

อภิบาลนันทนาการ



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ โครงสร้างและสมบัติทางแสงของกระจกแบ่งลำแสงที่
เตรียมด้วยวิธีสปัตเตอริง

ผู้วิจัย

ผศ.ดร.คเชนทร์ แดงอุดม

นางสาวพรวิณี บุญเรศ

นายแสงเพชร บุญผาง

สํานักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันลงทะเบียน 20 พ.ย. 2562

เลขทะเบียน 1023679

เลขเรียกหนังสือ ว 3c

176
-8.592

๑1195

2560

ธันวาคม 2560

สัญญาเลขที่ R2560C076

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ โครงสร้างและสมบัติทางแสงของกระจกแบ่งลำแสงที่
เตรียมด้วยวิธีสปีดเตอริง



ผู้วิจัย

ผศ.ดร.คเชนทร์ แดงอุดม

นางสาวปราณี บุญเรศ

นายแสงเพชร บุญผาง

สังกัด

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ชื่อเรื่อง โครงสร้างและสมบัติทางแสงของกระจกแบ่งลำแสงที่เตรียมด้วยวิธีสปีดเทอริง

ผู้วิจัย ผศ.ดร.คเชนทร์ แดงอุดม

นางสาวพรวิณี บุญเรศ

นายแสงเพชร บุญผาง

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเคลือบฟิล์มบางเงินบนกระจกด้วยวิธีสปีดเทอริงที่ความหนา 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 นาโนเมตร วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5,00 และ 10,000 เท่า พบว่าเมื่อเคลือบเงินที่ความหนาเพิ่มขึ้นจะพบว่าเงินจะมีการเกาะตัวที่แน่นและสม่ำเสมอมากขึ้น วัดสมบัติการส่งผ่านที่มุมตกกระทบ 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา และสมบัติการสะท้อนที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา ด้วยต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร พบว่าที่ความหนา 40 นาโนเมตร มีการสะท้อนแสงได้ดีในทุกช่วงความยาวคลื่น และได้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนแสงที่มุมตกกระทบต่างๆ ของแสงแต่ละความยาวคลื่นเพื่อเป็นข้อมูลในการนำกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินแต่ละความหนาไปใช้งานต่อไปได้

คำสำคัญ ฟิล์มบางเงิน / สปีดเทอริง / การส่งผ่านของแสง

Title Structural and optical properties of beam splitter prepared by sputtering technique.

Author Kachain Dangudom
Parvinee Boonyaras
Sangphet Boonpang

Abstract

This research was fabricated a silver-coated glass thin film using sputtering technique with 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 and 100 nm thickness. Physical characteristics of thin film were studied by scanning electron microscope with magnification 500X and 10,000X. It was found that the surface of thin films were thick and smooth when the thickness increase. Then the optical properties-transmission were measured at various incident angle 0, 15, 30, 45, 60 and 75 degree with light wavelength 405, 532, 650 and 780 nanometer. The reflection coefficients were measure at various incident angle 15, 30, 45, 60 and 75 degree with light wavelength 405, 532, 650 and 780 nanometer. We found that at 40 nm thickness has the best reflective in every incident angle and we get the information of transmission and reflection coefficients at various incident angle for useful in optical beam splitter application.

Keywords : thin film silver / sputtering / transmittance light

สารบัญ

บทที่

หน้า

กิตติกรรมประกาศ

ก

บทคัดย่อภาษาไทย

ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

ค

สารบัญ

ง

สารบัญรูป

ฉ

1 บทนำ

1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

2

ขอบเขตการวิจัย

2

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3

2.1 สเปกตรัม

3

2.2 แสง

6

2.3 เลเซอร์

10

2.4 เครื่อง vacuum coating

13

2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสเปกโตรสโกปี

14

2.6 เทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสเปกโตรสโกปี

15

2.7 เงิน

18

2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

19

2.9 หัววัดแสงโฟโตไดโอด

21

2.10 เครื่องวัดมัลติมิเตอร์

23

2.11 กระจก

26

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

29

3 วิธีดำเนินการวิจัย

31

3.1 เคลือบฟิล์มบางเงินบนกระจกด้วยวิธีสเปกโตรสโกปี

31

3.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	32
3.3 วิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านและการสะท้อน	33
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	37
4.1 กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	37
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ	39
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านและการสะท้อนของแสง	41
5 บทสรุป	68
บรรณานุกรม	70



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.2 สเปกตรัมของแสงที่ตามนุษย์มองเห็น	4
2.3 สเปกตรัมต่อเนื่อง	4
2.4 สเปกตรัมไม่ต่อเนื่องของธาตุบางชนิด	5
2.5 สเปกตรัมของแสงขาว	6
2.6 การสะท้อนแสงบนวัตถุผิวเรียบและการสะท้อนแสงผิวขรุขระ	8
2.7 ลักษณะการเกิดหักเหของแสง	8
2.8 ลักษณะของแสงเมื่อตกกระทบวัตถุ	9
2.9 He-Ne Laser ก๊าซบรรจุอยู่ในหลอดแก้ว	11
2.10 เลเซอร์ที่พบครั้งแรก	12
2.11 laser pointer ซึ่งเป็นเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ	13
2.12 เครื่อง vacuum coating	14
2.13 การเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า	15
2.14 การเคลื่อนที่เป็นวงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวด้านในเส้นทางเลื่อน ลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	17
2.15 เงิน	19
2.16 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM	20
2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
2.18 วงจรโฟโตไดโอด	21
2.19 โฟโตไดโอด	22
2.20 วงจรโฟทรานซิสเตอร์	22
2.21 มัลติมิเตอร์แบบเข็ม	24
2.22 มัลติมิเตอร์แบบตัวเลข	24
2.23 กระจกสะท้อนแสง	29
3.1 (ก) กระจกสไลด์ (ข) อะซิโตน	31
3.2 เครื่อง Vacuum coating รุ่น EDWARD 603 sputtering magnetron	32

3.3	เลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์อินฟราเรด	33
3.4	หัววัดสเปกโตรไดโอด	34
3.5	แสดงชุดการจัดตั้งระบบการวิเคราะห์ความเข้มแสงส่องผ่าน และการสะท้อนของแสงโดยยิงต้นกำเนิดแสงเข้าตัดวัดโดยตรง	35
3.6	ชุดการจัดตั้งระบบการวิเคราะห์ความเข้มแสงส่องผ่านและการสะท้อน ของแสงโดยยิงต้นกำเนิดแสงผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	36
3.7	ระบบวิเคราะห์การส่องผ่านและการสะท้อนของแสงในชุดการจัดตั้งระบบจริง	36
4.1	กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนาต่างๆ	38
4.2	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 20 นาโนเมตร	39
4.3	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 40 นาโนเมตร	40
4.4	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 60 นาโนเมตร	40
4.5	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 80 นาโนเมตร	41
4.6	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 100 นาโนเมตร	41
4.7	ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่าน 405 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	47
4.8	ร้อยละการสะท้อนแสง 405 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	48
4.9	ร้อยละการดูดกลืนแสง 405 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	49
4.10	ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่าน 532 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	53
4.11	ร้อยละการสะท้อนแสง 532 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	54
4.12	ร้อยละการดูดกลืนแสง 532 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	55
4.13	ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่าน 650 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	59
4.14	ร้อยละการสะท้อนแสง 650 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	60
4.15	ร้อยละการดูดกลืนแสง 650 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	61
4.16	ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่าน 780 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	65
4.17	ร้อยละการสะท้อนแสง 780 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	66
4.18	ร้อยละการดูดกลืนแสง 780 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน	67

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบางได้เริ่มเข้ามามีบทบาทต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมทำให้มนุษย์มีการดำรงชีวิตที่สะดวกสบายมากขึ้น การเคลือบฟิล์มบางแสงในเส้นใยนำแสงสำหรับงานทางด้านอุปกรณ์โทรคมนาคมหรือการนำฟิล์มบางแสงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านพลังงาน เช่น เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ หรือประยุกต์ใช้ทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ นอกจากนั้นฟิล์มบางแสงที่สัมผัสได้มากที่สุดก็คือ การเคลือบฟิล์มบาง dielectric-Ag-dielectric ซึ่งมีสมบัติในการเป็นกระจกสะท้อนความร้อนที่ดี และมีการประยุกต์ใช้กับกระจกรถยนต์ หรืออาคาร เพื่อลดการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นรังสีความร้อน

การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์นั้นก็มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การทำให้เป็นไอด้วยความร้อน (Thermal evaporation) สเปตเตอริง (Sputtering)^[1] การเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก (Arc vapor deposition) ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกันออกไป แต่มีวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูงคือ การเคลือบด้วยวิธีสเปตเตอริง กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นภายใต้ความดันค่าประมาณ $10^{-3} - 10^{-1}$ mbar และอาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าของแก๊สทำให้แตกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนจะถูกเร่งให้วิ่งเข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบ (target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง อนุภาคของเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊สพลังงานสูงนั้นจะหลุดจาก เป้าสารเคลือบและวิ่งออกมาด้วยความเร็วสูงเข้าชนและทับถม (deposition) เป็นชั้นของฟิล์มบางเคลือบ ลงบนวัสดุรองรับ (substrate) ในทุกทิศทางและเนื่องจากพลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมาจากกระบวนการสเปตเตอริงนี้สูงมาก ดังนั้นเมื่อตกกระทบบนวัสดุรองรับก็จะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อของวัสดุรองรับทำให้การยึดเกาะของฟิล์มบางที่เคลือบได้ดีมาก ข้อดีของการเคลือบด้วยวิธีสเปตเตอริงคือวัสดุรองรับหรือวัสดุที่ต้องการเคลือบนั้นอาจเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ ขณะเดียวกันสารที่ต้องการเคลือบอาจเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้เช่นเดียวกัน ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมนั้นได้มีการนำวิธีการเคลือบแบบสเปตเตอริงมาใช้ในกระบวนการผลิตอุปกรณ์เครื่องมือและวัสดุต่างๆ มากมายโดยฟิล์มบางที่เคลือบได้นั้นอาจเป็นแบบชั้นเดียวหรือแบบหลาย

ชั้นอาจเป็นฟิล์มของสารชนิดเดียว อัลลอยด์ หรือสารประกอบ และอาจมีลักษณะหรือขนาดแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการเคลือบฟิล์มบางเงินบนกระจกเพื่อใช้เป็นกระจกส่องผ่านหรือสะท้อนบางส่วนที่ใช้งานเฉพาะเจาะจงในแต่ละความยาวคลื่นด้วยวิธีสเป็คโตรอิง โดยใช้เงินซึ่งเป็นโลหะมาเป็นเป้าในระบบเพื่อศึกษาสมบัติทางแสงหาเงื่อนไขการสะท้อนและการส่องผ่านของต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่นเฉพาะค่าที่มุมตกกระทบต่างๆและศึกษาลักษณะทางกายภาพของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินฟิล์มบางเงินที่ความหนาต่างๆ

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการเคลือบฟิล์มบางเงินของกระจกด้วยวิธีสเป็คโตรอิง
2. เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน
3. เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

ขอบเขตการวิจัย

1. ประดิษฐ์กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยวิธีสเป็คโตรอิง ที่ความหนา 10, 20 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 นาโนเมตร
2. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยภาพถ่าย SEM
3. วิเคราะห์สมบัติทางแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินโดยใช้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ 4 ความยาวคลื่น ดังนี้ 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเงินบนกระจกด้วยวิธีสเป็คโตรอิงได้
2. ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน
3. ทราบถึงสมบัติทางแสงในแต่ละความยาวคลื่นของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินที่มุมตกกระทบต่างๆ สำหรับการเคลือบฟิล์มบางเงินที่ความหนาต่างๆ
4. สามารถนำกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินที่ได้ไปใช้งานเป็นกระจกส่องผ่านหรือ กระจกสะท้อนบางส่วนที่ใช้งานเฉพาะเจาะจงแต่ละความยาวคลื่นได้

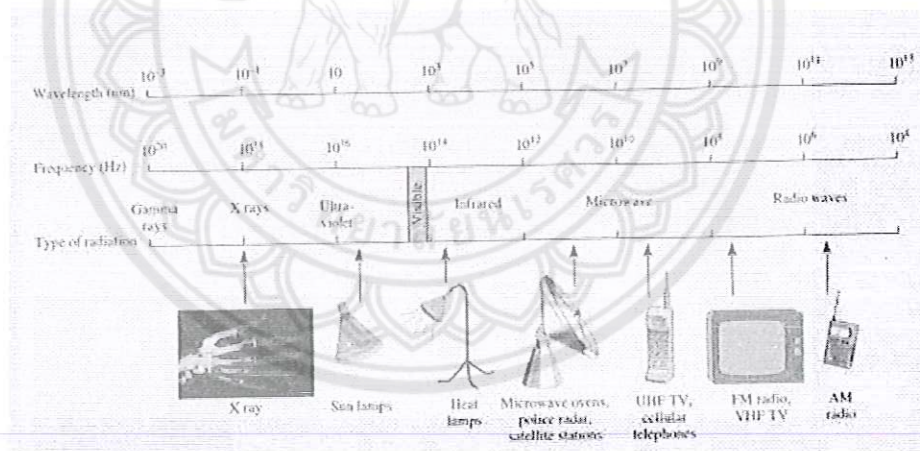
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

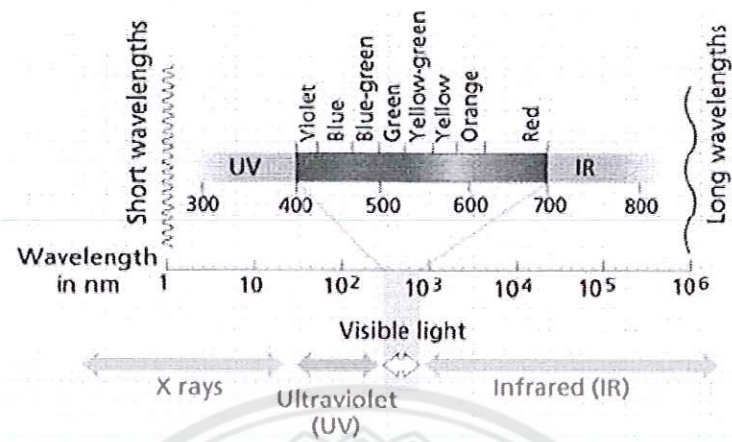
2.1 สเปกตรัม (Spectrum)^[2]

สเปกตรัม หมายถึง อนุกรมแถบสีหรือเส้นสีที่ได้จากการผ่านพลังงานแสงเข้าไปในสเปกโตรสโคปแล้วทำให้พลังงานแสงแยกออกเป็นแถบสีที่เรียงกันตามความยาวคลื่นหรือได้เส้นสีที่มีค่าความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ คลื่นอัลตราไวโอเลต อินฟราเรด คลื่นวิทยุ โทรทัศน์ ไมโครเวฟ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา เป็นต้นดังรูปที่ 2.1 และ 2.2



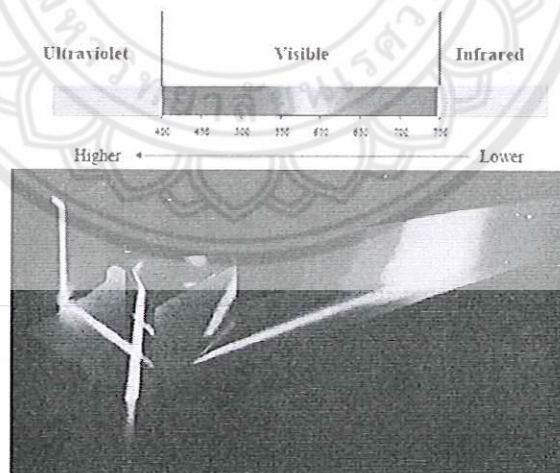
รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของแสงที่ตามนุษย์มองเห็น

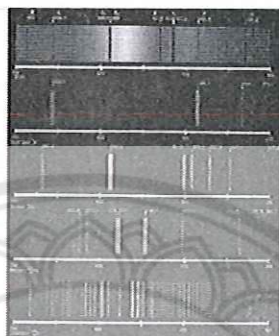
สเปกตรัมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. สเปกตรัมต่อเนื่อง หมายถึง สเปกตรัมที่ประกอบด้วยแถบของสีที่มีค่าความถี่หรือความยาวคลื่นต่อเนื่องกัน เช่น สเปกตรัมที่เกิดจากแสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมต่อเนื่อง

2. สเปกตรัมไม่ต่อเนื่อง หมายถึง สเปกตรัมที่มีลักษณะเป็นเส้นสีหรือแถบสีเล็กๆ ที่ไม่ต่อเนื่องกัน (ความถี่ไม่ต่อเนื่องกัน) มีช่องว่างระหว่างเส้น เส้นสีที่เกิดขึ้นเรียกว่าเส้นสเปกตรัม เช่น สเปกตรัมที่เกิดจากแสงซึ่งเกิดจากหลอดไฟฟ้าที่บรรจุธาตุไฮโดรเจน ดังรูปที่ 2.4

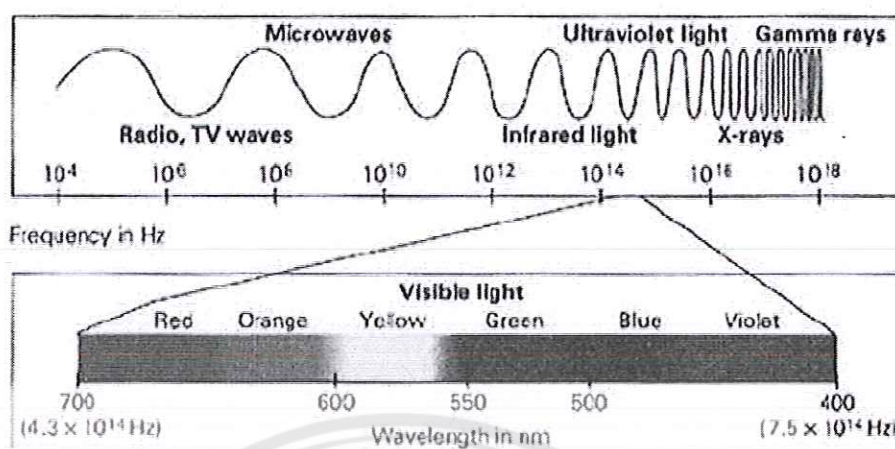


รูปที่ 2.4 สเปกตรัมไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Spectrum) ของธาตุบางชนิด

ถ้าให้แสงขาวผ่านปริซึมแสงขาวจะเบนกระจายออกเป็นแสงสีต่างๆ คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง แสงทุกสีจะต่อเนื่องกันไปเรียกแถบสีทั้ง 7 สีที่ต่อเนื่องกันว่า สเปกตรัมแสงขาวและจัดเป็นสเปกตรัมชนิดต่อเนื่องการที่แสงสีขาวแยกเป็นแถบสเปกตรัมเมื่อผ่านปริซึมเกิด เนื่องจากเมื่อแสงขาวเดินทางจากอากาศผ่านตัวกลางจะเกิดการหักเหและกระจายออกเป็นแสงสีต่างๆ ตามความยาวคลื่นของแสงโดยแสงสีที่มีความยาวคลื่นสั้นจะหักเหได้มากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นยาว เช่น แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดจึงหักเหได้มากที่สุด ในขณะที่แสงสีแดงมีความยาวคลื่นยาวที่สุดจึงหักเหได้น้อยที่สุด ดังตาราง 2.1 และรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นของแสงสีต่างๆในแถบสเปกตรัมของแสงขาว

สีของสเปกตรัม	ความยาวคลื่น (nm)
ม่วง	400 - 420
น้ำเงิน	420 - 490
เขียว	490 - 580
เหลือง	580 - 590
ส้ม	590 - 650
แดง	650 - 700



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของแสงขาว

2.2 แสง (Light)^[3]

แสงเป็นพลังงานรูปหนึ่งเดินทางในรูปคลื่นที่มีอัตราเร็วสูง แหล่งกำเนิดแสงที่สำคัญที่สุดของเราคือดวงอาทิตย์อย่างไรก็ตามเราสามารถผลิตแสงได้เอง เช่น หลอดไฟ ตะเกียง เทียนไข เป็นต้น แสงมีประโยชน์และเป็นสิ่งจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต

การมองเห็นวัตถุใดๆ ต้องมีแสงจากวัตถุนั้นเข้ามา ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

1. เมื่อวัตถุนั้นมีแสงสว่างในตัวเองจะมีแสงสว่างจากวัตถุเข้ามาโดยตรง
2. วัตถุนั้นไม่มีแสงสว่างในตัวเองต้องมีแสงจากแหล่งกำเนิดแสงอื่นกระทบวัตถุนั้นแล้ว สะท้อนเข้ามาเมื่อแสงเคลื่อนที่ไปกระทบวัตถุต่างๆ วัตถุบางชนิดแสงผ่านไปได้แต่วัตถุบางชนิดแสงผ่านไม่ได้เราอาจแบ่งวัตถุตามปริมาณแสงและลักษณะที่แสงผ่านวัตถุได้ 3 ประเภท ดังนี้

2.1 วัตถุโปร่งใส หมายถึง วัตถุที่แสงผ่านได้หมดหรือเกือบหมดอย่างเป็นระเบียบ เราจึงสามารถมองเห็นวัตถุที่อยู่อีกข้างหนึ่งได้อย่างชัดเจนวัตถุโปร่งใสมีหลายชนิด เช่น อากาศกระจกใส แก้วใส่น้ำ และแผ่นพลาสติกใส เป็นต้น

2.2 วัตถุโปร่งแสง หมายถึง วัตถุที่แสงผ่านได้อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อเรามองผ่านวัตถุโปร่งแสง จึงเห็นวัตถุอีกด้านหนึ่งไม่ชัดเจน เช่น กระดาษชุบน้ำมัน กระดาษฝ้า กระดาษไข หรือกระดาษลอกลาย และหมอก เป็นต้น

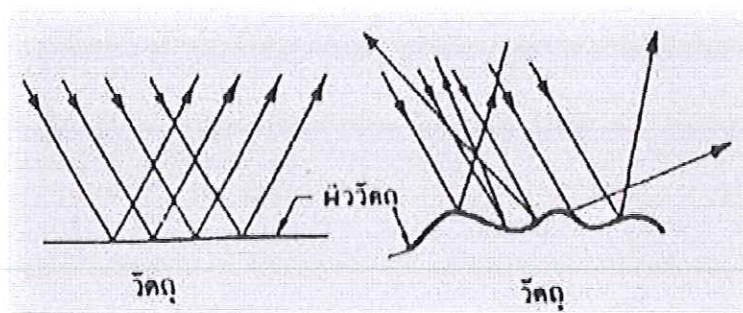
2.3 วัตถุทึบแสง หมายถึง วัตถุที่แสงผ่านไปได้ไม่ได้ เช่น ผ้า แผ่นไม้ แผ่นอะลูมิเนียม แผ่นสังกะสี กระดาษหนา เหล็ก และทองแดง เป็นต้น

ดังนั้นแสง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางและมีการเคลื่อนที่แนวเส้นตรงในตัวกลางชนิดอื่นๆ จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแต่ละชนิดด้วยความเร็วไม่เท่ากันตัวกลางใดมีความหนาแน่นมากแสงจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้นด้วยความเร็วช้า ถ้าแสงเคลื่อนที่ผ่านไม่ได้ก็เป็นเพราะวัตถุมีการดูดกลืน สะท้อนแสง หรือการแทรกสอดของแสง

คุณสมบัติของแสง⁽⁴⁾

คุณสมบัติต่างๆ ของแสงแต่ละคุณสมบัติที่เราสามารถนำหลักการมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของการสะท้อนแสงของวัตถุเรานำมาใช้ในการออกแบบแผ่นสะท้อนแสงของโคมไฟการหักเหของแสงนำมาออกแบบแผ่นปิดหน้าโคมไฟ ซึ่งเป็นกระจกหรือพลาสติกเพื่อบังคับทิศทางของแสงไฟที่ออกจากโคมไฟในทิศทางที่ต้องการการกระจายตัวของลำแสงเมื่อกระทบตัวกลางนำมาใช้ประโยชน์เช่นใช้แผ่นพลาสติกใสปิดดวงโคมเพื่อลดความจ้าจากหลอดไฟ ต่างๆ การดูดกลืนแสง นำมาทำเตาอบพลังงานแสงอาทิตย์เครื่องต้มพลังงานแสงและการแทรกสอดของแสง นำมาใช้ประโยชน์ในกล้องถ่ายรูป เครื่องฉายภาพต่างๆ จะเห็นว่าคุณสมบัติแสงดังกล่าวก็ได้นำมาใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์เราทั้งนั้น

การสะท้อนแสง (Reflection) หมายถึง การที่แสงไปกระทบกับตัวกลางแล้วสะท้อนไปในทิศทางอื่นหรือสะท้อนกลับมาทิศทางเดิมการสะท้อนของแสงนั้นขึ้นอยู่กับพื้นผิวของวัตถุด้วยว่าเรียบหรือหยาบโดยทั่วไปพื้นผิวที่เรียบและมันจะทำให้มุมของแสงที่ตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนตำแหน่งที่แสงตกกระทบกับแสงสะท้อนบนพื้นผิวจะเป็นตำแหน่งเดียวกันดัง รูป 2.6 (ก) ลักษณะของวัตถุดังกล่าว เช่น อลูมิเนียมขัดเงาเหล็กชุบโครเมียม ทอง เงินและกระจกเงาเป็นต้น แต่ถ้าหากวัตถุมีผิวหยาบ แสงสะท้อนก็จะมีลักษณะกระจายกันดังรูป 2.6 (ข) เช่น ผนังฉาบปูนกระดาดขาวโดยทั่วไปวัตถุส่วนใหญ่จะเป็นแบบผสมขึ้นอยู่กัพื้นผิวนั้นมีความมันหรือหยาบมากกว่า



(ก)

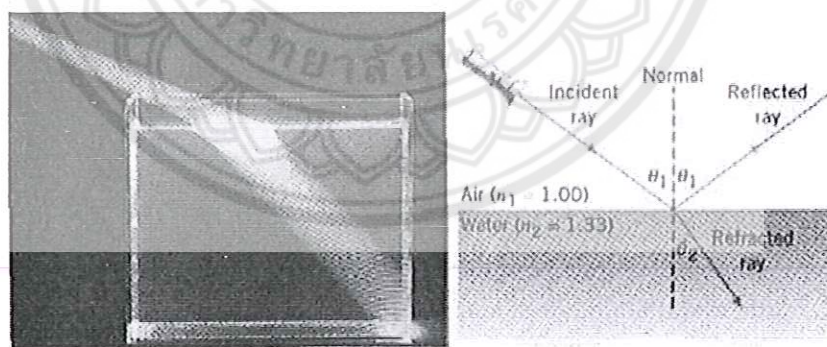
(ข)

รูปที่ 2.6 (ก) การสะท้อนแสงบนวัตถุผิวเรียบ (ข) การสะท้อนแสงผิวขรุขระ

กฎการสะท้อนแสง

1. รังสีตกกระทบ เส้นปกติและรังสีสะท้อนย่อมอยู่บนพื้นระนาบเดียวกัน
2. มุมในการตกกระทบย่อมใหญ่เท่ากับมุมสะท้อน

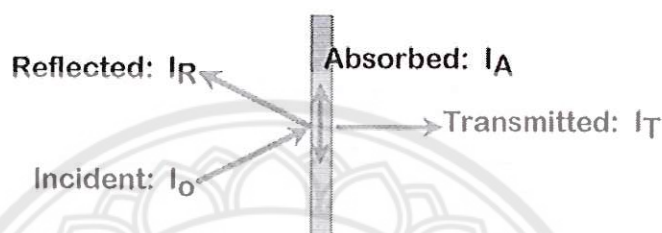
การหักเหของแสง (Refraction) หมายถึง การที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ทำให้แนวลำแสงเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม เช่น แสงผ่านจากอากาศไปยังน้ำ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดหักเหของแสง

การทะลุผ่าน (Transmission) หมายถึง การที่แสงพุ่งชนตัวกลางแล้วทะลุผ่านมันออกไปอีกด้านหนึ่งโดยที่ความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงวัตถุที่มีคุณสมบัติการทะลุผ่านได้ เช่น กระจกผลึกคริสตัล พลาสติกใส น้ำ และของเหลวต่างๆ

การดูดกลืน (Absorption) หมายถึง การที่แสงถูกดูดกลืนหายเข้าไปในตัวกลางทั่วไปเมื่อมีพลังงานแสงถูกดูดกลืนหายเข้าไปในวัตถุใดๆ เช่น เตารอบพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องต้มน้ำพลังงานแสง และยังสามารถนำคุณสมบัติของการดูดกลืนแสงมาใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น การเลือกสวมใส่เสื้อผ้าสีขาว จะดูดแสงน้อยกว่าสีดำจะเห็นได้ว่าเวลาใส่เสื้อผ้าสีดำอยู่กลางแจ้งแดดจะทำให้ร้อนมากกว่าสีขาว



รูปที่ 2.8 ลักษณะของแสงเมื่อตกกระทบวัตถุ¹

¹<http://physics.science.cmu.ac.th/courses/210351/Large%205.pdf>

เมื่อแสงเมื่อตกกระทบวัตถุจะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้⁽⁵⁾

$$I_o = I_T + I_A + I_R \quad (2.1)$$

$$\frac{I_T}{I_o} + \frac{I_A}{I_o} + \frac{I_R}{I_o} = T + A + R = 1 \quad (2.2)$$

สภาพการส่องผ่าน $T = \frac{I_T}{I_o} \quad (2.3)$

สภาพการดูดกลืน $A = \frac{I_A}{I_o} \quad (2.4)$

สภาพการสะท้อน $R = \frac{I_R}{I_o} \quad (2.5)$

เมื่อ I_o คือ ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ

I_T คือ ค่าการส่องผ่าน

I_A คือ ค่าการดูดกลืน

I_R คือ ค่าการสะท้อน

2.3 เลเซอร์ (Laser)^[6]

เลเซอร์ย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation หมายถึง การขยายตัวสัญญาณแสงโดยการปล่อยแสงแบบเร่งเร้า ดังนั้นกลไกพื้นฐานของเลเซอร์จึงได้แก่ การเปล่งแสงแบบเร่งเร้า และการขยายสัญญาณแสง กลไกทั้งสองอย่างนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เลเซอร์ มีสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น ลำแสงขนานที่มีความเข้มสูง และมีคลื่นแสงที่เป็นระเบียบด้วยค่าความยาวคลื่นที่ตายตัว

2.3.1 สมบัติของแสงเลเซอร์

1. เป็นแสงสีเดียว (monochromaticity)

เป็นสมบัติสำคัญประการหนึ่งของเลเซอร์ ซึ่งหมายถึงแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แสงที่ปล่อยจากต้นกำเนิดแสงโดยทั่วไปที่เราพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟ และดวงอาทิตย์จะเป็นสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึมจะเห็นแถบสีต่างๆ เรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เมื่อให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านปริซึม จะไม่มีการแยกเป็นหลายเส้นแต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

2. มีความพร้อมเพรียง (coherence)

หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่างๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียว ทุกๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (coherence light)

3. มีทิศทางที่แน่นอน (directionality)

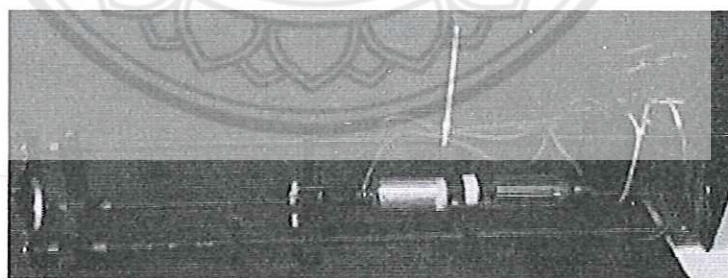
ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกลๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ

4. มีความเข้ม (Intensity หรือ Brightness)

สูงมากแสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่ซ้ำแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในเชิงความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุ ก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น (Laser Speckle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุ นั้นมีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่อย่าง random ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาค หรือผิวของวัตถุ และเกิดการแทรกสอดของลำแสง ทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้นจึงเป็นมิติของการมองเห็นโดยใช้ Laser displays แสงเลเซอร์กำลังต่ำๆ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ขนาด 1 mW ก็มีความเข้มสูงกว่าแสงอาทิตย์ ฉะนั้นถ้าฉายเข้าตามนุษย์โดยตรงแล้ว จะเป็นอันตรายต่อนัยน์ตาถึงตาบอดได้

2.3.2. ชนิดของแสงเลเซอร์^[7]

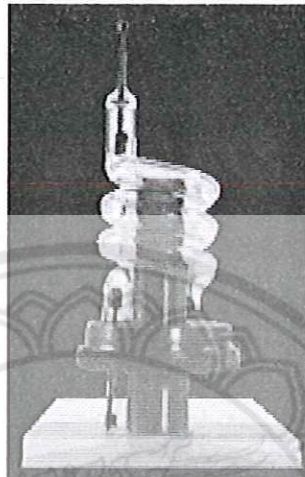
1. เลเซอร์ก๊าซ (Gas Laser) ประกอบด้วยก๊าซฮีเลียม (He) และนีออน (Ne) ในอัตรา ส่วนประมาณ 10:1 แหล่งกำเนิดพลังงานที่ กระตุ้นให้เกิดประชากรผกผัน (มักเรียกอีกชื่อว่า pumping source) ที่ใช้จะเป็น electrical discharge คือทำให้มีอิเล็กตรอนวิ่งผ่านและชนกับก๊าซที่บรรจุอยู่ในหลอดเลเซอร์แสงเลเซอร์ที่ได้จะเป็นสีแดง ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร หรือ (632.8×10^{-9} เมตร) และมีกำลังประมาณ 0.5 – 50 มิลลิวัตต์ ผู้สร้างสามารถเลือกการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมให้เกิดเป็นเลเซอร์สีเขียว และอินฟราเรด ได้แต่ไม่นิยม เพราะแสงดังกล่าวเกิดยากกว่า และต้องใช้ต้นทุนสูง ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 He-Ne Laser ก๊าซบรรจุอยู่ในหลอดแก้ว

2. เลเซอร์ชนิดของแข็ง (Solid State Laser) มีลักษณะที่สำคัญคือ ตัวกลางเลเซอร์ที่ใช้จะเป็นแท่งผลึกของฉนวน ซึ่งทำหน้าที่เป็น host และมีการ ฉาบ (dope) โครเมียม (เป็น impurity) เข้าไป ทำ

ให้บางครั้งนิยมเรียกว่า doped insulator laser และมีตัวอย่างเลเซอร์หลัก ๆ 2 ชนิดที่ใช้เทคนิคนี้ คือ เลเซอร์ทัปทิม และ Nd:YAG เลเซอร์ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เลเซอร์ทัปทิมเครื่องแรก

3. เลเซอร์ของเหลว (Dye Laser) ใช้ตัวกลางเลเซอร์ที่ทำจากของเหลวได้ เช่น ใช้สีย้อมผ้า (Dye) ผสมน้ำ หรือแอลกอฮอล์ บรรจุใส่ภาชนะใส การปั๊มพลังงานแก่ของเหลวเหล่านี้ ใช้วิธีทางแสง เช่นเดียวกับตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นของแข็ง เช่น ใช้หลอดซินอน หรือเลเซอร์ไนโตรเจน เลเซอร์ของเหลวเหล่านี้จะมีจุดเด่นที่สำคัญคือ เป็นเลเซอร์ที่ให้สีที่ตามองเห็น ค่าความยาวคลื่นของแสงสามารถปรับได้ จึงเป็น ทุเนเบิล เลเซอร์ (Tunable Laser) เพราะโมเลกุลของสีย้อมผ้ามีขนาดโต เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์เคมี ระดับพลังงานของโมเลกุลมีลักษณะเป็นขั้นพลังงานที่ซ้อนหลายชั้น มิได้เป็นขั้นเดี่ยวๆ เหมือนกรณีของก๊าซหรือของแข็ง

4. เลเซอร์ไดโอด (semiconductor Laser) มีเนียมอาร์เซไนด์ (In GaAsP (อินเดียม แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสฟายด์) ซึ่งมีค่าแถบพลังงานต่างๆ กัน จึงเป็นตัวกำหนดค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์เลเซอร์ไดโอดแต่ละชนิดจึงมีการใช้งานที่แตกต่างกันตามลักษณะ และคุณสมบัติของค่าความยาวคลื่นนั้นๆ เช่น เลเซอร์ไดโอดที่ให้สีแดง จะใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กจิ๋ว กินไฟน้อย สามารถผลิตได้จำนวนมากๆ ด้วย เทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำเลเซอร์ไดโอด ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่การใช้เป็นเลเซอร์ พอยน์เตอร์ (Laser Pointer) ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ใช้เป็นหัวอ่านของเครื่องคอมพิวเตอร์

เครื่องวัดโอเลเซอร์ดิสก์ และเครื่องถ่ายภาพเอกสารประเภทเลเซอร์ พรินเตอร์ (Laser Printer) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ศึกษาวิจัยการสร้างเลเซอร์ไดโอด ด้วยเทคโนโลยีด้านการปลูกผลึกจากของเหลว (Liquid Phase Epitaxy : LPE) และเทคโนโลยีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) เลเซอร์ไดโอดมีกำลังแสงต่ำตั้งแต่ระดับ ไมโครวัตต์ จนถึงวัตต์ (W) และเป็นเลเซอร์ที่มีจุดเด่นคือ สามารถโมดูลเลตสัญญาณได้โดยตรง โดยผ่านเข้าไปทางด้านกระแสไฟฟ้า ที่ฉีดผ่านตัวสิ่งประดิษฐ์ จึงสะดวกต่อการใช้งาน โดยเฉพาะการสื่อสารทางด้านแสง ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 laser pointer ซึ่งเป็นเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ²

²https://www.google.co.th/search?q=laser+pointer&espv=2&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj7drBjbTPAhUJro8KHcTDB8MQ_AUICCgB&biw=1366&bih=613#imgrc=LYx0O6Eu1LQILM%3A

2.4 เครื่อง vacuum coating^[8]

การเคลือบผิววัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการ ทั้งนี้การปรับปรุงคุณภาพผิววัสดุวิธีหนึ่ง คือ การเคลือบด้วยสารที่มีลักษณะเป็นชั้นเคลือบบางๆ ที่เรียกว่า "ฟิล์มบาง(thin film)" บนผิววัสดุ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการเคลือบผิวชิ้นงานส่วนใหญ่จะนิยมใช้วิธีทางเคมี เช่น การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) แต่การเคลือบวิธีนี้มีข้อเสียคือคุณภาพของผิวเคลือบต่ำอีกทั้งยังมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการเคลือบใหม่ทดแทน ได้แก่ "การเคลือบในสุญญากาศ (vacuum

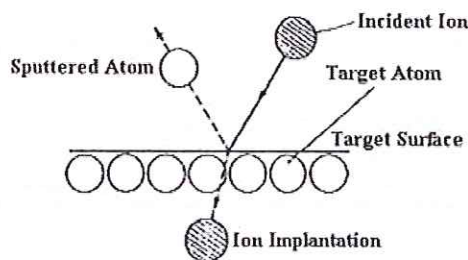
coating)” เนื่องจากการเคลือบนี้เกิดขึ้นเฉพาะในสุญญากาศและไม่ใช้สารเคมีที่จะทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในกระบวนการเคลือบ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เครื่อง vacuum coating

2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปัตเตอริง (Sputtering)^[9]

สปัตเตอริง (Sputtering) เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมบริเวณผิวหน้าของวัสดุของแข็งหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูงรูปที่ 2.11 อนุภาคที่ใช้เป็นตัวชนนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ แต่เนื่องจากในการทำอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงเพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งยังสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อนุภาคพลังสูงนี้จะถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มสารเคลือบตามต้องการซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการใช้อนุภาคลำแสงจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือผลิตได้จากการใช้กระบวนการปลดปล่อย (glow discharge) ซึ่งนำไปใช้ในการบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีดีซีแมกเนตรอนสปัตเตอริง (DC Magnetron Sputtering) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.13 การเกิดสเปตเตอริงที่ผิวเป้า

2.6 เทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสเปตเตอริง (DC Magnetron Sputtering)^[10]

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสเปตเตอริงเกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเปตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาภายหลังจากการชนของไอออนบวกที่ผิวเป้างั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเปตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้ามากขึ้นผลคือทำให้อัตราการสเปตเตอริงสูงขึ้น ทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะ บลทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสเปตเตอริง เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v_{\perp}$ ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้นซึ่งมีค่า

$$F = Bqv_{\perp} \quad (2.6)$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลมโดยที่

$$F_B = F_C \quad (2.7)$$

โดย F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่

จะได้

$$qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{r} \quad (2.8)$$

จะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

$$r = mv_{\perp}/Bq \quad (2.9)$$

โดยเรียกรัศมีของประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมว่ารัศมีไซโคลตรอน (cyclotron radius) หรือรัศมีลาร์มอร์ (larmor radius) โดยอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้ แต่สำหรับไอออนซึ่งมีมวลมากจะได้รับผลกระทบของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้น้อย

จาก $v = \omega r$ จะได้ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น

$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.10)$$

และเมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากข้อคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.11)$$

โดย e = ประจุของอิเล็กตรอน

m = มวลของอิเล็กตรอน

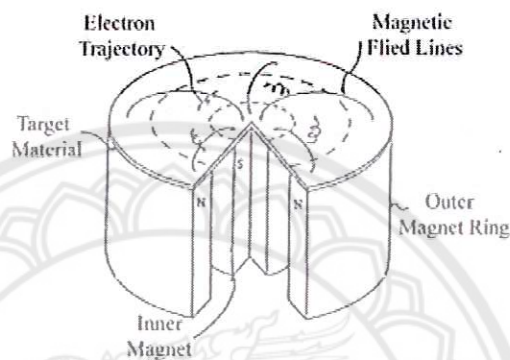
$\vec{v}$ = ความเร็วของอิเล็กตรอน

$\vec{E}$ = สนามไฟฟ้า

$\vec{B}$ = สนามแม่เหล็ก

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลื้อยลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ($\vec{E} \times \vec{B}$ drift path) ที่เกิดขึ้นและจุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมแบบเลื้อยลอยในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B ดังรูป 2.12 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของ

ก๊าซและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงซึ่งบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้อัตราการสเปกโตรัมมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้วิธีดีซีแมกเนตรอนสเปกโตรัมเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่เป็นวงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิเป้าในเส้นทางเคลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = |q|V \quad (2.12)$$

จะได้

$$v = \sqrt{\frac{2|q|V}{m}} \quad (2.13)$$

แทนค่า (2.13) ลงใน (2.9) จะได้

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{|q|}} \quad (2.14)$$

โดยจะได้รัศมีของอนุภาคที่เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ ในกรณีของอิเล็กตรอนจะได้

$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{V}}{B} \quad (2.15)$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสรจซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสรจเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไป

$$B_c = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mV_c}{e}} \quad (2.16)$$

โดย V_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายขั้วอิเล็กโทรด

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

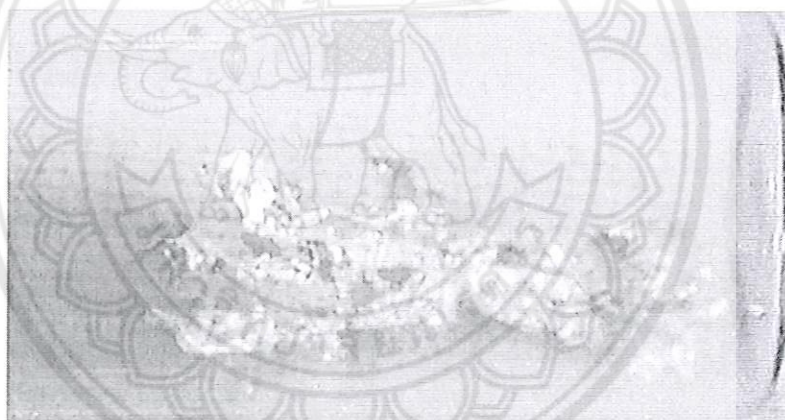
2.7 เงิน (silver)^[11]

เงินเป็นโลหะทรานซิชันสีขาวเงิน มีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมากในธรรมชาติอาจรวมอยู่ในแร่อื่นๆ หรืออยู่อิสระเงินใช้ประโยชน์ในการทำเหรียญ เครื่องประดับ ภาชนะบนโต๊ะอาหาร และอุตสาหกรรมการถ่ายรูป ดังรูปที่ 2.15

การนำไปใช้

1. เงินตรา
2. อัญมณีและเครื่องเงิน โดยโลหะเงินสามารถใช้ร่วมกับโลหะชนิดอื่น เพื่อประกอบเป็นเครื่องประดับอันสวยงาม เช่น ทองคำ ทองแดง เหล็ก ทองเหลือง นอกจากนี้ เครื่องเงินยังมีประโยชน์มากในด้านใช้สอย เช่น ช้อน ช้อน มีด เป็นต้น
3. การทำฟัน โดยใช้เงินผสมกับดีบุก และโลหะอื่นๆ เพื่อให้ได้ amalgams ที่ใช้สำหรับอุดฟัน การผสมของโลหะเงินเข้ากับโลหะอื่นนั้น จะช่วยให้ amalgams สามารถปรับตัวรับเข้ากับรูของฟันที่ต้องการอุดได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังจับตัวแข็งภายในเวลาไม่กี่นาที
4. การถ่ายภาพและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การถ่ายภาพจะใช้เงินในรูปแบบของไลต์ในเตรตและ สีเงิน อีกทั้งผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าบางชนิดก็มีโลหะเงินเป็นส่วนประกอบสำคัญ เช่น สายเคเบิล สายลำโพง นาฬิกา ก็ยังใช้แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์ เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นต้น

5. เลนส์และกระจก กระจกที่ต้องการการสะท้อนเหนือกว่าธรรมดา ส่วนใหญ่ทำมาจากเงิน ในขณะที่กระจกทั่วไปส่วนใหญ่ทำจากอะลูมิเนียม
6. ใช้ในอุตสาหกรรมและการพาณิชย์ โลหะเงินใช้สำหรับสร้างสิ่งที่มีคุณภาพสูง เครื่องดนตรีประเภทเป่าลมต่าง ๆ และเงินที่ใช้ในการทำอัลลอยด์บัดกรีและประสาน
7. ด้านการแพทย์ เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์การแพทย์ต่าง ๆ อาจถูกใช้เพื่อรักษาโรคติดเชื้อภายนอก เงินยังใช้ในการใช้งานทางการแพทย์บางอย่าง เช่น สายสวนปัสสาวะ และท่อช่วยหายใจ เป็นต้น
8. เสื้อผ้า เงินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราบนเสื้อผ้า เช่น ถุงเท้า เสื้อกีฬา เพื่อลดกลิ่นอับไม่พึงประสงค์และความเสี่ยงของการติดเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา ที่รวมอยู่ในเสื้อผ้าหรือรองเท้า โดยใช้อนุภาคซิลเวอร์นาโนในพอลิเมอร์จากเส้นด้ายเคลือบด้วยเงิน



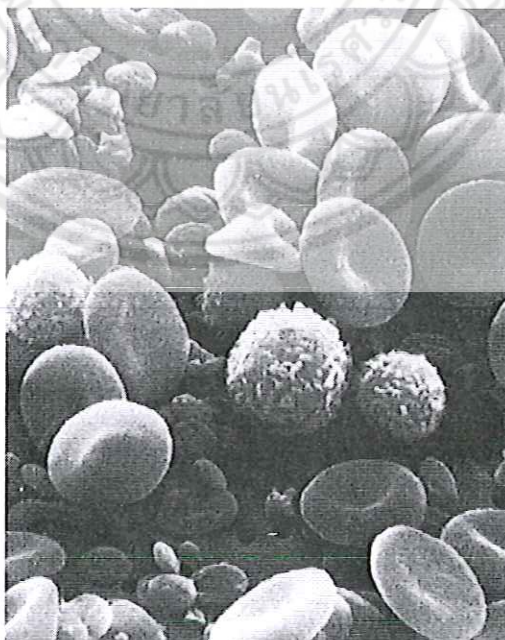
รูปที่ 2.15 เงิน

2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)^[12]

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุทำให้ได้ภาพซึ่งมี ลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ กำลังขยาย 20-800,000 เท่า มีเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectrometer: EDS) สามารถศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุหรือสารมลทินบนพื้นผิว ของวัสดุที่นำมาศึกษาได้ เครื่องนี้สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ boron (B) ถึง uranium (U) โดยการวิเคราะห์สามารถแสดงผลเป็นชนิดและปริมาณของธาตุรวมถึงสามารถทำ map และ line scan (เฉพาะที่ติดตั้งกับ

SEM เท่านั้น) ได้อีกด้วยซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงและพัฒนางานวิจัยงานในกระบวนการผลิตงานวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุงานแก้ไขปัญหาอุตสาหกรรมและงานควบคุมคุณภาพของวัสดุได้เป็นอย่างดี

หลักการทำงานของเครื่อง SEM^[13] จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2.16 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

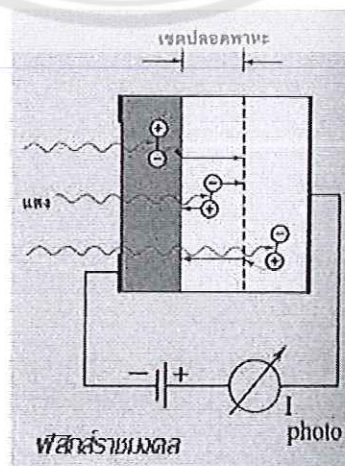
ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก



รูปที่ 2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.9 หัววัดแสงโฟโตไดโอด^[14]

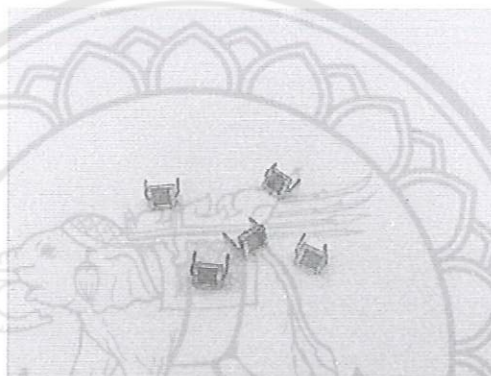
1. โฟโตไดโอด คือ สิ่งประดิษฐ์รับแสงที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ จะเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เมื่อแสงตกกระทบบนอิเล็กตรอนที่ยึดติดอยู่กับอะตอมในขั้วผลึกจะแตกหลุด เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และโฮลอิสระขึ้น อิเล็กตรอนและโฮลเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้าไปในเขตปลอดพาหะเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าย้อนด้วยปริมาณที่แปรเปลี่ยนตามความเข้มแสง เรียกว่า กระแสโฟโต ดังรูปที่ 2.18 และ 2.19



รูปที่ 2.18 วงจรโฟโตไดโอด

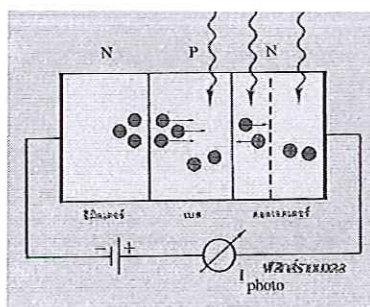
โฟโตไดโอดใช้ประโยชน์ในงาน

- วัดความเข้มแสง
- ชัตเตอร์แสง
- กำหนดตำแหน่งของเครื่องมือกล
- การวัดระยะทางไกลด้วยแสงอินฟราเรด
- ตรวจจับสัญญาณแสงที่มีความถี่สูง



รูปที่ 2.19 โฟโตไดโอด

2.โฟโตทรานซิสเตอร์ คือ โฟโตไดโอดที่มีการขยายสัญญาณ โดยใช้หัวต่อ PN ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเบส และคอลเลคเตอร์เป็นที่ยับแสงกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นจะไหลไปอีมิเตอร์ เนื่องด้วยปรากฏการณ์ทรานซิสเตอร์ กระแสอีมิเตอร์จะมีขนาดเป็นประมาณ 500 เท่าของ กระแสโฟโตที่เกิดขึ้นในตอนแรกเมื่อถูกแสง ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรโฟโตทรานซิสเตอร์

ไฟโตทรานซิสเตอร์ใช้ประโยชน์ในงาน

- เครื่องควบคุมแสง
- ตรวจสอบแผ่นการ์ดหรือเทปเจาะรู
- ตัวเชื่อมแสงกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2.10 เครื่องวัดมัลติมิเตอร์ (Multimeters)^[15]

มัลติมิเตอร์ (Multimeters) คือ เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่สามารถวัดปริมาณไฟฟ้าได้หลายปริมาณ แต่ วัดได้ทีละปริมาณ โดยสามารถตั้งเป็นโวลท์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ หรือ โอห์มมิเตอร์และเลือกไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หรือไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ได้มัลติมิเตอร์บางชนิดมีคุณสมบัติการวัดเพิ่มเติม เช่น วัดค่าความจุ วัด ความถี่และทดสอบทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

การแสดงผลของมัลติมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ มัลติมิเตอร์แบบเข็ม (Analog Multimeters) กับ มัลติมิเตอร์แบบตัวเลข (Digital Multimeters) เพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองเรื่องนั้นๆ ซึ่งมัลติมิเตอร์ แต่ละเครื่องจะมีรายละเอียดปลีกย่อยและข้อควรระมัดระวังในการใช้งานแตกต่างกัน

1. มัลติมิเตอร์แบบเข็ม (Analog Multimeters)^[16] เป็นเครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้าหลายประเภทรวมอยู่ในเครื่องเดียวกัน โดยทั่วไปแล้วมัลติมิเตอร์จะสามารถใช้วัดปริมาณต่อไปนี้

การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง

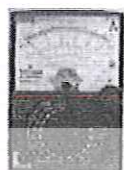
ปรับมัลติมิเตอร์ให้เป็นโวลท์มิเตอร์ก่อน โดยหมุนสวิตช์บนตัวมิเตอร์ ไปที่ตำแหน่งช่วงการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (DCV) ซึ่งมี 7 ช่วงการวัดคือ 0-0.1V, 0-0.5V, 0.2.5V, 0-10V, 0-50V, 0-250V, 0-1000V

การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ

ปรับมัลติมิเตอร์ให้เป็นโวลท์มิเตอร์กระแสสลับ โดยหมุนสวิตช์บนตัวมิเตอร์ ไปที่ตำแหน่งช่วงการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (ACV) ซึ่งมี 4 ช่วงการวัดคือ 0-10V, 0-50V, 0- 250V, 0-1000V จากนั้นเลือกช่วงการวัดให้เหมาะสม สำหรับการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ เรา สามารถต่อโดยให้สายวัดเส้นใดอยู่ข้างใดก็ได้แต่วิธีวัดค่ายังใช้หลักการเดียวกันกับโวลต์มิเตอร์กระแสตรง

การวัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง

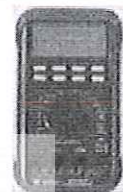
ปรับมัลติมิเตอร์ให้เป็นแอมมิเตอร์ก่อน โดยหมุนสวิตช์บนตัวมิเตอร์ ไปที่ตำแหน่งช่วงการวัดกระแส ไฟฟ้ากระแสตรง (DCA) ที่มี 4 ช่วงการวัดคือ 0-50 μ A, 0-2.5mA, 0-25mA, 0-0.25A ดังรูปที่ 2.21



Analog Multimeter



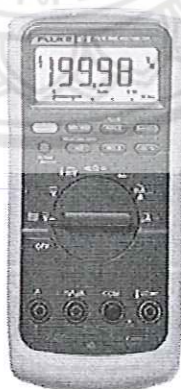
Analog Multimeter



Digital Multimeter

รูปที่ 2.21 มัลติมิเตอร์แบบเข็ม

2. มัลติมิเตอร์แบบตัวเลข (Digital Multimeters)^[17] เป็นมัลติมิเตอร์อีกแบบหนึ่ง ซึ่งแสดงผลเป็นตัวเลข ดังนั้นจึงง่ายต่อการนำไปใช้ แต่ถ้าทำการวัดหรือต่อผิดก็อาจทำให้เครื่องชำรุดหรือเสียหายง่ายกว่ามัลติมิเตอร์แบบเข็ม ดังนั้นการนำ Digital multimeter มาใช้งานจึงต้องมีความระมัดระวังสูงขึ้น การนำมัลติมิเตอร์ไปวัดค่าความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าใช้หลักการวัดเดียวกันกับมัลติมิเตอร์แบบเข็ม SUNWA หรือหลักการใช้แอมมิเตอร์และโวลท์มิเตอร์ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 มัลติมิเตอร์แบบตัวเลข³

³<https://www.google.co.th/search?q=%E0%B8%E0%=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewjv6JKNm4fQ=1366&bih=662#imgsrc=FjEnol8wr2EQwM%3A>



สำนักหอสมุด

- 3 ก.พ. 2563

1029679

ว ๐๐
176
จ.สงขลา
อ.ทูล
2560

ส่วนประกอบที่สำคัญของมัลติมิเตอร์แบบตัวเลข

1. จอแสดงผล (display)
2. สวิตช์เปิด-ปิด (ON-OFF)
3. สวิตช์เลือกปริมาณที่จะวัดและช่วงการวัด (range selector switch) สามารถเลือกการวัดได้ 8 อย่าง ดังนี้

1. DCV สำหรับการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง มี 5 ช่วงการวัด
 2. ACV สำหรับการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ มี 5 ช่วงการวัด
 3. DCA สำหรับการวัดปริมาณกระแสตรง มี 3 ช่วงการวัด
 4. ACA สำหรับการวัดปริมาณกระแสสลับ มี 2 ช่วงการวัด
 5. Ω สำหรับการวัดความต้านทาน มี 6 ช่วงการวัด
 6. CX สำหรับการวัดความจุไฟฟ้า มี 5 ช่วงการวัด
 7. h_{FE} สำหรับการวัดการขยายกระแสตรงของทรานซิสเตอร์
 8. $\rightarrow$ สำหรับการตรวจสอบไดโอด
4. ช่องเสียบสายวัดร่วม : (COM) ใช้เป็นช่องเสียบร่วมสำหรับการวัดทั้งหมด (ยกเว้นการวัด CX และ h_{FE} ไม่ต้องใช้สายวัด)
5. ช่องเสียบสายวัด mA สำหรับการวัด DCA และ ACA ที่มีขนาด 0-200 mA
 6. ช่องเสียบสายวัด 10A สำหรับการวัด DCA และ ACA ที่มีขนาด 200 mA-10A
 7. ช่องเสียบสำหรับการวัดการขยายกระแสตรงของทรานซิสเตอร์
 8. ช่องเสียบสำหรับการวัดความจุไฟฟ้า
 9. ช่องเสียบสายวัด V Ω
- ลักษณะเฉพาะบางประการของเครื่องวัด

1. จอแสดงผล (display) แสดงด้วยตัวเลข $3\frac{1}{2}$ หลัก ($3\frac{1}{2}$ digit) เนื่องจากค่าสูงสุดที่สามารถแสดงได้คือ 1999 ตัวเลขหลักที่ 1, 2 และ 3 (นับจากขวาสุดไปทางซ้าย) แปรค่าได้จาก 0 ถึง 9 (เรียกว่า full digit) ส่วนตัวเลขหลักที่ 4 จะแสดงตัวเลขได้เฉพาะ 1 เท่านั้น (เรียกว่า half digit)
2. สภาพขั้ว (polarity) ในการวัดปริมาณทางไฟฟ้าบางชนิดเช่นความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเครื่องวัดที่ใช้เข็มชี้เป็นตัวแสดงผล เมื่อต่อสายวัดผิดขั้ว เข็มของเครื่องวัดจะตีกลับในทิศตรงข้ามในสถานะเช่นนี้สำหรับมัลติมิเตอร์แบบตัวเลขจะปรากฏเครื่องหมาย - บนจอแสดงผล

3. ในการวัดปริมาณใด ๆ ที่ตั้งช่วงการวัดต่ำกว่าค่าที่จะวัด จอแสดงผลจะแสดงตัวเลข 1 หรือ -1 เช่น จะวัดความต้านทาน 10 k Ω แต่ตั้งช่วงการวัดไว้ที่ 0-2 k Ω จะปรากฏ 1 แสดงว่าค่าที่จะวัดสูงกว่าช่วงการวัดที่ตั้งไว้
4. เมื่อแหล่งจ่ายกำลังให้เครื่องวัด คือ แบตเตอรี่ 9V อ่อนกำลัง LO BAT จะปรากฏบนจอเตือนให้ผู้ใช้เปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่

2.11 กระดาษ (glass)^[18]

กระดาษเป็นวัสดุที่ใช้ตกแต่งภายในอาคารเพื่อความสวยงามและเพิ่มความสว่างไสวให้กับอาคารบ้านเรือนใช้กับอุตสาหกรรมยานยนต์และมีการใช้งานทั่วไปอย่างกว้างขวางวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษประมาณ 80% ได้มาจากแหล่งผลิตในประเทศได้แก่ หินทรายแก้ว (silica sand) หินฟันม้า หินโดโลไมต์ (dolomite) เศษกระดาษ (cullets) และวัตถุดิบที่นำเข้าจาก ต่างประเทศ ได้แก่ โซดาแอช ผงคาร์บอน ผงเหล็ก โซเดียมซัลเฟต

กรรมวิธีการผลิตกระดาษจะเริ่มผลิตโดยการนำวัตถุดิบซึ่งได้แก่ หินทรายแก้ว หินฟันม้า หินโดโลไมต์ เศษกระดาษ โซดาแอช หินปูน และโซเดียมซัลเฟตมาผสมเข้าด้วยกันตามอัตราส่วนที่ได้กำหนดไว้ แล้วนำส่วนผสมที่ได้นั้นไปใส่ในเตา ที่มีอุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส จนวัสดุต่างๆ เกิดการหลอมละลายจนได้น้ำแก้ว (เชื้อเพลิงได้แก่ น้ำมันเตาซึ่งใช้แทนถ่านหิน) หลังจากนั้นจะปรับอุณหภูมิของน้ำแก้วให้เหลือประมาณ 1,100 องศาเซลเซียสจนมีความหนืดพอเหมาะต่อการขึ้นรูปน้ำแก้วจะถูกนำไปผ่านกระบวนการที่ทำให้เป็นแผ่นโดยวิธีการปล่อยให้ไหลลงไปฟอร์มตัวเป็นแผ่นกระดาษบนผิวตีบอกแหลมกรรมวิธีนี้จะได้แผ่นกระดาษที่เรียกว่ากระดาษโฟลตมีคุณสมบัติดีกว่าแผ่นกระดาษที่ผลิตโดยระบบอื่นๆ คือผิวของแผ่นกระดาษจะเรียบไม่เป็นคลื่นมีความหนาสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นผิวสุกใสแวววาวไม่ขุ่นมัวการผลิตกระดาษแผ่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคืออุตสาหกรรมกระดาษแผ่น และ อุตสาหกรรมกระดาษต่อเนื่อง

1. อุตสาหกรรมกระดาษแผ่น เป็นอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษพื้นฐานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่

1.1 กระดาษโฟลต (float glass) ได้มาจากกระบวนการผลิตที่เรียกว่า กระบวนการโฟลต (float process) เป็นกระดาษที่มีคุณภาพดีเยี่ยม มีผิวทั้งสองด้านเรียบสนิท เป็นกระดาษที่มีความโปร่งใส มีคุณภาพสูง ทนทานต่อการขีดขีดเป็นรอยได้ดี มีความหนาประมาณ 2 ถึง 19 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่

ใช้งานกับประตู หน้าต่างอาคาร ตู้แสดงสินค้า ใช้กับการก่อสร้างที่ต้องการผนังเป็นกระจกขนาดใหญ่

1.2 กระจกชิต (sheet glass) เป็นกระจกที่มีคุณภาพด้อยกว่ากระจกโฟลตเล็กน้อยเป็นกระจกแผ่นเรียบ ใช้งานกับหน้าต่างของที่อยู่อาศัย อาคาร กรอบรูป ผลิตภัณฑ์กระจกชิตสามารถแบ่งออกเป็นกระจกใส กระจกสี กระจกฝ้า (เป็นกระจกชิตที่นำมาขัดฝ้าที่ผิวใช้เป็นฝักันห้องหรือประตู) และกระจกดอกกลดลายที่มีลวดลายพิมพ์ลงด้านหนึ่งด้านใดของกระจก สามารถมองผ่านได้สลัว ๆ มีคุณสมบัติกึ่งทึบกึ่งใส เหมาะกับงานตกแต่งภายใน เช่น โคมไฟ บานประตู หน้าต่าง และภายนอกอาคาร

2. อุตสาหกรรมกระจกต่อเนื่องเป็นการนำกระจกโฟลตและกระจกชิตมาแปรรูป เพื่อประโยชน์ใช้สอยตามคุณสมบัติและลักษณะงานที่แตกต่างกันได้แก่

2.1 กระจกเงา (mirror glass) ได้จากการฉาบโลหะเงินลงไปทีด้านใดด้านหนึ่งของกระจกโฟลตชนิดใสหรือกระจกโฟลตสีตัดแสง แล้วนำมาเคลือบด้วยสารโลหะทองแดงเป็นการป้องกันโลหะเงินอีกชั้นหนึ่ง และเพื่อความทนทานในการใช้งาน และเคลือบทับด้วยสีที่มีคุณภาพและมีความหนาที่เหมาะสม สีที่เคลือบแต่ละชั้นจะผ่านการอบแห้งด้วยความร้อนสูงทำให้การยึดติดกันระหว่างชั้นต่าง ๆ ดีขึ้น

2.2 กระจกสะท้อนแสง (heat reflection glass) ได้จากการนำกระจกแผ่นใสมาเคลือบด้วยออกไซด์ของโลหะ ขนาดความหนาของการเคลือบขึ้นอยู่กับระดับความเข้มของแสงที่ส่องผ่าน กระจกสะท้อนแสงมีคุณสมบัติด้านการสะท้อนแสงได้ดี เมื่อมองจากภายนอก อาคารจะคล้ายกระจกเงา หากมองจากภายในอาคารจะคล้ายกระจกเงา หากมองจากภายในอาคารจะคล้ายกระจกสีตัดแสง ดังรูปที่ 2.23

2.3 กระจกนิรภัยเทมเปอร์ด (architectural flat tempered safety glass) ได้จากการนำกระจกแผ่นธรรมดาตามาเผาที่มีอุณหภูมิ 650 ถึง 700 องศาเซลเซียส แล้วใช้ลมเป่าทั้งสองด้านเพื่อให้กระจกเย็นลงอย่างรวดเร็วทำให้ผิวของกระจกจะอยู่ในสภาพแรงอัด ขณะที่ภายในของกระจกอยู่ในสภาวะแรงดึง ด้วยผิวที่อยู่ในสภาวะแรงอัด เมื่อกระจกถูกกระแทกหรือทุบจนแตก แผ่นกระจกจะแตกละเอียดเป็นเม็ดเล็กๆ ที่ไม่มีคมมีความแข็งแรงกว่ากระจกธรรมดา 2 ถึง 3 เท่า นิยมใช้งานกับยานพาหนะหรือส่วนของอาคารที่ง่ายต่อการถูกกระแทก

2.4 กระจกนิรภัยหลายชั้น (architectural flat laminaty safeted glass) เป็นกระจกที่เพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้มากขึ้น มีขั้นตอนการผลิตดังนี้

ก. การเตรียมกระจก โดยการคัดเลือกกระจกที่มีคุณสมบัติดี และไม่มีตำหนิ เลือกความหนา ความกว้าง และความยาว แล้วตัดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

ข. การทำความสะอาด ขั้นตอนนี้จะต้องใช้เครื่องล้าง ซึ่งต้องใช้น้ำสะอาดล้าง ชัดและเป่ากระจกให้แห้ง

ค. การเข้าประกอบวัสดุคั่นกลาง โดยการนำฟิล์มโพลีไวนิลบิวไทเรล (polyvinyl butyral) ที่มีคุณสมบัติเหนียวและแข็งแรงมาปิดทับหน้ากระจกที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว และนำกระจกอีกแผ่นมาประกบลงบนกระจกแผ่นแรก ดึงฟิล์มให้ตึงและประกอบกระจกให้ขอบเสมอกันทุกด้านแล้วตัดฟิล์มส่วนเกินทิ้ง

ง. การอัดประกบ กระจกที่ประกอบกับวัสดุคั่นกลางแล้ว จะถูกอัดประกบโดยใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิ 120 ถึง 130 องศาเซลเซียส แล้วใช้ลูกกลิ้งรีดกระจกทั้งสองแผ่นให้ติดสนิทกัน

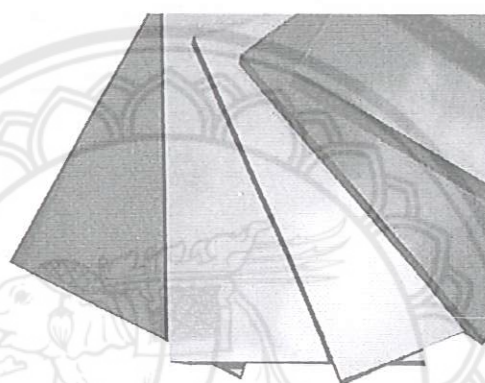
จ. การอบกระจกที่อัดประกบแล้วจะเป็นกระจกกึ่งสำเร็จรูป คือเนื้อฟิล์มจะใสขึ้นแต่ยังไม่ใสมาก จึงต้องนำเข้าเตาอบใหญ่อีกครั้งหนึ่งเตาอบใหญ่เป็นเตาอบซึ่งอบกระจกโดยควบคุมความร้อนและความดันจนได้กระจกที่ใสมากจนไม่สามารถมองเห็นแผ่นฟิล์มได้

กระจกนิรภัยหลายชั้นมีคุณสมบัติป้องกันขโมยอย่างได้ผล เพราะยากแก่การเจาะผ่าน และเมื่อเกิดการกระแทกหรือชนอย่างรุนแรง ชิ้นส่วนที่แตกจะไม่หลุดออกจากกัน ยังคงสภาพเดิม เพียงแต่มีรอยร้าวเกิดขึ้น

2.5 กระจกฉนวน (sealed insulating glass) เป็นกระจก 2 แผ่นหรือมากกว่าวางคู่ขนานกัน มีระยะห่างพอสมควร ขอบกระจกทุกด้านมีสารจำพวกการบรรจุอยู่เพื่อให้กระจกคงรูป และป้องกันอากาศชื้นจากภายนอกที่จะเข้ามาในช่องว่างระหว่างแผ่นกระจก มีประสิทธิภาพมากกว่ากระจกธรรมดา 2 เท่า มีคุณสมบัติสามารถลดปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านกระจก ลดระดับเสียงที่ผ่านผนังอาคารลง เหมาะสำหรับห้องสมุด พิพิธภัณฑ์ ห้องคอมพิวเตอร์

2.6 กระจกเสริมลวด (wired glass) เป็นกระจกที่มีเส้นลวดแผงตาข่ายลวดฝังภายในกระจก จัดเป็นกระจกนิรภัยชนิดหนึ่ง เมื่อแตก เส้นลวดจะช่วยยึดเศษกระจกไม่ให้หลุดลงมา ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ มี 2 ชนิดคือ กระจกชนิดซุ่น (โปร่งแสง) และชนิดใส (โปร่งใส)

2.7 กระจกกันกระสุน เป็นกระจกที่ผลิตโดยการนำกระจกนิรภัยชนิดพิเศษมาติดกับกระจกนิรภัยหลายชั้น โดยมีแผ่นฟิล์มพลาสติกชั้นกลาง (ได้แก่ โพลีคาร์บอเนต โพลีไวนิลไทรอัล)



รูปที่ 2.23 กระจกสะท้อนแสง

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tomas Tamulevicius, Asta Tamuleviciene, Dainius Virganavicius, Andrius Vasiliauskas, Vitoldas Kopustinskas, Sarunas Meskinis, Sigitas Tamulevicius (2014) ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางที่มีสารประกอบระดับนาโนของ DLC : Ag โดยใช้พลาสมาที่กัดกร่อนและไอออนสปัตเตอร์^[19] มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ photoresist และ aluminum mask โดยการฉายแสงผ่านกระบวนการกัดกร่อนด้วยพลาสมาเคมีหรือกระบวนการไอออน สปัตเตอร์ สามารถผลิตเป็น grating โดยใช้กระบวนการ magnetron sputtering ด้วย Ag Target ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอโดยก๊าซผสม C_2H_2/Ar โครงสร้างจะถูกดำเนินการโดยใช้กระบวนการ PCE โดยก๊าซผสม CF_4/O_2 , กระบวนการ IS และกระบวนการการรวมกัน PCE + IS ขณะปลูกฟิล์มและสัมผัสกับสารเคลือบผิวของ พลาสมาเคมีจะแสดงลักษณะเฉพาะตัวโดยวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), หาองค์ประกอบทางเคมีโดยวัดปริมาณ x-ray ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง EDS , วิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยเครื่อง FTIR และตรวจวัด

ปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วง รังสี UV และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านด้วยเครื่อง UV-VIS หลังจากปลูกฟิล์ม DLC:Ag แล้ว จะฉายแสงให้ PhR mask / Al mask มาเคลือบทับลงบน ฟิล์ม DLC:Ag และ remove PhR mask / Al mask ด้วย สารขจัด Photoresist mr-Ram 660 และในกระบวนการต่างๆจะแสดงให้เห็นว่า จะได้ลักษณะทางกายภาพของ grating ที่แตกต่างกัน พบว่า การใช้ photoresist และ aluminum mask โดยการฉายแสงผ่านกระบวนการกัดกร่อนด้วยพลาสมาเคมีหรือกระบวนการไอออน สเป็คเตอริง สามารถผลิตเป็น grating ได้

อมรรัตน์ ทาเกิด (2015) การประดิษฐ์และวิเคราะห์สมบัติทางแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางทองแดงด้วยวิธีสเป็คเตอริง^[20] มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางทองแดงโดยใช้วิธีสเป็คเตอริง โดยเคลือบฟิล์มบางทองแดงบนกระจกด้วยวิธีสเป็คเตอริงที่ความหนา 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 และ 200 นาโนเมตร จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเลเซอร์ทั้งหมด 4 ความยาวคลื่นคือ 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร พบว่ากระจกเคลือบฟิล์มบางทองแดงนั้นมีสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันตามต้นกำเนิดแสงที่ต่างกัน

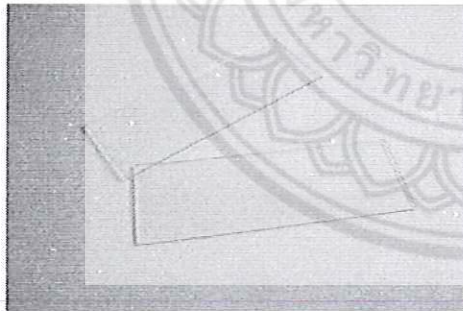
บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

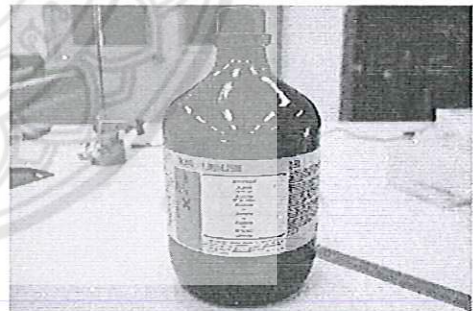
งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางเงินบนกระจกด้วยวิธีสปัตเตอริงที่ความหนาต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและศึกษาสมบัติการสะท้อนและการส่งผ่านของต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่นเฉพาะค่าที่มุมตกกระทบต่างๆ ด้วยเลเซอร์ความยาวคลื่น 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร

3.1 เคลือบฟิล์มบางเงินบนกระจกด้วยวิธีสปัตเตอริง

3.1.1 การเตรียมกระจกสไลด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) คัดเลือกกระจกสไลด์ที่ไม่มีรอยขีดข่วน ไม่มีรอยแตกหรือร้าว จากนั้นนำกระจกสไลด์ที่เลือกไว้มาเช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) โดยเช็ดด้วยผ้าเช็ดเลนส์หรือกระดาษทิชชูไร้ขนให้สะอาด หลังจากนั้นนำมาห่อด้วยอะลูมิเนียมฟอยเพื่อเก็บไว้ใช้ในการเคลือบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 (ก) กระจกสไลด์ (ข) อะซิโตน

3.1.2 เคลือบฟิล์มบางเงินบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีสปัตเตอริงโดยเคลือบด้วยเครื่อง Vacuum coating รุ่น EDWARD 603 sputtering magnetron ที่ตั้งอยู่ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ที่ความหนาทั้งหมด 10 นาโนเมตร คือ กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 10 นาโนเมตร, กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 20 นาโนเมตร, กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 30 นาโนเมตร,

กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 40 นาโนเมตร, กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 50 นาโนเมตร, กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 60 นาโนเมตร, กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 70 นาโนเมตร, กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 80 นาโนเมตร, กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 90 นาโนเมตร, กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 100 นาโนเมตร และอีก 1 ชนิด คือกระจกที่ไม่เคลือบฟิล์มบางเงินเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในการวิเคราะห์สมบัติการสะท้อนและการส่งผ่านของแสง



รูปที่ 3.2 เครื่อง Vacuum coating รุ่น EDWARD 603
sputtering magnetron

3.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

1. นำกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินมาตัดขนาด 1×1 เซนติเมตร
2. นำกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า
3. บันทึกและสรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

3.3 วิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านและการสะท้อน

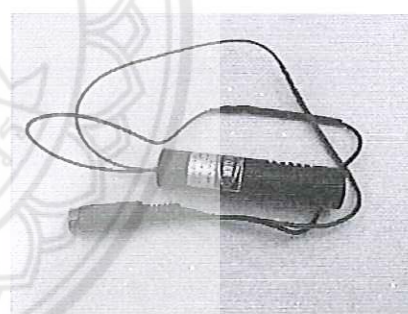
วิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา และวิเคราะห์สมบัติการสะท้อนที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา จากต้นกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร ของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินทั้งหมด 9 ความหนา

3.3.1 ต้นกำเนิดแสง

เลเซอร์ไดโอดในที่นี้นำเลเซอร์มาใช้ทั้งหมด 4 ความยาวคลื่นได้แก่ เลเซอร์สีม่วงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร เลเซอร์สีเขียวความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เลเซอร์สีแดงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร และเลเซอร์อินฟราเรดความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปภาพที่ 3.3 ก, ข, ค, และ ง ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)



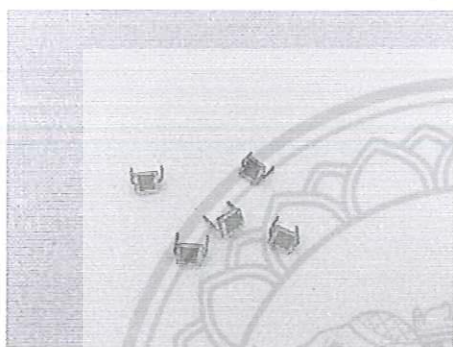
(ง)

รูปที่ 3.3 เลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์อินฟราเรดความยาวคลื่น

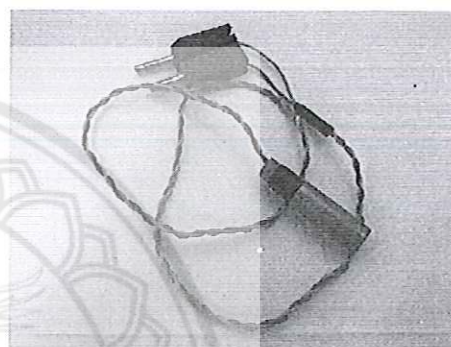
(ก) 405 nm (ข) 532 nm (ค) 650 nm (ง) 780 nm

3.3.2 หัววัดแสง

นำหัววัดแสงโฟโตไดโอด ดังแสดงในรูป 3.4 (ก) ที่ครอบด้วยแท่งโลหะทรงกระบอกและเชื่อมต่อกับสายไฟเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกและนำมาเชื่อมกับมัลติมิเตอร์เพื่อที่จะให้หัววัดแสงโฟโตไดโอดอ่านค่าความเข้มแสงการส่งผ่านและการสะท้อนจากต้นกำเนิดแสงเท่านั้นเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนจากหัววัดแสงที่ได้รับค่าจากแสงภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข)



(ก)

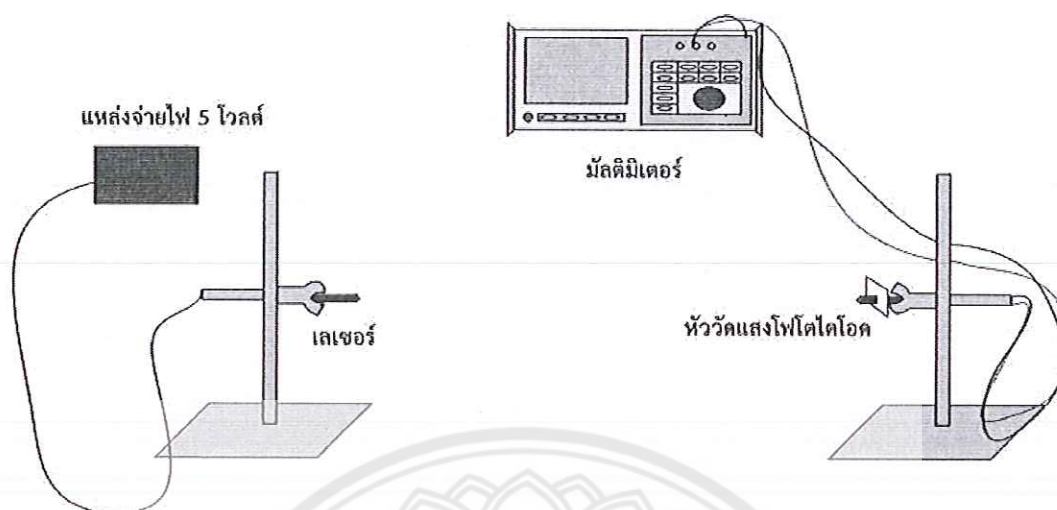


(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) หัววัดแสงโฟโตไดโอด (ข) แท่งโลหะทรงกระบอกครอบหัววัดโฟโตไดโอด

3.3.3 การจัดตั้งระบบ

1. ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบชุดการจัดตั้งระบบเพื่อวิเคราะห์และวัดค่าสมบัติการส่งผ่านและการสะท้อนของแสงที่มุมตกกระทบต่างๆ โดยใช้ต้นกำเนิดแสงเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟขนาด 5 โวลต์เพื่อให้ต้นกำเนิดแสงมีความนิ่งของแสงที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดแสงนั้นเข้าหัววัดแสงโฟโตไดโอดที่ต่อกับมัลติมิเตอร์ที่ปรับเป็นไมโครแอมแปร์เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 3.5 แสดงชุดการจัดตั้งระบบการวิเคราะห์ความเข้มแสงส่องผ่าน และการสะท้อนของแสงโดยยิงต้นกำเนิดแสงเข้าตัดวัดโดยตรง

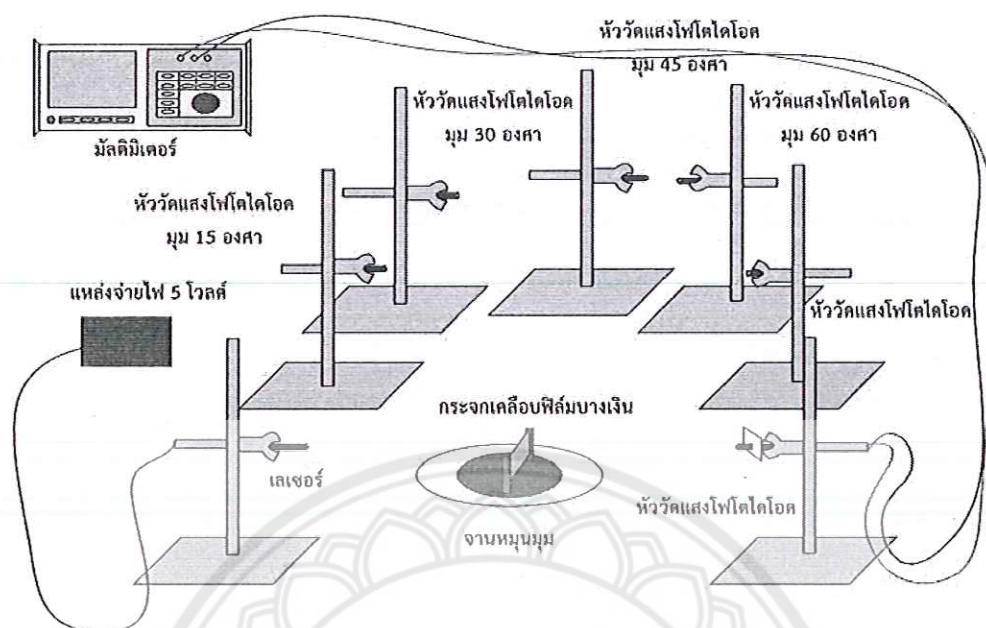
2. ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบชุดการจัดตั้งระบบเพื่อวิเคราะห์และวัดค่าสมบัติการส่องผ่านที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา และวัดค่าสมบัติการสะท้อนที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยนำกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินที่ยึดติดกับจานหมุนหมุนต่างๆมาวางกั้นระหว่างต้นกำเนิดแสงที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ กับหัววัดแสงที่เชื่อมกับมัลติมิเตอร์ที่ปรับเป็น ไมโครแอมแปร์ หลังจากนั้นทำการวัดค่าการส่องผ่านและการสะท้อนของแสงโดยปรับมุมเป็น 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศาจนครบทุกๆความหนา ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และมีการจัดตั้งระบบเพื่อวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านและการสะท้อนของแสงในชุดการจัดตั้งระบบจริงดังที่แสดงในรูปที่ 3.7

บทที่ 4

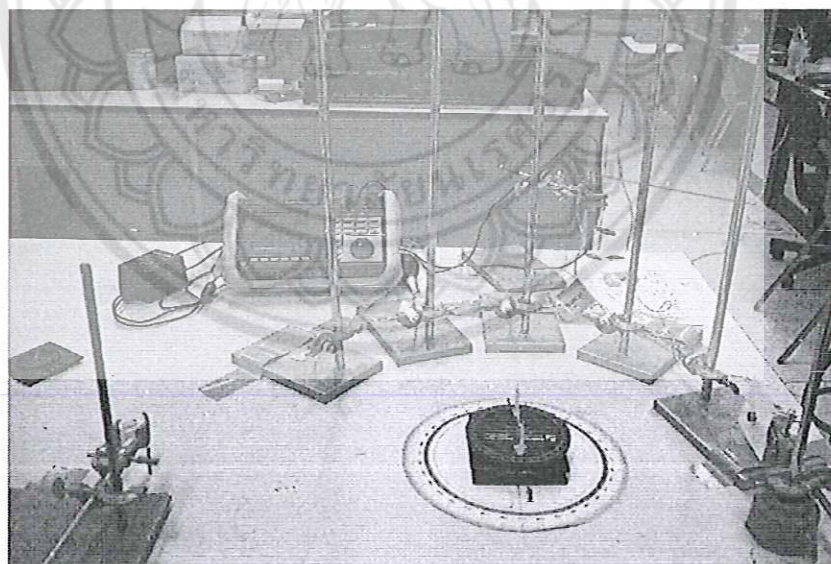
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

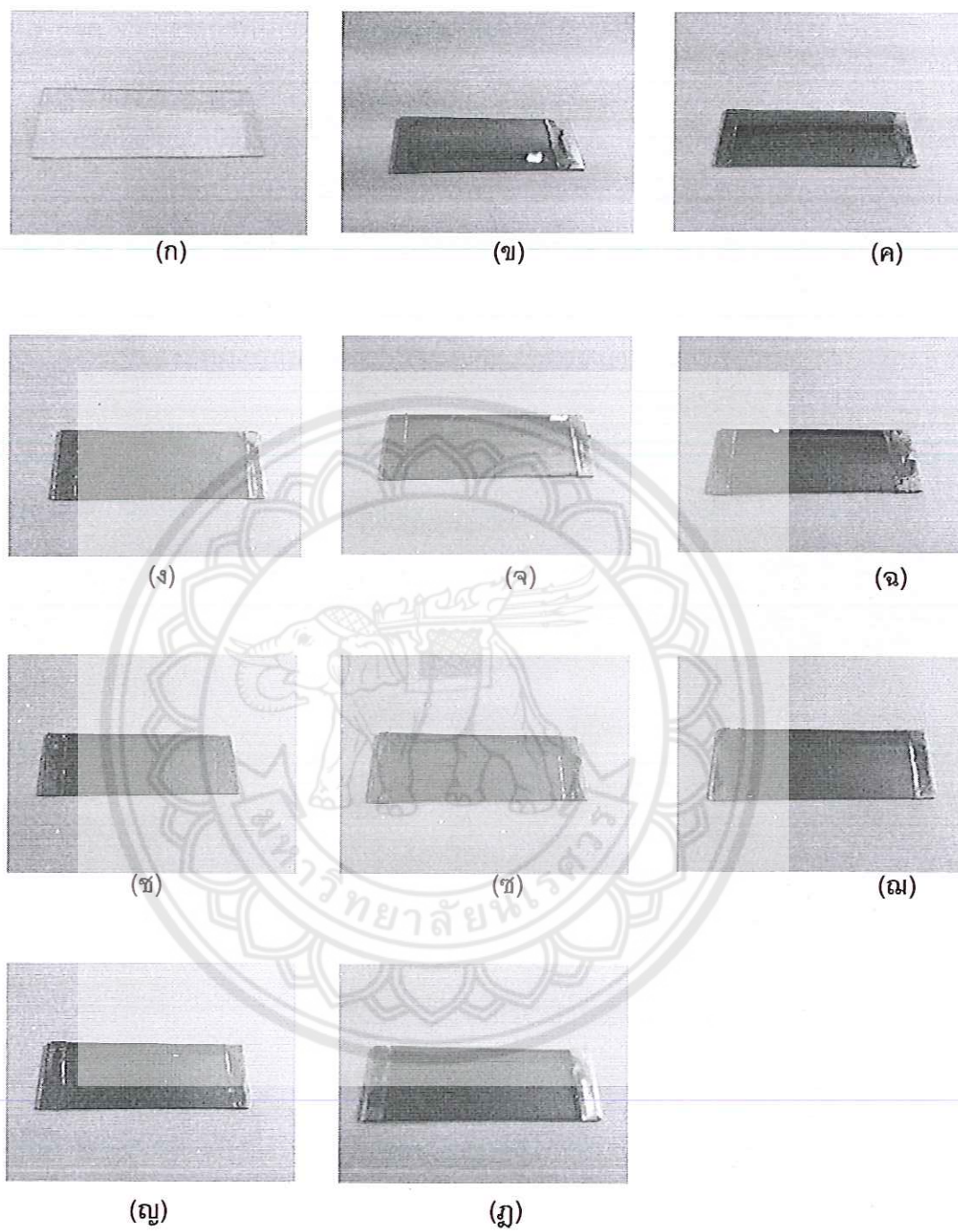
กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยวิธีสปัตเตอร์ด้วยเครื่อง vacuum coating รุ่น EDWARD 603 sputtering magnetron ตั้งอยู่ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์โดยกระจกที่เคลือบฟิล์มบางเงินที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและสมบัติการส่องผ่านการสะท้อนของแสงโดยมีความหนาต่างๆดังนี้ กระจกที่ไม่เคลือบฟิล์มบางเงิน 0 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ก) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 10 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ข) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 20 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ค) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 30 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ง) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 40 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (จ) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 50 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ฉ) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 60 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ช) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 70 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ซ) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 80 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ฌ) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 90 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ญ) กระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน 100 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 (ฎ)



รูปที่ 3.6 ชุดการจัดตั้งระบบการวัดความเข้มแสงส่องผ่าน และการสะท้อนของแสงโดยยิงต้นกำเนิดแสงผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน



รูปที่ 3.7 ระบบวัดการส่องผ่านและการสะท้อนของแสงในชุดการจัดตั้งระบบจริง



รูปที่ 4.1 กระดาษเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนาต่างๆ

(ก) 0 nm (ข) 10 nm (ค) 20 nm (ง) 30 nm (จ) 40 nm (ฉ) 50 nm

(ช) 60 nm (ซ) 70 nm (ณ) 80 nm (ญ) 90 nm (ฎ) 100 nm

4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินในงานวิจัยนี้ได้เลือกกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินโดยครอบคลุมทั้งหมดในความหนาทุกๆ 20 นาโนเมตร ทั้งหมด 5 ความหนา คือ 20 นาโนเมตร, 40 นาโนเมตร, 60 นาโนเมตร, 80 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร โดยวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า

4.2.1 กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินความหนา 20 นาโนเมตร โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า ดังรูปที่ 4.2 (ก) และรูปที่ 4.2 (ข) ตามลำดับ



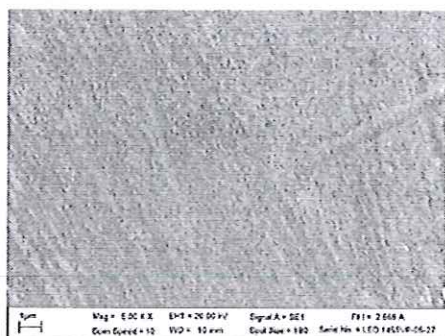
(ก)

(ข)

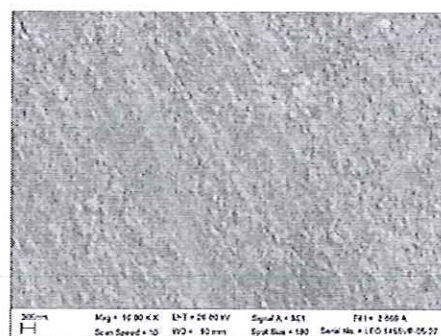
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) 10,000 เท่า

4.2.2 กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินความหนา 40 นาโนเมตร โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า ดังรูปที่ 4.3 (ก) และรูปที่ 4.3 (ข) ตามลำดับ



(ก)

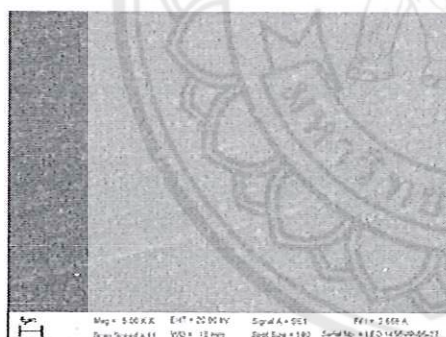


(ข)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) 10,000 เท่า

4.2.3 กระเจกเคลือบฟิล์มบางเงินความหนา 60 นาโนเมตร โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า ดังรูปที่ 4.4 (ก) และ รูปที่ 4.4 (ข) ตามลำดับ



(ก)

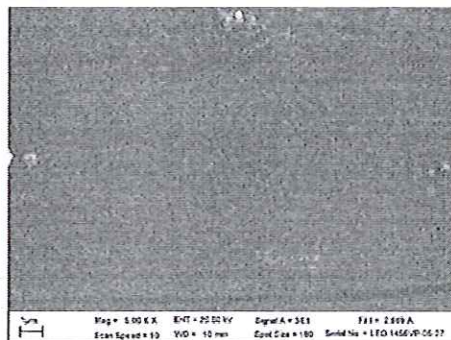


(ข)

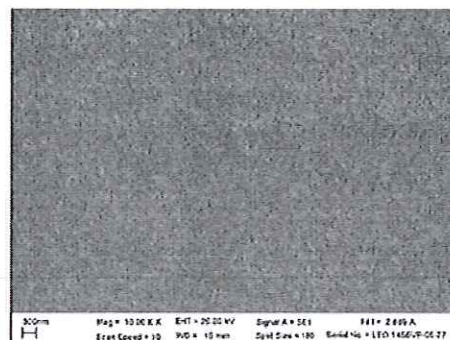
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) 10,000 เท่า

4.2.4 กระเจกเคลือบฟิล์มบางเงินความหนา 80 นาโนเมตร โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า ดังรูปที่ 4.5 (ก) และ รูปที่ 4.5 (ข) ตามลำดับ



(ก)

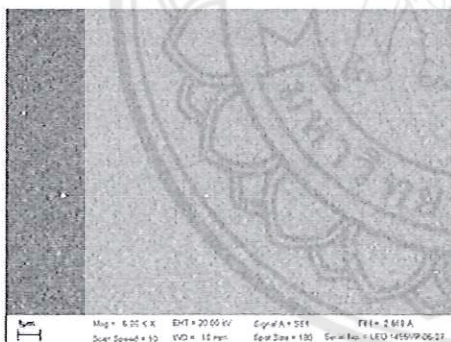


(ข)

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) 10,000 เท่า

4.2.5 กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินความหนา 100 นาโนเมตร โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า ดังรูปที่ 4.6 (ก) และ รูปที่ 4.6 (ข) ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) 10,000 เท่า

4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านและการสะท้อนของแสง

จากการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านและการสะท้อนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินทั้งหมด 11 ความหนา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงทั้งหมด 4 ความยาวคลื่นได้แก่ 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร ภายในห้องที่มีอุณหภูมิคงที่ขณะทำการทดสอบนั้นมีอุณหภูมิห้องอยู่ที่ 25 องศา

เรลชีเยส จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์หาค่าความเข้มการส่องผ่านดังแสดงในสมการ 4.1 และหาค่าความเข้มการสะท้อนแสงดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ T คือ ค่าสภาพส่องผ่าน

เมื่อ I_0 คือ ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ

เมื่อ I_T คือ ค่าความเข้มแสงที่ทะลุผ่าน

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad (4.2)$$

เมื่อ R คือ ค่าสภาพสะท้อน

เมื่อ I_0 คือ ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ

เมื่อ I_R คือ ค่าความเข้มแสงที่สะท้อนวัตถุ

$$A = \frac{I_A}{I_0} \quad (4.3)$$

เมื่อ A คือ ค่าสภาพดูดกลืน

เมื่อ I_0 คือ ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ

เมื่อ I_A คือ ค่าความเข้มแสงที่ดูดกลืน

สามารถนำผลค่าการส่องผ่านและการสะท้อนมาคำนวณหาค่าสภาพการดูดกลืนได้ดังแสดงในสมการที่ 4.4, 4.5 และ 4.6

$$I_0 = I_T + I_R + I_A \quad (4.4)$$

$$\frac{I_T}{I_0} + \frac{I_R}{I_0} + \frac{I_A}{I_0} = T + R + A = 1 \quad (4.5)$$

$$A = 1 - T - R \quad (4.6)$$

จากค่าสภาพการส่องผ่านและการสะท้อนแสงแปรผันตรงกับค่ากระแสที่วัดได้จากหัววัดแสงโฟโตไดโอดตามสมการที่ 4.7

$$I_0 \propto i \quad (4.7)$$

จึงได้ค่าสภาพการส่องผ่านเท่ากับค่ากระแสที่วัดได้โดยยิงต้นกำเนิดแสงเข้าหัววัดแสงโฟโตไดโอดโดยตรงค่ากระแสที่วัดได้เมื่อต้นกำเนิดแสงผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินดังแสงในสมการ 4.8

$$T = \frac{i_T}{i_0} \quad (4.8)$$

เมื่อ T คือ ค่าสภาพการส่องผ่าน

เมื่อ i_T คือ ค่ากระแสที่วัดได้เมื่อแสงผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

เมื่อ i_0 คือ ค่ากระแสที่ได้จากการยิงเลเซอร์เข้าหัววัดโดยตรง

คิดเป็นร้อยละของสภาพการส่องผ่านดังสมการที่ 4.9

$$\%T = \frac{i_T}{i_0} \times 100\% \quad (4.9)$$

จึงได้ค่าการสะท้อนเท่ากับค่ากระแสที่วัดได้โดยยิงเลเซอร์เข้าหัววัดโดยตรงต่อค่ากระแสที่วัดได้เมื่อแสงเลเซอร์ผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินดังสมการที่ 4.10

$$R = \frac{i_R}{i_0} \quad (4.10)$$

เมื่อ R คือ ค่าการสะท้อน

เมื่อ i_R คือ ค่ากระแสที่วัดได้เมื่อแสงสะท้อนกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

เมื่อ i_0 คือ ค่ากระแสที่ได้จากการยิงเลเซอร์เข้าหัววัดโดยตรง

คิดเป็นร้อยละของการสะท้อนดังสมการที่ 4.11

$$\%R = \frac{i_R}{i_0} \times 100\% \quad (4.11)$$

1) ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านและการสะท้อนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินทั้งหมด 11 ความหนา

ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์หรือผลการสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร

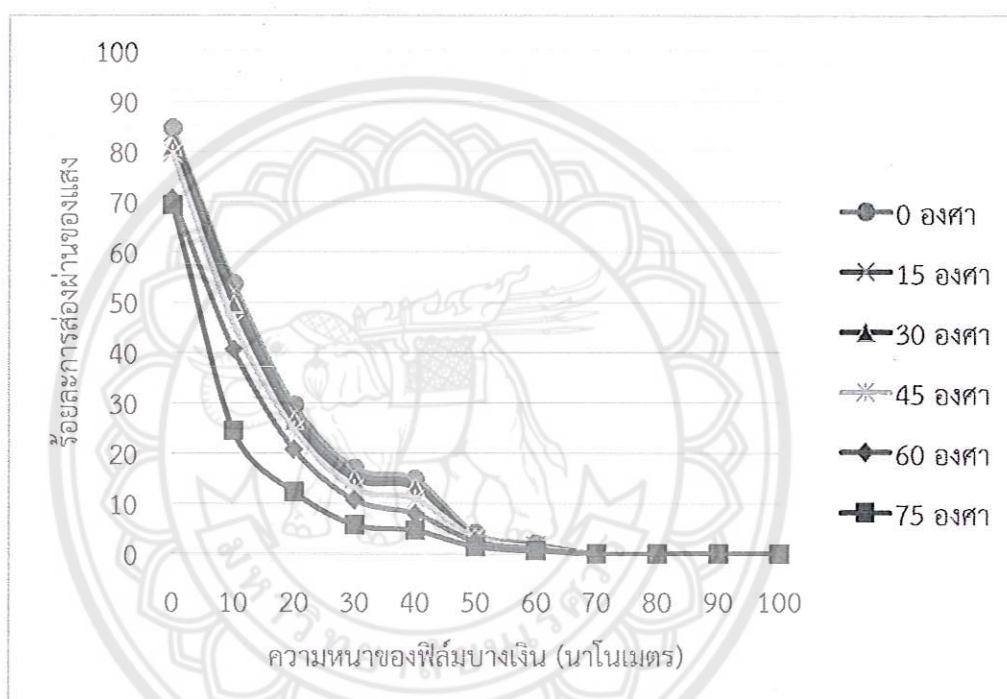
ความหนาของฟิล์มบางเงิน	เลเซอร์สีม่วง 405 นาโนเมตร				
	15	30	45	60	75
	องศา	องศา	องศา	องศา	องศา
0 นาโนเมตร	15.33	16.67	19.33	20.00	22.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
10 นาโนเมตร	17.33	18.00	19.6	21.33	30.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
20 นาโนเมตร	28.67	34.67	38.00	42.67	48.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
30 นาโนเมตร	49.00	49.67	53.33	59.33	60.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
40 นาโนเมตร	56.33	58.00	59.33	67.00	71.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
50 นาโนเมตร	53.33	57.67	63.00	67.67	70.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
60 นาโนเมตร	56.33	57.67	64.33	70.00	73.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
70 นาโนเมตร	61.00	64.67	66.00	70.67	75.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
80 นาโนเมตร	62.67	66.67	69.00	71.00	77.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
90 นาโนเมตร	64.00	66.67	69.33	70.00	79.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
100 นาโนเมตร	64.67	66.67	71.00	75.00	78.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์หรือผลการดัดแปลงแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร

ความหนาของฟิล์มบางเงิน	เลเซอร์สีม่วง 405 นาโนเมตร				
	15	30	45	60	75
	องศา	องศา	องศา	องศา	องศา
0 นาโนเมตร	1.00	2.33	1.00	9.33	8.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
10 นาโนเมตร	30.33	32.33	34.73	38.00	44.80
	± 0.33	± 0.34	± 0.21	± 0.14	± 0.11
20 นาโนเมตร	43.40	38.87	37.33	36.53	39.67
	± 0.10	± 0.05	± 0.12	± 0.05	± 0.07
30 นาโนเมตร	34.87	35.40	33.67	29.93	33.53
	± 0.05	± 0.04	± 0.00	± 0.04	± 0.05
40 นาโนเมตร	29.80	28.80	29.67	25.00	24.00
	± 0.05	± 0.05	± 0.00	± 0.07	± 0.00
50 นาโนเมตร	43.30	39.00	33.73	29.80	27.87
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
60 นาโนเมตร	42.00	40.67	34.33	29.00	26.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
70 นาโนเมตร	38.97	35.31	33.98	29.32	24.32
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
80 นาโนเมตร	37.31	33.31	30.99	28.99	22.99
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
90 นาโนเมตร	35.99	33.32	30.66	29.99	20.32 $\pm$
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	0.00
100 นาโนเมตร	35.33	33.33	29.00	25.00	21.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00

2) นำผลการวิเคราะห์ความเข้มแสงส่องผ่านและการสะท้อนแสงที่บันทึกในตารางมาแสดงเป็นกราฟ

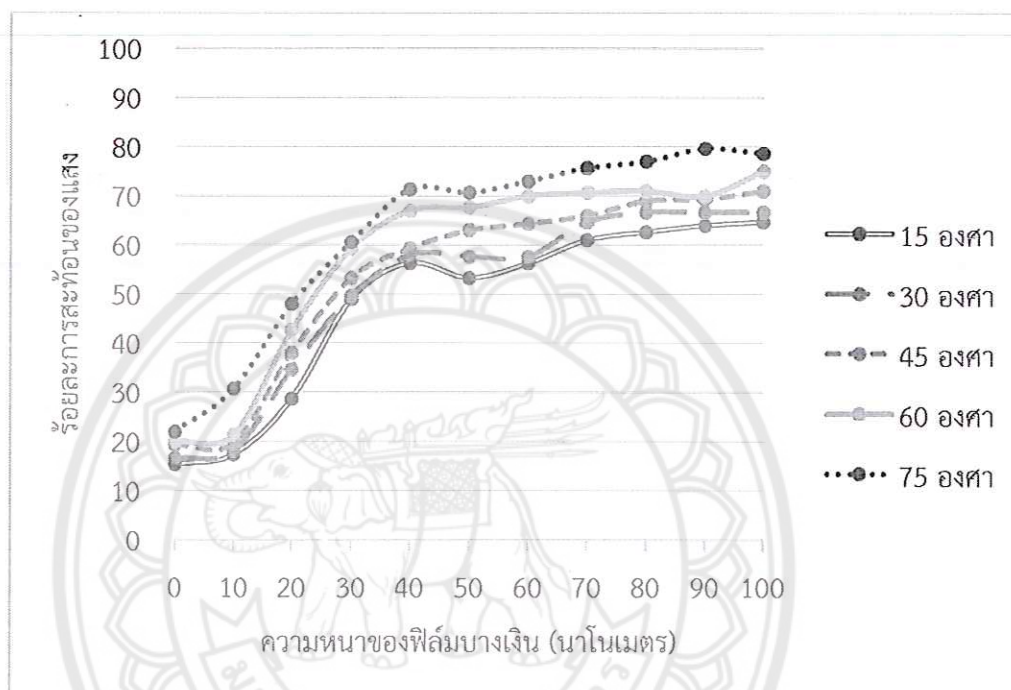
2.1 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร



รูปที่ 4.7 ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.7 ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่าน พบว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร นั้นสามารถให้แสงส่องผ่านจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0 นาโนเมตร ที่มุม 0 และ 15 องศา ได้มากถึง 84% ความหนา 10-60 นาโนเมตร นั้นสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ประมาณ 1-53% หลังจากตั้งแต่ว่าความหนา 70-100 นาโนเมตร นั้นสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ใกล้เคียงกับ 0% มาก เพราะยิ่งความหนามากขึ้นการส่องผ่านของแสงที่มุมตกกระทบต่างๆ ก็เลยยิ่งลดลงเรื่อยๆ

2.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละการสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร



รูปที่ 4.8 ร้อยละการสะท้อนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.8 ร้อยละการสะท้อนแสง พบว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร นั้นสามารถให้แสงสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 90 และ 100 นาโนเมตร ที่มุม 75 องศา ได้มากถึง 79% และความหนา 0-80 นาโนเมตร นั้นสามารถสะท้อนกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ประมาณ 15-77% เนื่องจากต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตรพบว่า ค่าการสะท้อนจะเพิ่มขึ้นตามมุมตกกระทบและความหนาของฟิล์มบางเงิน

2.3 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร



รูปที่ 4.9 ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.9 ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินที่ความหนา 10 นาโนเมตร นั้นสามารถดูดกลืนแสงต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ได้ดีที่สุดที่มุม 75 องศา มากถึง 44.80 % ที่ความหนา 50-100 นาโนเมตร พบว่ากระจกเคลือบฟิล์มบางเงินมีการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 27-45 % แต่ที่ความหนา 40 นาโนเมตร พบว่าร้อยละการดูดกลืนแสงภายใต้มุมตกกระทบต่างๆมีค่าน้อยสุดถึง 30 % เนื่องจากที่ความหนาที่มีการส่องผ่านและการสะท้อนของแสงได้ดีที่สุด

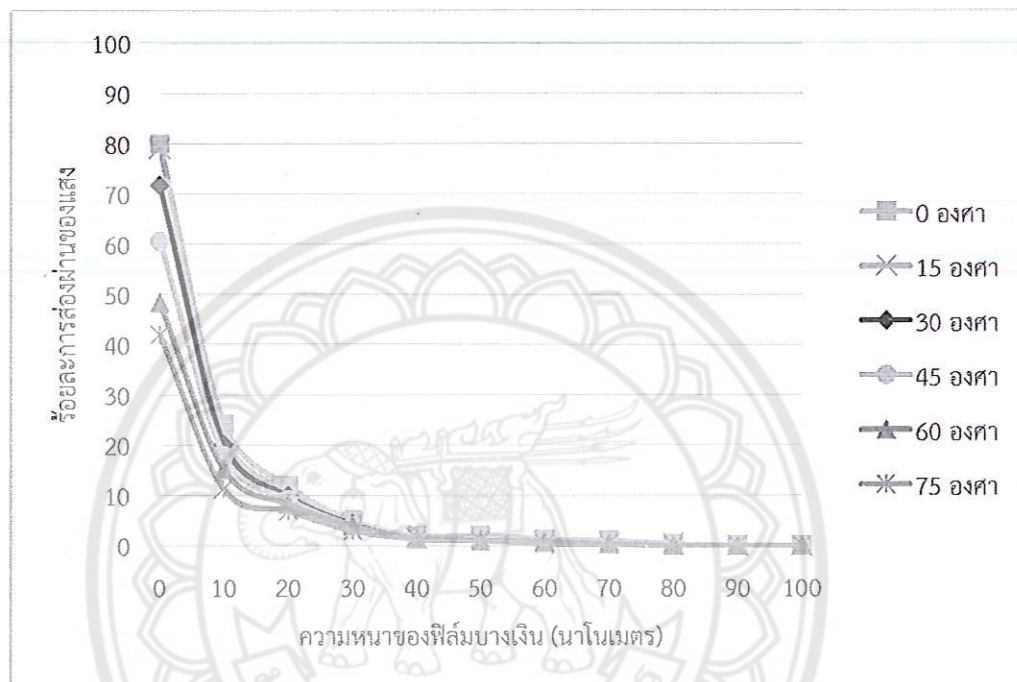
ตารางที่ 4.5 ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์ร้อยละการสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร

ความหนาของฟิล์มบางเงิน	เลเซอร์สีเขียว 532 นาโนเมตร				
	15 องศา	30 องศา	45 องศา	60 องศา	75 องศา
0 นาโนเมตร	20.00 ± 0.00	25.67 ± 0.00	29.33 ± 0.00	32.00 ± 0.00	39.00 ± 0.00
10 นาโนเมตร	30.00 ± 0.00	31.00 ± 0.00	32.00 ± 0.00	35.00 ± 0.00	41.67 ± 0.00
20 นาโนเมตร	71.00 ± 0.00	75.33 ± 0.00	78.00 ± 0.00	82.33 ± 0.00	84.67 ± 0.00
30 นาโนเมตร	67.33 ± 0.00	71.67 ± 0.00	78.67 ± 0.00	81.67 ± 0.00	85.33 ± 0.00
40 นาโนเมตร	76.67 ± 0.00	78.33 ± 0.00	80.67 ± 0.00	83.00 ± 0.00	84.00 ± 0.00
50 นาโนเมตร	78.33 ± 0.00	80.67 ± 0.00	85.67 ± 0.00	88.33 ± 0.00	90.67 ± 0.00
60 นาโนเมตร	80.00 ± 0.00	81.67 ± 0.00	83.33 ± 0.00	85.00 ± 0.00	87.33 ± 0.00
70 นาโนเมตร	50.33 ± 0.00	53.00 ± 0.00	58.67 ± 0.00	61.67 ± 0.00	68.33 ± 0.00
80 นาโนเมตร	77.00 ± 0.00	79.33 ± 0.00	81.33 ± 0.00	90.67 ± 0.00	96.67 ± 0.00
90 นาโนเมตร	77.00 ± 0.00	79.33 ± 0.00	81.00 ± 0.00	86.67 ± 0.00	90.67 ± 0.00
100 นาโนเมตร	66.67 ± 0.00	75.33 ± 0.00	81.00 ± 0.00	85.33 ± 0.00	88.00 ± 0.00

ตารางที่ 4.6 ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์หรือผลการดัดแปลงแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร

ความหนาของฟิล์มบางเงิน	เลเซอร์สีเขียว 532 นาโนเมตร				
	15	30	45	60	75
	องศา	องศา	องศา	องศา	องศา
0 นาโนเมตร	1.00	2.67	10.00	19.67	19.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
10 นาโนเมตร	48.07	48.87	50.07	49.87	47.13
	± 0.34	± 0.33	± 0.25	± 0.27	± 0.18
20 นาโนเมตร	18.20	14.8	12.80	9.33	8.40
	± 0.08	± 0.08	± 0.05	± 0.07	± 0.04
30 นาโนเมตร	28.07	24.07	17.33	14.33	11.67
	± 0.04	± 0.04	± 0.00	± 0.00	± 0.00
40 นาโนเมตร	21.67	20.33	18.00	15.67	14.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
50 นาโนเมตร	20.00	18.00	13.00	10.67	8.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
60 นาโนเมตร	19.00	17.67	16.00	14.33	12.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
70 นาโนเมตร	49.00	46.67	41.00	38.00	31.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
80 นาโนเมตร	22.67	20.33	18.33	9.33	3.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
90 นาโนเมตร	23.00	20.67	19.00	13.33	9.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
100 นาโนเมตร	33.33	24.67	19.00	14.67	12.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00

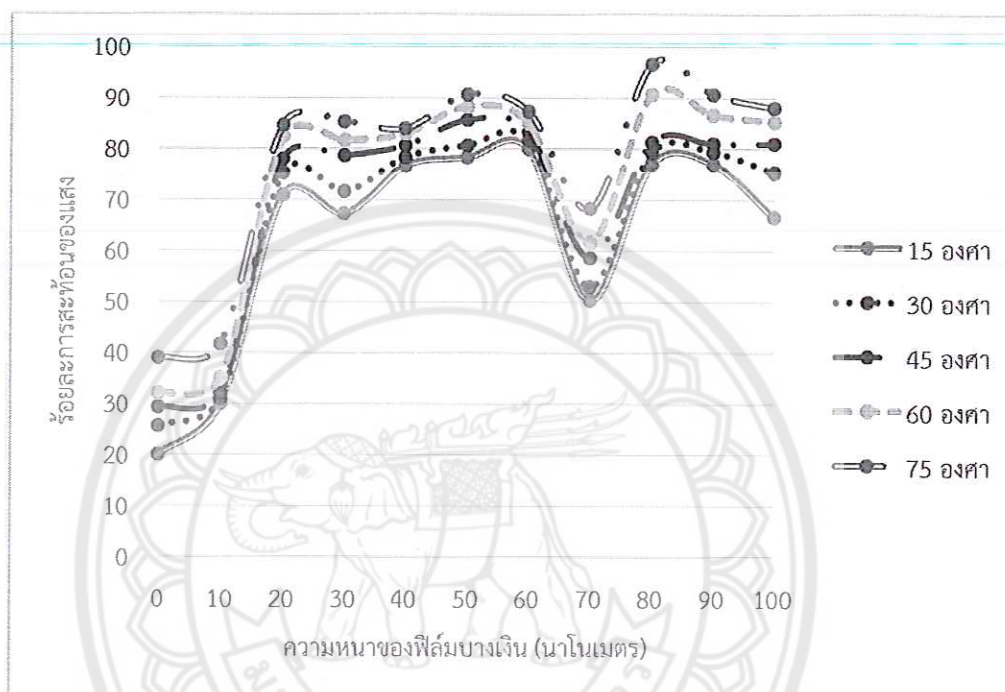
2.4 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร



รูปที่ 4.10 ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.10 ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่าน พบว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร นั้นสามารถให้แสงส่องผ่านจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0 นาโนเมตร ที่มุม 0 องศา ได้มากถึง 80% และความหนา 10-60 นาโนเมตร นั้นสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ประมาณ 1-24% หลังจากตั้งแต่ความหนา 70-100 นาโนเมตร นั้นสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ใกล้เคียงกับ 0% มาก เพราะยิ่งความหนามากขึ้นการส่องผ่านของแสงที่มุมตกกระทบต่างๆก็จะยิ่งลดลงเรื่อยๆ

2.5 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หรืออัตราการสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร



รูปที่ 4.11 อัตราการสะท้อนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.11 อัตราการสะท้อนแสง พบว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร นั้นสามารถให้แสงสะท้อนจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 80 นาโนเมตร ที่มุม 75 องศา ได้มากถึง 96% และความหนา 0-100 นาโนเมตร นั้นมีแนวโน้มการสะท้อนแสงเพิ่มมากขึ้น แต่ที่ความหนา 10 และ 70 นาโนเมตร สามารถสะท้อนแสงได้น้อยเพียง 30-50% เพราะฉะนั้นที่ความหนาที่มีการดูดกลืนต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ได้ดีในทุกการวัดของมุมตกกระทบ

2.6 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร



รูปที่ 4.12 ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.12 ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินที่ความหนา 10 และ 70 นาโนเมตร ภายใต้มุมตกกระทบต่างๆ นั้นสามารถดูดกลืนแสงต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร ได้ 30-50 % และที่ความหนาอื่นๆ มีการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 5-30 % เนื่องจากการส่องผ่านและการสะท้อนแสงได้ดี

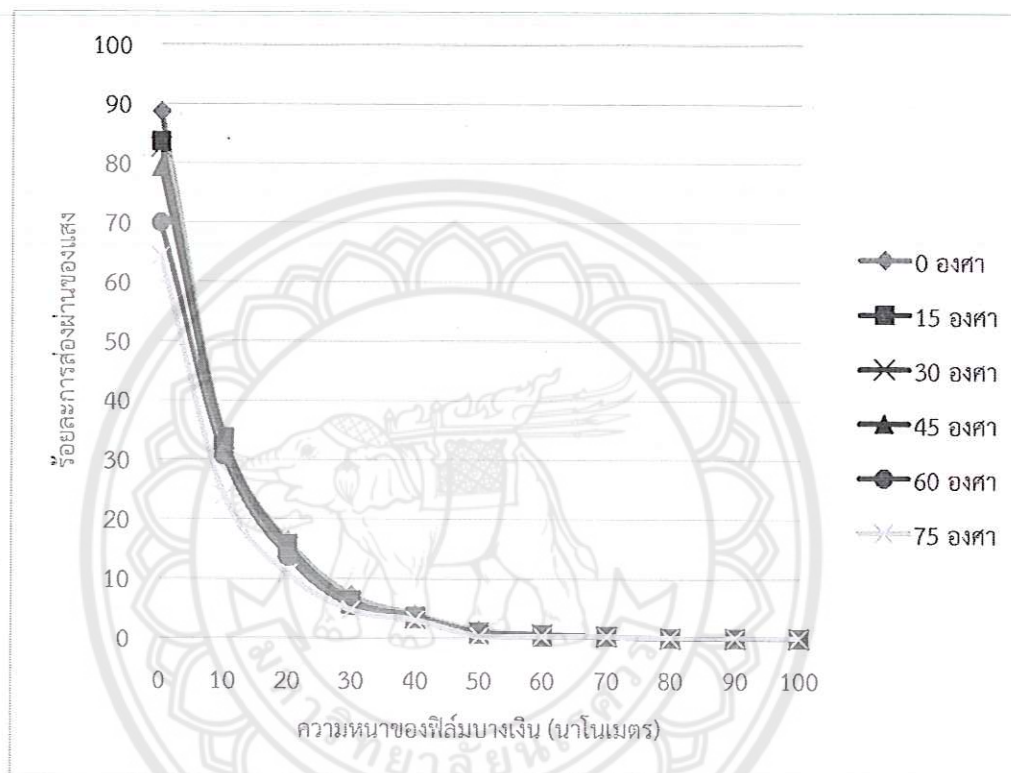
ตารางที่ 4.8 ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์ห้อยละการสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร

ความหนาของฟิล์มบางเงิน	เลเซอร์สีแดง 650 นาโนเมตร				
	15	30	45	60	75
	องศา	องศา	องศา	องศา	องศา
0 นาโนเมตร	7.67	8.00	9.00	11.33	28.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
10 นาโนเมตร	34.67	37.00	38.00	40.00	45.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
20 นาโนเมตร	40.00	50.00	51.33	52.67	58.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
30 นาโนเมตร	60.00	61.00	62.00	63.33	65.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
40 นาโนเมตร	73.33	74.33	76.00	76.67	77.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
50 นาโนเมตร	54.67	56.67	61.00	63.00	64.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
60 นาโนเมตร	58.67	59.67	60.67	61.00	61.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
70 นาโนเมตร	60.33	61.33	61.67	63.00	63.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
80 นาโนเมตร	62.33	63.00	63.33	65.00	67.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
90 นาโนเมตร	64.00	64.67	65.00	65.33	66.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
100 นาโนเมตร	63.33	63.67	64.33	65.33	66.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00

ตารางที่ 4.9 ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์หรือผลการดัดแปลงแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร

ความหนาของฟิล์มบางเงิน	เลเซอร์สีแดง 650 นาโนเมตร				
	15	30	45	60	75
	องศา	องศา	องศา	องศา	องศา
0 นาโนเมตร	8.67	9.33	11.67	18.67	7.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
10 นาโนเมตร	31.60	29.60	29.33	29.33	30.60
	± 0.04	± 0.04	± 0.00	± 0.07	± 0.04
20 นาโนเมตร	44.20	34.67	33.87	33.60	30.87
	± 0.05	± 0.00	± 0.05	± 0.04	± 0.05
30 นาโนเมตร	33.67	33.00	32.27	31.17	29.93
	± 0.00	± 0.00	± 0.04	± 0.04	± 0.04
40 นาโนเมตร	23.00	22.33	20.67	20.00	19.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.04	± 0.05	± 0.04
50 นาโนเมตร	44.33	42.33	38.33	36.33	35.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
60 นาโนเมตร	40.67	39.67	39.00	38.67	38.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
70 นาโนเมตร	39.33	38.33	38.00	36.67	36.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
80 นาโนเมตร	37.67	37.00	36.67	35.00	32.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
90 นาโนเมตร	36.00	35.33	35.00	34.67	34.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
100 นาโนเมตร	36.67	36.33	35.67	34.67	34.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00

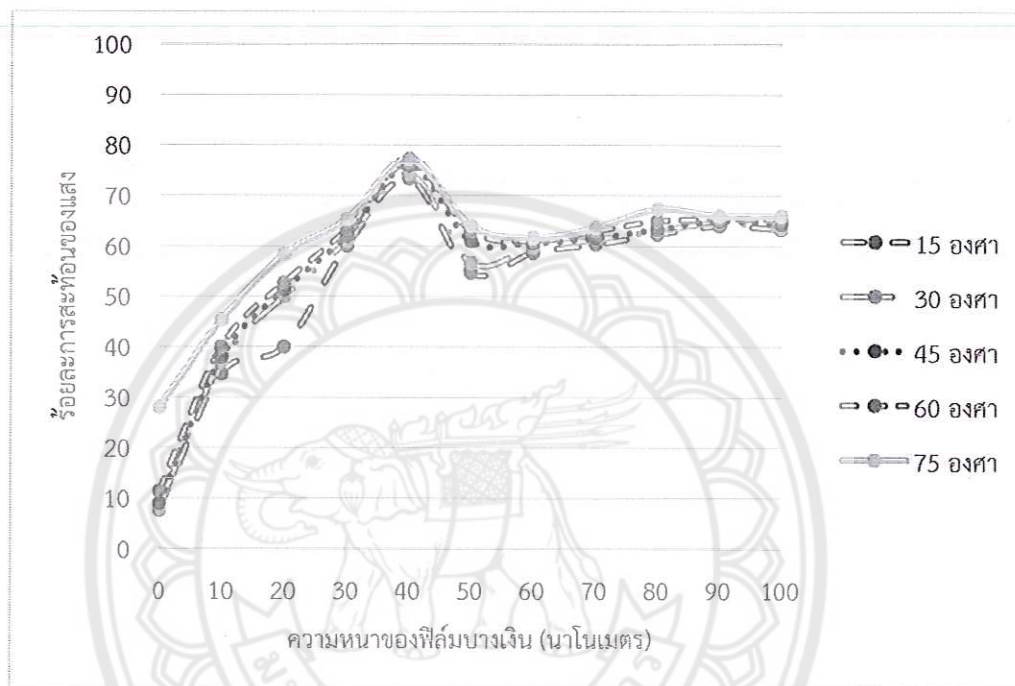
2.7 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร



รูปที่ 4.13 ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.13 ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่าน พบว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร นั้นสามารถให้แสงส่องผ่านจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0 นาโนเมตร ที่มุม 0 องศา ได้มากถึง 88% ความหนา 10-50 นาโนเมตร นั้นสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ประมาณ 1-34 % หลังจากตั้งแต่ความหนา 60-100 นาโนเมตรนั้นสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ใกล้เคียงกับ 0% มาก เพราะยิ่งความหนามากขึ้นการส่องผ่านของแสงที่มุมตกกระทบต่างๆ ก็ยิ่งลดลงเรื่อยๆ

2.8 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละการสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร



รูปที่ 4.14 ร้อยละการสะท้อนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.14 ร้อยละการสะท้อนแสง พบว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร นั้นสามารถให้แสงสะท้อนจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 80 นาโนเมตรที่มุม 75 องศาได้มากถึง 67% และความหนา 0-100 นาโนเมตร นั้นมีแนวโน้มการสะท้อนแสงเพิ่มมากขึ้น แต่ที่ความหนา 40 นาโนเมตร สามารถสะท้อนแสงได้สูงที่สุดถึง 77% เพราะฉะนั้นที่ความหนานี้มีการดูดกลืนต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ได้น้อยที่สุดในทุกการวัดของมุมตกกระทบ

2.9 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร



รูปที่ 4.15 ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.15 ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินในทุกๆ ความหนาภายใต้มุมตกกระทบต่างๆ นั้นสามารถดูดกลืนแสงต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ได้ 10-36 % แต่ที่ความหนา 40 นาโนเมตร ภายใต้มุมตกกระทบต่างๆ พบว่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำที่สุดถึง 20-23 % เนื่องจากที่ความหนาที่มีการส่องผ่านและการสะท้อนของแสงได้ดีที่สุด

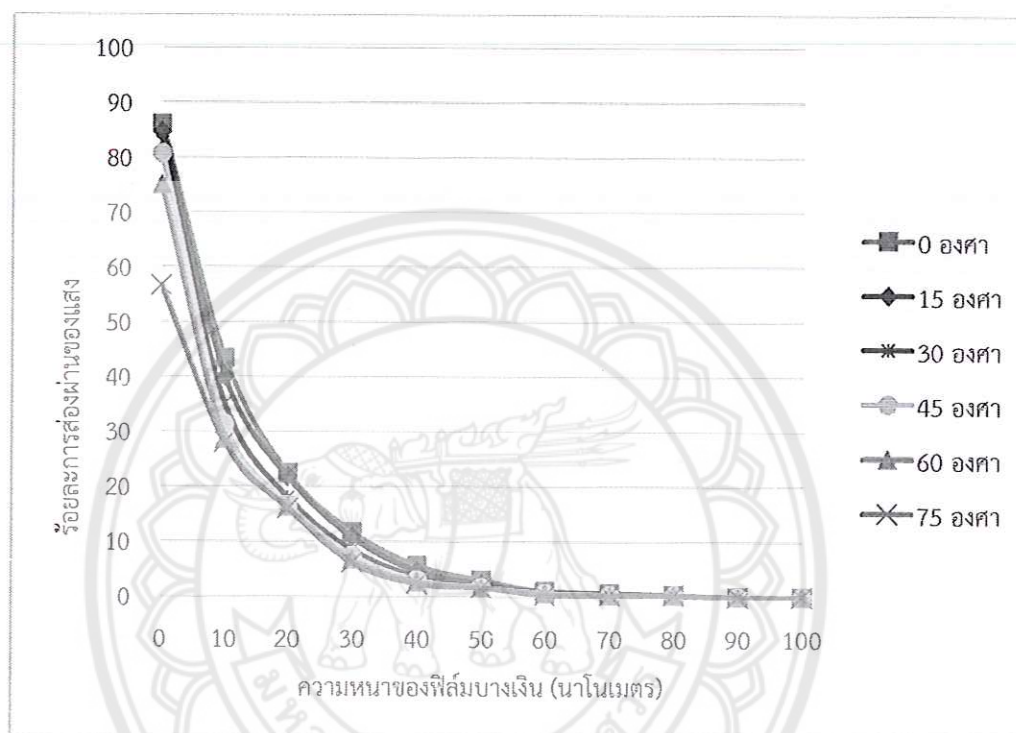
ตารางที่ 4.11 ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์ห้อยละการสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร

ความหนาของฟิล์มบางเงิน	เลเซอร์อินฟราเรด 780 นาโนเมตร				
	15	30	45	60	75
	องศา	องศา	องศา	องศา	องศา
0 นาโนเมตร	5.33	6.00	6.67	7.33	10.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
10 นาโนเมตร	23.67	27.33	32.33	33.67	37.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
20 นาโนเมตร	66.00	67.33	72.33	73.33	75.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
30 นาโนเมตร	67.33	70.33	72.67	76.00	77.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
40 นาโนเมตร	67.33	78.33	82.67	86.00	90.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
50 นาโนเมตร	66.00	67.33	73.00	75.00	77.40
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
60 นาโนเมตร	60.00	60.67	63.67	67.00	74.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
70 นาโนเมตร	60.00	60.67	62.33	63.33	65.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
80 นาโนเมตร	62.67	64.33	66.67	68.33	70.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
90 นาโนเมตร	61.67	63.00	65.33	67.00	68.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
100 นาโนเมตร	62.00	64.00	68.00	69.33	70.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00

ตารางที่ 4.12 ตารางบันทึกผลการวิเคราะห์หรรยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร

ความหนาของฟิล์มบางเงิน	เลเซอร์อินฟราเรด 780 นาโนเมตร				
	15	30	45	60	75
	องศา	องศา	องศา	องศา	องศา
0 นาโนเมตร	10.00	11.33	12.67	17.67	33.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
10 นาโนเมตร	36.33	37.67	36.33	37.67	34.67
	± 0.04	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
20 นาโนเมตร	12.23	14.67	11.00	10.33	9.00
	± 0.20	± 0.08	± 0.08	± 0.04	± 0.05
30 นาโนเมตร	21.87	21.13	19.87	17.27	16.47
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
40 นาโนเมตร	28.00	18.00	14.33	11.33	7.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
50 นาโนเมตร	31.67	30.67	25.33	23.33	20.93
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
60 นาโนเมตร	39.00	38.33	35.67	32.33	25.33
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
70 นาโนเมตร	39.33	38.67	37.33	36.33	34.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
80 นาโนเมตร	37.00	35.33	33.00	31.33	29.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
90 นาโนเมตร	38.33	37.00	34.67	33.00	31.67
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00
100 นาโนเมตร	38.00	36.00	32.00	30.67	30.00
	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00	± 0.00

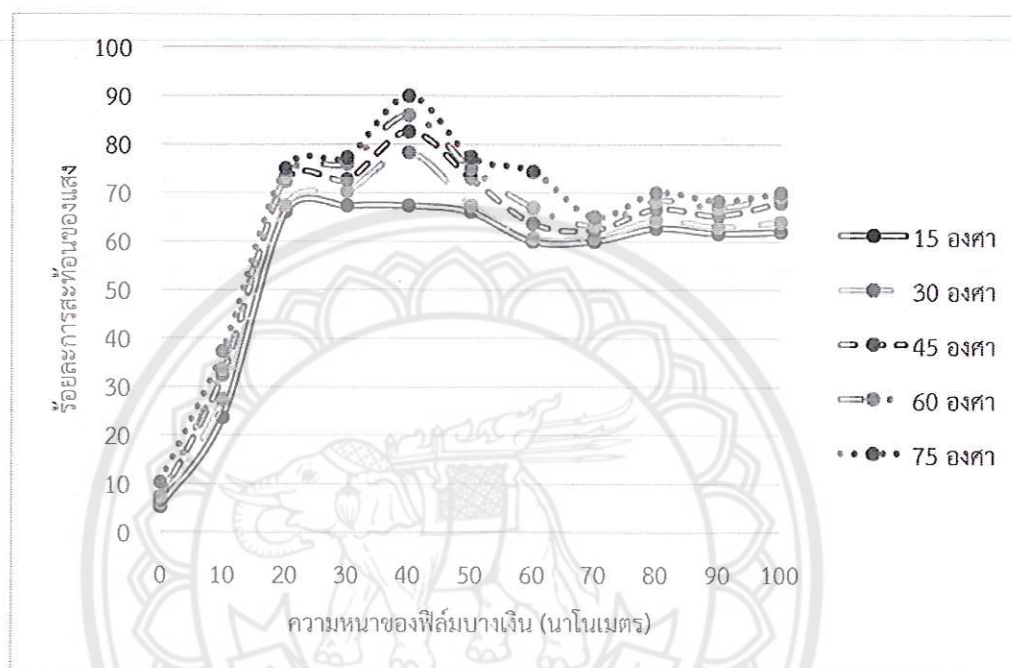
2.10 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร



รูปที่ 4.16 ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่านของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.16 ร้อยละความเข้มแสงส่องผ่าน พบว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร นั้นสามารถให้แสงส่องผ่านจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินด้วยความหนา 0 นาโนเมตร ที่มุม 0 องศา ได้มากถึง 86% และความหนา 10-50 นาโนเมตร นั้นสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ประมาณ 1-43% หลังจากตั้งแต่ว่าความหนา 60-100 นาโนเมตร นั้นสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางได้ใกล้เคียงกับ 0% มาก เพราะยิ่งความหนาเพิ่มขึ้นการส่องผ่านของแสงที่มุมตกกระทบต่างๆ ก็ยิ่งลดลงเรื่อยๆ

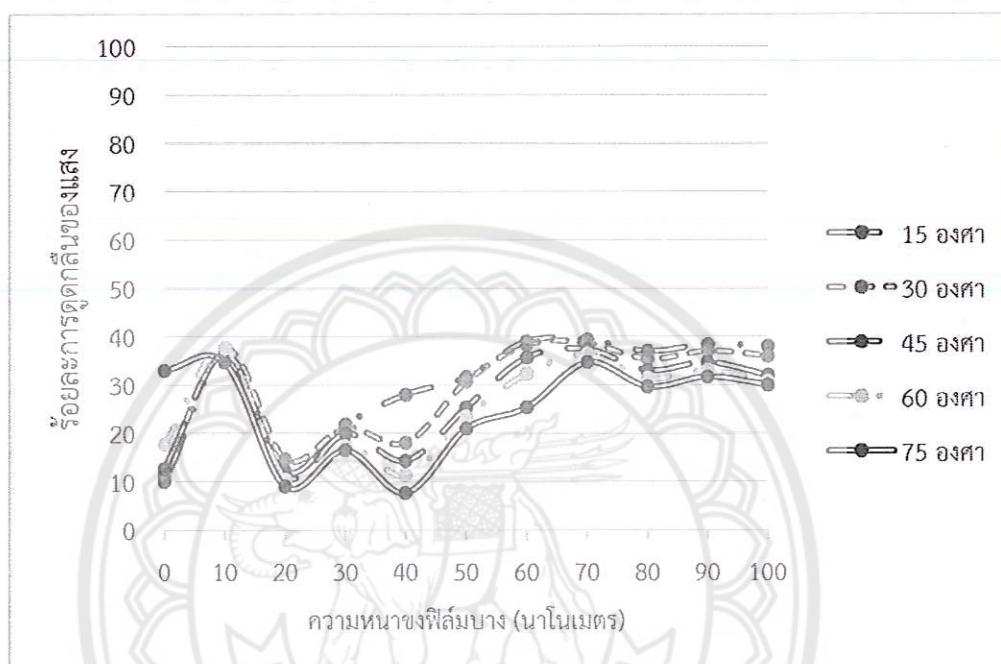
2.11 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละการสะท้อนแสงจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร



รูปที่ 4.17 ร้อยละการสะท้อนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.17 ร้อยละการสะท้อนแสง พบว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร นั้นสามารถให้แสงสะท้อนจากกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินที่มีความหนา 0-100 นาโนเมตร นั้นมีแนวโน้มการสะท้อนแสงเพิ่มมากขึ้น แต่ที่ความหนา 40 นาโนเมตร สามารถสะท้อนแสงได้สูงที่สุดถึง 90% เพราะฉะนั้นที่ความหนาที่มีการดูดกลืนต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร ได้น้อยที่สุดในทุกการวัดของมุมตกกระทบ

2.12 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน ด้วยความหนา 0-100 นาโนเมตร ด้วยมุม 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา โดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร



รูปที่ 4.18 ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน

รูปที่ 4.18 ร้อยละการดูดกลืนแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางเงิน พบว่าในทุกๆ ความหนา ภายใต้มุมตกกระทบต่างๆ นั้นสามารถดูดกลืนแสงต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร ได้ 10-40 % แต่ที่ความหนา 20 นาโนเมตร ภายใต้มุมตกกระทบต่างๆ พบว่ามีการดูดกลืนแสงต่ำสุดถึง 10-15 % เนื่องจากที่ความหนาที่มีการส่องผ่านแสงที่ดี และที่ความหนา 40 นาโนเมตร ภายใต้มุมตกกระทบต่างๆ พบว่ามีการดูดกลืนแสงต่ำถึง 10-30 % เนื่องจากที่ความหนาที่มีการสะท้อนแสงได้ดีที่สุด

บทที่ 5

สรุปผล

จากการทำวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์สมบัติทางแสงโดยใช้ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 4 ความยาวคลื่น ได้แก่ 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร พบว่า

1. กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินความหนา 20, 40, 60 และ 100 นาโนเมตร ที่นำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพกำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า ที่ความหนา 20 นาโนเมตร จะมีพื้นผิวของเงินที่ค่อนข้างบางและไม่สม่ำเสมอ ความหนา 40 นาโนเมตร จะมีพื้นผิวของเงินที่สม่ำเสมอมากขึ้น และที่ความหนา 60-100 นาโนเมตร พื้นผิวมีความหนาแน่นของเงินสูงทำให้เกิดการไหลและไม่สม่ำเสมอ

2. กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินนั้นสามารถส่องผ่านได้ในต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร ได้แตกต่างกัน แต่ต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405 และ 780 นาโนเมตร จะสามารถส่องผ่านกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินได้ดีกว่าต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 532 และ 650 นาโนเมตร และภาพรวมของต้นกำเนิดแสงทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น พบว่ายิ่งความหนาเพิ่มมากขึ้นการส่องผ่านของแสงที่มุมตกกระทบต่างๆก็ยิ่งลดลงเรื่อยๆ

3. กระจกเคลือบฟิล์มบางเงินนั้นสามารถสะท้อนแสงได้ในต้นกำเนิดแสงความยาวคลื่น 405, 532, 650 และ 780 นาโนเมตร มีค่าแตกต่างกัน ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร สามารถสะท้อนแสงได้ดีที่สุดด้วยความหนา 100 นาโนเมตร (71.20%), ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร สามารถสะท้อนแสงได้ดีที่สุดด้วยความหนา 80 นาโนเมตร (85.00%), ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร สามารถสะท้อนแสงได้ดีที่สุดด้วยความหนา 40 นาโนเมตร (75.53%) และความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร สามารถสะท้อนแสงได้ดีที่สุดด้วยความหนา 40 นาโนเมตร (80.86%) ภาพรวมของต้นกำเนิดแสงที่ต่างกันจะพบว่าค่าการสะท้อนจะเพิ่มขึ้นตามมุมตกกระทบและความหนาของฟิล์มบางเงิน

อย่างไรก็ตามผลการวิจัยเบื้องต้นทำให้ผู้วิจัยทราบว่า หากต้องการนำกระจกเคลือบฟิล์มบางเงินไปใช้เพื่อที่จะพัฒนาใช้เป็นกระจกแบ่งลำแสง กระจกสะท้อนหรือกระจกสองผ่านที่ใช้งานเฉพาะเจาะจงในแต่ละความยาวคลื่นได้ต่อไปในอนาคต



บรรณานุกรม

- [1] นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สุรสิงห์ ไชยคุณ.การเตรียมฟิล์มบางด้านการกัดกร่อนซึ่งเคลือบด้วยกระบวนการ PVD.มหาวิทยาลัยบูรพา. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กันยายน 2559, จาก http://digital_collect.lib.buu.ac.th//dcms/files//2559_073.pdf
- [2] มธุรินทร์ สุทธิเชษฐ์.สเปกตรัม (Spectrum). [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2559, จาก <http://pirun.ku.ac.th/~g5414652996/files/%E0%B9%83%E0%B8%9A%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%205.pdf>
- [3] แสง (Light). [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2559, จาก <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/231/Light1.htm>
- [4] คุณสมบัติของแสง. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2559, จาก http://202.143.165.163/sci_t1/chap12/chap12_4.pdf
- [5] สมบัติเชิงแสงของวัตถุ. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2559, จาก <http://physics.science.cmu.ac.th/courses/210351/Large%205.pdf>
- [6] ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเลเซอร์. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2559, จาก http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/Optics/basic_laser3.htm
- [7] ชนิดของเลเซอร์. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2559, จาก <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=20&chap=5&page=t20-5-infodetail06.html>
- [8] Vacuum Technology and Thin Films Research Lab. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 กันยายน 2559, จาก <http://vtff.buu.ac.th/index.php>
- [9] ทฤษฎีเบื้องต้นของการสputtering (Sputtering). [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 กันยายน 2559, จาก http://www.sut.ac.th/engineering/Electrical/courses/429650/IC%20Week%209_Etching.pdf
- [10] ร.อ. พัฒนา เทพขโลธร.เทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสputtering. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 24 กันยายน 2559, จาก <http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/>

Pattana_Thepchalotorn/Fulltext.pdf

- [11] เงิน (silver). [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 24 กันยายน 2559, จาก [https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%87%E0%B8%B4%E0%B8%99_\(%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0\)](https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%87%E0%B8%B4%E0%B8%99_(%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0))
- [12] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 24 กันยายน 2559, จาก http://www2.rdi.ku.ac.th/newweb/cl/documents/Sampling_forSEM.pdf
- [13] หลักการทำงานของเครื่อง SEM. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 24 กันยายน 2559, จาก <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-microscopysem-.html>
- [14] หัววัดแสงโฟโตไดโอด. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กันยายน 2559, จาก <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK19/chapter9/t19-9-l3.htm#sect2a>
- [15] มัลติมิเตอร์ (Multimeters). [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กันยายน 2559, จาก http://www.vec thai.com/main/wpcontent/uploads/2009/article/Multimeters_User_Guide.pdf
- [16] มัลติมิเตอร์แบบเข็ม (Analog Multimeters). [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 26 กันยายน 2559, จาก https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/saowalak/analog_multi/analog.htm
- [17] มัลติมิเตอร์แบบตัวเลข (Digital Multimeters). [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 26 กันยายน 2559, จาก http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/saowalak/digital_multi/digital.htm
- [18] กระดาษ (glass). [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อวันที่ 26 กันยายน 2559, จาก <http://www.akesteel.com/articles/60346/%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%AB%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%88%E0%B8%81.html>
- [19] Tomas Tamulevicius, Asta Tamuleviciene, Dainius Virganavicius, Andrius Vasiliauskas, Vitoldas Kopustinskas, Sarunas Meskinis, Sigitas Tamulevicius "Structuring of DLC:Ag nanocomposite thin films employing plasma chemical etching and ion sputtering" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 341 (2014) 1–6
- [20] อมรรัตน์ ทาเกิด "การประดิษฐ์และวิเคราะห์สมบัติทางแสงของกระจกเคลือบฟิล์มบางทองแดงด้วยวิธีสเปคโตรริง" คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ (2558)