

การพัฒนาอีลิปโซมิเตอร์เพื่อการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง
DEVELOPMENT OF ELLIPSOMETER FOR MEASURING
OF OPTICAL PROPERTIES OF THIN FILM

นางสาวศุภานี อภิวันต์
นางสาวสุรีย์ ฉ่ำเทา

โครงการพิเศษงานเป็นหัวหน้างานของสารพัดวิชาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๑

การพัฒนาอีลิปโซมิเตอร์เพื่อการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง
DEVELOPMENT OF ELLIPSOMETER FOR MEASURING
OF OPTICAL PROPERTIES OF THIN FILM

นางสาวสุทธีณี อภิวันท์
นางสาวสุรียี่ ลำภา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**DEVELOPMENT OF ELLIPSOMETER FOR MEASURING
OF OPTICAL PROPERTIES OF THIN FILM**

MISS SUTTINEE APIWAN

MISS SUREE LAMPHAO

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2556**

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวสุทธิณี อภิวัฒน์ นางสาวสุรีย์ ลำเถา
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญภูมิ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการพัฒนาระบบอิลลิปโซมิเตอร์ด้วยหลักการเทคนิคอิลลิปโซมิทรี เพื่อวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง ได้แก่ ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และค่าความหนาของฟิล์มบาง โดยพัฒนาซอฟต์แวร์ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Basic 2010 ในการออกแบบหน้าจอ User Interface เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-EASY168 STAMP เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่มีอนาไลเซอร์ติดอยู่ แล้วทำการจำลองระบบอิลลิปโซมิเตอร์วัด silicon wafer และฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเห $n = 1.49$ และ $n = 1.6$ ทำให้สถานะโพลาไรซ์เปลี่ยนจากเชิงเส้นเป็นโพลาไรซ์วงรี แล้วเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงจากตัวตรวจจับแสง กับมุม Analyzer ที่บิดไปทุก 1 องศา จนครบ 360 องศา นำข้อมูลที่ได้จากการวัดไปวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้ค่า stroke parameters เพื่อหาค่า ψ และ Δ เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง

คำสำคัญ : อิลลิปโซมิเตอร์ , อิลลิปโซมิทรี , โพลาไรซ์ , ฟิล์มบาง

Title	DEVELOPMENT OF ELLIPSOMETER FOR MEASURING OF OPTICAL PROPERTIES OF THIN FILM
Student	Miss. Suttinee Apiwan Miss. Suree Lamphao
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda
Co-Advisor	Dr. S Tipawan Khlayboonme

ABSTRACT

This special project is to develop of Ellipsometer for measuring the optical properties of thin films. Optical properties are the refractive index , the absorption coefficient and the thickness of thin films. The application software development with Microsoft Visual Basic 2010 in Design User Interface screen connected to the ET-EASY168 STAMP microcontroller to control the rotation of the motor . Simulation Ellipsometer system for measure silicon wafer and thin film have refractive index $n = 1.49$ and $n = 1.6$, making the polarization changes from linear polarization ellipse. Then collected data on the relationship between the intensity of the light detection with the Analyzer with a twist every 1 degrees until 360 degrees, the data obtained from measurements to numerical analysis has the stroke parameters to determine the optical properties of thin films.

Keywords : Ellipsometey, Ellipsometer, Polarized, Thin Flim

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญญี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่มอบโอกาสและการสนับสนุนในการทำโครงการพิเศษนี้ รวมทั้งให้คำแนะนำ แนวคิดต่างๆ มาโดยตลอด คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ภักคิณี ชิตสกุล และ อ.พุกทพร วานิชกร ที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในเรื่องการวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม

ขอขอบคุณ นายสมพบ แซ่เจี้ย ที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้การเขียนโปรแกรม และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นายวรรณะ โกศลวัฒน์ และ นายสุภณัฐ เรืองศิริ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีอิลลิปโซมิทรี และให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณ อาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ด้านต่างๆ จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการทำโครงการพิเศษ

สุดท้ายขอขอบคุณ พี่เพื่อน น้อง สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ให้คำปรึกษาและการสนับสนุนในทุกๆด้าน และคอยเป็นกำลังใจเสมอ

นางสาวสุทธินิ อภิวันท์

นางสาวสุรีย์ ลำภา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การเคลื่อนที่ของแสง (Propagation of light).....	3
2.1.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นใน 1 มิติ (Propagation of one dimensional wave).....	3
2.1.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave).....	6
2.2 ปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน (Polarization).....	7
2.2.1 โพลาไรซ์เชิงเส้นหรือโพลาไรซ์เชิงระนาบ (Linear or plane polarization).....	8
2.2.2 การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์.....	9
2.2.3 โพลาไรซ์เชิงวงรี (Elliptical polarization).....	22
2.2.4 Jones Matrix.....	24
2.3 ระบบเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์.....	29
2.3.1 คำนิยามของเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์.....	29
2.3.2 ประเภทของเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์แบ่งตามโครงสร้าง.....	31
2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง.....	32

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การคำนวณของ ψ และ Δ ของ Static Photometric RAE.....	32
2.4.2 ค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน	35
2.4.3 ค่าความหนาของฟิล์ม.....	36
2.5 Half Wave Plate.....	38
2.6 สเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping Motor).....	39
2.6.1 ชนิดและโครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์.....	39
2.6.2 ลักษณะของสเต็ปมอเตอร์	40
2.6.3 การทำงานของ stepping motor	41
2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-EASY168 STAMP	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	43
3.1 การออกแบบโปรแกรมควบคุมระบบอิลลิปโซมิเตอร์.....	44
3.2 การจักระบบอิลลิปโซมิเตอร์	45
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	48
3.4 การวิเคราะห์หาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง	49
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	50
4.1 ผลการทดลองการวัดฟิล์มบางด้วยระบบอิลลิปโซมิเตอร์.....	50
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการวิจัย	54
5.2 ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น.....	55
เอกสารอ้างอิง	56

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก	57
ภาคผนวก ข	60
ภาคผนวก ค	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแต่ละขั้นตอน	2
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 คลื่นใน 1 มิติ เคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x ด้วยความเร็วคงที่ s	3
2.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นใน 1 มิติ	4
2.3 แสดงจำนวนเชิงซ้อนในระนาบเชิงซ้อน	5
2.4 แสดงเส้นทางเดินของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.5 ทิศทางการแกว่งของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.6 แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นหรือแสงโพลาไรซ์เชิงระนาบ	8
2.7 สัญลักษณ์ของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นและแสงไม่โพลาไรซ์.....	8
2.8 ระนาบตกกระทบ	9
2.9 เฟสของคลื่นที่สะท้อนจากรอยต่อของตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกัน.....	10
2.10 แสงสีรุ้งที่สะท้อนจากฟองสบู่.....	11
2.11 แสงสะท้อนจากผิวด้านบนและด้านล่างของฟิล์มบาง	11
2.12 เลนส์กล้องถ่ายรูปที่เคลือบด้วยฟิล์มกันแสงสะท้อนจะเห็นเป็นสีม่วง	12
2.13 การแทรกสอดในฟิล์มบาง.....	13
2.14 การแทรกสอดของแสงในฟิล์มบางบนฐานรอง	13
2.15 สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงโพลาไรซ์ชนิด s ชนิด p และแสงไม่โพลาไรซ์ ที่มุมตกกระทบต่างๆ	14
2.16 เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบทำมุมบริวสเตอร์แสงสะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิด s ... 15	15
2.17 การสะท้อนและหักเหของแสงทำให้เกิดโพลาไรซ์ชนิด p	16
2.18 Gian-Thompson Polarizing Beamsplitter ใช้หลักการสะท้อนและหักเหของแสงทำให้เกิดแสง โพลาไรซ์ชนิด p และ s	17
2.19 ในความจริงแสงโพลาไรซ์ในแนวตั้งฉากกับแนวโมเลกุลจะไม่ถูกดูดกลืนและสามารถผ่าน แผ่นโพลาไรซ์ได้.....	18
2.20 แนวโพลาไรซ์ของแสงทำมุม θ กับแกนโพลาไรซ์ของโพลาไรเซอร์องค์ประกอบของ สนามไฟฟ้าที่ผ่านแอนาไลเซอร์มีค่า $E_0 \cos \theta$	18
2.21 การแกนโพลาไรซ์ของโพลาไรเซอร์และอนาไลเซอร์ตั้งฉากกัน	19
2.22 ผลึก birefringence จะแยกแสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์สองลำ	19
2.23 ผลึก sodium chloride (ซ่าย) และผลึก calcite (ขาว)	20

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 เมื่อแสงตกกระทบเป็นแสงไม่โพลาไรซ์แสงที่เกิดจากการกระเจิงในระนาบ yz เป็นแสงโพลาไรซ์.....	21
2.25 ทิศทางและสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่กระเจิงที่เกิดจากแสงตกกระทบที่เป็นแสงไม่โพลาไรซ์.....	21
2.26 สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม	22
2.27 สนามไฟฟ้ารวมของคลื่นมีทิศทางที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	23
2.28 แกนหลักและแกนรองของวงรีขนานกับแกน x และ y.....	23
2.29 แกนหลักของวงรีทำมุม α กับแกน x.....	24
2.30 การเปลี่ยนระนาบจาก x-y เป็นระนาบ $x' - y'$ โดยการหมุนระนาบ	26
2.31 แสดงเวกเตอร์ของสถานะโพลาไรซ์ต่างๆ.....	27
2.32 แสดงสถานะโพลาไรซ์เชิงวงกลมแบบหมุนซ้ายและหมุนขวา	28
2.33 แสดงเครื่องมือทางแสงเบื้องต้นที่อธิบายด้วย Jones matrices	29
2.34 แสดงตัวอย่างการติดตั้งโดยทั่วไปของเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์	30
2.35 โฟโตเมทริกอิลลิปโซมิเตอร์	31
2.36 แสดงโครงสร้างการวัดค่าพารามิเตอร์ของอิลลิปโซมิเตอร์.....	32
2.37 แสดงการสะท้อนและส่งผ่านของแสงผ่านตัวกลาง 2 ชนิด.....	35
2.38 แผนภาพของระบบแสง สิ่งแวดล้อม-ฟิล์ม-ฐานรอง ซึ่งแสงตกกระทบบางส่วนนั้นจะสะท้อนและบางส่วนจะส่งผ่าน	36
2.39 เมื่อแสงตกกระทบแนวโพลาไรซ์ทำมุม θ กับแกนแสงของ half waveplate.....	38
2.40 สเต็ปมอเตอร์แบบมีสาย 5 เส้น.....	39
2.41 มอเตอร์แบบมีสาย 6 เส้น	39
2.42 สเต็ปมอเตอร์หลายแบบไบโพลาร์	39
2.43 แสดงโครงสร้างสเต็ปมอเตอร์.....	40
2.44 แสดงการป้อน pulse ให้กับ stepping motor.....	41
2.45 รูปแสดงโครงสร้างของบอร์ด ET-EASY168 STAMP	41
3.1 แสดงภาพรวมการวัดฟิล์มบางของระบบอิลลิปโซมิเตอร์.....	42
3.2 กล่องควบคุม Stepping Motor	43
3.3 Digital Multimeter (DMM).....	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	44
3.5	45
3.6	45
3.7	46
3.8	46
3.9	47
3.10	47
3.11	48
4.1	50
4.2	51
4.3	52
4.4	52
4.5	53

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
RAE	Rotating Analyzer Ellipsometer
s-polarized	แสงตกกระทบที่มีการแกว่งในทิศตั้งฉากกับแสงตกกระทบ
p-polarized	แสงตกกระทบที่มีการแกว่งในทิศขนานกับแสงตกกระทบ
e-ray	extraordinary ray
o-ray	ordinary ray
Re(C)	ส่วนจริงของจำนวนเชิงซ้อน
Im(C)	ส่วนจินตภาพของจำนวนเชิงซ้อน
ψ	อัตราส่วนแอมพลิจูดระหว่าง s-polarized และ p-polarized
Δ	ความต่างเฟสระหว่าง s-polarized กับ p-polarized
B	สนามแม่เหล็ก
E	สนามไฟฟ้า
A	แอมพลิจูดของคลื่น
K	เลขคลื่น
s	ความเร็ว
τ	คาบเวลา
v	ความถี่
ω	ความถี่เชิงมุม
C	จำนวนเชิงซ้อน
δ	มุมเฟสเริ่มต้นของคลื่น
c	ความเร็วแสง
r	สัมประสิทธิ์การสะท้อน
r_s	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงโพลาไรซ์ชนิด s
r_p	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงโพลาไรซ์ชนิด p
n	ดัชนีหักเห
n_0	ดัชนีหักเหในตัวกลาง 0
n_1	ดัชนีหักเหในตัวกลาง 1

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันได้มีการนำเครื่องมือวัดที่มีเทคนิคต่างๆ มาใช้ในการหาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่ไม่ทราบค่าความหนาหรือดัชนีหักเหของฟิล์มบาง เช่น เทคนิคการวัดที่อาศัยหลักการสะท้อน (reflectometry) เทคนิคการวัดที่อาศัยหลักการส่งผ่าน (transmission) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวต้องทราบพารามิเตอร์อย่างใดอย่างหนึ่งจากฟิล์มบางก่อนถึงทำการวิเคราะห์หาค่าที่ต้องทราบได้ แต่มีเทคนิคหนึ่ง ได้แก่ เทคนิคอิลลิปโซมิเตอร์ (ellipsometry) ที่สามารถทำการหาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่ไม่ทราบค่าความหนาหรือดัชนีหักเหของฟิล์มบาง โดยเทคนิคนี้จะสามารถหาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางได้โดยไม่ต้องทราบพารามิเตอร์ใดๆ แต่เราสามารถที่จะหาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางได้โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

จากที่กล่าวในข้างต้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคอิลลิปโซมิทรีมีข้อดีสำหรับใช้หาค่าสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอย่างมาก จึงจัดทำโครงการงานพิเศษนี้ขึ้นเพื่อพัฒนาอิลลิปโซมิเตอร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ในการควบคุมและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากระบบอิลลิปโซมิเตอร์ ซึ่งนำข้อมูลจากการเปลี่ยนแปลงของสถานะโพลาไรซ์ของแสงหลังจากการสะท้อนและหักเหในฟิล์มบางไปวิเคราะห์หาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการของเทคนิคอิลลิปโซมิทรี
2. เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมและวิเคราะห์ข้อมูลจากระบบอิลลิปโซมิเตอร์
3. เพื่อหาค่าสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวิเคราะห์ข้อมูลจากระบบอิลลิปโซมิเตอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของเทคนิคอิลลิปโซมิทรี
2. ศึกษาการโพลาไรซ์ของแสง
3. ศึกษาการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมและวิเคราะห์ข้อมูลจากระบบอิลลิปโซมิเตอร์
4. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลองจากระบบอิลลิปโซมิเตอร์

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับการวัดด้วยเทคนิคอิลลิปโซเมทรี

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมและวิเคราะห์ข้อมูลจากระบบอิลลิปโซมิเตอร์

ขั้นตอนที่ 3 จัดระบบอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อทำการทดลอง

ขั้นตอนที่ 4 ทำการทดลองหาค่าสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยใช้ระบบอิลลิปโซมิเตอร์

ขั้นตอนที่ 5 สรุปโครงการพิเศษและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอน	ปี 2556							ปี 2557		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ขั้นตอนที่ 1	■	■	■							
ขั้นตอนที่ 2				■	■	■				
ขั้นตอนที่ 3							■			
ขั้นตอนที่ 4								■	■	
ขั้นตอนที่ 5										■

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ประโยชน์จากระบบอิลลิปโซมิเตอร์ ในการใช้วัดความหนาของฟิล์มบางได้
2. สามารถรู้และเข้าใจระบบอิลลิปโซมิเตอร์ และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาต่อ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเคลื่อนที่ของแสง (Propagation of Light)

แสงนั้นมีความสมบัติเป็นคลื่น ซึ่งแมกซ์เวลล์ได้แสดงให้เห็นว่าแสงนั้นมีความสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นเราสามารถกล่าวได้ว่า “แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า” ในทางคณิตศาสตร์นั้น เราสามารถอธิบายแสงได้ด้วย sine wave เช่น $y = \sin x$ หรือ $y = \cos x$ เมื่อแสงเข้าสู่ตัวกลางแสงจะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อน เนื่องจากการหักเหและการดูดกลืนของแสง การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางสามารถอธิบายได้ด้วยดัชนีหักเหเชิงซ้อนหรือดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ซึ่งต่อไปจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลาง

2.1.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นใน 1 มิติ (Propagation of one dimensional wave)

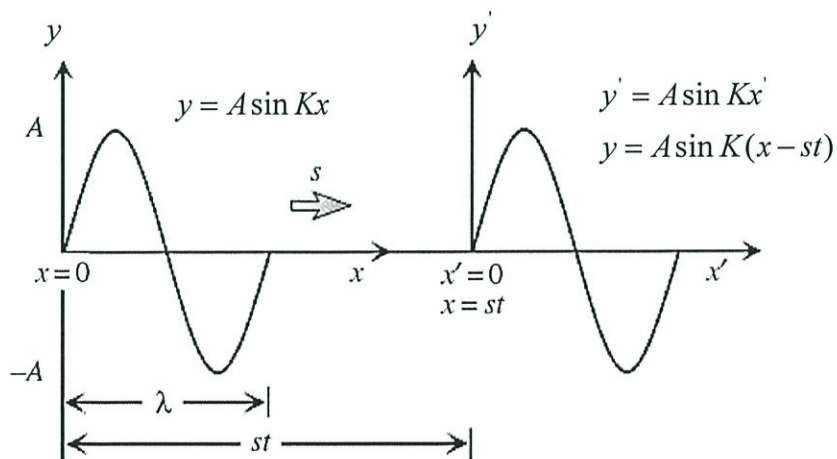
พฤติกรรมของคลื่นแสงเคลื่อนที่ไปตามเวลาสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ของคลื่นใน 1 มิติ พิจารณา sine wave เคลื่อนที่ไปทางแกน x ด้วยความเร็วคงที่ s ในกรณีนี้ คลื่นในตำแหน่ง x ก่อนการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้เป็น

$$y = A \sin Kx \quad (2.1)$$

เมื่อ A คือ แอมพลิจูดของคลื่น และ K คือ เลขคลื่น จากค่าความยาวคลื่น λ จะได้

$$K \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.2)$$

ดังนั้น K คือ ตัวเลข sine wave ที่แสดงระยะทางระหว่าง 0 ถึง 2π



รูปที่ 2.1 คลื่นใน 1 มิติ เคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x ด้วยความเร็วคงที่ s

ในรูปที่ 2.1 เมื่อเวลาผ่านไป t คลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว s เป็นระยะทาง st ตามแนวแกน x เราเปลี่ยนระบบพิกัดเป็น $x' - y'$ เราสามารถอธิบายคลื่นได้ด้วย $y' = A \sin Kx'$ จะเห็นว่า $x' = x - st$ และ $y = y'$ ดังนั้น คลื่นใน 1 มิติ ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ x สามารถอธิบายได้ด้วย

$$y = A \sin K(x - st) \quad (2.3)$$

กล่าวในอีกด้านหนึ่ง เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบ λ สามารถหาได้จาก

$$\tau = \frac{\lambda}{s} \quad (2.4)$$

เมื่อ τ คือคาบเวลา ค่าความถี่ ν และความถี่เชิงมุม ω สามารถหาได้จากค่า τ

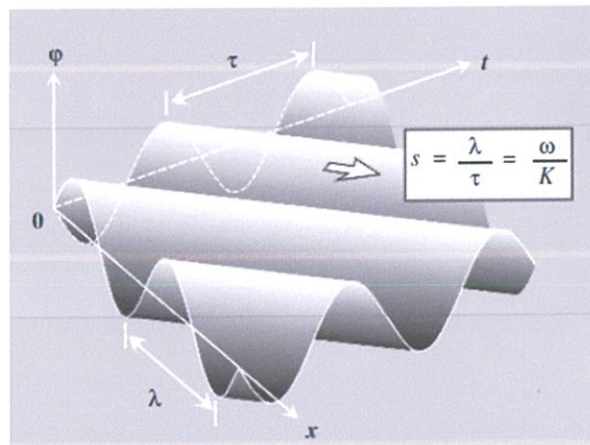
$$\nu = \frac{1}{\tau} \quad (2.5)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi\nu \quad (2.6)$$

เราสามารถเขียนสมการ (2.3) ได้ใหม่โดยใช้ สมการ (2.2), (2.4) และ (2.6) จะได้

$$y = A \sin(Kx - \omega t) \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันของคลื่น 1 มิตินั้นจะขึ้นอยู่กับ x และ t เทอมของ $(Kx - \omega t)$ จะขึ้นอยู่กับเฟส



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นใน 1 มิติ

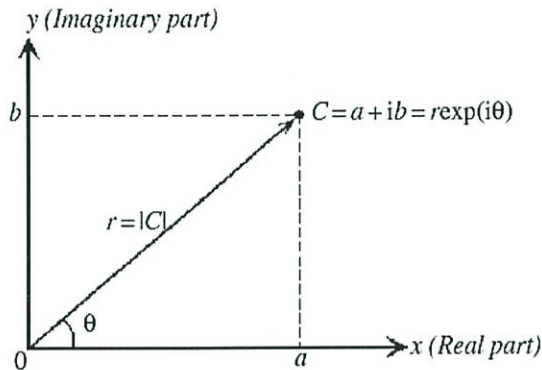
รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นใน 1 มิติ ซึ่งคำนวณจากสมการ (2.7) จากภาพคลื่นเคลื่อนที่ไปตามแกน x เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น t การเคลื่อนที่ของคลื่นจะเป็นฟังก์ชันคาบของ x และ t ในระนาบ $x - t$ ถ้า $x = 0$ ในสมการ (2.7) $A \sin(-\omega t) = -A \sin(\omega t)$ รูปร่างของ sine wave ก็จะไปตรงกันข้าม ความเร็วของ sine wave แสดงทิศทางของลูกศรในรูป 2.2 ที่ขึ้นกับสมการ (2.2) และ (2.4) - (2.6)

$$s = \frac{\lambda}{\tau} = \lambda v = \frac{\omega}{K} \quad (2.8)$$

เมื่อแสงสะท้อนโดยตัวกลาง เฟส ($Kx - \omega t$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ใ้เฟสเริ่มต้นลงในสมการ (2.7)

$$y = A \sin(Kx - \omega t + \delta) \quad (2.9)$$

ในสมการ (2.9) เมื่อ $\delta = \frac{\pi}{2}$ จะกลายเป็นคลื่นโคไซน์ เนื่องจาก $\sin(x + \frac{\pi}{2}) = \cos(x)$



รูปที่ 2.3 แสดงจำนวนเชิงซ้อนในระนาบเชิงซ้อน

การเคลื่อนของคลื่น 1 ในมิติต้องใช้จำนวนเชิงซ้อน จำนวนเชิงซ้อนสามารถแทนด้วยจุดบนระนาบเชิงซ้อนดังรูปที่ 2.3 ในรูปนี้ แกน x และแกน y แสดงส่วนจริงและส่วนจินตภาพที่เป็นส่วนประกอบของจำนวนเชิงซ้อนตามลำดับในระนาบจำนวนเชิงซ้อน จำนวนเชิงซ้อน $C = a + ib$ ($i = \sqrt{-1}$) C

ค่าสัมบูรณ์ของจำนวนเชิงซ้อนสามารถหาได้จาก r ในรูป 2.3

$$|C| = r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.10)$$

สังยุคของจำนวนเชิงซ้อน สามารถทำได้โดยเปลี่ยนเครื่องหมาย คือ แทนที่ i ด้วย $-i$

$$C^* = (a + ib)^* = a - ib \quad (2.11)$$

ถ้าเราใช้สังยุคของจำนวนเชิงซ้อน ส่วนจริง (Re) และส่วนจินตภาพ(Im) สามารถเขียนได้เป็น

$$\text{Re}(C) = a = \frac{C + C^*}{2} \text{ และ } \text{Im}(C) = b = \frac{C - C^*}{2i} \quad (2.12)$$

ค่าสัมบูรณ์ของ C สามารถคำนวณโดยใช้ C^*

$$|C| = \sqrt{CC^*} \quad (2.13)$$

ในระบบพิกัดเชิงขั้ว จุด C จะเป็น

$$\text{Re}(C) = r \cos \theta \text{ และ } \text{Im}(C) = r \sin \theta \quad (2.14)$$

ดังนั้น

$$C = a + ib = r(\cos \theta + i \sin \theta) \quad (2.15)$$

ค่า θ จะขึ้นอยู่กับค่า C ซึ่งนิยามโดย $\theta = \arg C$ เมื่อ $\tan \theta = \frac{b}{a}$ เราจะได้

$$\theta = \arg C = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) & \text{สำหรับ } a < 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) + 180^\circ & \text{สำหรับ } a < 0, b > 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) - 180^\circ & \text{สำหรับ } a < 0, b < 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

ในสมการ (2.16) เงื่อนไขสำหรับ a และ b ใช้เปลี่ยนช่วงของ θ จาก $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ถึง $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ เราสามารถดูได้จากรูป 2.3 เมื่อ $a = 0$ ในสมการ (2.16) $\theta = 90^\circ$ ($b < 0$) และ $\theta = -90^\circ$ ($b > 0$) จากสูตรของออยเลอร์

$$\exp(i\theta) = \cos \theta + i \sin \theta \quad (2.17)$$

ดังนั้น จำนวนเชิงซ้อนในสมการ (2.15) สามารถอธิบายด้วย

$$C = r \exp(i\theta) = |C| \exp(i\theta) \quad (2.18)$$

ถ้าเราใช้สมการ (2.13) และ (2.17) ค่าสัมบูรณ์ของ $\exp(i\theta)$ สามารถหาได้จาก

$$|\exp(i\theta)| = \sqrt{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta} = 1 \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.14) ในระบบพิกัดเชิงขั้ว ส่วนจริง และ ส่วนจินตภาพ สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ ตามลำดับ ที่ยอมรับร่วมกัน ถ้าเราเลือกส่วนจริงหรือส่วนจินตภาพ เราสามารถอธิบายคลื่นไซน์ได้ตามนี้

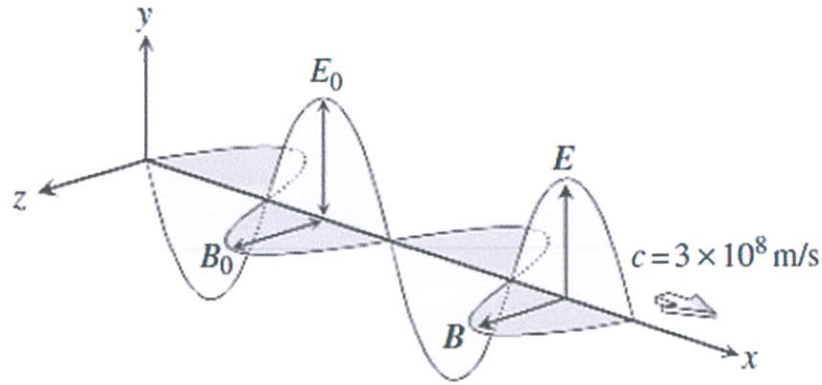
$$y = A \cos(\omega t - Kx + \delta) = \operatorname{Re}\{A \exp[i(\omega t - Kx + \delta)]\} \quad (2.20)$$

เราสามารถเขียนได้อย่างง่าย

$$y = A \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] \quad (2.21)$$

2.1.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave)

เมื่อปี 1849 แมกเวลล์ได้ค้นพบคลื่นแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางเดินของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในรูป E และ B คือ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกันตลอด $E = 0$ เมื่อ $B = 0$ คลื่นแสงจะเป็นคลื่นตามขวาง ค่าความเร็วแสงจะไม่ขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นของแสง แต่จะเป็นค่าคงที่ $c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$



รูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางเดินของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยคลื่นในหนึ่งมิติ

$$E = E_0 \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] \quad (2.22a)$$

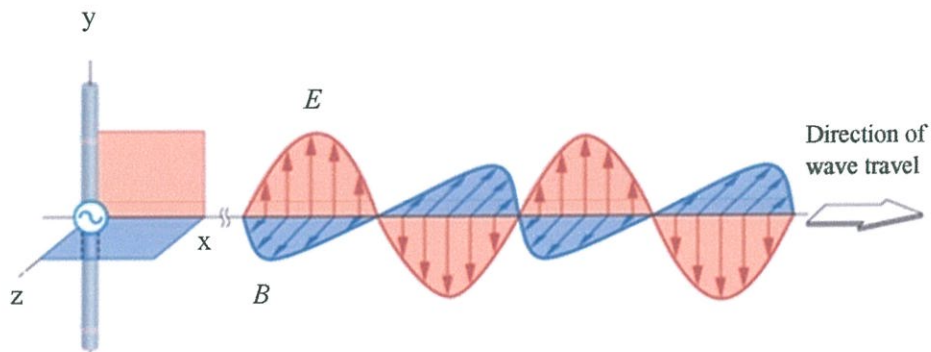
$$B = B_0 \exp[i(\omega t - Kx + \delta)] \quad (2.22b)$$

ในสมการที่ (2.22) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้โดย $E_0 = cB_0$ ดังนั้น

$$E = cB \quad (2.23)$$

2.2 ปราภฏการณ์โพลาไรเซชัน (Polarization)

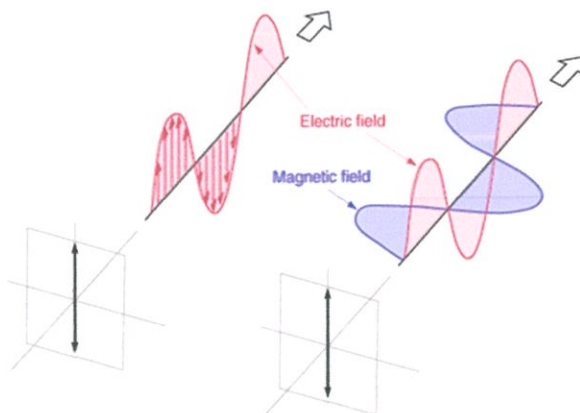
การโพลาไรซ์เป็นสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แสง ที่อธิบายทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าตามขวางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น



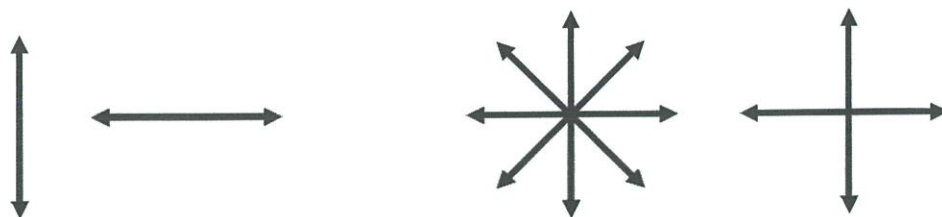
รูปที่ 2.5 ทิศทางการแกว่งของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2.1 โพลาริซ์เชิงเส้นหรือโพลาริซ์เชิงระนาบ (Linear or plane polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงมีการแกว่งในระนาบใดระนาบหนึ่ง จะเรียกคลื่นแสงนี้ว่าเป็นแสงโพลาริซ์เชิงเส้นหรือแสงโพลาริซ์เชิงระนาบ ถ้าสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงมีการแกว่งในทิศทางต่างๆ กันและมีเฟสต่างกันอย่างสุ่ม เรียกว่าเป็น แสงไม่โพลาริซ์หรือแสงโพลาริซ์แบบสุ่ม



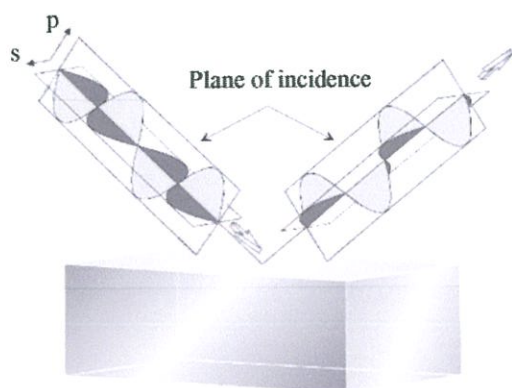
รูปที่ 2.6 แสงโพลาริซ์เชิงเส้นหรือแสงโพลาริซ์เชิงระนาบ



รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ของแสงโพลาริซ์เชิงเส้นและแสงไม่โพลาริซ์

ชนิดของโพลาริซ์เชิงเส้นหรือโพลาริซ์เชิงระนาบ

เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ จะสามารถสร้างระนาบที่เกิดจากแนวแสงตกกระทบบนเส้นที่ตั้งฉากกับพื้นผิวตรงจุดที่แสงตกกระทบบและเรียกระนาบนี้ว่า ระนาบแสงตกกระทบบ (plane of incidence) ดังแสดงในรูป ถ้าสนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบบมีการแกว่งในทิศทางตั้งฉากกับระนาบแสงตกกระทบบ จะเรียกแสงที่มีการแกว่งของสนามไฟฟ้าแบบนี้ว่า แสงโพลาริซ์ชนิด s (s-polarized light) ในกรณีที่สนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบบมีการแกว่งในทิศขนานกับระนาบตกกระทบบ จะเรียกแสงที่มีการแกว่งของสนามไฟฟ้าแบบนี้ว่า แสงโพลาริซ์ชนิด p (p-polarized light)



รูปที่ 2.8 ระนาบตกกระทบ

2.2.2 การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์

การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์สามารถทำได้ 4 วิธีดังนี้

1. การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน (Reflection)
2. การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการดูดกลืน (Absorption)
3. การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยวัสดุที่มีสมบัติ (Double Refraction หรือ Birefringence)
4. การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการกระเจิง (Scattering)

1) การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน(Reflection)

เมื่อแสงตกกระทบพื้นผิวหรือเดินทางจากตัวกลางหนึ่งตกกระทบพื้นผิวของตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกัน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เป็นไปได้ 3 ประการได้แก่

- การสะท้อน (reflection) ที่ผิวของตัวกลางที่ตกกระทบกลับสู่ตัวกลางเดิม
- การหักเห (refraction) ผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่แสงตกกระทบ
- แสงบางส่วนหรือทั้งหมดอาจเกิดการดูดกลืน (absorption) โดยตัวกลางนั้น

การสะท้อนแสงที่รอยต่อตัวกลาง

จากกฎการสะท้อนของเฟรสเนล (Fresnel's laws of reflection) สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflectance) ของแสงโพลาไรซ์ชนิด s และ ชนิด p (s-polarized และ p-polarized) หรือ r_s และ r_p ได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$r_s = \left[\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right]^2 \quad (2.24)$$

$$r_p = \left[\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \right]^2 \quad (2.25)$$

ถ้าแสงตกกระทบบนตั้งฉาก ($\theta=0$) จากอากาศสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง r จะมีค่า ดังนี้

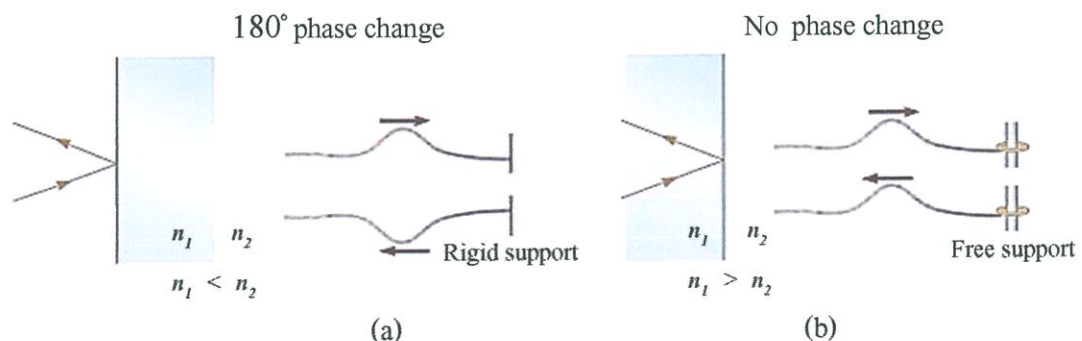
$$r = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (2.26)$$

จากสมการ(2.26) ถ้าแสงกระทบบนจากอากาศลงบนแผ่นแก้วที่มี $n=1.52$ จะได้ $r = 4\%$ จะเห็นว่า เมื่อมีแสงตกกระทบบนตั้งฉากกับผิวแก้วจะเกิดการสะท้อนประมาณ 4% เสมอ ในระบบเลนส์ (multi-element lens system) เช่น ในกล้องถ่ายรูป ถ้าไม่มีการป้องกันที่เหมาะสมแล้วจะเกิดการสะท้อนของแสงระหว่างผิวเลนส์สูงมากทำให้ภาพถ่ายที่ไม่คมชัด โดยทั่วไปแล้วเลนส์ของกล้องถ่ายรูปคุณภาพสูงจะทำการป้องกันการสะท้อน โดยการเคลือบเลนส์ด้วยสารป้องกันการสะท้อนแสงที่เรียกว่า การเคลือบป้องกันการสะท้อน (antireflection coating) ซึ่งอาศัยการแทรกสอดแบบหักล้าง

การสะท้อนของคลื่นแสง

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า (n_1) ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า (n_2) แสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองจะมีเฟสต่างจากคลื่นแสงที่ตกกระทบบนอยู่ 180° (มีการกลับเฟส) ในทางตรงข้าม ถ้าแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า (n_1) ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า (n_2) แสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองจะมีเฟสตรงกับคลื่นแสงที่ตกกระทบบน คือไม่มีการกลับเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ในขณะที่มีการสะท้อนของคลื่นจากรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง จะมีคลื่นส่วนหนึ่งหักเหผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองได้ คลื่นหักเหหนึ่งจะไม่มี การเปลี่ยนเฟสไม่ว่าตัวกลางที่สองจะมีดัชนีหักเหสูงหรือต่ำกว่าก็ตาม



รูปที่ 2.9 เฟสของคลื่นที่สะท้อนจากรอยต่อของตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกัน

การแทรกสอดในฟิล์มบาง

ปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกี่ยวกับการแทรกสอดของฟิล์มบางที่พบได้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ การสะท้อนแสงจากฟิล์มของน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำหรือการสะท้อนแสงจากฟองสบู่ จะพบว่าแสงที่สะท้อนจากฟิล์มน้ำมันและฟองสบู่จะเห็นเป็นสีรุ้ง ดังรูปที่ 2.10 สีรุ้งนี้เกิดจากการแทรกสอดกันของแสงที่สะท้อนจากผิวน้ำและผิวด้านหลังของฟิล์มบาง



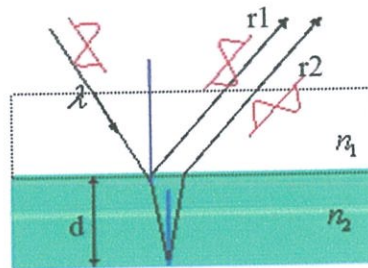
รูปที่ 2.10 แสงสีรุ้งที่สะท้อนจากฟองสบู่

พิจารณาฟิล์มบางที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ t มีดัชนีหักเห n สมมติว่าแสงตกกระทบบที่ผิวน้ำของฟิล์มบางจากด้านบนทำมุมน้อยๆ กับเส้นปกติ แสงสะท้อนจะเกิดที่ผิวน้ำและผิวด้านหลังของฟิล์มบาง แสงสะท้อนทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดกัน

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 แสงสะท้อนจะมีมุมเปลี่ยนไป 180° ถ้า $n_2 > n_1$ และจะไม่มีเปลี่ยนเฟสถ้า $n_2 < n_1$ อย่งแสงนอกจากนี้จะต้องพิจารณาความยาวคลื่นของแสงซึ่งจะมีค่าลดลงในตัวกลางใดๆ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นในอากาศ (สุญญากาศ) โดยความยาวคลื่นของแสงในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n คือ λ_n มีค่า

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad (2.27)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นในสุญญากาศ



รูปที่ 2.11 แสงสะท้อนจากผิวด้านบนและด้านล่างของฟิล์มบาง

พิจารณาการสะท้อนของแสงจากผิวด้านบนและด้านล่างของฟิล์มบางในรูปที่ 2.11 เมื่อแสงเดินทางจากอากาศสะท้อนที่ผิวด้านบนของฟิล์มที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า แสงสะท้อนจะมีการกลับเฟส 180° แสงที่เดินทางผ่านเนื้อฟิล์มจะมีเฟสตรงกับแสงตกกระทบ เมื่อสะท้อนที่ผิวด้านล่างของฟิล์มจะไม่มี การกลับเฟส เนื่องจากการสะท้อนจากผิวที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า และเมื่อแสงสะท้อนนี้เดินทางผ่านเนื้อฟิล์มออกสู่อากาศซึ่งไม่มีการเปลี่ยนเฟส ดังนั้น ลำแสง 1 และ 2 จึงมีเฟสต่างกัน 180° เมื่อแสงทั้งสองลำเกิดการแทรกสอดกันจะเกิดแทรกสอดแบบเสริมเมื่อ

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_n \quad (2.28)$$

เนื่องจาก $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad ; m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.29)$$

ถ้าความหนาของฟิล์มมีค่าทำให้ $2t$ เท่ากับจำนวนเต็ม λ_n (ผลต่างเฟสเนื่องจากความต่างของเส้นทางเดินแสงเท่ากับ 0) ลำแสง 1 และ ลำแสง 2 จะยังคงมีเฟสต่างกัน 180° เหมือนเดิม จึงเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ดังนั้นการแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2nt = m\lambda \quad ; m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.30)$$

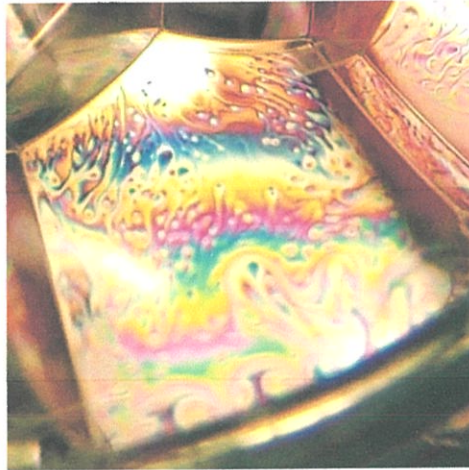
การแทรกสอดแบบเสริมและแบบหักล้างดังกล่าวข้างต้นนี้เป็นจริงเมื่อตัวกลางที่ด้านบนและด้านล่างฟิล์มเป็นตัวกลางชนิดเดียวกัน ตัวกลางนี้อาจมีดัชนีหักเหสูงหรือต่ำกว่าดัชนีหักเหของฟิล์ม ผลของการสะท้อนจะทำให้แสงสะท้อนมีเฟสต่างกัน 180° เสมอ

ถ้าฟิล์มอยู่ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหไม่เท่ากัน ตัวกลางที่มี $n < n_{\text{film}}$ และอีกตัวกลางหนึ่งมี $n > n_{\text{film}}$ สถานะการแทรกสอดแบบเสริมและแบบหักล้างจะเกิดตรงข้ามกับกรณีข้างต้น ในกรณีแสงสะท้อนจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° เมื่อเทียบกับแสงตกกระทบทั้งที่สะท้อนจากผิวด้านบนและด้านล่าง ดังนั้นผลของการสะท้อนทำให้ลำแสง 1 และ 2 ยังคงมีเฟสตรงกัน



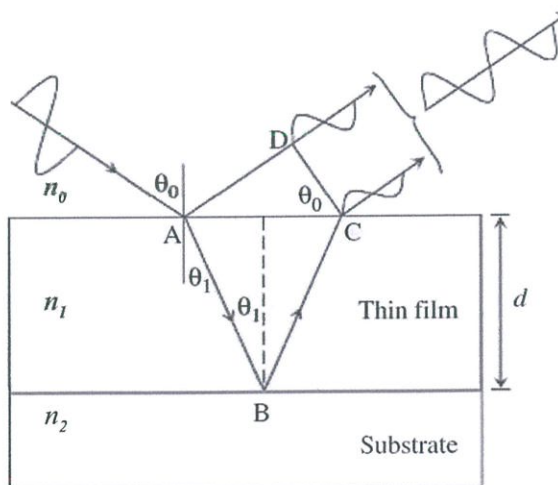
รูปที่ 2.12 เลนส์กล้องถ่ายรูปที่เคลือบด้วยฟิล์มกันแสงสะท้อนจะเห็นเป็นสีม่วง

เลนส์กล้องถ่ายรูปที่เคลือบด้วยฟิล์มกันสะท้อนหลายชั้น ฟิล์มแต่ละชั้นมีความหนาต่างกัน สำหรับแต่ละความยาวคลื่น จะช่วยลดการสะท้อนของแสงในย่านตามองเห็น เป็นผลทำให้แสงที่สะท้อนจากเลนส์เป็นแสงในช่วงความยาวคลื่นทางด้านปลายของสเปกตรัมแสงที่ตามองเห็น (ย่านแสงสีม่วงและแสงสีแดง) ทำให้มองเห็นเลนส์เป็นสีม่วง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.13 การแทรกสอดในฟิล์มบาง

ริ้วแทรกสอดที่เกิดจากการที่แสงขาวตกกระทบฟิล์มของฟองสบู่ จะมีการเปลี่ยนสีตลอดเวลา เนื่องจากความหนาของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ดังรูปที่ 2.13 การแทรกสอดในฟิล์มบาง

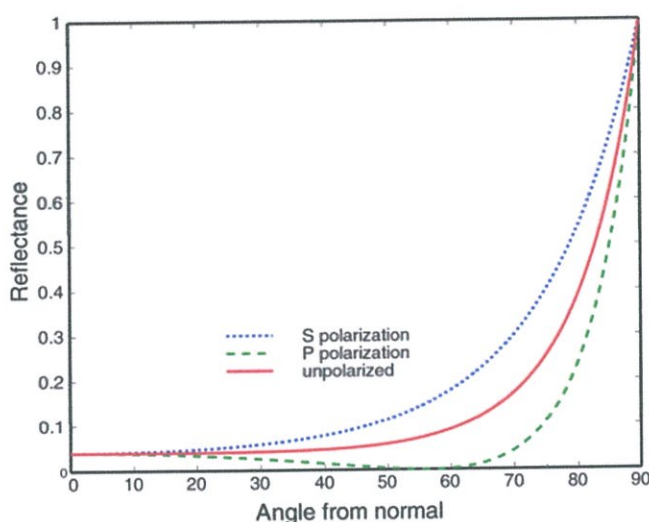


รูปที่ 2.14 การแทรกสอดของแสงในฟิล์มบางบนฐานรอง

รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบโครงสร้างของฟิล์มบางบนฐานรอง (อากาศ/ฟิล์มบาง/ฐานรอง) รูปแบบถูกแทนที่ด้วยดัชนีหักเหเชิงซ้อน และความหนาของฟิล์มบาง ให้ n_0 , n_1 และ n_2 คือดัชนีหักเหเชิงซ้อนของอากาศ ฟิล์มบาง และฐานรองตามลำดับ เมื่อแสงตกกระทบในฟิล์มบางน้อย คลื่นตกกระทบจะสะท้อนที่บริเวณพื้นผิวฟิล์มบางและฐานรอง ในกรณีนี้คลื่นแสงที่สะท้อนตอนแรกจะซ้อนทับกันกับคลื่นแสงที่สะท้อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างฟิล์มบางและฐานรอง ทำให้เกิดการแทรกสอดเกิดขึ้น

การสะท้อนของแสงโพลาไรซ์

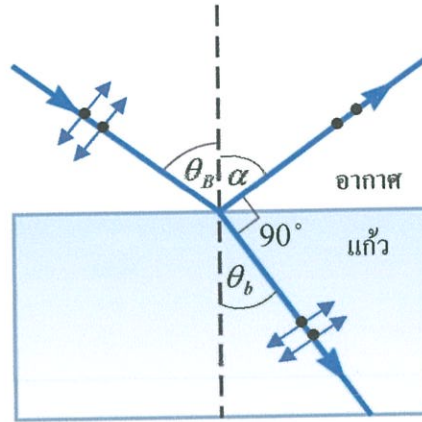
จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงโพลาไรซ์ชนิด s และ p ที่มุมตกกระทบต่างๆ มีลักษณะดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงโพลาไรซ์ชนิด s ชนิด p และแสงไม่โพลาไรซ์ ที่มุมตกกระทบต่าง

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าแสงโพลาไรซ์ชนิด s และ p จะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนประมาณ 4% (0.04) ตั้งแต่มุมตกกระทบ 0° ถึงมุมตกกระทบ 25° และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนเพิ่มขึ้นเป็น 100% ที่มุมตกกระทบ 90° ที่มุมตกกระทบระหว่าง 25° ถึง 90° แสงโพลาไรซ์ชนิด s จะสะท้อนแสงได้ดีกว่าแสงโพลาไรซ์ชนิด p ที่มุม 59° จะไม่มีการสะท้อนของแสงโพลาไรซ์ชนิด p เลย (แสงทั้งหมดจะหักเหผ่านตัวกลาง) ดังนั้นที่มุมตกกระทบนี้ แสงสะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิด s เท่านั้น มุมตกกระทบนี้เรียกว่ามุมบริวสเตอร์ (Brewster's angle) ส่วนแสงหักเหจะมีทั้งแสงโพลาไรซ์ชนิด s และ p

ในกรณีที่แสงตกกระทบเป็นแสงไม่โพลาไรซ์คือแสงที่ประกอบด้วยแสงโพลาไรซ์ชนิด s และชนิด p โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงไม่โพลาไรซ์จึงมีลักษณะผสมระหว่างแสงโพลาไรซ์ชนิด s และชนิด p ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (เส้นกลาง) เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบทำมุมบรีวสเตอร์แสงสะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิด s ส่วนแสงหักเหจะมีทั้งแสงโพลาไรซ์ชนิด s และชนิด p ดังรูปที่ 2.16



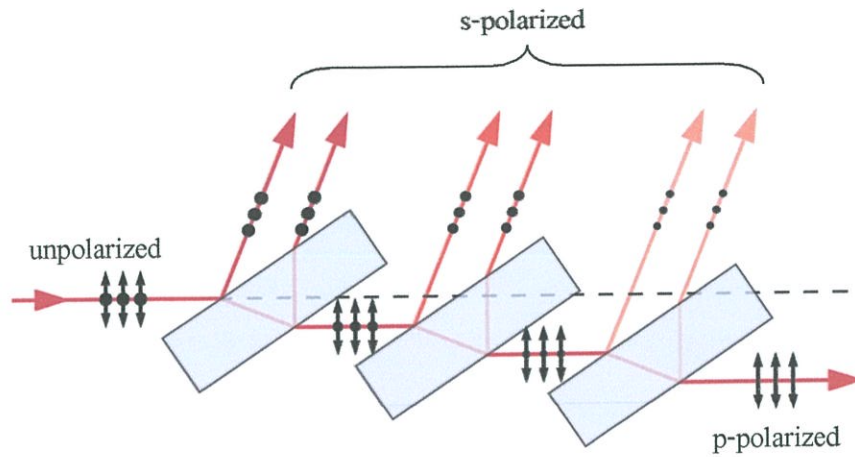
รูปที่ 2.16 เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบทำมุมบรีวสเตอร์แสงสะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิด s

ที่มุมบรีวสเตอร์แสงสะท้อนและแสงหักเหจะตั้งฉากกัน ($\theta_B + \theta_b = 90^\circ$)

$$\tan \theta_B = \frac{n_b}{n_a} \quad (2.31)$$

เนื่องจากการสะท้อนเกิดจากที่สนามไฟฟ้าของแสงทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวสั่นแล้วเปล่งแสงออกมาเป็นแสงสะท้อน ด้วยเหตุนี้แสงโพลาไรซ์ s ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวแกว่งได้มากกว่า ดังนั้นแสงโพลาไรซ์ชนิด s จึงสะท้อนได้ดีกว่าโพลาไรซ์ชนิด p (ดูรูปที่ 2.16) องค์ประกอบสนามไฟฟ้าของแสงที่ไม่ทำให้อิเล็กตรอนสั่น พลังงานของแสงไม่ถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอน จะหักเหผ่านตัวกลาง ดังนั้นแสงโพลาไรซ์ชนิด p จึงมีการหักเหเข้าสู่ตัวกลางได้ดีกว่าและแสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนไป

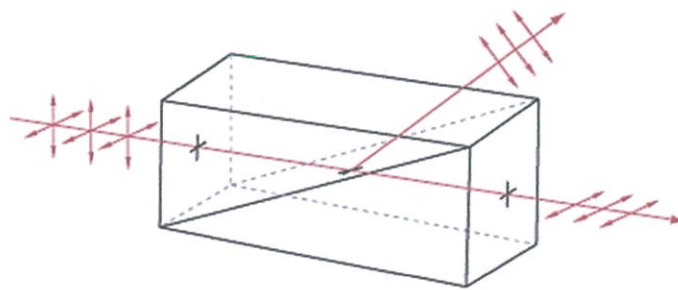
ที่มุมบรีวสเตอร์ทิศทางของแสงสะท้อนจะอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์ชนิด p จึงไม่ปรากฏว่าแสงโพลาไรซ์ชนิด p สะท้อนที่มุมบรีวสเตอร์นี้ โดยการคิดแผ่นแก้วทำมุมบรีวสเตอร์ สามารถทำให้แสงเลเซอร์เป็นแสงโพลาไรซ์ชนิด p ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การสะท้อนและการหักเหของแสงทำให้เกิดโพลาไรซ์ชนิด p

รูปที่ 2.17 แสดงการสะท้อนและหักเหแสงที่ผ่านแก้วหลายแผ่น สมมติว่าแสงโพลาไรซ์ชนิด s จะสะท้อนที่ผิวของแผ่นแก้วแต่ละครั้งมีค่าประมาณ 14% เมื่อแสงผ่านกระจกแผ่นแรกแสงหักเหยังมีเปอร์เซ็นต์ของการโพลาไรซ์ชนิด s อยู่สูง แสงหักเหจึงไม่เป็นแสงโพลาไรซ์ จะต้องทำการสะท้อนหลายครั้งจะได้แสงหักเหที่เป็นโพลาไรซ์ชนิด p 100% ในทางปฏิบัติจะใช้แผ่นแก้วแผ่นเดียวแต่ทำการเคลือบฟิล์มบางไว้หลายชั้น

อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่ทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์โดยใช้หลักการสะท้อนและหักเหของแสง ได้แก่ Gian-Thompson Polarizing Beamsplitter จะทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์ชนิด p และ s ในทิศที่ตั้งฉากกันดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 Gian-Thompson Polarizing Beamsplitter ใช้หลักการสะท้อนและหักเหของแสงทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์ชนิด p และ s

Degree of Polarization

Degree of Polarization (P) เป็นค่าคงที่แสดงความเป็นโพลาไรซ์ของแสงโดย

$$P = \frac{I_p - I_s}{I_p + I_s} \quad (2.32)$$

เมื่อ I_p และ I_s คือค่าความเข้มของแสงโพลาไรซ์ชนิด p และ s ตามลำดับ

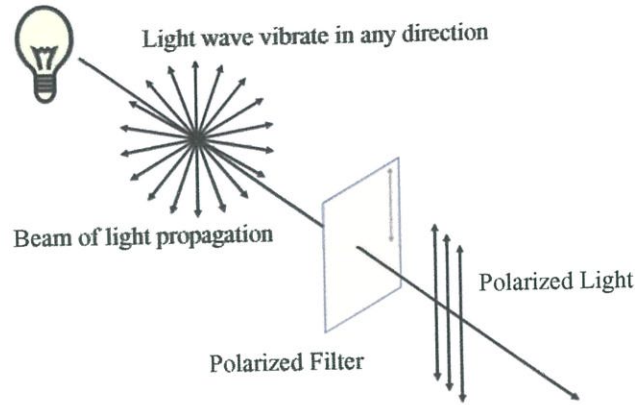
ถ้าเป็นไม่โพลาไรซ์จะมีค่าความเข้มแสงชนิด p และ s มีค่าเท่ากัน ($I_p = I_s$) จะได้ว่า $P=0$ ในกรณีของแสงโพลาไรซ์ชนิด p ความเข้มของแสงโพลาไรซ์ชนิด s จะมีค่าเป็นศูนย์ ($I_s = 0$) จะได้ว่า $P=1$

การสะท้อนของแสงโพลาไรซ์เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่าแสดงดังรูปที่ 2.18 แสงโพลาไรซ์ชนิด p จะไม่มีการสะท้อนที่มุมบริวสเตอร์เช่นกัน แสงโพลาไรซ์ชนิด p และ s จะสะท้อนกลับหมดที่จุดวิกฤติ

2) การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการดูดกลืน (absorption or dichroism)

Dichroism เป็นสมบัติที่วัสดุเลือกดูดกลืนแสงเฉพาะแนวใดแนวหนึ่งของแสงโพลาไรซ์โดยให้อีกแนวหนึ่งสามารถทะลุผ่านไปได้ คล้ายกับคลื่นในเส้นเชือกที่สามารถเดินทางผ่านช่องเปิดแคบๆ ได้เมื่อคลื่นในเส้นเชือกแกว่งในแนวเดียวกับช่องเปิดนั้นและจะผ่านไม่ได้ถ้าแกว่งในแนวขวางกับช่องเปิด ดังรูปที่ 2.19 เมื่อแสงเดินทางผ่านวัสดุบางชนิด แนวโพลาไรซ์ของแสงบางแนวจะถูกดูดกลืนในขณะที่แนวโพลาไรซ์บางแนวที่ตั้งฉากกันจะสามารถทะลุผ่านไปได้โดยไม่ถูกดูดกลืน

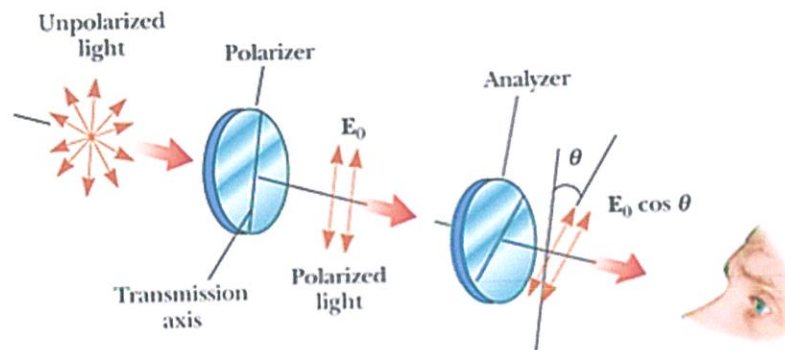
แผ่นโพลาไรซ์หรือโพลาไรเซอร์ (polarized plate or polarizer) เป็นตัวอย่างหนึ่งของวัสดุ dichroic (dichroic material) ทำจากสารอินทรีย์ (organic material) ที่มีโมเลกุลเป็นสายยาวคล้ายโครงสร้างแสงที่มีแนวโพลาไรซ์ในทิศทางเดียวกับแนวยาวของโมเลกุลจะดูดกลืน ส่วนแนวโพลาไรซ์ในทิศตั้งฉากกับแนวยาวของโมเลกุลจะสามารถผ่านไปได้โดยไม่ถูกดูดกลืน ดังนั้นแสงที่ผ่านโพลาไรซ์จึงมีแนวโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแนวโมเลกุลของแผ่นโพลาไรซ์จะเรียกแกนที่ตั้งฉากกับแนวโมเลกุลของแผ่นโพลาไรซ์หรือแกนที่ให้แสงโพลาไรซ์ผ่านได้ว่า แกนโพลาไรซ์ (polarizing axis หรือ transmission axis) ดังนั้นแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์จะมีแนวโพลาไรซ์ขนานกับแกนโพลาไรซ์



รูปที่ 2.19 ในความจริงแสงโพลาไรซ์ในแนวตั้งฉากกับแนวโมเลกุลจะไม่ถูกดูดกลืน และสามารถผ่านแผ่นโพลาไรซ์ได้

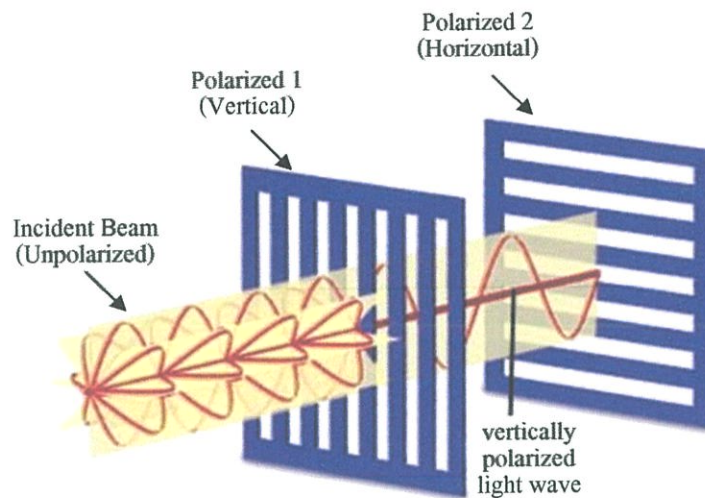
ถ้าแสงโพลาไรซ์ตกทำมุม θ กับแกนโพลาไรซ์ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงที่ถูกแตกมาขนานกับแนวแกนโพลาไรซ์คือ $E_0 \cos \theta$ ดังรูปที่ 2.20 ดังนั้น ความเข้มแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์จะมีค่าดังนี้

$$I = E_0^2 \cos^2 \theta = I_0 \cos^2 \theta \quad \text{Malus' Law} \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.20 แนวโพลาไรซ์ของแสงทำมุม θ กับแกนโพลาไรซ์ของโพลาไรเซอร์ องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่ผ่านแอนาไลเซอร์ มีค่า $E_0 \cos \theta$

ถ้าวางแกนโพลาไรซ์ของแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นทำมุมกัน ความเข้มแสงจะลดลงคำนวณได้โดยกฎของมาลุส เมื่อแกนโพลาไรซ์ของแผ่นโพลาไรซ์สองแผ่นทำมุมกัน 90° แสงจะผ่านแผ่นโพลาไรซ์นี้ไม่ได้ แต่ถ้าแทรกแผ่นโพลาไรซ์โดยแกนโพลาไรซ์ทำมุม 45° ระหว่างแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองนี้แสงจะผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21

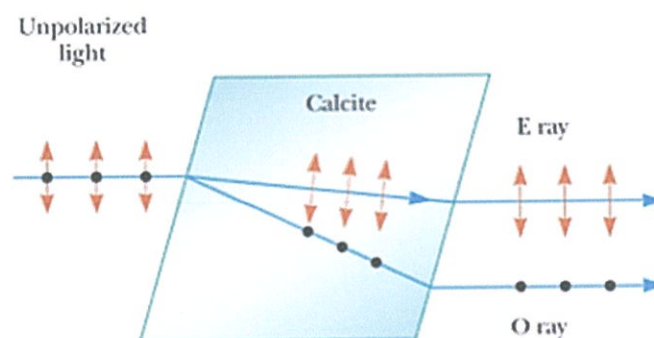


รูปที่ 2.21 การแกนโพลาไรซ์ของโพลาไรเซอร์และอนาไลเซอร์ตั้งฉากกัน

3) ทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยวัสดุที่มีสมบัติ Double Refraction หรือ Birefringence

วัสดุที่มีสมบัติ Double Refraction หรือ Birefringence คือวัสดุที่มีดัชนีหักเหสองค่า กล่าวคือดัชนีหักเหของวัสดุมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าของแสง เมื่อเดินทางผ่านเข้าสู่เนื้อวัสดุ โดยจะมีดัชนีหักเหค่าหนึ่งสำหรับสนามไฟฟ้าของแสงที่แกว่งในแนวหนึ่ง และจะมีค่าดัชนีหักเหเป็นอีกค่าหนึ่งสำหรับแสงที่มีสนามไฟฟ้าแกว่งในแนวตั้งฉาก

เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ซึ่งพิจารณาได้ว่าประกอบด้วยแสงโพลาไรซ์สองแนวที่ตั้งฉากกัน เมื่อเดินทางผ่านวัสดุ birefringence แสงทั้งสองจะหักเหไปเป็นมุมที่ต่างกัน หรือถ้าแสงไม่โพลาไรซ์ตกตั้งฉากกับพื้นผิววัสดุ birefringence แสงจะถูกแยกออกเป็นแสงโพลาไรซ์สองลำ ที่มีแนวโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน โดยแสงหนึ่งจะไม่หักเห เรียกว่า ordinary ray หรือ o-ray ส่วนอีกลำหนึ่งจะหักเหออกจากแนวแสงตกกระทบ เรียกว่า extraordinary ray หรือ e-ray ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ผลึก birefringence จะแยกแสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์สองลำ

ผลึกที่มีสมบัติ birefringence ได้เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่สมมาตร ทำให้แสงที่มีการแกว่งของสนามไฟฟ้าในทิศทางที่ตั้งฉากกันมองเห็นโครงสร้างผลึกที่ต่างกัน ดัชนีหักเหเป็นค่าที่ขึ้นกับ

โครงสร้างทางผลึกของวัสดุ ดังนั้นในทิศทางที่ต่างกันจึงมีค่าต่างกัน เป็นผลให้แสงหักเหออกจากกันด้วยมุมค่าหนึ่ง

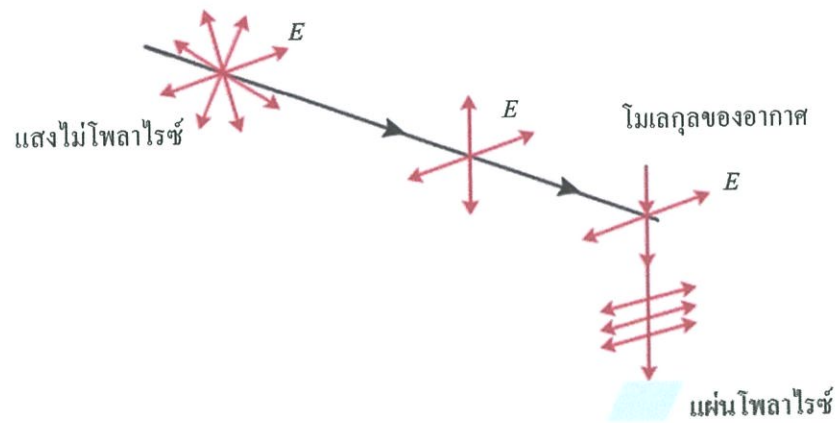
ถ้าแสงหักเหออกจากกันเป็นมุมไม่มากพอหรือผลึกมีความหนาไม่มากนัก แสงโพลาไรซ์ทั้งสองลำจะยังคงมีบางส่วนที่ซ้อนทับกัน แสงส่วนที่ซ้อนทับกันจะมีโพลาไรซ์ทั้งสองแนว นั่นคือยังคงเป็นแสงไม่โพลาไรซ์อยู่บางส่วน รูปที่ 2.23 (ซ้าย) แสงไม่โพลาไรซ์เมื่อผ่านผลึกที่มีโครงสร้างสมมาตร (optically isotropic) เช่นผลึกเกลือ sodium chloride ซึ่งมีดัชนีค่าเดียว แสงจะไม่แยกเป็นสองลำ ส่วนรูปทางด้านขวาเป็นผลึก calcite ซึ่งเป็นวัสดุ birefringence มีโครงสร้างไม่สมมาตร (optically anisotropic) แสงจะแยกเป็นสองลำ แสดงการสังเกตแสง o-ray และ e-ray ผ่านแผ่นโพลาไรซ์



รูปที่ 2.23 ผลึก sodium chloride (ซ้าย) และผลึก calcite (ขวา)

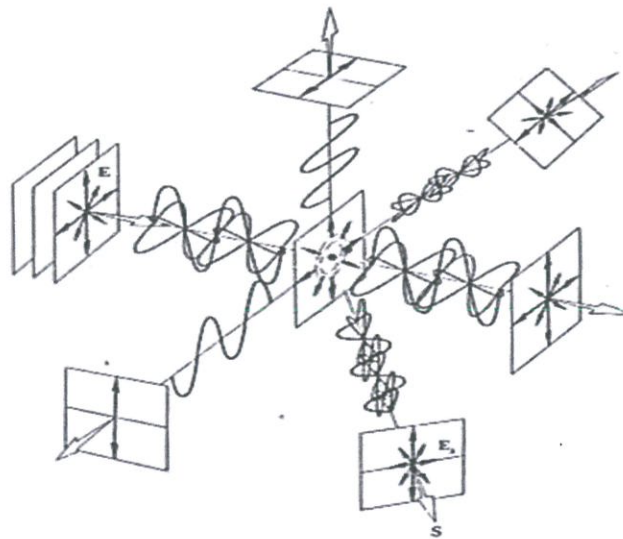
4) การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการกระเจิง (Scattering)

การกระเจิงของแสงเกิดจากแสงตกกระทบ โมเลกุลของอากาศ อนุภาคน้ำหรือฝุ่นละอองในอากาศหรือสารแขวนลอยในน้ำที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง สนามไฟฟ้าของแสงจะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมเกิดการแกว่งในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่สั่นเหล่านี้จะคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแสง เรียกว่าเกิดการกระเจิงของแสง แสงจะเดินทางออกจากอะตอมในทุกทิศทางที่ตั้งฉากกับการสั่นของอิเล็กตรอนและสนามไฟฟ้าของแสงที่กระเจิงนี้จะมี การแกว่งในทิศทางเดียวกับการสั่นของอิเล็กตรอนด้วย นั่นคือมีทิศทางตั้งฉากกับแสงตกกระทบด้วยเสมอ ดังนั้นแสงที่กระเจิงนี้จึงเป็นแสงโพลาไรซ์เสมอ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 เมื่อแสงตกกระทบเป็นแสงไม่โพลาไรซ์แสงที่เกิดจากการกระเจิงในระนาบ yz เป็นแสงโพลาไรซ์

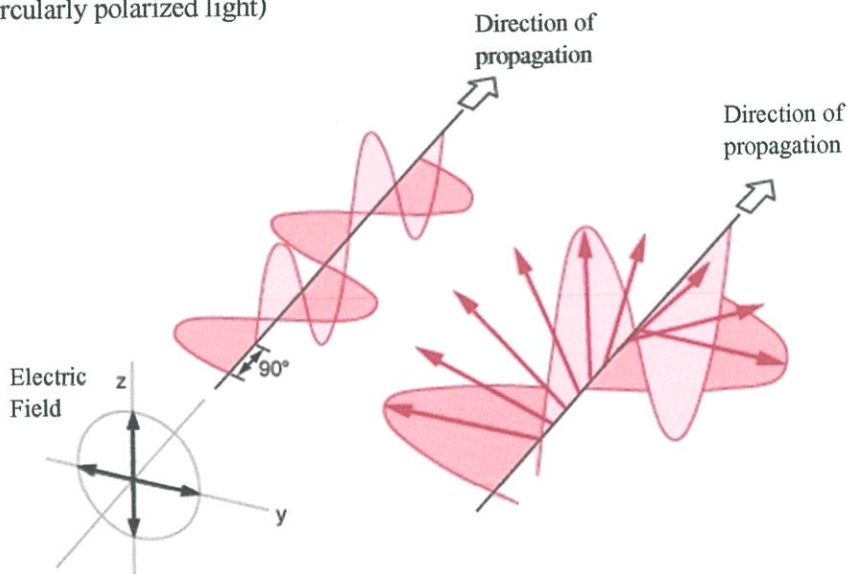
ในกรณีที่แสงตกกระทบเป็นแสงโพลาไรซ์ แสงที่กระเจิงเป็นแสงโพลาไรซ์และมีทิศทางในแกนใดแกนหนึ่งเท่านั้นขึ้นอยู่กับแนวโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบ โดยทิศทางของแสงกระเจิงจะต้องเป็นทิศทางที่ทำให้สนามไฟฟ้าหรือแนวโพลาไรซ์ของแสงกระเจิงขนานกับทิศทางของสนามไฟฟ้าหรือแนวโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบเท่านั้น



รูปที่ 2.25 ทิศทางและสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่กระเจิงที่เกิดจากแสงตกกระทบที่เป็นแสงไม่โพลาไรซ์

2.2.3 โพลาริซเซชันวงรี (Elliptical polarization)

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงแสงโพลาริซเซชันเส้น ซึ่งมีสนามไฟฟ้าอยู่บนระนาบใดระนาบหนึ่งเท่านั้น ในบางกรณีแสงอาจมีสนามไฟฟ้าอยู่ในสองระนาบที่ตั้งฉากกัน ถ้าสนามไฟฟ้าของแต่ละระนาบมีเฟสตรงกันและมีแอมพลิจูดเท่ากันจะกล่าวได้ว่าเป็นแสงโพลาริซเซชันเส้น แต่ถ้าสนามไฟฟ้าในระนาบทั้งสองมีเฟสต่างกัน 90° โดยที่สนามไฟฟ้าทั้งสองมีแอมพลิจูดเท่ากัน เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้ารวมจะหมุนเป็นวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.26 เรียกว่า แสงโพลาริซเซชันวงกลม (circularly polarized light)



รูปที่ 2.26 สนามไฟฟ้าของแสงโพลาริซเซชันวงกลม

สนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y (อยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกัน) ที่มีแอมพลิจูดเท่ากันและมีเฟสต่างกัน 90° สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_x = iE_0 \cos(kz - \omega t) \quad (2.34a)$$

$$E_y = jE_0 \sin(kz - \omega t) \quad (2.34b)$$

เมื่อ i และ j เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

สนามไฟฟ้ารวมสามารถเขียนได้ดังนี้

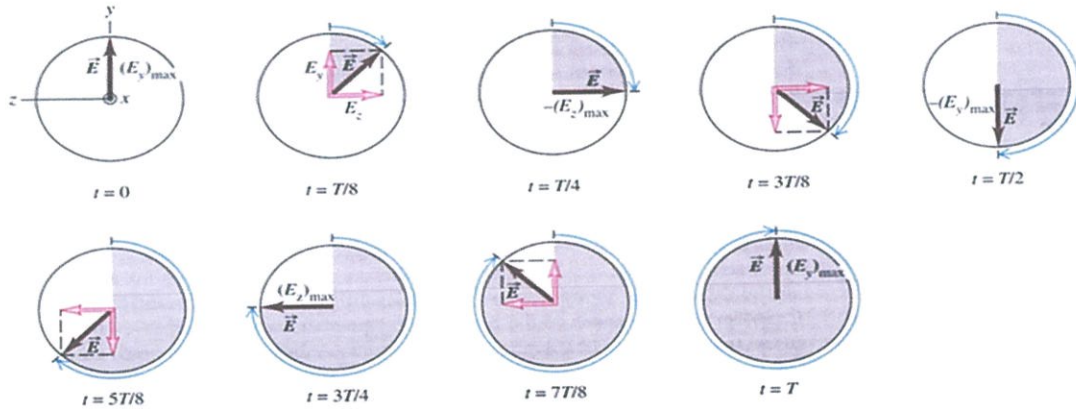
$$\begin{aligned} E &= E_x + E_y \\ &= E_0 [i \cos(kz - \omega t) + j \sin(kz - \omega t)] \end{aligned} \quad (2.35)$$

ถ้าพิจารณาที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง $kz = 0$ (ที่ $z = 0$) จะได้ว่า

$$E = E_0 [i \cos \omega t - j \sin \omega t] \quad (2.36)$$

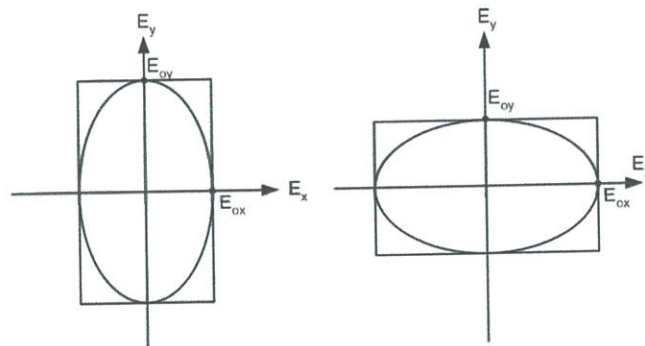
จากสมการ (2.36) พบว่าสนามไฟฟ้ารวมมีทิศทางเปลี่ยนไปตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.27 จะเห็นว่า สนามไฟฟ้ามีการหมุนตามเข็มนาฬิกา ถ้าแสงเดินทางในทิศทาง z (พุ่งออกจากกระดาษ)

จะเห็นสนามไฟฟ้าของแสงนี้หมุนเป็นวงกลมตามเข็มนาฬิกาด้วยความถี่ ω โดยมีแอมพลิจูด E_0 เรียกว่า แสงที่มีสถานะโพลาไรซ์เช่นนี้ว่า แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมหมุนขวา (right circularly polarized light)



รูปที่ 2.27 สนามไฟฟ้ารวมของคลื่นมีทิศทางที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

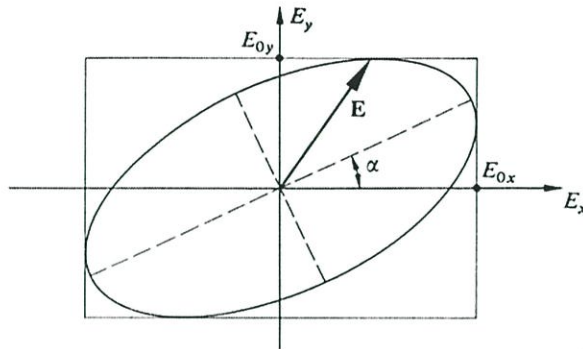
ในกรณีที่สองของสมการ (2.36) มีเครื่องหมายตรงข้าม (มีเฟสต่างไป π) สนามไฟฟ้าของแสงนี้จะหมุนเป็นวงกลมทวนนาฬิกาด้วยความถี่ ω โดยมีแอมพลิจูด E_0 แสงที่มีสถานะของการโพลาไรซ์ เรียกว่า แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมหมุนซ้าย (left circularly polarized light) และถ้าแอมพลิจูดของคลื่นในแต่ละระนาบมีขนาดไม่เท่ากัน ($E_{ox} \neq E_{oy}$) สนามไฟฟ้ารวมจะหมุนเป็นวงรี เรียกว่าแสงโพลาไรซ์เชิงวงรี (elliptical polarized light) ซึ่งมีแบบหมุนซ้ายและหมุนขวาเช่นกัน



รูปที่ 2.28 แกนหลักและแกนรองของวงรีขนานกับแกน x และ y

กรณีของเฟสของสนามไฟฟ้าระหว่างระนาบทั้งสองต่างกัน $\pi/2 (90^\circ)$ นี้วงรีจะมีแกนหลักและแกนรอง (major และ minor axes) ขนานกับแกน x และ y ดังรูปที่ 2.28 ถ้าสนามไฟฟ้าในระนาบทั้งสองมีเฟสต่างกัน ϕ (ϕ ไม่เท่ากับ $\pi/2$) แกนหลักของวงรีจะทำมุม α กับแกน x ดังรูปที่ 2.29 โดย α มีค่าดังสมการ(2.37)

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{(E_{ox} E_{oy} \cos \phi)}{(E_{oy}^2 - E_{ox}^2)} \right] \quad (2.37)$$



รูปที่ 2.29 แกนหลักของวงรีทำมุม α กับแกน x

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่า ทั้งโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์เชิงวงกลม เป็นกรณีพิเศษของโพลาไรซ์เชิงวงรีทั้งสิ้น โดยกรณีของโพลาไรซ์ก็คือโพลาไรซ์เชิงวงรีที่สนามไฟฟ้าในระนาบใดระนาบหนึ่งเป็นศูนย์ (เช่น $E_y = 0$) ส่วนโพลาไรซ์เชิงวงกลมก็คือโพลาไรซ์เชิงวงรีที่แอมพลิจูดในระนาบทั้งสองมีขนาดเท่ากัน ($E_{ox} = E_{oy}$)

2.2.4 Jones Matrix

เมทริกซ์ที่เป็นตัวแทนเราเรียกว่า “Jones Matrix” ซึ่งเป็นคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายเครื่องมือทางแสง ถ้าเราประยุกต์ Jones Matrix เราสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซ์ของแสงจากการคำนวณของเมทริกซ์ เมื่อเรามีองค์ประกอบเครื่องทางแสงหลายอย่าง เมื่อเราอธิบายเครื่องมือวัดออลลิปโซมิเตอร์ด้วยคณิตศาสตร์ กล่าวในอีกด้านหนึ่ง Jones vector ใช้เมื่อเราต้องการอธิบายสถานะโพลาไรซ์ที่ประกอบไปด้วย โพลาไรซ์เชิงเส้น และโพลาไรซ์เชิงวงรี ซึ่งในบทนี้เราจะอธิบายที่มาของ Jones vector และ matrix เพื่อให้เข้าใจเครื่องมือวัดออลลิปโซมิตรมากขึ้น

1) Jones vector

สถานะโพลาไรเซชันของแสงจะถูกแทนที่โดยการซ้อนทับของคลื่นสองขบวนที่มีการสั่นขนานกันในแกน x และ y Jones vector ถูกนิยามโดย เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในทิศทางแกน x และ y ซึ่ง jones vector สามารถเขียนได้เป็น

$$E(z,t) = \begin{bmatrix} E_{x0} \exp\{i(\omega t - Kz + \delta_x)\} \\ E_{y0} \exp\{i(\omega t - Kz + \delta_y)\} \end{bmatrix} = \exp\{i(\omega t - Kz)\} \begin{bmatrix} E_{x0} \exp(i\delta_x) \\ E_{y0} \exp(i\delta_y) \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

โดยปกติ สมการด้านบนเราจะไม่สนใจเทอมของ $\exp\{i(\omega t - Kz)\}$

$$E(z, t) = \begin{bmatrix} E_{x0} \exp(i\delta_x) \\ E_{y0} \exp(i\delta_y) \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบอย่างง่ายดังนี้

$$E(z, t) = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

เมื่อ $E_x = E_{x0} \exp(i\delta_x) = |E_x| \exp(i\delta_x) \quad (2.41a)$

$$E_y = E_{y0} \exp(i\delta_y) = |E_y| \exp(i\delta_y) \quad (2.41b)$$

ในสมการ (2.45) เราเปลี่ยนรูปแบบโดยใช้ สมการ (2.18) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$E_x = E_{x0} \exp[(\delta_x - \delta_y)] = |E_x| \exp[(\delta_x - \delta_y)] \quad (2.42a)$$

$$E_y = E_{y0} = |E_y| \quad (2.42b)$$

ความเข้มแสงจะเป็น

$$I = I_x + I_y = E_{x0}^2 + E_{y0}^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 = E_x E_x^* + E_y E_y^* \quad (2.43)$$

Jones vector โดยปกติจะอธิบายด้วยความเข้มแสงนอลมอลไลท์ ($I = 1$) ซึ่งในกรณีนี้ โพลาริซเซชันเส้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_{linear,x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad E_{linear,y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

ถ้าแสงโพลาริซเซชันทำมุม 45° สามารถเขียนได้เป็น

$$E_{+45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

กล่าวในอีกด้านหนึ่ง โพลาริเซชันเชิงวงกลมแบบหมุนซ้าย (E_R) และ โพลาริเซชันเชิงวงกลมแบบหมุนขวา (E_L) สามารถเขียนได้เป็น

$$E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad E_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2) Transformation of coordinate system

ในการวัดของอิลลิปโซเมทรี โพลาริเซอร์หรือคอมเพนเซเนเตอร์ จะถูกติดตั้งให้หมุนซึ่งมีความสัมพันธ์กับแกน x และ y ถ้าเราหมุนระนาบ $x-y$ ด้วยตัวมันเองโดยใช้การเปลี่ยนรูปแบบทางคณิตศาสตร์ เราสามารถทำให้สมการง่ายขึ้น ในระนาบ $x' - y'$ จุด P สามารถเขียนได้เป็น

$$E_{x'} = E_x \cos\alpha + E_y \sin\alpha \quad (2.47a)$$

$$E_{y'} = -E_x \sin\alpha + E_y \cos\alpha \quad (2.47b)$$

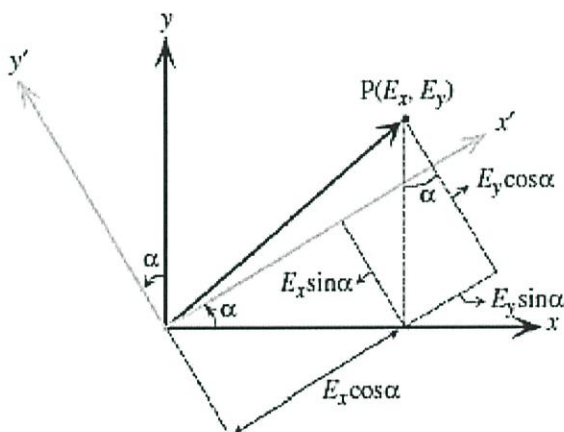
เมื่อ α คือมุมที่หมุนไปของระนาบ $x' - y'$ สมการ (3.15) สามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

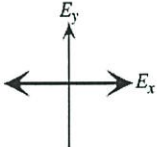
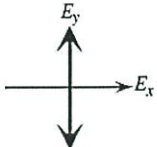
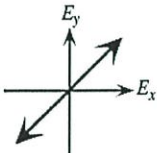
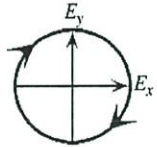
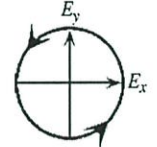
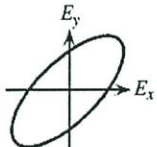
จากสมการ (2.52) จะได้เมทริกซ์แทนการหมุนของระนาบ

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad R(-\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$R(-\alpha)$ สอดคล้องกับเมทริกซ์เมื่อระนาบพิกัด หมุนตามเข็มนาฬิกา ซึ่งสามารถหาได้จาก $R(\alpha)$ ตอนนี้เราสมมติจุด (E_x, E_y) ในรูปที่ 2.30 คือโจนส์เวกเตอร์ ในกรณีนี้โจนส์เวกเตอร์ (E_x, E_y) เปลี่ยนระนาบเป็น $(E_{x'}, E_{y'})$ โดยการหมุนระนาบพิกัด



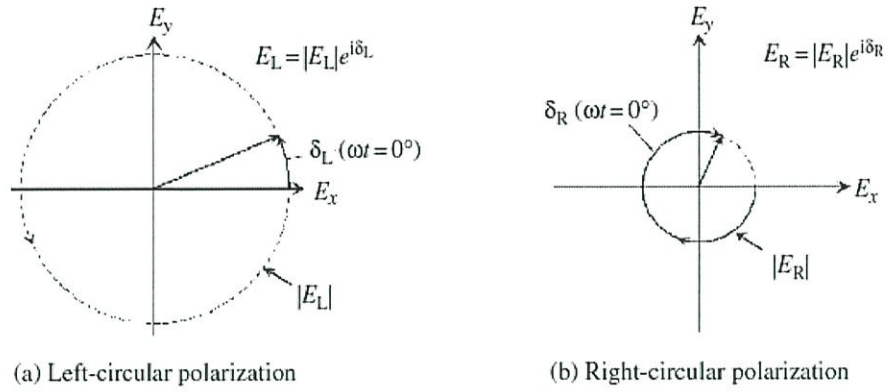
รูปที่ 2.30 การเปลี่ยนระนาบจาก $x-y$ เป็นระนาบ $x' - y'$ โดยการหมุนระนาบ

Linear polarization parallel to x axis		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Linear polarization parallel to y axis		$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Linear polarization oriented at 45°		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Right-circular polarization		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$
Left-circular polarization		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$
Elliptical polarization		$\begin{bmatrix} \sin \psi \exp(i\Delta) \\ \cos \psi \end{bmatrix}$

รูปที่ 2.31 แสดงเวกเตอร์ของสถานะโพลาไรซ์ต่างๆ

สถานะของโพลาไรเซชันสามารถอธิบายได้จากผลลัพท์เวกเตอร์ของ โพลาไรเซชันเชิงวงกลมแบบหมุนซ้ายและหมุนขวา รูปที่ 2.32 แสดงโพลาไรเซชันเชิงวงกลมหมุนซ้ายและหมุนขวา โดยใช้ระนาบโพลาไรซ์ ดังที่แสดงในรูป 2.32 โพลาไรเซชันเชิงวงกลมหมุนซ้าย (E_L) และโพลาไรเซชันเชิงวงกลมหมุนขวา (E_R) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_L = |E_L| \exp(i\delta_L) \quad E_R = |E_R| \exp(i\delta_R) \quad (2.50)$$



รูปที่ 2.32 แสดงสถานะโพลาไรซ์เชิงวงกลมแบบหมุนซ้ายและหมุนขวา

เมื่อ $|E|$ และ δ แทนขนาดของวงกลมและเฟส เมื่อ $\omega t = 0^\circ$ ตามลำดับ

$$E = \begin{bmatrix} E_L \\ E_R \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

ระบบพิกัดเชิงขั้วใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์โพลาไรเซชันสามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบคาร์ทีเซียนแสดงในรูปที่ 2.32

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_L \\ E_R \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

จากสมการ (2.52) เปลี่ยนระนาบจากระบบพิกัดเชิงขั้วไปเปลี่ยนระนาบคาร์ทีเซียน

$$T = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

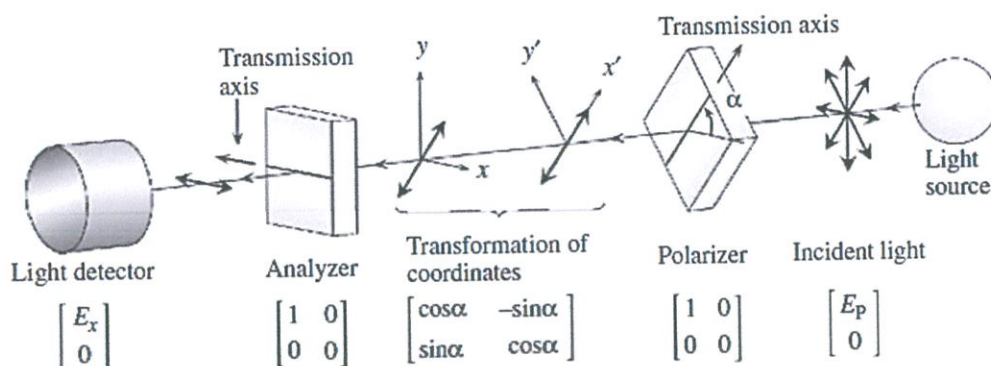
เมื่อแทนค่า $E_L = 1$ และ $E_R = 0$ จะได้

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

หากจะทำการเปลี่ยนจากระนาบคาร์ทีเซียนกลับสู่ระบบพิกัดเชิงขั้ว จะได้

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_L \\ E_R \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

3) Representation of optical measurement by Jones matrices



รูปที่ 2.33 แสดงเครื่องมือทางแสงเบื้องต้นที่อธิบายด้วย Jones matrices

ในเครื่องมือนี้ แสงจะถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดและถูกเปลี่ยนให้เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นโดยโพลาไรเซอร์ และแสงตรวจวัดความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านมาจากอนาไลเซอร์ เราสมมติแกนการส่งผ่านของโพลาไรเซอร์นั้นหมุนเป็นมุม α ในระนาบ x - y และขนานกับระนาบของอนาไลเซอร์ในทิศทางแกน x โพลาไรเซอร์จะถูกวางหลังแหล่งกำเนิดแสง แสงที่เกิดการส่งผ่านมานั้นจะเกิดขึ้นในทิศทางแกนการส่งผ่านเท่านั้น แสงที่ถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดแสงจะมีแสงที่ผ่านมาจากโพลาไรเซอร์เท่านั้นที่นำมาคำนวณ ถ้าเราเลือกระนาบ $x' - y'$ เป็นแกนการส่งผ่านของโพลาไรเซอร์ที่ขนานกับแกน x' ที่ถูกหมุนโดยมีความสัมพันธ์กับแกน x เราจะได้

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_p \cos\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

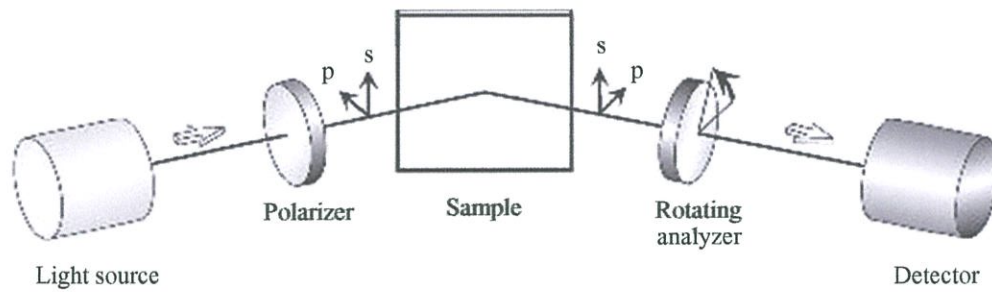
ดังนั้นความเข้มแสงที่ตรวจวัดจาก detector จะเป็น

$$I = |E_x|^2 = |E_p|^2 \cos^2 \alpha \quad (2.57)$$

2.3 ระบบเครื่องอิตลิปโซมิเตอร์

2.3.1 คำนิยามของเครื่องอิตลิปโซมิเตอร์

โดยปกตินิยามของอิตลิปโซมิเตอร์ คือ บทบาทของการวัดสถานะของโพลาไรเซชันของคลื่นแสงในการสะท้อนของเครื่องอิตลิปโซมิเตอร์จะสนใจการเปลี่ยนโพลาไรเซชันซึ่งเป็นประเด็นสำคัญ การเปลี่ยนโพลาไรเซชันของแสงที่ตกกระทบที่ขอบเขตพื้นผิวซึ่งสิ่งนี้ก่อให้เกิดโดยความแตกต่างในสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรสเนล ค่าสัมประสิทธิ์นี้คือความแตกต่างสำหรับ s -polarized และ p -polarized ของแสง โดยปกติโครงสร้างภายนอกของเครื่องอิตลิปโซมิเตอร์จะบรรยายให้เห็นภาพในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แสดงตัวอย่างการติดตั้งโดยทั่วไปของเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

แสงนั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิด Light source ผ่านมายังแผ่น Polarizer ก่อนที่จะสะท้อนบนขอบเขตพื้นผิว Sample หลังการสะท้อนของแสงจะผ่านแผ่น Polarizer นั่นคือ Analyzer อีกครั้งหนึ่งก่อนที่มันจะไปถึงตัวตรวจจับแสง Detector

โดยปกติจะประกอบด้วย 5 ส่วน คือ

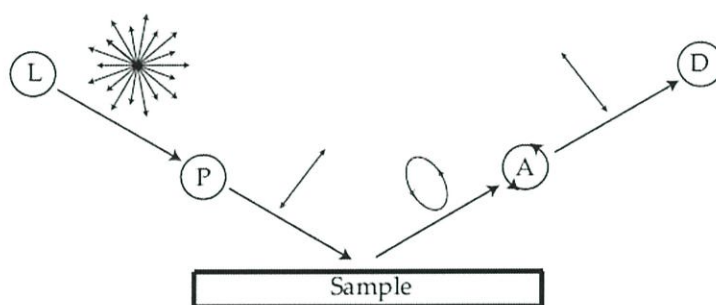
1. แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งปลดปล่อยออกมาโดยรอบหรือคือแสงไม่โพลาไรซ์ ซึ่งสามารถเป็นเลเซอร์หรือบางประเภทของโคมไฟ เลเซอร์มีข้อได้เปรียบของการปลดปล่อยที่มีความเข้มมากและแสงขนานกันดีซึ่งผลิตจุดที่มีขนาดเล็กบนตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ที่จะใช้เลเซอร์ประกอบหน้าที่เครื่องมือวัดสเปกโทรสโกปิก ซึ่งเลเซอร์จะประกอบด้วยค่าความยาวคลื่นเดียวเท่านั้น อย่างไรก็ตามโคมไฟพื้นที่จาก Xenon ซึ่งปลดปล่อยแสงที่มีค่าความยาวคลื่นหลายค่าทำให้เป็นไปได้ในเครื่องมือวัด สเปกโทรสโกปิก Linear polarized ซึ่งทำให้เปลี่ยนแสงที่เข้ามาให้เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น
2. **Surface** สัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการสะท้อนเฟรสเนล Analyzer โพลาไรซ์เชิงเส้นที่มุม α จะมีความเกี่ยวข้องกับทิศทาง π ของโพลาไรซ์ เชิงเส้น
3. **Detector** การวัดความเข้มของแสงจาก Analyzer Detector สามารถทำการวัดความเข้มแสงของคลื่นแสง

จากที่กล่าวในข้างต้น คือการวัดของอิลลิปโซมิเตอร์ของพื้นผิวเมื่อมีมุมการหมุนของ polarizer compensator และ analyzer และมุม compensator จะต้องรู้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอิลลิปโซมิเตอร์ มีหลากหลายทางในการประกอบซึ่งเป็นงานสำคัญของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอิลลิปโซมิเตอร์

2.3.2 ประเภทของเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์แบ่งตามโครงสร้าง

1) Photometric Ellipsometer

ในโฟโตเมตริกอิลลิปโซมิเตอร์นั้นคือหนึ่งหรือหลายเงื่อนไขที่มีรูปแบบแตกต่างกัน ขณะที่ตัวตรวจจับได้ทำการวัดความเข้มแสง ซึ่งโฟโตเมตริกอิลลิปโซมิเตอร์นั้นจะไม่เหมือนกับ null ellipsometer ที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 0 ที่ตัวตรวจจับ ดังนั้นค่าเอาต์พุตของโฟโตเมตริกอิลลิปโซมิเตอร์ การวัดคือค่าความเข้มแสงของเงื่อนไขกำหนด เงื่อนไขที่แตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับมุมการหมุนของโพลาริเซอร์คอมเพนเซเตอร์ หรืออนาไลเซอร์ ซึ่งความสัมพันธ์สิ่งที่เป็นอุปสรรคของคอมเพนเซเตอร์หรือมุมตกกระทบ



รูปที่ 2.35 โฟโตเมตริกอิลลิปโซมิเตอร์

โครงสร้างโดยทั่วไปของโฟโตเมตริกที่มีการหมุนของอนาไลเซอร์ อิลลิปโซมิเตอร์ได้แสดงในรูป 2.35 ยิ่งไปกว่านั้นรูปภาพได้แสดงสถานะของการโพลาไรเซชันระหว่างองค์ประกอบที่แตกต่างกันของอิลลิปโซมิเตอร์ แหล่งกำเนิดแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมานั้นจะเป็นแสงที่ไม่โพลาไรซ์ซึ่งจะกลายเป็นแสงที่มีสถานะเป็นโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นโดยแผ่นโพลาไรซ์ หลังจากนั้นจะเกิดการสะท้อนที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งสถานะของการโพลาไรเซชันของคลื่นแสงจะถูกเปลี่ยนจากโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นไปเป็นโพลาไรเซชันแบบวงรี อนาไลเซอร์นั้นจะถูกหมุนและค่าความเข้มแสงที่วัดที่มุมการหมุนที่แตกต่างกันไปของอนาไลเซอร์ ซึ่งหลักการโดยทั่วไปของโฟโตเมตริกที่มีการหมุนของอนาไลเซอร์คือการวัดความเข้มแสงที่มุมการหมุนแตกต่างของอนาไลเซอร์และจากการวัดจะสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ คือค่าเฟส และเคลต้า มันสามารถเป็นไปได้ในการเปลี่ยนแปลงมุมของโพลาไรซ์ในกรณีนี้ อิลลิปโซมิเตอร์จะนิยามว่า โฟโตเมตริกอิลลิปโซมิเตอร์ที่มีการหมุนของโพลาไรเซอร์ ซึ่งคุณสมบัติในการทำงานของโฟโตเมตริกอิลลิปโซมิเตอร์ที่มีการหมุนของโพลาไรเซอร์และอนาไลเซอร์นั้นมีพื้นฐานเหมือนกัน โฟโตเมตริกอิลลิปโซมิเตอร์ที่มีการหมุนของโพลาไรเซอร์นั้นต้องการแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นแสงไม่

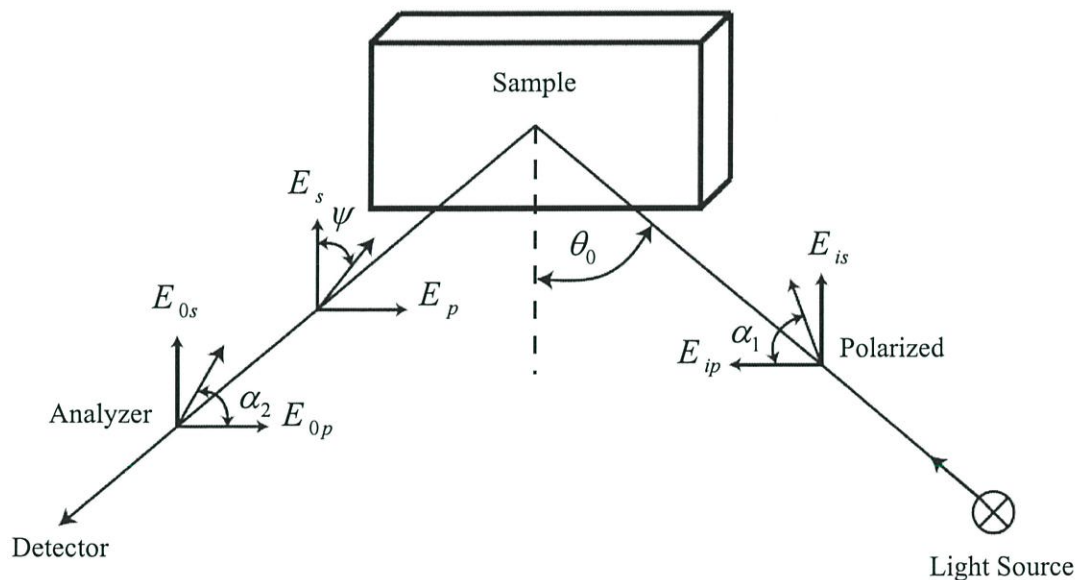
โพลาไรซ์ที่มีความแม่นยำในการวัดเช่นเดียวกัน โฟโตเมตริกที่มีการหมุนของอนาไลเซอร์นั้น ต้องการตัวตรวจจับที่ไม่ไวต่อการผิดพลาดของการโพลาไรเซชัน

2) Null ellipsometer

จะไม่เหมือนกับโฟโตเมตริกอิลลิปโซมิเตอร์ รวมถึงองค์ประกอบ ซึ่งข้อได้เปรียบอื่นๆ นั้น ประกอบไปด้วยโพลาไรเซอร์ คือเปรียบเทียบกับสิ่งอื่นถึงคอมเพนเซเตอร์และอื่นๆซึ่งง่ายต่อการจัดในระบบ กล่าวในอีกด้านหนึ่งข้อเสียนั้นคือระบบไม่ได้จัดระเบียบอย่างจริงจังของการตอบสนอง เมื่อเคลด้า เข้าใกล้ 0-180 องศา

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง

2.4.1 การคำนวณของ ψ และ Δ ของ Static Photometric RAE



รูปที่ 2.36 แสดงโครงสร้างการวัดค่าพารามิเตอร์ของอิลลิปโซมิเตอร์

แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดกลายเป็นแสงที่มีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นโดยโพลาไรซ์ที่ถูกยึดมุมอยู่กับที่ Jones vector ของคลื่นแสงหลังจากผ่าน polarizer E_i^{ps} คือ

$$E_i^{ps} = \begin{bmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i \cos(\alpha_1) \\ E_i \sin(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

เมื่อ E_i ขนาดของ Jones vector ของคลื่นแสงหลังจากผ่าน polarizer E_i^{ps} และ α_1 คือมุมของ polarizer ที่วัดจากทิศทางของ p – eigen polarization

แสงที่ถูกสะท้อนโดยพื้นผิวซึ่งเหมือนกันคูณโดย Jones matrix ของพื้นผิว

$$T_i^{ps} = \begin{bmatrix} \rho_p & 0 \\ 0 & \rho_s \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

ต่อไป Jones matrix ของคลื่นแสงหลังจากนั้นพื้นผิวจะหมุนของระบบโคออดิเนตของอนาไลเซอร์โดย Jones transform matrix

$$R(\alpha_2) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2) & \sin(\alpha_2) \\ -\sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

ซึ่ง Jones vector จะให้ในระบบโคออดิเนตของอนาไลเซอร์ Jones matrix ของอนาไลเซอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_i^{te} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Jones matrix ที่สามารถตรวจจับได้นั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$E_0^{te} = T_A^{te} R(\alpha_2) T_S^{ps} E_i^{ps} \quad (2.62)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2) & \sin(\alpha_2) \\ -\sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_p & 0 \\ 0 & \rho_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i \cos(\alpha_1) \\ E_i \sin(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2)\rho_p \cos(\alpha_1)E_i + \sin(\alpha_2)\rho_s \sin(\alpha_1)E_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2)E_p + \sin(\alpha_2)E_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

เมื่อ $E_p = \rho_p \cos(\alpha_1)E_i$ และ $E_s = \rho_s \sin(\alpha_1)E_i$

ค่าความเข้มแสงที่ตัวตรวจวัด I_0 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$I_0 = E_0' E_0 \quad (2.66)$$

$$= [\cos(\alpha_2)E_s^* + \sin(\alpha_2)E_p^* \quad 0] \begin{bmatrix} \cos(\alpha_2)E_p + \sin(\alpha_2)E_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$= \cos^2(\alpha_2)E_p E_p^* + \sin^2(\alpha_2)E_s E_s^* + \cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2)(E_p E_s^* + E_s E_p^*) \quad (2.68)$$

สำหรับค่าความเข้มแสงนั้นสามารถเขียนใหม่โดยใช้เอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติ

$$\cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) = \frac{1}{2}\sin(2\alpha_2) \quad (2.69a)$$

$$\sin^2(\alpha_2) = \frac{1 - \cos(2\alpha_2)}{2} \quad (2.69b)$$

$$\cos^2(\alpha_2) = \frac{1 + \cos(2\alpha_2)}{2} \quad (2.69c)$$

ดังนั้นค่าความเข้มแสงสามารถหาได้จาก

$$I_0 = \frac{1}{2}(E_p E_p^* + E_p E_p^* \cos(2\alpha_2)) + \frac{1}{2}(E_s E_s^* + E_s E_s^* \cos(2\alpha_2))$$

$$+ \frac{1}{2}(E_p E_s^* + E_s E_p^* \sin(2\alpha_2)) \quad (2.70)$$

$$= \frac{1}{2}[(E_p E_p^* + E_s E_s^* + (E_p E_p^* - E_s E_s^*) \cos(2\alpha_2) + (E_p E_s^* + E_s E_p^*) \sin(2\alpha_2)] \quad (2.71)$$

$$= \frac{1}{2}[(s_0 + s_1 \cos(2\alpha_2) + s_2 \sin(2\alpha_2)] \quad (2.72)$$

เมื่อ $s_0 = E_p E_p^* + E_s E_s^*$, $s_1 = E_p E_p^* - E_s E_s^*$ และ $s_2 = E_p E_s^* + E_s E_p^*$

จากสมการ (2.72) การแสดงออกสำหรับค่าความเข้มของคลื่นแสงที่มุมที่แตกต่างกันของอานาไลเซอร์สามารถคำนวณ ค่าความเข้มแสงที่ค่าที่ค่าที่เฉพาะเจาะจงของ α_2 ในมุม 45°

$$I_0(0^\circ) = \frac{1}{2}(s_0 + s_1) \quad (2.73a)$$

$$I_0(45^\circ) = \frac{1}{2}(s_0 + s_2) \quad (2.73b)$$

$$I_0(90^\circ) = \frac{1}{2}(s_0 - s_1) \quad (2.73c)$$

$$I_0(-45^\circ) = \frac{1}{2}(s_0 - s_2) \quad (2.73d)$$

การคำนวณของค่าพารามิเตอร์อิลลิปโซมิเตอร์ ψ และ Δ ต้องการติดตั้งมุมของอานาไลเซอร์ 3 ค่าเท่านั้น เช่น $\alpha_2 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 45^\circ$ และ $\alpha_2 = 90^\circ$ แต่เนื่องจากข้อบกพร่องในอิลลิปโซมิเตอร์อาจจะเพิ่มขึ้นความแม่นยำของการกำหนดค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ของStokes จะเชื่อมต่อไปถึงการวัดค่าความเข้มแสงที่ตัวตรวจจับเนื่องจากสมการ (2.73) ค่าพารามิเตอร์ของStokesนอกจากนี้ยังเชื่อมต่อไปถึงค่าพารามิเตอร์ของอิลลิปโซมิเตอร์

$$\cos(2\psi') = \frac{-s_1}{s_0} = \frac{\frac{1}{2}(s_0 - s_1) - \frac{1}{2}(s_0 + s_1)}{\frac{1}{2}(s_0 - s_1) + \frac{1}{2}(s_0 + s_1)} = \frac{I_0(90^\circ) - I_0(0^\circ)}{I_0(90^\circ) + I_0(0^\circ)} \quad (2.74)$$

และ

$$\sin(2\psi') \cos(\Delta) = \frac{s_2}{s_0} = \frac{s_0 + s_2}{s_0} = \frac{2I_0(45^\circ)}{I_0(90^\circ) + I_0(0^\circ)} \quad (2.75)$$

เมื่อค่าตัวแปรใหม่ ψ' มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tan(\psi') = \frac{\tan(\psi)}{\tan(\alpha_1)} \quad (2.76)$$

ในกรณีที่โพลาไรเซอร์มีมุม 45° จะได้ความสัมพันธ์

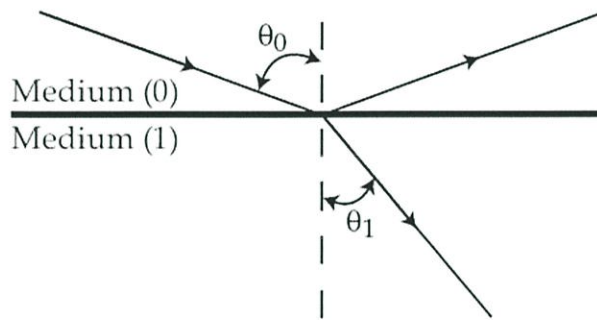
$$\tan(\psi') = \tan(\psi) \quad (2.77)$$

และ $\psi' = \psi$

เราสามารถเห็นได้จากสมการ (2.76) และ (2.77) ค่าพารามิเตอร์ของอิลลิปโซมิเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณจากค่าความเข้มแสงสามค่าเท่านั้น อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการวัดอยู่ ซึ่ง Δ นั้นสามารถวัดได้ในช่วง $0^\circ \leq \Delta \leq 180^\circ$ เท่านั้น

2.4.2 ค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์อิลลิปโซมิเตอร์ ψ และ Δ ในการวัดด้วยอิลลิปโซมิเตอร์และค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน รูปที่ 2.41 แสดงพื้นฐานในการคำนวณค่าดัชนีหักเห สมการพื้นฐานสำหรับอิลลิปโซมิเตอร์



รูปที่ 2.37 แสดงสะท้อนและส่งผ่านของแสงผ่านตัวกลาง 2 ชนิด

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรสเนล ρ_p และ ρ_s เขียนไว้ดังนี้

$$\rho_p = \frac{\tilde{n}_1 \cos(\theta_0) - \tilde{n}_0 \cos(\theta_1)}{\tilde{n}_1 \cos(\theta_0) + \tilde{n}_0 \cos(\theta_1)} \quad (2.78)$$

$$\rho_s = \frac{\tilde{n}_0 \cos(\theta_0) - \tilde{n}_1 \cos(\theta_1)}{\tilde{n}_0 \cos(\theta_0) + \tilde{n}_1 \cos(\theta_1)} \quad (2.79)$$

เมื่อ $\cos(\theta_1)$ สามารถพบด้วยวิธีการจาก Snell's law และเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ

$$\cos(\theta_1) = \sqrt{1 - \left(\frac{\tilde{n}_0}{\tilde{n}_1}\right)^2 \sin^2(\theta_0)} \quad (2.80)$$

เมื่อ \tilde{n}_1 คือ ดัชนีหักเหเชิงซ้อนของตัวกลางที่ 1

\tilde{n}_0 คือค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของบริเวณที่ล้อมรอบ

θ_0 คือ มุมตกกระทบ และ θ_1 มุมของการส่งผ่าน

เมื่อใส่สมการ (2.78), (2.79) และ (2.80) ลงในสมการ $P = \frac{P_p}{P_s} = \tan(\psi) e^{j\Delta}$

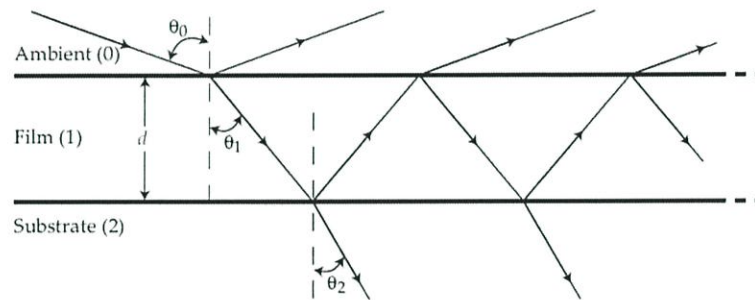
และหาค่าอัตราส่วนของ \tilde{n}_1 จะได้

$$\tilde{n}_1 = \frac{\left\{ \sqrt{1 - 4 \sin^2(\theta_0) \tan(\psi) e^{j\Delta} + 2 \tan(\psi) e^{j\Delta} + \tan^2(\psi) e^{j2\Delta}} \right\} \tilde{n}_0 \sin(\theta_0)}{\cos(\theta_0) (1 + \tan(\psi) e^{j\Delta})} \quad (2.81)$$

ข้อมูลจากอิลลิปโซมิเตอร์คือค่า ψ และ Δ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น จะใช้ในสมการ(2.81) ซึ่งข้อมูลนี้สามารถใช้ได้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

2.4.3 ค่าความหนาของฟิล์ม

เมื่อหลักการวัดของอิลลิปโซเมตริกปฏิบัติหน้าทีบน 3 ตัวด้วยกันซึ่งประกอบไปด้วย สิ่งแวดล้อม ฟิล์ม ฐานรอง มันเป็นไปได้ที่จะกำหนดค่าความหนาของฟิล์ม ถ้าดัชนีหักเหสำหรับ สามค่านี้เรารู้ โดยจะกล่าวถึงค่าความหนาของฟิล์มและค่าพารามิเตอร์ของอิลลิปโซมิเตอร์ ψ และ Δ สิ่งแวดล้อม-ฟิล์ม-ฐานรองระบบแสงจะบรรยายให้เห็นภาพในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 แผนภาพของระบบแสง สิ่งแวดล้อม-ฟิล์ม-ฐานรอง ซึ่งแสงตกกระทบบางส่วนนั้นจะ สะท้อน และบางส่วนจะส่งผ่าน

คลื่นแสงตกกระทบบจากอิลลิปโซมิเตอร์จะกระทบบนพื้นผิวระหว่างสิ่งแวดล้อมและฟิล์ม ทำมุม θ_0 เช่นเดียวกันค่ามุมของการสะท้อนเนื่องจากSnell's law ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ทั้งหมดของ σ และ π ของแสงโพลาไรซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_s = \frac{\rho_{01,s} + \rho_{12,s} e^{-j2\beta}}{1 + \rho_{01,s} \rho_{12,s} e^{-j2\beta}} \quad (2.82)$$

$$P_p = \frac{\rho_{01,p} + \rho_{12,p} e^{-j2\beta}}{1 + \rho_{01,p} \rho_{12,p} e^{-j2\beta}} \quad (2.83)$$

จากสมการ(2.84)และ (2.85)สามารถเขียนได้ดังนี้

$$P = \frac{P_\pi}{P_\sigma} = \tan(\psi) e^{j\Delta} \quad (2.84)$$

เมื่อ P คืออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ซึ่งแทนค่า P_p และ P_s จะได้

$$\begin{aligned}
P &= P_p \cdot \frac{1}{P_s} = \frac{\rho_{01,p} + \rho_{12,p} e^{-j2\beta}}{1 + \rho_{01,s} \rho_{12,p} e^{-j2\beta}} \cdot \frac{1 + \rho_{01,s} \rho_{12,s} e^{-j2\beta}}{\rho_{01,s} + \rho_{12,s} e^{-j2\beta}} \\
&= \frac{\rho_{12,p} \rho_{01,s} \rho_{12,s} e^{-j4\beta} + (\rho_{01,p} \rho_{01,s} \rho_{12,s} + \rho_{12,p}) e^{-j2\beta} + \rho_{01,p}}{\rho_{12,p} \rho_{01,p} \rho_{12,s} e^{-j4\beta} + (\rho_{01,p} \rho_{01,p} \rho_{12,s} + \rho_{12,s}) e^{-j2\beta} + \rho_{01,s}} \quad (2.85)
\end{aligned}$$

ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพของดัชนีหักเหเชิงซ้อน \tilde{n}_0 , \tilde{n}_1 , \tilde{n}_2 , มุมตกกระทบ θ_0 เมื่อแสงที่ตกกระทบมีค่าความยาวคลื่นเป็น λ และฟิล์มมีความหนา d จากสมการ(2.85) เราสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P = \frac{AX^2 + BX + C}{DX^2 + EX + F} \quad (2.86)$$

เมื่อ $A = \rho_{12,p} \rho_{01,s} \rho_{12,s}$, $B = \rho_{01,p} \rho_{01,s} \rho_{12,s} + \rho_{12,p}$, $C = \rho_{01,p}$, $D = \rho_{12,p} \rho_{01,p} \rho_{12,s}$,
 $E = \rho_{01,p} \rho_{01,p} \rho_{12,s} + \rho_{12,s}$, $F = \rho_{01,s}$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$(PD - A)X^2 + (PE - B)X + (PF - C) = 0 \quad (2.87)$$

แก้สมการหาค่า X จะได้

$$X = \frac{-(PE - B) \pm \sqrt{(PE - B)^2 - 4(PD - A)(PF - C)}}{2(PD - A)} \quad (2.88)$$

ถ้าเราทราบค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม จะมีสองคำตอบในการวิเคราะห์ นั่นคือ X_1 และ X_2 ถ้าเราไม่ทราบค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม แต่เราสามารถสมมติให้ $\tilde{n}_1 = n_1$ คำตอบของสมการ(2.35) สามารถทำได้โดยวิธีซ้ำ ซึ่งในกระบวนการทำซ้ำนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเงื่อนไข $|X| = 1$ ซึ่งพอใจ ขณะที่ $X = e^{-j2\beta}$ เมื่อ $\beta = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{\tilde{n}_1^2 - \tilde{n}_0^2} \sin(\theta_0)$ ซึ่ง $|X|$ ต้องมีค่าเท่ากับ 1 กับการกำหนดค่าของ n_1 สำหรับค่า X ซึ่ง X กำหนดจากแบบต่างๆของวิธีการ ซึ่งมันเป็นไปได้ที่จะคำนวณค่าความหนาของฟิล์มเนื่องจาก

$$X = e^{-j2\beta} \quad (2.89)$$

$$\ln(X) = -j4\pi \frac{d}{\lambda} \tilde{n}_1 \cos(\theta_1) \quad (2.90)$$

$$d = \frac{j \ln(X) \lambda}{4\pi \tilde{n}_1 \cos(\theta_1)} \quad (2.91)$$

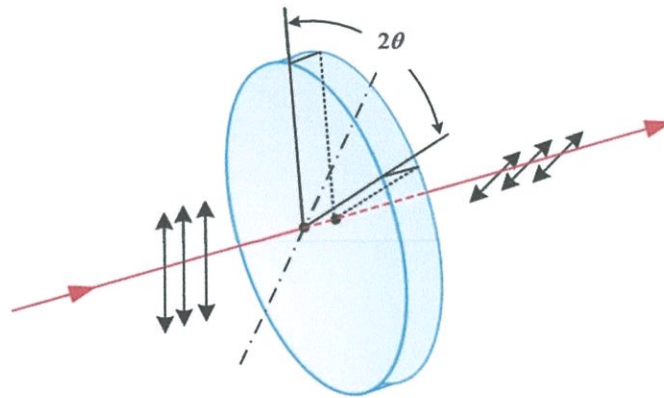
เมื่อ X เช่นเดียวกันของการคำนวณคำตอบของสมการ(2.35) อย่างชัดเจนจะมีเพียงคำตอบเดียวเท่านั้นสำหรับความหนาฟิล์มที่ถูกต้อง ซึ่งควรจะเป็นส่วนจริงและควรมีค่าเป็นบวก ความผิดพลาดนั้นอาจทำให้กลายเป็นเลขเชิงซ้อน

2.5 Half Wave Plate

เป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ทำหน้าที่บิดแนวโพลาไรซ์ของแสง การทำงานมีหลักการเช่นเดียวกับ quarter wave plate แต่ผลึกจะมีความหนา d ที่ทำให้

$$|n_o d - n_e d| = \frac{\lambda}{2} \quad (2.92)$$

จะเรียกอุปกรณ์ทางแสงนี้ว่า half waveplate ในกรณีนี้ o-ray และ e-ray มีเฟสต่างกันเท่ากับ 180° ถ้าแนวโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบบทำมุม θ กับแนวแกนแสงแล้ว แสงที่ผ่าน half waveplate ออกมาจะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแนวโพลาไรซ์ทำมุม 2θ กับแนวโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบบ ดังรูปที่ 2.39 หรือกล่าวได้ว่าแนวโพลาไรซ์แสงบิดไปทำมุม θ กับแนวแกนแสงในทิศตรงข้ามกับแนวโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบบ



รูปที่ 2.39 เมื่อแสงตกกระทบบแนวโพลาไรซ์ทำมุม θ กับแกนแสงของ half waveplate

2.6 สเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)

สเต็ปมอเตอร์ เป็นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยพัลส์ ลักษณะการขับเคลื่อน จะหมุนรอบแกนได้ 360 องศา มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง แต่มีลักษณะเป็นสเต็ป โดยแต่ละสเต็ปจะขับเคลื่อนได้ 1, 1.5, 1.8 หรือ 2 องศา แล้วแต่ละ โครงสร้างของมอเตอร์ลักษณะที่ นำมอเตอร์ไปใช้ จะเป็นงานที่ต้องการตำแหน่งแม่นยำ เช่น ระบบขับเคลื่อนหัวแม่พิมพ์ในเครื่องพิมพ์ (Printer) ระบบขับเคลื่อนหัวอ่านในเครื่องอ่านบันทึกเทป ระบบขับเคลื่อนตำแหน่งของปากกาใน X-Y Plotter เป็นต้น

2.6.1 ชนิดและโครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์

สเต็ปมอเตอร์มีลักษณะดังรูป



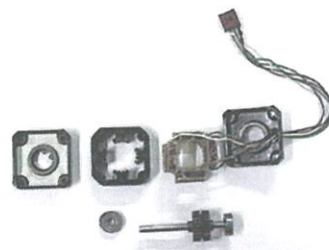
รูป 2.40 สเต็ปมอเตอร์แบบมีสาย 5 เส้น



รูป 2.41 มอเตอร์แบบมีสาย 6 เส้น



รูป 2.42 สเต็ปมอเตอร์หลายแบบไบโพลาร์



รูป 2.43 แสดง โครงสร้างสเต็ปมอเตอร์

2.6.2 ลักษณะของสเต็ปมอเตอร์

1) แบบแม่เหล็กถาวร(Permanent Magnet - PM)

สเต็ปมอเตอร์แบบ PM จะมีสเตเตอร์ (Stator) ที่พันขดลวดไว้หลายๆ โพล โดยมีโรเตอร์ (Rotor) เป็นรูปทรง กระบอกฟันเลื่อย และโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร เพื่อป้อนไฟกระแสตรงให้กับขดสเตเตอร์จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าผลักดันโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนมอเตอร์แบบ PM จะเกิดแรงดูดยึดให้โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ แม้จะไม่ได้ป้อนไฟเข้าขดลวด

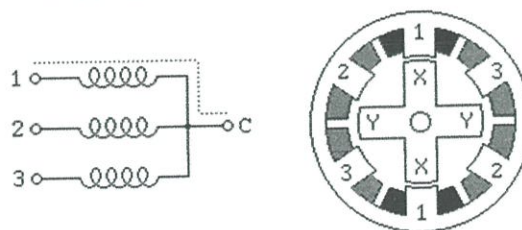
2) แบบแปรค่ารีลักแตนซ์(Variable Reluctance - VR)

สเต็ปมอเตอร์แบบ VR จะมีการหมุนโรเตอร์ได้อย่างอิสระ แม้จะไม่ได้จ่ายไฟให้โรเตอร์ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกกำลังอ่อน มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย รูปทรงกระบอกโดยจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนโพลในสเตเตอร์ แรงบิดที่เกิดขึ้นจะไปหมุนโรเตอร์ ไปในเส้นทางของอำนาจแม่เหล็กที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำที่สุด ตำแหน่งที่จะเกิดแน่นอนและมีเสถียรภาพแต่จะเกิดขึ้นได้หลายๆ จุดดังนั้นเมื่อป้อนไฟเข้าขดลวดต่างๆ ในมอเตอร์แตกต่างกันไป ก็ทำให้มอเตอร์ หมุนไปตำแหน่งต่างๆ กันโรเตอร์ของ VR จะมีความเฉื่อยของโรเตอร์น้อยจึงมีความเร็วรอบสูงกว่ามอเตอร์แบบ PM

3) แบบผสม(Hybrid - H)

สเต็ปมอเตอร์แบบ H จะเป็นลูกผสมของ VR กับ PM โดยจะมีสเตเตอร์คล้ายกับที่ใช้ใน VR โรเตอร์มีหมวกหุ้ม ปลายซึ่งมีลักษณะของสารแม่เหล็กที่มีกำลังสูง โดยการควบคุมขนาดรูปร่างของหมวกแม่เหล็กอย่างดีทำให้ได้มุม การหมุนและครั้งน้อยและแม่นยำ ข้อดีก็คือ ให้แรงบิดสูง และมีขนาดกะทัดรัด และให้แรงดูดยึดโรเตอร์นิ่งกับที่ตอนไม่จ่ายไฟ

2.6.3 การทำงานของ Stepping motor



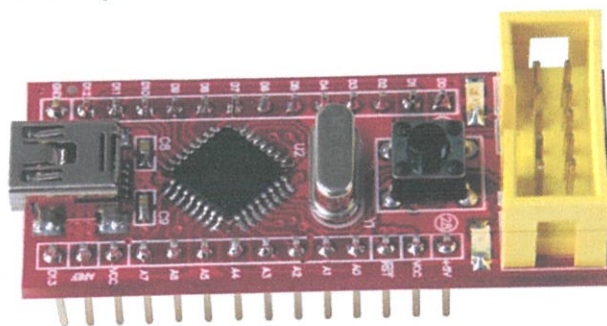
รูป 2.44 แสดงการป้อน pulse ให้กับ stepping motor

ขึ้นชื่อว่าเป็นมอเตอร์แล้วก็ต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ 1. Rotor ซึ่งเป็นส่วนที่หมุนหรือเคลื่อนที่ได้ 2. Stator ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ สำหรับ stepping motor

ก็เช่นเดียวกันที่ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนนี้ โดยส่วนที่เป็น stator ของ stepping motor นี้จะเป็นส่วนซึ่งมีขดลวดพันล้อมอยู่บนแกนเหล็ก(ส่วนที่เขียน 1,2,3 ที่เป็นส่วนนอก ของ stepping motor คือส่วนที่เป็น stator) เมื่อเราจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดที่พันอยู่บน stator ที่ขด 1 ก่อน ก็จะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นที่ตำแหน่ง 1 นี้ และผลักให้ rotorเกิดการเคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่นี้เรียกว่ามันเคลื่อนที่ไป 1 stepซึ่งการที่มันจะเคลื่อนที่ไปเป็นมุมเท่าไรนั้นก็ขึ้นอยู่กับ spec ของ stepping motor ตัวนั้นว่าสามารถที่จะหมุนได้ step ละกี่องศา และต่อไปถ้าเราหยุดจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด1 และไปจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 2 แทนก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณ 2 บน stator ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กนี้ผลัก rotor ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้ และถ้าเราหยุดจ่ายกระแสเข้าที่ 2 และไปจ่ายเข้าที่ขด 3 แทนก็จะทำให้สนามแม่เหล็กมาเกิดที่บริเวณ 3 และผลักให้ rotor เคลื่อนที่ต่อไปได้อีก

จะเห็นว่า stepping motor นั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้จากหลักการของการจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดบน stator ในลักษณะที่จ่ายไฟให้เกิดแบบ ลำดับเฟสกันไป ซึ่งเป็นหลักการของการควบคุม stepping motor

2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-EASY168STAMP



รูปที่ 2.45 รูปแสดง โครงสร้างของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

ET-EASY168 STAMP เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR8 ขนาดเล็กจิ๋ว โดยมีขนาดของบอร์ดเพียง 2cm x 5cm เท่านั้น ซึ่งขนาดบอร์ด ประมาณเท่ากับตัวถังของไอซี 28DIP 300โดยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR8 เบอร์ ATmega168 ของ ATMEL เป็น MCU ประจำบอร์ด โดยเลือกใช้ MCU ที่มีรูปร่างตัวถังแบบ 32 TQFP พร้อมวงจรรอบนอกที่จำเป็นอย่าง Oscillator และ Reset รวมไว้ด้วยภายในบอร์ด นอกจากนี้แล้วภายในตัวบอร์ดยังได้รวมเอาไอซี USB Bridge ของ FTDI เบอร์ FT232R เพื่อใช้ติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมด้วย RS232 กับคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ต USB ได้โดยตรงทำให้บอร์ด ET-EASY168 STAMP เป็นบอร์ดทดลองขนาดเล็กที่เพียงพร้อมไปด้วยวงจรพื้นฐานที่จำเป็นต่อการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR8 อย่างแท้จริง เพียงแค่เสียบสาย USB จากพอร์ตUSB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ PC เข้ากับขั้ว USB ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP ก็สามารถทำการเขียนโปรแกรม และ Download Code ให้กับ MCU เพื่อทำการทดลองได้ทันที

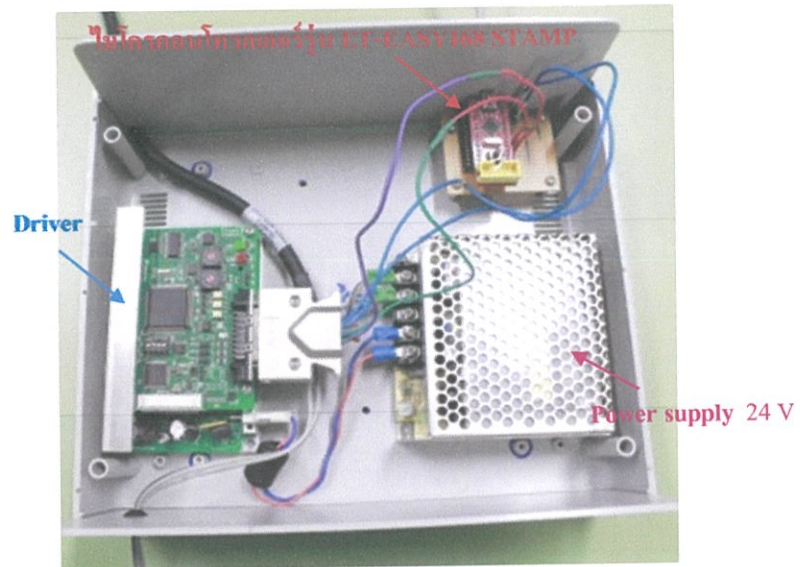
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยโครงการพิเศษในหัวข้อ การพัฒนาอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง ถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบโปรแกรมในการควบคุมและรับค่าข้อมูลจากอิลลิปโซมิเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic 2010 ออกแบบหน้าจอ User Interface และโปรแกรม Arduino ควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-EASY168 STAMP เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่ติดอยู่กับอานาไลเซอร์ แล้วนำข้อมูลจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของการโพลาไรซ์ของแสงหลังจากการสะท้อนและหักเหในฟิล์มบางไปวิเคราะห์หาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง ซึ่งลักษณะการจัดระบบจะเป็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมการวัดฟิล์มบางของระบบอิลลิปโซมิเตอร์



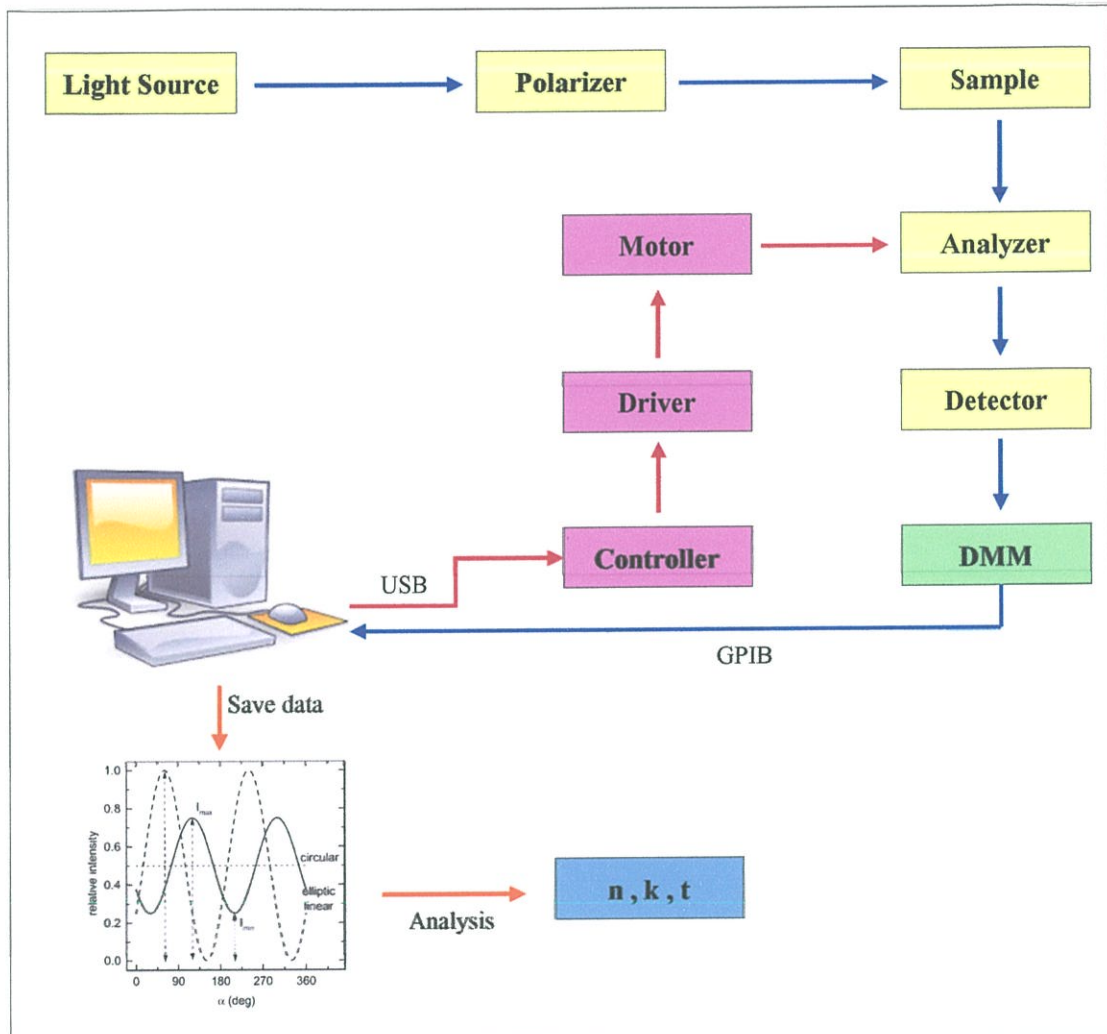
รูปที่ 3.2 กล่องควบคุม Stepping Motor



รูปที่ 3.3 Digital Multimeter (DMM)

3.1 การออกแบบโปรแกรมควบคุมระบบอิลลิปโซมิเตอร์

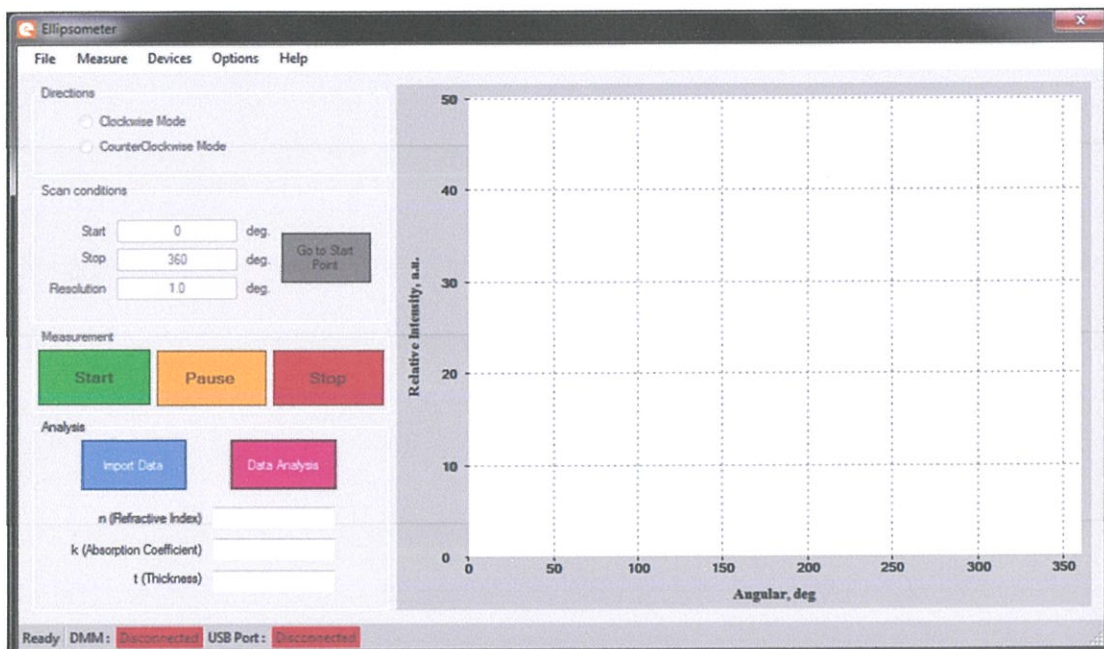
การเก็บค่าผลการทดลองจากระบบอิลลิปโซมิเตอร์ผ่านทางคอมพิวเตอร์ โดยแสงที่สะท้อนจาก sample ผ่านอนาไลเซอร์ที่ควบคุมการหมุนด้วยคอนโทรลเลอร์ และเข้าสู่ตัวตรวจจับ แสงเก็บค่าเป็นสัญญาณไคอะล็อกแล้วนำสัญญาณมาแปลงด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์(DMM) ได้ข้อมูลเป็นดิจิตอล คือ ความเข้มแสงที่แปรผันตรงกับ โวลต์



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการควบคุมการทำงานของระบบอิลลิปโซมิเตอร์

ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการหมุนของอนาไลเซอร์ ทำการเชื่อมต่อส่งข้อมูลผ่านสาย serial port (RS-232) โดยคอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูล (จำนวนพัลส์และทิศทางการหมุน) ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์แบบเป็นสเต็ป เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งพัลส์ควบคุมการหมุนมอเตอร์ไปหนึ่งสเต็ป ก็จะส่งข้อมูลคืนกลับมายังคอมพิวเตอร์เพื่อให้คอมพิวเตอร์ส่งคำสั่งอ่านค่าไปยังดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่เชื่อมต่อผ่าน GPIB โดย

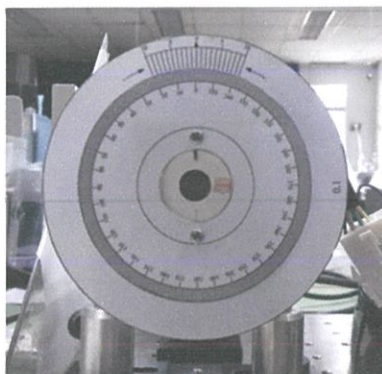
โปรแกรมที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้นในการควบคุมและรับค่าจากระบบอิลลิปโซมิเตอร์มีหน้าต่างโปรแกรมดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงหน้าจอ User interface ควบคุมการทำงานของระบบอิลลิปโซมิเตอร์

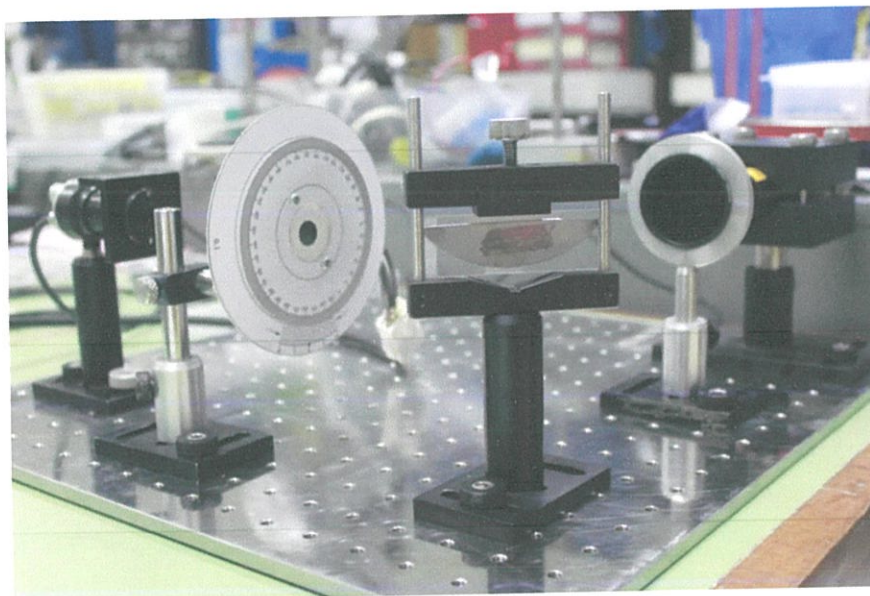
3.2 การจักระบบอิลลิปโซมิเตอร์

3.2.1 ตั้งค่าแนวโพลาไรซ์ของอนาไลเซอร์ให้อยู่ในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3.6 และตั้งค่าแสงโพลาไรซ์จากแหล่งกำเนิดให้อยู่ในแนวตั้งเช่นกัน โดยหมุนกระบอกเลเซอร์แล้วให้แสงผ่านอนาไลเซอร์แล้ววัดค่าที่มีความเข้มแสงสูงสุด



รูปที่ 3.6 แสดงการตั้งค่าแนวโพลาไรซ์ของอนาไลเซอร์

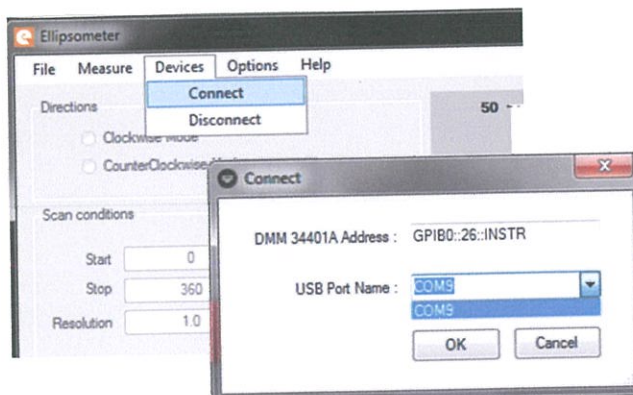
3.2.2 จัดแนวแสงจากแหล่งกำเนิดให้มาตกกระทบบนตัวอย่างทำมุม 45° และแสงสะท้อนทำมุม 45° ผ่านอนาไลเซอร์เข้าตัวตรวจจับแสง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการจัดระบบอิลลิปโซมิเตอร์

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. นำตัวอย่างมาวางทำมุมกับแนวตกกระทบของแสง 45° ดังรูปที่ 3.7
2. เปิดโปรแกรม Ellipsometer เลือกแท็บ Device แล้วคลิก Connect จะปรากฏหน้าจอ Connect ขึ้นมา ให้ทำการตั้งค่าอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งต้องระบุ Address ของ DMM และเลือก Port Name แล้วคลิกปุ่ม OK (สังเกตได้ว่า Taskbar ของโปรแกรมจะเปลี่ยนข้อความจาก Disconnect เป็น Connect) ดังรูปที่ 3.8



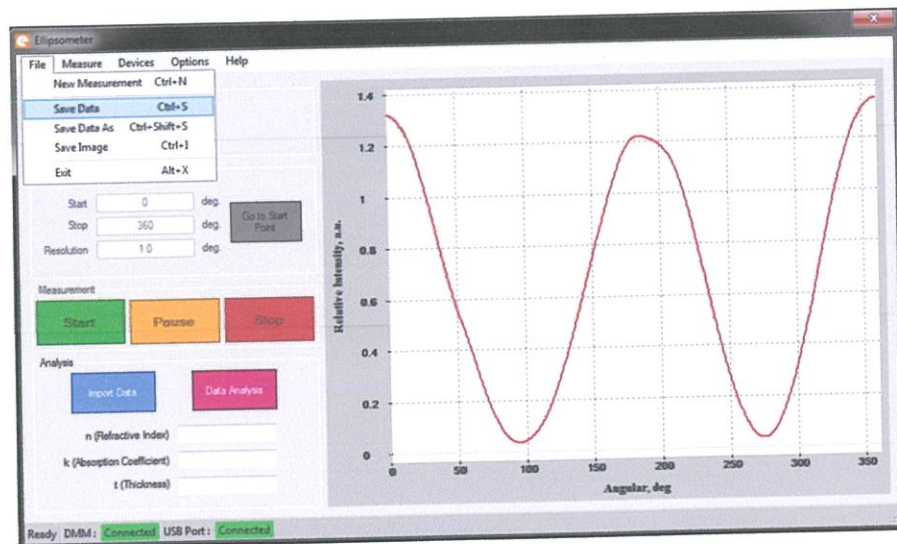
รูปที่ 3.8 แสดงการตั้งค่าอุปกรณ์เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

3. ตั้งค่า Directions เลือก Clockwise Mode และกำหนด Scan conditions Start 0 deg. , Stop 360 deg. , Resolution 1.0 deg. แล้วคลิกปุ่ม Go to Start Point และคลิกปุ่ม Start เพื่อให้โปรแกรมเริ่มเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดง Taskbar ของโปรแกรมแสดงความ Connect และการตั้งค่า Directions

4. เมื่อโปรแกรม Ellipsometer ทำการวัดจนเสร็จสิ้น จะได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงจากตัวตรวจจับแสงกับมุมของอนาไลเซอร์ แล้วบันทึกข้อมูลจากโปรแกรม Ellipsometer เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาค่าสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง (n, k, t) ดังรูปที่ 3.10



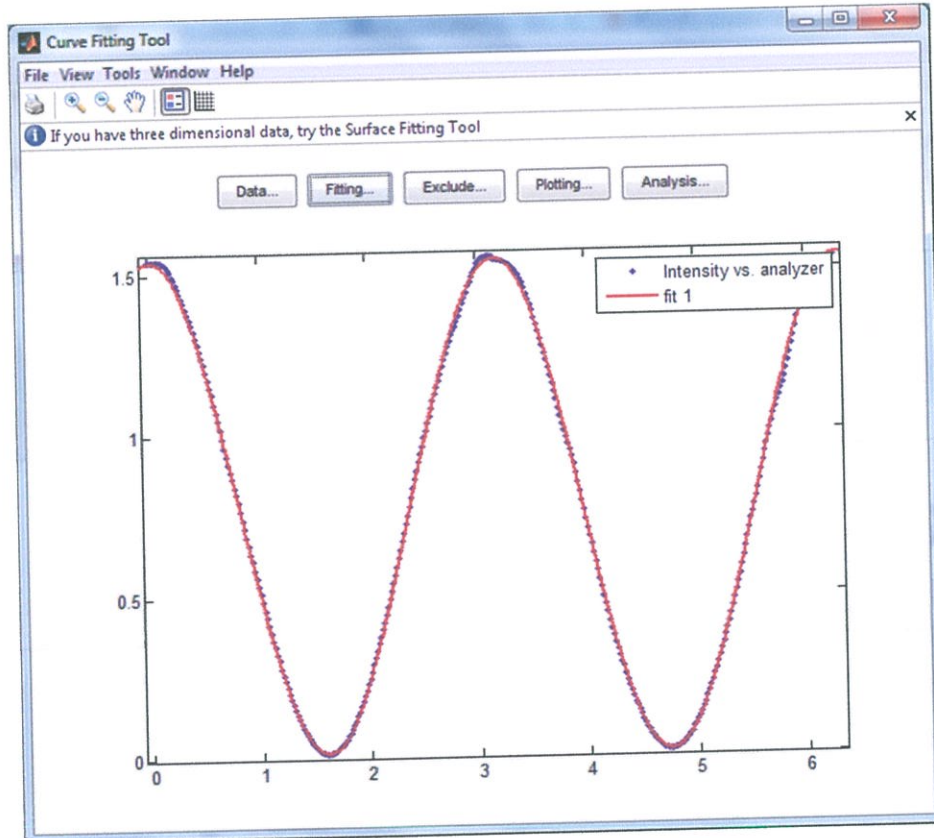
รูปที่ 3.10 แสดงการบันทึกข้อมูลจากโปรแกรม Ellipsometer เมื่อทำการวัดเสร็จสิ้น

3.4 การวิเคราะห์หาสมบัติเชิงแสงของตัวอย่าง

- เมื่อได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงจากตัวตรวจจับแสงกับมุมของอานาไลเซอร์ นำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อหาค่า s_0, s_1, s_2 ตามสมการ

$$I_0 = \frac{1}{2} [s_0 + s_1 \cos(2\alpha_2) + s_2 \sin(2\alpha_2)]$$

ด้วยวิธีการฟูเรียร์ทรานฟอร์ม หรือใช้ Curve Fitting Tool ของโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 หาค่า s_0, s_1, s_2 ด้วย Curve Fitting Tool

จะได้ค่า s_0, s_1, s_2

- หาค่า ψ และ Δ จากสมการ

$$\cos(2\psi') = \frac{-s_1}{s_0}$$

$$\text{และ } \sin(2\psi') \cos(\Delta) = \frac{s_2}{s_0} = \frac{s_0 + s_2}{s_0}$$

- นำค่า ψ' มาหาค่า ψ จากความสัมพันธ์

$$\tan(\psi') = \frac{\tan(\psi\psi)}{\tan(\alpha_1)}$$

ในกรณีที่มีมุมของ polarizer มีค่าเท่ากับ 45°

$$\tan(\psi') = \tan(\psi)$$

4. เมื่อทราบค่า ψ และ Δ นำมาแทนในสมการ

$$\tilde{n}_1 = \frac{\left\{ \sqrt{1 - 4 \sin^2(\theta_0) \tan(\psi) e^{j\Delta} + 2 \tan(\psi) e^{j\Delta} + \tan^2(\psi) e^{j\Delta}} \right\} \tilde{n}_0 \sin(\theta_0)}{\cos(\theta_0) (1 + \tan(\psi) e^{j\Delta})}$$

เพื่อหาค่าดัชนีหักเห (n) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (k) จะได้ค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนดังสมการ $\tilde{n} = n + ki$

ซึ่งค่า n ที่ได้คือ ดัชนีหักเหของวัสดุ และค่า k ที่ได้คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

5. การคำนวณค่าความหนาของฟิล์ม (t) หาได้จากสมการ

$$d = \frac{j \ln(X) \lambda}{4\pi \tilde{n}_1 \cos(\theta_1)}$$

ซึ่งค่า λ คือ ค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลอง

\tilde{n}_1 คือ ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน

โดยที่
$$P = \frac{P_\pi}{P_\sigma} = \tan(\psi) e^{j\Delta}$$

และ
$$P_\sigma = \frac{\rho_{01,\sigma} + \rho_{12,\sigma} e^{-j2\beta}}{1 + \rho_{01,\sigma} \rho_{12,\sigma} e^{-j2\beta}}, \quad P_\pi = \frac{\rho_{01,\pi} + \rho_{12,\pi} e^{-j2\beta}}{1 + \rho_{01,\pi} \rho_{12,\pi} e^{-j2\beta}}$$

$$\therefore P = \frac{AX^2 + BX + C}{DX^2 + EX + F}$$

โดยที่
$$X = \frac{-(PE - B) \pm \sqrt{(PE - B)^2 - 4(PD - A)(PF - C)}}{2(PD - A)}$$

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดลองการวัดฟิล์มบางด้วยระบบอิลลิปโซมิเตอร์

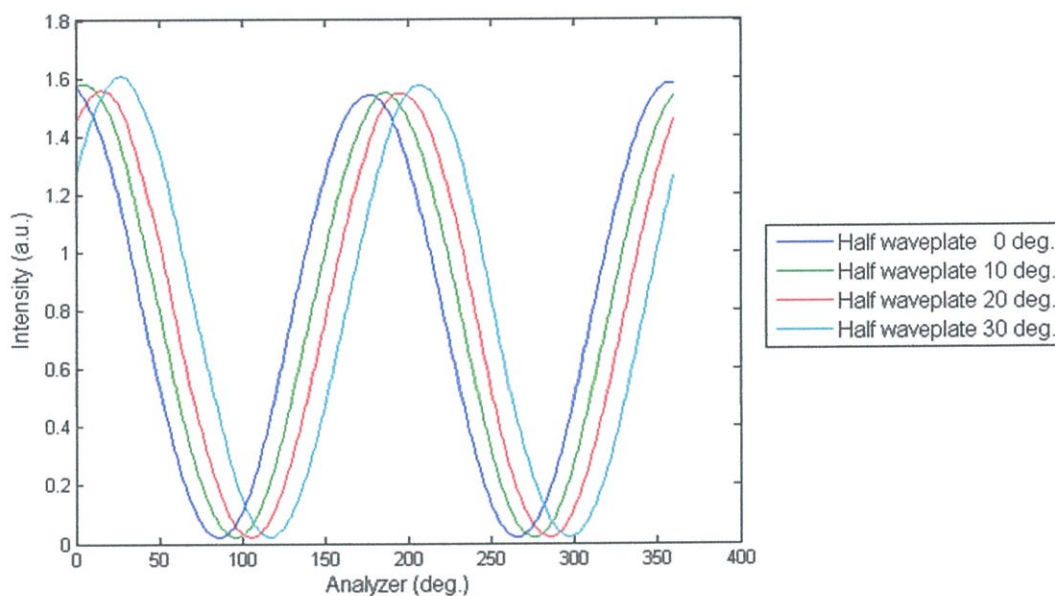
การทดลองการวัดการเปลี่ยนแปลงสถานะโพลาไรซ์ของแสงของฟิล์มบาง ได้จัดระบบวัดความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับมุมอนาไลเซอร์ ซึ่งจากทฤษฎีอิลลิปโซเมทรี การจัดระบบอิลลิปโซมิเตอร์ แสงจากแหล่งกำเนิดจะผ่านโพลาไรเซอร์เพื่อให้แสงที่ผ่านออกมาก่อนตกกระทบพื้นผิวเป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น โดยการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นอยู่แล้ว เราจึงไม่ได้ใช้โพลาไรเซอร์ แต่เปลี่ยนเป็น Half waveplate เพื่อที่จะสามารถกำหนดแนวระนาบของโพลาไรซ์ได้

เมื่อทำการจัดระบบเพื่อตรวจสอบแนวโพลาไรซ์ของแสง โดยให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงส่องผ่าน Half waveplate และ อนาไลเซอร์ เข้าสู่ตัวตรวจจับแสง ดังรูปที่ 4.1



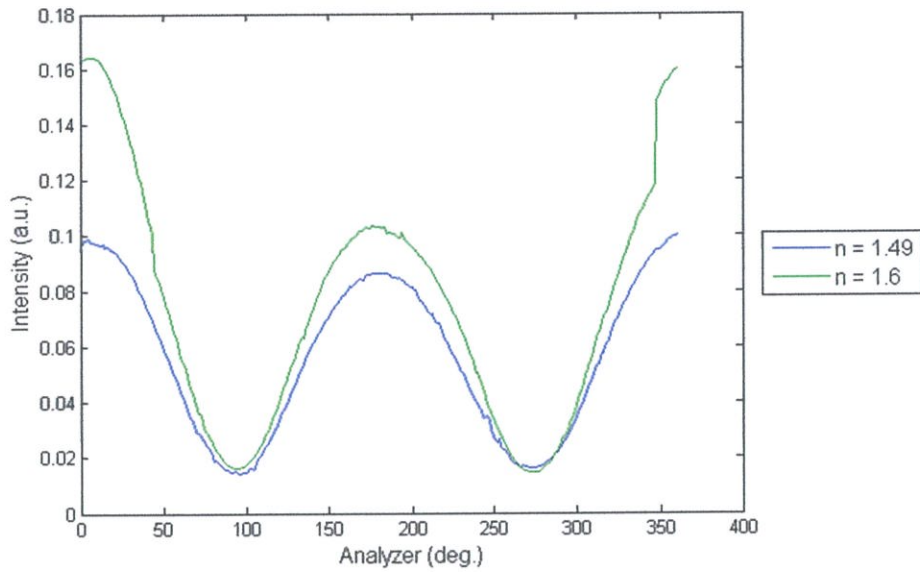
รูปที่ 4.1 แสดงระบบการวัดเพื่อตรวจสอบสถานะและแนวโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง

ผลการทดลองการวัดเพื่อตรวจสอบสถานะและแนวโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง โดยทำการบิดมุม Half waveplate ไป 0 , 10 , 20 , 30 องศา ตามลำดับ ซึ่งเก็บข้อมูลที่สัมพันธ์กับมุมอนาไลเซอร์ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ได้ข้อมูลดังรูปที่ 4.2

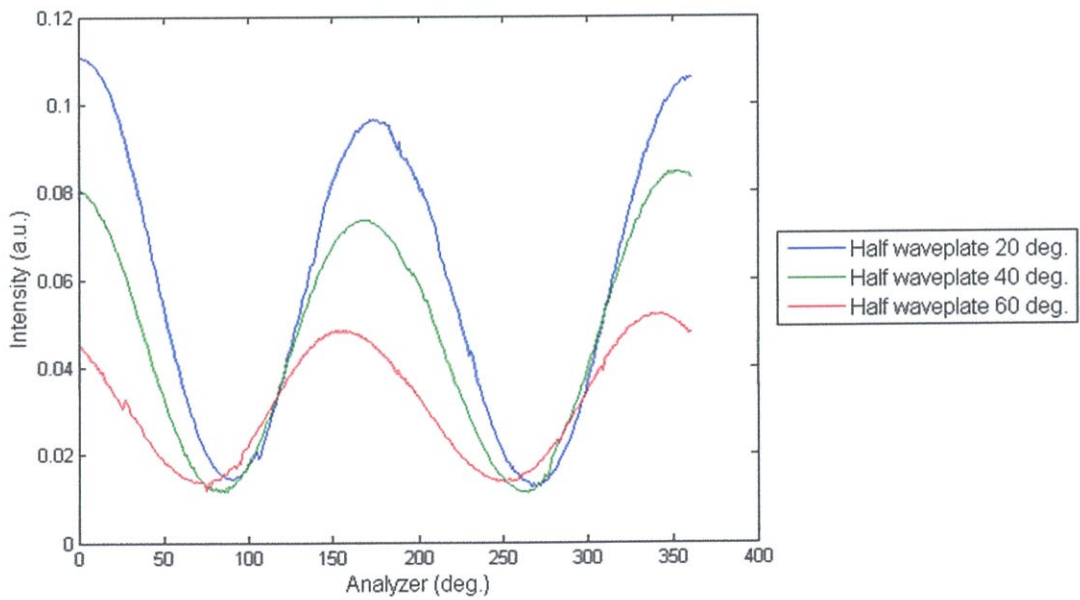


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและมุมอนาไลเซอร์เปรียบเทียบแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นผ่าน Half waveplate ที่บิดมุม 0 , 10 , 20 , 30 องศา ตามลำดับ

จากนั้นจัดระบบอิตลิปโซมิเตอร์ที่มีมุมกระทบเท่ากับ 45 องศา และจัดแนวแกนโพลาไรซ์ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้อยู่ในแนวตั้ง ทำการวัดฟิล์มบางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ 1.49 และ 1.6 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 แล้ววัดฟิล์มบางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ 1.49 ผ่าน Half waveplate ที่บิดมุม 20 , 40 , 60 องศา ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4 และวัด Silicon wafer ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและมุมอนาไลเซอร์ของฟิล์มบางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ 1.49 และ 1.6



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและมุมอนาไลเซอร์เปรียบเทียบฟิล์มบางที่มีดัชนีหักเหเท่ากับ 1.49 และบิตม Half waveplate ไป 20 , 40 , 60 องศา ตามลำดับ

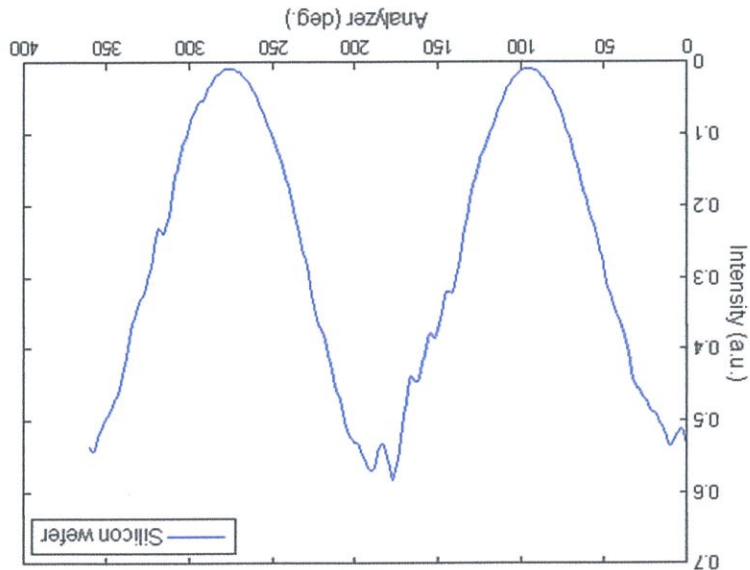
ชื่อวัสดุ	ดัชนีหักเห(n)	สัมประสิทธิ์การดูดกลืน(k)	ความหนา(mm)
Thin film n=1.49	0.8229	0.4055	1594.8
Thin film n=1.6	0.8246	0.4243	1825.1
Thin film n=1.49, 20°	0.8277	0.4676	1491.0
Thin film n=1.49, 40°	0.8362	0.4982	1422.0
Thin film n=1.49, 50°	0.857	0.4865	1417.4
Silicon Wafer	0.7991	0.5693	1860.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมมติเชิงแสงของฟิล์มบาง

เมื่อจำลองระบบออปติคัลโพรเซสเซอร์และวัดผลที่ได้ค่าความสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

4.2 ผลการวิเคราะห์สมมติเชิงแสงของตัวอย่าง

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและค่าดัชนีหักเหของ Silicon wafer



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษ เรื่อง การพัฒนาอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและสร้างระบบอิลลิปโซมิเตอร์ด้วยหลักการของเทคนิคอิลลิปโซเมทรี โดยพัฒนาซอฟต์แวร์ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Basic 2010 ในการออกแบบหน้าจอ User Interface เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-EASY168 STAMP เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่ติดอยู่กับอานาไลเซอร์ และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากระบบอิลลิปโซมิเตอร์ ซึ่งนำข้อมูลจากการเปลี่ยนแปลงของสถานะโพลาไรซ์ของแสงหลังจากการสะท้อนและหักเหในฟิล์มบางไปวิเคราะห์หาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ได้แก่ ดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดูดกลืน และค่าความหนาของฟิล์มบาง

ในการทดลองได้ทำการจำลองระบบอิลลิปโซมิเตอร์ ใช้เลเซอร์สีแดง มีความยาวคลื่นค่าเดียวเท่ากับ 632.8 นาโนเมตร เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น และใช้ Half Waveplate ในการกำหนดแนวระนาบของโพลาไรซ์แทนโพลาไรเซอร์ แล้วจัดระบบให้แสงตกกระทบพื้นผิวทำมุม 45 องศา และมุมสะท้อนเท่ากับ 45 องศา เก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับมุมอานาไลเซอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าค่าสมบัติเชิงแสง

จากผลการทดลองการเก็บข้อมูล จัดระบบเพื่อตรวจสอบสถานะและแนวระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงนั้น เห็นได้ว่าที่ half waveplate ทำมุม 0 องศา เมื่อค่าความเข้มแสงที่ 0 องศาของอานาไลเซอร์ที่จัดให้แกนโพลาไรซ์อยู่ในแนวตั้ง นั่นคือ 0 องศาของมุมอานาไลเซอร์จะมีความเข้มแสงสูงสุด ซึ่งความเข้มแสงที่ออกมาจากแนว 0 องศาของอานาไลเซอร์มีความเข้มสูงสุด และที่มุม 90 องศา ก็มีความเข้มต่ำสุด เพราะแกนของอานาไลเซอร์ตั้งฉากกับแนวโพลาไรซ์ของแสง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี จึงทำการวัดฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเห 1.49 และ 1.6 โดยที่แนวโพลาไรซ์ตกกระทบอยู่ในแนวตั้งเหมือนกัน เปรียบเทียบกราฟที่ออกมาจากการวัดฟิล์ม 2 ชนิดนี้ มีลักษณะของแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงทดลองวัดฟิล์มบางชนิดที่มีค่าดัชนีหักเห 1.49 แล้ววัดมุม Half waveplate 20 , 40 , 60 องศา ตามลำดับ เปรียบเทียบกราฟที่ออกมาปรากฏว่ามีเฟสที่ต่างกัน และมีแอมพลิจูดที่ต่างกัน โดยที่วัดมุม Half waveplate มาก แอมพลิจูดก็จะน้อยลง และเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง โดยฟูเรียร์ทรานฟอร์มกราฟเพื่อหาค่า s_0, s_1, s_2 แล้วนำไปแทนค่าหา ψ และ Δ เพื่อแก้สมการจนได้ค่า n, k, t นั้น จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยที่อ้างอิงทฤษฎี ปรากฏว่าผลลัพธ์ที่ได้ไม่ถูกต้องตามค่าจริง และทุกชุด

ข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อนจึงอาจต้องใช้เวลาในการตรวจสอบ และหาวิธีการพิสูจน์ และพัฒนาต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น

1. เนื่องจากผลการทดลอง ได้จากการจำลองระบบบิลลิปโซมิเตอร์เพื่อวัดการเปลี่ยนสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อตกกระทบพื้นผิวของฟิล์มบาง
2. ควรตรวจสอบโหมดของเลเซอร์ว่าอยู่ในโหมดใด เพราะโหมดของเลเซอร์มีผลกับสนามไฟฟ้า
3. ตรวจสอบเข้ครณะนตกกระทบว่าเป็นแสงโพลาไรซ์ชนิด s หรือโพลาไรซ์ชนิด p
4. กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลจนได้ค่า n , k , t ค่อนข้างซับซ้อนต้องใช้เวลาศึกษาและออกแบบซอฟต์แวร์ในตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจนได้ค่าที่ถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร.วราวุฒิ เถาวัลดีดา. ออปโตอิเล็กทรอนิกส์. การโพลาไรซ์ของแสง : หน้าที่ 93-162.
- [2] เอกชัย มะการ. เรียนรู้เข้าใจใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วย Arduino. กรุงเทพฯ : บริษัท อีทีที จำกัด , 2552.
- [3] Nectec. สเต็ปมอเตอร์(Stepping Motor) [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.nectec.or.th/schoolnet/library/webcontest2003/100team/dlnes137/am/step_motor.html. (วันที่ค้นข้อมูล : 23 ตุลาคม 2556).
- [4] Spreadsheet Ellipsometry [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~kondoh/ellips_e.html. (วันที่ค้นข้อมูล : 18 มกราคม 2557).
- [5] Dennis Goldstein. Polarized Light Revised and Expanded. Second Edition, New York : Marcel Dekker. , 2003.
- [6] Fujiwara, Hiroyuki. Spectroscopic ellipsometry : principles and applications. USA. : John Wiley & Sons Inc. , 2007.
- [7] Harland G. Tompkins and Eugene A. Irene. Handbook of Ellipsometry. Second Edition, USA.: William Andrew, Inc., 2005.
- [8] Jesper Jung , Jakob Bork ,Tobias Holmgaard and Niels Anker Kortbek. 2004. Ellipsometry. Institute of Physics and Nanotechnology Aalborg University
- [9] R.M.A.Azzam and N.M.Bashara. Ellipsometry and Polarized Light. New York : North-Holland. , 1977.

ภาคผนวก ก

```

// Source code program for microcontroller
int pls = 3; // pin 4 violet
int dir = 4; // pin 5 green
unsigned long int i;
unsigned long int pulse;
unsigned long int plsA, plsB, plsC ;
int m = 0;
boolean gate =false;
byte incoming[20];
byte mode;

void setup()
{
  Serial.begin(19200);
  pinMode(pls,OUTPUT);
  pinMode(dir,OUTPUT);
}

void loop()
{
  // listen
  if (Serial.available())
  {
    incoming[m] =Serial.read();
    if(incoming[0]=='R' | incoming[0]=='L')
      m++;
    //Serial.print(incoming[m-1]); echo
  }

  // Interface
  if(m==4)
  { m = 0;
    if(incoming[0]=='R')
      { // Clokwise Mode
        mode ='R';
        gate =true;
      }
    else if(incoming[0]=='L')
      { // Counter-Clokwise Mode
        mode ='L';
      }
  }
}

```

```

        gate =true;
        }
    }

    if(gate)
    {
        if(mode == 'R')
        { plsA = incoming[1];
          plsB = incoming[2];
          plsC = incoming[3];

          pulse = 255*((255*plsC) + plsB) + plsA;

          // pulse = 5000; //fix demo carefull error here!!
          // Serial.print("K");

          digitalWrite(dir,LOW);
          for(i = 0;i<pulse;i++)
          {
              digitalWrite(pls,HIGH);
              delayMicroseconds(50);
              digitalWrite(pls,LOW);
              delayMicroseconds(50);
          }

          // Serial.print("J");

          //delay(1000); //It shall be in computer software.
          Serial.print("Z");
          gate =false;
        }

        else if( mode ='L')
        { plsA = incoming[1];
          plsB = incoming[2];
          plsC = incoming[3];

          pulse = 255*((255*plsC) + plsB) + plsA;

          digitalWrite(dir,HIGH);
          for(i = 0;i<pulse;i++)

```

```
        {
            digitalWrite(pls,HIGH);
            delayMicroseconds(50);
            digitalWrite(pls,LOW);
            delayMicroseconds(50);
        }
        //delay(1000);
        Serial.print("Z");
        gate =false;
    }
}
```

ภาคผนวก ข

```
Imports System
Imports System.IO.Ports
Imports System.Math
Imports System.Numerics
```

```
Public Class FormMain
```

```
Public strDMMAddress As String           'ใช้ลิยเวิร์ด Public นำหน้าตัวแปรเพื่อฟอร์มอื่นๆ เข้าถึงได้
Public strPortName As String
Public strClose As String
```

```
Dim MyCurve As DYNAPLOT3Lib.Curve
```

```
Dim ioMgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
Dim DMM As Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
```

```
Dim DataAnalyzer() As Double
Dim DataIntensity() As Double
Dim Vmax As Double
Dim angle As Double
```

```
Dim numStart As Double
Dim numStop As Double
Dim numRes As Double
Dim pulse As Double
Dim volt As Double
Dim StepPoint As Integer = 0
Dim StepBack As Double
Dim StepNumber As Double ' ค่าจำนวนรอบที่ต้องการให้มอเตอร์หมุน
```

```
Dim Scanning As Boolean = False
Dim btnClick As Boolean = False
Dim StopBackslide As Boolean = False
```

```
Dim ByteIncoming As Byte = 0
```

```
Dim pls(3) As Integer
Dim plsA As Integer = pls(1)
Dim plsB As Integer = pls(2)
Dim plsC As Integer = pls(3)
```

```
Dim Stopwatch As New Stopwatch
```

```
Private Sub Analysis()
```

```
Dim s0, s1, s2 As Double
Dim sum1, sum2, sum3 As Double
Dim psi As Double
Dim psidet As Double
Dim delta As Double
Dim n0 As Double = 1
Dim n1 As Complex
Dim n2 As Double = 1.512
' Dim n, k As Complex
Dim EXPi As Complex
Dim P, A, B, C, D, E, F, R, U, V, W, X, Y, Z, beta, t0, t, thick As Complex
Dim m As Double
Try
    For IDX As Integer = 0 To DataAnalyzer.Length - 1
        sum1 += DataIntensity(IDX)
        sum2 += DataIntensity(IDX) * Cos(2 * DataAnalyzer(IDX) * PI / 180)
        sum3 += DataIntensity(IDX) * Sin(2 * DataAnalyzer(IDX) * PI / 180)
    Next
    ' Find s0,s1,s2
    s0 = (sum1 / 361) * 2
    s1 = (2 * sum2 / 361) * 2
    s2 = (2 * sum3 / 361) * 2

    psidet = Acos(-s1 / s0) / 2
    delta = Acos(s2 / s0 * 1 / Sin(2 * psidet))
```

```

psi = Atan(Tan(psidet) * Tan(45 * PI / 180))
EXPi = Complex.Exp(Complex.ImaginaryOne * delta)

n1 = (Complex.Sqrt(1 - (4 * Sin(45 * PI / 180) ^ 2 * Tan(psi) * EXPi) + (2 * Tan(psi) * EXPi) +
(Tan(psi) ^ 2 * EXPi)) * (n0 * Sin(45 * PI / 180))) / (Cos(45 * PI / 180) * (1 + Tan(psi) * EXPi))

'n = n1.Real
'k = n1.Imaginary

'Find Theta1
Dim theta0 As Double
Dim theta1 As Complex
Dim theta2 As Complex
Dim rho01s As Complex
Dim rho01p As Complex
Dim rho12s As Complex
Dim rho12p As Complex

theta0 = 45 * PI / 180
theta1 = Complex.Acos(Complex.Sqrt(1 - (n0 / n1) * (n0 / n1) * Sin(theta0) * Sin(theta0)))
theta2 = Complex.Asin(n1 * Complex.Sin(theta1) / n2)

rho01s = (n0 * Cos(theta0) - n1 * Complex.Cos(theta1)) / (n0 * Cos(theta0) + n1 * Complex.Cos
(theta1))
rho01p = (n1 * Cos(theta0) - n0 * Complex.Cos(theta1)) / (n1 * Cos(theta0) + n0 * Complex.Cos
(theta1))
rho12s = (n1 * Complex.Cos(theta1) - n2 * Complex.Cos(theta2)) / (n1 * Complex.Cos(theta1) + n2
* Complex.Cos(theta2))
rho12p = (n2 * Complex.Cos(theta1) - n1 * Complex.Cos(theta2)) / (n2 * Complex.Cos(theta1) + n1
* Complex.Cos(theta2))

P = Tan(psi) * Complex.Exp(Complex.ImaginaryOne * delta)
A = rho12p * rho01s * rho12s
B = rho01p * rho01s * rho12s + rho12p
C = rho01p
D = rho01p * rho12p * rho12s
E = rho01p * rho12p * rho01s + rho12s
F = rho01s

R = (P * E - B).Real
U = (P * D - A).Real
V = (P * F - C).Real
W = Complex.Sqrt(R * R - 4 * U * V)
X = (-R + -W) / 2 * U
beta = -Complex.Log(X) / 2 * Complex.ImaginaryOne
Y = beta.Imaginary
Z = Complex.Sqrt(n1 * n1 - n0 * n0 * Sin(theta0) * Sin(theta0))
t0 = (X * (632.8 * 10 ^ -9)) / (2 * PI * Z)
t = (632.8 * 10 ^ -9) / (2 * n1 * Cos(theta0))
m = 1
thick = t0 + m * t

' Update textbox
txtN.Text = n1.Real.ToString("n4")
txtK.Text = n1.Imaginary.ToString("n4")
txtT.Text = thick.Real.ToString

Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.Message)
End Try

End Sub

Private Sub ImportDATA()

End Sub

#Region "Controls"

```

```
Private Sub Clockwise_Mode()
```

```
    numStart = CDb1(txtAngleStart.Text)
    numStop = CDb1(txtAngleStop.Text)
    numRes = CDb1(txtAngleResolution.Text)
```

```
    pulse = numRes * 500 '500 pulse/Deg.
    plsA = pulse Mod 255
    plsB = (pulse \ 255) Mod 255
    plsC = (pulse \ 255) \ 255
```

```
Try
```

```
    While Scanning
```

```
        If numStart < numStop Then
            StepNumber = numStart + (StepPoint * numRes)
        End If
```

```
        ReDim Preserve DataAnalyzer(0 To StepPoint)
        ReDim Preserve DataIntensity(0 To StepPoint)
```

```
        '-----
        'คำสั่งส่งและรับข้อมูล
        '-----
```

```
        If StepPoint = 0 Then
            DMM.WriteString("READ?")
            volt = DMM.ReadNumber
```

```
        ElseIf StepPoint > 0 Then
```

```
            SerialPort1.DiscardInBuffer()
            SerialPort1.DiscardOutBuffer()
            SerialPort1.Write("R")
            SerialPort1.Write(Chr(plsA))
            SerialPort1.Write(Chr(plsB))
            SerialPort1.Write(Chr(plsC))
```

```
            Try
```

```
                ByteIncoming = SerialPort1.ReadByte
                If ByteIncoming = Asc("Z") Then
```

```
                    Stopwatch.Reset()
                    Stopwatch.Start()
```

```
                    DMM.WriteString("READ?")
                    'DELAY 200 MS-----
                    Do
                        Application.DoEvents()
                    Loop Until Stopwatch.ElapsedMilliseconds > 1000
                    '-----
                    volt = DMM.ReadNumber
```

```
                    Stopwatch.Stop()
```

```
                Else
                    'nothing
                End If
```

```
            Catch ex As Exception
```

```
                'Do Nothing
            End Try
```

```
        End If
```

```
        '-----
        'เก็บข้อมูล
        DataAnalyzer(StepPoint) = StepNumber
        DataIntensity(StepPoint) = volt
```

```

' Update Chart
If AxDynaPlot.DataCurves.Count = 0 Then
    MyCurve = AxDynaPlot.DataCurves.AddParametric("Curve", numStart, numRes, DataIntensity,
DataIntensity.Length).Curve()
Else
    MyCurve.UpdateDataParametric(numStart, numRes, DataIntensity, DataIntensity.Length)
    AxDynaPlot.Axes.Autoscale()
End If

'-----
If numStart < numStop Then
    If numStop = StepNumber Then Scanning = False
End If

If StopBackslide = True Then

    Stopwatch.Reset()
    Stopwatch.Start()

    'DELAY 1000 MS-----
    Do
        Application.DoEvents()
    Loop Until Stopwatch.ElapsedMilliseconds > 1000
    '-----
    Stopwatch.Stop()

    StepBack = numStart + StepNumber
    pulse = StepBack * 500 '500 pulse/Deg.
    plsA = pulse Mod 255
    plsB = (pulse \ 255) Mod 255
    plsC = (pulse \ 255) \ 255

    SerialPort1.DiscardInBuffer()
    SerialPort1.DiscardOutBuffer()
    SerialPort1.Write("L")
    SerialPort1.Write(Chr(plsA))
    SerialPort1.Write(Chr(plsB))
    SerialPort1.Write(Chr(plsC))

ElseIf StepBack = 0 And 360 Then
    'Noting
End If

'Next Point
StepPoint += 1
End While

'-----
' ถ้าเกินค่าน้อยกว่า 360 ให้หมุนกลับ
'-----
If numStop < 360 Then

    Stopwatch.Reset()
    Stopwatch.Start()
    'DELAY 1000 MS-----
    Do
        Application.DoEvents()
    Loop Until Stopwatch.ElapsedMilliseconds > 200
    '-----
    Stopwatch.Stop()

    pulse = numStop * 500 '500 pulse/Deg.
    plsA = pulse Mod 255
    plsB = (pulse \ 255) Mod 255
    plsC = (pulse \ 255) \ 255

    SerialPort1.DiscardInBuffer()
    SerialPort1.DiscardOutBuffer()
    SerialPort1.Write("L")
    SerialPort1.Write(Chr(plsA))

```

```

        SerialPort1.Write(Chr(plsB))
        SerialPort1.Write(Chr(plsC))
    End If

    '-----
    'Update botton เมื่อจบการพิกาน
    '-----
    If StepNumber = numStop Then
        gbDirectiions.Enabled = False
        gbScanConditions.Enabled = False
        gbMeasurement.Enabled = False
        MessageBox.Show("Scan Complete", "Ellipsometer", MessageBoxButtons.OK)
    End If

    Catch ex As Exception
        'Noting
    End Try

End Sub

Private Sub CounterClockwise_Mode()

    numStart = Cdbl(txtAngleStart.Text)
    numStop = Cdbl(txtAngleStop.Text)
    numRes = Cdbl(txtAngleResulution.Text)

    pulse = numRes * 500 '500 pulse/Deg.
    plsA = pulse Mod 255
    plsB = (pulse \ 255) Mod 255
    plsC = (pulse \ 255) \ 255

    Try

        While Scanning

            If numStart < numStop Then
                StepNumber = numStart + (StepPoint * numRes)
            End If

            ReDim Preserve DataAnalyzer(0 To StepPoint)
            ReDim Preserve DataIntensity(0 To StepPoint)
            '-----
            'คำสั่งส่งและรับข้อมูล
            '-----

            If StepPoint = 0 Then
                DMM.WriteString("READ?")
                volt = DMM.ReadNumber

            ElseIf StepPoint > 0 Then

                SerialPort1.DiscardInBuffer()
                SerialPort1.DiscardOutBuffer()
                SerialPort1.Write("L")
                SerialPort1.Write(Chr(plsA))
                SerialPort1.Write(Chr(plsB))
                SerialPort1.Write(Chr(plsC))

                Try
                    ByteIncoming = SerialPort1.ReadByte
                    If ByteIncoming = Asc("Z") Then

                        Stopwatch.Reset()
                        Stopwatch.Start()

                        DMM.WriteString("READ?")
                        'DELAY 200 MS-----
                        Do
                            Application.DoEvents()
                        Loop Until Stopwatch.ElapsedMilliseconds > 200
                        '-----
                        volt = DMM.ReadNumber
                    End Try
                End Try
            End If
        End While
    End Try
End Sub

```

```

        Stopwatch.Stop()

        Else
            'nothing
        End If

        Catch ex As Exception

            'Do Nothing
        End Try
    End If
'-----
'เก็บข้อมูล
DataAnalyzer(StepPoint) = StepNumber
DataIntensity(StepPoint) = volt

'-----

' Update Chart
If AxDynaPlot.DataCurves.Count = 0 Then
    MyCurve = AxDynaPlot.DataCurves.AddParametric("Curve", numStart, numRes, DataIntensity,
DataIntensity.Length).Curve()
Else
    MyCurve.UpdateDataParametric(numStart, numRes, DataIntensity, DataIntensity.Length)
    AxDynaPlot.Axes.Autoscale()
End If

'-----
If numStart < numStop Then
    If numStop = StepNumber Then Scanning = False
End If

If StopBackslide = True Then

    Stopwatch.Reset()
    Stopwatch.Start()

    'DELAY 1000 MS-----
    Do
        Application.DoEvents()
    Loop Until Stopwatch.ElapsedMilliseconds > 1000
    '-----
    Stopwatch.Stop()

    StepBack = numStart + StepNumber
    pulse = StepBack * 500 '500 pulse/Deg.
    plsA = pulse Mod 255
    plsB = (pulse \ 255) Mod 255
    plsC = (pulse \ 255) \ 255

    SerialPort1.DiscardInBuffer()
    SerialPort1.DiscardOutBuffer()
    SerialPort1.Write("R")
    SerialPort1.Write(Chr(plsA))
    SerialPort1.Write(Chr(plsB))
    SerialPort1.Write(Chr(plsC))

    ElseIf StepBack = 0 And 360 Then
        'Noting
    End If

    'Next Point
    StepPoint += 1
End While

'-----
' ถ้าเก็บค่าน้อยกว่า 360 ให้หมุนกลับ
'-----
If numStop < 360 Then

```

```

    Stopwatch.Reset()
    Stopwatch.Start()
    'DELAY 1000 MS-----
    Do
        Application.DoEvents()
    Loop Until Stopwatch.ElapsedMilliseconds > 1000
    '-----
    Stopwatch.Stop()

    pulse = numStop * 500 '500 pulse/Deg.
    plsA = pulse Mod 255
    plsB = (pulse \ 255) Mod 255
    plsC = (pulse \ 255) \ 255

    SerialPort1.DiscardInBuffer()
    SerialPort1.DiscardOutBuffer()
    SerialPort1.Write("R")
    SerialPort1.Write(Chr(plsA))
    SerialPort1.Write(Chr(plsB))
    SerialPort1.Write(Chr(plsC))
End If

'-----
'Update botton เมื่อจบการทำงาน
'-----
If StepNumber = numStop Then
    gbDirectiions.Enabled = False
    gbScanConditions.Enabled = False
    gbMeasurement.Enabled = False
    MessageBox.Show("Scan Complete", "Ellipsometer", MessageBoxButtons.OK)
End If

Catch ex As Exception
    'Noting
End Try
End Sub

Private Sub ResetDynaplot()

    Try
        '-----
        Dim x(0) As Double
        Dim y(0) As Double

        AxDynaPlot.DataCurves.RemoveAll()

        MyCurve = AxDynaPlot.DataCurves.Add("Reset", x, y, 0, False).Curve

        AxDynaPlot.Axes.XAxis.From = 0
        AxDynaPlot.Axes.XAxis.To = 360
        AxDynaPlot.Axes.YAxis.From = 0
        AxDynaPlot.Axes.YAxis.To = 50
        '-----

    Catch ex As Exception
        'Noting
    End Try

End Sub

Private Sub ResetSetting()

    radClockwise.Checked = False
    radCounterClockwise.Checked = False

    txtAngleStart.Text = "0"
    txtAngleStop.Text = "360"
    txtAngleResolution.Text = "1.0"

    gbDirectiions.Enabled = True
    gbScanConditions.Enabled = True
    gbMeasurement.Enabled = False

    StepPoint = 0

```

```
Scanning = False
btnClick = False
StopBackslide = False
ByteIncoming = 0
```

```
End Sub
```

```
Private Sub GotoStart_CW()
```

```
'Update Bottons
gbMeasurement.Enabled = True
btnStart.Enabled = True
btnPause.Enabled = False
btnStop.Enabled = False
numStart = CDb1(txtAngleStart.Text)

pulse = numStart * 500 '500 pulse/Deg.
plsA = pulse Mod 255
plsB = (pulse \ 255) Mod 255
plsC = (pulse \ 255) \ 255
```

```
Try
```

```
SerialPort1.DiscardInBuffer()
SerialPort1.DiscardOutBuffer()
SerialPort1.Write("R")
SerialPort1.Write(Chr(plsA))
SerialPort1.Write(Chr(plsB))
SerialPort1.Write(Chr(plsC))
```

```
'-----
Catch ex As Exception
'Nothing
End Try
```

```
End Sub
```

```
Private Sub GotoStart_CCW()
```

```
'Update Bottons
gbMeasurement.Enabled = True
btnStart.Enabled = True
btnPause.Enabled = False
btnStop.Enabled = False
numStart = CDb1(txtAngleStart.Text)

pulse = numStart * 500 '500 pulse/Deg.
plsA = pulse Mod 255
plsB = (pulse \ 255) Mod 255
plsC = (pulse \ 255) \ 255
```

```
Try
```

```
SerialPort1.DiscardInBuffer()
SerialPort1.DiscardOutBuffer()
SerialPort1.Write("L")
SerialPort1.Write(Chr(plsA))
SerialPort1.Write(Chr(plsB))
SerialPort1.Write(Chr(plsC))
```

```
'-----
Catch ex As Exception
'Nothing
End Try
End Sub
```

```
Private Sub StartRunning()
```

```
Scanning = True

'Update Bottons
btnStart.Enabled = False
```

```

    btnPause.Enabled = True
    btnStop.Enabled = True
    'Serect directions Mode
    If radClockwise.Checked = True Then
        Clockwise_Mode()
    ElseIf radCounterClockwise.Checked = True Then
        CounterClockwise_Mode()
    End If

```

```
End Sub
```

```

Private Sub PauseRunning()
    PauseBotton()
    'Update Bottons
    btnStart.Enabled = False
    btnPause.Enabled = True
    btnStop.Enabled = True

    If btnPause.Text = "Pause" Then
        ContinueRunning()
    ElseIf btnPause.Text = "Continue" Then
        Scanning = False
    End If

```

```
End Sub
```

```

Private Sub ContinueRunning()
    Scanning = True
    'Update Bottons
    btnStart.Enabled = False
    btnPause.Enabled = True
    btnStop.Enabled = True
    'Serect directions Mode
    If radClockwise.Checked = True Then
        Clockwise_Mode()
    ElseIf radCounterClockwise.Checked = True Then
        CounterClockwise_Mode()
    End If

```

```
End Sub
```

```

Private Sub StopRunning()
    Scanning = False
    StopBackslide = True
    'Update Bottons
    btnStart.Enabled = False
    btnPause.Enabled = False
    btnPause.Text = "Pause"
    btnStop.Enabled = False
End Sub

```

```

Private Sub PauseBotton()
    btnClick = Not btnClick
    If btnClick = True Then
        btnPause.Text = "Continue"
    ElseIf btnClick = False Then
        btnPause.Text = "Pause"
    End If
End Sub

```

```
#End Region
```

```
#Region "Scan conditions"
```

```

Private Sub btnGotoStartPoint_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles btnGotoStartPoint.Click

```

```

    gbDirectiions.Enabled = False
    gbScanConditions.Enabled = False

    If radClockwise.Checked = True Then
        GotoStart_CW()
    ElseIf radCounterClockwise.Checked = True Then

```

```
        GotoStart_CCW()
    Else
        MsgBox("You have not selected direction mode.", MessageBoxIcon.Error)
        gbDirections.Enabled = True
        gbScanConditions.Enabled = True
    End If

End Sub

Private Sub btnStart_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles btnStart. ◀
Click
    StepPoint = 0
    Scanning = False
    btnClick = False
    StopBackslide = False
    ByteIncoming = 0
    StartRunning()
End Sub

Private Sub btnPause_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles btnPause. ◀
Click
    PauseRunning()
End Sub

Private Sub btnStop_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles btnStop. ◀
Click
    StopRunning()
End Sub

Private Sub mnuMeasureStart_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ◀
mnuMeasureStart.Click
    'Update Menu
    mnuMeasureStart.Enabled = False
    mnuMeasureStop.Enabled = True
    mnuMeasurePause.Enabled = True
    mnuMeasureContinue.Enabled = False

    StartRunning()
End Sub

Private Sub mnuMeasureStop_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ◀
mnuMeasureStop.Click
    'Update Menu
    mnuMeasureStart.Enabled = False
    mnuMeasureStop.Enabled = False
    mnuMeasurePause.Enabled = False
    mnuMeasureContinue.Enabled = False
    StopRunning()
End Sub

Private Sub mnuMeasurePause_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ◀
mnuMeasurePause.Click
    'Update Menu
    mnuMeasureStart.Enabled = False
    mnuMeasureStop.Enabled = True
    mnuMeasurePause.Enabled = False
    mnuMeasureContinue.Enabled = True
    PauseRunning()
End Sub

Private Sub mnuMeasureContinue_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ◀
mnuMeasureContinue.Click
    'Update Menu
    mnuMeasureStart.Enabled = False
    mnuMeasureStop.Enabled = True
    mnuMeasurePause.Enabled = False
    mnuMeasureContinue.Enabled = False
    PauseRunning()
End Sub

#End Region

#Region "File"
```

```

Private Sub mnuFileNewMeasurement_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles mnuFileNewMeasurement.Click
    ResetDynaplot()
    ResetSetting()

End Sub

Private Sub mnuFileSaveData_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
mnuFileSaveData.Click

    Dim tempStr As String = ""
    For IDX As Integer = 0 To DataAnalyzer.Length - 1
        tempStr &= DataAnalyzer(IDX) & ", " & DataIntensity(IDX) & vbNewLine
    Next

    Try
        With SaveData
            .Filter = "Text File(*.csv)|*.csv"
            .Title = "บันทึกผลวัด"
            .AddExtension = True
            .DefaultExt = ".csv"
            .FileName = "*.csv"
            .ValidateNames = True
            .OverwritePrompt = True
        End With

        If SaveData.ShowDialog = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
            Dim fileName As String = SaveData.FileName
            My.Computer.FileSystem.WriteAllText(fileName, tempStr, False)
        End If

        Catch ex As Exception
            'Noting
        End Try

    End Sub

Private Sub mnuFileSaveDataAs_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
mnuFileSaveDataAs.Click

End Sub

Private Sub mnuFileExit_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
mnuFileExit.Click
    Me.Close()
End Sub

#End Region

#Region "Device"

Private Sub ConnectDivice()

    If strClose = "True" Then

        'Connect DMM 34401A
        Try
            ioMgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
            DMM = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
            DMM.IO = ioMgr.Open(strDMMAddress)
            DMM.IO.Timeout = 7000
            DMM.WriteString("CONF:VOLT:DC 15, 0.0001") '15-> range , 0.0001 -> resolution

            lblDMM.Text = "Connected"
            lblDMM.BackColor = Color.LimeGreen
        Catch ex As Exception
            MsgBox(ex.Message)
            lblUSB.Text = "Disconnected"
            lblUSB.BackColor = Color.Red
        End Try

    End Sub

```

```

'Connect USB Port
Try

    If SerialPort1.IsOpen Then SerialPort1.Close()
    SerialPort1.PortName = strPortName
    SerialPort1.BaudRate = 19200
    SerialPort1.Parity = IO.Ports.Parity.None
    SerialPort1.DataBits = 8
    SerialPort1.Handshake = IO.Ports.Handshake.None
    SerialPort1.StopBits = IO.Ports.StopBits.One
    SerialPort1.RtsEnable = True
    SerialPort1.WriteTimeout = 1000
    SerialPort1.ReadTimeout = 7000
    SerialPort1.Encoding = System.Text.Encoding.Default
    SerialPort1.Open()

    lblUSB.Text = "Connected"
    lblUSB.BackColor = Color.LimeGreen
Catch ex As Exception
    MsgBox(ex.Message)
    lblUSB.Text = "Disconnected"
    lblUSB.BackColor = Color.Red
End Try

ElseIf strClose = "False" Then
    gbDirectiions.Enabled = False
    gbScanConditions.Enabled = False
    gbMeasurement.Enabled = False

End If

If lblDMM.Text = "Connected" And lblUSB.Text = "Connected" Then
    gbDirectiions.Enabled = True
    gbScanConditions.Enabled = True
    gbMeasurement.Enabled = False
End If

End Sub

Private Sub DisconnectDevice()

    'Disconnect DMM 34401A
    Try
        DMM.IO.Close()
        lblDMM.Text = "Disconnected"
        lblDMM.BackColor = Color.Red
    Catch ex As Exception
        'Noting
        lblDMM.Text = "Disconnected"
        lblDMM.BackColor = Color.Red
    End Try

    'Disconnect USB Port
    Try
        SerialPort1.Close()
        lblUSB.Text = "Disconnected"
        lblUSB.BackColor = Color.Red
    Catch ex As Exception
        'Noting
        lblUSB.Text = "Disconnected"
        lblUSB.BackColor = Color.Red
    End Try

    If lblDMM.Text = "Disconnected" And lblUSB.Text = "Disconnected" Then
        gbDirectiions.Enabled = False
        gbScanConditions.Enabled = False
        gbMeasurement.Enabled = False
    End If

End Sub
Private Sub mnuDeviceConnect_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
mnuDeviceConnect.Click

```

```
FormSettingConnect.ShowDialog()
ConnectDivice()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub mnuDeviceDisconnect_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles mnuDeviceDisconnect.Click
    DisconnectDevice()
End Sub
```

```
#End Region
```

```
#Region "Options"
```

```
Private Sub mnuOptionsSettingAnalyzer_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles mnuOptionsSettingAnalyzer.Click
```

```
    If MsgBox("Do you want to setting analyzer ?", MsgBoxStyle.OkCancel + MsgBoxStyle.Question, "Setting
Analyzer") = MsgBoxResult.Ok Then
```

```
        StepPoint = 0
        Vmax = 0
        lblPleasewait.Text = "Please wait..."
        pgbSettingAnalyzer.Visible = True
        pgbSettingAnalyzer.Minimum = 0
        pgbSettingAnalyzer.Maximum = 360
        lblPercent.Text = "0%"
```

```
        Scanning = True
        SettingAnalyzer()
```

```
    Else
        'Nothing
    End If
```

```
End Sub
```

```
#End Region
```

```
#Region "Help"
```

```
Private Sub mnuHelpManual_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
mnuHelpManual.Click
    MessageBox.Show("วิธีการใช้โปรแกรมอิลลิปโซมิเตอร์" + vbCrLf + " ", "Manual", MessageBoxButtons.OK)
```

```
End Sub
Private Sub mnuHelpAbout_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
mnuHelpAbout.Click
    MessageBox.Show("Ellipsometer Program" + vbCrLf + "©2013, Applied Physics @KMITL." + vbCrLf +
"Design by Suree Lamphao", "About Ellipsometer Program", MessageBoxButtons.OK)
End Sub
```

```
Private Sub FormMain_FormClosing(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.Windows.Forms.
FormClosingEventArgs) Handles MyBase.FormClosing
```

```
    If MsgBox("Do you want to exit program ?", MsgBoxStyle.YesNo + MsgBoxStyle.Question, "Exit") =
MsgBoxResult.Yes Then
        e.Cancel = False
```

```
    Else
        e.Cancel = True
    End If
```

```
End Sub
```

```
#End Region
```

```
Private Sub SettingAnalyzer()
```

```
    pulse = 1 * 500 '500 pulse/Deg.
    plsA = pulse Mod 255
    plsB = (pulse \ 255) Mod 255
    plsC = (pulse \ 255) \ 255
```

```
    Try
        While Scanning
```

```

StepNumber = 0 + (StepPoint * 1)

ReDim Preserve DataAnalyzer(0 To StepPoint)
ReDim Preserve DataIntensity(0 To StepPoint)

'-----
' คำนวณและส่งและรับข้อมูล
'-----
If StepPoint = 0 Then
    DMM.WriteString("READ?")
    volt = DMM.ReadNumber

ElseIf StepPoint > 0 Then

    SerialPort1.DiscardInBuffer()
    SerialPort1.DiscardOutBuffer()
    SerialPort1.Write("R")
    SerialPort1.Write(Chr(plsA))
    SerialPort1.Write(Chr(plsB))
    SerialPort1.Write(Chr(plsC))

    Try
        ByteIncoming = SerialPort1.ReadByte
        If ByteIncoming = Asc("Z") Then

            Stopwatch.Reset()
            Stopwatch.Start()

            DMM.WriteString("READ?")
            'DELAY 200 MS-----
            Do
                Application.DoEvents()
            Loop Until Stopwatch.ElapsedMilliseconds > 200
            '-----
            volt = DMM.ReadNumber

            Stopwatch.Stop()

        Else
            'nothing
        End If

    Catch ex As Exception

        'Do Nothing
    End Try
End If
'-----
' เก็บข้อมูล
DataAnalyzer(StepPoint) = StepNumber
DataIntensity(StepPoint) = volt

If DataIntensity(StepPoint) > Vmax Then
    Vmax = volt
    angle = StepNumber
End If

'-----

If StepNumber = 360 Then Scanning = False

pgbSettingAnalyzer.Value = StepNumber
lblPercent.Text = (StepNumber * 100) \ 360 & "%"
'Next Point
StepPoint += 1
End While

```

```

lblPleasewait.Text = "Scan Complete "
lblPleasewait.Text = ""
lblPercent.Text = ""
pgbSettingAnalyzer.Visible = False
'set analyzer-----

pulse = angle * 500 '500 pulse/Deg.
plsA = pulse Mod 255
plsB = (pulse \ 255) Mod 255
plsC = (pulse \ 255) \ 255

SerialPort1.DiscardInBuffer()
SerialPort1.DiscardOutBuffer()
SerialPort1.Write("R")
SerialPort1.Write(Chr(plsA))
SerialPort1.Write(Chr(plsB))
SerialPort1.Write(Chr(plsC))

ByteIncoming = SerialPort1.ReadByte
If ByteIncoming = Asc("Z") Then
    MsgBox("Set Analyzer Complete", MsgBoxStyle.OkOnly, "Setting Analyzer")
Else
    'nothing
End If
'-----

```

```
Catch ex As Exception
```

```
End Try
```

```
End Sub
```

```
Private Sub FormMain_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
```

```

    gbDirections.Enabled = False
    gbScanConditions.Enabled = False
    gbMeasurement.Enabled = False
    gbAnalysis.Enabled = True
    pgbSettingAnalyzer.Visible = False
    lblPleasewait.Text = ""
    lblPercent.Text = ""

```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnImportData_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles btnImportData.Click
```

```

    ImportDATA()

```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnDataAnalysis_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles btnDataAnalysis.Click
```

```

    Analysis()

```

```
End Sub
```

```
End Class
```

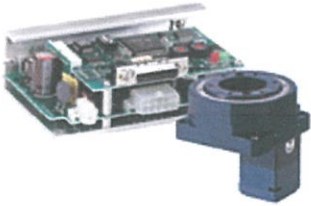
ภาคผนวก ค

Oriental Motor U.S.A. Corp.
 1001 Knox St.
 Torrance, CA 90502
 Tel: 800-418-7903 Fax: 800-309-7999
 www.orientalmotor.com

Item # DG60-ASAK, Hollow Rotary Actuator

Web Price \$1406.00

Hollow Rotary Actuator



AlphaStep closed loop step motors with a hollow rotary gearhead.

- Large-Diameter, Hollow Output Table
- Direct Coupling
- Accurate Positioning
- Shorter Positioning Time
- Easy Home Operation



[LEAD TIME](#) · [SPECIFICATIONS](#)

LEAD TIME

Available to Ship ¹	Contact your local sales office for more information.
--------------------------------	---

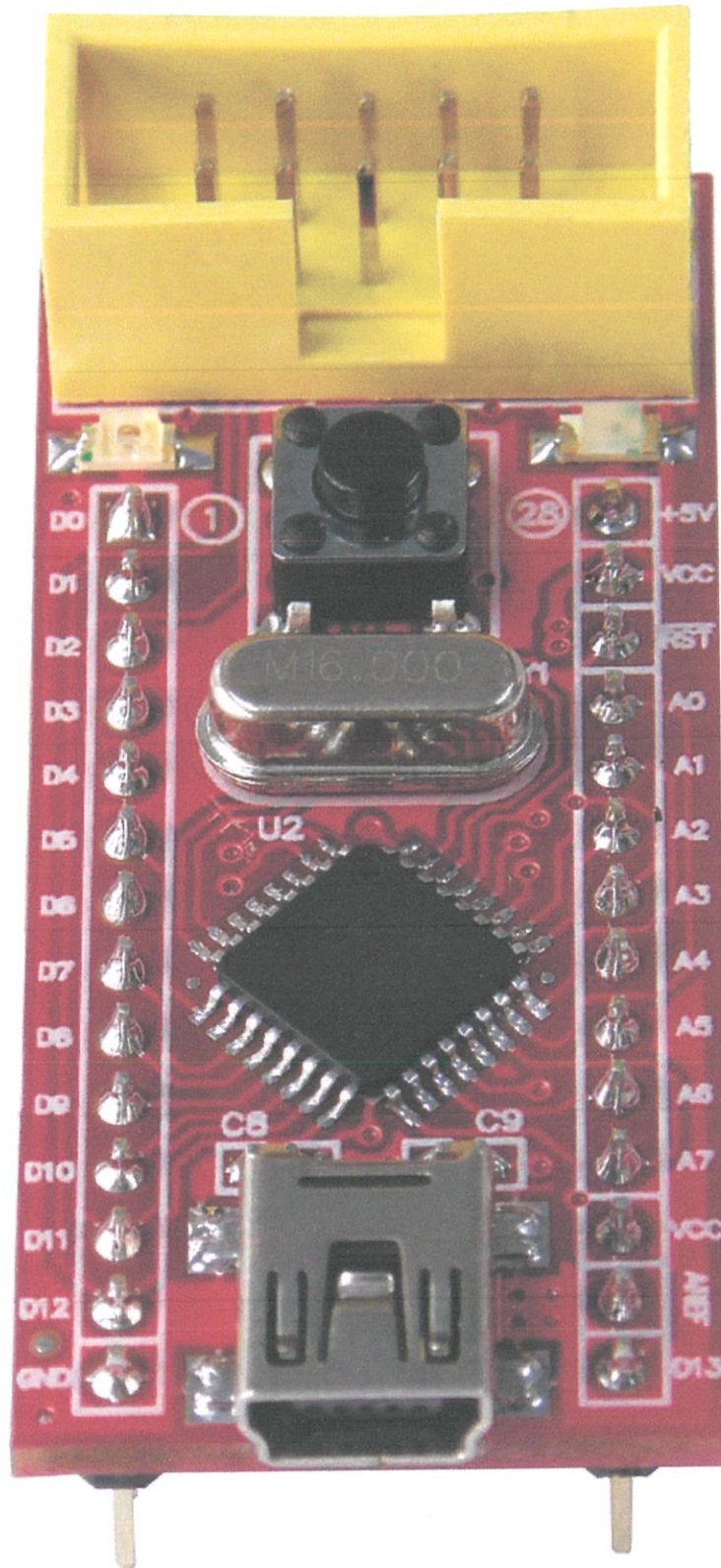
¹ Quoted Ship Date for orders placed before 12:00pm PST in quantities listed.
 A newer version of this product is available, contact your local sales office for more information.

SPECIFICATIONS

Motor Type	Hollow Rotary Actuator
Type	Standard
Frame Size (in. sq.)	2.36
Power Supply	24 VDC
Current	1.0 A
Shaft	Single
Permissible Torque (lb-in)	7.9
Maximum Holding Torque (lb-in)	3.9
Inertial Moment (oz-in ²)	24

Permissible Speed (r/min)	200
Resolution	9000 P/R (Resolution Setting: 0.04°/pulse [500] [X1]) 18000 P/R (Resolution Setting: 0.02°/pulse [1000] [X1]) 90000 P/R (Resolution Setting: 0.004°/pulse [500] [X10]) 180000 P/R (Resolution Setting: 0.002°/pulse [1000] [X10])
Repetitive Positioning Accuracy (sec)	±15 (±0.004°)
Lost Motion (min)	2 (0.033°)
Angle Transfer Error (min)	4 (0.067°)
Permissible Thrust Load (lb)	22
Permissible Moment Load (lb-in)	17.7
Parallelism of Output Table (in.)	0.002
Components	ASD10A-K (Driver) DGM60-ASAK (Actuator)
RoHS Compliant	Yes
Safety Standards	UL CSA CE
CE Marking	EMC Directives
Insulation Class	[Motor] Class B (266°F [130°C]), Recognized as Class A (221°F [105°C]) by UL and CSA standards.
Insulation Resistance	[Motor] 100 M Ω minimum when measured by a 500 VDC megger between the Frame - Motor and Sensor Windings. [Driver] 100 M Ω when measured by a 500 VDC megger between the Heat Sink - Power Supply Terminal.
Dielectric Strength (Motor)	Sufficient to withstand the following for 1 minute: Frame - Motor and Sensor Windings 0.5 kV 50 Hz or 60 Hz
Dielectric Strength (Driver)	Sufficient to withstand the following for 1 minute: Heat sink - Power supply input terminal 0.5 kV 50 Hz or 60 Hz
Ambient Temperature Range	[Motor] 32°F ~ 122°F (0°C ~ 50°C) (nonfreezing), 32°F ~ 104°F (0°C ~ 40°C) when home-sensor set is attached. [Driver] 32°F ~ 104°F (0°C ~ 40°C) (nonfreezing).
Ambient Humidity	85% or less (noncondensing)
Degree of Protection	[Driver] IP00 [Motor] IP40 (IP20 for motor connector)

ET-EASY168 STAMP



รูปแสดงโครงสร้างของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

ET-EASY168 STAMP เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR8 ขนาดเล็กจิ๋ว โดยมีขนาดของบอร์ดเพียง 2cm x 5cm เท่านั้น ซึ่งขนาดบอร์ด ประมาณเท่ากับตัวถังของไอซี 28 DIP 300 โดยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR8 เบอร์ ATmega168 ของ ATMEL เป็น MCU ประจำบอร์ด โดยเลือกใช้ MCU ที่มีรูปร่างตัวถังแบบ 32 TQFP พร้อมวงจรรอบนอกที่จำเป็นอย่าง Oscillator และ Reset รวมไว้ด้วยภายในบอร์ด นอกจากนี้แล้วภายในตัวบอร์ดยังได้รวมเอาไอซี USB Bridge ของ FTDI เบอร์ FT232R เพื่อใช้ติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมด้วย RS232 กับคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ต USB ได้โดยตรง

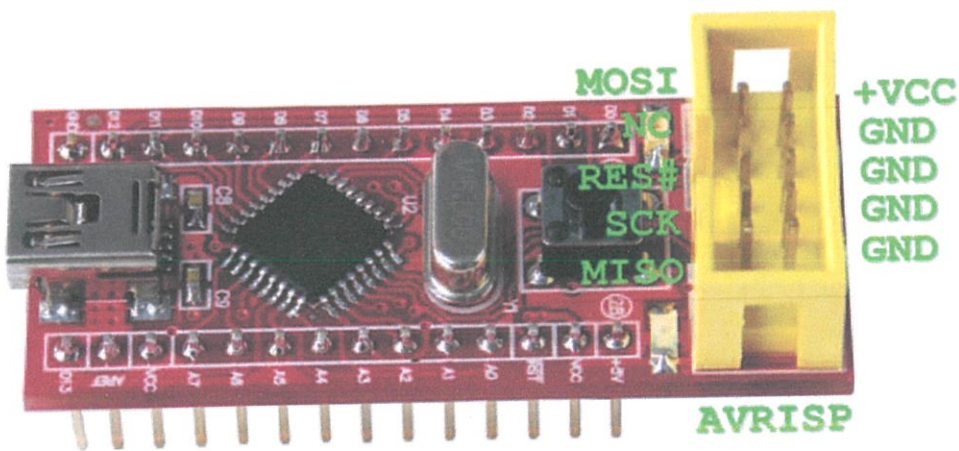
ทำให้บอร์ด ET-EASY168 STAMP เป็นบอร์ดทดลองขนาดเล็กที่เพียบพร้อมไปด้วยวงจรพื้นฐานที่จำเป็นต่อการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR8 อย่างแท้จริง เพียงแค่เสียบสาย USB จากพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ PC เข้ากับหัว USB ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP ก็สามารถทำการเขียนโปรแกรม และ Download Code ให้กับ MCU เพื่อทำการทดลองได้ทันที

คุณสมบัติของบอร์ด

- เลือกใช้ MCU ตระกูล AVR8 เบอร์ ATmega168 ของ ATMEL Run ความถี่ 16.00 MHz
 - มีหน่วยความจำ Flash สำหรับเขียนโปรแกรม 16KByte ถ้าใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านระบบ AVRISP หรือ 14Kbyte เมื่อใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านระบบ Boot Loader RS232
 - มี SRAM ใช้งานขนาด 1KByte และ EEPROM ใช้งานขนาด 512 Byte
 - มี GPIO ใช้งานจำนวน 22 บิต
 - Digital GPIO จำนวน 14 บิต
 - Analog Input (ADC) ขนาดความละเอียด 10บิต จำนวน 8 ช่อง
- ใช้งานกับแรงดันไฟตรงขนาด +5VDC โดยใช้ได้ทั้งกับแหล่งจ่าย +5VDC/500mA จากพอร์ต USB และจากแหล่งจ่าย +5VDC จากภายนอกได้ด้วย พร้อม LED Power แสดงสถานะของแหล่งจ่าย
- มีวงจร External Reset แบบ RC Reset และ Switch Reset พร้อมภายในบอร์ด
- หัวต่อใช้งานวางตัวบน Pin Header ระยะห่าง 2.54mm(100mil) ขนาด 28 Pin (ด้านละ14Pin) ระยะห่าง 600mil(1.5cm) ง่ายต่อการนำไปต่อประยุกต์ใช้งาน และ ขยายวงจร I/O สามารถใช้กับ Project Board และ PCB เอนกประสงค์ได้โดยง่าย
- มีหัวต่อ USB สำหรับเชื่อมต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ PC ผ่าน USB Bridge ของ FTDI ในรูปแบบของการสื่อสารอนุกรม RS232 สำหรับใช้งานสื่อสารและ Download Code ให้กับ MCU ในบอร์ด
- มีหัว AVRISP แบบ IDE 10PIN สำหรับใช้ Download โปรแกรมให้กับ MCU ภายในบอร์ดในกรณีไม่ต้องการใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านทาง Boot Loader
- มี LED แสดงสถานะ โดยต่อกับ PB5 ของ AVR (Digital-13 ของ Arduino Project) สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ทดลองการทำงานอย่างง่าย

AVR	Arduino	Pin	ET-EASY168 STAMP	Pin	Arduino	AVR
PD0	Digital-0	1		28	+5V(+Vin)	+5V(+Vin)
PD1	Digital-1	2		27	+VCC(+5V)	+VCC(+5V)
PD2	Digital-2	3		26	RESET#	RESET(PC6)
PD3	Digital-3	4		25	Analog-0	PC0/ADC0
PD4	Digital-4	5		24	Analog-1	PC1/ADC1
PD5	Digital-5	6		23	Analog-2	PC2/ADC2
PD6	Digital-6	7		22	Analog-3	PC3/ADC3
PD7	Digital-7	8		21	Analog-4	PC4/ADC4
PB0	Digital-8	9		20	Analog-5	PC5/ADC5
PB1	Digital-9	10		19	Analog-6	ADC6
PB2	Digital-10	11		18	Analog-7	ADC7
PB3	Digital-11	12		17	+VCC(+5V)	+VCC(+5V)
PB4	Digital-12	13		16	+AREF	+AREF
GND	GND	14		15	Digital-13	PB5

ตารางแสดง การจัดสรรขาสัญญาณของบอร์ด ET-EASY168 STAMP



AVR	Arduino	Pin	AVRISP	Pin	Arduino	AVR
PB3	Digital-11	MOSI		+VCC	+VCC	+VCC
-	-	NC		GND	GND	GND
RES#	RES#	RES#		GND	GND	GND
PB5	Digital-13	SCK		GND	GND	GND
PB4	Digital-12	MISO		GND	GND	GND

หน้าที่ของขาสัญญาณในการใช้งานแบบ “Arduino Project”

- +5V(+Vin) เป็นขาสำหรับใช้เป็นจุดรับแรงดันขนาด +5VDC จากภายนอกเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับบอร์ด
- +VCC(+5V) เป็นขาแหล่งจ่ายไฟจุดเดียวกันกับที่ป้อนให้กับ +VCC ของ MCU ซึ่งจุดนี้จะรับแรงดันมาจาก 2 แหล่ง ด้วยกันคือ ขารับแรงดัน +5V(+Vin) จากขา 28 ของบอร์ด และ จากขา +VUSB(+5V) จากขั้ว USB ของบอร์ด โดยมี Diode ป้องกันการย้อนกลับของแรงดันไว้แล้ว
- +AREF เป็นขาสำหรับรับสัญญาณแรงดันอ้างอิง (Analog Reference) ให้กับวงจร Analog Input ในกรณีต้องการใช้แรงดันอ้างอิงจากภายนอก
- RESET# เป็นขาสัญญาณ RESET ของ CPU ทำงานที่ Logic “0”
- Digital[0..13] เป็นขา I/O แบบ Digital สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับสัญญาณ Logic TTL (5V) ต่างๆ
- Analog[0..7] เป็นขา Input แบบ Analog สามารถรับ Input แบบ Analog 0..+5V

หน้าที่ของขาสัญญาณในการใช้งานแบบ “AVR Micro Controller”

- +5V(+Vin) เป็นขาสำหรับใช้เป็นจุดรับแรงดันขนาด +5VDC จากภายนอกเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับบอร์ด
- +VCC(+5V) เป็นขาแหล่งจ่ายไฟจุดเดียวกันกับที่ป้อนให้กับ +VCC ของ MCU ซึ่งจุดนี้จะรับแรงดันมาจาก 2 แหล่ง ด้วยกันคือ ขารับแรงดัน +5V(+Vin) จากขา 28 ของบอร์ด และ จากขา +VUSB(+5V) จากขั้ว USB ของบอร์ด โดยมี Diode ป้องกันการย้อนกลับของแรงดันไว้แล้ว
- +AREF เป็นขาสำหรับรับสัญญาณแรงดันอ้างอิง (Analog Reference) ให้กับวงจร Analog Input ในกรณีต้องการใช้แรงดันอ้างอิงจากภายนอก
- RESET# เป็นขาสัญญาณ RESET ของ CPU ทำงานที่ Logic “0”
- PB[0..5] เป็นขา I/O แบบ Digital สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับสัญญาณ Logic TTL (5V) ต่างๆ
- PD[0..7] เป็นขา I/O แบบ Digital สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับสัญญาณ Logic TTL (5V) ต่างๆ
- PC[0..5] เป็นขา I/O ซึ่งสามารถกำหนดให้เป็นที่ทั้ง Digital และ Analog Input
- ADC6,ADC7 เป็นขา Input แบบ Analog สามารถรับ Input แบบ Analog 0..+5V

การพัฒนาโปรแกรมของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

ในการพัฒนาโปรแกรมของบอร์ด ET-EASY168 STAMP นั้น ผู้ใช้สามารถเลือกใช้วิธีการพัฒนาโปรแกรมได้ 2 รูปแบบด้วยกัน คือ

- AVR Micro Controller เป็นการพัฒนาโปรแกรมตามรูปแบบของ AVR Micro Controller ปรกติ ซึ่งสามารถเลือกใช้โปรแกรมภาษาใดก็ได้ที่รองรับการใช้งานร่วมกับ AVR เบอร์ ATmega168 ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกใช้โปรแกรมในการพัฒนาได้ตามความถนัด เช่น ภาษาเบสิก BASCOM-AVR หรือ ภาษาซี เช่น Code Vision และ WinAVR เป็นต้น
- Arduino Project เป็นการพัฒนาโปรแกรมโดยใช้โปรแกรมและชุดคำสั่งในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี (C++) ของ "Arduino Project" ซึ่งเป็นโครงการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR แบบ Open Source ซึ่งกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโครงการที่เปิดเผยทั้ง Source Code ในการพัฒนาให้ทั้งหมดและยังมีตัวอย่างโครงงานพร้อมตัวอย่างโปรแกรมการทดลองต่างๆแจกจ่ายให้ผู้สนใจนำมาใช้ศึกษา เรียนรู้และทดลอง ได้ฟรี โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายใดๆ ผู้สนใจสามารถเข้าไปค้นหารายละเอียดต่างๆของ Arduino Project นี้ได้ <http://www.arduino.cc/>

Helium-Neon Laser Heads 1100 Series



- Key Features**
- Long operating life
 - Low noise
 - Exceptional beam-pointing stability
 - Long-term amplitude stability

The JDS Uniphase 1100 Series red helium-neon laser products offer low noise, high power stability, and long life for the most demanding applications. With more than 1.5 million units sold, JDS Uniphase lasers are the industry standard for many advanced system designs.

JDS Uniphase manufactures helium-neon lasers in the red, green, yellow, and orange wavelengths. All feature our patented close-cathode design that rapidly and uniformly distributes discharge heat throughout the laser, resulting in excellent thermal, beam-pointing, and power stability. Our patented field concentrator design ignites the discharge within milliseconds of applying the start voltage. Hard-sealed internal mirrors, small physical size, and low noise result in greater reliability, longer life, and enhanced performance.

All JDS Uniphase helium-neon lasers are manufactured in a dedicated facility using state-of-the-art process control technology. This enables us to achieve higher process yields, and results in dependable lead times and excellent on-time delivery performance.

Applications

- Flow cytometry
- Metrology
- Semiconductor inspection
- Alignment
- Laser-induced fluorescence
- Hematology
- High-speed printing

Compliance

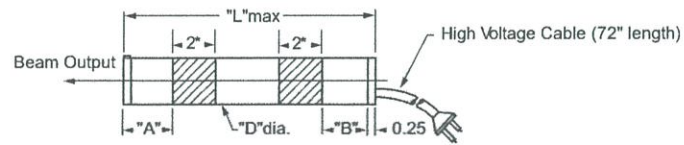
- CDRH 1040.10
- CE



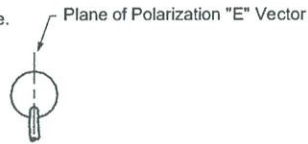
2

1100 Series Laser Heads

(Specifications in inches unless otherwise noted.)



Accessory Housing Holes:
M-3 on 1.38" (34.9 mm) bolt circle.
(1.740" diameter head only)





3

Specifications

Parameter	1101/P	1103/P	1107/P	1108/P	1122/P	1125/P	1135/P	1137/P	1144/P	1145/P	Unit
Optical											
Min. output power (TEM ₀₀)	1.5	2.0	0.8	0.5	2.0	5.0	10.0	7.0	15.0	22.5/21.0	mW
Wavelength	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	nm
Mode purity (TEM ₀₀)	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	%
Beam diameter (1/e ² points, ±3%, TEM ₀₀)	0.63	0.63	0.48	0.48	0.63	0.81	0.68	0.81	0.70	0.70	mm
Beam divergence (TEM ₀₀ , ±3%, mrad- full angle)	1.3	1.3	1.7	1.8	1.3	1.0	1.2	1.0	1.15	1.15	mrad
Polarization ratio (minimum, P versions)	N/A /500:1	N/A /500:1	N/A /500:1	N/A /500:1	N/A /500:1	N/A /500:1	N/A /500:1	N/A /500:1	N/A /500:1	N/A /500:1	-
Longitudinal mode spacing (nominal)	730	730	1090	1090	730	435	320	435	257	257	MHz
Maximum noise (rms, 30 Hz to 10 MHz)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	1.0	0.2	0.5	0.5	%
Max. drift (mean power measured over 8 hours)	±2.5	±2.5	±2.5	±2.5	±2.5	±2.5	±3.0	±2.5	±2.0	±2.0	%
Max. mode sweeping contribution	3	3	10	20	3	2	2	2	1	1	%
Max. warm-up time (minutes to 95% power)	10	10	10	10	10	10	15	10	20	20	min.
Beam pointing stability (from cold start, 25 °C)	N/A	N/A	N/A	N/A	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.20	<0.20	mrad
Beam pointing stability (after 15 minutes warm-up)	N/A	N/A	N/A	N/A	<0.10	<0.10	<0.02	<0.02	<0.03	<0.03	mrad
Operating voltage (V DC ±100)	1700	1700	1250	1250	1800	2300	3100	2300	3800	3800	V DC
Operating current (±0.1 mA)	4.9	4.9	4.0	4.0	6.5	6.0	6.5	6.0	6.5	6.5	mA
Dimensions											
L-overall length	9.50	9.50	7.00	7.00	10.71	15.79	19.13	15.79	25.00	25.00	inches
D-mounting diameter (±0.005 inches)	1.245	1.245	1.245	1.245	1.740	1.740	1.740	1.740	1.740	1.740	inches
B-distance: cable end to mounting surface	1.00	1.00	0.75	0.75	1.50	3.00	4.00	3.00	5.00	5.00	inches
A-distance: output end to mounting surface	0.75	0.75	0.50	0.50	1.50	3.00	4.00	3.00	5.00	5.00	inches
CDRH class (head & 1200 Series power supply)	IIIa	IIIa	IIIa	II	IIIa	IIIb	IIIb	IIIb	IIIb	IIIb	-



4

Specifications
Continued

Parameter	1101/P	1103/P	1107/P	1108/P	1122/P	1125/P	1135/P	1137/P	1144/P	1145/P	
General											
Maximum starting voltage					10 kV DC						
Mode purity					>95%						
Storage lifetime					Indefinite (hard-sealed)						
Static alignment	Center to outer cylinder within ± 0.01 inch. Parallel to outer cylinder within ± 1 mR.										
Environmental											
Temperature	-40 to 70 °C (operating), -40 to 150 °C (non-operating)										
Altitude	0 to 10,000 feet (operating), 0 to 70,000 feet (non-operating)										
Relative humidity (no condensation)					0 to 100%						
Shock					25 g for 11 ms, 100 g for 1 ms						
Physical											
Shipping weight	5 lb. (1100 Series heads); 10 lb. (1100 Series head and 1200 Series power supply)										

Ordering Information

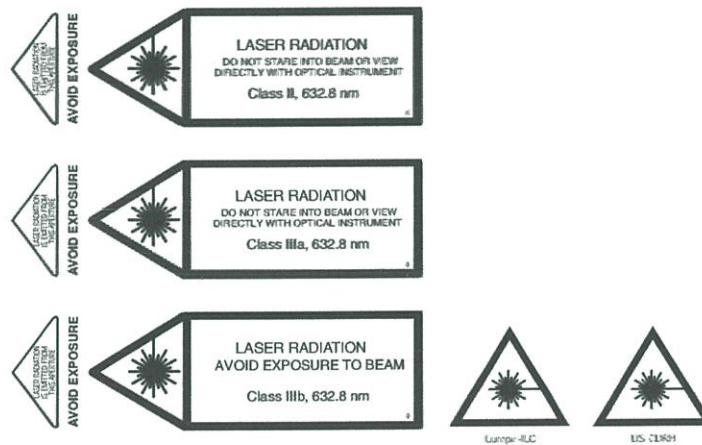
For more information on this or other products and their availability, please contact your local JDS Uniphase account manager or JDS Uniphase directly at 1-800-254-3684 in North America and +800-5378-JDSU worldwide or via e-mail at sales@jdsu.com.

Sample: 1122P

5

Warranty

JDS Uniphase helium-neon laser systems are warranted to be free of defects in workmanship and materials for twelve months from the date of shipment.



Regulatory Compliance

The products listed in this bulletin comply to one or more of the following regulatory standards, and may display one or more of the safety labels shown below. Contact your local JDS Uniphase sales representative for additional information on specific products or configurations.



Photonic Solutions
 Unit A, 40 Captains Road
 Edinburgh, EH17 8QF, UK
 Tel: +44(0)131 664 8122
 Fax: +44 (0)131 664 8144
 Email: sales@photronicsolutions.co.uk
 Web: www.photronicsolutions.co.uk

All statements, technical information and recommendations related to the products herein are based upon information believed to be reliable or accurate. However, the accuracy or completeness thereof is not guaranteed, and no responsibility is assumed for any inaccuracies. The user assumes all risks and liability whatsoever in connection with the use of a product or its application. JDS Uniphase reserves the right to change at any time without notice the design, specifications, function, fit or form of its products described herein, including withdrawal at any time of a product offered for sale herein. JDS Uniphase makes no representations that the products herein are free from any intellectual property claims of others. Please contact JDS Uniphase for more information. JDS Uniphase and the JDS Uniphase logo are trademarks of JDS Uniphase Corporation. Other trademarks are the property of their respective holders. ©2005 JDS Uniphase Corporation. All rights reserved. 21021910 Rev. 004 05/05