

สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซึ่งค้ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม
เตรียมโดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง

ปริญญานิพนธ์
ของ
นันทนัช วัฒนสุภิญโญ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซึ่งค้ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม
เตรียมโดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง

บทคัดย่อ
ของ
นันทนัช วัฒนสุภิญโญ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2553

นันท์นัช วัฒนสุภิญญา. (2553). สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซิงโครไคต์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม เตรียมโดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง. ปรินซ์ตันเพนน์ วท.ม. (ฟิลิซ).

กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ คณะกรรมการควบคุมอาจารย์
ดร.ธนากรณ์ ไตโสภณ, อาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ พงษ์ศิริ.

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และพื้นผิวของฟิล์มบาง AIZO เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้เตรียมฟิล์มบางซิงโครไคต์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม (AIZO) โดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกในบรรยากาศอาร์กอนบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิห้อง โดยใช้เซรามิกซิงโครไคต์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม ในปริมาณ 0.5 wt% ขนาด 3 นิ้วเป็นเป้า ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขของการสเปตเตอริงได้แก่ ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดันและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพบว่าระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดันและกำลังไฟฟ้า มีผลต่อการทับถมของฟิล์ม สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์ม AIZO โดยเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm จะให้ฟิล์มที่มีอัตราการทับถมดีที่สุด (25-32 nm/min) มีความหนาสูงสุดในช่วง 750-900 nm โดยไม่ขึ้นกับความดันขณะสเปตเตอริง และสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มความดัน ขณะที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่เพิ่มขึ้น อัตราการทับถมของฟิล์มจะลดลงและขึ้นกับความดันอย่างชัดเจน โดยการเตรียมฟิล์มที่มีความดันต่ำกว่าจะให้อัตราการทับถมของฟิล์มสูงกว่า ฟิล์มมีการก่อตัวเป็นคอลัมน์นาร์ที่ต่อเนื่อง พื้นผิวมีโครงสร้างแบบกรานูลาร์ ส่งผลให้มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าทำให้ฟิล์มมีอัตราการทับถมสูงขึ้นและเกรนมีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของพลังงานของอะตอมขณะทับถมกัน ฟิล์มที่มีการส่งผ่านแสงดีเตรียมได้จากระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับมากกว่า 7 cm โดยมีการส่งผ่านแสงเฉลี่ยมากกว่า 80% ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm โดยขอบเขตของการดูดกลืน (Absorption edge) เลื่อนไปทางด้านอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานในช่วง 3.3-3.65 eV และพบว่าเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มที่ดีที่สุดคือระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm กำลังไฟฟ้า 50 W และความดัน 0.03 mbar โดยฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น $2.57 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ค่าการส่งผ่านแสง 81% โดยการกัดฟิล์มด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 % ด้วยระยะเวลา 5 s จะให้ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มและค่าเซพที่มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

PHYSICAL PROPERTIES OF Al AND In DOPED ZnO THIN FILMS PREPARED BY
DC MAGNETRON SPUTTERING TECHNIQUE

AN ABSTRACT
BY
NUNTANUT WATTANASUPINYO

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements For the
Master of Science Degree in Physics
at Srinakharinwirot University

October 2010

Nuntanut Wattanasupinyo. (2010). *Physical properties of Al and In doped ZnO thin films prepared by DC Magnetron Sputtering Technique*. Master thesis, M.Sc. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr.Thanaporn Tohsophon, Dr. Songsak Phonghirun.

The purpose of this research is to study the effect of sputtering conditions on the electrical properties, optical properties and surface morphology of aluminum and indium doped zinc oxide (AlZO) films. In view of the application in thin film solar cells, AlZO thin 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. The influence of sputtering conditions -- target-substrate distance, pressure and power -- on the physical properties of AlZO films were studied. At the target-substrate distance of 7 cm, the films show optimum deposition rate (25-32 nm/min) with the thickness of 750-900 nm throughout the deposited pressure, indicating that the deposited rate not depend on the pressure. As increasing the pressure, the films resistivity tend to decrease. While at the higher target-substrate distance, the lower deposited rate depending on the pressure is obtained. The lower pressure, the higher deposited rate with continuous columnar films and granular structure is grown. This lead to obtain lower resistivity films. In addition, as increasing the power, the deposited rate and the grain size is increased. This is due to the effect of sputtered atom energy during deposition. Excellent transparent films of more than 80% in the wavelength range of 400-1100 nm. can be prepared at the substrate-target distance of more than 7 cm. The films absorption edge shift to the ultraviolet region, which related to the band gap energy of 3.3-3.65 eV. It was found that as deposited film prepared at the target – substrate distance of 10 cm, 50 W and 0.03 mbar give lowest resistivity of $2.57 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ with average transmittance of 81% . Post deposited film after 5 s in diluted hydrochloric acid 0.1% with the appropriate surface morphology and haze property is the optimum film to apply as TCO in solar cells.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. อนุภรณ์ โตโสภณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และได้ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้งานลุล่วงได้ด้วยดี ตลอดระยะเวลาที่ทำวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ปณิธาน วนากมล ดร.ทรงศักดิ์ พงษ์หิรัญ และ ดร.พงศ์พันธ์ จินดาอุดม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณธัญนพ นิลกำจร คุณเสริมสุข เร่งรัด นางสาวอ้อมตะวัน แสงจักรวาล และนิสิตปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในภาควิชาฟิสิกส์ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา- มารดา และญาติๆ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้ความสำคัญต่อการศึกษาเสมอมา

นันทนัช วัฒนสุภิญญา

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายงานวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของ ZnO.....	4
สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor).....	5
สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor).....	6
สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor).....	7
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor).....	7
สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor).....	7
การนำไฟฟ้าของเซรามิกสซิงโครออกไซด์(ZnO) เจือด้วย อะลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3) : AZO.....	9
การเคลือบฟิล์มบาง.....	11
วิธีทางเคมี (Chemical process).....	11
วิธีทางกายภาพ (Physical process).....	11
การสเปกโตรสโกปี.....	12
กระบวนการสเปกโตรสโกปี.....	12
อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวปาสารเคลือบ.....	13
กระบวนการโกลด์ดิสชาร์จ (Glow Discharge).....	14
ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี แมกนีตรอน สเปกโตรสโกปี.....	16
การก่อเกิดฟิล์มบาง.....	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม.....	27
สมบัติทางไฟฟ้า.....	27
สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity : ρ).....	27
ความคล่องตัวของพาหะ (Mobility ; μ).....	29
ความหนาแน่นของพาหะ (Carrier concentration ; n).....	29
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ และความ คล่องตัว ของพาหะด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว (Van der pauw method) และวิธีการวัดฮอลล์ (Hall effect measurement).....	31
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว	31
การวัดความหนาแน่นพาหะและความคล่องตัวพาหะ ด้วยวิธีการวัดฮอลล์ (Hall effect measurement).....	33
สมบัติทางแสง.....	35
สมบัติการดูดกลืนแสง.....	35
การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	37
สมบัติเฮซ (Haze properties).....	39
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	
แบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope : SEM).....	40
ลักษณะการใช้งาน SEM (SEM operation mode).....	42
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	47
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	47
สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	48
ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	49

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
การเตรียมแผ่นรองรับ.....	49
การเตรียมฟิล์มบาง AIZO.....	49
การวัดสมบัติของฟิล์ม AIZO.....	51
การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม.....	51
การวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม.....	53
การวัดค่าเฮซ (Haze).....	55
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	56
วัดความหนาของฟิล์ม.....	57
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	58
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ	
ความดัน และกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาของฟิล์ม.....	58
ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันที่มีต่อ	58
ความหนาของฟิล์ม.....	
ผลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อความหนาของฟิล์ม.....	59
สมบัติทางไฟฟ้า.....	61
ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันที่มีต่อ	
สภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ	
และความหนาแน่นของพาหะ.....	61
ผลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า	
ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ.....	67
สมบัติทางแสง.....	71
ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์ม.....	77
คุณสมบัติของฟิล์มหลังกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	81

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	81
คุณสมบัติทางแสง.....	81
ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม.....	85
5 สรุปผลการทดลอง.....	88
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	88
บรรณานุกรม.....	90
ประวัติย่อผู้ทำวิจัย.....	95

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างแบบเวทริกซ์ของ ZnO.....	4
2 แสดงช่องว่างแถบพลังงานของสารที่เป็นไดอิเล็กทริก กึ่งตัวนำและโลหะ.....	5
3 แสดงคู่อิเล็กตรอนและโฮลในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน	6
4 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor).....	7
5 แสดงตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน	8
6 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	8
7 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	9
8 แสดงการทำพันธะของ (ก) ZnO (ข) AZO.....	10
9 แสดงแถบพลังงาน (ก) ZnO (ข) AZO.....	10
10 ประเภทของกระบวนการการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ.....	11
11 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ.....	14
12 ลักษณะการไหลของประจุระหว่างขั้วอิเล็กโทรด.....	16
13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	17
14 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ.....	18
15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบ ในระบบพลาสมาแมกนีตรอน สเปคโตรริง.....	20
16 ขั้นตอนการเกิดฟิล์ม.....	22
17 การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ขณะมีการรวมกันของกลุ่มอะตอม และหลังการรวมกันของกลุ่มอะตอม.....	23
18 รูปแบบขณะเกิดการรวมกันของกลุ่มอะตอม	23
19 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่างๆ.....	26
20 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A	28
21 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวอย่าง.....	32
22 ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ f และ $\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$	32

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 การวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์	34
24 ลักษณะของการย้ายสถานะพลังงานของสาร	
(a) การย้ายสถานะแบบตรง (Direct transition) และ	
(b) การย้ายสถานะแบบไม่ตรง (Indirect transition).....	37
25 แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	38
26 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO	
(a) สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO	
(b) กราฟความสัมพันธ์ของ $(\alpha h\nu)^2$ และ $(h\nu)$ ซึ่งจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน	
จากส่วนตัดแกนของพลังงานโฟตอนโดยการประมาณค่า	40
27 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM.....	41
28 แผนภาพไดอะแกรมแสดงการทำความสะดวกกระจกขึ้นงาน.....	50
29 แสดงระบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง	52
30 ระบบการวัดของเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ	53
31 เชื่อมคอนแทคกับชิ้นงาน	54
32 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง.....	54
33 แสดงการเตรียมชิ้นงานวัดค่าเฮซ (Haze).....	55
34 แสดงการเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปวัดโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์ม	56
35 เครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) รุ่น Veeco Dektak 150.....	57
36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงที่มีต่อความหนาของฟิล์ม	
AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น	
7 10 13 และ 16 cm ตามลำดับ.....	60
37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงที่มีต่อความหนาของฟิล์ม	
AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับ	
แผ่นรองรับเป็น 10 cm.....	60

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

[illegible]

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 50 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm.....	69
48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ เป็น 10 cm.....	69
49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อ ความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับเป็น 10 cm.....	70
50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อ ความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับเป็น 10 cm.....	70
51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.03 mbar.....	73
52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.05 mbar.....	73
53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.07 mbar.....	74
54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.09 mbar.....	74
55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.10 mbar.....	75
56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม AIZO เตรียมที่เงื่อนไขต่างๆ.....	75
57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm.....	76

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
58 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางและพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย กำลังไฟฟ้า 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับ 10 cm ที่ความดัน (a) (b) 3×10^{-2} mbar (c)(d) 7×10^{-2} mbar (e) (f) 1×10^{-1} mbar ตามลำดับ.....	79
59 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดันเป็น 3×10^{-2} ด้วยกำลังไฟฟ้า (a)(b) 30 (c)(d) 40 และ (e)(f) 50 W ตามลำดับ.....	80
60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อ สภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่น ของพาหะของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วย กรดไฮโดร คลอริกความเข้มข้น 0.1%	82
61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อ สภาพต้านทานไฟฟ้าความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ ของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05%.....	82
62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อความหนา ของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1% และ 0.05%.....	83
63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อ อัตราการกัดกร่อนของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้า กับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลัง จากกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05%.....	83

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่าเฮซของฟิล์มAIZO ที่เตรียมด้วย ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากก๊าดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ด้วยระยะเวลา 5 15 30 45 และ 60 s.....	84
65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่าเฮซของฟิล์มAIZO ที่เตรียมด้วย ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากก๊าดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ด้วยระยะเวลาต่างๆ.....	84
66 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากก๊าดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ระยะเวลา (a) 5 s (b) 15 s (c) 30 s (d) 45 s (e) 60 s.....	86
67 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากก๊าดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% ระยะเวลา (a) 5 s (b) 15 s (c) 30 s (d) 45 s (e) 60 s.....	87

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปัจจุบันภาวะน้ำมันและก๊าซอันเป็นแหล่งพลังงานของโลกมีราคาที่สูงขึ้นทุกวัน ในขณะที่การใช้งานนั้นไม่มีทีท่าว่าจะลดลงแต่อย่างใด มีแต่ความต้องการในปริมาณที่สูงขึ้น ทั้งการใช้งานเพื่อการค้า การอยู่อาศัย เป็นแหล่งพลังงานต่างๆ สถานะการณ์เช่นนี้ทำให้ประเทศต่างๆ ต้องมุ่งศึกษาและหาพลังงานทดแทนแบบใหม่ เพื่อทดแทนการใช้น้ำมัน ซึ่งมีโอกาสที่จะหมดจากโลกนี้ไปในอีก 100 ปีข้างหน้า พลังงานแสงอาทิตย์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่หลายประเทศให้ความสนใจ เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่สิ้นสุดและมีลักษณะกระจายไปถึงผู้ใช้โดยตรง อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

แสงอาทิตย์ให้ประโยชน์ต่าง ๆ แก่มนุษย์เรามากมาย ไม่เพียงแต่ประโยชน์ทางตรงสำหรับการดำรงชีวิต มนุษย์เรายังคิดค้นที่จะนำแสงอาทิตย์นี้มาใช้ประโยชน์ทางด้านอื่น ๆ อีก เช่น การตากแห้งอาหารเพื่อถนอมอาหารให้เก็บไว้ได้นาน การทำนาเกลือโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการระเหยน้ำเกลือ การใช้กระจกเงาหลายบานสะท้อนแสงรวมไว้ที่จุดเดียวเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน (Solar tower) การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นต้น

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามคิดค้นและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพ โดยมีการปรับปรุงทั้งรูปแบบและวัสดุ ที่ใช้ผลิต เช่น การปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ประเภทผลึกซิลิคอนซึ่งมีจุดด้อยคือ กรรมวิธีการเตรียมให้บริสุทธิ์ อยู่ในรูปของสารที่พร้อมทำเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีราคาแพงและแตกหักได้ง่าย จึงมีการคิดค้นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบฟิล์มบาง (Thin film) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำกว่าแบบแรก แต่มีข้อดีคือมีน้ำหนักเบา สามารถติดตั้งได้โดยไม่แตกหัก

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิต พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็น สามชั้น (Triple junction structure) รวมถึงเทคนิคที่ใช้ทำฟิล์มและการกำหนดเงื่อนไขในการทำฟิล์ม เป็นต้น สิ่งเหล่านี้จะส่งผลให้ได้ค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน

โดยทั่วไปการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (Solartec). 2548: 1-2) จะสร้างบนแผ่นรอง รับซึ่งเป็นกระจก ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางออกไซด์โปร่งใสไฟฟ้า (Transparent Conductive Oxide : TCO) โดย TCO ที่นิยมใช้ใน

ปัจจุบันนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดคืออินเดียม ทิน ออกไซด์ (Indium Tin Oxide, ITO) ทินออกไซด์ (Tin Oxide, SnO_2) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) กรณีของ ITO มีราคาแพงเหมาะที่จะใช้สำหรับงานวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพมากกว่าการผลิตเป็นเชิงพาณิชย์ซึ่งมีต้นทุนการผลิตสูง ในส่วนของ SnO_2 จะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า ZnO และปัจจุบันนิยมนำมาใช้ผลิตเชิงพาณิชย์แต่มีราคาแพง ส่วนเทคโนโลยีการสร้างฟิล์มนั้นค่อนข้างง่าย การทำให้ฟิล์มมีพื้นผิวขรุขระ เหมาะกับการใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงปิดเป็นความลับซึ่งทำได้ยากมาก ส่วน ZnO มีเทคโนโลยีการสร้างฟิล์มค่อนข้างง่ายสามารถทำให้พื้นผิวฟิล์มขรุขระได้ เหมาะกับการใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

ZnO มีข้อได้เปรียบกว่า ITO และ SnO_2 โดยสามารถใช้เป็น TCO ที่มีราคาถูกที่สุดเพราะมีวัตถุดิบจำนวนมาก สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ $100 - 150^\circ\text{C}$ และทนทานต่อสิ่งแวดล้อมที่มีไฮโดรเจนพลาสมา (Hydrogen plasma) ซึ่งมักจะใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน แม้สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของ ZnO ซึ่งอยู่ในช่วง $6 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ซึ่งต่ำกว่า ITO อยู่ก็ตาม แต่สภาพต้านทานของ ZnO มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 1 ปีในอุณหภูมิห้อง ZnO จึงเหมาะที่จะนำมาใช้แทน ITO และ SnO_2

ZnO เป็นที่รู้จักและใช้ในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลาพอสมควร (Lee, J.C.; et al. 2000: 186) โดยเฉพาะในรูปแบบของออกไซด์โปร่งใส นำไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์โดย นำมาใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมและราคาถูก เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นหน้าต่างรับแสงเป็น ZnO ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 18 %

ฟิล์มบางที่ใช้เป็น TCO ควรมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ส่องผ่านแสงสูง และกักเก็บแสงได้ดี งานวิจัยนี้จึงมุ่งความสนใจไปศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง ZnO ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ส่องผ่านแสงสูง และกักเก็บแสงได้ดี โดยเตรียมฟิล์มบางจากเป้าเซรามิกส์ ZnO ที่เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม (Al and In doped $\text{ZnO} : \text{AIZO}$) ด้วยเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มที่แตกต่างกัน โดยใช้เทคนิค ดีซีแมกนีตรอน สเปตเตอริง จากนั้นนำฟิล์ม บาง AIZO มาศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และพื้นผิวของฟิล์ม เพื่อให้ได้ฟิล์มตัวอย่างที่มีสมบัติที่เหมาะสมเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบางโปร่งใส นำไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ศึกษาเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และ พื้นผิวของฟิล์มบาง AIZO เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์

ความสำคัญของการวิจัย

การศึกษาฟิล์มบาง AIZO ด้วยเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์ม ต่างกัน ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และพื้นผิวของฟิล์ม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วโปร่งใสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์

ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมฟิล์มบาง AIZO ที่สputter จากเป้า ZnO เจือด้วย Al และ In ในปริมาณ 0.5 wt% ด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สputter อิง (DC magnetron sputtering) ลงบนกระจกคอร์นิง (Corning glass)
2. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยใช้เทคนิค โฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe) และเทคนิคฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall effect measurements) โดยศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ
3. ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่อง วัดค่าการส่งผ่านแสง (UV – visible spectrometer) เพื่อตรวจสอบค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม และค่าเฮซ (Haze)
4. ศึกษาพื้นผิวของฟิล์ม บางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
5. ประมวลผลและแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่วัดได้ในรูปของตารางและกราฟ
6. วิเคราะห์และสรุปผล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ผลที่ได้จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง AIZO สามารถนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส (TCO) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดีขึ้นในอนาคตและเป็นแนวทางในการศึกษาฟิล์มบางชนิดอื่นต่อไป

บทที่ 2

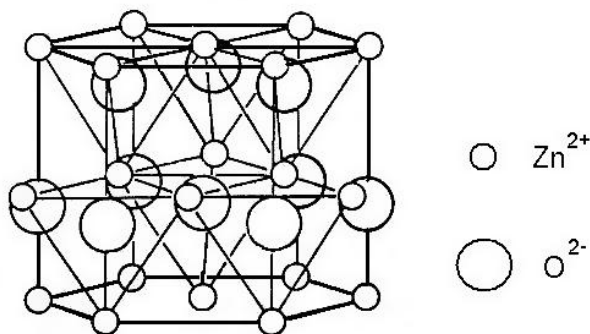
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของ ZnO
2. การเคลือบฟิล์มบาง
3. สเปกโตรสโกปี
4. ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี แมกนีตรอนสเปกโตรสโกปี
5. การก่อเกิดฟิล์มบาง
6. ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม
7. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของ ZnO

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) : (Madelung. 1992: 26) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) โครงสร้างผลึกของ ZnO เป็นแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค (Hexagonal closed pack : hcp) ภายในโครงสร้างมีออกซิเจนไอออน (Oxygen ions : O^{2-}) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างซิงค์ไอออน (Zinc ions : Zn^{2+}) ซึ่งทำพันธะกันแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เรียกว่าเวทซ์ไท์ (Wurtzite structure) ดังภาพประกอบ 1 ZnO มีค่าคงที่ผลึก (Lattice constants) $a = 3.24 \text{ \AA}$ และ $c = 5.19 \text{ \AA}$ (Hartnagel H. L. 1996. 17)

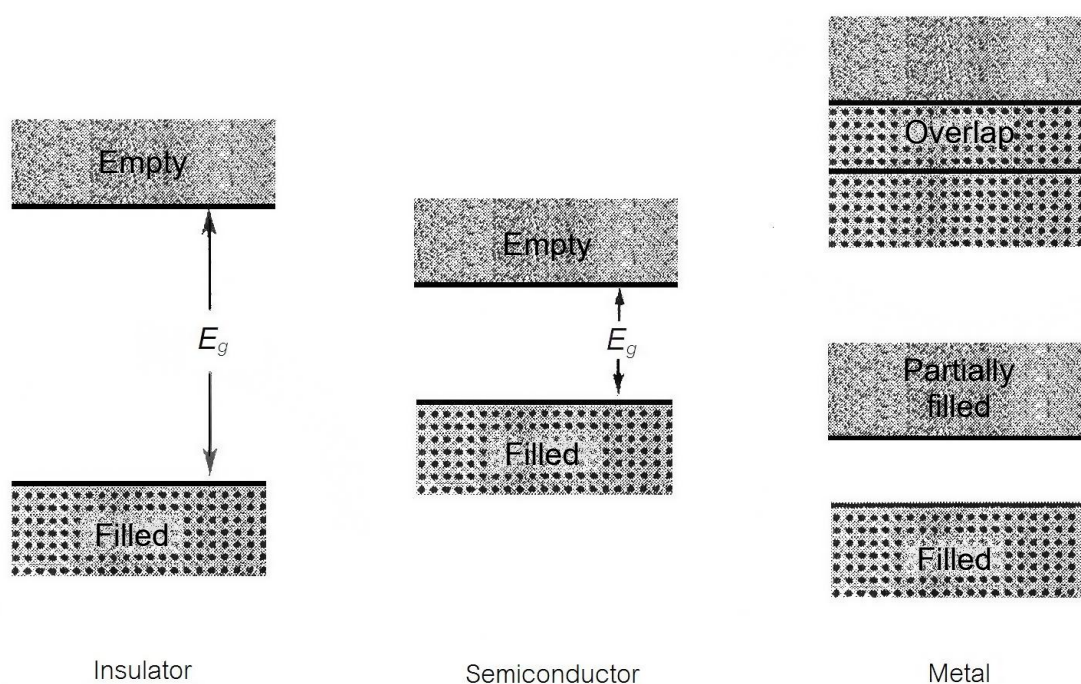


ภาพประกอบ 1 โครงสร้างแบบเวทซ์ไท์ของ ZnO

ที่มา: H. L. Hartnagel; et al. (1996). *Semiconducting Transparent Thin Films*. p. 17.

1.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำ (Ben G. Streetman. 1995: 64) เป็นวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าไดอิเล็กทริก แต่ต่ำกว่าตัวนำ ลักษณะแถบพลังงาน (Energy band) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) มีช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ซึ่งมีความกว้างไม่เกิน 4 eV กั้นระหว่างแถบทั้งสองนี้ ดังภาพประกอบ 2 หน่วยของพลังงานคือ อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron Volt : eV) ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ใช้งานในการทำให้อิเล็กตรอนหนึ่งตัววิ่งผ่านสนามศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานมากพอก็จะสามารถข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบการนำและทำให้เกิดการนำกระแสได้ ซึ่งสารกึ่งตัวนำแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) และสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)

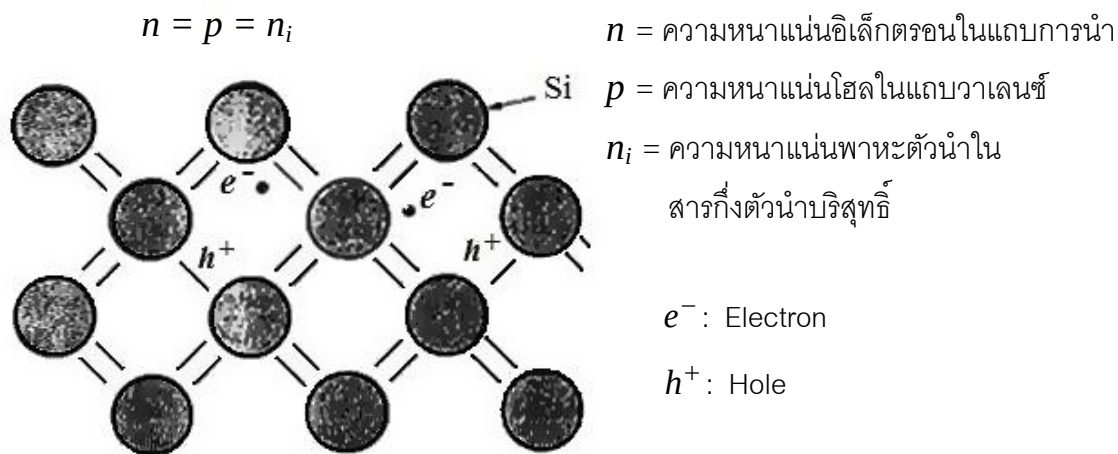


ภาพประกอบ 2 แสดงช่องว่างแถบพลังงานของสารที่เป็นไดอิเล็กทริก กึ่งตัวนำและโลหะ

ที่มา: Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 56.

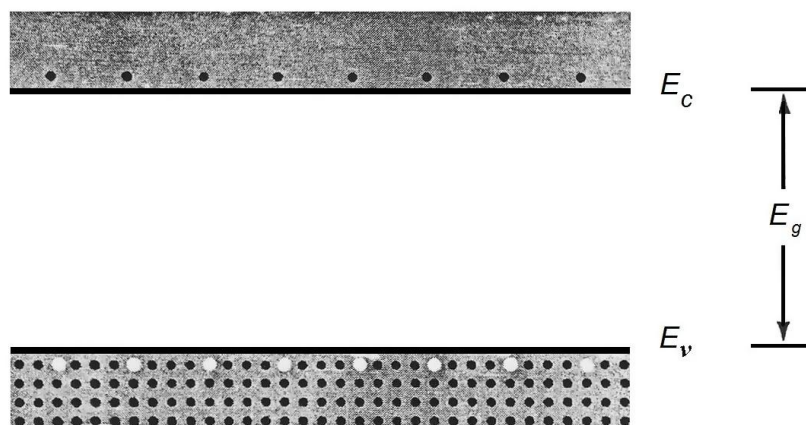
1.1.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Ben G. Streetman. 1995: 65) จะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ เช่น ซิลิกอน หรือเจอร์มาเนียม ซึ่งอยู่ในธาตุหมู่ 4A ดังภาพประกอบ 3 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้อธิบายได้โดยพิจารณาแถบพลังงาน ดังภาพประกอบ 4 ที่ 0 K สารกึ่งตัวนำมีแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม แต่แถบการนำจะว่างเปล่าไม่มีพาหะประจุอยู่เลย แต่ถ้าทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ผลึกเกิดการสั่นสะเทือนและทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่หลุดออกจากพันธะโควาเลนต์กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและสามารถเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ เนื่องจากช่องว่างพลังงานในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีความกว้างไม่มากนัก ไม่จำเป็นต้องให้พลังงานสูงแก่อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนก็สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำได้ การเคลื่อนที่ของวาเลนซ์อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะทำให้เกิดโฮล (Hole) เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ซิลิกอนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น พลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิห้องก็เพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ การที่อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำจะทำให้เกิดโฮล ในแถบวาเลนซ์ ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นมีประจุเป็นบวกและเกิดอิเล็กตรอนในแถบการนำซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบโดยเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน – โฮล (Electron – hole pair) ดังภาพประกอบ 3 ดังนั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จึงมีพาหะนำไฟฟ้า 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล



ภาพประกอบ 3 แสดงคู่อิเล็กตรอนและโฮลในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน

ที่มา: Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 65.



ภาพประกอบ 4 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

ที่มา: Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 61.

1.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Ben G. Streetman. 1995: 66-68) สามารถแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้โดยการเติมสารเจือลงในอะตอมตัวทำละลาย ทำให้เกิดการละลายของแข็งแบบแทนที่หรือการแทรก สารเจือที่เติมลงไปช่วยให้อิเล็กทรอนิกส์ หรือโฮลเกิดขึ้นมาในแลตทิซ ก่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ โดยสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็น (n) และชนิดพี (p)

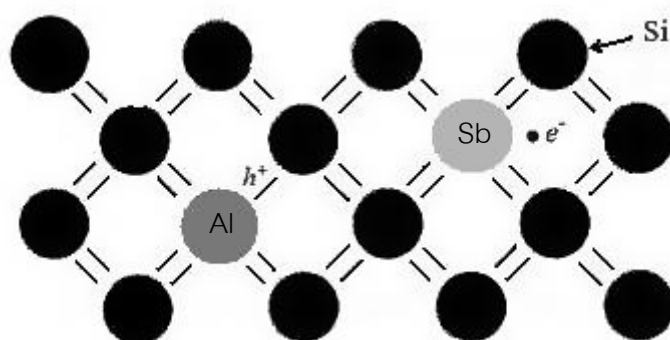
1.1.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (n-type semiconductor) คือ สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะประจุลบมากกว่าพาหะประจุบวก เพราะมีอิเล็กตรอนเพิ่มมาจากสารเจือ ตัวอย่างเช่น พลวง (Sb) ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวถูกเติมลงไปในซิลิกอน (Si) ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ดังภาพประกอบ 5 อิเล็กตรอนจากสองอะตอมจับคู่กันด้วยพันธะโควาเลนต์ 4 พันธะ และจะเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนของพลวง 1 ตัวดึงดูดกับนิวเคลียสของพลวงอย่างหลวมๆ ด้วยพลังงานพันธะเพียง 0.044 eV อิเล็กตรอนของพลวงต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นอีกเพียง 0.044 eV ก็จะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและสามารถนำกระแสได้ เรียกสารที่เจือพลวงว่า ตัวให้ (donor) โดยมีระดับพลังงานอยู่ใต้แถบการนำเรียกว่า ระดับตัวให้ (Donor level : E_D) ดังภาพประกอบ 6

1.1.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

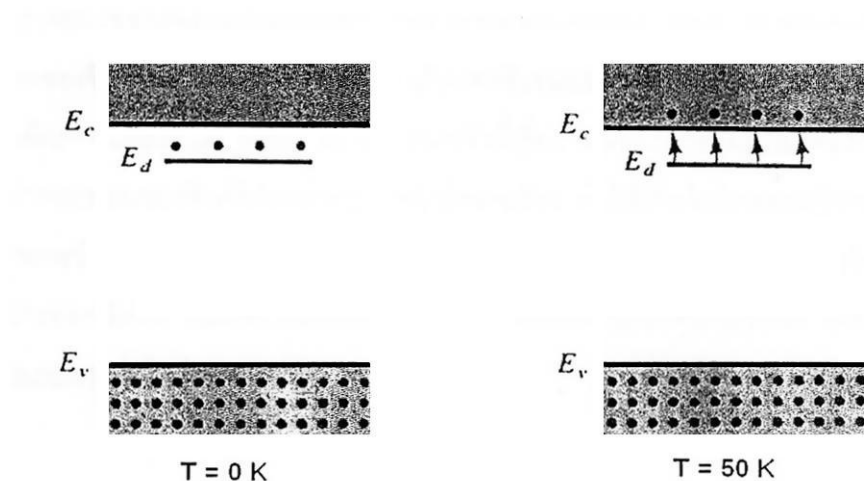
สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดพี (p-type semiconductor) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมสารเจือเพื่อให้มีพาหะประจุบวกมากกว่าพาหะประจุลบ ตัวอย่างเช่นการเติมธาตุหมู่ 3A อันได้แก่อลูมิเนียม (Al) อินเดียม (In) ลงในซิลิกอน เมื่ออะตอมซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวของสารเจือมี

พันธะโควาเลนต์กับอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ทำให้เกิดโฮล 1 โฮลขึ้นในโครงสร้าง และพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอน จึงเรียกสารเจือเหล่านี้ว่าตัวรับ (Acceptor) ดังภาพประกอบ 5 โดยมีระดับพลังงานเหนือแถบวาเลนซ์อิเล็กตรอนเล็กน้อยเรียกว่าระดับตัวรับ (Acceptor level : E_a) ดังภาพประกอบ 7 อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับตัวรับนี้ได้ง่ายกว่าเข้าไปอยู่ในแถบการนำ เนื่องจากใช้พลังงานน้อยกว่า เมื่ออิเล็กตรอนออกไปจากแถบวาเลนซ์แล้วจะทำให้เกิดโฮลที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้ซึ่งทำให้มีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้



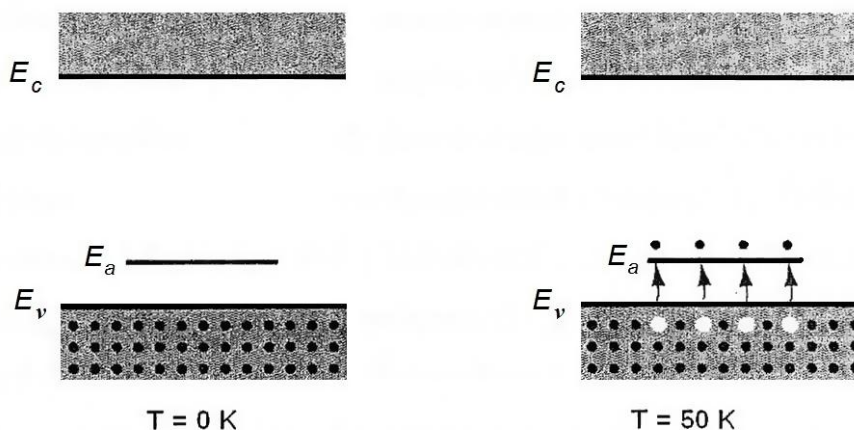
ภาพประกอบ 5 แสดงตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน

ที่มา: Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 67.



ภาพประกอบ 6 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ที่มา: Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 67.



ภาพประกอบ 7 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพี

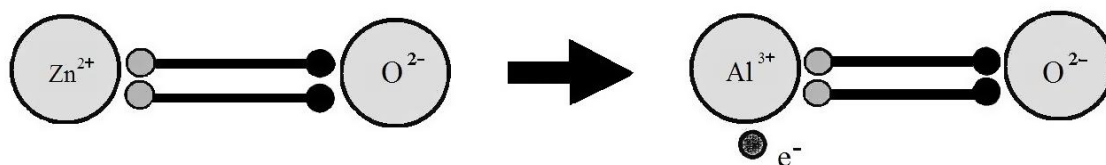
ที่มา: Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 67.

1.2 การนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) : AZO

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเจือในปริมาณน้อยๆและเงื่อนไขของอุณหภูมิผิวนึก เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น ZnO จะสูญเสียออกซิเจน (O) ไปทำให้อิเล็กตรอนของซิงค์ 2 อิเล็กตรอนไม่มีพันธะกับ O และเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนอิสระให้มากขึ้น โมเดลก่อนหน้านี้เชื่อว่าผลของการที่ผลึกมีโครงสร้างไม่สมบูรณ์อันเนื่องมาจากอะตอมของ Zn แทรกอยู่ในโครงสร้าง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ แต่ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าการนำไฟฟ้าของ ZnO เกิดจากการสูญเสีย O และที่อุณหภูมิห้องก็พอเพียงที่จะทำให้เกิดช่องว่าง O อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้เมื่อให้พลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถกระโดดขึ้นไปบนแถบการนำไฟฟ้าและสามารถนำไฟฟ้าได้ (Moulsom, A.J. ; & Herbert, J.M. 2003: 156)

ในโครงสร้างของ ZnO อะตอมของ Zn และ O ทำพันธะกันดังภาพประกอบ 8 (ก) เมื่อเจือ Al_2O_3 ลงไปในโครงสร้างของ ZnO แล้วอลูมิเนียมอะตอม (Al^{3+}) ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว และมีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Zn และทำพันธะกับ O ในโครงสร้าง แต่เนื่องจาก Al มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว และ O มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัว เมื่อทำพันธะกันแล้วจะมีอิเล็กตรอนของ Al เหลือ 1 ตัว ที่ไม่ได้ทำพันธะกับอะตอมของ O แต่จะเกาะอยู่กับนิวเคลียสของ Al อย่างหลวมๆดังภาพประกอบ 8 (ข) เมื่อให้พลังงานกระตุ้นเข้าไปในปริมาณเล็กน้อยก็จะทำให้อิเล็กตรอนนี้กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) และสามารถนำไฟฟ้าได้ การนำไฟฟ้าของ Al เจือ ZnO อธิบายได้โดยพิจารณาช่องว่าง

แถบพลังงานดังภาพประกอบ 9 ZnO มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง 3.37 eV เมื่อเจือ Al_2O_3 ลงไปใน ZnO ช่องว่างแถบพลังงานจะแคบลงเหลือ 3.2 eV ช่องว่างแถบพลังงานที่แคบลงจากการเติมสารเจือ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระสามารถกระโดดขึ้นไปบนแถบการนำได้ง่ายขึ้น

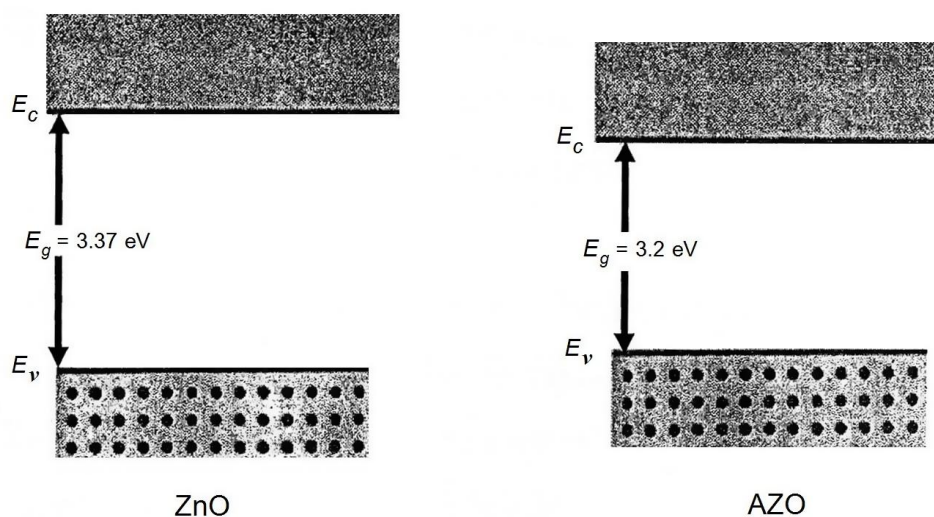


(ก) การทำพันธะของ ZnO

(ข) การทำพันธะของ AZO

ภาพประกอบ 8 แสดงการทำพันธะของ (ก) ZnO (ข) AZO

ที่มา: อ้อมตะวัน แสงจักรวาล. (2552). อิทธิพลของกรดสเตียริก และโพลิเมทิลเมทาไครเลตต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม.



ภาพประกอบ 9 แสดงแถบพลังงานของ (ก) ZnO (ข) AZO

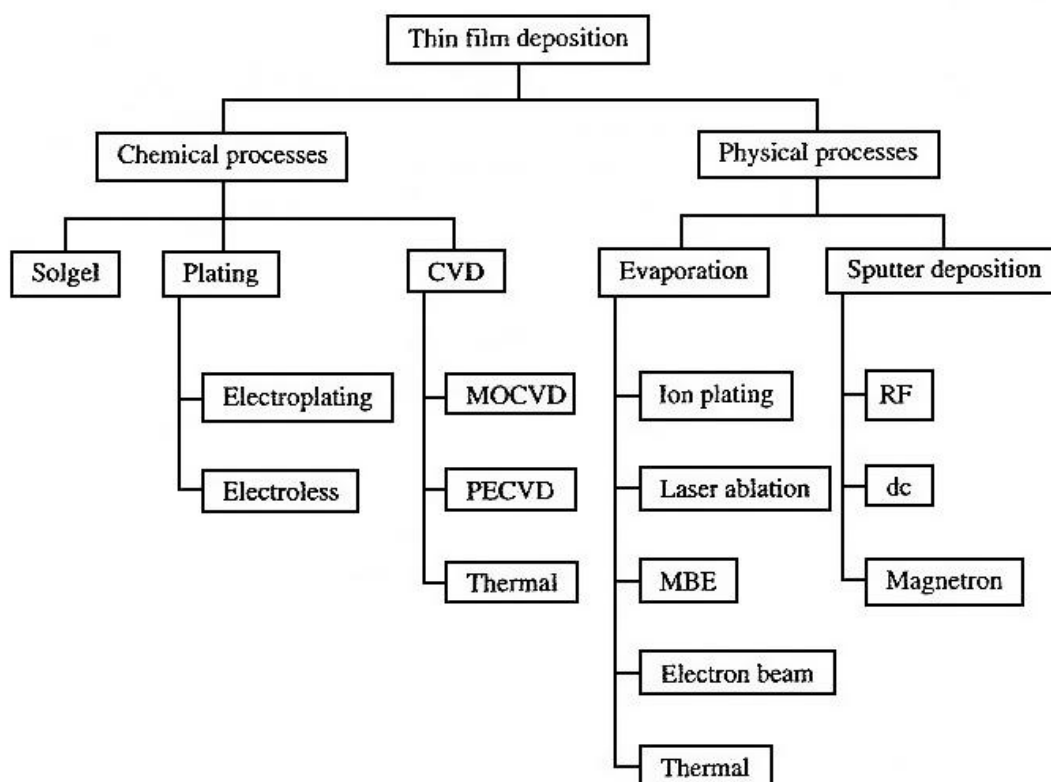
ที่มา: Guojia,Fang; Dejie,Li; & Bao-Lun, Yao (2003). *Fabrication and vacuum annealing of transparent conductive AZO thin films prepared by DC magnetron sputtering.* (online)

2. การเคลือบฟิล์มบาง

วิธีการเตรียมฟิล์มบางมีหลายแบบ(กมล เอี่ยมพนากิจ . 2547: 9) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี ปริมาณและคุณภาพของฟิล์มบาง สำหรับเทคโนโลยีในการ เตรียม ฟิล์มบางนั้นแบ่งได้ 2 วิธี ดัง ภาพประกอบ 10 คือ

1. วิธีทางเคมี (Chemical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพ ของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบน แผ่นรองรับ ซึ่งรวมถึงการพ่นสเปรย์ ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) กระบวนการเคลือบไอเคมี (Chemical vapor deposition) และวิธี โซลเจล (Sol-gel)

2. วิธีทางกายภาพ (Physical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสาร เคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของ แผ่นรองรับ โดยการใช้ ความร้อน (Thermal) และระเหยสารด้วยลำ อิเล็กตรอน (Electron beam evaporation) รวมถึง วิธีการใช้แสงเลเซอร์ (Laser ablation) วิธีการสปัตเตอริง (Sputtering)



ภาพประกอบ 10 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสูญญากาศ

ที่มา: Milton Ohring. (1997). *The Materials Science of Thin Films*. p 2.

ในส่วนองวิธีทางกายภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลือบฟิล์มโดยวิธีระเหยสาร (Evaporation) เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอซึ่งไอสารเคลือบนี้จะพุ่งไปกระทบกับวัสดุที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป ข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและแผ่นรองรับจะไม่สูง นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้ อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุลหอยหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2. การเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริง ซึ่งการเคลือบด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ ไอออนของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งชน แผ่นรองรับ และมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบาง เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่อ ไอออนของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นรองรับ ก็ฝังตัวแน่นลงใน แผ่นรองรับ มากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับแผ่นรองรับดีกว่า

3. การสปัตเตอริง

3.1 กระบวนการสปัตเตอริง

กระบวนการสปัตเตอริงเป็นกระบวนการที่จะตอมผิวหน้าของวัสดุ ที่ต้องการทำฟิล์มบาง ถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อ่อนภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ (กมล เอี่ยมพนากิจ . 2547: 10) ดังนั้น สิ่งที่เป็นในกระบวนการสปัตเตอริง คือ

1. เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นรองรับ

2. อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่ยอมรับคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่ผลิตได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมากทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้

กระบวนการสับแต่อร์ริงเกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของ ก๊าซ ในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสับแต่อร์ริงจะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการ โกลวดิสชาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสับแต่อร์ริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการ โกลวดิสชาร์จ ในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง

3.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังภาพประกอบ 11 (มติ ห่อประชุม. 2548: 6-8) ดังนี้

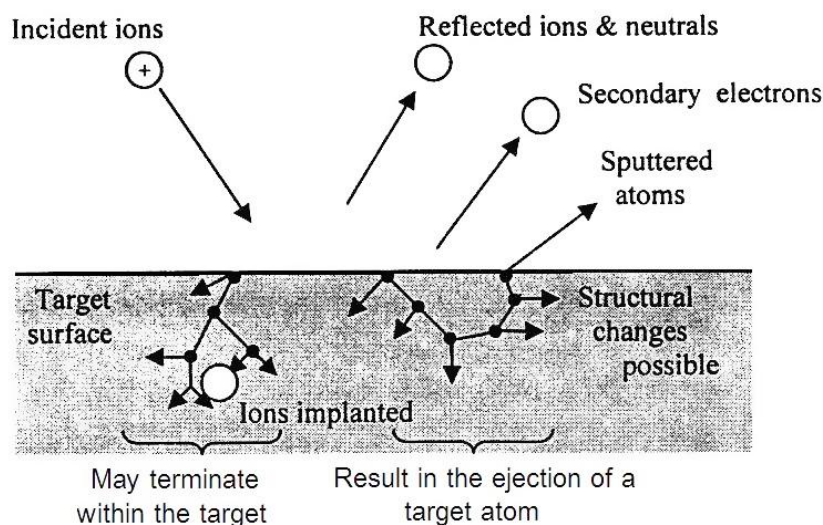
1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected ions and neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ส่งจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ

3. การฝังตัวของไอออน (Ion implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้น ไอออนอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน ซึ่งมีค่าประมาณ $10 \text{ \AA}$ /พลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง

4. การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect)

5. การสับแต่อร์ริง การชนของไอออน ที่ผิวหน้าเป้า อาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสับแต่อร์ริง



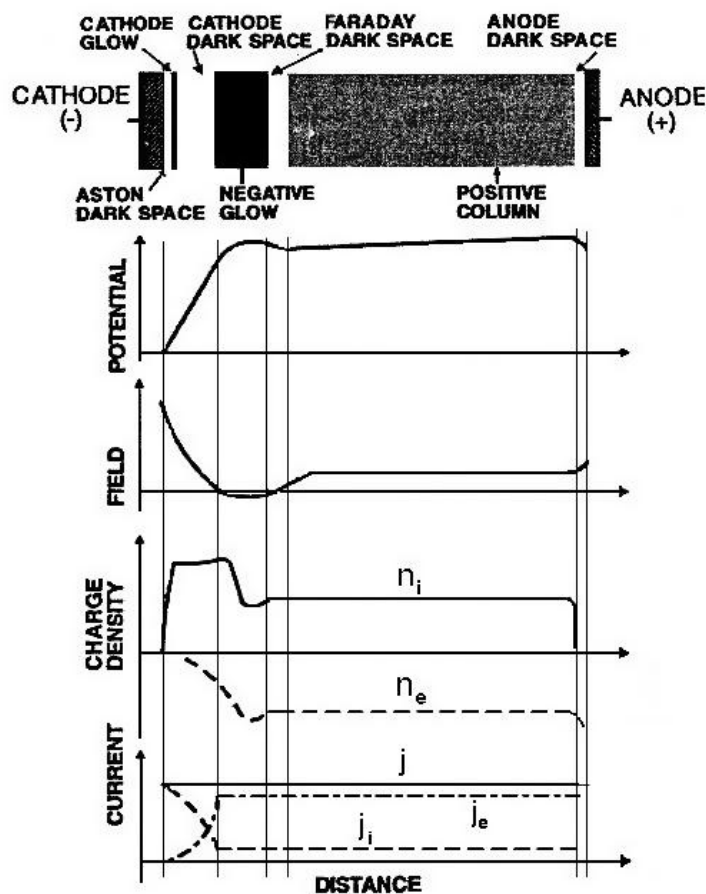
ภาพประกอบ 11 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

ที่มา: Chapman, B. (1980). *Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching*.

3.3 กระบวนการโกลดิสชาร์จ (Glow Discharge)

ในการผลิตอนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้น วิธีที่นิยมและใช้กันมาก ได้แก่ กระบวนการโกลดิสชาร์จ (กมล เขียมพนากิจ . 2547: 12-14) ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคนี้เช่นกัน โดยในกระบวนการโกลดิสชาร์จจะเกิดขึ้นโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ D ภายใต้ความดันบรรยากาศที่ต่ำ ($10^{-3} - 10^{-1}$ Torr) เมื่อเริ่มดันความต่างศักย์ไฟฟ้าน้อย กระแสไฟฟ้าจะเกิดจากอิเล็กตรอนและ ไอออนบวก ซึ่งได้จากการแตกตัวก๊าซ เนื่องจากเกิดการชนกันเองหรือถูกชนโดยรังสีคอสมิก อิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก (Anode) และไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วลบ (Cathode) ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองแต่กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าต่ำมาก เมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่าง อิเล็กโทรด จนถึงแรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) พลังงานของประจุ จะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจนมีค่าสูงขึ้น สามารถชนกับโมเลกุลของก๊าซเฉื่อยที่อยู่ในภาชนะสุญญากาศ ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก เรียกว่าการไอออไนซ์ของก๊าซ โดยไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้ว คาโทดที่ติดเป้าสารเคลือบไว้ด้านบน ทำให้อิเล็กตรอนชุดที่สองและอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบถูกชนหลุดออกมาจากเป้าสารเคลือบด้วยการถ่ายเทโมเมนตัม โดยอะตอมของเป้าสารเคลือบที่ถูกชนจะฟุ้งกระจายภายในระบบสุญญากาศ ซึ่งพร้อมที่จะตกลงบนแผ่นรองรับส่วนอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วแอโนดและทำให้เกิดการไอออไนซ์ก๊าซอย่างต่อเนื่อง ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากพอที่จะ

ผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่เพื่อรักษาสภาวะ โกลด์สชาร์จต่อไป หลังจากการไอออไนซ์ของก๊าซ ไอออนซึ่งมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าทำให้บริเวณหัว คาโทด มีประจุบวกเกาะกลุ่มกัน (Positive space charge) เกิดขึ้นสูง ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สู่อานอดอย่างรวดเร็วทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณหัว คาโทดมีค่าสูง ศักย์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมบริเวณนี้ เมื่อพ้นจากบริเวณคาโทด สนามไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลง อิเล็กตรอนหลังการไอออไนซ์ หลาย ๆ ครั้งบริเวณใกล้คาโทด จะสูญเสียพลังงานไปมากไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองภายใต้สนามไฟฟ้าที่ต่ำนี้เพื่อให้มีพลังงานสูงเพียงพอที่จะไอออไนซ์ก๊าซครั้งต่อไปได้ จึงเคลื่อนที่เข้าหาหัวอานอด โดยระหว่างนี้อาจทำได้เพียงกระตุ้น (Excited) อะตอมของก๊าซเท่านั้น เมื่ออะตอมของก๊าซที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นกลับสู่กราวด์สเตทจะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออก จึงเกิดเป็นสีต่างๆ ตามชนิดของก๊าซเรียกว่าเกิดโกลด์สชาร์จ ส่วนไอออนบวกที่วิ่งเข้าสู่ คาโทดจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ คาโทดให้เป็นกลางทางไฟฟ้าและกลับจากสภาวะไอออนสู่กราวด์สเตท โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอะตอมของก๊าซจากสภาวะไอออนสู่กราวด์สเตทนี้ มีความถี่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดเป็นบริเวณมืด และบริเวณมืดนี้เกิดขึ้นในช่วงระยะปลอดการชนจากผิว คาโทดโดยเป็นระยะปลอด การชนเฉลี่ย (Mean free path) ระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซ โดยระยะของแถบมืด จะเปลี่ยนแปลงไปตามความดันบรรยากาศภายในและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ระหว่างหัวอิเล็กโทรด พบว่าผลคูณระหว่างความดันกับระยะของแถบมืดมีค่าคงที่ เมื่อความดันลดลงแถบมืดจะมีระยะยาวขึ้น ทำให้การผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยลง กระแสลดลง ดังนั้นอะตอมที่ถูกสับเตอรังจะมีปริมาณลดลงด้วย แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นแถบมืดจะมีค่าลดลง การผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นทำให้ขบวนการสับเตอรังสูงขึ้นตามความดันก๊าซ ขณะที่ความดันก๊าซในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนจะมีค่าลดลง อะตอมของสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบจะถูกส่งผ่านลงเคลือบบนแผ่นรองรับได้ยากขึ้น เนื่องจากการชนกันกับโมเลกุลของก๊าซและเคลื่อนที่ย้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนัง ภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าyieldของการ สับเตอรังมีค่าลดลงเมื่อมีความดันสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการเกิดสับเตอรังจะขึ้นอยู่กับความดันก๊าซ และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัว อิเล็กโทรด แรงดันไฟฟ้า พังทลายในขบวนการโกลด์สชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง D ระหว่างหัวอิเล็กโทรดและระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอน ชุดที่สองกับโมเลกุลของก๊าซ (ระยะปลอดการชนจะแปรผกผันกับความดันก๊าซ) ถ้าความดันก๊าซต่ำเกินไป หรือระยะทาง D มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนให้มากพอก่อนการชนกับอานอด ถ้าความดันก๊าซสูงเกินไปหรือระยะทาง D มากเกินไปอิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอในการไอออไนซ์ก๊าซ ดังนั้นทั้งสองกรณีนี้จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าพังทลายที่มีค่าค่อนข้างสูง พิจารณาลักษณะการโกลด์สชาร์จดังภาพประกอบ 12

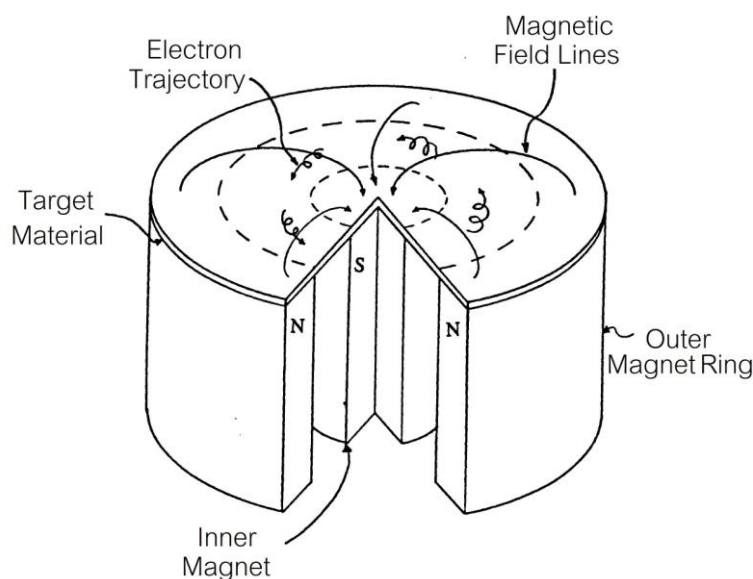


ภาพประกอบ 12 ลักษณะการไหลของประจุระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

ที่มา: Milton Ohring. (2002). *Materials Science of Thin Films*. p 151.

4. ระบบการเคลือบฟิล์มแบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงภายใต้ระบบไหลของประจุและใช้สนามแม่เหล็กช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการสปัตเตอริง โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง และอาเอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งระบบดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เป็นการสปัตเตอริงโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เหมาะสำหรับการสปัตเตอริงเคลือบฟิล์มบางที่เป็นโลหะ และมีอัตราการเคลือบฟิล์มสูง ส่วนระบบอาเอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นสปัตเตอริงโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ เหมาะสำหรับการสปัตเตอริงเคลือบฟิล์มบางที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือฉนวน

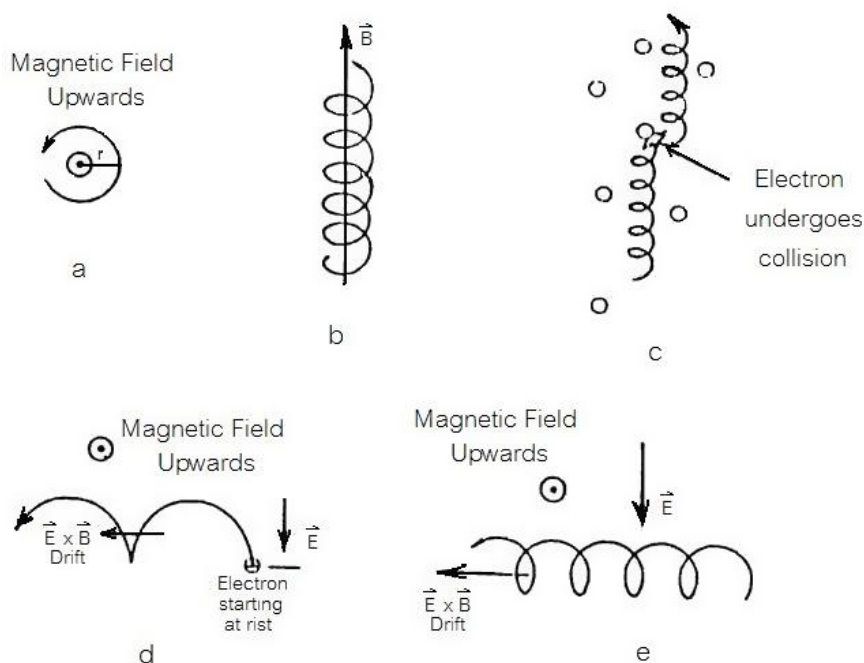


ภาพประกอบ 13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ที่มา: Vossen, J.L.; & Kerns W. (1978). *Thin Film Processes*. p 552

อัตราการเกิดสปัตเตอริงนั้น (มติ ห่อประชุม. 2548: 20-23) จะขึ้นกับผลคูณระหว่างยิลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริงนั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มยิลด์แล้ว ยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งในระบบ ดี ซี สปัตเตอริงปกตินั้น ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่าง อิเล็กโทรด หรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแส ประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบ ดีซีสปัตเตอริงทั่วไปอะตอมของก๊าซที่จะเกิดการไอออนไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศขนานกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งดังภาพประกอบ 13 ทำให้การไอออนไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมก๊าซเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม ด้วยรัศมี (r) ดังภาพประกอบ 14(a)



ภาพประกอบ 14 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ โดยที่ภาพ (a) (b) และ (c) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน (d) และ (e) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่างๆ

ที่มา: Smith, D.L. (1995). *Thin Film Deposition : Principle and Practice*. p 616.

$$r = \frac{3.37 (W)^{1/2}}{B} \quad (2.1)$$

เมื่อ r คือ รัศมีการหมุนของอิเล็กตรอน
 W คือ พลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV
 B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ 2.8×10^8 Hz ภาพประกอบ 14(b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่ง ึ่งระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมก๊าซ ภาพประกอบ 14(c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป

ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบ เลื่อน (Drift motion) มีค่าเท่ากับ

$$v_{drift} = \frac{10^8 E}{B} \quad (2.2)$$

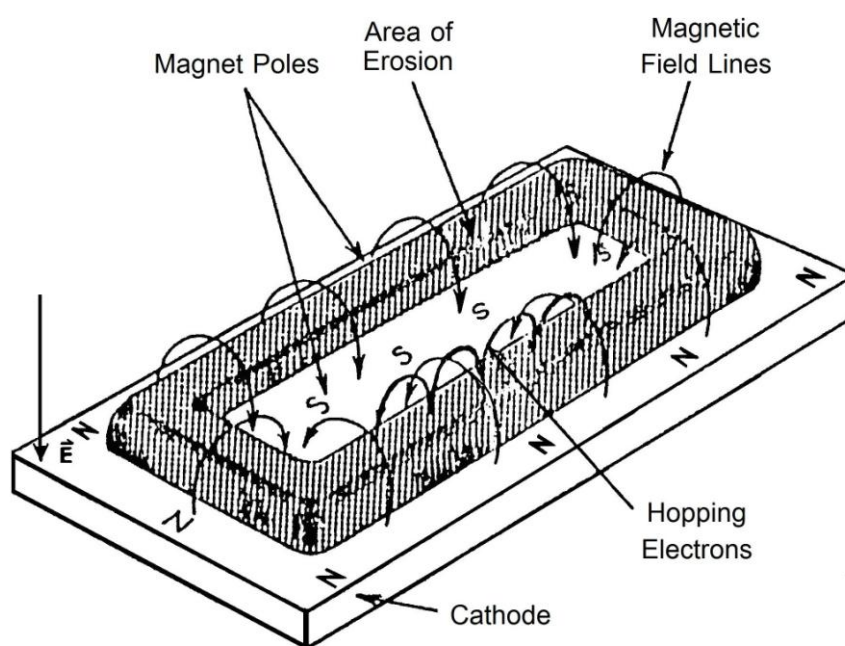
เมื่อ v_{drift} คือ ความเร็วรอยเลื่อน (Drift velocity)
 E คือ สนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm
 B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กหน่วยเป็น gauss

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณดาร์คสเปซมีค่าประมาณ 1,000 V/cm และสนามแม่เหล็ก 100 gauss จะให้ค่าความเร็วในการเลื่อนเท่ากับ 10^7 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นไซคลอยด์ (Cycloid) ดังภาพประกอบ 14(d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบ เลื่อน จะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงใน ภาพประกอบ 14(e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมาก ถึงแม้จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อยๆ ระหว่าง 50-500 gauss แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสเป็คโตริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (Longitudinal field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิด โกลดิสซาร์จ เปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (Transverse field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพประกอบ 14(d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทดและ drift ตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ภาพประกอบ 15) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุล ก๊าซบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวที่ไม่ชนโมเลกุลของ ก๊าซจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้อิออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดโกล์ ผิวคาโทด ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอนสเป็คโตริงทรงกระบอก (Cylindrical magnetron sputtering)

และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบดีซี สเป็คเตอรिंगที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาสมาแมกนีตรอน สเป็คเตอรिंग (Planar magnetron sputtering)

การเพิ่มไอออนสูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเข้มข้นบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสเป็คเตอรिंगของระบบนี้มีค่าสูง ขณะที่ความดันในระบบจะมีค่าต่ำ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสเป็คเตอรिंग แมกนีตรอนสเป็คเตอรिंगทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสเป็คเตอรिंगสูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าระหว่าง $300\text{--}800 \text{ V}$ ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสเป็คเตอรिंगขนาดใหญ่ได้ง่าย เมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไตรโอดสเป็คเตอรिंग ระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง 10^{-5} mbar ส่วนข้อเสียของระบบแมกนีตรอนสเป็คเตอรिंग คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูง เพื่อควบคุมคุณภาพฟิล์มแต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบแมกนีตรอนสเป็คเตอรिंगนี้สามารถควบคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็กมีอิเล็กตรอนที่หลุด



ภาพประกอบ 15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตัวของเป้าสารเคลือบในระบบพลาสมาแมกนีตรอน สเป็คเตอรिंग

ที่มา: Milton Ohring. (2002). *Materials Science of Thin Films*. p 223.

ออกมาและวิ่งเข้าสู่แผ่นรองรับปริมาณน้อย จึงลดปัญหาความร้อนบน แผ่นรองรับ เนื่องจากการชนของ อิเล็กตรอนลงได้อย่างมาก

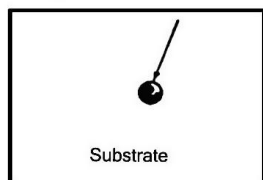
5. การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเคลือบในสุญญากาศ (มติ ห่อประชุม . 2548: 30-31) สารเคลือบที่ตกกระทบผิว แผ่นรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล ภาพประกอบ 16(a) โดยพลังงานพันธะ (Bonding energy) ระหว่างอะตอมสารเคลือบกับ แผ่นรองรับและอุณหภูมิของ แผ่นรองรับ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิว แผ่นรองรับ อะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่า ตำแหน่งการดูดจับ (Absorption site) และเกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจฝ่าเข้าไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป ภาพประกอบ 16(b) อะตอมสารเคลือบอาจถูกชนจากอะตอมที่เข้ามาใหม่หรืออาจเกิดการระเหยกกลับและรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ เมื่ออะตอมรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ ดังภาพประกอบ 16(c) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว ทั้งนี้การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตรา การเคลือบ (Deposition rate) อะตอมคู่ที่เกิดขึ้นอาจมีการรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวเกิดเป็นสามอะตอม (Triplets) สี่อะตอม (Quadruplets) อื่นๆ การรวมตัวกันในลักษณะนี้เรียกว่า การเกิดนิวเคลียส ดังในภาพประกอบ 16(d) ซึ่งจะทำให้เกิดกลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-stable islands) จากนั้น กลุ่มอะตอมจะเริ่มเติบโตขึ้นจนกลายเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Islands growth) ดังภาพประกอบ 16(e) และ ภาพประกอบ 16(f) กลุ่มอะตอมจะโตขึ้นเรื่อยๆจนเกิดการแตะและชนกับกลุ่มข้างๆ จะเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของกลุ่มอะตอมซึ่งเรียกว่า การรวมกันของกลุ่มอะตอม (Coalescence) ดังภาพประกอบ 16(g) ขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกัน พบว่าอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลว (Liquid like behavior) ในระหว่างการรวมกันของกลุ่มอะตอมจะมีทิศเรียงตัวในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic orientation) การรวมกลุ่มของอะตอม จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 0.1 วินาที) หลังจากการรวมกันของกลุ่มอะตอมพบว่าพื้นที่ ของอะตอมที่รวมกลุ่มกันบนแผ่นรองรับ (Projected area) มีขนาดน้อยลง ดังภาพประกอบ 17 แต่ความสูงของกลุ่มอะตอม มีค่ามากขึ้นดังภาพประกอบ 18

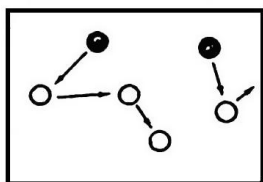
การรวมกันของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งฟิล์มเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องดังภาพประกอบ 16(h) ในบางกรณีการเชื่อมต่อของฟิล์มจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 400-500 nm ลักษณะผิวของฟิล์มโดยทั่วไปในขณะเกิดการรวมกลุ่มของอะตอมจะมีลักษณะเป็นหุบเขาและเนินเขา การเกิดฟิล์มในสภาวะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าแต่ละกลุ่ม อาจจะ เป็นผลึกเดี่ยวหรือมีจำนวนผลึกประกอบกันเพียง 2-3 ผลึก โดยถ้าเคลือบลงบนแผ่น

รองรับที่เป็นหลายผลึกทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมจะเป็นแบบสุ่ม จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็น หลายผลึกด้วย แต่ถ้าเคลือบลงบนแผ่นรองรับที่เป็นผลึกเดียว การจัดเรียงตัวของฟิล์มจะเป็นไปตามโครงสร้างของแผ่นรองรับทำให้ได้ฟิล์มที่มีลักษณะเป็นผลึกเดียว เรียกกระบวนการนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy) ในขณะที่เคลือบฟิล์มอะตอมจะมีการเคลื่อนที่เพื่อเลือกไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่า โดยความสามารถในการเคลื่อนที่จะมีมากขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิวแผ่นรองรับมีค่าสูงและพบว่าเมื่ออัตราการเคลือบลดลงช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดีขึ้น อุณหภูมิของผิวแผ่นรองรับที่สูงและอัตราการเคลือบต่ำจะทำให้ฟิล์มเคลือบมีขนาดเกรนใหญ่มีความบกพร่อง (defect) ในเกรนน้อย

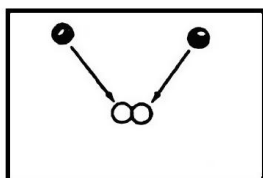
(a) Single Atom Arrives



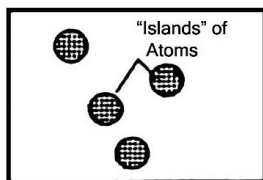
(b) Migration Re- evaporation



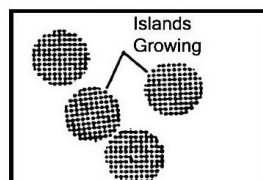
(c) Collision & Combination of Single Atoms



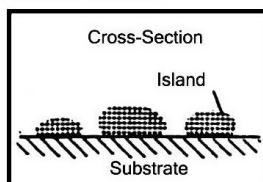
(d) Nucleation



(e) Growth



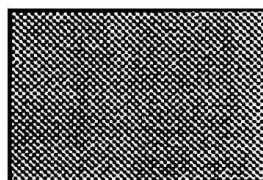
(f) Island Shape



(g) Coalescence

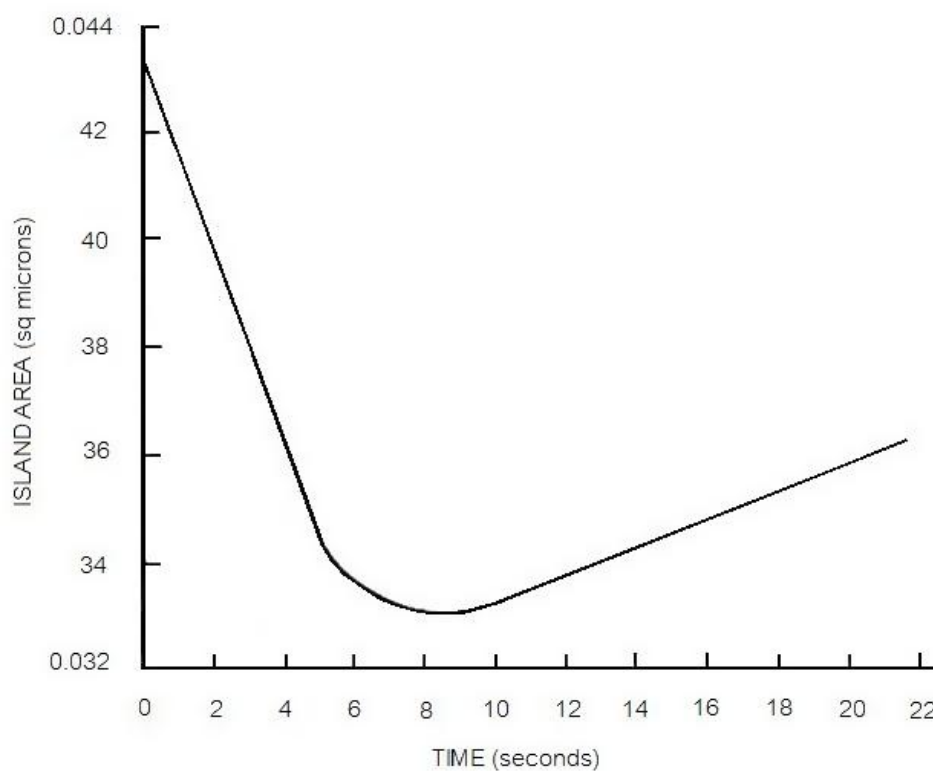


(h) Continuity



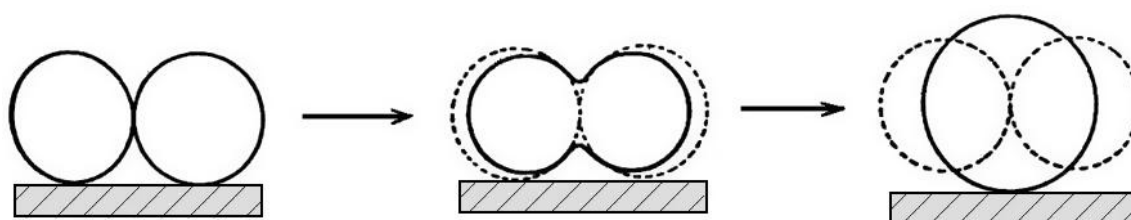
ภาพประกอบ 16 ขั้นตอนการเกิดฟิล์ม

ที่มา: สายัณห์ ผุดวัฒน์. (2547). การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นที่ให้ค่าการปลดปล่อยรังสีต่ำของ เงิน-ซิงค์ออกไซด์ โดยวิธีสปีดเทออร์. หน้า 21.



ภาพประกอบ 17 การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ขณะมีการรวมกันของกลุ่มอะตอมและหลังการรวมกันของกลุ่มอะตอม

ที่มา: กมล เอี่ยมพนากิจ. (2547). การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นที่ให้ค่าการปลดปล่อยรังสีต่ำของเงิน-ไททาเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีสเปกโตร.



ภาพประกอบ 18 รูปแบบขณะเกิดการรวมกันของกลุ่มอะตอม

ที่มา: กมล เอี่ยมพนากิจ (2547). การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นที่ให้ค่าการปลดปล่อยรังสีต่ำของเงิน-ไททาเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีสเปกโตร.

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปีดเทอริงนั้นสารเคลือบที่ตกกระทบผิวรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล และเกิดการฟอรมตัวจนพอกพูนเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น ในช่วงเวลานั้นการฟอรมตัวของฟิล์มบางจะมีปัจจัยหลายอย่าง เช่น พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบ พลังงานพันธะระหว่างอะตอมสารเคลือบ (Bonding energy) กับแผ่นรองรับและอะตอมสารเคลือบด้วยกัน อุณหภูมิของแผ่นรองรับ (Substrate temperature) และตำแหน่งของอะตอมสารเคลือบที่ตกกระทบ การเกิดและการโตของฟิล์มบาง สามารถแบ่งออกเป็นลำดับขั้นได้ดังนี้

1. อะตอมจากเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยของไอออนบวก ที่มีพลังงานสูง จะหลุดออกและเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ผ่านระบบสุญญากาศ ที่มีอนุภาคของก๊าซ และพลาสมาบรรจุอยู่
2. เมื่ออะตอมตกลงมาที่ผิวแผ่นรองรับ อะตอมที่ตกลงมาจะมีพลังงานที่ได้รับจากการถ่ายเทโมเมนตัมจากการชน ทำให้อะตอมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ ของพื้นผิว (Surface mobility) ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวแผ่นรองรับได้ เพื่อหาดำ แหน่งที่เหมาะสมกับการเกิดนิวเคลียส
3. หลังจากที้อะตอมเคลื่อนที่ไปบนผิวรองรับ อะตอมจะเกิดการรวมตัวเป็นนิวเคลียสได้หลายรูปแบบดังนี้

3.1 เกิดปฏิกิริยากับผิวแผ่นรองรับ โดยอะตอมที่ตกลงมาเกิดพันธะเคมีกับผิวแผ่นรองรับ อะตอมต่ออะตอม ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับผิวแผ่นรองรับแข็งแรง การเคลื่อนตัวของอะตอมที่ผิวหน้าจะมีค่าต่ำ ทำให้เกิดเป็นนิวเคลียสและอะตอมอื่นบนผิวจะสามารถเข้ามารวมตัวกับนิวเคลียสที่เกิดขึ้นแล้ว เพื่อลดแรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างฟิล์มเคลือบกับแผ่นรองรับ

3.2 ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับ แผ่นรองรับมีค่าต่ำ อะตอมก็มี ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิว สูง ทำให้สามารถเคลื่อนที่มารวมตัวกัน ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียส คือเป็นตำแหน่งที่สามารถสร้างพันธะได้แข็งแรงกว่า โดยตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียสนั้น ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องหรือรอยขีด ความบกพร่องของระนาบบนผิวแผ่นรองรับ อะตอมแปลกปลอมบนผิวแผ่นรองรับ บริเวณที่มีประจุบนผิวแผ่นรองรับที่เป็นฉนวน พื้นผิวที่มีความแตกต่างทางเคมีหรือเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างออกไป เป็นต้น

3.3 เกิดนิวเคลียสจากการที่อะตอมเคลื่อนที่ไปชนกับอนุภาคอื่นที่เคลื่อนที่และอยู่บนผิวแผ่นรองรับ และฟอรมตัวกันเป็นนิวเคลียสที่เสถียร เมื่ออะตอมเกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสแล้ว ถ้าทำการเคลือบต่อไปก็จะมีจำนวนนิวเคลียสต่อพื้นที่ หรือความหนาแน่นของนิวเคลียสมากขึ้น ซึ่งนิวเคลียสจะเริ่มเชื่อมต่อกันเป็นฟิล์ม และ ครอบคลุมพื้นที่ผิวทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ความหนาแน่นของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของแผ่นรองรับ หรือลักษณะการเรียงตัวของผลึกของผิวแผ่นรองรับสามารถเพิ่มความหนาแน่นของนิวเคลียสที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับได้ด้วยการเพิ่ม

อุณหภูมิเคลือบ เพิ่มอัตราการเคลือบ เปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของผิว เพิ่มการชนเพื่อเพิ่มความบกพร่องในระนาบหรือเพื่อให้ผิวแผ่นรองรับขรุขระเป็นต้น

4. กลไกการโตของนิวเคลียสแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแยกตามความแตกต่างของการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมสารเคลือบและแผ่นรองรับ

4.1 กลไกการเกิดการโตแบบขั้นต่อขั้น

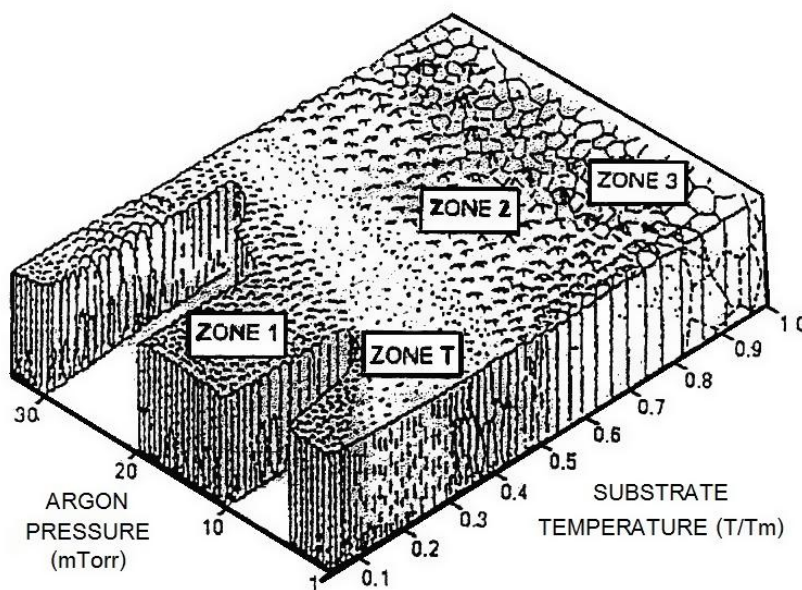
4.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ (Three Dimension Volmer-Weber) เกิดขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ของชิ้นงานกับวัสดุเคลือบแตกต่างกันและโตขึ้นทุกทิศทาง

4.3 กลไกการเกิดนิวเคลียส โดยการฟอร์มตัวกันระหว่าง ชั้นของแผ่นรองรับกับวัสดุเคลือบส่วนใหญ่มักเกิดกับการเคลือบฟิล์มโลหะบนแผ่นรองรับโลหะ ที่อุณหภูมิต่ำ ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ ของพื้นผิว ก็ต่ำด้วย ในเงื่อนไขนี้การโตของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับเทอร์โมไดนามิกกับพลังงานพื้นผิว ของผิวงานนั้น พิจารณาการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ พบว่าเมื่อเกิดการสะสมของอะตอมที่แพร่ไปบนผิวแผ่นรองรับ และเริ่มเกาะตัวกันเป็นนิวเคลียส การโตของนิวเคลียสใน แนวอนจะมีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีกับผิว ที่เรียกว่า การเติบโตแบบเวทติง (Wetting growth) เช่น ทองบนคาร์บอน อลูมินา ซิลิกอนออกไซด์และโพลิเมอร์ การโตและการรวมตัวกันของนิวเคลียสสามารถลดช่องว่างระหว่างรอยต่อหรือความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างที่รอยต่อของแผ่นรองรับได้ เพราะเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีระหว่างนิวเคลียสและวัสดุที่เป็นแผ่นรองรับ

กรณีที่มีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีเล็กน้อยระหว่างแผ่นรองรับกับ นิวเคลียส จะเกิดการโตอีกแบบต่างหากที่เรียกว่า ลำดับขั้นการโตของเกรนแบบ การเกาะ ตัว-ช่องแคบ -ต่อเนื่อง (Island-Channel-Continuous Film) ก่อนจะรวมตัวกัน นิวเคลียสจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว คือสามารถหมุนและจัดเรียงโครงผลึกได้เอง การเกาะตัวกันเป็นกลุ่มของนิวเคลียส เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิของนิวเคลียสมีค่า สูงพอที่จะเกิดการแพร่ของอะตอม และการจัดเรียงตัว เป็นนิวเคลียสแบบบอลอัพ (Ball Up) ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุด ถ้ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง อะตอมเคลือบกับผิวแผ่นรองรับสูง จะมีอัตราการแพร่ต่ำหรือเกิดการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบ ที่แผ่นรองรับ โดย โครงสร้างของ ฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของ อุณหภูมิเคลือบ ต่ออุณหภูมิหลอมเหลว (T/T_m) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ ดังประกอบ 19

บริเวณ 1 (Zone1)

เป็นการเคลือบที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันก๊าซขณะเคลือบ มีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจายและเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยาวแหลมแบบเล็กเรียวยาว (Tapers crystallites) จากนิวเคลียส



ภาพประกอบ 19 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่างๆ

ที่มา: Bunshah, R.F; et al. (1982). *Deposition Technologies for Films and Coatings*. p 213.

ที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำ มีช่องว่างขนาดความกว้างในระดับร้อยละ สิบสองถึง 30 ที่ T/T_m เท่ากับ 0 - 0.1 ที่ความดัน 1 mTorr ถ้าความดันก๊าซสูง บริเวณนี้จะขยายกว้างสู่ บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า T/T_m เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูง ความหนาแน่นของก๊าซใน ภาชนะสุญญากาศ มีมากขึ้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้ อนุภาคของผิวเคลือบตกลงมาได้บ่อยและขณะที่ตกอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่นทำให้อนุภาคที่ตกลงมา มี ขนาดใหญ่และมีเวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์มตัวเป็นนิวเคลียส จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรน มีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ผิวเคลือบที่ขรุขระมักจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดย อุณหภูมิที่มีผลต่อการโตของฟิล์มมักจะมาจากการระดมยิงของไอออน (ion bombardment) เป็นส่วนใหญ่

บริเวณ T (Zone T)

เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอริงโดยที่ T/T_m อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr เกิดอยู่ในช่วงระหว่างบริเวณ 1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บน ผิวแผ่นรองรับจะมีปริมาณมากขึ้น และได้รับพลังงานการชน อุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเพิ่มขึ้น ค่า ความสามารถในการเคลื่อนที่ของผิวหน้าก็เพิ่มขึ้นและโครงสร้างในบริเวณ 1 ก็จะเข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะ เริ่มมีเกรนยาว (Fibrous grain) เต็มพื้นที่และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นมาก จึงมีการแพร่ของ

อะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แ ซึ่งแรงนั้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จนกลายเป็น คอลัมน์นาร์ (Columnar) ต่อไป โดยปราศจากช่องว่างบริเวณที่ขอบ

บริเวณ 2 (Zone 2)

ที่บริเวณ 2 จะมีค่า T/T_m อยู่ระหว่าง 0.5 - 0.8 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็นโครงสร้าง คอลัมน์นาร์ ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม (มีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิว ของอะตอม) และขนาดของคอลัมน์นาร์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบคอลัมน์นาร์

บริเวณ 3 (zone 3)

บริเวณนี้อุณหภูมิสูงสุด T/T_m อยู่ระหว่าง 0.8 - 1.0 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr การแพร่จะมีค่าสูง และส่งผลต่อโครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมด ขนาดของคอลัมน์นาร์จะมีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจจะทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องมาจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored strain energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบเกรนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจากคอลัมน์นาร์เป็นผลึกเดี่ยว

6. ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

ฟิล์มที่เตรียมได้จากการทดลองจะนำมาวัดสมบัติต่างๆดังนี้

6.1 สมบัติทางไฟฟ้า (Robert, M.R. 1966)

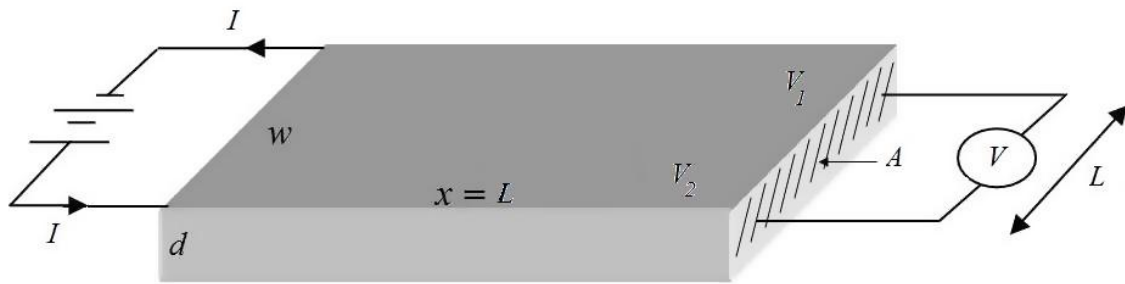
สมบัติทางไฟฟ้าที่วัดประกอบด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะซึ่งหาได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

6.1.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำที่เป็นของแข็งที่มีความต่างของศักย์ไฟฟ้า โดยปรกติความหนาแน่นกระแส J เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า E ;

$$J = \frac{E}{\rho} = \sigma E \quad (2.3)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า และ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า สมการ (2.3) เป็นสมการที่แสดงกฎของโอห์ม ในภาพประกอบ 20 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยที่มีกระแส I ผ่านแท่งตัวนำที่มี



ภาพประกอบ 20 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A

ที่มา: Robert, M.R. (1966). *The Structure and Properties of Materials*.

ภาคตัดขวางคงที่ A และความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า ($V_2 - V_1$) ซึ่งถูกวัดระหว่าง 2 จุด ความหนาแน่นกระแส J ในแท่งตัวนำเท่ากับ I/A และสนามไฟฟ้าเป็น $\frac{(V_2 - V_1)}{L}$ และ

$$J = \frac{I}{A} = \frac{\sigma (V_2 - V_1)}{L} \quad (2.4)$$

กฎของโอห์มโดยทั่วไปเขียนสมการนำไฟฟ้าได้เป็น

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{(I/A)}{(V_2 - V_1)/L} \quad (2.5)$$

เมื่อ $(V_2 - V_1) = IR$ เขียนสมการ (2.5) ได้เป็น

$$\sigma = \frac{(I/A)}{IR/L} \quad (2.6)$$

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (2.7)$$

สมการความต้านทานไฟฟ้าของแท่งตัวนำยาว L ในภาพประกอบ 20 คือ

$$R = \frac{L}{\sigma A} = \frac{\rho L}{A} \quad (2.8)$$

เมื่อพื้นที่ภาคตัดขวาง A มีค่าเท่ากับ wd และ $\rho = 1/\sigma$ จากสมการ (2.8) จึงเขียนสมการใหม่ได้เป็น (Streetman, Ben G. 1995: 85)

$$R = \frac{\rho L}{wd} = \frac{L}{wd} \frac{1}{\sigma} \quad (2.9)$$

เมื่อ R คือความต้านทานไฟฟ้า, L คือความยาว, w คือความกว้าง และ d คือความหนา

ความต้านทานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัสดุและสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุชนิดเดียวกัน จะมีค่าเท่ากัน ความต้านทาน ไฟฟ้ามี หน่วย เป็นโอห์ม (Ω) สภาพต้านทานไฟฟ้า มีหน่วย เป็นโอห์ม เซนติเมตร (Ωcm) และสภาพนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นต่อโอห์มเซนติเมตร

6.1.2 ความคล่องตัวของพาหะ (Mobility ; μ)

ความคล่องตัวของพาหะ (Mobility ; μ) เป็นอัตราส่วนของความเร็วลอยเลื่อน(Drift velocity) กับสนามไฟฟ้า E ;

$$\mu = \frac{V_{drift}}{E} \quad (2.10)$$

โดยความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนแทนด้วย μ_e และความคล่องตัวของโฮลแทนด้วย μ_h สำหรับอิเล็กตรอนที่ไหลในสนามไฟฟ้า E สามารถหาสภาพนำไฟฟ้าได้จากสมการ 2.11

$$\sigma_e = n_e e \mu_e \quad (2.11)$$

เมื่อ n_e คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลนำกระแสไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้าเขียนได้เป็น

$$\sigma = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h \quad (2.12)$$

เมื่อ n_h เป็นปริมาณความหนาแน่นของโฮล

6.1.3 ความหนาแน่นของพาหะ (Carrier concentration ; n)

ความหนาแน่นของพาหะ (Carrier concentration ; n) ในสารกึ่งตัวนำ บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิคงที่ภายใต้สภาวะสมดุล (แม้น อมรสิทธิ์; และ สมชัย อัครทิวา. 2546: 144-145) ผลคูณของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระกับโฮล มีค่าดังนี้

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (2.13)$$

เมื่อ n_i คือความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

ในสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) พาหะที่มีความหนาแน่นมาก จะเป็นพาหะหลัก (Majority carriers) และพาหะที่มีความหนาแน่นน้อยจะเป็นพาหะรอง (Minority carriers) ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวทำชนิดเอ็น (n) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ n_n และความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวทำชนิดเอ็น (n) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ p_n ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวทำชนิดพี (p) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ p_p และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวทำชนิดพี (p) จะแทนด้วย สัญลักษณ์ n_p

จากความจริงที่ว่า โครงสร้างผลึกจะต้องมีประจุเป็นกลาง ดังนั้น ผลรวมของความ หนาแน่นของประจุทั้งหมดในหนึ่งหน่วยปริมาตรจะต้องเท่ากับ ศูนย์ สำหรับสารกึ่งตัวนำไม่ บริสุทธิ์นั้นจะมีประจุ

อยู่ 2 ชนิด คือ ไอออนที่ไม่เคลื่อนที่ และพาหะนำประจุที่เคลื่อนที่ ไอออนที่ไม่เคลื่อนที่ได้แก่ อะตอมของสารเจือปนที่เป็นอะตอมตัวให้อิเล็กตรอน (Donor) และตัวรับ (Acceptor) (ธาตุในหมู่ที่ 3A หรือ 5A)

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำต้องมีประจุเป็นกลาง ดังนั้นผลรวมของความหนาแน่นของประจุลบจะต้องเท่ากับผลรวมของความหนาแน่นของประจุบวก ดังสมการ

$$N_a + n = N_d + p \quad (2.14)$$

เมื่อ N_a คือ ความหนาแน่นของตัวรับ (Acceptor)

N_d คือ ความหนาแน่นของตัวให้ (Donor)

n คือ จำนวนอิเล็กตรอน

p คือ จำนวนโฮล

สำหรับสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (n) นั้น เนื่องจากไม่มีไอออนตัวรับ (Acceptor ions) ที่มีประจุลบ ดังนั้น N_a จะเท่ากับศูนย์ และจำนวนอิเล็กตรอนจะมากกว่าจำนวนโฮลมาก ($n \gg p$) ดังนั้นสมการ (2.14) จึงอาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$n_n \cong N_d \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.15) จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ในสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (n) อาจประมาณได้เท่ากับ ความหนาแน่นของอะตอมของตัวให้ (Donor) ที่เจือเข้าไป ส่วนความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (n) อาจประมาณได้จากสมการ (2.13) ดังนี้

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \quad (2.16)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดพี (p) ความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวนำ อาจประมาณได้เท่ากับ ความหนาแน่นของอะตอมของตัวรับ (Acceptor) ที่เจือเข้าไป

$$p_p \cong N_a \quad (2.17)$$

และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนประมาณได้จากสมการ

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_a} \quad (2.18)$$

6.1.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ และความคล่องตัวของพาหะด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว (Van der pauw method) และวิธีการวัดฮอลล์ (Hall effect measurement)

6.1.4.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ใช้กับตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางโดยมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลมและมีความหนาสม่ำเสมอโดยการวางขั้วสัมผัสให้อยู่บนขอบของชิ้นงานตัวอย่างความถูกต้องแม่นยำขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่อไปนี้ (เกษรรัตน์ อักษรรัตน์. 2545: 24-26)

- 1) ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารตัวอย่าง
- 2) จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง
- 3) ตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
- 4) เนื้อสารจะต้องสม่ำเสมอไม่มีรูหรือรอยแตกใดๆ

การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่างจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้

จากภาพประกอบ 21 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{12} ผ่านเข้าทางจุด 1 ออกทางจุด 2 จะสามารถวัดความต่างศักย์ $V_{34} = V_3 - V_4$ ได้ ซึ่งนิยามได้ว่า

$$R_{12,34} = \frac{(V_3 - V_4)}{I_{12}} \quad (2.19)$$

และถ้าเปลี่ยนกระแสเข้าทางจุด 2 และออกจุด 3 และวัดความต่างศักย์ $V_{41} = V_4 - V_1$ จะได้

$$R_{23,41} = \frac{(V_4 - V_1)}{I_{23}} \quad (2.20)$$

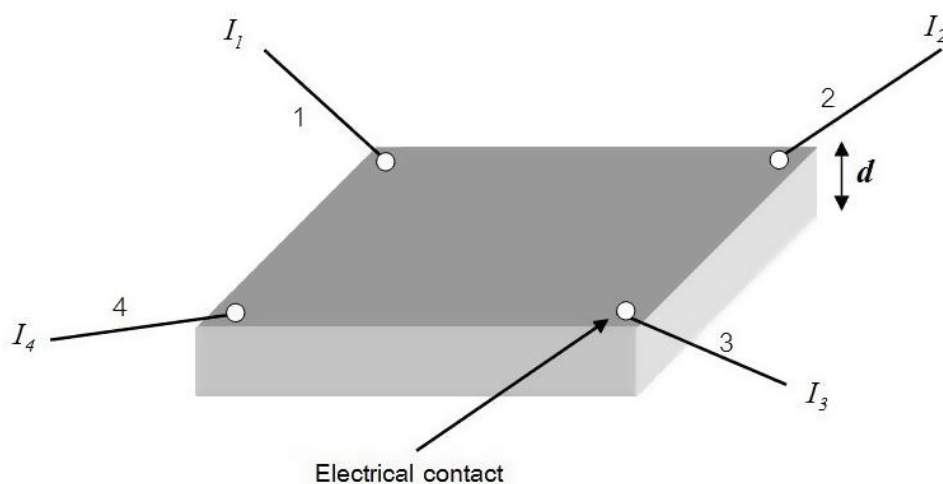
ดังนั้นสามารถหาสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (Blood, P; & Orton, J.W. 1992)

$$\exp\left[-\frac{\pi R_{12,34}}{\rho}\right] + \exp\left[-\frac{\pi R_{23,41}}{\rho}\right] = 1 \quad (2.21)$$

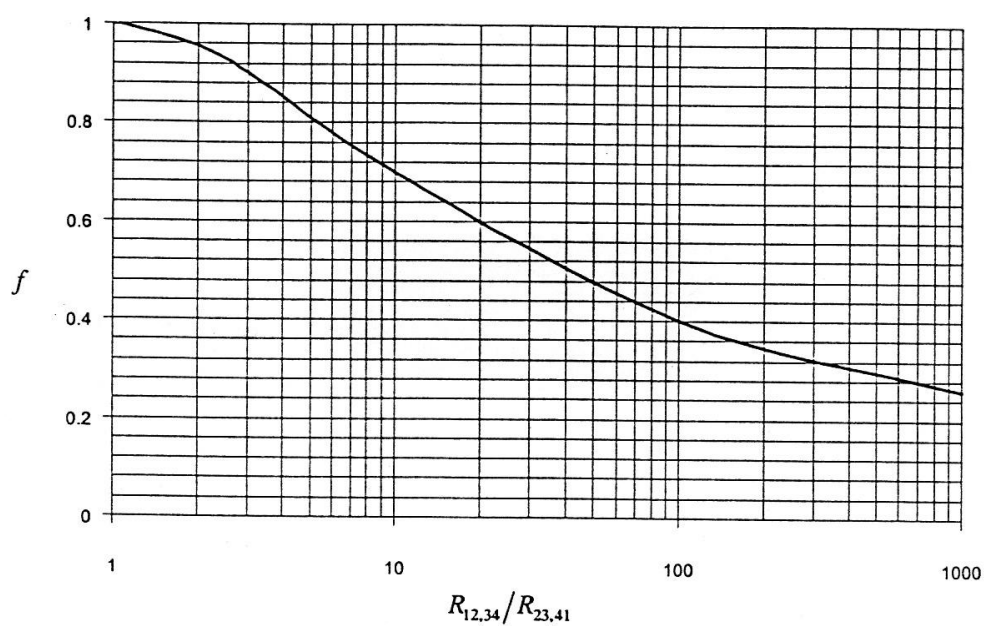
จากความรู้เรื่องคอนฟอร์มัลแมปปิง (Conformal mapping) ของสนามไฟฟ้าในสองมิติ แวนเดอร์พาวได้พิสูจน์ว่าสมการที่ (2.21) ยังคงเป็นจริงสำหรับแผ่นสารรูปร่างใดๆ และหากทราบ $d, R_{12,34}$ และ $R_{23,41}$ สมการที่ (2.21) จะลดรูปเป็น

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left[\frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \right] f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right) \quad (2.22)$$

เมื่อ d คือความหนาของชิ้นสารตัวอย่างและ f คือค่าปรับแก้ (Correction factor) ขึ้นกับอัตราส่วนของ $\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$ ดังแสดงในภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 21 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสของขั้วของชิ้นสารตัวอย่าง



ภาพประกอบ 22 ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ f และ $\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$

ที่มา: Blood, P.; & Orton, J.W. (1992). *The Electrical Charecterization of Semiconductor: Majority Carriers and Electron States*.

ความหนาแน่นของพาหะและความคล่องตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นปริมาณสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของพาหะและสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยจะเห็นได้จากสมการ 2.12 ที่สภาวะนำไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับปริมาณทั้งสองนี้โดยตรง

6.1.4.2 การวัดความหนาแน่นพาหะและความคล่องตัวพาหะด้วยวิธีการวัดฮอลล์ (Hall effect measurement)

ในปี ค.ศ.1874 ฮอลล์พบว่าหากนำสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสในตัวนำแล้วจะเกิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็กภายในตัวนำนั้นซึ่งมีผลมาจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ที่ทำให้ทิศทางการไหลของพาหะเบี่ยงเบนไปทำให้ไปกองอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของแท่งตัวนำจนเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นมาได้

การวัดความหนาแน่นของพาหะและความคล่องตัวของพาหะ (Ben G. Streetman. 1995: 67) สามารถกระทำได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์แสดงดังภาพประกอบ 23 พิจารณาจากสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดพี สนามแม่เหล็กที่ให้ตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของโฮลโดยแรงรวมของ 1 โฮลมีค่าเท่ากับผลรวมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังสมการ

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.23)$$

แรงในทิศแกน y คือ

$$F_y = q(E_y - v_x B_z) \quad (2.24)$$

เมื่อใส่สนามไฟฟ้า E_x ในแนวแกน x มีกระแสไฟฟ้าไหลในแนวแกน x และมีสนามแม่เหล็กความเข้ม B_z ในแนวแกน Z ดังภาพประกอบ 23 จะเกิดแรงลอเรนซ์ขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ $qv_x B_z$ มีทิศในแกน $-y$ กระทำบนโฮลแล้วทำให้โฮลวิ่งลงมารวมกันอยู่ข้างล่างเกิดสนามไฟฟ้า E_y ในแนวแกน $+y$ เมื่อเกิดความสมดุลจะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน y คือ แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า E_y จะเท่ากับแรงลอเรนซ์ $qv_x B_z$ ดังสมการ

$$qE_y = qv_x B_z \quad (2.25)$$

จะได้

$$E_y = v_x B_z \quad (2.26)$$

โดยกำหนดให้ $+q$ และ p_0 ใช้สำหรับโฮล จะได้ค่าสนามไฟฟ้าในทิศแกน y ดังสมการ

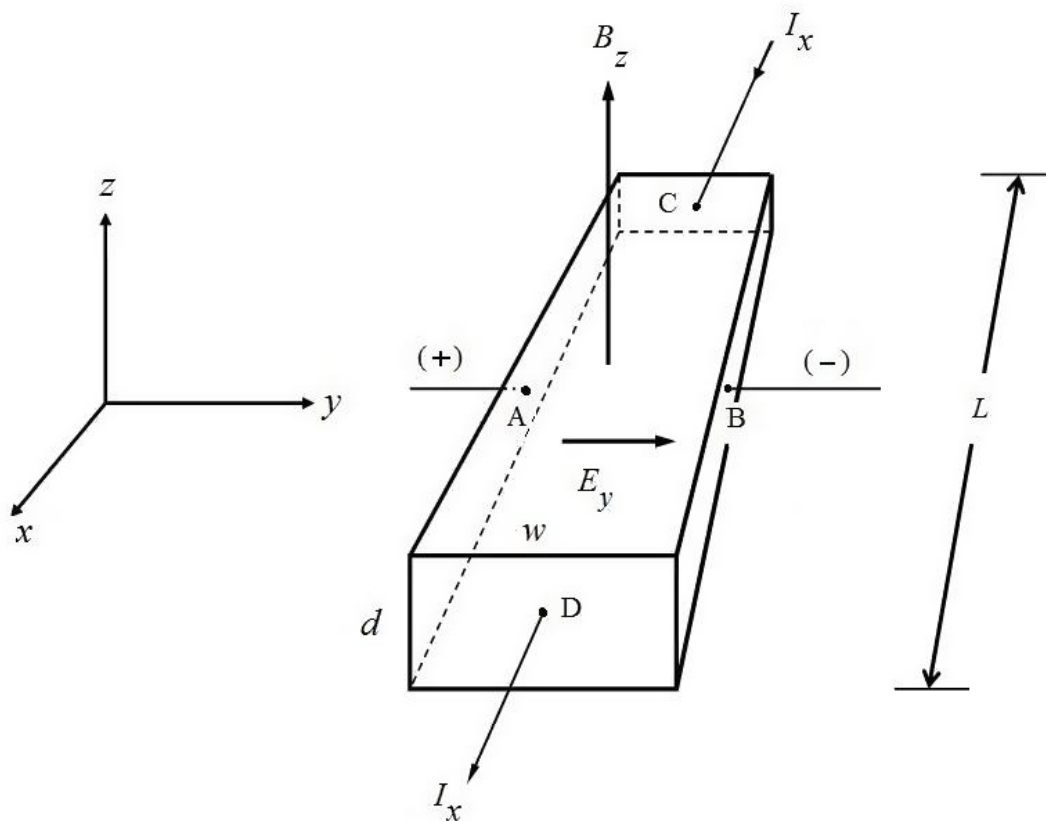
$$E_y = \frac{J_x}{qp_0} B_z = R_H J_x B_z, \quad R_H \equiv \frac{1}{qp_0} \quad (2.27)$$

เมื่อ J_x คือความหนาแน่นของกระแส

R_H คือสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

สนามของฮอลล์ (Hall field) นั้นเป็นส่วนหนึ่งของผลคูณของความหนาแน่นกระแสและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อทราบค่ากระแสและสนามแม่เหล็กที่ให้เข้าไป สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage) ได้ และสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของโฮล (p_0) ดังสมการ (2.28)

$$p_0 = \frac{1}{qR_H} = \frac{J_x B_z}{q\vec{E}_y} = \frac{(I_x / wd) B_z}{q(V_{AB} / w)} = \frac{I_x B_z}{qdv_{AB}} \quad (2.28)$$



ภาพประกอบ 23 การวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์

ที่มา: Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 89.

เมื่อทำการวัดความต้านทาน (R) จะสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้จากสมการ

$$\rho(\Omega\text{cm}) = \frac{Rwd}{L} = \frac{V_{CD} / I_x}{L / wd} \quad (2.29)$$

โดยสภาพนำไฟฟ้า (σ) มีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q\mu_p p_0 \quad (2.30)$$

เมื่อ μ_p เป็นความคล่องตัวของพาหะโฮล

ค่าความคล่องตัวของพาหะโฮลคืออัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และสภาพนำไฟฟ้า ดังสมการ

$$\mu_p = \frac{\sigma}{qp_0} = \frac{1/\rho}{q(1/qR_H)} = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.31)$$

6.2 สมบัติทางแสง

6.2.1 สมบัติการดูดกลืนแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่หนึ่ง ซึ่งสามารถมีปฏิกิริยากับสสารได้และสามารถใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) อธิบายปรากฏการณ์ทางแสงต่างๆที่เกิดขึ้นในเนื้อสารได้ (เกษรรัตน์ อักษรรัตน์. 2545: 34-36) จากทฤษฎีนี้ทำให้สามารถอธิบายสมบัติเชิงแสงของตัวกลาง ซึ่งเป็นตัวบอกถึงการหน่วง การยืดยอม หรือการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้ามาในเนื้อสารนั้น สมบัตินี้เรียกว่าดัชนีหักเห (Reflective index) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ซึ่งถ้ารู้สมบัติอย่างหนึ่งจะรู้สมบัติอีกอย่างหนึ่งได้

สสารสามารถดูดกลืนแสงได้ นิยามค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในระดับมหภาค (Macroscopic) คือสัดส่วนของความเข้มแสงที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของตัวกลางดังสมการ

$$\alpha = \frac{-dI/I}{dx} \quad (2.32)$$

โดยที่ I คือความเข้มแสงที่ระยะทาง x ใดๆ ในตัวกลาง

เนื่องจากความเข้มแสงเป็นปริมาณโดยตรงกับกำลังสองของศักย์เวกเตอร์ A ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสง α จะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์เอ็กซิงคิชั่น (Extinction coefficient : K) ดังสมการ

$$\alpha = \frac{4\pi K}{\lambda} \quad (2.33)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นแสง

เมื่อนำแสงเข้าในตัวกลางใดๆ ความเข้มแสงจะลดลงเมื่อแสงเดินทางลึกเข้าไปในเนื้อสาร เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางแล้วย้ายสถานะพลังงานไปอยู่ในระดับที่สูงขึ้นไป ลักษณะการดูดกลืนแสงของตัวกลางแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง

จากทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็งการดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำเมื่อพลังงานของแสงเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานพอดี ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (Fundamental absorption edge) นิยามโดยพลังงานที่น้อยที่สุดของแสงที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบการนำ การดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับโอกาสในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถแบ่งการย้ายสถานะของการย้ายอิเล็กตรอนได้ 2 แบบ ได้แก่ การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนย้ายสถานะในแถบพลังงานเดียวกัน (Intraband transition) และการดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนย้ายสถานะไปยังแถบพลังงานอื่น (Band-to-Band transition) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนย้ายสถานะในแถบพลังงานเดียวกัน (Intraband Transition)

ปกติในแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มแล้ว จะเกิดการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนเพิ่มอีกไม่ได้ แต่สำหรับแถบพลังงานที่ยังมีสถานะพลังงานที่ว่างอยู่ เช่น ในแถบนำ จะสามารถเกิดการย้ายสถานะได้ โดยอิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานแสงแล้วย้ายไปอยู่ ที่ระดับสถานะพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดได้หลายกรณี เช่น การดูดกลืนแสง ของอิเล็กตรอนอิสระ (Free-carrier absorption) เป็นต้น

2. การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนย้ายสถานะไปยังแถบพลังงานอื่น (Band-to-Band Transition)

การดูดกลืนแสงในกรณีนี้มีได้หลายลักษณะ ในที่นี้จะกล่าวถึงกรณีสำคัญและสามารถสังเกตได้เด่นชัด ได้แก่ การดูดกลืนแสงพื้นฐาน เมื่ออิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ข้ามช่องว่างแถบพลังงานไปยังแถบนำ เรียกว่า การดูดกลืนแสงหลัก พลังงานของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนในกรณีนี้จะเท่ากับค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยประมาณ ซึ่งสามารถแบ่งการดูดกลืนนี้ออกเป็น 2 แบบ ขึ้นกับลักษณะของการย้ายสถานะ และโครงสร้างแถบพลังงานของสาร ได้แก่ การย้ายสถานะแบบตรง (Direct transition) และการย้ายสถานะแบบไม่ตรง (Indirect transition) ดังภาพประกอบ 24 ในการทดลองวัดการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ สามารถพบการดูดกลืนแสงทั้งสองลักษณะ ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ

การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง เป็นการย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ โดยมีค่า $\vec{k}$ (Wave vector) เดียวกัน ปรากฏเด่นชัดในสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง โดยการใช้แบบจำลองโครงสร้างแถบพลังงานที่เป็นแบบพาราโบลาอย่างง่าย (Simple parabolic band) โดยสามารถหาความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงในกรณีนี้ได้

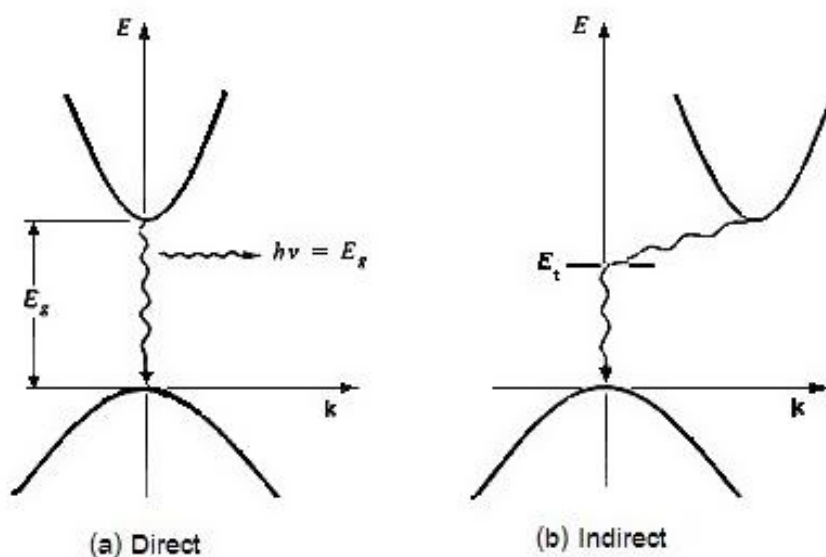
$$\alpha_d h\nu = \begin{cases} A(h\nu - E_g)^{1/2}, & h\nu > E_g \\ 0, & h\nu < E_g \end{cases} \quad (2.34)$$

เมื่อ ν คือ ความถี่ของแสง

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)

A คือ ค่าคงที่

E_g คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน



ภาพประกอบ 24 ลักษณะของการย้ายสถานะพลังงานของสาร (a) การย้ายสถานะแบบตรง (Direct transition) และ (b) การย้ายสถานะแบบไม่ตรง (Indirect transition)

ที่มา: Ben G. Streetman. (1995). *Solid State Electronic Devices*. p 57.

สำหรับการย้ายสถานะพลังงานแบบยอมรับได้ (Allowed transition) ความสัมพันธ์นี้จะใช้ได้ ที่บริเวณใกล้ๆกับขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (Fundamental absorption edge) เท่านั้น

การย้ายสถานะพลังงานแบบไม่ตรง เป็นการย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ โดยมีค่า $\vec{k}$ เปลี่ยนไป ซึ่งการย้ายสถานะแบบนี้เกิดจากการช่วยเหลือของโฟนอน (Phonon assisted) ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความถี่ของแสงในกรณีนี้ได้

$$\alpha_1 h\nu = \begin{cases} B(h\nu - E_g)^2, & h\nu > E_g \\ 0, & h\nu < E_g \end{cases} \quad (2.35)$$

เมื่อ B คือค่าคงที่

6.2.2 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ สามารถนำมาหาขนาดและประเภทของว่างแถบพลังงานได้(เกษรรัตน์ อักษรรัตน์. 2545: 36-37) เมื่อมีพลังงานโฟตอนตกกระทบบนสารตัวอย่าง แสดงดังภาพประกอบ 25

ถ้าให้ความเข้มแสงตกกระทบเป็น I_0 ความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาเป็น I_r และความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านเป็น I_t จะได้ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงดังกล่าว ในรูปของการสะท้อน (Reflection : R) และการส่งผ่าน (Transmission : T) ดังนี้

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.36)$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-(\alpha d)}}{1 + R^2 e^{(-2\alpha d)}} \quad (2.37)$$

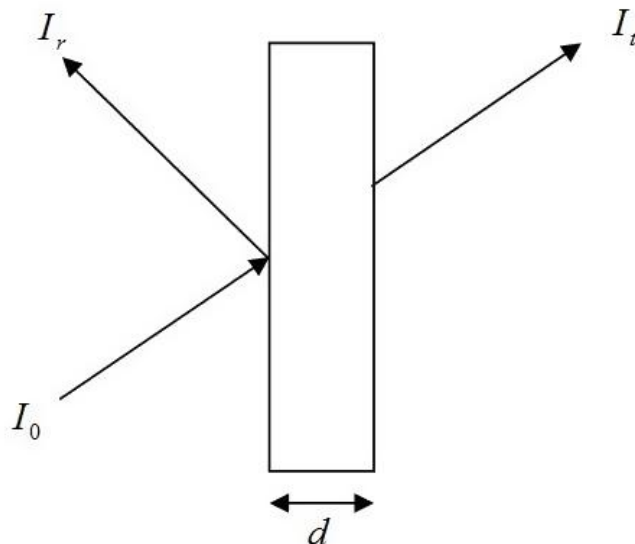
เมื่อ d คือ ความหนาของฟิล์ม ในกรณีที่ชั้นสารมีความหนาเหมาะสมที่ทำให้ $R^2 e^{(-2\alpha d)} \ll 1$ สมการที่ (2.37) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{I_t}{I_0} = (1-R)^2 e^{(-\alpha d)} \quad (2.38)$$

โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนไปน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานโฟตอนที่มาตกกระทบ ดังนั้นเทอม $(1-R)^2$ ประมาณว่าเป็นค่าคงที่ ดังนั้นสามารถคำนวณค่า α ได้ดังสมการ

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{I_0}{I_t} \right] + A \quad (2.39)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่



ภาพประกอบ 25 แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

ที่มา: Abeles, F. (1972). *Optical Properties of Solids*.

ถ้ากำหนดความเข้มเป็น I_0 เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างกำหนดความเข้มแสงที่วัดได้เป็น

$$I_t = I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.40)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorbion coefficient)

ดังนั้นจะได้ค่าการส่งผ่านแสง (Transmission : T)

$$T = I_t / I_0 = e^{-\alpha d} \quad (2.41)$$

จะได้

$$\alpha = (-\ln T) / d \quad (2.42)$$

จากสเปกตรัมของการส่งผ่านแสงจึงสามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ของฟิล์มได้ สำหรับ Interband transition ของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (Direct band gap)

$$\alpha = \frac{(h\nu - E_g)^{1/2}}{h\nu} \quad (2.43)$$

$$(\alpha h\nu)^2 = (h\nu - E_g) \quad (2.44)$$

จะเห็นได้ว่า $(\alpha h\nu)^2 \propto (h\nu - E_g)$ จึงสามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ได้โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานของโฟตอน ($h\nu$) และประมาณค่า ช่องว่างแถบพลังงาน โดยการลากเส้นตรงตัดพลังงานโฟตอน แสดงดังภาพประกอบ 26

6.2.3 สมบัติเฮซ (Haze properties)

สมบัติเฮซ คือลักษณะขุ่นมัวของฟิล์มบางใสอันเนื่องจากการกระเจิงของแสงจาก พื้นผิวภายในและภายนอก (Ian J. McColm. 1994: 155) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของการกระเจิงจากการสะท้อนต่อการสะท้อนรวมทั้งหมด หรืออัตราส่วนระหว่างการกระเจิงจากการส่งผ่านแสงต่อการส่งผ่านแสงรวมทั้งหมด (N. Senoussaoui; et al. 2000: 52) ดังสมการ (2.45)

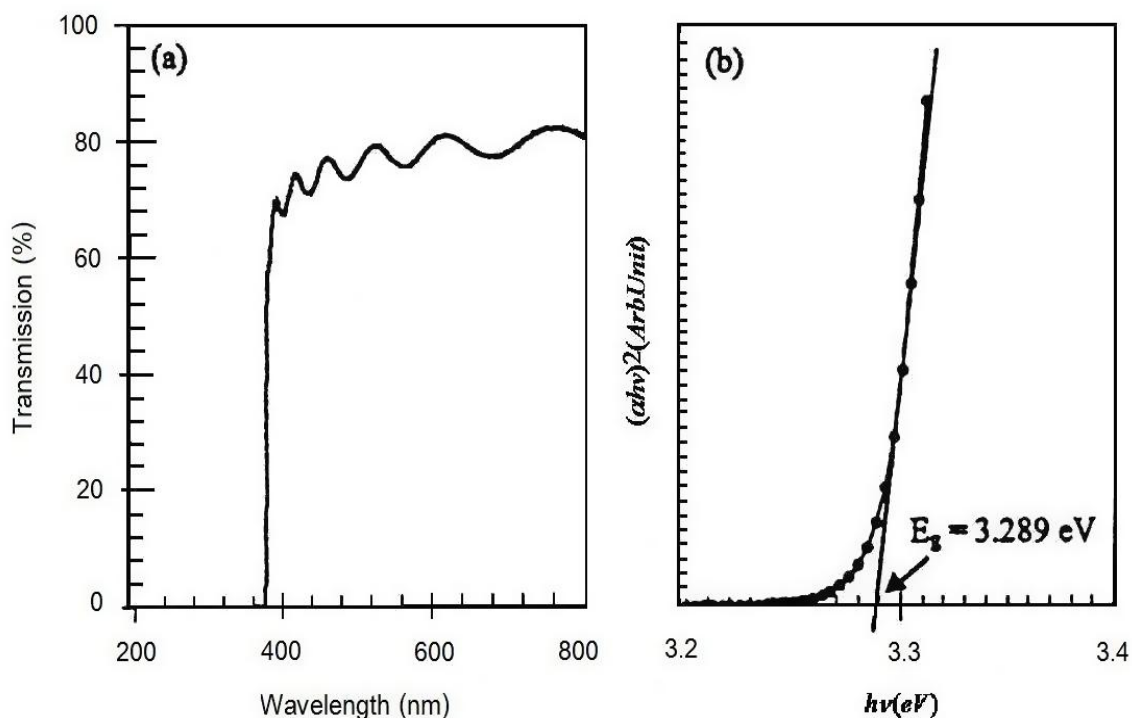
$$H_R = \frac{R_{diff}}{R_{total}}$$

หรือ

$$H_T = \frac{T_{diff}}{T_{total}} \quad (2.45)$$

เมื่อ H_R คือ ค่าเฮซจากการสะท้อนแสง (Reflection) ได้จากอัตราส่วนระหว่างการกระเจิงจากการสะท้อน (R_{diff}) ส่วนการสะท้อนรวมทั้งหมด (R_{total})

H_T คือ ค่าเฮซจากการส่งผ่านแสง (Transmission) ได้จากอัตราส่วนระหว่างการกระเจิงจากการส่งผ่านแสง (T_{diff}) ส่วนการส่งผ่านแสงรวมทั้งหมด (T_{total})



ภาพประกอบ 26 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO

(a) สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO

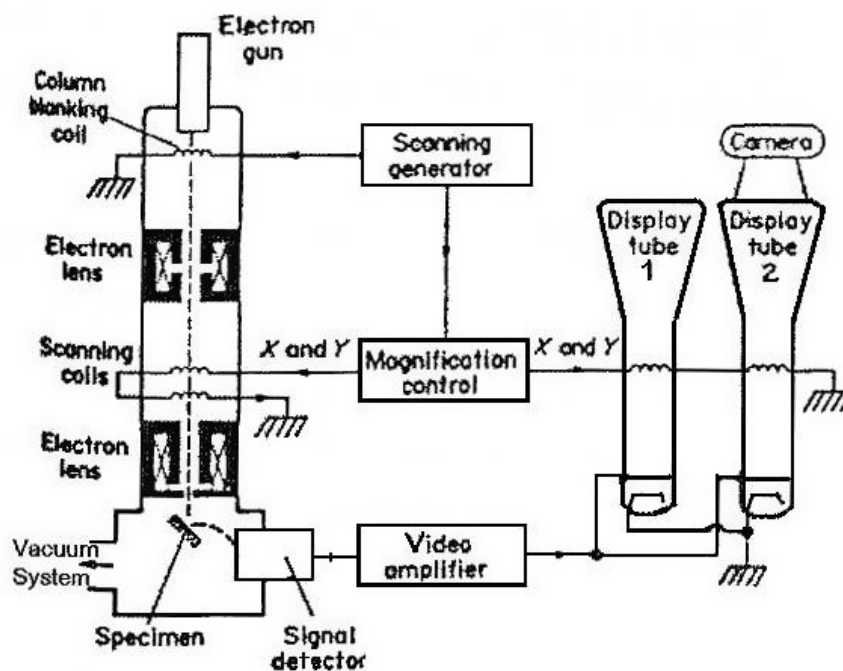
(b) กราฟความสัมพันธ์ของ $(\alpha h\nu)^2$ และ $(h\nu)$ ซึ่งจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานจากส่วนตัดแกนของพลังงานโฟตอนโดยการประมาณค่า

ที่มา: Johnson, E.J. (1967). *Semiconductor and Semimetal*.

6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope : SEM)

โครงสร้างจุลภาคของสารกึ่งตัวนำมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมและสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา (Morphology) หรือโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เช่นลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของเกรน คือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) (อ้อมตะวัน แสงจักรวาล. 2552: 32-34) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่มีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่าจนถึงมากกว่า 100,000 เท่า โดยการแจกแจงรายละเอียดของภาพมีความเป็นไปได้ถึงประมาณ 3 nm จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของสารตัวอย่าง



ภาพประกอบ 27 ส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM

ที่มา: Lifshin, Eric. (1993). *Concise Encyclopedia of Materials Characterization*. p 423.

หลักการทำงานของกล้อง ภาพประกอบ 27 ใช้ลำอิเล็กตรอนสแกนลงบนตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศโดยลำอิเล็กตรอนนี้เกิดขึ้นจากการกระทำให้คาโทดทั้งสแตนร้อนจนสามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุด ออกมา จากนั้นอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูงและถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่เล็ก ซึ่งลำอิเล็กตรอนนี้เราเรียกว่าอิเล็กตรอนปฐมภูมิ อิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะไปตกกระทบที่บริเวณพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง โดยทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างหลุดออกจากวงโคจร และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้ว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยสามารถ ศึกษาลักษณะของพื้นผิวดตัวอย่างได้จากการใช้หัววัดสัญญาณ (Detector) รับอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้และนำไปประมวลผลต่อไป

วิธีการวิเคราะห์ด้วย SEM กรณีวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า จะมีประจุลบอันเนื่องมาจากการสะสมอิเล็กตรอนบนพื้นผิวหน้าและไม่สามารถระบายออกไปได้ทำให้เกิดประจุลบสะสมอยู่บนพื้นผิวหน้าประจุเหล่านี้จะทำให้เกิดแรงผลักต่อ อิเล็กตรอน จากลำอิเล็กตรอน ที่กวาดไปบนพื้นผิวทำให้ความชัดของภาพลดลง อัตราการขยายภาพหาได้จากอัตราส่วนของภาพบนจอมอนิเตอร์ต่อความยาวของส่วนที่ถูกสแกน อาจมีค่าสูงถึงแสนเท่าสำหรับความคมชัด (Resolution) ของภาพจะถูกจำกัดโดยขนาด ของ

ลำอิเล็กตรอนที่ต้องโฟกัสให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งขนาดของลำ อิเล็กตรอนก็จะถูกกำหนดโดยการแผ่กระจายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยด้วยความร้อนซึ่งจะถูกจำกัดให้มีค่า ประมาณ 8 nm ในกรณีที่ต้องการให้มีความคมชัดที่ดีควรลดกระแสของอิเล็กตรอนลงและความลึกของสนาม(Depth field) ควรมีค่าประมาณ 1 μm การเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างให้แก่เครื่องมือ SEM จะทำให้สามารถได้รับข้อมูลรายละเอียดเพิ่มขึ้นและหนึ่งในจำนวนเครื่องมือที่มีประโยชน์ก็คือเครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy หรือ EDS) โดยเมื่อลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงตกกระทบกับอะตอมของสารตัวอย่าง จะทำให้ อิเล็กตรอน ที่อยู่ชั้นใน หลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกจะมาแทนที่โดยการปล่อยรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นแสงสีเดียว (คลื่นความถี่เดียว) คลื่นที่ปล่อยออกมาจะแสดงลักษณะเฉพาะของธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างดังนั้นเครื่องมือ EDS สามารถใช้หาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าสาร โดยมักจะใช้ร่วมกับ SEM

6.3.1 ลักษณะการใช้งาน SEM (SEM operation mode)

ในทางการปฏิบัติ ลักษณะการใช้งาน SEM อาจแบ่งได้ 4 กลุ่มหลัก ดังนี้

- 1) High Resolution Mode สำหรับงานที่ต้องการกำลังขยายสูง จึงต้องการจุดตกกระทบขนาดเล็ก
- 2) High Depth of Mode สำหรับงานที่ต้องการความชัดลึกสูง จึงต้อง ารใช้มุมคอนเวอร์เจนซ์ของลำอิเล็กตรอนเล็กๆ
- 3) High Current Mode สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้รังสีเอกซ์ต้องการปริมาณกระแสมากๆเพื่อเพิ่มความไว (Sensitivity) ต่อการตรวจวัดปริมาณของธาตุ
- 4) Low Voltage Mode นอกเหนือไปจากการใช้งาน SEM ในแบบต่างๆข้างต้นในปัจจุบัน SEM บางแบบยังสามารถทำงานได้ดีที่ค่าต่ำกว่า 5 kV เนื่องจากการใช้งาน SEM ลักษณะนี้จะได้พื้นผิวที่ดีขึ้น อีกทั้งยังลดปริมาณประจุสะสมบนผิว (Charging) จึงทำให้สามารถศึกษาตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าโดยไม่ต้องเคลือบด้วยคาร์บอน

7. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2544 ทิงและไซ (Jyh-Ming Ting; & B.S. Tsai. 2001: 273-277) ได้ศึกษาฟิล์ม AZO โดยใช้เทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง บนกระจกฟิล์มบาง AZO มีค่าการส่งผ่านแสงสูงในช่วงแสงที่มองเห็น (Visible light) ในช่วง 85 – 95 % การเจือด้วย Al มีผลต่อโครงสร้างผลึก และลักษณะโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของฟิล์มขึ้นอยู่กับการเพิ่ม Al ค่าความต้านทานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความดันก๊าซออกซิเจนและปริมาณ Al ที่เจือ

ในปี พ.ศ. 2547 ลีและเกา (Zhengwei Li; & W. Gao. 2004: 1363-1370) ได้ศึกษาฟิล์ม ZnO บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจก ด้วยเทคนิค อาเอฟ และ ดีซี รีแอคทีฟสเปคโตรอกราฟี โดยฟิล์มทั้งหมดมีรูปแบบโครงสร้างนาโน โดยมีการจัดเรียงตัว ในระนาบ (002) พบว่าการใช้เทคนิค ดีซี รีแอคทีฟสเปคโตรอกราฟี ที่ความดัน ก๊าซออกซิเจนและความดันรวมสูง ทำให้ฟิล์มมีขนาดเกรนใหญ่ แต่ให้ค่า ฟูลวีดฮาร์ฟแมกซ์ิมัม (Full Width Half Maximum : FWHM) ต่ำและ อัตราการเคลือบสูงขณะที่ ความดันออกซิเจนต่ำจะให้ค่า FWHM สูงและอัตราการเคลือบต่ำ โดยทั่วไป FWHM ของฟิล์ม ZnO ที่เคลือบด้วยเทคนิค อาเอฟ จะดีกว่าของฟิล์มที่ได้จากเทคนิค ดีซี ซึ่งได้อธิบายผลจากการให้ไบแอส การควบคุมเงื่อนไขระบบที่เหมาะสม เช่น ความดันรวมและความดันของก๊าซ ออกซิเจน รูปแบบของการกระตุ้นให้เกิดพลาสมา การไบแอส ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ และการเจือจางให้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างจุลภาคความเป็นผลึกและความเป็นรูปแบบเดียวกัน (Uniformity) ต่างกัน

ในปี พ.ศ. 2548 ฮุงดุก โค และคณะ (Hyungduk Ko; et al. 2005: 352-358) ได้ศึกษาฟิล์มบาง AZO ที่มีค่าสภาพต้านทานต่ำและส่งผ่านแสงสูง ด้วยเทคนิค ดีซี พัลส์ สเปคโตรอกราฟี (DC pulsed sputtering) บนกระจก การใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction : XRD) วิเคราะห์ให้เห็นว่าฟิล์ม AZO จัดเรียงตัวในแนวแกน c ตั้งฉากกับผิวแผ่นรองรับ ฟิล์ม AZO เตรียมที่พัลส์ ความถี่ 30 kHz ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด ($7.4 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$) โดยมีโครงสร้างพื้นผิวที่ราบเรียบและหนาแน่น และพบว่าการลดลงของสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นผลมาจากการพัฒนาการเป็นผลึกและความขรุขระของพื้นผิว ฟิล์มมีค่าการส่งผ่านแสงสูง 85 – 90 % ในช่วงแสงที่มองเห็น (Visible range) การที่ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ และการส่งผ่านแสงสูงของฟิล์ม AZO จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นฟิล์มออกไซด์โปร่งใสนำไฟฟ้า

ในปี พ.ศ. 2549 โอลิเวอร์ คลูท และคณะ (Oliver Kluth; et al. 2006: 311-316) ได้ศึกษาเปรียบเทียบฟิล์ม AZO ที่เตรียมด้วยเทคนิค อาเอฟ และ ดีซี แมกนีตรอน สเปคโตรอกราฟีบนกระจก เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของฟิล์ม พบว่าฟิล์ม AZO ที่ใช้เทคนิค อาเอฟ สเปคโตรอกราฟี ความหนาของฟิล์มและอุณหภูมิของแผ่นรองรับมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความดันและออกซิเจนในการสเปคโตรอกราฟี สำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสเปคโตรอกราฟีในระบบสถิต (Static) ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำในช่วง $2.3 - 5 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ในช่วงความดัน 0.04 – 4 Pa โดยออกซิเจนที่ใส่เข้าไป ในปริมาณน้อยแทบจะไม่มี ผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยฟิล์มมีความโปร่งใสสูง ที่อุณหภูมิแผ่นรองรับ ต่ำ และพบมีการกระเจิงของแสงหลังจาก การกัดฟิล์มบางให้ขรุขระโดยวิธีทางเคมี ฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสเปคโตรอกราฟีระบบพลวัต (Dynamic) ให้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำในช่วง $8 - 40 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลง เล็กน้อยเมื่อเทียบกับระบบสวิต

ในปี พ.ศ. 2551 กุยเลนและเฮร์เรโร (C. Guillen; & J. Herrero. 2008: 668-672) ได้ศึกษาฟิล์ม AZO เตรียมด้วยเทคนิคพัลส์ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง (Pulsed magnetron sputtering) จากเป้าเซรามิกส์ โดยให้กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ มิติของแผ่นรองรับและอัตราการพอกพูนฟิล์มต่างกัน พบว่าฟิล์ม AZO มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ($1.0 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$) และมีค่าส่งผ่านแสงเฉลี่ย 85 % โดยมีอัตราการพอกพูนฟิล์มอยู่ในช่วง 70-80 nm/min ที่อุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C และ ในปีเดียวกันทอนาญโรโตโซกอนและคณะ (T.Tohsophon; et al. 2008: 4628-4632) ได้ศึกษาฟิล์มบาง AZO ด้วยเทคนิค อินไลน์ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง (in-line direct current (dc) magnetron sputtering) บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจก โดยใช้เป้าเซรามิกส์ 4 ชนิด ที่แตกต่างกันในปริมาณ Al ที่เจือและวิธีการเตรียมเป้า ได้แก่ การเผาผนึกแบบปรกติ การเผาผนึกแบบอ่อนและอัดด้วยความร้อน (Hot pressed) แล้วศึกษาอิทธิพลของเป้า ความหนาแน่นของ Al ที่เจือและเงื่อนไขการสเป็คเตอริงที่มีต่อฟิล์ม AZO พบว่าคุณภาพของฟิล์มขึ้นอยู่กับชนิดของเป้า และเงื่อนไขการทับถมของฟิล์มบาง ส่งผลให้ได้ฟิล์มที่มีความโปร่งใสสูงและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำในช่วง $3.6 - 11 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ การเลือกเป้าและเงื่อนไขในการทับถมของฟิล์มมีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) ที่มีต่อฟิล์มและมีอิทธิพลอย่างมากต่อการกระเจิงแสงของฟิล์ม AZO

สำหรับฟิล์มบาง IZO มีการศึกษาดังนี้

ในปี พ.ศ. 2547 (ค.ศ. 2004) ยัง ซู โซนงและคณะ (Young Soo Songa; et al. 2004: 117-120) ได้ศึกษาฟิล์มบางอินเดียม (In) เจือ ZnO (IZO) ด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจก พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและค่าการส่งผ่านแสงค่อยๆ ลดลง เมื่อเพิ่มความดันในการพอกพูนฟิล์มสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นมาก และการส่งผ่านแสงจะลดลง ฟิล์มบาง IZO มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่ $3.8 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ มีค่าส่งผ่านแสงในช่วง 80-90% ในช่วงแสงที่มองเห็น และต่อมาในปี พ.ศ. 2552 เพงและคณะ (L.P.Peng; et al. 2009: 1819-1823) ได้ศึกษาฟิล์มบาง โปร่งใส นำไฟฟ้า IZO บนแผ่นรองรับ ที่เป็นกระจกเช่นเดียวกัน แต่ใช้เทคนิค อาเอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง พบว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างเป็นผลึกดีที่สุดเมื่อเตรียมที่อุณหภูมิแผ่นรองรับ 300°C โดยมีเกรนขนาดใหญ่ 29 nm และความตึงเครียด 0.9% และฟิล์มมีการส่งผ่านแสงเกิน 85% ในช่วงแสงที่มองเห็น โดยมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดที่ $2.4 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ จะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริงของ ซู โซนงและคณะในการ สเป็คเตอริงฟิล์มบาง IZO นี้จะให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำและการส่งผ่านแสงที่สูงกว่าการใช้เทคนิค อาเอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง

ในปี พ.ศ. 2549 ยากิโอกูและคณะ (Burag Yaglioglu; et al. 2006: 89-94) ได้ศึกษาฟิล์มบาง In 10 wt % เจือ ZnO ด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง ให้ได้ความหนาของฟิล์ม 100 nm สเปตเตอริงที่อุณหภูมิห้องและ อุณหภูมิ 350 °C โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณของก๊าซออกซิเจน ที่ใช้ในการสเปตเตอริงด้วยเป้า In_2O_3 บริสุทธิ์ และเป้า ZnO ที่เจือด้วย In 10 wt% และเป้า SnO_2 ที่เจือด้วย In 9.8 wt% พบปริมาณโมลาร์ของฟิล์มบาง IZO ชนิดอะมอร์ฟัสซึ่งอบอ่อนในอากาศที่อุณหภูมิ 200 °C จะไม่ทำให้ฟิล์มพัฒนาเป็น ผลึก แต่ทำให้เฟสการเป็นอะมอร์ฟัสลดลง 0.5% และสัมพันธ์กับการที่ความหนาแน่น ของพาหะลดลง การอบอ่อนในบรรยากาศของ N_2/H_2 พบว่าเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของพาหะโดยลดปริมาณ โมลาร์เล็กน้อย การอบอ่อนในอากาศที่อุณหภูมิ 500 °C เฟสอะมอร์ฟัสจะพัฒนาเป็นผลึกลูกบาศก์บิกไบท์หรือเฟสรวมไบฮีดรอล

ในปี พ.ศ. 2550 (ค.ศ. 2007) ฉางและชาย (Shang-Chou Chang; & Ming-Hua Shiao. 2007: 1202-1206) ทำการศึกษาฟิล์มบาง IZO จากเป้าเซรามิกส์อินเดียม ซิงค์ออกไซด์ ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ ในอัตราส่วน 95:5 wt%) ด้วยเทคนิค อาเอฟ แมกนีตรอน สเปตเตอริง พบว่าหากเพิ่มก๊าซออกซิเจนที่ระหว่างกระบวนการสเปตเตอริง สภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์ม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นี้จะเพิ่มขึ้นแบบมีนัยมากกว่าฟิล์ม IZO ที่เตรียมด้วยเป้า ZnO เจือด้วย In 10 wt% ในการอบอ่อนสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทันทีที่ฟิล์ม IZO กลายเป็นผลึก ส่วนสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง IZO นั้น ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไข สรุปได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง IZO คือ ไม่ควรเพิ่มออกซิเจนในการสเปตเตอริงและไม่ควรอบอ่อน

ในปี พ.ศ. 2551 (ค.ศ. 2008) คิมและคณะ (Do-Geun Kim; et al. 2008: 2045-2049) ได้ทำการศึกษาฟิล์ม IZO โดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน รีแอคทีฟ สเปตเตอริง (DC magnetron reactive sputtering) จากเป้า IZO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{ZnO}$ ในอัตราส่วน 90:10 wt %) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า และพื้นผิวของฟิล์ม พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นรองรับถึง 200 °C ฟิล์มบาง IZO มีสภาพต้านทานไฟฟ้า $3.4 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิมากกว่า 300 °C ผิวฟิล์มจะเรียบมากกว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C โดยฟิล์มบาง IZO ที่มีคุณภาพสูง จะเตรียมได้ด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง โดยการเพิ่มก๊าซ O_2/Ar ในอัตราส่วน 0.03 ที่อุณหภูมิในช่วง 150-200 °C

ในปี พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) จี บอง พาร์ค ซี ฮัน พาร์คและพุง ควน ซอง (Ji Bong Park; Se Hun Park; & Pung Keun Song. 2010: 669-672) ได้ศึกษาฟิล์มบาง IZO บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจก เตรียมโดยเทคนิค อาเอฟ แมกนีตรอน สเปตเตอริง ร่วมกับดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง จากเป้าเซรามิกส์ ZnO เจือด้วย In 9.54 wt% ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และโครงสร้างของ

ฟิล์มบาง IZO โดยให้กำลังไฟฟ้ารวมของ อาเอฟ และ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง เท่ากับ 80 W และ กำหนดอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าของ อาเอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริงต่อกำลังไฟฟ้ารวม จาก 0 ถึง 100 % โดยเพิ่มครั้งละ 25% พบว่าฟิล์มบาง IZO ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าโดย อาเอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง 100% ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดที่ $1.28 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ เนื่องจากมีความหนาแน่นของพาหะสูง ฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50% ด้วยอาเอฟนั้นแสดงเกรนขนาดใหญ่กว่าและ FWHM น้อยกว่า และจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS พบว่ามีการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของ In^{3+} ณ ตำแหน่งของ Zn^{2+} ในโครงสร้าง ZnO เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ การจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยอาเอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ต่อ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายทั้งหมด ค่าส่งผ่านแสงของฟิล์มทั้งหมดในช่วงที่มองเห็น มีมากกว่า 80% การเพิ่ม กำลังไฟฟ้าของอาเอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริงทำให้แถบช่องว่าง (Band gap) กว้างขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากการเพิ่มของความหนาแน่นของพาหะซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของเบอร์สไตน์-มอส (Burstein-Moss)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง ZnO ที่เจือด้วย Al และ In (AlZO) เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง จากเป้า ZnO เจือด้วย Al และ In (ZnO: Al_2O_3 0.5 wt%+ In_2O_3 0.5 wt%) ใช้เทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม ให้ได้คุณสมบัติของฟิล์มตามที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำยาล้างจาน
2. น้ำกลั่น (Distilled water : DI)
3. อะซีโตน (Acetone : $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)
4. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol (IPA): $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$)
5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric : HCl) ความเข้มข้น 37%
6. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol : $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)
7. ก๊าซอาร์กอน ความบริสุทธิ์ 99.99 %
8. ยาขัดโลหะ (Wenol)
9. กาวเงิน (Silver paint)
10. ไดไอโอดมีเทน (Diiodomethane : CH_2I_2)

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีกเกอร์ขนาดต่างๆ
2. ถังมือยางแบบไม่มีแปรง (ไร้ฝุ่น)
3. อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil)
4. กระดาษทราย
5. กระดาษเช็ดเลนส์
6. คีมปากคีบ
7. กระจกสไลด์
8. กระบอกตวงพลาสติก
9. เครื่องอัลตราโซนิก
10. เครื่องสเป็คเตอริง ระบบ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง

11. มัลติมิเตอร์ (Multimeter)
12. กล่องใส่แผ่นกระจกสไลด์
13. เป้าสารเคลือบ (Target) เป็นเป้าซึ่งคือออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียมในอัตราส่วน 0.5 wt% (Al_2O_3 0.5 wt% + In_2O_3 0.5 wt%) มีลักษณะเป็นแผ่นกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.7 cm
14. กระจกคอร์นนิ่ง (Corning glass) ขนาด $7.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ หนา 0.10 cm ผลิตโดยบริษัทคอร์นนิ่ง (CORNING) ประเทศสหรัฐอเมริกา
15. ชุดวัดความต้านทานไฟฟ้า (Four point probe) รุ่น RM3 ผลิตโดยบริษัทแจนเดล (JANDEL) ประเทศอังกฤษ สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
16. เครื่องวัดพาหะสารกึ่งตัวนำ ฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall effect measurements) ผลิตโดยบริษัทอีโคเปีย (ECOPIA) รุ่น HMS-3000 สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
17. เครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) ผลิตโดยบริษัทวีโก้ (Veeco) รุ่น Dektak 150 สถานที่ตั้งอุปกรณ์ สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC)
18. เครื่องทดสอบการส่งผ่านแสง (UV-VIS spectrophotometer) ผลิตโดยบริษัทเพอร์กินเอลเมอร์ (PerKin Elmer) Version 2.85.04 สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร)
19. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ผลิตโดยบริษัทฮิตาชิ (Hitachi) รุ่น S4700 สถานที่ตั้งอุปกรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

3.3 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
3. ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)
4. สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC)

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

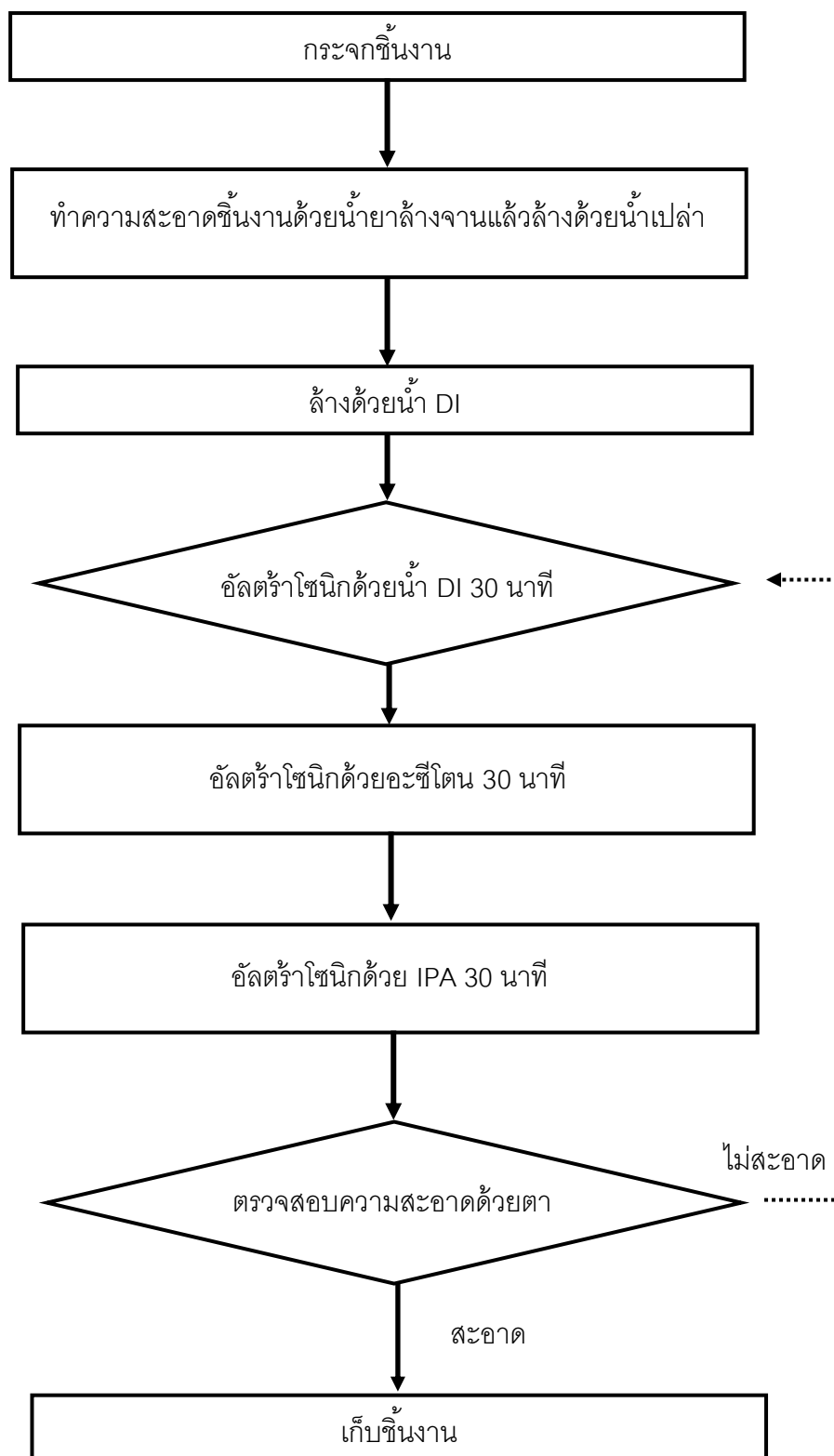
1. การเตรียมแผ่นรองรับ

แผ่นรองรับที่ใช้ในการทดลองเป็น กระดาษคอร์นิง (corning glass) ขนาด $7.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ หนา 0.10 cm ผลิตโดยบริษัทคอร์นิง ประเทศสหรัฐอเมริกา แผ่นรองรับเหล่านี้ก่อนนำมาศึกษาหรือเคลือบฟิล์มจะต้องนำมาทำความสะอาดสิ่งสกปรกได้แก่ คราบฝุ่นไขมัน สารอินทรีย์ต่างๆ เพื่อให้ได้ผิวกระจกที่สะอาดทำให้ฟิล์มที่เคลือบยึดติดแน่นลงบนผิวกระจก ซึ่งมีขั้นตอนการทำความสะอาด ดังนี้

การทำความสะอาดแผ่นรองรับโดยเริ่มจากนำขึ้นกระจกล้างด้วยน้ำยาล้างจาน เพื่อขจัดฝุ่นและคราบไขมันแล้วล้างออกด้วยน้ำเปล่า แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น (DI) นำขึ้นงานไปอัลตราโซนิกด้วยน้ำกลั่น เป็นเวลา 30 นาที อัลตราโซนิกด้วยอะซิโตน 30 นาที แล้วนำไปอัลตราโซนิกด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) อีก 30 นาที นำขึ้นงานขึ้นโดยใช้คีมคีบ และเช็ดให้แห้งด้วยกระดาษเช็ดเลนส์จนแห้งสะอาด ถ้า ยังมีคราบสกปรกอยู่ ให้นำกลับไปทำความสะอาดใหม่ในขั้นตอนการอัลตราโซนิกด้วยน้ำ DI 30 นาที ชิ้นงานที่สะอาดจะนำไปเก็บไว้ในกล่องเก็บชิ้นงานที่มิดชิด ขั้นตอนการล้างกระจกแสดงดังภาพประกอบ 28

2. การเตรียมฟิล์มบาง AIZO

การเตรียมฟิล์มบาง AIZO โดยวิธี ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง จากเป้า ZnO เจือด้วย Al และ In ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.7 cm เคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นกระดาษคอร์นิง (Corning glass) ขนาด $7.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ หนา 0.10 cm ผลิตโดยบริษัทคอร์นิง ประเทศสหรัฐอเมริกา และใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) 99.99 % เป็นก๊าซพลาสมา โดยควบคุม การไหลของก๊าซด้วยวาล์วเข็ม (Needle valve) ในการทดลองจะมีตัวแปรต่างๆ ของการเคลือบ ฟิล์มที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ค วามดันก๊าซอาร์กอน กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ ระบบ และระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัย ได้ควบคุมเวลาในการเคลือบฟิล์มคงที่ที่ 30 นาที แล้วนำฟิล์มที่เตรียมตามเงื่อนไขต่างๆ ไปศึกษาสมบัติทาง ไฟฟ้า สมบัติทางแสง และโครงสร้างจุลภาค โดยมีรายละเอียดการเตรียมฟิล์มดังนี้



ภาพประกอบ 28 แผนภาพไดอะแกรมแสดงการทำความสะอาดกระจกชิ้นงาน

1. ทำความสะอาดภายในภาชนะสุญญากาศ (Chamber) โดยเก็บเศษฝุ่นผง และ เช็ดทำความสะอาดคราบสกปรกภายในที่เกิดขึ้นขณะสัปดาห์เตอร์ ในครั้งที่ผ่านมามาออกให้หมดด้วยยาขัดโลหะ (Wenol) เช็ดซ้ำด้วยอะซิโตน (Acetone) จนคราบสกปรกหมด แล้วเช็ดตามด้วย ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ใช้แอลูมิเนียมฟอยล์บุผนังด้านในภาชนะสุญญากาศ เพื่อป้องกันคราบ ติดตามผนังขณะสัปดาห์เตอร์

2. นำกระจกที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว นำมาวางที่แท่นวางแผ่นรองรับ ซึ่งอยู่ด้านล่างของภาชนะสุญญากาศ และเป็นขั้วบวก (Anode) โดยมีเป้า ZnO เจือด้วย Al กับ In ที่อยู่ด้านบน และเป็นขั้วลบ (Cathode) ดังภาพประกอบ 29 กำหนดระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับ เป็น 7 10 13 และ 16 cm ตามลำดับ ก่อนทำการสัปดาห์เตอร์ต้องปิดเป้าด้วยชัตเตอร์ (Shutter) ที่ทำด้วยอลูมิเนียม แล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศให้สนิท

3. เปิดสวิตช์เครื่องทำความเย็น และระบบน้ำหล่อเย็น เพื่อระบายความร้อน ของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (Diffusion pump : DF) และขั้วลบ (Cathode) ขณะทำการสัปดาห์เตอร์

4. เปิดสวิตช์ควบคุมเครื่องสัปดาห์เตอร์ ึ่งเปิดระบบปั๊มเริ่มจากเปิด สวิตช์เครื่องสูบก (Rotary pump : RP) เปิดเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (Diffusion pump : DF) ปั๊มจนได้ความดันที่ 6×10^{-5} mbar

5. เปิดระบบก๊าซอาร์กอน (Ar) หมุนเปิดวาล์วที่ถังก๊าซและปรับปริมาตรการปล่อยก๊าซ ให้ได้ความดันก๊าซที่ต้องการตามเงื่อนไข ดังนี้ 3×10^{-2} 5×10^{-2} 7×10^{-2} 9×10^{-2} และ 1×10^{-1} mbar โดยการปรับวาล์วเข็ม (Needle valve) ควบคุมความดันก๊าซอาร์กอนจนกว่าจะคงที่

6. เปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หมุนปรับเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt) จนเกิดการโกลว์ดิซชาร์จ แล้วปรับกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการตามเงื่อนไขดังนี้ 30 40 และ 50 W

7. ทำการพรีสัปดาห์เตอร์ (Pre-sputter) เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงทำการเคลือบฟิล์มบนแผ่นรองรับ โดยการเปิดที่บังเป้าออกเป็นเวลา 30 นาที

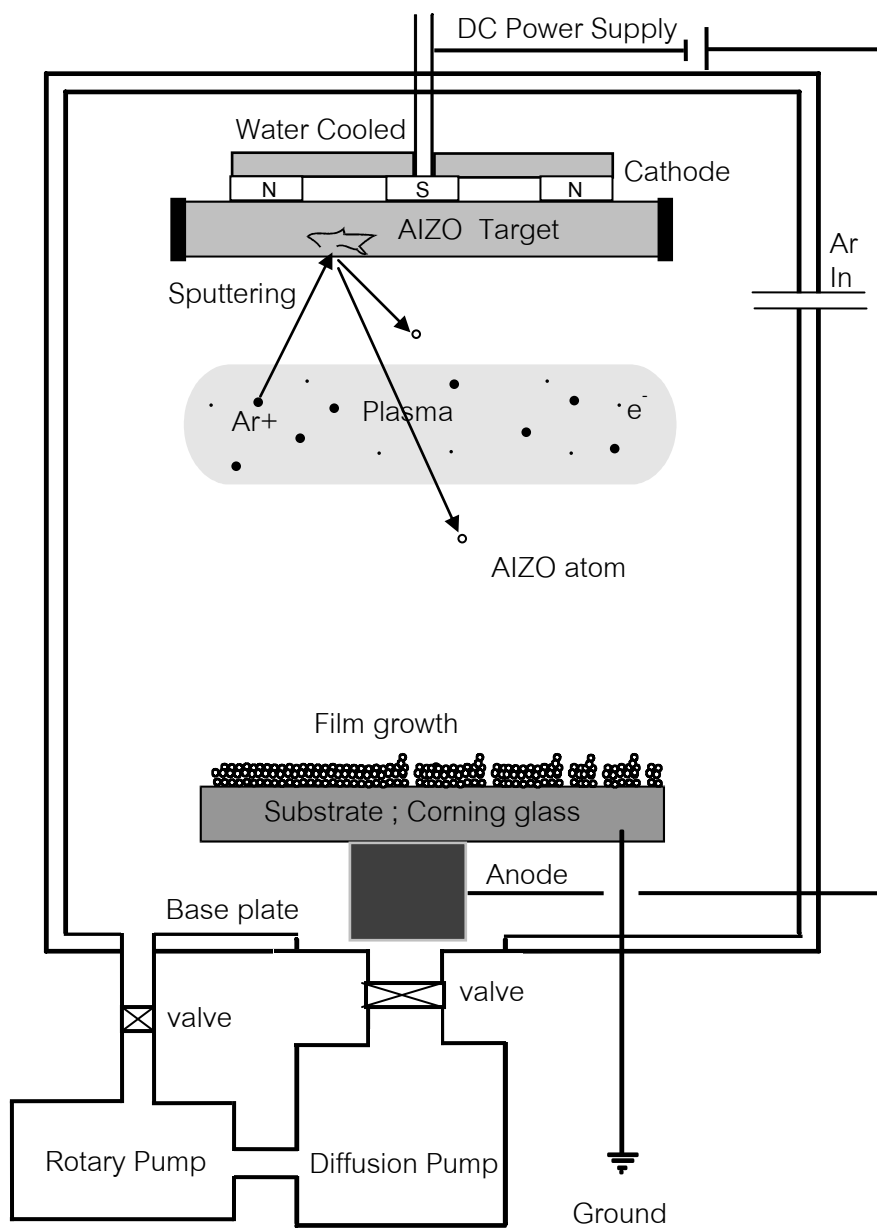
8. นำฟิล์มออกจากภาชนะสุญญากาศ และตรวจสอบสมบัติต่างๆต่อไป

3. การวัดสมบัติของฟิล์ม AIZO

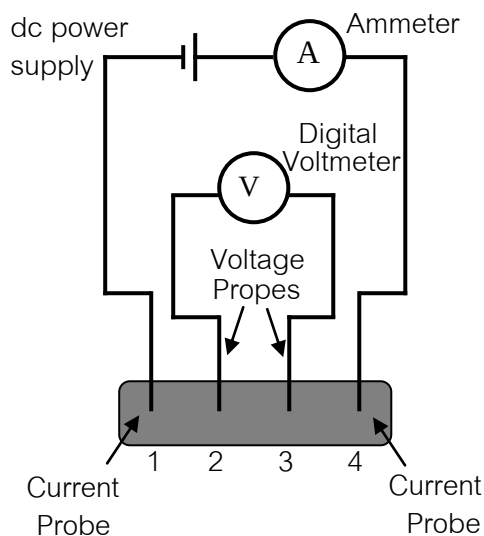
3.1 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม

ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะดังต่อไปนี้

3.1.1 วัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการ วัดความต้านทานไฟฟ้าด้วย เทคนิค โฟร์พอยท์โพรบ เริ่มจากนำชิ้นงานตัวอย่างตัดให้ได้ขนาด



ภาพประกอบ 29 แสดงระบบ ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง



ภาพประกอบ 30 ระบบการวัดของเครื่องโพรบอยทีโพรบ

ที่มา: Images scientific instruments. (2007). *The four point electrical probe*. (online)

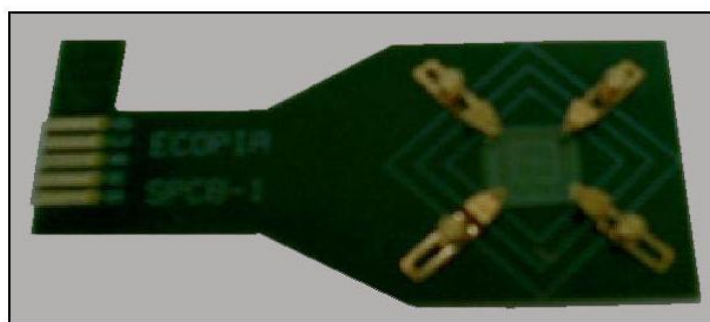
$1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ แล้วจึงทำมาวัดด้วยเทคนิค โพรบอยทีโพรบ โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าโพรบ 1 และ 4 กำหนดกระแสคงที่ที่ $1 \mu\text{A}$ แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างโพรบ 2 และ 3 ด้วยมิเตอร์ระบบดิจิทัล ดังภาพประกอบ 30 แล้วระบบก็จะคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าออกมาให้อัตโนมัติ นำค่าความต้านทานที่ได้ไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้สมการ (2.9)

3.1.2 วัดความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะ

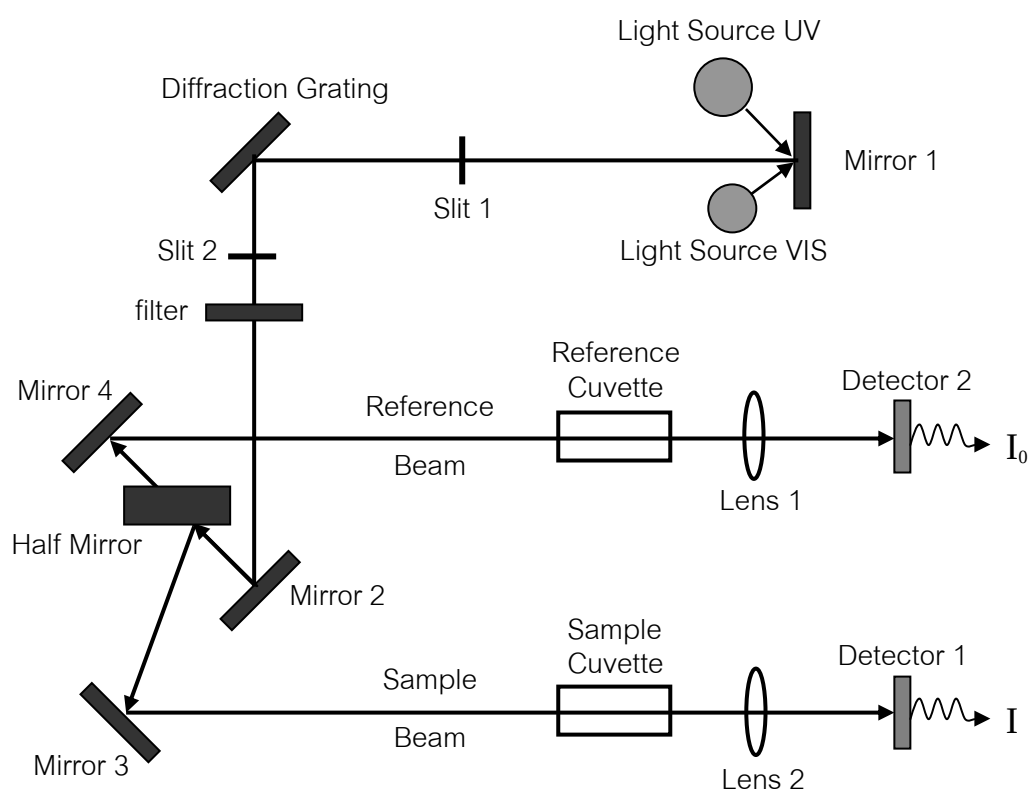
ในขั้นตอนนี้ทำกา รวัดความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะ ด้วยการวัดฮอลล์เอฟเฟค (Hall effect measurements) เตรียมชิ้นงานโดยตัดชิ้นงานที่มีความสมมาตรขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ โดยเลือกชิ้นงานที่มีความหนาสม่ำเสมอ เนื้อผิวเรียบไม่มีรอยแยก นำชิ้นงานยึดติดกับขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 มุม เพื่อตรวจสอบ ดังภาพประกอบ 31 ป้อนกระแสไฟฟ้า 1 nA เพื่อวัดความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะ

3.2 การวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม

ขั้นตอนนี้เป็น การวัด ค่าการส่งผ่านแสง ของฟิล์ม สามารถวัดโดยเครื่องทดสอบการ ส่งผ่านแสง (UV-VIS spectrophotometer) ซึ่งเป็นแบบลำแสงคู่ แสงออกจากแหล่งกำเนิด (Deuterium



ภาพประกอบ 31 เชื่อมคอนแทคกับชิ้นงาน



ภาพประกอบ 32 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

ที่มา: พรณทิพย์ ตั้งปรียารักษ์. (2551). เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง. (ออนไลน์)

lamp, D2 or Halogen lamp ,WI) จะกระทบกับกระจก (Mirror 1) แล้วเปลี่ยนเป็นแสงเอกรงค์โดยดิฟแฟรคชันเกรตติง (Diffraction Grating) จากนั้นแสงจะเคลื่อนที่กระทบกระจก (Mirror 2) กระจกสะท้อนแสง 50% (Half Mirror) จะแยกแสงออกเป็นสองลำ ลำแรกไปกระทบกระจก (Mirror 4) ลำแสงนี้จะสะท้อนไปยังแผ่นรองรับอ้างอิง (Reference) ไปยังตัวตรวจวัด (Detector 2) อีกลำกระทบกระจก (Mirror 3) สะท้อนไปยังแผ่นรองรับตัวอย่าง (Sample) ตัวตรวจวัด (Detector 1) ดังภาพประกอบ 32 ซึ่งจะทำให้การวัดการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสงตกกระทบซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงช่วงความยาวคลื่นได้ในช่วง 190 – 1100 nm

3.3 การวัดค่าเฮซ (Haze)

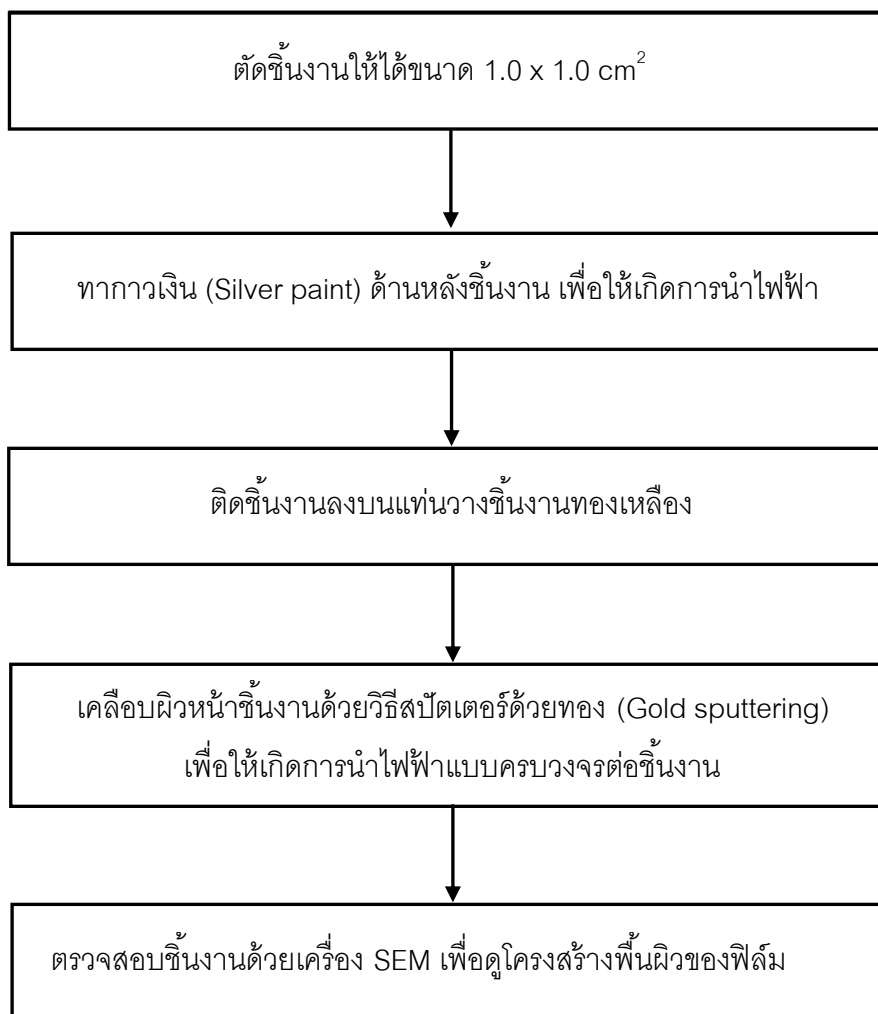
การทดลองนี้ได้ทำการวัดค่า เฮซของฟิล์มบาง AIZO โดยเครื่องทดสอบการส่งผ่านแสง (UV-VIS spectrophotometer) โดยมีขั้นตอนดังภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 33 แสดงการเตรียมชิ้นงานวัดค่าเฮซ (Haze)

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

ในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง AIZO ด้วยเครื่อง SEM เพื่อศึกษาภาพตัดขวาง (cross-section) และพื้นผิวของฟิล์ม โดยการเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปถ่ายภาพด้วยกล้อง SEM ดังภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 แสดงการเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปวัดโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์ม

3.5 วัดความหนาของฟิล์ม

วัดความหนาของฟิล์มด้วย เครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) ดังภาพประกอบ 35 เตรียมชิ้นงานก่อนนำไปวัด โดย กัดฟิล์มด้วยกรด ไฮโดรคลอริก (hydrochloric) ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร กัดฟิล์มให้เป็นร่องลึกลงไปถึงผิว แผ่นรองรับ แล้วนำชิ้นงานไปวางบนแท่นวางบนเครื่อง โดยจะมีกล้องจุลทรรศน์เป็นตัวส่องให้เห็นพื้นผิวฟิล์มและแสดงภาพบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ และระบุตำแหน่งที่ต้องการวัด โดยเครื่องจะวัดโดยการลากโพรบขนาดเล็กๆ ผ่านพื้นผิวฟิล์มที่ขรุขระ แล้วประมวลค่าความหนาที่ได้ออกมา



ภาพประกอบ 35 เครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profiler) รุ่น Veeco Dektak 150

ที่มา: Veeco instruments. (2006). *Dektak 150*. (online).

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้ จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในบทที่ 3 โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดัน และกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาของฟิล์ม จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มโดยใช้เทคนิคโฟร์พอยท์ โพรบ (Four point probe) และเทคนิคฮอลล์เอฟเฟค (Hall effect measurements) โดยศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความเข้มข้นของพาหะ วิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดค่าการส่งผ่านแสง (UV – visible spectrometer) แบบลำแสงคู่ เพื่อตรวจสอบค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม แล้วศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) สุดท้ายวิเคราะห์ค่าเฮซ (Haze) สมบัติทางไฟฟ้าและพื้นผิวของฟิล์มบางอีกครั้งหลังจากที่กัดฟิล์มให้ขรุขระด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric : HCl)

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดัน และกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาของฟิล์ม

จากการใช้เป้าเซรามิกส์ AIZO เพื่อเตรียมฟิล์มบาง AIZO ด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง นั้น พบว่าทุกเงื่อนไขการสเปตเตอริงจะได้ฟิล์มบางโปร่งใส บนแผ่นรองรับ โดยมีความหนาต่างกันซึ่งขึ้นกับเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มดังนี้

4.1.1 ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันที่มีต่อความหนาของฟิล์ม

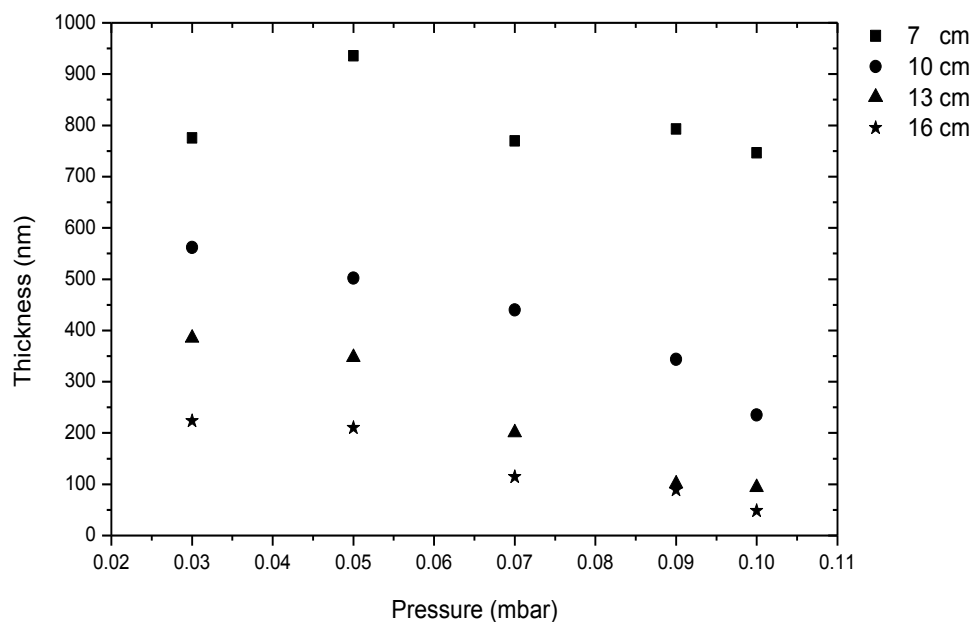
อันดับแรกวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติและการทับถมของฟิล์ม จากภาพประกอบ 36 แสดงถึงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันขณะสเปตเตอริงที่ส่งผลต่อการทับถมของฟิล์ม พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 13 และ 16 cm ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้จากเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่างอาโนดและคาโทดจนถึงแรงดันพังทลาย พลังงานของประจุรุนแรงภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น สามารถชนกับโมเลกุลของก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยในภาชนะสุญญากาศทำให้โมเลกุลของก๊าซอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก เกิดการไอออไนซ์ก๊าซอย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณมาก ไอออนบวกจะเข้าไปชนกับเป้าซึ่งอยู่ที่ขั้วคาโทด เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมทำให้อะตอมของเป้าถูกสเปตเตอริงออกมาและตกลงบนแผ่นรองรับ เมื่อความดัน

เพิ่มขึ้นทำให้มีไอออนของอาร์กอนในพลาสมาเพิ่มขึ้น จึงทำให้อะตอมของเป้าที่ถูกสปัตเตอร์ออกมาชนกับไอออนของอาร์กอนในพลาสมาและสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชน และมีพลังงานไม่พอที่จะตกลงบนแผ่นรองรับ ทำให้อัตราการทับถมลดลง ความหนาของฟิล์มจึงลดลงตามลำดับ และระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่ต่างกันยังส่งผลต่อค่าความหนาของฟิล์ม โดยระยะห่างมาก ความหนาของฟิล์มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ระยะห่างมาก อะตอมของเป้าที่ถูกสปัตเตอร์ออกมามีโอกาสสูญเสียพลังงานจากการชนกับ ไอออนของอาร์กอนในพลาสมามากกว่าที่ระยะใกล้ทำให้อัตราการทับถมลดลง ความหนาของฟิล์มจึงลดลง โดยที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm จะให้อัตราการทับถมดีที่สุด (25-32 nm/min) โดยฟิล์มมีความหนาระหว่าง 750-950 nm เมื่อความดันขณะสปัตเตอร์อยู่ในช่วง 0.03-0.1 mbar ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับใกล้กัน ทำให้อะตอมของเป้าที่ถูกสปัตเตอร์ออกมาตกลงบนแผ่นรองรับโดยไม่สูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนกับ ไอออนของอาร์กอนจึงให้อัตราการทับถมดี จากผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันขณะสปัตเตอร์นั้นมีผลต่ออัตราการทับถมของฟิล์มซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการก่อเกิดฟิล์มบาง (Bunshah, R.F; et al. 1982: 213) โดยสามารถปรับเงื่อนไขเพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการได้

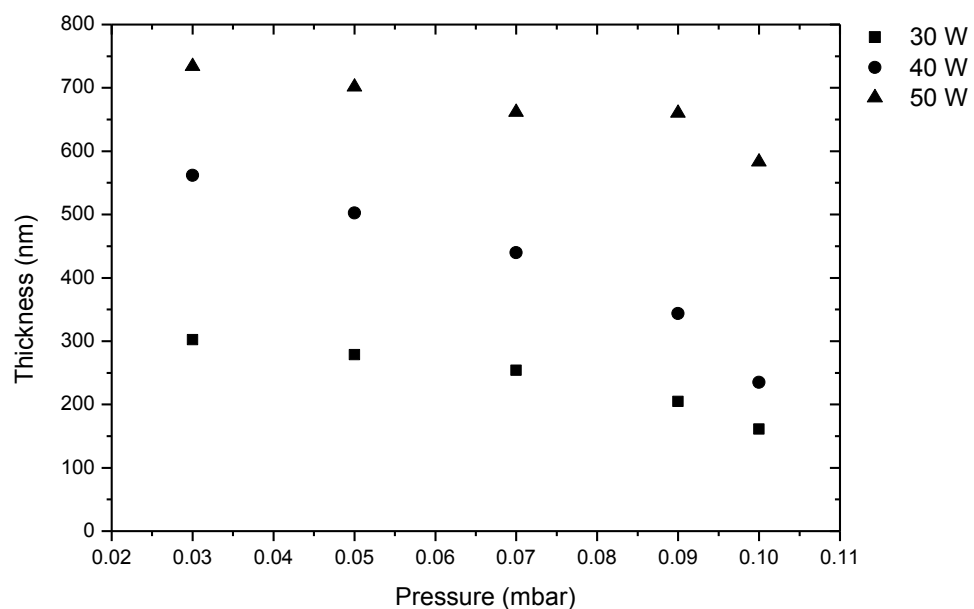
4.1.2 ผลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อความหนาของฟิล์ม

จากภาพประกอบ 37 แสดงถึงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อการทับถมของ ฟิล์ม โดยเตรียมฟิล์มที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm ด้วยกำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W ที่ความดันต่างๆ พบว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 30 W เมื่อเพิ่มความดันความหนาของฟิล์มจะลดลงตามลำดับ โดยมีผลการทดลองที่สอดคล้องกันทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นการเตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 40 หรือ 50 W และสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.1.1

จากการทดลองกำลังไฟฟ้าส่งผลต่อความหนาของฟิล์มเช่นกัน โดยฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าสูงกว่าจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับในทุกตัวอย่างที่เตรียมด้วยความดันเดียวกัน เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งไอออนให้เคลื่อนที่ด้วยพลังงานสูงเมื่อเกิดการชนและถ่ายเทโมเมนตัมกับอะตอมผิวหน้าเป้าจะส่ง ผลให้อะตอมผิวหน้าเป้าหมายมีการเคลื่อนที่ที่สูงขณะตกเคลือบบนแผ่นรองรับ (Chapman, B. 1980: 206,406) จึงทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนากว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการกลอวดิสซาร์จ โดยจากการทดลองฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W ที่ความดันต่ำในช่วง 0.03-0.05 mbar จะให้ฟิล์มที่มีความหนาสูงสุด (>700 nm) โดยมีอัตราการทับถมในช่วง 24 nm/min



ภาพประกอบ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอรืงที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กําลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 10 13 และ 16 cm ตามลำดับ



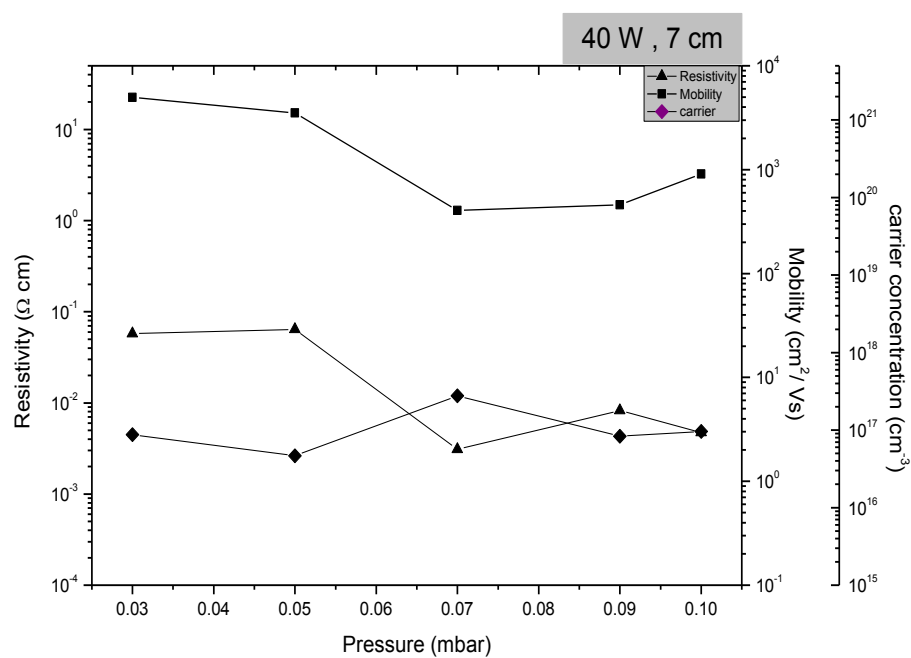
ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอรืงที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กําลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm

4.2 สมบัติทางไฟฟ้า

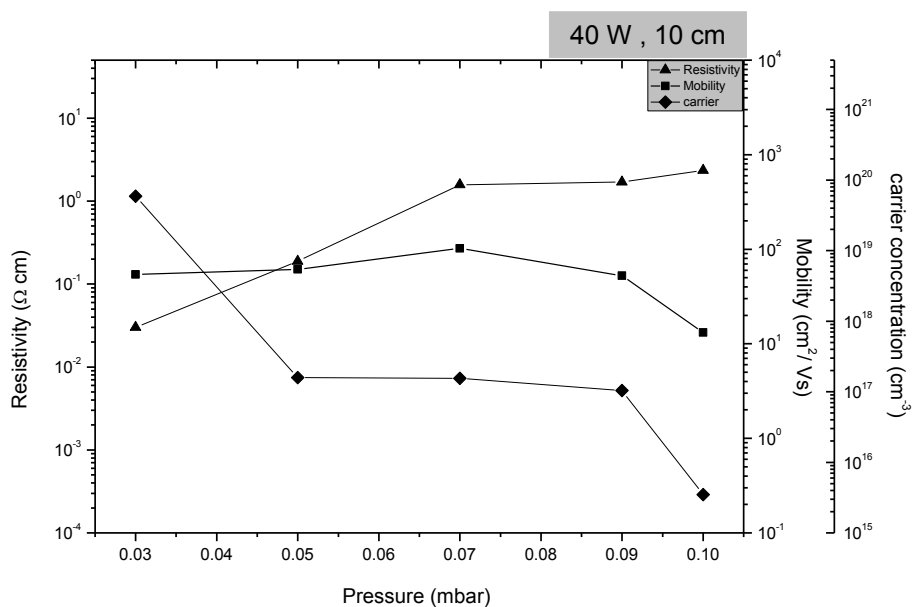
ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มโดยใช้เทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe) และเทคนิคฮอลล์เอฟเฟค (Hall effect measurements) โดยศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ

4.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันที่มีต่อ สภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ

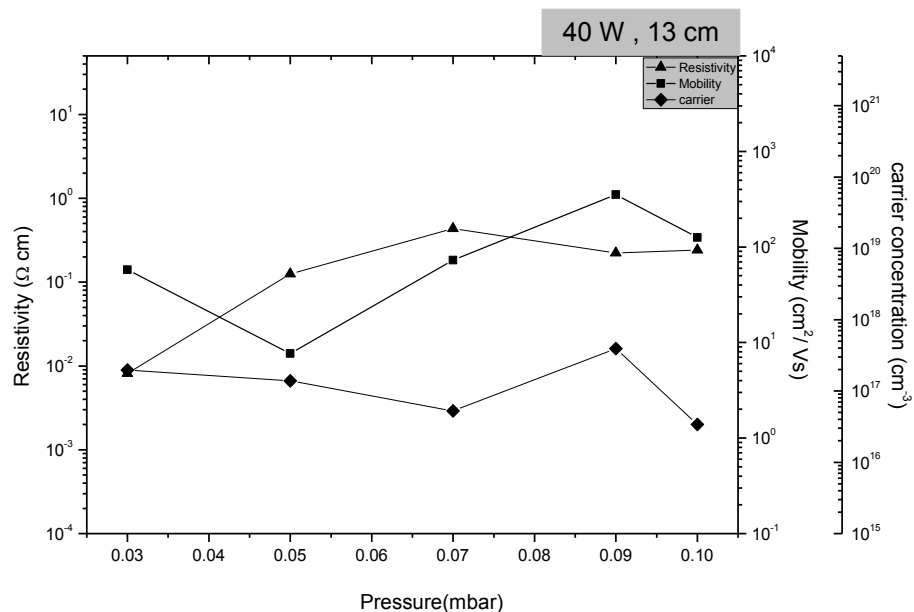
จากภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอร่าที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในช่วง $6.39 \times 10^{-2} - 3.10 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ ความหนาแน่นของพาหะ $4.66 \times 10^{16} - 2.76 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และค่าความคล่องตัวของพาหะ $4.04 \times 10^2 - 4.95 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ เมื่อเพิ่มความดัน ค่าความคล่องตัวของพาหะและสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงแต่ความหนาแน่นของพาหะมีแนวโน้มคงที่ โดยความคล่องตัวของพาหะ จะส่งผลต่อค่า สภาพต้านทานไฟฟ้า อย่างชัดเจน เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ค่าความคล่องตัวของพาหะมีปริมาณมากจะส่งผลให้ค่า สภาพต้านทานไฟฟ้า มีค่าลดลง เนื่องจากพาหะอิสระเคลื่อนที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 13 และ 16 cm ดังภาพประกอบ 39 40 และ 41 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มความดัน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะมีอิทธิพลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งคู่ เมื่อความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะลดลงจะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



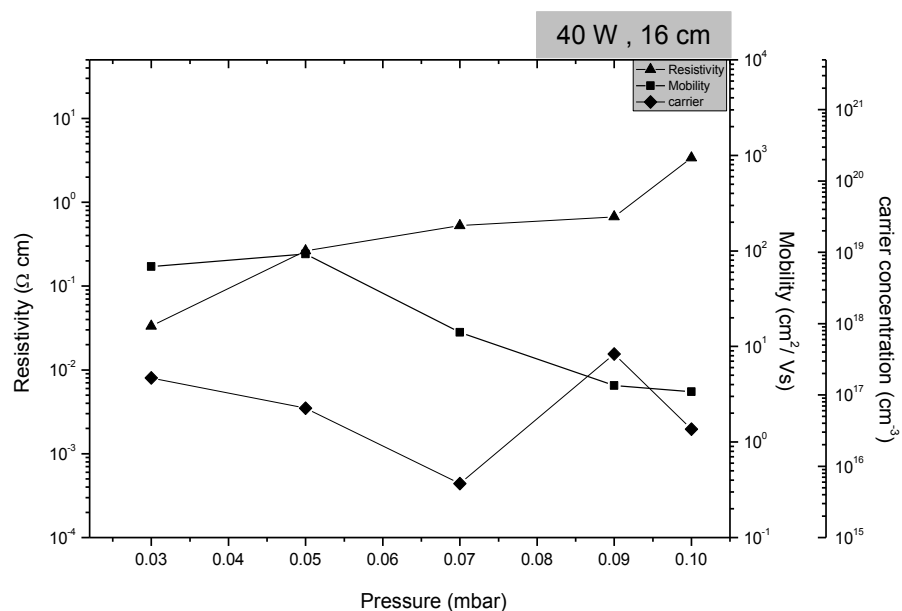
ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอรืงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กําลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 7 cm



ภาพประกอบ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอรืงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กําลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



ภาพประกอบ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเปกโตรสโกปีที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กึ่งกลางไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 13 cm

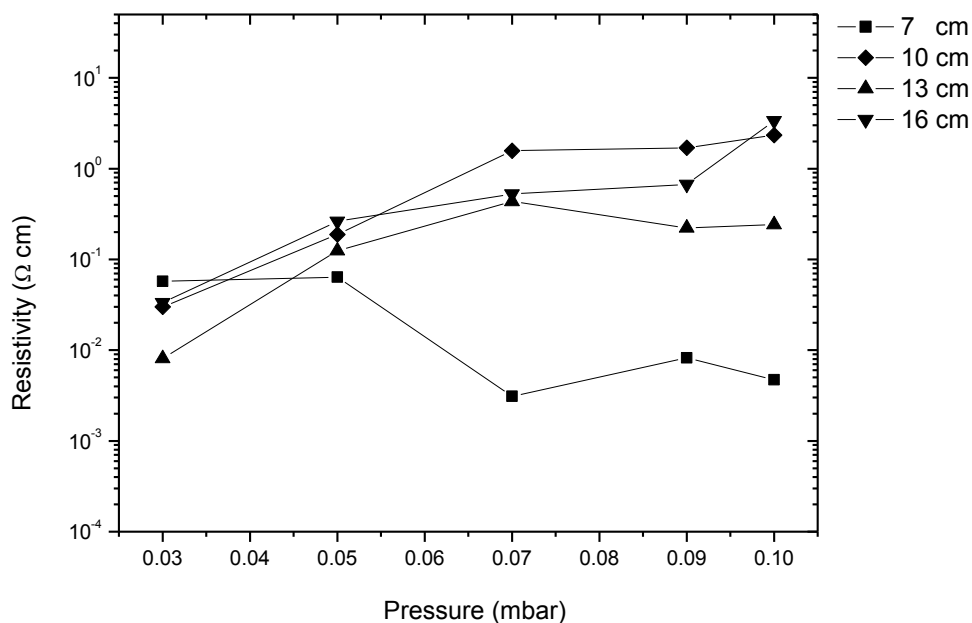


ภาพประกอบ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเปกโตรสโกปีที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กึ่งกลางไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 16 cm

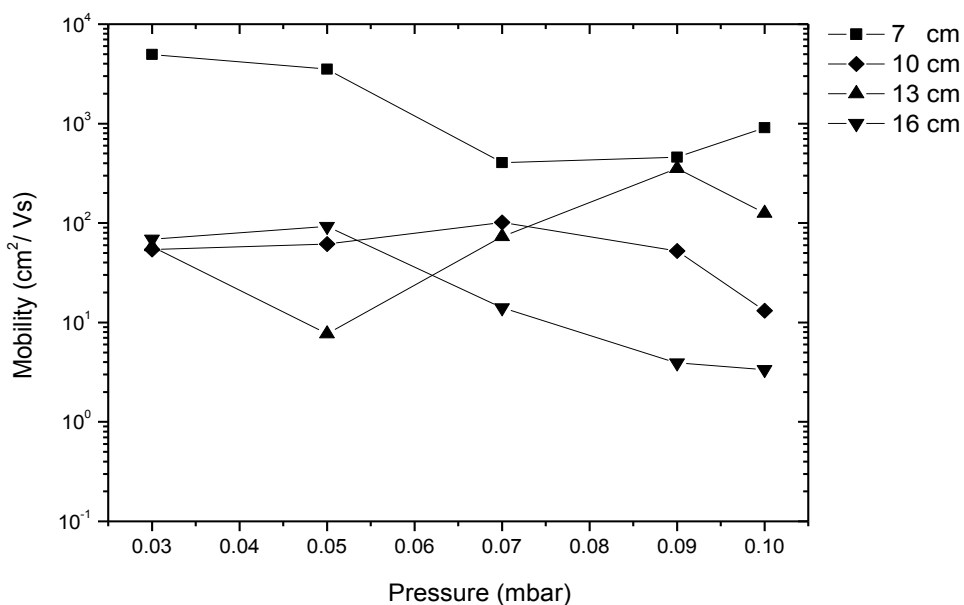
พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและ ระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 10 13 และ 16 cm ดังภาพประกอบ 42 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 13 และ 16 cm ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความดัน อะตอมจะมีพลังงานในการทับถมฟิล์มต่ำ เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์จากการชนกับ ไอออนในพลาสมา โดยทับถมเป็นกลุ่มกระจัดกระจายไม่เชื่อมต่อกันระหว่างกลุ่มอะตอม AIZO ทำให้เกิดลักษณะฟิล์มบางน้อยกว่า 400 nm และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของ ภาพประกอบ 36 ขณะที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ สั้นเป็น 7 cm สภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดอย่างเห็นได้ชัดเด่น ($3.10 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$) ที่ความดัน 0.07 mbar ซึ่งอธิบายได้จากพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงเมื่อทับถมบนแผ่นรองรับ เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนในพลาสมามากขึ้น และทำให้อะตอม AIZO ที่ถูกสปีดเตอริงออกมาและพลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบเพิ่มขึ้น มีสัมประสิทธิ์การแพร่สูง เนื่องจากที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับสั้น อะตอม AIZO จะไม่สูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนกับไอออนในพลาสมา ทำให้เคลื่อนที่ไปได้ทั่วบริเวณผิวที่มีพื้นที่ว่าง ซึ่งจะทำให้ฟิล์มที่ได้หนาที่บ และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ

ภาพประกอบ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและ ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W ซึ่งพบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm มีค่าความคล่องตัวของพาหะสูงตลอดทุกช่วงความดัน โดยสูงถึง $4.95 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ เมื่อเตรียมที่ความดัน 0.03 mbar ขณะที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 13 และ 16 cm ความคล่องตัวของพาหะอยู่ในช่วง $3.37 \text{ cm}^2/\text{Vs} - 3.54 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ เมื่อค่าความคล่องตัวของพาหะสูงก็จะส่งผลให้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำได้ดี ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้างภาพประกอบ 42

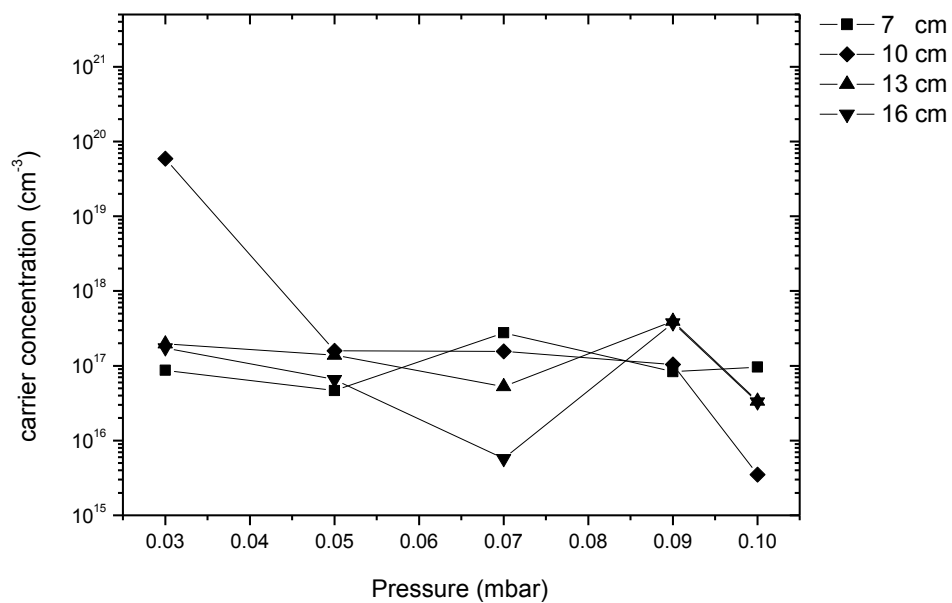
ภาพประกอบ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสปีดเตอริงและ ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W ซึ่งพบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 10 13 และ 16 cm ค่าความหนาแน่นของพาหะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง $2.5 \times 10^{15} - 3.94 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ยกเว้นที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 0.03 mbar ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของพาหะสูงที่สุดเป็น $5.91 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และที่ความดัน 0.01 mbar ซึ่งมีความหนาแน่นของพาหะต่ำสุดเป็น $5.73 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ



ภาพประกอบ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 40 W



ภาพประกอบ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 40 W



ภาพประกอบ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมปกติเตอริงและระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กำลังไฟฟ้า 40 W

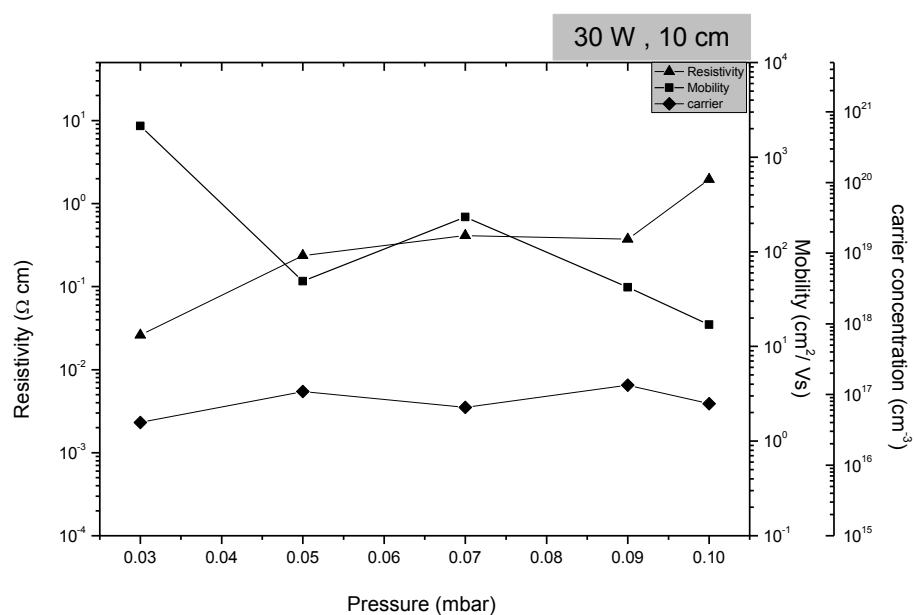
4.2.2 ผลของกำลังไฟฟ้าและความดันที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ

พิจารณาความดันขณะสับตัดเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm กำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W ดังภาพประกอบ 45 46 และ 47 ตามลำดับ พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้น ความคล่องตัวของพาหะมีแนวโน้มลดต่ำลง ส่วนค่าความหนาแน่นของพาหะมีแนวโน้มคงที่ตลอด ช่วงความดัน ยกเว้นที่กำลังไฟฟ้า 40 W ความดัน 0.03 และ 0.10 mbar ค่าความคล่องตัวของพาหะส่งผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยมีลักษณะแปรผกผันกัน ปริมาณค่าความคล่องตัวของพาหะที่มากจะส่งผลให้พาหะอิเล็กตรอนมีความสามารถในการเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าได้ดี จึงทำให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดี สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ

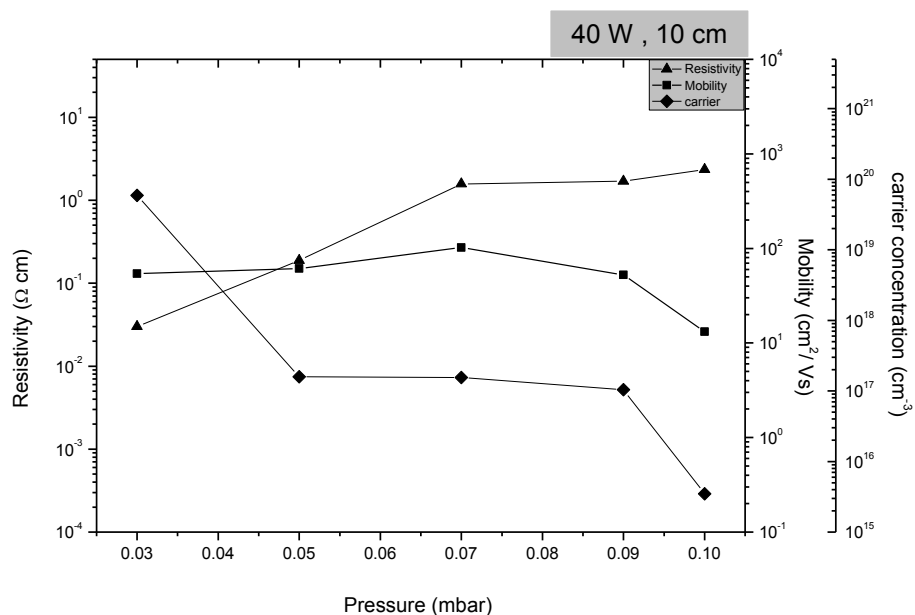
เมื่อเปรียบเทียบสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเตรียมที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน ดังภาพประกอบ 48 เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดต่ำลงซึ่งสัมพันธ์กับความหนาดังภาพประกอบ 37 โดยมีค่าต่ำสุดเป็น $2.57 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ เมื่อเตรียมที่กำลังไฟฟ้า 50 W ความดัน 0.03 mbar โดยการให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ด้วยพลังงานสูงเมื่อเกิดการชนและถ่ายเทโมเมนตัมกับอะตอมผิวหน้าเป้าจะส่งผลให้อะตอมผิวหน้าเป้ามียุทธศาสตร์การเคลื่อนที่ที่สูงขณะตกเคลือบบนแผ่นรองรับจึงทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนา เนื้อฟิล์มมีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากกว่า ตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าต่ำ ทำให้พาหะอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดี ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ

ภาพประกอบ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสับตัดเตอริงและ กำลังไฟฟ้าที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ซึ่งพบว่าที่ความดันเพิ่มมากขึ้นค่าความคล่องตัวของพาหะมีแนวโน้มลดต่ำลง โดยแปรผกผันกับสภาพต้านทานไฟฟ้างดภาพประกอบ 48 โดยเมื่อค่าความคล่องตัวของพาหะมีค่าสูงจะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ

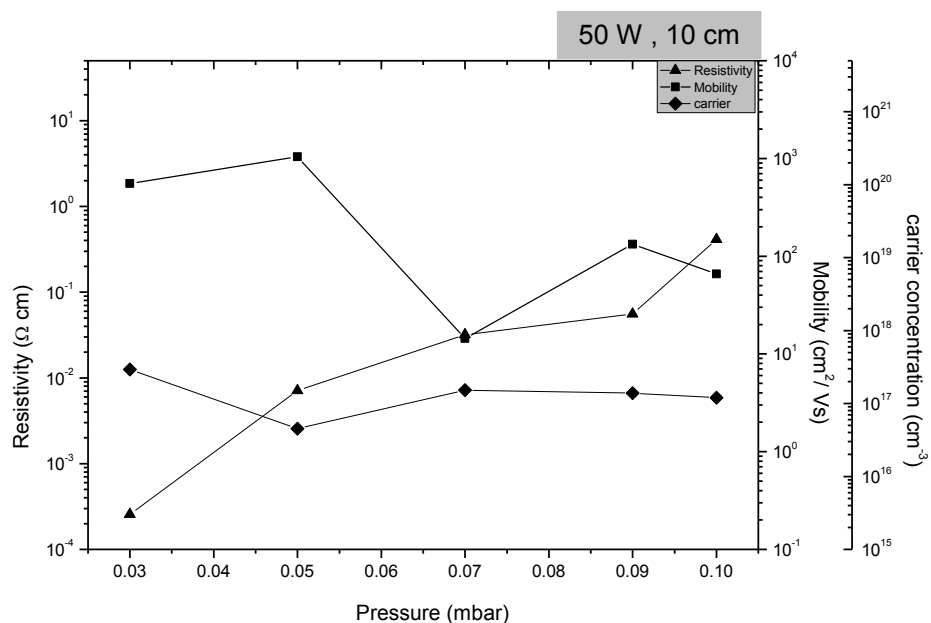
ภาพประกอบ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสับตัดเตอริงและ กำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm พบว่าค่าความหนาแน่นของพาหะของกำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง $4.0 \times 10^{16} - 2.92 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ยกเว้นกำลังไฟฟ้า 40 W ความดัน 0.03 mbar และ 0.1 mbar ซึ่งให้ค่าความหนาแน่นของพาหะสูงสุดเป็น $5.91 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และต่ำสุดเป็น $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$



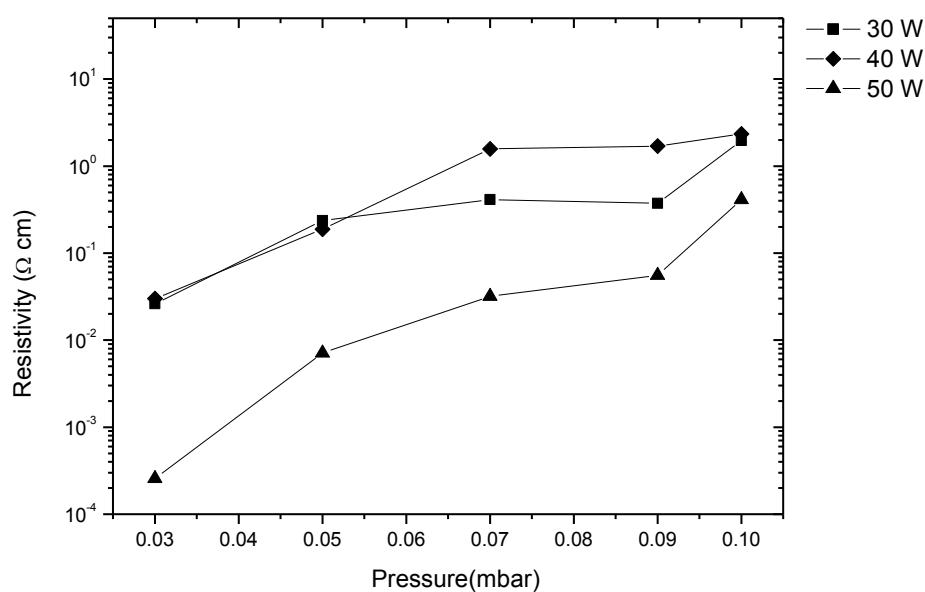
ภาพประกอบ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับค่าการนำไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 30 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



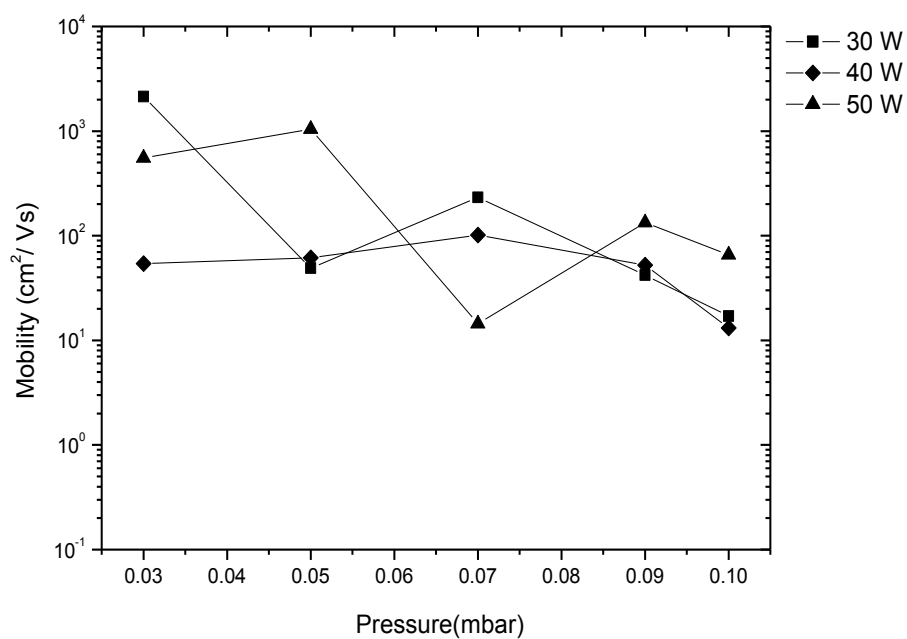
ภาพประกอบ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสะสมกับค่าการนำไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ กำลังไฟฟ้า 40 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



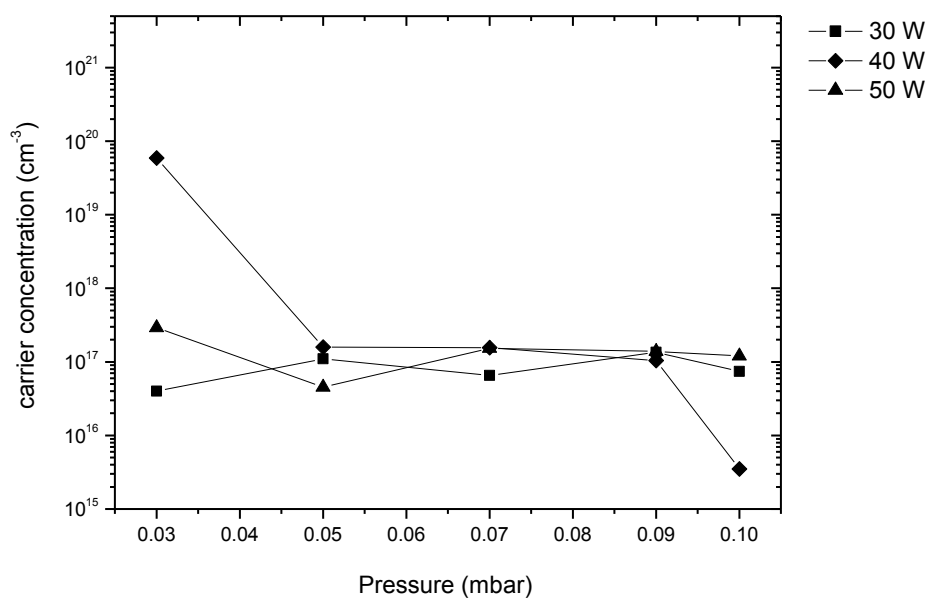
ภาพประกอบ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสับเตอริงที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO เตรียมที่กําลังไฟฟ้า 50 W โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



ภาพประกอบ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสับเตอริงและกําลังไฟฟ้าที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



ภาพประกอบ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความคล่องตัวของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm



ภาพประกอบ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขณะสเป็คเตอริงและกำลังไฟฟ้าที่มีต่อความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO โดยมีระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm

4.3 สมบัติทางแสง

เมื่อวัดค่าการส่งผ่านแสง ของฟิล์ม AIZO ด้วยเครื่องวัดค่าการส่งผ่าน แสง (UV – visible spectrometer) แบบลำแสงคู่ ได้ข้อมูลดังภาพประกอบ 51 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO เตรียมที่ความดัน 0.03 mbar โดยพบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งหมดมีการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm โดยฟิล์มเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ย 48 % โดยฟิล์มมีลักษณะสีดำไม่โปร่งใสและฟิล์มเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 13 และ 16 cm มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ย 78-93 % ริ้วแทรกสอดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็น คลื่นรูปไซน์เกิดจากความหนาของฟิล์ม ฟิล์มที่มีความหนามากจะเกิดนิวตันริง เมื่อวัดค่าส่งผ่านแสงจะปรากฏเป็นลักษณะคลื่นรูปไซน์อย่างชัดเจน

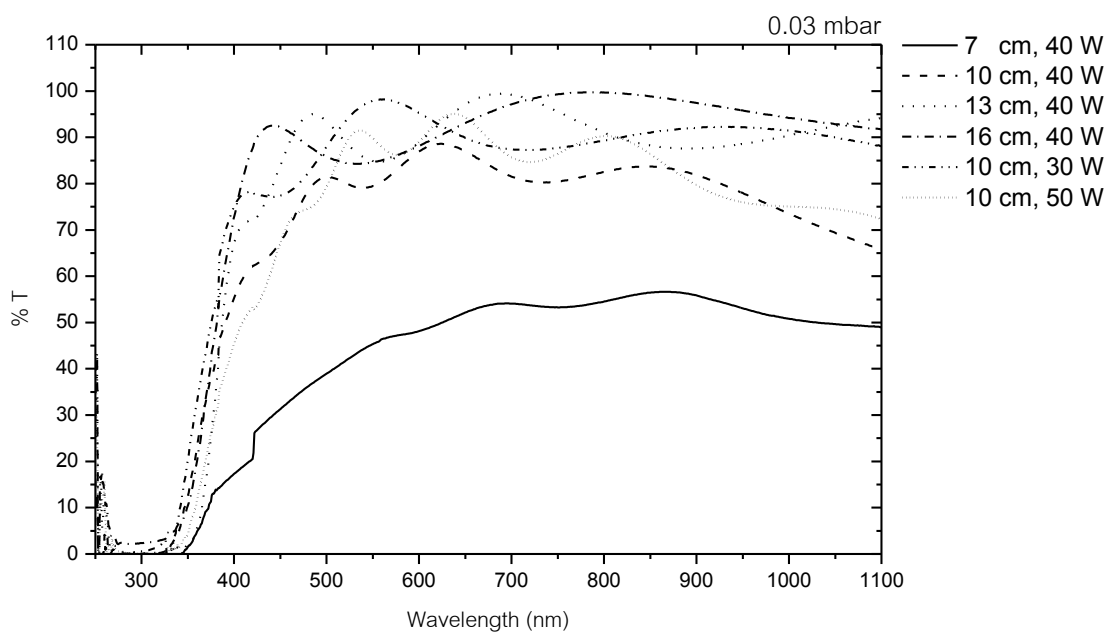
เมื่อทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการสเป็คโตรโดยการเพิ่มความดันเป็น 0.05 mbar ดังภาพ ประกอบ 52 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ทั้งหมดมีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ย 72-93 % ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ยมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากฟิล์มมีความหนาลดลง โดยอธิบายได้จาก เมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้มี ไอออนของอาร์กอนในพลาสมาเพิ่มขึ้น จึงทำให้อะตอมของเป้าที่ถูกสเป็คโตรออกมาชนกับไอออนของอาร์กอนในพลาสมาและสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชน และพลังงานไม่พอที่จะตกลงบนแผ่นรองรับ ทำให้อัตราการทับถมลดลง ความหนาของฟิล์มจึงลดลงตามลำดับ ลักษณะผลการทดลองที่ได้เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการสเป็คโตรที่ความดัน 0.07 0.09 และ 0.1 mbar สอดคล้องกัน ดังภาพประกอบที่ 52 53 54 และ 55

จากกราฟจะเห็นได้ว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าที่ 40 W เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับมากขึ้น จะส่งผลต่อการเลื่อนตำแหน่งของขอบเขตการดูดกลืนแสงของฟิล์มไปทางอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) (< 350 nm) ซึ่งตำแหน่งขอบเขตการดูดกลืนแสงนี้จะสัมพันธ์กับช่องว่างแถบพลังงาน

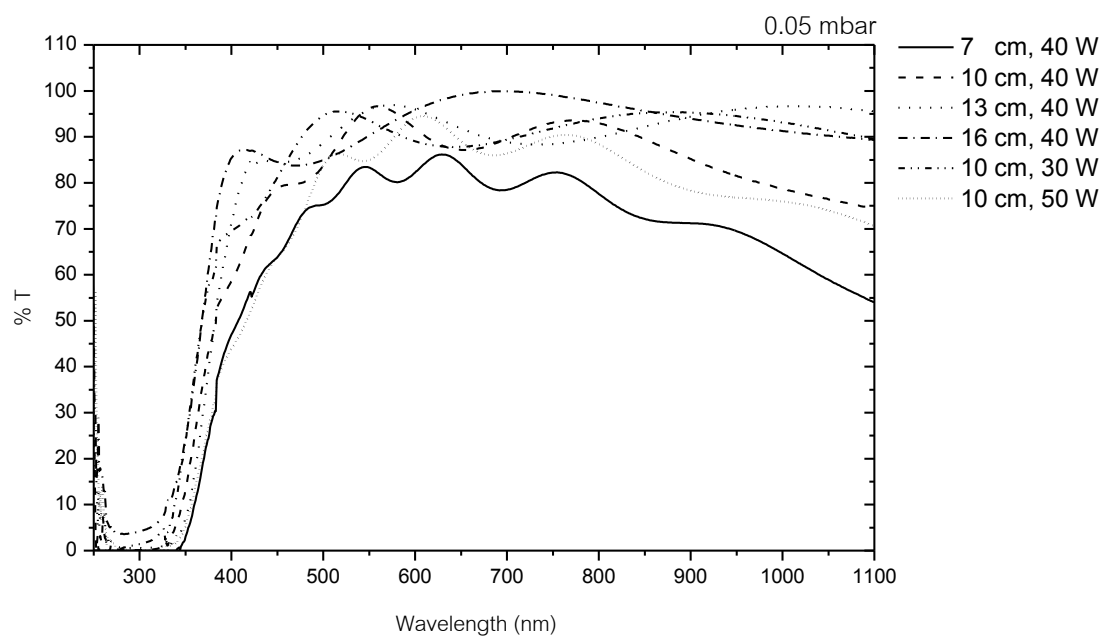
ค่าช่องว่างแถบพลังงานนี้หาได้จากการนำค่าการส่งผ่านแสงที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ 2.42 และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานของโฟตอน $(h\nu)$ และประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยการลากเส้นตรงตัดพลังงานโฟตอน แสดงดังภาพประกอบ 2.27 (b) ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้เป็นตัวบ่งบอกถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ต้องการใช้กระตุ้นเพื่อย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบนำไฟฟ้า โดยจากการทดลองพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าในช่วง 3.3-3.65 eV ดังภาพประกอบ 56 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง AIZO เตรียมที่เงื่อนไขต่างๆ

ค่าช่องว่างแถบพลังงานนี้จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งในการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงโฟตอน เมื่อพลังงานที่ได้รับจากช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม AIZO ฟิล์มก็จะส่งผ่านแสงออกมาทั้งหมด จึงเกิดการส่งผ่านแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ต่างกัน โดยปรกติฟิล์ม ZnO ที่ไม่เจือสารจะมีช่องว่างแถบพลังงานที่ประมาณ 3.37 eV (Madelung, 1992, 26) เมื่อเทียบกับฟิล์ม AIZO พบว่าฟิล์ม AIZO มีการเลื่อนขึ้นของช่องว่างแถบพลังงาน โดยจะช่วยเพิ่มช่วงการส่งผ่านแสงของฟิล์มให้มากขึ้นในช่วง UV

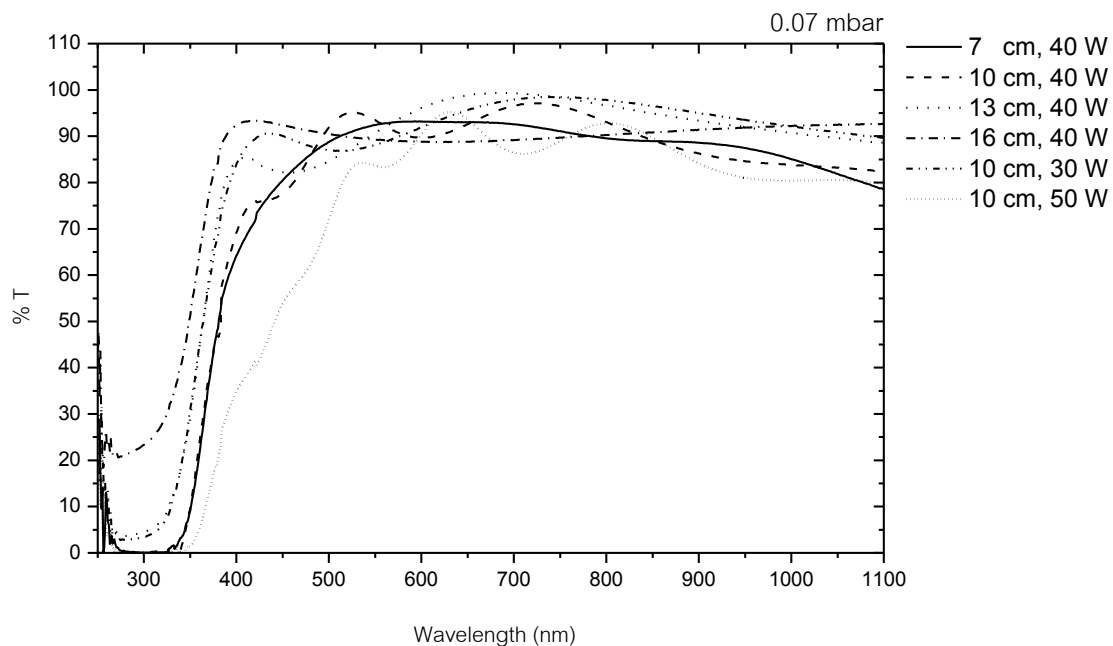
ภาพประกอบ 57 แสดงค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1100 nm ของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยเงื่อนไขในการทับถมฟิล์มที่ต่างกัน จะพบว่าฟิล์มเตรียม ที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm มีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยที่ต่ำในช่วงความดันที่น้อยกว่า 0.05 mbar ซึ่งสอดคล้องกับความหนาและลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม เมื่อฟิล์มหนาเพิ่มขึ้นจะดูดกลืนแสงมากและลดความโปร่งใสลง ขณะที่เมื่อเตรียมฟิล์มที่เงื่อนไขอื่นๆพบว่า ฟิล์มมีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยมากกว่า 80% ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (visible) และช่วงใกล้อินฟราเรด (NIR)



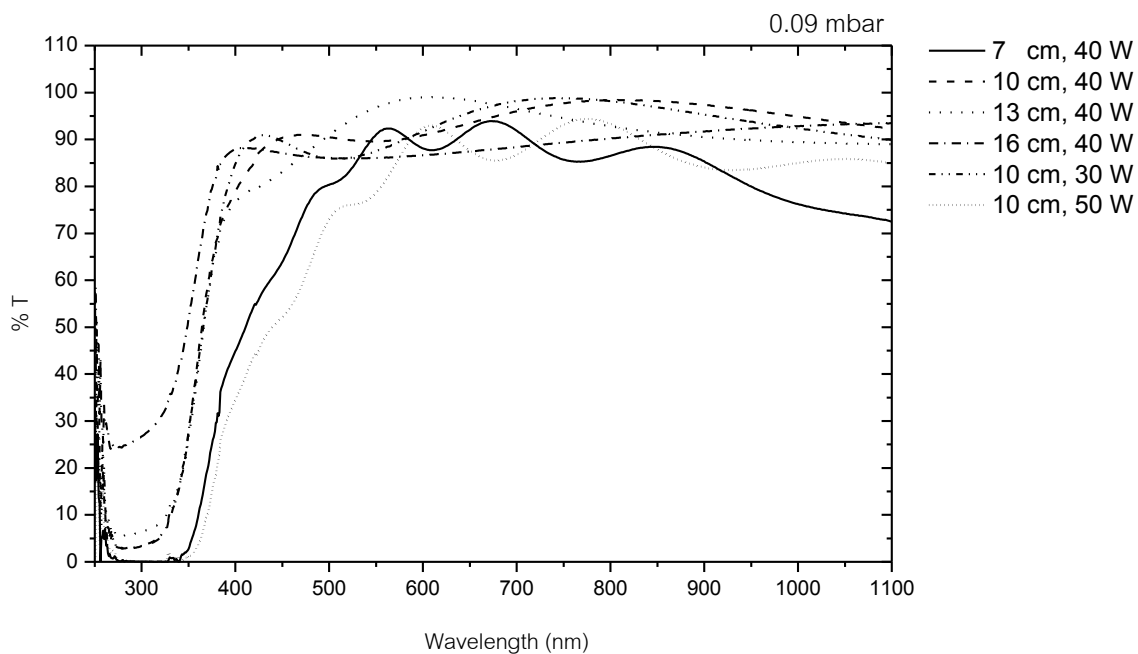
ภาพประกอบ 51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.03 mbar



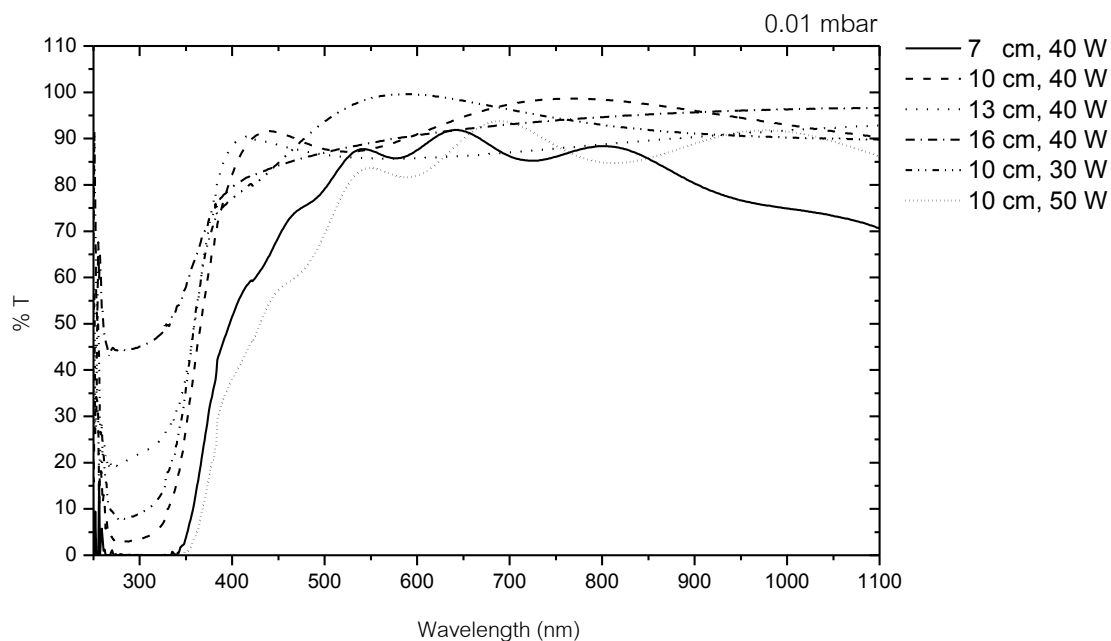
ภาพประกอบ 52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.05 mbar



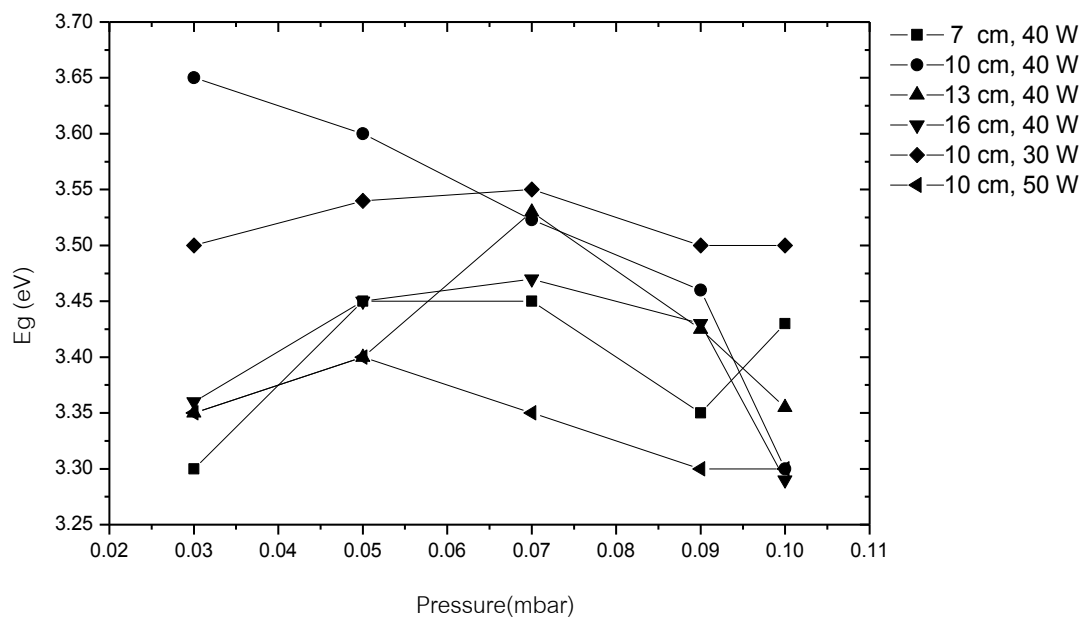
ภาพประกอบ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.07 mbar



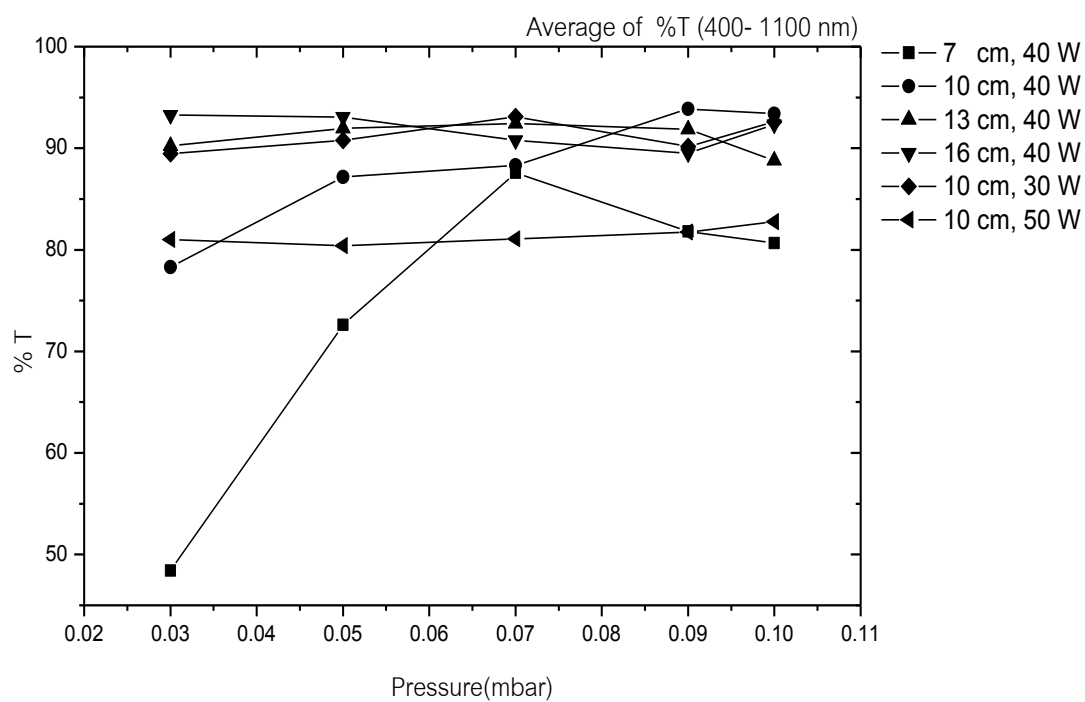
ภาพประกอบ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.09 mbar



ภาพประกอบ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่ความดัน 0.10 mbar



ภาพประกอบ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม AIZO
เตรียมที่เงื่อนไขต่างๆ



ภาพประกอบ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงของฟิล์ม AIZO ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm

4.4 ลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์ม

จากภาพประกอบ 58 ซึ่งแสดงภาพตัดขวางและพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยความดัน 3×10^{-2} , 7×10^{-2} และ 1×10^{-1} mbar ตามลำดับ พบว่าฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยความดัน 3×10^{-2} mbar มีลักษณะการก่อตัวของฟิล์มเป็นคอลัมน์นาฬิกาที่หนาแน่นและสม่ำเสมอโดยมีความหนา 730 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบกรานูลาร์ (granular) เกรนมีขนาดใหญ่ในช่วง 50-150 nm โดยที่ค่าเฉลี่ยประมาณ 76 nm ดังภาพประกอบ 58 (a) และ (b)

ตัวอย่างที่เตรียมด้วยความดัน 7×10^{-2} mbar การก่อตัวของฟิล์มมีลักษณะเป็นคอลัมน์นาฬิกาไม่สม่ำเสมอ โดยมีความหนาเป็น 660 nm และลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดเล็กเฉลี่ย 27 nm ดังภาพประกอบ 58 (c) และ (d) และตัวอย่างที่เตรียมด้วยความดัน 1×10^{-1} mbar เนื้อฟิล์มที่ก่อตัวขึ้นมีลักษณะไม่เป็นคอลัมน์นาฬิกาชัดเจนและไม่หนาแน่น โดยเกาะกันอย่างหลวมๆ มีช่องว่างเล็กๆแทรกในเนื้อฟิล์มจำนวนมากและมีความหนาเป็น 580 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดเล็กเฉลี่ย 25 nm ดังภาพประกอบ 58 (e) และ (f)

จากการทดลองพบว่าความดันส่งผลต่อการก่อตัว และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโดยที่ความดันต่ำ ฟิล์มมีลักษณะเป็นคอลัมน์นาฬิกาที่หนาแน่น สม่ำเสมอและเกรนมีขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มความดันฟิล์มจะบาง ความหนาแน่นน้อย ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดเล็กลง

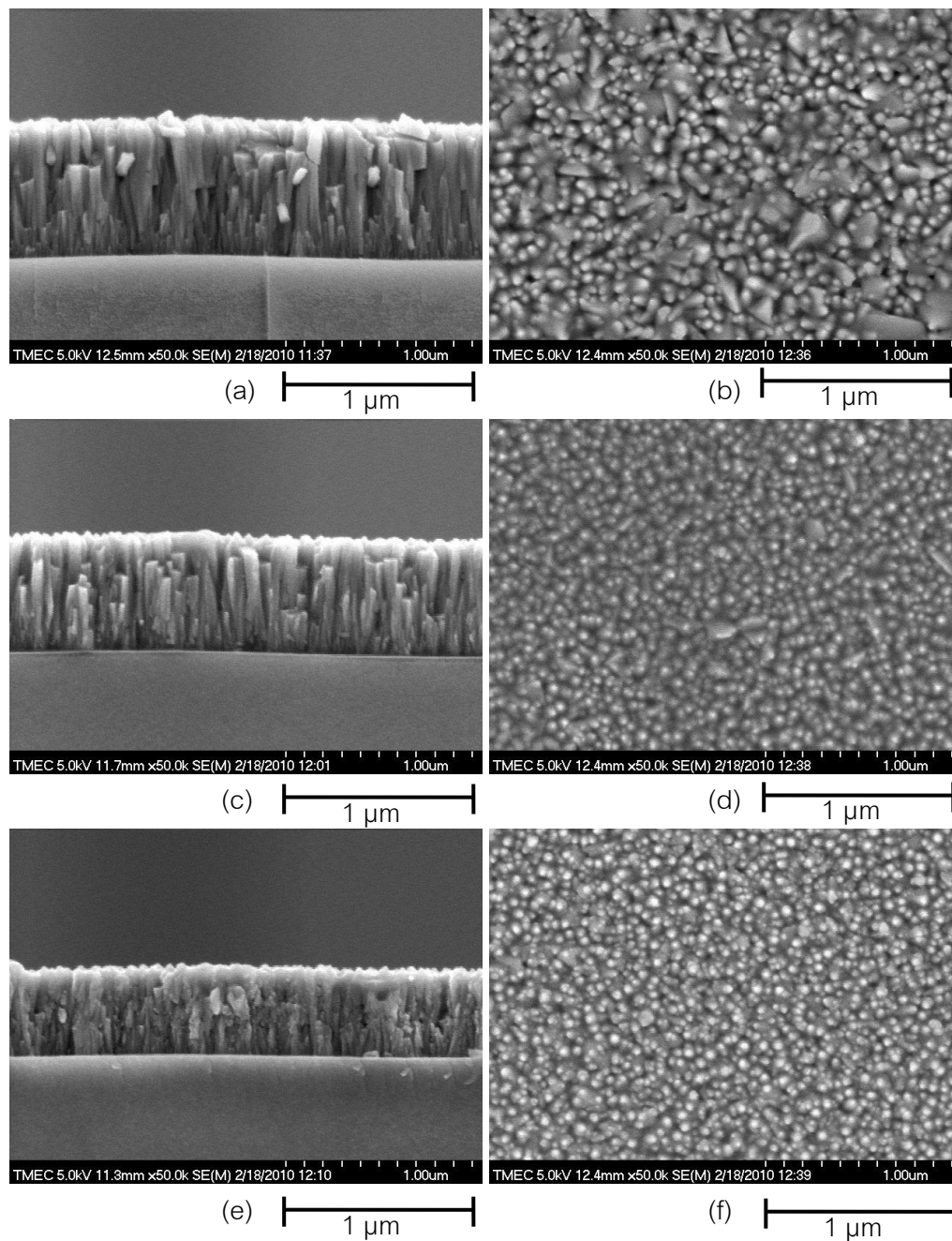
ภาพประกอบ 59 ซึ่งแสดงภาพตัดขวางและพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO เตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดันเป็น 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 30 40 และ 50 W ตามลำดับ พบว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 30 W มีลักษณะบาง เกาะกันอย่างหลวมๆ ไม่เห็นเป็นคอลัมน์นาฬิกาชัดเจน โดยมีความหนา 302 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดเล็กเฉลี่ย 23 nm ดังภาพประกอบ 59 (a) และ (b)

ตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 40 W มีลักษณะเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ มีช่องว่างเล็กๆแทรกในเนื้อฟิล์ม มีความหนา 562 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบกรานูลาร์ เกรนมีขนาดใหญ่ เฉลี่ยประมาณ 67 nm ดังภาพประกอบ 59 (c) และ (d) และตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W มีลักษณะการก่อตัวของฟิล์มเป็นคอลัมน์นาฬิกาที่หนาแน่นและสม่ำเสมอโดยมีความหนา 730 nm ลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบกรานูลาร์ เกรนมีขนาดใหญ่ในช่วงประมาณ 50-150 nm ค่าเฉลี่ยประมาณ 76 nm ดังภาพประกอบ 59 (e) และ (f)

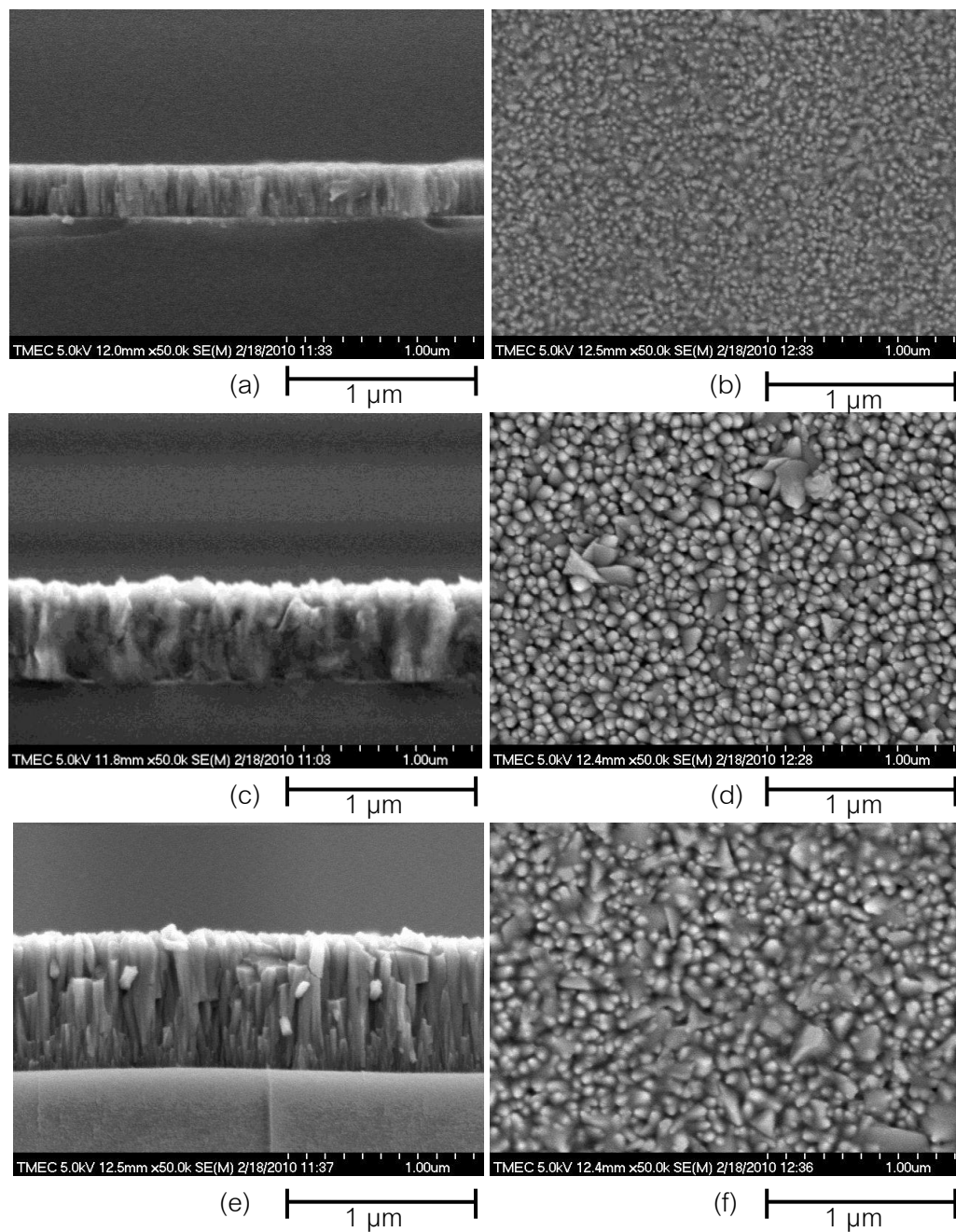
จากการทดลองพบว่ากำลังไฟฟ้ามีผลต่อการก่อตัวของฟิล์มอย่างชัดเจน โดยที่กำลังไฟฟ้าต่ำ ฟิล์มบาง ความหนาแน่นน้อย และเกรนมีขนาดเล็ก เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าฟิล์มจะมีลักษณะเป็นคอลัมน์

นาร์ที่หนาแน่น สม่ำเสมอมากขึ้น และลักษณะพื้นผิวฟิล์มมีโครงสร้างแบบเป็นกรานูลาร์ เกรนมีขนาดใหญ่และชัดเจนมากขึ้น

ภาพจาก SEM แสดงให้เห็นว่าความดันและกำลังไฟฟ้าส่งผลต่อการเติบโตของฟิล์ม สำหรับฟิล์มที่เตรียมด้วยความดันสูงซึ่งมีปริมาณไอออนบวกในพลาสมามาก เมื่อเกิดการสับเตอริงอะตอมที่หลุดจากผิวหน้าเป้าจึงมีโอกาสูญเสียพลังงานจากการชนกับไอออนก่อนตกเคลือบบนแผ่นรองรับ พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบลดลง มีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มกระจัดกระจาย ส่งผลให้มีอัตราการทับถมต่ำและให้โครงสร้างผลึกที่ มีลักษณะคอลัมน์าร์ มีความหนาแน่นน้อย ขณะที่ฟิล์มเตรียมที่กําลังไฟฟ้ามาก อะตอมจะมีพลังงานในการทับถมสูง พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้เคลื่อนที่ได้ทั่วบริเวณผิวที่มีพื้นที่ว่าง ส่งผลให้ได้เกรนขนาดใหญ่ ฟิล์มมีความหนาแน่นสูง



ภาพประกอบ 58 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางและพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย กำลังไฟฟ้า 50 W ระยะห่างระหว่างเป้ากับ แผ่นรองรับ 10 cm ที่ความดัน (a) (b) 3×10^{-2} mbar (c)(d) 7×10^{-2} mbar (e) (f) 1×10^{-1} mbar ตามลำดับ



ภาพประกอบ 59 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย
 ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดันเป็น 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า
 (a)(b) 30 W (c)(d) 40 W และ (e)(f) 50 W ตามลำดับ

4.5 คุณสมบัติของฟิล์มหลังกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก

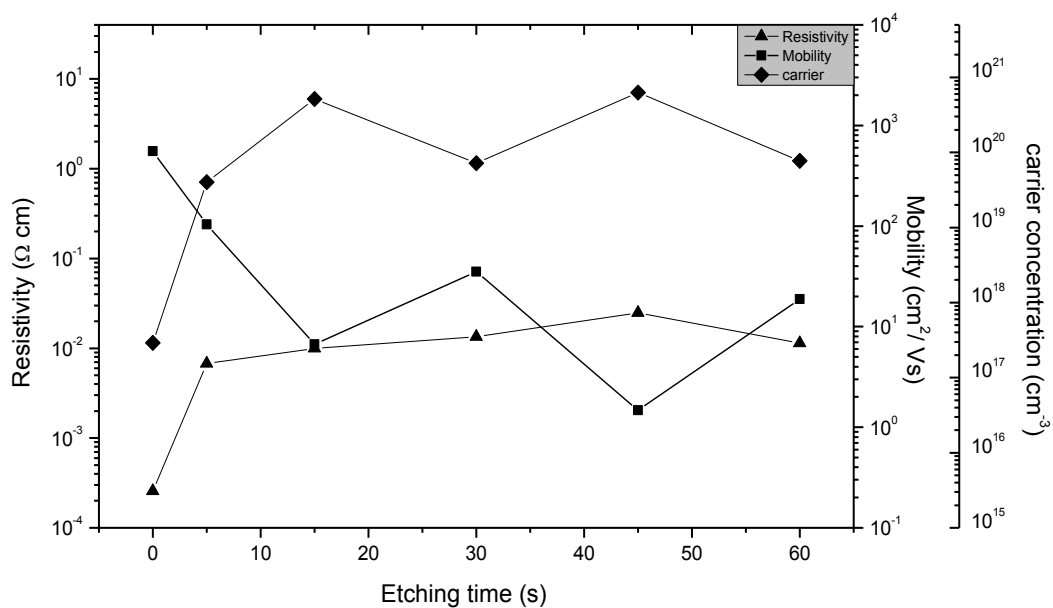
จากผลการทดลองที่ 4.2.2 เมื่อเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar กำลังไฟฟ้า 50 W ซึ่งให้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติดีที่สุด กล่าวคือมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น 2.57×10^{-4} Ω cm และการส่งผ่านแสง 81% จึงนำฟิล์มที่เตรียมด้วยเงื่อนไขนี้ มากัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อเป็นการเพิ่มความขรุขระของผิวหน้าฟิล์ม โดยหลังจากกัดด้วยกรดฟิล์มมีคุณสมบัติดังนี้

4.5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

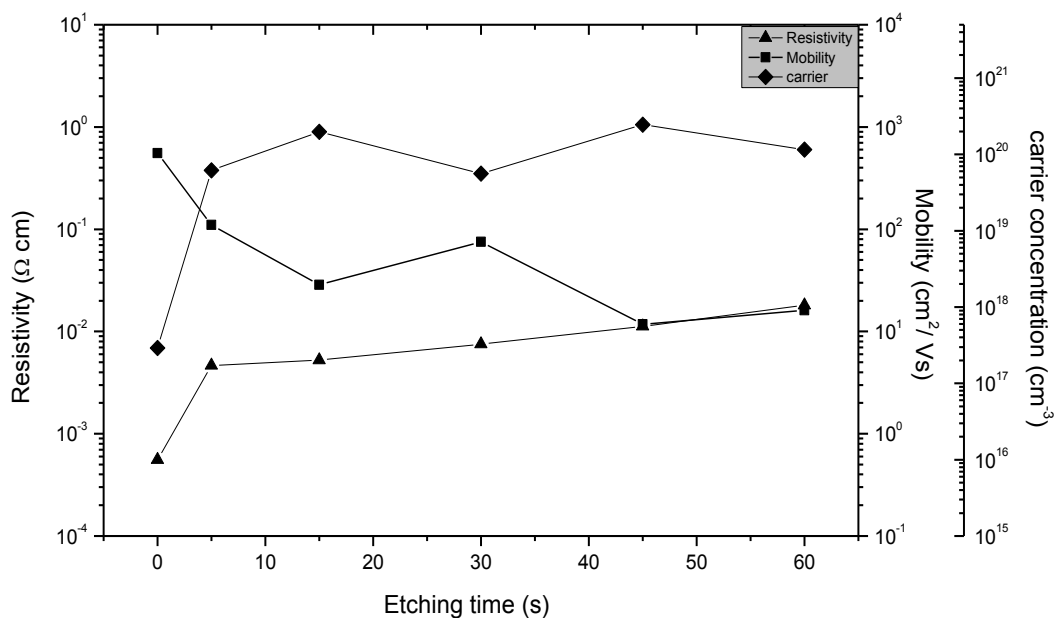
พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05% ดังภาพประกอบ 60 และ 61 ตามลำดับพบว่าทั้งสองกราฟมีลักษณะคล้ายกันคือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อกัดฟิล์มด้วยกรดไฮโดรคลอริกในระยะเวลาที่นานขึ้น โดยค่าความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะซึ่งแปรผกผันกันมีอิทธิพลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งคู่ การเพิ่มเวลาในการกัดฟิล์มด้วยกรดทำให้ความหนาของฟิล์มลดลงดังภาพประกอบ 62 ซึ่งฟิล์มที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05% จะมีอัตราการกัดกร่อน (Etching rate) สูงสุดที่ระยะเวลา 5 s และลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% จะมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าฟิล์มที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% ดังภาพประกอบ 63

4.5.2 คุณสมบัติทางแสง

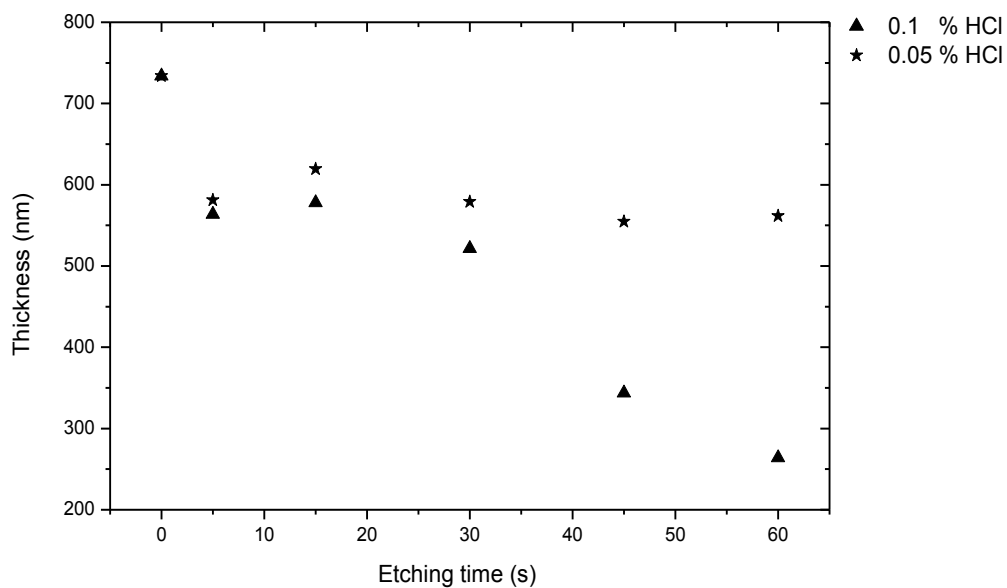
ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่าเฮชของฟิล์ม AIZO หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ด้วยระยะเวลา 5 - 60 s ดังภาพประกอบ 64 โดยสามารถหาค่าเฮชได้จากสมการ 2.45 พบว่าฟิล์มที่กัดด้วยระยะเวลา 5 s จะมีค่าเฮชสูงสุดเป็น 53 % ที่ความยาวคลื่น 800 nm เนื่องจากมีการกระเจิงของแสงมาก ซึ่งจะสัมพันธ์กับลักษณะความขรุขระของพื้นผิวในหัวข้อ 4.5.3 เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นเป็น 0.05% ดังภาพประกอบ 65 พบว่ามีค่าเฮชแนวโน้มใกล้เคียงกันทุกช่วงความยาวคลื่น แม้กระทั่ง ฟิล์มที่กัดด้วยกรดด้วยระยะเวลาต่างๆ โดยมีค่าเฮชอยู่ในช่วง 40 - 55 % ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวของฟิล์มดังภาพประกอบ 66 และ 67



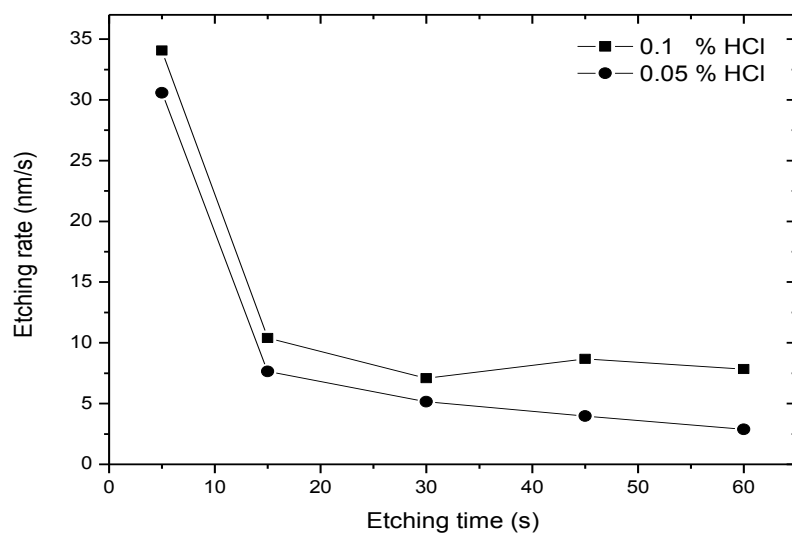
ภาพประกอบ 60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1%



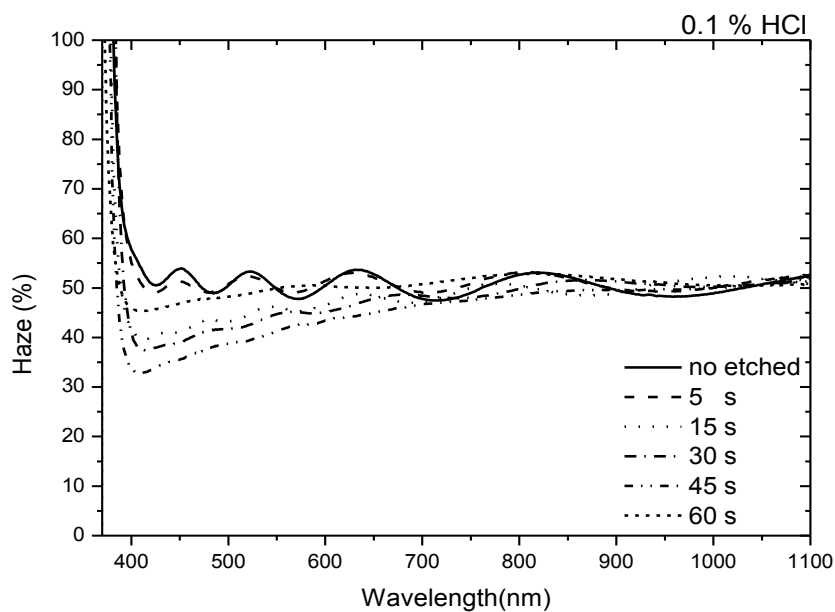
ภาพประกอบ 61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05%



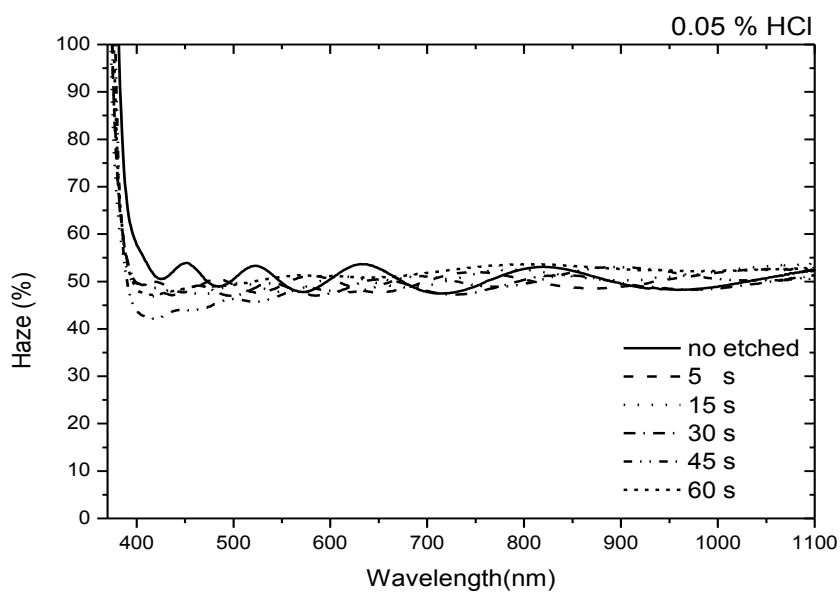
ภาพประกอบ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่อความหนาของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05%



ภาพประกอบ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีต่ออัตราการกัดกร่อนของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05%



ภาพประกอบ 64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่าเฮซของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ด้วยระยะเวลา 5 15 30 45 และ 60 s



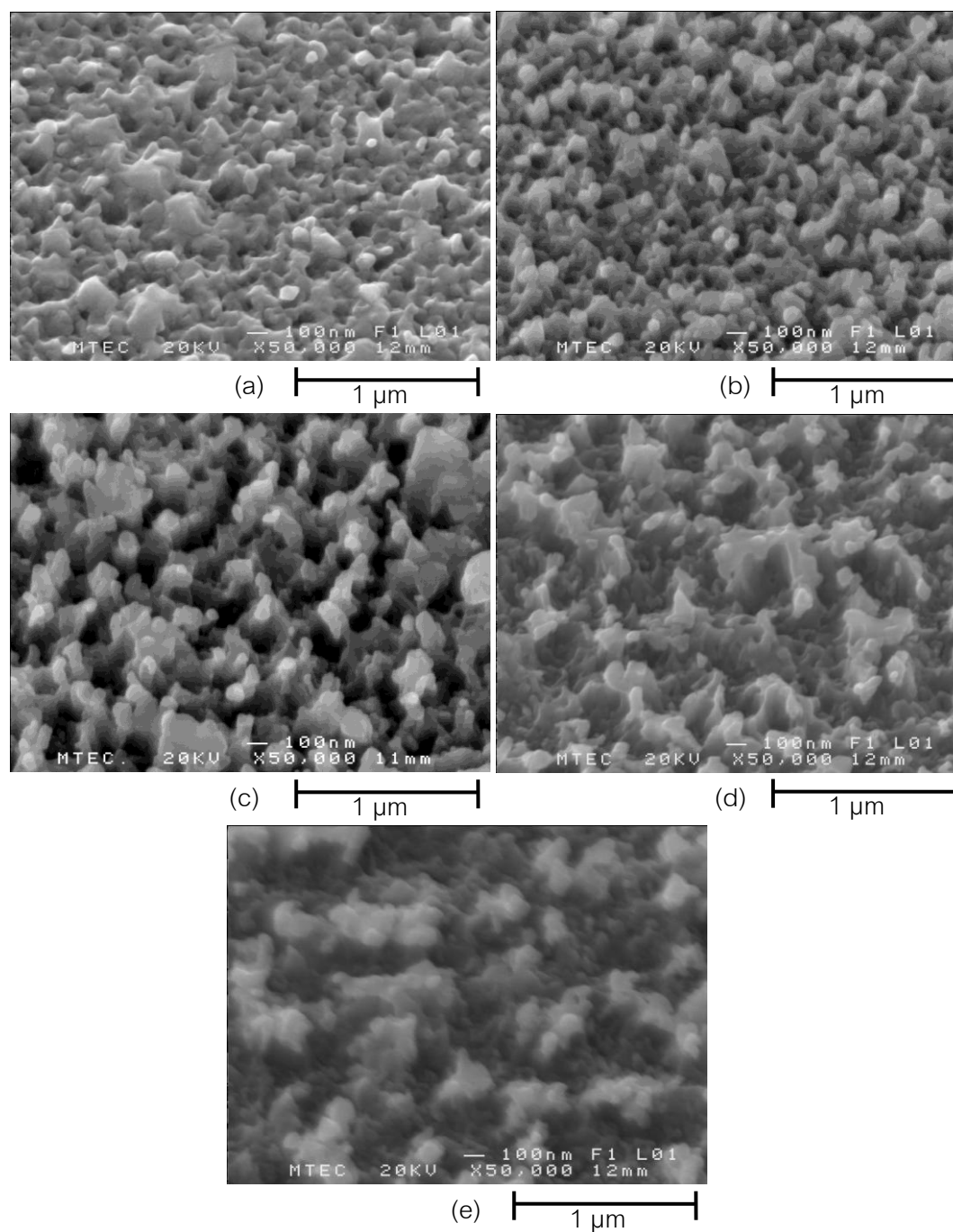
ภาพประกอบ 65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นที่มีต่อค่าเฮซของฟิล์ม AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ด้วยระยะเวลาต่างๆ

4.5.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม

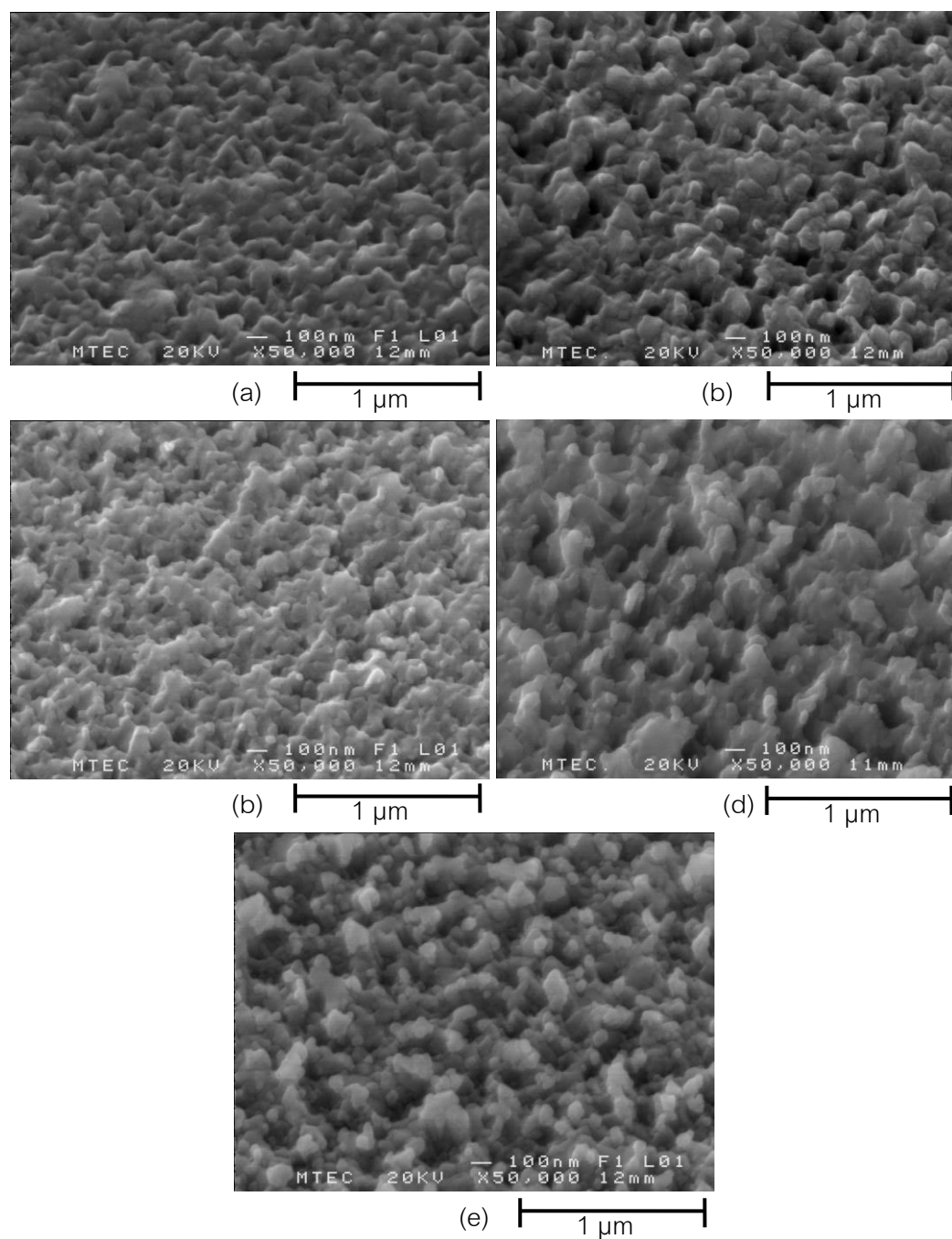
พิจารณาภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วยระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ระยะเวลา 5 - 60 s ดังภาพประกอบ 66 พบว่าฟิล์มกัดด้วยระยะเวลา 5 และ 15 s มีลักษณะเป็นหลุมบ่อขนาดเล็กอยู่ ว่างหนาแน่น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกัดด้วยกรด พบว่าฟิล์มจะมีหลุมขนาดใหญ่มากขึ้นแต่ไม่หนาแน่น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับภาพ SEM ของฟิล์มที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่กัดด้วยกรดระยะเวลาต่าง ๆ นั้น ไม่แตกต่างกันอย่าง ชัดเจน โดยพบว่ามีหลุมบ่อขนาดเล็กและหนาแน่น ดังภาพประกอบ 67 ซึ่งลักษณะความขรุขระนี้จะส่งผลต่อการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบ และสอดคล้องกับผลการทดลองหัวข้อ 4.5.2 คุณสมบัติทางแสง

เนื่องจากฟิล์ม AIZO มีลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ขรุขระ เมื่อกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกพื้นผิวของฟิล์มหลุดออกจนเป็นหลุมขนาดใหญ่ ทำให้มีการกระเจิงแสงน้อย ค่าเฮชที่ได้จึงมีค่าลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม AZO ที่ได้จากการสเป็คเตอรืง ซึ่งมีเนื้อฟิล์มที่ราบเรียบไม่ขรุขระ (T.Tohsophon; et al. 2008: 4628-4632) การกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก จะทำให้พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น กระเจิงแสงได้ดี ค่าเฮชจึงเพิ่มขึ้น

จะเห็นได้ว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอรืง ที่อุณหภูมิห้องนี้ มีคุณสมบัติทางด้านพื้นผิวที่ดี เนื่องจากฟิล์มมีความขรุขระแม้ไม่ได้ทำการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อเพิ่มความขรุขระให้กับพื้นผิวฟิล์ม ฟิล์มที่ได้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส (TCO) ของเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะจะช่วยเพิ่มการกระเจิงและกักเก็บแสงในเซลล์ทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



ภาพประกอบ 66 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AIZO ที่เตรียมด้วย
 ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W
 หลังจากกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% ระยะเวลา (a) 5 s (b) 15 s (c) 30 s
 (d) 45 s (e) 60 s



ภาพประกอบ 67 แสดงภาพถ่าย SEM ของภาพโครงสร้างพื้นผิวฟิล์มบาง AZO ที่เตรียมด้วย
 ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 10 cm ความดัน 3×10^{-2} mbar ด้วยกำลังไฟฟ้า 50 W
 หลังจากกัด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05% ระยะเวลา (a) 5 s (b) 15 s (c) 30 s
 (d) 45 s (e) 60 s

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดลองพบว่าฟิล์มบาง AIZO เตรียมโดย เทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเต อริง จาก เป้าเซรามิกส์ ZnO เจือด้วย Al และ In ในปริมาณ 0.5 wt% ด้วยเงื่อนไขการสเปตเตอริงที่แตกต่างกัน จะให้ฟิล์มที่มีสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแตกต่างกัน โดยสรุปได้ดังนี้

1. ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดัน และกำลังไฟฟ้า มีผลต่อการทับถมและความหนาของฟิล์ม AIZO โดยพบว่าฟิล์มเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ใกล้และความดันขณะสเปตเตอริงต่ำ จะให้การทับถมสูงสุด ส่งผลให้ฟิล์มมีความหนามาก เมื่อระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับและความดันเพิ่มขึ้น ความหนาของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง อันเนื่องมาจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ทำให้มีไอออนของอาร์กอนในพลาสมาเพิ่มขึ้น จึงทำให้อะตอมของเป้าที่ถูกสเปตเตอริงออกมาชนกับไอออนของอาร์กอนในพลาสมาและสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชน และมีพลังงานไม่พอที่จะตกลงบนแผ่นรองรับ จึงทำให้อัตราการทับถมลดลง การเพิ่มระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ จึงเป็นการเพิ่มระยะการเดินทางของไอออนอะตอมของเป้าที่ถูกสเปตเตอริงออก อะตอมดังกล่าวจึงมีโอกาสสูญเสียพลังงานเนื่องจาก การชนมาก ส่งผลให้อัตราการทับถมลดลง ขณะเดียวกัน ฟิล์มที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าสูงกว่าจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งไอออนให้เคลื่อนที่ด้วยพลังงานสูงเมื่อเกิดการชนและถ่ายเทโมเมนตัมกับอะตอมผิวหน้าเป้าจะส่งผลให้อะตอมผิวหน้า เป้ามีพลังงานการเคลื่อนที่สูงขณะตกเคลือบบนแผ่นรองรับ จึงทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนามากกว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยกำลังไฟฟ้าต่ำ

2. ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ ความดันและกำลังไฟฟ้ามีผลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า และลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม โดยที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ 7 cm เมื่อเพิ่มความดันสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง ขณะที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 13 และ 16 cm ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั้งค่าความคล่องตัวของพาหะและความหนาแน่นของพาหะมีอิทธิพลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม การเพิ่มความดันทำให้ มีปริมาณไอออนบวกในพลาสมามาก เมื่อเกิดการสเปตเตอริงอะตอม AIZO ที่หลุดจากผิวหน้าเป้าจึงมีโอกาสสูญเสียพลังงานจากการชนกับไอออนบวกก่อนตกเคลือบบนแผ่นรองรับ พลังงานจลน์ของอะตอม AIZO ลดลง มีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มกระจุกกระจาย ส่งผลให้อัตราการทับถมต่ำและให้โครงสร้างผลึกที่มีลักษณะคอลลอยด์ที่มีความหนาแน่นน้อย ส่งผลให้ฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ขณะที่การเพิ่มกำลังไฟฟ้า อะตอมมีพลังงานในการทับถมมาก พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบเพิ่มขึ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่สูง อะตอมเคลื่อนที่ไปได้ทั่วบริเวณผิวที่มีพื้นที่ว่าง ทำให้ได้ฟิล์มที่มีเกรนขนาดใหญ่ และมีลักษณะเป็นคอลัมน์ารอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ได้สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ

3. ฟิล์ม AIZO ที่มีคุณภาพดีเตรียมได้จากระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับมากกว่า 7 cm โดยมีการส่งผ่านแสงเฉลี่ย 78-93 % ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm ขึ้นกับเงื่อนไขการเตรียมฟิล์ม โดยขอบเขตของการดูดกลืนแสง (Absorption edge) เลื่อนไปทางด้าน UV ซึ่งสอดคล้องกับ ค่าช่องว่างแถบพลังงานในช่วง 3.3-3.65 eV และการเลื่อนขึ้นของช่องว่างแถบพลังงาน นี้ จะช่วยเพิ่มช่วงการส่งผ่านแสงของฟิล์มให้มากขึ้น

4. คุณสมบัติของฟิล์มหลัง กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1% และ 0.05% พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อกัดฟิล์มด้วยกรดไฮโดรคลอริกในระยะเวลาที่นานขึ้น และความหนาของฟิล์มมีค่าลดต่ำลง โดยการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 % มีอิทธิพลต่อฟิล์มในด้านสภาพต้านทานไฟฟ้า ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม และค่าเฮชมากกว่าฟิล์มที่กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.05 % โดยลักษณะความขรุขระของฟิล์มที่ได้จะสัมพันธ์กับค่าเฮช

จากการทดลองพบว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอริงน อุนทุมมิห้องซึ่งให้สภาพต้านทานไฟฟ้า $2.57 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ และค่าการส่งผ่านแสง 81% (400-1100 nm) เมื่อเตรียมที่ระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับเป็น 10 cm กำลังไฟฟ้า 50 W และความดัน 0.03 mbar มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานเป็น ขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส (TCO) ในเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ การส่งผ่านแสงสูงและลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ แม้ไม่ได้กัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยความขรุขระนี้จะช่วยเพิ่มการกระเจิงและกักเก็บแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กมล เขียมพนาภิจ. (2547). การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นที่ให้การปลดปล่อยรังสีต่ำของเงิน-ไททาเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีสเปกเตอร์. ปรินูญานินพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- เกษรรัตน์ อักษรรัตน์. (2545). ฟิล์มบางโปร่งใสในไฟฟ้า ZnO(Al) เตรียมโดยอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสเปกเตอร์แบบตามลำดับ. ปรินูญานินพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์. ถ่ายเอกสาร.
- พรรณทิพย์ ตั้งปริยารักษ์. (2551). เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง. สืบค้นเมื่อ 12 กุมภาพันธ์ 2553, จาก <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm>
- มติ ห่อประทุม. (2548). การศึกษาฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โดยการเตรียมด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปกเตอร์. ปรินูญานินพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- แมน อมรสิทธิ์; และ สมชัย อัครทิวา. (2529). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: ท็อป.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC). (2547). พจนานุกรมศัพท์ วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค).
- สายัณห์ ผุดวัฒน์. (2547). การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นที่ให้การปลดปล่อยรังสีต่ำของเงิน-ซิงค์ออกไซด์ โดยวิธีสเปกเตอร์. ปรินูญานินพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (Solartec). (2548). โครงการวิจัยและพัฒนากระจกเคลือบขั้วโปร่งใสในไฟฟ้า. หน้า 1-2. สืบค้นเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2553, จาก http://www.solartec.or.th/file-stock/stock_2_270893.pdf
- อ้อมตะวัน แสงจักรวาล. (2552). อิทธิพลของกรดสเตียริก และโพลิเมทิลเมทาไครเลต ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม. ปรินูญานินพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Abeles, F. (1972). *Optical Properties of Solids*. Natherland: North-Holland.
- Blood, P.; & Orton, J.W. (1992). *The Electrical Charecterization of Semiconductor, Majority Carriers and Electron States*. London: Acadedmic Press.
- Bunshah, R.F; et al. (1982). *Deposition Technologies for Films and Coatings*. Development and Applications. New Jersey: Noyes Publications.

- Burag Yaglioglu; et al. (2006). *A study of amorphous and crystalline phases in In₂O₃–10 wt.% ZnO thin films deposited by DC magnetron sputtering*. Thin Solid Films. 496(2006): pp. 89-94.
- C. Guillen; & J. Herrero. (2008). *Transparent and conductive ZnO:Al thin films grown by pulsed magnetron sputtering in current or voltage regulation modes*. Vacuum. 82(2008): pp. 668-672.
- Chapman, B. (1980). *Glow discharge processes, Sputtering and plasma etching*. John Wiley & Son.
- Do-Geun Kim; et al. (2008). *Temperature dependence of the microstructure and resistivity of indium zinc oxide films deposited by direct current magnetron reactive sputtering*. Thin Solid Films. 516(2008): pp. 2045-2049.
- Hartnagel H. L.; et al. (1996). *Semiconducting Transparent Thin Films*. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.
- Hyungduk Ko; et al. (2005). *Growth of Al-doped ZnO thin films by pulsed DC magnetron sputtering*. Journal of Crystal Growth. 277(2005): pp. 352-358.
- Ian J. McColm. (1994). *Dictionary of Ceramic Science and Engineering*. p. 155. New York: Plenum Press.
- Images scientific instruments. (2007). *The four point electrical probe*. Retrieved February 12, 2010, from <http://www.imagesco.com/articles/superconductors/four-point-electrical-probe.html>
- Jeong Chul Lee; et al. (2000). *RF sputter deposition of the high-quality intrinsic and n-type ZnO window layers for Cu(In, Ga)Se₂-based solar cell applications*. Solar Energy Materials and Solar Cells. pp. 185-195.
- Ji Bong Park; SeHun Park; & Pung Keun Song. (2010). *Electrical and structural properties of In-doped ZnO films deposited by RF super imposed DC magnetron sputtering system*. Journal of Physics and Chemistry of Solids. 71(2010): pp. 669-672.
- Johnson, E.J. (1967). *Semiconductor and Semimetal*. USA: Academic Press.
- Jyh-Ming Ting; & B.S. Tsai. (2001). *DC reactive sputter deposition of ZnO:Al thin film on glass*. Materials Chemistry and Physics. 72(2001): pp. 273-277.

- L.P.Peng; et al. (2009). *Characteristics of ZnO : In thin films prepared by RF magnetrons sputtering*. Physica E. 41(2009): pp. 1819-1823.
- Lifshin, Eric. (1993). *Concise Encyclopedia of Materials Characterization*. Oxford: Pergamon press.
- Madedlung, O. (1992). *Semiconductor Group IV Element and III-V Compound*. n.p. :Springer-Verlag.
- Milton Ohring. (1997). *The Materials Science of Thin Films*. Thin Film Technology Handbook: McGraw-Hill Companies international.
- N. Senoussaoui; et al. (2000). *Optical Properties of Microcrystalline Thin Film Solar Cells*. pp. 49-56. Germany.
- Oliver Kluth; et al. (2006). *Comparative material study on RF and DC magnetron sputtered ZnO:Al films*. Thin Solid Films. 502(2006): pp. 311-316.
- Robert, M.R. (1966). *The Structure and Properties of Materials*. New York: John Wiley & Son.
- Shang-Chou Chang; & Ming-Hua Shiao. (2007). *Smooth indium zinc oxide film prepared by sputtering a $In_2O_3:ZnO = 95:5$ target*. Microelectronic Journal. 38(2007): pp.1202-1206.
- Smith, D.L. (1995). *Thin Film Deposition. Principle and Practice*. New York: McGraw-Hill Companies international.
- Streetman, Ben G. (1995). *Solid State Electronic Devices*. New jersey: Prentice-Hall international.
- T.Tohsophon; et al. (2008). *High rate direct current magnetron sputtered and texture-etched zinc oxide films for silicon thin film solar cells*. Thin Solid Films. 516(2008): pp. 4628-4632.
- Veeco instruments. (2006). *Dektak 150*. Retrieved February 12, 2010, from http://www.veeco.com/pdfs/database_pdfs/B509%20Dektak150%20_281.pdf
- Vossen, J.L.; & Kerns W. (1978). *Thin Film Processes*. New York: Academic Press.

Young Soo Song; et al. (2004). *Influence of process parameters on the characteristics of indium zinc oxide thin films deposited by DC magnetron sputtering*. Thin Solid Films. 467(2004): pp. 117-120.

Zhengwei Li; & W. Gao. (2004). *ZnO thin films with DC and RF reactive sputtering*. Materials Letters. 58(2004): pp. 1363-1370.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวนันท์นัช วัฒนสุภิญโญ
วันเดือนปีเกิด	17 ธันวาคม 2527
สถานที่เกิด	กิ่ง อ.เหล่าเสือโก้ก จ.อุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	231 หมู่ 2 ต.เหล่าเสือโก้ก กิ่ง อ.เหล่าเสือโก้ก จ.อุบลราชธานี
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2545	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนปทุมพิทยาคม จ.อุบลราชธานี
พ.ศ. 2549	วท.บ. (สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2553	วท.ม. (สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ