส้นแรงแม่เหล็กที่สังเกตได้จาก รูปที่ 4.14-4.15 (b).....	77
5.7 กราฟแสดง $B_x$ ที่ตำแหน่งต่างๆ (ไม่มีแกนเหล็ก)วัดโดยเทสลามีเตอร์.....	78
5.8 กราฟแสดง $B_y$ ที่ตำแหน่งต่างๆ (ไม่มีแกนเหล็ก)วัดโดยเทสลามีเตอร์.....	78
5.9 ภาวะสูญญากาศและแผนควบคุมการทำงานของระบบสูญญากาศ.....	79
5.10 ระบบจ่ายกำลัง DC Generater และ RF Generater ของระบบสปีดเทอริง.....	79
5.11 แท่นวางวัสดุรองรับสำหรับวัสดุรองรับขนาด 1.2 x 2.5 ตารางเซนติเมตร.....	80
5.12 การจัดวางวัสดุรองรับขนาด 1.2 x 2.5 ตารางเซนติเมตร.....	81
5.13 แท่นวางวัสดุรองรับขนาด 4.85 x 5.85 ตารางเซนติเมตร.....	81
5.14 โครงสร้างของแท่นวางวัสดุรองรับแบบหมุน.....	82
6.1 ภาวะผสมที่ใช้ผสมซิงค์ออกไซด์กับอลูมิเนียมออกไซด์.....	83
6.2 ภาวะผสมถูกจับให้หมุนบนเครื่องกลึง.....	84
6.3 เบ้าอัดเหล็กเคลือบแข็งสำหรับอัดเป่าซิงค์ออกไซด์.....	85
6.4 การอัดขึ้นรูปเป่าซิงค์ออกไซด์โดยเครื่องอัดไฮดรอลิก.....	85
6.5 การเผาเป่าซิงค์ออกไซด์ในเตาเผาโซนเดี่ยวแนวนอน.....	86
6.6 การบันทึกอุณหภูมิเตาขณะเผาเป่าซิงค์ออกไซด์.....	86
6.7 กราฟของอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้เผาเป่าซิงค์ออกไซด์.....	87
6.8 ระบบการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของซอลล์.....	90
6.9 โครงสร้างสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่.....	91



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

7.1	แบบจำลองโครงสร้างผลึกของฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจืออลูมิเนียมใน 2 มิติ.....	94
7.2	อัตราการเคลือบกับความดันแก๊สอาร์กอนของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าชนิดอัดร้อน ที่กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	97
7.3	อัตราการเคลือบกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าชนิดอัดร้อน ที่ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar ระยะ 6.5 cm.....	97
7.4	อัตราการเคลือบกับระยะระหว่างวัสดุรองรับกับเป่า ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าชนิดอัดร้อน ที่ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt.....	98
7.5	อัตราการเคลือบกับสัดส่วนแก๊สออกซิเจน ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าชนิดอัดร้อน ที่ความดันแก๊สรวม $8 \times 10^{-3}$ mbar ระยะ 6.5 cm กำลัง 75 watt.....	98
7.6	สภาพต้านทานไฟฟ้ากับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัดร้อน กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	101
7.7	สภาพต้านทานไฟฟ้ากับกำลังไฟที่ใช้สปีดเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัดร้อน ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar ระยะ 6.5 cm.....	101
7.8	สภาพต้านทานไฟฟ้าและระยะแทนวางวัสดุรองรับกับเป่า ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัดร้อน กำลัง 75 watt ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar.....	102
7.9	สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัดส่วนของแก๊สออกซิเจน ของฟิล์มบาง ZnO ที่จากเป่าอัดร้อน กำลัง 75 watt ความดันแก๊สรวม $8 \times 10^{-3}$ mbar ระยะ 6.5 cm.....	102

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

7.10	สภาพเคลื่อนที่ได้ของซอลล์กับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัตร้อน กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	103
7.11	ความหนาแน่นพหะกับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัตร้อน กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	103
7.12	สภาพเคลื่อนที่ได้ของซอลล์กับกำลังไฟที่ใช้สปัตเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัตร้อน ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar ระยะ 6.5 cm.....	104
7.13	ความหนาแน่นพหะกับกำลังไฟที่ใช้สปัตเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัตร้อน ความดันแก๊สอาร์กอน $8 \times 10^{-3}$ mbar ระยะ 6.5 cm.....	104
7.14	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัตร้อน ที่ความดัน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	108
7.15	การวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง ZnO ด้วย SEM จากเป่าอัตร้อน ที่ความดัน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	109
7.16	การวิเคราะห์ด้วย EDX ของฟิล์มบาง ZnO เตรียมจากเป่าอัตร้อน ที่ความดัน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	110
7.17	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัตร้อน ความดัน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....	112
7.18	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ZnO จากเป่าอัตร้อน ความดัน $8 \times 10^{-3}$ mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm แนว 45 องศา.....	113

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่

7.19 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ZnO  
จากเป้าอัตร้อน ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm แนว 0 องศา.....114

7.20 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ZnO  
จากเป้าอัตร้อน ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt  
ระยะ 6.5 cm แนว 90 องศา.....115

7.21 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดเบียดแล้วเผา กำลัง 75 watt ความดันแก๊สอาร์กอน  
 $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm.....118

7.22 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดเบียดแล้วเผา กำลัง 75 watt  
ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm.....118

7.23 ความหนาแน่นพาหะและสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนของฟิล์มบาง ZnO จากเป้าอัดเบียดแล้วเผา กำลัง 75 watt  
ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm.....119

7.24 อัตราการเคลื่อนที่กับความดันแก๊สอาร์กอนของฟิล์มบาง ZnO  
จากเป้าชนิดอัดเบียดแล้วเผา ที่กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....122

7.25 อัตราการเคลื่อนที่กับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ระบบของฟิล์มบาง ZnO  
จากเป้าชนิดอัดเบียดแล้วเผา ที่ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm.....122

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่

7.26 อัตราการเคลื่อนที่ของประจุระหว่างวัสดุรองรับกับเม้า ของฟิล์มบาง ZnO  
จากเม้าชนิดอัดเปียกแล้วเผา ที่ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt.....123

7.27 อัตราการเคลื่อนที่ของสัดส่วนแก๊สออกซิเจน ของฟิล์มบาง ZnO จากเม้า  
ชนิดอัดเปียกแล้วเผา ที่ความดันแก๊สรวม  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm กำลัง 75 watt....123

7.28 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO  
จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....126

7.29 สภาพต้านทานไฟฟ้ากับกำลังไฟที่ใช้สปีดเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO  
จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm.....126

7.30 สภาพต้านทานไฟฟ้าและระยะแทนวางวัสดุรองรับกับเม้า ของฟิล์มบาง ZnO  
จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar.....127

7.31 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสัดส่วนของแก๊สออกซิเจน ของฟิล์มบาง ZnO  
จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ความดันแก๊สรวม  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm...127

7.32 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์กับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO  
จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....128

7.33 ความหนาแน่นพาหะกับความดันแก๊สอาร์กอน ของฟิล์มบาง ZnO  
จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....128

7.34 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์กับกำลังไฟที่ใช้สปีดเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO  
จากเม้าอัดเปียกแล้วเผา ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm.....129

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

7.35 ความหนาแน่นพหุกับกำลังไฟที่ใช้สเปคเตอร์ ของฟิล์มบาง ZnO  
 จากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา ความดันแก๊สอาร์กอน  $8 \times 10^{-3}$  mbar ระยะ 6.5 cm.....129

7.36 การวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง ZnO ด้วย SEM จากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา  
 ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....130

7.37 การวิเคราะห์ด้วย EDX ของฟิล์มบาง ZnO  
 เตรียมจากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar  
 กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm.....131

7.38 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเทคนิค XRD ของฟิล์มบาง ZnO  
 จากเป้าอัดเบี่ยงแล้วเผา ที่ความดัน  $8 \times 10^{-3}$  mbar กำลัง 75 watt ระยะ 6.5 cm..... 132

7.39 การระบุตำแหน่งบนวัสดุรองรับขนาด 4.85x5.85 ตารางเซนติเมตร.....133