สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR ELLIPSOMETER

นายจิตติ รุจิพัฒนพงศ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 123375
วัน,เดือน,ปี - 8 พย. 2555
b.....
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

นายจิตติ รุจิพัฒนพงศ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR ELLIPSOMETER

MR. JITTI RUJIPATTANAPONG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS-SCIENCE AND INDUSTRY INSTRUMENTATION
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์

ชื่อนักศึกษา นายจิตติ รุจิพัฒนพงศ์

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วรการ นียากร	
รศ. วิชาญ เตชิตธีระ	
ดร.ประธาน บุรณศิริ	
รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์
ชื่อนักศึกษา	นายจิตติ รุจิพัฒนพงศ์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ด้วยโปรแกรม Visual Basic 2008 ซึ่งมีการพัฒนาระบบประมวลผลที่ช่วยในการคำนวนจำนวนเชิงซ้อน โดยข้อมูลจากอิลลิปโซมิเตอร์นั้นจะสามารถหาได้จากเทคนิคอิลลิปโซมิทรี และมีการนำสมการเฟสเนลในการคำนวนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอิลลิปโซมิเตอร์ พร้อมกับการใช้วิธีมินิไมซ์เซชั่นในการเลือกค่าที่เหมาะสมเพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Software Development for Ellipsometer
Name	Mr. Jitti Rujipattanapong
Deparment	Applied Physics
Program	Applied Physics – Science and Industry Instrumentation
Academic Year	2010
Special Project Advisor	Assoc. Prof. Dr. Warawoot Thowladda

Abstract

This special project proposes the development of software for ellipsometry. The program was developed using Visual Basic2008. In the program,a process system was developed for calculation of complex number. The ellipsometric data obtained from the ellipsometer were calculated by Fresnel equation. By minimization process, the appropriate complex refractive index was obtained.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาและการสนับสนุนจาก รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา ที่ให้โอกาศในการทำโครงงานพิเศษนี้ รวมทั้งให้คำแนะนำ คำปรึกษาต่างๆ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งใจเป็นอย่างยิ่ง และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณ สมพบ แซ่เจี่ย เป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาต่างๆ และให้การสนับสนุนในด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ที่ถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ด้านต่างๆให้ และให้โอกาศที่ดีในการศึกษาหาความรู้

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งเพื่อนๆและพี่น้องที่ค่อยเป็นกำลังใจเสมอ

และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ

นาย จิตติ รุจิพัฒนพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยแบะวิธีดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 อิลลิปโซมิทรี	3
2.1.1 The fundamental Equation of Ellipsometry	3
2.1.2 Measurement of the Ellipsometric parameter Psi (ψ) , Delta (Δ)	5
2.1.3 Null Ellipsometry	5
2.1.4 Fresnel Equation	6
2.2 การโพลาไรซ์ของแสง	8
2.2.1 โพลาไรซ์เชิงเส้นหรือโพลาไรซ์เชิงระนาบ	9
2.2.2 โพลาไรซ์เชิงวงรี	9
2.2.3 การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์	10
2.3 จำนวนเชิงซ้อน(Complex Number)	13
2.3.1 จำนวนจินตภาพ (Imaginary Number)	14
2.3.2 จำนวนตรรกยะ (Rational Number)	14
2.3.3 จำนวนอตรรกยะ (Irrational Number)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1 จำนวนเชิงซ้อน (Complex Number)	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	17
3.1 การออกแบบโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน จากข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์	17
3.2 การหาข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์ Phi (ψ) , Delta (Δ) มุมตกกระทบ (θ_i)	18
3.3 สร้างและพัฒนาโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจาก ข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	23
4.1 ผลการพัฒนาโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจาก ข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์	23
4.2 ผลการจำลองข้อมูลอิลลิปโซมิทรีด้วยโปรแกรม MATLAB	28
4.3 ผลการทดลองใช้โปรแกรมทำนายดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูล ที่จำลองไว้ใน 4.2 โดยไม่มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูล	33
4.4 ผลการทดลองใช้โปรแกรมทำนายดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูล ที่จำลองไว้ใน 4.2 โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ใช้ 5%	36
4.5 ผลการทดลองใช้โปรแกรมทำนายดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูล ที่จำลองไว้ใน 4.2 โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ใช้ 10%	43
4.6 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของมุมบูสเตอร์และ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน	49
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	60
5.3 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน และวิธีการดำเนินงาน 2

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงข้อมูลอิลลิปโซมีทรีที่ได้จากการจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Aluminum Oxide ที่มีค่าของดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.76 + 0i 29

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงข้อมูลอิลลิปโซมีทรีที่ได้จากการจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Aluminum ที่มีค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.39 + 1.51i 30

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงข้อมูลอิลลิปโซมีทรีที่ได้จากการจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Lithium Floride ที่มีค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.391 + 0i 31

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงข้อมูลอิลลิปโซมีทรีที่ได้จากการจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Cadmium Sulfide ที่มีค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 2.416 + 0.17i 32

ตารางที่ 4.5 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 1° 49

ตารางที่ 4.6 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5° 50

ตารางที่ 4.7 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 1° 51

ตารางที่ 4.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5° 52

ตารางที่ 4.9 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 1° 54

ตารางที่ 4.10 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5° 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.11 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 1° 56

ตารางที่ 4.12 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5° 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบฟิล์มบาง 3

รูปที่ 2.2 ชุดทดลองของการวัดค่า ψ และ Δ ของ 5
ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางแสง

รูปที่ 2.3 การหักเหและการสะท้อนของคลื่นระนาบ 6
ที่ระนาบตกกระทบระหว่างตัวกลางต่างชนิด

รูปที่ 2.4 แผนภาพทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้า 8
(a) แบบสุ่มหรือหลายทิศทาง (b) ทิศทางเดียวหรือเชิงระนาบ

รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสงโพลาไรซ์ 9

รูปที่ 2.6 แผนภาพจำลองแสดงสนามไฟฟ้าของแต่ละระนาบของคลื่นแสง 10
(ก) โพลาไรซ์เชิงเส้น (ข) โพลาไรซ์เชิงวงกลม
(ค) โพลาไรซ์เชิงวงรี

รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงลำแสงที่ตกกระทบวัตถุ 11
(a) กรณีที่สะท้อนทั่วไป (b) กรณีที่สะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์

รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการสร้างแสงโพลาไรซ์โดยการดูดกลืน 12

รูปที่ 2.9 แผนภาพการสร้างโพลาไรซ์ด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติ birefigence 12

รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการสรุประบบจำนวนเชิงซ้อน 13

รูปที่ 3.1 รูปภาพแสดงหน้าต่างของโปรมแกรมคำนวนหาค่าดัชนีหักเห 17

รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงแสงโพลาไรซ์ที่มีอยู่ในการทดลอง 19

รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อหาดัชนีหักเหของฟิล์ม 21

รูปที่ 4.1 ภาพแสดงหน้าต่างโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อวิเคราะห์ 23
หาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน

รูปที่ 4.2 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน 33
ของ Aluminum Oxide

รูปที่ 4.3 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ 34
P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum Oxide

รูปที่ 4.4 ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน 35
ของ Aluminum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.5 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum 35

รูปที่ 4.6 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Lithium Floride 36

รูปที่ 4.7 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของP-Polarized และ S-Polarized ของ Lithium Floride 36

รูปที่ 4.8 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Cadmium Sulfide 37

รูปที่ 4.9 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของP-Polarized และ S-Polarized ของ Cadmium Sulfide 38

รูปที่ 4.10 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Aluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5 % 39

รูปที่ 4.11 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5 % 39

รูปที่ 4.12 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Aluminum ที่มีความคลาดเคลื่อน 5% 40

รูปที่ 4.13 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum ที่มีความคลาดเคลื่อน 5% 40

รูปที่ 4.14 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Lithium Floride ที่มีความคลาดเคลื่อน 5% 41

รูปที่ 4.15 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Lithium Floride ที่มีความคลาดเคลื่อน 5% 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.16 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ของ Cadmium Sulfide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5% 43

รูปที่ 4.17 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อน ของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Cadmium Sulfide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5% 43

รูปที่ 4.18 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ของ Aluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 10% 44

รูปที่ 4.19 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อน ของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 10% 44

รูปที่ 4.20 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ของ Aluminum ที่มีความคลาดเคลื่อน 10% 45

รูปที่ 4.21 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อน ของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum มีความ คลาดเคลื่อน 10% 46

รูปที่ 4.22 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ของ Lithium Floride ที่มีความคลาดเคลื่อน 10% 47

รูปที่ 4.23 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อน ของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Lithium Florid มีความ คลาดเคลื่อน 10% 47

รูปที่ 4.24 ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ของ Cadmium Sulfide ที่มีความคลาดเคลื่อน 10% 48

รูปที่ 4.25 ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อน ของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Cadmium Sulfide มีความคลาดเคลื่อน 10% 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

กราฟที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ1° 49

กราฟที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5° 50

กราฟที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 1° 52

กราฟที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5° 53

กราฟที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 1° 54

กราฟที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5° 55

กราฟที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 1° 57

กราฟที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5° 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ

ในปัจจุบันได้มีการนำชุดทดลองอิลลิปโซมิเตอร์มาใช้ในการหาคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ไม่ทราบค่าความหนาหรือดัชนีหักเหของฟิล์มบาง โดยชุดทดลองอิลลิปโซมิเตอร์นั้นจะสามารถหาคุณสมบัติทางแสงเช่น ดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มบางได้โดยที่ไม่ต้องทราบคุณสมบัติใดเช่น ไม่ต้องทราบความหนาของฟิล์มหรือดัชนีหักเหของฟิล์ม แต่เราจะสามารถที่จะหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มได้โดยที่ใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองจากชุดทดลองอิลลิปโซมีเตอร์

โครงงานพิเศษนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการชุดทดลองอิลลิปโซมิเตอร์ โดยเทคนิคอิลลิปโซมิทรีที่ดูการเปลี่ยนแปลงของสถานะโพลาไรซ์ของแสงหลังการสะท้อนและหักเหในฟิล์มบาง เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน(Complex reflective index) ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในต่อการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์บาง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคอิลลิปโซมิทรี
2. เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากชุดทดลองอิลลิปโซมิเตอร์
3. เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางโดยใช้ข้อมูลจากชุดทดลองมิเตอร์อิลลิปโซมิเตอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงงานพิเศษนี้ทำขึ้นเพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากชุดทดลองอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน ขอบเขตโครงงานพิเศษนี้คือศึกษาหลักการหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางด้วยอิลลิปโซมีทรี และโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากอิลลิปโซมิเตอร์เป็นดัชนี หักเหเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. พัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ผลที่ได้จากอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางทำการทดลองซอฟต์แวร์วิเคราะห์ผลที่ได้จากอิลลิปโซมิเตอร์หาดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางโดยการจำลองค่าจากโปรแกรม MATLAB

2. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้จากซอฟต์แวร์

1.4 ขั้นตอนของงานวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ตาราง 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน และวิธีการดำเนินงาน

ระยะเวลาดำเนินงาน	ขั้นตอนการดำเนินงาน
มิถุนายน-กรกฎาคม พ.ศ.2553	-ศึกษาทฤษฎีของอิลลิปโซมีทรี -ศึกษาพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ผลที่ได้จากอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบาง
สิงหาคม-ตุลาคมพ.ศ. 2553	-พัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ผลที่ได้จากอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบาง
พฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ.2553	-สร้างรูปแบบสมการเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ โดยโปรแกรม MATLAB -สร้างรูปแบบการประมวลผลของจำนวนเชิงซ้อนด้วยภาษา Visual Basic 2008
มกราคม –มีนาคม พ.ศ. 2554	-ทำการทดลองโดยจำลองค่าจากโปรแกรม MATLAB มาทดลองในซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ผลที่ได้จากอิลลิปโซมิเตอร์ -วิเคราะห์ผลจากการทดลองและสรุปผลการทดลองที่ได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ได้รับความรู้ความเข้าใจใน หลักการหาดัชนีการหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบางโดยเทคนิคอิลลิปโซมิทรี

2. ได้รับความรู้ในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์คำนวนผลที่ได้ จากเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนของฟิล์มบาง

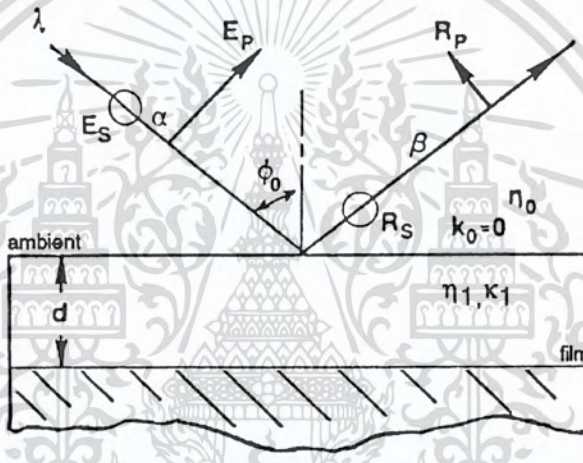
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 อิลลิปโซมิทรี (Ellipsometry)

อิลลิปโซมิทรีเป็นเทคนิคทางแสงที่ใช้หาคุณลักษณะของฟิล์มบาง โดยวัดการเปลี่ยนแปลงสถานะการโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงของสถานะโพลาไรซ์นั้นจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของฟิล์มบาง เช่น ดัชนีหักเห ความหนา และมุมลำแสงที่ตกกระทบกับผิวของฟิล์มบาง

2.1.1 The fundamental Equation of Ellipsomatry



รูปที่ 2.1แผนภาพแสดงการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบฟิล์มบาง

เราจะอธิบายสมการที่มีความสัมพันธ์กับแอมปลิจูดและเฟสของแสงที่ตกกระทบและสะท้อนจากฟิล์มบางซึ่งเรียกว่าค่า Parameter ของระบบวัดอิลลิปโซมิทรี เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน(complex reflective index) และความหนาของฟิล์มบาง สมการนี้เรียกว่าเป็น Fundamental Equation of Ellipsometry เพื่ออธิบายสมการนี้ จากรูปที่ 1 ในภาพ E_pและ E_s เป็นสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบโดยแนว p ขนานกับระนาบตกกระทบ และแนว s ตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ ดังนั้น R_p และ R_s เป็นสนามไฟฟ้าที่สะท้อนกลับออกมา เราเขียนสมการที่สอดคล้องกับแสงตกกระทบได้เป็น

$$E_p = E_{0p} e^{i\alpha_p} \qquad (1a)$$

$$E_s = E_{0s} e^{i\alpha_s} \qquad (1b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการของแสงที่สะท้อนกลับได้เป็น

$$R_p = R_{0p} e^{i\alpha_p} \tag{2a}$$

$$R_s = R_{0s} e^{i\alpha_s} \tag{2b}$$

ในสมการ (1) และ (2) เราสามารถแสดงการวัด $R_{p/s}$ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ $E_{p/s}$ และสำหรับค่าดูดกลืนทางแสงของวัตถุที่ทำกับแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส เราอธิบายพฤติกรรมนี้โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ρ_p และ ρ_s ได้เป็น

$$R_p = \rho_p E_p \tag{3a}$$

$$R_s = \rho_s E_s \tag{3b}$$

หรือในรูปทั่วไป

$$\rho_m = \frac{R_m}{E_m} \qquad \text{เมื่อ } m = p, s \tag{4}$$

แทนสมการ (1) และ (2) ใน (4) แล้วได้

$$\rho_m = \left(\frac{R_{0m}}{E_{0m}} \right) e^{i(\beta_m - \alpha_m)} \tag{5}$$

จากสมการ (5) เราสามารถกำหนดขอบเขตของ “Normalized” reflection coefficient ρ

$$\rho = \frac{\rho_p}{\rho_s} = \left(\frac{R_{0p} / E_{0p}}{R_{0s} / E_{0s}} \right) e^{i(\beta - \alpha)} \tag{6}$$

ที่ $\alpha = \alpha_p - \alpha_s$ และ $\beta = \beta_p - \beta_s$ ค่า α และ β สามารถอธิบายจากเฟสก่อนและหลังการสะท้อนที่สอดคล้องกัน

จากที่กล่าวมาเราสามารถเขียนในเทอมของ Tangent ของมุม ψ

$$\tan\psi = \frac{R_{op} / E_{0p}}{R_{0s} / E_{0s}} \tag{7a}$$

และมุมเฟส Δ

$$\Delta = \beta - \alpha = (\beta_p - \beta_s) - (\alpha_p - \alpha_s) \tag{7b}$$

จากสมการ (7) เราสามารถเขียนนสมการ (6) ได้ใหม่เป็น

$$\rho = \tan\psi \, e^{i\Delta} \tag{8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

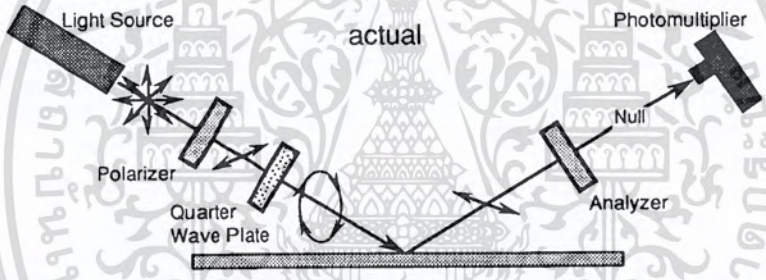
ด้วยเหตุนี้อิลลิปโซมิทรี เป็นการวัดที่ยุ่งยากของ $\tan\psi$ (การเปลี่ยนแปลงใน Amplitude ratio) และ Δ(การเปลี่ยนแปลงในเฟส๗ ค่า ψ และ Δ เป็นฟังชันก์ของค่าคงที่ทางแสงของวัตถุอาจจะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\rho = \tan\psi e^{i\Delta} = f(n, k, d) \qquad (9)$$

โดยสมการที่ (9) นี้จะเรียกว่า The fundamental Equation of Ellipsometry

2.1.2 Measurement of the Ellipsometric parameter PSI (ψ) and DELTA (Δ)

เราจะอธิบายการวัดค่า parameter PSI (ψ) และ DELTA (Δ) ในฟังชันก์ของระบบการวัด Ellipsometric ซึ่งทำได้โดยการให้แสงส่องผ่าน Polarizer และ Compensator ก่อนทำมุมตกกระทบกับผิวหน้าของฟิล์มบางตัวอย่างและสะท้อนกลับผ่าน Analyzer(Polarizer) ปัจจัยในการวิเคราะห์คือความสัมพันธ์ของการปรับมุม Polarizer และ Compensator เพื่อหา ψ และ Δ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2.2ชุดทดลองของการวัดค่า ψ และ Δ ของตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางแสง

ให้เราตั้งสมมุติฐานของระบบการวัด Ellipsometric ที่เหมือนกันก่อนคือให้สมมุติระบบเป็น Ideal polarizer และ Ideal compensator ในฝั่งด้าน "generating" arm และ Ideal polarizer ในฝั่ง "Analyzer" arm ให้แกนส่งผ่านของ polarizer เป็น P และ A ตามลำดับ ตัว compensator ใช้เป็นตัวพิจารณาการดูดกลืนเพียงเล็กน้อยของตัวอย่าง และให้แกน fast axis ที่ทำมุมเป็น C สุดท้ายแสงที่ตกกระทบที่เกิดจากการปรับมุม polarizer

2.1.3 Null Ellipsometry

การกำหนดค่า PCSA สามารถใช้ในการตรวจสอบโดยประมาณอย่างง่ายของตัวอย่างที่มี 2 ตัวแปร ขั้นตอนประกอบไปด้วยการตั้งให้แสงที่ตัวตรวจวัดมีค่าความสว่างเข้าใกล้ศูนย์ (แสงที่ผ่านมาถึงตัวตรวจวัดจะมีความสว่างน้อยหรือดับ) ที่มุมAzimuths ของ Polarizer (P_0) และ Compensator (C_0) มีการปรับเพื่อให้เป็นแสงโพลาไรซ์วงรีส่งผลให้สะท้อนกับตัวอย่างแล้วแสงที่ได้เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น แสงที่สะท้อนมานั้นจะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสว่างเข้าใกล้ศูนย์หรือดับลงจะขึ้นอยู่กับการปรับมุม Analyzer (A_0) โดยมีสมการเชิงเส้นสำหรับอัตรส่วนการสะท้อนเชิงซ้อนเป็น

$$\rho = \frac{\tau_c \tan(P_0 - C_0) + \tan C_0}{\tan(P_0 - C_0)\tan C_0 - 1} \tan A_0 \qquad (10)$$

ขณะที่ τ_c เขียนแทนด้วยการส่งผ่านเชิงซ้อนของการชดเชย

$$\tau_c = \frac{t_{slow}}{t_{fast}} = \tan\psi_c e^{i\Delta_c} \qquad (11)$$

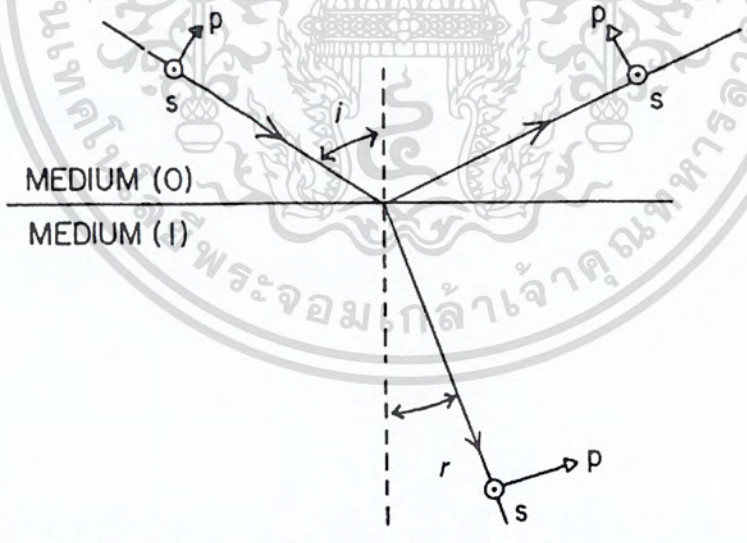
ซึ่งสามารถแสดงในรูปของมุม ψ_c และ Δ_c

ผลการทำให้เข้าใจง่ายที่สำคัญสำหรับการตั้งค่ามุม quarter-wave compensator $C = \pi/4$ กล่างคือความเข้มในเอาท์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับการตั้งค่า P_0, A_0 และ P_1, A_1 เกี่ยวข้องโดย $P_1 = \pm P_0$, $A_2 = -A_1$ นอกจากนี้มุมเหล่านี้จะตรงไปตรงมากับการวัดมุมอิลลิปโซเมทริก

$$\psi = A_1 \qquad (12a)$$

$$\Delta = 2P_0 + \pi/2 \qquad (12b)$$

2.1.4 Fresnel Equation



รูปที่ 2.3การหักเหและการสะท้อนของคลื่นระนาบที่ระนาบตกกระทบระหว่างตัวกลางต่างชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วค่าดัชนีหักเหจะสามารถเขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อนได้เป็น

$$N = n + ki \tag{13}$$

โดยที่ N คือ ดัชนีหักเหเชิงซ้อน

n คือ ดัชนีหักเห

k คือ extinction coefficient

เมื่อมีแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห N_i ไปยัง N_t เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R_p = \frac{N_t \cos\theta_i - N_i \cos\theta_t}{N_t \cos\theta_i + N_i \cos\theta_t} \tag{14a}$$

$$R_s = \frac{N_i \cos\theta_i - N_t \cos\theta_t}{N_i \cos\theta_i + N_t \cos\theta_t} \tag{14b}$$

ค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน ρ ที่หาได้เป็น

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} \tag{15}$$

เราสามารถตัดในเทอมของมุมหักเหออกไปได้ด้วยการใช้ Snell's Law

$$N_i \sin\theta_i = N_t \sin\theta_t \tag{16}$$

และจากสูตรตรีโกณมิติ $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ จะทำให้ได้

$$\cos\theta_t = \left[1 - \left(\frac{N_i}{N_t}\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2} \tag{17}$$

เมื่อนำสมการ (16) ไปแทนในสมการ (13) จะได้

$$R_p = \frac{\left(N_t/N_i\right)^2 \cos\theta_i - \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}{\left(N_t/n_i\right)^2 \cos\theta_i + \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}} \tag{18a}$$

$$R_s = \frac{\cos\theta_i - \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}{\cos\theta_i + \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}} \tag{18b}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการ (17) มาแทนในสมการ (14) จะได้

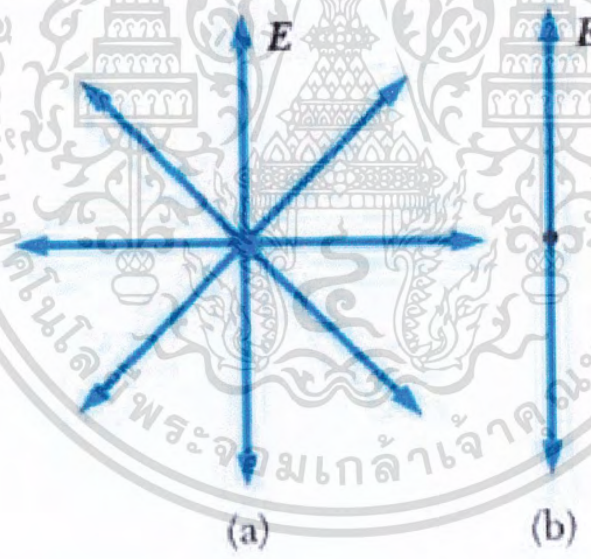
$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \left[\frac{\left(N_t/N_i\right)^2 \cos\theta_i - \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}{\left(N_t/N_i\right)^2 \cos\theta_i + \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}\right]\left[\frac{\cos\theta_i + \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}{\cos\theta_i - \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}\right] \quad (19)$$

และจากสมการ (8) และ (14) จะทำให้ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\rho = \tan\psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} \quad (20)$$

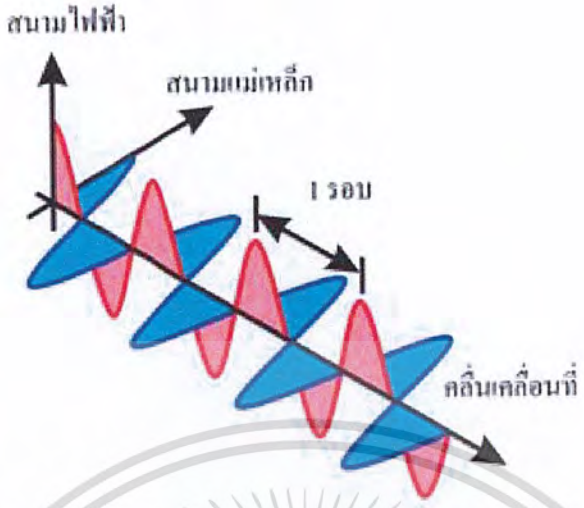
2.2 การโพลาไรซ์ของแสง

การโพลาไรซ์เป็นสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แสง ที่อธิบายทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้าตามขวางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (คลื่นตามยาว) เช่น คลื่นเสียงไม่มีสมบัติการโพลาไรซ์ เนื่องจากการแกว่งมีทิศทางเดียวกัลการเคลื่อนที่ของคลื่น



รูปที่ 2.4แผนภาพทิศทางการแกว่งของสนามไฟฟ้า (a) แบบสุ่มหรือหลายทิศทาง (b) ทิศทางเดียวหรือเชิงระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5แผนภาพแสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแสงโพลาไรซ์

2.2.1 โพลาไรซ์เชิงเส้นหรือโพลาไรซ์เชิงระนาบ

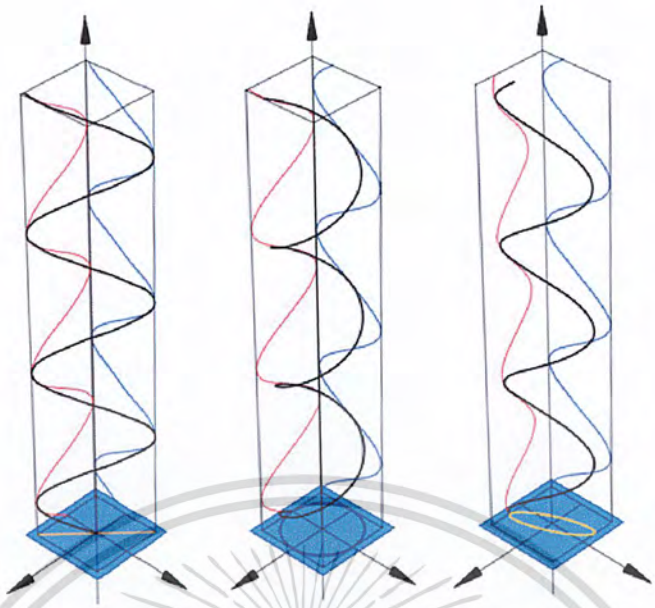
ถ้าสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงมีการแกว่งในระนาบใดระนาบหนึ่ง จะเรียกแสงนี้ว่าเป็นแสงโพลาไรซ์ โพลาไรซ์เชิงเส้นหรือแสงโพลาไรซ์เชิงระนาบ (Linear or plane polarizes light) ถ้าสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงทีการแกว่งในทิศทางต่างๆกันและมีเฟสต่างกันมีอย่างสุ่ม (Randomly in time) เรียกแสงนี้ว่าเป็น แสงไม่โพลาไรซ์หรือแสงโพลาไรซ์แบบสุ่ม (Unpolarized light or random polarized light) ถ้าสนามไฟฟ้าของแต่ละระนาบมีเฟสตรงกันและมีแอมปลิจูดเท่ากันจะพบว่า กล่าวได้ว่าแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น

2.2.2 โพลาไรซ์เชิงวงรี

ถ้าสนามไฟฟ้าในระนาบทั้งสองมีต่างกัน 90° โดยที่สนามไฟฟ้าทั้งสองมีแอมปลิจูดเท่ากัน เวคเตอร์ของสนามไฟฟ้าจะรวมหมุนเป็นวงกลม เรียกว่า แสงโพลาไรซ์เชิงวงกลม (circularly polarized light) และถ้าแอมปลิจูดของคลื่นในแต่ละระนาบมีขนาดไม่เท่ากัน สนามไฟฟ้าจะรวมหมุนเป็นวงรี เรียกว่าแสงโพลาไรซ์เชิงวงรี (Elliptically polarized light)

จากที่กล่าวมีข้างต้น จะเห็นได้ว่า ทั้งแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นและโพลาไรซ์เชิงวงกลม เป็นกรณีพิเศษของโพลาไรซ์เชิงวงรี โดยในกรณีของโพลาไรซ์เชิงเส้นก็คือโพลาไรซ์เชิงวงรีที่สนามไฟฟ้าในระนาบใดระนาบหนึ่งเป็นศูนย์ ส่วนโพลาไรซ์เชิงวงกลมก็คือโพลาไรซ์เชิงวงรีที่แอมปลิจูดในระนาบทั้งสองมีขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6แผนภาพจำลองแสดงสนามไฟฟ้าของแต่ละระนาบของคลื่นแสง
(ก) โพลาไรซ์เชิงเส้น (ข) โพลาไรซ์เชิงวงกลม (ค) โพลาไรซ์เชิงวงรี

2.2.3 การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์

การทำให้แสงไม่โพลาไรซ์เป็นแสงโพลาไรซ์สามารถทำได้โดย 4 วิธี

1.การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน (Reflection)

2.การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการดูดกลืน (Absorption or dichroism)

3.การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยวัสดุที่สมบัติ double refraction หรือ birefringence

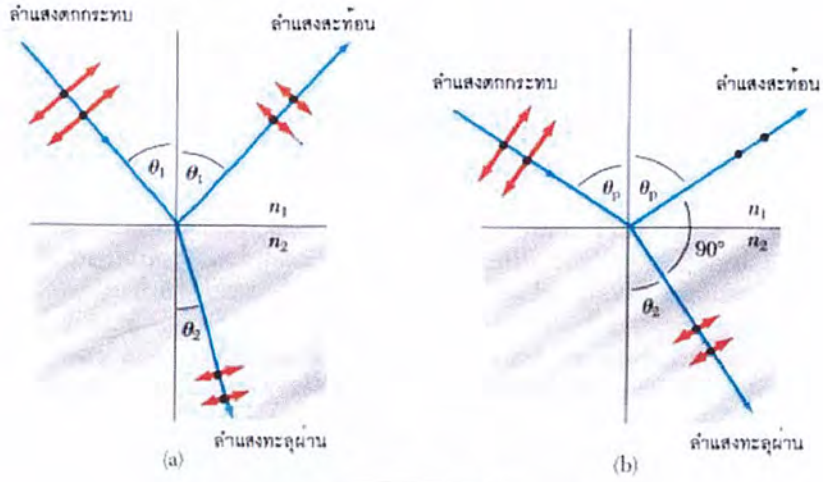
4.การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการกระเจิง (Scattering)

2.2.3.1 การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการสะท้อน (Reflection)

แสงตกกระทบพื้นผิวหรือเดินทางจากตัวกลางหนึ่งตกกระทบพื้นผิวของตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกันจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆที่เป็นไปได้ 3 ประการ ได้แก่ การสะท้อน (reflection) ที่ผิวของตัวกลางที่ตกกระทบกลับสู่ตัวลางเดิม การหักเห (refraction) ผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่แสงตกกระทบและแสงบางส่วนหรือทั้งหมดอาจถูกดูดกลืน (absorption) โดยตัวกลางนั้น

เมื่อแสงที่ไม่โพลาไรซ์ตกกระทบผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง n_1และ n_2แสงที่สะท้อนออกมาจะเป็นแสงโพลาไรซ์ได้ เมื่อมุมระหว่างรังสีสะท้อนกับรังสีหักเหเป็นมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

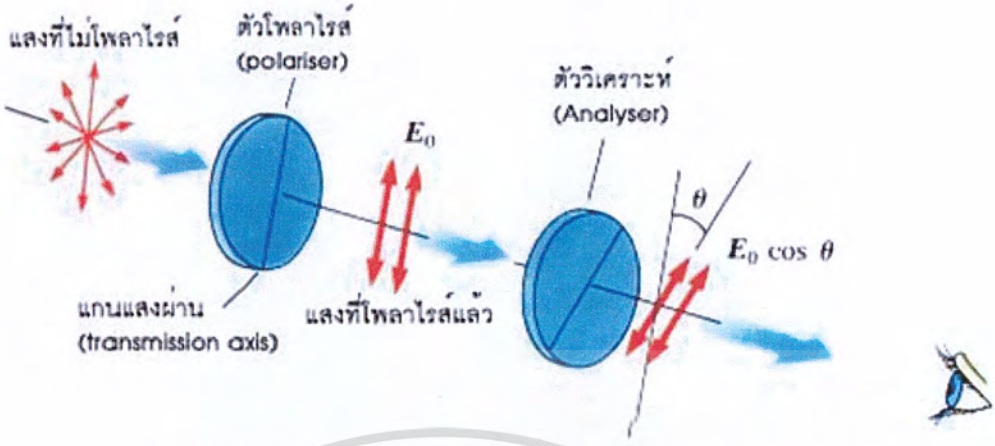


รูปที่ 2.7แผนภาพแสดงลำแสงที่ตกกระทบวัตถุ
(a) กรณีที่สะท้อนทั่วไป (b) กรณีที่สะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์

2.2.3.2 การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการดูดกลืน(Absorption or dichroism)

Dichroism เป็นสมบัติที่วัสดุเลือกดูดกลืนแสงเฉพาะแนวใดแนวหนึ่งของแสงโพลาไรซ์โดยให้อีกแนวหนึ่งสามารถทะลุผ่านไปได้ คล้ายกับคลื่นในเส้นเชือกที่สามารถเดินทางผ่านช่องเปิดแคบๆ ได้เมื่อคลื่นในเส้นเชือกแกว่งในแนวเดียวกับช่องเปิดนั้นและจะผ่านไม่ได้ถ้าแกว่งในแนวขวางกับช่องเปิด เมื่อแสงเดินทางผ่านวัสดุบางชนิดแนวโพลาไรซ์ของแสงบางแนวจะถูกดูดกลืนในขณะที่แนวโพลาไรซ์บางแนวที่ตั้งฉากกันจะสามารถทะลุผ่านไปได้โดยไม่ถูกดูดกลืน แผ่นโพลาไรซ์หรือโพลาไรซ์เซอร์ (polarized plate or polarizer) (โพลารอยด์ เป็นชื่อทางการค้าของแผ่นโพลาไรซ์) เป็นตัวอย่างหนึ่งของวัสดุ dichroic (dichroic material) ทำจากสารอินทรีย์ (organic material) ที่มีโมเลกุลเป็นสายยาวคล้ายโครงสร้างดังรูปที่ 2.8แสงที่มีแนวโพลาไรซ์ในทิศขนานกับแนวยาวของโมเลกุลจะถูกดูดกลืน ส่วนแนวโพลาไรซ์ในทิศตั้งฉากกับแนวโมเลกุลจะสามารถผ่านไปได้โดยไม่ถูกดูดกลืน ดังนั้นแสงที่ผ่านโพลาไรซ์จึงมีแนวโพลาไรซ์ตั้งฉากกับแนวยาวของโมเลกุลของแผ่นโพลาไรซ์ จะเรียกแกนที่ตั้งฉากกับแนวโมเลกุลของแผ่นโพลาไรซ์หรือแกนที่ให้แสงโพลาไรซ์ผ่านได้ว่า แกนโพลาไรซ์ (polarizing axis หรือ transmission axis) ดังนั้นแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์จะมีแนวโพลาไรซ์ขนานกับแกนโพลาไรซ์

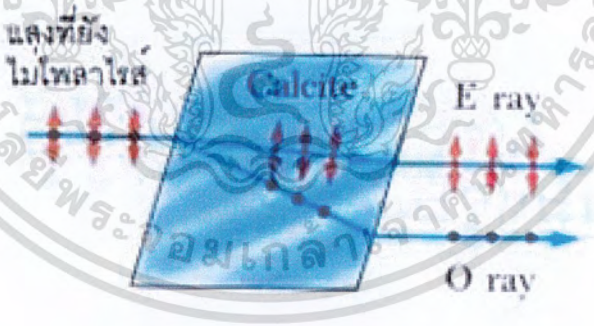
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8แผนภาพแสดงการสร้างแสงโพลาไรซ์โดยการดูดกลืน

2.2.3.3 การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยวัสดุที่สมบัติ double refraction หรือ birefigence

วัสดุบางชนิด เช่น Calcite ($CaCO_3$) และ Quartz (SiO_2) มีคุณสมบัติที่เรียกว่าrefraction หรือ birefigence คือวัสดุมีค่าดัชนีหักเห 2 ค่า เนื่องจากแสงเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางของผลึก เมื่อฉายแสงที่ไม่เป็น โพลาไรซ์เข้าสู้ผลึกของวัสดุเหล่านี้ แสงที่หักเหออกมาจึงเป็นแสงโพลาไรซ์



รูปที่ 2.9 แผนภาพการสร้างโพลาไรซ์ด้วยวัสดุที่มีคุณสมบิ birefigence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.4 การทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์โดยการกระเจิง (Scattering)

การกระเจิงของแสงเกิดจากแสงตกกระทบเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของอากาศ ไอน้ำหรือฝุ่นละอองในอากาศหรือสารแขวนลอยในน้ำที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวของความยาวคลื่นของแสง สนามไฟฟ้าของแสงจะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมเกิดการแกว่งในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่สั่นเหล่านี้จะคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแสงเรียกว่าเกิดการกระเจิงของแสง แสงจะเดินทางออกจากอะตอมในทุกทิศทุกทางที่ตั้งฉากกับการสั่นของอิเล็กตรอนและสนามไฟฟ้าของแสงที่กระเจิงนี้จะมีการแกว่งในทิศทางเดียวกับการสั่นของอิเล็กตรอนด้วย นั่นคือมีทิศทางตั้งฉากกับแสงตกกระทบด้วยเสมอ ดังนั้นแสงที่กระเจิงนี้จึงเป็นแสงโพลาไรซ์ในกรณีที่แสงตกกระทบเป็นแงโพลาไรซ์ แสงที่กระเจิงจะเป็นแสงโพลาไรซ์และมีทิศทางในแกนใดแกนหนึ่งเท่านั้นขึ้นกับแนวโพลาไรซ์ที่ตกกระทบ โดยทิศทางของแสงกระเจิงจะต้องเป็นทิศทางที่ทำให้สนามไฟฟ้าหรือแนวโพลาไรซ์ของแสงที่กระเจิงขนานกับทิศทางของสนามไฟฟ้าหรือแนวโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบเท่านั้น นั้นคือจะมีแสงกระเจิงในทิศที่ตั้งฉากกับแนวโพลาไรซ์ของแสงที่ตกกระทบเท่านั้น

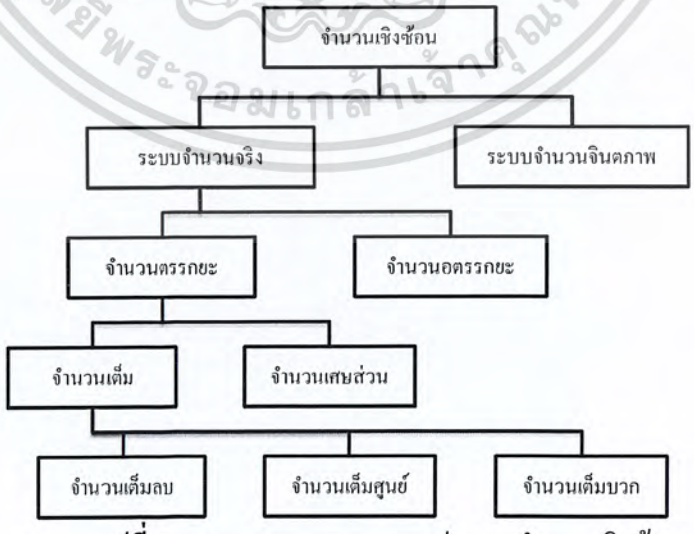
2.3 จำนวนเชิงซ้อน (Complex Number)

ระบบจำนวนเลขเท่าที่มนุษย์คิดค้นพบในขณะนี้ประกอบด้วยเลขจำนวน 2 ระบบ คือ

1.ระบบจำนวนจริง (Real Number System)

2.ระบบจำนวนเชิงซ้อนประเภทจินตภาพ (Imaginary Number System)

สรุปเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



รูปที่ 2.10แผนภาพแสดงการสรุประบบจำนวนเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 จำนวนจินตภาพ (Imaginary Number)

เป็นจำนวนที่เกิดจากนักคณิตศาสตรพยายามแก้ไขปัญหาในค่า x จากสมการ $x^2+1=0$

$$x^2=-1$$

$$x=\sqrt{-1}$$

แต่เนื่องจาก $\sqrt{-1}$ ไม่ใช่จำนวนจริง นักคณิตศาสตร์จึงตั้งชื่อจำนวนจริงลบที่อยู่ในเครื่องหมาย $\sqrt{}$ ว่าจำนวนจินตภาพและใช้สัญลักษณ์ i แทน $\sqrt{-1}$ ดังนั้น

$$i^2=-1$$

2.3.2 จำนวนตรรกยะ (Rational Number)

จำนวนที่สามารถเขียนในรูปเศษส่วน a/b เมื่อ a และ b เป็นจำนวนเต็มโดยที่ $b\neq 0$ จำนวนตรรกยะจำแนกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. จำนวนเต็ม (Integer)
2. เศษส่วน (Fraction)
3. ทศนิยม (Repeating decimal)

2.3.3 จำนวนอตรรกยะ (Irrational Number)

จำนวนที่สามารถเขียนในรูปเศษส่วน a/b เมื่อ a และ b เป็นจำนวนเต็มโดยที่ $b\neq 0$ หรือจำนวนอตรรกยะ คือ จำนวนที่ไม่ใช่จำนวนตรรกยะนั่นเอง จำนวนอตรรกยะจำแนนได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1. จำนวนติดกรณฑ์บางจำนวน เช่น $\sqrt{2},\sqrt{3},\sqrt[4]{5}$ เป็นต้น
2. จำนวนทศนิยมไม่ซ้ำเช่น 5.1811816847352

หมายเหตุ π ซึ่งประมาณได้ด้วย $\frac{22}{7}$ แต่จริงๆแล้ว π เป็นจำนวนอตรรกยะ

สิ่งที่ควรทราบ

$$\sqrt{2}\approx 1.4142135$$

$$\sqrt{3}\approx 1.7320508$$

$$\pi\approx\frac{22}{7}\approx 3.14159$$

$$e\approx 2.71828$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 จำนวนเชิงซ้อน (Complex Number)

เขียนแทนด้วย z โดยที่ $z=(a,b)$ จะได้ว่า $z=a+bi$ เมื่อ $i=\sqrt{-1}$

เรียก a เป็นส่วนจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน z

เรียก b เป็นส่วนจำนวนจินตภาพของจำนวนเชิงซ้อน z

2.3.4.1 การเท่ากันของจำนวนเชิงซ้อน

ให้ $z_1=a+bi$ และ $z_2=c+di$

ดังนั้น $z_1=z_2$ ก็ต่อเมื่อ $a=c, b=d$

2.3.4.2 การบวกจำนวนเชิงซ้อน

ให้ $z_1=a+bi$ และ $z_2=c+di$

ดังนั้น $z_1+z_2=(a+c)+(b+d)i$

2.3.4.3 การลบจำนวนเชิงซ้อน

ให้ $z_1=a+bi$ และ $z_2=c+di$

ดังนั้น $z_1-z_2=(a-c)+(b-d)i$

2.3.4.4 การคูณจำนวนเชิงซ้อน

การคูณจำนวนเชิงซ้อนด้วยจำนวนจริง

ให้ $z=a+bi$ และ k เป็นจำนวนจริง

ดังนั้น $kz=ka+kbi$

การคูนจำนวนเชิงซ้อนด้วยจำนวนเชิงซ้อน

ให้ $z_1=a+bi$ และ $z_2=c+di$

ดังนั้น $z_1z_2=(a+bi)(c+di)=\left[(ac-bd)+(bc+ad)i\right]$

2.3.4.5 การหารจำนวนเชิงซ้อน

ให้ $z_1=a+bi$ และ $z_2=c+di$

ดังนั้น $\dfrac{z_1}{z_2}=\left(\dfrac{ac+bd}{c^2+d^2}\right)+\left(\dfrac{bc-ad}{c^2+d^2}\right)i$

2.3.4.6 คอนจูเกต(Conjugate)จำนวนเชิงซ้อน

ให้ $z=a+bi$ โดยที่ คอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนจะเขียนแทนด้วย $\bar{z}$

ดังนั้น $\bar{z}=a-bi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.6 หารากที่สองของจำนวนเชิงซ้อน

ให้ $z = a + bi$ โดยที่ $b \neq 0$ จะได้

$\sqrt{z} = x + yi$

โดยที่ $x = \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}}$

$y = \text{sgn}(b)\sqrt{\frac{-a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}}$ โดยที่ $sng(b) = \frac{b}{|b|}$

2.3.4.6 ค่าสัมบูรณ์ของจำนวนเชิงซ้อน

ให้ $z = a + bi$

ดังนั้น $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่ 3
ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

เนื่องจาก Visual Basic 2008 ได้รับการออบแบบให้สามารถพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานทำให้ผู้ใช้งานสะดวกต่อการทำงานต่างๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือก Visual Basic 2008 มาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์

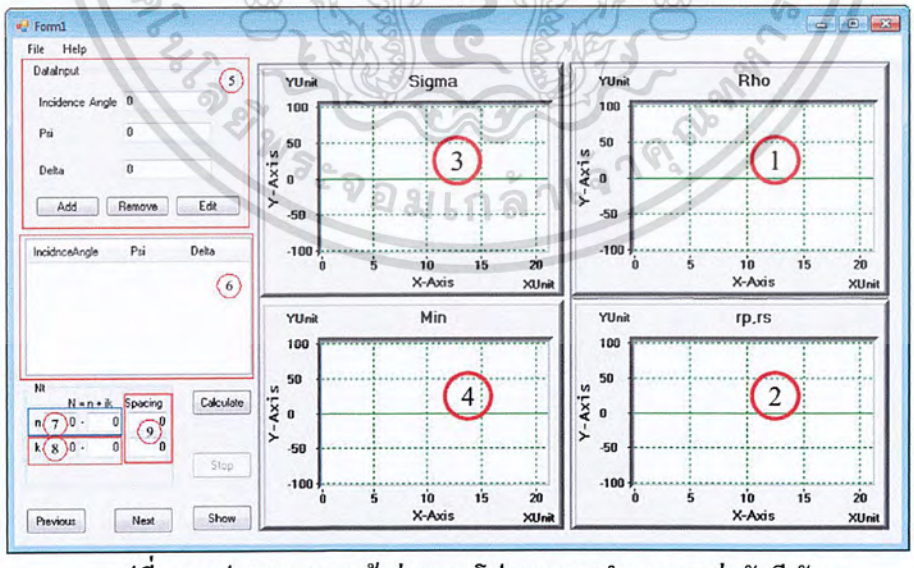
การวิเคราะห์ข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนในงานวิจัยนี้มีแนวทางในการดำเนินงานดังนี้

- ออกแบบหน้าต่างของโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์
- การหาข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์
- สร้างและพัฒนาโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์

- วิเคราะห์ข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน

3.1 การออกแบบของโปรแกรมคำนวนดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์

การออกแบบเพื่อให้ผู้ใช้งานได้มีการใช้งานได้สะดวกในการนำค่าที่ได้ค่าการทดลองมาคำนวนโดยค่าต่างๆจะมีการแบ่งเป็น ψ , Δและมุมตกกระทบ θ_0 โดยหน้าต่างของโปรแกรมจะแสดงดังรูปที่



รูปที่ 3.1 รูปภาพแสดงหน้าต่างของโปรมแกรมคำนวนหาค่าดัชนีหักเห

123375
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

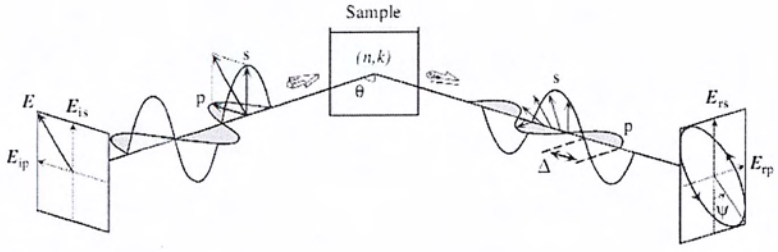
โดย

- หน้าต่างแสดงกราฟที่ 1 แสดงการ plot ของ reflection coefficient (ρ) ที่ได้จากการคำนวนโดยการประมาณค่าในขอบเขตที่กำหนด และ ค่าที่ได้จากค่าที่มาจากการทดลอง
- หน้าต่างแสดงกราฟที่ 2 แสดงการ plot ของค่า R_p และ R_s กับค่าของมุมตกกระทบ θ_i
- หน้าต่างแสดงกราฟที่ 3 แสดงการ plot ของค่า σ กับค่าของดัชนีหักเหที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด
- หน้าต่างแสดงกราฟที่ 4 แสดงการ plot ของของ σ ที่จุดตำสุดที่ได้จากกราฟที่ 3
- หน้าต่างที่ 5 เป็นหน้าต่างที่ใช้ในการรับค่าที่ได้จากการทดลอง
    - Incidenec Angle คือ มุมตกกระทบ
    - Psi คือ ψ
    - delta คือ Δ
    - ปุ่ม Add เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองใส่ในหน้าต่างที่ 6
    - ปุ่ม Remove เพื่อนำค่าที่ไม่ต้องการออกจากหน้าต่างที่ 6
    - ปุ่ม Edit เพื่อการเปลี่ยนแปลงค่าที่ต้องการในหน้าต่างที่ 6
- หน้าต่างที่ 6 หน้าต่างที่แสดงค่าต่างๆ
- ปุ่ม Calculate ทำหน้าที่สั่งให้โปรแกรมทำการคำนวนหาค่าดัชนีหักเห
- ปุ่ม Stop ทำหน้าที่หยุดการทำงานของโปรแกรม
- ปุ่ม Next ทำหน้าที่เลื่อนดูค่ากราฟโดยเลือกค่าไปข้างหน้าโดยจะดูที่กราฟที่ 1 และ 2
- ปุ่ม Previous ทำหน้าที่เลื่อนดูค่ากราฟโดยเลือกค่าย้อนกลับโดยจะดูที่กราฟที่ 1 และ 2
- ปุ่ม Show ทำหน้าที่ดรียกดูค่าดัชนีหักเหเมื่อมีการเลือกดูกราฟจากปุ่ม Next และ Previous

3.2การหาข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์ (Phi (ψ) , Deatal (Δ) , มุมตกกระทบ (θ_i))

ข้อมูลจากอิลลิปโซมิเตอร์เกิดจากการเซตชุดทดลอง Null Ellipsometer ในหัวข้อ 2.1.3 และทำการทดลองตามทฤษฎีของชุดทดลอง Null Ellipsometer จะทำให้ได้ขข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2แผนภาพแสดงแสงโพลาไรซ์ที่มีอยู่ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์จะได้จากการจำลองข้อมูลโดยนำค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน โดยเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวนหาข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์ที่มีซอสโค๊ตดังนี้

```
Thetai = 0:5:90;
Ni = 1.0 + 0i;
Nt = 2.416 + 0.17i;

Nti = Nt/Ni;

rp1 = (Nti^2)*cos(Thetai*pi/180);
rp2 = sqrt( (Nti^2) - (sin(Thetai*pi/180)).^2 );
rs1 = cos(Thetai*pi/180);

rp = (rp1 - rp2)./(rp1 + rp2);
rs = (rs1 - rp2)./(rs1 + rp2);
rho = rp./rs;

delta_rp = (1i)*log(rp./abs(rp))*180/pi+360;
delta_rs = (1i)*log(rs./abs(rs))*180/pi;

for i=1:length(rho)
if real(rho(i))>0
      delta(i) = -atan(imag(rho(i))/real(rho(i)))*180/pi;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

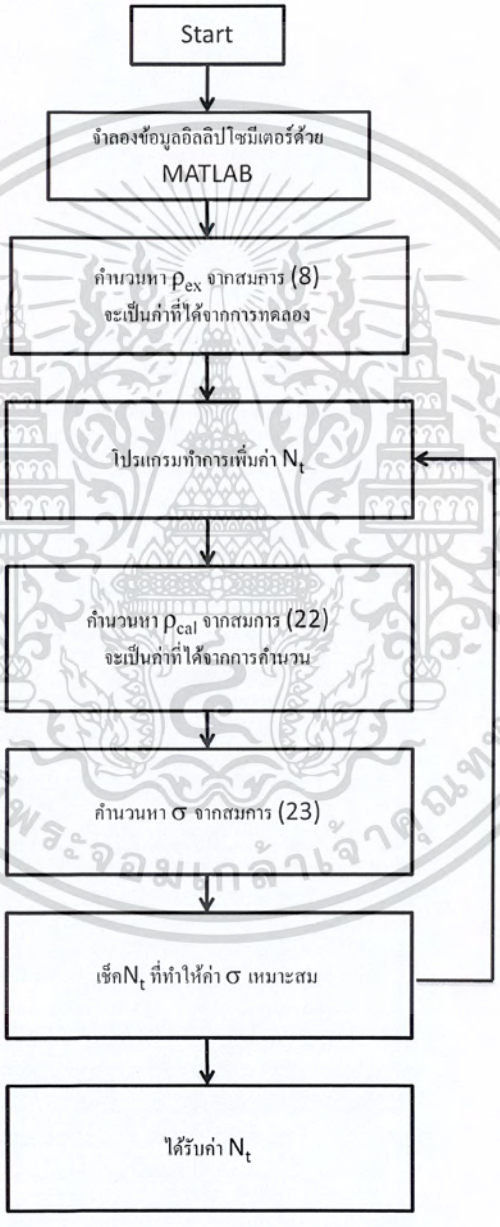
```
elseif real(rho(i))<0
if imag(rho(i))>=0
        delta(i) = -atan(imag(rho(i))/real(rho(i)))*180/pi - 180;
else
        delta(i) = -atan(imag(rho(i))/real(rho(i)))*180/pi + 180;
end
elseif real(rho)==0
      delta(i) = 0;
end
end

psi = atan(rho./exp(-1i*delta*pi/180))*180/pi;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สร้างและพัฒนาโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์

การเขียนโปรแกรมคำนวนด้วยภาษา Visual Basic 2008 เพื่อช่วยให้การหาคำนวนหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่มีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนด้วยการพัฒนารูปหาการประมวลผลจำนวนเชิงซ้อนเพื่อให้ระบบการคำนวนหาค่าดัชนีหักเหที่เป็นค่าเชิงซ้อน โดยที่ระบบการทำงานของโปรแกรมเพื่อคำนวนหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการเขียนโปรแกรมเพื่อหาดัชนีหักเหของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1วิเคราะห์ข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์เพื่อหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน

เมื่อได้รับข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์จากหัวข้อ 3.3 กระบวนการนี้ทำการแทนค่าในสมการ (21) แล้วคำนวนเพื่อหาอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนที่ได้จากการทดลอง (ρ_{ex}) และใช้ระบบการคำนวนด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยมีสมการ (22) เพื่อหาอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนที่ได้จากการคำนวนจากการคำนวนโปรแกรม (ρ_{cal}) และนำค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนที่ได้จากการทดลองและอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรมมาแทนในสมการสมการ (23) เพื่อหาค่าเบี่ยงเบน (σ) เมื่อได้ค่าเบี่ยงเบนมาทำการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการมินิไมซ์เซชั่น จะทำให้พบว่าค่าที่ต่ำที่สุดของ

$$\rho_{ex} = \tan\psi e^{i\Delta} \tag{21}$$

$$\rho_{cal} = \frac{R_p}{R_s} = \left[\frac{\left(N_t/N_i\right)^2\cos\theta_i - \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}{\left(N_t/N_i\right)^2\cos\theta_i + \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}\right]\left[\frac{\cos\theta_i + \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}{\cos\theta_i - \left[\left(N_t/N_i\right)^2 \sin^2\theta_i\right]^{1/2}}\right] \tag{22}$$

โดย ψ คือ ค่ามุมที่ได้จากการปรับอนาไลเซอร์

Δ คือ ค่าเฟสของแสงที่เปลี่ยนเมื่อสะท้อนผ่านจากตัวอย่างที่ทำการวัด

n_i คือ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ

n_t คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างที่ทำการวัด

θ_i คือ มุมตกกระทบ

R_p คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน p-polarized

R_s คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน s-polarized

$$\sigma^2 = \frac{\sum[\rho_{ex} - \rho_{cal}]^2}{M - P - 1} \tag{23}$$

โดย M คือ Number of data point

P คือ Number of parameter

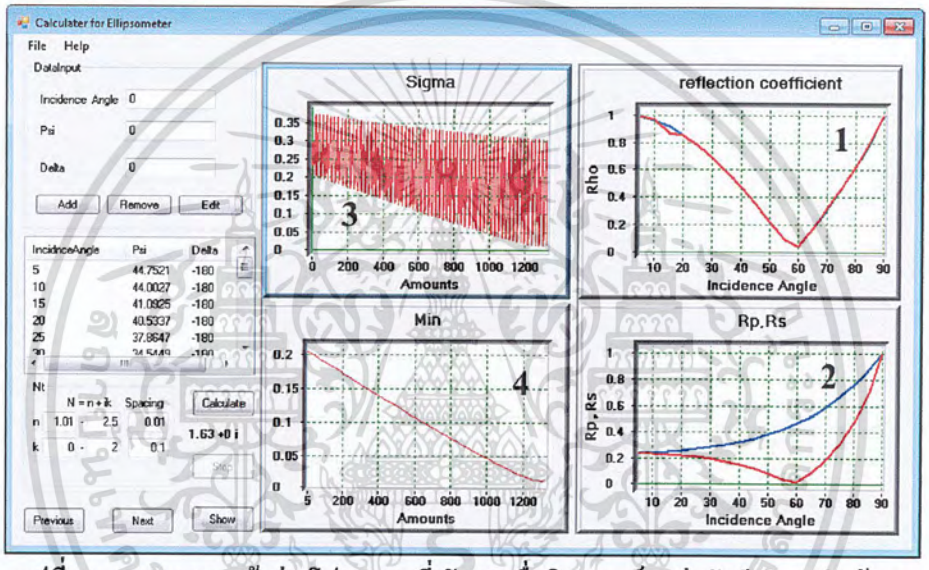
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลการพัฒนาโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้องมูลอิลลิปโซมิทรี

4.1.1 หน้าต่างโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลอิลลิปโซมิทรี

โปรแกรมมี 1 หน้าต่างมีกราฟแสดงผล 4 กราฟมีชุดรองรับข้อมูลจากการทดลองหรือข้อมูลที่จำลองโดย MATLAB โดยจะมีการรับข้อมูลได้แก่ มุมตกกระทบ Psi (ψ) และ Delta (Δ)



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงหน้าต่างโปรแกรมที่พัฒนาเพื่อวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน

กราฟหมายเลข 1 คือ กราฟแสดงอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน $(\rho = Rho = R_r / R_s)$

- เส้นสีแดงคือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากการทดลองหรือจากการจำลอง

- เส้นสีน้ำเงินคือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม

กราฟหมายเลข 2 คือ กราฟแสดงกราฟ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized

- เส้นสีแดงคือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ P-Polarized
- เส้นสีน้ำเงินคือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ S-Polarized

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟหมายเลข 3 คือ กราฟแสดงลักษณะกราฟค่าเบี่ยงเบนของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (σ)

กราฟหมายเลข 4 คือ กราฟแสดงลักษณะกราฟค่าเบี่ยงเบนของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนที่ต่ำสุด (σ_{min})

4.1.2 ซอสโค๊ต Visual Basic 2008 ที่ใช้ในการประมวลผลจำนวนเชิงซ้อนในคอมพิวเตอร์

การประมวลผลจำนวนเชิงซ้อนเพื่อที่ช่วยในการคำนวนสมการที่เกี่ยวข้องกับของค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน $N = n \pm ki$ โดยใน Visual Basic 2008 ไม่ได้สามารถประมวลผลได้ จึงมีการพัฒนาซอสโค๊ตเพื่อทำให้การประมวลผลในส่วนของจำนวนเชิงซ้อนได้ โดยมีซอสโค๊ตดังนี้

```
Structure ComplexNumber
Public Real AsDouble
Public Imaginary AsDouble

PublicSubNew(ByVal realPart AsDouble, ByVal imaginaryPart AsDouble)
Me.Real = realPart
Me.Imaginary = imaginaryPart
EndSub

PublicSubNew(ByVal sourceNumber As ComplexNumber)
Me.Real = sourceNumber.Real
Me.Imaginary = sourceNumber.Imaginary
EndSub

PublicSubNew(ByVal sourceString AsString)
Dim j AsInteger
Try
        j = InStr(sourceString, " ") - 1
'Me.Real = CDbl(Left(sourceString, j))
Me.Real = CDbl(sourceString.Substring(0, j))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'Me.Imaginary = _
'    CDbl(Mid(sourceString, j + 1, InStr(sourceString, "i") - (j + 1)))
Me.Imaginary = CDbl(sourceString.Substring(j, j + 1))
Catch
Me.Real = 0.0
Me.Imaginary = 0.0
            MsgBox("Invalid complex number format!"& Environment.NewLine
&"The correct format is a + bi"& Environment.NewLine &"where a and b are
numbers.")
EndTry
EndSub


PublicOverridesFunction ToString() AsString
If Imaginary < 0 Then
Return Real &" "& Imaginary &" i"
Else
Return Real &" +"& Imaginary &" i"
EndIf
EndFunction


PublicSharedOperator +(ByVal a As ComplexNumber, ByVal b As
ComplexNumber) As ComplexNumber
' -- add two complex numbers
ReturnNew ComplexNumber(a.Real + b.Real, a.Imaginary + b.Imaginary)
EndOperator


PublicSharedOperator -(ByVal a As ComplexNumber, ByVal b
AsComplexNumber) As ComplexNumber
' -- subtract one complex numbers from another
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ReturnNew ComplexNumber(a.Real - b.Real, _
                        a.Imaginary - b.Imaginary)
EndOperator

PublicSharedOperator *(ByVal a As ComplexNumber, ByVal b As
ComplexNumber) As ComplexNumber
' -- multiply two complex numbers
ReturnNew ComplexNumber(a.Real * b.Real - a.Imaginary * b.Imaginary,
a.Real * b.Imaginary + a.Imaginary * b.Real)
EndOperator

PublicSharedOperator /(ByVal a As ComplexNumber, ByVal b As
ComplexNumber) As ComplexNumber
' -- divide two complex numbers
Return a * Reciprocal(b)
EndOperator

PublicSharedFunction Reciprocal( _
ByVal a As ComplexNumber) As ComplexNumber
' -- return the reciprocal of a complex number
Dim divisor AsDouble
' -- check for divide by zero
        divisor = a.Real * a.Real + a.Imaginary * a.Imaginary
If (divisor = 0.0#) ThenThrowNew DivideByZeroException
' -- perform the operation
ReturnNew ComplexNumber(a.Real / divisor, _
                        a.Imaginary / divisor)
EndFunction

PublicSharedFunction Absolute(ByVal a As ComplexNumber) AsDouble
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Return Math.Sqrt((a.Real ^ 2) + (a.Imaginary ^ 2))
EndFunction

PublicSharedFunction SquareRoot(ByVal a As ComplexNumber) As
ComplexNumber
If a.Imaginary = 0 Then
        a.Real = Math.Sqrt(a.Real)
ReturnNew ComplexNumber(a.Real, a.Imaginary)
Else
Dim AB AsDouble
Dim SqrtAB AsDouble
Dim BSqAB AsDouble
Dim BSq2 AsDouble
Dim SqrtBSq2 AsDouble
        AB = (a.Real * a.Real) + (a.Imaginary * a.Imaginary)
        SqrtAB = Math.Sqrt(AB)
        BSqAB = (a.Real * (-1)) + SqrtAB
        BSq2 = BSqAB / 2
        SqrtBSq2 = Math.Sqrt(BSq2)
        a.Real = Math.Sqrt((a.Real + Math.Sqrt((a.Real ^ 2) + (a.Imaginary ^
2))) / 2)
        a.Imaginary = (a.Imaginary / Math.Abs(a.Imaginary)) * SqrtBSq2
ReturnNew ComplexNumber(a.Real, a.Imaginary)
EndIf

EndFunction
EndStructure
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการจำลองข้อมูลอิลลิปโซมิทรีด้วยโปรแกรม MATLAB

เพื่อทำการทดสอบโปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์ ในงานวิจัยครั้งนี้จึงเขียนโปรแกรม MATLAB มาเพื่อจำลองข้อมูลอิลลิปโซมีทรี โดยมี Psi หรือ Phi (ψ) Delta (Δ) และมุมตกกระทบ (θ_i) ด้วยการนำค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนมาทำการจำลองข้อมูล โดยค่าของดัชนีหักเหเชิงซ้อนที่ใช้ในงานวิจัยได้จากตาราง

ตารางค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของแต่ละธาตุ จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข [1]

	n	k
Aluminum	1.39	1.51
Aluminum Oxide	1.76	
Aluminum Nitride	2.11	
Amorphous silicon	4.23	0.461
Cadmium Sulfide	2.416	0.17
Cadmium Telluride	0.625	2.87
Carbon (non cubic)	2.7	0.584
Chrome ?	3.465	1.163
Copper	2.43	3.46
Diamond	2.41	(at 656.3 nm)
GaAs Native Oxide	1.8	
Gallium Antimonide	5.145	1.1
Gallium Arsenide	3.856	0.196
Gallium Nitride	1.97	
Gallium Phosphide	3.31	
Germanium	5.441	0.785
Glass	1.5	
Gold	0.166	3.15
Hafnium Oxide	1.9	
Indium Antimonide	4.313	1.823
Indium Arsenide	3.956	0.603
Indium Nitride	2.9	0
Indium Phosphide	3.533	0.305
Indium Tin Oxide	1.8	
Iridium	2.53	4.6
Lead Sulfide	0.62	4.29
Lithium Floride	1.391	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 – 4 คือ ข้อมูลอิลิลปโซมิทรีที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีค่าของดัชนีหักเหเชิงซ้อนในแต่ละตารางโดย

ตารางที่ 4.1ตารางแสดงข้อมูลอิลลิปโซมีทรีที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Aluminum Oxide ที่มีค่าของดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.76 + 0i

มุมตกกระทบ (θ_i)	Psi (ψ)	Delta (Δ)
0	-	-
5	44.7515	-180
10	43.9984	-180
15	42.7187	-180
20	40.8758	-180
25	38.4202	-180
30	35.2925	-180
35	31.4300	-180
40	26.7786	-180
45	21.3114	-180
50	15.0516	-180
55	8.0935	-180
60	0.6082	-180
65	7.1795	0
70	15.0400	0
75	22.7983	0
80	30.3629	0
85	37.7382	0
90	45	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2ตารางแสดงข้อมูลอิลลิปโซมีทรีที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Aluminum ที่มีค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.39 + 1.51i

มุมตกกระทบ (θ_i)	Psi (ψ)	Delta (Δ)
0	-	-
5	44.8560	179.6865
10	44.4236	178.7384
15	43.7021	177.1317
20	42.6909	174.8238
25	41.5021	171.7488
30	39.9083	167.8101
35	38.1235	162.8678
40	35.9790	156.7215
45	34.0004	149.0861
50	31.5829	139.5678
55	29.0609	127.7790
60	27.2999	112.8960
65	26.5480	95.1300
70	27.0609	75.1565
75	29.5867	54.6649
80	33.6810	35.1797
85	38.9291	17.1307
90	45	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3ตารางแสดงข้อมูลอิลลิปโซมีทรีที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Lithium Floride ที่มีค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.391 + 0i

มุมตกกระทบ (θ_i)	Psi (ψ)	Delta (Δ)
0	-	-
5	44.7523	-180
10	43.5619	-180
15	42.1284	-180
20	39.6230	-180
25	36.5418	-180
30	32.4381	-180
35	27.4512	-180
40	21.3912	-180
45	14.5184	-180
50	6.8323	-180
55	1.1400	0
60	9.0323	0
65	16.5014	0
70	23.4567	0
75	29.4821	0
80	35.0243	0
85	40.1268	0
90	45	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4ตารางแสดงข้อมูลอิลลิปโซมีทรีที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ของ Cadmium Sulfide ที่มีค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 2.416 + 0.17i

มุมตกกระทบ (θ_i)	Psi (ψ)	Delta (Δ)
0	-	-
5	44.8199	179.9746
10	44.2757	179.8975
15	43.3547	179.7655
20	42.0359	179.5729
25	40.2893	179.3100
30	38.0754	178.9618
35	35.3449	178.5033
40	32.0389	177.8915
45	28.0897	177.0461
50	23.4242	175.7969
55	17.9714	173.7090
60	11.6877	169.2433
65	4.7640	150.8287
70	4.7508	29.6585
75	13.5311	9.4246
80	23.4597	4.5207
85	34.0560	1.9495
90	45	0

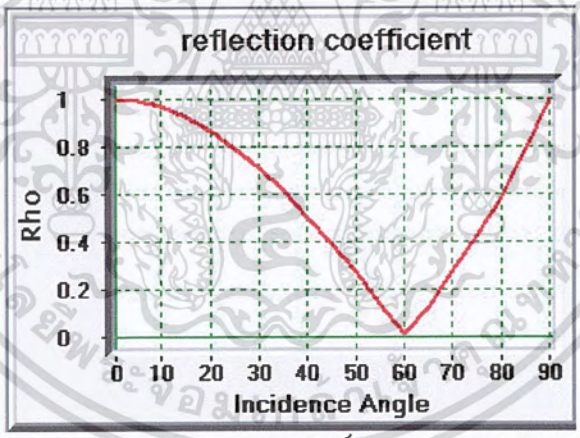
ในงานวิจัยครั้งนี้จะนำข้อมูลในตารางที่ 1 – 4 ไปใช้ในการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานโปรแกรมหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลอิลลิปโซมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อดูประสิทธิภาพการทำงานและความแม่นยำในการหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองใช้โปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลที่จำลองไว้ใน 4.2 โดยไม่มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

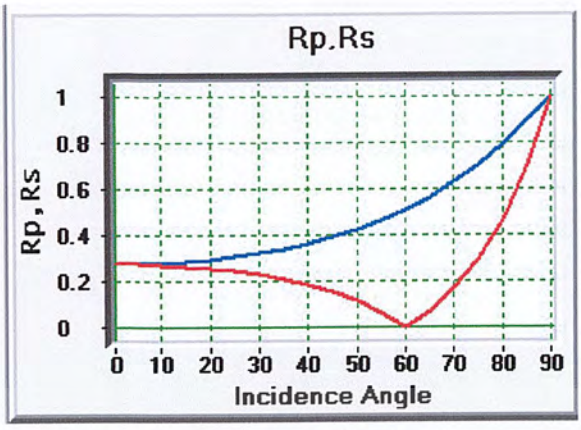
4.3.1 ผลการทดลองจากข้อมูลของ Aluminum Oxide

ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Aluminum Oxide ในตารางที่ 4.1 **รูปที่ 4.2** ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 60° **รูปที่ 4.3**ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 60° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.76 + 0i มีค่าเท่ากับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Aluminum Oxide ที่นำมาใช้



รูปที่ 4.2ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Aluminum Oxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

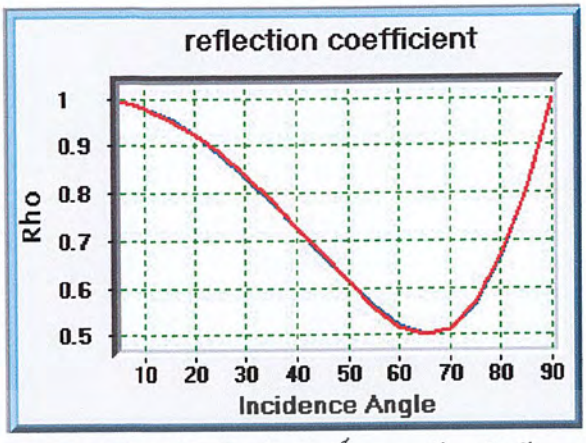


รูปที่ 4.3ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum Oxide

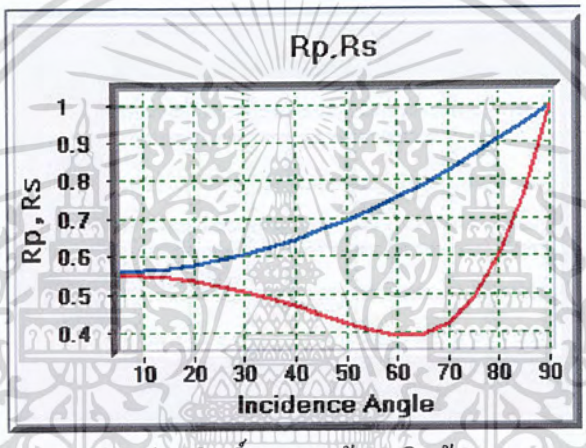
4.3.2 ผลการทดลองจากข้อมูลของ Aluminum

ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Aluminum ในตารางที่ 4.2 **รูปที่ 4.4**ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.2 เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 65° **รูปที่ 4.5** ภาพแสดงกราฟแสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 65° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.39 + 1.51iมีค่าเท่ากับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Aluminum ที่นำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Aluminum



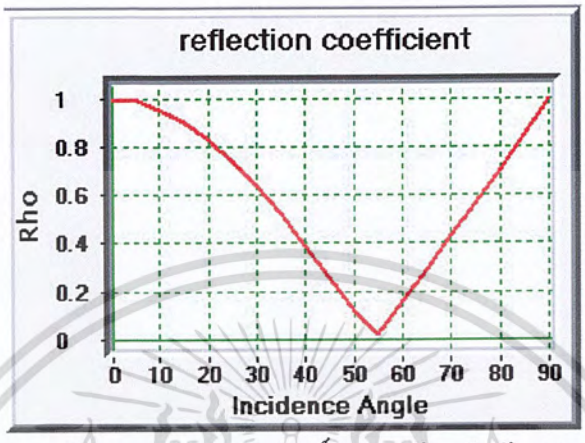
รูปที่ 4.5ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum

4.3.3 ผลการทดลองจากข้อมูลของ Lithium Floride

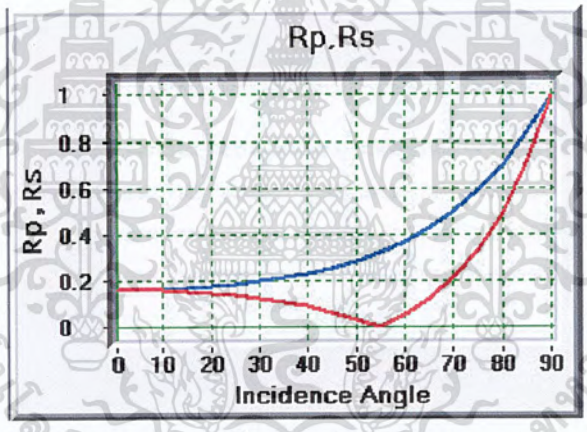
ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Lithium Floride ในตารางที่ 4.3 **รูปที่ 4.6**ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 55° **รูปที่ 4.7** ภาพแสดงกราฟแสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 55° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.39 + 0i มีค่าเท่ากับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของLithium Floride ที่นำมาใช้



รูปที่ 4.6ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Lithium Floride



รูปที่ 4.7ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Lithium Floride

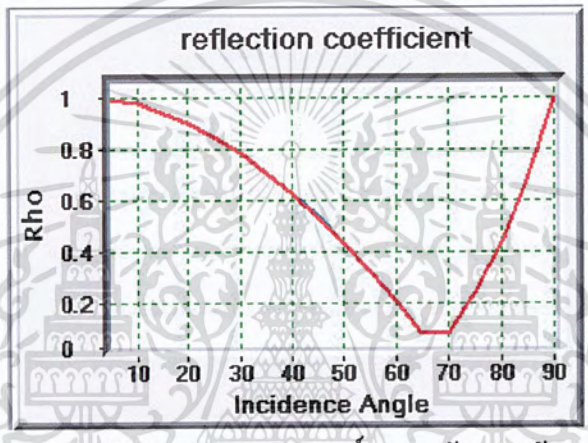
4.3.4 ผลการทดลองจากข้อมูลของ Cadmium Sulfide

ผลการทดลองใช้โปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธีมินิไมซ์เซชั่น (minimization) จากข้อมูลของ Cadmium Sulfide ในตารางที่ 4.4 ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.8** ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำ

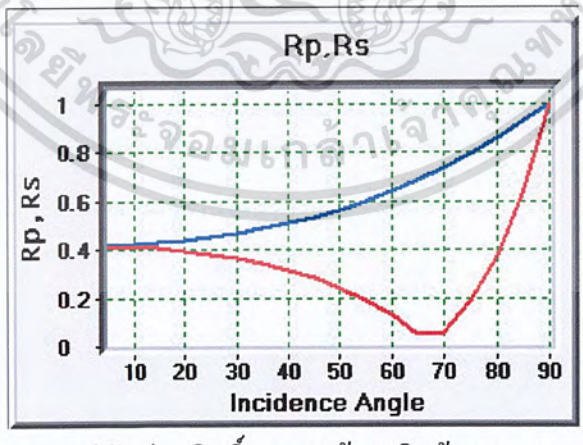
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่าระหว่าง 65°–70° **รูปที่ 4.9**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟแสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าระหว่าง 65°–70° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 2.42 + 0.17i มีค่าเท่ากับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Cadmium Sulfide ที่นำมาใช้

พิจารณาที่มุมบูสเตอร์ของผลการทดลอง มีได้อยู่ระหว่าง 65°–70° เพราะข้อมูลที่จำลองขึ้นไม่ได้ประมาณช่วงที่อยู่ระหว่างมุมตกกระทบของข้อมูลป้อนเข้า (Input)



รูปที่ 4.8ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Cadmium Sulfide



รูปที่ 4.9ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Cadmium Sulfide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

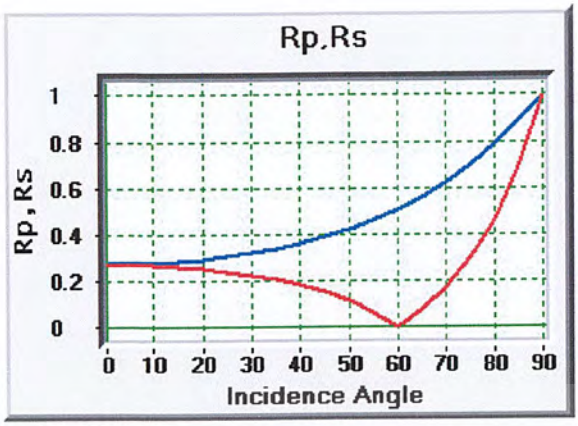
4.4 ผลการทดลองใช้โปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลที่จำลองไว้ใน 4.2 โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ใช้ 5%

4.4.1 ผลการทดลองจากข้อมูลของAluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%

ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Aluminum Oxide ในตารางที่ 4.1 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 5% ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.10** ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 5% เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 60° **รูปที่ 4.11**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 60° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน $1.76 + 0i$ มีค่าเท่ากับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Aluminum Oxide ที่นำมาใช้

รูปที่ 4.10ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Aluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

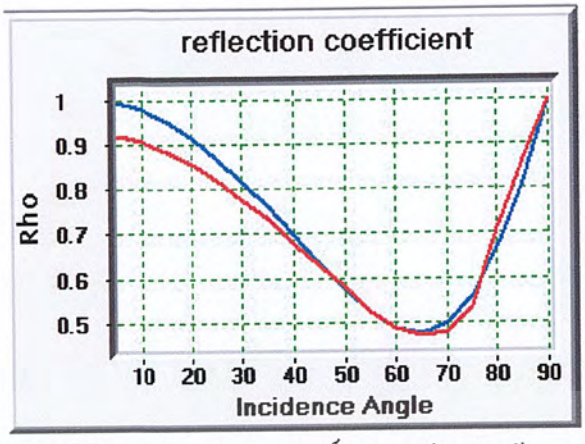


รูปที่ 4.11ภาพแสดงกราฟกสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5 %

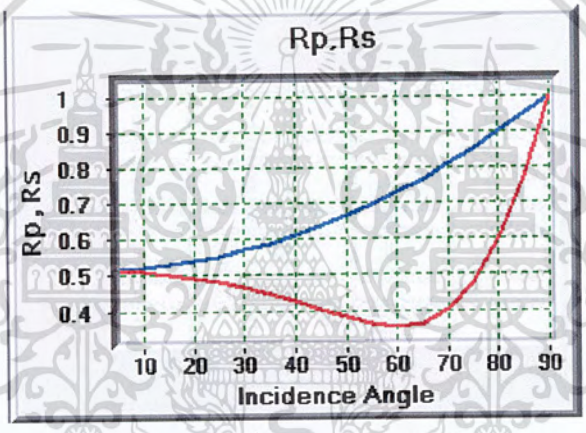
4.4.2 ผลการทดลองจากข้อมูลของAluminum ที่มีความคลาดเคลื่อน 5 %

ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Aluminum ในตารางที่ 4.2 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 5% ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.12** ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.2 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 5% เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 65° **รูปที่ 4.13**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 65° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.38 + 1.37i มีคลาดเคลื่อนกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Aluminum ที่นำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Aluminum ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%



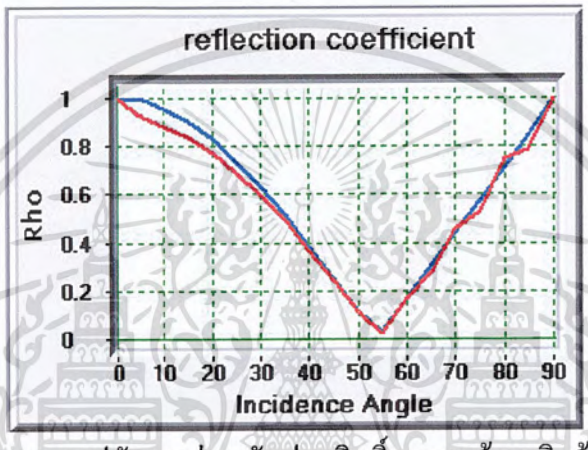
รูปที่ 4.13ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%

4.4.3 ผลการทดลองจากข้อมูลของLithium Floride**ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%**

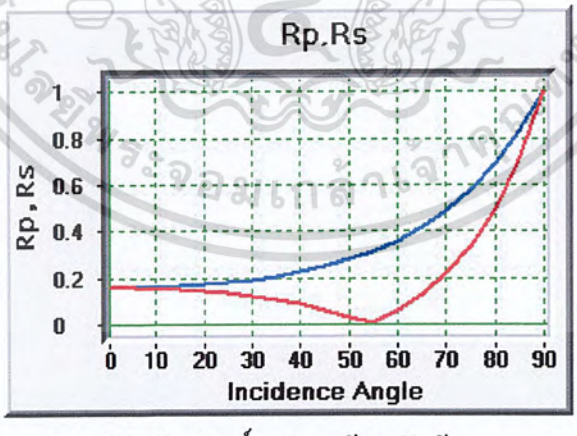
ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Lithium Floride ในตารางที่ 4.3 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 5% ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.14** ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 5% เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 55° **รูปที่ 4.15**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 55° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.38 + 0i มีคลาดเคลื่อนกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Lithium Floride ที่นำมาใช้



รูปที่ 4.14ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Lithium Floride ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%



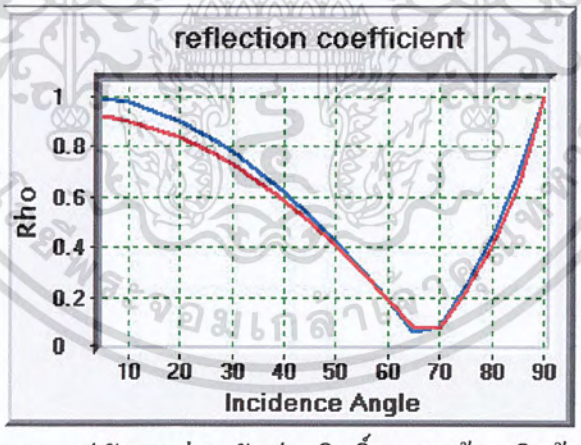
รูปที่ 4.15ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Lithium Floride ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลการทดลองจากข้อมูลของCadmium Sulfide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%

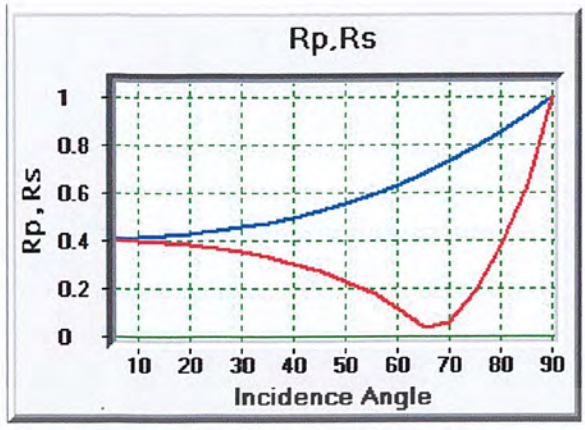
ผลการทดลองใช้โปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธีมินิไมซ์เซชั่น (minimization) จากข้อมูลของ Cadmium Sulfide ในตารางที่ 4.4 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 5% ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.16**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 5% เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่าระหว่าง $65^\circ - 70^\circ$**รูปที่ 4.17**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟแสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าระหว่าง $65^\circ - 70^\circ$ และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 2.37 + 1i มีค่าคลาดเคลื่อนกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Cadmium Sulfide ที่นำมาใช้

พิจารณาที่มุมบูสเตอร์ของผลการทดลอง มีได้อยู่ระหว่าง $65^\circ - 70^\circ$เพราะข้อมูลที่จำลองขึ้นไม่ได้ประมาณช่วงที่อยู่ระหว่างมุมตกกระทบของข้อมูลป้อนเข้า (Input)



รูปที่ 4.16ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Cadmium Sulfide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



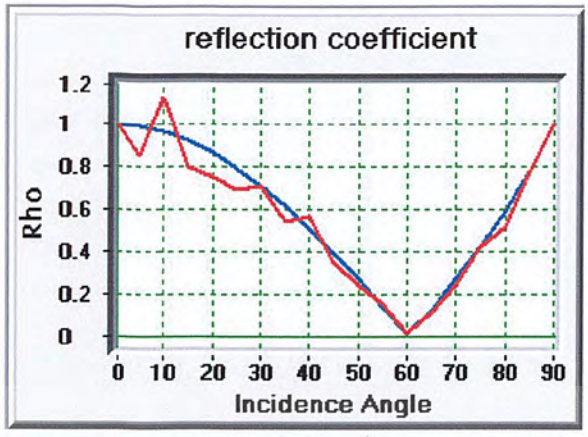
รูปที่ 4.17ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Cadmium Sulfide ที่มีความคลาดเคลื่อน 5%

4.5 ผลการทดลองใช้โปรแกรมหาดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลที่จำลองไว้ใน 4.2 โดยมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ใช้ 10%

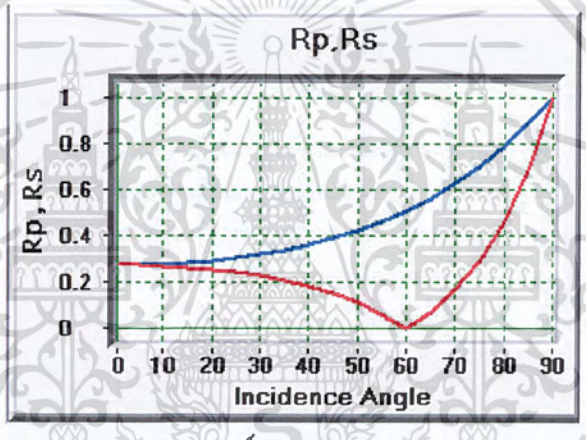
4.5.1 ผลการทดลองจากข้อมูลของAluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%

ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Aluminum Oxide ในตารางที่ 4.1 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 10% ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.18** ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 10% เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 60° **รูปที่ 4.19**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 60° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.72 + 0i มีคลาดเคลื่อนกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Aluminum Oxide ที่นำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Aluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%



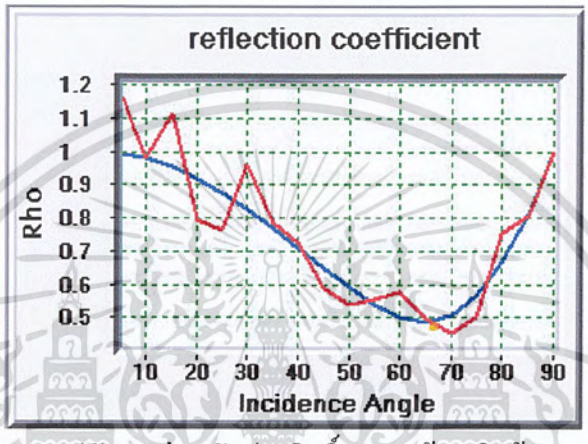
รูปที่ 4.19ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum Oxide ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%

4.5.2 ผลการทดลองจากข้อมูลของAluminum ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%

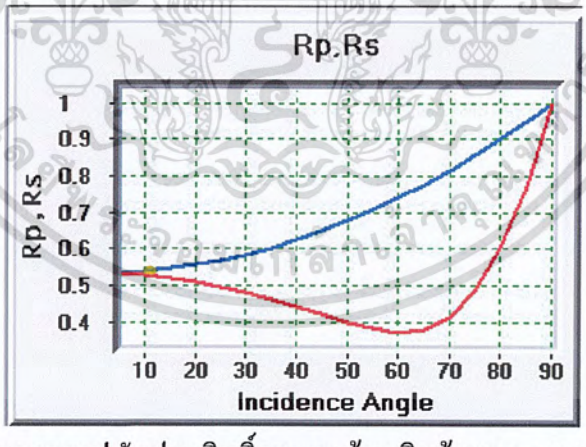
ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Aluminum ในตารางที่ 4.2 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 10% ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.20** ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.2 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 10% เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 60° **รูปที่ 4.21**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 60° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.35 + 1.4i มีคลาดเคลื่อนกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Aluminum ที่นำมาใช้



รูปที่ 4.20ภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Aluminum ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%

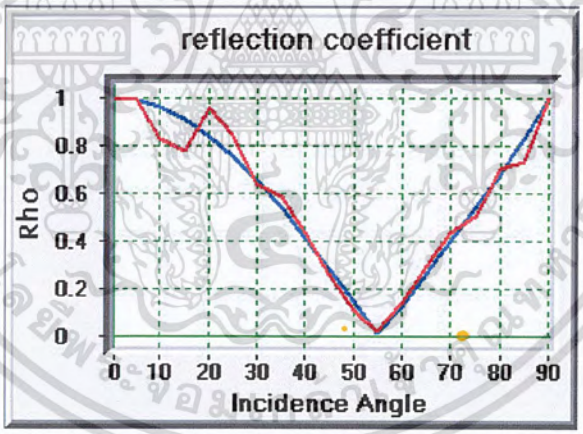


รูปที่ 4.21ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Aluminum มีความ คลาดเคลื่อน 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

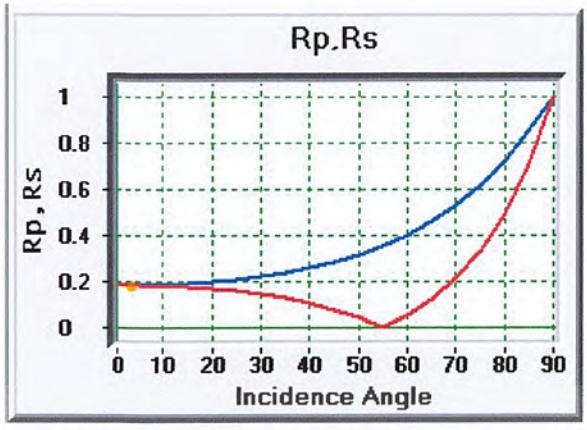
4.5.3 ผลการทดลองจากข้อมูลของ Lithium Floride ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%

ผลการทดลองโปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธี minimization จากข้อมูลของ Lithium Floride ในตารางที่ 4.3 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 10% ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.22** ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex}) ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 และมีการผสมความคลาดเคลื่อน 10% เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal}) ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่า 55° **รูปที่ 4.23**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าเป็น 55° และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 1.45 + 0i มีคลาดเคลื่อนกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Lithium Floride ที่นำมาใช้



รูปที่ 4.22ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Lithium Floride ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



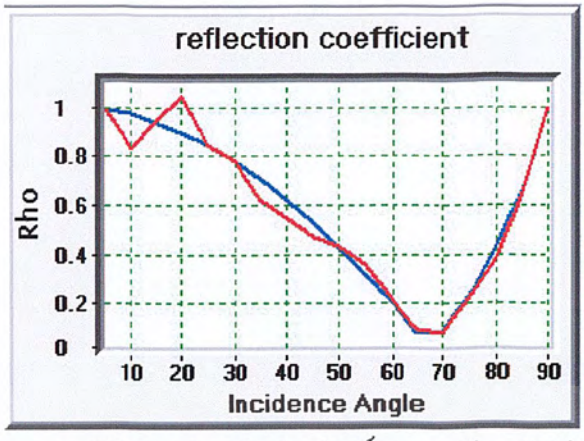
รูปที่ 4.23ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Lithium Floride มีความ คลาดเคลื่อน 10%

4.5.4 ผลการทดลองจากข้อมูลของ Cadmium Sulfide ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%

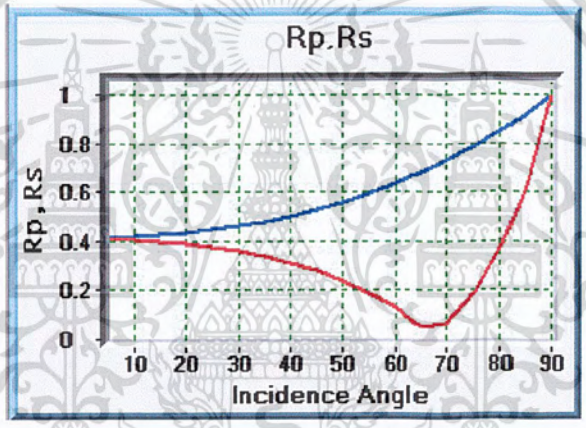
ผลการทดลองใช้โปรแกรมคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนด้วยวิธีมินิไมซ์เซชั่น (minimization) จากข้อมูลของ Cadmium Sulfide ในตารางที่ 4.4 ผลการจำลองใน **รูปที่ 4.24**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนโดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{ex})ที่ได้จากการคำนวนค่าที่มาจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 เส้นสีน้ำเงิน คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (ρ_{cal})ที่ได้จากการคำนวนด้วยโปรแกรม และจุดที่ต่ำสุดของกราฟทั้ง 2 เส้นในรูปจะทำให้ทราบถึงค่ามุมบูสเตอร์ที่ทีค่าระหว่าง $65°-70°$ **รูปที่ 4.25**ซึ่งคือภาพแสดงกราฟแสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อน P-Polarized และ S-Polarized โดยมีทั้งหมด 2 เส้น เส้นสีแดง คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน P-Polarized เส้นสีน้ำเงิน คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน S-Polarized ที่จุดต่ำสุดของเส้นสีแดงจะทำให้ทราบถึงค่าของมุมบูสเตอร์ที่มีค่าระหว่าง $65°-70°$ และผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน 2.40 + 1.5i มีคลาดเคลื่อนกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนของ Cadmium Sulfide ที่นำมาใช้

พิจารณาที่มุมบูสเตอร์ของผลการทดลอง มีได้อยู่ระหว่าง $65°-70°$เพราะข้อมูลที่จำลองขึ้นไม่ได้ประมาณช่วงที่อยู่ระหว่างมุมตกกระทบของข้อมูลป้อนเข้า (Input)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24ภาพแสดงกราฟอัตตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนของ Cadmium Sulfide ที่มีความคลาดเคลื่อน 10%



รูปที่ 4.25ภาพแสดงกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนชิงซ้อนของ P-Polarized และ S-Polarized ของ Cadmium Sulfide มีความ คลาดเคลื่อน 10%

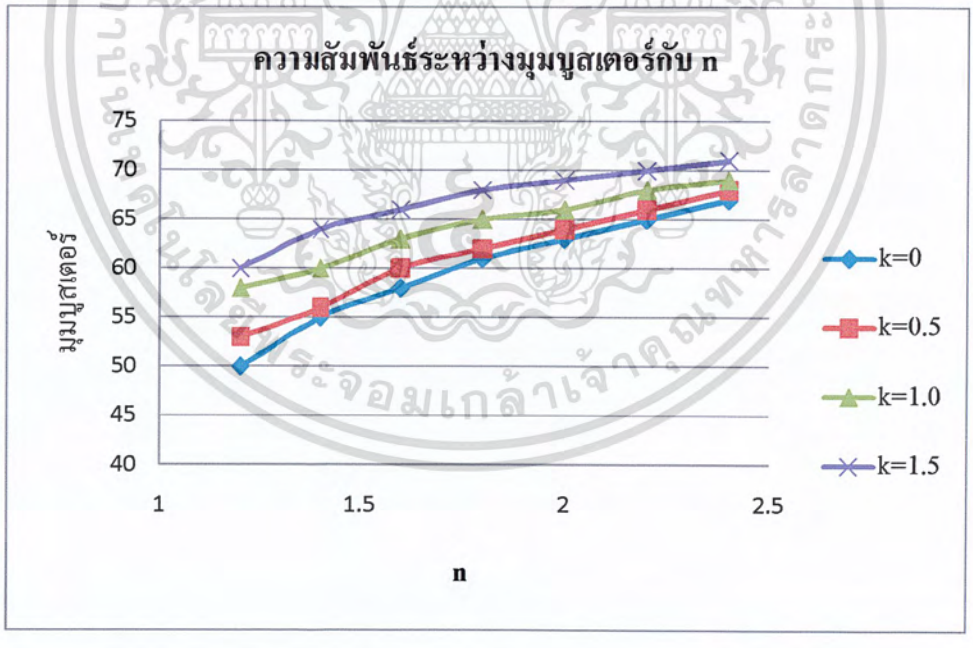
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของมุมบูสเตอร์และสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน

4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n

ตารางที่ 4.5ตารางความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 1°

N	มุมบูสเตอร์(องศา)			
	k=0	k=0.5	k=1.0	k=1.5
1.2	50	53	58	60
1.4	55	56	60	64
1.6	58	60	63	66
1.8	61	62	65	68
2	63	64	66	69
2.2	65	66	68	70
2.4	67	68	69	71

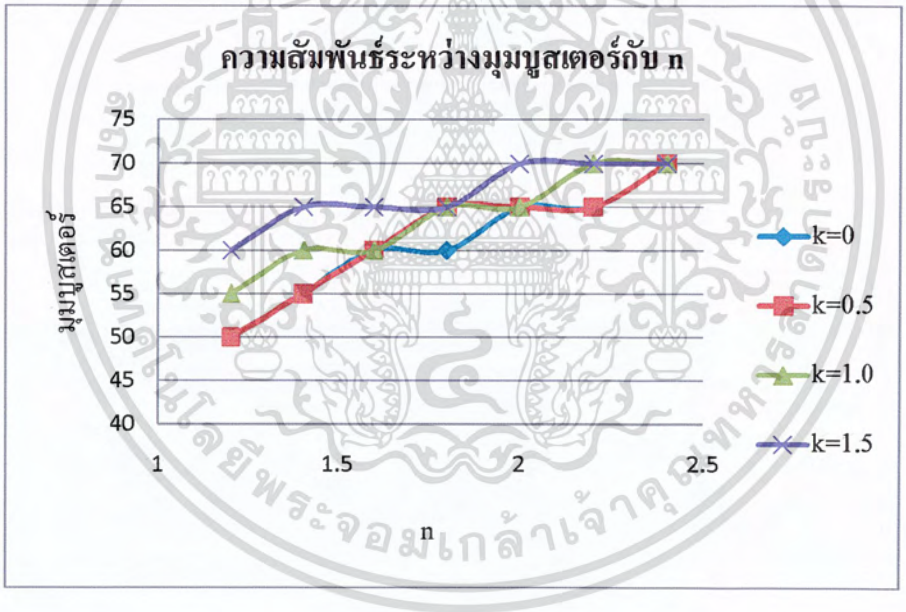


กราฟที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 1°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6ตารางความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 5°

N	มุมบูสเตอร์(องศา)			
	k=0	k=0.5	k=1.0	k=1.5
1.2	50	50	55	60
1.4	55	55	60	65
1.6	60	60	60	65
1.8	60	65	65	65
2	65	65	65	70
2.2	65	65	70	70
2.4	70	70	70	70



กราฟที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 5°

พิจารณาจากกราฟที่ 1และ 2 จะเห็นว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเพิ่มขึ้นแต่มีบางช่วงคงที่ การที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

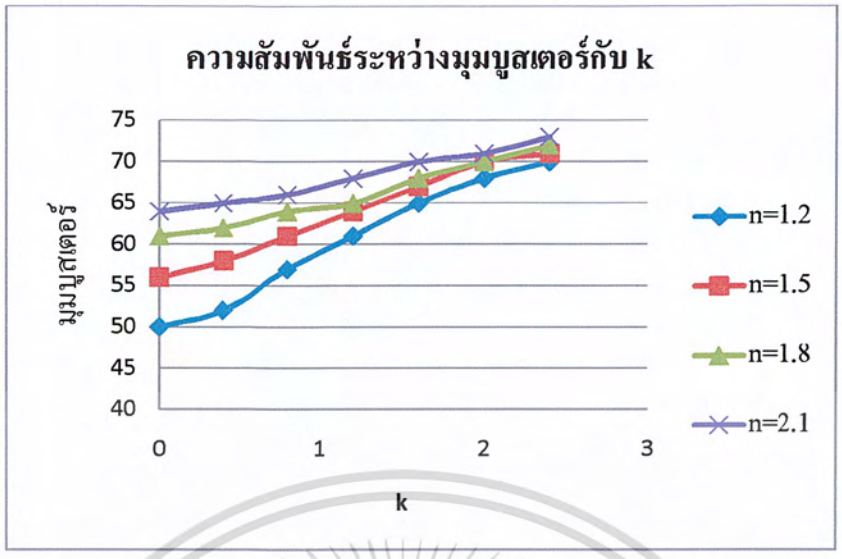
แบบไม่ต่อเนื่องนั้นเกิดจากการที่กำหนดมุมตกกระทบที่ไม่ละเอียดพอสังเกตได้กราฟว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับช่วงของมุมตกกระทบทุกๆ1° สำหรับกราฟที่ 1 และ 5° สำหรับกราฟที่ 2 สามารถแก้ไขได้โดยที่ซอฟต์แวร์ต้องสามารถคำนวนในช่วงมุมตกกระทบที่ผู้ใช้ไม่ได้ป้อนได้อาจจะมีความละเอียดเป็น 1° หรือต่ำกว่า

4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k

ตารางที่ 4.7ตารางความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 1°

K	มุมบูสเตอร์(องศา)			
	n=1.2	n=1.5	n=1.8	n=2.1
0	50	56	61	64
0.4	52	58	62	65
0.8	57	61	64	66
1.2	61	64	65	68
1.6	65	67	68	70
2	68	70	70	71
2.4	70	71	72	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

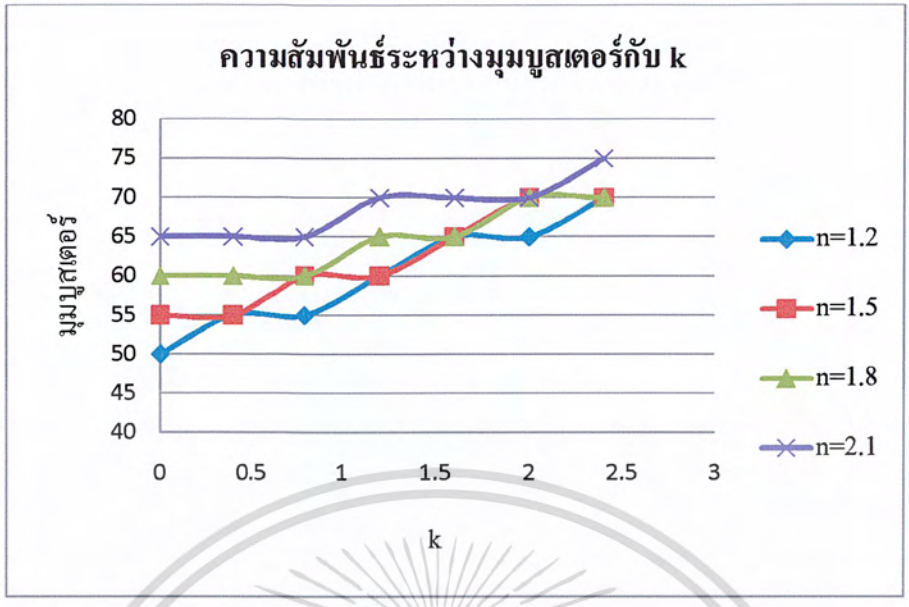


กราฟที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 1°

ตารางที่ 4.8ตารางความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 5°

K	มุมบูสเตอร์(องศา)			
	n=1.2	n=1.5	n=1.8	n=2.1
0	50	55	60	65
0.4	55	55	60	65
0.8	55	60	60	65
1.2	60	60	65	70
1.6	65	65	65	70
2	65	70	70	70
2.4	70	70	70	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 5°

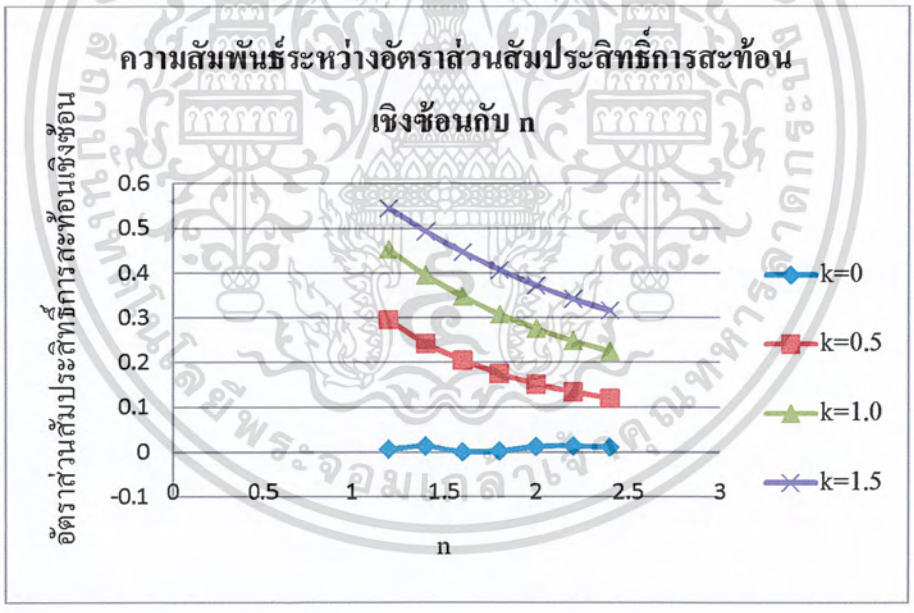
พิจารณาจากกราฟที่ 3 และ 4 จะเห็นว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเพิ่มขึ้นแต่มีบางช่วงคงที่ การที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ต่อเนื่องนั้นเกิดจากการที่กำหนดมุมตกกระทบที่ไม่ละเอียดพอสังเกตได้กราฟว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับช่วงของมุมตกกระทบทุกๆ 1° สำหรับกราฟที่ 3 และ 5° สำหรับกราฟที่ 4 สามารถแก้ไขได้โดยที่ซอฟต์แวร์ต้องสามารถคำนวนในช่วงมุมตกกระทบที่ผู้ใช้ไม่ได้ป้อนได้อาจจะมีความละเอียดเป็น 1° หรือต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ n

ตารางที่ 4.9ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 1°

N	อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน			
	k=0	k=0.5	k=1.0	k=1.5
1.2	0.006	0.295	0.453	0.545
1.4	0.013	0.242	0.395	0.493
1.6	0	0.205	0.348	0.447
1.8	0.002	0.175	0.308	0.407
2	0.012	0.151	0.276	0.372
2.2	0.013	0.134	0.249	0.342
2.4	0.011	0.12	0.225	0.316

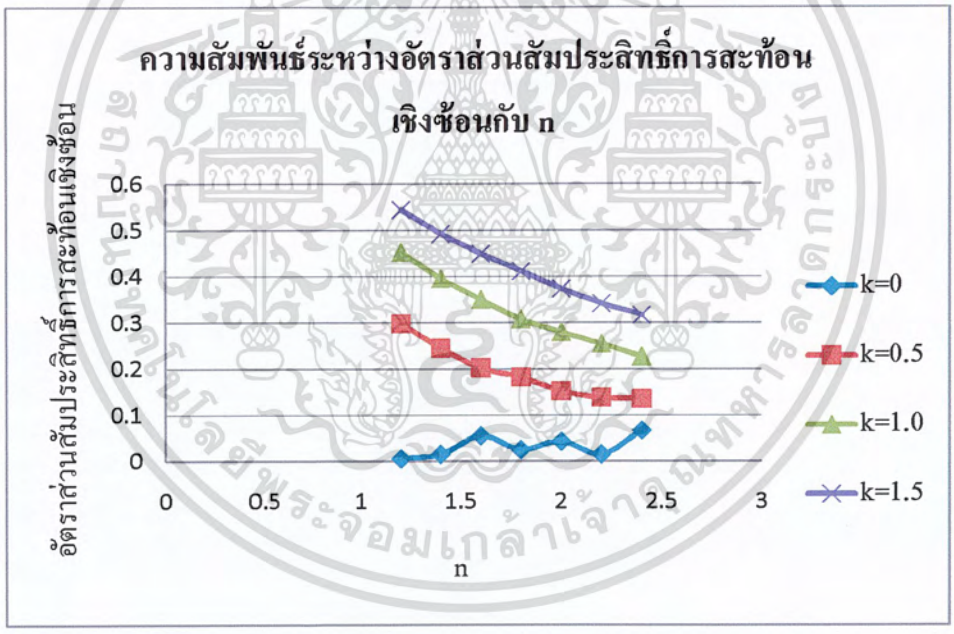


กราฟที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 1°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระไปครั้งหละ 5°

N	อัตราส่วนสัมประสิทธ์การสะท้อนเชิงซ้อน			
	k=0	k=0.5	k=1.0	k=1.5
1.2	0.006	0.298	0.453	0.545
1.4	0.015	0.245	0.396	0.493
1.6	0.055	0.202	0.351	0.45
1.8	0.025	0.182	0.308	0.412
2	0.043	0.152	0.28	0.374
2.2	0.015	0.138	0.255	0.342
2.4	0.067	0.135	0.227	0.317



กราฟที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ n ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 5°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

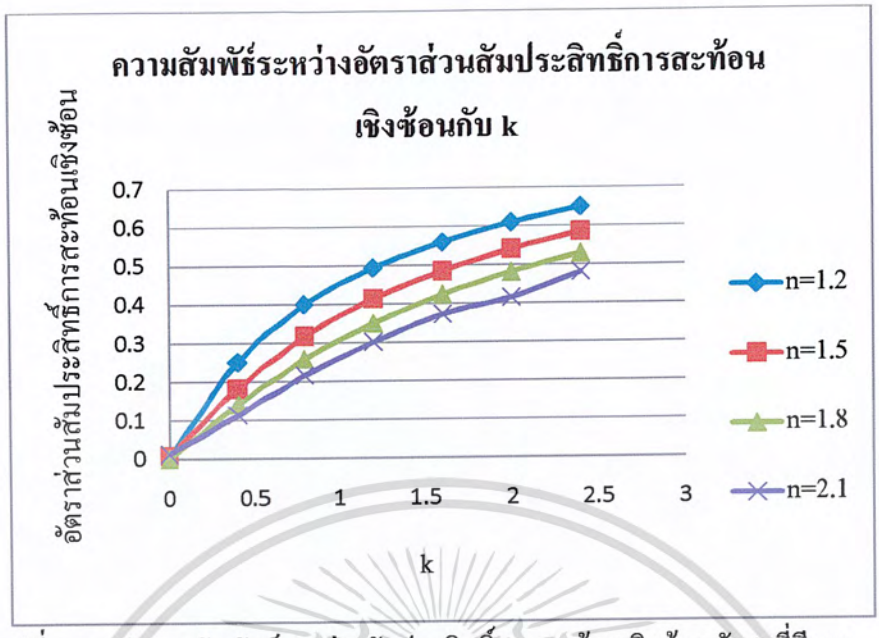
พิจารณาจากกราฟที่ 5 และ 6 จะเห็นว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงโดยค่าของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การะสะท้อนเชิงซ้อนจะลดลงเมื่อค่า n เพิ่ม การที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ต่อเนื่องหรือเป็นแบบ Linear นั้นเกิดจากการที่กำหนดมุมตกกระทบที่ไม่ละเอียดพอสังเกตได้กราฟว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับช่วงของมุมตกกระทบทุกๆ 1° สำหรับกราฟที่ 5 และ 5° สำหรับกราฟที่ 6 สามารถแก้ไขได้โดยที่ซอฟต์แวร์ต้องสามารถคำนวนในช่วงมุมตกกระทบที่ผู้ใช้ไม่ได้ป้อนได้อาจจะมีความละเอียดเป็น 1° หรือต่ำกว่า

4.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ k

ตารางที่ 4.11ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 1°

K	อัตราส่วนสัมประสิทธ์การสะท้อนเชิงซ้อน			
	n=1.2	n=1.5	n=1.8	n=2.1
0	0.006	0.008	0.001	0.013
0.4	0.251	0.182	0.141	0.114
0.8	0.401	0.318	0.259	0.217
1.2	0.494	0.414	0.351	0.302
1.6	0.56	0.485	0.424	0.373
2	0.61	0.541	0.482	0.416
2.4	0.65	0.586	0.53	0.481

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

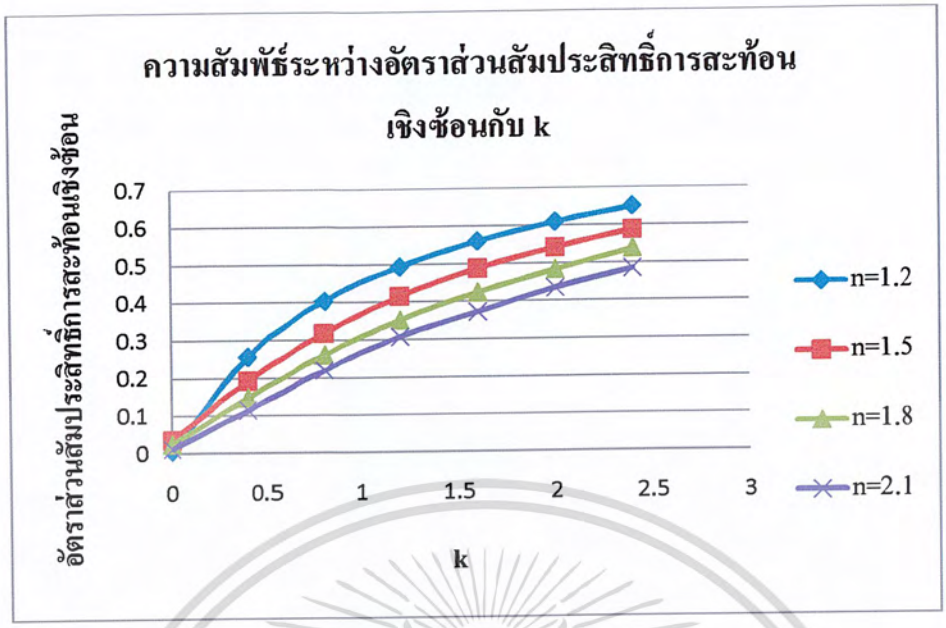


กราฟที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 1°

ตารางที่ 4.12ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 5°

K	อัตราส่วนสัมประสิทธ์การสะท้อนเชิงซ้อน			
	n=1.2	n=1.5	n=1.8	n=2.1
0	0.006	0.036	0.025	0.013
0.4	0.256	0.193	0.148	0.114
0.8	0.404	0.318	0.261	0.22
1.2	0.494	0.415	0.353	0.308
1.6	0.56	0.488	0.425	0.373
2	0.61	0.542	0.483	0.435
2.4	0.65	0.588	0.538	0.485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับ k ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบไปครั้งหละ 5°

พิจารณาจากกราฟที่ 7 และ 8 จะเห็นว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงโดยค่าของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การะสะท้อนเชิงซ้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า k เพิ่ม การที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ต่อเนื่องหรือเป็นแบบ Linear นั้นเกิดจากการที่กำหนดมุมตกกระทบที่ไม่ละเอียดพอสังเกตได้กราฟว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับช่วงของมุมตกกระทบทุกๆ 1° สำหรับกราฟที่ และ 5° สำหรับกราฟที่ คสามารถแก้ไขได้โดยที่ซอฟต์แวร์ต้องสามารถคำนวนในช่วงมุมตกกระทบที่ผู้ใช้ไม่ได้ป้อนได้อาจจะมีความละเอียดเป็น 1° หรือต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและพัฒนาโปรแกรมสำหรับคำนวนค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจากข้อมูลจากเครื่องอิลลิปโซมีเตอร์ด้วยภาษา Visual Basic โดย

- การศึกษาทฤษฎี Ellipsometry
- การศึกษากฎการสะท้อนของ Fresnel
- ภาษา Visual Basic

การศึกษากฎการสะท้อนของ Fresnel ทำให้ได้สมการ(14) เป็นสมการของ Fresnel ที่ให้ในการหาค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน และหาอัตราส่วนการสะท้อนเชิงซ้อนเพื่อใช้ในการหาดัชนีหักเหเชิงซ้อน

การออกแบบโปรแกรมจะใช้วิธีการขยับค่าของดัชนีหักเหเชิงซ้อนโดยเราจะจำกัดขอบเขตของดัชนีหักเหเชิงซ้อนและดูค่าเบี่ยงเบนของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (σ) โดยค่าเบี่ยงเบนของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (σ) นั้นจะมีค่าเข้าสู่ศูนย์โดยเมื่อค่าดัชนีหักเหที่ทำให้ค่าเบี่ยงเบนของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (σ) สุดท้ายที่เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดนั้นจะเป็นค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนที่เราต้องการจากการทดลอง ในการทดลองที่นำข้อมูลทีทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB มาใช้ร่วมกับโปรแกรมคำนวนหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน จะได้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนที่คำนวนได้ตรงกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนในตารางที่
1 – 4 และเมื่อมีการนำข้อมูลในตารางที่ 1 – 4 มาทำการใส่ค่าความคลาดเคลื่อนเข้าไปจะพบว่าค่าของ ดัชนีหักเหเชิงซ้อนที่ได้จากการทดลองมีการคลาดเคลื่อน

จากการทดลองโปรแกรมจะพบว่า โปรแกรมจะมีแนวโน้มในการให้ค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนโดยการดูกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่าเบี่ยงเบนของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (σ) โดยจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อถึงจุดที่เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดแล้วนั้นก็จะสามารถทราบค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนได้ และกราฟของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนและกราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ P-Polarized และ S-Polarized เมื่อเรา พิจารณากราฟทั้ง 2 จะพบว่า ที่จุดต่ำสุดของกราฟนั้นจะแสดงถึงมุมบูสเตอร์ในแต่หละค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มของค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน $N_t = n + ki$ นั้น การเปลี่ยนแปลงของ nจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนนั้นน้อยมาก ส่วนการเปลี่ยนแปลงของ kจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนนั้นมากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของ n

แนวโน้มของค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมบูสเตอร์กับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน $N_t = n + ki$ นั้น การเปลี่ยนแปลงของ kจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของมุมบูสเตอร์นั้นน้อยมาก ส่วนการเปลี่ยนแปลงของ nจะมีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของมุมบูสเตอร์นั้นมากกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของ k

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

โปรแกรมสามารถใช้ในการหาดัชนีเชิงซ้อนด้วยข้อมูลอิลลิปโซมิทรีที่จำลองมาจากโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนที่ได้มานั้นจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าของดัชนีหักเหเชิงซ้อนที่อ้างอิงมา โดยผลของค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะคลาดเคลื่อนเนื่องจากความละเอียดของช่วงในมุมตกกระทบที่ละเอียดไม่เพียงพอ

จากการทดลองนั้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างมุมบูสเตอร์กับดัชนีหักเหเชิงซ้อนนั้นจะเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนกับดัชนีหักเหเชิงซ้อนจะเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดของช่วงมุมตกกระทบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนามีดังนี้

- ควรที่จะเพิ่มความสามารถในการคำนวนหาค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนในช่วงมุมตก กระทบที่ผู้ใช้ไม่ได้ป้อนเข้าไป
- ควรพัฒนาระบบมินิไมซ์เซชั่นที่ครอบคลุมกับดัชนีหักเหเชิงซ้อนที่มีค่า k มากๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา. ออปโตอิเล็กทรอนิกส์(Optoelectronics)

Hiroyuki Fujiwara. 2007. **Spectroscopic Ellipsometry Principles and Applications.** England. John Wiley & Sons Ltd.

Harland G. Tompkins and Eugene A Irene. 2005. **Handbook of Ellipsometry**. United States of America. William Andrew Publishing

R.M.A. AZZAM and N.M.BASHARA. 1997. **Ellipsometry and polarized light.** Netherlands. NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY

Dennis Goldstein. 2003. **Polarized Light Second Edition, Revised and Expanded.** United States of America. Marcel Dekker, Inc.

http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%88%E0%B8%B3%E0%B8%99%E0%B8%A7%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%8A%E0%B8%B4%E0%B8%87%E0%B8%8B%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Imports System.Collections
Imports System.Windows.Forms

Public Class ListViewColumnSorter
    Implements IComparer
    Public Enum SortOrder
        Ascending
        Descending
    End Enum

    Private mSortColumn As Integer
    Private mSortOrder As SortOrder

    Public Sub New(ByVal sortColumn As Integer, ByVal
sortOrder As SortOrder)
        mSortColumn = sortColumn
        mSortOrder = sortOrder
    End Sub

    Public Function Compare(ByVal x As Object, ByVal y As
Object) As Integer Implements
System.Collections.IComparer.Compare
        Dim Result As Integer
        Dim ItemX As ListViewItem
        Dim ItemY As ListViewItem
        ItemX = CType(x, ListViewItem)
        ItemY = CType(y, ListViewItem)
        If mSortColumn = 0 Then
            Result = DateTime.Compare(CType(ItemX.Text,
DateTime), CType(ItemY.Text, DateTime))
        Else
            Result =
DateTime.Compare(CType(ItemX.SubItems(mSortColumn).Text,
DateTime), CType(ItemY.SubItems(mSortColumn).Text, DateTime))
        End If

        If mSortOrder = SortOrder.Descending Then
            Result = -Result
        End If
        Return Result
    End Function
End Class

Public Class ListViewStringSort
    Implements IComparer
    Private mSortColumn As Integer
    Private mSortOrder As SortOrder

    Public Sub New(ByVal sortColumn As Integer, ByVal
sortOrder As SortOrder)
        mSortColumn = sortColumn
        mSortOrder = sortOrder
    End Sub

    Public Function Compare(ByVal x As Object, ByVal y As
Object) As Integer Implements
System.Collections.IComparer.Compare
        Dim Result As Integer
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Dim ItemX As ListViewItem
        Dim ItemY As ListViewItem
        ItemX = CType(x, ListViewItem)
        ItemY = CType(y, ListViewItem)
        If mSortColumn = 0 Then
            Result = ItemX.Text.CompareTo(ItemY.Text)
        Else
            Result =
ItemX.SubItems(mSortColumn).Text.CompareTo(ItemY.SubItems(mSor
tColumn).Text)
        End If
        If mSortOrder = SortOrder.Descending Then
            Result = -Result
        End If
        Return Result
    End Function
End Class

Public Class ListViewNumericSort
    Implements IComparer
    Private mSortColumn As Integer
    Private mSortOrder As SortOrder

    Public Sub New(ByVal sortColumn As Integer, ByVal
sortOrder As SortOrder)
        mSortColumn = sortColumn
        mSortOrder = sortOrder
    End Sub

    Public Function Compare(ByVal x As Object, ByVal y As
Object) As Integer Implements
System.Collections.IComparer.Compare
        Dim Result As Integer
        Dim ItemX As ListViewItem
        Dim ItemY As ListViewItem
        ItemX = CType(x, ListViewItem)
        ItemY = CType(y, ListViewItem)
        If mSortColumn = 0 Then
            Result = Decimal.Compare(CType(ItemX.Text,
Decimal), CType(ItemY.Text, Decimal))
        Else
            Result =
Decimal.Compare(CType(ItemX.SubItems(mSortColumn).Text,
Decimal), CType(ItemY.SubItems(mSortColumn).Text, Decimal))
        End If
        If mSortOrder = SortOrder.Descending Then
            Result = -Result
        End If
        Return Result
    End Function
End Class

Public Class ListViewDateSort
    Implements IComparer
    Private mSortColumn As Integer
    Private mSortOrder As SortOrder
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Public Sub New(ByVal sortColumn As Integer, ByVal
sortOrder As SortOrder)
        mSortColumn = sortColumn
        mSortOrder = sortOrder
    End Sub

    Public Function Compare(ByVal x As Object, ByVal y As
Object) As Integer Implements
System.Collections.IComparer.Compare
        Dim Result As Integer
        Dim ItemX As ListViewItem
        Dim ItemY As ListViewItem
        ItemX = CType(x, ListViewItem)
        ItemY = CType(y, ListViewItem)
        If mSortColumn = 0 Then
            Result = DateTime.Compare(CType(ItemX.Text,
DateTime), CType(ItemY.Text, DateTime))
        Else
            Result =
DateTime.Compare(CType(ItemX.SubItems(mSortColumn).Text,
DateTime), CType(ItemY.SubItems(mSortColumn).Text, DateTime))
        End If
        If mSortOrder = SortOrder.Descending Then
            Result = -Result
        End If
        Return Result
    End Function

End Class
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Imports System.IO
Imports System.Text


Public Class Form1
    Structure ComplexNumber
        Public Real As Double
        Public Imaginary As Double

        Public Sub New(ByVal realPart As Double, ByVal
imaginaryPart As Double)
            Me.Real = realPart
            Me.Imaginary = imaginaryPart
        End Sub

        Public Sub New(ByVal sourceNumber As ComplexNumber)
            Me.Real = sourceNumber.Real
            Me.Imaginary = sourceNumber.Imaginary
        End Sub

        Public Sub New(ByVal sourceString As String)
            Dim j As Integer
            Try
                j = InStr(sourceString, " ") - 1
                'Me.Real = CDbl(Left(sourceString, j))
                Me.Real = CDbl(sourceString.Substring(0, j))
                'Me.Imaginary = _
                '    CDbl(Mid(sourceString, j + 1,
InStr(sourceString, "i") - (j + 1)))
                Me.Imaginary = CDbl(sourceString.Substring(j,
j + 1))
            Catch
                Me.Real = 0.0
                Me.Imaginary = 0.0
                MsgBox("Invalid complex number format!" &
Environment.NewLine & "The correct format is a + bi" &
Environment.NewLine & "where a and b are numbers.")
            End Try
        End Sub


        Public Overrides Function ToString() As String
            If Imaginary < 0 Then
                Return Real & " " & Imaginary & " i"
            Else
                Return Real & " +" & Imaginary & " i"
            End If
        End Function

        Public Shared Operator +(ByVal a As ComplexNumber,
ByVal b As ComplexNumber) As ComplexNumber
            ' -- add two complex numbers
            Return New ComplexNumber(a.Real + b.Real,
a.Imaginary + b.Imaginary)
        End Operator

        Public Shared Operator -(ByVal a As ComplexNumber,
ByVal b As ComplexNumber) As ComplexNumber
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            ' -- subtract one complex numbers from another
            Return New ComplexNumber(a.Real - b.Real, _
                                     a.Imaginary -
b.Imaginary)
        End Operator

        Public Shared Operator *(ByVal a As ComplexNumber,
ByVal b As ComplexNumber) As ComplexNumber
            ' -- multiply two complex numbers
            Return New ComplexNumber(a.Real * b.Real -
a.Imaginary * b.Imaginary, a.Real * b.Imaginary + a.Imaginary
* b.Real)
        End Operator

        Public Shared Operator /(ByVal a As ComplexNumber,
ByVal b As ComplexNumber) As ComplexNumber
            ' -- divide two complex numbers
            Return a * Reciprocal(b)
        End Operator

        Public Shared Function Reciprocal( _
            ByVal a As ComplexNumber) As ComplexNumber
            ' -- return the reciprocal of a complex number
            Dim divisor As Double
            ' -- check for divide by zero
            divisor = a.Real * a.Real + a.Imaginary *
a.Imaginary
            If (divisor = 0.0#) Then Throw New
DivideByZeroException
            ' -- perform the operation
            Return New ComplexNumber(a.Real / divisor, _
                                     a.Imaginary / divisor)
        End Function

        Public Shared Function Absolute(ByVal a As
ComplexNumber) As Double

            Return Math.Sqrt((a.Real ^ 2) + (a.Imaginary ^ 2))
        End Function

        Public Shared Function SquareRoot(ByVal a As
ComplexNumber) As ComplexNumber
            If a.Imaginary = 0 Then
                a.Real = Math.Sqrt(a.Real)
                Return New ComplexNumber(a.Real, a.Imaginary)
            Else
                Dim AB As Double
                Dim SqrtAB As Double
                Dim BSqAB As Double
                Dim BSq2 As Double
                Dim SqrtBSq2 As Double
                AB = (a.Real * a.Real) + (a.Imaginary *
a.Imaginary)
                SqrtAB = Math.Sqrt(AB)
                BSqAB = (a.Real * (-1)) + SqrtAB
                BSq2 = BSqAB / 2
                SqrtBSq2 = Math.Sqrt(BSq2)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                a.Real = Math.Sqrt((a.Real + Math.Sqrt((a.Real
^ 2) + (a.Imaginary ^ 2))) / 2)
                a.Imaginary = (a.Imaginary /
Math.Abs(a.Imaginary)) * SqrtBSq2
                Return New ComplexNumber(a.Real, a.Imaginary)
            End If

        End Function

    End Structure

    Structure StrucInputData
        Dim Psi() As Double
        Dim Delta() As Double
        Dim RhoComplex() As ComplexNumber
        Dim RhoAbsolute() As Double
        Dim IncidenceAngle() As Double
        Dim CRho As DYNAPLOT3Lib.Curve

    End Structure

    Structure StrucFresnelData
        Dim Complexrp() As ComplexNumber
        Dim Complexrs() As ComplexNumber
        Dim Complexrho() As ComplexNumber
        Dim absrp() As Double
        Dim absrs() As Double
        Dim absRho() As Double
        Dim CComplexrp As DYNAPLOT3Lib.Curve
        Dim CComplexrs As DYNAPLOT3Lib.Curve
        Dim CRho As DYNAPLOT3Lib.Curve
    End Structure

    Dim FresnelData() As StrucFresnelData
    Dim InputData() As StrucInputData
    Dim sigmasqt As Double
    Dim IncidenceTheta() As Double
    Dim ComplexNt As ComplexNumber
    Dim ComplexNi As ComplexNumber
    Dim complexNtArr As ComplexNumber



    Dim SigmaC As DYNAPLOT3Lib.Curve
    Dim SigmaMinC As DYNAPLOT3Lib.Curve
    Dim NArr() As Double
    Dim NoSigma() As Double
    Dim SigmaArr() As Double
    Dim SigmaMinArr() As Double
    Dim ComplexNArr() As ComplexNumber

    Dim NReal As Double
    Dim NImagine As Double
    Dim Inner As Integer
    Dim M As Integer
    Dim IsRunning As Boolean = True
    Dim IsRunOut As Boolean = True
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Dim IsStop As Boolean = True

    Private Sub OpenFile(ByVal filename As String)

        If Not File.Exists(filename) Then
            MsgBox("Flie is not found")
            Exit Sub
        End If

        Dim fs As FileStream = File.OpenRead(filename)

        'Open the stream and read it back.
        fs = File.OpenRead(filename)
        Dim b(1024) As Byte
        Dim temp As UTF8Encoding = New UTF8Encoding(True)

        Do While fs.Read(b, 0, b.Length) > 0
            Dim ft As String = temp.GetString(b)
            Dim a() As String = ft.Split(",")
            For x As Integer = 0 To (a.Length / 3) - 1
                Dim data As New ListViewItem
                data = ListView1.Items.Add(a(x * 3))
                data.SubItems.Add(a((x * 3) + 1))
                data.SubItems.Add(a((x * 3) + 2))

            Next
        Loop


        fs.Close()
    End Sub

    Private Sub OpenToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
OpenToolStripMenuItem.Click
        ListView1.Items.Clear()

        Dim dlg As New OpenFileDialog
        dlg.Filter = "Text File, *.txt|*.txt|CSV File,
*.csv|*.csv|All File, *.*|*.*"
        Dim redlg As DialogResult = dlg.ShowDialog()
        If redlg = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
            'Open file
            OpenFile(dlg.FileName)
        Else
            'Do nothing
            'MsgBox("No")
        End If
    End Sub



    Private Shared Sub AddText(ByVal fs As FileStream, ByVal
value As String)
        Dim info As Byte() = New
UTF8Encoding(True).GetBytes(value)
        fs.Write(info, 0, info.Length)
    End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Private Sub SaveFile(ByVal FileName As String)

        ' Delete the file if it exists.
        If File.Exists(FileName) Then
            File.Delete(FileName)
        End If

        'Create the file.
        Dim fs As FileStream = File.Create(FileName)

        For Each item As ListViewItem In ListView1.Items
            AddText(fs, item.SubItems(0).Text)
            AddText(fs, ",")
            AddText(fs, item.SubItems(1).Text)
            AddText(fs, ",")
            AddText(fs, item.SubItems(2).Text)
            AddText(fs, ",")
        Next

        fs.Close()

    End Sub



    Private Sub SaveToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
SaveToolStripMenuItem.Click
        Dim dlg As New SaveFileDialog
        dlg.Filter = "Text File, *.txt|*.txt|CSV File,
*.csv|*.csv|All File, *.*|*.*"
        Dim redlg As DialogResult = dlg.ShowDialog
        If redlg = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
            'Save File
            SaveFile(dlg.FileName)
        Else
            'Do nothing
            'MsgBox("No")
        End If
    End Sub

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

    Private Sub ButtonAdd_Click(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles ButtonAdd.Click
        Dim ListVI As New ListViewItem

        ListVI = ListView1.Items.Add(Txtincidence.Text)
        ListVI.SubItems.Add(TxtPsi.Text)
        ListVI.SubItems.Add(TxtDelta.Text)
    End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Private Sub ButtonRemove_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ButtonRemove.Click
        Try
            ListView1.Items.Remove(ListView1.SelectedItems(0))
        Catch ex As Exception

        End Try

    End Sub

    Private Sub ButtonEdit_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ButtonEdit.Click
        Try
            ListView1.SelectedItems(0).Text =
Txtincidence.Text
            ListView1.SelectedItems(0).SubItems(1).Text =
TxtPsi.Text
            ListView1.SelectedItems(0).SubItems(2).Text =
TxtDelta.Text

        Catch ex As Exception

        End Try
    End Sub

    Private Sub ButtonCalc_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ButtonCalc.Click
        AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
        AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()
        AxDynaPlot3.DataCurves.RemoveAll()
        AxDynaPlot4.DataCurves.RemoveAll()

        Inner = 0
        M = Inner
        IsRunning = True
        IsRunOut = True

        IsStop = False

        ButtonStop.Enabled = True
        ButtonCalc.Enabled = False


        ComplexNt = New ComplexNumber(CDbl(TxtnI1.Text),
CDbl(TxtkI1.Text))
        ReDim NArr(0 To 0)
        ReDim SigmaArr(0 To 0)
        ReDim ComplexNArr(0 To 0)
        ReDim SigmaMinArr(0 To 0)
        ReDim NoSigma(0 To 0)


'++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
+++++++
        If CDbl(TxtDk.Text) = 0 Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            ComplexNt = New ComplexNumber(CDbl(TxtnI1.Text),
CDbl(TxtkI2.Text))

            Do
                Application.DoEvents()


                ReDim Preserve FresnelData(0 To Inner)
                ReDim Preserve InputData(0 To Inner)

                ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 1) =
ComplexNt + New ComplexNumber(CDbl(Inner * TxtDn.Text), 0)
                LBNt.Text = ComplexNArr(ComplexNArr.Length -
1).ToString
                AxDynaPlot3.DataCurves.RemoveAll()
                SigmaC =
AxDynaPlot3.DataCurves.AddParametric("Sigma", 0, 1, SigmaArr,
SigmaArr.Length).Curve

                Dim k As Integer
                k = ListView1.Items.Count - 1

                ReDim InputData(Inner).IncidenceAngle(0 To k)
                ReDim InputData(Inner).Delta(0 To k)
                ReDim InputData(Inner).Psi(0 To k)
                ReDim InputData(Inner).RhoComplex(0 To k)
                ReDim InputData(Inner).RhoAbsolute(0 To k)
                ReDim FresnelData(Inner).Complexrp(0 To k)
                ReDim FresnelData(Inner).Complexrs(0 To k)
                ReDim FresnelData(Inner).Complexrho(0 To k)
                ReDim FresnelData(Inner).absRho(0 To k)
                ReDim FresnelData(Inner).absrp(0 To k)
                ReDim FresnelData(Inner).absrs(0 To k)


                Dim tanPsi As Double
                Dim cosDelta As Double
                Dim sinDelta As Double
                Dim Real As Double
                Dim ima As Double
                Dim sum As Double = 0

                For i As Integer = 0 To k
                    AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
                    AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()


                    '----- Ex -----'
                    InputData(Inner).IncidenceAngle(i) =
CDbl(ListView1.Items(i).Text)
                    InputData(Inner).Psi(i) =
CDbl(ListView1.Items(i).SubItems(1).Text)
                    InputData(Inner).Delta(i) =
CDbl(ListView1.Items(i).SubItems(2).Text)


                    tanPsi = Math.Tan(InputData(Inner).Psi(i)
* Math.PI / 180)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    cosDelta =
Math.Cos(InputData(Inner).Delta(i) * Math.PI / 180)
                    sinDelta =
Math.Sin(InputData(Inner).Delta(i) * Math.PI / 180)
                    Real = tanPsi * cosDelta
                    ima = tanPsi * sinDelta

                    InputData(Inner).RhoComplex(i) = New
ComplexNumber(Real, ima)
                    InputData(Inner).RhoAbsolute(i) =
CDbl(ComplexNumber.Absolute(InputData(Inner).RhoComplex(i)))
                    '---- Ex ----'

                    '---- Cal ----'
                    Dim Complexr1 As ComplexNumber
                    Dim Complexr2 As ComplexNumber
                    Dim Complexr3 As ComplexNumber
                    Dim Complexr4 As ComplexNumber

                    Dim cosi As Double
                    Dim sini As Double

                    Dim ComplexCosi As ComplexNumber
                    Dim ComplexSini As ComplexNumber

                    cosi =
Math.Cos(InputData(Inner).IncidenceAngle(i) * Math.PI / 180)
                    sini =
(Math.Sin(InputData(Inner).IncidenceAngle(i) * Math.PI / 180))

                    ComplexCosi = New
ComplexNumber(CDbl(cosi), 0)
                    ComplexSini = New
ComplexNumber(CDbl(sini), 0)

                    ComplexNi = New ComplexNumber(1, 0)

                    Complexr1 =
((ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 1) / ComplexNi) *
(ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 1) / ComplexNi))
                    Complexr2 = Complexr1 * ComplexCosi
                    Complexr3 = Complexr1 - (ComplexSini *
ComplexSini)
                    Complexr4 =
ComplexNumber.SquareRoot(Complexr3)
                    FresnelData(Inner).Complexrp(i) =
(Complexr2 - Complexr4) / (Complexr2 + Complexr4)
                    FresnelData(Inner).Complexrs(i) =
(ComplexCosi - Complexr4) / (ComplexCosi + Complexr4)
                    FresnelData(Inner).Complexrho(i) =
(FresnelData(Inner).Complexrp(i) /
FresnelData(Inner).Complexrs(i))
                    FresnelData(Inner).absRho(i) =
ComplexNumber.Absolute(FresnelData(Inner).Complexrho(i))
                    FresnelData(Inner).absrp(i) =
ComplexNumber.Absolute(FresnelData(Inner).Complexrp(i))
                    FresnelData(Inner).absrs(i) =
ComplexNumber.Absolute(FresnelData(Inner).Complexrs(i))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    Dim DivRho As Double
                    Dim SqDivRho As Double
                    DivRho = InputData(Inner).RhoAbsolute(i) -
FresnelData(Inner).absRho(i)
                    SqDivRho = DivRho * DivRho
                    sum = sum + SqDivRho



                Next
                Dim SigmaMP As Double
                SigmaMP = k - 2 - 1
                Dim sigma As Double

                sigma = Math.Sqrt(sum / SigmaMP)

                InputData(Inner).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho",
InputData(Inner).IncidenceAngle, InputData(Inner).RhoAbsolute,
InputData(Inner).RhoAbsolute.Length, True).Curve
                FresnelData(Inner).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho",
InputData(Inner).IncidenceAngle, FresnelData(Inner).absRho,
FresnelData(Inner).absRho.Length, True).Curve

                FresnelData(Inner).CComplexrp =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rp",
InputData(Inner).IncidenceAngle, FresnelData(Inner).absrp,
FresnelData(Inner).absrp.Length, True).Curve
                FresnelData(Inner).CComplexrs =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rs",
InputData(Inner).IncidenceAngle, FresnelData(Inner).absrs,
FresnelData(Inner).absrs.Length, True).Curve
                AxDynaPlot1.Axes.Autoscale()
                AxDynaPlot2.Axes.Autoscale()

                NArr(NArr.Length - 1) =
ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 1).Real
                SigmaArr(SigmaArr.Length - 1) = sigma

                SigmaC.UpdateDataParametric(0, 1, SigmaArr,
SigmaArr.Length)
                AxDynaPlot3.Axes.Autoscale()
                '============================
                Dim sw As New Stopwatch
                sw.Start()
                Do
                    Application.DoEvents()
                Loop Until sw.ElapsedMilliseconds > 50 'ms
                '============================

                If CDbl(ComplexNArr(ComplexNArr.Length -
1).Real) >= CDbl(TxtnI2.Text) Then
                    IsRunning = False
                ElseIf IsStop = True Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    IsRunning = False
                End If
                If Inner >= 1 Then
                    If SigmaArr(Inner - 1) < SigmaArr(Inner)
Then
                        IsRunning = False
                        LBNt.Text =
ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 2).ToString
                        AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
                        AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()

                        InputData(Inner - 1).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(Inner -
1).IncidenceAngle, InputData(Inner - 1).RhoAbsolute,
InputData(Inner - 1).RhoAbsolute.Length, True).Curve
                        FresnelData(Inner - 1).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(Inner -
1).IncidenceAngle, FresnelData(Inner - 1).absRho,
FresnelData(Inner - 1).absRho.Length, True).Curve

                        FresnelData(Inner - 1).CComplexrp =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rp", InputData(Inner -
1).IncidenceAngle, FresnelData(Inner - 1).absrp,
FresnelData(Inner - 1).absrp.Length, True).Curve
                        FresnelData(Inner - 1).CComplexrs =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rs", InputData(Inner -
1).IncidenceAngle, FresnelData(Inner - 1).absrs,
FresnelData(Inner - 1).absrs.Length, True).Curve
                        AxDynaPlot1.Axes.Autoscale()
                        AxDynaPlot2.Axes.Autoscale()
                    End If
                End If

                ReDim Preserve NArr(0 To NArr.Length)
                ReDim Preserve SigmaArr(0 To SigmaArr.Length)
                ReDim Preserve ComplexNArr(0 To
ComplexNArr.Length)
                M = Inner
                Inner = Inner + 1
            Loop While IsRunning = True

'++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
+++++++


'++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
+++++++
        Else
            Do
                Application.DoEvents()
                Dim Outter As Integer
                complexNtArr = ComplexNt + New
ComplexNumber(CDbl(Outter * TxtDn.Text), 0)
                Do
                    IsRunning = True
                    Application.DoEvents()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    Dim Dis As Integer
                    ReDim Preserve FresnelData(0 To Inner)
                    ReDim Preserve InputData(0 To Inner)

                    ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 1) =
complexNtArr + New ComplexNumber(0, CDbl(Dis * TxtDk.Text))
                    LBNt.Text = ComplexNArr(ComplexNArr.Length
- 1).ToString

                    AxDynaPlot3.DataCurves.RemoveAll()
                    AxDynaPlot4.DataCurves.RemoveAll()
                    SigmaC =
AxDynaPlot3.DataCurves.AddParametric("Sigma", 0, 1, SigmaArr,
SigmaArr.Length).Curve
                    SigmaMinC =
AxDynaPlot4.DataCurves.Add("Sigma", NoSigma, SigmaMinArr,
SigmaMinArr.Length, True).Curve
                    Dim k As Integer
                    k = ListView1.Items.Count - 1

                    ReDim InputData(Inner).IncidenceAngle(0 To
k)
                    ReDim InputData(Inner).Delta(0 To k)
                    ReDim InputData(Inner).Psi(0 To k)
                    ReDim InputData(Inner).RhoComplex(0 To k)
                    ReDim InputData(Inner).RhoAbsolute(0 To k)
                    ReDim FresnelData(Inner).Complexrp(0 To k)
                    ReDim FresnelData(Inner).Complexrs(0 To k)
                    ReDim FresnelData(Inner).Complexrho(0 To
k)
                    ReDim FresnelData(Inner).absRho(0 To k)
                    ReDim FresnelData(Inner).absrp(0 To k)
                    ReDim FresnelData(Inner).absrs(0 To k)


                    Dim tanPsi As Double
                    Dim cosDelta As Double
                    Dim sinDelta As Double
                    Dim Real As Double
                    Dim ima As Double
                    Dim sum As Double = 0

                    For i As Integer = 0 To k
                        AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
                        AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()


                        '----- Ex -----'
                        InputData(Inner).IncidenceAngle(i) =
CDbl(ListView1.Items(i).Text)
                        InputData(Inner).Psi(i) =
CDbl(ListView1.Items(i).SubItems(1).Text)
                        InputData(Inner).Delta(i) =
CDbl(ListView1.Items(i).SubItems(2).Text)


                        tanPsi =
Math.Tan(InputData(Inner).Psi(i) * Math.PI / 180)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                        cosDelta =
Math.Cos(InputData(Inner).Delta(i) * Math.PI / 180)
                        sinDelta =
Math.Sin(InputData(Inner).Delta(i) * Math.PI / 180)
                        Real = tanPsi * cosDelta
                        ima = tanPsi * sinDelta

                        InputData(Inner).RhoComplex(i) = New
ComplexNumber(Real, ima)
                        InputData(Inner).RhoAbsolute(i) =
CDbl(ComplexNumber.Absolute(InputData(Inner).RhoComplex(i)))
                        '---- Ex ----'

                        '---- Cal ----'
                        Dim Complexr1 As ComplexNumber
                        Dim Complexr2 As ComplexNumber
                        Dim Complexr3 As ComplexNumber
                        Dim Complexr4 As ComplexNumber

                        Dim cosi As Double
                        Dim sini As Double

                        Dim ComplexCosi As ComplexNumber
                        Dim ComplexSini As ComplexNumber

                        cosi =
Math.Cos(InputData(Inner).IncidenceAngle(i) * Math.PI / 180)
                        sini =
(Math.Sin(InputData(Inner).IncidenceAngle(i) * Math.PI / 180))

                        ComplexCosi = New
ComplexNumber(CDbl(cosi), 0)
                        ComplexSini = New
ComplexNumber(CDbl(sini), 0)

                        ComplexNi = New ComplexNumber(1, 0)

                        Complexr1 =
((ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 1) / ComplexNi) *
(ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 1) / ComplexNi))
                        Complexr2 = Complexr1 * ComplexCosi
                        Complexr3 = Complexr1 - (ComplexSini *
ComplexSini)
                        Complexr4 =
ComplexNumber.SquareRoot(Complexr3)
                        FresnelData(Inner).Complexrp(i) =
(Complexr2 - Complexr4) / (Complexr2 + Complexr4)
                        FresnelData(Inner).Complexrs(i) =
(ComplexCosi - Complexr4) / (ComplexCosi + Complexr4)
                        FresnelData(Inner).Complexrho(i) =
(FresnelData(Inner).Complexrp(i) /
FresnelData(Inner).Complexrs(i))
                        FresnelData(Inner).absRho(i) =
ComplexNumber.Absolute(FresnelData(Inner).Complexrho(i))
                        FresnelData(Inner).absrp(i) =
ComplexNumber.Absolute(FresnelData(Inner).Complexrp(i))
                        FresnelData(Inner).absrs(i) =
ComplexNumber.Absolute(FresnelData(Inner).Complexrs(i))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                        Dim DivRho As Double
                        Dim SqDivRho As Double
                        DivRho =
InputData(Inner).RhoAbsolute(i) - FresnelData(Inner).absRho(i)
                        SqDivRho = DivRho * DivRho
                        sum = sum + SqDivRho



                    Next
                    Dim SigmaMP As Double
                    SigmaMP = k - 2 - 1
                    Dim sigma As Double

                    sigma = Math.Sqrt(sum / SigmaMP)


                    '==============================

                    InputData(Inner).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho",
InputData(Inner).IncidenceAngle, InputData(Inner).RhoAbsolute,
InputData(Inner).RhoAbsolute.Length, True).Curve
                    FresnelData(Inner).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho",
InputData(Inner).IncidenceAngle, FresnelData(Inner).absRho,
FresnelData(Inner).absRho.Length, True).Curve

                    FresnelData(Inner).CComplexrp =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rp",
InputData(Inner).IncidenceAngle, FresnelData(Inner).absrp,
FresnelData(Inner).absrp.Length, True).Curve
                    FresnelData(Inner).CComplexrs =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rs",
InputData(Inner).IncidenceAngle, FresnelData(Inner).absrs,
FresnelData(Inner).absrs.Length, True).Curve
                    AxDynaPlot1.Axes.Autoscale()
                    AxDynaPlot2.Axes.Autoscale()

                    NArr(NArr.Length - 1) =
ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 1).Real

                    SigmaArr(SigmaArr.Length - 1) = sigma
                    SigmaC.UpdateDataParametric(0, 1,
SigmaArr, SigmaArr.Length)
                    AxDynaPlot3.Axes.Autoscale()
                    '==============================
                    Dim sw As New Stopwatch
                    sw.Start()
                    Do
                        Application.DoEvents()
                    Loop Until sw.ElapsedMilliseconds > 100
'ms
                    '==============================
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    If CDbl(ComplexNArr(ComplexNArr.Length -
1).Imaginary) = CDbl(TxtkI2.Text) Then
                        IsRunning = False
                        Dis = -1

                    End If

                    If SigmaArr.Length > 4 Then
                        If SigmaArr(SigmaArr.Length - 1) >
SigmaArr(SigmaArr.Length - 2) And SigmaArr(SigmaArr.Length -
2) < SigmaArr(SigmaArr.Length - 3) Then
                            SigmaMinArr(SigmaMinArr.Length -
1) = SigmaArr(SigmaArr.Length - 2)
                            NoSigma(NoSigma.Length - 1) =
SigmaArr.Length - 2
                            SigmaMinC.UpdateData(NoSigma,
SigmaMinArr, SigmaMinArr.Length)

                            AxDynaPlot4.Axes.Autoscale()
                            ReDim Preserve NoSigma(0 To
NoSigma.Length)
                            ReDim Preserve SigmaMinArr(0 To
SigmaMinArr.Length)
                        End If
                    End If
                    If SigmaMinArr.Length > 2 Then
                        If SigmaMinArr(SigmaMinArr.Length - 3)
< SigmaMinArr(SigmaMinArr.Length - 2) Then
                            IsRunning = False
                            IsRunOut = False
                            LBNt.Text =
ComplexNArr(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).ToString
                            AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
                            AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()


InputData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho",
InputData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).IncidenceAngle,
InputData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).RhoAbsolute,
InputData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length -
3))).RhoAbsolute.Length, True).Curve

FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho",
InputData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).IncidenceAngle,
FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).absRho,
FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).absRho.Length,
True).Curve


FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).CComplexrp =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rp",
InputData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).IncidenceAngle,
FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).absrp,
FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).absrp.Length,
True).Curve
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).CComplexrs =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rs",
InputData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).IncidenceAngle,
FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).absrs,
FresnelData(CInt(NoSigma(NoSigma.Length - 3))).absrs.Length,
True).Curve
                            AxDynaPlot1.Axes.Autoscale()
                            AxDynaPlot2.Axes.Autoscale()

                        End If
                    End If
                    ReDim Preserve NArr(0 To NArr.Length)
                    ReDim Preserve SigmaArr(0 To
SigmaArr.Length)
                    ReDim Preserve ComplexNArr(0 To
ComplexNArr.Length)
                    M = Inner
                    Inner = Inner + 1
                    Dis = Dis + 1
                    If IsStop = True Then
                        IsRunning = False
                        IsRunOut = False

                    End If

                Loop While IsRunning = True

                If CDbl(ComplexNArr(ComplexNArr.Length -
2).Real) = CDbl(TxtnI2.Text) And
(ComplexNArr(ComplexNArr.Length - 2).Imaginary) =
CDbl(TxtkI2.Text) Then
                    IsRunOut = False
                    IsRunning = False
                End If
                Outter = Outter + 1
            Loop While IsRunOut = True
        End If

'++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
+++++++

        ButtonCalc.Enabled = True
        ButtonStop.Enabled = False



    End Sub

    Private Sub ListView1_SelectedIndexChanged(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ListView1.SelectedIndexChanged
        Try
            Txtincidence.Text =
ListView1.SelectedItems(0).Text
            TxtPsi.Text =
ListView1.SelectedItems(0).SubItems(1).Text
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            TxtDelta.Text =
ListView1.SelectedItems(0).SubItems(2).Text
        Catch ex As Exception

        End Try

    End Sub

    Private Sub ListView1_ColumnClick(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As
System.Windows.Forms.ColumnClickEventArgs) Handles
ListView1.ColumnClick
        SortMyListView(Me.ListView1, e.Column, , True)

    End Sub

    Friend Sub SortMyListView(ByVal ListViewToSort As
ListView, ByVal ColumnNumber As Integer, Optional ByVal Resort
As Boolean = False, Optional ByVal ForceSort As Boolean =
False)
        ' Sorts a list view column by string, number, or date.
The three types of sorts must be specified within the listview
columns "tag" property unless the ForceSort option is enabled.
        ' ListViewToSort - The listview to sort
        ' ColumnNumber - The column number to sort by
        ' Resort - Resorts a listview in the same direction as
the last sort
        ' ForceSort - Forces a sort even if no listview tag
data exists and assumes a string sort.  If this is false
(default) and no tag is specified the procedure will exit
        Dim SortOrder As SortOrder
        Static LastSortColumn As Integer = -1
        Static LastSortOrder As SortOrder =
SortOrder.Ascending
        If Resort = True Then
            SortOrder = LastSortOrder
        Else
            If LastSortColumn = ColumnNumber Then
                If LastSortOrder = SortOrder.Ascending Then
                    SortOrder = SortOrder.Descending
                Else
                    SortOrder = SortOrder.Ascending
                End If
            Else
                SortOrder = SortOrder.Ascending
            End If
        End If

        ' In case a tag wasn't specified check if we should
force a string sort
        If
String.IsNullOrEmpty(CStr(ListViewToSort.Columns(ColumnNumber)
.Tag)) Then
            If ForceSort = True Then
                ListViewToSort.Columns(ColumnNumber).Tag =
"String"
            Else
                ' don't sort since no tag was specified.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Exit Sub
            End If
        End If

        Select Case
ListViewToSort.Columns(ColumnNumber).Tag.ToString
            Case "Numeric"
                ListViewToSort.ListViewItemSorter = New
ListViewNumericSort(ColumnNumber, SortOrder)
            Case "Date"
                ListViewToSort.ListViewItemSorter = New
ListViewDateSort(ColumnNumber, SortOrder)
            Case "String"
                ListViewToSort.ListViewItemSorter = New
ListViewStringSort(ColumnNumber, SortOrder)
        End Select
        LastSortColumn = ColumnNumber
        LastSortOrder = SortOrder
        ListViewToSort.ListViewItemSorter = Nothing
    End Sub

    Private Sub ButtonStop_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ButtonStop.Click
        IsStop = True
        ButtonStop.Enabled = False
        ButtonCalc.Enabled = True

    End Sub


    Private Sub ResetToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
ResetToolStripMenuItem.Click
        ListView1.Items.Clear()
        AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
        AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()
        AxDynaPlot3.DataCurves.RemoveAll()
        AxDynaPlot4.DataCurves.RemoveAll()
    End Sub

    Private Sub BNext_Click(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles BNext.Click
        M = M + 1
        If M = Inner Then
            M = 0
            AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
            AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()

            InputData(M).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(M).IncidenceAngle,
InputData(M).RhoAbsolute, InputData(M).RhoAbsolute.Length,
True).Curve
            FresnelData(M).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absRho, FresnelData(M).absRho.Length,
True).Curve
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            FresnelData(M).CComplexrp =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rp", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absrp, FresnelData(M).absrp.Length, True).Curve
            FresnelData(M).CComplexrs =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rs", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absrs, FresnelData(M).absrs.Length, True).Curve


            AxDynaPlot1.Axes.Autoscale()
            AxDynaPlot2.Axes.Autoscale()

        Else
            AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
            AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()

            InputData(M).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(M).IncidenceAngle,
InputData(M).RhoAbsolute, InputData(M).RhoAbsolute.Length,
True).Curve
            FresnelData(M).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absRho, FresnelData(M).absRho.Length,
True).Curve
            FresnelData(M).CComplexrp =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rp", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absrp, FresnelData(M).absrp.Length, True).Curve
            FresnelData(M).CComplexrs =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rs", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absrs, FresnelData(M).absrs.Length, True).Curve


            AxDynaPlot1.Axes.Autoscale()
            AxDynaPlot2.Axes.Autoscale()

        End If
    End Sub

    Private Sub BPrevious_Click(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles BPrevious.Click
        M = M - 1
        If M < 0 Then
            M = Inner - 1
            AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
            AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()

            InputData(M).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(M).IncidenceAngle,
InputData(M).RhoAbsolute, InputData(M).RhoAbsolute.Length,
True).Curve
            FresnelData(M).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absRho, FresnelData(M).absRho.Length,
True).Curve
            FresnelData(M).CComplexrp =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rp", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absrp, FresnelData(M).absrp.Length, True).Curve
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            FresnelData(M).CComplexrs =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rs", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absrs, FresnelData(M).absrs.Length, True).Curve


            AxDynaPlot1.Axes.Autoscale()
            AxDynaPlot2.Axes.Autoscale()

        Else
            AxDynaPlot1.DataCurves.RemoveAll()
            AxDynaPlot2.DataCurves.RemoveAll()

            InputData(M).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(M).IncidenceAngle,
InputData(M).RhoAbsolute, InputData(M).RhoAbsolute.Length,
True).Curve
            FresnelData(M).CRho =
AxDynaPlot1.DataCurves.Add("rho", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absRho, FresnelData(M).absRho.Length,
True).Curve
            FresnelData(M).CComplexrp =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rp", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absrp, FresnelData(M).absrp.Length, True).Curve
            FresnelData(M).CComplexrs =
AxDynaPlot2.DataCurves.Add("rs", InputData(M).IncidenceAngle,
FresnelData(M).absrs, FresnelData(M).absrs.Length, True).Curve


            AxDynaPlot1.Axes.Autoscale()
            AxDynaPlot2.Axes.Autoscale()

        End If
    End Sub

    Private Sub BShow_Click(ByVal sender As System.Object,
ByVal e As System.EventArgs) Handles BShow.Click
        MsgBox(ComplexNArr(M).ToString)
    End Sub
End Class
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้