MRG5180203 ดร. ธนภรณ์ โตโสภณ

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
245891

สกว
TRF

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลการเจือร่วมของอินเดียมและอลูมิเนียมที่มีต่อฟิล์มบางโปร่งใสนำไฟฟ้าซิงค์ออกไซด์

Effect of In and Al co-doping on transparent conductive zinc oxide films

โดย อ.ดร.ธนภรณ์ โตโสภณ

ธันวาคม 2553

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งช
245891
b00251925

สัญญาเลขที่ MRG5180203

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลการเจือร่วมของอินเดียมและอลูมิเนียมที่มีต่อฟิล์มบางโปร่งใสนำไฟฟ้าซิงค์ออกไซด์

Effect of In and Al co-doping on transparent conductive zinc oxide films

อ.ดร.ธนภรณ์ โตโสภณ
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงได้ หากไม่ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานต่างๆดังนี้

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.บัญชา ศิลป์สกุลสุข รศ.ดร.ณสรรค์ ผลโภค อ.ดร.ภูณิศรา ลิ้มนนทกุล คุณธัญนพ นิลกำจร คุณเสริมสุข รัดเร่ง คุณวิวัฒน์ เครือวงศ์ รวมทั้งคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆตลอดมา ขอขอบคุณนางสาวนันทนัช วัฒนสุภิญโญ และนางสาวอ้อมตะวัน แสงจักรวาล นักศึกษาปริญญาโท ที่เป็นแรงสำคัญทำให้งานวิจัยสำเร็จด้วยดี

หน่วยวิจัยและนักวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (MTEC) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.พงศ์พันธ์ จินดาอุดม คุณมติ ห่อประทุม และสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเครื่องโอเจย์ อิเล็กตรอน ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

Dr. Kah-Yoong Chan, Faculty of Engineering, Multimedia University, Malaysia ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ตรวจสอบตัวอย่างด้วยเทคนิคอะตอมมิค ฟอซ ไมโครสโคป ผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและสำนักงานการอุดมศึกษาที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยและขอขอบคุณ รศ.ดร.นรินทร์ สิริกุลรัตน์ นักวิจัยที่ปรึกษา ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุพการีและครอบครัวที่เป็นกำลังใจให้เสมอมา

ธนภรณ์ โตโสภณ

30 ธันวาคม 2553

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ MRG5180203

ชื่อโครงการ ผลการเจือร่วมของอินเดียมและอลูมิเนียมที่มีต่อฟิล์มบางโปร่งใสนำไฟฟ้าซิงค์ออกไซด์

ชื่อนักวิจัย อ.ดร.ธนภรณ์ โตโสภณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

E-mail address thanapor@swu.ac.th

ระยะเวลาโครงการ 15 พฤษาคม 51 ถึง 15 ตุลาคม 53

245891

ได้เตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม (AIZO) โดยเทคนิค ดีซี แมกนี-ตรอน สปัตเตอริง บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกในบรรยากาศอาร์กอนบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิห้อง โดยใช้เซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียมในปริมาณ 0.5 wt% ขนาด 3 นิ้วเป็นเป้า พบว่าโครงสร้างของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมได้นี้เป็นโครงสร้างเฮกซะโกนอล มีค่าแกนผลึก a เป็น 3.251 Å ค่าแกนผลึก c เป็น 5.214 Å และมีขนาดของผลึกเป็น 48-53 nm ฟิล์มมีองค์ประกอบเป็น Zn : O เท่ากับ 1:1 โดยฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2.57×10^{-4} - 3 Ωcm การส่งผ่านแสงอยู่ในช่วง 70-90 % และค่าช่องว่างแถบพลังงานในช่วง 3.3-3.65 eV ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์ม ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดัน และกำลังไฟฟ้า มีผลต่อการทับถมของฟิล์ม สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์ม AIZO โดยเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm จะให้ฟิล์มที่มีอัตราการทับถมดีที่สุด มีความหนาสูงสุดในช่วง 750-900 nm โดยไม่ขึ้นกับความดันขณะสปัตเตอร์ และสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มความดัน ขณะที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่เพิ่มขึ้น อัตราการทับถมของฟิล์มจะลดลงและขึ้นกับความดันอย่างชัดเจน โดยการเตรียมฟิล์มที่ความดันต่ำกว่าจะให้อัตราทับถมของฟิล์มสูงกว่าและฟิล์มมีโครงสร้างแบบเกรนคอลัมนาร์ ส่งผลให้มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าทำให้ฟิล์มมีอัตราการทับถมสูงขึ้นและเกรนมีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของพลังงานของอะตอมขณะทับถม เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มที่ดีที่สุดคือระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm กำลังไฟฟ้า 50 W ความดัน 0.03 mbar และไม่ให้ความร้อนกับแผ่นรองรับ โดยฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น 2.57×10^{-4} Ωcm ค่าการส่งผ่านแสง 81% ซึ่งให้ลักษณะพื้นผิวฟิล์มที่ขรุขระและค่าเฮซที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้งานเป็นฟิล์มบางโปร่งใสนำไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์แม้จะไม่กัดฟิล์มด้วยกรดก็ตาม

คำหลัก ฟิล์มบางโปร่งใสนำไฟฟ้า ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

Abstract

Project Code : MRG5180203

Project Title : Effect of In and Al co-doping on transparent conductive zinc oxide films

Investigator : Dr.Thanaporn Tohsophon, Physics department, Faculty of Science, Srinakharinwirot university

E-mail Address : thanapor@swu.ac.th

Project Period : May 15,2008 - October 15,2010

245891

Aluminum and indium doped zinc oxide (AIZO) films were prepared by direct current (dc) magnetron sputtering on glass substrate in pure argon atmosphere at room temperature. Three inches of home made zinc oxide ceramic with 0.5 wt% of aluminum and indium doping was used as a target. AIZO films deposited by this technique has hexagonal structure with a axis of 3.251 Å, c axis of 5.214 Å and the crystal size between 48-53 nm. In addition, the film shows the ratio of Zn:O as 1:1. Film resistivity of 2.57×10^{-4} - 3 Ωcm and transmittance of 70-90 % with band gap energy of 3.3-3.65 eV are obtained, depending on the deposited conditions. At the target-substrate distance of 7 cm, the films show optimum deposition rate with the thickness of 750-900 nm throughout the deposition pressure, indicating that the deposition rate is not dependent upon variations in the pressure. The increasing pressure tends to decrease the films resistivity. While at higher target-substrate distance, the lower deposition rate which is dependent on the pressure has been observed. The lower the pressure, the higher the deposition rate with columnar grain structure is achieved. This leads to obtain lower resistivity films. In addition, as increasing the power, the deposition rate and the grain size increase. This is due to the influence of the energy of sputtered atom during deposition. The optimum condition is found at the target – substrate distance of 10 cm, the power of 50 W and the pressure of 0.03 mbar without heating substrate, which give the lowest resistivity of 2.57×10^{-4} Ωcm and average transmittance of 81%. Its surface morphology and haze property is appropriate as TCO films in solar cells, without HCl etching required.

Keywords: TCO films, ZnO films, dc magnetron sputtering

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ก

บทคัดย่อ ข

บัญชีตาราง ฉ

บัญชีภาพประกอบ ช

บทที่ 1 บทนำ 1

บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี

2.1 เอกสารที่เกี่ยวข้อง 3

2.2 ทฤษฎี 4

2.2.1 ซิงค์ออกไซด์ 4

2.2.2 สารกึ่งตัวนำ 6

2.2.2 การนำไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม (AIZO) 10

2.2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง 10

2.2.5 การสปัตเตอริง 15

2.2.6 ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง 17

2.3 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

2.3.1 สมบัติทางไฟฟ้า 22

2.3.2. สมบัติทางแสง 25

2.3.3 สมบัติเฮซ 30

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 31

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 31

3.3 สถานที่ดำเนินงานวิจัย 32

3.4 ขั้นตอนการทดลอง 33

3.4.1 การเตรียมเซรามิกส์ AIZO เพื่อใช้เป็นเป้าในระบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง 33

3.4.2 การใช้เซรามิกส์ AIZO เป็นเป้าเพื่อเตรียมฟิล์มบาง AIZO ด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง 34

3.4.3 การวัดสมบัติของฟิล์ม AIZO 37

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดัน และกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาของฟิล์ม 41

4.1.1 ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันที่มีต่อความหนาของฟิล์ม 41

4.1.2 ผลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อความหนาของฟิล์ม 42

4.2 สมบัติทางไฟฟ้า 44

4.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ 44

4.2.2 ผลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ 50

4.3 สมบัติทางแสง 54

4.4 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์ม 60

4.5 คุณสมบัติของฟิล์มหลังกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก 65

4.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า 65

4.5.2 คุณสมบัติทางแสง 65

4.5.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม 65

4.6 โครงสร้างผลึกของฟิล์ม AIZO 72

4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์ม AIZOโดยเทคนิคโอเจย์ อิเล็กตรอน (AES) 76

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 78

บรรณานุกรม 80

Out put 84

ภาคผนวก 85

บัญชีตาราง

ภาพประกอบ **หน้า**

2.1 คุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์ 5

4.1 แสดงค่าแกนผลึก a ค่าแกนผลึก c และ ขนาดของผลึกของฟิล์มที่เตรียมด้วยเงื่อนไขต่างๆ 75

4.2 แสดงองค์ประกอบของฟิล์ม AIZO 77

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	โครงสร้างแบบ เวิร์ตไซต์ของ ZnO	4
2.2	แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระซึ่งเป็นพาหะนำไฟฟ้าในซิงค์ออกไซด์	5
2.3	แสดงคู่อิเล็กตรอนและโฮลในพันธะโควาเลนซ์ของผลึกซิลิกอน	7
2.4	แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)	7
2.5	แสดงตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนซ์ของผลึกซิลิกอน	9
2.6	แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	9
2.7	แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพี	9
2.8	แสดงการเกิดฟิล์มบาง	11
2.9	โมเดลของทอมสันแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิของแผ่นรองรับและความดันก๊าซ อาร์กอนที่มีต่อฟิล์มในระบบสปัตเตอริง	14
2.10	อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ	17
2.11	การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	18
2.12	การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆโดยที่ภาพ (a) (b) และ (c) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน (d) และ (e) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่างๆ	18
2.13	การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลานาร์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง	22
2.14	การวัดสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A	23
2.15	ลักษณะของการย้ายสถานะพลังงานของสาร (a) การย้ายสถานะแบบตรง (Direct transition) และ (b) การย้ายสถานะแบบไม่ตรง (Indirect transition)	27
2.16	แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	28
2.17	สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO (a) สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO (b) กราฟความสัมพันธ์ของ $(\alpha h\nu)^2$ และ $(h\nu)$ ซึ่งจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานจากส่วนตัดแกนของพลังงานโฟตอนโดยการประมาณ	29

3.1	เป้าเซรามิกส์นำไฟฟ้าซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม	34
3.2	แผนผังระบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง โดยใช้เป้าเซรามิกส์ AIZO เป็นขั้วคาโทด และแผ่นรองรับซึ่งเป็นกระจกคอร์นนิ่งเป็นขั้วอาโนด	36
3.3	ระบบการวัดของเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ	37
3.4	เชื่อมคอนแทคกับชิ้นงาน	38
3.5	การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	38
3.6	แสดงการเตรียมชิ้นงานวัดค่าเฮซ (Haze)	39
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 10 13 และ 16 cm ตามลำดับ	43
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm	43
4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm	45
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm	45
4.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 13 cm	46
4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 16 cm	46
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40W	48
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W	48

4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W 49

4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 30 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm 51

4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm 51

4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 50 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm 52

4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm 52

4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm 53

4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปัตเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm 53

4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.03 mbar 56

4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.05 mbar 56

4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.07 mbar 57

4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.09 mbar 57

4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.10 mbar 58

4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง AIZO เตรียมที่เงื่อนไขต่างๆ 58

4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm 59

4.23 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางและพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับ 10 cm ที่ความดัน (a) (b) 3 x10^{-2} mbar (c)(d) 7 x 10^{-2} mbar (e) (f) 1x 10^{-1} mbar ตามลำดับ 62

4.24 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดันเป็น 3x10^{-2} ด้วยกำลังไฟฟ้า (a)(b) 30 (c)(d) 40 และ (e)(f) 50 W ตามลำดับ 63

4.25 แสดงพื้นผิวและความขรุขระของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยเงื่อนไข
(a) (b) กำลัง 40 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm ความดัน 0.07 mbar
(c) (d) กำลัง 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar
(e) (f) กำลัง 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.05 mbar 64

4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3x10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% 66

4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3x10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% 66

4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3x10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05% 67

4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่ออัตราการกัดกร่อนของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3x10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05% 67

4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่าเฮซของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน $3x10^{-2}$ mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ด้วยระยะเวลา 5 15 30 45 และ 60 s 68

4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่าเฮซของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน $3x10^{-2}$ mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% ด้วยระยะเวลา 5 15 30 45 และ 60 s 68

4.32 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน $3x10^{-2}$ mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ระยะเวลา (a) 5 s (b) 15 s (c) 30 s (d) 45 s (e) 60 s 70

4.33 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน $3x10^{-2}$ mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% ระยะเวลา (a) 5 s (b) 15 s (c) 30 s (d) 45 s (e) 60 s 71

4.34 แสดงสเปคตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 40 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm ที่ความดัน 0.03-0.10 mbar 73

4.35 แสดงสเปคตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cmที่ความดัน 0.03-0.10 mbar 74

4.36 แสดงดิฟเฟอเรนซิเอทสเปคตรัมของโอเจย์ สำหรับ AIZO (a) ก่อนการกัดกร่อนผิวหน้าด้วยการสปัตเตอริง (b) หลังการกัดกร่อนผิวหน้าด้วยการสปัตเตอริงด้วย Ar 77