

ฟิล์มบางโปร่งใสนำไฟฟ้า ZnO(AI) เตรียมโดยอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบตามลำดับ



นางสาวเกษรรัตน์ อักษรรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-172-138-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRANSPARENT CONDUCTING ZnO(AI) THIN FILMS DEPOSITED BY SEQUENTIAL RF AND DC
MAGNETRON SPUTTERING

MissKessarat Ugsornrat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Faculty of Sciences

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-172-138-2

เกษรวรัตน์ อักษรรัตน์ : फिल्मบางโปร่งใสนำไฟฟ้า ZnO(AI) เตรียมโดยอาร์เอฟและดีซีแมก
 นิตรอนสปัตเตอริงแบบตามลำดับ. (TRANSPARENT CONDUCTING ZnO(AI) THIN
 FILMS DEPOSITED BY SEQUENTIAL RF AND DC MAGNETRON SPUTTERING) อ.ที่
 ปรีक्षा : ผศ.ดร. ขจรยศ อยู่ดี, อ.ที่ปรีक्षाร่วม : อ.ดร.โคจพิงศ์ ฉัตรภรณ์ จำนวนหน้า 94
 หน้า. ISBN 974-172 -138 -2.

ฟิล์มบาง ZnO(AI) ชนิดสองชั้นเตรียมขึ้นบนวัสดุรองรับกระจกโซดาไลม์พื้นที่ 5x6 ตาราง
 เซนติเมตร กระจกที่ 1 เตรียมโดยการสปัตเตอร์เป้า Zn และเป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) พร้อมกัน ตาม
 ด้วยการสปัตเตอร์เป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนิตรอนสปัตเตอริง (Zn-added-ZnO
 (Al)/ZnO(AI)) และกระจกที่ 2 เตรียมโดยการสปัตเตอร์เป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนิตร
 ออนสปัตเตอริง ตามด้วยการสปัตเตอร์เป้า Zn และเป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) พร้อมกัน (ZnO(AI)/Zn-
 added-ZnO(AI)) และเลือกสภาวะของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นที่มีสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิง
 แสง และโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับ ความหนาของ
 ฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เปลี่ยนแปลงจาก 0 เปอร์เซ็นต์ถึง 100 เปอร์เซ็นต์เป็นช่วง ช่วงละ 20
 เปอร์เซ็นต์โดยความหนาของฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับทั้งหมดคงที่ 3000 อังสตรอม สมบัติทาง
 ไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง และโครงสร้างของฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับศึกษาโดยการวัดปรากฏ
 การฮอลล์ การส่งผ่านแสง และการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ตามลำดับ พบว่าฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 9 ชั้น
 สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดมีค่า 5.60×10^{-4} โอห์ม-เซนติเมตร การส่งผ่านแสงสูงสุดซึ่งสูงกว่า 90%
 ในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตรและรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มที่ได้แสดงแกน
 c ของผลึกเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกลุ่มซิงค์ออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....ฟิสิกส์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....ฟิสิกส์.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรีक्षा.....
 ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรีक्षाร่วม.....

4272221523 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: ZnO / ZnO(Al) / TRANSPARENT CONDUCTING THIN-FILM / SPUTTERING / SOLAR CELL

KESSARARAT UGSORNARAT : THESIS TITLE. (TRANSPARENT CONDUCTING ZnO(Al) THIN FILMS DEPOSITED BY SEQUENTIAL RF AND DC MAGNETRON SPUTTERING)
 THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF KARJORN YOD YOODER, PH.D, THESIS COADVISOR : SOJIPHONG CHATRAPHORN, PH.D , 94 pp. ISBN 974-172 -138-2.

The bilayer ZnO(Al) thin films were grown on $5 \times 6 \text{ cm}^2$ soda lime glass substrates. In case 1, the Zn target and ZnO(Al_2O_3 2.5 wt%) target were co-sputtered, then followed by rf-magnetron sputtering of ZnO(Al_2O_3 2.5 wt%) target (Zn-added-ZnO(Al)/ZnO(Al)). In case 2, the first layer started by rf-magnetron sputtering of ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) followed by co-sputtering of Zn target and ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) target (ZnO(Al)/Zn-added-ZnO(Al)). The growth conditions of the ZnO(Al) bilayer films with the best electrical, optical and structural properties were chosen for the growth of sequentially layered ZnO(Al) thin films. The total thickness of the sequentially layered ZnO(Al) films were kept at 3000 Å, while varying the thickness of the Zn-added-ZnO(Al) layer from 0-100% with a step of 20% increment . The obtained sequentially layered ZnO(Al) films were characterized by Hall measurement, optical transmission measurement and X-ray diffraction for its electrical, optical and structural properties, respectively. It was found that the films with 9 sequential layers yielded the minimum resistivity of about $5.60 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ and maximum transmission higher than 90% in the 400-1000 nm range, accordingly. The XRD pattern also showed a c-axis preferred orientation compared to the bulk ZnO.

Department.....Physics.....Student's signature.....

Field of study.....Physics.....Advisor's signature.....

Academic year.....2002.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถของท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี และอาจารย์ ดร.โคจิพงศ์ ฉัตรภรณ์ ที่ได้ให้คำแนะนำติดตามและควบคุมงานวิจัยอย่างใกล้ชิดรวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์ อีกทั้งอาจารย์ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตรภรณ์ ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการวิจัย และอาจารย์ พงษ์ ทรงพงษ์ ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับวิชาการด้านฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวรรณบ แดงงาม เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ซึ่งให้ความช่วยเหลือตลอดที่ได้ทำงานอยู่ที่ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณศรีไฉล ขุนทน สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง

ในขณะที่ศึกษาอยู่ผู้เขียนได้รับการอนุเคราะห์ทุนการศึกษาจากโครงการพัฒนาอาจารย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณจามรี อมรโกศลพันธ์ สำหรับความรู้ในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณเฉลิมวัฒน์ วงศ์วานิชวัฒนา นิสิตปริญญาโทมหาบัณฑิตที่ให้ความช่วยเหลือตลอดการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ ผู้เขียนกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้โอกาสในการศึกษาและคำแนะนำที่ดีเสมอมา และขอขอบคุณครอบครัววักขรรัตน์ทุกคนและคุณสุภัทร์ พรหมทองสำหรับความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีสปต์เตอริง	4
2.1 ดีซีโกลวดิสซาร์จสปต์เตอริง	4
2.2 อาร์เอฟสปต์เตอริง	9
2.3 สภาพโกลวดิสซาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก.....	14
2.3.1 สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวแคโทด	14
2.3.2 สนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวแคโทด	15
2.4 การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปต์เตอริง	17
2.4.1 หลักการเบื้องต้น	17
2.4.2 ระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการสปต์เตอริง	18
2.4.3.โครงสร้างระบบเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปต์เตอริง	18
2.4.4 การสปต์เตอริ่งเป้าที่เป็นสารประกอบและการก่อตัวเป็นฟิล์ม	20
บทที่ 3 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	22
3.1 สมบัติทางไฟฟ้า	22
3.1.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่าย	22
3.1.2 สภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะ	24
3.1.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว	24
3.1.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	26
3.1.5 สมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ชนิดหลายชั้นจากเป้า ZnO(Al) (doped 2 ⁰ wt Al ₂ O ₃) และ Zn	31
3.2 สมบัติเชิงแสง	33
3.2.1 สมบัติการดูดกลืนแสง	34

สารบัญ (ต่อ)

3.2.2 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	36
3.3 โครงสร้างผลึก	37
3.3.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์	37
3.3.2 กฎของแบรกก์	38
บทที่ 4 การดำเนินการทดลอง	41
4.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	41
4.2 การเตรียมวัสดุรองรับ	41
4.3 การสเปคเตอร์เคลือบฟิล์ม	43
4.3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอน สเปคเตอรिंग	43
4.3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) โดยวิธี co-sputterin	45
4.3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอน สเปคเตอรिंगแบบตามลำดับ	46
4.4 การวัดสมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์	49
4.4.1 การวัดความหนาของฟิล์ม	49
4.4.2 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม	51
4.4.3 การวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์ม	55
4.4.4 การหาโครงสร้างผลึกของฟิล์ม	56
บทที่ 5 ผลการทดลอง	58
5.1 สมบัติของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ด้วยวิธีการสเปคเตอรिंगพร้อมกัน	59
5.1.1 สมบัติทางไฟฟ้า	59
5.1.2 สมบัติเชิงแสง	59
5.1.3 โครงสร้างผลึก	59
5.2 สมบัติของฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดสองชั้น	63
5.2.1 สมบัติทางไฟฟ้า	64
5.2.2 สมบัติเชิงแสง	66
5.2.3 โครงสร้างผลึก	68
5.3 สมบัติของฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดหลายชั้น	73
5.3.1 สมบัติทางไฟฟ้า	73

สารบัญ (ต่อ)

5.3.2 สมบัติเชิงแสง	74
5.3.3 โครงสร้างผลึก	76
บทที่ 6 อภิปรายและสรุปผลการทดลอง.....	88
รายการอ้างอิง	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	94



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 รูปแบบของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	52
ตารางที่ 4.2 รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ขณะไม่มีสนามไฟฟ้า	52
ตารางที่ 4.3 รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ขณะมีสนามแม่เหล็ก -B	52
ตารางที่ 4.4 รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ขณะมีสนามแม่เหล็ก +B	53



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่ 2.1 ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จสปีดเตอริง	4
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของระบบ ดีซีโกลวดิสชาร์จ	6
รูปที่ 2.3 เส้นโค้งพาสเซนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฟงทลายของแก๊ส กับความดันในหน่วยทอริที่ระยะ d เซนติเมตร	7
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของดีซีโกลวดิสชาร์จขณะที่สามารถรักษาสภาพการดีสชาร์จ ได้เอง	8
รูปที่ 2.5 การป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสลับให้กับสภาพโกลวดิสชาร์จ	10
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของสภาพโกลวดิสชาร์จความถี่สูง	10
รูปที่ 2.7 รูปคลื่นความต่างศักย์และกระแสของเป้า เมื่อวงจรรูปที่ 2.6 ถูกป้อนด้วยคลื่น ศักย์ไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม	11
รูปที่ 2.8 รูปคลื่นความต่างศักย์ ที่แหล่งกำเนิด (V_a) และที่เป้า (V_b) เมื่อวงจรรูปที่ 2.7 ถูกป้อนด้วยคลื่นศักย์ไฟฟ้ารูปไซน์	12
รูปที่ 2.9 การไบแอสตัวเองของเป้าที่เป็นฉนวน	13
รูปที่ 2.10 วงจรแมชซิงในระบบอาร์เอฟสปีดเตอริง	14
รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กในสภาพโกลวดิสชาร์จ	16
ก. บริเวณ cathode dark space	
ข. บริเวณ negative glow	
รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กที่คัพเข้าสู่กระดาศบริเวณ ผิวหน้าแคโทด	16
ก. ไม่มีสนามไฟฟ้า	ข.
มีสนามไฟฟ้าที่คัพเข้าสู่ผิวหน้าแคโทด	
รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการสปีดเตอริง	17
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไอออนโมเลกุลคู่ (MO^+/M^++MO^+) กับพลังงาน ยึดเหนี่ยวระหว่าง พันธะของโลหะออกไซด์	21
รูปที่ 3.1 การวัดสภาพนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A ของอิเล็กตรอนอิสระ ในของแข็ง	23
รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวอย่าง	25

รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ f และค่า $\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$	26
รูปที่ 3.4 การวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์	27
รูปที่ 3.5 แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	37
รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite Structure ของซิงค์ออกไซด์	38
รูปที่ 3.7 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์	39
รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	42
รูปที่ 4.2 วัสดุรองรับ (soda lime glass) ขนาดกับเป้า ZnO(Al ₂ O ₃ 2.5wt%)	45
ก. ด้านบน	
ข. ด้านข้าง	
รูปที่ 4.3 พิล์ม ZnO(Al) ชนิดสองชั้นโดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง แบบตามลำดับ	47
ก. กรณีที่ 1 (Zn-added-ZnO(Al)/ZnO(Al))	
ข. กรณีที่ 2 (ZnO(Al)/Zn-added-ZnO(Al))	
รูปที่ 4.4 พิล์ม ZnO(Al) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบตามลำดับ	48
ก. พิล์ม ZnO(Al) ชนิด 3 ชั้น	
ข. พิล์ม ZnO(Al) ชนิด 5 ชั้น	
ค. พิล์ม ZnO(Al) ชนิด 7 ชั้น	
ง. พิล์ม ZnO(Al) ชนิด 9 ชั้น	
รูปที่ 4.5 การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคโทลานสกี	49
รูปที่ 4.6 รั้วการแทรกสอดของฟิล์ม	50
รูปที่ 4.7 แผนผังระบบการวัดสภาพเคลือบที่ได้ของฮอลล์	51
รูปที่ 4.8 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV 2501(PC), Shimadzu	55
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO	56
ก. สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO	
ข. กราฟของ $(\alpha h\nu)^2$ และพลังงานของโฟตอน ($h\nu$) ซึ่งจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากส่วนตัดแกนของพลังงานโฟตอนโดยการประมาณค่า	
รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จาก ZnO	57
รูปที่ 5.1 สมบัติทางไฟฟ้ากับกระแสดีซีในการสปัตเตอริงของฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al)	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสเปกโตรสโกปี 8×10^{-3} มิลลิบาร์
 กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ 60

ก. สภาพต้านทานไฟฟ้า
 ข. สภาพเคลือบที่ได้ของฮอลล์
 ค. ความเข้มข้นของพาหะ

รูปที่ 5.2 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่มีกระแสดีซีในการสเปกโตรสโกปี
 0 mA, 10 mA และ 30 mA ตั้งแต่ ความดันแก๊สอาร์กอน 8×10^{-3} mbar
 กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ 61

รูปที่ 5.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่มีกระแสดีซีตั้งแต่
 0 mA, 10 mA และ 30 mA ความดันแก๊สอาร์กอน 8×10^{-3} mbar กำลังไฟฟ้า
 100 วัตต์ 62

รูปที่ 5.4 ฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดสองชั้น 63

รูปที่ 5.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม
 Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% 65

. สภาพต้านทานไฟฟ้า
 . สภาพเคลือบที่ได้ของฮอลล์
 ค. ความเข้มข้นของพาหะ

รูปที่ 5.6 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้น ในกรณีที่ 1 (Zn- added-ZnO(AI)
 /ZnO(AI)) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI)
 ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% 68

รูปที่ 5.7 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้น ในกรณีที่ 2 (ZnO(AI)
 /Zn-added-ZnO(AI)) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่
 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%..... 69

รูปที่ 5.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้น ในกรณีที่ 1
 (Zn-added-ZnO(AI) /ZnO(AI)) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI)
 ตั้งแต่ 0 %,20%, 40%, 60%, 80% และ 100 71

รูปที่ 5.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้น ในกรณีที่ 2
 (ZnO(AI) /Zn-added-ZnO(AI)) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI)
 ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%/ , 80% และ 100% 72

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.10 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิดหลายชั้นที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added- ZnO(Al) ตั้งแต่ 0%, 20 %, 40%, 60%, 80% และ 100%	75
. สภาพต้านทานไฟฟ้า	
. สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์	
. ความเข้มข้นของพาหะ	
รูปที่ 5.11 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 3 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน	78
รูปที่ 5.12 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 5 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน	79
รูปที่ 5.13 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 7 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน	80
รูปที่ 5.14 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 9 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน	81
รูปที่ 5.15 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) 20% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน	82
รูปที่ 5.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 3 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน	83
รูปที่ 5.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 5 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน	84
รูปที่ 5.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 7 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 9 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน 86

รูปที่ 5.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) 20% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ก่อน 87



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.3 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) โครงสร้างผลึกของ ZnO เป็นแบบ hexagonal closed pack (hcp) สองโครงสร้างซ้อนกัน เรียกว่า wurzite structure มีค่าคงที่ผลึก $a = 3.235 \text{ \AA}$ และ $c = 5.213 \text{ \AA}$ [1]

ซิงค์ออกไซด์เป็นที่รู้จักและใช้ในอุตสาหกรรมมาเป็นเวลาพอสมควร [2] โดยเฉพาะในรูปแบบของออกไซด์ที่โปร่งใสและนำไฟฟ้า (transparent conducting oxide (TCO)) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้งานกับเครื่องมือประเภทโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) และได้รับการยอมรับในการนำมาใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) เนื่องจากมีสมบัติเหมาะสม ราคาถูก และปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นหน้าต่างรับแสงเป็น ZnO ประสิทธิภาพสูงถึง 18% [3] การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดังกล่าวจึงเป็นวัตถุประสงค์ส่วนหนึ่งในงานวิจัยนี้ เพื่อสนับสนุนโครงการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง CIGS ของห้องปฏิบัติการฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [4]

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น reactive evaporation, RF และ DC sputtering, ion beam sputtering, chemical vapour deposition และ spray pyrolysis [5] ในปี 1998 K. Tominaga และคณะ [6] ได้รายงานผลการเตรียมฟิล์มบาง ZnO (Al) เป็นชั้นๆ ตามลำดับโดยการแบ่งเป็นชั้นฟิล์ม ZnO(Al) จากการสปัตเตอร์เป้า ZnO(Al₂O₃ 2wt%) และ ชั้นฟิล์ม ZnO(O_v) จากการสปัตเตอร์เป้า Zn สลับกัน ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ฟิล์มบาง ZnO(Al) ที่เตรียมได้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า 2.5×10^{-4} โอห์ม-เซนติเมตรและการส่งผ่านแสงสูงประมาณ 90% ในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปเป็นชั้นหน้าต่างรับแสงที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำและมีความโปร่งใสของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับพลังงานโฟตอนของแสงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว ซึ่งมากพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band) กระโดดไปยังแถบนำ (conduction band) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่ออวิวิธพันธ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (CIGS/CdS heterojunction) เป็นผลทำ

ให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรภายนอก ซึ่งการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) โดยวิธีดังกล่าวจะให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าวิธีอาร์เคฟสปัตเตอริงเพียงอย่างเดียว และในวิทยานิพนธ์นี้ได้เตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) แบบเป็นชั้นๆ ตามลำดับเช่นกันแต่แตกต่างจากงานของ K. Tominaga และคณะ คือ เตรียมฟิล์มโดยแบ่งเป็นชั้นฟิล์ม ZnO(AI) โดยการสปัตเตอริงเป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) และชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) โดยการสปัตเตอริงเป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) และเป้า Zn พร้อมกัน ซึ่งคาดว่าจะให้ฟิล์มที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำและโปร่งใส

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โปร่งใสและนำไฟฟ้าแบบเป็นชั้นๆ ตามลำดับโดยการสปัตเตอริงเป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) โดยวิธีอาร์เคฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง และสปัตเตอริงเป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) และเป้าสังกะสี (Zn) โดยวิธีการสปัตเตอริงพร้อมกัน (co-sputtering)
2. วัดและวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มและอธิบายถึงสมบัติดังกล่าวด้วยแบบจำลองความเข้มข้นของพาหะในฟิล์มชนิดหลายชั้น ZnO(AI) และ Zn-added-ZnO(AI)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลของฟิล์ม ZnO(AI) ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำและการส่งผ่านแสงสูงบนพื้นที่ขนาดโตเมื่อเทียบกับขนาดของเป้า เพื่อให้เหมาะสมสำหรับเป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองการนำไฟฟ้าของพาหะที่เคลื่อนที่ในฟิล์มบางสองชนิด ที่มี ความเข้มข้นของพาหะต่างกัน [6]
2. เตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เคฟสปัตเตอริงจากเป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%)
3. เตรียมฟิล์มบาง Zn-added-ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เคฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบพร้อมกัน (co-sputtering) จากเป้า Zn และเป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) และแปรค่ากระแสดีซี
4. วัดและวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้า สมบัติเชิงแสงและโครงสร้างผลึก

5. เตรียมฟิล์มบาง ZnO(Al) จากเป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) และ Zn+ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) แบบตามลำดับ
6. วัดและวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง และโครงสร้างผลึก
7. อธิบายสมบัติของฟิล์มจากแบบจำลองความเข้มข้นของพาหะในสองชั้น ของฟิล์ม ZnO(Al) และ Zn-added-ZnO(Al)
8. สรุปผลการทดลองและเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีการสเปกตรัมซึ่งจะกล่าวถึงดีซีโกลวดิสซาร์จสเปกตรัม อาร์เอฟสเปกตรัม สภาพโกลวดิสซาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก และการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการสเปกตรัม บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม คือ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง และโครงสร้างผลึก ส่วนบทที่ 4 เป็นวิธีการดำเนินการทดลอง การเตรียมวัสดุรองรับ การสเปกตรัมเคลือบฟิล์ม และการวัดสมบัติของฟิล์ม บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลอง และบทที่ 6 เป็นการอภิปรายและสรุปผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

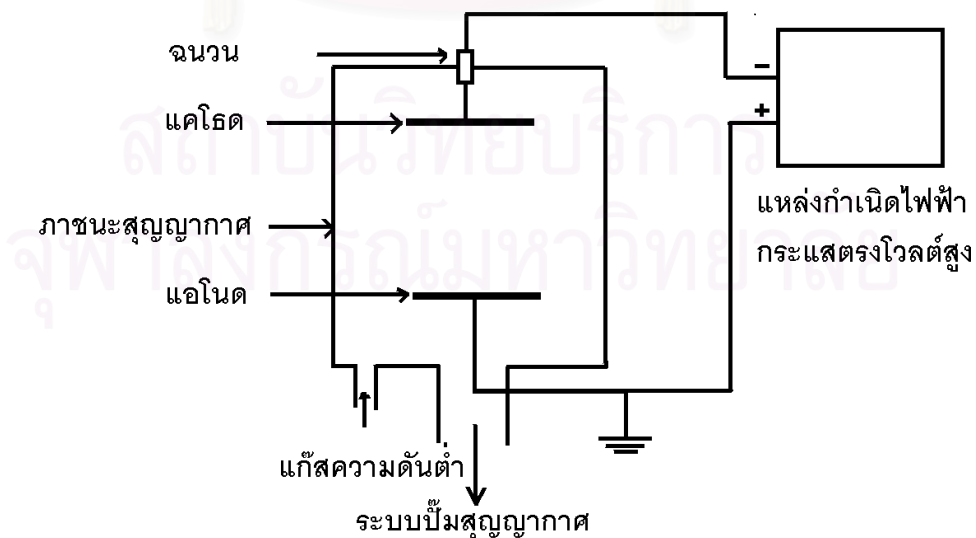
บทที่ 2

ทฤษฎีสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางโดยกระบวนการสปัตเตอริง ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาพโกลวดิสชาร์จเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบหนึ่งที่ได้รับการใช้งานอย่างกว้างขวาง ในบทนี้ได้นำเสนอการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดีซีโกลวดิสชาร์จสปัตเตอริง อาร์เอฟสปัตเตอริง และสภาพโกลวดิสชาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก และได้กล่าวถึงการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงด้วย

2.1 ดีซีโกลวดิสชาร์จสปัตเตอริง (DC-Glow Discharge Sputtering)

ดีซีโกลวดิสชาร์จสปัตเตอริงเป็นวิธีการสปัตเตอริงที่ง่ายที่สุด แต่มีข้อจำกัด คือสามารถสปัตเตอริงเป้าที่เป็นโลหะได้เท่านั้น ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.1 จะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าสองขั้ว คือ ขั้วแคโทด (cathode) และแอโนด (anode) วางขนานกันในภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) ซึ่งบรรจุแก๊สความดันต่ำ เช่น อาร์กอน นีออน ซีนอน คริปทอน หรือเป็นแก๊สระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจน เป็นต้น นอกจากนี้ต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงคิกซ์สูง (high voltage dc power supply) โดยที่แคโทดต่อกับขั้วลบส่วนแอโนดต่อกับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.1 ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จสปัตเตอริง

เมื่อป้อนความต่างศักย์ V ให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะได้สนามไฟฟ้าขนาด V/d โดย d เป็น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยที่เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จำนวนหนึ่งหลุดจากผิวขั้วแคโทดด้วยการกระตุ้นของรังสีตามธรรมชาติ เช่น รังสีคอสมิก รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น จากนั้นจะถูกเร่งไปยังแอโนดโดยสนามไฟฟ้าในสภาวะและความดันที่เหมาะสม อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสะสมพลังงานจนกระทั่งมากพอที่จะไอออไนซ์อะตอมของแก๊สตัวอื่นให้แตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ความต่างศักย์ที่เหมาะสมนี้จะมีความต่างศักย์ที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์อย่างน้อยเท่ากับพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมแก๊ส ความดันที่เหมาะสมคือความดันที่ไม่ต่ำและไม่สูงจนเกินไป เนื่องจากความดันมีผลต่อระยะทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) ของอิเล็กตรอน ถ้าความดันต่ำเกินไประยะทางอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนจะสูงมาก ทำให้ไม่มีโอกาสชนกันกับอะตอมของแก๊สอื่นก็จะไม่เกิดการไอออไนซ์ และถ้าความดันสูงเกินไประยะอิสระเฉลี่ยก็จะน้อย ทำให้ไม่สามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์พอที่จะไปไอออไนซ์อะตอมของแก๊สอื่นได้เช่นกัน

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิชนและไอออไนซ์อะตอมของแก๊ส จะทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ไอออนบวกจะถูกเร่งไปยังขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนทุติยภูมิรวมทั้งอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกเร่งต่อไปยังขั้วแอโนดด้วยแรงของสนามไฟฟ้าในระหว่างเคลื่อนที่ไปขั้วแอโนดอย่างต่อเนื่อง ทั้งอิเล็กตรอนปฐมภูมิและอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะมีการสะสมพลังงานเพื่อที่จะไปไอออไนซ์อะตอมแก๊สตัวอื่น ขณะเดียวกันไอออนบวกจะถูกเร่งไปที่ขั้วแคโทด ถ้ามีพลังงานมากพอการชนผิวแคโทดของไอออนบวกจะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) จากผิวแคโทดและถูกเร่งต่อไปยังแอโนด กระบวนการแบบนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบแบบทวีคูณ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่ความต่างศักย์คงที่ เรียกสภาวะนี้ว่าการพังทลาย (breakdown) และเรียกความต่างศักย์ขณะนี้ว่า ความต่างศักย์พังทลาย (breakdown voltage; V_B)

สถานะการดีสชาร์จตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งถึงจุดพังทลายเรียกว่า Townsend discharge ซึ่งการเพิ่มของกระแสดีสชาร์จในช่วงนี้สามารถอธิบายได้โดยสมการ [7]

$$I = I_0 \exp(\alpha d) [1 + \lambda \exp(\alpha d) + (\lambda \exp(\alpha d))^2 + \dots] = I_0 \frac{\exp(\alpha d)}{[1 - \lambda \exp(\alpha d)]} \quad (2.1)$$

เมื่อ I_0 คือ กระแสอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากการกระตุ้นภายนอก

α คือ จำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นต่อหน่วยระยะทางของอิเล็กตรอน

λ คือ สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิของผิวแคโทดเนื่อง

จากการชนของไอออนบวก

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดในหน่วยเซนติเมตร

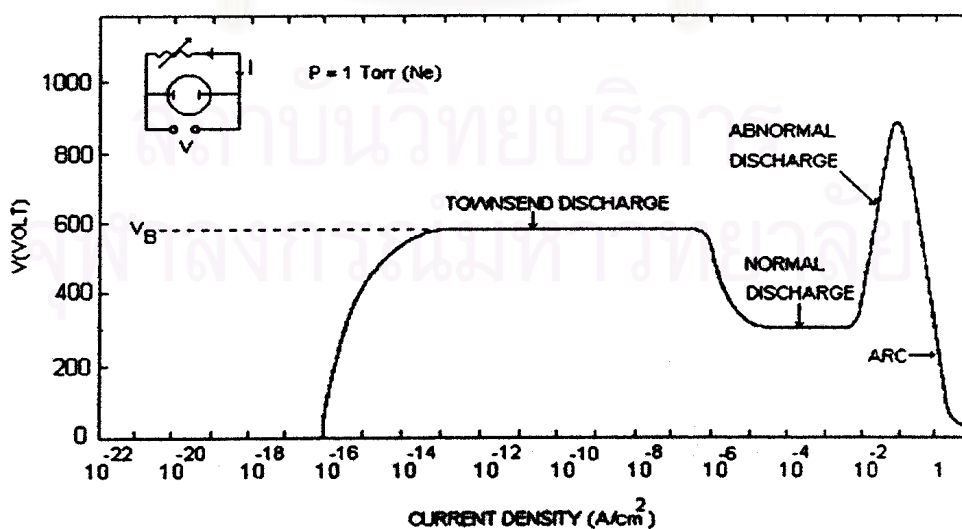
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.1 สามารถทำนายการพังทลายได้จาก $[1 - \lambda \exp(\alpha d)] = 0$ ความต่างศักย์พังทลายที่วัดในหน่วยโวลต์จะสัมพันธ์กับความดันแก๊สและระยะระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดตามสมการ [8]

$$V_B = \frac{A(Pd)}{C + \ln(Pd)} \quad (2.2)$$

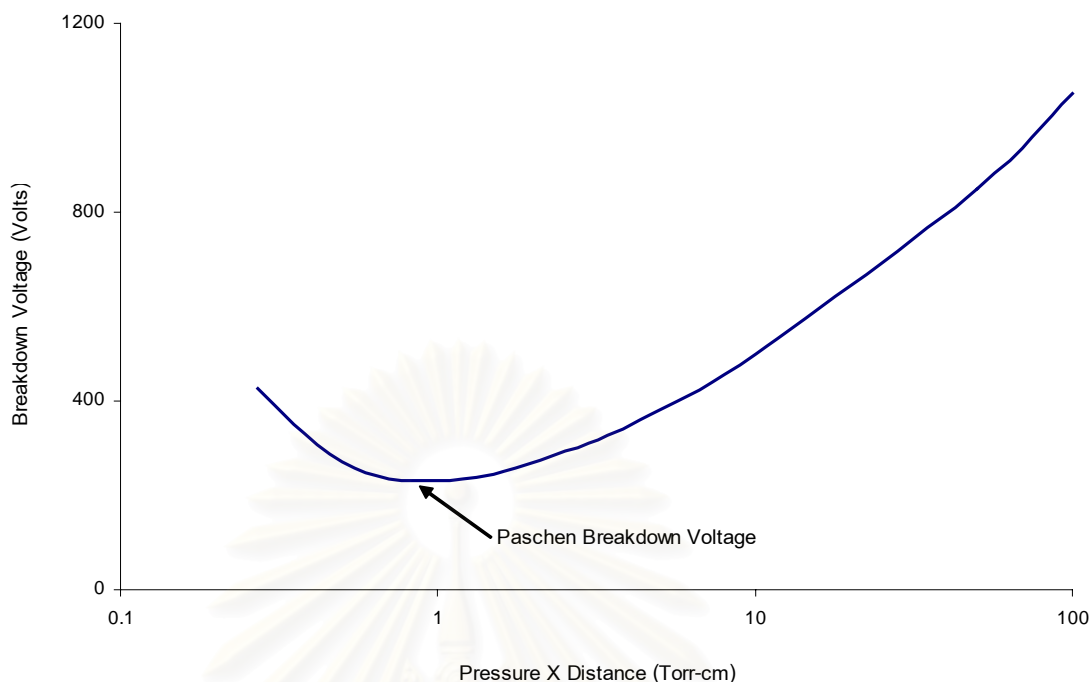
เมื่อ A และ C คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของแก๊ส

P คือ ความดันแก๊สในหน่วยทอร์ (torr)

สมการที่ 2.2 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์พังทลายกับผลคูณของความดันแก๊สและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าได้แสดงดังรูปที่ 2.3 กราฟนี้เรียกว่าเส้นโค้งพาสเชน (Paschen curve) เส้นกราฟจะปรากฏค่าศักย์พังทลายต่ำสุด เรียกว่า จุดต่ำสุดพาสเชน จากกราฟเมื่อให้ d คงที่ การลดหรือเพิ่มความดันแก๊สจะทำให้ความต่างศักย์พังทลายสูงขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมของแก๊สน้อยลงเมื่อความดันของแก๊สลดต่ำลง และ จะต้องใช้ความต่างศักย์สูงขึ้นเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงเมื่อความดันแก๊สเพิ่มสูงขึ้น แก๊สแต่ละชนิดจะให้เส้นโค้งพาสเชนที่แตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานไอออนไนซ์ และ ค่าภาคตัดขวางของการชนกับอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของระบบดีซีโกลวดิสชาร์จ [7]

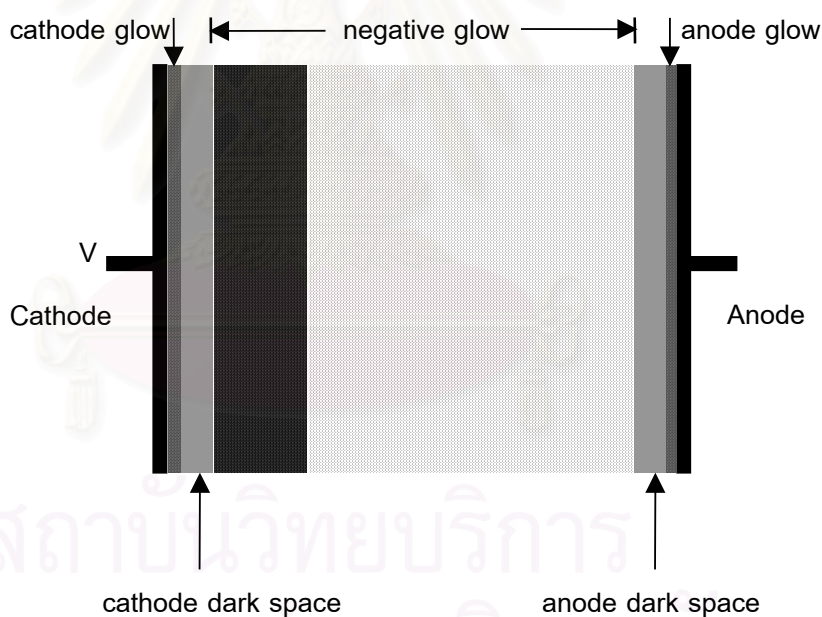


รูปที่ 2.3 เส้นโค้งพาสเชนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์พังทลายของแก๊สกับความดันในหน่วยทอร์ที่ระยะ d เซนติเมตร [9]

จากรูปที่ 2.2 เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดพังทลายแล้วถ้ายังมีกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบอย่างเพียงพอ กระบวนการเพิ่มของกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงจุดที่ไอออนบวกและอิเล็กตรอนสามารถควบคุมซึ่งกันและกันได้ กล่าวคืออิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากผิวแคโทดสามารถเพิ่มปริมาณไอออนบวกมากพอที่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิในปริมาณเท่าเดิม ระบบก็จะเข้าสู่สภาวะการรักษาสภาพอิสระได้เอง (self-sustained) โดยไม่ต้องอาศัยอิเล็กตรอนปฐมภูมิอีกต่อไป แก๊สภายในระบบก็จะเปลี่ยนสถานะอยู่ในสภาพโกลวดิสชาร์จ ซึ่งจะเริ่มเห็นการเรืองแสง และขณะเดียวกันความต่างศักย์ก็จะลดลง เรียกสภาวะการโกลวเช่นนี้ว่า normal discharge ในช่วงนี้การโกลวจะอยู่บริเวณเหนือขบและบริเวณผิวขรุขระของผิวแคโทดอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นถ้าเพิ่มศักย์ไฟฟ้าต่อไปกระบวนการโกลวจะเข้าสู่ย่าน abnormal discharge ช่วงนี้การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะทำให้กระแสและความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้น หากมีการป้อนกำลังไฟฟ้าต่อไปอีกจนกระทั่งถึงจุดที่แคโทดปลดปล่อยอิเล็กตรอน เนื่องจากความร้อน (thermionic electron emission) นอกเหนือจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ การเพิ่มของกระแสขณะนี้จะเพิ่มสูงขึ้นแต่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะลดลงอย่างรวดเร็วเป็นช่วงที่เกิดการอาร์ก (arc) ขึ้น

ในทางปฏิบัติเมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าจนถึงช่วงที่เกิดการพังทลายแล้ว การดิสชาร์จจะเข้าสู่สภาพการโกลวดิสชาร์จอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจจะตกอยู่ในช่วง normal discharge หรือ abnormal discharge ก็ได้ขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบในขณะนั้น อย่างไรก็ตามสภาพการโกลวดิสชาร์จที่ใช้งานทั่วไป เช่น ในระบบสปีดเตอริงจะอยู่ในย่าน abnormal discharge เนื่องจากในช่วงนี้ความหนาแน่นกระแสของการดิสชาร์จมีค่าสูง และสามารถควบคุมได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นโกลวดิสชาร์จที่จะกล่าวถึงต่อจากนี้ไป จะหมายถึงเฉพาะโกลวดิสชาร์จในย่าน abnormal discharge เท่านั้น

ในระบบดีซีโกลวดิสชาร์จที่ใช้งานทั่วไปซึ่งมีระยะระหว่างแคโทดและแอโนดไม่มากนัก (ประมาณ 4-10 เซนติเมตร) เมื่อเทียบกับระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนภายในโกลวดิสชาร์จ ลักษณะเบื้องต้นที่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อโกลวดิสชาร์จอยู่ในสภาพรักษาการดิสชาร์จได้เอง คือ การเรืองแสงในบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะแบ่งเป็นส่วนๆตามความเข้มแสงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของดีซีโกลวดิสชาร์จขณะที่สามารถรักษาสภาพการดิสชาร์จได้เอง [10]

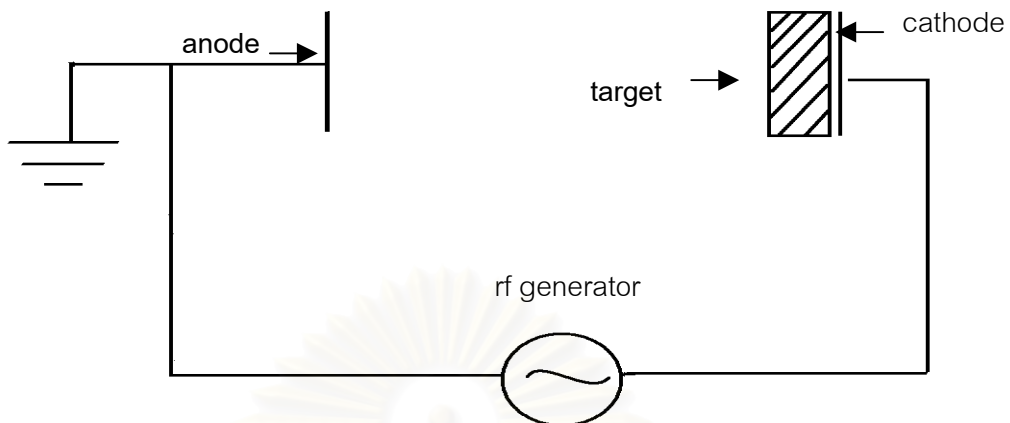
โครงสร้างของดีซีโกลวดิสชาร์จตามรูปที่ 2.4 ประกอบด้วยบริเวณมืด (dark space) สองบริเวณ คือ cathode dark space และ anode dark space ซึ่งอยู่ใกล้กับแคโทดและแอโนดตามลำดับ cathode dark space มีบทบาทสำคัญต่อการเร่งไอออนบวกและอิเล็กตรอน เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความต่างศักย์ซึ่งป้อนระหว่างขั้วไฟฟ้ามามากคร่อมเกือบทั้งหมด ระหว่าง

บริเวณมืดทั้งสองเป็นบริเวณเรืองแสง เรียกว่า negative glow ซึ่งจะครอบคลุมปริมาตรส่วนใหญ่ของโครงสร้างทั้งหมด การเรืองแสงในบริเวณ negative glow จะเข้มมากที่สุดด้านที่ติดกับ cathode dark space และจะจางลงเมื่อเข้าใกล้ด้าน anode dark space negative glow ถือว่าเป็นตัวพลาสมาซึ่งมีสนามไฟฟ้าภายในเป็นศูนย์และเป็นบริเวณที่กระบวนการไอออไนซ์ส่วนใหญ่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีชั้นการเรืองแสงบางๆใกล้ผิวแคโทดและแอโนด เรียกว่า cathode glow และ anode glow ตามลำดับ เป็นบริเวณที่ไอออนบวกถูกทำให้เป็นกลาง (neutralized) ด้วยกระบวนการรวมตัว (recombination) กับอิเล็กตรอน กระบวนการนี้จะช่วยลดการสะสมไอออนบวกที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โดยเฉพาะที่แคโทดจะมีความสำคัญ เนื่องจากทำให้ไอออนบวกอื่นๆที่ถูกเร่งเข้าหาแคโทดยังสามารถเคลื่อนที่ถึงแคโทด

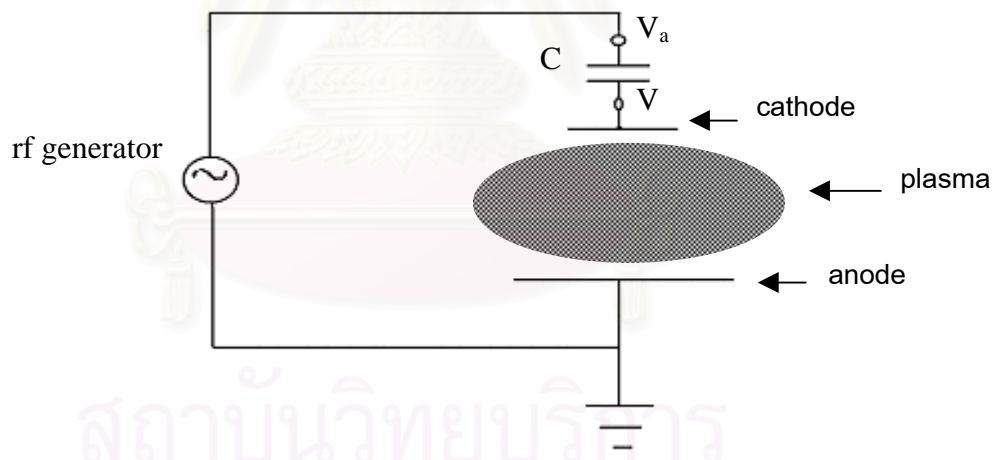
2.2 อาร์เอฟสปัตเตอริง (RF Sputtering) [10,11]

ในกรณีที่เป็นแคโทด เป็นฉนวนจะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในการแก้ปัญหาการหยุดการสปัตเตอริง เนื่องจากบริเวณเป้าที่เป็นลบเมื่อถูกชนด้วยไอออนบวกจะเริ่มเป็นบวกมากขึ้น เพราะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนในการทำให้ไอออนเป็นกลางบริเวณผิวของเป้าทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวแคโทดจะเพิ่มขึ้นจากลบไปสู่ศูนย์ สุดท้ายกระบวนการสปัตเตอริงจะหยุดลง การแก้ปัญหากระทำได้โดยการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในการขับเคลื่อนสภาพโกลด์ิสซาร์จแสดงดังรูปที่ 2.5 ไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนเป้าด้วยศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกในครึ่งรอบคลื่นแรก และจะถูกทำให้เป็นลบโดยการชนของอิเล็กตรอนในครึ่งรอบคลื่นหลัง กรณีที่ใช้ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ความถี่ย่านนี้ไม่มีผลต่อการทำให้เป้ามืดด้วยไฟฟ้าเป็นลบได้ เพราะเมื่อไอออนบวกชนเป้าจะใช้เวลาน้อยมากที่ทำให้เป้าถูกชาร์จให้เป็นบวก หากใช้ความถี่ที่สูงเกินไปอิเล็กตรอนก็จะไม่ตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทำให้ไม่สามารถทำให้เป้ามืดด้วยไฟฟ้าเป็นลบได้ ความถี่ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนสภาพโกลด์ิสซาร์จอยู่ในช่วงความถี่วิทยุ (radio frequency:RF) 1-100 เมกะเฮิรตซ์ การใช้งานจริงจะใช้ความถี่ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อมิให้รบกวนกับการสื่อสารภายนอก [10]

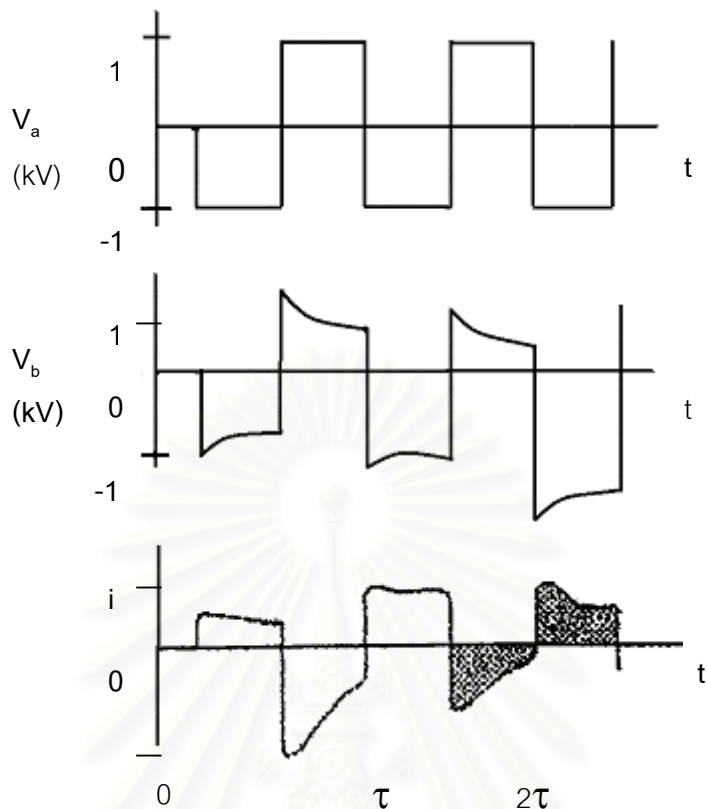
จากรูปที่ 2.5 เขียนวงจรมืดแสดงดังรูปที่ 2.6 ตัวเก็บประจุ C เป็นตัวเก็บประจุเนื่องมาจากเป้าฉนวนมีการสะสมประจุ หรืออาจมองเป็นตัวเก็บประจุที่วางอยู่หลังเป้าที่เป็นตัวนำ V_a คือศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ V_0 คือ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณเป้า



รูปที่ 2.5 การป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับสภาพโกลวดิสชาร์จ [10]



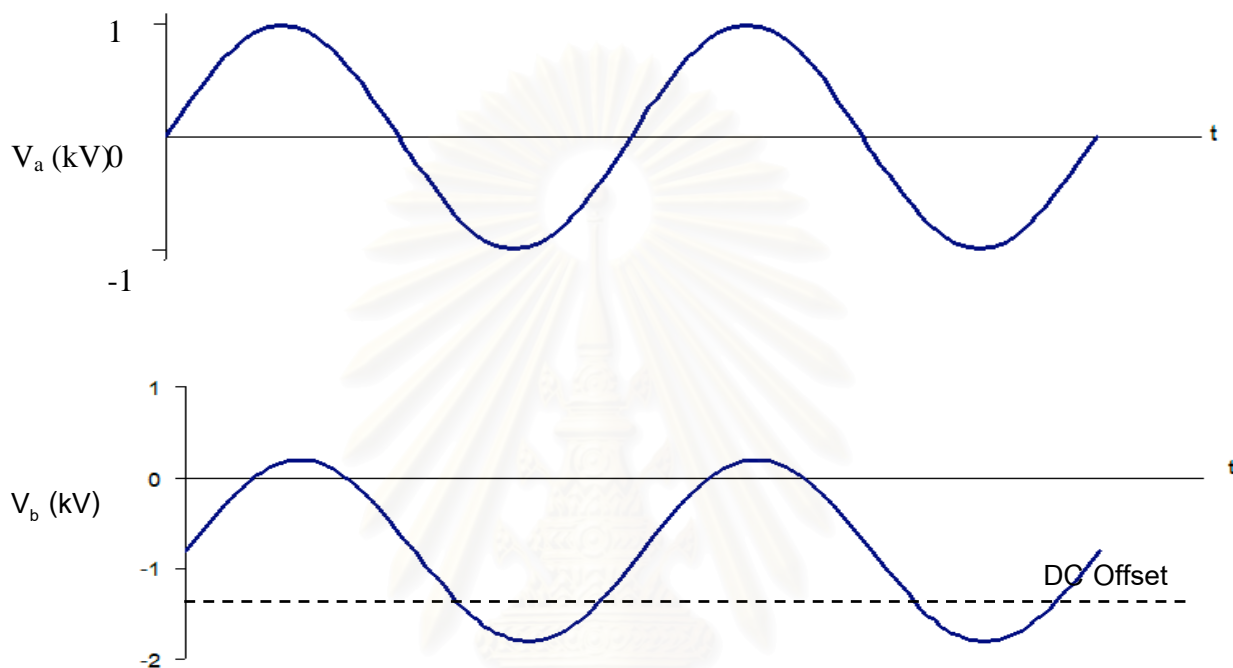
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของสภาพโกลวดิสชาร์จความถี่สูง [10]



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นความต่างศักย์และกระแสของเป้า เมื่อวงจรรูปที่ 2.6 ถูกป้อนด้วยคลื่นศักย์ไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม [17]

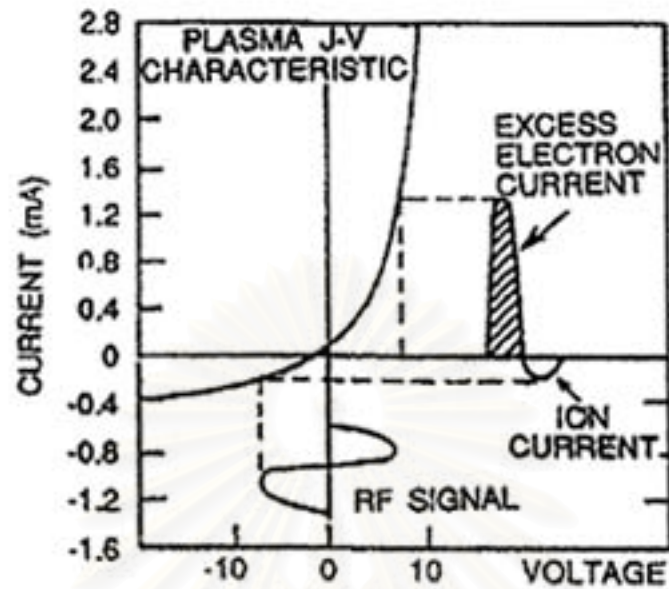
พิจารณารณที่ป้อนคลื่นความต่างศักย์รูปสี่เหลี่ยมเข้าในวงจร ขนาดความต่างศักย์จากยอดถึงยอด 2 kV แสดงดังรูป 2.7 ในขณะที่เริ่มต้น ที่เวลา $t=0$ ตัวเก็บประจุอยู่ในสภาพที่ไม่มีประจุ $V_a = -1$ kV เช่นกัน กระบวนการไหลของประจุจะเริ่มขึ้น เป้าเริ่มที่จะถูกชนโดยไอออนบวก ตัวเก็บประจุ (เป้า) เริ่มที่จะมีการสะสมประจุทำให้ V_b เริ่มเพิ่มขึ้นสู่ศูนย์ หากสัญญาณคลื่นความต่างศักย์รูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนเข้าสู่วงจรมีความถี่สูงพอ ซึ่งอยู่ประมาณ 1 เมกะเฮิรตซ์ V_b ก็จะไม่ถูกชาร์จมากเกินไป ซึ่งจะหยุดที่เวลา $\tau/2$ สมมติให้หยุดที่ -800 V เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ $V_a = 2$ kV จะทำให้ $V_b = +1200$ V ประจุบวกบนเป้าจะถูกทำให้เป็นกลางโดยอิเล็กตรอน ทำให้ V_b ลดลงอย่างรวดเร็ว สมมติว่า V_b อยู่ที่ 100 V เมื่อสิ้นสุดรอบคลื่นแรกที่เวลา τ และถ้า V_a กลับเป็น -2 kV อีก V_b จะลดลงไปอยู่ที่ -1900 V และจะเริ่มเพิ่มขึ้นอีก แต่จะไม่มากเพราะปริมาณไอออนบวกมีน้อยมาก เมื่อเริ่มรอบคลื่นใหม่ประมาณ 2-3 รอบคลื่นอย่างต่อเนื่อง คลื่นศักย์ไฟฟ้า V_b ลดลงเป็นลบ ในขณะนั้นเป้าจะถูกชนด้วยไอออนบวกที่มีพลังงานสูง และถูกทำให้เป็นกลางด้วยกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ปริมาณกระแสไอออนบวกและอิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าเมื่อระบบอยู่ในสภาพไหลของประจุที่คงตัวแล้ว ปริมาณกระแสสุทธิของไอออนบวกและ

อิเล็กตรอนเท่ากัน และหักล้างกันเป็นศูนย์ในรอบคลื่นพอดี รูปแบบของคลื่นศักย์ไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม แสดงเพียงกลไกที่ทำให้เกิดสภาพโกลดดิสชาร์จภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสลับของเป้าที่เป็น ฉนวนเท่านั้น ในทางปฏิบัติจะใช้คลื่นรูปไซน์ป้อนให้กับระบบ รูปแบบสัญญาณที่ได้เมื่อระบบอยู่ในสถานะคงตัวแสดงในรูปที่ 2.8

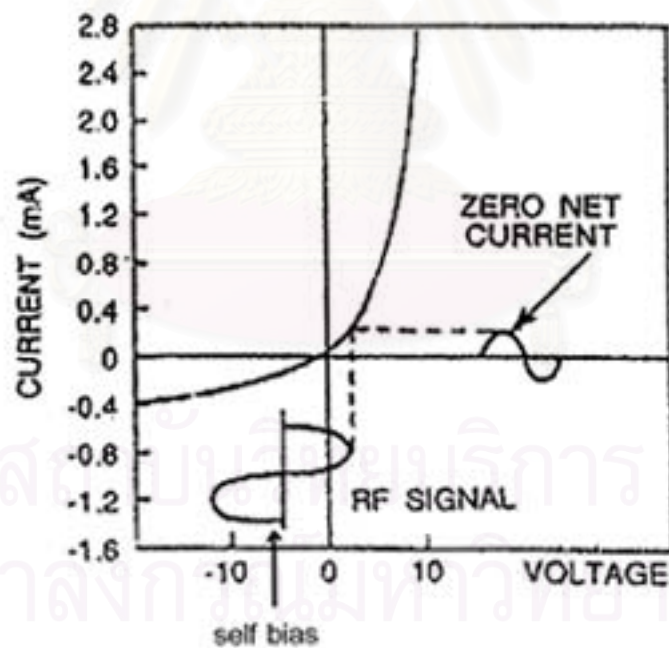


รูปที่ 2.8 รูปคลื่นความต่างศักย์ ที่แหล่งกำเนิด (V_a) และที่เป้า (V_b) เมื่อวงจรรูปที่ 2.7 ถูกป้อนด้วย คลื่นศักย์ไฟฟ้ารูปไซน์ [10]

ค่าศักย์ไฟฟ้า V_b จะมีคลื่นสัญญาณที่เป็นรูปไซน์มีค่าเฉลี่ยเป็นลบอยู่ที่ dc offset voltage ลักษณะเช่นนี้เป็นการไบแอสตัวเองจะมีค่าอยู่ประมาณครึ่งคลื่นรูปไซน์ที่ป้อนให้กับระบบ จะเห็นว่า V_b จะเป็นบวกในสัดส่วนที่น้อยมากในทุกรอบคลื่น ทำให้ไอออนบวกชนเป้าอย่างต่อเนื่องเหมือนกับกรณีคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ผลจากการไบแอสตัวเองของเป้าพิจารณาได้จากเส้นโค้ง I-V ของพลาสมาที่แสดงปริมาณกระแสไอออนบวกและอิเล็กตรอน รูปที่ 2.9 (ก) แสดงปริมาณของอิเล็กตรอนส่วนเกิน อันเนื่องมาจากการชนเป้าฉนวนที่ไม่มีการไบแอสตัวเองของไอออนบวก อิเล็กตรอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในพลาสมา เกิดจากการที่อิเล็กตรอนมีสภาพเคลื่อนที่ได้มากกว่า ไอออนบวก เมื่อเป้ามีการไบแอสตัวเองทำให้พลาสมาเป็นกลางทางไฟฟ้า (กระแสสุทธิเป็นศูนย์) แสดงดังรูปที่ 2.9 (ข)



(ก)

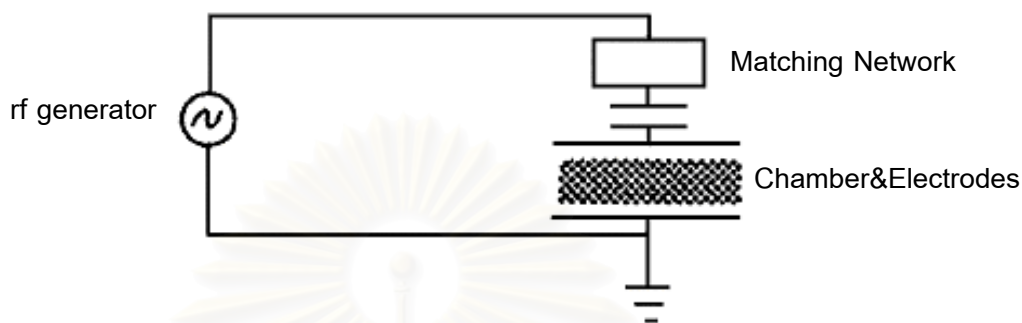


(ข)

รูปที่ 2.9 การไบแอสตัวเองของเป้าที่เป็นฉนวน [9]

นอกจากนี้ในระบบอาร์เอฟสเปคเตอรียังมีวงจรมะขิงระหว่างแหล่งกำเนิดอาร์เอฟกับสภาพโกลวดิสชาร์จเพื่อแก้ปัญหาการป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับระบบกระทำไม่ได้เต็มที่ เนื่อง

จากตัวระบบมีความขัดภายใน (internal impedance) วงจรแมชชิงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลังให้กับระบบ และยังช่วยป้องกันแหล่งกำเนิดอาร์เอฟแสดงการเชื่อมต่อกับวงจรแมชชิงในระบบอาร์เอฟสเป็คเตอริงดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรแมชชิงในระบบอาร์เอฟสเป็คเตอริง [10]

2.3 สภาพโกลดดิสชาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก

การเกิดสภาพโกลดดิสชาร์จในสภาพความดันต่ำ จำเป็นต้องใช้ความต่างศักย์ในการดิสชาร์จสูงแต่ให้กระแสดิสชาร์จต่ำลักษณะเช่นนี้เป็นข้อดีอยู่ในการนำไปใช้งานในระบบสเป็คเตอริงคือจะทำให้อัตราการเคลือบต่ำ เนื่องจากกระแสดิสชาร์จต่ำทำให้วัสดุรองรับมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนปริมาณสูง ข้อดีที่เกิดขึ้น เกิดจากความดันที่ต่ำทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งไปยังแอโนดโดยมีการชนกับอะตอมอื่นน้อยมาก

การใส่สนามแม่เหล็กในสภาพการโกลดดิสชาร์จ สามารถเพิ่มการไอออไนซ์อะตอมของแก๊สให้สูงขึ้น และยังทำให้สภาพนำไฟฟ้าของสภาพโกลดดิสชาร์จเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย เพราะสนามแม่เหล็กจะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสภาพโกลดดิสชาร์จเปลี่ยนไป สนามแม่เหล็กที่ให้กับสภาพโกลดดิสชาร์จแบ่งเป็นสองลักษณะดังนี้

2.3.1 สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวแคโทด

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กความเข้มคงที่ขนานกับสนามไฟฟ้าใน cathode dark space อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแคโทดในทิศตั้งฉากจะถูกแรงกระทำเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กบังคับให้เคลื่อนที่รอบเส้นแรงแม่เหล็ก หากรวมแรงของสนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark space ที่กระทำกับอิเล็กตรอนด้วยแล้ว อิเล็กตรอนจะเคลื่อนออกจากแคโทดแบบ helix ที่ระยะ pitch เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แสดงดังรูปที่ 2.11 (ก) เมื่อเข้าสู่บริเวณ negative glow เป็นบริเวณที่

สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดแบบ helix ที่มีระยะ pitch คงที่ แสดงดังรูปที่ 2.11 (ข)

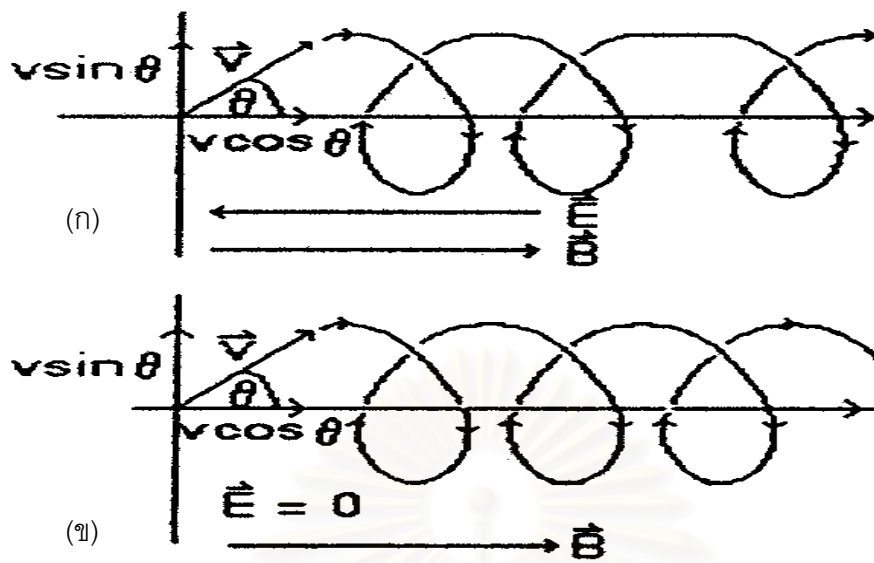
ลักษณะการเคลื่อนที่แบบ helix ทำให้อิเล็กตรอนมีระยะทางเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้โอกาสที่จะไอออไนซ์อะตอมของแก๊สเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยบังคับอิเล็กตรอนไม่ให้หลุดจากบริเวณดิสชาร์จเป็นการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับภาชนะสุญญากาศ และจำกัดการดิสชาร์จให้อยู่ในบริเวณแคโทดกับแอโนด

2.3.2 สนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวแคโทด

พิจารณาอิเล็กตรอนหลุดจากแคโทดในแนวตั้งฉากเข้าสู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กขนานกับแคโทด เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าในบริเวณแคโทดอิเล็กตรอนจะถูกแรงกระทำจากสนามแม่เหล็กบังคับให้เคลื่อนที่เป็นวงกลมย้อนกลับสู่แคโทดอีก เมื่อสะท้อนกลับก็จะเริ่มเคลื่อนที่ในลักษณะเดิมอีก การเคลื่อนที่ทั้งหมดเป็นรูปครึ่งวงกลมเลื่อนไปบนผิวแคโทดในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 2.12 (ก)

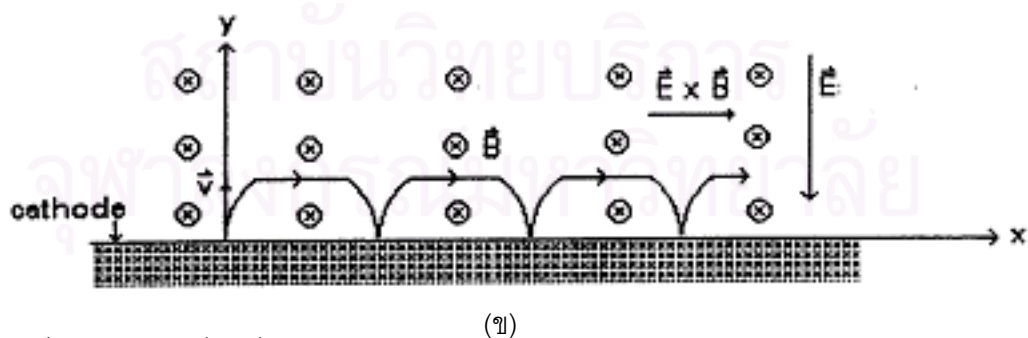
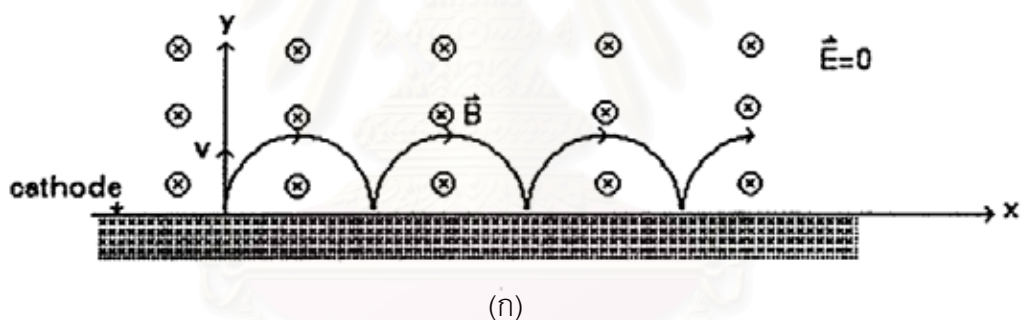
ภายใต้สภาวะเดียวกันหากพิจารณาแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark space ทิศพุ่งเข้าสู่แคโทด แรงดังกล่าวจะเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแบบครึ่งวงกลมเป็นแบบไซคลอยด์ (cycloidal) อิเล็กตรอนจะกระโดด (hop) ไปบนผิวแคโทดในทิศ $\vec{E} \times \vec{B}$ แสดงดังรูปที่ 2.12 (ข) ถ้าอิเล็กตรอนหลุดเข้าสู่บริเวณ negative glow ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ก็จะเคลื่อนที่เป็นรูปวงกลมย้อนกลับเข้าสู่บริเวณ cathode dark space ในที่สุดกระบวนการเช่นนี้ทำให้เกิดการกักอิเล็กตรอนบริเวณผิวแคโทด อิเล็กตรอนก็จะสามารถไอออไนซ์อะตอมแก๊สบริเวณนี้มากกว่าบริเวณอื่นและยังทำให้การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับผิวแคโทดลดลงเป็นผลให้สัดส่วนกระแสอิเล็กตรอนต่อกระแสไอออนบวกลดลงด้วย

ในความจริงอิเล็กตรอนจะมีการเปลี่ยนทิศหลังจากการชนกับอนุภาคอื่นๆภายในสภาพโกลวดิสชาร์จ ทำให้เกิดการกระโดดข้ามเส้นแรงแม่เหล็กไปยังอีกเส้นหนึ่งที่ห่างจากแคโทดเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนสามารถที่จะลอยเลื่อนตัดสนามแม่เหล็กเข้าไปเข้าสู่แอโนด



รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กในสภาพโกลวดิสชาร์จ [12]

- () บริเวณ cathode dark space
- (ข) บริเวณ negative glow



รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กที่คัพองเข้ากระดาดบริเวณผิวหน้าแคโทด [12]

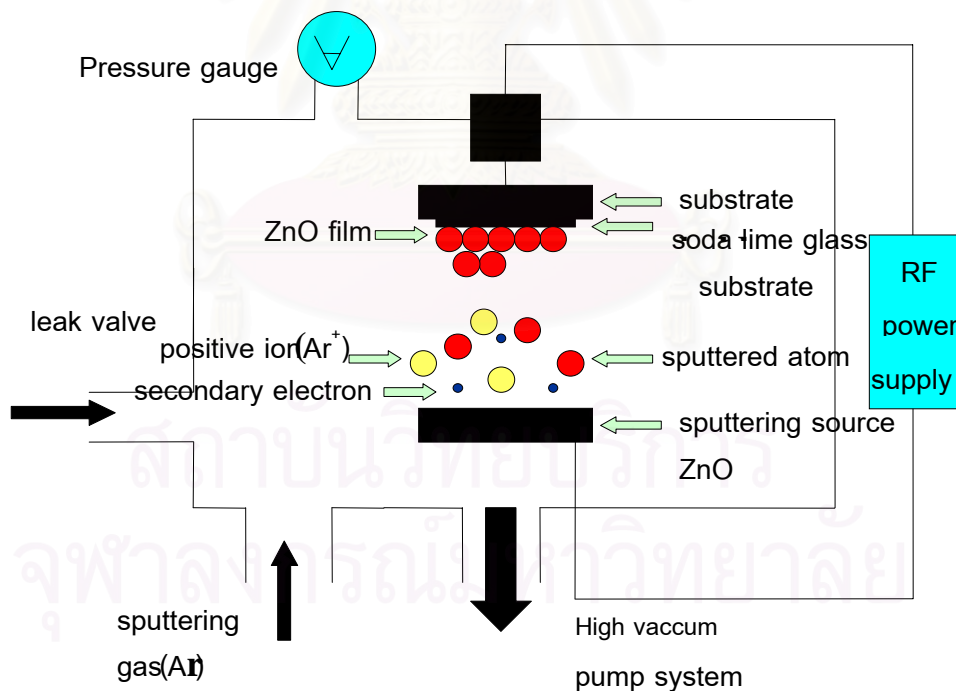
- () ไม่มีสนามไฟฟ้า
- () มีสนามไฟฟ้าที่คัพองเข้าสู่ผิวหน้าแคโทด

2.4 การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง

2.4.1 หลักการเบื้องต้น

การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มที่เกิดขึ้นภายใต้สภาพโกลด์ดิสชาร์จ โดยมีไอออนบวกเป็นตัวสปัตเตอริ่ง และมีวัสดุที่ใช้ทำแคโทดเป็นเป้า (sputtering target) เมื่อเป้าถูกชนโดยไอออนบวกพลังงานสูงจนทำให้อะตอมของเป้าหลุดออก เรียกว่ากระบวนการนี้ว่า สปัตเตอริง (sputtering)

การสปัตเตอริงมีหลักการง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ภายในภาชนะสุญญากาศ ประกอบด้วยเป้า ซึ่งทำจากวัสดุที่ต้องการเคลือบลงบนแผ่นรองรับ แก๊สอาร์กอนความดันต่ำถูกป้อนเข้าไปภายในภาชนะสุญญากาศ เมื่อปรับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจนมีค่าที่สูงพอ จะเกิดการโกลด์ดิสชาร์จขึ้นมา จะได้ไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าและกระแทกจนอะตอมที่ผิวของเป้าหลุดออกตกลงบนวัสดุรองรับเกิดเป็นฟิล์มบางขึ้น



รูปที่ 2.13 แสดงหลักการของการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง

2.4.2 ระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงภายใต้ระบบโกลวดิสชาร์จ โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

- ดีซีสปัตเตอริง (DC sputtering) เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดของระบบสปัตเตอริงเหมาะสำหรับการสปัตเตอริงเคลือบฟิล์มที่เป็นโลหะ
- อาร์เอฟสปัตเตอริง (RF sputtering) เป็นการสปัตเตอริงโดยไฟฟ้ากระแสสลับเหมาะสำหรับการสปัตเตอริงเคลือบฟิล์มที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือฉนวน

นอกจากนี้ยังแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภท คือ

- แมกนีตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering) เป็นการใช้นามแม่เหล็กช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการสปัตเตอริง สามารถใช้ได้ทั้งในระบบดีซีสปัตเตอริงและอาร์เอฟสปัตเตอริง ซึ่งเรียกว่า ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ตามลำดับ
- รีแอคทีฟสปัตเตอริง (reactive sputtering) เป็นการป้อนแก๊สไปปฏิกิริยาผสมกับแก๊สที่เป็นตัวสปัตเตอริง เป็นเทคนิคในการสปัตเตอริงเคลือบฟิล์มที่เป็นสารประกอบ รูปแบบอาจเป็นได้ทั้งดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

2.4.3. โครงสร้างระบบเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริง

ระบบสปัตเตอริงในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ โดยมีชื่อตามที่มีการดัดแปลงการใช้งานดังตัวอย่างที่กล่าวในตอนที่แล้ว อย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้มีโครงสร้างมาตรฐานสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) สำหรับบรรจุก๊าซของการดิสชาร์จและติดตั้งส่วนประกอบอื่นๆ วัสดุสำหรับทำภาชนะสุญญากาศ ได้แก่ แก้ว สเตนเลส หรือโลหะผสมที่ผ่านการทดสอบความทนต่อสุญญากาศ

2) ระบบปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ซึ่งสามารถปั๊มลดความดันในภาชนะสุญญากาศก่อนที่จะเริ่มการเคลือบฟิล์มได้ถึงระดับ 10^{-6} ทอรร หรือต่ำกว่า โดยทั่วไปจะเป็นระบบที่ทำงานร่วมกันระหว่างปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (diffusion pump) หรือระบบผสมระหว่างปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มเทอร์โบโมเลคิวลา (turbo molecular)

3) หัววัดความดันก๊าซ (pressure gauge) ในภาชนะสุญญากาศพร้อมด้วยระบบวัดและแสดงผล ทั้งในย่านความดันต่ำ และความดันในขณะใช้งาน

4) แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ (sputtering source) ประกอบด้วยเป้าของการสปัตเตอร์พร้อมกับแท่นยึด แบ่งตามชนิดของการไหลของไอออนได้เป็น 2 แบบ คือ แหล่งกำเนิดแบบ DC กับ แหล่งกำเนิดแบบ RF แต่ละแบบแยกย่อยเป็น non-magnetron หรือ magnetron

5) แหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) เพื่อกำเนิดโวลต์สจาร์จ โดยทั่วไปมีสองชนิดคือชนิดกระแสตรง (dc power supply) สำหรับระบบที่ใช้ดีซีโวลต์สจาร์จ กับชนิดกระแสสลับความถี่ 13.56 MHz (RF power supply) สำหรับระบบที่ใช้อาร์เอฟโวลต์สจาร์จ

6) Shutter ใช้สำหรับเปิดปิดฟลักซ์ของอะตอมที่หลุดออกจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์

7) แท่นวางวัสดุรองรับ (substrate holder) สำหรับวางวัสดุรองรับฟิล์ม

8) ก๊าซตัวสปัตเตอร์ (sputtering gas) จะต้องเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าและฟิล์มที่เกิดขึ้น หรือส่วนประกอบอื่นๆในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ต้องไม่เป็นพิษและควรมีมวลมากจะทำให้ได้อัตราสปัตเตอริงที่สูง ก๊าซที่ใช้กันทั่วไป คือ อาร์กอน เพราะไม่เป็นพิษ หาง่าย และราคาถูก แต่ก็ยังไม่ใช้ก๊าซเฉื่อยที่มีมวลมากที่สุด

นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมตามจุดประสงค์การใช้งาน เช่น

8) วงจรแมชซิง (matching network) สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้า และป้องกันแหล่งกำเนิดในกรณีอาร์เอฟสปัตเตอริง

9) ตัวทำความร้อน (heater) สำหรับเพิ่มอุณหภูมิวัสดุรองรับพร้อมด้วยระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิ

10) แหล่งจ่ายไฟฟ้าไบแอสสำหรับป้องกันความต่างศักย์ให้กับวัสดุรองรับ ในกรณีของไบแอสสปัตเตอริง

11) เครื่องวิเคราะห์แก๊ส หรือ optical emission monitor สำหรับวัด partial pressure และฟลักซ์ของอะตอมที่ถูสปัตเตอริง

9) แหล่งกำเนิดไอออนบวกที่แยกส่วนจากระบบโกลวดิสชาร์จ ใช้กระแทกฟิล์ม ในระหว่างที่กำลังเคลือบ

10) แหล่งแก๊สไวปฏิกิริยา (reactive gas) ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรเจน สำหรับระบบรีแอคทีฟสเปคเตอรียิง

11) ระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ

2.4.4 การสเปคเตอร์เป่าที่เป็นสารประกอบและการก่อตัวเป็นฟิล์ม

การสเปคเตอร์เป่าที่เป็นสารประกอบทางเคมี เช่นในกรณีของโลหะออกไซด์ เป่ามีโอกาสที่จะถูกสเปคเตอร์เป็นได้ทั้งอะตอมหรือโมเลกุล ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนไอออนของอะตอมโลหะและไอออนของโมเลกุลคู่ของโลหะออกไซด์ (OM^+) ต่อไอออนทั้งหมดที่ถูกสเปคเตอร์ออกมาสามารถเขียนได้เป็น [10]

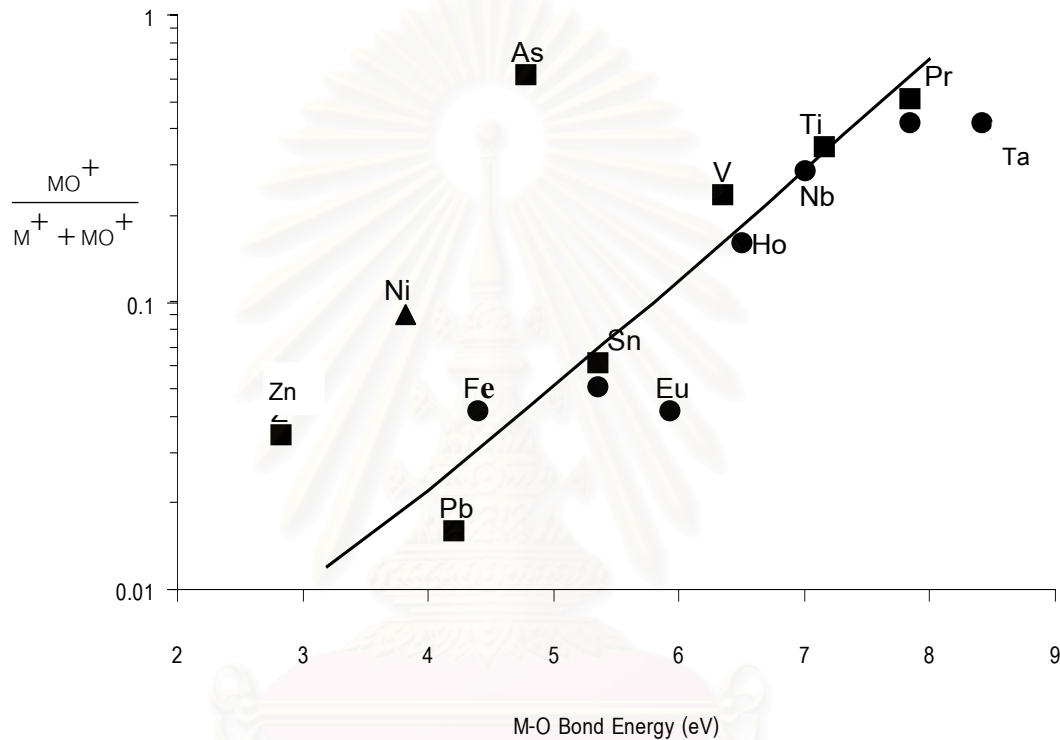
$$\eta = \frac{OM^+}{(M^+ + OM^+)}$$

สำหรับโลหะ M รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่า η ขึ้นกับความแข็งแรงของพันธะของโลหะออกไซด์ $M-O$ ดังจะเห็นว่าความแข็งแรงของพันธะไอออนโลหะออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น จะลดการแตกตัวของโมเลกุลลง η จะเป็นตัวกำหนดและวัดสำหรับไอออนโมเลกุลที่ถูกสเปคเตอร์ออกมาซึ่งสัมพันธ์กับโมเลกุลที่เป็นกลางที่ให้ผลไม่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้ η ยังขึ้นกับความดันที่ใช้ในการสเปคเตอร์ เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วน η ลดลง และที่ความดันเป็นศูนย์ แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของไอออนที่อยู่บริเวณเป่า

พลังงานของไอออนบวกที่เข้าชนกับเป่าหากมีพลังงานมากพอที่จะส่งให้กับคู่ของโมเลกุลแล้วจะทำให้โมเลกุลสามารถที่จะหลุดจากเป่าเป็นคู่ได้ พลังงานที่ไอออนบวกส่งให้กับคู่ของโมเลกุลจะขึ้นกับฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน ซึ่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของไอออนที่เข้าชนเท่ากับมวลของอะตอมที่ถูกชนในรูปที่ 2.27 โลหะเบาที่มีมวลเป็นสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับออกซิเจน จะเห็นได้ในบริเวณใกล้เส้นประ และยังแสดงให้เห็นว่าไอออนโมเลกุลขนาดใหญ่จะขึ้นกับพันธะของโลหะออกไซด์

การก่อตัวเป็นฟิล์มของเป่าที่เป็นสารประกอบที่เป็นโลหะออกไซด์หรือโลหะอื่น โมเลกุลของเป่าที่ถูกสเปคเตอร์ออกมาจะไม่สมบูรณ์ จึงทำให้องค์ประกอบของฟิล์มที่ได้แตกต่างจากเป่าเนื่องจากการขาดหายของอะตอมก๊าซภายในฟิล์ม และสภาพการขนส่งอะตอมไปยังวัสดุรองรับ ตัวอย่างเช่น ในการสเปคเตอร์เป่าควอร์ตในก๊าซอาร์กอน ฟิล์มที่ได้จะมีการขาดหายของ

อะตอมของออกซิเจน วิธีการแก้ไขการขาดหายของอะตอมแก๊สออกซิเจนกระทำได้โดยกระทำได้โดยสเป็คเตอรืด้วยแก๊สผสมระหว่าง 95%Ar:5%O₂ หรือที่เรียกว่ารีแอคทีฟสเป็คเตอรื โดยที่ออกซิเจนที่ป้อนเข้าไปทั้งหมดจะถูกไอออไนซ์และเข้าไปจับบนฟิล์ม ทำให้องค์ประกอบของฟิล์มมีความสมบูรณ์มากขึ้น การไอออไนซ์ของออกซิเจนเกิดจากการถ่ายเทพลังงานจากอิเล็กตรอนภายในสภาพโกลวดิสชาร์จ



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไอออนโมเลกุลคู่ ($MO^+/(M^+ + MO^+)$) กับพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของโลหะออกไซด์ [10]

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีโกลวดิสชาร์จสเป็คเตอรื อาร์เอฟสเป็คเตอรื สภาพโกลวดิสชาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก หลักการเบื้องต้น ระบบเคลือบฟิล์มบาง โครงสร้างระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการสเป็คเตอรื และยังได้กล่าวถึงการสเป็คเตอรืเป้าที่เป็นสารประกอบและการก่อตัวเป็นฟิล์มคร่าวๆ ซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิงหมายเลข [10,11] และ[12]

บทที่ 3

ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

ฟิล์มที่เตรียมได้จากการทดลองจะนำมาวัดสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง และโครงสร้างผลึกของฟิล์มเพื่อจะนำไปวิเคราะห์สมบัติที่เหมาะสมต่อไป

3.1 สมบัติทางไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติทางไฟฟ้าที่จะทำการวัดประกอบด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความหนาแน่นของพาหะซึ่งจะหาได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) และกล่าวถึงสมบัติของฟิล์มซึ่งคือออกไซด์ชนิดหลายชั้นด้วย

3.1.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่าย [13]

กระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำของแข็งเมื่อมีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า โดยปกติความหนาแน่นกระแส J_e เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า E ;

$$J_e = \frac{E}{\rho_e} = \sigma_e E \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_e คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า และ σ_e คือ สภาพนำไฟฟ้า สมการ 3.1 เป็นสมการหนึ่งที่แสดงกฎของโอห์ม ในรูปที่ 3.1 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยที่มีกระแส I ผ่านแท่งตัวนำที่มีภาคตัดขวางคงที่ A และความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า ($V_2 - V_1$) ซึ่งถูกวัดระหว่าง 2 จุด ความหนาแน่นกระแส J_e ในแท่งตัวนำเท่ากับ I/A และสนามไฟฟ้าเป็น $\frac{(V_2 - V_1)}{\Delta x}$ และ

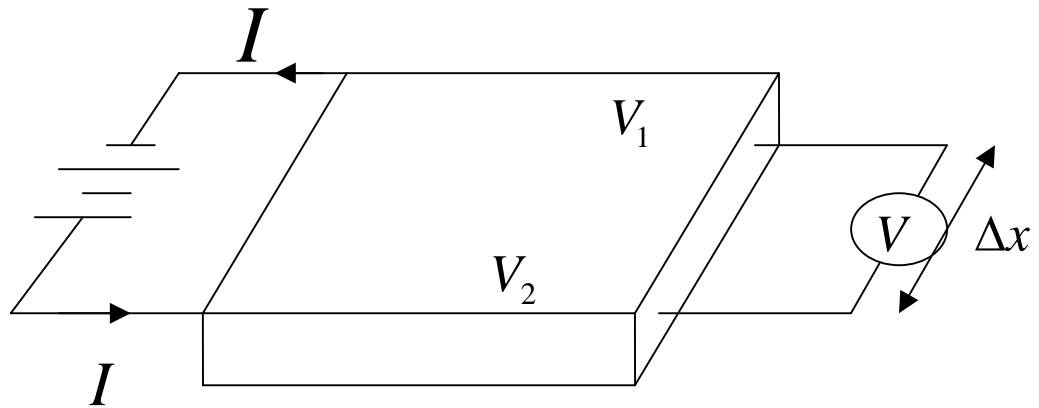
$$J_e = \frac{I}{A} = \frac{\sigma_e (V_2 - V_1)}{\Delta x} \quad (3.2)$$

กฎของโอห์มโดยทั่วไปเขียนได้เป็น

$$\sigma_e = \frac{J_e}{E} = \frac{(I/A)}{(V_2 - V_1)/\Delta x} \quad (3.3)$$

ความต้านทานของแท่งตัวนำยาว Δx ในรูป 3.1 คือ

$$R(\Delta x) = \frac{\Delta x}{\sigma_e A} = \frac{\rho_e \Delta x}{A} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.1 การวัดสภาพนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A [13]

ความต้านทานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเรขาคณิตแต่สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุคงที่ ความต้านทานวัดในหน่วยของโอห์ม สภาพต้านทานไฟฟ้าในหน่วยโอห์มเมตรและสภาพนำไฟฟ้าในหน่วยต่อโอห์มเมตร

โลหะบริสุทธิ์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด ในโลหะการไหลของประจุเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระซึ่งถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้า พิจารณาอิเล็กตรอนซึ่งสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในของแข็ง ผลของสนาม E ทำให้เกิดแรง eE ซึ่งเร่งอิเล็กตรอน

$$a = \frac{eE}{m_e} \quad (3.5)$$

อิเล็กตรอนไม่สามารถเร่งความเร็วได้อย่างไม่มีกำหนด เราสามารถสมมติให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจลน์โดยการชนด้วยโฟนอน สิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ ถ้าเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนคือ 2τ (τ เรียกว่า relaxation time) ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนคือ

$$\bar{v} = \frac{\tau eE}{m_e} \quad (3.6)$$

ถ้าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระคือ n ความหนาแน่นของกระแส คือ

$$J_e = ne\bar{v} = \frac{ne^2E\tau}{m_e} \quad (3.7)$$

และแทนค่าลงในสมการ 3.2 ได้ว่า

$$\sigma_e = \frac{ne^2\tau}{m_e} \quad (3.8)$$

3.1.2 สภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะ (mobility)

สภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) μ เป็นอัตราส่วนของความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) กับสนามไฟฟ้า E ;

$$\mu = \frac{v_{drift}}{E} \quad (3.9)$$

ปกติจะแทนสภาพเคลื่อนที่ได้ของตัวนำอิเล็กตรอนด้วย μ_e และสภาพเคลื่อนที่ได้ของโฮลโดย μ_h สำหรับอิเล็กตรอนที่ไหลในสนามไฟฟ้า E อาจเขียนสมการ 3.8 ได้เป็น

$$\sigma_e = n_e e \mu_e \quad (3.10)$$

เมื่อ n_e คือปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กตรอนอิสระ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลนำกระแส สภาพนำไฟฟ้าเขียนได้เป็น

$$\sigma_e = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h \quad (3.11)$$

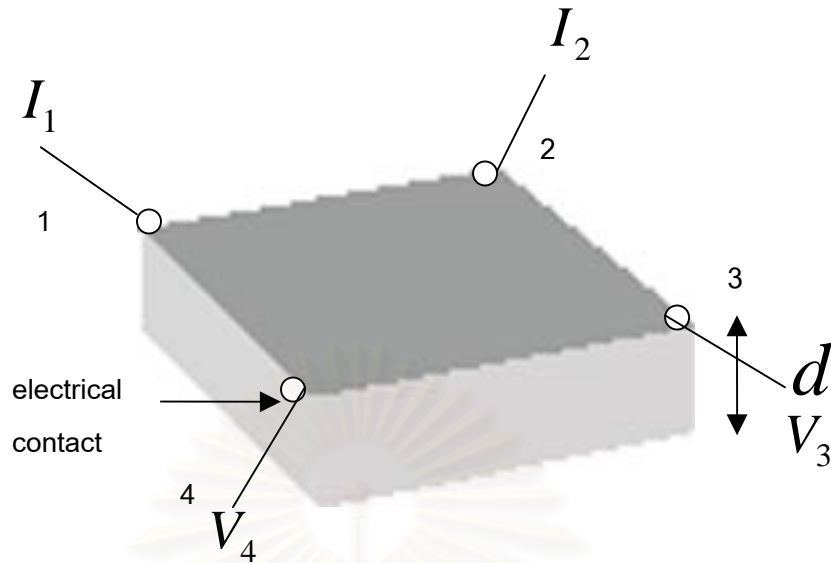
เมื่อ n_h เป็นปริมาณความเข้มข้นของโฮล

3.1.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว (Van der Pauw Method) [14,15,16]

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ใช้กับตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง รูปร่างไม่แน่นอน แต่ต้องมีความหนาสม่ำเสมอโดยการวางขั้วสัมผัสให้อยู่บนขอบของชิ้นสารตัวอย่าง ความถูกต้องแม่นยำขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่อไปนี้

- 1) ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารตัวอย่าง
- 2) จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง
- 3) สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
- 4) เนื้อสารจะต้องสม่ำเสมอไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่างจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวอย่าง

จากรูปที่ 3.2 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{12} ผ่านเข้าทางจุด 1 ออกทางจุด 2 เราจะสามารถวัดความต่างศักย์ $V_{34} = V_3 - V_4$ ได้ ซึ่งเรานิยามได้ว่า

$$R_{12,34} = \frac{(V_3 - V_4)}{I_{12}} \quad (3.12)$$

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

$$R_{23,41} = \frac{(V_4 - V_1)}{I_{23}} \quad (3.13)$$

ดังนั้นสามารถหาสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ [16]

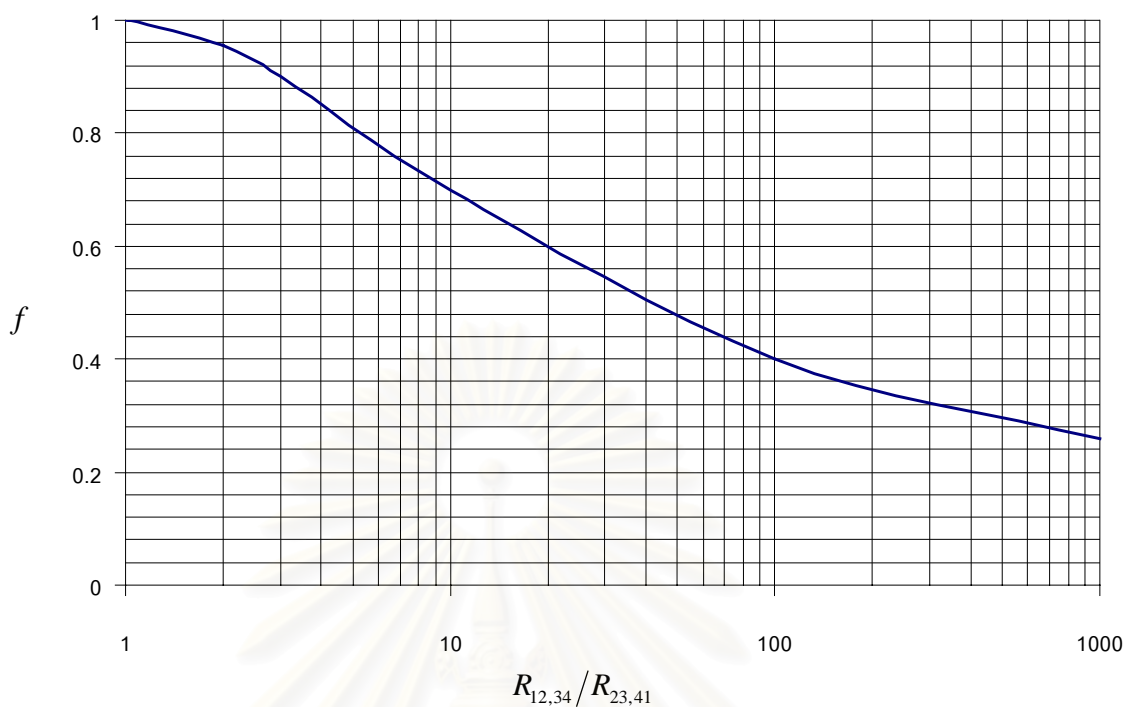
$$\exp\left[-\frac{\pi R_{12,34}}{\rho}\right] + \exp\left[-\frac{\pi R_{23,41}}{\rho}\right] = 1 \quad (3.14)$$

จากความรู้เรื่อง conformal mapping ของสนามไฟฟ้าในสองมิติ แวนเดอร์พาวด์พิสูจน์ว่าสมการที่ 3.14 ยังคงเป็นจริงสำหรับแผ่นสารรูปร่างใดๆ และหากทราบ d , $R_{12,34}$ และ $R_{23,41}$ สมการที่ 3.14 จะลดรูปเป็น [16]

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln\left[\frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2}\right]} f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right) \quad (3.15)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่างและ f คือ ค่าปรับแก้ (correction factor) ขึ้นกับอัตรา

ส่วนของ $\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$ ดัง แสดงในรูปที่ 3.3



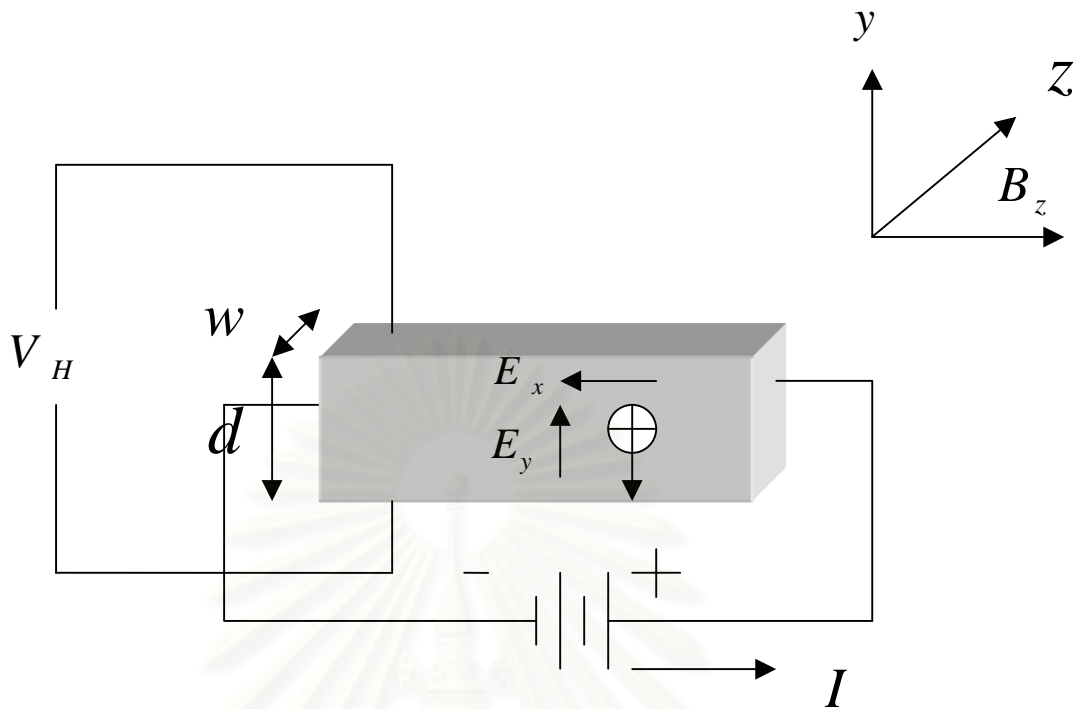
ที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ f และค่า $\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$ [16]

3.1.4 ปรัชญาการณฮอลล์ [15]

ความหนาแน่นของพาหะและสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะในสารกึ่งตัวนำ เป็นปริมาณสำคัญต่อการขนส่ง (transport) และสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยจะเห็นได้จากสมการ 3.11 ที่สภาพนำไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับปริมาณทั้งสองนี้โดยตรง

ในปี คศ.1874 ฮอลล์พบว่าหากนำสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสในตัวนำแล้วจะเกิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็กภายในตัวนำนั้นซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ที่ทำให้ทิศทางการไหลของพาหะเบี่ยงเบนไปทำให้ไปกองอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของแท่งตัวนำจนเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นมาได้

การวัดความหนาแน่นของพาหะและสภาพเคลื่อนที่ได้สามารถกระทำได้โดยอาศัยปรัชญาการณฮอลล์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์

พิจารณาจากสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดพี เมื่อใส่สนามไฟฟ้า E_x ในแนวแกน x มีกระแสไฟฟ้าไหลในแนวแกน x และมีสนามแม่เหล็กความเข้ม B_z ในแนวแกน Z ดังรูปที่ 3.4 จะเกิดแรงลอเรนซ์ขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ $qv_x B_z$ มีทิศในแกน $-y$ กระทำบนโฮลแล้วทำให้โฮลวิ่งลงมารวมกันอยู่ข้างล่างเกิดสนามไฟฟ้า E_y ในแนวแกน $+y$ เมื่อเกิดความสมดุลจะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน y คือ แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า E_y จะเท่ากับแรงลอเรนซ์ $qv_x B_z$ ดังสมการ

$$qE_y = qv_x B_z \quad (3.16)$$

จะได้ $E_y = v_x B_z$ (3.17)

จะเห็นว่าปริมาณ v_x ในสมการนี้สามารถนำไปสู่การหาความหนาแน่นพาหะได้ดังนี้

$$I = JA \quad (3.18)$$

เนื่องจากชั้นสารตัวอย่างมีความกว้าง w หนา d และ p คือความหนาแน่นพาหะในสารชนิดพี

$$I = (qpv_x)(wd) \quad (3.19)$$

$$v_x = \frac{I}{qpwd} \quad (3.20)$$

แทนค่า v_x ในสมการ (3.13) ลงในสมการ (3.16) จึงได้

$$E_y = B_z \left(\frac{I}{qpwd} \right) \quad (3.21)$$

เนื่องจากสามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์ (V_H) คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ไม่มีกระแสไหลในทิศแกน y ซึ่งหาได้จาก

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{B_z I}{qpwd} dy = \frac{B_z I}{qpd} \quad (3.22)$$

จะเห็นว่า $1/qp$ เป็นปริมาณที่เป็นสมบัติของสาร ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยปริมาณภายนอกคือ V_H, B, I, d เราจึงนิยามได้ว่า

$$R_H = \frac{dV_H}{BI} \quad (3.23)$$

เรียก R_H ว่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient)

ดังนั้นได้ความหนาแน่นพาหะสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยเขียน R_H เป็น R_{Hp} ได้ว่า

$$p = \frac{1}{qR_{Hp}} \quad (3.24)$$

ทำนองเดียวกันสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะได้ความหนาแน่นพาหะเป็น

$$n = -\frac{1}{qR_{Hn}} \quad (3.25)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (3.21) สามารถเขียนสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้อีกเช่นกัน

$$R_H = \frac{E_y}{B_z J_x} \quad (3.26)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำทั่วไปมีทั้งประจุลบและบวกในการนำไฟฟ้าตามลำดับและจะได้ว่า

$$J_x = J_{nx} + J_{px} \quad (3.27)$$

ซึ่ง J_{nx} และ J_{px} เกิดจากพาหะประจุลบกับประจุบวกในการนำไฟฟ้าตามลำดับและจะเห็นได้ว่า

$$\begin{aligned} J_x &= \sigma E_x, \\ J_{nx} &= \sigma E_{nx} \\ J_{px} &= \sigma E_{px} \end{aligned} \quad (3.28)$$

สนามไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ฮอลล์ในแกน y จะได้

$$\begin{aligned} E_y &= R_H J_x B_z \\ E_{ny} &= R_{Hn} J_{nx} B_z \\ E_{py} &= R_{Hp} J_{px} B_z \end{aligned} \quad (3.29)$$

แทนค่า E_y, E_{ny} และ E_{py} จากสมการ (3.29) ลงในสมการ (3.27) จะได้ความหนาแน่นกระแสรวมดังนี้

$$\sigma E_y = \sigma_n E_{ny} + \sigma_p E_{py}$$

$$\sigma R_H J_x B_z = \sigma_n R_{Hn} J_{nx} B_z + \sigma_p R_{Hp} J_{px} B_z$$

แทนค่า J_x, J_{nx} และ J_{px} จากสมการ (3.28) จะได้ว่า

$$\sigma^2 R_H E_x B_z = \sigma_n^2 R_{Hn} E_{nx} B_z + \sigma_p^2 R_{Hp} E_{px} B_z$$

จึงได้สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิค (Intrinsic semiconductor) เป็นตามสมการ

$$R_H = \frac{(R_{Hn} \sigma_n^2 + R_{Hp} \sigma_p^2)}{(\sigma_n + \sigma_p)^2} \quad (3.30)$$

จากสมการ (3.30) ถ้าเราแทน $\sigma_n = qn\mu_n$, $\sigma_p = qp\mu_p$, $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ จะได้ว่า

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{p - b^2 n}{(p + bn)^2} \quad (3.31)$$

สรุปได้ว่าเราสามารถหาค่า R_H ได้ด้วยสมการที่ (3.23) และกรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีสามารถหาความหนาแน่นพาหะด้วยสมการที่ (3.24) และถ้าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก็สามารถหาได้ด้วยสมการที่ (3.25) ส่วนสมการที่ (3.30) และ (3.31) เป็นความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิค

ถ้า τ ขึ้นกับความเร็วหรือพลังงานของพาหะ จากการคำนวณกลศาสตร์สถิติได้ความหนาแน่น p และ n ในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (3.24) และ (3.25) ดังนี้ [15]

$$p = \frac{r}{qR_{Hp}} \quad (3.32)$$

$$n = -\frac{r}{qR_{Hn}} \quad (3.33)$$

โดยที่ $r = \langle \tau^2 \rangle / \langle \tau \rangle^2$ และ τ คือเวลาปลอดการชนเฉลี่ยระหว่างพาหะ (mean free time) ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ E ; [33]

$$\tau = aE^{-s} \quad (3.34)$$

เมื่อ a และ s เป็นค่าคงที่

ในกรณีพาหะมีพลังงานเท่ากันแบบผิวทรงกลม (spherical constant energy surface)

$$\tau \sim E^{-\frac{1}{2}} \text{ สำหรับ phonon scattering}$$

$$\tau \sim E^{\frac{3}{2}} \text{ สำหรับ impurity scattering}$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในสถานะ non-degenerate

$$\langle \tau^m \rangle = \frac{\int_0^\infty \tau^m E^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE}{\int_0^\infty E^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE} \quad (3.35)$$

จากสมการ (3.34) และ (3.35) จะได้ว่า

$$\langle \tau^2 \rangle = \frac{a^2 (kT)^{-2s} \Gamma\left(\frac{5}{2} - 2s\right)}{\Gamma\left(\frac{5}{2}\right)} \quad (3.36)$$

$$\langle \tau \rangle^2 = \left[\frac{a (kT)^{-s} \Gamma\left(\frac{5}{2} - s\right)}{\Gamma\left(\frac{5}{2}\right)} \right]^2 \quad (3.37)$$

โดยที่ $\Gamma(n) = \int_0^\infty x^{n-1} \exp(-x) dx$, $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$

ดังนั้นจากสมการ (3.36) และ (3.37) จะได้ว่า

$$r = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2} = \frac{3\pi}{8} = 1.18 \text{ สำหรับ phonon scattering}$$

$$r = \frac{351\pi}{512} = 1.93 \text{ สำหรับ ionized impurity scattering}$$

สังเกตสมการที่ (3.9) ได้สภาพเคลื่อนที่ได้อของพาหะ

$$\mu = \frac{\sigma}{qn}$$

แต่สมการ (3.32) และ (3.33) ได้ว่า

$$-R_{Hn} \sigma_n = \frac{r \sigma_n}{qn} \quad (3.38)$$

$$R_{Hp} \sigma_p = \frac{r \sigma_p}{qp} \quad (3.39)$$

จึงนิยามสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (Hall Mobility)

$$\mu_H = |R_H \sigma|$$

ดังนั้นจึงได้ว่า

$$\mu_{Hn} = -\frac{r\sigma_n}{qn} \quad (3.40)$$

$$\mu_{Hp} = \frac{r\sigma_p}{qp} \quad (3.41)$$

จากเทคนิคแวนเดอร์พาวหากทำการวัดภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B กระทำในทิศตั้งฉากกับระนาบแผ่นสารตัวอย่าง จ่ายกระแสเข้าในแนวทะแยงมุมข้อ 1,3 วัดความต่างศักย์จากข้อ 2,4 และนิยาม $R_{13,24}$ ดังสมการ

$$R_{13,24} = \frac{V_{13}}{I_{24}} \quad (3.42)$$

สัมประสิทธิ์ของฮอลล์จากเทคนิคแวนเดอร์พาวนิยามโดย

$$R_H = \frac{d}{B} \Delta R_{13,24} \quad (3.43)$$

เมื่อ $\Delta R_{13,24}$ เป็นผลต่างระหว่างค่า $R_{13,24}$ ขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์คำนวณได้โดย

$$\mu = \frac{R_H}{\rho} = \frac{d}{B\rho} \Delta R_{13,24} \quad (3.44)$$

3.1.5 สมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ชนิดหลายชั้นจากเป้า ZnO(Al) (doped 2% wt Al₂O₃) และ Zn [6]

K.Tominaga และ คณะ ได้รายงานผลการทดลองของสภาพต้านทานไฟฟ้า ความเข้มชั้นของพาหะ และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(Al) และ ZnO(O_v) ชนิดหลายชั้นจากเป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) และเป้า Zn โดยการสปีดเตอร์เป้าทั้งสอง สลับกัน และได้เสนอแบบจำลองความหนาแน่นของพาหะในชั้นของฟิล์มดังกล่าวให้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้

ในแบบจำลองความหนาแน่นของพาหะในชั้นของฟิล์ม ซึ่งประกอบด้วย ZnO(Al) และ ZnO(O_v) กำหนดให้ความเข้มชั้นของพาหะสำหรับชั้นฟิล์ม ZnO(Al) และ ZnO(O_v) คือ n_A และ n_B ตามลำดับ ความหนาของ ZnO(Al) และ ZnO(O_v) คือ w_A และ w_B ตามลำดับ และมีสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะ μ_A และ μ_B ตามลำดับ ซึ่งถ้าการสปีดเตอร์ฟิล์ม ZnO(Al) ชั้นเดียว

ใช้เวลาดิสชาร์จ (discharge) t_A เป็นเวลาคงที่ 10 นาทีและเวลาในการดิสชาร์จของฟิล์ม ZnO (O_V) ชั้นเดียว t_B ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้เวลาในการดิสชาร์จรวมในหนึ่งรอบคือ $t_c = t_A + t_B$ และใช้อัตราการเคลือบของฟิล์ม ZnO(Al) และ ZnO(O_V) เป็น 100 nm/h และ 110 nm/h ตามลำดับ

ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ารวมคือ

$$\rho = \frac{(w_A + w_B)}{(q\mu_A n_A w_A + q\mu_B n_B w_B)} \quad (3.45)$$

โดยที่ q คือประจุของอิเล็กตรอน w_A และ w_B เท่ากับ $10s_A$ และ $s_B t_B$ เมื่อ s_A และ s_B คืออัตราการเคลือบของฟิล์ม ZnO(Al) และ ZnO(O_V) ตามลำดับ จากสมการ (3.44) จึงได้

$$\rho = \frac{\left(\frac{1}{q\mu_A n_A}\right)(10 + \alpha t_B)}{(10 + \alpha\beta\gamma t_B)} \quad (3.46)$$

เมื่อ α, β, γ ใช้แทน $s_B/s_A, n_B/n_A$ และ μ_B/μ_A ตามลำดับ ความเข้มข้นพาหะหาจากค่าเฉลี่ยในการวัดฮอลล์ (Hall measurement) ในแต่ละชั้นของฟิล์ม

$$n = \frac{(n_A w_A + n_B w_B)}{(w_A + w_B)} \quad (3.47)$$

$$= \frac{n_A(10 + \alpha\beta\gamma t_B)}{(10 + \alpha t_B)} \quad (3.48)$$

เมื่อความเข้มข้นของพาหะ n คำนวณจากสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient) $R_H = 1/qn$ สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จึงประมาณได้จากสมการ

$$\mu = \frac{1}{q\rho n} = \left(\frac{\mu_A n_A w_A + \mu_B n_B w_B}{n_A w_A + n_B w_B}\right) \quad (3.49)$$

$$= \frac{\mu_A(10 + \alpha\beta\gamma t_B)}{(10 + \alpha\beta\gamma t_B)} \quad (3.50)$$

ในกรณีนี้อัตราส่วนของอัตราการเคลือบฟิล์มของ ZnO(Al) และ ZnO(O_V) เป็น 1.1 และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเกือบเหมือนกับงานที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ [17] นั่นคือ $s_B/s_A \approx 1.1$ และ $\rho_A \approx \rho_B$ ดังนั้น $\alpha = 1.1, \beta\gamma = 1$ และ $\rho \approx \rho_A = \text{const}$ เพราะฉะนั้นความเข้มข้นของพาหะตามทฤษฎีลดลงเล็กน้อยและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์เพิ่มขึ้นที่ t_B เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงโดยสมการ (3.48) และ (3.50)

จะเห็นได้ว่าสมมติฐานของการแยกชั้นที่มีสิ่งเจือปนที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำลงยังอธิบายไม่ได้ด้วยความเข้มข้นของพาหะที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นโดยสมการ (3.45)-(3.50)

จึงแก้ไขแบบจำลองดังกล่าวโดยการกำหนดให้ความเข้มข้นของพาหะทั้งสองชั้นมีค่าเหมือนกัน เป็นความเข้มข้นของพาหะ n' ในระบบ ZnO(Al) และ ZnO(O_v) โดย

$$n' = \frac{(n_A w_A + n_B w_B)}{(w_A + w_B)} \quad (3.51)$$

$$= \frac{n_A (10 + \alpha \beta t_B)}{(10 + \alpha t_B)} \quad (3.52)$$

เมื่อแทนค่า n_A และ n_B ในสมการ (3.44) โดยค่า n' จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ดังสมการ

$$\rho' = \frac{(w_A + w_B)}{q \mu_A n' (w_A + \gamma w_B)} \quad (3.53)$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{q \mu_A n_A}\right) (10 + \alpha t_B)^2}{(10 + \alpha \beta t_B)(10 + \alpha \gamma t_B)} \quad (3.54)$$

และ

$$\mu' = \frac{1}{q \rho n'} = \frac{(\mu_A n' w_A + \mu_B n' w_B)}{(n' w_A + n' w_B)} \quad (3.55)$$

$$= \frac{\mu_A (10 + \alpha \gamma t_B)}{(10 + \alpha t_B)} \quad (3.56)$$

จากสมการที่ (3.53) และ (3.56) ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างเล็กน้อยและสภาพเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้นมากกว่าสมการที่ (3.50)

กล่าวโดยสรุปได้ว่าการแจกจ่าย (redistribution) ในความเข้มข้นของพาหะจากชั้น ZnO(Al) สู่อัน ZnO(O_v) อธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของสภาพการเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และการลดลงอย่างเล็กน้อยของสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากการลดลงของความไม่สมบูรณ์ในฟิล์ม ZnO(Al)

3.2 สมบัติเชิงแสง

การศึกษาช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี ส่วนใหญ่จะใช้สมบัติเชิงแสงของสาร เช่น การดูดกลืนแสง (optical absorption) การสะท้อนแสง (reflection) และสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (photoconductivity) เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติการดูดกลืนแสง และการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

3.2.1 สมบัติการดูดกลืนแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่หนึ่ง ซึ่งสามารถมีปฏิริยากับสสารได้และสามารถใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) อธิบายปรากฏการณ์ทางแสงต่างๆที่เกิดขึ้นในเนื้อสารได้ จากทฤษฎีนี้ทำให้สามารถอธิบายสมบัติเชิงแสงของตัวกลาง ซึ่งเป็นตัวบอกถึงการหน่วง การยินยอม หรือการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้ามาในเนื้อสารนั้น สมบัติดังกล่าวคือดัชนีหักเห (refractive index) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ซึ่งถ้ารู้สมบัติอย่างหนึ่งจะรู้สมบัติอีกอย่างหนึ่งได้

สสารสามารถดูดกลืนแสงได้นิยามของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในระดับมหภาค (macroscopic) คือสัดส่วนของความเข้มแสงที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของตัวกลาง ดังสมการ [18]

$$\alpha = \frac{-dI/I}{dx} \quad (3.57)$$

โดยที่ I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง x ใด ๆ ในตัวกลาง เนื่องจากความเข้มแสง เป็นปริมาณโดยตรงกับกำลังสองของศักย์เวกเตอร์ A ซึ่งสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α จะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงชัน (extinction coefficient, K) ดังสมการ [18]

$$\alpha = \frac{4\pi K}{\lambda} \quad (3.58)$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของแสงในสุญญากาศ เมื่อฉายแสงเข้าไปในตัวกลางใดๆ ความเข้มแสงจะลดลงเมื่อแสงเดินทางลึกเข้าไปในเนื้อสาร เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานแสงที่ผ่านเข้ามาในตัวกลางแล้วย้ายสถานะพลังงานไปอยู่ในระดับที่สูงขึ้นไป ลักษณะการดูดกลืนแสงของตัวกลางแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง

ตามทฤษฎีดังกล่าว การดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำได้เมื่อพลังงานของแสงเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานพอดี ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental absorption edge) นิยามโดยพลังงานที่น้อยที่สุดของแสง ที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบการนำ การดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับโอกาสในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถแบ่งการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนได้ 2 แบบ ได้แก่ การย้ายสถานะภายในแถบพลังงานเดียวกัน (intraband transition) และแบบมีเมื่ออิเล็กตรอนในแถบพลังงานหนึ่งรับพลังงานจากโฟตอนของแสงแล้วย้ายสถานะไปยังแถบพลังงานอื่น (band-

to-band transition) การดูดกลืนแสงเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ก็จะมีรายละเอียดแตกต่างกันไป ดังนี้ [19]

1. การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนย้ายสถานะในแถบพลังงานเดียวกัน

ปกติในแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มแล้ว จะเกิดการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนเพิ่มอีกไม่ได้ แต่สำหรับแถบพลังงานที่ยังมีสถานะพลังงานที่ว่างอยู่ เช่นในแถบนำจะสามารถเกิดการย้ายสถานะได้ โดยอิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานแสงแล้วย้ายไปอยู่ที่ระดับสถานะพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดได้หลายกรณี เช่น การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระ (free-carrier absorption) โดยเมื่ออิเล็กตรอนดูดกลืนแสงในกรณีนี้มีค่าน้อยเทียบกับการดูดกลืนแสงจากกรณีอื่นๆ เมื่อพลังงานของแสงมีค่าใกล้เคียงกับช่องว่างแถบพลังงาน และไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

2. การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนย้ายสถานะไปยังแถบพลังงานอื่น

การดูดกลืนแสงในกรณีนี้มีได้หลายลักษณะ ในที่นี้จะกล่าวถึงกรณีที่สำคัญและสามารถสังเกตได้เด่นชัด ได้แก่ การดูดกลืนแสงพื้นฐาน

เมื่ออิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ข้ามช่องว่างแถบพลังงานไปยังแถบนำ เรียกว่า การดูดกลืนแสงหลัก พลังงานของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนในกรณีนี้จะเท่ากับค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยประมาณ ซึ่งสามารถแบ่งการดูดกลืนนี้ออกเป็น 2 แบบขึ้นกับลักษณะของการย้ายสถานะ และโครงสร้างแถบพลังงานของสาร ได้แก่ การย้ายสถานะแบบตรง (direct transition) และการย้ายสถานะแบบอ้อม (indirect transition) ในการทดลองวัดการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ สามารถพบการดูดกลืนแสงทั้งสองลักษณะ ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ

การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง เป็นการย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ โดยมีค่า \vec{k} (wave vector) เดียวกัน ปรากฏเด่นชัดในสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง โดยการใช้แบบจำลองโครงสร้างแถบพลังงานที่เป็นแบบพาราโบลาอย่างง่าย (simple parabolic band) โดยสามารถหาความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงในกรณีนี้ได้ [18]

$$\alpha_d h\nu = \begin{cases} A(h\nu - E_g)^{1/2}, & h\nu > E_g \\ 0 & , h\nu < E_g \end{cases} \quad (3.59)$$

สำหรับการย้ายสถานะพลังงานแบบยอมรับได้ (allowed transitions) เมื่อ ν คือความถี่ของแสง h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ A คือ ค่าคงที่ และ E_g เป็นค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความสัมพันธ์นี้จะใช้ได้ทีบริเวณใกล้ๆกับขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental absorption edge) เท่านั้น

การย้ายสถานะแบบเฉียง เป็นการย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ โดยมีค่า \vec{k} เปลี่ยนไป ซึ่งการย้ายสถานะแบบนี้เกิดจากการช่วยเหลือของโฟนอน (phonon assisted) ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความถี่ของแสงในกรณีนี้ได้ [18]

$$\alpha_{\nu} = \begin{cases} B(h\nu - E_g)^2, & h\nu > E_g \\ 0 & , h\nu < E_g \end{cases} \quad (3.60)$$

เมื่อ B เป็นค่าคงที่

3.2.2 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง [18,20]

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ สามารถนำมาหาขนาดและประเภทของช่องว่างแถบพลังงานได้ เมื่อมีพลังงานโฟตอนตกกระทบบนสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3.5 ถ้าให้ความเข้มของแสงตกกระทบบนเป็น I_0 ความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาเป็น I_r และความเข้มแสงที่ทะลุผ่านเป็น I_t จะได้ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงดังกล่าว ในรูปของการสะท้อน (reflection, R) และการส่งผ่าน (transmission, T) ดังนี้

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (3.61)$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1 + R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (3.62)$$

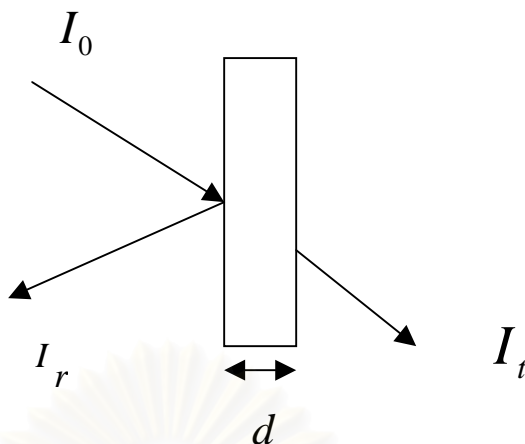
เมื่อ d คือความหนาของฟิล์ม ในกรณีที่ชั้นสารมีความหนาเหมาะสมที่ทำให้ $R^2 e^{-2\alpha d} \ll 1$ สมการที่ (3.62) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{I_t}{I_0} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.63)$$

โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานโฟตอนที่มาตกกระทบบ ดังนั้นเทอม $(1-R)^2$ จะประมาณเป็นค่าคงที่ และสามารถคำนวณค่า α ได้ดังสมการ

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{I_0}{I_t} \right] + A \quad (3.64)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่



รูปที่ 3.5 แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

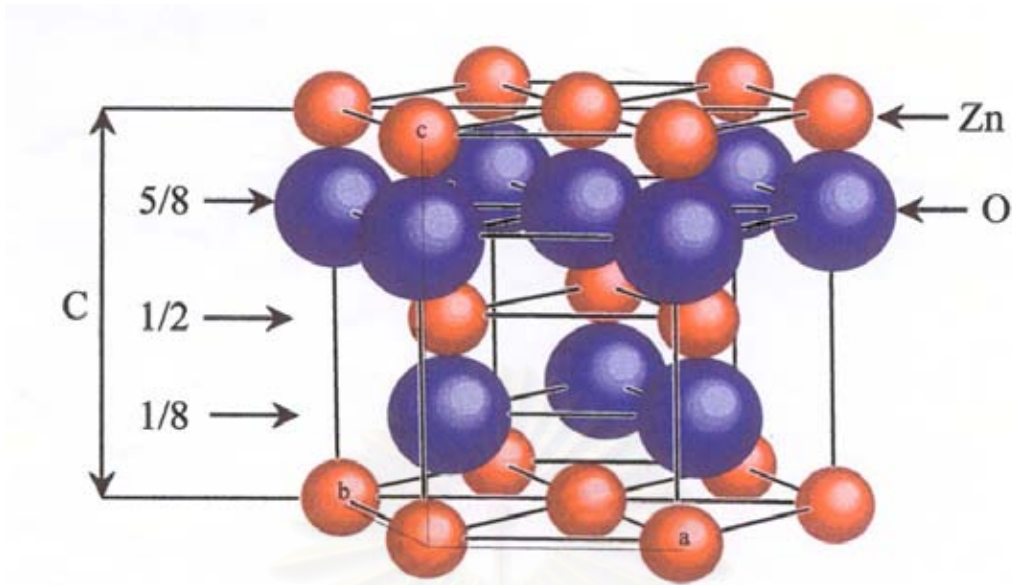
3.3 โครงสร้างผลึก

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มสามารถทำได้โดยวิธีวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึง โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์และกฎของแบรกก์

3.3.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

สารประกอบซิงค์ออกไซด์จัดเป็นสารประกอบเชิงคู่ (binary compound) ซึ่งเป็นการรวมตัวกันของธาตุในกลุ่ม 2 ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัวกับธาตุในกลุ่ม 6 ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 6 ตัว และโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์เป็นแบบ Wurtzite Struture คือเป็นโครงสร้างผลึกที่ประกอบขึ้นจากโครงสร้างแบบ hexagonal close-pack structure (hcp) สองโครงสร้างวางซ้อนกันโดยชุดแรกจะจับกันโดย Zn^{2+} และชุดที่ 2 จะจับกันโดย O^- ซึ่งมีค่าคงที่ผลึกคือ $a=b \neq c$, $\alpha=\beta=120^\circ$, $\gamma=90^\circ$ แสดงดังรูปที่ 3.6

รังสีเอ็กซ์ (X-Rays) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูง มีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 100 อังสตรอม ซึ่งสามารถเกิดการกระเจิงหรือการเลี้ยวเบน (diffraction) กับโครงสร้างผลึก (crystal structure) หรือโมเลกุลของสารได้



รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite Structure ของซิงค์ออกไซด์ [21]

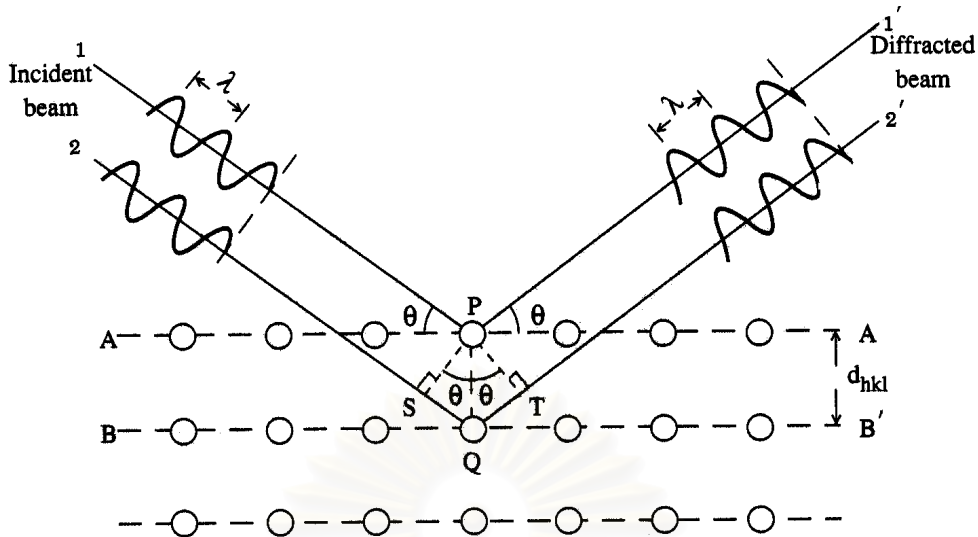
3.3.2 กฎของแบรกก์ (Bragg's law)

ในปี พ.ศ.2455 (ค.ศ.1912) W.H.Bragg และ W.L.Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองผลึกว่าประกอบด้วย“ชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane)” ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนรังสีเอ็กซ์ที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่ “สะท้อน” ออกไปจากระนาบต่างๆ หากความแตกต่างระหว่างระยะเดินทาง (path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงกันมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังรูปที่ 3.8 ก็ จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันตามสมการ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.65)$$

โดย λ เป็นความยาวคลื่น n เป็นลำดับของการสะท้อน d_{hkl} เป็นระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl) และ θ เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 3.7

จากกฎของแบรกก์ (สมการที่ 3.65) เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ n ในสมการดังกล่าวจะพบว่ามีความหมายทางกายภาพซ่อนอยู่ ในกรณีนี้จะใช้ตัวอย่างเพื่อแสดงแนวคิดและความหมาย



รูปที่ 3.7 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ จากรูประยะทางที่คลื่นรังสีเอกซ์ทั้งสอง ขบวนเคลื่อนที่ไปจะต่างกันเท่ากับ $\Delta = SQ + QT = 2d \sin \theta$ ดังนั้นการแทรกสอดแบบเสริมสร้างจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ $2d \sin \theta = n\lambda$ โดยที่ λ เป็นจำนวนเต็มใดๆ [22]

พิจารณาคลื่นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากระนาบ (111) ของผลึก

สำหรับการสะท้อนลำดับที่ 1 (1st order reflection): $2d_{111} \sin \theta_1 = 1\lambda$

สำหรับการสะท้อนลำดับที่ 2 (2nd order reflection): $2d_{111} \sin \theta_2 = 2\lambda$

อย่างไรก็ตาม สำหรับการเลี้ยวเบนลำดับที่ 2 จากระนาบ (111) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d_{111} นั้นอาจตีความหมายได้ว่าเป็นการเลี้ยวเบนลำดับที่ 1 จากระนาบซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบเป็น $\frac{1}{2}d_{111}$ ซึ่งจากความรู้ในทางผลึกวิทยาเราทราบว่าระนาบที่มีระยะห่างดังกล่าวได้แก่ระนาบ (222) นั่นเอง

จากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในการทดลอง การแทรกสอดจะแทรกสอดจะสังเกตได้จากความเข้มของรังสีเอกซ์ที่บันทึกลงบนกระดาษกราฟมุลี่เยวเบน (มุมระหว่างแนวรังสีสะท้อนกระทำกับระนาบของแนวรังสีตกกระทบ, 2θ) ต่างๆ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันเพื่อหาค่าคงที่ผลึกสำหรับธาตุหรือสารชนิดเดียวกันจะมีการแทรกสอดสูงสุดที่มุมเบี่ยงเบนเดียวกันและยังสามารถทำนายระนาบที่เกิดขึ้นที่มุมเบี่ยงเบนนี้ได้อีกด้วย

ระนาบต่างๆจะกำหนดโดยดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์แทนระนาบแต่ละชุดคือ (hkl) ซึ่ง h, k และ l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 0, 1, 2,..... และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมิลเลอร์ ค่าคงที่ผลึก $(a,b,c,\alpha,\beta,\gamma)$ และ ระยะห่างระหว่างระนาบสำหรับซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบ Wurtzite structure โครงผลึกประกอบด้วย 2 hexagonal closed-pack ได้ดังนี้ [21]

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.66)$$

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบบจำลองทางไฟฟ้าอย่างง่าย สภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ด้วยเทคนิค แวนเดอร์พาว ปรากฎการณฮอลล์ สมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ชนิดหลายชั้น สมบัติการดูดกลืนแสง การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มโดยวิธีวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การดำเนินการทดลอง

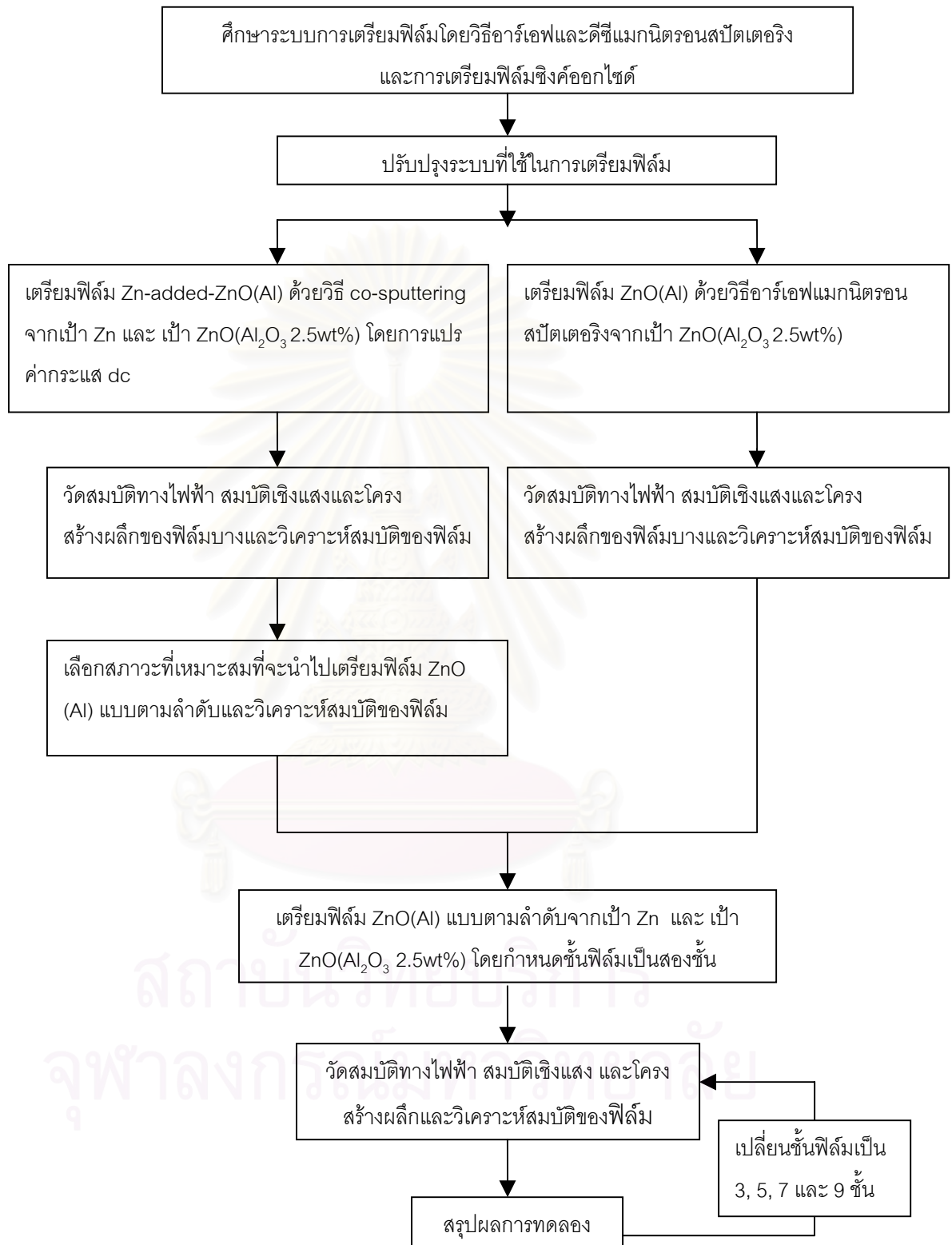
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง การเตรียมวัสดุรองรับ การสเปคเตอร์เคลือบฟิล์ม การวัดสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง และโครงสร้างผลึกของฟิล์ม

4.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การวิจัยเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง และกลไกของระบบสปัตเตอริงที่มีอยู่แล้ว จากนั้นเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงจากเป้าซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม 2.5% และฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ด้วยวิธีสปัตเตอริงพร้อมกัน (co-sputtering) ระหว่างเป้าโลหะซิงค์และเป้าซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม 2.5% ซึ่งทำบนวัสดุรองรับ soda lime glass ขนาด 4.85x5.85 ตารางเซนติเมตร โดยแขวนวัสดุรองรับห่างจากเป้าประมาณ 6 เซนติเมตร และหมุนอย่างสม่ำเสมอ หาสภาวะการเตรียมฟิล์มที่ให้สมบัติตามต้องการ จากนั้นใช้สภาวะดังกล่าวไปเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์จากโดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบตามลำดับ ซึ่งแสดงขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยตามรูปที่ 4.1

4.2 การเตรียมวัสดุรองรับ

วัสดุรองรับที่ใช้ในการทดลองเป็นกระจกโซดาไลม์ (soda lime glass) ขนาด 4.85 x 5.85 ตารางเซนติเมตร ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยการขัดเบาๆ ด้วยฟองน้ำสังเคราะห์และน้ำยาล้างจานแล้วนำกระจกไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิก (ultrasonic bath) ซึ่งมีน้ำผสมกับน้ำยาล้างจาน (500:1) 1 ครั้งและน้ำธรรมดาอีก 2 ครั้ง ครั้งละ 15 นาทีเพื่อขจัดคราบสกปรก จากนั้นล้างออกให้สะอาดด้วยน้ำดีไอออไนซ์และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนก่อนนำไปแช่ในกรดโครมิก(สารละลายอิมิตัวของโปแตสเซียมไดโครเมต (KCr_2O_4) ผสมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น ในอัตราส่วน 1:20 โดยปริมาตร) ประมาณ 12-24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์จากนั้นนำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกด้วยน้ำดีไอออไนซ์อีก 2 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที ก่อนนำไปเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและอบที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ปกติในการทดลองสามารถล้างได้ประมาณ 8 แผ่น



รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

4.3 การสเป็คเตอร์เคลือบฟิล์ม

4.3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

การเคลือบฟิล์มบาง ZnO(AI) ชนิดชั้นเดียวด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอริง จากเป้าซึ่งคอกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม 2.5 % ทำบนวัสดุรองรับ soda lime glass ขนาด 4.85 x 5.85 ตารางเซนติเมตร โดยแขวนวัสดุรองรับขนานกับระนาบของเป้าห่างประมาณ 6 เซนติเมตร และหมุนอย่างสม่ำเสมอ มีเงื่อนไขในการสเป็คเตอริง คือ ใช้ความดันของแก๊สอาร์กอน 8×10^{-3} มิลลิบาร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ และความหนาของฟิล์มบาง 3000 Å โดยมีขั้นตอนดังนี้

- นำกระจกที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว นำมายึดติดกับแท่นวัสดุรองรับ (substrate holder) ซึ่งวางขนานกับแนวระนาบของเป้าซึ่งคอกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม 2.5 wt% ห่างประมาณ 6 เซนติเมตร และแท่นสามารถหมุนได้ โดยในการเตรียมฟิล์ม 1 ครั้ง สามารถติดกระจกได้ 4 แผ่น ดังรูปที่ 4.2

- ทำความสะอาดภายในภาชนะสุญญากาศ (chamber) โดยใช้เครื่องดูดฝุ่นดูดเอาเศษผง ฝุ่นหรือคราบสกปรกที่เกิดขึ้นขณะสเป็คเตอริงในครั้งที่ผ่านออกมาออกให้หมด ปิดเป้าซึ่งคอกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมซึ่งจะใช้ในการสเป็คเตอริงด้วย shutter ซึ่งทำด้วยอลูมิเนียมและปิดเป้าโลหะซึ่งคอกไซด์ด้วยแผ่นอลูมิเนียม

- เปิด braker และ main switch ควบคุมเครื่องสเป็คเตอริง (balzer) และเปิดระบบน้ำหล่อเย็นระบบสเป็คเตอริงสำหรับระบบปั๊มต่างๆ จากนั้นเปิดสวิตช์ของระบบ balzer ซึ่งระบบจะเดินเครื่อง rotary pump และ turbo pump เพื่อเอาอากาศในภาชนะสุญญากาศออก จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่า 7.5×10^{-6} มิลลิบาร์

- ทำการฟลัชอาร์กอน (Flush Argon) เพื่อทำความสะอาดภายในภาชนะสุญญากาศและระบบท่อต่างๆ และยังเป็นกรเตรียมระบบเพื่อเข้าสู่สภาวะการสเป็คเตอริงโดยจะทำการฟลัชอาร์กอน 3 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที และมีการพักระหว่างครั้ง ๆ ละ 5 นาที โดยจะควบคุมการไหลของแก๊สอาร์กอนด้วย valve control unit โดยใช้ความดันของแก๊สในสภาวะการสเป็คเตอริง (working pressure) จริง

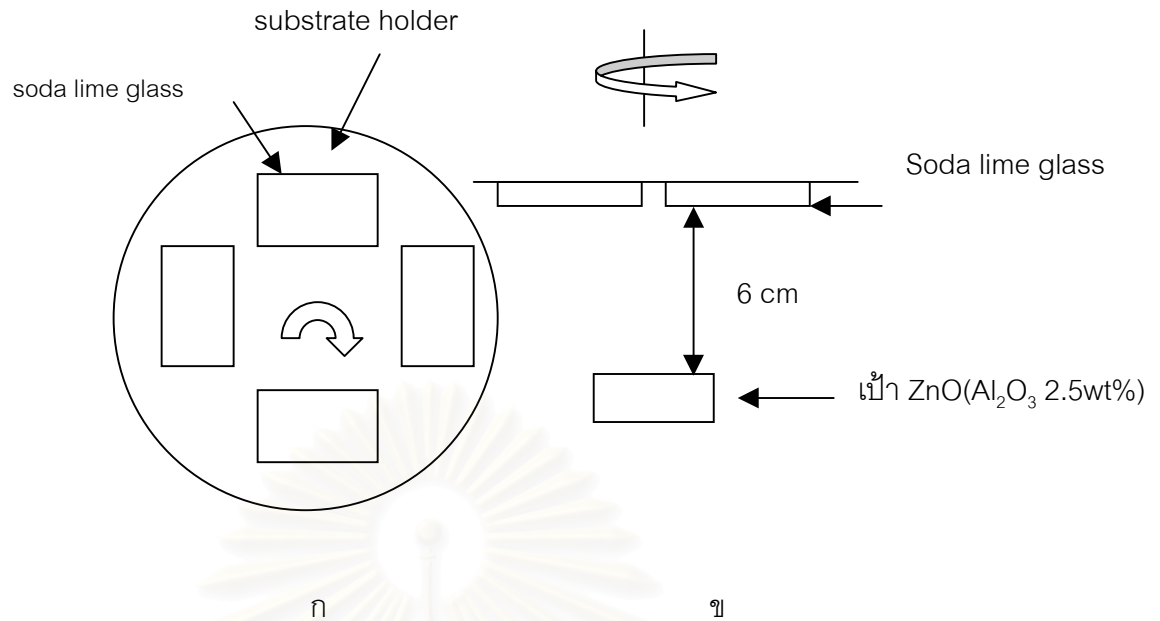
5. เมื่อฟลัชชอาร์กอนแล้วทำการ pre-sputter โดยการควบคุมอุปกรณ์และเงื่อนไขทุกอย่างเหมือนกับการสปีดเตอร์จริง แต่ไม่เปิด shutter ที่บังเป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%)

6. ขั้นตอนการสปีดเตอร์จริงจะเริ่มหลังจาก presputter โดยหยุดก๊าซอาร์กอนแล้วปล่อยจนกระทั่งความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงอยู่ในช่วง 8×10^{-6} มิลลิบาร์ เมื่อเริ่มการสปีดเตอร์จึงปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าจนมีความดัน 8×10^{-3} มิลลิบาร์ หลังจากนั้นเปิด braker ระบบจ่ายไฟดีซีและอาร์เอฟและเปิดสวิตช์ควบคุมอาร์เอฟและวงจร matching เปิดสวิตช์ควบคุม power volume ปรับ power volume ขึ้นไปประมาณ 50 จนกระทั่งมีไฟ standby จากนั้นปรับ c-tune และ c-load จนกระทั่งมีไฟ optimum ติด เมื่อไฟ optimum ติดแล้วให้ปรับ power volume ขึ้นไปอีกจนไฟของ polarity ติด แล้วปรับ power volume ลงมาที่ค่าตัวเลข 214 เพื่อให้ค่าของ incident power อยู่ที่ค่า 100 วัตต์ จากนั้นปรับที่ c-tune และ c-load อีกครั้งเพื่อให้ค่าของ reflected power เป็นศูนย์ เมื่อได้แล้วให้เปิดสวิตช์ล็อกสัญญาณ ในขณะที่ปรับค่าต่างๆ ให้สังเกตค่าความดันภายในภาชนะสุญญากาศไม่ให้สูงเกินกว่าค่าที่ใช้ในการสปีดเตอร์จริง (8×10^{-3} มิลลิบาร์)

7. เปิดสวิตช์หมุนแท่นยึดวัสดุรองรับ (7 รอบ/นาที) จากนั้นเปิด shutter พร้อมกับเริ่มจับเวลาโดยในการสปีดเตอร์จะแบ่งการสปีดเตอร์เป็นช่วง ช่วงละ 20 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วจะปิด shutter และ ปรับ power volume ไปที่ศูนย์ ปิดสวิตช์ rf generator ปิดสวิตช์ล็อกสัญญาณ ปิดวาล์วก๊าซอาร์กอนและปิดสวิตช์หมุนแท่นยึดวัสดุรองรับ รอจนกระทั่งอยู่ในระดับ 8×10^{-6} มิลลิบาร์ จากนั้นจะเริ่มรอบใหม่ โดยในแต่ละช่วงจะพักเป็นเวลา 10 นาที อย่างไรก็ตามต้องรอจนกระทั่งระบบไม่ร้อน

8. เมื่อทำการสปีดเตอร์เสร็จเรียบร้อยแล้วให้ปิด braker ระบบจ่ายไฟดีซีและอาร์เอฟ ปิดวาล์วของก๊าซอาร์กอน ปิดวาล์วของแก๊สไนโตรเจนเพื่อปิดระบบปั๊ม จากนั้นปิดสวิตช์ของมอเตอร์ที่หมุนแท่นยึดวัสดุรองรับ ปิด valve control unit ปิดสวิตช์ของ turbo pump และ rotary pump จากนั้นรอประมาณ 3 นาที วาล์วที่ควบคุมการไหลเข้าของแก๊สไนโตรเจนสู่ภาชนะสุญญากาศจะปิดเป็นเวลา 3 นาที แล้วก็จะปิดตามระบบอินเตอร์ล็อก จากนั้นให้เปิด leak valve ที่ฐานของภาชนะสุญญากาศเพื่อให้อากาศภายนอกเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

9. เมื่อปิดระบบสปีดเตอร์จริงของเครื่อง balzer แล้วรอให้ปั๊มน้ำเย็นเย็นเข้าไหลเวียนในระบบปั๊มน้ำเย็น รอประมาณ 10 นาทีแล้วค่อยปิดปั๊มน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำค้างอยู่ในระบบท่อซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ภายหลัง จากนั้นปิด main switch และ braker ควบคุมเครื่อง balzer



รูปที่ 4.2 วัสดุรองรับ (soda lime glass) ขนานกับเป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%)

- . ด้านบน
- . ด้านข้าง

4.3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) โดยวิธี co-sputtering

การเคลือบฟิล์มบาง Zn-added-ZnO(Al) ด้วยวิธีสputเตอริงพร้อมกัน (co-sputtering) จากเป้า Zn และ เป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5 wt%) โดยการสputเตอริงจากเป้าทั้งสองพร้อมกันโดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสputเตอริงและจัดวางวัสดุรองรับเช่นเดียวกับวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสputเตอริง เงื่อนไขในการสputเตอริง คือ ความดันแก๊สอาร์กอน 8×10^{-3} มิลลิบาร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ ความหนาของฟิล์มบาง 3000 Å และเปลี่ยนแปลงค่ากระแสดีซีที่แตกต่างกันเพื่อหาสภาวะที่จะให้ฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ที่มีสมบัติที่เหมาะสมเพื่อนำไปเตรียมฟิล์มแบบอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสputเตอริงโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ข้อ 1-4 ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสputเตอริงในหัวข้อ 4.3.1

2. เมื่อพลาสมาอาร์กอนแล้วทำการ pre-sputter โดยควบคุมอุปกรณ์และเงื่อนไขทุกอย่างเหมือนกับการสputเตอริงจริง แต่ไม่เปิดสputเตอริงที่บังเป้า Zn และ เป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) เท่านั้น โดยทำการ pre-sputter เป้า Zn และ เป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) ตามลำดับ

3. ขั้นตอนในการสputteringจริงโดยวิธีการ co-sputtering ชัตเตอร์จะปิดอยู่ที่เป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) เนื่องจากจะสputteringเป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนิตรอนสputteringก่อนตามข้อ 6 ในหัวข้อ 4.3.1 จากนั้นเปิดชัตเตอร์ของเป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) ให้หมุนไปปิดเป้า Zn ทันที เพื่อจะสputteringเป้า Zn โดยวิธีดีซีสputteringและเริ่มจับเวลา

4. เริ่มการสputteringเป้า Zn ด้วยวิธีดีซีแมกนิตรอนสputtering โดยการเปิดสวิตช์ควบคุมวงจรดีซี โดยกำหนดกระแสในการสputteringเป็น 10 mA และ 30 mA เมื่อกระแสคงที่ให้เปิดชัตเตอร์ เสร็จขั้นตอนนี้เป้าทั้งสองจะถูกสputteringพร้อมๆ กัน

5. ในการสputteringจะแบ่งการสputteringเป็นช่วงๆ โดยในการพักแต่ละช่วงนั้นเมื่อครบเวลาแล้วจะปิดชัตเตอร์ไปยังเป้า Zn ก่อน และปิดสวิตช์ควบคุมวงจรดีซี จากนั้นหมุนชัตเตอร์ไปปิดเป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) ปรับ power volume ไปที่ศูนย์ ปิดสวิตช์ rf generator ปลดสวิตช์ล็อกสัญญาณ ปิดวาล์วแก๊สอาร์กอนและปิดสวิตช์หมุนแท่นวัสดุรองรับ รอจนกระทั่งความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงจนกระทั่งอยู่ในระดับ 8×10^{-6} มิลลิบาร์ จากนั้นเริ่มรอบใหม่

6. เมื่อทำการสputteringเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ปิดระบบในการสputteringตามข้อ 8 และ 9 ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนิตรอนสputtering หัวข้อ 4.3.1

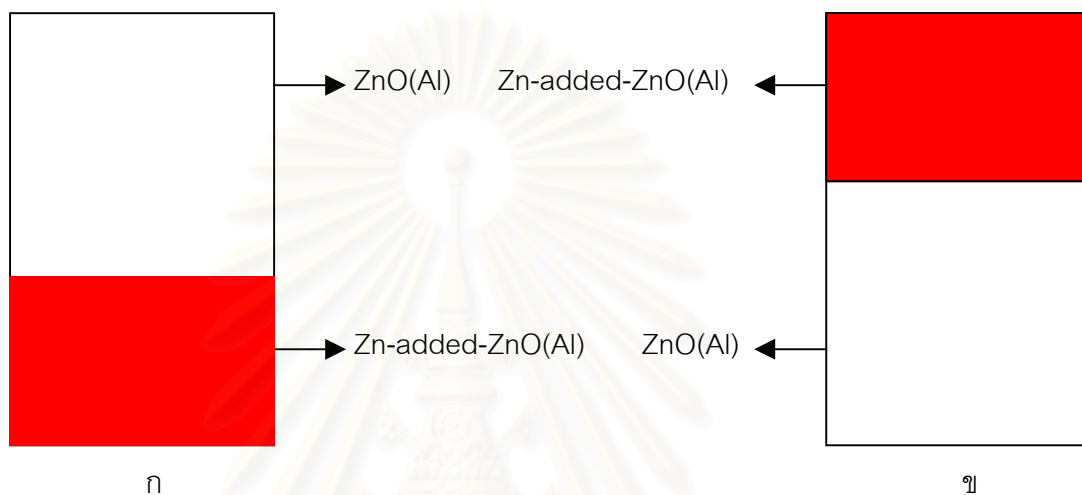
4.3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม ZnO(Al) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนิตรอนสputteringแบบตามลำดับ

การเคลือบฟิล์มบาง ZnO(Al) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนิตรอนสputteringจากเป้า Zn และ เป้า ZnO(Al₂O₃ 2.5wt%) แบบตามลำดับ ชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ที่ได้จากการ co-sputtering นั้นจะเลือกฟิล์มจากสถานะจากฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ในหัวข้อ 4.3.2

การเตรียมฟิล์มได้แบ่งชั้นฟิล์ม ZnO(Al) เป็น 2 ชั้นและแบ่งการเตรียมฟิล์มเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ทำการสputteringชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) โดยวิธี co-sputtering ก่อนตามด้วยการสputteringชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนิตรอนสputtering (Zn-added-ZnO(Al)/ZnO(Al)) ดังรูปที่ 4.3 ก และกรณีที่ 2 ทำการสputteringฟิล์ม ZnO(Al) ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนิตรอนสputteringก่อนตามด้วยการสputteringฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ด้วยวิธี co-sputtering (ZnO(Al)/Zn-added-ZnO(Al)) ดังรูปที่ 4.3 ข และได้เตรียมฟิล์ม ZnO(Al) ชนิดหลายชั้น คือ 3, 5, 7 และ 9 ชั้นด้วยโดยทำการสputteringฟิล์ม ZnO(Al) ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนิตรอนสputteringก่อนตาม

ด้วยการสเปคเตอร์ฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ด้วยวิธี co-sputtering จนครบจำนวนชั้นที่กำหนด ดังรูปที่ 4.4

ฟิล์มทั้งหมดกำหนดให้ความหนาของฟิล์มทั้งหมดคงที่ 3000 Å เปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) เป็น 20%, 40%, 60% และ 80% ของความหนาทั้งหมด



รูปที่ 4.3 ฟิล์ม ZnO(Al) ชนิดสองชั้นโดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริงแบบตามลำดับ

ก. กรณีที่ 1 (Zn-added-ZnO(Al)/ZnO(Al))

ข. กรณีที่ 2 (ZnO(Al)/Zn-added-ZnO(Al))

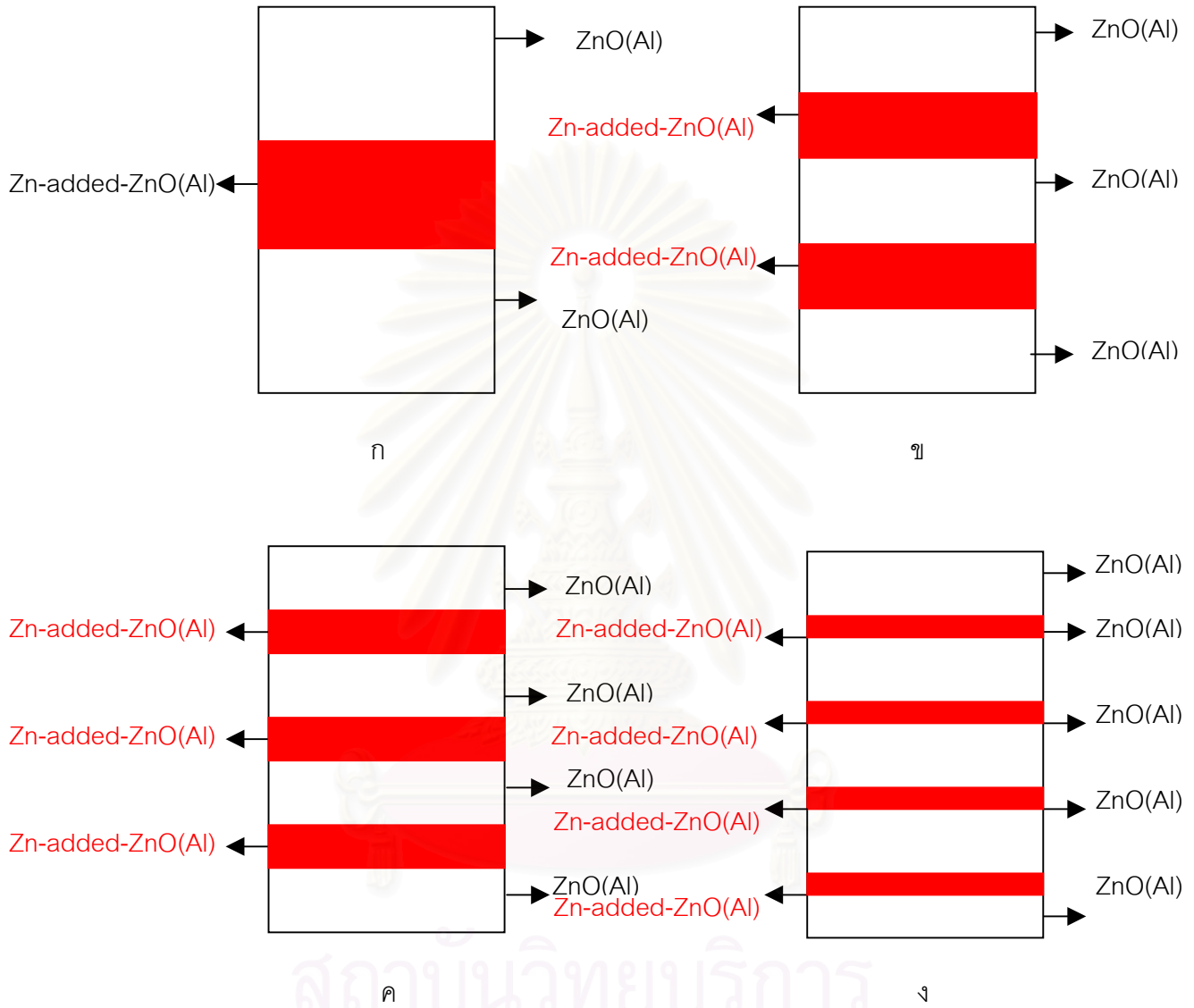
ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม ZnO(Al) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริงแบบตามลำดับมีขั้นตอนดังนี้

1. ข้อ 1-4 ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริง หัวข้อ 4.3.1

2. เมื่อพลาสมาอาร์กอนแล้วทำการ pre-sputter โดยควบคุมอุณหภูมิจึงและเงื่อนไขทุกอย่างเหมือนกับการสเปคเตอร์ริงจริง แต่ไม่เปิดสเปคเตอร์ที่บังเป้า Zn และ เป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%)

3. ในการสเปคเตอร์ริงจะกำหนดชั้นของฟิล์มเป็น 2 ชั้นก่อนโดยจะสเปคเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(Al) ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริงวิธีการตามข้อ 6 และ 7 ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(Al) โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริงหัวข้อ 4.3.1 ตามด้วยสเปคเตอร์ชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ด้วยวิธี co-sputtering ตามข้อ 4 ในหัวข้อ 4.3.2 โดยกำหนดให้ความหนา

ของฟิล์มทั้งหมดคงที่ 3000 Å และเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) เป็น 20%, 40%, 60%, 80% ของความหนาทั้งหมด



รูปที่ 4.4 ฟิล์ม ZnO(Al) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบตามลำดับ

ก. ฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 3 ชั้น

ข. ฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 5 ชั้น

ค. ฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 7 ชั้น

ง. ฟิล์ม ZnO(Al) ชนิด 9 ชั้น

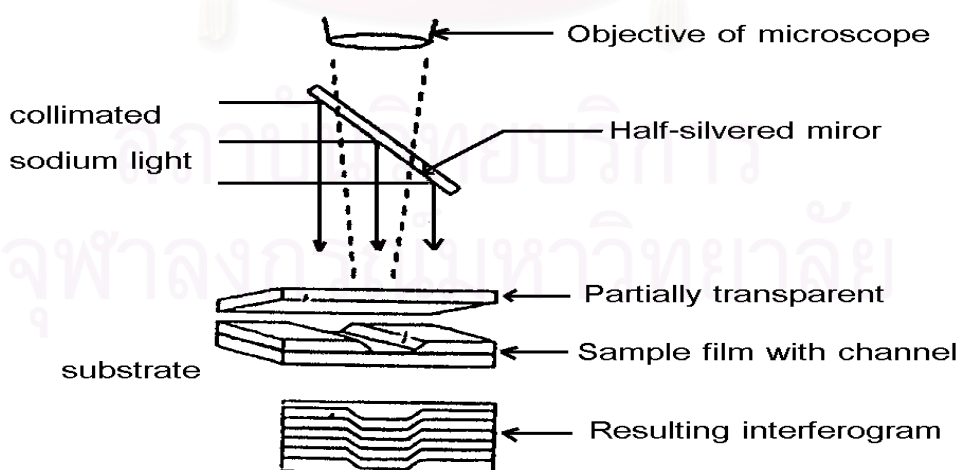
4. เปลี่ยนแปลงชั้นฟิล์มทั้งหมดเป็น 3, 5, 7 และ 9 ชั้น โดยในแต่ละกรณีจะสับตัดเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อนตามด้วยชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) สลับกัน และเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มตามข้อ 3. ในกรณีของการกำหนดชั้นฟิล์มเป็น 2 ชั้นจะเปลี่ยนเป็นการสับตัดเตอร์ชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ก่อนตามด้วยชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ด้วย

5. ทำการปิดชุดเตอร์ตามข้อ 5 ในหัวข้อ 4.3.2 และเมื่อทำการ สับตัดเตอร์เสร็จเรียบร้อยแล้วให้ปิดระบบในการสับตัดเตอร์จริงตามข้อ 8 และ 9 ในหัวข้อ 4.3.1

4.4 การวัดสมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์

4.4.1 การวัดความหนาของฟิล์มโดยเทคนิคโทลานสกี

ฟิล์มที่เตรียมได้จะใช้กรวดไฮโดรคลอริก 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรกัดฟิล์มให้เป็นร่องจนถึงผิววัสดุรองรับ การวัดความหนาของฟิล์มบางโดยเทคนิคโทลานสกี สามารถแสดงหลักการของวิธีนี้ ดังรูป 4.5 เมื่อแสงโซเดียมตกกระทบที่กระจกสะท้อนแสง 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวางเอียงกับระนาบของฟิล์มแสงที่สะท้อนจากกระจกนี้จะตกกระทบลงที่ซุดของฟิล์มบางและแผ่น partially transparent ที่เป็นแผ่นวัสดุบางๆ ที่สามารถยอมให้แสงผ่านได้บางส่วนและมีการสะท้อนแสงดี วางทำมุมเล็กๆ กับระนาบของฟิล์ม เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์จะเห็นริ้วแทรกสอดของแสงโซเดียมดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคโทลานสกี [10]

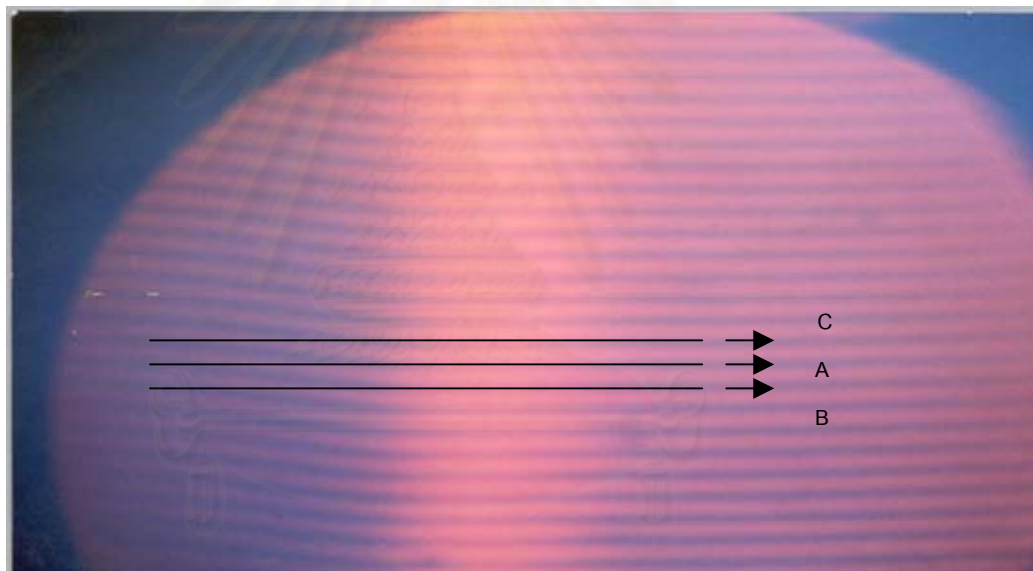
การคำนวณความหนาของฟิล์มจากรีฟแทรกสอด กระทำได้โดยการอ่านขนาดการเลื่อมกันของรีฟแทรกสอดจากภาพ ทำให้สามารถคำนวณความหนาได้จากสมการ 4.1

$$t = \Delta n \times \left(\frac{\lambda}{2} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ t คือ ความหนาของฟิล์มบางมีหน่วยเป็นอังสตรอม

Δn คือ ขนาดการเลื่อมกันของรีฟแทรกสอด

λ คือ ความยาวคลื่นแสงโซเดียมเท่ากับ 5890 อังสตรอม

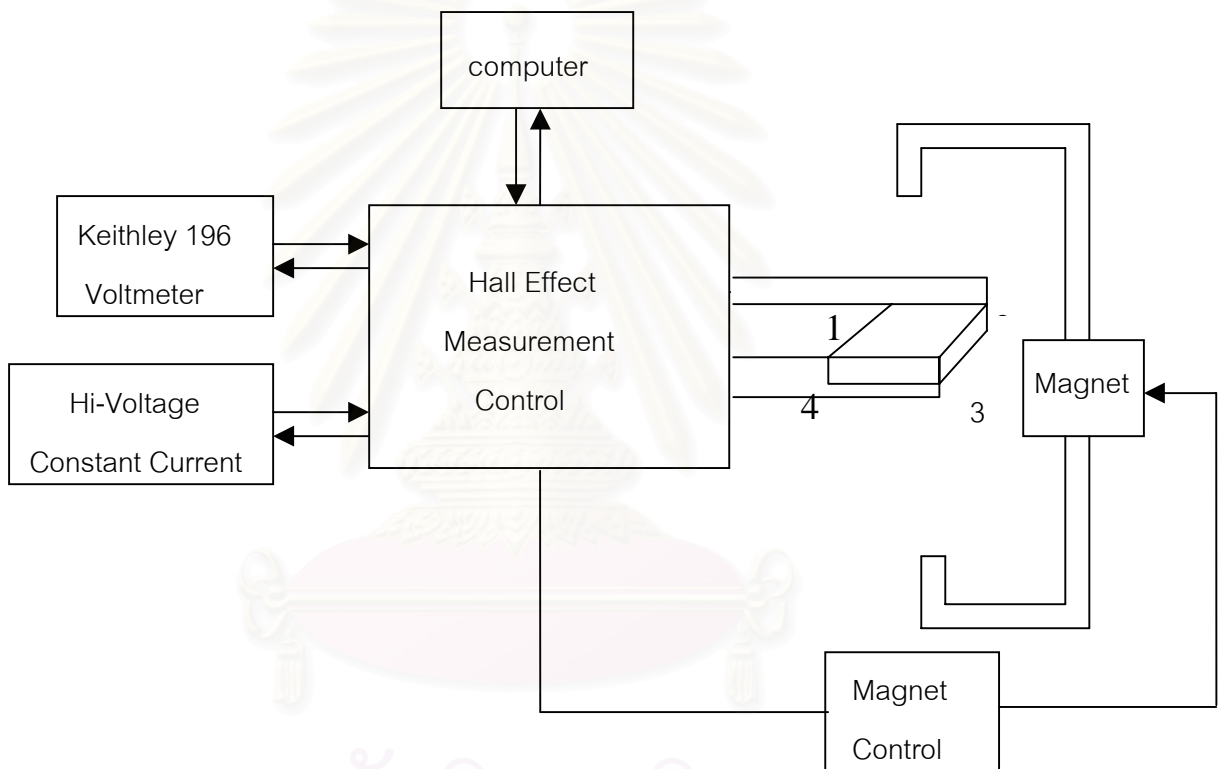


รูปที่ 4.6 รีฟแทรกสอดของฟิล์ม

จากรูปที่ 4.6 รีฟแทรกสอดจาก A ไปยัง B มีจำนวน 1 รีฟ ซึ่งสามารถเทียบกับระยะการเลื่อมกันของรีฟแทรกสอดจาก A ไปยัง C เนื่องจากความหนาของฟิล์มบาง (Δn) คิดเป็น 1.14 เท่าของรีฟแทรกสอดจาก A ไปยัง B และเมื่อแทนค่าในสมการ 4.1 จะได้ความหนาเป็น 3357.3 Å

4.4.2 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม

ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มได้แก่สภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความหนาแน่นพาหะ ได้ทำการวัดด้วยระบบฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว ซึ่งเป็นระบบวัดและเก็บข้อมูลที่ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ แสดงผังการทำงานได้ดังรูป 4.7 คอมพิวเตอร์จะควบคุมการทำงานของแหล่งจ่ายกระแสคงที่ความต่างศักย์สูง (Hi - Voltage Constant Current) ระบบควบคุมการวัดฮอลล์ (Hall effect Measurement control) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสเข้าที่ขั้วสัมผัสต่างๆ ของฟิล์มที่วัดและควบคุมการเปิดปิดแม่เหล็ก



รูปที่ 4.7 แผนผังระบบการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์พาวจะวางขั้วไฟฟ้าไว้ที่มุมทั้ง 4 ของชิ้นสารตัวอย่าง และวัดข้อมูลของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นไปได้ทั้งหมด 20 แบบ โดยสภาพต้านทานไฟฟ้าคำนวณได้จากการวัดในรูปแบบตั้งแต่ 1-8 ในตารางที่ 4.1 และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ในรูปแบบที่ 13-20 ในตารางที่ 4.3 และ 4.4

configuration	forward				Measurement parameter
	I+	I-	V+	V-	
1	I_1	I_2	V_3	V_4	I_{12}, V_{34}
3	I_2	I_3	V_4	V_1	I_{23}, V_{41}
5	I_3	I_4	V_1	V_2	I_{34}, V_{12}
7	I_4	I_1	V_2	V_3	I_{41}, V_{23}

Configuration	reverse				Measurement parameter
	I+	I-	V+	V-	
2	I_2	I_1	V_3	V_4	I_{21}, V_{34}
4	I_3	I_2	V_4	V_1	I_{32}, V_{41}
6	I_4	I_3	V_1	V_2	I_{43}, V_{12}
8	I_1	I_4	V_2	V_3	I_{14}, V_{23}

ตารางที่ 4.1 รูปแบบของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

configuration	forward				Measurement parameter
	I+	I-	V+	V-	
9	I_1	I_3	I_2	I_4	I_{13}, V_{24}
11	I_2	I_4	I_1	I_3	I_{24}, V_{13}

configuration	reverse				Measurement parameter
	I+	I-	V+	V-	
10	I_3	I_1	I_2	I_4	I_{31}, V_{24}
12	I_4	I_2	I_1	I_3	I_{42}, V_{13}

ตารางที่ 4.2 รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ขณะไม่มีสนามไฟฟ้า

configuration	forward				Measurement parameter
	I+	I-	V+	V-	
13	I_1	I_3	I_2	I_4	I_{13}, V_{24}
15	I_2	I_4	I_1	I_3	I_{24}, V_{13}

Configuratio n	reverse				Measurement parameter
	I+	I-	V+	V-	
14	I_3	I_1	V_2	V_4	I_{31}, V_{24}
16	I_4	I_2	V_1	V_3	I_{42}, V_{13}

ตารางที่ 4.3 รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ขณะมีสนามแม่เหล็ก -B

configuration	forward				Measurement parameter
	I+	I-	V+	V-	
17	I ₁	I ₃	V ₂	V ₄	I ₁₃ , V ₂₄
19	I ₂	I ₄	V ₁	V ₃	I ₂₄ , V ₁₃

configuration	reverse				Measurement parameter
	I+	I-	V+	V-	
18	I ₃	I ₁	I ₂	I ₄	I ₃₁ , V ₂₄
20	I ₄	I ₂	I ₁	I ₃	I ₄₂ , V ₁₃

ตารางที่ 4.4 รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ขณะมีสนามแม่เหล็ก +B

สภาพต้านทานไฟฟ้า ρ และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ μ_H สามารถได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

จากตารางที่ 4.1 สภาพต้านทานไฟฟ้าของรูปแบบที่ 1 และ รูปแบบที่ 3 ($\rho(1,3)$) หาได้จากสมการ

$$\rho(1,3) = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_{12,34} + R_{12,41})}{2} f \left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} \right)$$

เมื่อ $R_{12,34} = \frac{(V_3 - V_4)}{I_{12}}$, I_{12} เป็นกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าทางขั้ว 1 ออกทางขั้ว 2

และ $R_{23,41} = \frac{(V_4 - V_1)}{I_{23}}$, I_{23} เป็นกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าทางขั้ว 2 ออกทางขั้ว 3

$$f = \frac{(Q-1)}{(Q+1)}$$

$$= (f/\ln 2) \operatorname{arccos} h \left\{ \frac{1}{2} \exp[\ln 2/f] \right\}$$

$$Q = \frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$$

สำหรับ $\rho(3,5)$, $\rho(5,7)$, $\rho(7,1)$, $\rho(2,4)$, $\rho(4,6)$, $\rho(6,8)$ และ $\rho(8,2)$ หาได้ในทำนองเดียวกัน และสามารถคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยได้จากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้ง 8 ค่า

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ รูปแบบที่ 13 และ รูปแบบที่ 17 ($\mu_c(13,17)$) หาได้ดังนี้

$$R_H(13,17) = \frac{d(\text{cm})\Delta V_H}{B(T)I(\text{mA})}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad & \Delta V_H = |V_{24}(+B) - V_{24}(-B)| \\ \text{ดังนั้น} \quad & \mu_H(13,17) = \frac{R_H(13,17)}{\rho} \end{aligned}$$

สำหรับ $\mu_H(15,19)$, $\mu_H(14,18)$ และ $\mu_H(16,20)$ หาได้ในทำนองเดียวกันและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์เฉลี่ยหาได้จากค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ทั้ง 4 ค่า

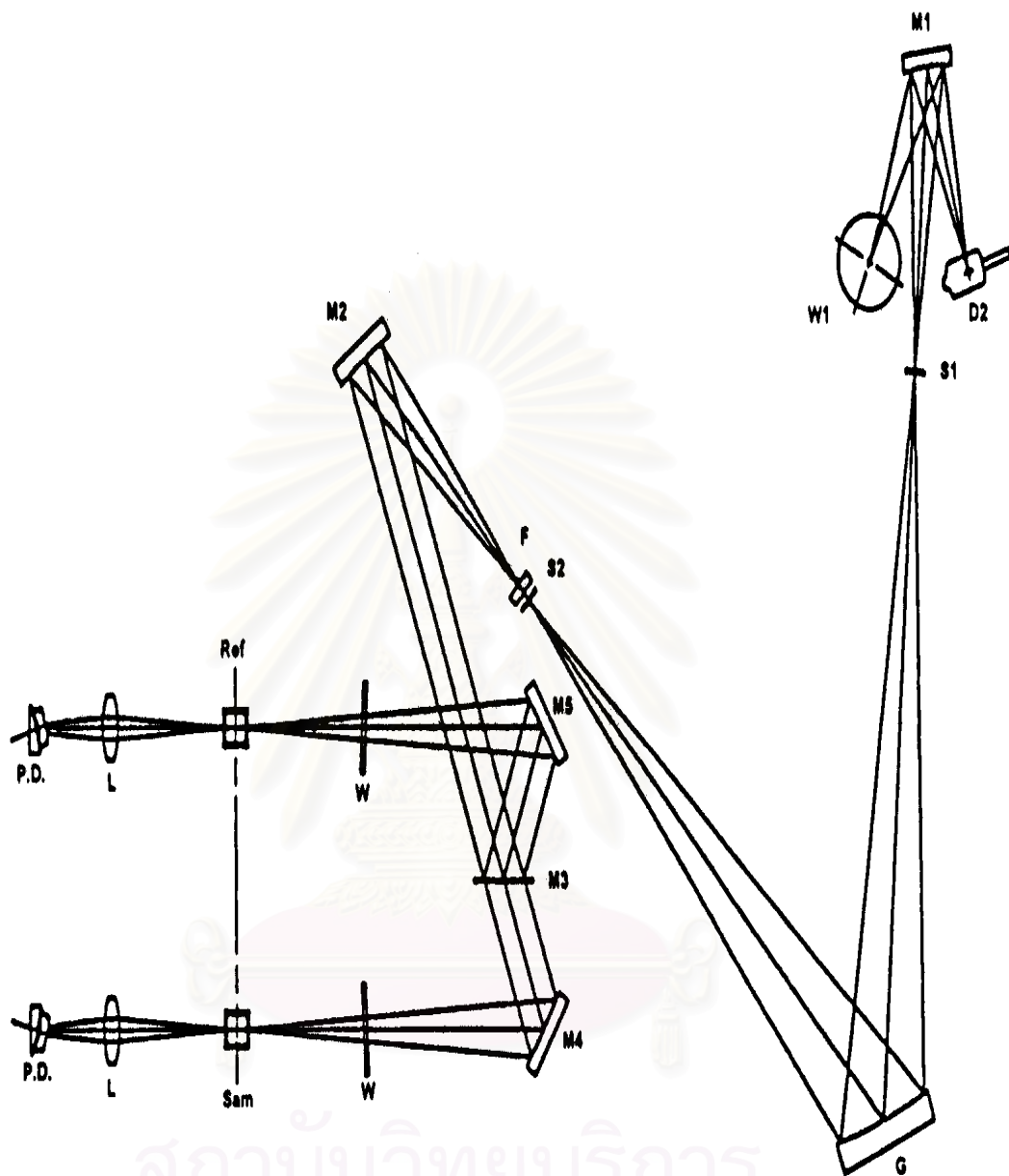
4.4.3 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม

การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสามารถวัดโดยใช้เครื่อง UV - visible spectroscope (UV 1601(PC) , Shimadzu) ซึ่งเป็นแบบลำแสงคู่ มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.8 เป็นระบบและเก็บข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งอธิบายการทำงานคร่าว ๆ ได้ คือ แสงออกจากแหล่งกำเนิด (deuterium lamp, D2 or halogen lamp,WI) ตกกระทบกระจก M1 และเปลี่ยนเป็นแสงเอกรงค์โดยเกรตติง (G) จากนั้นกระจกสะท้อนแสง 50 เปอร์เซ็นต์ (M3) จะแยกเป็น 2 ลำซึ่งจะตกกระทบบนวัสดุรองรับที่มีฟิล์ม (Sam) และวัสดุรองรับอ้างอิง (ไม่มีฟิล์ม) (Ref) ไปยัง Photodiode detector (PD) ซึ่งจะทำให้การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสงตกกระทบซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ (200-1200nm) ถ้ากำหนดความเข้มเป็น I_0 เมื่อแสงผ่านตัวอย่างกำหนดความเข้มแสงที่วัดได้เป็น $I = I_0 e^{-\alpha t}$ เมื่อ α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient , α) ดังนั้นการส่งผ่านแสง (transmission, T) จะได้รับจาก $T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha t}$ และจึงได้, $\alpha = (-\ln T)/t$ จากสเปกตรัมของการส่งผ่านจึงสามารถได้รับช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) ของฟิล์มได้

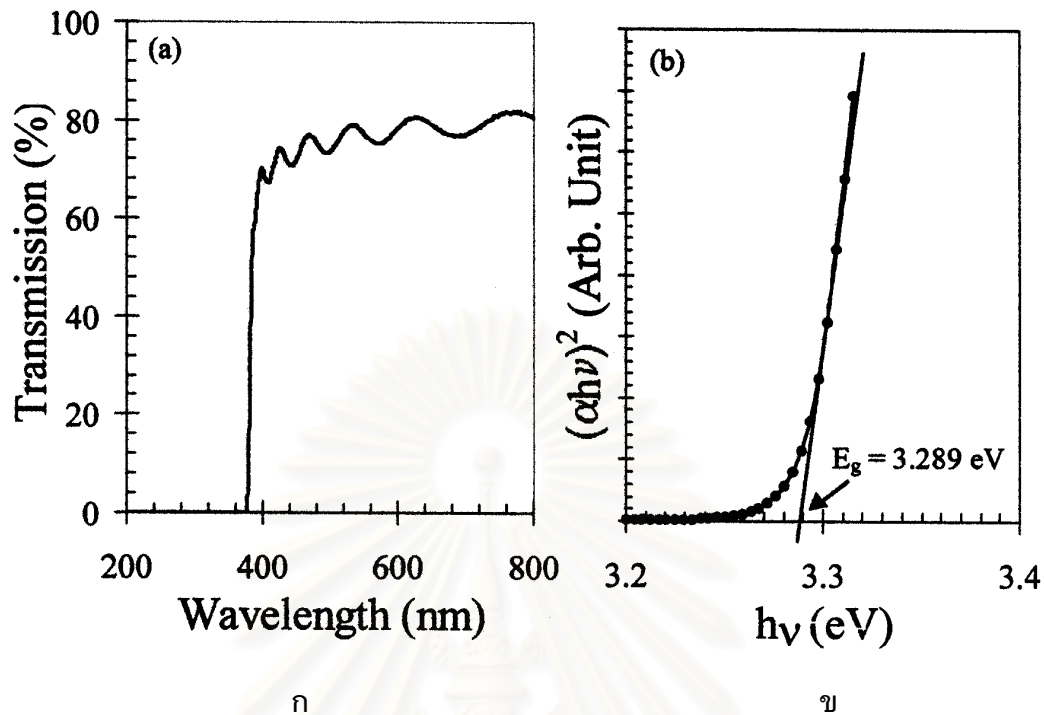
สำหรับ interband transition ของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap)

$$\alpha \propto \frac{(h\nu - E_g)^{1/2}}{h\nu} \quad (4.2)$$

จะเห็นได้ว่า $(\alpha h\nu)^2 \propto (h\nu - E_g)$ จึงสามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ได้โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานของโฟตอน ($h\nu$) โดยช่องว่างแถบพลังงานก็คือส่วนตัดของพลังงานโฟตอน ตัวอย่างกราฟแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV 1601(PC), Shimadzu [23]



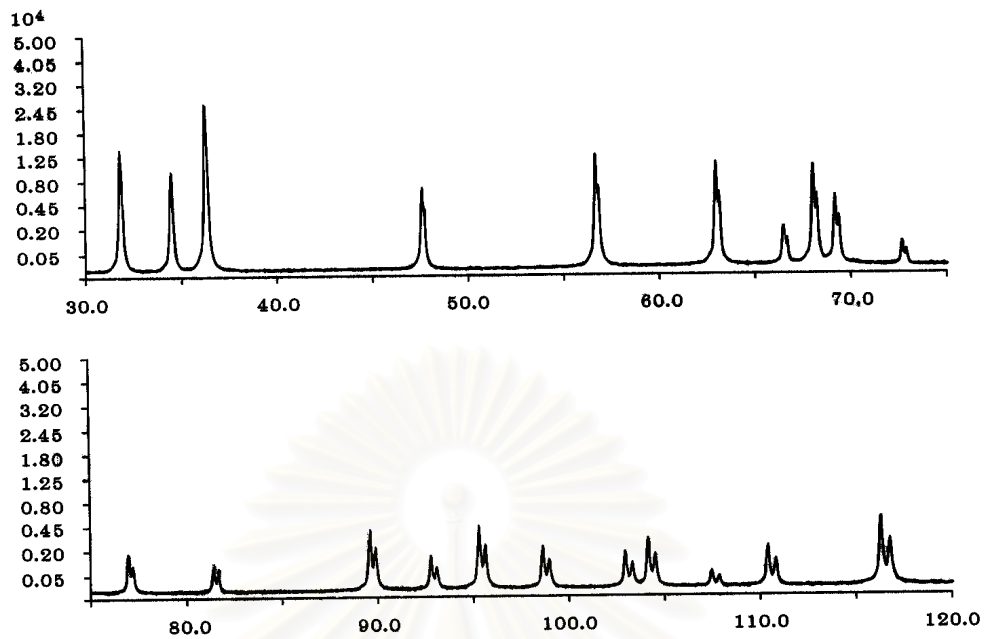
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO

ก. สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO

ข. กราฟของ $(\alpha h\nu)^2$ และพลังงานของโฟตอน ($h\nu$) ซึ่งจะหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากส่วนตัดแกนของพลังงานโฟตอนโดยการประมาณค่า

4.4.4 การหาโครงสร้างผลึกของฟิล์ม

ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองจะนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer) ซึ่งเทคนิคนี้ใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือวัสดุหลายผลึก วิธีการจะทำให้ตัวอย่างหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์ (X-ray detector) จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ZnO ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และค่าความเข้มของรังสีแสดงในรูป 4.9



รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จาก ZnO [22]

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการทดลอง การเตรียมวัสดุรองรับ การสเป็คเตอรเคลือบฟิล์ม การวัดความหนาของฟิล์ม การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม และการหาโครงสร้างผลึกของฟิล์ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ผลการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งได้เป็นสามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นผลการทดลองของการเตรียมฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ด้วยวิธีการสปัตเตอริงพร้อมกัน (co-sputtering) โดยใช้เป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) และเป้า Zn ส่วนที่สองเป็นผลการทดลองของการเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดสองชั้น และส่วนที่สามเป็นผลการทดลองของการเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดหลายชั้น ซึ่งในแต่ละส่วนจะแสดงผลของสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง และโครงสร้างผลึกของฟิล์ม

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดในการทดลองนี้ ฟิล์มบาง ZnO(AI) เตรียมจากเป้า ZnO(Al_2O_3 2.5wt%) ซึ่งเป็นสารประกอบนั้นองค์ประกอบของฟิล์มที่ได้จะมีสมบัติแตกต่างจากเป้าโดยในโครงสร้างของฟิล์มอาจมีการขาดหายไปของอะตอมของออกซิเจน ตามรายงานของ C.R. Aita และคณะ [24] ทำให้เกิดความบกพร่องของโครงสร้างภายในฟิล์ม นอกจากนี้ความบกพร่องของโครงสร้างของฟิล์มอาจเกิดจากอะตอมของซิงค์อิสระที่อยู่ตามช่องว่างของโครงผลึก T.Minami และคณะ [25] ได้รายงานว่าความบกพร่องเหล่านี้ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าเนื่องจากความหนาแน่นพาหะที่เพิ่มขึ้น และในกรณีที่เป้ามักมีการเจือด้วยอลูมิเนียมในโครงสร้างของฟิล์มนั้น Al^{3+} จะเข้าไปแทนที่ Zn^{2+} ในโครงผลึก ก็จะให้อิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ขึ้นในโครงผลึกเช่นกัน ทั้งสามกรณีที่กล่าวไปเป็นรูปแบบของการเพิ่มอิเล็กตรอนอิสระขึ้นเรียกรวมกันว่าเกิด donors ขึ้นในฟิล์ม แต่ก็ยังมีอีกกรณีหนึ่งที่เป็นไปได้เช่นเดียวกันคือเกิดความบกพร่องของอะตอมของซิงค์ในโครงผลึกซึ่งเรียกรวมกันว่าเกิด acceptor ขึ้นในฟิล์ม [17]

สรุปสั้น ๆ ได้ว่า Donors และ Acceptor ในฟิล์ม ZnO(AI) ได้แก่ [17]

- | | | |
|---------------------------------------|---|----------|
| 1. Oxygen vacancies | } | Donors |
| 2. Interstitial Zn atoms | | |
| 3. Donor atoms at a lattice site (Al) | | |
| 4. Defects at Zn lattice sites | → | Acceptor |

ผลของ donors และ acceptor นี้เองที่ทำให้ได้โครงสร้างของฟิล์มที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้ฟิล์มมีสมบัติแตกต่างกันไปด้วย

5.1 สมบัติของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ด้วยวิธีการสเปคโตรริงพร้อมกัน

ผลของการเตรียมฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ด้วยวิธีการสเปคโตรริงพร้อมกัน จาก เป้า Zn และ เป้า ZnO(Al_2O_3 2.5 wt%) โดยในการสเปคโตรริงแบบดีซีได้ทำการเปลี่ยนค่ากระแสดีซี เป็น 0 mA, 10 mA และ 30 mA เพื่อหาสภาวะที่จะได้ฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่มีสมบัติเหมาะสมเพื่อนำสภาวะดังกล่าวไปใช้ในการเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับต่อไป

5.1.1 สมบัติทางไฟฟ้า

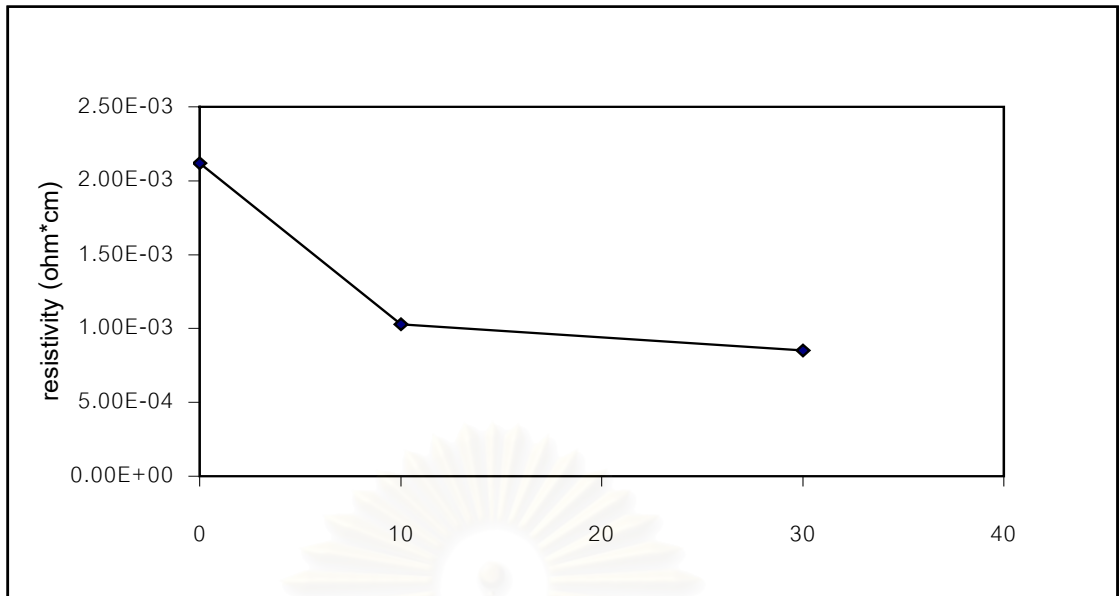
ในรูปที่ 5.1 (ก) แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเพิ่มกระแสดีซีสูงขึ้น เพราะกระแสดีซีที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของ Zn จากเป้าซึ่งคืบขึ้นไปเคลือบบนวัสดุรองรับมากขึ้นทำให้จำนวนอะตอมของ Zn ในโครงสร้างผลึกมากขึ้นความเข้มข้นของพาหะจึงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 5.1 (ค) ซึ่งความเข้มข้นของพาหะที่เพิ่มขึ้นเกิดจากอะตอมของ Zn ที่มากเกินไปในโครงสร้างผลึกและประพฤติตัวเป็น native donor (interstitial Zn) ทำให้ฟิล์มแสดงความเป็นโลหะ สภาพต้านทานไฟฟ้าจึงลดต่ำลง และค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (รูปที่ 5.19(ข)) เมื่อเพิ่มกระแสดีซีจาก 0 mA เป็น 10 mA เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของพาหะที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มกระแสดีซีเป็น 30 mA สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ลดลงอีกครั้งเนื่องจากผลของความเข้มข้นของพาหะที่เพิ่มขึ้นอย่างมากทำให้มีการกระเจิงของพาหะมากขึ้นด้วย

5.1.2 สมบัติเชิงแสง

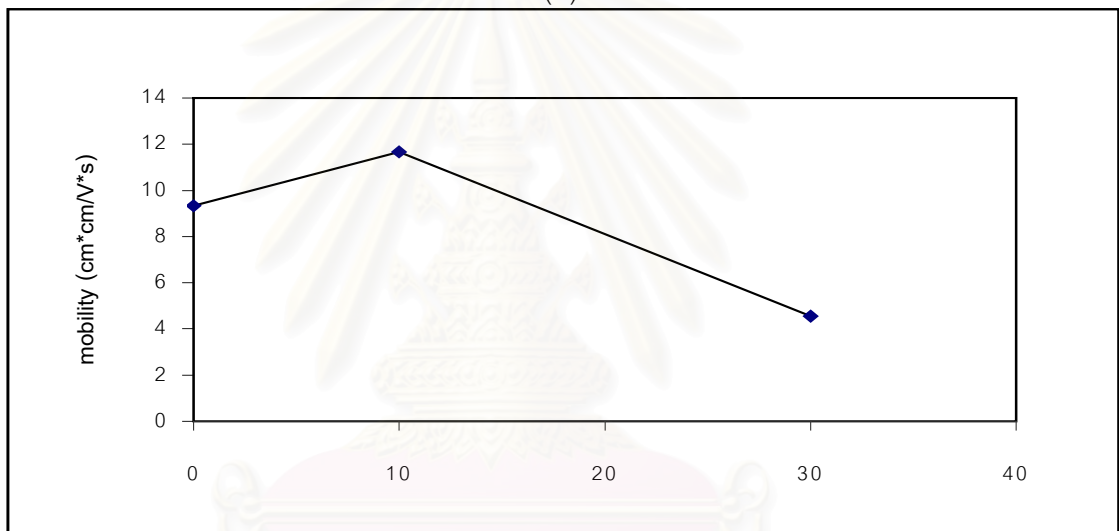
ผลของการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) แสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่ง จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มกระแสดีซีจาก 0 mA เป็น 10 mA การส่งผ่านแสงลดลง และเมื่อเพิ่มกระแสดีซี เป็น 30 mA การส่งผ่านแสงลดลงเกือบเป็นศูนย์ เนื่องจากอะตอมของ Zn ที่มากเกินไปทำให้ฟิล์ม แสดงความเป็นโลหะมากขึ้น ความเป็นโลหะของ Zn ยอมให้แสงผ่านได้น้อยลง

5.1.3 โครงสร้างผลึก

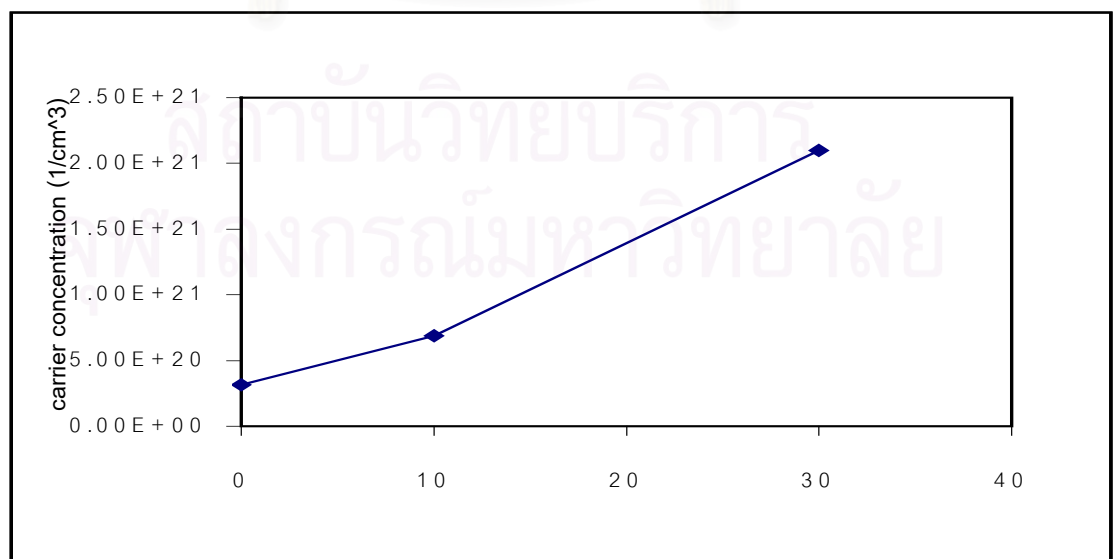
ผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) แสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งเห็นว่าเมื่อเพิ่มกระแสดีซีจาก 0 mA เป็น 10 mA รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มซึ่ง แสดงระนาบ (002) ต่ำลงแต่ยังใกล้เคียงวัสดุกลุ่ม ZnO และเมื่อเพิ่มกระแสดีซีเป็น 30 mA รูป



(ก)

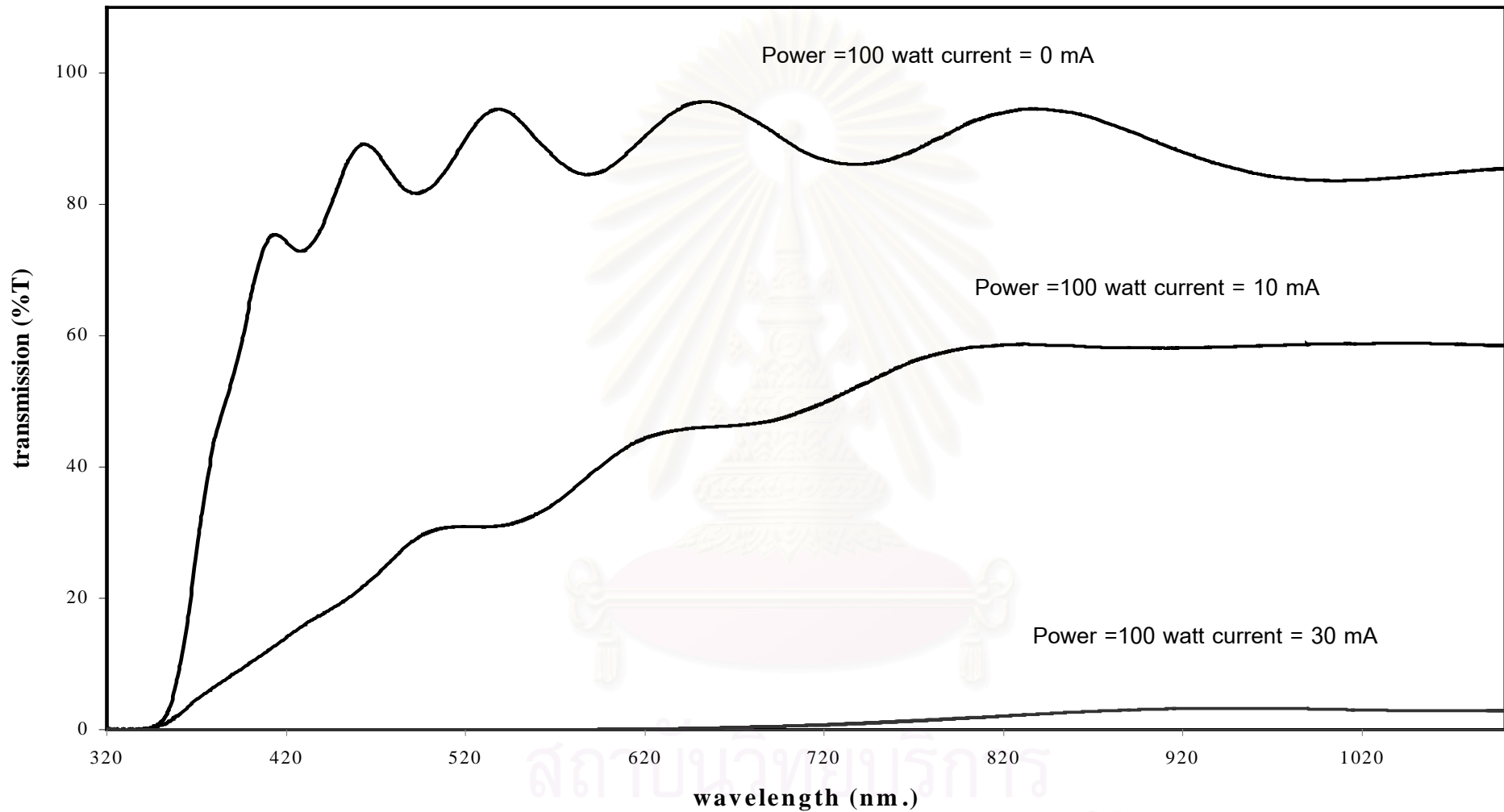


(ข)

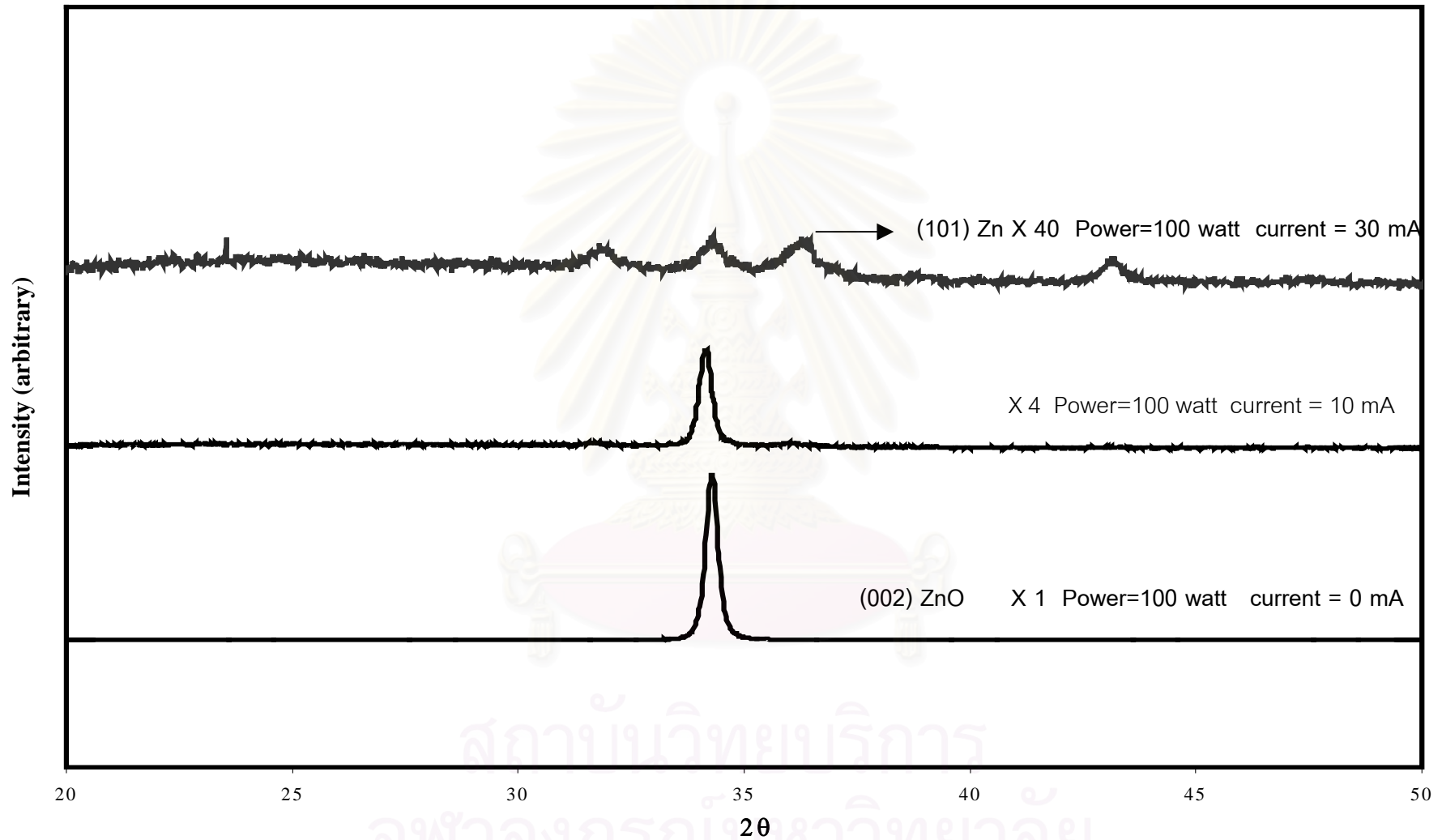


(ค)

รูปที่ 5.1 สมบัติทางไฟฟ้ากับกระแสดีซีในการสปีดเตอร์ฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ความดันแก๊สอาร์กอน 8×10^{-3} มิลลิบาร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ (ก) สภาพต้านทานไฟฟ้า (ข) สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (ค) ความเข้มข้นของพาหะ



รูปที่ 5.2 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่มีกระแสดีซีใช้ในการสับตัดเตอริง ตั้งแต่ 0 mA, 10 mA และ 30 mA ความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสับตัดเตอริง 8×10^{-3} มิลลิบาร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์



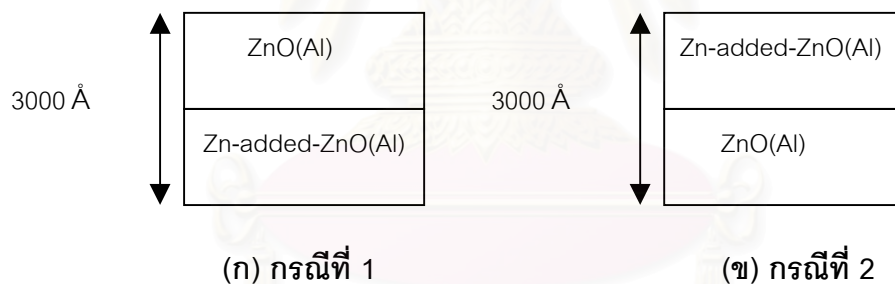
รูปที่ 5.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่มีกระแสเล็ดซีในการสเป็คเตอริง 0 mA, 10 mA และ 30 mA ความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสเป็คเตอริง 8×10^{-3} มิลลิบาร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์

แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะเปลี่ยนไป ระบุนาบ (002) ต่ำลงอย่างมากและพบระบุนาบ (101) ซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะ Zn เนื่องจากอะตอมของ Zn ที่มากเกินไปในโครงสร้างผลึก

จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1.1, 5.1.2 และ 5.1.3 ทำให้สามารถเลือกสภาวะของการเตรียมฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่จะนำไปเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับที่กระแสดีซี 10 mA เนื่องจากผลของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำลง การส่งผ่านแสงไม่ต่ำมากนักและโครงสร้างผลึกยังแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ใกล้เคียงกับวัสดุในกลุ่ม ZnO

5.2 สมบัติของฟิล์ม ZnO(AI) เตรียมแบบตามลำดับชนิดสองชั้น

การเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดสองชั้น จะแบ่งการเคลือบฟิล์มออกเป็น 2 ชั้น คือชั้นของฟิล์ม ZnO(AI) ที่เตรียมจากวิธีอาร์เอฟแมกนิตรอนสปัตเตอริงและชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จากวิธีการสปัตเตอริงพร้อมกันซึ่งเลือกสภาวะที่ใช้กระแสดีซี 10 mA ความหนาของฟิล์มรวมทั้งหมดคงที่ 3000 Å และเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เป็น 20%, 40%, 60% และ 80% ของความหนาทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดสองชั้น

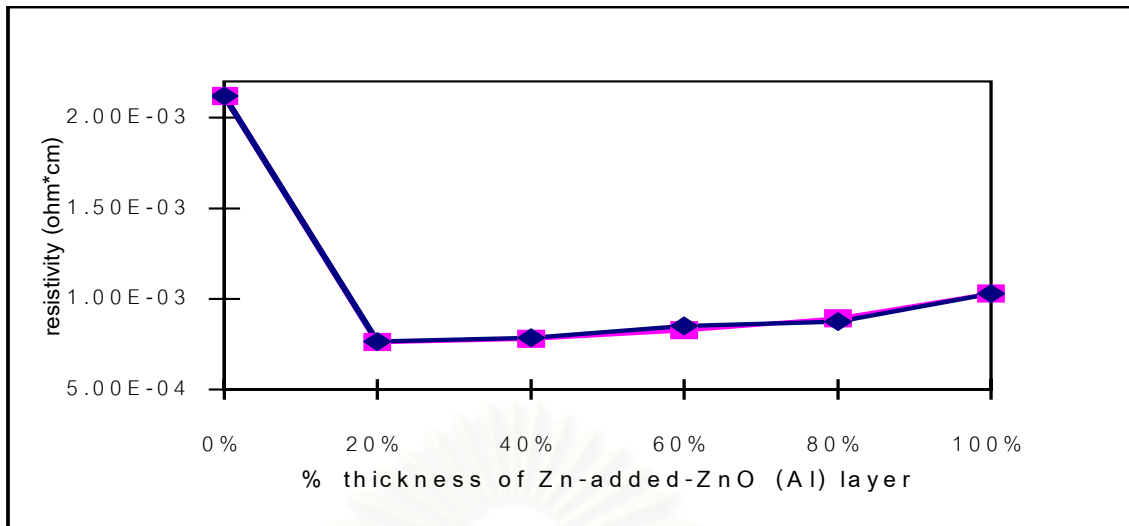
ในการเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 2 ชั้นนั้น ยังแบ่งวิธีการเตรียมฟิล์มออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ทำการสปัตเตอร์ชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ก่อนแล้วตามด้วยการสปัตเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(AI) (รูปที่ 5.4 (ก)) และกรณีที่ 2 ทำการสปัตเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อนแล้วตามด้วยการสปัตเตอร์ชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) (รูปที่ 5.4 (ข)) ซึ่งจะแสดงผลของสมบัติทางไฟฟ้าสมบัติเชิงแสง และโครงสร้างผลึกของฟิล์มทั้งสองกรณีได้ดังนี้

5.2.1 สมบัติทางไฟฟ้า

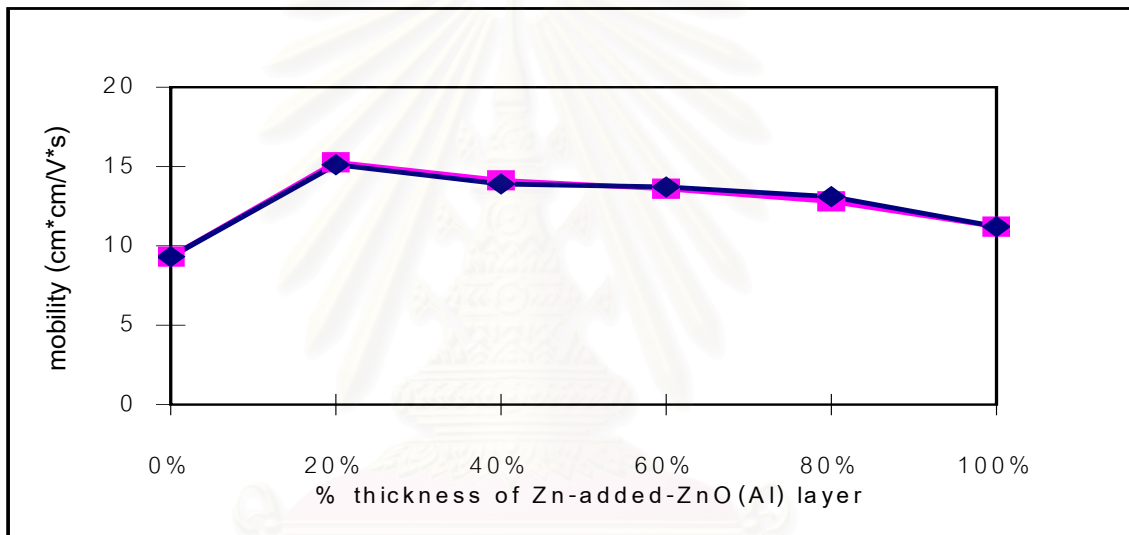
รูปที่ 5.5 แสดงผลของสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้น โดยสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความเข้มข้นของพาหะ แสดงในรูป 5.5 (ก) 5.5 (ข) และ 5.5 (ค) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน จากข้อมูลในรูป 5.5 (ก) พบว่าเมื่อความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เป็น 20% ของความหนาทั้งหมด สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของพาหะและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ การที่สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์เพิ่มขึ้นที่ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ชี้ให้เห็นว่าสามารถลดการกระเจิงของพาหะในโครงสร้างของฟิล์มลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสภาพเคลื่อนที่ได้จะลดลงถ้าเพิ่ม donor concentration ซึ่งในที่นี้คืออะตอมของ Zn ในชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ดังนั้นการเพิ่มอะตอม Zn ในชั้นฟิล์มที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% เป็นการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มซึ่งก็คือลดความบกพร่องของฟิล์มนั่นเองและคำอธิบายดังกล่าวจะเป็นในกรณีที่ 1 เท่านั้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลของสมบัติเชิงแสงและโครงสร้างผลึกที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

จากรายงานของ K. Tominaga และคณะ [17] ซึ่งทำการเตรียมฟิล์ม ZnO จากการ co-sputtering เป้า ZnO และ Zn พบว่าความเข้มข้นของพาหะสูงสุดมีค่า $1.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ กระแสดีซี 40 mA และเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) จากการ co-sputtering เป้า ZnO(AI) และ เป้า Zn พบว่าความเข้มข้นของพาหะสูงสุดที่ได้มีค่า $6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ที่กระแสดีซี 10 mA จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า donor concentration ที่เพิ่มขึ้นจากอะตอม Zn ในฟิล์ม ZnO(AI) ไม่มากเมื่อเทียบกับ donor ที่ให้โดย Al ดังนั้นผลการทดลองของฟิล์มที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ในการทดลองนี้จึงมีคำอธิบายในทำนองเดียวกันกับงานของ K.Tominaga และคณะ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของพาหะในฟิล์มที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ในการทดลองนี้คงจะไม่ใช่เกิดจากการก่อดัวของ native donor แต่เป็นการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มซึ่งข้อสรุปนี้จะต้องสังเกตผลของสมบัติเชิงแสงและโครงสร้างผลึก

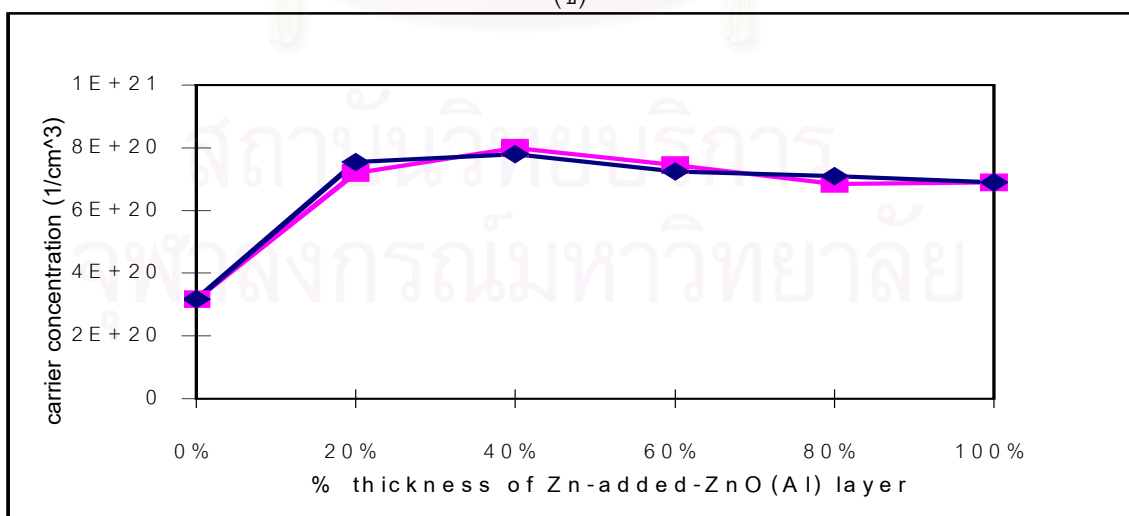
อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) มากกว่า 20% ของความหนาทั้งหมด สภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งสอดคล้องกับสภาพเคลื่อนที่ได้ที่ลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของพาหะมีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอะตอมของ Zn ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความเข้มข้นของพาหะมากนักเนื่องจาก donor concentration ที่เพิ่ม



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO(Al) ชนิดสองชั้นที่มีความหนา Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%; กรณีที่ 1 \square (Zn-added-ZnO(Al)/ZnO(Al)) กรณีที่ 2 \blacklozenge (ZnO(Al)/Zn-added-ZnO(Al)) (ก) สภาพต้านทานไฟฟ้า (ข) สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (ค) ความเข้มข้นของพาหะ

ขึ้นจากอะตอม Zn ในฟิล์ม ZnO(AI) ไม่มากเมื่อเทียบกับ Al นั้นเอง แต่เห็นได้ว่าถ้าเพิ่มปริมาณของอะตอม Zn มากเกินไปทำให้สภาพเคลื่อนที่ได้ลดลงส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีข้อสรุปแตกต่างจากงานของ K. Tominaga และคณะ คือสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นน่าจะเกิดจากอะตอมของ Zn บางอะตอมประพฤติตัวเป็น native donor อะตอมเหล่านี้ทำให้เกิดการการกระเจิงของพาหะขึ้น ซึ่งคำอธิบายนี้อาจไม่ชัดเจนจากผลของสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งจะต้องสังเกตจากผลของสมบัติเชิงแสงและโครงสร้างผลึกด้วย

ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO(AI) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% กับฟิล์ม ZnO(AI) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) มากกว่า 20% มีค่าต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ด้วยเหตุผลที่ต่างกัน คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ลดลงของฟิล์มที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) มากกว่า 20% เกิดจากฟิล์มแสดงความเป็นโลหะมากขึ้น ในขณะที่ฟิล์มที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างผลึกซึ่งจะเป็นเฉพาะในกรณีที่ 1 เท่านั้นและจะสังเกตได้ชัดเจนขึ้นจากผลของการวัดสมบัติเชิงแสงและโครงสร้างผลึก

5.2.2 สมบัติเชิงแสง

การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 1 (Zn-added-ZnO(AI)/ZnO(AI)) แสดงดังรูปที่ 5.6 พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เป็น 20% การส่งผ่านแสงสูงขึ้นกว่าฟิล์มที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เนื่องจากการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มซึ่งสอดคล้องกับค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำสุด และการส่งผ่านแสงของฟิล์มที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 40%, 60%, 80% ลดลงเรื่อยๆ ตามความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่เพิ่มขึ้น และต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) แต่ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกัน การส่งผ่านแสงที่ลดลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมของ Zn ที่มากเกินไปในโครงสร้างผลึกและประพฤติตัวเป็น interstitial Zn ความเป็นโลหะของ Zn ยอมให้แสงผ่านได้น้อยลงส่งผลให้การส่งผ่านแสงลดลงและลดลงอย่างมากเมื่อมีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 100% ของความหนาทั้งหมด

ในรูปที่ 5.7 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 2 (ZnO(AI)/Zn-added-ZnO(AI)) มีผลการทดลองแตกต่างจากฟิล์มในกรณีที่ 1 คือ เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% การส่งผ่านแสงของฟิล์มในกรณีที่ 2 ต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ในขณะที่ฟิล์ม ZnO(AI) กรณีที่ 1 มีการส่งผ่านแสงของฟิล์มสูงกว่า

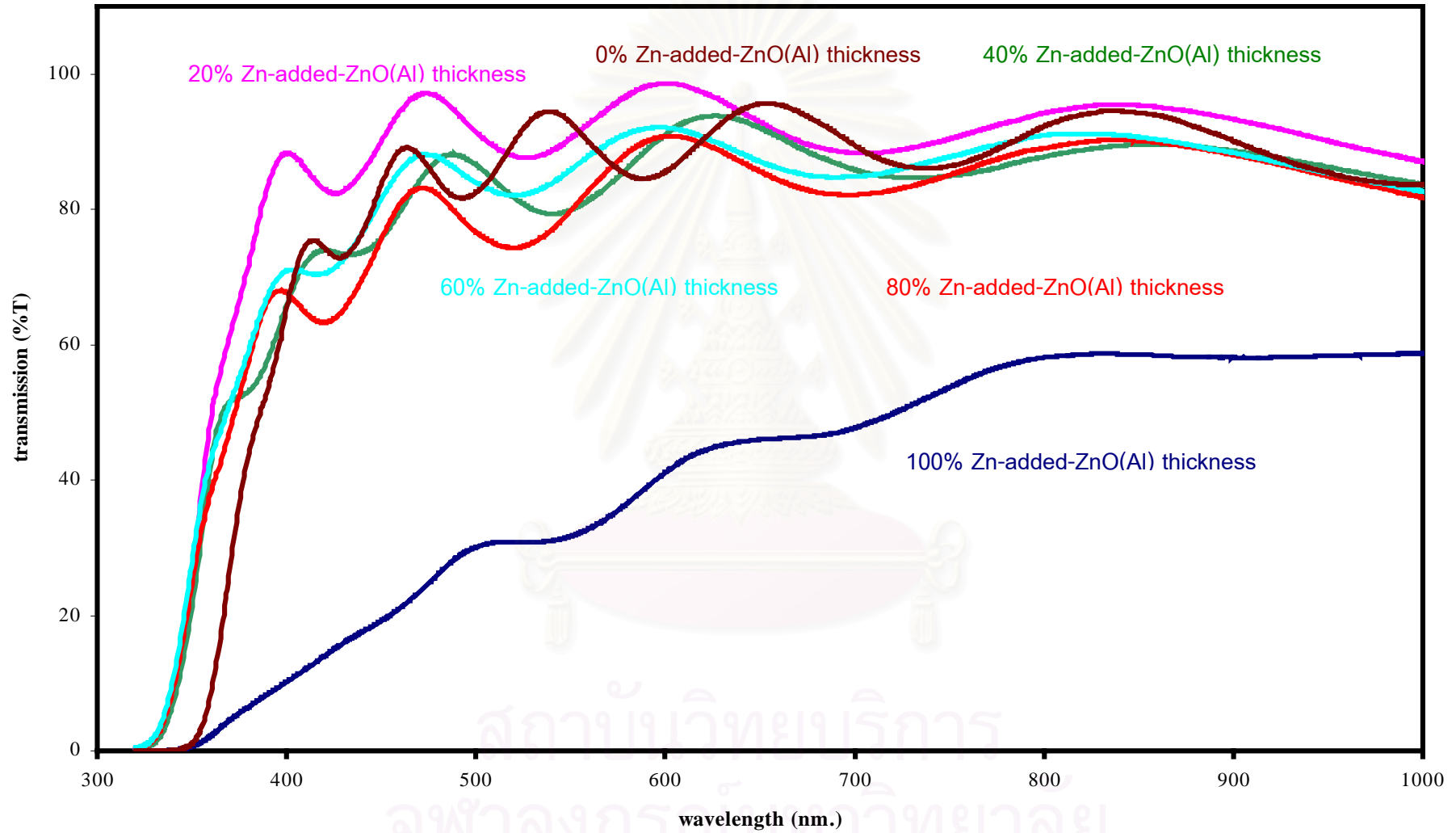
ฟิล์มที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ด้วยเหตุนี้เองจึงมีข้อสรุปของการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มในกรณีที่ 1 เท่านั้นและมีผลการทดลองในทำนองเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) มากขึ้น การส่งผ่านแสงต่ำลงเรื่อยๆ ด้วยเหตุผลของจำนวนอะตอม Zn ในทำนองเดียวกันกับฟิล์ม ZnO(AI) ในกรณีที่ 1

เมื่อเปรียบเทียบผลการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ในกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เดียวกัน พบว่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มในกรณีที่ 1 สูงกว่าฟิล์มในกรณีที่ 2 ที่ทุกเปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(A) ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่เมื่อสปีดเตอร์ชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) อยู่ด้านล่าง อะตอมของ Zn ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีโอกาสการจัดเรียงตัวในโครงสร้างของฟิล์ม ZnO(AI) ได้ดีขึ้น ทำให้อะตอมของ Zn ที่ประพติดตัวเป็น donors มีน้อยกว่าการส่งผ่านแสงจึงสูงกว่าซึ่งคำอธิบายนี้ยืนยันจากผลของโครงสร้างผลึกในหัวข้อต่อไป

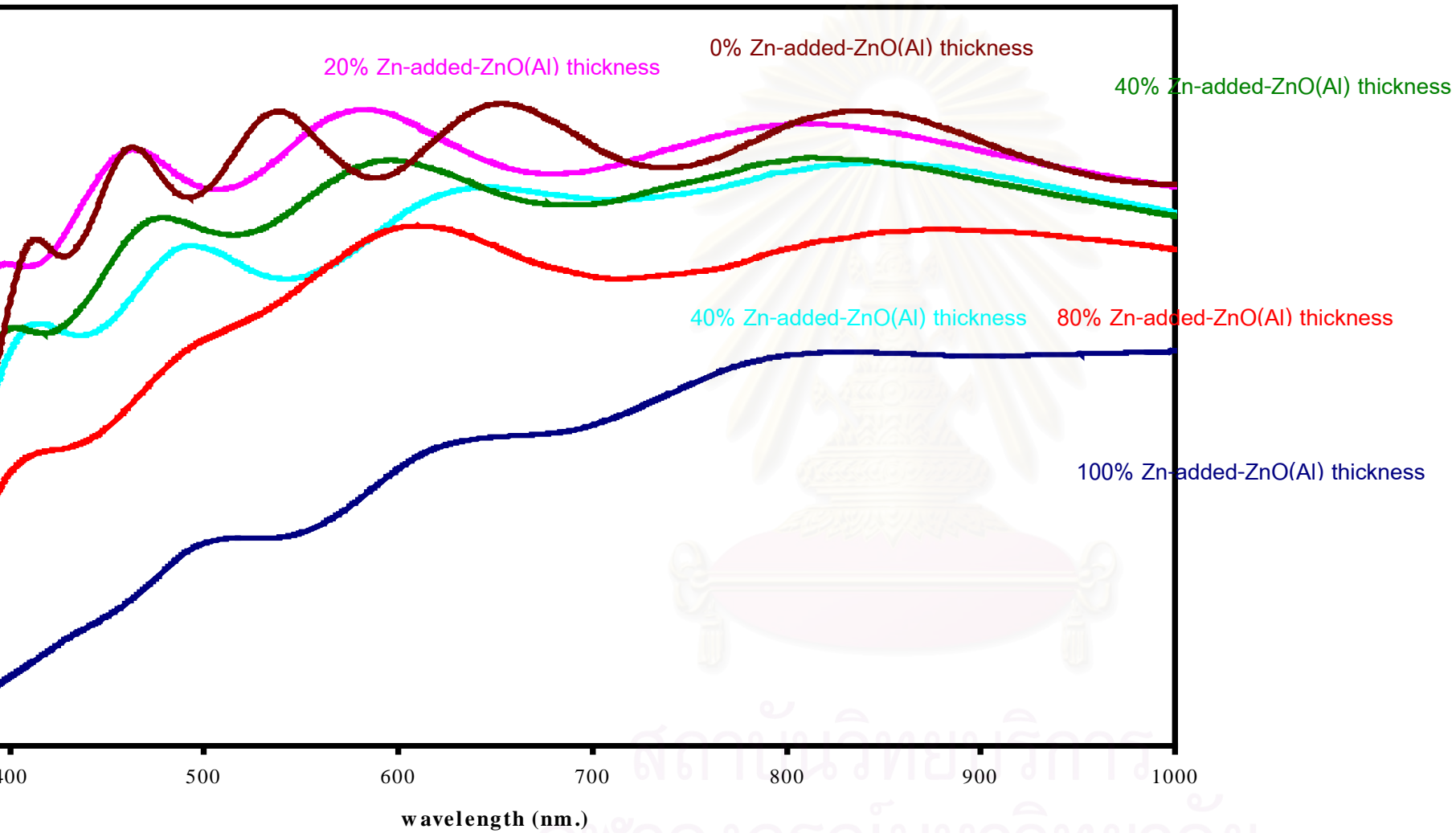
ฟิล์ม ZnO(AI) ทั้งสองกรณีจะมีขอบการดูดกลืนแสงเลื่อนไปยังด้านที่มีพลังงานสูงกว่าเนื่องจากความเข้มข้นของพาหะที่เพิ่มขึ้น เพราะว่าเมื่อมีความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจะมีการครอบครองสถานะในบริเวณตอนล่างของแถบนำจันเต็ม ทำให้อิเล็กตรอนอิสระ (free electron) จะต้องขึ้นไปครอบครองสถานะที่ว่างในระดับที่สูงกว่า จึงต้องใช้พลังงานสูงกว่าจึงจะมีการดูดกลืนโฟตอนเพื่อยกระดับตัวเองจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบการนำได้ ซึ่งจะทำให้มีการเลื่อนขึ้นของช่องว่างแถบพลังงาน เรียกว่า “Burstein-Moss shift” [26]

5.2.3 โครงสร้างผลึก

ผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ทั้งสองกรณี แสดงในรูปที่ 5.8 และ 5.9 ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของระนาบ (002) ที่ทุกเปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ในรูปที่ 5.8 เป็นผลของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 1 (Zn-added-ZnO(AI)/ZnO(AI)) ซึ่งเห็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จาก 0% เป็น 20% รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) สูงขึ้นซึ่งเป็นการยืนยันถึงจำนวนอะตอม Zn ในชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่เพิ่มขึ้นเข้าไปลดความบกพร่องของฟิล์ม ZnO(AI) ทำให้โครงสร้างผลึกดีขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของการส่งผ่านแสงที่สูงขึ้นในหัวข้อที่ผ่านมา และเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 40% รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) จะต่ำกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้น



รูปที่ 5.6 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 1 (Zn-added-ZnO(AI)/ZnO(AI)) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%



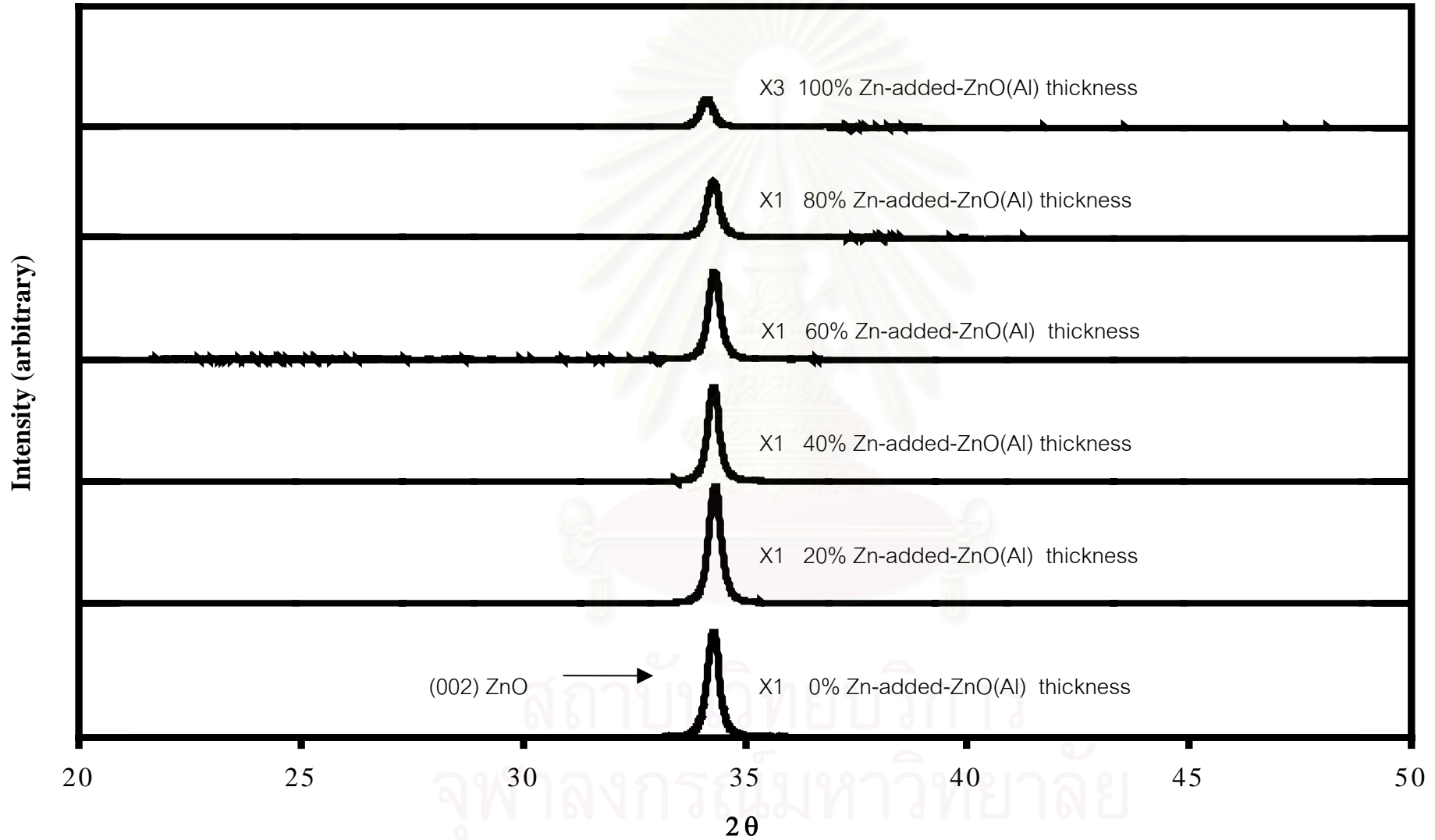
รูปที่ 5.7 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 2 (ZnO(AI)/Zn-added-ZnO(AI)) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%

ฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) และต่ำลงเรื่อยๆ ตามความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของอะตอมของ Zn ที่มากเกินไปในโครงสร้างผลึก

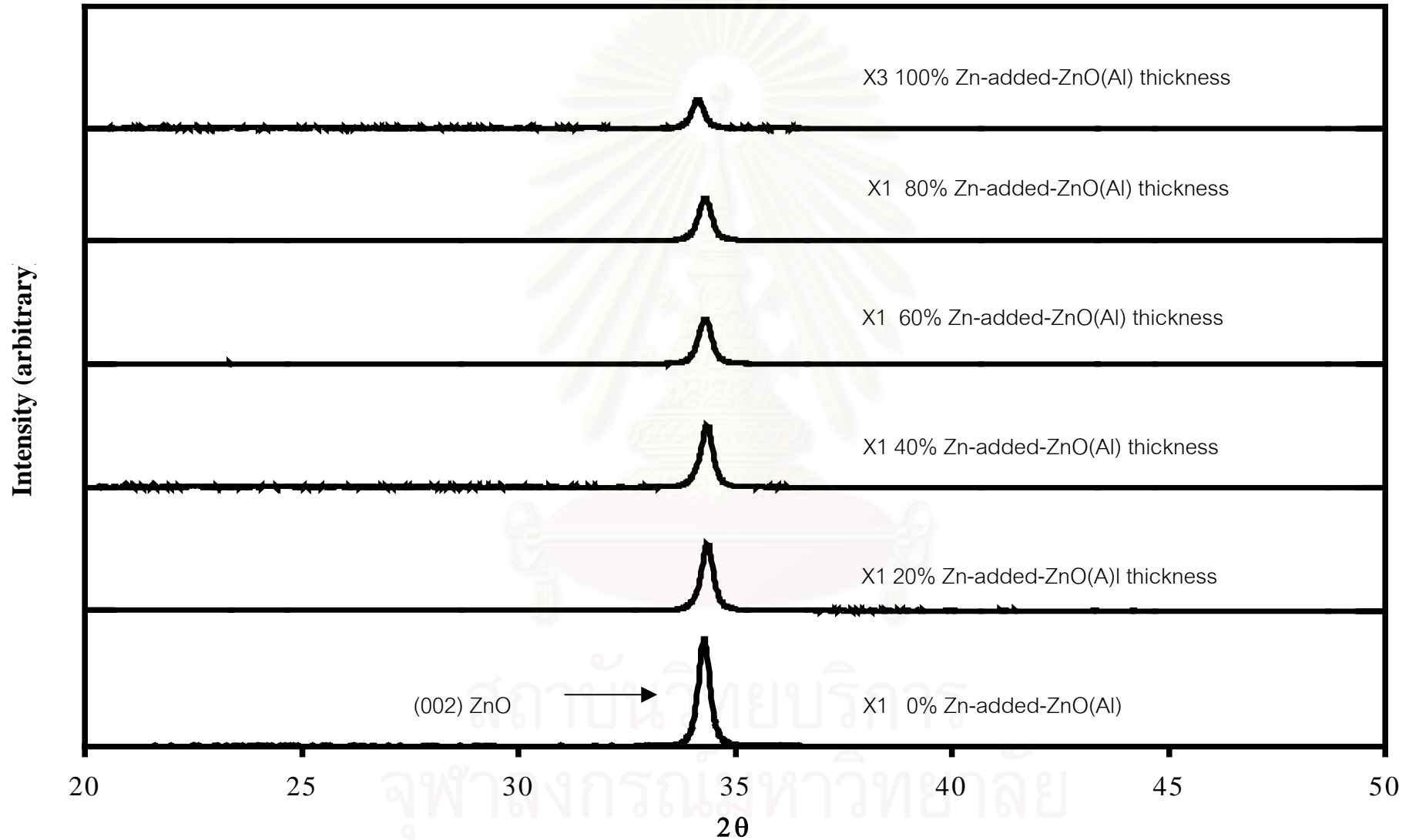
จากรูปที่ 5.9 เป็นผลของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 2 (ZnO(AI)/Zn-added-ZnO(AI)) เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จาก 0% เป็น 20% มีผลการทดลองแตกต่างจากฟิล์มในกรณีที่ 1 กล่าวคือฟิล์มในกรณีนี้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับการส่งผ่านแสงที่ต่ำลง ซึ่งเกิดจากอะตอม Zn ในชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ในกรณีที่ 1 น่าจะมีโอกาสจัดเรียงตัวในโครงสร้างผลึกได้ดีกว่าฟิล์มในกรณีที่ 2 และเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 40% รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ต่ำลงเรื่อยๆ ตามความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของอะตอมของ Zn ที่เพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกันกับฟิล์ม ZnO(AI) ในกรณีที่ 1 เป็นการยืนยันคำอธิบายการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์ม ZnO(AI) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% เกิดขึ้นในกรณีที่ 1 เท่านั้น ส่วนในกรณีที่ 2 นั้นน่าจะมีอะตอม Zn บางอะตอมที่ประพฤติตัวเป็น interstitial Zn ฟิล์มจึงแสดงความเป็นโลหะมากขึ้นในทำนองเดียวกันกับฟิล์ม ZnO(AI) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 40%, 60%, 80% และ 100% ทั้งสองกรณี

เมื่อเปรียบเทียบผลของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ที่เปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เดียวกัน พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ของฟิล์มในกรณีที่ 1 สูงกว่าฟิล์มในกรณีที่ 2 ที่ทุกเปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เป็นการยืนยันคำอธิบายที่กล่าวว่าเมื่อสปีดเตอร์ชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) อยู่ด้านล่าง อะตอม Zn ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีโอกาสจัดเรียงตัวในโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ZnO(AI) ได้ดีกว่าทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) สูงกว่าในกรณีที่ 2 นั่นเอง

จากผลการทดลองซึ่งแสดงสมบัติของฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดสองชั้นพบว่าลำดับของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) มีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มทำให้สมบัติของฟิล์มที่ได้ต่างกันด้วย ซึ่งอาจเกิดจากการแทรกตัวของอะตอม Zn ในโครงสร้างของฟิล์ม ZnO(AI) ที่ต่างกันทำให้โอกาสในการจัดเรียงตัวของอะตอม Zn ในโครงสร้างผลึกต่างกัน ในหัวข้อต่อไปจึง



รูปที่ 5.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 1 (Zn-added-ZnO(AI) /ZnO(AI)) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%



รูปที่ 5.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 2 (ZnO(AI)/Zn-added-ZnO(AI)) ที่มีความหนาของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%

ได้เตรียมฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดหลายชั้นขึ้น คือ ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น โดยแทรกชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ระหว่างชั้นฟิล์ม ZnO(AI) เพื่อดูผลโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ZnO(AI)

5.3 สมบัติของฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดหลายชั้น

การเคลือบฟิล์มบาง ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบตามลำดับชนิดหลายชั้น จะแบ่งการเคลือบฟิล์มออกเป็น 4 แบบ คือ 3, 5, 7 และ 9 ชั้น (รูปที่ 4.4) คือ เตรียมชั้นฟิล์ม ZnO(AI) จากวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริงสปีดเตอริงก่อนตามด้วยชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จากวิธีสปีดเตอริงพร้อมกันซึ่งเลือกสภาวะที่ใช้กระแสดีซี 10 mA สลับกันไปจนครบจำนวนชั้นที่กำหนดเพื่อดูผลของการแทรกอะตอม Zn เข้าไปในโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ZnO(AI) ความหนาของฟิล์มทั้งหมดคงที่ 3000 Å และเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เป็น 20%, 40%, 60% และ 80% ของความหนาทั้งหมด ซึ่งจะแสดงผลของสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงแสง และโครงสร้างผลึกของฟิล์มทั้งหมดได้ดังนี้

5.3.1 สมบัติทางไฟฟ้า

ผลของสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดหลายชั้นทั้ง 4 แบบ คือ ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น แสดงแนวโน้มใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งจะเห็นได้ในทุกฟิล์มว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จาก 0% เป็น 20% จะได้สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด เนื่องจากสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความเข้มข้นของพาหะมีค่าสูงสุด และเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เป็น 40% จนถึง 100% สภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากผลของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองโดยรวมชี้ให้เห็นว่าการแทรกอะตอมของ Zn เข้าไปในชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความเข้มข้นของพาหะ เพราะสามารถลดการกระเจิงของพาหะในฟิล์ม ZnO(AI) และที่ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ของความหนาทั้งหมดแสดงปริมาณของอะตอม Zn ที่เพิ่มขึ้นทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าในฟิล์มแต่ละแบบต่ำสุด โดยฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดหลายชั้นที่เตรียมขึ้นทั้งหมดจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่มีมีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) แต่จะเกิดจากสาเหตุที่แตกต่างกันในทำนองเดียวกันกับฟิล์ม ZnO(AI) แบบตามลำดับชนิดสองชั้นคือเกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มหรือฟิล์มแสดงความเป็นโลหะมากขึ้นซึ่งจะต้องสังเกตผลของสมบัติเชิงแสงและโครงสร้างผลึกด้วย

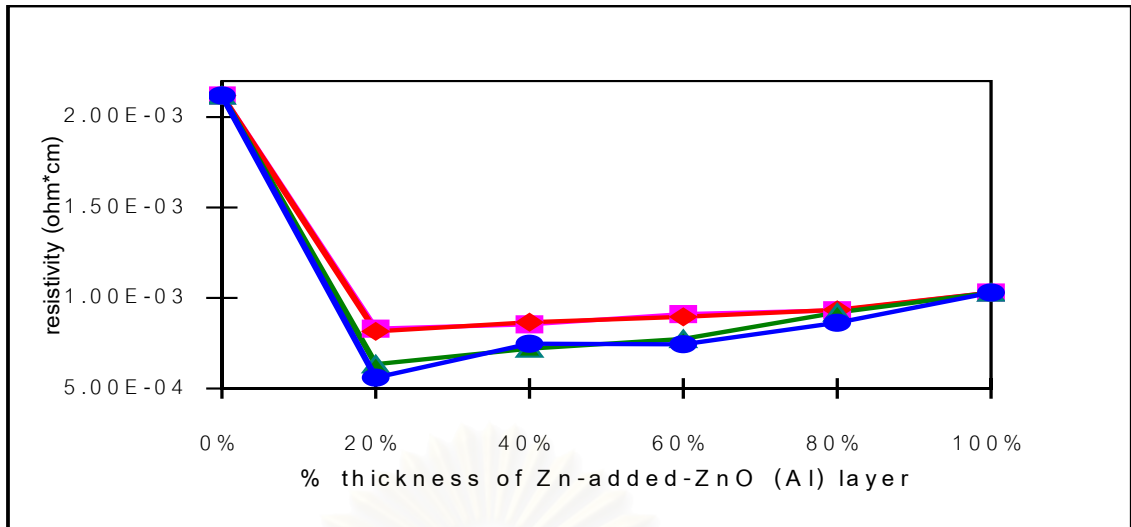
จากรูป 5.10 (ก) เมื่อเปรียบเทียบสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มทุกแบบที่เปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เดียวกัน พบว่า เมื่อเพิ่มชั้นฟิล์มมากขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเนื่องจากผลของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความเข้มข้นของพาหะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.10 (ข) และ 5.10 (ค) และเพื่อให้สังเกตผลการทดลองได้ดีขึ้นพิจารณาฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้นที่ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เท่ากับ 8.29×10^{-4} , 8.17×10^{-4} , 6.34×10^{-4} และ $5.60 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้ น่าจะสรุปได้ว่าการแทรกอะตอมของ Zn ในโครงสร้างของฟิล์ม ZnO(AI) ในแบบที่ต่างกันทำให้โอกาสในการจัดเรียงตัวของอะตอม Zn ในโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและทำให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกันด้วย ผลของสมบัติเชิงแสงและโครงสร้างผลึกจะยืนยันความชัดเจนของสมมติฐานนี้

5.3.2 สมบัติเชิงแสง

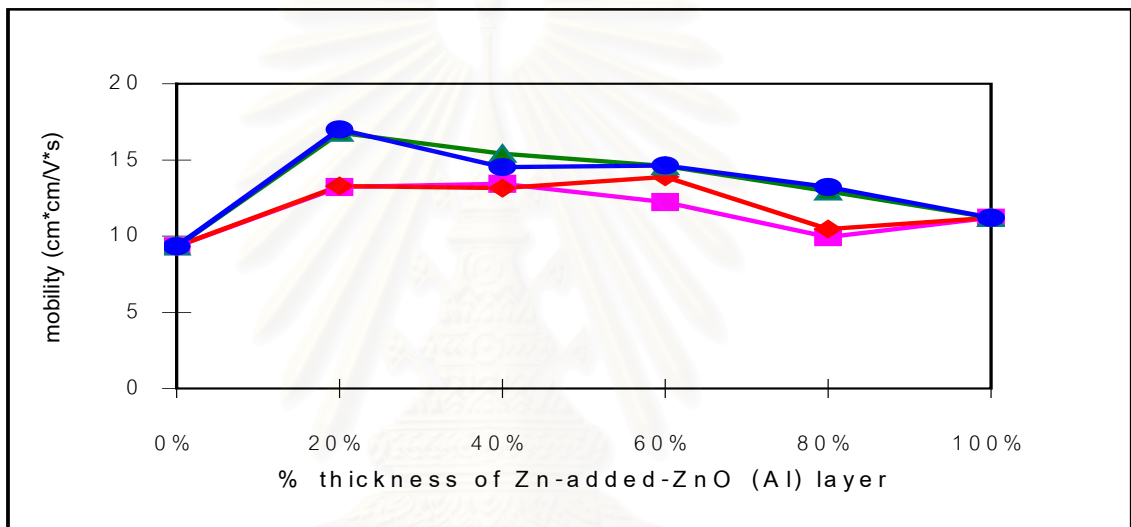
ผลของการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น แสดงในรูปที่ 5.11, 5.12, 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ ซึ่งผลของการส่งผ่านแสงแสดงแนวโน้มเดียวกัน คือ ฟิล์มทุกแบบเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จาก 20% จนถึง 100% การส่งผ่านแสงลดลงเรื่อยๆ ตามความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของอะตอม Zn ที่มีลักษณะของความเป็นโลหะแทรกไปในโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ZnO(AI) มากขึ้น ทำให้มีการส่งผ่านแสงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ทุกแบบที่เปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เดียวกันพบว่าเมื่อเพิ่มชั้นฟิล์มมากขึ้นการส่งผ่านแสงจะสูงขึ้น สอดคล้องกับผลของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากชั้นฟิล์มมากขึ้นน่าจะทำให้อะตอม Zn มีโอกาสจัดเรียงตัวของอะตอม Zn ในโครงสร้างผลึกดีขึ้น

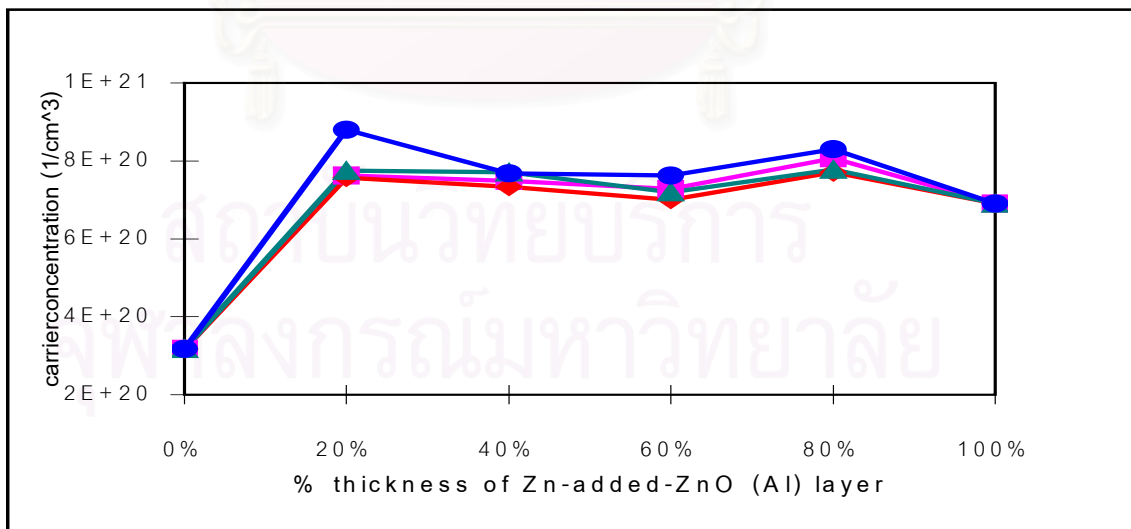
เพื่อให้สังเกตผลการทดลองได้ชัดเจนขึ้น รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบผลของการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้นที่ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่ให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และความเข้มข้นของพาหะสูงที่สุดกับฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) พบว่า ฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3 และ 5 ชั้น มีการส่งผ่านแสงต่ำกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) โดยที่ฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 5 ชั้น มี



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.10 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO(Al) ที่มีความหนาของฟิล์ม Zn-added-ZnO(Al) ตั้งแต่ 0%, 20 %, 40%, 60%, 80% และ 100%; — 3 ชั้น, — 5 ชั้น, — 7 ชั้น, — 9 ชั้น

(ก) สภาพต้านทานไฟฟ้า (ข) สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (ค) ความเข้มข้นของพาหะ

การส่งผ่านแสงสูงกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3 ชั้น เมื่อเพิ่มชั้นฟิล์ม ZnO(AI) เป็น 7 ชั้น พบว่าการส่งผ่านแสงใกล้เคียงกับฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) และเมื่อชั้นฟิล์ม ZnO(AI) 9 ชั้น การส่งผ่านแสงสูงที่สุดและสูงกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จากผลการทดลองน่าจะอธิบายได้ว่าเมื่อแบ่งชั้นฟิล์มออกเป็น 9 ชั้น โดยมีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 4 ชั้นแทรกระหว่างชั้นฟิล์ม ZnO(AI) นั้นน่าจะทำให้อะตอมของ Zn ที่เพิ่มเข้าไปมีโอกาสจัดเรียงตัวเข้าไปในโครงสร้างของฟิล์ม ZnO(AI) ทั้งหมดได้ดีขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มเป็นการลดความบกพร่องของฟิล์มจึงทำให้ฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด จากผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา และเมื่อลดชั้นฟิล์มลงเป็น 7, 5 และ 3 ชั้น จะลดโอกาสในการจัดเรียงตัวของอะตอม Zn ในโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ZnO(AI) เนื่องจากอะตอม Zn ที่เป็น native donor ยังเหลืออยู่ในโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ซึ่งอะตอม Zn มีสมบัติเป็นโลหะมีผลทำให้การส่งผ่านแสงต่ำลง

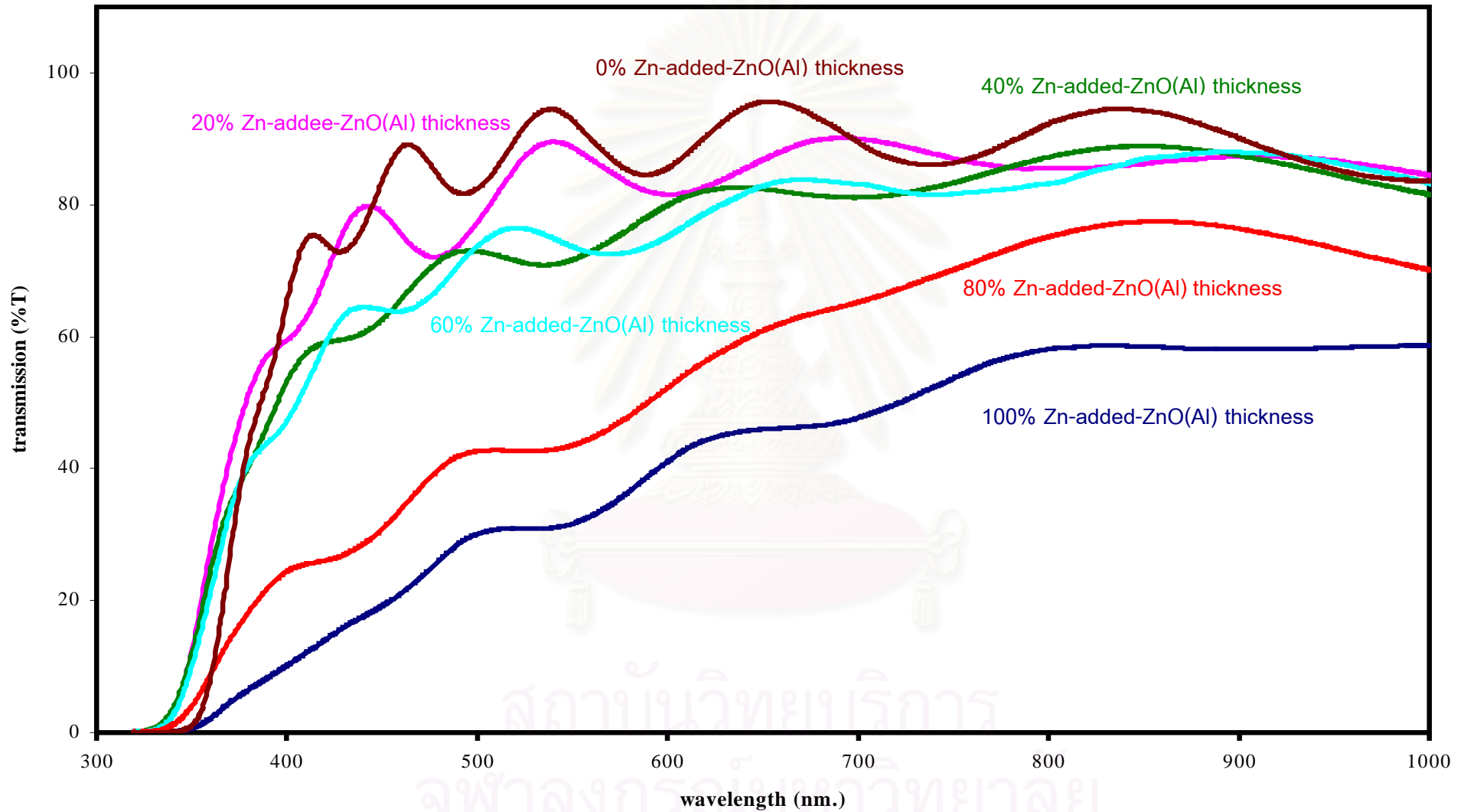
5.3.3 โครงสร้างผลึก

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดหลายชั้นทั้ง 4 แบบ คือ ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น แสดงในรูปที่ 5.16, 5.17, 5.18 และ 5.19 ตามลำดับ ซึ่งทุกฟิล์มแสดงให้เห็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของระนาบ (002) และมีแนวโน้มเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จาก 20% ถึง 100% รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ของฟิล์ม ZnO(AI) ทั้ง 4 แบบมีแนวโน้มต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับการส่งผ่านแสงที่ต่ำลงและเมื่อเปรียบเทียบการส่งผ่านแสงที่เปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เดียวกัน พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3 ชั้นต่ำที่สุดและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มมากขึ้นและสูงที่สุดเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มเป็น 9 ชั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการส่งผ่านแสงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นการยืนยันว่าการแทรกอะตอมของ Zn ในฟิล์มแต่ละแบบทำให้โอกาสในการจัดเรียงตัวของอะตอม Zn โครงสร้างผลึกแตกต่างกัน

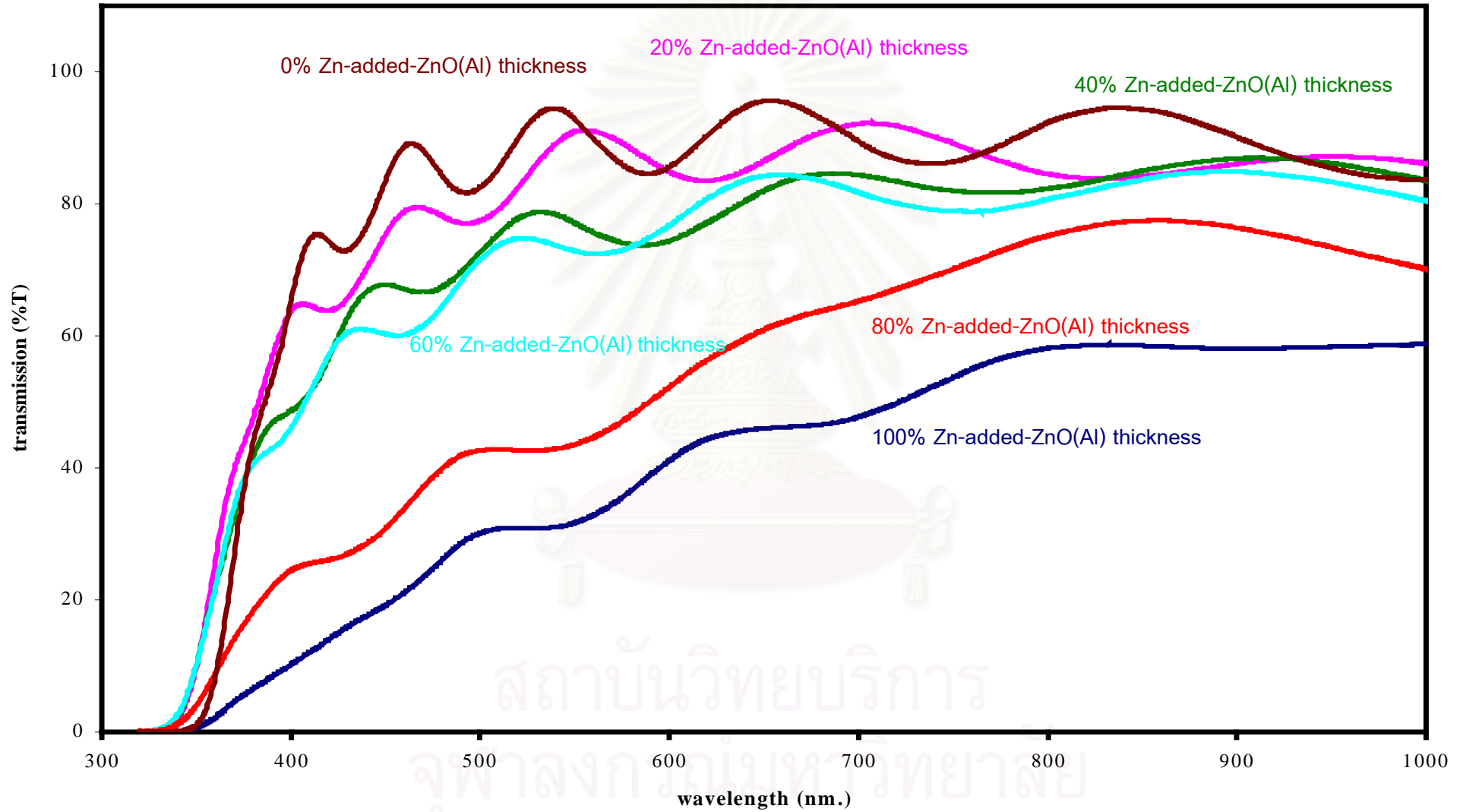
รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% กับฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) พบว่า ฟิล์มชนิด 3 และ 5 ชั้น รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ต่ำกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) โดยฟิล์มชนิด 5 ชั้น มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) สูงกว่าฟิล์มชนิด 3 ชั้น และเมื่อเพิ่มชั้นฟิล์มเป็น 7 ชั้น พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) สูง

ชั้นและสูงที่สุดเมื่อแบ่งชั้นฟิล์มเป็น 9 ชั้นที่สูงกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) สอดคล้องกับผลของการส่งผ่านแสงเป็นการยืนยันถึงสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำสุดของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 9 ชั้นที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20 % เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์ม และผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการจัดเรียงตัวของอะตอม Zn ในโครงสร้างผลึกจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มมากขึ้น

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าฟิล์ม ZnO(AI) ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ชนิด 9 ชั้นมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดเนื่องจากอะตอมของ Zn ที่เพิ่มขึ้นสามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ทำให้เกิดการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มเป็นการลดความบกพร่องของฟิล์ม ซึ่งยืนยันได้จากการส่งผ่านแสงและรูปแบบรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ที่สูงขึ้น ส่วนฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 7 ชั้นมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) สูงขึ้นแต่ผลของการส่งผ่านแสงไม่ชัดเจน จึงไม่สามารถสรุปถึงการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มได้ และฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3 และ 5 ชั้น มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เนื่องจากฟิล์มแสดงความเป็นโลหะมากขึ้น

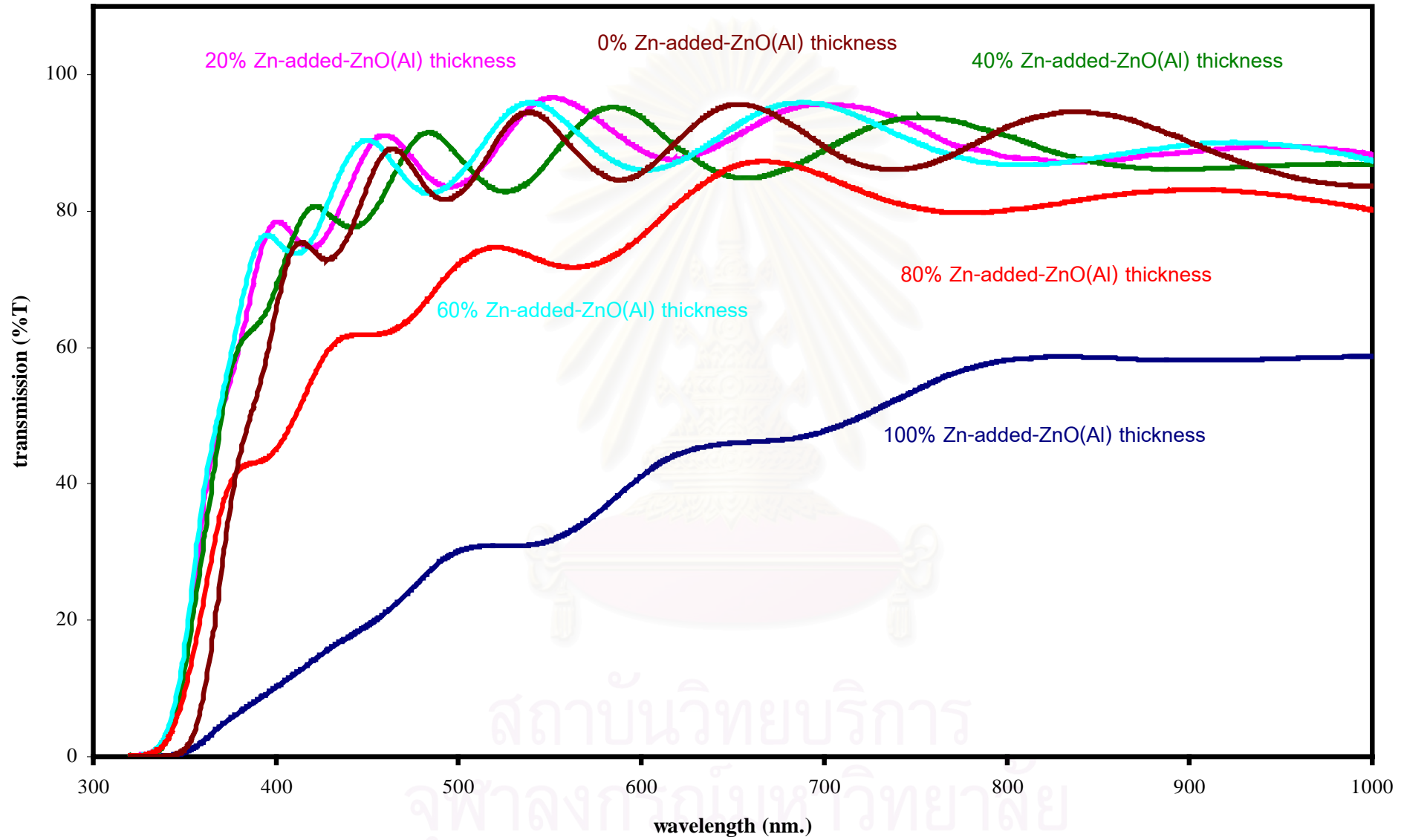


รูปที่ 5.11 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน

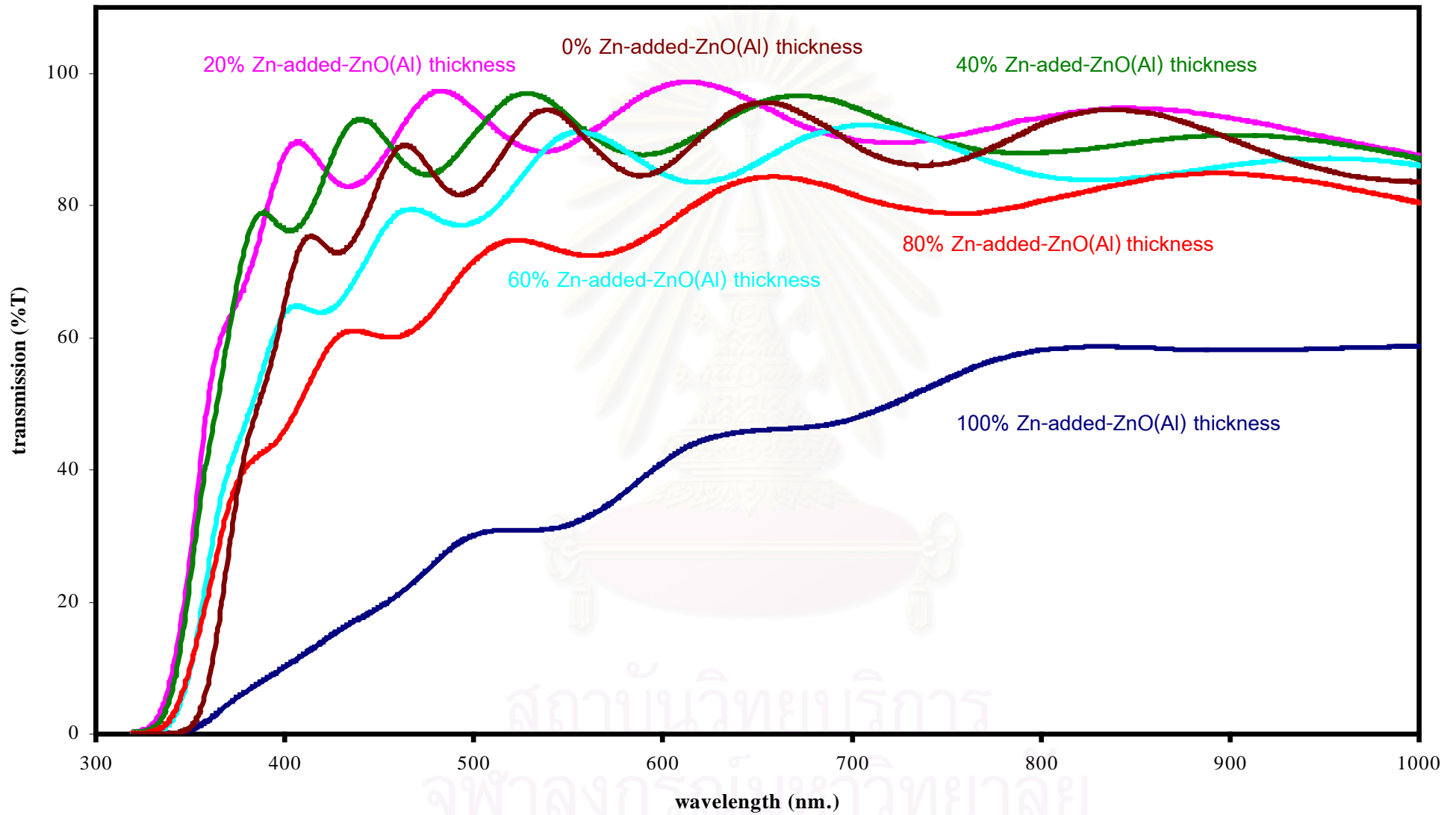


รูปที่ 5.12 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 5 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%

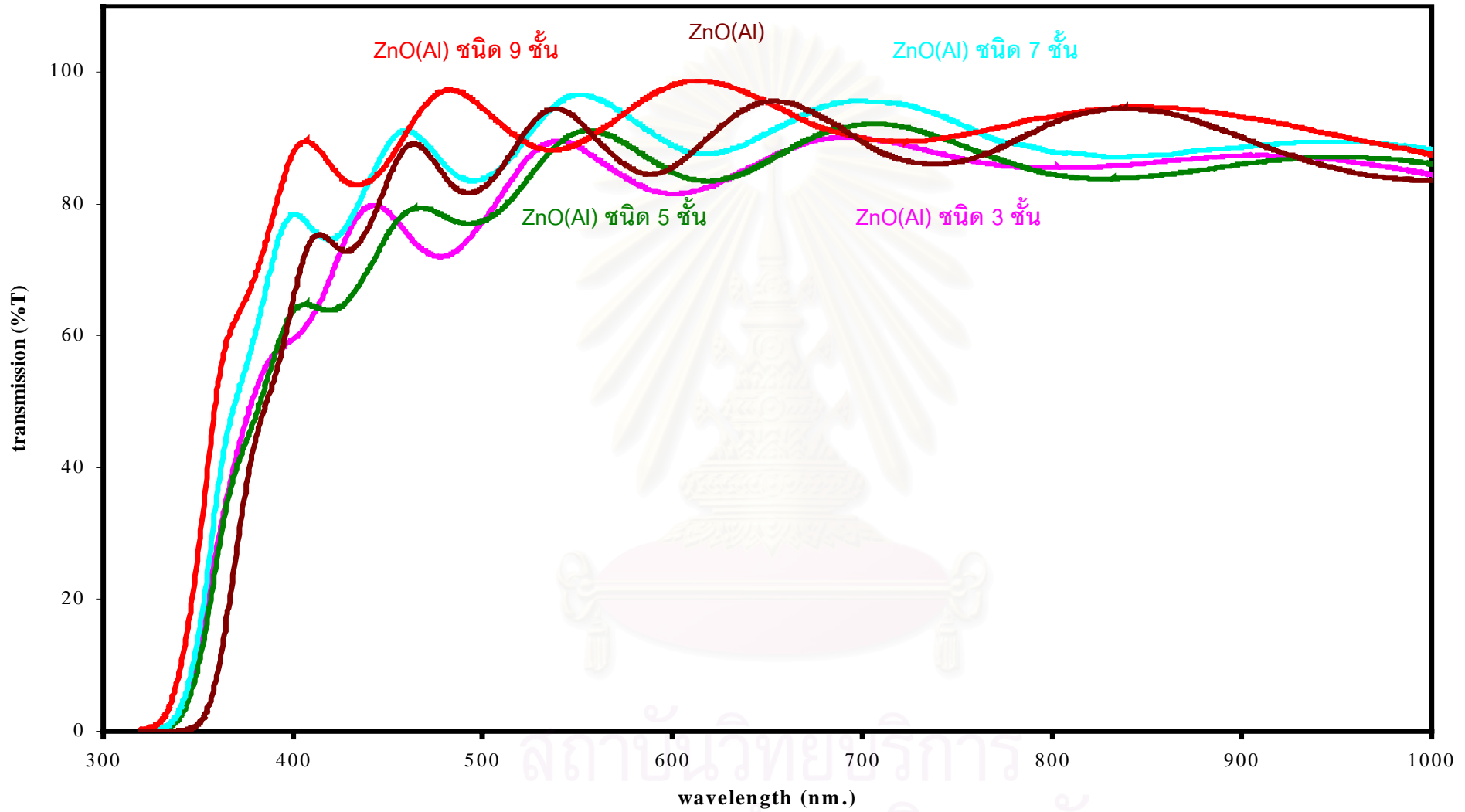
การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชั้น



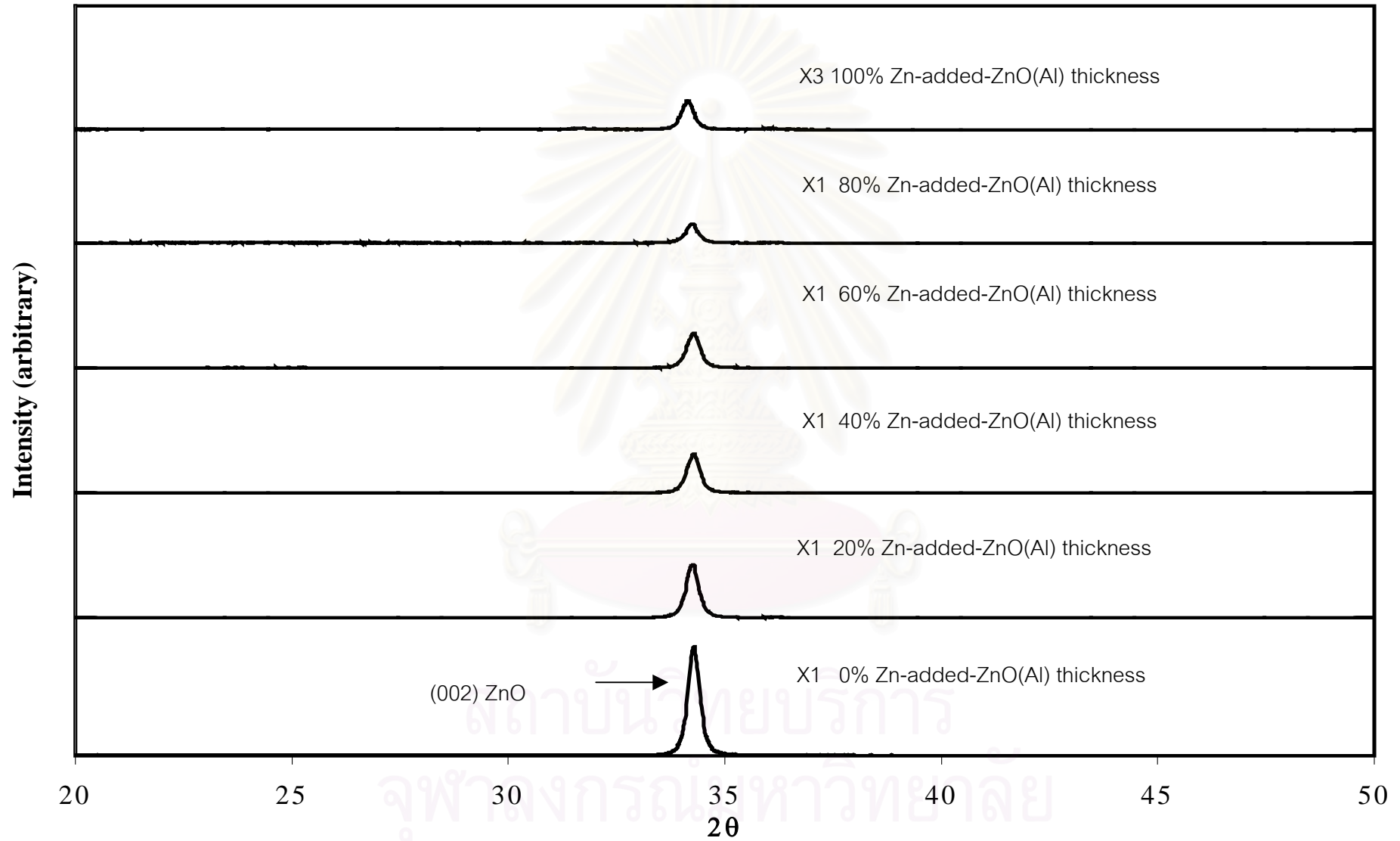
รูปที่ 5.13 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 7 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสเปกโตรชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน



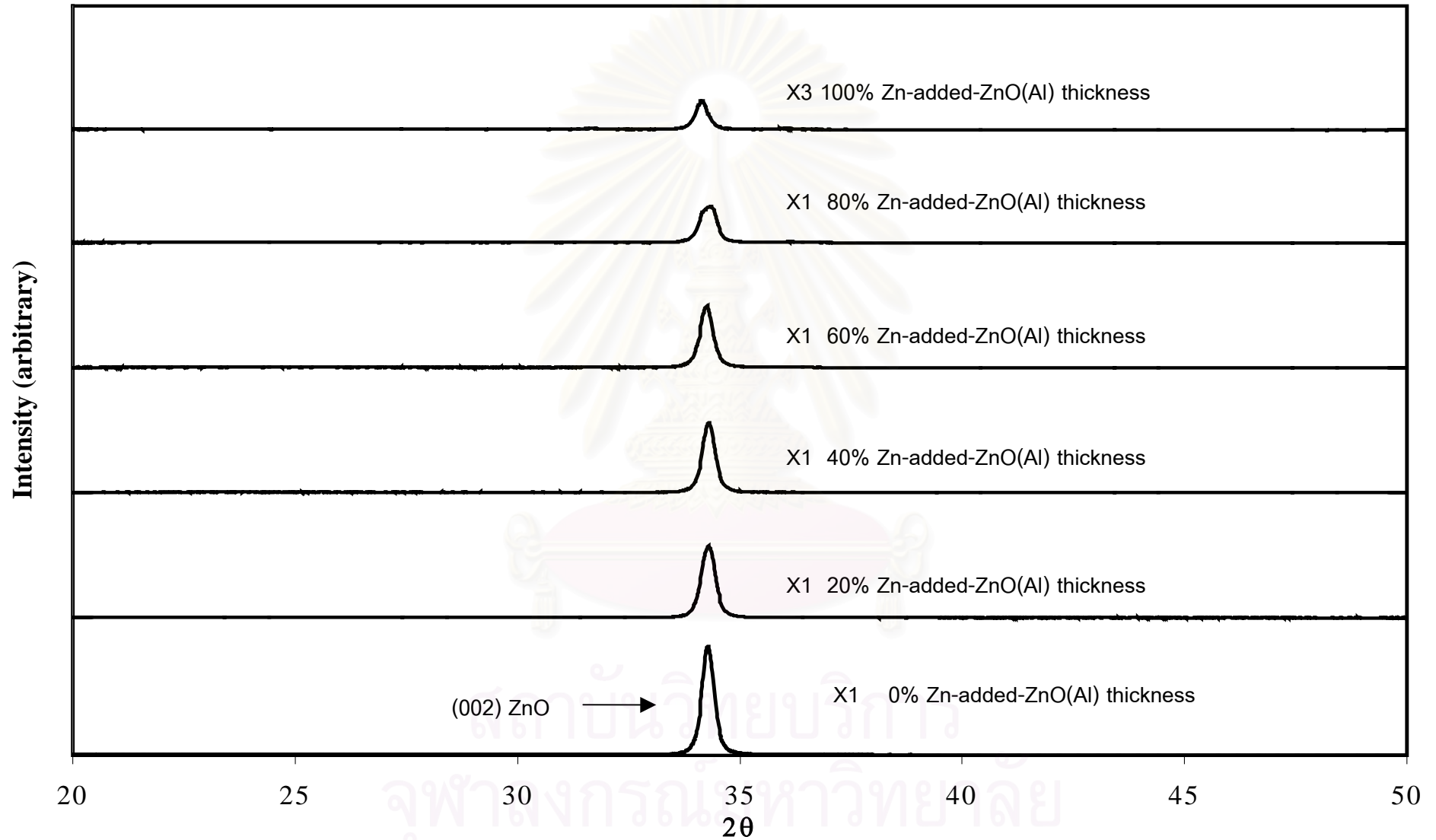
รูปที่ 5.14 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 9 ชั้นที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอรืชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน



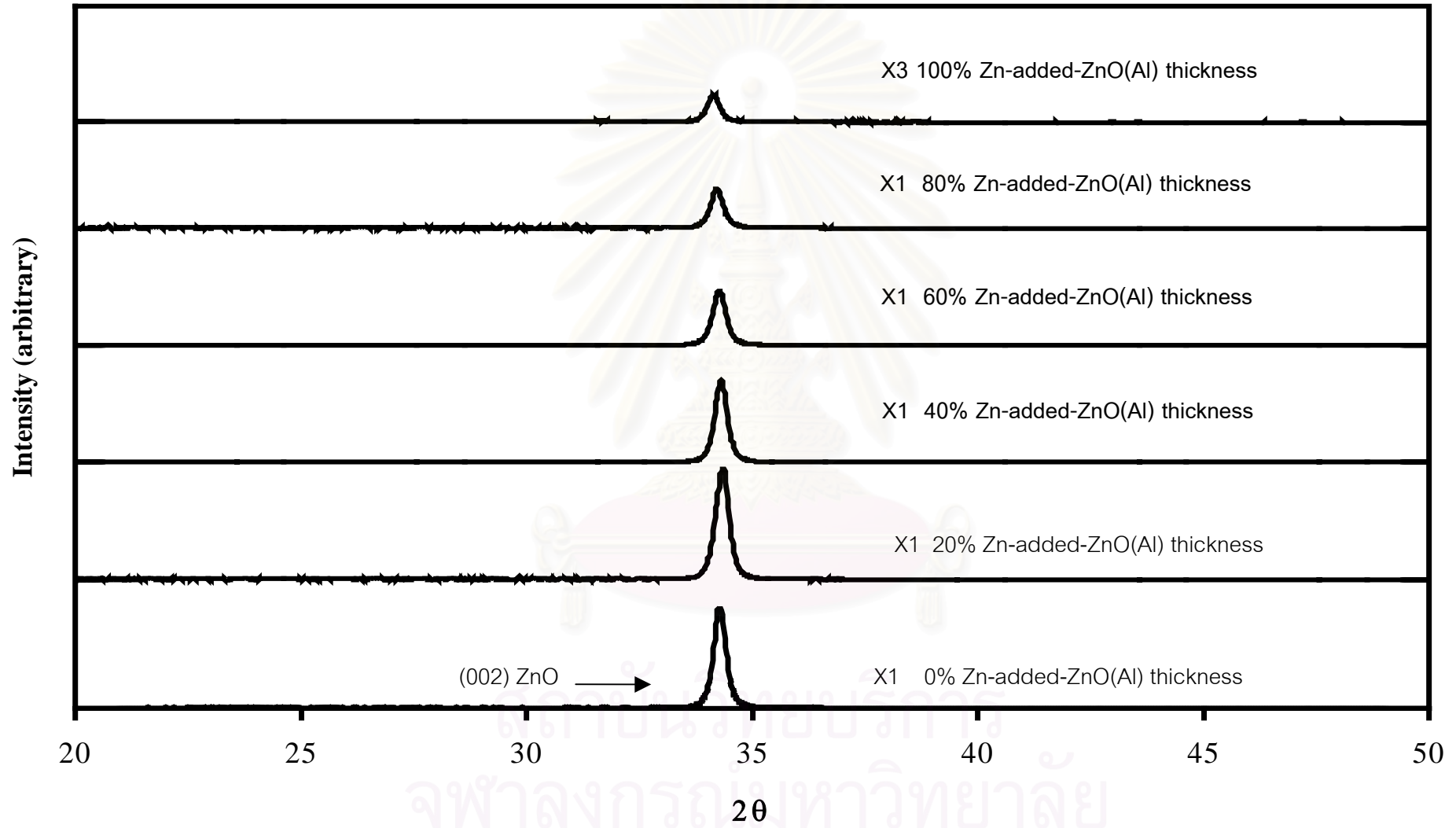
รูปที่ 5.15 การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ZnO(AI) ชั้น 3, 5, 7 และ 9 ชั้นที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ซึ่งทำการสับเตอรืชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน



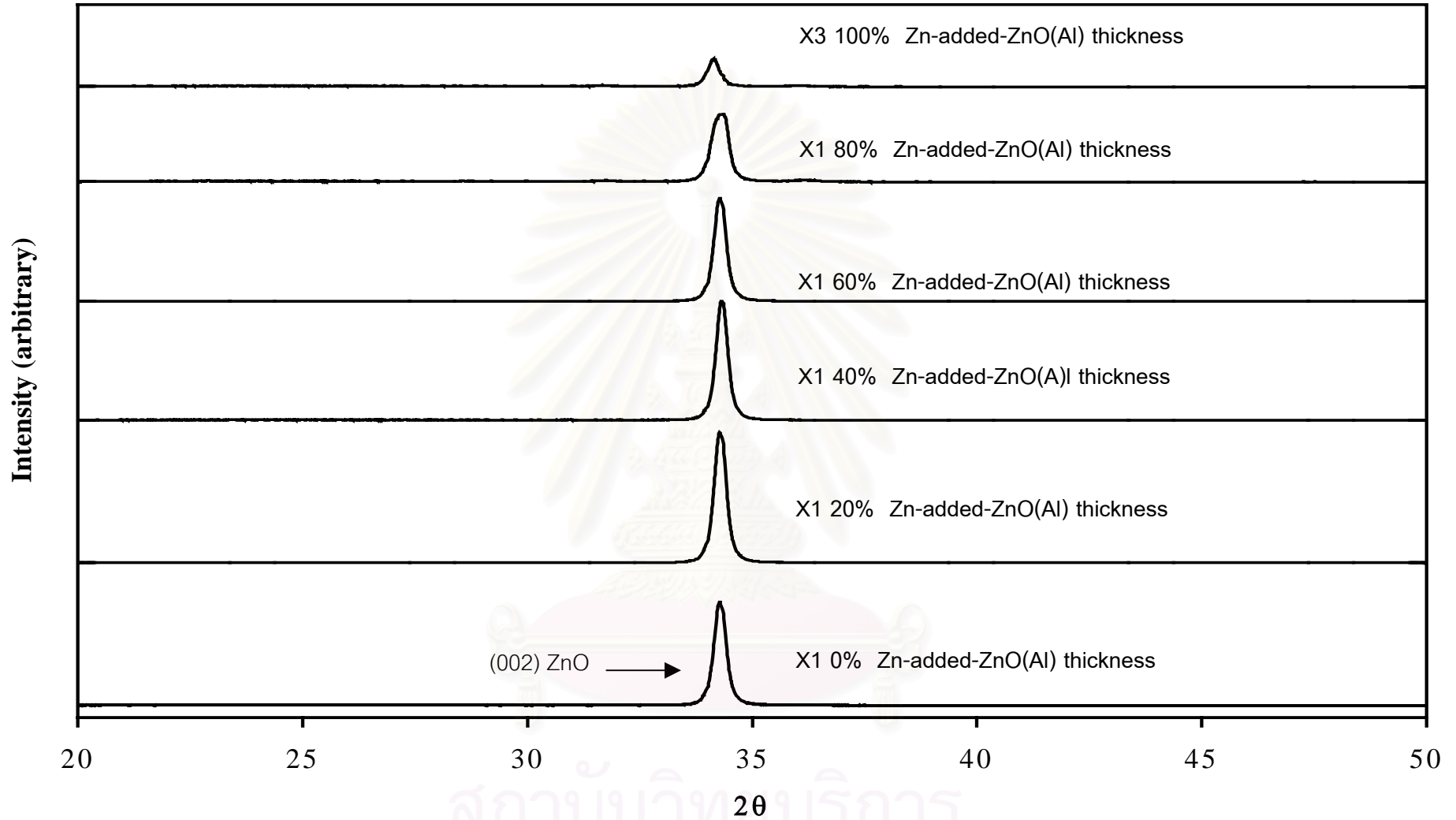
รูปที่ 5.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสเปคเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน



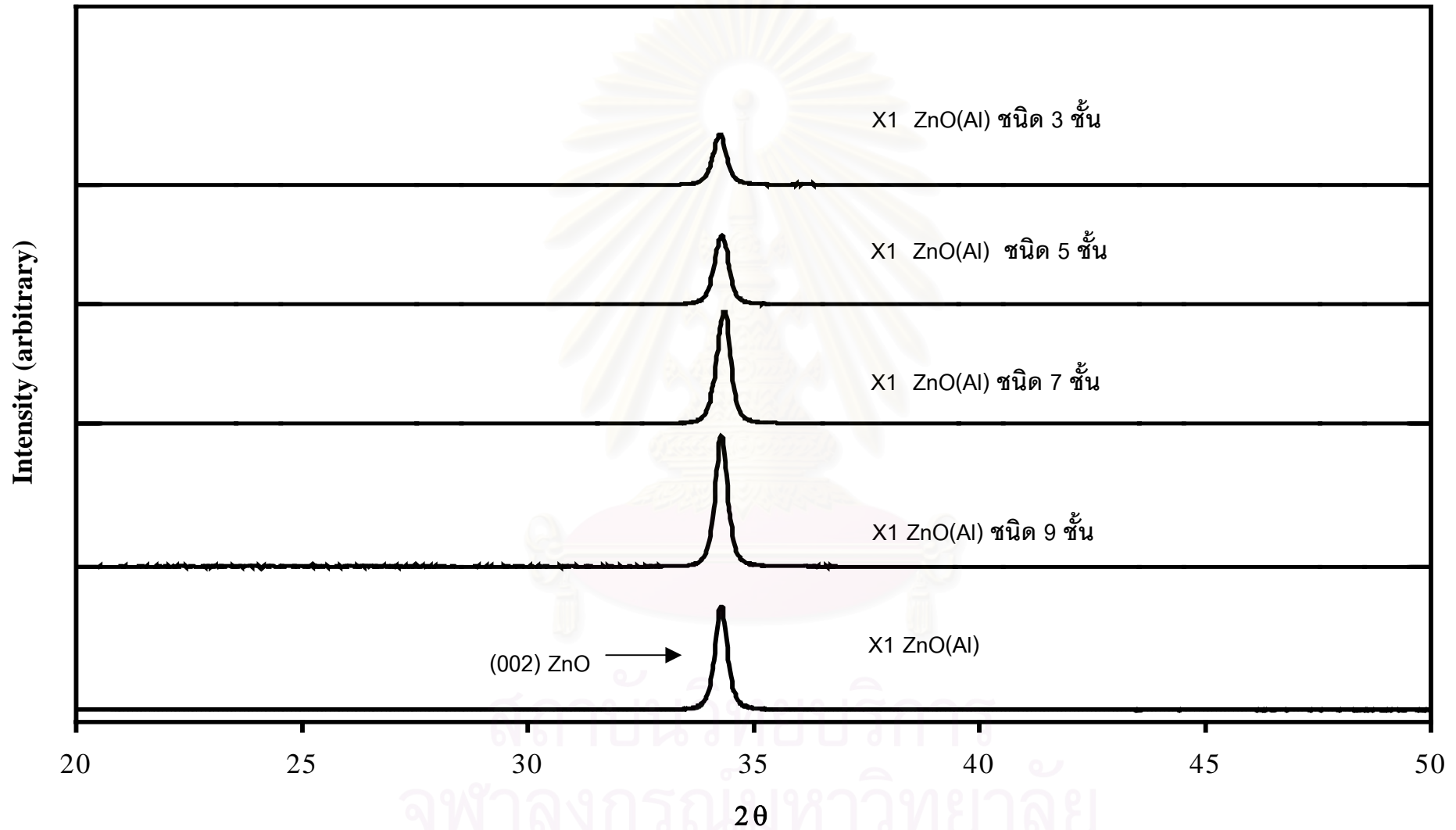
รูปที่ 5.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 5 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน



รูปที่ 5.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 7 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสับเตอรืชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน



รูปที่ 5.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 9 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ตั้งแต่ 0 %, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ซึ่งทำการสเป็คเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน



รูปที่ 5.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ซึ่งทำการสับเตเตอร์ชั้นฟิล์ม ZnO(AI) ก่อน

บทที่ 6

อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

การเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์จากการสปัตเตอร์เป่าซิงค์ออกไซด์ที่เจืออลูมิเนียมเป็นไปได้อย่างที่จะให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ [6] เพราะการเจือปนอลูมิเนียมถึงแม้จะเป็นการเพิ่มพาหะอิสระแต่ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของการกระเจิงซึ่งจะลดสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะ (carrier mobility) และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น ความโปร่งแสงลดลง ดังสมการ [27]

$$A = 1 - e^{-\alpha d}$$

$$\alpha \propto N/\mu$$

(6.1)

$$R_{sh} \propto 1/N\mu$$

(6.2)

เมื่อ A : การดูดกลืนแสง

α : สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

d : ความหนาของฟิล์ม

N : จำนวนของอิเล็กตรอนอิสระ

μ : สภาพเคลื่อนที่ได้

R_{sh} : ความต้านทานแผ่น

จากสมการที่ (6.2) ถ้าต้องการให้ฟิล์มมีความต้านทานต่ำจะต้องมีการเจือปนของอลูมิเนียม ออกไซด์มากขึ้นด้วยส่งผลทำให้จำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงขึ้น นั่นคือความโปร่งแสงของฟิล์มลดลง การเพิ่มการเจือปนของอลูมิเนียมจึงไม่ใช่ตัวแปรที่จะทำให้ได้สมบัติของฟิล์มตามต้องการ เมื่อพิจารณาจากทั้งสองสมการจะเห็นได้ว่าถ้าเพิ่มค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะจะทำให้ความต้านทานแผ่นลดลงและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงลดลงด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเพิ่มค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะในฟิล์ม ZnO(AI) โดยอาศัยแบบจำลองอย่างง่ายของตัวนำที่เกี่ยวข้องกับพาหะในชั้นฟิล์มที่แตกต่างกันสองชั้น ในงานวิจัยของ K.Tominaga และคณะ [6] ที่ให้ค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับความต้องการในวิทยานิพนธ์นี้ และนอกจากนี้ในงานวิจัยก่อนหน้า [17,28] ได้เตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจืออลูมิเนียมและมีการเพิ่มอะตอม Zn ซึ่งให้ผลของฟิล์มที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของพาหะและสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะที่เพิ่มขึ้น [17,28] ผลของการส่ง

ผ่านแสงที่สูงขึ้น [17] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจเตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบตามลำดับชั้น โดยกำหนดชั้นฟิล์มที่มีความเข้มข้นของพาหะแตก ต่างกันสองชั้น คือชั้นฟิล์ม ZnO(AI) และชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ซึ่งคาดว่าจะให้ฟิล์ม ZnO (AI) ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำและการส่งผ่านแสงสูง

วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการเตรียม ฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) โดยวิธีการสปัตเตอริงพร้อมกัน (co-sputtering) ส่วนที่สองเป็นการ เตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบตามลำดับชั้นสองชั้น และส่วนที่สามเป็นการเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบ ตามลำดับชั้นหลายชั้น

1. การเตรียมฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) โดยวิธีการสปัตเตอริงพร้อมกัน (co-sputtering)

งานวิจัยเริ่มจากการเตรียมฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) โดยวิธีการสปัตเตอริง พร้อมกัน (co-sputtering) จากเป้า Zn และ ZnO(AI₂O₃ 2.5wt%) โดยการสปัตเตอร์จากเป้าทั้ง สองพร้อมกันโดยเปลี่ยนแปลงค่ากระแสดีซี และได้เลือกสภาวะที่ให้ฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ที่ กระแสดีซี 10 mA เพื่อจะนำไปเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง แบบตามลำดับ เนื่องจากผลของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำลงซึ่งมีค่า 1.03×10^{-3} โอห์ม-เซนติเมตร การส่งผ่านแสงไม่ต่ำมากนักและโครงสร้างผลึกยังแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ใกล้เคียง วัสดุกลุ่มซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากมีข้อจำกัดของเครื่องมือที่ไม่สามารถใช้กระแสดีซีที่ต่ำกว่านี้ได้

2. การเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบ ตามลำดับชั้นสองชั้น

ฟิล์มบาง ZnO(AI) เตรียมโดยอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบตาม ลำดับชั้นสองชั้น ฟิล์มที่ได้ทั้งหมดมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีอาร์เอฟแมกนี ตรอนสปัตเตอริง (ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI)) เนื่องจากสภาพเคลื่อนที่ได้และความเข้มข้นของพาหะสูงขึ้น โดยฟิล์มบาง ZnO(AI) ชั้นสองชั้นในกรณีนี้ 1 (Zn-added-ZnO(AI)/ZnO (AI)) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ของความหนาทั้งหมดมีสภาพต้านทาน ไฟฟ้าต่ำสุดซึ่งมีค่า 7.63×10^{-4} โอห์ม-เซนติเมตร มีสภาพเคลื่อนที่ได้ $15.21 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ และความเข้มข้นของพาหะ $7.20 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ โดยสภาพเคลื่อนที่ได้ที่เพิ่มขึ้นเป็นการชี้ให้เห็นว่าเกิดจากการลดการ

กระเจิงของพหุในโครงสร้างของฟิล์มลง และจากผลการส่งผ่านแสงและรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ที่สูงขึ้นกว่าฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงจึงอธิบายได้ว่าการเพิ่มอะตอมของ Zn ในฟิล์ม ZnO(AI) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ในกรณีที่ 1 เป็นการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มซึ่งก็คือการลดความบกพร่องของฟิล์มนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของฟิล์มบาง ZnO(AI) ชนิดสองชั้นที่เปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) เดียวกัน พบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มในกรณีที่ 1 (Zn-added-ZnO(AI)/ZnO(AI)) และกรณีที่ 2 (ZnO(AI)/Zn-added-ZnO(AI)) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบผลของการส่งผ่านแสงและรูปแบบรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) พบว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและรูปแบบรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ของฟิล์มในกรณีที่ 1 สูงกว่าฟิล์มในกรณีที่ 2 ที่ทุกเปอร์เซ็นต์ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) จากผลการทดลองน่าจะอธิบายได้ว่าตำแหน่งของฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) มีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มทำให้ฟิล์มมีสมบัติแตกต่างกันซึ่งน่าจะเกิดจากโอกาสที่อะตอม Zn แทรกตัวเข้าไปในฟิล์ม ZnO(AI) ได้แตกต่างกัน โดยฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 1 ซึ่งได้สปีดเตอริงชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) อยู่ด้านล่างอะตอม Zn มีโอกาสจัดเรียงตัวในโครงสร้างผลึกได้ดีกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ชนิดสองชั้นในกรณีที่ 2

3. การเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบตามลำดับชนิดหลายชั้น

จากผลการทดลองของฟิล์มบาง ZnO(AI) ชนิดสองชั้นที่พบว่าเมื่อมีการแทรกตัวของอะตอม Zn ในตำแหน่งที่ต่างกันทำให้โอกาสในการจัดเรียงตัวในโครงสร้างผลึกแตกต่างกันจึงสนใจเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบตามลำดับชนิด 3, 5, 7 และ 9 ชั้น โดยแทรกชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) ระหว่างชั้นฟิล์ม ZnO(AI) เพื่อดูผลของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม โดยผลการทดลองพบว่าฟิล์มบาง ZnO(AI) ชนิดหลายชั้นทั้ง 4 แบบ ฟิล์มทั้งหมดมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าฟิล์มบาง ZnO(AI) ที่เตรียมโดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง (ไม่มีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI)) โดยเมื่อมีความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ของความหนาทั้งหมด จะให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดเนื่องจากสภาพเคลื่อนที่ได้และความเข้มข้นของพหุสูงสุด จากผลการทดลองเห็นได้ว่าที่ความหนาของชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 20% ของความหนาทั้งหมดเป็นความหนาที่ทำให้มีปริมาณอะตอม Zn ที่เพิ่มขึ้นทำให้

สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดในฟิล์มแต่ละแบบ และฟิล์มบาง ZnO(AI) ชนิด 9 ชั้นให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดซึ่งมีค่า 5.60×10^{-4} โอห์ม-เซนติเมตร สภาพเคลื่อนที่ได้มีค่า $17.0 \text{ cm}^2/\text{V}\times\text{s}$ และความเข้มข้นพาหะมีค่า $8.80 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งเป็นค่าสูงสุด จากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าการแทรกอะตอมของ Zn ในโครงสร้างของฟิล์มในแบบที่ต่างกันทำให้โอกาสในการจัดเรียงตัวในโครงสร้างผลึกของฟิล์มแตกต่างกันและทำให้ฟิล์มมีสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกันด้วย สำหรับผลการส่งผ่านแสงและรูปแบบรังสีเอ็กซ์ที่แสดงระนาบ (002) ของฟิล์ม ZnO(AI) ชนิด 9 ชั้นสูงที่สุดและสูงกว่าฟิล์ม ZnO(AI) ที่เตรียมโดยวิธีอาร์เอฟแมกนิตรอนสปัตเตอริงอีกด้วย จากผลการทดลองทั้งหมดจึงน่าจะอธิบายได้ว่าอะตอมของ Zn ที่เพิ่มเข้าไปมีโอกาสจัดเรียงตัวในโครงสร้างของฟิล์ม ZnO(AI) ได้ดีที่สุดเมื่อแบ่งชั้นฟิล์มออกเป็น 9 ชั้น ซึ่งมีชั้นฟิล์ม Zn-added-ZnO(AI) 4 ชั้นแทรกระหว่างชั้นฟิล์ม ZnO(AI) และทำให้เกิดการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มซึ่งเป็นการลดความบกพร่องของฟิล์มด้วย

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองการเตรียมฟิล์มบาง ZnO(AI) โดยวิธีอาร์เอฟและดีซีแมกนิตรอน สปัตเตอริงแบบตามลำดับชนิดหลายชั้น พบว่า เมื่อแบ่งชั้นฟิล์มมากขึ้นจะทำให้อะตอม Zn ที่เพิ่มขึ้นมีโอกาสแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างผลึกของฟิล์มได้ดีขึ้น ทำให้ฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงและการส่งผ่านแสงสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้น การเตรียมฟิล์ม ZnO(AI) โดยการเพิ่มอะตอม Zn ปริมาณน้อยระหว่างการสปัตเตอริงเข้าซึ่งคือออกไซด์ที่เจือด้วยออกซิเจนน่าจะเป็นแนวทางที่จะทำให้ฟิล์มบาง ZnO(AI) ที่มีสมบัติตามต้องการ

รายการอ้างอิง

1. Madedlung, O. Semiconductor Group IV Element and III-V Compound. n.p. : Springer-Verlag, 1992.
2. Brown, H.E. Zinc Oxide Rediscovered. The New Jersey Zinc Company, 1957.
3. Lee, J.C., Kang, K.H., Kim, S.K., Yoon, K.H., Park, I.J. and Song, J. RF sputter deposition of the high-quality intrinsic and n-type ZnO window layers for Cu(In,Ga)Se₂. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 64(2000) : 186.
4. Rockett, A. and Birkmire, R.W. CuInSe₂ for photovoltaic applications J. Appl. Phys. 70 (1991) : R81-R89
5. Hardind, G.L., Window, B.I., and Horrigan, E.C. Solar Energy Material 1991 : 69-91.
6. Tominaga, K., Umezumi, N., Mori, I., Ushiro, T., Moroga, T. and Hakabayashi, I. Transparent conductive ZnO film preparation by alternating sputtering of ZnO:Al and Zn or Al targets. Thin Solid Films 334(1998) : 35-39.
7. Granqvist, C.G. and Niklasson, G.A. Thin Film Technology. Gothenburg : Physics Department, Chalmers University of Technology, n.d.
8. Vossen, J.L. and Kerm, W. Thin Film Process II. San Diego : Academic Press Inc, 1991.
9. Shah, S.I. Handbook of thin film Process Technology. New York: Academic, 1996.
10. Chopman, B. Glow Discharge Processes : sputtering and plasma etching. New York : John Wiley & Son, Inc., 1980.
11. คมกฤษณ์ ปันอุดม. การเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์แบบโปร่งใสและนำไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
12. ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน. การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
13. Robert, M.R., The Structure and Properties of Materials. New York : John Wiley & Son, 1966.
14. Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices. 2nd ed. New York : John Wiley & Son, 1981.
15. Ranyan, W.R., Semiconductor Measurement and Instrumentation. Bombay :

McGraw-Hill, 1975.

16. Blood, P., and Orton, J.W. The Electrical Characterization of Semiconductor :Majority Carriers and Electron States. London : Academic Press, 1992.
17. Tominaga, K.,Manabe,H.,Umezun,N.,Mori,I.,Ushiro,T.,Nakabayashi,I. Film properties of ZnO:Al prepared by cosputtering of ZnO:Al and either Zn or Al targets. J.Vac.Sci.Technol A15(1997) :1074-1079.
18. Johnson, E.J. Semiconductor and Semimetal. USA : Academic Press, 1967.
19. Pankove, J.I. Optical Process in Semiconductor. New York : Dover,1971.
20. Abeles, F. Optical Properties of Solids. Natherland:North-Holland ,1972.
21. Cullity, B.D. Element of X-Ray Diffraction. 2nd ed. Massachusetts : Addison&Wesley, 1967.
22. บัญชา ธนบุญสมบัติ การศึกษาวัดโดยเทคนิคดีฟแฟรกชัน. กรุงเทพฯ : ส.ส.ท., 2537.
23. Shimadzu Corporation. Instruction Manual UVPC Series Personal Spectroscopy Software. Kyoto , 1994.
24. Aita, C.A., J.Appl.Phys. 51(1980) : 5533-5536.
25. Minami, T.,Sato,H.,Nanto,H.,Takata,S. Jpn.J.Appl. 24(1985) : L781-L784.
26. Tominka, K.,Murayama,T.,Mori,I.,Ushiro,T.,Moriga,T.,Nakabayashi,I. Effect of insertion of thin ZnO layer in transparent conductive ZnO:Al film. Thin solid Films 386(2001): 267-270.
27. Lundberg,O. Optimization of the ZnO:Al window layer for CIGS-based solar cell Department of Physics and Measurement . Linkopings University, 1999.
28. Tominaga,K.,Kataoka,M.,Ueda,T.,Chong M.,Shintani,Y.,Mori,I. Preparation of conductive ZnO:Al films by a facing target system with a strong magnetic field. Thin solid films 253(1994) : 9-13.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเกษรรัตน์ อักษรรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2520 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ (เกียรตินิยมอันดับสอง) จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2541 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2542 และได้รับทุนโครงการพัฒนาอาจารย์ปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย