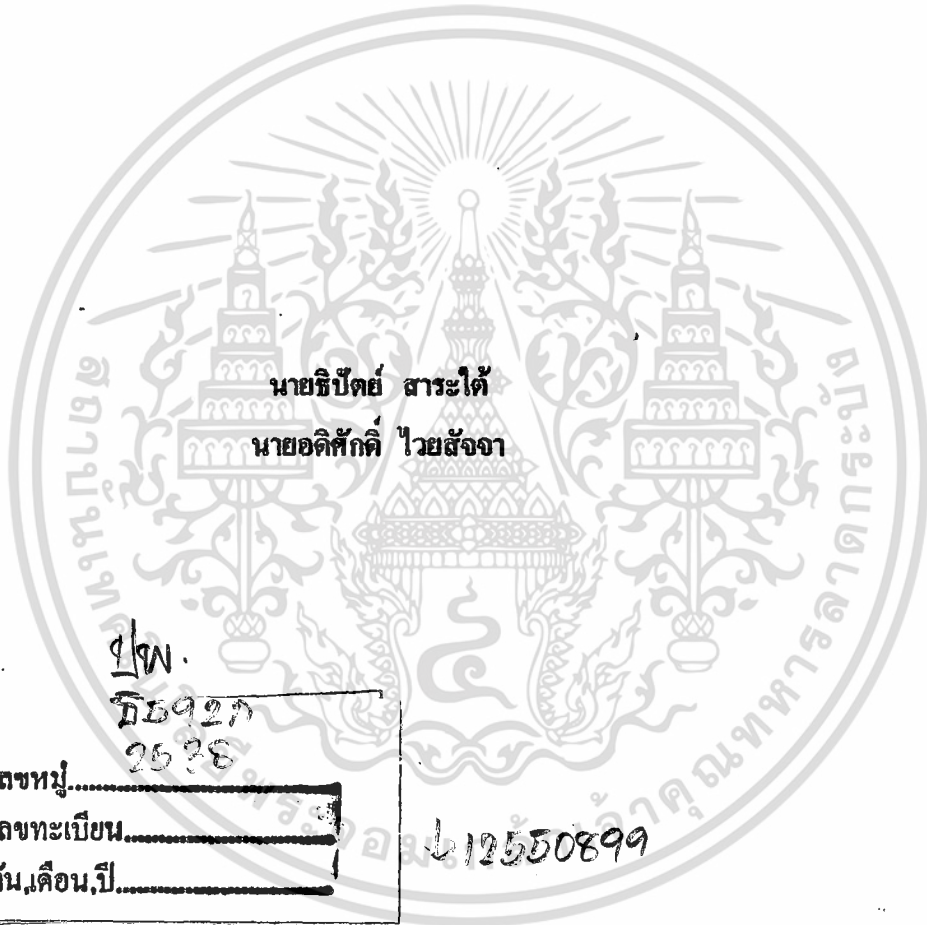


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



การศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนของพื้นผิวโดยใช้เส้นใยนำแสง



นายธิปไตย สาระไค้
นายอดิศักดิ์ ไวยสังจา

ร/พ.

2592ก

2538

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

วันเดือนปี.....

12550899

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of the Reflectivity of Surfaces Using Optical Fibres



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the

Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

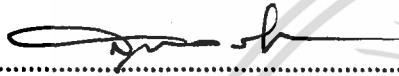
1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนของพื้นผิวโดยใช้เส้นใยนำแสง
โดย นายธิปไตย สารระใต้
นายอดิศักดิ์ ไวยสังจา
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.รัชภักย์ จิตต์อารี
อ.ธีรวัฒน์ ประกอบผล

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

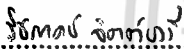
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(รศ.สุรพล รักวิชัย)

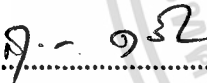
หัวหน้าภาค

คณะกรรมการโครงการ



(ดร.รัชภักย์ จิตต์อารี)

ประธานกรรมการ



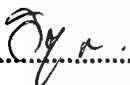
(ผศ.สุวรรณ คูสำราญ)

กรรมการ



(ผศ.ดร.ปรีชา युพาพิน)

กรรมการ



(อ.วิชาญ เศษิตธีระ)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อ โครงการพิเศษ	การศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนของพื้นผิวโดยใช้เส้นใยนำแสง
โดย	นายธิปไตย สารระใต้ นายอดิศศักดิ์ ไวยสังจา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี อ.ธีรวัฒน์ ประกอบผล
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2538

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนของแสง เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้ให้เป็นค่าพารามิเตอร์ทางแสง มีหลักการทั่วไปคือใช้แหล่งกำเนิดแสงที่รู้สถานะโพลาไรซ์ฉายบนพื้นผิวตัวอย่าง แล้ววิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสถานะโพลาไรเซชันของแสงสะท้อน ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 5 ชนิดคือ BK7, Acrylic plate, ทองแดง, แก้วเลียมอะซิไนด์ และซิลิกอน และใช้ตัวกลางของแสง 2 ชนิดคืออากาศและเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากตัวกลางของแสงทั้งสอง ผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนและมุมตกกระทบ ซึ่งสามารถที่จะบ่งบอกชนิดของสารได้จากกราฟผลการทดลองของตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด

Special Project Title **A Study of the Reflectivity of Surfaces Using Optical Fibres**
Name **Mr. Thipat Saratai**
 Mr. Adisak Vaiyasajja
Special Project Adviser **Dr. Ratchapak Chitaree**
 Aj. Teerawat Prakobphon
Department **Applied Physics**
Academic Year **1995**

ABSTRACT

This special project is a study of the optical reflectivity of various materials. The principle involves a projection of a polarized-light onto sample surfaces and an analysis of the polarization of the reflected light. In this special project, samples consist of a BK7, an acrylic plate, a copper plate, gallium arsenide (GaAs) and silicon (Si). Two media of light, both space and optical fibres, are used for comparison. The experimental results were shown graphically by plotting reflectance against angle of incidence for each sample.

กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องการศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนของพื้นผิวโดยใช้เส้นใยนำแสงชิ้นนี้ สำเร็จลงได้เนื่องจากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่านอาจารย์ที่ปรึกษาทั้ง 2 ท่าน คือ คร.รัชภาคย์ จิตต์อารี และ อ.ธีรวัฒน์ ประกอบผล ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และคำสั่งสอนตั้ง แต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ผศ.อนุพงศ์ สรงประภา ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืมอุปกรณ์การทำโครงการ รวมทั้งให้คำแนะนำต่าง ๆ

อาจารย์รัชชัย ขาวประเสริฐ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือภายในศูนย์ซ่อม-สร้างเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.

ขอบคุณ คุณเฉลิมเกียรติ เทพสารานู ที่กรุณาให้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องพิมพ์ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

เพื่อน ๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ปีการศึกษา 2538 ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ คอยถามไถ่ ความคืบหน้า ให้หิยืมยืมอุปกรณ์ และให้ความช่วยเหลือมากมายมาโดยตลอด

ธีปิตย์ สาระใต้
อดิศักดิ์ ไวยสังจา
23 เมษายน 2539

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ โครงการงานพิเศษภาษาไทย	I
บทคัดย่อ โครงการงานพิเศษภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
สารบัญกราฟ	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ/ที่มาของ โครงการงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการงานพิเศษ	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	3
1.5 โครงงานสร้างของรายงาน	4
1.6 สิ่งที่เราคาดว่าจะได้จากโครงการงานพิเศษ	5
1.7 สรุป	5
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานทางทัศนศาสตร์กายภาพ	6
2.1 การสะท้อนที่ผิว	6
2.1.1 สมการเฟรเนล	6
2.1.2 การสะท้อนภายนอก	11
2.1.3 การเปลี่ยนเฟสจากการสะท้อน	13
2.1.4 คณิตหักเหเชิงซ้อน	13
2.1.5 การสะท้อนจากผิวโลหะ	16
2.2 โพลาริเซชัน	17
2.3 Ellipsometry	21
2.4 สรุป	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 หลักการทำงานของอุปกรณ์	24
3.1 เลเซอร์ไดโอด	24
3.2 อุปกรณ์โพลาไรซ์	26
3.2.1 Polarizer Sheet	26
3.2.2 Wave Plates	27
3.2.2.1 Half Wave Plates (HWP)	28
3.2.2.2 Quarter Wave Plates (QWP)	29
3.2.3 Polarization Beamsplitter Cubes	30
3.3 อุปกรณ์รับสัญญาณแสง	32
3.3.1 โฟโตดีเทคเตอร์	32
3.3.1.1 โฟโตไดโอด	32
3.3.1.2 ภาคขยายสัญญาณ	34
3.3.2 โฟโตมิเตอร์	35
3.4 เส้นใยแก้วนำแสง	35
3.4.1 การหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสง	36
3.4.2 การหักเหสองแนว	37
3.4.3 ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง	37
3.4.3.1 เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด	38
3.4.3.2 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว	40
3.4.3.3 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดอนุรักษ์สถานะ	40
ทางโพลาไรเซชัน	40
3.5 เลนส์	44
3.6 Micro Block	45
3.7 สรุปล	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลอง	46
4.1 การวิเคราะห์สถานะโพลาริซ์ของแสงสะท้อนเชิงทฤษฎี	46
4.1.1 วิธีการวิเคราะห์โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางของแสง	46
4.1.2 วิธีการวิเคราะห์โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางของแสง	49
4.2 ตัวอย่างสารที่ใช้ในการทดลอง	50
4.3 ขั้นตอนการทดลอง	51
4.4 สรุป	52
บทที่ 5 ผลการทดลองและบทวิเคราะห์	53
5.1 ผลการทดลอง	53
5.2 บทวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง	65
บทที่ 6 บทสรุปและแนวการพัฒนา	67
6.1 บทสรุป	67
6.2 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ จากข้อมูลค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน	ก-1
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงค่าความสะท้อนของตัวอย่างที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง (โดยการคำนวณ)	ข-1
ภาคผนวก ค. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (โดยการคำนวณ)	ค-1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาของขั้นตอนต่าง ๆ ของการทำโครงการพิเศษ	4
ตารางที่ 2.1 แสดง Jones vector ของแสงโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ	19
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลของเลเซอร์ไดโอดชนิดต่าง ๆ	26
ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของสารที่นำมาทดลองคุณสมบัติการสะท้อน ของแสง	46
ตารางที่ ข-1 แสดงค่าความสะท้อนของ BK7 ที่มุมตกกระทบต่าง ๆ โดยวิธีคำนวณ	ข-1
ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความสะท้อนของ Acrylic Plate ที่มุมตกกระทบต่าง ๆ โดยวิธีคำนวณ	ข-2
ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความสะท้อนของ copper ที่มุมตกกระทบต่าง ๆ โดยวิธีคำนวณ	ข-3
ตารางที่ ข-4 แสดงค่าความสะท้อนของ GaAs ที่มุมตกกระทบต่าง ๆ โดยวิธีคำนวณ	ข-4
ตารางที่ ข-5 แสดงค่าความสะท้อนของ Si ที่มุมตกกระทบต่าง ๆ โดยวิธีคำนวณ	ข-5

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงการจัดวางชุดอุปกรณ์ของวิธี Ellipsometry	2
รูปที่ 2.1 แสดงการสะท้อนและการหักเหที่ผิวรอยต่อ โดยที่สนามไฟฟ้า มีทิศตั้งฉากกับระนาบตกกระทบหรือ TE mode	6
รูปที่ 2.2 แสดงการสะท้อนและการหักเหที่ผิวรอยต่อ โดยที่สนามแม่เหล็ก มีทิศตั้งฉากกับระนาบตกกระทบหรือ TM mode	9
รูปที่ 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ในกรณีของการสะท้อนภายนอก	11
รูปที่ 2.4 แสดงค่าความสะท้อนภายนอก โดย $n_1 = 1, n_2 = 1.5$	12
รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนเฟสระหว่างแสงตกกระทบกับแสงสะท้อน	13
รูปที่ 2.6 แสดงความสะท้อนที่ผิวโลหะที่ความยาวคลื่น 589.3 nm	17
รูปที่ 2.7 แสดงสนามไฟฟ้าของแสง ณ เวลาหนึ่งโดยแสงเคลื่อนที่ในแนว +z	18
รูปที่ 2.8 แสดงแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีที่มี major axis ทำมุม α กับแกน x	20
รูปที่ 2.9 แสดงแสงโพลาไรซ์ที่สะท้อนจากระนาบของพื้นผิว	21
รูปที่ 2.10 แสดงการจัดอุปกรณ์ของ Ellipsometer	23
รูปที่ 3.1 (ก) แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด (ข) แสดงระดับพลังงานขณะที่ไม่มีการไบแอส (ค) แสดงระดับพลังงานขณะไบแอสตาม	24
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของแสงที่วัดได้กับกระแสที่ทำให้ เลเซอร์ทำงานเปรียบเทียบกับ LED	25
รูปที่ 3.3 แสดงภาคตัดขวางของเลเซอร์ไดโอด	25
รูปที่ 3.4 แสดงหลักการทำงานของ Polarizer Sheet	27
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของ Polarizer Sheet	27
รูปที่ 3.6 แสดงหลักการทำงานของ Wave Plate	28
รูปที่ 3.7 แสดงหลักการทำงานของ HWP	28
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะการทำงานของ QWP	29
รูปที่ 3.9 แสดงการสร้างแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมจาก QWP	29

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของ Polarization Beamsplitter Cubes	30
รูปที่ 3.11 แสดง (a) โพลาริเซชันโดยการสะท้อนและหักเห (b) Brewster's law ของมุมโพลาริซ์	30
รูปที่ 3.12 แสดงโพลาริเซชันของแสงจาก Plate ที่วางซ้อนกัน	31
รูปที่ 3.13 แสดง Glass Plate ที่มุมโพลาริซ์ Φ	32
รูปที่ 3.14 แสดงโฟโตไดโอดแบบธรรมดา	33
รูปที่ 3.15 แสดงโฟโตไดโอดแบบพิน	33
รูปที่ 3.16 แสดงโครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์	34
รูปที่ 3.17 แสดงวงจรรับสัญญาณแสงและภาคขยาย	34
รูปที่ 3.18 แสดงการจั่ววงโฟโตมิเตอร์	35
รูปที่ 3.19 แสดงช่วงตอบสนองความยาวคลื่นของของโฟโตมิเตอร์	35
รูปที่ 3.20 แสดงการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงโดยอาศัย หลักการสะท้อนกลับหมด	36
รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะของแสงที่เดินทางภายในแกนเส้นใยแก้วนำแสง (ก) เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว (ข) เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดขั้นบันได (Step-Index Multimode Fibre) (ค) เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดดัชนีรูปมน (Graded-Index Multimode Fibre)	37 38
รูปที่ 3.22 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด	38
รูปที่ 3.23 แสดงชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามลักษณะดัชนีหักเหแสงของแกน (ก) กราฟแสดงค่าดัชนีหักเหแสงของแกนเมื่อเปรียบเทียบกับ ค่าดัชนีหักเหแสงของอากาศมีลักษณะเป็นขั้นบันได (ข) เพื่อลดการกระจายของสัญญาณ โดยการสร้างให้ดัชนีหักเหภายใน แกนมีค่าค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะต่อเนื่องมากกว่า	39
รูปที่ 3.24 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว	40
รูปที่ 3.25 แสดงโหมดของแสงโพลาริซ์ 2 โหมดที่ตั้งฉากกันที่ความเร็วต่างกัน	41

สารบัญรูป (ต่อ)

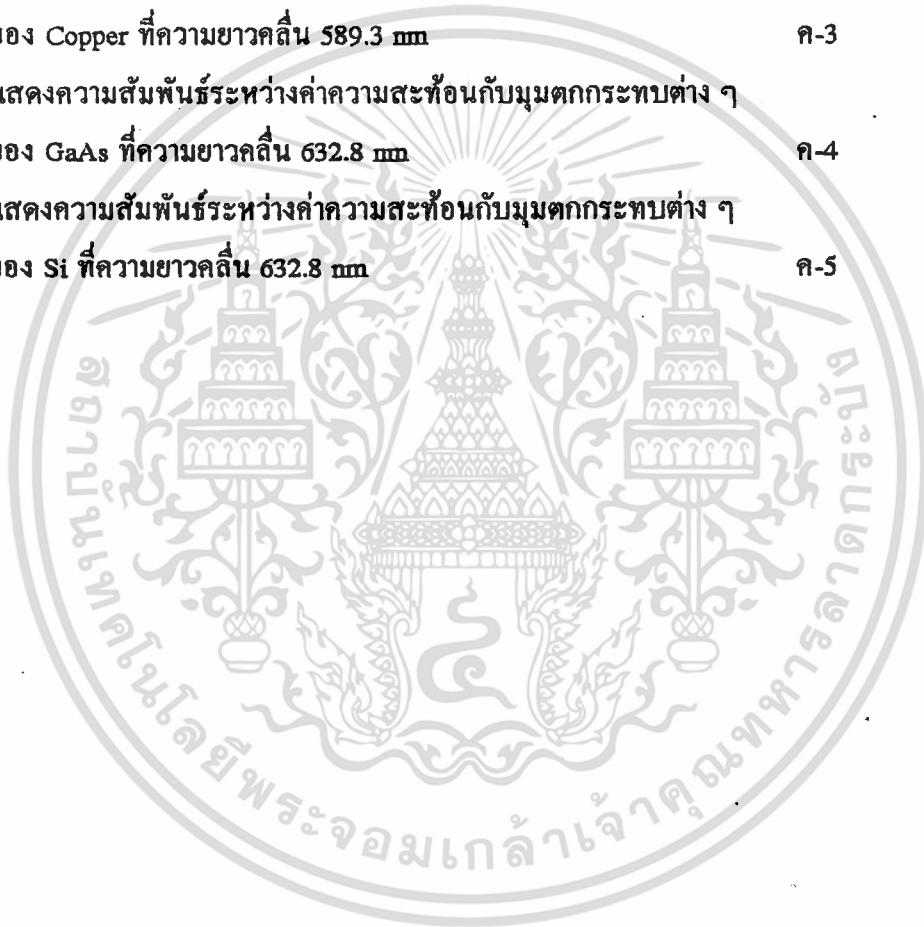
	หน้า
รูปที่ 3.26 แสดงการจัดประเภทของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด อนุรักษสถานะโพลาริเซชัน	42
รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่างของเส้นใยแก้วนำแสงไฮลีไบร์พรีนเจนซ์บางชนิด	42
รูปที่ 3.28 แสดงการเปรียบเทียบ	
(ก) ความสัมพันธ์ของความยาวปิตซ์ของเส้นใยแก้วนำแสง	
(ข) ความสามารถในการอนุรักษสถานะทางโพลาริเซชันภายในของ เส้นใยแก้วนำแสงชนิดไฮลีไบร์พรีนเจนซ์	43
รูปที่ 3.29 แสดงลักษณะของเลนส์	44
รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะของ Micro Block	45
รูปที่ 4.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์วิธี Ellipsometry (Free Space)	47
รูปที่ 4.2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์วิธี Ellipsometry (Optical Fibres)	49
รูปที่ 4.3 แสดงวิธีการสร้างแสงโพลาริเซชันวงกลม	51
รูปที่ 4.4 แสดงวิธีการวัดความเข้มของแสง	52

สารบัญกราฟ

	หน้า
กราฟที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์ เชิงวงกลมที่ผ่านโพลาไรเซอร์กับแนวแกนโพลาไรซ์	53
กราฟที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ BK7 ที่ความยาวคลื่น 670 nm (อากาศ)	54
กราฟที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Acrylic Plate ที่ความยาวคลื่น 670 nm (อากาศ)	55
กราฟที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Copper ที่ความยาวคลื่น 670 nm (อากาศ)	56
กราฟที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ BK7 ที่ความยาวคลื่น 670 nm (เส้นใยแก้วนำแสง)	57
กราฟที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Acrylic Plate ที่ความยาวคลื่น 670 nm (เส้นใยแก้วนำแสง)	58
กราฟที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Copper ที่ความยาวคลื่น 670 nm (เส้นใยแก้วนำแสง)	59
กราฟที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ GaAs ที่ความยาวคลื่น 670 nm (เส้นใยแก้วนำแสง)	60
กราฟที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Si ที่ความยาวคลื่น 670 nm (เส้นใยแก้วนำแสง)	61
กราฟที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางเป็นอากาศกับตัวกลางเป็น เส้นใยแก้วนำแสงของ BK7 ที่ความยาวคลื่น 670 nm	62
กราฟที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางเป็นอากาศกับตัวกลางเป็น เส้นใยแก้วนำแสงของ Acrylic Plate ที่ความยาวคลื่น 670 nm	63
กราฟที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางเป็นอากาศกับตัวกลางเป็น เส้นใยแก้วนำแสงของ Copper ที่ความยาวคลื่น 670 nm	64

สารบัญกราฟ (ต่อ)

	หน้า
กราฟที่ ค-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ BK7 ที่ความยาวคลื่น 588.9 nm	ค-1
กราฟที่ ค-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Acrylic Plate ที่ความยาวคลื่น 588.9 nm	ค-2
กราฟที่ ค-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Copper ที่ความยาวคลื่น 589.3 nm	ค-3
กราฟที่ ค-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ GaAs ที่ความยาวคลื่น 632.8 nm	ค-4
กราฟที่ ค-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Si ที่ความยาวคลื่น 632.8 nm	ค-5



บทที่ 1

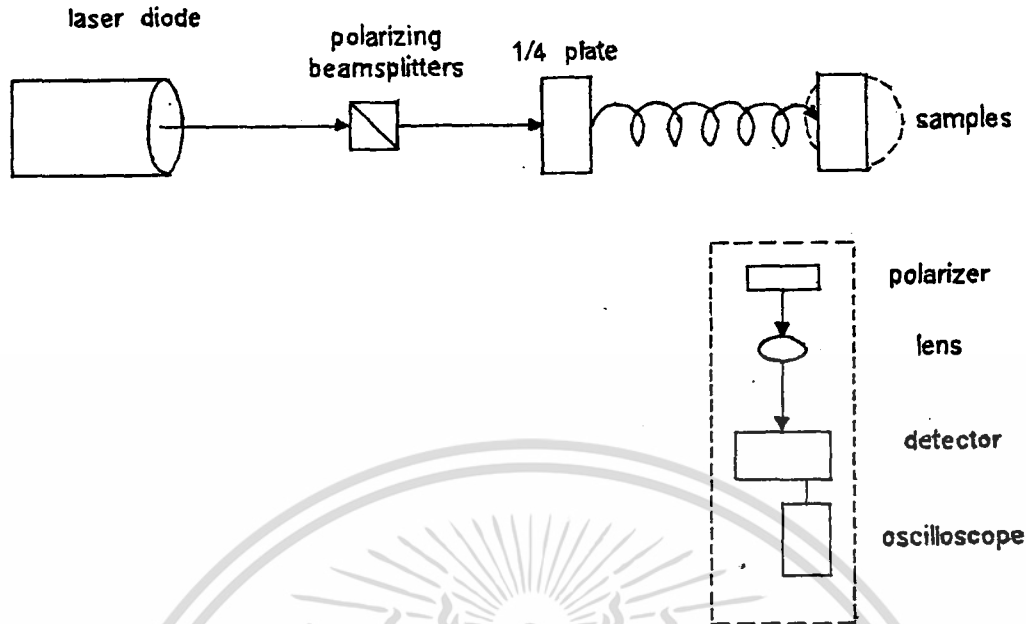
บทนำ

1.1 . ความสำคัญ/ที่มาของโครงการพิเศษ

เนื่องมาจากในปัจจุบันความสามารถในการวัดค่าต่าง ๆ ของพื้นผิวเช่น ค่าดัชนีหักเห, ค่าการลดทอนของแสง และค่าไบรีฟริงเจน แบบที่ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานกำลังเป็นที่ต้องการ เหตุผลหนึ่งที่ชัดเจนของความต้อการคือ สภาพของชิ้นงานที่ทำการตรวจวัดจะไม่ได้รับความเสี่ยง

วิธีการหนึ่งที่น่ามาใช้เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์นี้ ก็คือวิธีทางแสงที่รู้จักกันในนามของ Ellipsometry วิธีการนี้มีหลักการโดยทั่วไปคือ ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ทราบถึงสถานะของโพลาไรเซชัน (โดยปกติจะใช้แสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น) ฉายลง ไปบนชิ้นงานที่ต้องการศึกษาจากนั้นแสงที่สะท้อนออกมาจากชิ้นงาน (ซึ่งจะมีสถานะทางแสงเปลี่ยนไป) ก็จะถูกนำมาวิเคราะห์และตีค่ากลับมาเป็นค่า parameter ต่าง ๆ ที่เราสนใจของชิ้นงานนั้น

เทคนิคนี้ได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำเนื่องมาจากผลของการศึกษาอย่างต่อเนื่องจริงจัง แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบของการจัดเตรียมชุดอุปกรณ์ Ellipsometry ซึ่งใช้อากาศเป็นตัวกลางของแสง อาจทำให้เกิดข้อจำกัดที่สำคัญอย่างหนึ่งในเรื่องของตำแหน่งการวางชุดอุปกรณ์ทางแสงที่เกี่ยวข้อง (ที่จะต้องมึรูปแบบตามรูปที่ 1.1) ทั้งในส่วน of ชุดผลิตแสงโพลาไรซ์, ตำแหน่งของชิ้นงาน และตำแหน่งของหัววัดแสง ซึ่งในบางครั้ง บริเวณที่วางชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ที่กำลังเคลือบ (coating) อยู่บนฐานรอง (substrate) ภายใน chamber สูญญากาศ แต่ด้วยการพัฒนาทางด้านเส้นใยแก้วนำแสง ปัญหาดังกล่าวก็อาจแก้ไขได้โดย การใช้เส้นใยนำแสงมาเป็นตัวกลางของแสงแทนซึ่งก็หมายความว่า ชุดผลิตแสงโพลาไรซ์ สามารถที่จะนำไปวางไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมได้โดยมีเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวส่งผ่านแสงไปยังชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ สำหรับในการส่วนของการรับแสงก็เช่นเดียวกัน ถ้าตำแหน่งการจัดวางหัววัดแสงมีปัญหา เราสามารถที่จะนำเส้นใยนำแสงอีกชุดหนึ่งมารับและส่งผ่านแสงไปยังหัววัดแสง ซึ่งจัดวางอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม



รูปที่ 1 แสดงการจัดวางชุดอุปกรณ์ของวิธี Ellipsometry

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำความรู้ทางทัศนศาสตร์กายภาพมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการวัด
2. เพื่อศึกษาถึงวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติการสะท้อนของพื้นผิวหลาย ๆ ชนิดด้วยวิธี Ellipsometry
3. เพื่อศึกษาถึงทฤษฎีเกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง และความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้งานทางด้านการวัดแบบ Ellipsometry

1.3 ขอบเขตของการทำโครงการพิเศษ

การทำโครงการพิเศษเรื่องนี้ เพื่อทำการศึกษาวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชิ้นงานต่างชนิดกัน โดยวิธีทาง Ellipsometry โดยจะทำการศึกษาจากระบบที่ใช้ตัวกลางของแสงเป็นอากาศ ซึ่งต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของอุปกรณ์ทางแสงต่าง ๆ ซึ่งประกอบกันเข้ามาเป็น Ellipsometer

จากนั้นทำความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคทาง Ellipsometry ซึ่งนำเส้นใยแก้วนำแสงมาเป็นตัวกลางของแสงแทนอากาศ ซึ่งเราจะนำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ในงานการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิวต่าง ๆ ต่อไป

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1.วางแผนการดำเนินงาน โครงการพิเศษ

2.ศึกษาค้นคว้าและทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในโครงการพิเศษดังต่อไปนี้

-Theory of reflection

Fresnel's reflection laws,

Fresnel's equations,

Brewster's law

-Polarizations

-Theory of optical fibres

-Theory of Ellipsometry

3.ศึกษาค้นคว้าและทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติและหลักการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ดังต่อไปนี้

-Laser Diode

-Optical fibres

-Polarizing filters

-Lens

-Detector, Phetometer

-Photo diode

4.ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับจับยึดอุปกรณ์ทางแสงต่าง ๆ โดยคำนึงถึงความสะดวกต่อการใช้งาน, งบประมาณที่ใช้ และผลที่มีความถูกต้อง

5.ทำการทดลองเทคนิคทาง Ellipsometry โดยที่ตัวกลางคืออากาศชั้นงานที่ใช้ทดสอบ เป็นวัสดุที่ทำจาก สารไดอิเล็กตริก, สารกึ่งตัวนำ และโลหะ

6.เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณค่าความสะท้อน

7.ทำการทดลองการฉายแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง

8.ทำการทดลองเทคนิคทาง Ellipsometry โดยที่ตัวกลางเป็นเส้นใยแก้วนำแสงและชั้นงานที่ใช้ทดสอบเหมือนข้อ 5

9.วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

เดือนที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
วางแผน	—	—	→							
ศึกษาและค้นคว้า			—	—	—	→				
เตรียมอุปกรณ์						—	→			
ทดลอง (อากาศ), โปรแกรม								—	→	
ทดลอง (เส้นใยนำแสง)									—	→

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาของขั้นตอนต่าง ๆ ของการทำโครงการพิเศษ

1.5 โครงสร้างของรายงาน

บทที่ 1 บทนำ

จะกล่าวถึง ความสำคัญ/ที่มาของ โครงการพิเศษ, วัตถุประสงค์, ขอบเขตของการ
ทำโครงการพิเศษและขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 2 ทฤษฎี

จะกล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในโครงการพิเศษ

บทที่ 3 หลักการของอุปกรณ์

จะกล่าวถึงคุณสมบัติและหลักการของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการพิเศษ

บทที่ 4 การทำการทดลอง

จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทำการทดลอง การสร้างแสง โพลาริซ์เชิงวงกลม, วิธี
Ellipsometry ที่มีอากาศเป็นตัวกลางของแสง และวิธี Ellipsometry ที่นำเส้นใยแก้ว
นำแสงมาเป็นตัวกลางของแสง

บทที่ 5 ผลการทดลอง

จะกล่าวถึงผลการทดลอง และ กราฟแสดงค่าความสะท้อนของชั้นงานชนิดต่าง ๆ
ที่นำมาวิเคราะห์

บทที่ 6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ลักษณะของกราฟที่ได้ และสรุปผลการทดลอง

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 สิ่งที่เราคาดว่าจะได้จากโครงการพิเศษ

ความเข้าใจและความสามารถที่จะนำทฤษฎีในทางทัศนศาสตร์กายภาพ อุปกรณ์ทางแสง และเทคนิค Ellipsometry ไปประยุกต์ใช้งานในด้านการวัด หรืองานด้านอื่น ๆ ที่จะต้องใช้ความรู้ทางทัศนศาสตร์กายภาพเข้ามาเกี่ยวข้อง

1.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงความสำคัญ/ที่มาของ โครงการพิเศษ, วัตถุประสงค์, ขอบเขตของการทำโครงการพิเศษ, ขั้นตอนการดำเนินงาน และสิ่งที่คาดว่าจะได้จากโครงการพิเศษ ในส่วนของ บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เป็นพื้นฐานในการทำโครงการพิเศษ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

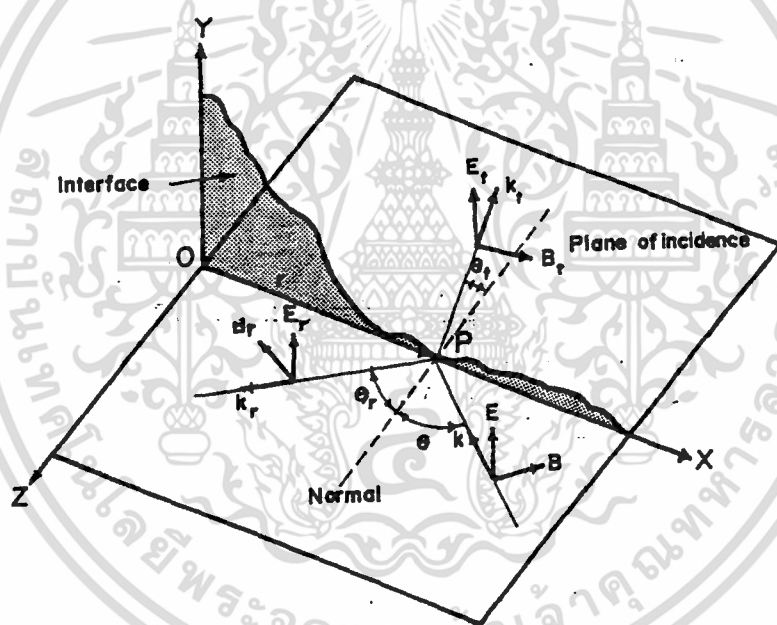
ทฤษฎีพื้นฐานทางทัศนศาสตร์

สำหรับทฤษฎีที่จะกล่าวถึงนี้เป็นพื้นฐานในการทำโครงการพิเศษซึ่งจะเกี่ยวกับการสะท้อนของแสงที่ผิวรอยต่อใด ๆ การโพลาไรซ์ของแสง ทฤษฎีของ Ellipsometry และหลักการของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

2.1 การสะท้อนที่ผิว (Reflection of Light at an Interface)

จากการศึกษาทางด้าน geometrical optics ทำให้สามารถหากฎการสะท้อนของคลื่นได้ โดยใช้สมบัติการเป็นคลื่นของแสงพิสูจน์กฎการสะท้อน ซึ่งจะนำไปสู่การหาสมการเฟรเนล และทำให้ทราบความสัมพันธ์ของพลังงานของแสงตกกระทบและแสงสะท้อนได้

2.1.1 สมการเฟรเนล (Fresnel equation)



รูปที่ 2.1 แสดงการสะท้อนและการหักเหที่ผิวรอยต่อ โดยที่สนามไฟฟ้า

มีทิศตั้งฉากกับระนาบตกกระทบหรือ TE mode

พิจารณาลำแสงตกกระทบที่จุด P บนผิวรอยต่อซึ่งอยู่บนระนาบ XY ทำให้มีลำแสงสะท้อนและหักเห ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ระนาบตกกระทบคือ ระนาบ XZ ถ้ากำหนดให้ลำแสงตกกระทบเป็นดังสมการ

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเลือกทิศของสนามไฟฟ้าในแนวแกน Y นั่นคือ สนามไฟฟ้ามีสถานะโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น สนามไฟฟ้าของแสงสะท้อนและแสงหักเหที่เกิดจากแสงตกกระทบตามสมการ (2.1) จะเขียนได้เป็น

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega_r t)} \quad (2.2)$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega_t t)} \quad (2.3)$$

ในระนาบของผิวรอยต่อ XY จะมีสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบและแสงสะท้อนอยู่ด้วยกันในเวลาเดียวกันจึงต้องมีความสัมพันธ์ที่แน่นอนของแอมพลิจูดของสนามทั้งสาม ความสัมพันธ์นี้จะต้องไม่ขึ้นกับจุดใด ๆ บนระนาบ และไม่ขึ้นกับเวลา t ด้วย ดังนั้นเฟสของคลื่นทั้งสาม ซึ่งขึ้นกับทั้ง r และ t ดังในสมการ (2.2) ถึง (2.3) นั้นจะต้องมีค่าเท่ากัน

$$(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) = (\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega_r t) = (\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega_t t) \quad (2.4)$$

ถ้าเลือกจุดบนรอยต่อที่ $r = 0$ คือที่จุด o จะได้

$$-\omega t = -\omega_r t = -\omega_t t \quad (2.5)$$

หรือ

$$\omega = \omega_r = \omega_t \quad (2.6)$$

นั่นคือทุกคลื่นมีความถี่เดียวกันนอกจากนี้ถ้าเราพิจารณากรณีที่เวลา $t = 0$ ภายในระนาบของผิวรอยต่อ จะได้จากสมการ (2.4) ว่า

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r} \quad (2.7)$$

สมการ (2.7) นี้นำไปสู่ข้อสรุปที่น่าสนใจหลายข้อดังนี้
ข้อแรก ถ้าเราทำการลบคู่ใด ๆ ของ

$$(\bar{k} - \bar{k}_r) \cdot \mathbf{r} = (\bar{k} - \bar{k}_t) \cdot \mathbf{r} = (\bar{k}_r - \bar{k}_t) \cdot \mathbf{r} = 0 \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) แสดงว่า \bar{k}_r และ \bar{k}_t อยู่ในระนาบของ \bar{k} กับ \mathbf{r} นั่นคือ \bar{k}, \bar{k}_r และ \bar{k}_t อยู่ในระนาบเดียวกันคือ ระนาบ XY และสรุปได้ว่าลำแสงสะท้อนกับลำแสงหักเห อยู่ในระนาบตกกระทบ

ข้อที่สอง จะได้จากการพิจารณาครั้งแรกของ สมการ (2.7) ซึ่งจะได้

$$k_r \sin \theta = k_t \sin \theta_r \quad (2.9)$$

เนื่องจากคลื่นทั้งสองนี้เคลื่อนที่ในตัวกลางเดียวกัน ความยาวของคลื่นทั้งสองจะมีค่าเท่ากับ k และ k_r จึงเท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้เป็นกฎการสะท้อนว่า

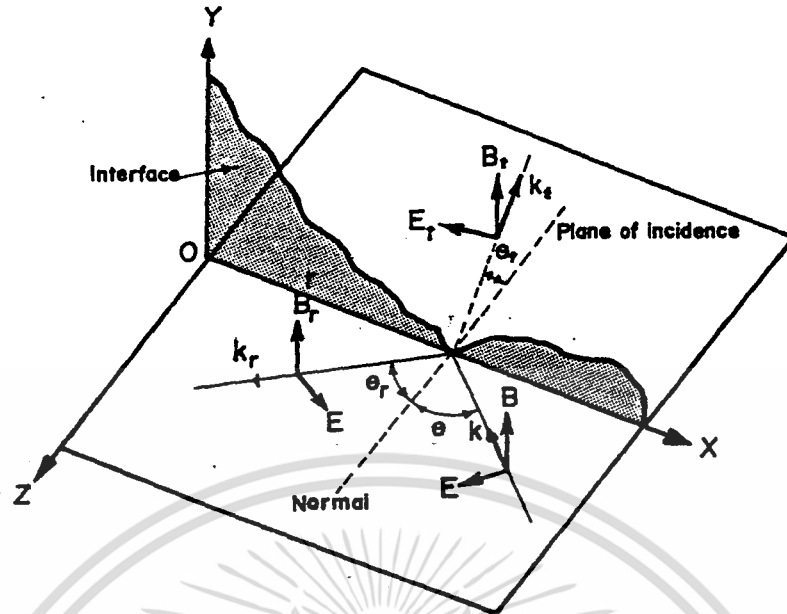
$$\text{มุมตกกระทบ } \theta = \text{มุมสะท้อน } \theta_r \quad (2.10)$$

อาศัยเงื่อนไขจากทฤษฎีสานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากสมการแมกซ์เวลล์ ในส่วนของเงื่อนไขที่ผิวรอยต่อที่ว่า องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวรอยต่อจะมีค่าต่อเนื่องที่ผิวรอยต่อ และถ้าใช้สถานการณ์ตามรูปที่ 2.1 จะได้ว่า

$$\bar{E} + \bar{E}_r = \bar{E}_t \quad (2.11)$$

และ

$$\bar{B} \cos \theta - \bar{B}_r \cos \theta = \bar{B}_t \cos \theta_t \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.2 แสดงการสะท้อนและหักเหที่ผิวรอยต่อ โดยสนามแม่เหล็ก

มีทิศตั้งฉากกับระนาบตกกระทบหรือ TM mode

ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวนี้ถ้าเราพิจารณาสถานการณ์ตามรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นกรณีของ TM mode จะได้ผลในทำนองเดียวกับสมการที่ (2.11) และ (2.12) ว่า

$$\vec{B} + \vec{B}_r = \vec{B}_t \quad (2.13)$$

$$-E \cos \theta + E_r \cos \theta = -E_t \cos \theta_t \quad (2.14)$$

เครื่องหมายลบในสมการที่ (2.12) และ (2.14) แสดงว่าสนามนั้นอยู่ในทิศ $-X$ และสมการที่ (2.11) ถึง (2.14) นี้เป็นจริงที่บริเวณรอยต่อเท่านั้น

สำหรับสนามแม่เหล็กอาจเขียนในเทอมของสนามไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$\vec{E} = v\vec{B} = \begin{pmatrix} c \\ - \\ n \end{pmatrix} \vec{B} \quad (2.15)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วแสง และ n คือ ดัชนีหักเห

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้ดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงสะท้อนเป็น n_1 และค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงหักเหเป็น n_2 จะเขียนสมการ (2.11) ถึง (2.14) และคิดเฉพาะขนาดของเวกเตอร์ ซึ่งเขียนได้ใหม่เป็น

$$\text{TE: } E + E_r = E_t \quad (2.16)$$

$$n_1 E \cos \theta - n_1 E_r \cos \theta = n_2 E_t \cos \theta_t \quad (2.17)$$

$$\text{TM: } n_1 E + n_1 E_r = n_2 E_t \quad (2.18)$$

$$-E \cos \theta + E_r \cos \theta = -E_t \cos \theta_t \quad (2.19)$$

แทนค่า E_t จากสมการ (2.16) ลงในสมการ (2.17) และแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้เป็น

$$\text{TE: } r_s \equiv \frac{E_r}{E} = \frac{\cos \theta - n \cos \theta_t}{\cos \theta + n \cos \theta_t} \quad (2.20)$$

และแทนค่า E_t จากสมการ (2.18) ลงในสมการ (2.19) และแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้เป็น

$$\text{TM: } r_p \equiv \frac{E_r}{E} = \frac{n \cos \theta - \cos \theta_t}{n \cos \theta + \cos \theta_t} \quad (2.21)$$

ค่าดัชนีหักเห n คือ $\frac{n_2}{n_1}$ ซึ่งเป็นค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์ของตัวกลางทั้งสอง และค่า n กับ θ_t มีความสัมพันธ์กับมุม θ ตามกฎการหักเหของสเนลล์ (Snell's Law)

$$\sin \theta = n \sin \theta_t \quad (2.22)$$

และสามารถกำจัด θ_t จากสมการ (2.20) และ (2.21) ได้และทำให้ได้

$$\text{TE: } r_s = \frac{E_r}{E} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (2.23)$$

$$\text{TM: } r_p = \frac{E_r}{E} = \frac{n^2 \cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2 \cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (2.24)$$

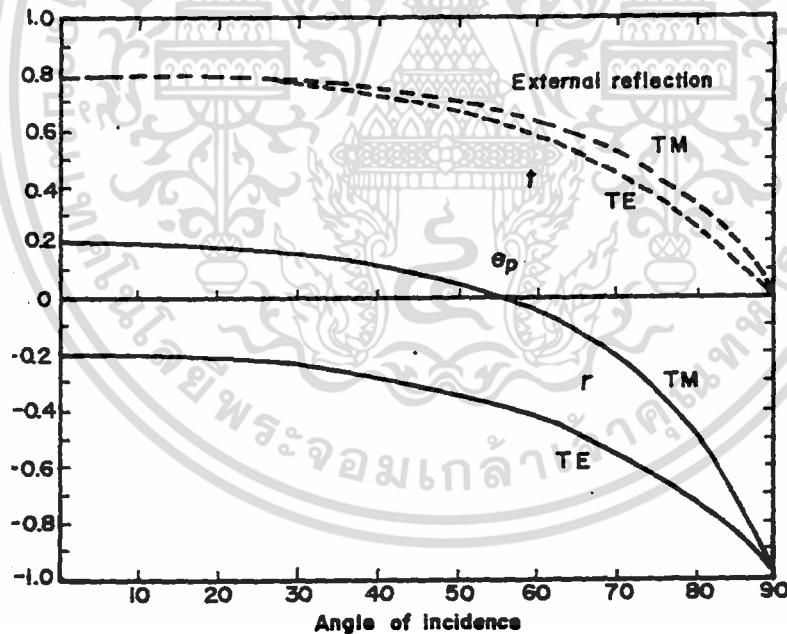
สมการที่ (2.23) และ (2.24) นี้ คือสมการเฟรเนล (Fresnel equation) สำหรับการสะท้อน

2.1.2 การสะท้อนภายนอก (External Reflection)

ในการใช้ประโยชน์จากสมการเฟรเนลจะต้องแยกความแตกต่างของกรณี การสะท้อนภายนอกและการสะท้อนภายใน

การสะท้อนภายนอก : $n_1 < n_2$ หรือ $n = \frac{n_2}{n_1} > 1$

การสะท้อนภายใน : $n_1 > n_2$ หรือ $n = \frac{n_2}{n_1} < 1$



รูปที่ 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ที่มุมตกกระทบต่าง ๆ

ในกรณีของการสะท้อนภายนอก

ในรูปนี้ใช้ $n = 1.50$ จะสังเกตได้ว่าที่ค่า $\theta = 90^\circ$ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนนั้น จะมีค่าเท่ากันและเป็นค่าลบทั้งสองกรณี สำหรับที่ $\theta = 0^\circ$ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกรณี TM mode มีค่าบวกส่วนกรณี TE mode มีค่าเป็นลบแต่มีขนาดเท่ากัน เครื่องหมายลบของค่าสัมประสิทธิ์การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

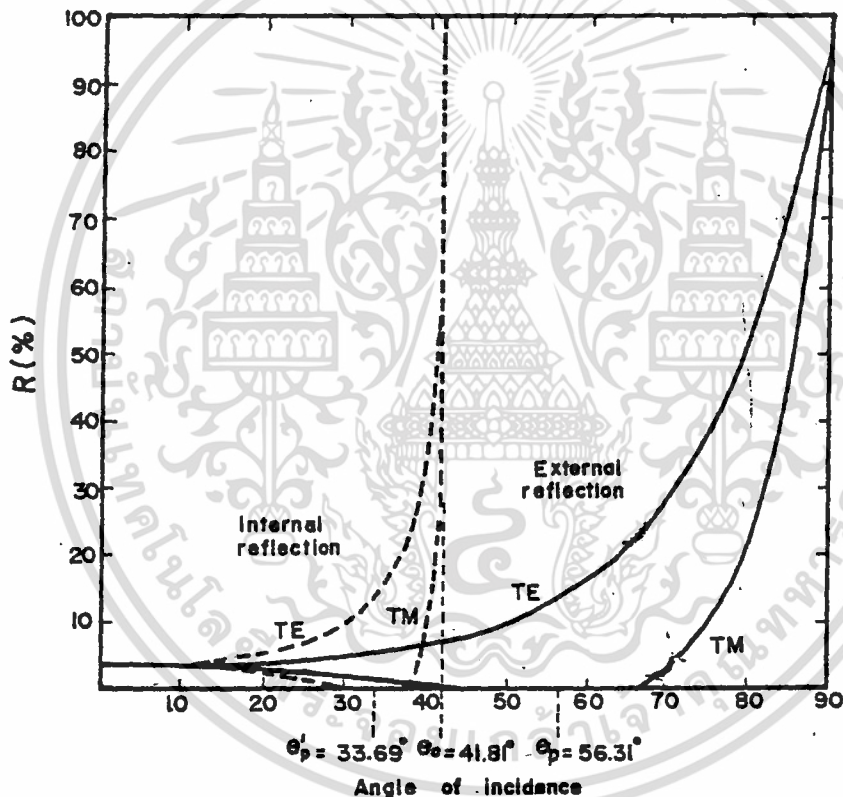
สะท้อนนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนเฟสของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กในการสะท้อนที่ผิวรอยต่อ กรณีของ TE mode ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเป็นลบทั้งหมด ส่วนกรณี TM mode จะมีค่าบวกและค่าลบ และมีค่าเป็นศูนย์ที่มุม θ_p (Polarizing Angle หรือ Brewster's Angle)

ผังรูปที่ 2.3

ค่าความสะท้อน (Reflectance) หาได้จาก

$$R \equiv r^2 = \left(\frac{E_r}{E} \right)^2 \quad (2.25)$$

ค่าความสะท้อนเมื่อนำมาเขียนกราฟกับมุมตกกระทบจะได้ผังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงค่าความสะท้อนภายนอก โดย $n_1 = 1$, $n_2 = 1.5$

ในกรณีการสะท้อนภายนอกกราฟของ TM mode แสดงให้เห็นว่าที่มุมตกกระทบ มีค่าประมาณ 60° จะไม่มีพลังงานสะท้อนไปเลย ซึ่งจะเกิดเมื่อ $\tan \theta_p = n$ หรือ $\theta_p = \tan^{-1} n$ ค่า θ_p นี้มีชื่อเรียกว่า มุมบริวสเตอร์ (Brewster Angle) หรือ มุมโพลาไรซ์ (Polarizing Angle)

2.1.3 การเปลี่ยนเฟสจากการสะท้อน (Phase Shift)

การที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าเป็นลบแสดงว่า $E_r = -|r|E$ สนามไฟฟ้ามีการกลับทิศหลังจากการสะท้อน หรือสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนเฟส π เรเดียน เมื่อมีการสะท้อน หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$E_r = -|r|E = e^{i\pi}|r|E_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)} = |r|E_0 e^{i(k \cdot r - \omega t + \pi)} \quad (2.26)$$

ในกรณีของการสะท้อนภายนอกจะมีการเปลี่ยนเฟสที่มุมตกกระทบทุกค่าสำหรับ TE mode และที่ $\theta > \theta_p$ สำหรับ TM mode



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนเฟสระหว่างแสงตกกระทบกับแสงสะท้อน

2.1.4 ดัชนีหักเหเชิงซ้อน (Complex Index)

จากการพิจารณาในกรณีที่มีรอยต่อเป็นสาร ใค้ดลักริกสภาพนำไฟฟ้า (conductivity, σ) จะมีค่าเป็นศูนย์ โดยปกติค่าสภาพนำไฟฟ้าเป็นค่าคงที่ในสมการแปรผันของกฎของโอห์มคือ

$$j = \sigma E \quad (2.27)$$

เมื่อ j คือ current density (A/m^2) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า และสนามไฟฟ้านี้จะนำไปตามสมการคลื่น (รวมทั้งสนามแม่เหล็กด้วย)

$$\Delta^2 E = \left(\frac{1}{c^2}\right) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าสนามไฟฟ้าในสมการ (2.8) อาจเขียนได้ในรูป

$$\mathbf{E} = E_0 e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)} \quad (2.29)$$

เมื่อฉนวนรอยต่อเปลี่ยนเป็นสารจำพวกโลหะ หรือเป็นสารที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าไม่เป็นศูนย์ สมการของแมกซ์เวลล์ จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \left(\frac{1}{c^2}\right) \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 c^2}\right) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.30)$$

การเปลี่ยนแปลงของสมการแมกซ์เวลล์นี้จะทำให้คำตอบที่จะได้จากสมการ (2.30) ต่างไปจากสมการ (2.29) โดยจะมีผลของค่า σ เข้าไปรวมอยู่ด้วย ถ้าเราทำการแทนค่าสมการในลักษณะเดียวกับที่ปรากฏในสมการ (2.29) ลงในสมการที่ (2.28) พบว่าค่าขนาดของ propagation vector \mathbf{k} ซึ่งเดิมมีค่าเป็น ω/c จะต้องมีค่าเป็นเลขเชิงซ้อน

$$\tilde{\mathbf{k}} = \frac{\omega}{c} \left[1 + i \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \right]^{1/2} \quad (2.31)$$

เนื่องจากดัชนีหักเหมีค่าสัมพันธ์กับ \mathbf{k} โดย

$$\mathbf{n} = \left(\frac{c}{\omega} \right) \mathbf{k} \quad (2.32)$$

ดังนั้นดัชนีหักเหในกรณีของฉนวนรอยต่อที่เป็นโลหะ จะเป็นเลขเชิงซ้อนด้วย

$$\tilde{n} = \left[1 + i \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \right]^{1/2} \quad (2.33)$$

หรือเขียนเป็นสมการทั่วไปว่า

$$\tilde{n} = n_R + in_I \quad (2.34)$$

ซึ่ง $\text{Re}(\tilde{n}) = n_R$ และ $\text{Im}(\tilde{n}) = n_I$ ดังนั้น

$$\tilde{n} = n_R + in_I = \left[1 + i \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

เมื่อยกกำลังสองจะได้

$$(\tilde{n})^2 = (n_R + in_I)^2 = 1 + i \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right)$$

$$n_R^2 - n_I^2 + 2in_R n_I = 1 + i \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \quad (2.36)$$

และ

$$n_R^2 - n_I^2 = 1$$

$$2n_R n_I = \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right) \quad (2.37)$$

สมการคู่นี้จะทำให้สามารถหาค่า n_R กับ n_I ในเทอมของ σ ได้ และได้ค่า \tilde{k} เป็น

$$\tilde{k} = \left(\frac{\omega}{c} \right) \tilde{n} = \frac{\omega}{c} [n_R + in_I] \quad (2.38)$$

และเขียนค่าสนามไฟฟ้าในทำนองเดียวกับสมการ (2.29) ได้เป็น

$$E = E_0 e^{-\left(\omega n_I r / c \right)} e^{i \omega \left[\left(n_R r / c \right) - t \right]} \quad (2.39)$$

สรุปได้จากสมการที่ (2.39) ว่าคลื่นเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางด้วยอัตราเร็ว c/n_R และถูกดูดกลืนทำให้แอมพลิจูดลดลงด้วยค่าที่กำหนดจาก $e^{-\left(\omega n_I r / c \right)}$ นั่นคือค่า $\text{Re}(\tilde{n}) = n_R$ ยังมีบทบาทเช่นเดิมคือเกี่ยวข้องกับอัตราเร็วของคลื่น ส่วน $\text{Im}(\tilde{n}) = n_I$ นั้นเรียกว่า extinction coefficient ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดกลืนคลื่นในตัวกลางประเภทตัวนำ การดูดกลืนนี้เป็นผล



มาจากการใช้พลังงานไปในการทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในตัวกลางและ power density, I จะลดลงตามระยะทางดังสมการ

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.40)$$

จากสมการเราอาจหาค่า power density ได้เป็น

$$I = I_0 e^{-2\omega n_I x/c} \quad (2.41)$$

เปรียบเทียบสมการ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) α กับค่า extinction coefficient มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\alpha = \frac{2\omega n_I}{c} = \frac{4\pi n_I}{\lambda} \quad (2.42)$$

2.1.5 การสะท้อนจากผิวโลหะ (Reflection from Metal Surface)

โดยการแทนค่า n ด้วย \tilde{n} ลงในสมการเฟรเนล คือสมการที่ (2.23) และ (2.24) เพื่อศึกษาการสะท้อนจากผิวโลหะเราจะได้ว่า

$$\text{TE: } r_s = \frac{E_r}{E} = \frac{\cos \theta - \sqrt{(\tilde{n})^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{(\tilde{n})^2 - \sin^2 \theta}} \quad (2.43)$$

$$\text{TM: } r_p = \frac{E_r}{E} = \frac{(\tilde{n})^2 \cos \theta - \sqrt{(\tilde{n})^2 - \sin^2 \theta}}{(\tilde{n})^2 \cos \theta + \sqrt{(\tilde{n})^2 - \sin^2 \theta}} \quad (2.44)$$

และถ้าแทนค่า $\tilde{n} = n_R + in_I$ จะได้ว่า

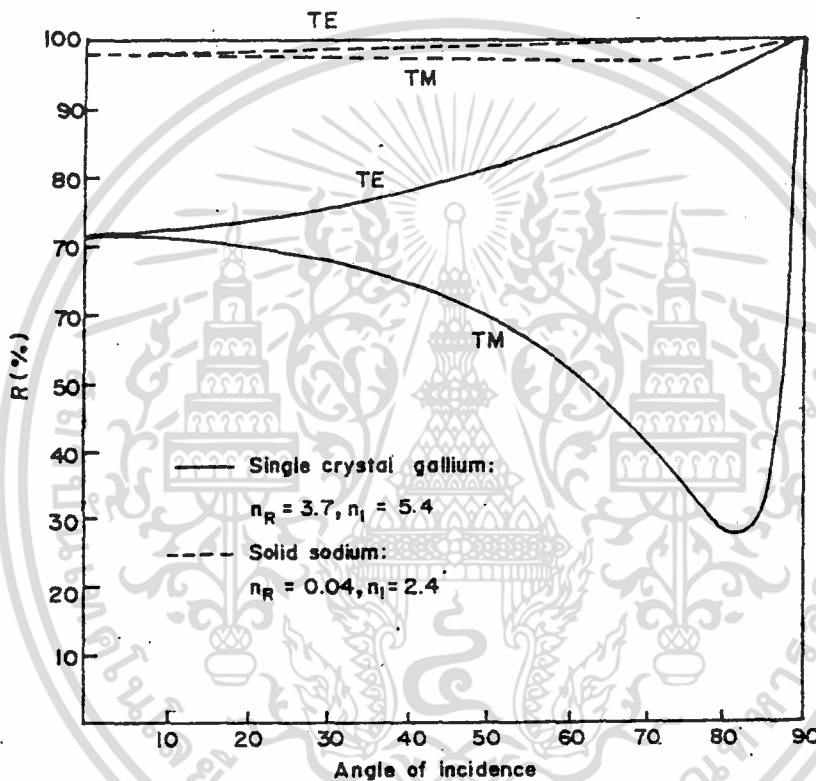
$$\text{TE: } r_s = \frac{E_r}{E} = \frac{\cos \theta - \sqrt{(n_R^2 - n_I^2 - \sin^2 \theta) + i(2n_R n_I)}}{\cos \theta + \sqrt{(n_R^2 - n_I^2 - \sin^2 \theta) + i(2n_R n_I)}} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TM:

$$r_p = \frac{E_r}{E} = \frac{[n_R^2 - n_I^2 + i(2n_R n_I)] \cos \theta - \sqrt{(n_R^2 - n_I^2 - \sin^2 \theta) + i(2n_R n_I)}}{[n_R^2 - n_I^2 + i(2n_R n_I)] \cos \theta + \sqrt{(n_R^2 - n_I^2 - \sin^2 \theta) + i(2n_R n_I)}} \quad (2.46)$$

จากสมการที่ (2.45) และ (2.46) มีความยุ่งยากและเป็นเลขเชิงซ้อนด้วย เราอาจทำให้ง่ายขึ้น โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูป $(a + ib)/(c + id)$



รูปที่ 2.6 แสดงความสะท้อนที่ผิวโลหะที่ ความยาวคลื่น 589.3 nm

2.2 โพลาริเซชัน (Polarization)

สมบัติทางโพลาริเซชันของแสง สามารถที่จะอธิบายได้โดยใช้ขบวนการทางคณิตศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์

เมื่อพิจารณาแสงลำหนึ่งที่กำลังเคลื่อนที่ ในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบของกระดาษ และอยู่ที่ตำแหน่งของจุดกำเนิดของระบบแกนในรูปที่ 2.7 ถ้าให้องค์ประกอบของ \vec{E} ในแกน x และ y เป็น

E_x และ E_y ตามลำดับ อาจเขียน \vec{E} ในรูปของ unit vector \hat{i} และ \hat{j} ได้เป็น

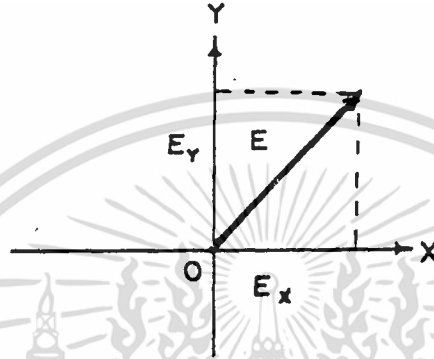
$$\vec{E} = E_x \hat{i} + E_y \hat{j} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าให้

$$E_x = E_{0x} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t + \varphi_x)} \quad (2.48)$$

$$E_y = E_{0y} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t + \varphi_y)} \quad (2.49)$$



รูปที่ 2.7 แสดงสนามไฟฟ้าของแสง ณ เวลาหนึ่ง โดยแสงเคลื่อนที่ในแนว +z
จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \left(E_{0x} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t + \varphi_x)} \right) \hat{i} + \left(E_{0y} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t + \varphi_y)} \right) \hat{j} \\ &= \left[\left(E_{0x} e^{i\varphi_x} \right) \hat{i} + \left(E_{0y} e^{i\varphi_y} \right) \hat{j} \right] e^{i(\vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t)} \\ &= \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t)} \end{aligned} \quad (2.50)$$

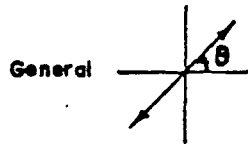
ในเทอมของวงเล็บ [] หรือ \vec{E}_0 เป็นแอมพลิจูดเชิงซ้อน (complex amplitude) ของแสงโพลาไรซ์ มิ่งค์ประกอบของคลื่นทั้งในแนวแกน x และ y อยู่ด้วยกันสถานะของแสงจะถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดและเฟสของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และ y ดังนั้นสถานะโพลาไรเซชัน จะพิจารณาเฉพาะแอมพลิจูดเชิงซ้อน และนำมาเขียนเป็นเมตริกซ์ หรือ Jones vector ดังนี้

$$\vec{E}_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jones vector ที่แทนสถานะแสงโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

I. Linear Polarization ($\Delta\theta = m\pi$)

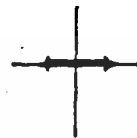


$$E_0 = \begin{vmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{vmatrix}$$

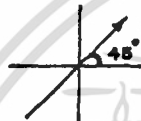
Vertical: $E_0 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$



Horizontal: $E_0 = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$



At $+45^\circ$: $E_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \end{vmatrix}$



At -45° : $E_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ -1 \end{vmatrix}$



II. Circular Polarization ($\Delta\theta = \frac{\pi}{2}$)

Left:



$$E_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ -i \end{vmatrix}$$

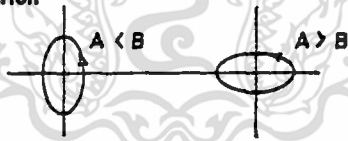
Right:



$$E_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 \\ i \end{vmatrix}$$

III. Elliptical Polarization

Left



$$E_0 = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{vmatrix} A \\ iB \end{vmatrix}$$

($\Delta\theta = (m + \frac{1}{2})\pi$)

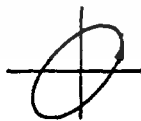
Right:



$$E_0 = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{vmatrix} A \\ -iB \end{vmatrix}$$

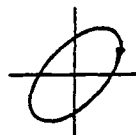
Left:

($\Delta\theta \neq \left\{ \begin{matrix} m\pi \\ (m + \frac{1}{2})\pi \end{matrix} \right\}$)



$$E_0 = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{vmatrix} A \\ B + iC \end{vmatrix}$$

Right:



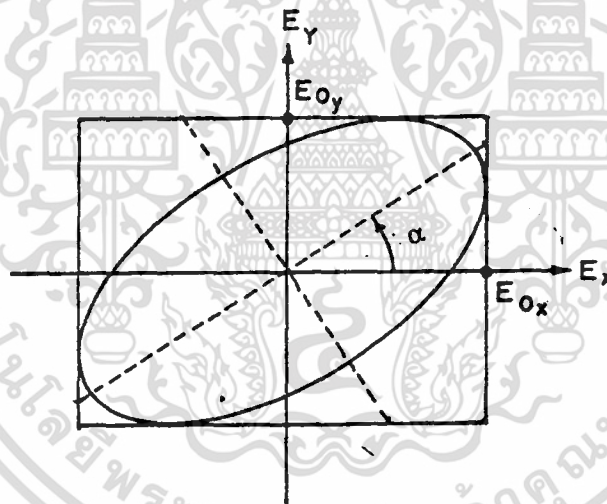
$$E_0 = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{vmatrix} A \\ B - iC \end{vmatrix}$$

ตารางที่ 2.1 แสดง Jones vector แสงโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่า

1. Jones vector ที่มี a และ b เป็นเลขจริงและไม่เป็นศูนย์ เป็นเวกเตอร์ที่แทนแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ทำมุม α กับแกน x ซึ่ง α หาได้จาก $\arctan(b/a)$
2. กรณีที่องค์ประกอบในแนวแกน x และ y มีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่ $\Delta\phi = 90^\circ$ โดยที่สนามไฟฟ้าในแกน x นำสนามไฟฟ้าในแกน y จะได้แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมในทิศวนซ้าย (LCP) แต่ถ้าสนามไฟฟ้าในแนวแกน y นำสนามไฟฟ้าในแนวแกน x $\Delta\phi = 90^\circ$ แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมจะมีทิศวนขวา (RCP) ในการพิจารณา Jones vector ของแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมว่าเป็นวนซ้ายหรือวนขวา จะต้องหา normalized form ก่อนจึงจะสามารถสรุปได้
3. ในกรณีที่ $E_{0x} = A$, $E_{0y} = B$ และ $\Delta\phi = 90^\circ$ จะได้แสงโพลาไรซ์เชิงวงรี สำหรับทิศของแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีจะขึ้นอยู่กับเฟสของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x และแกน y เช่นเดียวกับแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม สำหรับ major axis ของวงรีจะขึ้นอยู่กับ E_{0x} และ E_{0y}



รูปที่ 2.8 แสดงแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีที่มี major axis ทำมุม α กับแนวแกน x
พิจารณารูปที่ 2.8 แสดงแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีสามารถหา α ได้จาก

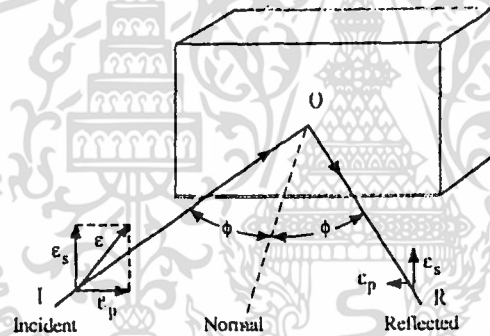
$$\tan^2 \alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \mathcal{E}}{(E_{0x})^2 - (E_{0y})^2} \quad (2.52)$$

โดยที่ \mathcal{E} คือความต่างเฟสของแสงในองค์ประกอบ y และองค์ประกอบ x

2.3 Ellipsometry

Ellipsometry จะใช้งานในด้านการวัดความหนาของฟิล์มบางที่เป็นไดอิเล็กทริกบนฐานรองที่มีการดูดกลืนสูง และยังสามารถที่จะใช้วัดค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มหรือฐานรอง ได้อีกด้วย Ellipsometry จะอาศัยพื้นฐานการวัดสถานะโพลาไรเซชันของแสงโพลาไรซ์ เมื่อแสงที่สะท้อนมาจากพื้นผิววัตถุ ซึ่งโดยปกติจะมีการลดทอนของแอมพลิจูดและเกิดการ shift ของเฟสขึ้น

พิจารณาแสง plane-polarized ที่ตกกระทบบนระนาบพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.9 แสงโพลาไรซ์ที่ตกกระทบนั้นจะประกอบด้วยตัวประกอบ 2 ชนิดคือ องค์ประกอบ P ซึ่งจะขนานกับระนาบของการตกกระทบ และองค์ประกอบ S ซึ่งจะตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบ เมื่อมีการสะท้อนจากวัตถุที่ดูดกลืนแสงจะทำให้องค์ประกอบทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงทั้งแอมพลิจูดและเกิดการ shift ของเฟสขึ้น ค่าการสะท้อนขององค์ประกอบ P จะมีค่าน้อยกว่าค่าการสะท้อนขององค์ประกอบ S ในทุก ๆ มุมตกกระทบ ยกเว้นที่มุม 0° และ 90° ค่าการสะท้อนของทั้งสององค์ประกอบจะมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.9 แสดงแสงโพลาไรซ์ที่สะท้อนจากระนาบของพื้นผิว

ความสำคัญของคุณสมบัติของแสงโพลาไรซ์ของวิธีการ Ellipsometry คือการเปลี่ยนแปลงของแสง plane-polarized ไปเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงรี (Elliptically polarized light) หรือแสงโพลาไรซ์เชิงวงรีไปเป็น plane-polarized เมื่อมีการสะท้อนเกิดขึ้น

การแพร่ของแสงจะเกิดการแกว่งในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในมุมที่เหมาะสมกับทิศทางของการแพร่ เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้ารวมหาได้จาก

$$\mathbf{E} = \epsilon_p \hat{p} + \epsilon_s \hat{s} \quad (2.53)$$

เมื่อ ϵ_p และ ϵ_s คือองค์ประกอบขนานและตั้งฉากของสนามไฟฟ้าตามลำดับ เครื่องหมายบวกและลบจะแทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหาได้จาก

$$R_p = \frac{\epsilon_p(\text{reflected})}{\epsilon_p(\text{incident})} \quad R_s = \frac{\epsilon_s(\text{reflected})}{\epsilon_s(\text{incident})} \quad (2.54)$$

อัตราส่วนของการสะท้อน ρ จะนิยามได้ในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน R_p และ R_s หรือจาก Ellipsometric angle Ψ และ Δ ดังนี้

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \tan(\Psi)e^{i\Delta} \quad (2.55)$$

ซึ่งสามารถทำการวัดได้ เมื่อ ρ คือค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งก็คือค่าอัตราส่วนของความเข้มแสงและเฟสที่เปลี่ยนไป

Ellipsometric angle Ψ ($0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$) และ Δ ($0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$) จะต้องใช้ร่วมกันกับการเปลี่ยนแปลงใน Ellipsometry และจะนิยามได้ว่า

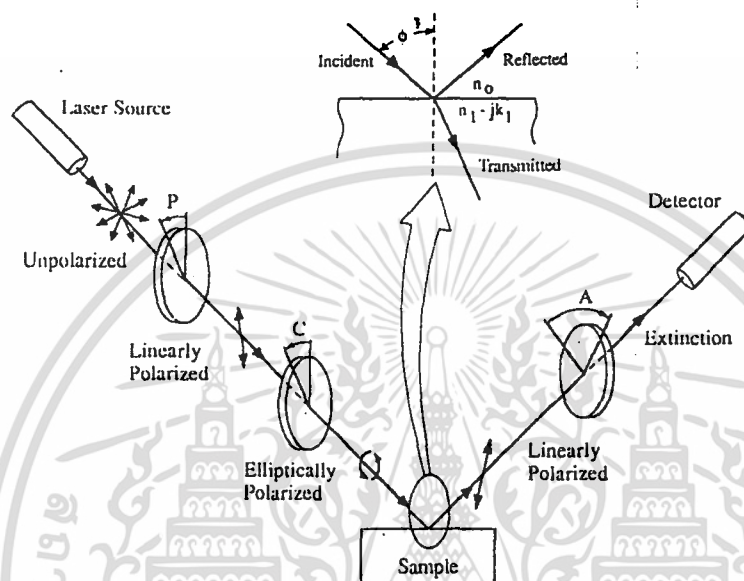
$$\Psi = \tan^{-1}\left(\frac{R_p}{R_s}\right) \quad (2.56a)$$

$$\Delta = \Delta_p - \Delta_s \quad (2.56b)$$

Ψ และ Δ จะกำหนดจากความแตกต่างของแอมพลิจูดและเฟสตามลำดับ Ψ และ Δ ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์ทางแสงของสารตัวอย่าง ถ้าในตัวอย่างง่าย ๆ โดยให้แสงสะท้อนที่ air-solid-absorbing susstate ดังรูปที่ 2.10 ค่าดัชนีหักเหของอากาศแทนด้วย n_0 และค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของตัวอย่างแทนด้วย $n_1 - jk_1$ เมื่อ n_1 คือค่าดัชนีหักเหและ k_1 คือ extinction coefficient เมื่อใช้สมการเฟสเนลจะได้

$$N_1 = n_1 - jk_1 = n_0 \tan(\phi) \sqrt{1 - \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2(\phi)} \quad (2.57)$$

เมื่อ ρ หาได้จากสมการที่ (2.55) ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนสามารถกำหนดได้ถ้าเรารู้ค่า n_0 และถ้าอัตราส่วน Ellipsometry ρ วัดได้ที่มุมตกกระทบ ϕ ในกรณีนี้จะง่ายต่อการคำนวณ



รูปที่ 2.10 แสดงการจัดอุปกรณ์ของ Ellipsometer

2.4 สรุป

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้เป็นรายละเอียดของทฤษฎีที่ใช้ข้างอิงในโครงการพิเศษนี้ซึ่งจะเกี่ยวกับการสะท้อนของแสงที่ผิว, โพลาไรซ์ของแสง และทฤษฎีของ Ellipsometry สำหรับในบทต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

บทที่ 3

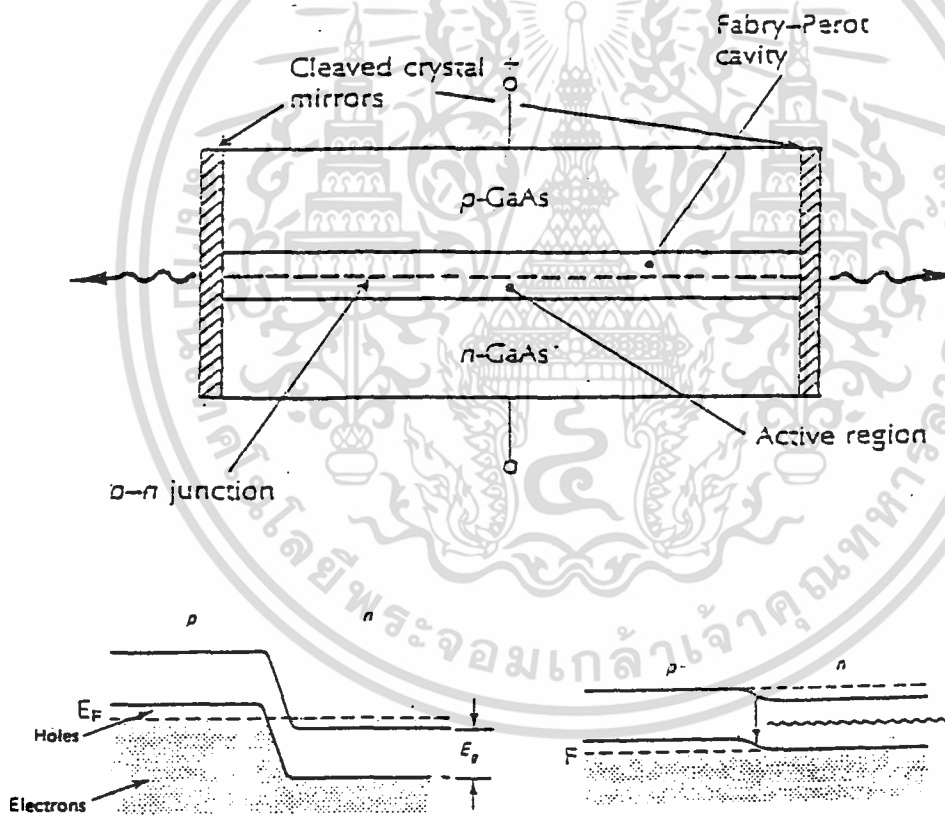
หลักการทํางานของอุปกรณ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้ซึ่งประกอบด้วย

3.1 เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode)

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่อยู่ในประเภทของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Laser) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก)

เมื่อให้การไบแอสตาม (Forward Bias) อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นของ Conduction Band จะได้รับการกระตุ้นจากพลังงานที่ไบแอสเข้าไปและจะเกิดการรวมตัวกับโฮลที่อยู่ใน Valence Band โดยที่การรวมตัวนี้อิเล็กตรอนอิสระจะปล่อยพลังงานออกมาอยู่ในรูปของพลังงานโฟตอนซึ่งมีค่าเท่ากับค่า Energy Gap (E_g) ของสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ค)



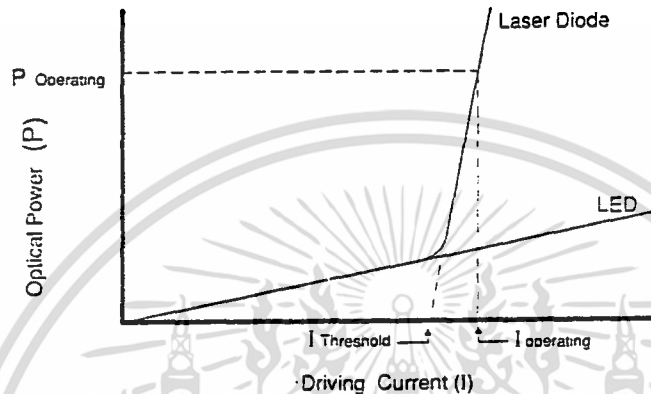
รูปที่ 3.1 (ก) แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด

(ข) แสดงระดับพลังงานขณะที่ไม่มีการไบแอส

(ค) แสดงระดับพลังงานขณะไบแอสตาม

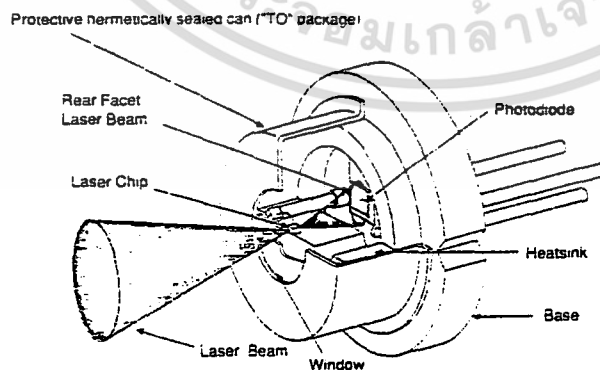
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระใน Conduction Band มีมากกว่าโฮลใน Valence Band ตลอดเวลา จะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นซึ่งแสงที่เกิดจะเป็นแสงเลเซอร์ที่มีคุณสมบัติดังนี้ คือ มีความยาวคลื่นเดียว มีเฟสตรงกันและมีความเข้มสูง ในการที่จะก่อให้เกิดสภาวะดังกล่าวได้นั้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่ฉีดเข้ามาต้องมีค่าสูงพอ โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสไบแอสต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นได้เรียกว่า ความหนาแน่นของกระแสขีดเริ่ม (Threshold current density, I_{th}) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของแสงที่วัดได้กับกระแสที่ทำให้เลเซอร์ทำงานเปรียบเทียบกับ LED เมื่อ I_{th} คือ ค่ากระแสต่ำสุดที่ทำให้เลเซอร์ไดโอดทำงาน I_{op} คือ ช่วงกระแสที่เหมาะสมในการทำงาน

พิจารณารูปที่ 3.2 ถ้ากระแสที่ป้อนให้กับเลเซอร์ไดโอดมีค่าสูงกว่า I_{op} จะทำให้เลเซอร์ไดโอดได้รับความเสียหายได้ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากกรณีดังกล่าว จะมีการนำโฟโตไดโอดมาทำหน้าที่รับแสง เพื่อป้อนสัญญาณกลับไปควบคุมกระแสที่ขับเลเซอร์ไดโอดซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงภาคตัดขวางของเลเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีทำนำไปใช้

Laser Diode	Wavelength (nm)	Power Output from Laser Diode (mW)	Pin-Out Type (see page 94)	Diameter of Laser Diode Base (mm)	Comments
Toshiba TOLD 9211	670	4	1	9.0	Medium power - "red"
Toshiba TOLD 9215	670	10.0	1	9.0	High power - "red"
Toshiba TOLD 9140	680	20	1	9.0	High power - "red"
Sharp LT023MS	780	3	2	5.6	Low cost
Sharp LT027MD	780	7	2	9.0	Medium power
Sharp LT025MD	780	30	2	9.0	High power
Mitsubishi ML5415C	830	30	2	9.0	High power
Sharp LT015MD	830	30	2	9.0	High power
Spectra Diode SDL-5311-G1	830	100	1	9.0	Very high power
Sharp LT011MS	845	3	2	5.6	Low cost

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลของเลเซอร์ไดโอดชนิดต่าง ๆ

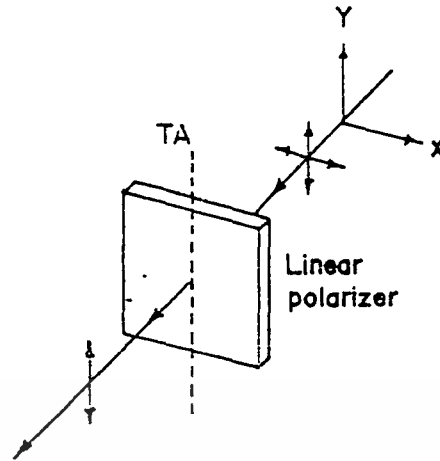
ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้เลเซอร์ไดโอดของ Hitachi HL 6711G ที่มีความยาวคลื่น 670 nm และกำลังของเลเซอร์ไดโอดเท่ากับ 10 mW แสงของเลเซอร์ไดโอดเป็นแสงสีแดง

3.2 อุปกรณ์โพลาไรซ์

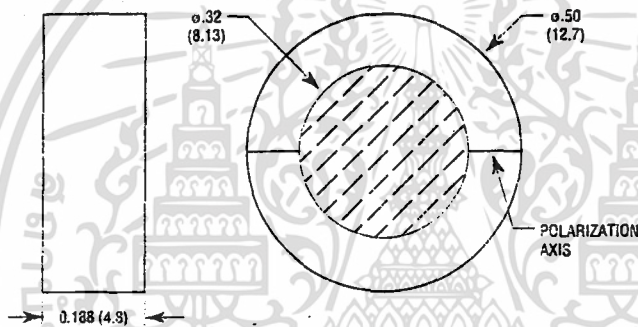
อุปกรณ์โพลาไรซ์เป็นอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ที่มีคุณสมบัติสามารถเปลี่ยนแปลงสถานะทางโพลาไรซ์ของแสงได้ ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้อุปกรณ์โพลาไรซ์ 3 แบบด้วยกันคือ

3.2.1 Polarizer Sheet

เป็นโพลาไรเซอร์เชิงเส้น (Linear Polarizer) ที่ทำมาจากสารประเภทโคโคริก ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้แสงทะลุผ่านได้ในแนวทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้นดังแสดง ในรูปที่ 3.4 และแสงที่อยู่ในทิศทางอื่น ๆ จะถูกดูดกลืนหมด สำหรับแนวทิศทางที่โพลาไรเซอร์ยอมให้แสงผ่านได้นั้นจะเรียกว่า Transmission Axis ; TA



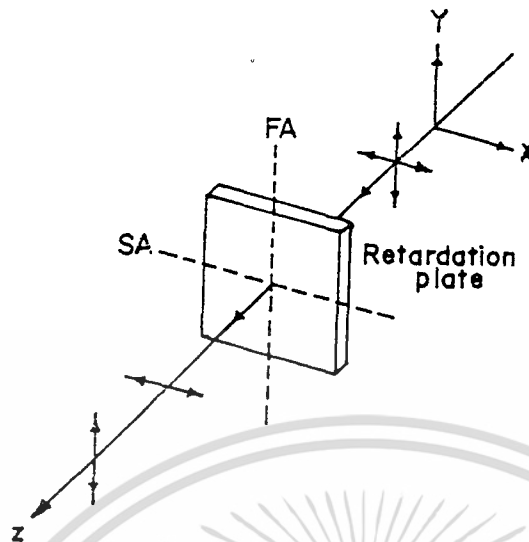
รูปที่ 3.4 แสดงหลักการทำงานของ Polarizer Sheet



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของ Polarizer Sheet

3.2.2 Wave Plates

เป็นอุปกรณ์โพลาไรซ์ชนิดหน่วงเฟส (Retarding Plates หรือ Retarder) ลักษณะโดยทั่วไปของ Wave Plates จะมีแนวแกนอยู่ 2 แนวที่ตั้งฉากกัน โดยที่แนวแกนหนึ่งแสงจะทะลุผ่านได้เร็วกว่าอีกแนวแกนหนึ่ง ซึ่งแนวแกนที่แสงผ่านได้เร็วกว่านั้นจะเรียกว่า Fast Axis ; FA และแนวแกนที่แสงผ่านได้ช้ากว่าจะเรียกว่า Slow Axis ; SA แสดงดังรูปที่ 3.6

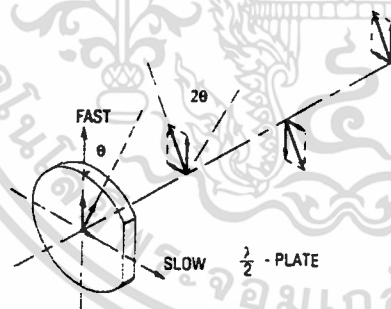


รูปที่ 3.6 แสดงหลักการทำงานของ Wave Plates

แสงที่ผ่าน Wave Plates ออกมานั้นจะมีสนามไฟฟ้าที่มีเฟสต่างกัน ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวนี้เองจึงสามารถแบ่งชนิดของ Wave Plates ออกได้เป็น

3.2.2.1 Half Wave Plates (HWP)

ลักษณะแสงที่ผ่านออกจาก (HWP) จะเป็นแสงที่มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้ามีเฟสต่างกัน 180° หรือ $\Delta\phi = 180^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

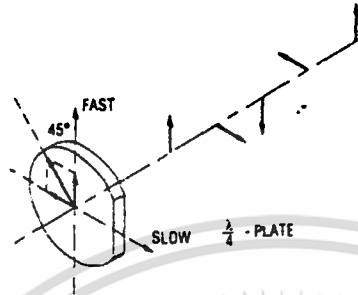


รูปที่ 3.7 แสดงหลักการทำงานของ HWP

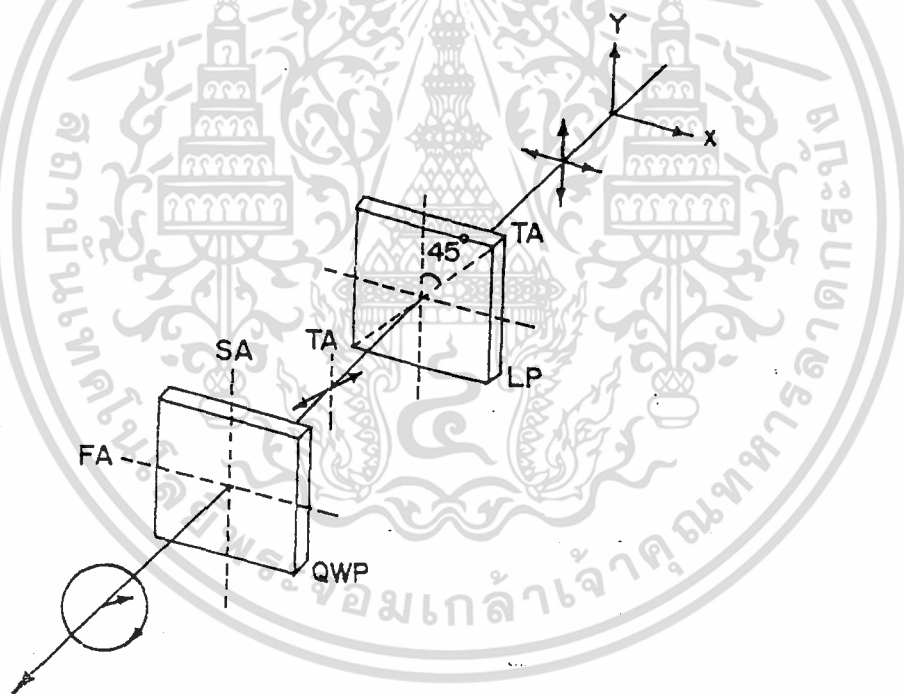
พิจารณารูปที่ 3.7 ถ้าแกนของสนามไฟฟ้าตกกระทบบทำมุม θ กับแนวแกน FA แนวแสงที่ทะลุผ่านออกมาจะหมุนไปเป็นมุม 2θ จากแนวแสงเดิมในขณะที่ตกกระทบบ และองค์ประกอบของแสงก็จะมีเฟสต่างกัน 180°

3.2.2.2 Quarter Wave Plates (QWP)

ลักษณะของแสงที่ผ่านออกมาจาก QWP จะเป็นแสงที่มีเฟสขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าต่างกัน 90° หรือ $\Delta\phi = 90^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งจากคุณสมบัตินี้เองจึงสามารถสร้างแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์เป็นวงกลมได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะการทำงานของ QWP

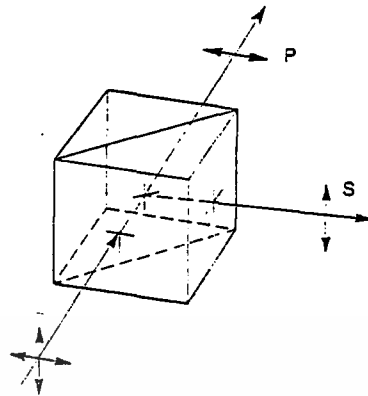


รูปที่ 3.9 แสดงการสร้างแสงโพลาไรซ์แบบวงกลมจาก QWP .

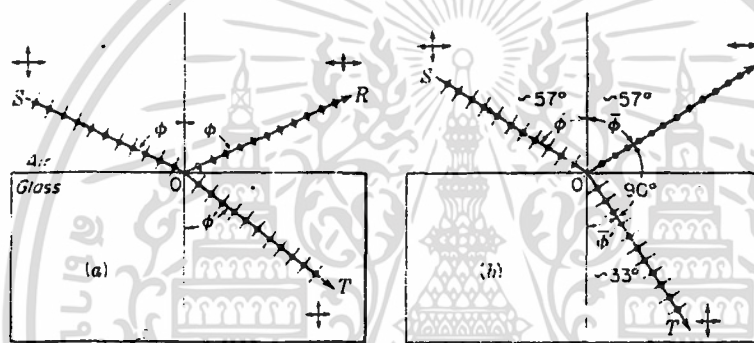
พิจารณารูปที่ 3.9 เมื่อให้แสงตกกระทบบโพลาไรเซอร์ชนิดโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarizer ; LP) โดยที่โพลาไรเซอร์มีแนว TA ทำมุม 45° กับแนวแกน y ฉะนั้นแสงที่ผ่านออกมาจาก LP จึงมีสถานะโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น เมื่อแสงนี้ตกกระทบบกับระนาบของ QWP สนามไฟฟ้าของแสงก็จะทำมุม 45° กับแนวแกน FA (หรือ SA) แสงที่ผ่านออกมาก็จะมีเฟสขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าต่างกัน 90° ซึ่งจะได้ผลเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 Polarization Beamsplitter Cubes



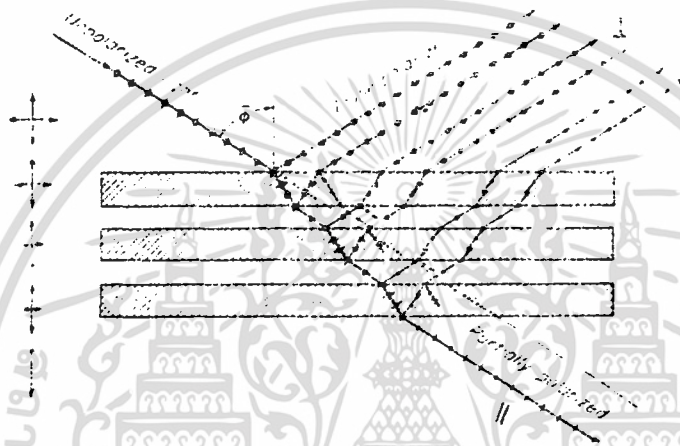
รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของ Polarization Beamsplitter Cubes



รูปที่ 3.11 แสดง (a) โพลาริเซชันโดยการสะท้อนและหักเห
(b) Brewster's law ของมุมโพลาริซ์

พิจารณาการหักเหของแสงในรูปที่ 3.11 สำหรับการโพลาริซ์พบว่าเกิด partially polarized ขึ้นทุก ๆ มุมตกกระทบ และจะไม่มีมุมใดเลยที่ทำให้เกิดแสงที่เป็น plane-polarized ที่สมบูรณ์ ปกติแสงตกกระทบจะมี plane-polarized สองแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน การสั่นของคลื่นในระนาบการตกกระทบ (ระนาบของกระดาษ) ส่วนหนึ่งจะสะท้อน อีกส่วนหนึ่งจะหักเหในทุกมุมตกกระทบ ยกเว้นที่มุมโพลาริซ์ Φ จะมีเพียงแสงหักเห การสั่นของคลื่นในแนวตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบจะมีพลังงานบางส่วนสะท้อนออกมาและที่เหลือจะหักเหในทุกมุมตกกระทบ ดังนั้นรังสีหักเหจึงมีระนาบของโพลาริเซชันทั้งสองเสมอ ในแก้วที่มี $n = 1.50$ ที่มุมโพลาริซ์ จะมีแสงที่มีแนวการสั่นขนานกับระนาบตกกระทบผ่านไปได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแสงในแนวตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบจะมีเพียง 85 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านออกมาส่วนอีก 15 เปอร์เซ็นต์จะสะท้อนออกไป

ถ้าลำแสงปกติของแสงตกกระทบบน plate ที่วางซ้อนกันที่มุมโพลาไรซ์ดังรูปที่ 3.12 แสงที่มีแนวการสั่นตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบจะสะท้อนออกไปในแต่ละพื้นผิว และในแนวขนานกับระนาบการตกกระทบจะเกิดการหักเห ผลสรุปว่าในลำแสงสะท้อนจะเป็น plane-polarized ในระนาบที่เหมือนกัน และในลำแสงหักเหแนวการสั่นที่ตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบจะค่อย ๆ ลดขนาดลง ซึ่งก็คือ partially polarized นั่นเอง ถ้ามีจำนวนของ plate มากแสงที่ผ่านออกมาจะมีลักษณะคล้ายกับ plane-polarized ดังแสดงให้เห็นจากรูปของแนวการสั่นทางด้านซ้ายของรูปที่ 3.12 มุมโพลาไรซ์ของการสะท้อนภายในจะมีลักษณะเหมือนกับมุมหักเห Φ' ดังในรูปที่ 3.11(b) ซึ่งหมายความว่าแสงที่สะท้อนภายในที่มุม Φ' จะเป็น plane-polarized ด้วยเหมือนกัน



รูปที่ 3.12 แสดงโพลาไรเซชันของแสงจาก plate ที่วางซ้อนกัน

ระดับการโพลาไรเซชัน P ของแสงที่ผ่านออกมาสามารถคำนวณได้โดยการรวมค่าความเข้มของส่วนที่ขนานและตั้งฉากเข้าด้วยกัน ถ้าแทนค่าความเข้มด้วย I_p และ I_s ตามลำดับจะได้ว่า

$$P = \frac{I_p - I_s}{I_p + I_s} = \frac{m}{m + \left[2n^2 / (1 - n^2) \right]} \quad (3.1)$$

เมื่อ m คือจำนวน plate นั่นคือจำนวนผิวคือ $2m$ และ n คือค่าดัชนีหักเห สมการนี้ถ้าใช้ปริมาณ plate ที่มากพอ ค่า P จะเข้าใกล้ 1 หรือประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ วิธีที่ดีกว่าในการทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์จะอธิบายต่อไป โดยจะใช้ plate ที่วางซ้อนกันซึ่งแสดงการจัดพวกในการทำและวิเคราะห์แสงโพลาไรซ์



รูปที่ 3.13 แสดง Glass plate ที่มีมุมโพลาไรซ์ Φ

รูปที่ 3.13 แสดง plate ที่วางซ้อนกัน 2 แบบคือ polarizer และ analyzer ซึ่งมีระนาบการตกกระทบแบบขนาน แสงที่ปรากฏออกมาทางด้าน N จะมีลักษณะคล้ายกับ plane-polarized และจะผ่าน analyzer ออกมาอย่างอิสระ และเมื่อหมุน analyzer ไป 90° จากแนวของเส้น NM จะทำให้แสงที่ผ่านออกมาหมดไป เมื่อแนวการสั่นนั้นตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบของ analyzer และจะสะท้อนออกทางด้านข้าง จากนั้นหมุนไปอีก 90° จะได้แสงกลับมาเหมือนเดิมและเมื่อหมุนครบรอบจะได้ค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด อย่างละ 2 ค่า polarizer และ analyzer ที่เรียกกันนี้เรียกว่า polariscope

สำหรับโพลาไรเซอร์ทั้ง 3 แบบที่กล่าวมานั้นในโรงงานพิเศษนี้ได้ใช้ Polarizer Sheet ในการปรับสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อนออกมาจากสารตัวอย่าง Waveplate ใช้ในการสร้างแสงตกกระทบให้มีสถานะทางโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและ Polarization Beamsplitter Cubes ใช้สำหรับสร้างสถานะโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์ให้มีสถานะโพลาไรซ์เชิงเส้นอยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบ

3.3 อุปกรณ์รับสัญญาณแสง

ในโรงงานพิเศษนี้ได้ใช้อุปกรณ์รับสัญญาณแสง 2 ประเภทคือ

1. โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo Detector)
2. โฟโตมิเตอร์ (Photo Meter)

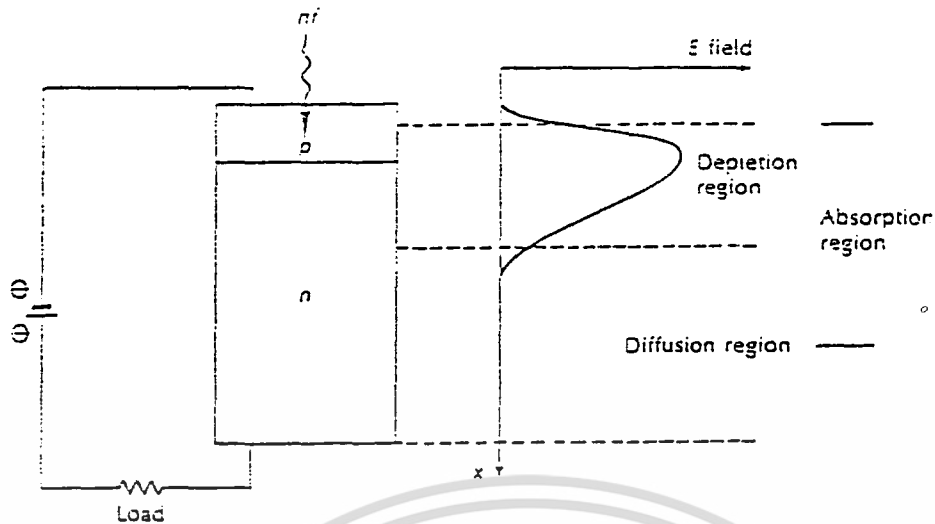
3.3.1 โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo Detector)

โฟโตดีเทคเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งจะมีโฟโตไดโอดทำหน้าที่รับสัญญาณแสงและแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยมีวงจรรักษาขยายทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าต่อไป รายละเอียดในส่วนของ โฟโตดีเทคเตอร์มีดังนี้

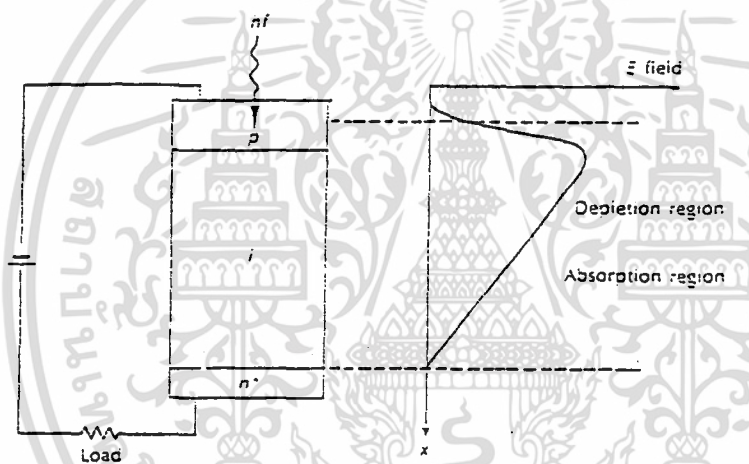
3.3.1.1 โฟโตไดโอด (Photo Diode)

มีหลักการทำงานที่ตรงกันข้ามกับไดโอดเปล่งแสง กล่าวคือเมื่อโฟโตไดโอดได้รับพลังงานแสงจากภายนอกบริเวณรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดการแตกตัวของโฮลและอิเล็กตรอนอิสระ เกิดเป็นกระแสรั่วไหล ซึ่งเมื่อให้การไบแอสกลับด้วยแรงดันค่าหนึ่งแก่โฟโตไดโอดแล้วบริเวณรอยต่อพี-เอ็นจะขยายกว้างขึ้น อิเล็กตรอนอิสระจะถูกแรงดันไบแอสกลับเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลข้ามรอยต่อเป็นกระแสเนื่องจากพลังงานแสงได้ดังแสดงในรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

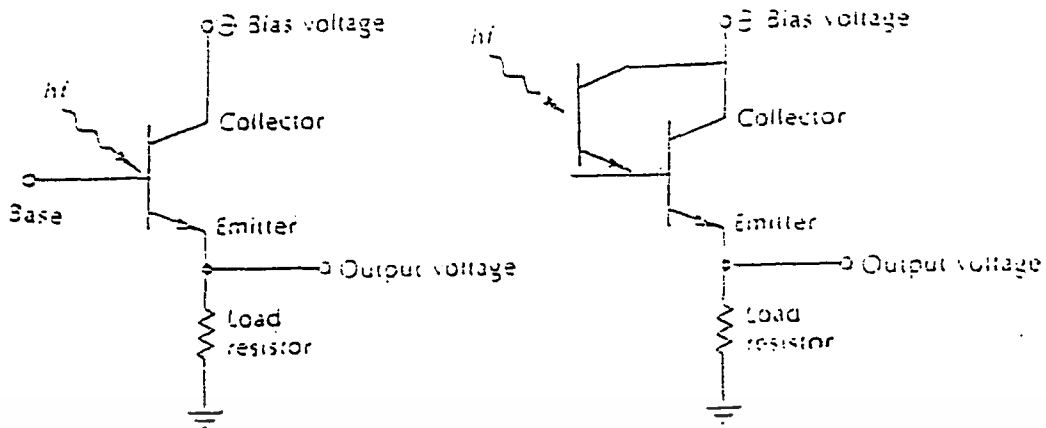


รูปที่ 3.14 แสดงโฟโตไดโอดแบบธรรมดา



รูปที่ 3.15 แสดงโฟโตไดโอดแบบพิน

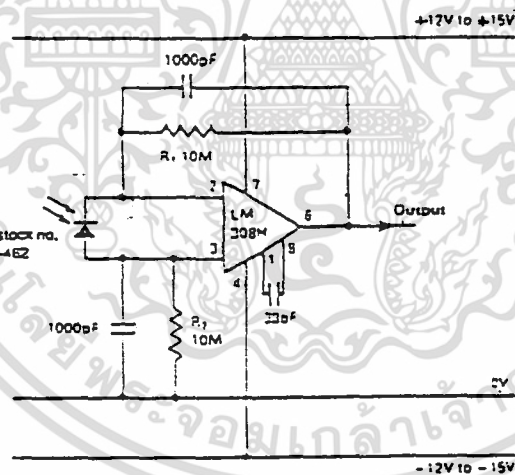
พิจารณารูปที่ 3.15 เป็นไดโอดชนิดพินโฟโตไดโอด ซึ่งจะมีรอยต่อพี-เอ็นกว้างขึ้นช่วยให้กระแสไหลได้มากขึ้น และมีช่วงเวลาคอสมอนของสัญญาณสั้นมาก และจะมีการทำงาน 2 โหมด คือ โหมดโฟโตวอลเทจิก (Photo voltaic) ซึ่งจะผลิตกระแสเมื่อมีแสงตกกระทบโดยไม่ต้องมีการไบแอส และโหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive) เป็นการทำงานเมื่อมีการไบแอสกลับ



รูปที่ 3.16 แสดงโครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์

พิจารณารูปที่ 3.16(ก) แสดงโครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์ โดยทั่วไปแล้วค่ากระแสที่ได้จากโฟโตทรานซิสเตอร์ จะมีการขยายด้วยทรานซิสเตอร์ก่อน จึงทำให้สามารถรับสัญญาณที่มีขนาดความเข้มแสงน้อย ๆ ได้ แต่จะมีช่วงเวลาตอบสนองค่อนข้างช้า รูปที่ 3.16(ข) เป็นโฟโตทรานซิสเตอร์แบบคาร์ลิ่งตันที่มีอัตราขยายสูงกว่าแบบธรรมดา สำหรับโครงการพิเศษนี้จะใช้โฟโตไดโอดชนิดพินโฟโตไดโอดของ RS รุ่น BPX 65

3.3.1.2 ภาควิทยาสัญญาณ

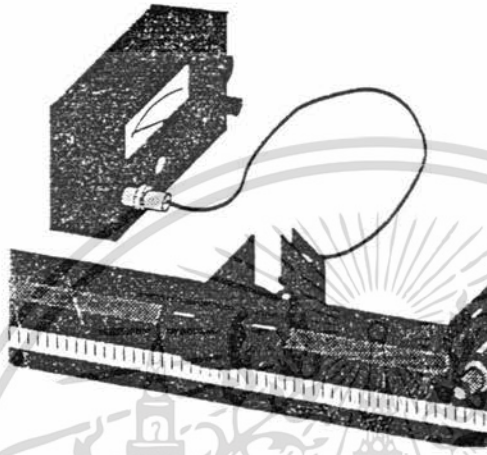


รูปที่ 3.17 แสดงวงจรรับสัญญาณแสงและภาควิทยาสัญญาณ

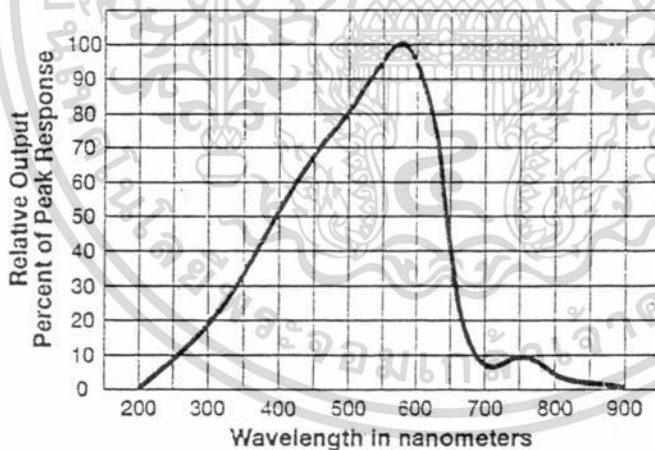
ในโครงการพิเศษนี้จะใช้ IC 741LS ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและภาควิทยาสัญญาณมีอัตราขยายสัญญาณ 500 เท่า

3.3.2 โฟโตมิเตอร์ (Photo Meters)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับแสง โดยมีซิลิเนียมโฟโตวอลทาอิกทำหน้าที่ตรวจสอบความเข้มของแสง และใช้มัดเส้นใยแก้วนำแสง (Optical fibre bundles) ทำหน้าที่รับแสง ค่าที่อ่านได้จากโฟโตมิเตอร์สามารถอ่านได้ในค่าของความเข้มแสงสัมพัทธ์ (Relative Intensities) ซึ่งมีหน่วยเป็น LUX และโฟโตมิเตอร์จะมีช่วงตอบสนองความยาวคลื่นดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 แสดงการจัดวาง Photo Meters



รูปที่ 3.19 แสดงช่วงตอบสนองความยาวคลื่นของ Photo Meters

3.4 เส้นใยแก้วนำแสง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการที่สำคัญของแสงที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยแก้วนำแสงเช่น การหักเหและการสะท้อนกลับหมด (Reflection and Total Internal Refraction) ซึ่งทำให้แสงสามารถเดินทางอยู่ภายในเส้นใยแก้วนำแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสง (Reflection and Total Internal Refraction)

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 2 ชนิด ที่มีดัชนีหักเหแสง (Light refractive index) ต่างกันแล้วจะมีการหักเหแสงเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) ในกรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีน้อยกว่านั้น หากมุมตกกระทบ θ_1 มีค่ามากขึ้นจะทำให้มุมหักเห θ_2 มีค่าเข้าใกล้ 90° เรียกมุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหเท่ากับ 90° นี้ว่า มุมวิกฤต (Critical angle, θ_c) ดังสมการที่ 3.2 และหากเพิ่มมุมตกกระทบอีก ($\theta > \theta_c$) จะทำให้แสงไม่สามารถเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ได้เลย นั่นคือเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในนั่นเองซึ่งในกรณีของเส้นใยแก้วนำแสงสามารถแสดงดังรูปที่ 3.20

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_{\text{clad}}}{n_{\text{core}}} \right) \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.20 แสดงการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง

โดยอาศัยหลักการการสะท้อนกลับหมด

ในการนำแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงดังรูปที่ 3.20 โดยการทำให้ดัชนีหักเหของแกนมีค่ามากกว่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง (Cladding) ที่หุ้มส่วนของแกนไว้ โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมดภายในของแสงดังกล่าวข้างต้น สามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปในแกนเดินทางไปได้โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับป้อนมาภายในแกน

3.4.2 การหักเหสองแนว (Double Reflection)

เมื่อแสงเคลื่อนที่ในตัวกลางสมลัทธิ (Isotropic) ความเร็วของแสงจะเท่ากันในทุกทิศทาง แต่ในตัวกลางอสมลัทธิ (Anisotropic) ถึงแม้จะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ความเร็วแสงในทิศทางที่ต่างกันจะไม่เท่ากัน ซึ่งตัวกลางชนิดนี้จะมีดัชนีหักเหแสงที่แตกต่างกันเล็กน้อยเรียกว่าเกิดการหักเหสองแนวหรือไบรฟรินเจนซ์ (Birefringence)

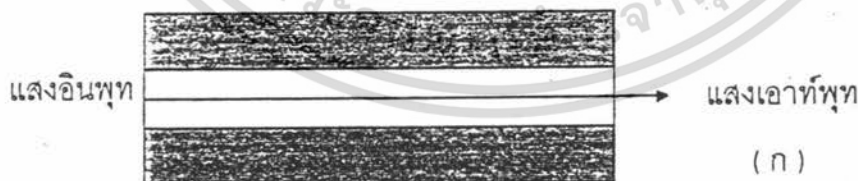
เมื่อแสงตกกระทบผลึกหักเหสองแนวในทิศทางที่เหมาะสมจะมีลำแสงหักเหออกจากผลึกสองแนว โดยแนวหนึ่งมาจากรังสีธรรมดา (Ordinary ray) หรือรังสี o และอีกแนวหนึ่งมาจากรังสีพิเศษ (Extraordinary ray) หรือรังสี e ซึ่งรังสีทั้งสองมีสมบัติต่างกัน โดยรังสี o เป็นไปตามกฎการหักเหของสเนลล์ แต่รังสี e ไม่เป็นไปตามกฎของสเนลล์ซึ่งสรุปได้ว่า

1. รังสี o เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_o คงที่ในทุกทิศทางของผลึกนั้นคือผลึกมีดัชนีหักเห n_o ซึ่งมีสมบัติเหมือนกับดัชนีหักเหของผลึกสมลัทธิ

2. รังสี e เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่ในทุกทิศทางของผลึก โดยความเร็วเปลี่ยนจาก V_o เป็น V_e ถ้า $V_e > V_o$ นั่นคือดัชนีหักเห $n_o > n_e$ โดยมีความสัมพันธ์ $n = c/v$ เมื่อ c เป็นความเร็วของแสง กล่าวคือความเร็วของคลื่น e จะมากกว่าคลื่น o หรือในเวลาเท่ากันคลื่น e และคลื่น o จะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางไม่เท่ากัน

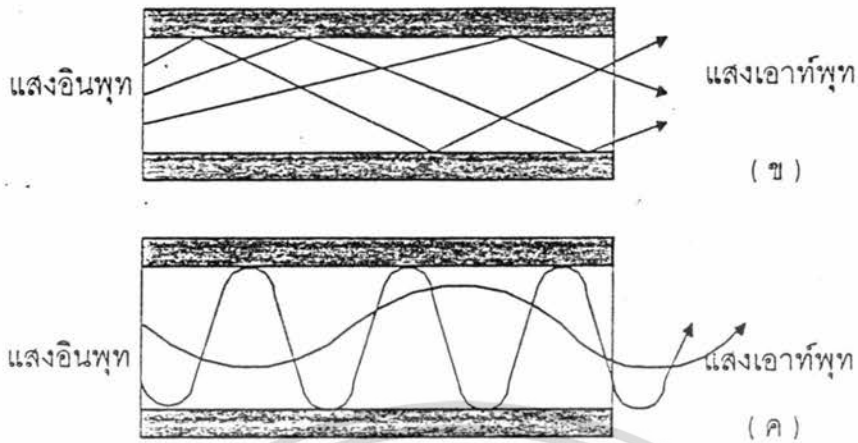
3.4.3 ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง (Types of Optical Fibres)

ภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจำนวนลำแสงที่เกิดขึ้นเป็นตัวบอกจำนวนโหมดของเส้นใยแก้วนำแสง เส้นใยแก้วนำแสงที่มีแนวลำแสงอยู่เพียงแนวเดียวเรียกว่า เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว (single mode fibre) แต่ถ้าภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นมีแนวลำแสงเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เรียกเส้นใยแก้วนำแสงนั้นว่าเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด (multimode fibre)



รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะของแสงที่เดินทางภายในแกนเส้นใยแก้วนำแสง
(ก) เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



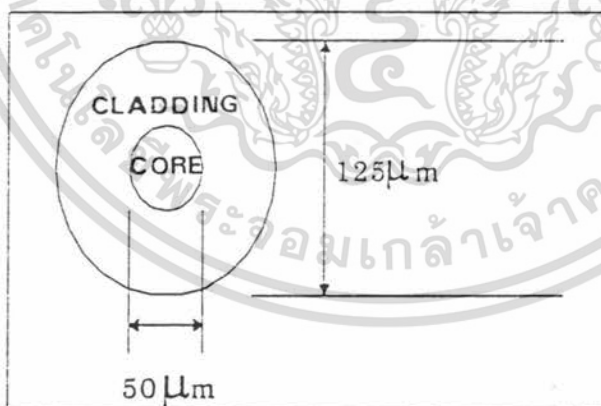
รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะของแสงที่เดินทางภายในแกนเส้นใยแก้วนำแสง (ต่อ)

(ข) เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดดัชนีขั้นบันได (step-index multimode fibre)

(ค) เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดดัชนีรูปมน (graded index multimode fibre)

3.4.3.1 เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multimode Fibre)

สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนและเคลดคิงโดยประมาณ 50 ไมครอน และ 125 ไมครอนตามลำดับ ดังรูปที่ 3.22



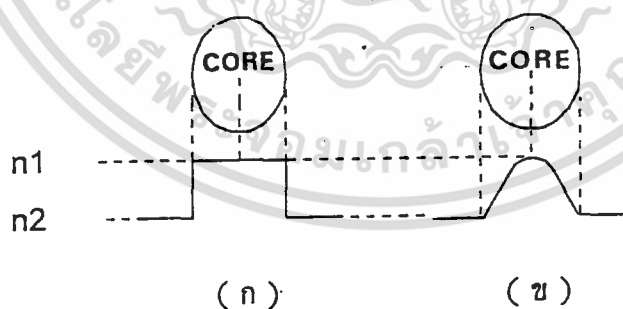
รูปที่ 3.22 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแกนของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด นั้นมีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นแสงที่ตกกระทบที่ปลายอินพุทของเส้นใยแก้วนำแสงมีมุมตกกระทบที่แตกต่างกันหลายค่า จากหลักการสะท้อนกลับหมดของแสงที่เกิดขึ้นภายในส่วนของแกน ทำให้มีแนวลำแสงเกิดขึ้นหลายโหมด และแสงแต่ละโหมดเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง โดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกัน อันเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณ (modal dispersion) จึงได้มีการพัฒนาที่จะลดการแตกกระจายของสัญญาณซึ่งเกิดขึ้นจากเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด โดยแบ่งเส้นใยแก้วนำแสงตามลักษณะดัชนีการหักเหแสงของแกน

ถ้าคิดว่าแกนของเส้นใยแก้วนำแสงนั้นมีค่าดัชนีหักเหแสงที่สม่ำเสมอเท่ากันตลอด ความสัมพันธ์ของกราฟแสดงค่าดัชนีหักเหแสงของส่วนแกนเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าดัชนีหักเหแสงในอากาศดังรูปที่ 3.23(ก) มีลักษณะเหมือนขั้นบันได โดยเรียกเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีลักษณะการแจกแจงของค่าดัชนีหักเหแสงภายในแกนเช่นนี้ว่า เส้นใยแก้วนำแสงชนิดดัชนีขั้นบันได

เมื่อสร้างเส้นใยแก้วนำแสงชนิดดัชนีขั้นบันไดนี้เป็นแบบปลายโหมดก็ย่อมทำให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณเอาต์พุตมาก ด้วยเหตุที่ว่าแนวทางเดินของแสงในแต่ละโหมดนั้นต้องใช้เวลาในการเดินทางต่าง ๆ กัน เพื่อปรับปรุงการลดการแตกกระจายของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดนี้ สามารถทำได้โดยการสร้างเส้นใยแก้วนำแสงให้มีดัชนีหักเหแสงภายในส่วนของแฉกหรือคั่น ดังรูปที่ 3.23(ข) ซึ่งเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้เรียกว่าเส้นใยแก้วนำแสงชนิดดัชนีรูปมน ทำให้ลำแสงทุกลำหรือทุกโหมดใช้เวลาในการเดินทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงต่างกันอย่างน้อยมาก



รูปที่ 3.23 แสดงชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามลักษณะดัชนีหักเหแสงของแกน

(ก) กราฟแสดงดัชนีหักเหแสงของแกนเมื่อเปรียบเทียบกับ

ดัชนีหักเหแสงของอากาศมีลักษณะเป็นขั้นบันได

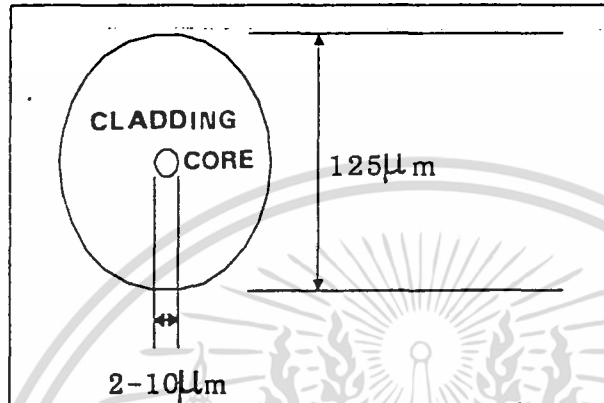
(ข) เพื่อลดการกระจายของสัญญาณ โดยการสร้างให้ดัชนีหักเหภายใน

แกนมีค่าค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะต่อเนื่องมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.2 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว (Single Mode Fibre)

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนและของแคลดดิ้งโดยประมาณ 2-10 ไมครอน และ 125 ไมครอนตามลำดับ ซึ่งส่วนของแกนมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดมากและให้แสงออกมาเพียงโหมดเดียวดังรูปที่ 3.24

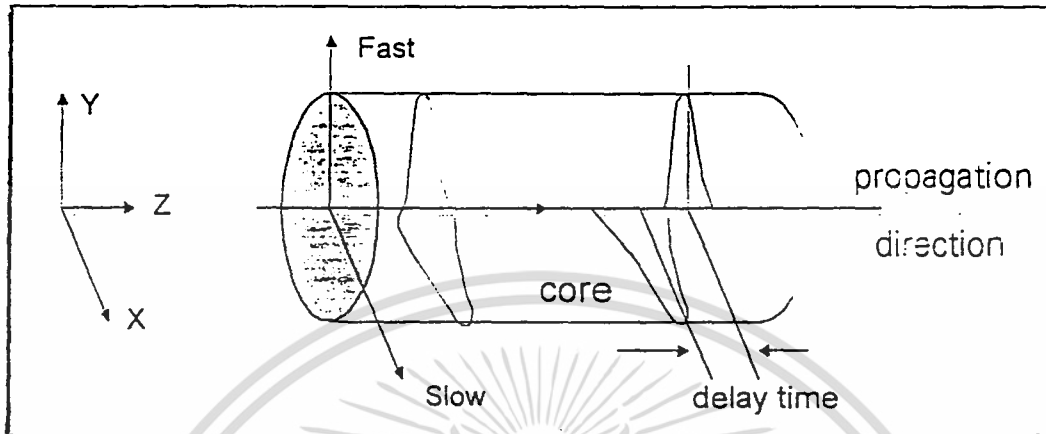


รูปที่ 3.24 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสง โหมดเดียว

สังเกตว่าขนาดของแกนที่ใช้ส่งสัญญาณนั้นเล็กมาก ทำให้ยากต่อการที่จะนำแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสง แต่เนื่องจากข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวก็คือ ไม่มีการแตกกระจายของสัญญาณเกิดขึ้นจึงมีแบนวิธที่ใช้ประโยชน์ได้กว้างกว่า

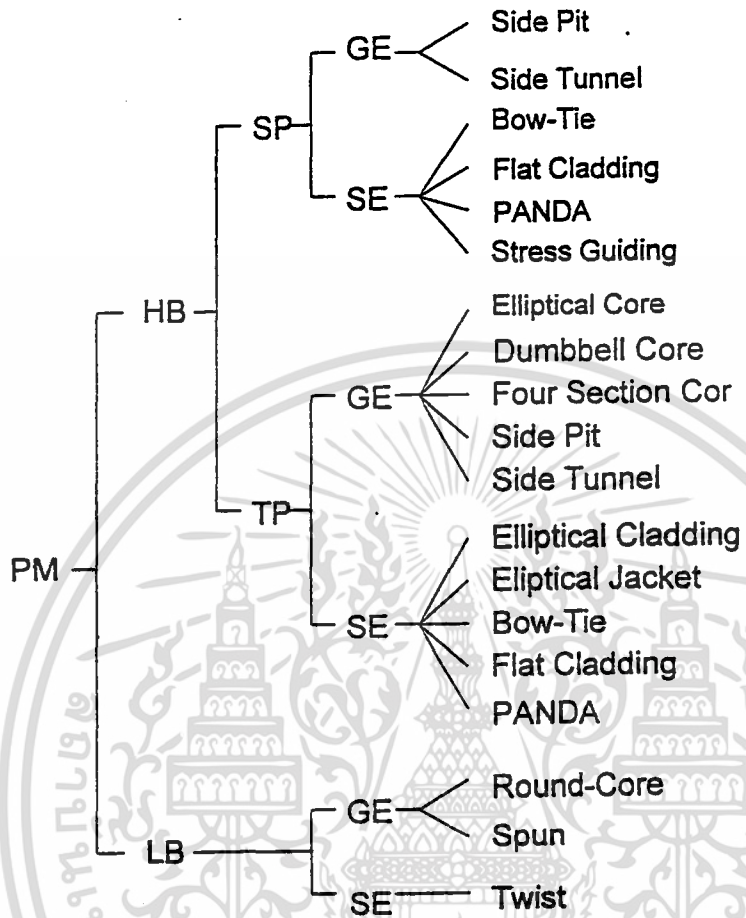
3.4.3.3 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดอนุรักษ์สถานะทางโพลาไรเซชัน (Polarization Preserving Fibres)

สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียวแบบธรรมดาในทางทฤษฎีนั้นองค์ประกอบของความเร็วของแสงในส่วนแกนจะเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติเส้นใยแก้วนำแสงจะไม่สมมาตรสมบูรณ์ โดยมีรูปร่างและดัชนีหักเหที่ไม่สมมาตร ซึ่งผลดังกล่าวทำให้เกิดการหักเหสองแนวขึ้น โดยที่โหมดทั้งสองนั้นมีความเร็วที่แตกต่างกันเล็กน้อยขององค์ประกอบของความเร็วที่ประกอบด้วยความเร็วที่มากกว่า (Fast Axis) และอีกแกนหนึ่งที่ตั้งฉากกันที่มีความเร็วน้อยกว่า (Slow Axis)

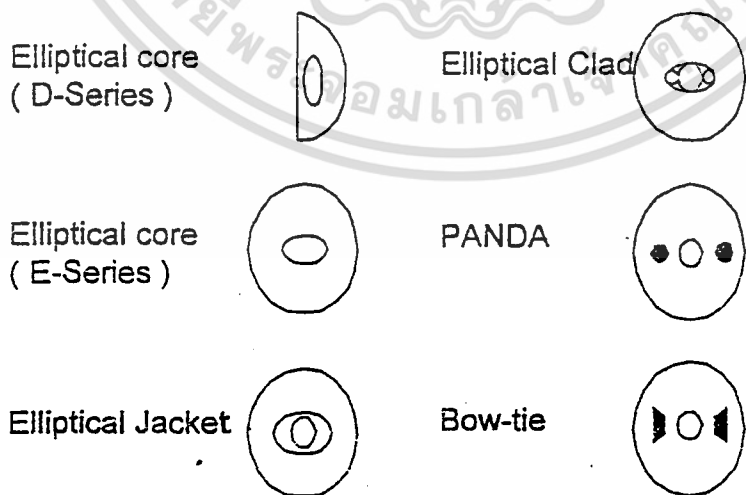


รูปที่ 3.25 แสดง โหมดของแสงโพลาไรซ์ 2 โหมดที่ตั้งฉากกันที่ความเร็วต่างกัน เส้นใยแก้วนำแสง โหมดเดียวที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความสามารถในการอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชัน (PM) ซึ่งแบ่งเป็นชนิดไฮลิ์ ไบรฟ์รินเจนซ์ (HB) และชนิดโลว์ ไบรฟ์รินเจนซ์ (LB) โดยพิจารณาจากผลต่างของดัชนีหักเหแสง (ไบรฟ์รินเจนซ์, Δn) กล่าวคือถ้าไบรฟ์รินเจนซ์ $\Delta n < 10^{-4}$ จัดเป็นชนิดไฮลิ์ ไบรฟ์รินเจนซ์ แต่ถ้าไบรฟ์รินเจนซ์ $\Delta n > 10^{-4}$ จัดเป็นชนิดโลว์ ไบรฟ์รินเจนซ์ โดยเส้นใยแก้วนำแสงชนิดไฮลิ์ ไบรฟ์รินเจนซ์ยังแยกพิจารณาเป็นแบบโหมดโพลาไรเซชันเดี่ยว (single-polarization mode, SP) และโหมดโพลาไรเซชันสองโหมด (two-polarization modes, TP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



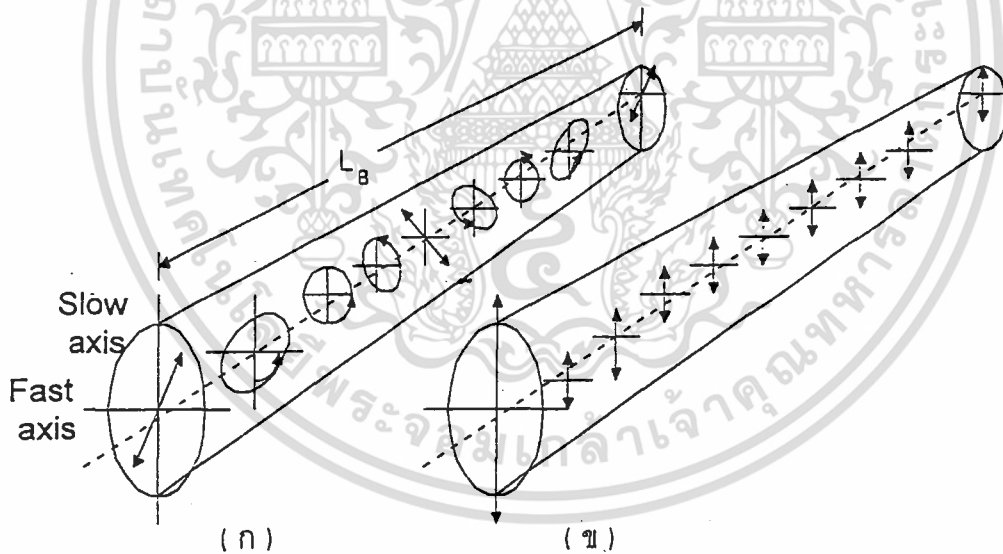
รูปที่ 3.26 แสดงการจัดประเภทของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด
อนุรักษัสถานะทางโพลาไรเซชัน



รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่างของเส้นใยแก้วนำแสงไฮลิ ไบรฟรินเจนซ์บางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกร้นำไปใช้

เส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดียวชนิดอนุรักษัสภาพะทางโพลาริเซชัน ชนิดไฮลิ-ไบร์ฟรินเจนซ์ซึ่งมีความยาวบิตส์สั้นจากรูปที่ 3.28 พิจารณาความสัมพันธ์ของความยาวบิตส์ของเส้นใยแก้วนำแสง (ก) และความสามารถในการอนุรักษัสภาพะทางโพลาริเซชันภายใน (ข) ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดไฮลิ-ไบร์ฟรินเจนซ์ โดยรูป (ก) เมื่อสตรอนซ์แสงเข้าในทิศทำมุม 45° กับแกนทั้งสอง (แกนที่มีความเร็วมากกว่าและแกนที่มีความเร็วน้อยกว่า) จะมีการเปลี่ยนรูปแบบของโพลาริเซชันจากเดิมซึ่งเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น เป็นวงรี วงกลมและ เชิงเส้น (ที่เฟสต่างจากเชิงเส้นเดิม 180°) วงรี วงกลมและเชิงเส้น (รูปแบบเดิม) ระยะการเปลี่ยนแปลงครบรอบของรูปแบบการโพลาริเซชัน จะเรียกว่าระยะความยาวบิตส์ของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งถ้าเป็นเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโลว์-ไบร์ฟรินเจนซ์ ความยาวบิตส์ของเส้นใยแก้วนำแสงจะยาวกว่าชนิดไฮลิ-ไบร์ฟรินเจนซ์ ส่วนรูป (ข) สำหรับในระบบตรวจวัดนั้นจะทำการสตรอนซ์แสงในแนวขนานกับแกนใดแกนหนึ่ง จะพบว่ารูปแบบของโพลาริเซชันจะไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือในระหว่างการเดินทางของแสงภายในแกนนั้น สภาวะของโพลาริเซชันมีความแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดที่จุดใด ๆ บนเส้นใยแก้วนำแสงยอมให้ผลเช่นเดียวกัน ซึ่งในโครงการพิเศษนี้อาศัยผลดังกล่าวมาใช้ในการรักษาสภาพะทางโพลาริเซชันของแสง



รูปที่ 3.28 แสดงการเปรียบเทียบ

(ก) ความสัมพันธ์ของความยาวบิตส์ของเส้นใยแก้วนำแสง

และ (ข) ความสามารถในการอนุรักษัสภาพะทางโพลาริเซชันภายในของ
เส้นใยแก้วนำแสงชนิดไฮลิ-ไบร์ฟรินเจนซ์

3.5 เลนส์ (Diode Laser Objective Lenses)

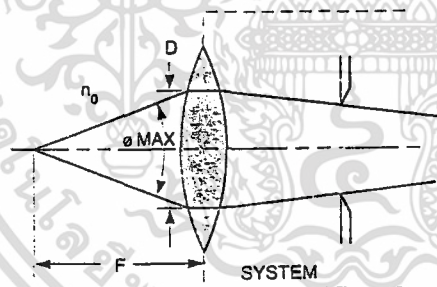
จากการที่แสงเลเซอร์ที่ได้จากเลเซอร์ไดโอด มีลักษณะที่เป็นลำแสงที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ core ของเส้นใยแก้วนำแสง (เส้นผ่านศูนย์กลางของ beam เลเซอร์มีขนาด 5 mm ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของ core fibre มีขนาด $\approx 6 \mu\text{m}$) ฉะนั้นแสงจึงไม่สามารถเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงได้เต็มที่จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการรวมแสงของเลเซอร์ไดโอด ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง เพื่อให้ง่ายต่อการฉายแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวคือ เลนส์ ซึ่งทำหน้าที่รวมแสงของเลเซอร์ไดโอด พารามิเตอร์ที่สำคัญอันหนึ่งของเลนส์คือค่า NA (Numerical Aperture) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$NA = n_0 \sin\left(\frac{\phi_{\max}}{2}\right) \quad (3.3)$$

เมื่อ n_0 คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศ

ϕ_{\max} คือ มุมที่มากที่สุดของแสงจากจุดโฟกัสของเลนส์

ดังแสดงในรูปที่ 3.29

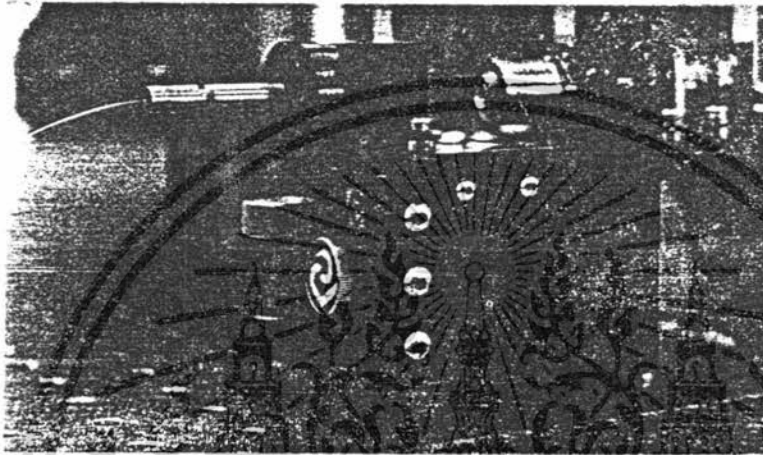


รูปที่ 3.29 แสดงลักษณะของเลนส์

NA เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเลือกใช้เลนส์กล่าวคือค่า NA ของเลนส์จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า NA ของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งจะทำให้แสงสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงได้เต็มที่ ซึ่งสำหรับในโครงการพิเศษนี้ค่า NA ของเลนส์ที่ใช้เท่ากับ 0.25 และค่า NA ของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากับ 0.16

3.6 Micro Block

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดเส้นใยแก้วนำแสงและเลนส์เพื่อให้สะดวกต่อการฉายแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง หลักการของ Micro Block ในส่วนที่เคลื่อนที่ได้ นั้น จะสามารถปรับการเคลื่อนที่ได้ทั้ง 3 แนวคือ แกน X,Y และ Z ดังรูปที่ 3.30 ซึ่งการปรับจะทำการปรับได้ทั้งแบบหยาบและละเอียด ทำให้แสงจากเลนส์สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงได้เต็มที่ โดยในโครงการพิเศษนี้ใช้ Micro Block ของ Photon Control



รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะของ Micro Block

3.7 สรุป

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้ สำหรับในบทต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของการทดลอง การศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนแสงของตัวอย่างชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง

สำหรับการทำโครงการพิเศษในขั้นตอนของการทำทดลองนั้น ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน กล่าวคือในขั้นตอนแรกจะเป็นการทดลองวิธี Ellipsometry ที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางของแสง ในขั้นตอนที่สองจะเป็นการทดลองวิธี Ellipsometry ที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางของแสง วัตถุประสงค์ที่ต้องแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนเพื่อต้องการเปรียบเทียบแสงสะท้อนที่เกิดจากการทดลองทั้ง 2 ขั้นตอน และศึกษาว่าการใช้เส้นใยแก้วนำแสงมีผลต่อวิธี Ellipsometry อย่างไร

สำหรับสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Ellipsometry นั้นได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับสารตัวอย่างไว้ในตารางที่ 4.1

Material	Type	Refractive index (n)	Absorption coefficient (n_k)
BK7	dielectrics	$1.516 \lambda = 588.9 \text{ nm}$	0
Acrylic Plate	dielectrics	$1.48\text{-}1.50 \lambda = 588.9 \text{ nm}$	0
Prism	dielectrics	$1.516 \lambda = 588.9 \text{ nm}$	0
Si	semiconductor	$3.86 \lambda = 632.8 \text{ nm}$	$0.32 \lambda = 632.8 \text{ nm}$
GaAs	semiconductor	$3.86 \lambda = 670.0 \text{ nm}$	$1.06 \lambda = 670.0 \text{ nm}$
Cu	metal	$0.62 \lambda = 588.9 \text{ nm}$	$2.57 \lambda = 588.9 \text{ nm}$

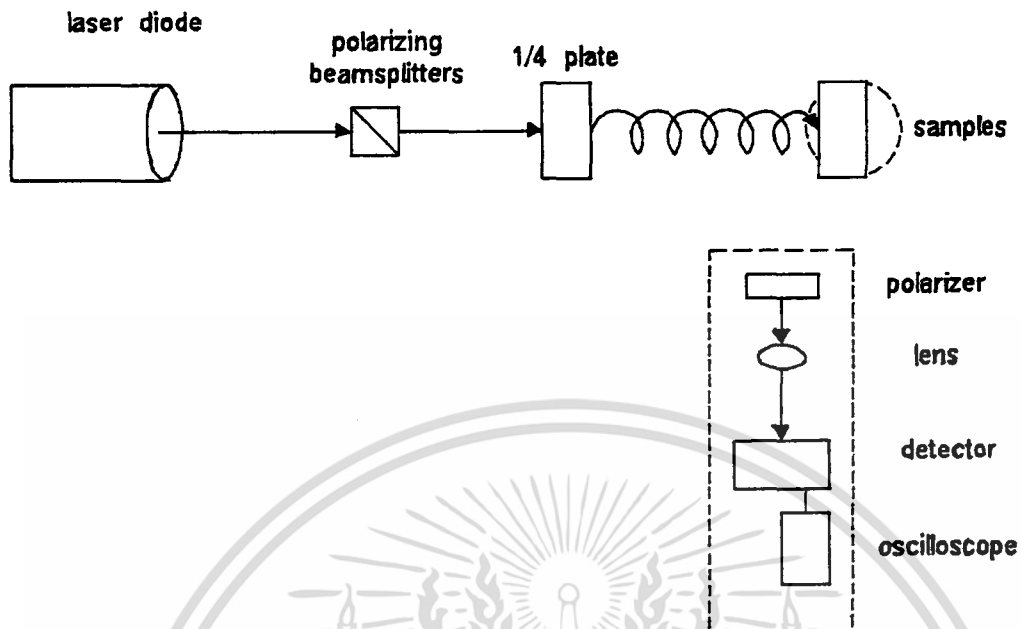
ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของสารที่นำมาทดสอบคุณสมบัติการสะท้อนของแสง

4.1 การวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนเชิงทฤษฎี

4.1.1 วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางของแสง

ในการทดลองซึ่งจะจัดอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 สามารถที่จะวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนได้โดยใช้วิธี Jones Matrix

พิจารณารูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นกรณีใช้อากาศเป็นตัวกลางของแสงสามารถที่จะวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนได้โดย



รูปที่ 4.1 แสดงการวัดวงอุปกรณมิติ Ellipsometry (Free Space)
แสงสะท้อน

$$\begin{aligned}
 E &= \begin{bmatrix} r_p e^{i\varphi_p} & 0 \\ 0 & r_s e^{i\varphi_s} \end{bmatrix} e^{-i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\pi/4} A \begin{bmatrix} r_p e^{i\varphi_p} \\ r_s e^{i\varphi_s} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

A คือ แอมพลิจูด

$$\begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} \text{ คือ Jones Matrix ของแสงตกกระทบ}$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ คือ Jones Matrix ของโพลาริเซอร์ที่มี TA ทำมุม } 45^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e^{-i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \quad \text{คือ Jones Matrix ของ QWP ที่มี FA ในแนวตั้งฉาก}$$

$$\begin{bmatrix} r_p e^{i\varphi_p} & 0 \\ 0 & r_s e^{i\varphi_s} \end{bmatrix} \quad \text{คือ Jones Matrix ของตัวอย่าง}$$

ในแนวขนานกับระนาบการตกกระทบ (plane of incidence)

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/4 A} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_p e^{i\varphi_p} \\ r_s e^{i\varphi_s} \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/4 A} \begin{bmatrix} r_p e^{i\varphi_p} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{คือ Jones Matrix ของโพลาไรเซอร์ที่มี TA อยู่ในแนวขนาน}$$

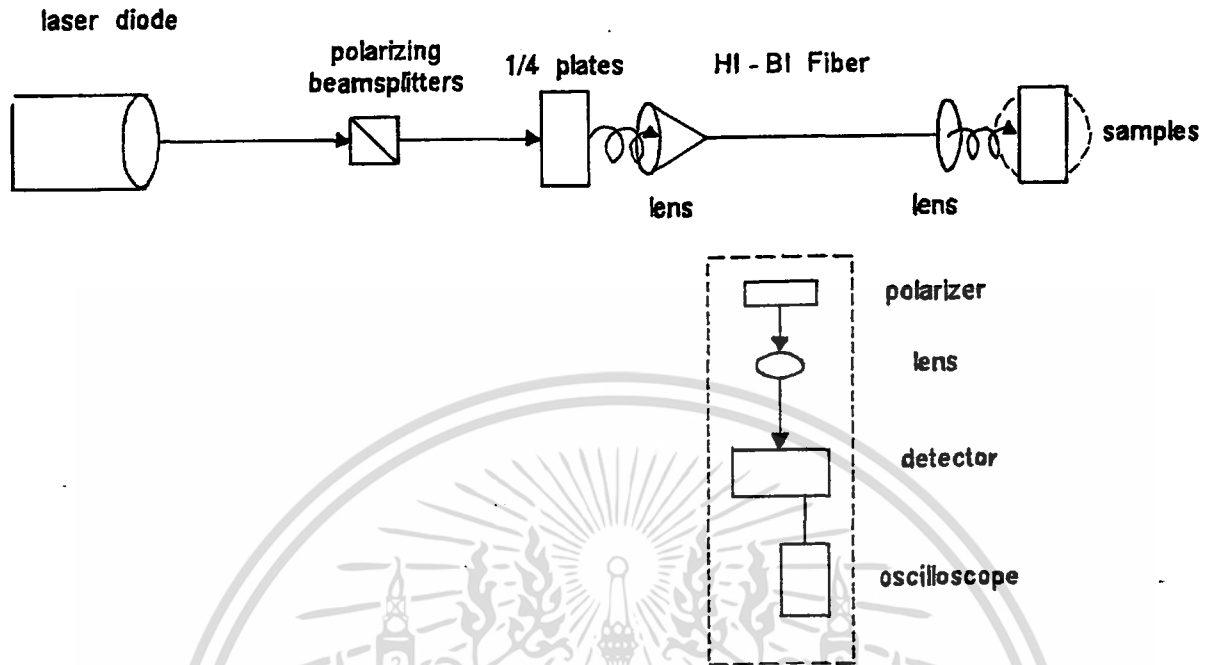
ในแนวตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบ (plane of incidence)

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/4 A} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_p e^{i\varphi_p} \\ r_s e^{i\varphi_s} \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/4 A} \begin{bmatrix} 0 \\ r_s e^{i\varphi_s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{คือ Jones Matrix ของโพลาไรเซอร์ที่มี TA อยู่ในแนวตั้งฉาก}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิธีวิเคราะห์โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางของแสง



รูปที่ 4.2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์วิธี Ellipsometry (Optical Fibers)

พิจารณารูปที่ 4.2 เป็นกรณีที่ให้แสงตกกระทบเค้นทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งสามารถที่จะวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนได้โดยแสงสะท้อน

$$E = \begin{bmatrix} r_p e^{i\varphi_p} & 0 \\ 0 & r_s e^{i\varphi_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\varphi_s} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_f} \end{bmatrix} e^{-i\pi/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\pi/4} A \begin{bmatrix} r_p e^{i(\varphi_p + \varphi_s)} \\ r_s e^{i(\varphi_s + \varphi_f)} \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} e^{i\varphi_s} & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_f} \end{bmatrix}$ คือ Jones Matrix ของเส้นใยแก้วนำแสง

ในแนวขนานกับระนาบการตกกระทบ (plane of incidence)

$$\begin{aligned}
 E_p &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/4} A \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_p e^{i(\varphi_p + \varphi_s)} \\ \Gamma_s e^{i(\varphi_s + \varphi_f)} \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/4} A \begin{bmatrix} \Gamma_p e^{i(\varphi_p + \varphi_s)} \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

ในแนวตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบ (plane of incidence)

$$\begin{aligned}
 E_s &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/4} A \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_p e^{i(\varphi_p + \varphi_s)} \\ \Gamma_s e^{i(\varphi_s + \varphi_f)} \end{bmatrix} \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{2} e^{i\pi/4} A \begin{bmatrix} 0 \\ \Gamma_s e^{i(\varphi_s + \varphi_f)} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

กล่าวสรุปได้ว่าหลังจากแสดงการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในกรณีการใช้ Optical fiber เป็นตัวกลางของแสงแล้ว จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนในเชิงทฤษฎีแล้ววิธีการทั้งสองให้ผลออกมาเหมือนกันเมื่อมองในเทอมของ intensity ของแสง และในตอนต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการเปรียบเทียบวิธีการทั้งสองในเชิงปฏิบัติ

4.2 ตัวอย่างสารที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ใช้ตัวอย่างในการทดสอบทั้ง 3 ประเภทคือ

1. สารประเภทไดอิเล็กตริก ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ BK7 และ Acrylic Plate เป็นตัวอย่างในการทดสอบ
2. สารประเภทสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ GaAs และ Si เป็นตัวอย่างในการทดสอบ
3. สารประเภทโลหะ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ทองแดงเป็นตัวอย่างในการทดสอบ

4.3 ขั้นตอนการทดลอง

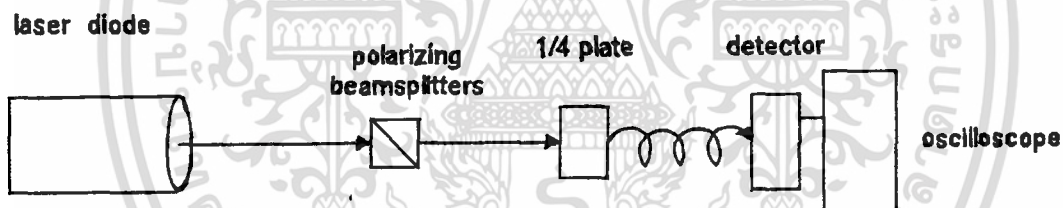
ในส่วนนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการทดลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์สถานะโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนทั้งสองวิธี โดยในตอนที่ 1 จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมแสงโพลาไรซ์ที่ทราบสถานะซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม เพราะเป็นสถานะทางโพลาไรซ์ของแสงเพียงสถานะเดียวที่ไม่ทำให้เกิดผลแตกต่างของแสงตกกระทบ ไม่ว่าตัวกลางจะเป็นอากาศหรือเส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาภาวะโพลาไรเซชัน

ในตอนที่ 2 และ 3 ก็จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำการวิเคราะห์โดยใช้อากาศและเส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางตามลำดับ และตอนที่ 4 จะอธิบายถึงการประมวลผล

ตอนที่ 1 การสร้างแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม

1.1 จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.3 จากนั้นหมุน Polarizer หามุมที่ให้ค่า voltage สูงสุด เพื่อให้ทราบถึงแนวแกนโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์

1.2 นำ Quarter Waveplate มาวางที่ตำแหน่งระหว่าง Polarization Beam splitter Cubes และ Polarizer แล้วปรับให้แกน FA ของ Quarter Waveplate ทำมุม 45° กับมุมของ Polarizer ในข้อที่ 1.1

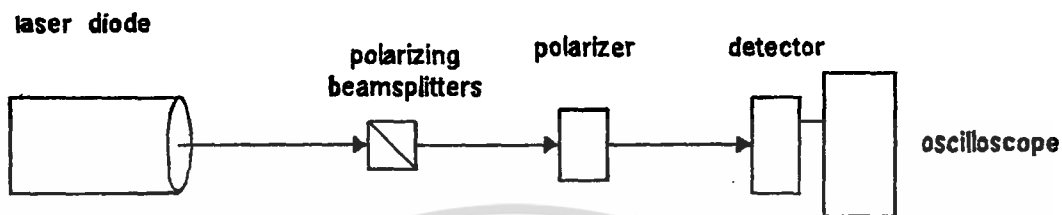


รูปที่ 4.3 แสดงวิธีการสร้างแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม

1.3 เพื่อเป็นการทดสอบแสงที่ผ่านออกมาจาก Quarter Waveplate ว่าเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมหรือไม่ ทำโดยการหมุน Polarizer ไปที่มุมต่าง ๆ สังเกตว่าถ้าเป็นแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์เชิงวงกลม Voltage จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ตอนที่ 2 วิธี Ellipsometry กรณีของ Free Space

2.1 จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.4 โดยที่แสงที่ผ่านออกมาจาก Quarter Waveplate ต้องปรับให้เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม (ตอนที่ 1) แล้วบันทึกค่าความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาจาก Quarter Waveplate (I_0) แล้วจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.4 แสดงวิธีการวัดความเข้มของแสง

2.2 ปรับ sample ให้ทำมุม 2° (มุมตกกระทบ = 2°) กับแนวแกนของแสงเลเซอร์ (แสงตกกระทบ) เลื่อนตำแหน่งของชุดวัดความเข้มของแสงสะท้อน (ประกอบด้วย Polarizer, Lens, Photometer) เพื่อวัดค่าความเข้มของแสงสะท้อน ปรับให้ Polarizer ทำมุม 90° กับระนาบตกกระทบ บันทึกค่าความเข้มของแสง (I_0) ปรับให้ Polarizer ทำมุม 0° กับระนาบตกกระทบ บันทึกค่าความเข้มแสง (I_p)

2.3 ทำซ้ำข้อ 2.2 แต่เพิ่มมุมขึ้นทีละ 2° จนถึง 90°

2.4 เปลี่ยน sample ที่วิเคราะห์ แล้วทำซ้ำข้อ 2.2 และ 2.3

ตอนที่ 3 วิธี Ellipsometry ในกรณีของ Optical Fibers

3.1 จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.2 ทำซ้ำข้อ 2.2 ถึง 2.4

หมายเหตุ ค่า I_0 ใช้ค่าเดียวกันกับกรณีของตอนที่ 2

ตอนที่ 4 การประมวลผล

สำหรับการประมวลผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยวิธี Ellipsometry ในตอนที่ 2 และตอนที่ 3 จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลและสร้างกราฟ ซึ่งกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสะท้อน และ มุมตกกระทบ

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง ส่วนของการทำการทดลอง ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

1. กรณีของการใช้อากาศเป็นตัวกลาง
2. กรณีของการใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง

และขั้นตอนของการทำการทดลองมีด้วยกัน 4 ขั้นตอน สำหรับผลการทดลองและ

การวิเคราะห์การทดลองจะกล่าวถึงในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

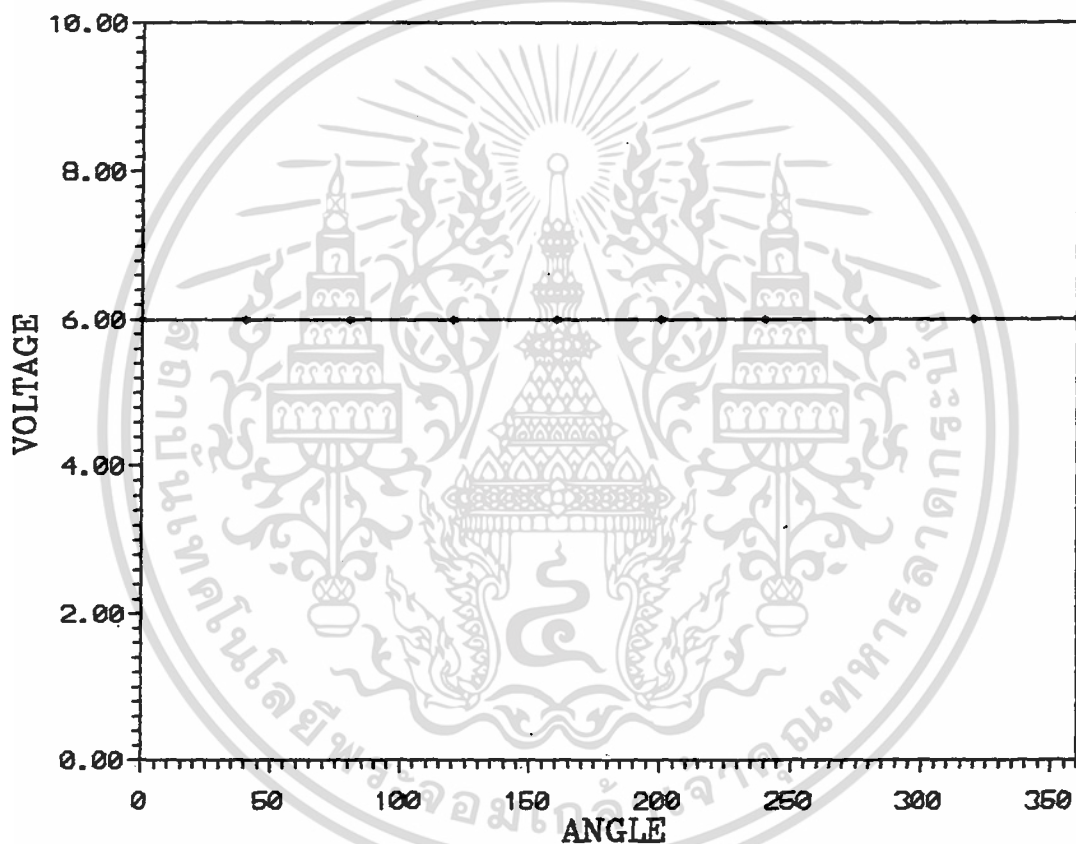
บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์

สำหรับบทนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน กล่าวคือ ในส่วนแรกจะกล่าวถึง ผลที่ได้จากการทดลอง และในส่วนที่สอง จะกล่าวถึงวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลการทดลอง

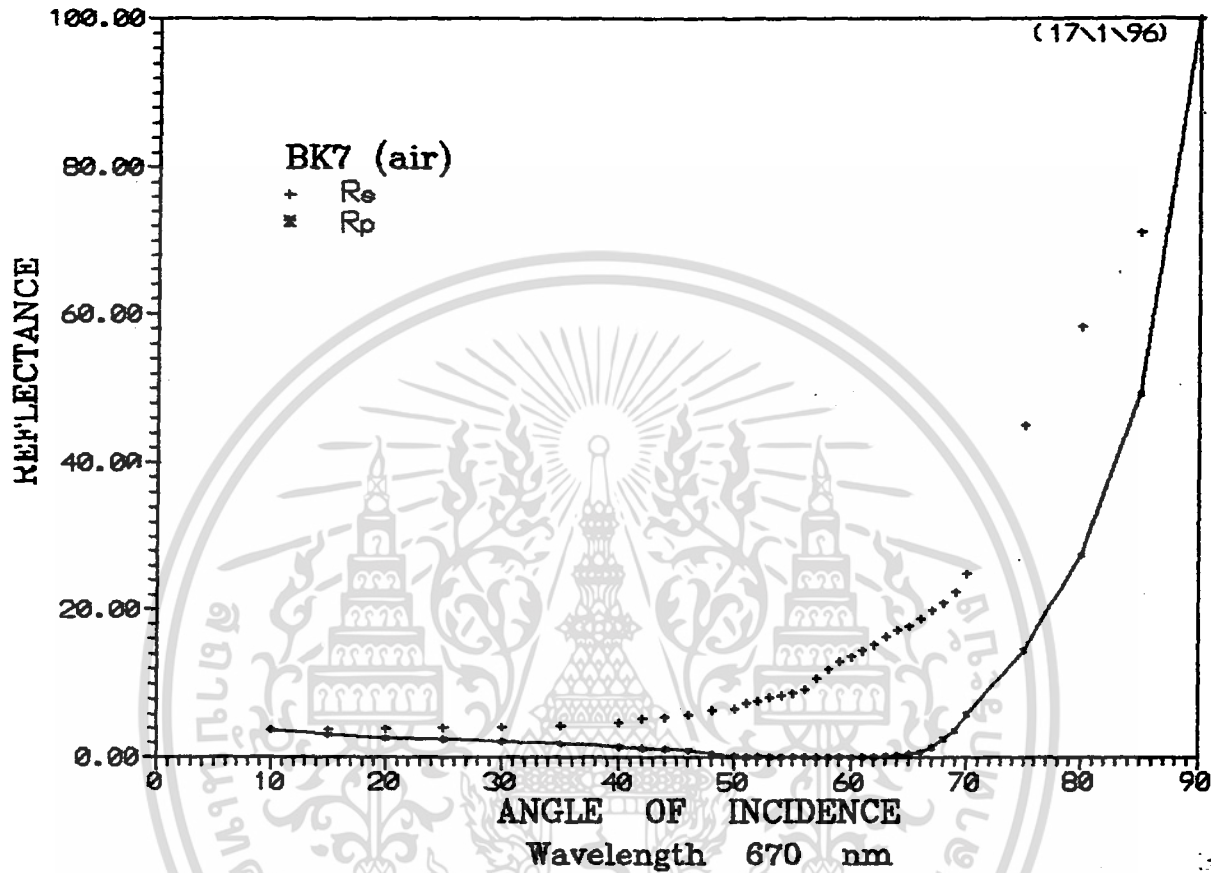
ตอนที่ 1 การสร้างแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม



กราฟที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลมที่ผ่านโพลาไรเซอร์ กับ แนวแกนโพลาไรซ์

ตอนที่ 2 วิธี Ellipsometry กรณีใช้ อากาศเป็นตัวกลาง

BK7



กราฟที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อน กับ มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ BK7 ที่ความยาวคลื่น 670 nm

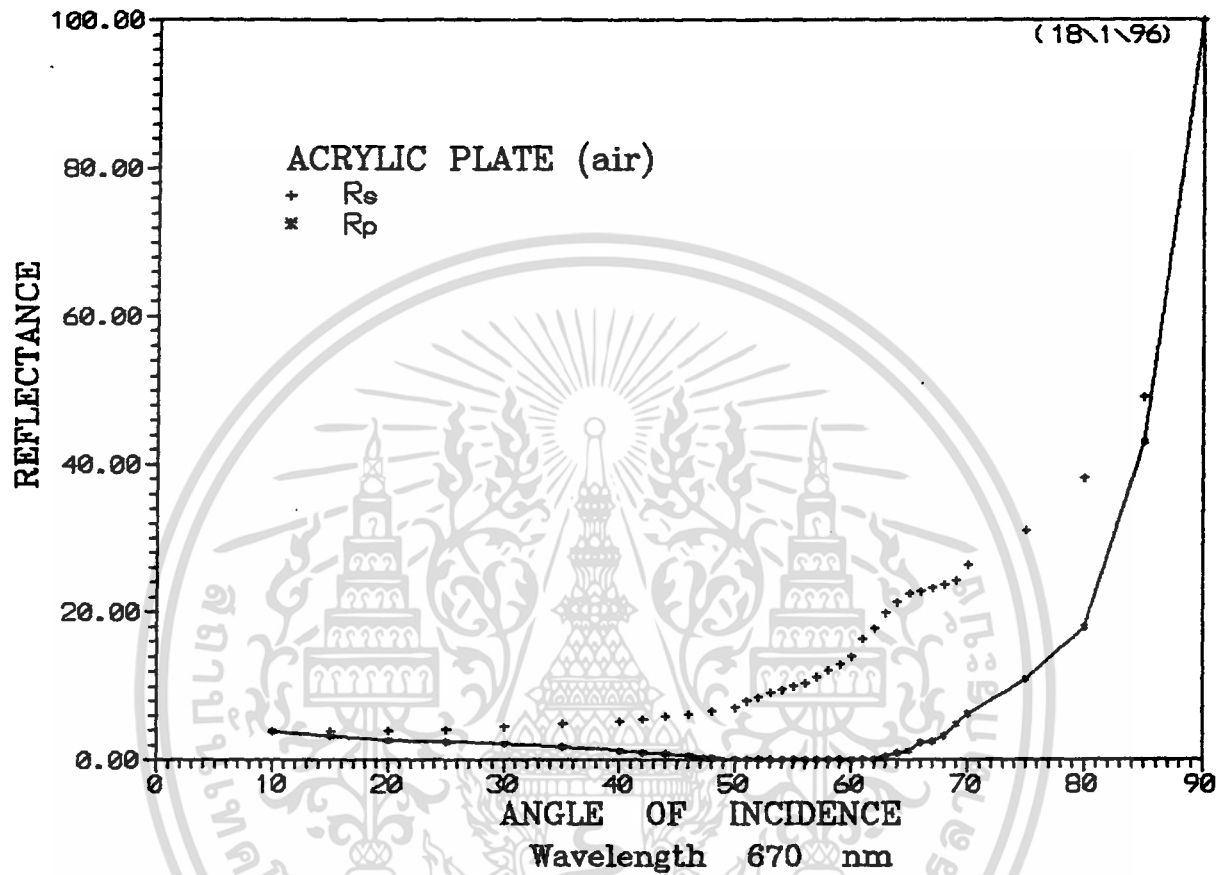
เมื่อ θ คือ มุมบริวสเตอร์

$$n = \tan \theta$$

$$= \tan 56$$

$$= 1.48$$

Acrylic Plate

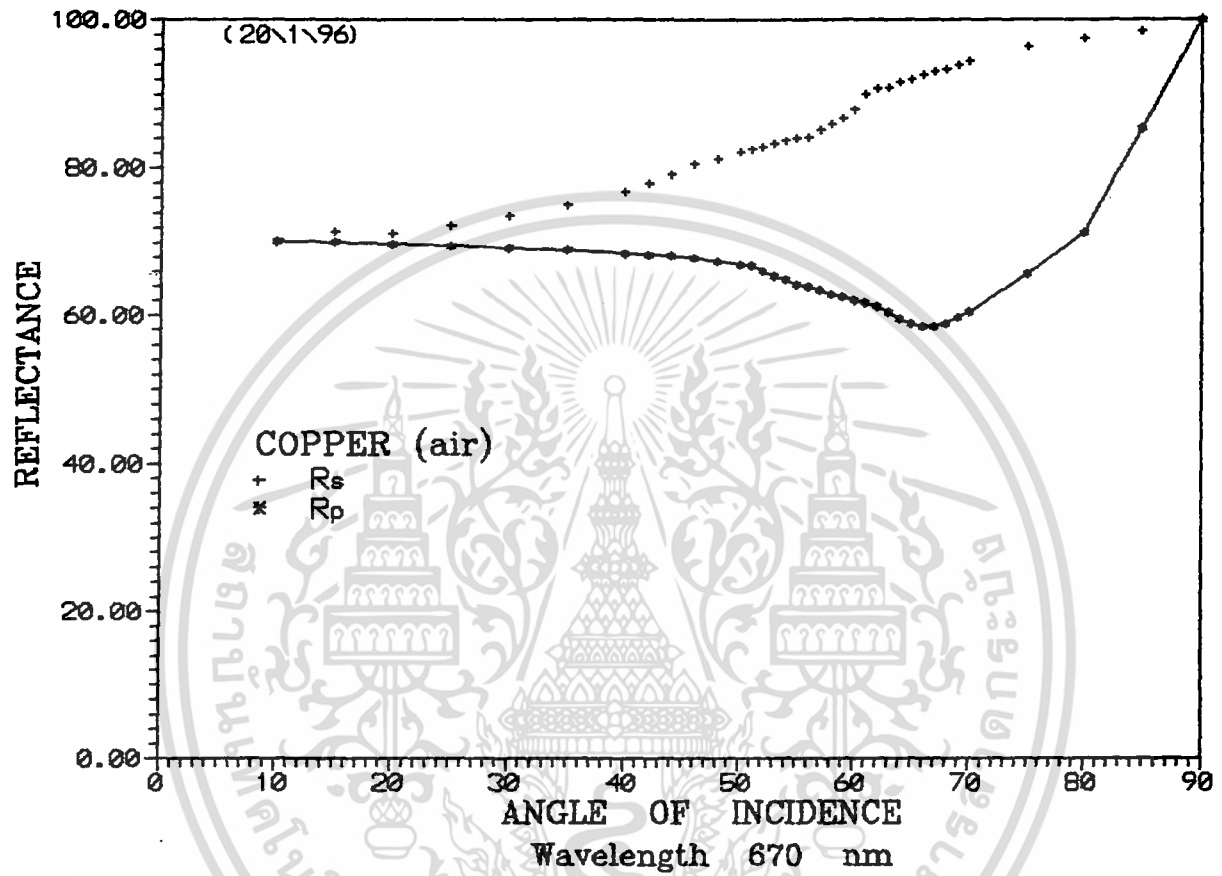


กราฟที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อน กับ มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Acrylic Plate ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เมื่อ θ คือ มุมบรีวสเตอร์

$$\begin{aligned} n &= \tan \theta \\ &= \tan 55.5 \\ &= 1.45 \end{aligned}$$

Copper

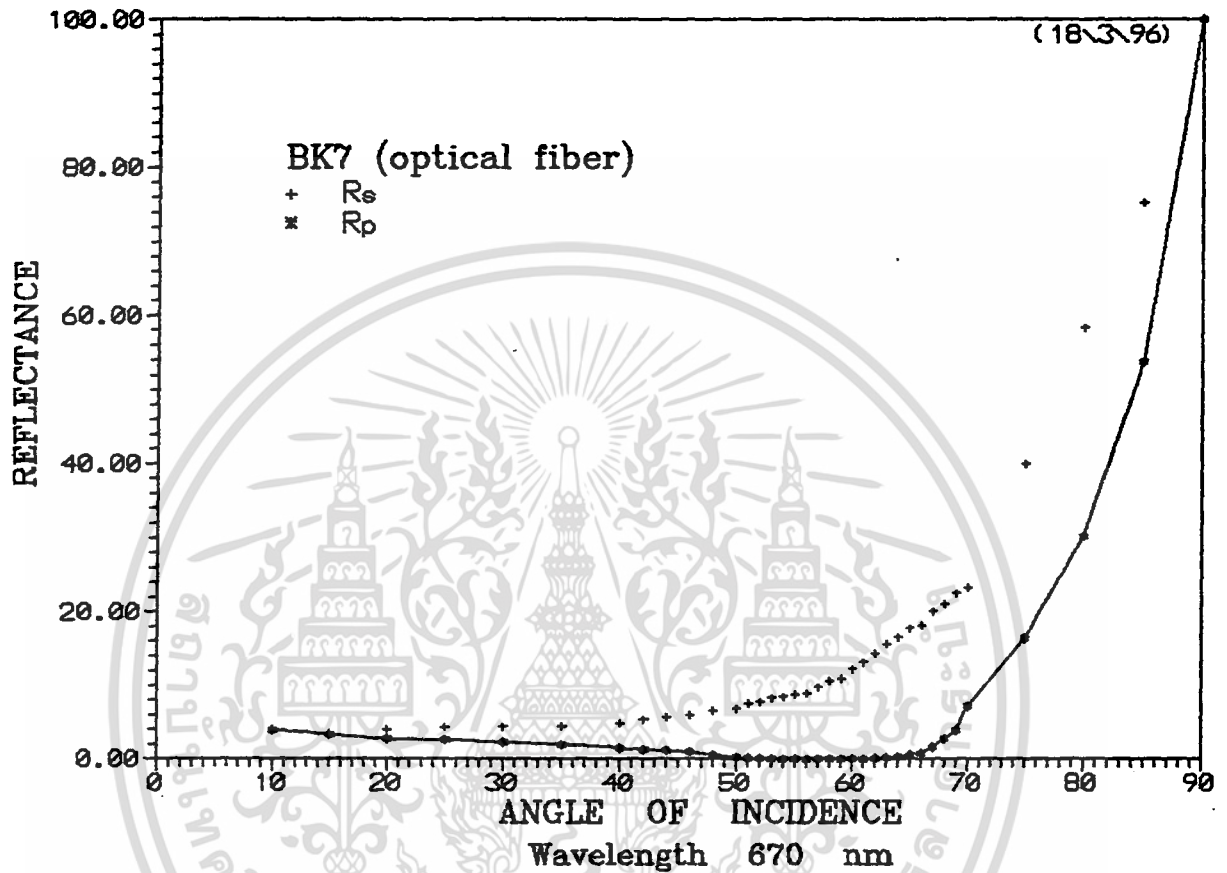


กราฟที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อน กับ มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Copper ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 วิธี Ellipsometry กรณีใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง

BK7



กราฟที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อน กับ มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ BK7 ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เมื่อ θ คือ มุมบรีวสเตอร์

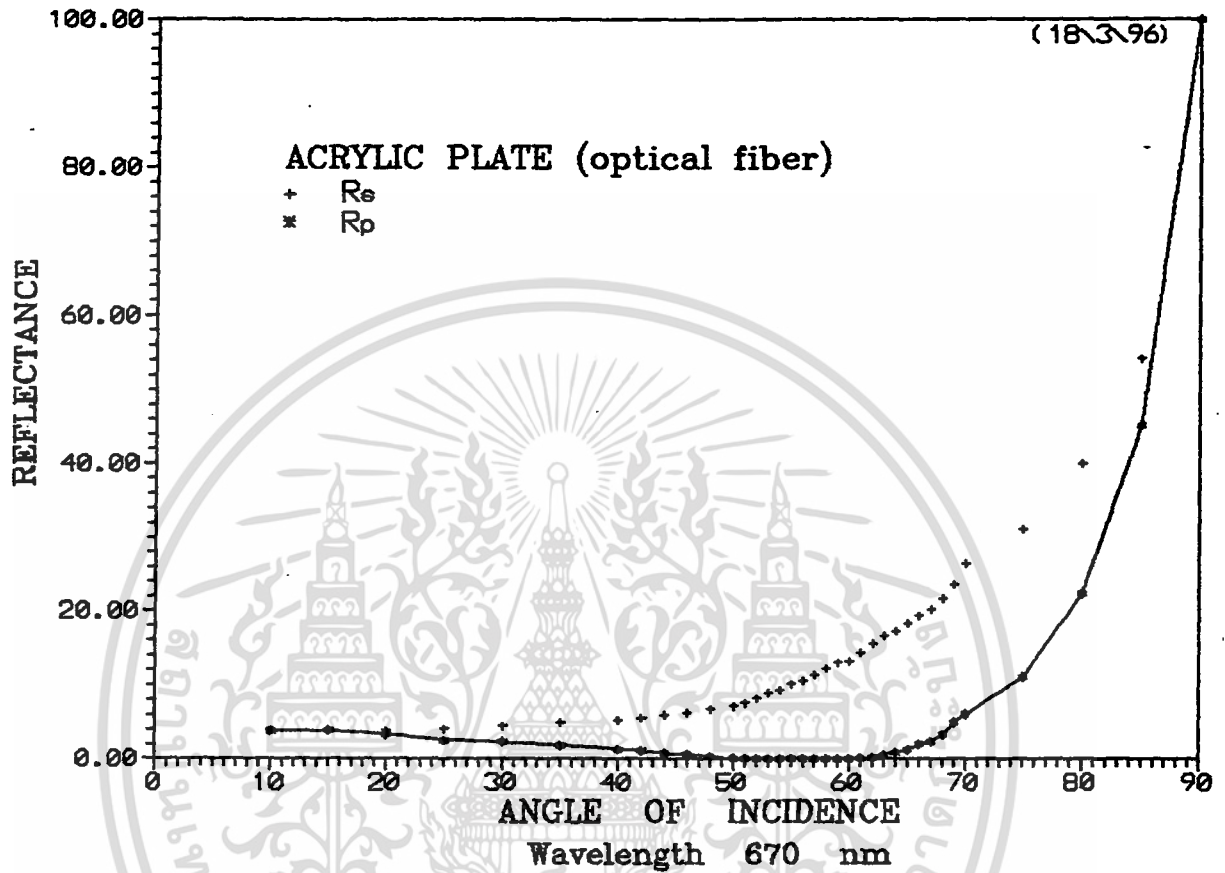
$$n = \tan \theta$$

$$= \tan 56.5$$

$$= 1.51$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acrylic Plate



กราฟที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อน กับ มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Acrylic Plate ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เมื่อ θ คือ มุมบรีวสเตอร์

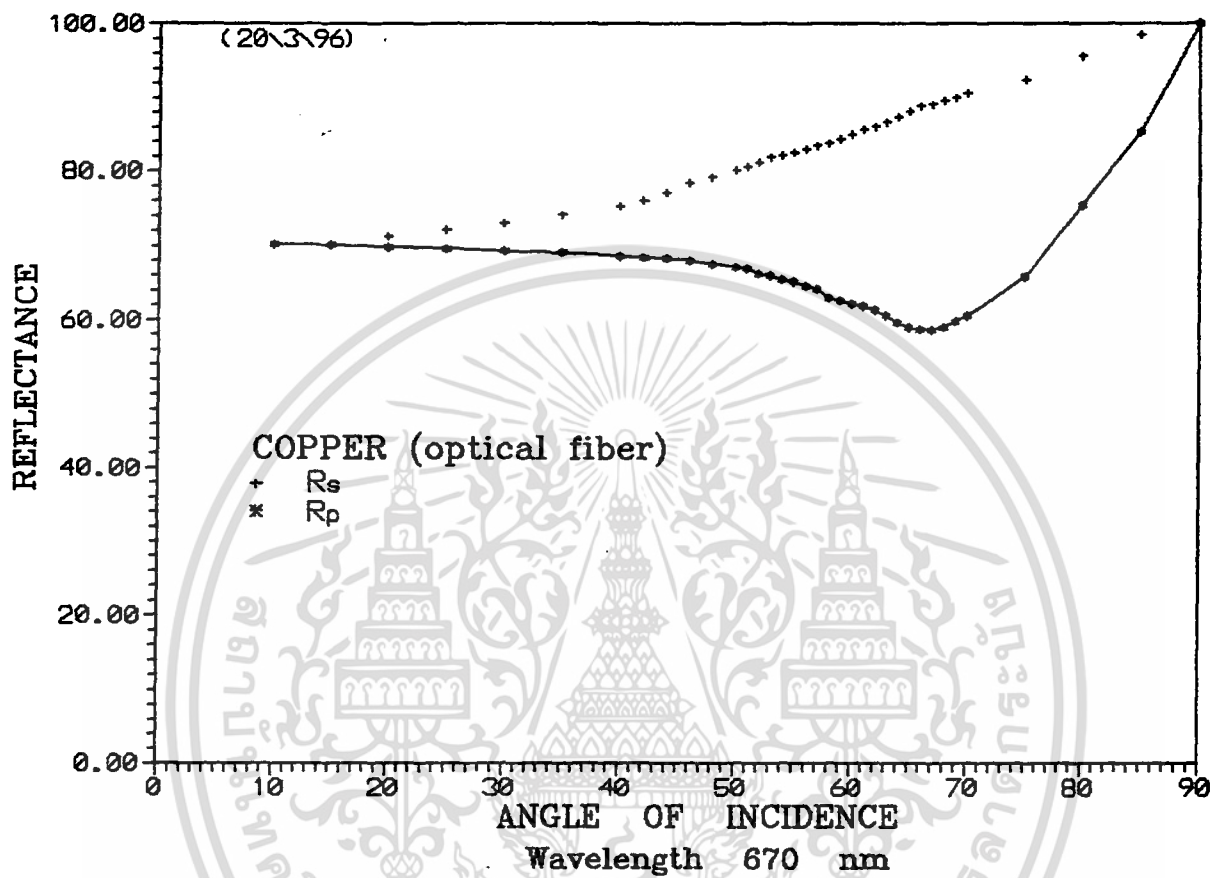
$$n = \tan \theta$$

$$= \tan 55$$

$$= 1.42$$

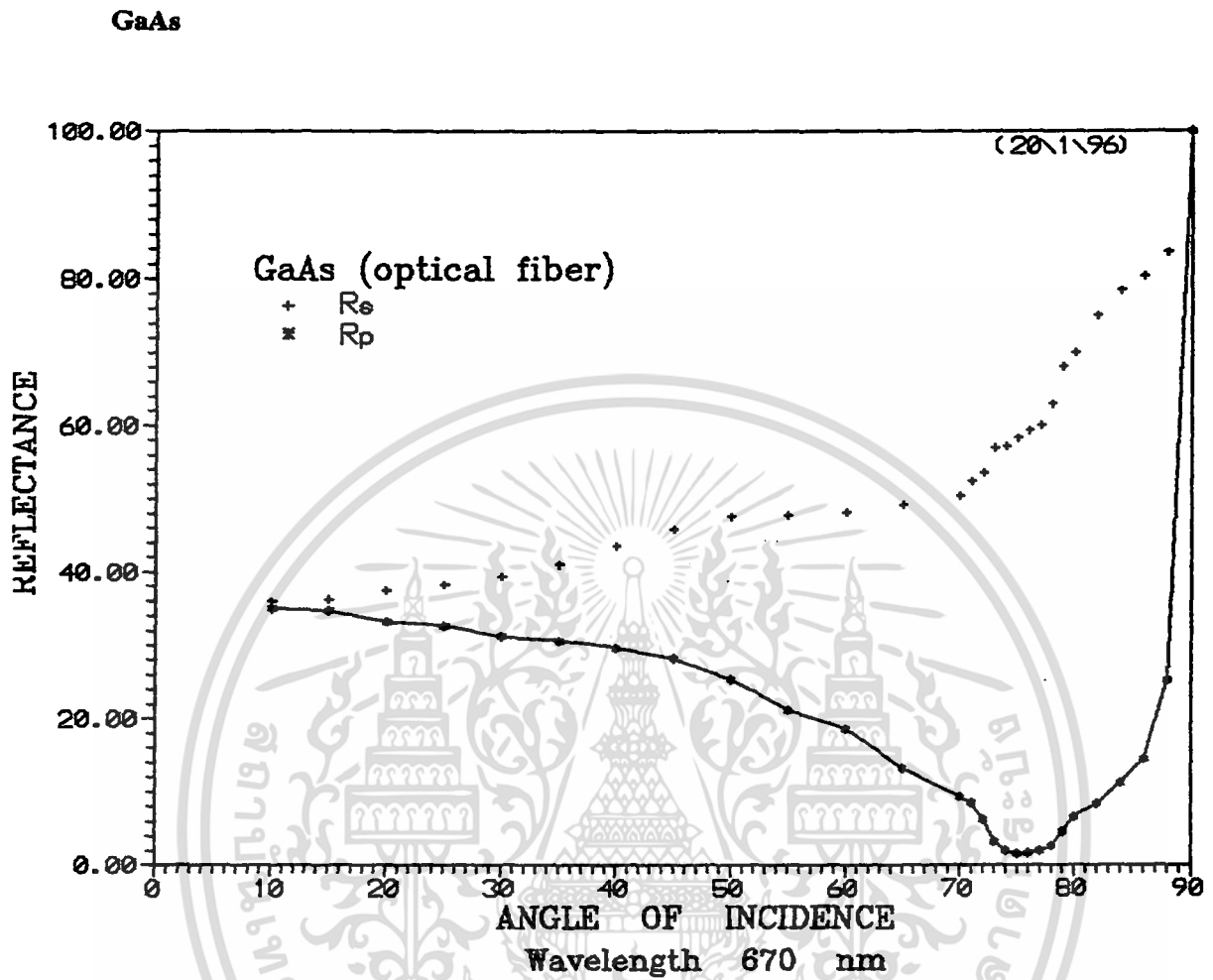
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copper



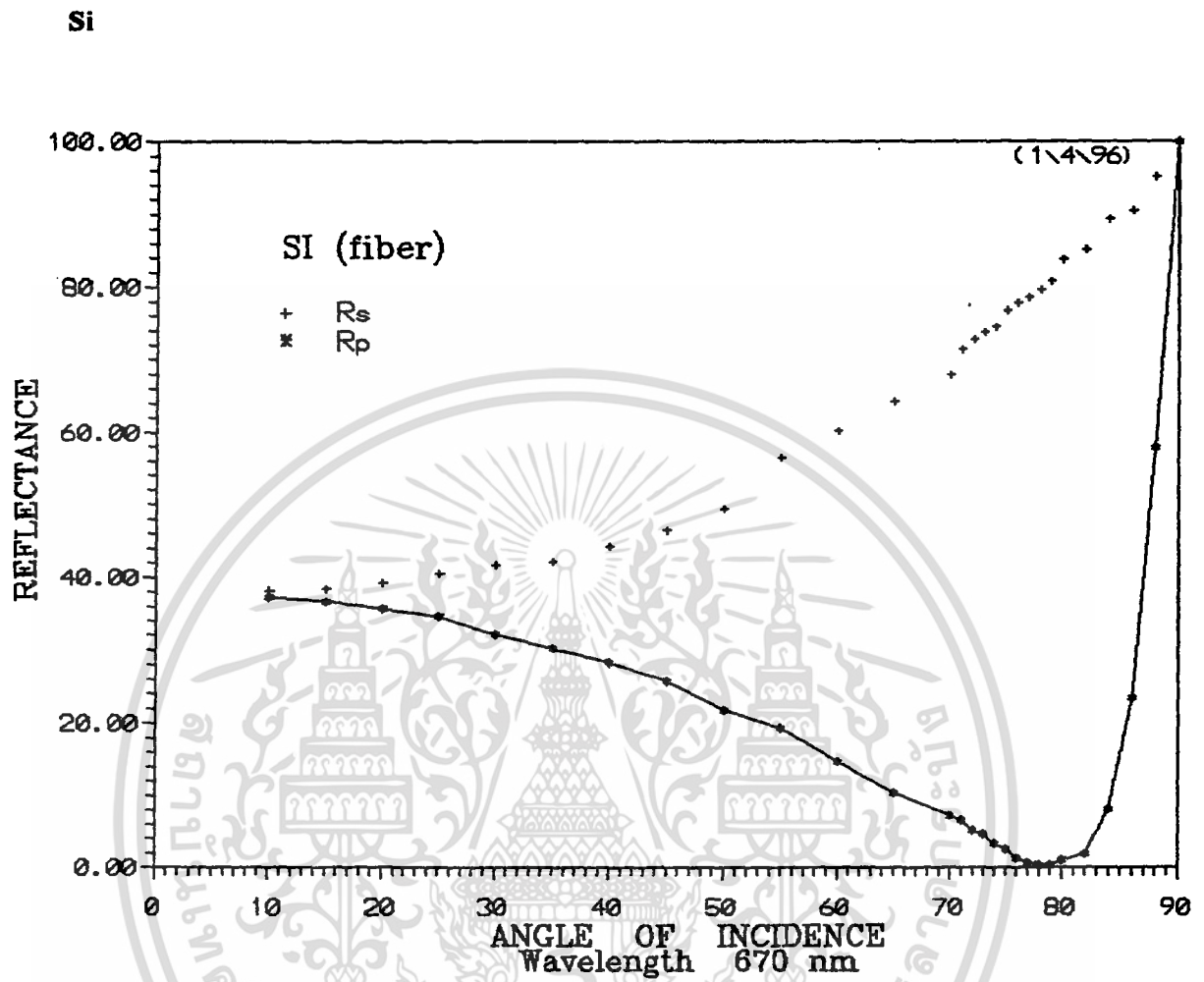
กราฟที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อน กับ มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Copper ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



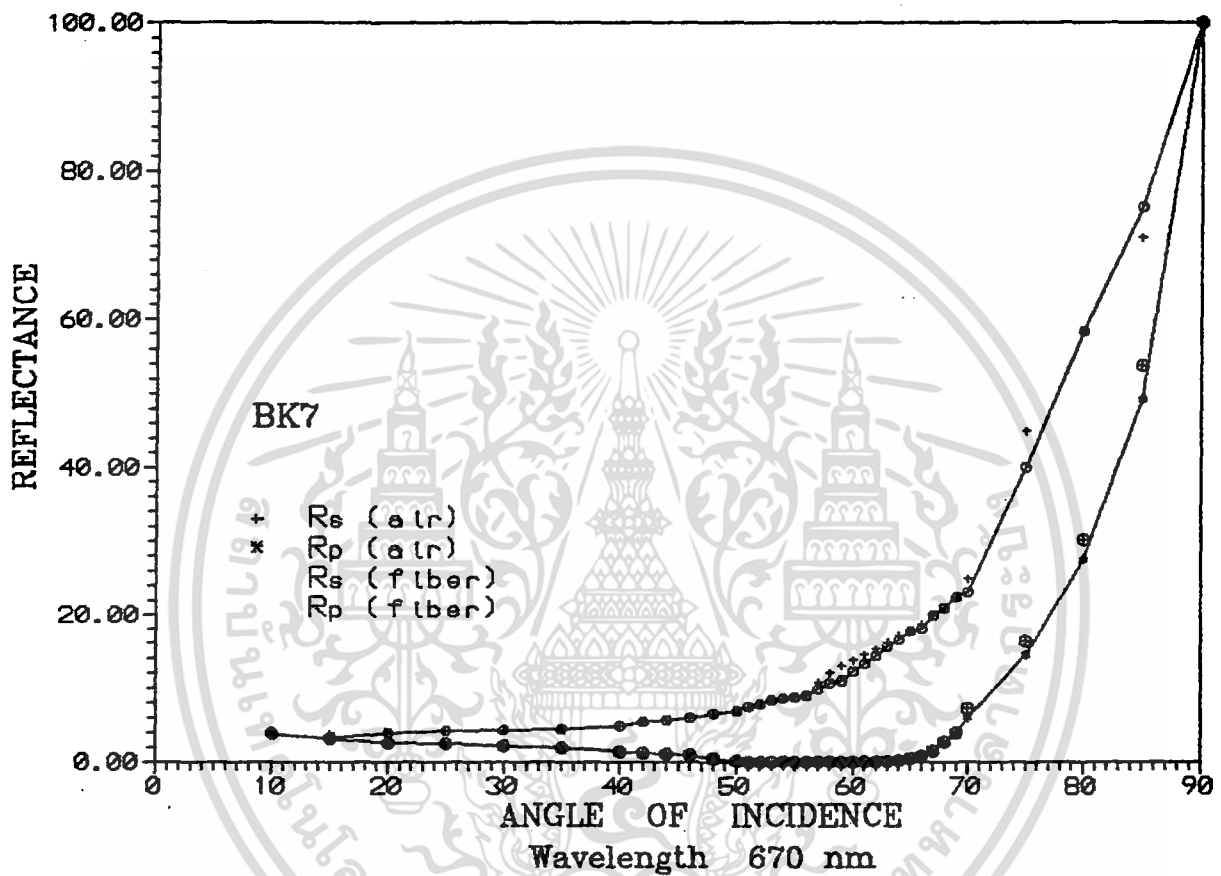
กราฟที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อน กับ มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ GaAs ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



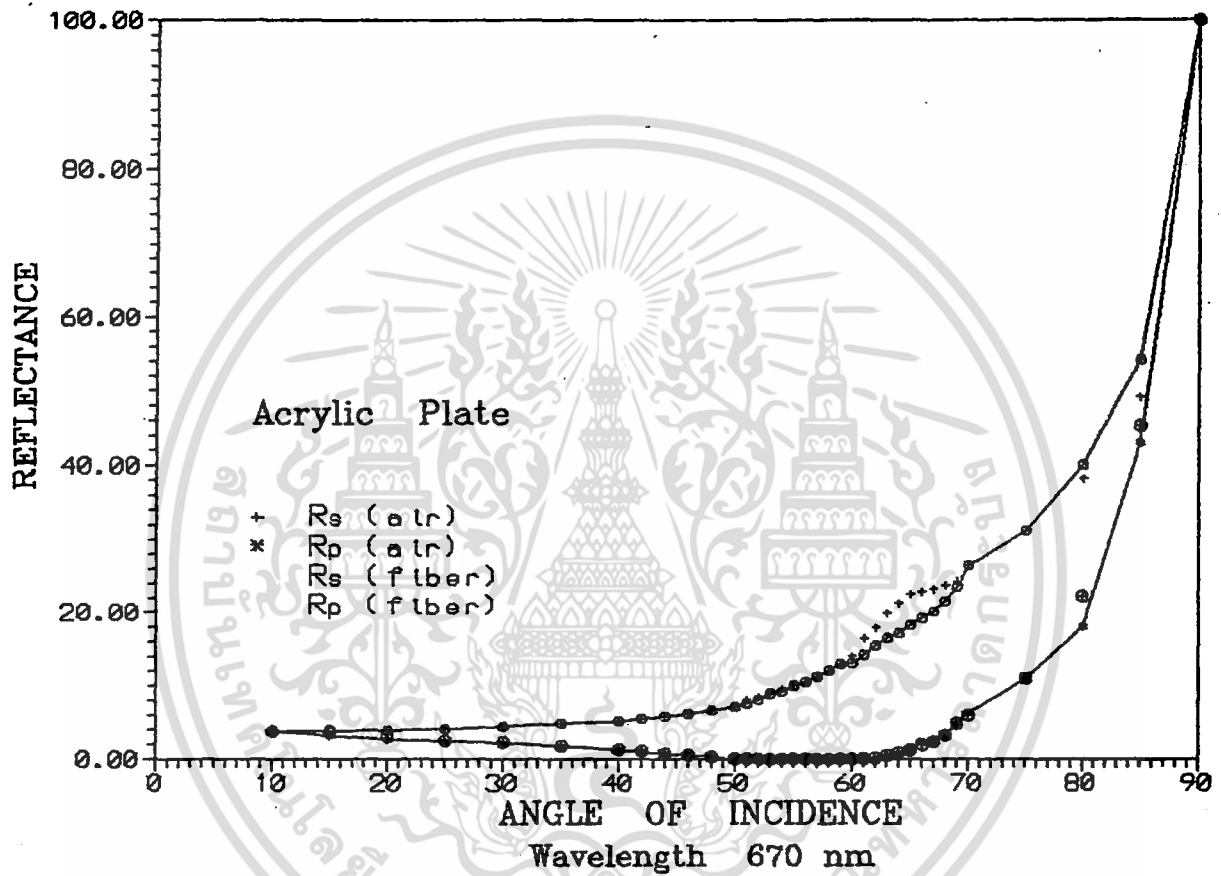
กราฟที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อน กับ มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Si ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



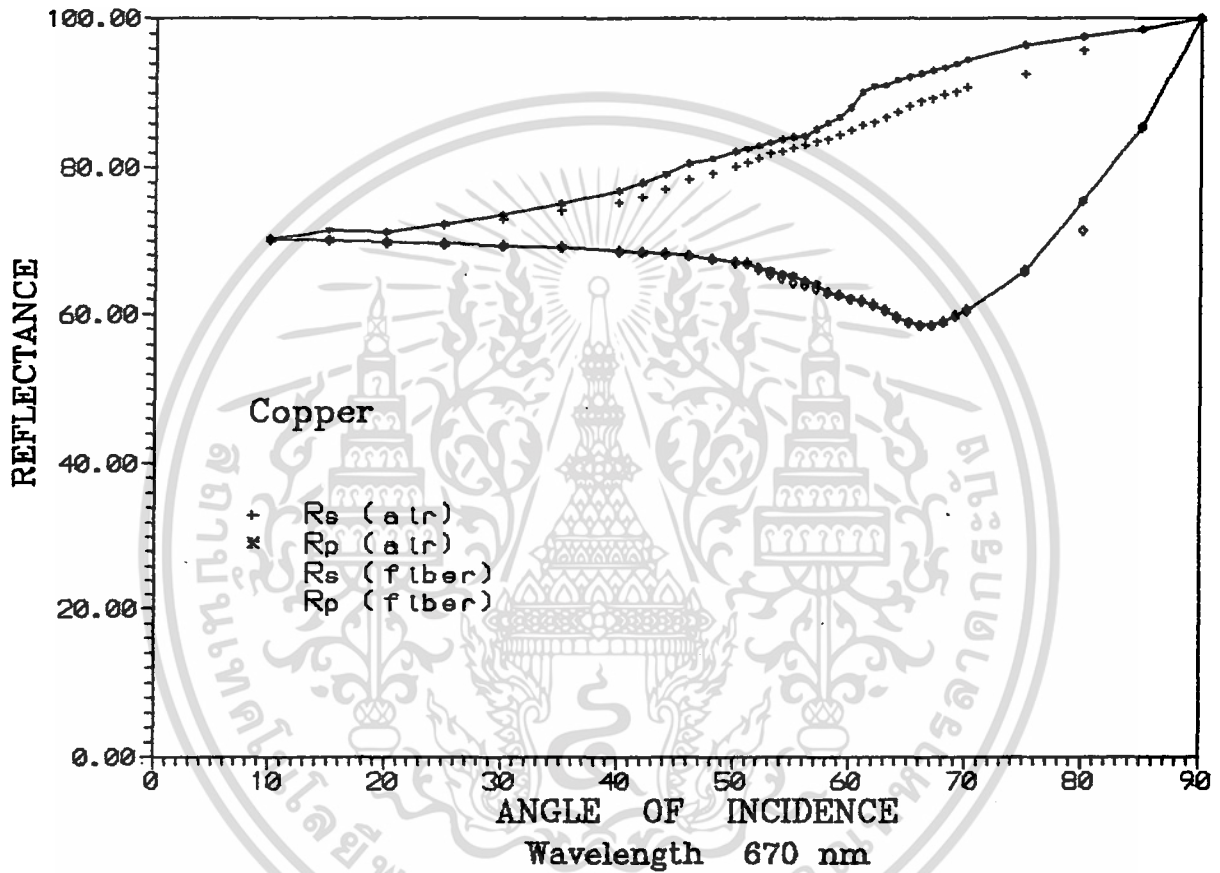
กราฟที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางเป็นอากาศ กับ ตัวกลางเป็น เส้นใยแก้วนำแสงของ BK7 ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางเป็นอากาศ กับ ตัวกลางเป็น เส้นใยนำแสงของ Acrylic Plate ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางเป็นอากาศ กับ ตัวกลางเป็น เส้นใยแก้วนำแสงของ Copper ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 บทวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

ตอนที่ 1

เป็นส่วนของการทดลองที่ทำการสร้างแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์เชิงวงกลม ซึ่งจะทำการทดสอบแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์เชิงวงกลม ได้โดยการนำโพลาไรเซอร์มาทำหน้าที่วิเคราะห์แสง จากกราฟผลทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าสนามไฟฟ้าของแสงที่ผ่านออกมาจากโพลาไรเซอร์จะมีขนาดเท่ากันในทุก ๆ แนวแกนโพลาไรซ์ของคผลาไรเซอร์ จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าในแนวองค์ประกอบของแสงที่มีสถานะโพลาไรซ์เชิงวงกลมจะมีขนาดที่เท่ากัน เมื่อนำโพลาไรเซอร์มาวิเคราะห์และทำการปรับแนวแกนโพลาไรซ์ไปที่มุมต่าง ๆ ค่าของสนามไฟฟ้าของแสงที่ผ่านโพลาไรเซอร์จึงมีค่าที่เท่ากันในทุก ๆ มุม

ตอนที่ 2

เป็นการทดลองวิธี Ellipsometry โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางของแสง ซึ่งสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ สารประเภทไดอิเล็กตริกเช่น BK7, Acrylic Plate สารประเภทสารกึ่งตัวนำเช่น GaAs, Si และสารประเภทโลหะเช่น Copper จากกราฟการทดลองจะเห็นได้ว่าแสงที่สะท้อนออกมาจากสารทั้ง 3 ประเภทจะมีค่าความสะท้อนในแนวขนานกับระนาบการตกกระทบ (R_p) และค่าความสะท้อนในแนวตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (R_s) ที่แตกต่างกัน มุมที่ R_p มีค่าต่ำสุดจะเรียกว่า มุมบริวสเตอร์ (Brewster Angle) ซึ่งเป็นไปตามกฎการสะท้อนของเฟรเนล และจากการทดลองจะได้ว่า BK7 มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.48 และ Acrylic Plate มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.45 เมื่อพิจารณากราฟความสะท้อนของสารทั้ง 3 ประเภทจะวิเคราะห์ได้ว่าสามารถแบ่งประเภทของสารได้โดยใช้กราฟของความสะท้อน กล่าวคือค่าความสะท้อนทั้งในกรณีของ R_p และ R_s ของสารประเภท ไดอิเล็กตริกจะมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสารอีก 2 ประเภท ค่าความสะท้อนทั้ง 2 กรณีของสารประเภทสารกึ่งตัวนำจะมีค่าอยู่ระหว่างค่าความสะท้อนของสารประเภท ไดอิเล็กตริกกับค่าความสะท้อนของสารประเภท โลหะ ในส่วนของโลหะจะมีค่าความสะท้อนทั้ง 2 กรณีสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 ประเภท ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อค่าความสะท้อนของแสงของสารทั้ง 3 ประเภทคือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสาร k (absorption coefficient)

จากกราฟการทดลองในช่วงระหว่างมุม 0 องศาถึง 10 องศาจะไม่ได้วัดค่าความสะท้อนซึ่งมีสาเหตุจากความขัดข้องเนื่องจากชุดอุปกรณ์การทดลอง

ตอนที่ 3

เป็นการทดลองวิธี Ellipsometry โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง จากกราฟการทดลองจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันกับกรณีการใช้อากาศเป็นตัวกลาง จึงสามารถที่จะวิเคราะห์ได้ว่า การนำเส้นใยแก้วนำแสงที่มีคุณสมบัติอนุกรมสถานะโพลาริซมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของสาร จะไม่มีผลต่อการทดลองที่ได้ แต่เมื่อพิจารณากราฟที่เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองในกรณีของการใช้อากาศเป็นตัวกลาง และการใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง จะเห็นว่ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นคือ ในบางมุมตกกระทบค่าความสะท้อนจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งมีสาเหตุจากการวัดแสงสะท้อนไม่แน่นอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุปและแนวการพัฒนา

6.1 บทสรุป

จากความต้องการที่จะวัดค่าคุณสมบัติทางแสงของสาร เช่น ค่าดัชนีหักเหของสาร, ค่าความสะท้อนของสาร โดยที่ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงาน จึงได้มีการนำวิธี Ellipsometry มาใช้งานซึ่งในโครงการพิเศษได้ทำการศึกษาวิธี Ellipsometry โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางของแสง และการประยุกต์วิธี Ellipsometry โดยนำเส้นใยแก้วนำแสงที่มีคุณสมบัติอนุกรมสถานะโพลาไรซ์มาทำหน้าที่เป็นตัวกลางแสง ซึ่งการประยุกต์วิธี Ellipsometry จะทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยวิธี Ellipsometry จะต้องอาศัยพื้นฐานทางทัศนศาสตร์ กล่าวคือต้องมีความเข้าใจในเรื่องของ

- 1) สถานะโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์ที่นำมาใช้งาน
- 2) หลักการในการสร้างแสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม
- 3) หลักการ การสะท้อนที่ผิวของสารประเภทไดอิเล็กตริก, สารประเภทสารกึ่งตัวนำและสารประเภทโลหะ

ในกรณีที่ประยุกต์วิธี Ellipsometry โดยการนำเส้นใยแก้วนำแสงมาเป็นตัวกลางแสง จะต้องมีความเข้าใจในหลักการของเส้นใยแก้วนำแสงที่นำมาใช้ และในการที่จะทำให้การศึกษามีความสมบูรณ์จะต้องมีการเลือกอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน และการจัดเรียงให้เหมาะสม

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าสามารถแบ่งแยกประเภทของสารได้โดยใช้วิธี Ellipsometry และในสารประเภท ไดอิเล็กตริกสามารถหาค่าดัชนีหักเหได้ ในส่วนของการนำเส้นใยแก้วนำแสงมาประยุกต์ในวิธี Ellipsometry ผลการทดลองไม่แตกต่างจากกรณีการใช้อากาศเป็นตัวกลาง

6.2 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารตัวอย่างด้วยวิธีการ Ellipsometry สามารถที่จะพัฒนาให้นำไปใช้งานในด้านการวัดได้อย่างกว้างขวางยิ่งขึ้น ซึ่งในการพัฒนานั้นจะต้องพยายามลดวิธีการปรับอุปกรณ์โดยใช้มือเป็นตัวปรับ และจะใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลข้อมูลที่วัดได้ เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

ในการลดการปรับอุปกรณ์ด้วยมือนั้น อาจจะทำ stepping motor มาประยุกต์ใช้งานแทน ซึ่งอาจนำมาใช้ในส่วนของการหมุนฐานรองสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์, การหมุนของโพลาริเซอร์ และการหมุน detector เพื่อรับแสงสะท้อน เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาจะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับการประมวลผลอาจจะเชื่อมต่อ detector เข้ากับคอมพิวเตอร์โดยผ่านการ์ด A/D เพื่อทำการเปลี่ยนค่า voltage ที่วัดได้ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อความสะดวกต่อการประมวลผลของคอมพิวเตอร์



เอกสารอ้างอิง

1. Frank L. Pedrotti, S.J. and Leno S. Pedrotti in Introduction to Optics, 2nd ed., pp. 280-295, Prentice-Hall International Editions
2. Sybil P. Parker in Optics Source Book, pp. 261-267, McGraw Hill
3. Pasco Scientific. Advanced Optics System (Instruction Manual and Experiment Guide for the Pasco Scientific Model)
4. Newport, Scientific and Laboratory Products (Product Catalog)
5. สุวรรณ คุณสำราญ, ทัศนศาสตร์กายภาพ, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 155-163, 261-278, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537
6. มยุรี หายสุภานุสรณ์ “เครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง”, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ
จากข้อมูลค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <iostream.h>
#include <complex.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>

void cal_cplex(void);
void screen(int x1,int y1,int x2,int y2,int fcolor,int bcolor);
void shows(void);
void printer_1(void);
FILE *out_file;
FILE *file_ptr;

int num;
double Nr,Nk,k,Rs[91],Rp[91];

void main(void)
{
    clrscr();
    screen(1,1,79,24,RED,LIGHTGRAY);
    shows();
    clrscr();
    cal_cplex();

    for(num=0;num<=90;num++)
    {
        printf("%d %3.4d (Rs) %3.4f (Rp)\n",num,Rs[num],Rp[num]);
    }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

getch();
out_file = fopen(" theory.dat ", "wt");
    if((out_file = fopen(" theory.dat ", "wt"))==NULL)
    {
        printf("Error in opening file\n");
    }else
    for(num=0;num<=90;num++)
    {
        fprintf(out_file, "%d  %f  %f\n", num, Rs[num], Rp[num]);
    }
printer_1();
getch();
}
void printer_1(void)
{
    FILE *file_ptr;
    file_ptr = fopen(" LPT1 ", "wb");
    for(num=0;num<=90;num++)
    {
        fprintf(file_ptr, "\n%d  %f(Rs)  %f(Rp)", num, Rs[num], Rp[num]);
    }
    fclose(file_ptr);
}
}

```

```

void cal_cplex(void)
{
double CS,SN,A_1,A_2,A_6,A_7,B_1,B_5,B_6;
complex A_3,A_4,A_5,B_2,B_3,B_4;
    for(num=0;num<=90;num++)
    {
        CS = cos((M_PI/180)*num);
        SN = pow(sin((M_PI/180)*num),2);
        A_1 = 2*Nr*Nk;
        A_2 = pow(Nr,2)-pow(Nk,2)-SN;
        B_1 = pow(Nr,2)-pow(Nk,2);
        A_3 = complex(A_2,A_1);
        A_4 = CS-sqrt(A_3);
        A_5 = CS+sqrt(A_3);
        A_6 = pow((real(A_4)),2)+pow((imag(A_4)),2);
        A_7 = pow((real(A_5)),2)+pow((imag(A_5)),2);
        Rs[num]= (A_6/A_7)*100;
        B_2 = complex(B_1,A_1)*CS;
        B_3 = B_2-sqrt(A_3);
        B_4 = B_2+sqrt(A_3);
        B_5 = pow((real(B_3)),2)+pow((imag(B_3)),2);
        B_6 = pow((real(B_4)),2)+pow((imag(B_4)),2);
        Rp[num]= (B_5/B_6)*100;
    }
}

void screen(int x1,int y1,int x2,int y2,int fcolor,int bcolor)
{
    int x,y;
    textbackground(bcolor);
    textcolor(fcolor);
    clrscr();
}

```

```

        for(y=y1+1;y<y2;y++)
        {
            gotoxy(x1,y);putch(0xb3);
            gotoxy(x2,y);putch(0xb3);
        }
        for(x=x1+1;x<x2;x++)
        {
            gotoxy(x,y1);putch(0xc4);
            gotoxy(x,y2);putch(0xc4);
        }

        gotoxy(x1,y1);putch(0xda);gotoxy(x2,y1);putch(0xbf);
        gotoxy(x1,y2);putch(0xc0);gotoxy(x2,y2);putch(0xd9);
    }
void shows(void)
{
    textcolor(BLUE);
    gotoxy(3,5);
    cprintf("The Coefficient of Reflection Calcution");
    gotoxy(5,9);
    cprintf("n (Refractive Index) = ");
    scanf("%lf",&Nr);
    gotoxy(5,13);
    cprintf("k (Absorption Coefficient) = ");
    scanf("%lf",&k);
    Nk = k;
    clrscr();
}

```

ภาคผนวก ข.

ตารางแสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (คำนวณ)

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ BK7 โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
0	4.206086	4.206086	24	5.306699	3.223304
1	4.207776	4.204395	25	5.413112	3.139434
2	4.212853	4.199324	26	5.526203	3.052217
3	4.221327	4.190870	27	5.646304	2.961696
4	4.233221	4.179030	28	5.773773	2.867924
5	4.248565	4.163802	29	5.908997	2.770966
6	4.267396	4.145181	30	6.052387	2.670898
7	4.289763	4.123161	31	6.204388	2.567813
8	4.315723	4.097737	32	6.365475	2.461820
9	4.345341	4.068903	33	6.536158	2.353047
10	4.378693	4.036650	34	6.716987	2.241644
11	4.415865	4.000974	35	6.908549	2.127784
12	4.456953	3.961864	36	7.111475	2.011671
13	4.502063	3.919316	37	7.326441	1.893535
14	4.551313	3.873321	38	7.554173	1.773647
15	4.604834	3.823874	39	7.795452	1.652313
16	4.662767	3.770970	40	8.051113	1.529886
17	4.725267	3.714604	41	8.322053	1.406767
18	4.792502	3.654775	42	8.609235	1.283417
19	4.864655	3.591482	43	8.913693	1.160357
20	4.941924	3.524730	44	9.236537	1.038182
21	5.024523	3.454523	45	9.578957	0.917564
22	5.112682	3.380872	46	9.942231	0.799269
23	5.206651	3.303792			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ BK7 โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
47	10.327732	0.684162	69	28.990203	3.376385
48	10.736935	0.573222	70	30.624964	4.172888
49	11.171419	0.467557	71	32.370316	5.104266
50	11.632885	0.368419	72	34.233887	6.188745
51	12.123155	0.277220	73	36.223787	7.447030
52	12.644187	0.195557	74	38.348634	8.902667
53	13.198082	0.125229	75	40.617577	10.582472
54	13.787095	0.068266	76	43.040312	12.517012
55	14.413648	0.026960	77	45.627108	14.741187
56	15.080339	0.003892	78	48.388826	17.294900
57	15.789954	0.001973	79	51.336936	20.223844
58	16.545484	0.024485	80	54.483534	23.580433
59	17.350134	0.075131	81	57.841361	27.424900
60	18.207342	0.158083	82	61.423814	31.826600
61	19.120793	0.278048	83	65.244956	36.865559
62	20.094433	0.440336	84	69.319526	42.634319
63	21.132490	0.650941	85	73.662946	49.240163
64	22.239488	0.916627	86	78.291316	56.807772
65	23.420269	1.245033	87	83.221420	65.482461
66	24.680009	1.644794	88	88.470715	75.434083
67	26.024239	2.125668	89	94.057320	86.861813
68	27.458869	2.698699	90	100.000000	100.000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Acrylic Plate โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
0	3.872518	3.872518	26	5.113372	2.791903
1	3.874102	3.870935	27	5.226653	2.707184
2	3.878857	3.866184	28	5.346950	2.619437
3	3.886796	3.858264	29	5.474639	2.528727
4	3.897939	3.847174	30	5.610121	2.435130
5	3.912315	3.832908	31	5.753828	2.338736
6	3.929961	3.815465	32	5.906224	2.239654
7	3.950922	3.794838	33	6.067809	2.138010
8	3.975253	3.771022	34	6.239119	2.033950
9	4.003016	3.744011	35	6.420729	1.927648
10	4.034286	3.713799	36	6.613258	1.819301
11	4.069143	3.680379	37	6.817370	1.709139
12	4.107681	3.643744	38	7.033780	1.597426
13	4.150001	3.603888	39	7.263254	1.484465
14	4.196217	3.560804	40	7.506619	1.370603
15	4.246453	3.514487	41	7.764758	1.256236
16	4.300846	3.464933	42	8.038627	1.141817
17	4.359545	3.412138	43	8.329248	1.027860
18	4.422712	3.356101	44	8.637723	0.914951
19	4.490524	3.296822	45	8.965236	0.803755
20	4.563171	3.234305	46	9.313060	0.695024
21	4.640859	3.168557	47	9.682564	0.589615
22	4.723812	3.099589	48	10.075221	0.488493
23	4.812270	3.027415	49	10.492614	0.392753
24	4.906493	2.952057	50	10.936449	0.303632
25	5.006760	2.873542			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Acrylic Plate โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
51	11.408557	0.222528	71	31.269145	5.232878
52	11.910910	0.151019	72	33.123344	6.323412
53	12.445628	0.090887	73	35.106933	7.587211
54	13.014991	0.044143	74	37.229039	9.047781
55	13.621453	0.013057	75	39.488371	10.731886
56	14.267651	0.000188	76	41.928250	12.670040
57	14.956420	0.008426	77	44.526631	14.897073
58	15.690810	0.041027	78	47.306128	17.452803
59	16.474097	0.101667	79	50.279037	20.382812
60	17.309801	0.194494	80	53.458360	23.739374
61	18.201704	0.324186	81	56.857821	27.582532
62	19.153867	0.496025	82	60.491886	31.981392
63	20.170649	0.715974	83	64.375781	37.015645
64	21.256726	0.990768	84	68.525497	42.777386
65	22.417115	1.328015	85	72.957807	49.373296
66	23.657190	1.736318	86	77.690266	56.927255
67	24.982710	2.225403	87	82.741211	65.583501
68	26.399841	2.806282	88	88.129763	75.510449
69	27.915177	3.491419	89	93.875810	86.905354
70	29.535768	4.294943	90	100.000000	100.000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Copper โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
0	73.129056	73.129056	26	75.750996	70.445161
1	73.133008	73.125104	27	75.952536	70.234172
2	73.144863	73.113247	28	76.161091	70.015230
3	73.164616	73.093484	29	76.376600	69.788365
4	73.192262	73.065813	30	76.599002	69.553613
5	73.227789	73.030231	31	76.828236	69.311018
6	73.271187	72.986733	32	77.064237	69.060636
7	73.322440	72.935317	33	77.306943	68.802535
8	73.381532	72.875976	34	77.556288	68.536795
9	73.448441	72.808704	35	77.812207	68.263514
10	73.523145	72.733496	36	78.074633	67.982805
11	73.605620	72.650343	37	78.343498	67.694806
12	73.695837	72.559240	38	78.618736	67.399673
13	73.793767	72.460177	39	78.900278	67.097594
14	73.899378	72.353148	40	79.188056	66.788784
15	74.012633	72.238144	41	79.482000	66.473494
16	74.133498	72.115157	42	79.782041	66.152014
17	74.261931	71.984181	43	80.088110	65.824678
18	74.397893	71.845208	44	80.400137	65.491873
19	74.541340	71.698232	45	80.718053	65.154040
20	74.692225	71.543249	46	81.041786	64.811688
21	74.850503	71.380255	47	81.371268	64.465398
22	75.016124	71.209248	48	81.706427	64.115835
23	75.189037	71.030230	49	82.047196	63.763758
24	75.369190	70.843204	50	82.393502	63.410032
25	75.556528	70.648178			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Copper โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
51	82.745277	63.055645	71	90.823315	59.424016
52	83.102451	62.701718	72	91.274124	59.777254
53	83.464955	62.349527	73	91.728906	60.243507
54	83.832719	62.000522	74	92.187593	60.836545
55	84.205674	61.656348	75	92.650118	61.571215
56	84.583751	61.318871	76	93.116411	62.463372
57	84.966881	60.990203	77	93.586403	63.529763
58	85.354997	60.672738	78	94.060024	64.787832
59	85.748029	60.369181	79	94.537204	66.255442
60	86.145910	60.082591	80	95.017872	67.950493
61	86.548572	59.816419	81	95.501955	69.890421
62	86.955947	59.574557	82	95.989382	72.091565
63	87.367968	59.361388	83	96.480077	74.568400
64	87.784567	59.181841	84	96.973965	77.332642
65	88.205678	59.041452	85	97.470972	80.392235
66	88.631232	58.946424	86	97.971018	83.750269
67	89.061163	58.903693	87	98.474025	87.403886
68	89.495404	58.921002	88	98.979913	91.343245
69	89.933888	59.006960	89	99.488599	95.550657
70	90.376547	59.171116	90	100.000000	100.000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ GaAs โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
0	37.599017	37.599017	26	41.459407	33.705315
1	37.604536	37.593499	27	41.773097	33.386037
2	37.621095	37.576939	28	42.100324	33.052535
3	37.648704	37.549325	29	42.441276	32.704565
4	37.687381	37.510635	30	42.796150	32.341874
5	37.737150	37.460841	31	43.165148	31.964200
6	37.798041	37.399904	32	43.548479	31.571275
7	37.870091	37.327778	33	43.946362	31.162822
8	37.953346	37.244406	34	44.359017	30.738558
9	38.047856	37.149726	35	44.786676	30.298194
10	38.153678	37.043665	36	45.229574	29.841435
11	38.270879	36.926142	37	45.687955	29.367984
12	38.399529	36.797066	38	46.162068	28.877539
13	38.539708	36.656339	39	46.652167	28.369799
14	38.691500	36.503853	40	47.158516	27.844461
15	38.854998	36.339493	41	47.681382	27.301227
16	39.030302	36.163131	42	48.221039	26.739804
17	39.217517	35.974634	43	48.777767	26.159907
18	39.416756	35.773858	44	49.351851	25.561263
19	39.628140	35.560651	45	49.943583	24.943615
20	39.851796	35.334849	46	50.553259	24.306728
21	40.087856	35.096281	47	51.181179	23.650394
22	40.336463	34.844767	48	51.827652	22.974439
23	40.597763	34.580118	49	52.492988	22.278733
24	40.871911	34.302133	50	53.177502	21.563195
25	41.159070	34.010604			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 (ต่อ) แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ GaAs โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
51	53.881515	20.827809	71	72.570858	3.678775
52	54.605350	20.072639	72	73.761607	3.009698
53	55.349335	19.297838	73	74.979117	2.438499
54	56.113800	18.503672	74	76.223675	1.991637
55	56.899079	17.690544	75	77.495560	1.701575
56	57.705508	16.859016	76	78.795038	1.608275
57	58.533424	16.009842	77	80.122364	1.761113
58	59.383169	15.144009	78	81.477780	2.221370
59	60.255083	14.262778	79	82.861515	3.065465
60	61.149508	13.367740	80	84.273782	4.389209
61	62.066786	12.460880	81	85.714781	6.313447
62	63.007260	11.544653	82	87.184691	8.991598
63	63.971270	10.622080	83	88.683676	12.619850
64	64.959157	9.696860	84	90.211878	17.451093
65	65.971257	8.773506	85	91.769423	23.814162
66	67.007907	7.857512	86	93.356410	32.140777
67	68.069439	6.955555	87	94.972919	43.003738
68	69.156179	6.075747	88	96.619005	57.171886
69	70.268452	5.227939	89	98.294698	75.690394
70	71.406574	4.424097	90	100.000000	100.000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Si โดยวิธีคำนวณ

มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
0	34.912739	34.912739	26	38.758295	31.052810
1	34.918212	34.907266	27	39.072228	30.736499
2	34.934635	34.890843	28	39.399932	30.406137
3	34.962020	34.863456	29	39.741623	30.061488
4	35.000385	34.825086	30	40.097527	29.702311
5	35.049757	34.775703	31	40.467876	29.328356
6	35.110170	34.715270	32	40.852911	28.939365
7	35.181666	34.643740	33	41.252883	28.535078
8	35.264296	34.561060	34	41.668048	28.115226
9	35.358115	34.467166	35	42.098672	27.679537
10	35.463190	34.361988	36	42.545030	27.227736
11	35.579592	34.245445	37	43.007404	26.759543
12	35.707403	34.117450	38	43.486084	26.274682
13	35.846710	33.977904	39	43.981368	25.772875
14	35.997609	33.826704	40	44.493564	25.253846
15	36.160204	33.663733	41	45.022984	24.717326
16	36.334607	33.488870	42	45.569951	24.163056
17	36.520937	33.301983	43	46.134796	23.590785
18	36.719321	33.102931	44	46.717855	23.000279
19	36.929896	32.891565	45	47.319473	22.391325
20	37.152804	32.667727	46	47.940002	21.763734
21	37.388197	32.431249	47	48.579802	21.117350
22	37.636234	32.181956	48	49.239239	20.452056
23	37.897083	31.919663	49	49.918685	19.767780
24	38.170919	31.644177	50	50.618520	19.064512
25	38.457926	31.355296			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 (ต่อ) แสดงค่าความสะท้อนที่มุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Si โดยวิธีคำนวณ

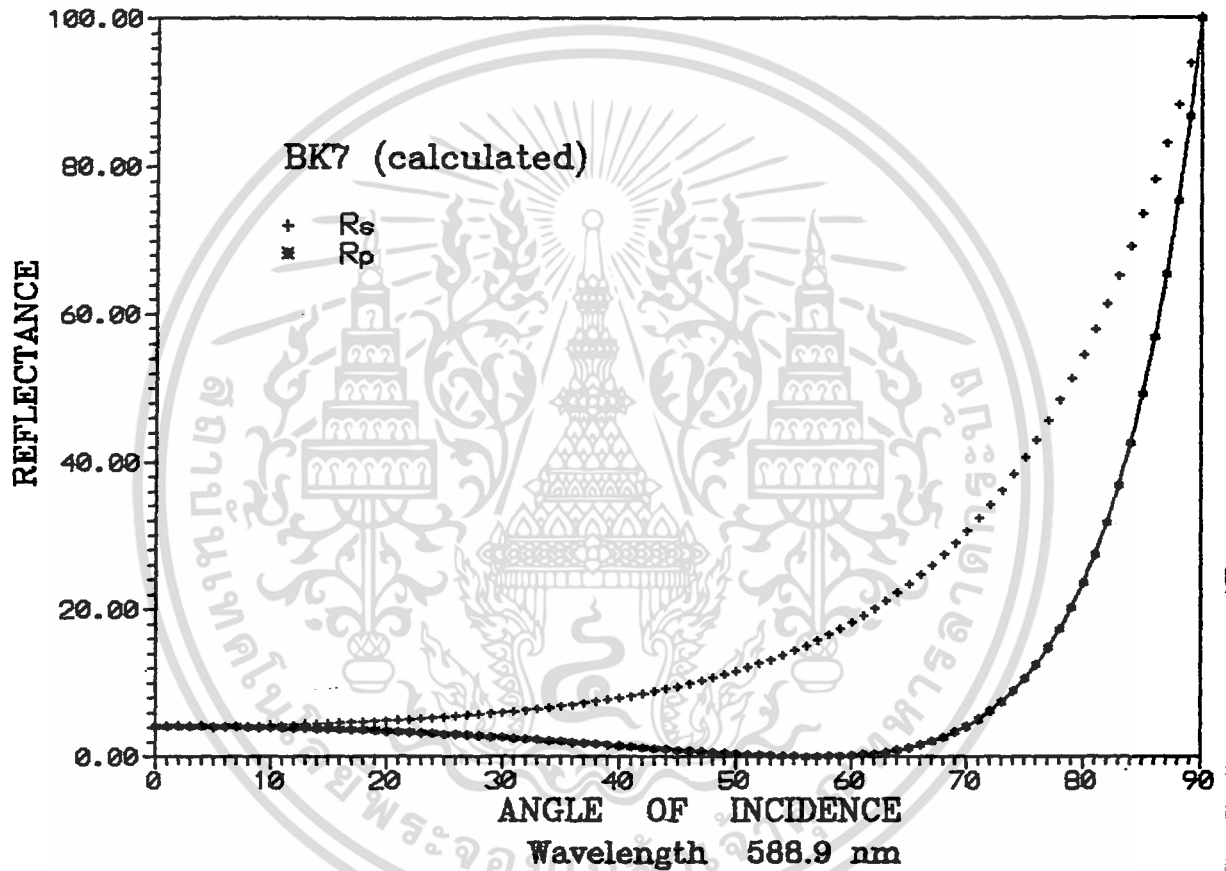
มุมตกกระทบ	R_s	R_p	มุมตกกระทบ	R_s	R_p
51	51.339130	18.342311	71	70.747359	1.849088
52	52.080907	17.601318	72	72.000159	1.248212
53	52.844246	16.841776	73	73.282915	0.750646
54	53.629552	16.064050	74	74.596016	0.383142
55	54.437231	15.268646	75	75.939843	0.178411
56	55.267696	14.456242	76	77.314765	0.176596
57	56.121362	13.627721	77	78.721142	0.427154
58	56.998650	12.784205	78	80.159317	0.991299
59	57.899982	11.927106	79	81.629622	1.945176
60	58.825785	11.058178	80	83.132372	3.384043
61	59.776486	10.179582	81	84.667867	5.427813
62	60.752516	9.293968	82	86.236386	8.228489
63	61.754304	8.404565	83	87.838191	11.980232
64	62.782281	7.515295	84	89.473522	16.933181
65	63.836879	6.630914	85	91.142597	23.412648
66	64.918526	5.757173	86	92.845610	31.846178
67	66.027651	4.901028	87	94.582729	42.802300
68	67.164677	4.070880	88	96.354097	57.046996
69	68.330027	3.276885	89	98.159826	75.627574
70	69.524117	2.531329	90	100.000000	100.000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

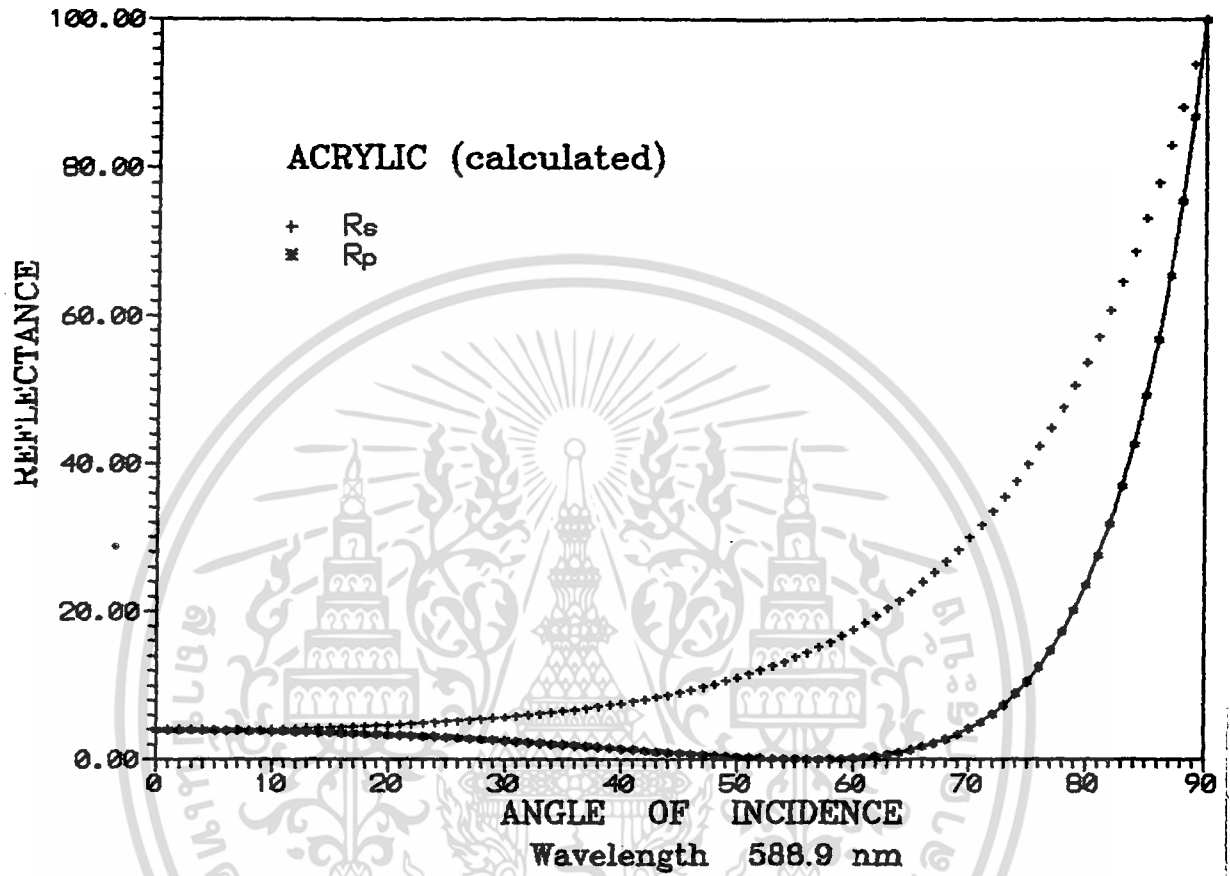
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ
ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (คำนวณ)

BK7



กราฟที่ ค-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ
ของ BK7 ที่ความยาวคลื่น 588.9 nm

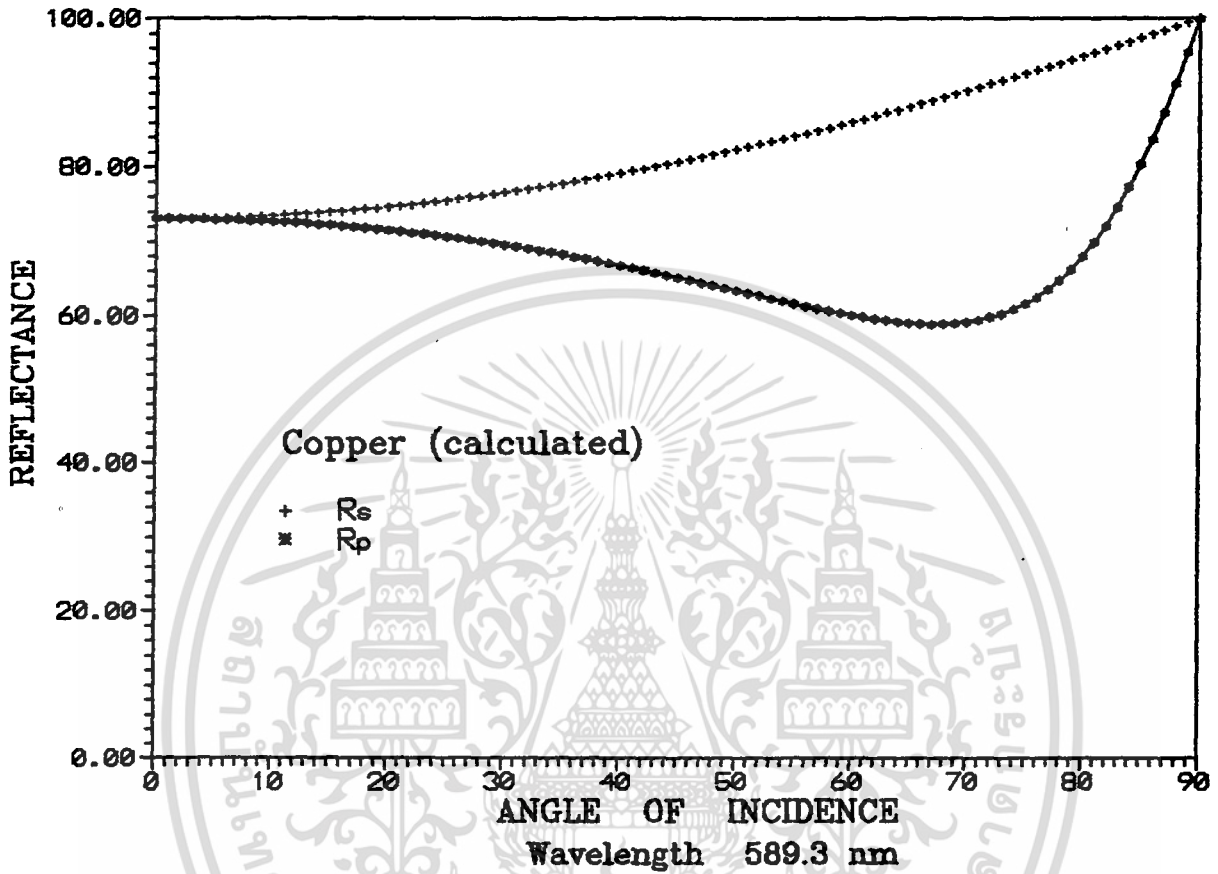
Acrylic Plate



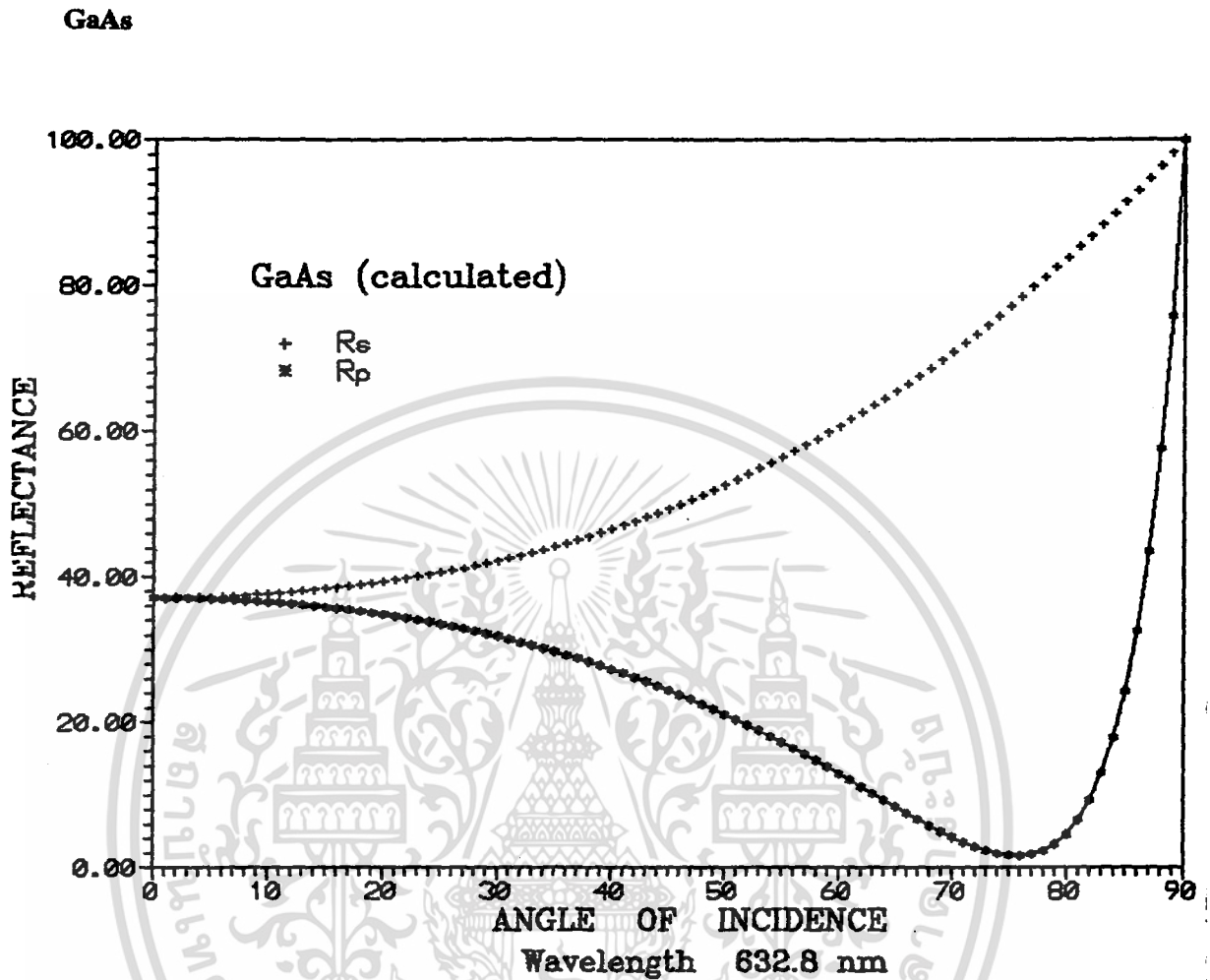
กราฟที่ ก-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Acrylic Plate ที่ความยาวคลื่น 588.9 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Copper

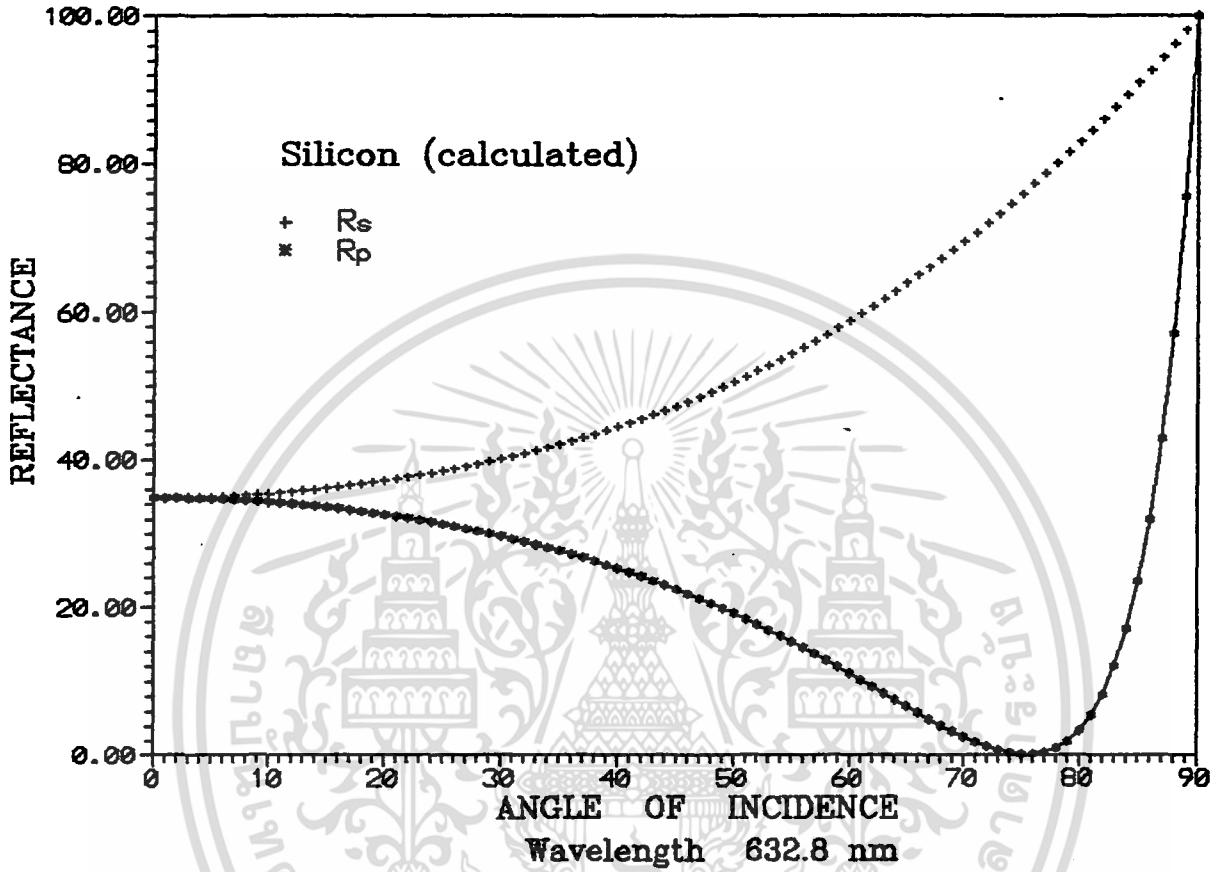


กราฟที่ ค-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Copper ที่ความยาวคลื่น 589.3 nm



กราฟที่ ก-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ GaAs ที่ความยาวคลื่น 632.8 nm

Si



กราฟที่ ก-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสะท้อนกับมุมตกกระทบต่าง ๆ ของ Si ที่ความยาวคลื่น 632.8 nm