การวิเคราะห์สมบัติการโพลาไรซ์ของแสงในอุปกรณ์ทางแสง โดยใช้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแม็คเซ็นเดอร์

POLARIZATION CHARACTERISTICS OF LIGHT IN OPTICAL DEVICES USING MACH ZEHNDER INTERFEROMETER

ธีรยุทธ ชารุนุ่วงศ์

THEERAYUT CHARUNUWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาพี่ศิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-608-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์สมบัติการโพลาไรซ์ของแสงในอุปกรณ์ทางแสง โดยใช้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแม็คเซ็นเดอร์

POLARIZATION CHARACTERISTICS OF LIGHT IN OPTICAL DEVICES USING MACH ZEHNDER INTERFEROMETER

T049619

ธีรยุทธ ชาญนุวงศ์

THEERAYUT CHARNNUWONG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 49619
วัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-608-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POLARIZATION CHARACTERISTICS OF LIGHT IN OPTICAL DEVICES USING MACH ZEHNDER INTERFEROMETER

THEERAYUT CHARNNUWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

ISBN 974-324-608-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมบัติการโพลาไรซ์ของแสงในอุปกรณ์ทางแสงโดยใช้อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแม็คเซ็นเดอร์
นักศึกษา	นายธีรยุทธ ชาญนุวงศ์
รหัสประจำตัว	41065010
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติของแสงเลเซอร์ที่มีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งเดิมผ่านเข้าไปภายในอุปกรณ์ทางแสงที่อยู่ในแม็คเซ็นเดอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (MZI) การศึกษาแบ่งเป็นเป็นการศึกษา MZI ที่เป็นที่ว่าง (free space) ซึ่งยังไม่มีอุปกรณ์ทางแสงและที่มีแขนข้างหนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงโดยการศึกษาในแบบที่เป็นที่ว่างนั้น ได้วางโพลาไรเซอร์ที่แขนข้างหนึ่งและหมุนโพลาไรเซอร์ที่มุมต่างๆจนครบรอบ ส่วนที่มีแขนข้างหนึ่งเป็นเส้นใยนำแสง ได้เพิ่มเส้นใยนำแสงเข้าไปที่แขนอีกข้างหนึ่ง โดยเส้นใยนำแสงที่ใส่เพิ่มเข้าไปจะเปลี่ยนเป็นชนิดต่าง ๆ คือ ชนิดไฮไบร์ และชนิดซัมมาเรียน และผลึกลิเธียมไนโอเบต ส่วนอีกแขนหนึ่งยังมีโพลาไรเซอร์เช่นเดิม วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณที่ออกจาก MZI ที่ตกลงที่โฟโตไดโอดสองตัวจากแขนทั้งสองแขนเพื่อวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณและหาแนวทางพัฒนาใช้ในระบบประมวลสัญญาณสำหรับงานด้านสื่อสารต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Polarization Characteristics of Light in Optical Devices Using Mach Zehnder Interferometer
Student	Mr.Theerayut Charnnuwong
Student ID.	41065010
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
year	2003
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Preecha Yupapin

ABSTRACT

Polarization characteristics of light in optical devices using Mach Zehnder interferometer (MZI) is presented. Laser source with wavelength of 670 nm is linearly polarized then launched into the MZI system. The employed optical devices are placed in one arm of the MZI, where several cases of the study using free space, Hibi fiber, sammarian fiber and $LiNbO_3$ are placed then the optical output characteristics are discerned. Results obtained have shown the feasibility of using such a devices for optical signal processing system in optical communication.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาให้ความช่วยเหลือด้วยความเอาใจใส่จาก รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำเนื้อหาทางด้านหลักการและทฤษฎีต่างๆตลอดจนคอยช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะการทำงานวิจัย ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ในที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผ.ศ. วิชาญ เตชิตธีระ, รศ. สุวรรณ คูสำราญ, ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว และผศ. ดร. รัชภาคย์ จิตต์อารี ที่คอยให้คำชี้แนะทั้งทางด้านเนื้อหาและการเขียนวิทยานิพนธ์โดยความเอาใจใส่

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ได้คอยช่วยเหลือพร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆในการทำงานวิจัยนี้ตลอดมา

ประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธีรยุทธ ชาญนุวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูปภาพ.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2

1.3 การดำเนินงานวิจัย.....2

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์(Interferometer).....3

2.1.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดไมเคิลสัน.....3

2.1.2 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแฟบรี-เพอโรต์.....4

2.1.3 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแม็คเซ็นเดอร์.....6

2.1.3.1 ในกรณีแขนทั้งสองเป็นที่ว่าง (Free space).....6

2.1.3.2 ในกรณีที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์.....9

2.2 โพลาไรเซชันของแสง.....11

2.2.1 โจนส์เวกเตอร์ตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของแสงโพลาไรซ์.....12

2.3 สมการแมกซ์เวลล์(Maxwell's Equation).....17

4.1.1 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law).....17

4.1.2 กฎของแอมแปร์(Ampere's Law).....17

4.1.3 กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า.....18

4.1.4 กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก.....18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4 สมการของเส้นใยนำแสง.....19

บทที่ 3 ทฤษฎีของอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย.....30

3.1 อุปกรณ์ทางแสง.....30

3.1.1 เส้นใยแก้วนำแสง.....30

3.1.2 ผลึกลิเทียมไนโอเบท $LiNbO_3$.....33

3.1.3 โพลาไรเซอร์.....36

3.1.4 ตัวแยกแสง.....37

3.1.5 เลเซอร์ไดโอด.....41

3.2 อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์.....46

3.2.1 พินโฟโตไดโอด.....46

3.2.1.1 สัญญาณรบกวนในโฟโตดีเทคเตอร์.....49

3.2.1.2 เวลาในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจรับแสง.....51

บทที่ 4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....52

4.1 ทดลองโดยจัดให้แขนทั้งสองข้างของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นที่ว่าง.....52

4.2 ทดลองโดยจัดให้แขนข้างหนึ่งของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นตัวกลางชนิดอื่น.....54

บทที่ 5 ผลของการดำเนินงานวิจัย.....57

5.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....57

5.1.1 ผลการทดลองตอนที่ 1 แขนทั้งสองเป็นที่ว่าง.....57

5.1.2 ผลการทดลองตอนที่ 2 แขนข้างหนึ่งเป็นที่ว่าง
อีกข้างหนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบไฮไบร์.....62

5.1.3 ผลการทดลองตอนที่ 2 แขนข้างหนึ่งเป็นที่ว่าง
อีกข้างหนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบซัมมาเรียน.....65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.1.4 ผลการทดลองตอนที่ 2 แขนข้างหนึ่งเป็นที่ว่าง
อีกข้างหนึ่งเป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต.....68

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....71

5.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1 71

5.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 2 75

5.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 3 76

5.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 4 78

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์.....80

6.1 สรุปผลการทดลอง.....80

6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....80

6.3 วิจารณ์.....81

6.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....81

เอกสารอ้างอิง.....82

ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....83

ภาคผนวก ข วงจรขยายสัญญาณจากพินโฟโตไดโอด.....100

ภาคผนวก ค คุณลักษณะของเลเซอร์ไดโอด.....103

ประวัติผู้เขียน.....106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 แสดงค่าดัชนีหักเห n_{r0} และค่าสัมประสิทธ์ของอิเลคโตรออปติก r_{ij} ของตัวกลางบางชนิด.....35

ผ.1 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงเลเซอร์.....ผ.2 – ผ.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดไมเคิลสัน.....4

2.2 แสดงอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแฟบรี-เพอโรต์.....5

2.3 แสดงอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแม็คเซ็นเดอร์.....6

2.4 แสดงสนามไฟฟ้าของแสง ณ เวลาหนึ่ง โดยแสงนี้เคลื่อนที่ในแนว +Z.....11

2.5 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีการวางตัวของสนามไฟฟ้า
ในแนวต่างๆ กันโดยทิศที่แสงเคลื่อนที่ไปเป็นทิศ +Z.....13

2.6 (ก) สนามไฟฟ้าที่สั่นในแนวแกน X และY โดยมีเฟสตรงกันจะได้ผลลัพธ์เป็น
แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในควอดดรันต์ที่ 1และ 3.....16

2.6 (ข) สนามไฟฟ้าในแนวแกน X และ Y มีเฟสตรงข้ามกัน จะให้ผลลัพธ์เป็น
แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในควอดดรันต์ที่ 2 และ 4.....16

2.7 แสดงโคออร์ดิเนตทรงกระบอก.....20

2.8 กราฟของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่ง เมื่อ n = 0, 1, 2, 3.....24

2.9 กราฟของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่สองของอันดับที่หนึ่งและสอง.....25

3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง.....30

3.2 แสดงความยาวบีตส์ในเส้นใยแก้วนำแสง
(ก) สถานะโพลาไรเซชันเมื่อเทียบกับ ϕ_Z
(ข) ความเข้มของแสงที่ปรากฏในเส้นใยแก้วนำแสงโดยความเข้มนี้จะมีการเปลี่ยนแปลง
ครบรอบในหนึ่งความยาวบีตส์.....31

3.3 การจัดอุปกรณ์เพื่อการเข้ารหัสสัญญาณทางแสง.....34

3.4 แสดงอุปกรณ์โพลาไรเซอร์ชนิดเชิงเส้น.....36

3.5 แสดงตัวแยกแสงเมื่อมีแสงเดินทางเข้ามาที่อินพุตพอร์ต #1 และ#2.....38

3.6 แสดงตัวแยกแสงเมื่อมีแสงเดินทางเข้ามาทั้งอินพุตพอร์ต #1 และ#2.....39

3.7 แสดงการเกิดการปลดปล่อยแสงของเลเซอร์เมื่อ
(ก) กระบวนการดูดกลืนโฟตอน
(ข) การปลดปล่อยพลังงานโดยธรรมชาติ และ
(ค) กระบวนการเร่งการปลดปล่อยพลังงาน.....43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.8 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด.....44

3.9 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไบแอสกับกำลังของแสงที่เปล่งออกมา.....45

3.10 แสดงรูปแบบโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดและการไบแอสให้พินโฟโตไดโอด.....47

3.11 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโตไดโอด.....48

3.12 แสดงรูปแบบและการใช้งานของพินโฟโตไดโอดที่ต่อกับวงจรขยายสัญญาณ.....50

3.13 แสดงการแพร่ของอิเล็กตรอนเมื่อมีแสงมาตกกระทบในพินโฟโตไดโอด.....51

4.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองที่มีแขนทั้งสองของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นที่ว่าง.....52

4.2 แสดงสัญญาณที่อ่านได้จากตัวรับแสงหลังจากเพิ่มชุดสั่นกระจก.....53

4.3 ส่วนประกอบต่างๆของชุดสั่นกระจก.....54

4.4 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองที่มีแขนข้างหนึ่งของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์
เป็นเส้นใยนำแสงชนิดต่างๆ.....55

4.5 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองที่มีแขนข้างหนึ่งของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์
เป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต.....55

5.1 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของ
แหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่หนึ่ง.....57

5.2 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของ
แหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่สอง.....57

5.3 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของ
แหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่หนึ่ง.....58

5.4 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของ
แหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่สอง.....58

5.5 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของ
แหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่หนึ่ง.....59

5.6 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของ
แหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่สอง.....60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.7 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่หนึ่ง.....60

5.8 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่สอง.....61

5.9 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง.....62

5.10 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา.....63

5.11 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา.....63

5.12 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา.....64

5.13 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง.....65

5.14 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา.....66

5.15 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา.....67

5.16 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา.....67

5.17 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 0 องศา.....68

5.18 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา.....69

5.19 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา.....70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.20 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา.....70

5.21 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่หนึ่ง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ.....71

5.22 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่หนึ่ง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ.....72

5.23 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ.....73

5.24 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ.....74

5.25 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบไฮไบร์.....75

5.26 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบไฮไบร์.....75

5.27 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบซัมมาเรียน.....77

5.28 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบซัมมาเรียน.....77

5.29 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต.....78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.30 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของเลเซอร์เป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต.....79

ผ.1 แสดงวงจรขยายสัญญาณจากพินโฟโตไดโอด.....101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์กรองสัญญาณทางแสงเพื่อใช้ในระบบการสื่อสารข้อมูลผ่านตัวกลางทางแสง ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์กรองสัญญาณคือ เลือกสัญญาณหรือข้อมูลที่ต้องการ ในขณะเดียวกันก็ต้องการกำจัดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยที่สุด อุปกรณ์กรองสัญญาณเหล่านี้มีอยู่หลายชนิดเช่น เกรตติง (grating) ปริซึม (prism) และอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์อีกหลายชนิด ในที่นี้จะมุ่งศึกษาเฉพาะในอุปกรณ์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแม็คเซ็นเดอร์ (Mach Zehnder Interferometer, MZI) เพราะมีลักษณะเด่นคือ สามารถเลือกกรองเอาสัญญาณข้อมูลที่ผสมอยู่ในคลื่นแสงความยาวคลื่นที่ต้องการได้ในขณะที่สัญญาณรบกวนต่ำ การสูญเสียสัญญาณน้อย สามารถทำการมัลติเพลกซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณได้จำนวนมาก ตัวอย่างงานวิจัยที่มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับ MZI เช่นในปี ค.ศ. 1991 โธมัส โพห์ลมานน์ (Thomas Pohlmann) ได้วิจัยเกี่ยวกับสมบัติการสวิตช์และกรองสัญญาณของสารประกอบไตตาเนียมลิเธียมไนโอเบต ($Ti : LiNbO_3$) และ ค.ศ.1996 โอคาโมโต (K. Okamoto) ได้วิจัยเกี่ยวกับการแยกสเปคตรัมของความยาวคลื่นแสงออกเป็นแปดช่วงโดยใช้ตัวกรองแบบแม็คเซ็นเดอร์ชนิดไม่สมมาตร และถ้าสร้าง MZI เป็นอุปกรณ์ชนิดท่อนำคลื่นจะสามารถสร้างให้มีขนาดเล็กมาก ได้ เหมาะแก่การนำไปใช้ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

การศึกษาผลกระทบของการโพลาไรซ์ของแสงใน MZI ยังมีการศึกษากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจมีผลกระทบในแง่เป็นการลดทอนประสิทธิภาพของระบบลงก็จะใช้ผลการศึกษาเป็นข้อมูลในการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดผลกระทบนั้นโดยการลดการโพลาไรซ์หรือเปลี่ยนลักษณะการโพลาไรซ์ และถ้าเป็นผลกระทบในแง่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพหรือขยายขอบเขตการประยุกต์การสื่อสารให้กว้างขึ้น และการศึกษายังแบ่งการศึกษาเป็นในที่ว่าง ผ่านเส้นใยนำแสงชนิดต่างๆและผ่านผลึกของสารบางชนิดเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงในตัวกลางชนิดต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะทำให้สามารถออกแบบและวางแผนการสร้างอุปกรณ์ การเลือกวัสดุที่เหมาะสมทั้งเป็นการพัฒนาปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วและการสร้างอุปกรณ์ชนิดใหม่ๆเพื่อขยายขอบเขตการสื่อสารให้กว้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงผลของแสงโพลาไรซ์กับการแทรกสอดของแสงในอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแม็คเซ็นเดอร์

1.2.2 ศึกษาถึงผลกระทบเมื่อมีการนำตัวกลางชนิดอื่นมากั้นทางเดินของแสงในMZI

1.2.3 เพื่อเป็นความรู้และแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ในระบบการสื่อสารทางแสง

1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะเริ่มจากการศึกษาค้นคว้าหลักการของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์และหลักการของการโพลาไรซ์ของแสงจากนั้นก็เริ่มทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการแทรกสอดของแสงในMZI จากการวิเคราะห์ สัญญาณที่ตกลงที่อุปกรณ์รับแสง แล้วจึงเริ่มควบคุมการโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์ที่ใช้ทดลอง ทำการศึกษาผลของโพลาไรซ์ที่เกิดกับการแทรกสอด และทำการเพิ่มตัวกลางที่ต้องการศึกษาเข้าไปในระบบซึ่งมีทั้งตัวกลางที่เป็นเส้นใยนำแสงและลักษณะที่เป็นแผ่นผลึก อีกทั้งในบางการทดลองไม่สามารถหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมได้ในห้องทดลองก็ได้ออกแบบและสร้างเพื่อให้การทดลองเกิดความถูกต้องและเกิดความสะดวกในการทำงาน ตลอดจนศึกษาหาแนวทางในการพัฒนาทำเป็นอุปกรณ์ในการแยกและกรองสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ได้ทราบถึงตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดการแทรกสอดของแสงในอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

1.4.2 ได้ทราบถึงผลที่เกิดจากการควบคุมโพลาไรซ์ของแสงที่มีต่อการแทรกสอดของแสง

1.4.3 ได้ทราบถึงลักษณะของแสงโพลาไรซ์หลังจากเดินทางผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ

1.4.4 เพื่อเป็นความรู้และเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Interferometer)

เครื่องมือที่ใช้ประโยชน์จากการแทรกสอดของแสงและภาพจากการแทรกสอดของแสง เรียกว่า อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Interferometer) ในการที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแสงอาพันธ์ 2 ลำนั้น อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์จะแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 ส่วน หรือมากกว่านั้นแต่ละส่วนที่ถูกแยกออกไปจะมีการเคลื่อนที่ไปในตัวกลาง เป็นระยะทางต่างกันจากนั้นก็จะกลับมาพบกันและแทรกสอดกันทำให้เกิดภาพการแทรกสอดกันขึ้น

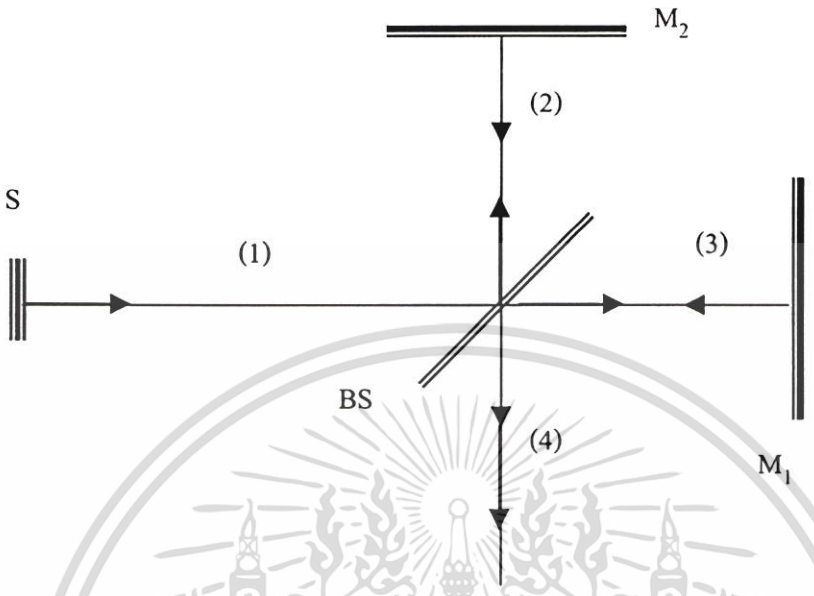
2.1.1 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดไมเคิลสัน

ในปี พ.ศ. 2424 (ค.ศ.1881) ไมเคิลสันได้เสนอหลักการของเครื่องมือชนิดนี้ให้เป็นที่รู้จักกัน และเครื่องมือนี้เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาของฟิสิกส์ยุคใหม่ ใช้วัดโครงสร้างที่ละเอียดมาก (hyperfine structue) ของเส้นสเปคตรัมได้ และใช้เป็นมาตรฐานในการกำหนดความยาวในรูปแบบของความยาวคลื่นแสงได้ เป็นต้น

หลักการของเครื่องมือชนิดนี้ แสดงไว้ดังรูป 2.1 S เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้ลำแสง (1) ออกมา เมื่อลำแสงนี้ไปตกกระทบที่ตัวแยกลำแสง BS (BS ในเครื่องมือนี้จะเป็นแท่งแก้วที่ฉาบผิวเพื่อทำให้เกิดการสะท้อนได้ 50 %) จะเกิดการแยกลำแสงออกเป็นสองลำที่มีอัมปลิจูดเท่ากัน คือ ลำแสงสะท้อน (2) และลำแสงที่ส่งผ่านไป (3) ลำแสงทั้งสองลำนี้จะไปสะท้อนที่กระจก M_1 และ M_2 กลับมาตามแนวเดิมไปสู่ BS อีกครั้งหนึ่ง ในครั้งนี้ ลำแสง (2) จะทะลุผ่าน และลำแสง (3) จะสะท้อนที่ BS แล้วออกไปด้วยกันเป็นลำแสง (4) และทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้น ถ้าให้เส้นทางเดินของแสงตามเส้นทาง (1)-(2)-(2)-(4) มีระยะทางเป็น L_1 และเส้นทางเดินของแสงตามเส้นทาง (1)-(3)-(3)-(4) มีระยะทางเป็น L_2 การแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะเป็นการแทรกสอดแบบเสริมเมื่อ

$$L_1 - L_2 = n\lambda \qquad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงอินเตอร์ฟิโรมิเตอร์ชนิดไมเคิลสัน

และการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะเป็นการแทรกสอดแบบหักล้างเมื่อ

$$L_1 - L_2 = (n + \frac{1}{2})\lambda \qquad (2.2)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนนับ และ λ คือความยาวคลื่นของแสง

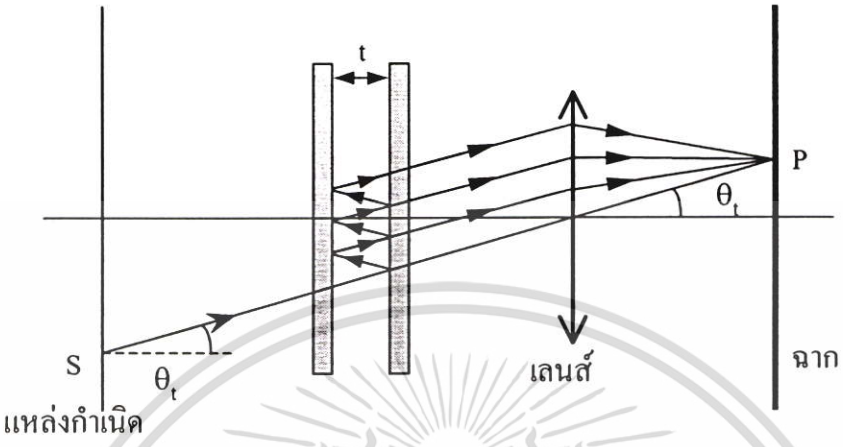
2.1.2 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแฟบรี-เพอโรต์

เครื่องมือนี้ใช้ฟิล์มบางที่มีผิวสองด้านขนานกันเป็นตัวทำให้เกิดการแทรกสอด และใช้ประโยชน์จากแสงที่ส่งผ่านไปทำให้เกิดการแทรกสอด

ลักษณะการจัดเครื่องมือชนิดนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยการใช้แผ่นแก้วหรือควอตซ์สองแผ่นวางขนานกัน เพื่อทำให้เกิดฟิล์มอากาศที่มีผิวสองด้านขนานกัน แผ่นแก้วหรือควอตซ์ที่ใช้ ต้องมีด้านในที่เรียบมากและสะท้อนแสงดีมากด้วย การสะท้อนนี้ทำได้โดยฉาบโลหะบางชนิด เช่น เงินหรืออลูมิเนียมไว้บนแผ่นแก้วหรือควอตซ์นั้น การฉาบฟิล์มโลหะจะต้องบางและเรียบมากระยะห่างระหว่างแผ่นแก้วหรือควอตซ์นั้นมีความสำคัญมาก เพราะเป็นความหนาของฟิล์ม t ที่ทำให้เกิดการแทรกสอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนานี้อาจทำให้คงที่หรือปรับค่าได้ก็ได้ แต่ส่วนใหญ่จะทำให้คงที่ และในกรณีนี้ เรียกแผ่นแก้วคู่นี้ว่า เอตาลอน(etalon)



รูปที่ 2.2 แสดงอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ชนิดแฟบรี-เพอโรต์

จากรูป S เป็นแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดี่ยว ให้แสงลำหนึ่งออกมาโดยทำมุม θ_t ดังรูป ลำแสงนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนหลาย ๆ ครั้ง และมีการหักเหผ่านออกไปอีกด้านหนึ่ง ไปรวมกันด้วยเลนส์นูน และเกิดภาพการแทรกสอดบนฉากที่จุด P ลักษณะของภาพการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนี้ สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta = 2n_f t \cos\theta_t \quad \text{โดยใช้} \quad n_f = 1 \tag{2.3}$$

Δ คือผลต่างระยะทางเดินแสงที่สะท้อนในฟิล์ม
ดังนั้นจะเกิดแถบสว่าง ถ้า

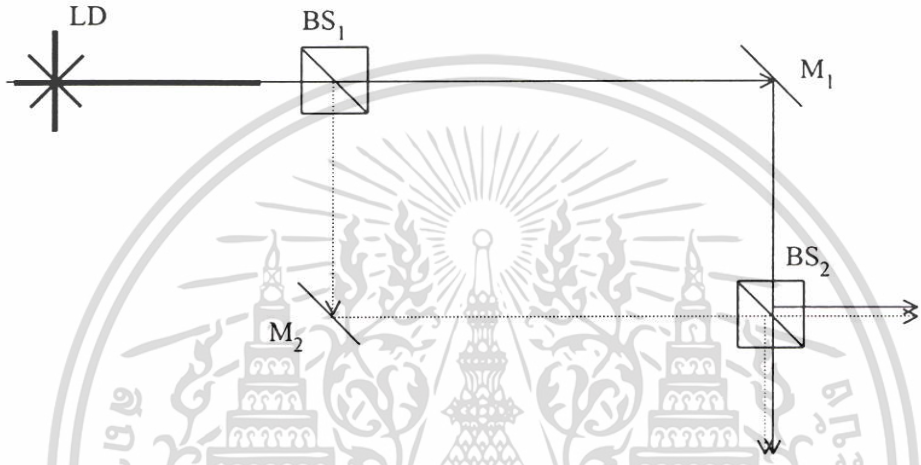
$$2t \cos\theta_t = m\lambda \tag{2.4}$$

แสงจากจุดอื่น ๆ บนแหล่งกำเนิด ถ้ามีมุม θ_t เท่ากันก็จะมีผลต่างเชิงแกนทัศน์เท่ากัน ก็จะให้ผลการแทรกสอดที่จุด P เช่นเดียวกัน แต่ถ้า θ_t มีค่าเปลี่ยนไปก็จะทำให้ได้วงสว่างที่ตำแหน่งอื่น ๆ ภาพการแทรกสอด ที่ได้บนฉากจะเป็นวงกลมมืด-สว่างสลับกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแม็คเซ็นเดอร์

เป็นอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ โครงสร้างทางกายภาพของ MZI จะประกอบด้วยตัวแยกและรวมแสง(beam splitter, BS) 2 อันคือ BS_1 และ BS_2 และกระจกเงา 2 อัน คือ M_1และ M_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ชนิดแม็คเซ็นเดอร์

ตัวแยกแสงBS ที่มีสมบัติแบ่งความเข้มแสงเป็น 50:50 จะแบ่งแสงออกเป็น 2 ทาง ที่มีความเข้มเท่ากัน ส่วนกระจก M จะต้องสะท้อนแสง 100%

แสงอาพันธ์จากเลเซอร์ไดโอด LD เมื่อตกกระทบผลึกแยกแสง BS_1 จะแยกแสงออกเป็นสองทางที่มีความเข้มเท่ากันแสงที่ทะลุผ่านตรงไป จะไปสะท้อนที่กระจก M_1 ส่วนแสงที่สะท้อนออกเป็นมุมฉากด้านข้างจะไปสะ ท้อนที่กระจก M_2 แล้วจึงมารวมกันที่ผลึกรวมแสง BS_2 แสงที่ผ่านออกมาทั้งสองทางจะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างขึ้นอยู่กับเฟสของแสงที่สะท้อนมาจากกระจกทั้งสอง

2.1.3.1 ในกรณีแขนทั้งสองเป็นที่ว่าง (Free space)

กำหนดให้ M_{BS} เป็นเมตริกซ์ที่กระทำกับแสงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวแยกแสง ซึ่งเป็นการพิจารณาจากการแบ่งความเข้มแสงเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{BS} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$ สัญญาณทั้งสองแขนของ MZI มาจากแหล่งกำเนิดแสงเหมือนกัน เอาต์พุตจากทางเดินแสงทั้งสอง มีความต่างเฟส $\Delta\varphi$ ซึ่งกำหนดโดย

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_1 L}{\lambda} - \frac{2\pi n_2 (L + \Delta L)}{\lambda} \tag{2.6}$$

เมื่อ L คือทางเดินของแสงในบริเวณที่ว่าง

ΔL คือความแตกต่างทางเดินของแสงในแขนทั้งสอง

n_1 คือดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางของแขนที่ 1

n_2 คือดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางของแขนที่ 2

λ คือความยาวคลื่นของแสง

ความต่างเฟส นี้สามารถหาได้จากความแตกต่างของทางเดินแสง ΔL หรือความแตกต่างของค่าดัชนีการหักเหถ้า $n_1 \neq n_2$ เมื่อทำให้ทั้งสองแขนมีค่าดัชนีการหักเหเหมือนกัน $n_1 = n_2 = n_{eff}$ ซึ่งทำให้สมการ(2.6) เขียนได้เป็น

$$\Delta\varphi = k\Delta L \tag{2.7}$$

เมื่อ $k = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$ และกำหนดให้เมตริกซ์สำหรับความต่างเฟส (Phase difference) $\Delta\varphi$ เป็น $M_{\Delta\varphi}$ เขียนได้เป็น

$$M_{\Delta\varphi} = \begin{bmatrix} e^{(jk\Delta L/2)} & 0 \\ 0 & e^{(-jk\Delta L/2)} \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

แสงเอาต์พุต $E_{Out\,1}$ และ $E_{Out\,2}$ จากความสัมพันธ์ทั้งสองแขนกับอินพุต E_{In1} และ E_{In2} ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} E_{Out1} \\ E_{Out2} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{In1} \\ E_{In2} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

เมื่อ

$$M = M_{BS}.M_{\Delta\varphi}.M_{BS} = j\begin{bmatrix} \sin(k\Delta L/2) & \cos(k\Delta L/2) \\ \cos(k\Delta L/2) & -\sin(k\Delta L/2) \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

$$E_{Out1} = j[E_{In1}(\lambda_1)\sin(k_1\Delta L/2) + E_{In2}(\lambda_2)\cos(k_2\Delta L/2)] \tag{2.11}$$

$$E_{Out2} = j[E_{In1}(\lambda_1)\cos(k_1\Delta L/2) - E_{In2}(\lambda_2)\sin(k_2\Delta L/2)] \tag{2.12}$$

กำหนดให้

$$E_{In1} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \cos\theta\sin\theta \\ \cos\theta\sin\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t} \tag{2.13}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos^2\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t}$$

และให้ $E_{In2} = 0$

โดยที่ E_0 คือแอมปลิจูดของสนามไฟฟ้า

ω_0 คือ ความถี่เชิงมุม

t คือเวลา

ดังนั้นเอาต์พุตที่ได้เขียนได้เป็น

$$E_{Out1} = j\left[\sin(k_1\Delta L/2)\begin{bmatrix} \cos^2\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t}\right] \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{Out2} = \mathbf{j}\left[\cos(k_1 \Delta L/2)\begin{bmatrix}\cos^2\theta \\ \sin\theta\end{bmatrix}\frac{E_0}{2}e^{i\omega_0 t}\right] \tag{2.15}$$

ดังนั้นความเข้มแสงหาได้จาก

$$I_{Out1} = E_{Out1}.E^*_{Out1}$$

$$= \frac{I_0}{4}\left[\cos^2\theta \sin^2(k_1 \Delta L/2)\right] \tag{2.16}$$

$$I_{Out2} = E_{Out2}.E^*_{Out2}$$

$$= \frac{I_0}{4}\left[\cos^2\theta \cos^2(k_1 \Delta L/2)\right] \tag{2.17}$$

2.1.3.2 ในกรณีที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์

จากสมการที่ (2.6) ในกรณีนี้ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางจะต่างกันและ L ต่างกัน ดังนั้น สามารถเขียนได้เป็น

$$\Delta\varphi = \delta_1 - \delta_2 \tag{2.18}$$

เมื่อ δ_1 คือค่าระยะทางเชิงแสงที่แสงเดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง และ δ_2 คือค่าระยะทางเชิงแสงที่แสงเดินทางในอากาศซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{n_{Fast} - n_{Slow}}{n_{Fast}\, n_{Slow}}\right)L_1 \tag{2.19}$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta_2 = \frac{2\pi n_2 L_2}{\lambda} \tag{2.20}$$

โดยที่ L_1 เป็นความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง L_2 ระยะทางของแสงที่เดินทางในแขนที่เป็นอากาศ เมื่อ n_{Fast} และ n_{Slow} คือค่าดัชนีการหักเหในแกนของเส้นใยแก้วนำแสง n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ L_2 ระยะทางของแสงที่เดินทางในแขนที่เป็นอากาศ ดังนั้นเมตริกสำหรับความต่างเฟส (Phase difference) ระหว่างสองแขนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$M_{\Delta\varphi} = \begin{bmatrix} e^{j(\delta_1-\delta_2)} & 0 \\ 0 & e^{-j(\delta_1-\delta_2)} \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

จะได้แสง Output E_{Out1} และ E_{Out2} จากสมการที่ (4) และ (5) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$M = M_{BS} \cdot M_{\Delta\varphi} \cdot M_{BS} = j\begin{bmatrix} \sin(\delta_1-\delta_2) & \cos(\delta_1-\delta_2) \\ \cos(\delta_1-\delta_2) & -\sin(\delta_1-\delta_2) \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

$$E_{Out1} = j[E_{In1}(\lambda_1)\sin(\delta_1-\delta_2) + E_{In2}(\lambda_2)\cos(\delta_1-\delta_2)]$$
$$E_{Out2} = j[E_{In1}(\lambda_1)\cos(\delta_1-\delta_2) - E_{In2}(\lambda_2)\sin(\delta_1-\delta_2)]$$

ดังนั้นความเข้มแสงหาได้จาก โดยที่ อินพุตของแสงเหมือนกับในที่ว่าง จะได้

$$I_{Out1} = E_{Out1} \cdot E^*_{Out1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

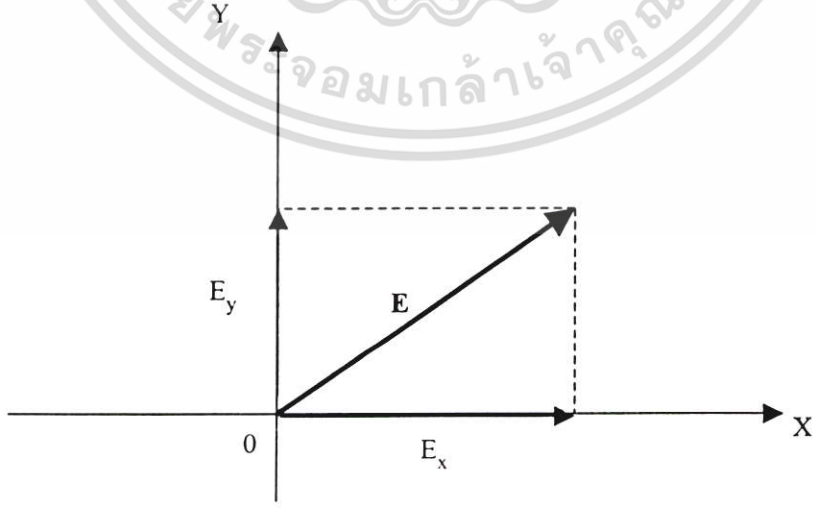
$$= \frac{I_0}{4}\left[\cos^2\theta \sin^2(\delta_1 - \delta_2)\right] \qquad (2.23)$$

$$I_{Out2} = E_{Out2} . E^*_{Out2}$$

$$= \frac{I_0}{4}\left[\cos^2\theta \cos^2(\delta_1 - \delta_2)\right]$$

2.2 โพลาไรเซชันของแสง

แสงเป็นคลื่นระนาบและมีทิศของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงหรือสั่นในแนวคงที่แนวหนึ่ง เรียกว่าเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น หรือเรียกว่ามีสมบัติโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized light) สมบัติทางโพลาไรซ์เชิงเส้นของแสงมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากกับการเป็นคลื่นตามขวาง (transverse wave) กล่าวคือ แนวของการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ในกรณีของคลื่นตามยาว (longitudinal wave) จะไม่สามารถอธิบายสมบัติทางโพลาไรเซชันได้ จึงอาจกล่าวได้ว่าโพลาไรเซชันของแสงเป็นการพิสูจน์ว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง โจนส์ (R.C.Jones) ได้พัฒนาเทคนิคทางเมตริกซ์ขึ้นสำหรับอธิบายเกี่ยวกับโพลาไรเซชัน โดยใช้เมตริกซ์หลัก (column metrix) ที่มี 2 แถวซึ่งเรียกว่าโจนส์เวกเตอร์(Jones vector) แทนแสงโพลาไรซ์ชนิดต่างๆ และใช้เมตริกซ์ชนิด 2x2 ที่เรียกว่าโจนส์เมตริกซ์ (Jones matrix) แทนกระบวนการที่ทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์ โดยโจนส์เมตริกซ์นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกระทำ (operator) สำหรับโจนส์เวกเตอร์



รูปที่ 2.4 แสดงสนามไฟฟ้าของแสง ณ เวลาหนึ่ง โดยแสงนี้เคลื่อนที่ในแนว +Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 โจนส์เวกเตอร์ตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของแสงโพลาไรซ์

พิจารณาแสงลำหนึ่งกำลังเคลื่อนที่ตั้งฉากกับระนาบกระดาษ และอยู่ที่ตำแหน่งของจุดกำเนิดของระบบแกนในรูปที่ 2.4 ให้ **E** ในรูปแทนขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้าของแสงลำดังกล่าว ณ เวลาหนึ่งขนาดของสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ส่วนทิศทางของสนามไฟฟ้าจะมีการกลับทิศทุกๆครึ่งรอบการสั่น ถ้าให้องค์ประกอบของ **E** ในแนวแกน X และ Y เป็น E_x และ E_y ตามลำดับ ดังนั้นเราอาจเขียนสนามไฟฟ้า **E** ในรูปของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) **i** และ **j** ได้เป็น

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} \tag{2.25}$$

และถ้าให้

$$E_x = E_{0x} e^{i(kz-\omega t+\varphi_x)} \tag{2.26}$$

กับ

$$E_y = E_{0y} e^{i(kx-\omega t+\varphi_y)} \tag{2.27}$$

ซึ่ง E_x และ E_y ต่างก็เคลื่อนที่ในทิศ +Z เหมือนกัน โดยมีอัมพลิจูด E_{0x} และ E_{0y} กับเฟส φ_x และ φ_y ตามลำดับ เมื่อแทนค่า E_x กับ E_y ลงในสมการ (2.25) จะได้

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= (E_{0X} e^{i(kz-\omega t+\varphi_x)})\mathbf{i} + (E_{0y} e^{i(kx-\omega t+\varphi_y)})\mathbf{j} \\ &= \left[(E_{0x} e^{i\varphi_x})\mathbf{i} + (E_{0y} e^{i\varphi_y})\mathbf{j}\right] e^{i(kz-\omega t)} \\ &= \tilde{E}_0 e^{i(kz-\omega t)}\end{aligned} \tag{2.28}$$

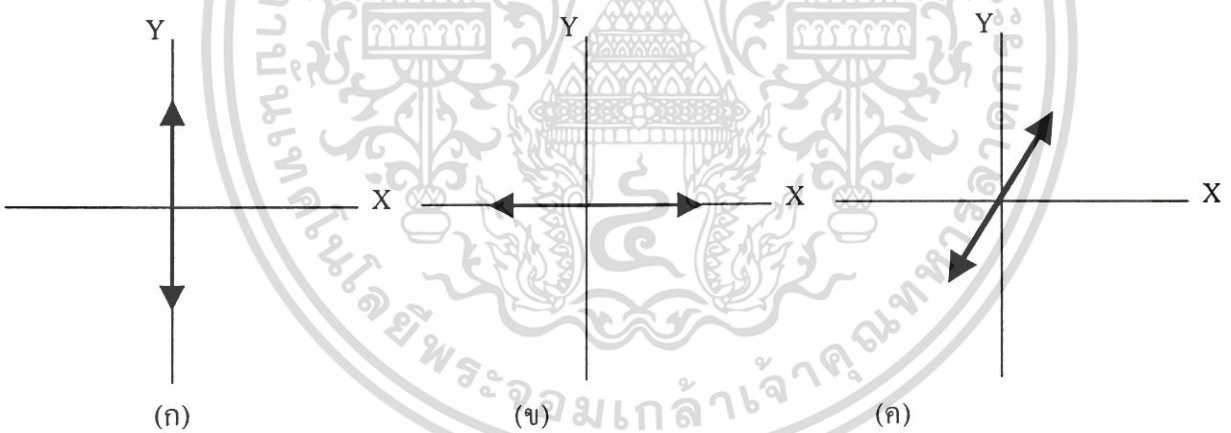
เทอมในวงเล็บ [ ] หรือ $\tilde{E}_0$ เป็นอัมพลิจูดเชิงซ้อน (complex amplitude) ของแสงโพลาไรซ์ มีองค์ประกอบของคลื่นทั้งในแนวแกนนอนและแกนตั้งอยู่ด้วยกัน สถานะทางโพลาไรซ์ของแสงจะถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างอัมพลิจูดและเฟสขององค์ประกอบนี้ ดังนั้นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสถานะทางโพลาไรซ์ เราจึงพิจารณาเฉพาะอัมพลิจูดเชิงซ้อน และนำมาเขียนเป็นเมตริกซ์หรือ โจนส์เวกเตอร์ ดังนี้

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{E}_{oy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x}e^{i\varphi_x} \\ E_{0y}e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} \qquad (2.29)$$

พิจารณารณารูปแบบของ โจนส์เวกเตอร์ที่ใช้แทนสถานะของโพลาไรเซชันเชิงเส้น โดยพิจารณาประกอบกับรูปที่ 2.5 ในรูปนี้แสงเคลื่อนที่ในทิศแกน +Z สำหรับรูปที่ 2.5 (ก) เป็นการแสดงแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวดิ่ง มีสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในแนวแกน Y ตลอดเวลา กล่าวคือ อัมพลิจูดจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันไซน์ (sine) ส่วนทิศทางจะมีเพียง +Y กับ –Y เท่านั้น ในกรณีนี้เราจะได้ว่า ไม่มีอัมพลิจูดในแนวแกน X หรือ $E_{0x}=0$ และอัมพลิจูดในแนวแกน Y มีค่า A หรือ $E_{0y}=A$



รูปที่ 2.5 แสดงสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีการวางตัวของสนามไฟฟ้าในแนวต่างๆ กันโดยทิศที่แสงเคลื่อนที่ไปเป็นทิศ +Z

เพื่อความสะดวก ถ้ากำหนดให้ จะได้โจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวดิ่งเป็น

$$E_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ A \end{bmatrix} = A\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่สนใจเฉพาะสถานะทางโพลาไรเซชัน เราอาจกำหนดให้ A มีค่าเป็น 1 และได้โจนส์เวกเตอร์สำหรับ แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวดิ่งเป็น

$$E_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

เวกเตอร์ใหม่นี้ก็คือ รูปแบบนอร์มอลไลซ์ของเวกเตอร์เดิมนั่นเอง สำหรับเวกเตอร์ $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ ใดๆจะเขียนในรูปแบบนอร์มอลไลซ์ได้ก็ต่อเมื่อ

$$|a^2| + |b^2| = 1$$

ในรูปที่ 2.5 (ข) เป็นการแสดงแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวนอนเราจะได้ว่า $E_{0y} = 0$ และ $E_{0x} = A$ และถ้าให้ $\varphi_x = 0$ จะได้โจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวนอนเป็น

$$E_0 = \begin{bmatrix} A \\ 0 \end{bmatrix} = A\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

สำหรับรูปที่ 2.3 (ค) แสดงแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีแนวการสั่นของสนามไฟฟ้าอยู่ในทิศที่ทำมุม α กับแกนราบ X ในกรณีสนามไฟฟ้าจะมีองค์ประกอบทางแกน X และแกน Y อยู่ด้วยกัน และถ้า $\alpha = 90°$ แสงนี้จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวดิ่ง ถ้า $\alpha = 0°$ แสงนี้จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวนอน องค์ประกอบทั้งสองของแสงในกรณีนี้จะต้องมีเฟสที่ตรงกัน กล่าวคือผ่านจุดกำเนิดในลักษณะเดียวกัน มีการเพิ่มของค่าสนามไฟฟ้าในแกนทั้งสองเหมือนกัน และมีค่าสูงสุดพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) เนื่องจากองค์ประกอบของแสงในทั้งสองแกนนี้ต้องมีเฟสที่ตรงกัน หรือมีความแตกต่างของเฟสเป็นศูนย์ เราอาจกำหนดเพื่อความสะดวกให้ φ_X และ φ_Y มีค่าเป็นศูนย์ และถ้าให้สนามไฟฟ้ามีอัมพลิจูดเป็น A จะได้องค์ประกอบในแนวแกน X และ Y มีค่าดังนี้

$$E_{0x} = A\cos\alpha$$

$$E_{0y} = A\sin\alpha$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น โจนส์เวกเตอร์สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในแนวที่ทำมุม α กับแนวราบคือ

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} A\cos\alpha \\ A\sin\alpha \end{bmatrix} = A\begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} \tag{2.30}$$

สำหรับรูปแบบนอร์มอลไลซ์ของโจนส์เวกเตอร์ในกรณีนี้จะมีค่า A=1

สมการ(2.30) นี้ใช้แสดงแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นในแนวดิ่งและแนวราบถ้าแทนค่า α เป็น 90° และ 0° ตามลำดับ สำหรับ α ค่าอื่นๆ เช่น 60° จะได้โจนส์เวกเตอร์เป็น

$$E_0 = \begin{bmatrix} A\cos 60 \\ A\sin 60 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix}$$

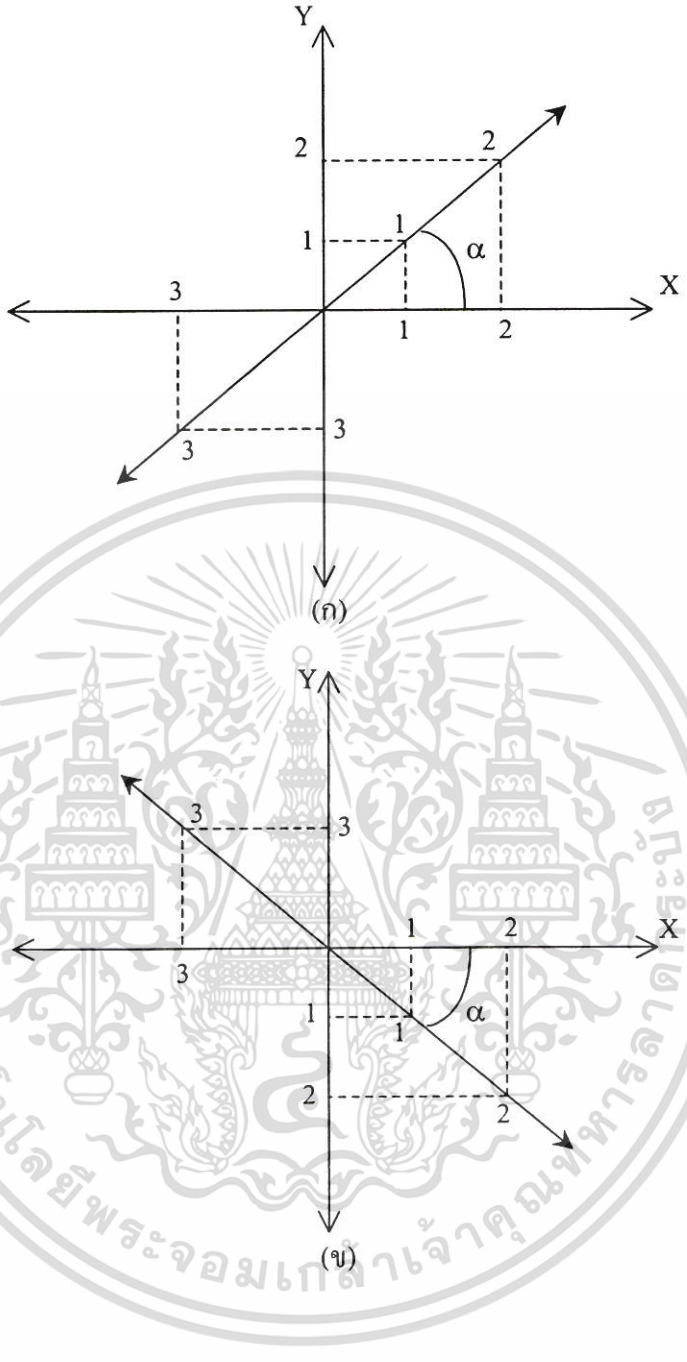
ในทางกลับกัน ถ้าพิจารณาเวกเตอร์ใดๆ $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ โดยที่ a และ b เป็นเลขจริง (real number) เราจะสามารถหามุมที่แนวของเวกเตอร์นี้ทำกับแนวราบได้เป็น

$$a = \arctan\frac{E_{0y}}{E_{0x}} = \arctan\frac{b}{a} \tag{2.31}$$

ในกรณีที่ a มีค่าเป็นบวก กล่าวคือ วัดจากแกน +X ไปทางควอดดรันต์ที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน Y จะมีค่าลบเนื่องจาก $\sin(-\alpha)$ มีค่าลบ ส่วนองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน X จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายถึงว่า องค์ประกอบทั้งสองนี้มีเฟสต่างกัน 180° หรือมีเฟสตรงกันข้าม และได้ผลเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในควอดดรันต์ที่ 2 และ 4 และมีความชันเป็นค่าลบ ในรูป 2.6 (ข) นี้จะเห็นได้ว่าในขณะที่สนามไฟฟ้าในแนวแกน X มีค่าเพิ่มขึ้นจากจุดกำเนิดไปในทิศ +X และสนามไฟฟ้าในแนวแกน Y จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากจุดกำเนิดไปในทิศ –Y

กล่าวโดยสรุปได้ว่า โจนส์เวกเตอร์ $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$ ที่มี a และ b เป็นเลขจริงและไม่เป็นศูนย์เป็นเวกเตอร์ที่แทนแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีมุมเอียง (inclination angle หรือมุมที่แนวการสั่นของสนามไฟฟ้าทำกับแนว +X) เป็น α ซึ่งเท่ากับ arctan(b/a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 (ก) สนามไฟฟ้าที่สั่นในแนวแกน X และ Y โดยมีเฟสตรงกันจะได้ผลลัพธ์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในควอดดรันต์ที่ 1 และ 3

(ข) สนามไฟฟ้าในแนวแกน X และ Y มีเฟสตรงข้ามกัน จะให้ผลลัพธ์เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในควอดดรันต์ที่ 2 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3 สมการแมกซ์เวลล์(Maxwell's Equation)

การอธิบายลักษณะการเดินทางของแสงที่เดินทางผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสง ในรูปแบบเชิงเรขาคณิต (เช่นการแทนแนวการเดินทางของแสงด้วยเส้นตรง) เนื่องจากแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การศึกษาพฤติกรรมของแสงที่เดินทางผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสง ซึ่งถือว่ามีโครงสร้างเป็นท่อนำสัญญาณแสงทรงกระบอก (cylindrical waveguide) จึงต้องเกี่ยวข้องกับเทอมของสมการทางคณิตศาสตร์ ที่มีความสัมพันธ์กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าสามารถแสดงได้ ด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation)

2.3.1 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

อธิบายไว้ว่าการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์สนามแม่เหล็กในตัวนำที่อยู่ในวงจรปิดจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าไหลในตัวนำนั้น ด้วยอัตราส่วนที่แปรผันกันโดยตรง ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{2.32}$$

เมื่อ $\mathbf{E}$ เป็นเวกเตอร์ของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (electric field intensity) มีหน่วยเป็นโวลท์ต่อเมตร (volt / metre; V/m)

และ $\mathbf{B}$ เป็นเวกเตอร์ของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux density) ที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น เทสลา (Tesla) หรือ เวเบอร์ต่อเมตร (Weber/m)

2.3.2 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law)

ได้อธิบายส่วนกลับของพฤติกรรมจากกฎของฟาราเดย์ได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในตัวนำใดๆ มีผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้น ด้วยอัตราส่วนที่แปรผันตรงซึ่งกันและกัน ดังแสดงด้วยสมการ

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \tag{2.33}$$

เมื่อ $\mathbf{H}$ เป็นเวกเตอร์ของความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) ที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

49619

J เป็นเวกเตอร์ของความหนาแน่นของของกระแสไฟฟ้า (current density) ที่ไหล มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

และ **D** เป็นเวกเตอร์ของความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า (electric flux density) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็นคูลอมป์ต่อเมตร (C/m)

2.3.3 กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า

อธิบายไว้ว่า ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าในหน่วยปริมาตรเล็กๆ (เข้าใกล้ศูนย์) มีค่าเท่ากับความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้น นั่นคือ

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \tag{2.34}$$

เมื่อ ρ หมายถึง ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมป์ต่อลูกบาศก์เมตร (C/m^3)

2.3.4 กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก

อธิบายไว้ว่า สนามแม่เหล็กในวงรอบปิดจะมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2.35}$$

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า และสามารถแสดงความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันได้ด้วยสมการ

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{2.36}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \tag{2.37}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \tag{2.38}$$

เมื่อ μ เป็นค่าความซึมซาบของตัวกลาง หรือ เพอเมียบิลลิตี (permeability) มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร (H/m)

ε เป็นค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าเพอมิตติวิตี (permittivity) มีหน่วยเป็นฟารัดต่อเมตร (F/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ σ เป็นค่าสภาพนำไฟฟ้าหรือคอนดัคติวิตี (conductivity) มีหน่วยเป็นโวลท์ต่อเมตร (V/m)

2.4 สมการของเส้นใยนำแสง

การเดินทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำสัญญาณใด ๆ เช่น เส้นใยนำแสง จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของเวลา t ดังตัวอย่างของสมการสนามไฟฟ้าดังนี้

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{j\omega t} \tag{2.39}$$

เมื่อ $\mathbf{r}$ เป็นโคออร์ดิเนตในพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinate)

และ ω เป็นค่าความถี่เชิงมุม (angular frequency) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (radian/s) ค่าของความถี่เชิงมุมมีความสัมพันธ์กับค่าของความถี่ (frequency, f) คือ $\omega = 2\pi f$

ในทำนองเดียวกัน สมการของพารามิเตอร์ตัวอื่นที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (เช่น $\mathbf{B}, \mathbf{H}, \mathbf{D}$) ต่างก็มีรูปแบบเช่นเดียวกับสมการ (2.39) เมื่อทำการแทนค่าต่างๆเหล่านี้ ลงในสมการของแมกซ์เวลล์ ประกอบกับใช้การพิจารณาค่าของความหนาแน่นประจุไฟฟ้าของเส้นใยนำแสง ซึ่งเป็นฉนวนทำให้มีค่าเป็นศูนย์ ($\rho = 0$) จะได้รูปแบบของสมการแมกซ์เวลล์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับเส้นใยนำแสง ดังนี้

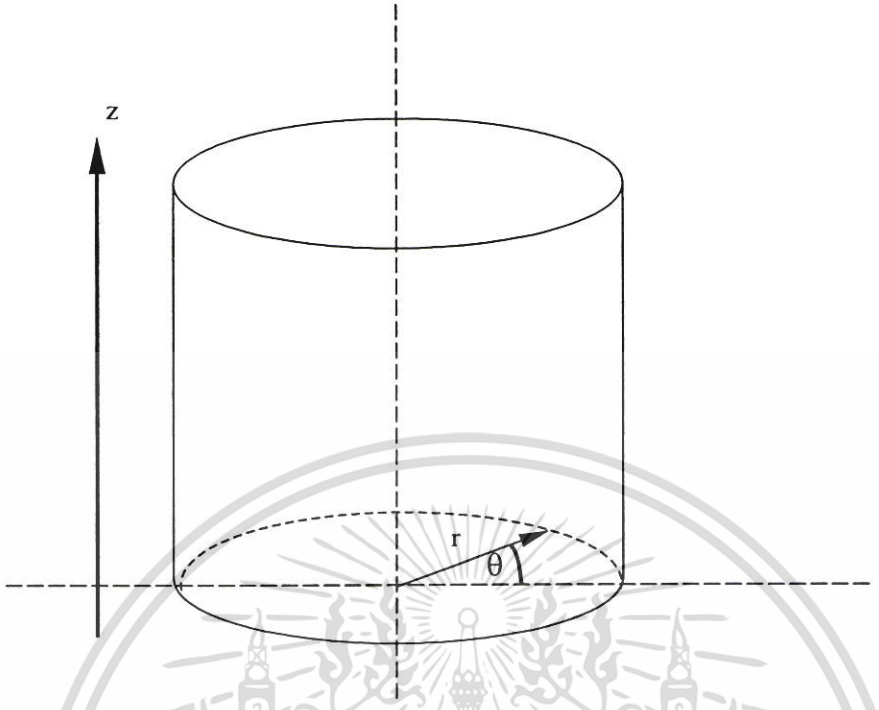
$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mathbf{B} \tag{2.40}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega\mathbf{D} \tag{2.41}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \tag{2.42}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2.43}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงโคออร์ดิเนตทรงกระบอก

สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังเช่นสนามไฟฟ้าในสมการที่ (2.39) สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันการเคลื่อนที่ในแนวแกน z และฟังก์ชันเชิงมุม ในทุกๆคาบเวลาของคลื่นหรือพีเรียด (period) ได้เป็น

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}.t) = (E_r\mathbf{a}_r + E_\theta\mathbf{a}_\theta + E_z\mathbf{a}_z)e^{-jn\theta + j\omega t - j\beta z} \qquad (2.44)$$

เมื่อ n = 0, 1, 2, 3, ... β เป็นค่าคงตัวการเคลื่อนที่ของคลื่น (propagation constant) และθ เป็นค่าของมุมที่กระทำในแนวรัศมี r ของเส้นใยนำแสง

จากสมบัติของเคิร์ล (curl) จะได้

$$\nabla\times\mathbf{E} = \frac{1}{r}\begin{vmatrix} \mathbf{a}_r & r\mathbf{a}_\theta & \mathbf{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial\theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \mathbf{E}_r & \mathbf{E}_\theta & \mathbf{E}_z \end{vmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{r}\left(\frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial\theta} - \frac{\partial}{\partial z}(r\mathbf{E}_\theta)\right)\mathbf{a}_r + \left(\frac{\partial \mathbf{E}_r}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial r}\right)\mathbf{a}_\theta + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial (r\mathbf{E}_\theta)}{\partial\theta} - \frac{\partial \mathbf{E}_r}{\partial z}\right)\mathbf{a}_z \qquad (2.45)$$

แทนค่า $\mathbf{E}$ จากสมการ (2.44) ลงไปจะได้

$$\nabla\times\mathbf{E} = \left(-\frac{jn}{r}E_z + j\beta E_\theta\right)\mathbf{a}_r + \left(-j\beta E_r - \frac{dE_z}{dr}\right)\mathbf{a}_\theta + \left(\frac{1}{r}E_\theta + \frac{dE_\theta}{dr} + \frac{jn}{r}E_r\right)\mathbf{a}_z \qquad (2.46)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าของเคิร์ล $\nabla\times(\nabla\times\mathbf{E})$ ในทิศทางของเวกเตอร์ $\mathbf{a}_z$ ที่สมมติให้คลื่นเคลื่อนที่ไป โดยแทนค่าของ $\nabla\times\mathbf{E}$ จากสมการที่ (2.46) ลงไปจะได้

$$[\nabla\times(\nabla\times\mathbf{E})]\mathbf{a}_z = \left[-j\beta\left(\frac{drE_r}{rdr} + j\frac{n}{r}E_\theta\right) - \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dE_z}{dr} - \frac{n^2}{r^2}E_z\right)\right]\mathbf{a}_z \qquad (2.47)$$

พิจารณาสมการที่ (2.42) เมื่อแทนค่าของ $\mathbf{D}$ จากสมการที่ (2.37) ลงไป จะได้

$$\nabla\cdot\mathbf{E} = 0 \qquad (2.48)$$

นั่นคือ

$$\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\mathbf{a}_r - \frac{1}{r}jn\mathbf{a}_\theta - j\beta\mathbf{a}_z\right)\cdot\left(rE_r\mathbf{a}_r + E_\theta\mathbf{a}_\theta + E_z\mathbf{a}_z\right) = 0 \qquad (2.49)$$

$$\frac{1}{r}\frac{drE_r}{dr} - j\frac{n}{r}E_\theta - j\beta E_z = 0$$

หรือ

$$j\beta E_z = \frac{1}{r}\frac{drE_r}{dr} + j\frac{n}{r}E_\theta \qquad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าจากสมการที่ (2.50) ลงไปในสมการที่ (2.47) จะได้

$$\left[\nabla\times(\nabla\times\mathbf{E})\right]\mathbf{a}_z = \left[\beta^2 E_z - \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dE_z}{dr}\right)+\frac{n^2}{r^2}E_z\right]\mathbf{a}_z \tag{2.51}$$

จากสมการที่ (2.40) เมื่อแทนค่า $\mathbf{B}$ ในสมการที่ (2.36) ลงไป แล้วคิดเฉพาะทิศทางของเวกเตอร์แกน z จะได้

$$\left[\nabla\times(\nabla\times\mathbf{E})\right]\mathbf{a}_z = -j\omega\mu\left[\nabla\times\mathbf{H}\right]\mathbf{a}_z \tag{2.52}$$

แทนค่า $\nabla\times\mathbf{H}$ จากสมการที่ (2.41) ลงไป แล้วแทนค่า $\mathbf{D}$ ด้วยสมการที่ (2.37) และสมการที่ (2.52) จะเป็น

$$\left[\nabla\times(\nabla\times\mathbf{E})\right]\mathbf{a}_z = \omega^2\mu\varepsilon E_z\mathbf{a}_z \tag{2.53}$$

เนื่องจากสมการที่ (2.51) มีค่าเท่ากับสมการที่ (2.53) เมื่อทำการเทียบสัมประสิทธิ์กัน จะได้

$$\beta^2 E_z - \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dE_z}{dr}\right)+\frac{n^2}{r^2}E_z = \omega^2\mu\varepsilon E_z \tag{2.54}$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการของฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function) ในรูปของ

$$\frac{d^2E_z}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dE_z}{dr}+\left(h^2-\frac{n^2}{r^2}\right)E_z = 0 \tag{2.55}$$

เมื่อกำหนดให้

$$h^2 = \omega^2\mu\varepsilon-\beta^2 \tag{2.56}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน สมการเบสเซลของสนามแม่เหล็กในทิศทางของเวกเตอร์แกน z จะมีรูปเป็น

$$\frac{d^2H_z}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dH_z}{dr}+\left(h^2-\frac{n^2}{r^2}\right)H_z = 0 \qquad (2.57)$$

ค่าของ h ในสมการที่ (2.56) มีได้สองค่า ขึ้นกับอาณาเขตภายในของเส้นใยนำแสง เช่น ในกรณีที่เป็นอาณาเขตของคอร์ที่มีค่าดัชนีหักเหเป็น n_1 ค่าของ h จะมีค่าเป็น

$$h^2 = \left(\frac{2\pi n_1}{\lambda}\right)^2-\beta^2 \qquad (2.58)$$

และกรณีที่อยู่ในอาณาเขตของแคลดดิงที่มีค่าดัชนีหักเหเป็น n_2 ค่าของ h จะมีค่าเป็น

$$h^2 = \left(\frac{2\pi n_2}{\lambda}\right)^2-\beta^2 \qquad (2.59)$$

สมการเบสเซลของสนามไฟฟ้าในสมการที่ (2.54) และของสนามแม่เหล็กในสมการที่ (2.55) สามารถแก้สมการด้วยเทคนิคในเทอมของฟังก์ชันพิเศษ (special function) เพื่อหาคำตอบออกมาได้เป็นสองกรณีคือ

1. กรณีที่อยู่ในอาณาเขตของคอร์ หรือ $r < a$ จะได้คำตอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นดังนี้

$$E_z(r,\theta,z,t) = Aj_n(ur)\cos(n\theta)\exp(-j\beta z+j\omega t) \qquad (2.60)$$

$$H_z(r,\theta,z,t) = Bj_n(ur)\sin(n\theta)\exp(-j\beta z+j\omega t) \qquad (2.61)$$

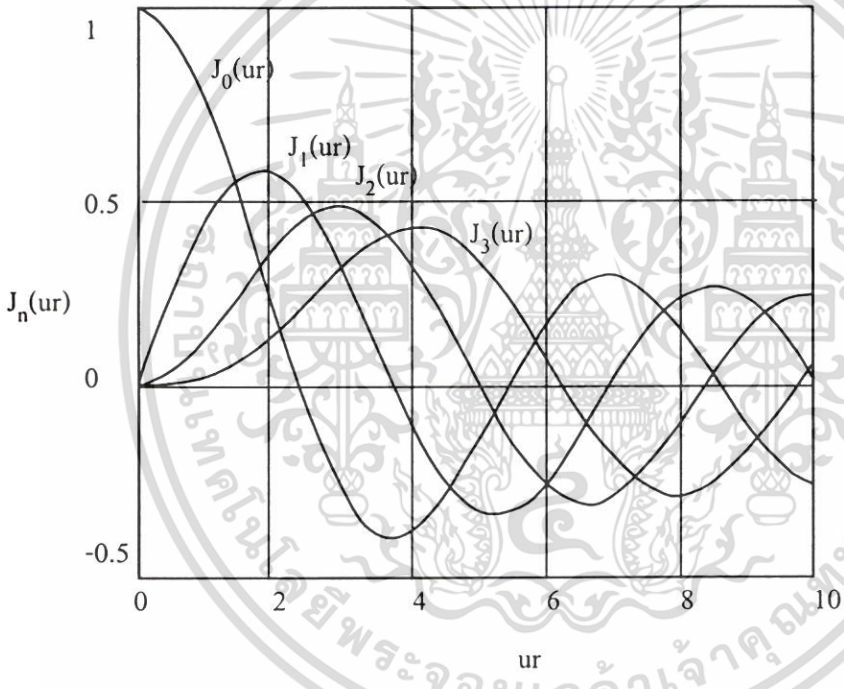
เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$J_n(ur)$ เป็นฟังก์ชันของเบสเซลชนิดที่หนึ่ง (first kind Bessel function) ในอันดับที่ n (n^{th}-order) มีนิยามดังนี้

$$j_n(ur) = \left(\frac{ur}{2}\right)^n \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(-(ur)^2/4)^q}{q!\Gamma(q+n+1)} \tag{2.62}$$

และ $$u = \sqrt{h_1^2 - \beta^2} \quad \text{เมื่อ} \quad h_1 = \frac{2\pi n1}{\lambda} \tag{2.63}$$



รูปที่ 2.8 กราฟของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่ง เมื่อ n = 0, 1, 2, 3

2. กรณีที่อยู่ในอาณาเขตของแคลดดิง หรือ r > a จะได้คำตอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นดังนี้

$$E_z(r,\theta,z,t) = CK_n(wr)\exp(j_n\theta)\exp(-j\beta z + j\omega t) \tag{2.64}$$

$$H_z(r,\theta,z,t) = DK_n(wr)\exp(j_n\theta)\exp(-j\beta z + j\omega t) \tag{2.65}$$

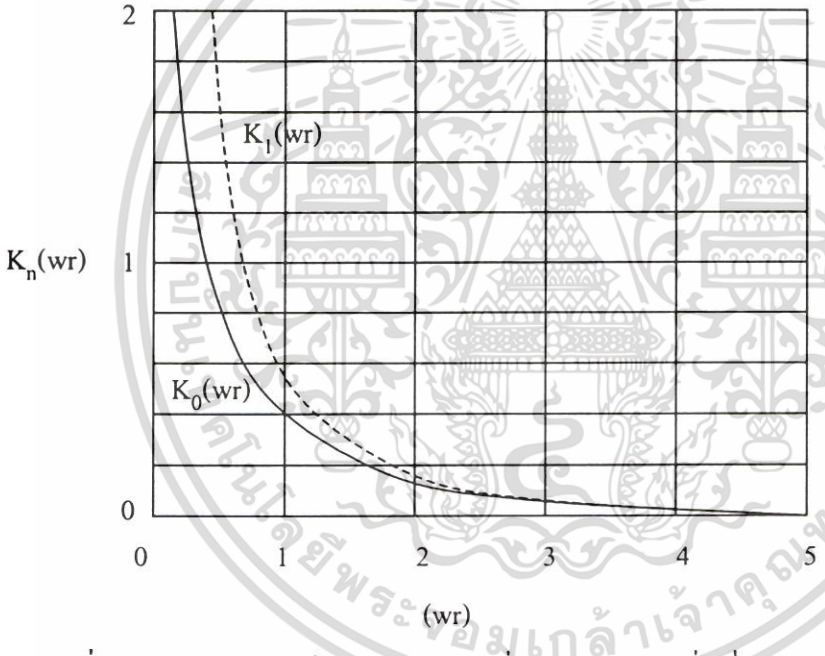
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C และD เป็นค่าคงที่ใดๆ

$K_n(wr)$ เป็นฟังก์ชันเบสเซลประยุกต์ชนิดที่สอง (modified Bessel function of the second kind) ในอันดับที่ n ซึ่งมีนิยามเป็น

$$K_n(wr) = \int_0^{\infty} \exp(-wr\cosh t)\cosh(nt)\,dt \qquad (2.66)$$

และ $$w = \sqrt{\beta^2 - h^2} \quad \text{เมื่อ} \quad h_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda} \qquad (2.67)$$



รูปที่ 2.9 กราฟของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่สองของอันดับที่หนึ่งและสอง

จากวิธีในการหาค่าของ $E_z(r, \theta, z, t)$ และ $H_z(r, \theta, z, t)$ ที่แสดงในสมการที่ (2.60), (2.61), (2.64) และ (2.65) สามารถนำวิธีเดียวกันนี้ มาใช้เพื่อหาค่าของ E_θ และ H_θ ได้เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\theta 1} = -\frac{n\beta}{u^2 r} AJ_n(ur) - \frac{\varepsilon\mu B}{u} J'_n(ur) \quad (2.68)$$

$$E_{\theta 2} = -\frac{n\beta}{w^2 r} CK_n(wr) - \frac{\varepsilon\mu D}{w} K'_n(wr) \quad (2.69)$$

$$H_{\theta 1} = -\frac{\omega\varepsilon_1}{u} AJ'_n(ur) - \frac{\beta n B}{ru^2} J_n(ur) \quad (2.70)$$

$$H_{\theta 2} = -\frac{\omega\varepsilon_2}{u} CK'_n(wr) - \frac{\beta n D}{rw^2} K_n(wr) \quad (2.71)$$

เมื่อตัวห้อย 1 และ 2 แสดงค่าในเทอมของคอร์และแคลดดิงตามลำดับ และสัญลักษณะขีดข้างบน(') แสดงถึงเทอมที่เป็นค่าอนุพันธ์(differential)

ในการพิจารณาหาค่าคงที่ A, B, C, D จะใช้เงื่อนไขขอบเขต(boundary condition) ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างคอร์และแคลดดิง โดยที่ค่าของ E_z และ H_z ที่จุดนี้จะต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ของสมการเมื่อ r = a เป็น

$$E_{z1} - E_{z2} = AJ_n(ua) + CK_n(wa) = 0 \quad (2.72)$$

$$H_{z1} - H_{z2} = BJ_n(ua) + DK_n(wa) = 0 \quad (2.73)$$

$$E_{\theta 1} - E_{\theta 2} = A\frac{n\beta}{u^2 a} J_n(ua) + B\frac{\omega\mu}{u} J'_n(ua) + C\frac{n\beta}{w^2 a} K_n(wa) + D\frac{\omega\mu}{w} K'_n(wa) = 0 \quad (2.74)$$

$$H_{\theta 1} - H_{\theta 2} = A\frac{\omega\varepsilon_1}{u} J'_n(ua) + B\frac{n\beta}{u^2 a} J_n(ua) + C\frac{\omega\varepsilon_2}{w} K'_n(wa) + D\frac{n\beta}{aw^2} K_n(wa) = 0 \quad (2.75)$$

สมการที่ (2.72), (2.73), (2.74) และ (2.75) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรไม่ทราบค่า A, B, C และ D สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} J_n(ua) & 0 & -Kn(wa) & 0 \\ 0 & J_n(ua) & 0 & -Kn(wa) \\ \frac{n\beta}{u^2 a} J_n(ua) & \frac{\omega\mu}{u} J'_n(ua) & \frac{n\beta}{w^2 a} K_n(wa) & \frac{\omega\mu}{w} K'_n(wa) \\ \frac{\omega\varepsilon_1}{u} J'_n(ua) & \frac{n\beta}{u^2 a} J_n(ua) & \frac{\omega\varepsilon_2}{w} K'_n(wa) & \frac{n\beta}{w^2 a} K_n(wa) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = 0 \qquad (2.76)$$

จากสมการนี้จะพบว่า ค่าคำตอบของสมการจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ค่าดีเทอมิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ของตัวที่ไม่ทราบค่ามีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\begin{vmatrix} J_n(ua) & 0 & -Kn(wa) & 0 \\ 0 & J_n(ua) & 0 & -Kn(wa) \\ \frac{n\beta}{u^2 a} J_n(ua) & \frac{\omega\mu}{u} J'_n(ua) & \frac{n\beta}{w^2 a} K_n(wa) & \frac{\omega\mu}{w} K'_n(wa) \\ \frac{\omega\varepsilon_1}{u} J'_n(ua) & \frac{n\beta}{u^2 a} J_n(ua) & \frac{\omega\varepsilon_2}{w} K'_n(wa) & \frac{n\beta}{w^2 a} K_n(wa) \end{vmatrix} = 0 \qquad (2.77)$$

ซึ่งสมการที่ (2.77) เป็นสมการที่แสดงค่าไอเกน(eigenvalue equation) ของการเคลื่อนที่ของคลื่นในเส้นใยนำแสง

ในสมการที่ (2.77) มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ u และ w ซึ่งอาจแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$u^2 = \left(\frac{2n_1\pi}{\lambda}\right)^2 - \beta^2 \qquad (2.78)$$

$$w^2 = \beta^2 - \left(\frac{2n_2\pi}{\lambda}\right)^2 \qquad (2.79)$$

เนื่องจากค่า u^2 และ w^2 จะต้องมีค่าเป็นบวกเสมอ(ค่ายกกำลังสอง) ค่าคงตัวการเคลื่อนที่ β (propagation constant) จะต้องมีค่าเป็นไปตามเงื่อนไข $k_1 \geq \beta \geq k_2$ เมื่อกำหนดให้

$k_1 = (2\pi n_1/\lambda)$ และ $k_2 = (2\pi n_2/\lambda)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการของ u และ w เมื่อทำการคูณด้วย a^2 ทั้งสองสมการ และนำสมการทั้งสองมารวมกัน จะได้

$$(ua)^2 + (wa)^2 = \left(\frac{2n_1\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{2n_2\pi}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 a^2(n_1^2 - n_2^2)$$

$$(ua)^2 + (wa)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 a^2(NA)^2 \qquad (2.80)$$

หรือนั่นคือ

$$(ua)^2 + (wa)^2 = V^2 \qquad (2.81)$$

โดยที่ V จะนิยามให้เป็นค่า ความถี่นอร์มอลไลซ์ (normalised frequency) หรือ ตัวเลขวี (V-number) ซึ่งมีค่าเป็น

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(NA) \qquad (2.82)$$

ย้อนกลับมาพิจารณาสมการค่าไอเกนหรือสมการที่ (2.77) เมื่อผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์ จะได้

$$\left[\frac{J'_n(ua)}{uJ_n(ua)} + \frac{K'_n(wa)}{wK_n(wa)}\right]\left[\frac{k_1^2 J'_n(ua)}{uJ_n(ua)} + \frac{k_2^2 K'_n(wa)}{wK_n(wa)}\right] = n^2\beta^2\left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2}\right)^2 \qquad (2.83)$$

เมื่อ $k_1 = (2\pi n_1/\lambda)$ และ $k_2 = (2\pi n_2/\lambda)$ อย่างไรก็ตาม ในที่นี้ค่าของ n = 0, 1, 2, 3, ... เป็นตัวเลขที่สัมพันธ์กับอันดับ (order) ของสมการเบสเซล ในขณะที่ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของคอร์และแคลดดิ้งตามลำดับ

ในกรณีที่ตัวเลขอันดับ n มีค่าเท่ากับศูนย์ สมการ (2.83) จะมีรูปเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[\frac{J'_0(ua)}{uJ_0(ua)}+\frac{K'_0(wa)}{wK_0(wa)}\right]\left[\frac{k_1^2J'_0(ua)}{uJ_0(ua)}+\frac{k_2^2K'_0(wa)}{wK_0(wa)}\right] = 0 \qquad (2.84)$$

เมื่อทำการเทียบสัมประสิทธิ์ โดยพิจารณาว่าค่าในวงเล็บจะมีค่าเป็นศูนย์ จะได้

$$\frac{J'_0(ua)}{uJ_0(ua)} = -\frac{K'_0(wa)}{wK_0(wa)} \qquad (2.85)$$

และ

$$\frac{k_1^2J'_0(ua)}{uJ_0(ua)} = -\frac{k_2^2K'_0(wa)}{wK_0(wa)} \qquad (2.86)$$

สมการ (2.85) และ (2.86) เรียกว่าสมการค่าไอเกนของคลื่นแสงในโหมด TE (Transverse Electric Mode) ซึ่งเป็นโหมดที่มีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และในโหมด TM (Transverse Magnetic Mode) ซึ่งเป็นโหมดที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ตามลำดับ

ในกรณีโหมด TE (พิจารณาเฉพาะสมการไอเกนที่ (2.85) เท่านั้น) จะประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่อยสามตัวคือ H_z, E_θ และ H_r ส่วนในกรณีของโหมด TM (พิจารณาเฉพาะสมการไอเกนที่ (2.86) เท่านั้น) ก็จะประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าย่อยสามตัวเช่นกันคือ E_z, H_θ และE_r

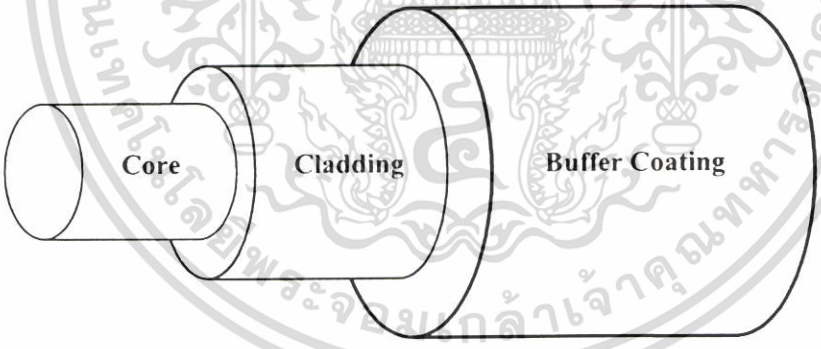
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีของอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ทางแสง

3.1.1 เส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงสร้างขึ้นจากแก้วหรือสารที่เป็นไดอิเล็กตริก โดยมีโครงสร้างเป็นตัวกลางทรงกระบอกอย่างน้อย 2 ชั้น คือ ชั้นแรกเรียกว่าแกน(Core) ของเส้นใยนำแสง และส่วนที่อยู่ถัดออกมาเป็นชั้นของแคลดดิง(Cladding) ซึ่งจะมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน โดยหน้าที่สำคัญของแกนของเส้นใยนำแสงนั้นจะเป็นตัวกลางในการนำแสง ส่วนหน้าที่ของแคลดดิงนั้น จะเป็นตัวลดการสูญเสียกำลังแสงเนื่องจากการสะท้อนแสงแบบกลับหมด และป้องกันการดูดกลืนกำลังแสงเมื่อแกนของเส้นใยนำแสงไปสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ช่วยในการป้องกันมิให้แกนของเส้นใยนำแสงเกิดการโค้งงอหรือหักได้ง่าย ซึ่งโครงสร้างของเส้นใยนำแสงนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

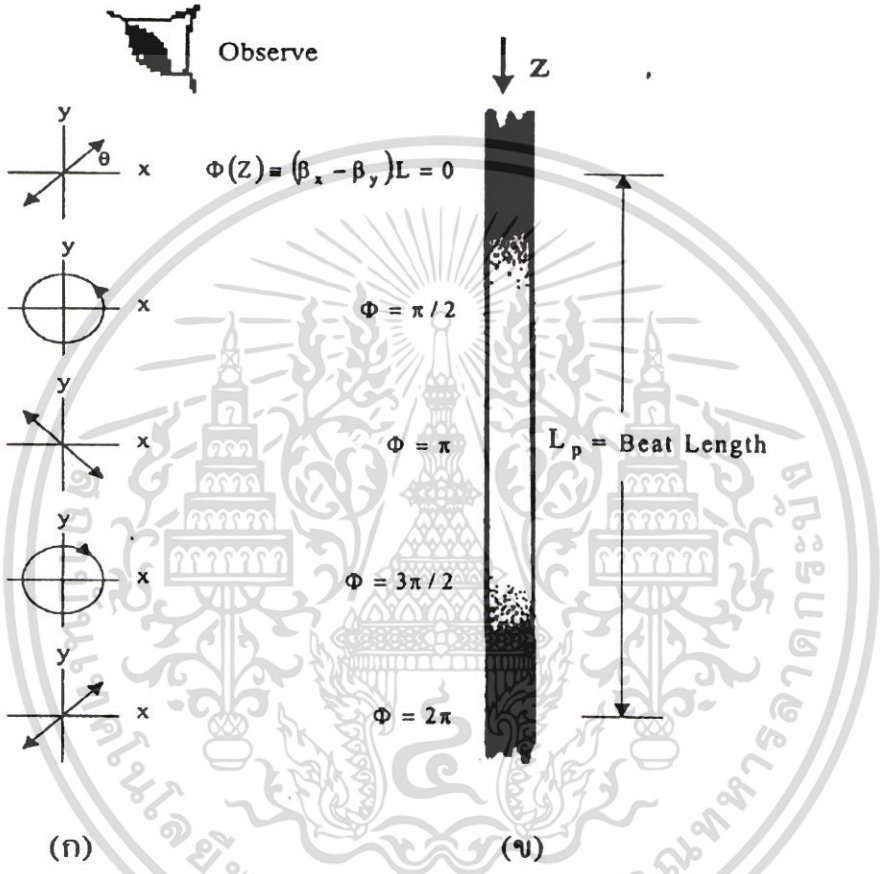


รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสง

ในส่วนนี้จะเป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงชนิดไบร์ฟรินเจนซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชันแบบไฮลีไบร์ฟรินเจนซ์ (Highly Birefringence Fiber) ซึ่งโดยปกติแล้วเส้นใยนำแสงในทางทฤษฎีนั้นองค์ประกอบของความเร็วของแสงในส่วนแกนจะเท่ากันแต่ในทางปฏิบัติแล้วเส้นใยนำแสงจะไม่สมมาตรอย่างสมบูรณ์ โดยมีรูปร่างและดัชนีหักเหที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สมมาตรจึงทำให้โหมดทั้งสองนั้นมีความเร็วที่แตกต่างกันเล็กน้อย องค์ประกอบของความเร็วนั้นประกอบด้วยองค์ประกอบตามแกนที่มีความเร็วมากกว่า (Fast Axis) และอีกแกนหนึ่งที่ตั้งฉากกัน ที่มีความเร็วน้อยกว่า (Slow Axis) ทำให้เกิดการหักเหสองแนวหรือไบร์ฟรินเจนซ์(Bire fringence, B)ขึ้น



รูปที่ 3.2 แสดงความยาวบีตส์ในเส้นใยแก้วนำแสง (ก) สถานะโพลาไรเซชันเมื่อเทียบกับ ϕ_Z (ข)ความเข้มของแสงที่ปรากฏในเส้นใยแก้วนำแสงโดยความเข้มนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงครบรอบในหนึ่งความยาวบีตส์

ซึ่งค่าไบร์ฟรินเจนซ์เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงสภาพทางโพลาไรเซชัน (Polarization) ของแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง โดยสามารถอธิบายในเทอมของผลต่างของค่าการกระจายค่าดัชนีหักเหในแนวแกนที่มีความเร็วมากกว่า(n_f) และในแนวแกนที่มีความเร็วน้อยกว่า(n_s) อันเนื่องมาจากความไม่สมมาตรของการกระจายค่าดัชนีหักเหในส่วนของแกน ซึ่งจะสามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเส้นใยนำแสงนั้นเอง(Intrinsic Birefringence) โดยโครงสร้างในส่วนของแกนภายในนั้นได้ถูกทำให้เกิดความเค้นบริเวณรอบๆ แกน (Geomertrical Effect,G.E.) หรือเกิดจากการรบกวนจากภายนอกก็ได้ ซึ่งผลของการให้ความเค้นภายนอก (Stress Effect,S.E.) นั้นทำให้ได้ค่าไบร์ฟรินเจนซ์ที่สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$B = \Delta n = \left| n_f - n_s \right| \tag{3.1}$$

และค่าที่บอกความสามารถในการรักษาสภาวะโพลาไรเซชันของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด (Polarization-Maintaining Fiber) นั้นคือ ค่าความยาวบีตส์ของเส้นใยนำแสง(L_B) ซึ่งค่าความยาวบีตส์นี้เป็นค่าที่บอกถึงระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ในเส้นใยนำแสงแล้ว ทำให้เกิดความต่างเฟสครบหนึ่งรอบหรือ 2π ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร โดยสามารถกำหนดได้โดยการวัดระยะระหว่างแถบมืด(Dark) กับแถบสว่าง(Bright) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และถ้าเส้นใยนำแสงชนิดใดมีค่าความยาวบีตส์สั้นจะมีคุณสมบัติในการรักษาสภาวะโพลาไรเซชันได้ดีกว่าเส้นใยนำแสงที่มีค่าความยาวบีตส์ที่ยาวกว่า สำหรับความยาวบีตส์ของเส้นใยนำแสงนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$L_B = \frac{\lambda}{B} \tag{3.2}$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง B คือค่าไบร์ฟรินเจนซ์ของเส้นใยนำแสง

ดังนั้นเส้นใยนำแสงเส้นใดมีค่าการกระจายค่าดัชนีหักเหในส่วนของแกนมากนั้นก็คือจะมีค่าไบร์ฟรินเจนซ์ มาก ซึ่งจะทำให้มีค่าความยาวบีตส์สั้น จึงทำให้มีคุณสมบัติในการอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชันได้ดี และสำหรับเส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชัน(PM)นี้ จะสามารถแบ่งได้เป็นชนิดไฮลีไบร์ฟรินเจนซ์(HB) และชนิดโลว์ไบร์ฟรินเจนซ์ (Low Birefringence,LB) โดยพิจารณาจากผลต่างของค่าดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสง กล่าวคือถ้าค่าไบร์ฟรินเจนซ์ $B > 10^{-5}$ จะจัดเป็นชนิดไฮลีไบร์ฟรินเจนซ์ แต่ถ้าค่าไบร์ฟรินเจนซ์ $B < 10^{-5}$ จะจัดเป็นชนิดโลว์ไบร์ฟรินเจนซ์ และเส้นใยนำแสงชนิดไฮลีไบร์ฟรินเจนซ์ก็ยังสามารถที่จะแยกพิจารณาเป็นแบบโหมดโพลาไรเซชันเดี่ยว(Single-Polarization Mode, SP) และแบบโหมดโพลาไรเซชันสองโหมด (Two-Polarization Mode, TP)

นอกจากการใช้เส้นใยนำแสงชนิดนี้ในงานทางด้านการสื่อสารแล้ว เรายังสามารถนำเส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชันไปใช้ในงานทางด้านการตรวจวัด เช่น การตรวจหาเสียง แม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็ก การหมุน และแรงดัน เป็นต้น ซึ่งจะใช้คุณสมบัติทางด้านโพลาไรเซชันของแสงมาเป็นตัวตรวจวัดได้

3.1.2 ผลึกลิเธียมไนโอเบต ($LiNbO_3$)

ลิเธียมไนโอเบต เป็นสารที่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่มีสมบัติพิเศษ คือสามารถเข้ารหัสสัญญาณทางแสง(optical signal modulation) ได้โดยอาศัยปรากฏการณ์อิเลคโตรออปติก(electro-optic effect) ที่จะเกิดขึ้นเมื่อผลึกนี้อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เมื่อแสงโพลาไรซ์ที่มีสถานะโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางชนิดนี้ จะแยกพิจารณาสมบัติที่สำคัญสองอย่าง คือ ดัชนีหักเหที่เปลี่ยนไปและเฟสของแสงโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนไปเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางเป็นระยะทาง L ดังรูปที่ 3.3 พิจารณาแสงที่เดินทางเข้ามามีสมการสถานะโพลาไรซ์ขาเข้าเป็น

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}}\exp(i\omega t) \qquad (3.3)$$

$$E_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}}\exp(i\omega t) \qquad (3.4)$$

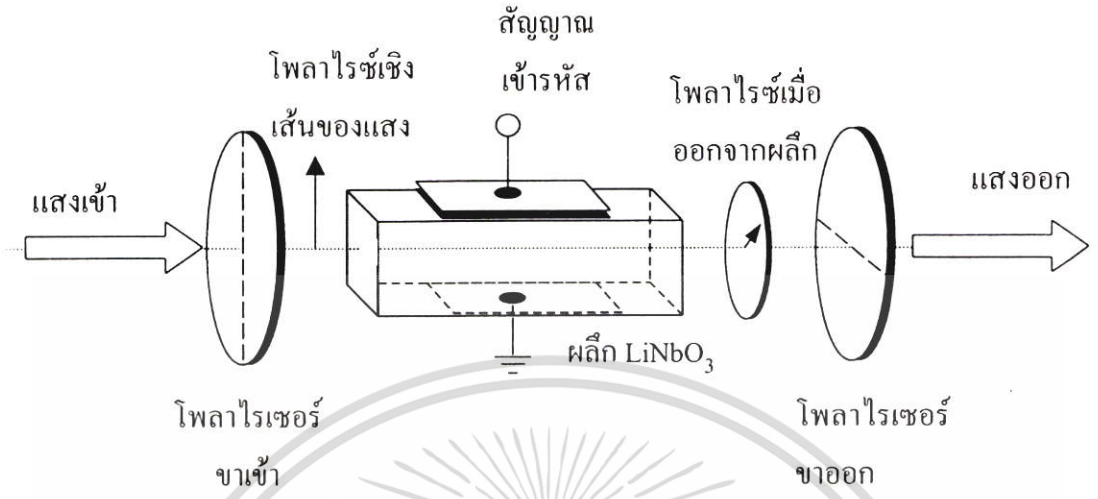
เมื่อเดินทางผ่านออกมา สถานะโพลาไรซ์ขาออกกำหนดโดย

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}}\exp(i\omega t + i\theta_1) \qquad (3.5)$$

$$E_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}}\exp(i\omega t + i\theta_2) \qquad (3.6)$$

ซึ่งมีเฟสต่างของทั้งสองแนวแกนเป็น $\phi = \theta_2 - \theta_1$ และถ้า $\phi = \pi/2$ สัญญาณแสงที่ออกมาจะเป็นแสงที่มีโพลาไรซ์ เป็นแบบวงกลม และถ้า $\phi = \pi$ ก็จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีระนาบโพลาไรซ์เปลี่ยนไป 90 องศากับแนวแสงที่เข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การจัดอุปกรณ์เพื่อการเข้ารหัสสัญญาณทางแสง

และถ้าความเข้มแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ที่วางตั้งฉากกับแผ่นโพลาไรเซอร์ขาเข้า อัตราการมอดูเลตมีค่าเป็น

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \sin^2 \frac{\phi}{2} \qquad (3.7)$$

ดังนั้น ถ้าสามารถควบคุมสนามไฟฟ้าได้ ก็จะสามารถควบคุมมุมที่บิดไปของระนาบโพลาไรซ์ของแสงที่เข้ามาในระบบ และสามารถควบคุมความเข้มแสงที่ออกจากระบบได้อีกด้วย ค่ามุมเฟสต่างจะขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้า มีสมการเป็น

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L n_{r0}^3 r_{42} V_d \qquad (3.8)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของแสง, L คือ ความยาวของผลึกตัวกลาง, n_{ro} คือ ดัชนีหักเหของตัวกลาง, r_{ij} คือ ค่า สัมประสิทธิ์อิเลคโตรออปติก (electro-optic coefficient) ของตัวกลาง, V คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับผลึก และ d คือความหนาของผลึกที่ใช้ การป้อนสนามไฟฟ้าให้กับระบบสามารถทำได้ทั้งในทิศตั้งฉากกับทิศทางเดินของแสง และในทิศขนานกับทางเดินของแสง ซึ่งถ้าให้สนามไฟฟ้าในทิศตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

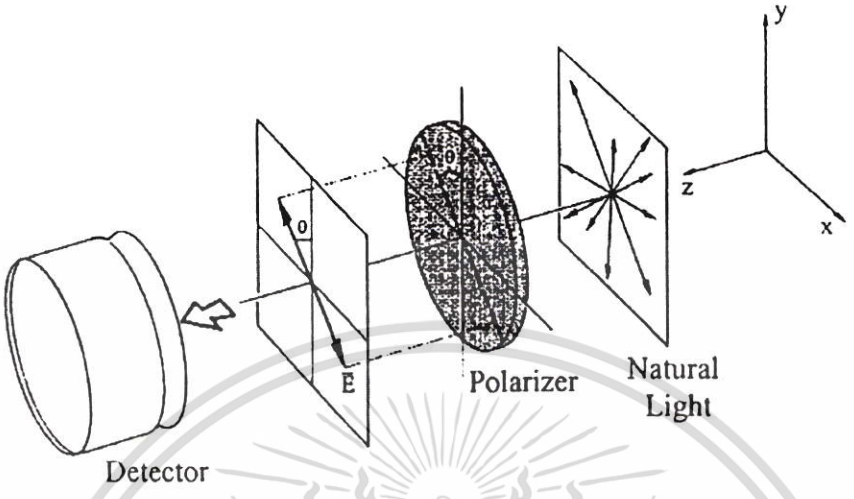
ฉากกับทิศทางเดินของแสง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) และถ้าให้สนามไฟฟ้าในทิศขนานกับทิศทางเดินของแสง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์พอคเคิล (Pockel effect) จากสมการที่ (3.8) จะได้ว่า สามารถทำให้ผลของปรากฏการณ์อิเลคโตรออปติกเกิดขึ้นมากๆได้โดยการลดขนาดของ d ลงโดยยังใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าเดิมได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์อิเลคโตรออปติกของตัวกลางก็ยังน้อยมาก (คือประมาณ 10^{-12}m/V) ดังนั้น ในการใช้งานจริงความยาวของผลึกที่ใช้ก็ยังคงยาวอยู่ (อยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร หรือมากกว่านั้น) ดังนั้นในการใช้งานระดับไมโครอิเลคทรอนิกส์ จึงยังถือว่าใหญ่อยู่มาก ยังต้องการการวิจัยทางด้านวัสดุเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพให้ดียิ่งขึ้นอีก

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าดัชนีหักเห n_{r0} และค่าสัมประสิทธิ์ของอิเลคโตรออปติก r_{ij} ของตัวกลางบางชนิด

Material	n_{r0}	r_{ij} (10^{-12} m/V)
Quartz	1.544	$r_{11} = -0.47$ $r_{41} = -0.2$
$LiNbO_3$	2.300	$r_{13} = 9.0$; $r_{22} = 6.6$ $r_{41} = 30$
KDP	1.507	$r_{41} = 8.6$; $r_{63} = 9.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 โพลาไรเซอร์



รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์โพลาไรเซอร์ชนิดเชิงเส้น

เครื่องมือทางทัศนศาสตร์ (Optics) ที่สามารถเปลี่ยนแสงธรรมชาติให้กลายเป็นแสงโพลาไรซ์เรียกว่า โพลาไรเซอร์ ตัวอย่างเช่นเครื่องมือที่ใช้แยกแสงที่ไม่ใช่แสงโพลาไรซ์ซึ่งเกิดจากการรวมกันของคลื่น 2 ขบวน ที่อยู่ในทิศทางตั้งฉากกันและมีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเฟสและความถี่ โดยให้ขบวนใดขบวนหนึ่งของแสงนี้แยกออกไป และให้อีกขบวนหนึ่งผ่านไปได้เท่านั้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 เครื่องมือชนิดนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า "โพลาไรเซอร์ชนิดเชิงเส้น" ดังนั้นสำหรับเครื่องมือที่สามารถให้แสงโพลาไรซ์ชนิดวงกลมและวงรีออกมาได้ จะเรียกว่า โพลาไรเซอร์ชนิดวงกลมและวงรี ตามลำดับ

โพลาไรเซอร์ดังกล่าวข้างต้นนี้อาจจะสร้างขึ้นโดยหลักการต่างๆกันแต่โดยทั่วไปจะต้องเป็นไปตามกลไกทางกายภาพเบื้องต้น 4 ประการ ได้แก่ ไดโครอิซึ่ม (Dichroism) หรือการเลือกกักกันแสงเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งแต่ให้อีกส่วนหนึ่งผ่านไปได้ การสะท้อน การกระเจิง และไบร์ฟรินเจนซ์ หรือการหักเหเป็นสองแนว ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงกรณีไดโครอิซึ่มหรือการเลือกกักกัน เมื่อแสงผ่านตัวกลางบางชนิดที่มีสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทาง จะทำให้แสงที่แตกออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกันในลำแสงที่ตกกระทบผ่านตัวกลางนั้นไปถูกกักกันเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งแต่ให้อีกส่วนหนึ่งผ่านไปได้ ซึ่งเรียกคุณสมบัตินี้ของสารตัวกลางเหล่านี้ว่า "ไดโครอิซึ่ม" สำหรับตัวกลางที่มีคุณสมบัติเช่นนี้และเป็นที่ทราบกันดีก็คือ แร่ธรรมชาติที่มีสีต่างๆสามารถนำมาทำเป็นเครื่องประดับพลอยที่มีสีสันต่างๆกัน ซึ่งมีอยู่หลายชนิดที่เป็นส่วนประกอบของโบรอนซิลิเกต โดยผลึกเหล่านี้จะมีทิศทางภายในบางทิศเรียกชื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเฉพาะว่า แกนทัศนศาสตร์(Optical Axis) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึก ในกรณีส่วนหนึ่งส่วนใดของสนามไฟฟ้าที่แตกออกไปแล้วตั้งฉากกับแนวดังกล่าวของสารตัวกลางจะถูกกักกันหรือดูดกลืนอยู่ภายในผลึกนั้นทั้งหมด หากผลึกของสารนั้นหนามากเท่าใดก็สามารถที่จะดูดกลืนได้ดียิ่งขึ้นเท่านั้น

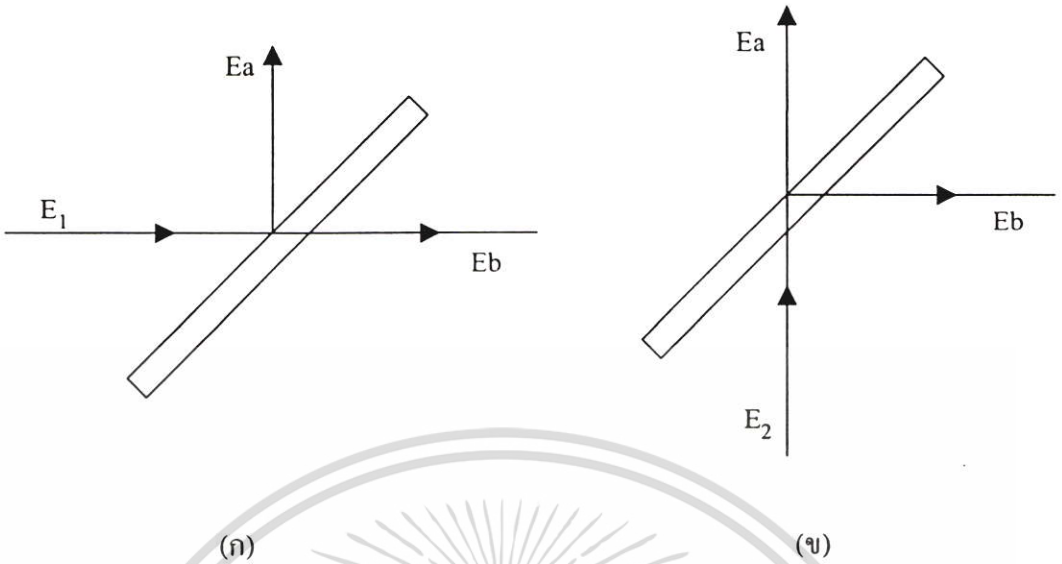
ผลึกไดโครอิกเป็นผลึกที่มีสมบัติในการดูดกลืนแสงที่มีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้านหนึ่งซึ่งตั้งฉากกัน ผลึกไดโครอิกที่เป็นแร่ได้แก่ ทัวมาลีน แสงที่ผ่านแร่นี้จะทำให้มีเวกเตอร์อยู่ในแนวเดียวกัน หรือเป็นแสงโพลาไรซ์ เนื่องจากผลึกทัวมาลีนมีสีจึงไม่ค่อยนิยมนำมาใช้งาน จนกระทั้งในปี ค.ศ. 1852 ได้มีผู้ค้นคว้าและประดิษฐ์ผลึกของสารประกอบอินทรีย์ไอโอไดซัลเฟต ซึ่งในปัจจุบันเรียกว่า เฮอร์ราพาไธต์ซึ่งมีสมบัติเหมือนทัวมาลีนทุกประการแต่ใสและมีขนาดเล็กกว่า แผ่นโพลาลอยด์ในปัจจุบันทำมาจากผลึกชนิดนี้ ในปี ค.ศ. 1932 ก็ได้มีการผลิตแผ่นโพลารอยด์โดยการจัดให้ผลึกเฮอร์ราพาไธต์ หรือผลึกไดโครอิก เรียงกันอยู่ในแนวเดียวกัน และหล่อไว้ด้วยพลาสติกใสทำเป็นแผ่นเพื่อป้องกันการขีดข่วน จากวิธีการนี้ทำให้สามารถที่จะสร้างแผ่นโพลาลอยด์ที่มีขนาดใหญ่ได้ จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

โพลาไรเซอร์จะใช้แตกต่างกันอยู่สองทางกล่าวคือถ้าใช้ทำให้แสงที่ไม่โพลาไรซ์ให้กลายเป็นแสงโพลาไรซ์ จะเรียกว่า โพลาไรเซอร์ และถ้าใช้ในการกำหนดหรือตรวจสอบสถานะของแสงโพลาไรซ์ จะเรียกว่า แอนะไลเซอร์ (Analyzer)

3.1.3 ตัวแยกแสง (Beam Splitter)

ตัวแยกแสงแบบไม่โพลาไรซ์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยแผ่นแก้วบาง ๆ ที่ฉาบสารไดอิเลคตริกให้เป็นฟิล์มบางๆไว้ที่ผิวหน้าด้านหนึ่ง ความหนาของฟิล์มที่ฉาบไว้จะต้องตรงตามความต้องการใช้งาน ในงานทดลองทางด้านแสง จะใช้ตัวแยกแสงในการแยกลำแสงหนึ่งลำออกเป็นสองลำ และยังสามารถรวมลำแสงสองลำเข้าด้วยกันด้วย ในการอธิบายนี้จะกำหนดว่าแสงเป็นแสงโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกับหน้ากระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 3.5 แสดงตัวแยกแสงเมื่อมีแสงเดินทางเข้ามาที่อินพุตพอร์ต #1 และ #2

รูปที่ 3.5 (ก) แสดงแสงเข้ามาที่ตัวแยกแสงทางพอร์ตอินพุต #1 และออกไปทางพอร์ตเอาท์พุต ที่ใช้สัญลักษณ์ a และ b แสงที่ออกมาแต่ละลำจะเกิดจากแสงที่เดินทางเข้าไปและสะท้อนไปกลับในชั้นฟิล์ม การบอกสมบัติของตัวแยกแสงจะบอกโดยความเข้มแสงเอาท์พุตสัมพันธ์อย่างไรกับแสงอินพุต จากรูปที่ 3.5 สามารถเขียนได้เป็น

$$E_a = rE_1, \quad E_b = tE_1 \tag{3.9}$$

เมื่อ r เรียกว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของอัมปลิจูด (amplitude reflection coefficient) และ t เรียกว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอัมปลิจูด (amplitude transmission coefficient) r และ t เป็นเลขจำนวนเชิงซ้อนและขึ้นกับความยาว คลื่นของแสง สำหรับตัวแยกแสงแบบโพลาไรซ์ยังขึ้นกับสถานะของการโพลาไรซ์ของแสงอีกด้วย รูปที่ 3.5 (ข) แสดงแสงที่เข้ามาทางพอร์ตอินพุต #2 ซึ่งกำหนดให้มีสมการเป็น

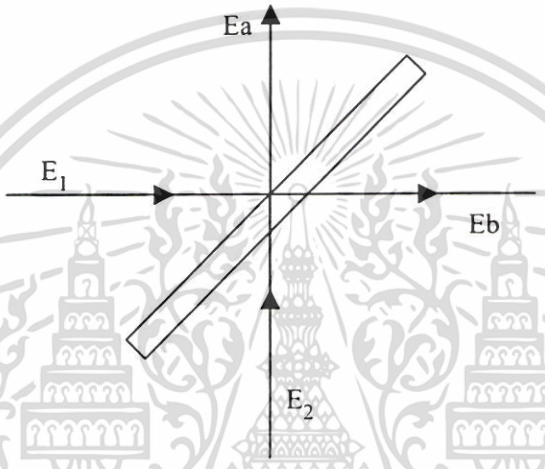
$$E_a = t'E_2, \quad E_b = r'E_2 \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดว่า r ต่างจาก r' และ t ก็ต่างจาก t' เช่นกัน อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ทั้งสี่ตัวที่สำคัญ ยังเป็นผลมาจากกฎการอนุรักษ์พลังงานเช่นเดิม พิจารณาเมื่อมีแสงเข้ามาที่อินพุตทั้งคู่ในเวลาเดียวกัน (รูปที่ 3.6)

ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตเป็น

$$E_a = r E_1 + t' E_2 , \qquad E_b = t E_1 + r' E_2 \tag{3.11}$$



รูปที่ 3.6 แสดงตัวแยกแสงเมื่อมีแสงเดินทางเข้ามาทั้งอินพุตพอร์ต #1 และ #2

สมมติว่าไม่มีการดูดกลืนแสงที่ตัวแยกแสงเลย ดังนั้นจะได้ความเข้มแสงรวมที่ตกกระทบ (เป็นผลรวมของความเข้มที่เข้ามาที่พอร์ตอินพุต #1 และ #2) จะต้องเท่ากับความเข้มแสงที่ออกมาที่พอร์ตเอาท์พุต ซึ่งสัมพันธ์กันคือ

$$\begin{aligned} |E_1|^2 + |E_2|^2 &= |E_a|^2 + |E_b|^2 \\ &= |r E_1 + t' E_2|^2 + |t E_1 + r' E_2|^2 \\ &= \left(|r|^2 + |t|^2\right)|E_1|^2 + \left(|r'|^2 + |t'|^2\right)|E_2|^2 + 2\mathrm{Re}\left[(r^* t' + r' t^*) E_1^* E_2\right] \end{aligned} \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะได้

$$|r|^2 + |t|^2 = 1 = |r'|^2 + |t'|^2 \tag{3.13}$$

$$r^* t' + r' t^* = 0 \tag{3.14}$$

ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันไม่ได้มีเฉพาะสัมประสิทธิ์เพียงสี่ตัว แต่ยังมีความสัมพันธ์ของ E_1 และ E_2 ในเทอมของ E_a และ E_b โดยการแก้สมการที่ (3.11) จะได้ค่า E_1 และ E_2 เป็น

$$E_1 = \frac{t' E_b - r' E_a}{tt' - rr'}, \quad E_2 = \frac{t E_a - r E_b}{tt' - rr'} \tag{3.15}$$

จากสมการ (3.15) และ บรรทัดแรกของสมการ (3.12) จะได้

$$|t|^2 + |r'|^2 = |tt' - rr'| = |t'|^2 + |r|^2 \tag{3.16}$$

และ

$$r' t'^* + r^* t = 0 \tag{3.17}$$

และทำนองเดียวกันสมการ (3.14) และสมการ (3.17) จะได้

$$|r'| = |r| \text{ และ } |t'| = |t| \tag{3.18}$$

ดังนั้น

$$|tt' - rr'| = 1 \tag{3.19}$$

จากสมการ (3.18) หมายความว่าปริมาณที่เป็นไพรม์และไม่ไพรม์ จะแตกต่างกันเฉพาะเฟสเท่านั้น ถ้าให้ $r = e^{j\alpha}\sin\beta$, $r' = e^{j\delta}\sin\beta$, $t' = e^{j\gamma}\cos\beta$, $t = e^{j\zeta}\cos\beta$ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\zeta = \alpha + \delta - \gamma \pm \pi \quad \text{และ} \quad \delta = \pm\pi - \alpha$$

จากผลที่ได้นี้ทำให้ได้สัมประสิทธิ์ของอัมปลิจูดอยู่ในเทอมของมุม 3 มุม (α, β และ γ) และได้

$$\begin{pmatrix} t' & r \\ r' & t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{j\gamma}\cos\beta & e^{j\alpha}\sin\beta \\ -e^{-j\alpha}\sin\beta & e^{-j\gamma}\cos\beta \end{pmatrix} \tag{3.20}$$

ค่าของมุมทั้งสามจะขึ้นกับค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม มุมตกกระทบของแสง และความหนาของฟิล์ม มีเงื่อนไขที่พิเศษของสมการ (3.20) โดยกำหนดให้ $R \equiv |r|^2$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของความเข้มแสงที่สะท้อน(intensity reflection coefficient) และ $T \equiv |t|^2$ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของความเข้มแสงที่ทะลุผ่าน(intensity transmission coefficient) สำหรับตัวแยกแสงที่มีกำลังแยก 50:50 และมีแสงตกกระทบด้านเดียว แสงที่แยกออกมาสองลำจะมีความเข้มแสงเท่ากัน ซึ่งทำให้ได้ $\beta = \pi/4$ ดังนั้น $R = T = 1/2$

สำหรับตัวแยกแสงที่มีกำลังแยก 50:50 ซึ่งมี $t' = t$ และ $r' = r$ ซึ่งเรียกว่า ตัวแยกแสงมาตรฐาน 50:50 ซึ่งจะใช้อ้างถึงบ่อยๆในทฤษฎีเกี่ยวกับทัศนศาสตร์เพราะจะง่ายในการวิเคราะห์ ซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{pmatrix} t' & r \\ r' & t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{j}{\sqrt{2}} \\ \frac{j}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \tag{3.21}$$

3.1.4 เลเซอร์ไดโอด

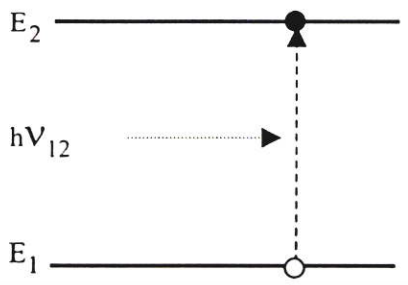
เลเซอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทเดียวกับไดโอดโดยถูกออกแบบให้สามารถเปล่งแสงเลเซอร์ออกมาได้ ลักษณะของแสงเลเซอร์จะมีทิศทางของแสงไปในทางเดียวกัน และมีเฟสที่ตรงกันจึงทำให้มีความเข้มแสงที่สูงมาก ซึ่งเลเซอร์ไดโอดจะมีลักษณะการทำงานประกอบไปด้วยสามกระบวนการด้วยกันคือ กระบวนการดูดกลืนโฟตอน (Absorption) การปลดปล่อยพลังงานโดยธรรมชาติ (Spontaneous Emission) และกระบวนการกระตุ้นการปลดปล่อยพลังงาน (Stimulated Emission) ซึ่งทั้งสามกระบวนการนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 โดยจะแสดงระดับพลังงานสองระดับคือ E_1 เป็นระดับพลังงานต่ำ และ E_2 เป็นระดับพลังงานสูง การส่งผ่านพลังงานระหว่างสองสถานะนี้จะนำไปสู่การดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานของโฟตอน โดยมีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h\nu_{12} = E_2 - E_1 \qquad (3.22)$$

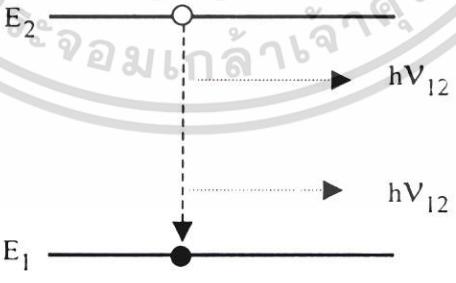
ซึ่งโดยทั่วไปอิเล็กตรอนในระบบจะอยู่ในสถานะระดับพลังงานต่ำ เมื่อมีพลังงานของโฟตอน $h\nu_{12}$ เข้าไปในระบบ อิเล็กตรอนในสถานะระดับพลังงาน E_1 จะทำการดูดกลืนพลังงานของโฟตอน ทำให้เปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานต่ำไปสู่ระดับพลังงานสูง และจะถูกกระตุ้นจากสถานะ E_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งในสภาพนี้จะไม่เสถียร โดยอิเล็กตรอนจะกระโดดสู่ระดับพลังงานต่ำอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้พลังงานของโฟตอนจึงถูกปลดปล่อยออกมา ลักษณะของการทำงานเมื่อไม่มีการกระตุ้นจากภายนอกจะเรียกว่าการปลดปล่อยพลังงานตามธรรมชาติ และในกรณีที่เมื่อมีพลังงานของโฟตอน $h\nu_{12}$ ผ่านเข้าไปในระบบขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในสถานะระดับพลังงานสูง โฟตอนที่เข้าไปในระบบจะกระตุ้นให้อิเลคตรอนพลังงานสูงลงมาสู่สถานะระดับพลังงานต่ำ และเมื่ออิเลค ตรอนกลับลงมาสู่สถานะระดับพลังงานต่ำโดยเป็นไปในลักษณะที่ถูกควบคุมให้ลงมาเร็วกว่าปกติ และจะปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานที่ปลดปล่อยออกมานี้จะมีค่ามากกว่าการปลดปล่อยพลังงานตามปกติ ซึ่งหลักการนี้เป็นหลักการของการเกิดแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

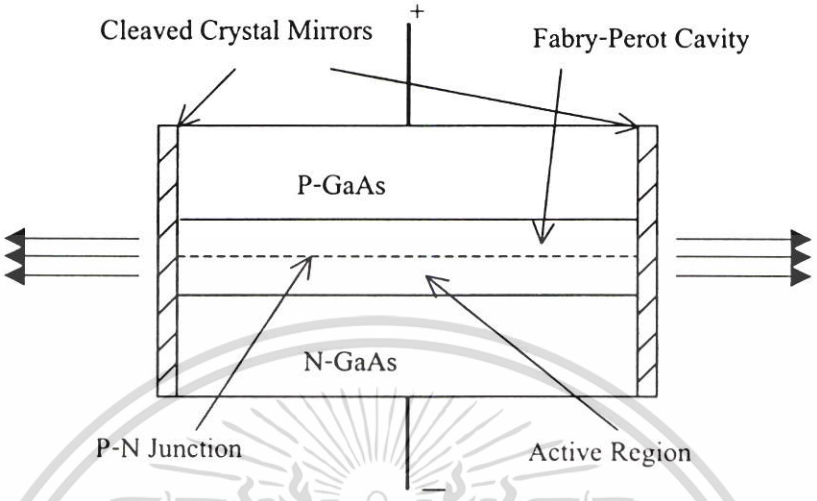
(ข)



(ค)

รูปที่ 3.7 แสดงการเกิดการปลดปล่อยแสงของเลเซอร์เมื่อ (ก) กระบวนการดูดกลืนโฟตอน (ข) การปลดปล่อยพลังงานโดยธรรมชาติและ(ค) กระบวนการกระตุ้นการปลดปล่อยพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

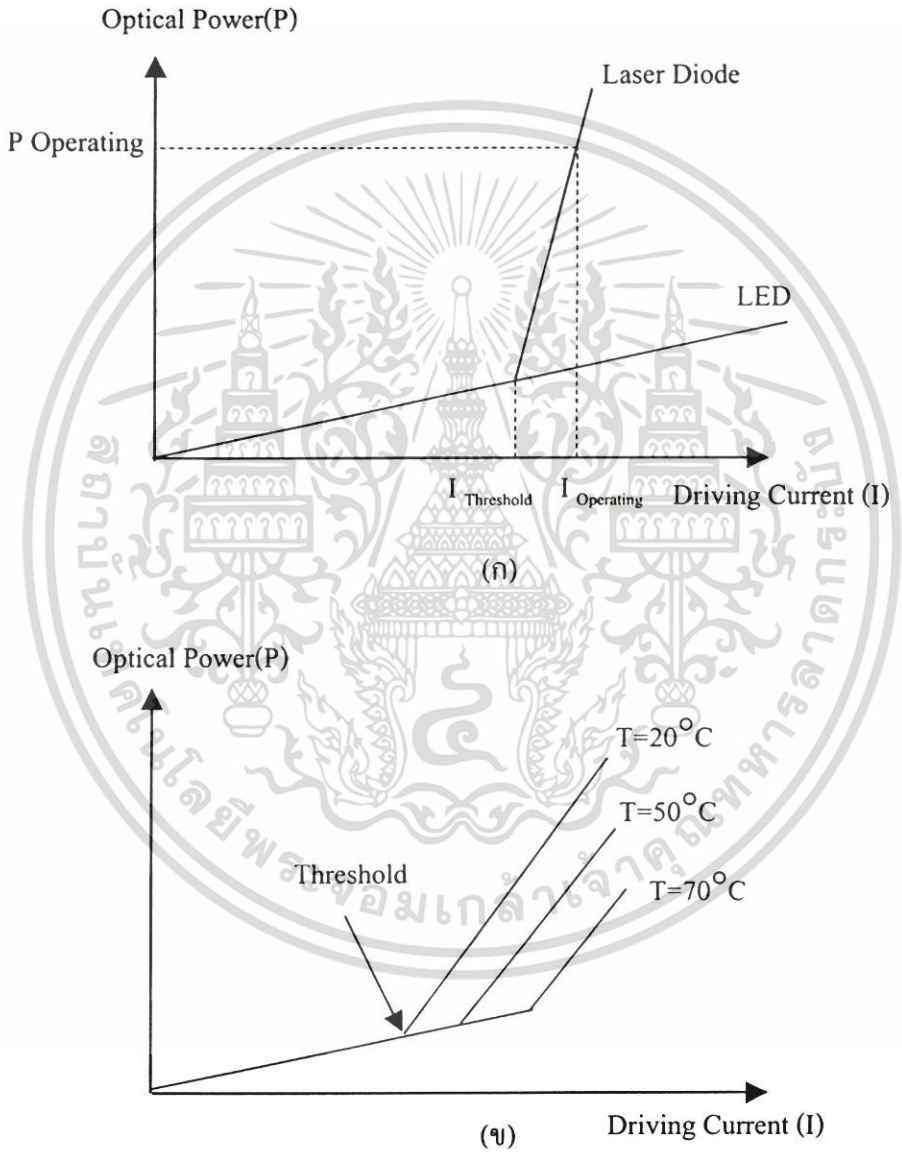


รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งประกอบด้วยสารชนิดแกล เลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ถูกโด๊ปเป็นสารสารชนิดพี(P) และสารชนิดเอ็น(N) วางต่อกัน โดยที่ปลายทั้งสองข้างจะถูกเคลือบด้วยสารที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นกระจกเงา (Cleaved Crystal Mirrors) เมื่อมีการไบแอสตาม (Forward Bias) ทำให้เกิดการแตกตัวของโฮล และอิเล็กตรอนอิสระบริเวณรอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction) หรืออิเลคตรอนและโฮลอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นให้อยู่ในระดับพลังงานสูง และเมื่อกลับลงมาที่ระดับพลังงานต่ำก็จะคายพลังงานออกมาในรูปแสง และพลังงานแสงที่ออกมาจะไปกระตุ้นอิเลคตรอนตัวอื่นให้คายพลังงานออกมา(เป็นการคายพลังงานแบบถูกกระตุ้น)สาเหตุดังกล่าวจึงทำให้เกิดการสะสมพลังงานภายในมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อพลังงานมีค่ามากพอก็จะเปล่ง แสงเลเซอร์ออกมา และการไบแอสเลเซอร์ไดโอดให้ทำงานจนสามารถเปล่งแสงออกมาได้นั้น จะขึ้นอยู่กับกระแสที่ป้อนให้โดยต้องมีค่าสูงกว่ากระแสเทรชโฮลด์(Threshold Current, I_{th}) ซึ่งเป็นขีดเริ่มของช่วงกระแสทำงานที่กำหนดตามข้อมูลของเลเซอร์ชนิดนั้นๆ หากกระแสมีค่าต่ำกว่ากระแสเทรชโฮลด์แล้วเลเซอร์ไดโอดยังคงทำงานอยู่แต่แสงที่เปล่งออกมาจะมีลักษณะไม่เป็นระเบียบคล้ายการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) และสำหรับในรูปที่ 3.9 จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของกระแสไบแอส(Driving Current) กับกำลังของแสง(Optical Power) ที่เปล่งออกมา โดยในรูปที่ 3.9 (ก) นั้นเมื่อเพิ่มกระแสไบแอสให้เลเซอร์ทำงานในช่วงแรกจะเป็นการเปล่งแสงด้วยตัวเอง แต่เมื่อถึงช่วงกระแสเทรชโฮลด์จะเป็นการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น โดยกำลังแสงที่ได้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยความชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเชิงเส้นแต่ถ้าเพิ่มกระแสไบแอสขึ้นเรื่อยๆจนเลยช่วงกระแสทำงานหรือถึงจุดที่กำลังอิ่มตัว(Power Saturation) จะไม่เป็นเชิงเส้นและอาจจะทำให้เลเซอร์เกิดความเสียหายขึ้นได้และจะกลายคุณสมบัติเป็นไดโอดเปล่งแสง ในที่สุด ส่วนในรูปที่ 3.9 (ข) นั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะที่ใช้งานจะทำให้ช่วงกระแสทำงานเปลี่ยนไปด้วย



รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไบแอสกับกำลังของแสงที่เปล่งออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้เราอาจจะแบ่งชนิดของเลเซอร์ไดโอดตามลักษณะของสเปกตรัมของแสงที่แผ่ออกมาได้เป็น 2 ชนิด คือ เลเซอร์ไดโอดชนิดโหมดเดี่ยว และเลเซอร์ไดโอดชนิดหลายโหมด เป็นต้น และในระบบการสื่อสารทางแสงนั้นแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการสื่อสารจะต้องมีแบนด์วิดท์ที่กว้างเพื่อที่จะสามารถส่งข้อมูลข่าวสารได้เป็นจำนวนมาก โดยปกติแล้วเลเซอร์ไดโอดจะมีแบนด์วิดท์ตั้งแต่ 200 เมกะเฮิรซ์ตขึ้นไป นอกจากนี้เลเซอร์ไดโอดเองยังมีสมบัติพิเศษอีกอย่างหนึ่งคือมีค่าจุดโฟกัสของแสงเล็กมาก ดังนั้นเลเซอร์ไดโอดจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในระบบการสื่อสารทางแสงเป็นอย่างมาก

3.2 อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงพินโฟโตไดโอด(PIN-Photodiode) ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจรับแสงในระบบการทดลองโดยจะมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

3.2.1 พินโฟโตไดโอด

สำหรับอุปกรณ์ตรวจรับแสงชนิดพินโฟโตไดโอดนั้นจะสามารถแสดงรูปแบบโครงสร้างและลักษณะของพินโฟโตไดโอดแสดงได้ในรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นสาร P และสาร N ของสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังมีบริเวณที่เป็นอินทรินซิก(Intrinsic) คั่นอยู่ระหว่างสาร P และสาร N โดยจะมีการเจือสาร N เข้าไปในเนื้อแท้ของสารนี้ด้วย สำหรับในการทำงานปกตินั้นจะต้องทำการไบแอสกลับให้กับพินโฟโตไดโอด เมื่อมีโฟตอน(Photon)มาตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำโดยมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานของช่องว่าง(Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะปลดปล่อยพลังงานทำให้อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำจะสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ระดับพลังงานสูง การทำงานของโฟตอนที่ประจุให้กับตัวกลางแสดงได้ในรูปที่ 3.10 อุปกรณ์ตรวจรับแสงปกติจะออกแบบให้ตัวกลางการทำงานหลักอยู่ที่บริเวณรอยต่อ(บริเวณรอยต่อคือบริเวณอินทรินซิก) ซึ่งเป็นบริเวณที่แสงตกกระทบและใช้ในการดูดกลืนพลังงานของโฟตอน เมื่อทำการป้อนกระแสให้กับโฟโตไดโอดจะทำให้อิเล็กตรอนไหลผ่านตัวกลาง เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลมีการเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางซึ่งมีระยะทางเป็น L_n และ L_p ของอิเล็กตรอน(Electron)และโฮล(Hole) เวลาที่อิเล็กตรอนหรือโฮลกลับมารวมกันใหม่เรียกว่าช่วงชีวิตของพาหะแสดงโดย τ_n และ τ_p ความสัมพันธ์ของความยาวในการแพร่คือ

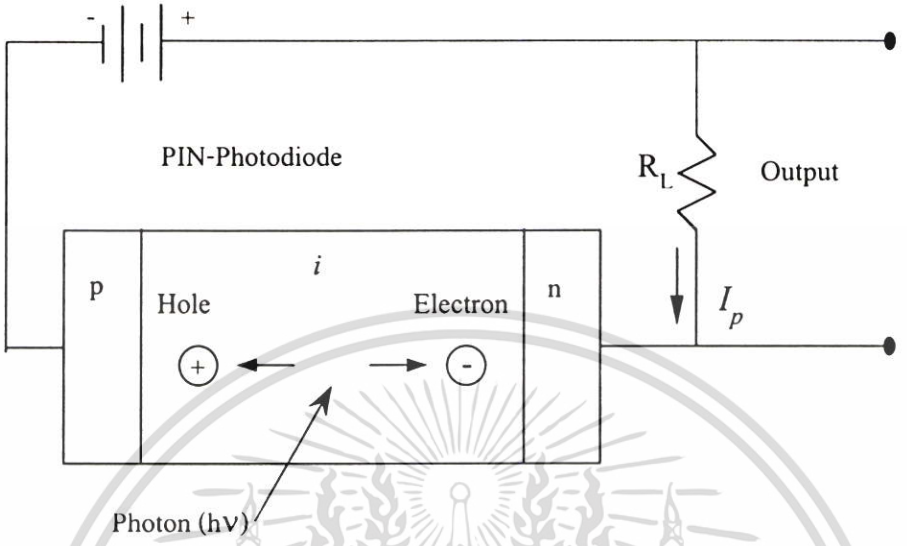
$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2} \tag{3.23}$$

และ

$$L_p = (D_p \tau_p)^{1/2} \tag{3.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง D_n และ D_p เป็นสัมประสิทธิ์ของการแพร่อิเล็กตรอนและโฮล



รูปที่ 3.10 แสดงรูปแบบโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดและการไบแอสให้พินโฟโตไดโอด

แสงที่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำนี้จะมีค่าเป็น

$$P(x) = P_0(1 - e^{-\alpha_s(\lambda)x}) \tag{3.25}$$

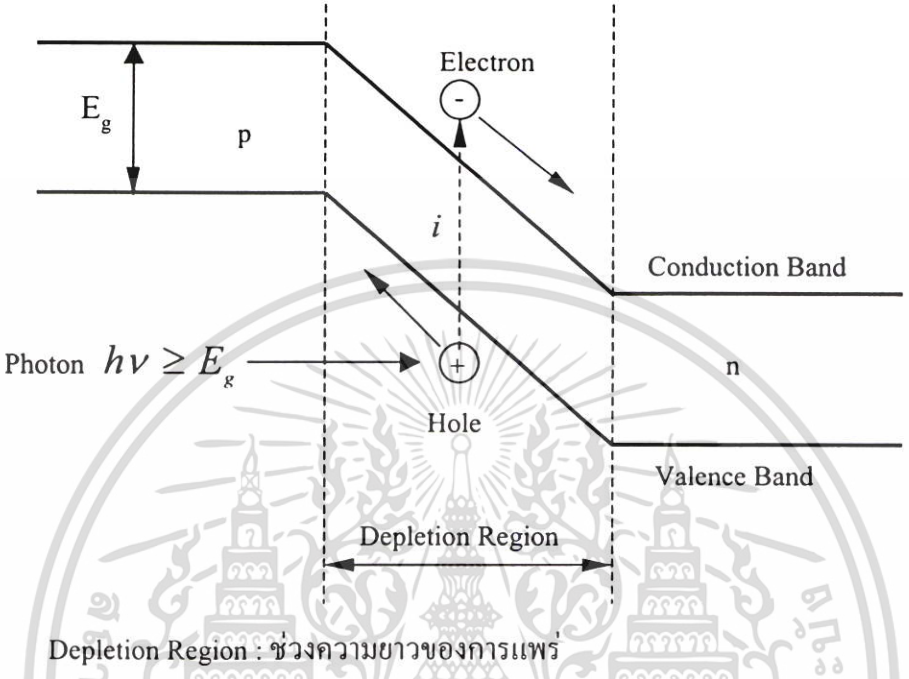
เมื่อ $\alpha_s(\lambda)$ เป็นสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนของแสงที่ความยาวคลื่น λ และ P_0 คือกำลังของแสงที่ตกกระทบ และ P(x) เป็นกำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนในระยะทาง x

สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นแสงของสารที่ใช้ทำโฟโตไดโอดสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.11 โดยอนุภาคของแสงที่ใช้ทำจะเป็นตัวกำหนดสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยค่าความยาวคลื่นคัทออฟ(λ_c) จะถูกกำหนดโดยพลังงานช่องว่าง(E_g) ของวัตถุนั้น ถ้า E_g มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์(eV) ดังนั้น λ_c จะมีหน่วยเป็นไมโครเมตร(μm) โดย

$$\lambda_c(\mu m) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g(eV)} \tag{3.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นคัทออฟจะมีค่า 1.06 ไมโครเมตร สำหรับซิลิกอน(Si) และ 1.6 ไมโครเมตร สำหรับเจอร์มาเนียม(Ge)



รูปที่ 3.11 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโตไดโอด

ถ้าที่บริเวณแพร่ของอิเล็กตรอนมีความกว้าง W ดังนั้นจากสมการผลรวมกำลังในการดูดกลืนแสงที่มีความกว้าง W คือ

$$P(w) = P_0(1 - e^{-\alpha_s w}) \tag{3.27}$$

ถ้าให้การสะท้อน R_x ที่ตกลงบนผิวหน้าของโฟโตไดโอด มีกระแสโฟโต I_p จากสมการกำลังของการดูดกลืน กำหนดโดย

$$I_p = \frac{q}{h\nu} P_0(1 - e^{-\alpha_s w})(1 - R_f) \tag{3.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P_0 เป็นกำลังของแสงที่ตกกระทบบนโฟโตดีเทคเตอร์ q คือประจุอิเล็กตรอน และ $h\nu$ เป็นพลังงานของโฟตอน และสัมประสิทธิ์ในการทำงานของโฟโตไดโอด จะแสดงในรูปของการตอบสนองต่อแสง $\Re$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ควอนตัม(η) โดย

$$\Re = \frac{I_p}{I_0} = \frac{\eta q}{h\nu} \tag{3.29}$$

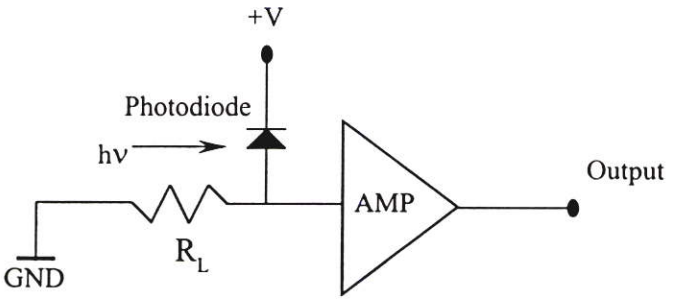
3.2.1.1 สัญญาณรบกวนในโฟโตดีเทคเตอร์

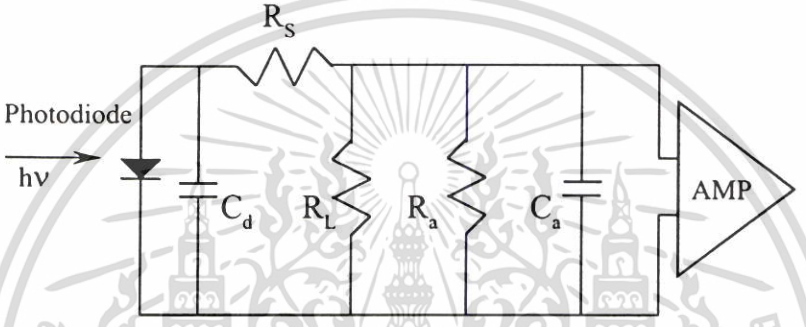
ในระบบการสื่อสารทางแสงนั้น โฟโตไดโอด จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแสง แต่เนื่องจากสัญญาณที่รับได้จากโฟโตไดโอดจะมีสัญญาณรบกวนอยู่ นอกจากนี้สัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ก็ต้องนำไปขยายสัญญาณซึ่งจะมีสัญญาณรบกวนภายในภาคขยายด้วย ดังนั้นในการแสดงสัญญาณรบกวนที่จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือ S/N ที่สัญญาณขาออกของอุปกรณ์ตรวจรับแสง กำหนดโดย

$$S/N = \text{กำลังของสัญญาณ} / \text{กำลังของสัญญาณรบกวน} \tag{3.30}$$

อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะมีค่าสูงได้จะต้องมีสภาพดังต่อไปนี้คือ โฟโตดีเทคเตอร์จะต้องมีกำลังของสัญญาณที่รับได้สูง สัญญาณรบกวนของโฟโตดีเทคเตอร์ และสัญญาณรบกวนของการขยายสัญญาณจะต้องมีค่าต่ำ โดยทั่วไปกระแสรบกวนจะตรวจรับได้จากระดับการตรวจรับแสงต่ำสุด ความไวของอุปกรณ์ตรวจรับแสงในระบบการสื่อสารทางแสงจะแสดงในเทอมของแสงและกำลังของแสงที่ตรวจรับได้ต่ำสุด สำหรับรูปแบบและการใช้งานของพินโฟโตไดโอดสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.12 โดยภายในตัวโฟโตไดโอดจะมีค่าความต้านทาน R_s ต่ออนุกรมอยู่ นอกจากนี้ยังมีตัวเก็บประจุ C_d ซึ่งเกิดขึ้นจากรอยต่อของสาร และความต้านทานไบแอส R_L นอกจากนี้การขยายสัญญาณตามโฟโตไดโอดจะมีตัวเก็บประจุอินพุท C_a และค่าความต้านทาน R_a โดยค่า R_s จะต้องมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานโหลด R_L มากๆ ดังนั้นจึงสามารถละทิ้งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 3.12 แสดงรูปแบบและการใช้งานของพินโฟโตไดโอดที่ต่อกับวงจรขยายสัญญาณ

ถ้าสัญญาณที่มอดูเลตแสง P(t) ตกลงบนตัวรับแสง กระแสโฟโต $I_{Ph}(t)$ จะมีค่าเป็น

$$I_{Ph}(t) = \frac{\eta q}{h\nu} P(t) \tag{3.31}$$

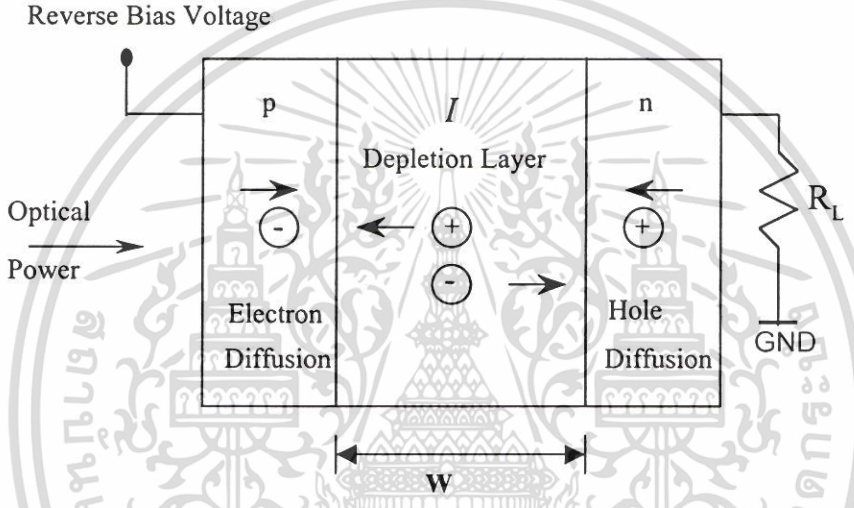
กระแสโฟโต I_p นี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสัญญาณแสงที่เข้ามาตกกระทบ และองค์ประกอบของสัญญาณ $I_p(t)$ กระแสของสัญญาณกำลังสองเฉลี่ย $\left\langle I_s^2 \right\rangle$ มีค่าเป็น

$$\left\langle I_s^2 \right\rangle = \left\langle I_p^2(t) \right\rangle \tag{3.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 เวลาในการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจรับแสง

เพื่อความเข้าใจถึงการตอบสนองต่อความถี่ของโฟโตไดโอด จะพิจารณาโครงสร้างและการไบแอสกลับ(Reverse Bias Voltage) ของพินโฟโตไดโอด แสดงในรูปที่ 3.13 พลังงานแสง(Optical Power) ที่เดินทางผ่านชั้น P จะเกิดขบวนการคู่อิเล็กตรอนโฮลดูดกลืนพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งคู่อิเล็กตรอนโฮลจะทำงานในบริเวณดีพลีทชั่น(Depletion Layer) หรือในช่วงความยาวของการแพร่ของชั้น I โดยการไบแอสกลับแรงดันในสนามไฟฟ้า



Electron Diffusion : การแพร่ของอิเล็กตรอน

Hole Diffusion : การแพร่ของโฮล

รูปที่ 3.13 แสดงการแพร่ของอิเล็กตรอนเมื่อมีแสงมาตกกระทบในพินโฟโตไดโอด

ภายใต้สภาพเสถียรความหนาแน่นของกระแส J_{tot} สำหรับการไบแอสกลับในชั้นที่เป็นตัวกลางจะเป็นดังนี้

$$J_{tot} = J_{dr} + J_{diff} \tag{3.33}$$

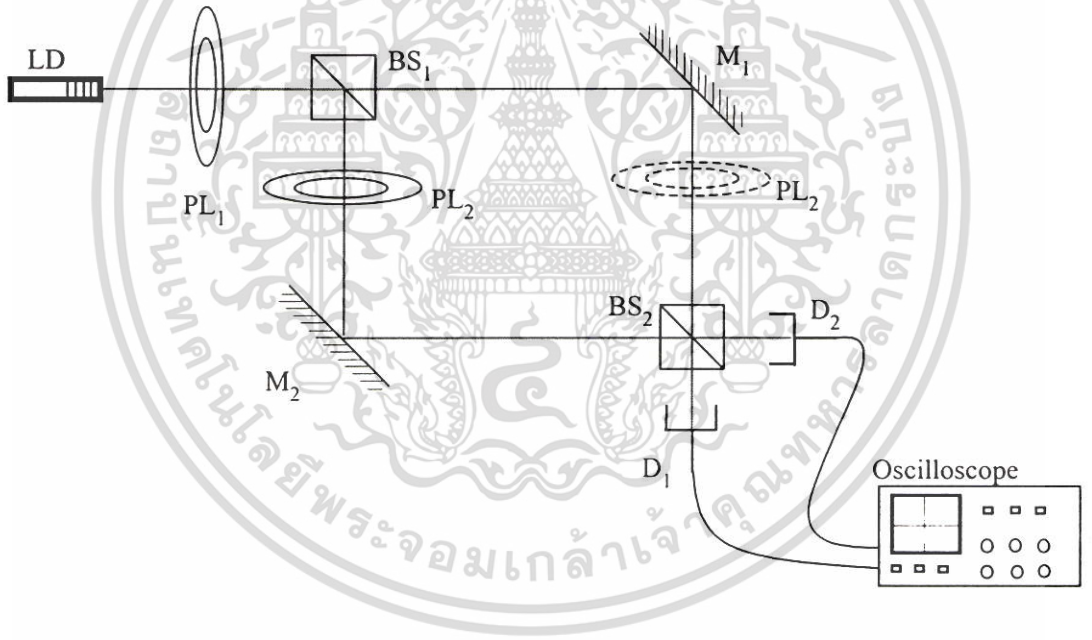
ซึ่ง J_{dr} เป็นความหนาแน่นของกระแสที่ไหลจากตัวกลางในบริเวณแพร่ และ J_{diff} เป็นความหนาแน่นของกระแสที่แพร่จากตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

การทดลองแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะทดลองโดยจัดให้แขนทั้งสองข้างของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นที่ว่าง(freespace) และขั้นตอนที่สองจะจัดให้แขนข้างหนึ่งเป็นตัวกลางอื่นโดยใช้ตัวกลางชนิดอื่นยังแยกเป็นตัวกลางที่เป็นเส้นใยนำแสงชนิดไฮลีไบร์ฟรินเจนซ์หรือเส้นใยนำแสงชนิดไฮไบร์, เส้นใยนำแสงชนิดซัมมาเรียน (summarian), ผลึกลิเธียมไนโอเบต ($LiNbO_3$) ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ทดลองโดยจัดให้แขนทั้งสองข้างของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นที่ว่าง

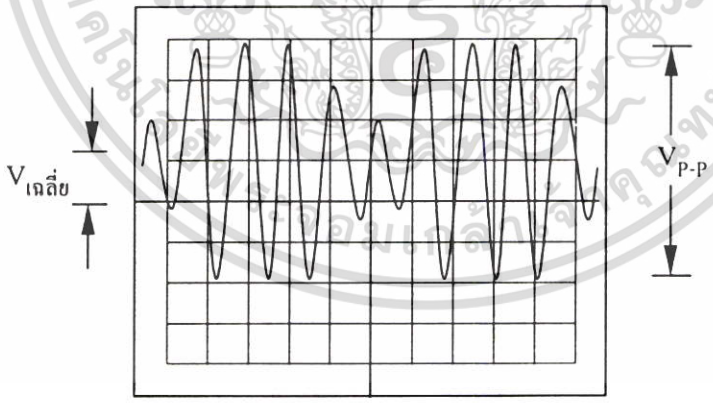


รูปที่ 4.1 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองที่มีแขนทั้งสองของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นที่ว่าง

ในการทดลองขั้นตอนนี้ ได้จัดอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งระบบประกอบด้วยเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร โดยแสงจากแหล่งกำเนิดแสง(LD) จะผ่านไปยังโพลาไรเซอร์ (PL_1) เพื่อทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ ผ่านไปยังตัวแยกแสง(BS_1) จะแยกลำแสงออกเป็นสองส่วน แสงทะลุผ่านและแสงสะท้อนจะไปสะท้อนอีกครั้งที่กระจก M_1 และ M_2 ตามลำดับ แล้วจึงไปรวมกันอีกครั้งที่ตัวรวมแสง (BS_2) แสงทั้งสองลำจะเกิดการแทรกสอดกันหลังจาก

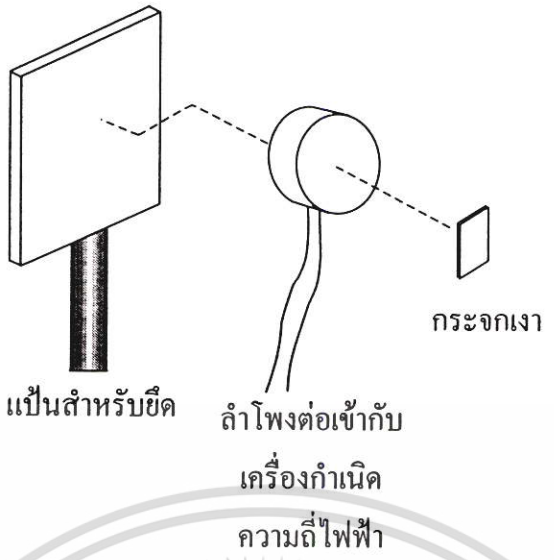
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านตัวรวมแสงแล้วจะตกลงที่ตัวรับแสงทั้งสอง (D_1และD_2) นำโพลาไรเซอร์อีกหนึ่งอัน(PL_2) มาวางตัดลำแสงที่ตำแหน่งที่หนึ่ง(ในภาพเป็นเส้นประ) หมุนโพลาไรเซอร์PL_2 โดยเริ่มจากเมื่อจัดให้ระนาบโพลาไรซ์ของ PL_2 อยู่ในแนวดิ่ง (กำหนดว่าเป็นมุม 0 องศา) และเพิ่มมุมครั้งละ 10 องศาจนครบรอบ ศึกษาผลของความเข้มแสงที่ตกลงบนตัวรับแสงทั้งคู่โดยบันทึกค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้ จากนั้นย้ายPL_2 ไปไว้ที่ตำแหน่งที่สอง(ในภาพเป็นเส้นทึบ) ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง หลังจากนั้นทำการหมุนแหล่งกำเนิดแสง(กระบอกเลเซอร์ไดโอด)และ PL_1 เพื่อเปลี่ยนระนาบโพลาไรซ์ของแสงที่จะเข้ามาในระบบโดยเปลี่ยนมุมเป็นมุมต่างๆ คือ 0° , 45°, 90°, 135° ทำกับแนวดิ่ง จากการทดลองพบว่า ระบบมีความไวต่อการสั่นสะเทือนสูงมาก แม้กระทั่งกระแสลมที่พัดจากเครื่องปรับอากาศก็ทำให้ระดับสัญญาณที่อ่านได้มีค่าไม่คงที่ (มีการกระเพื่อมขึ้นลงตลอดเวลา) ซึ่งเกิดจากการที่เมื่อมีการสั่นสะเทือน อุปกรณ์ในระบบเกิดการสั่นสะเทือนตามไปด้วย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผลต่างระยะทางเชิงทัศน์ (optical path difference) การแทรกสอดจึงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การบันทึกค่าทำได้ลำบากมาก จึงได้มีการปรับปรุงกระบวนการทดลองโดยการเพิ่มชุดสั่นกระจกเข้าไปที่ชุดกระจกสะท้อนแสง M_2 เพื่อให้เกิดการแทรกสอดกันอยู่ตลอดเวลา โดยถือว่าเป็นระบบที่ควบคุม รูปแบบของสัญญาณที่ได้จากตัวรับแสงจะเป็นรูปแบบที่คงที่ ดังรูปที่ 4.2 และชุดสั่นกระจกที่เพิ่มเข้าไปมีลักษณะดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณที่อ่านได้จากตัวรับแสงหลังจากเพิ่มชุดสั่นกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบต่างๆของชุดสั่นกระจก

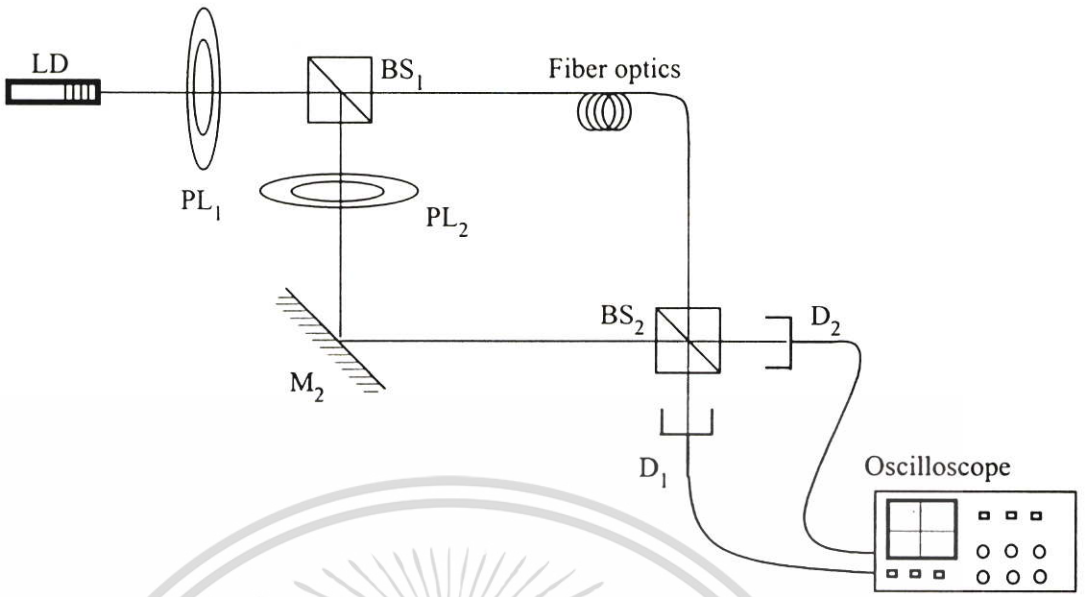
หลังจากนี้จะเพิ่มชุดสั่นกระจกเข้าไว้ที่ กระจก M_2 ในทุกการทดลอง ค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความเข้มของการแทรกสอดที่วัดออกมาเป็นความต่างศักย์ที่เอาท์พุตของวงจรขยายจากยอดถึงยอด (peak to peak)

4.2 ทดลองโดยจัดให้แขนข้างหนึ่งของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นตัวกลางชนิดอื่น

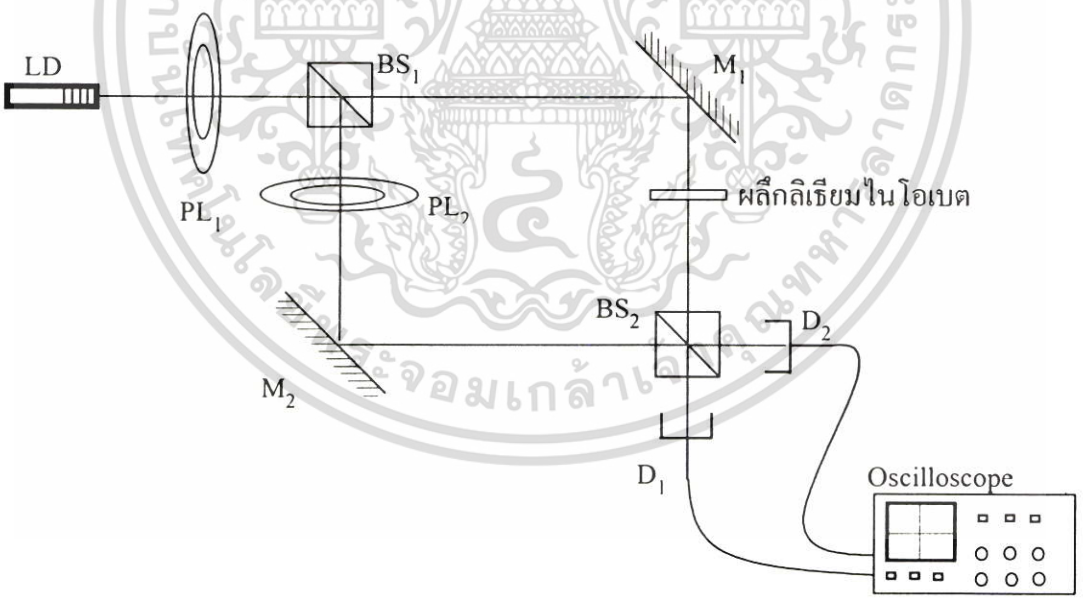
การทดลองขั้นตอนนี้คล้ายกับขั้นตอนที่ 4.1 แต่ได้เปลี่ยนทางด้านแสงที่ทะลุผ่าน BS_1 โดยถอดกระจก M_1 ออก แล้วนำเส้นใยนำแสงชนิดต่างๆ ใส่แทนที่ แล้ววาง PL_2 ไว้ที่แขนอีกข้างหนึ่ง ดังรูปที่ 4.4 หมุนปรับมุม PL_2 แล้วศึกษาสัญญาณที่ตัวรับแสงเช่นเดิม แต่ขั้นตอนนี้ไม่ต้องสลับPL_2 ไปไว้ที่แขนอีกข้าง และต้องทำการปรับมุมโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเหมือนเดิม

ขั้นตอนสุดท้าย ใส่กระจกM_1กลับที่เดิม และวางแผ่นผลึกลิเธียมไนโอเบตกั้นแสงทางด้านที่สะท้อนจากกระจกM_1ทำการทดลองซ้ำเช่นเดียวกับเมื่อเพิ่มเส้นใยนำแสงเข้าไป การจัดอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แล้ววาง PL_2 ไว้ที่แขนอีกข้างหนึ่ง หมุนปรับมุม PL_2 แล้วศึกษาสัญญาณที่ตัวรับแสงเช่นเดิม และต้องทำการปรับมุมโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองที่มีแขนข้างหนึ่งของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นเส้นใยนำแสงชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.5 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองที่มีแขนข้างหนึ่งของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลของการดำเนินงานวิจัย

5.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

5.1.1 ผลการทดลองตอนที่ 1 แขนทั้งสองเป็นที่ว่าง (free space)

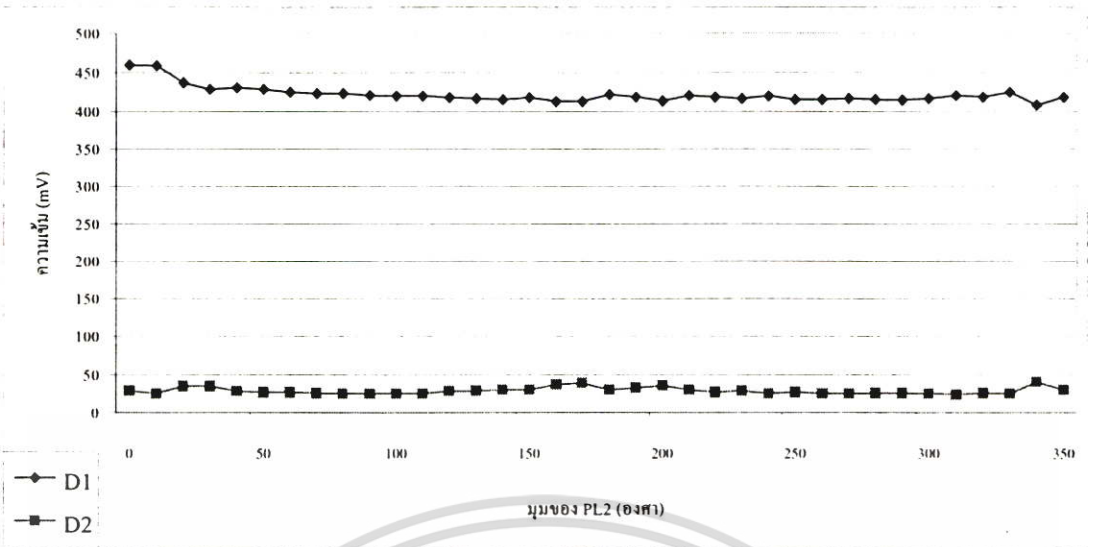
ในที่นี้จะนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองโดยมีแขนทั้งสองของ MZI เป็นที่ว่าง ซึ่งจะแสดงเป็นแผนภูมิในแต่ละขั้นตอนของการทดลอง

ผลการทดลองจะนำเสนอโดยการเรียงลำดับของมุมของการโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์และ PL_1 เป็นมุม 0, 45, 90, และ 135 องศา เป็นลำดับ และในแต่ละมุมข้างต้นก็มีการเปลี่ยนตำแหน่งของตัววิเคราะห์ PL_2 ที่วางที่แขนที่หนึ่ง และแขนที่สองของ MZI เรียงตามลำดับเช่นกัน

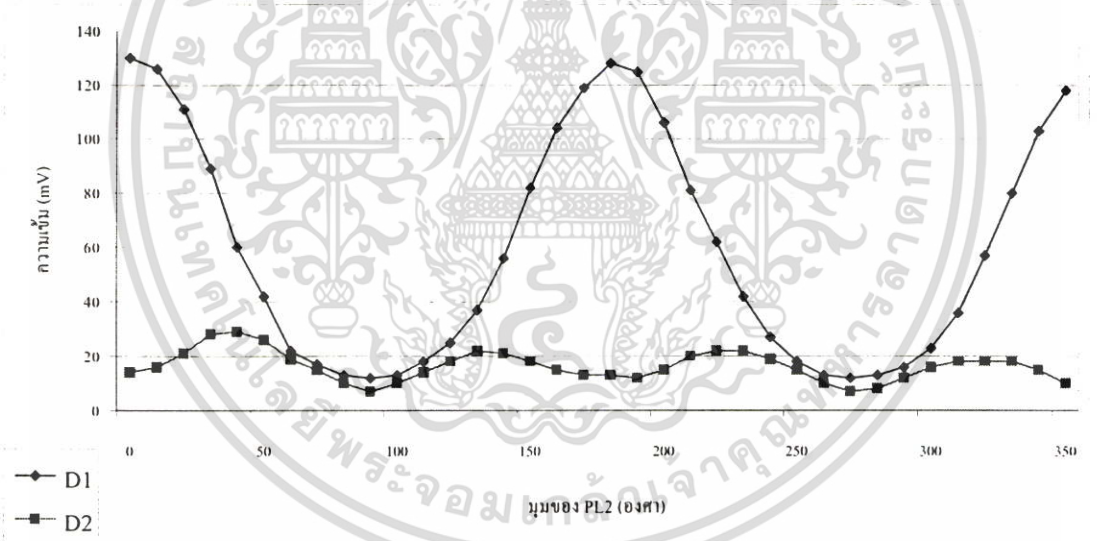
เมื่อแนวโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง(มุมของเลเซอร์และPL_1) เป็นมุม 0 องศา หรืออยู่ในแนวดิ่ง และ ตำแหน่งของ PL_2 อยู่ที่แขนที่หนึ่งของ MZI ความเข้มแสงที่แยกออกทั้งสองแขนจะมีความเข้มแสงของการแทรกสอดที่แตกต่างกันอย่างมากโดยแขนที่หนึ่ง จะมีความเข้มแสงที่ต่ำกว่าอีกแขนหนึ่ง(ซึ่งตัววิเคราะห์จะอยู่ที่แขนที่ความเข้มแสงต่ำ) การเปลี่ยนมุมของ PL_2 จึงมีผลต่อความเข้มแสงของการแทรกสอดโดยรวมของระบบค่อนข้างน้อย โดยความเข้มของการแทรกสอดของแสงสูงสุดที่ตกที่ตัวรับแสง D_1 จะมีความเข้มอยู่ที่ประมาณ 450 mV ส่วนที่ D_2 จะมีความเข้มประมาณ ต่ำกว่า 50 mV ดังรูปที่ 5.1

เมื่อย้าย PL_2 ไปวางไว้ที่แขนที่สองของ MZI เป็นการปรับที่แขนที่มีความเข้มแสงที่สูง ผลการปรับ PL_2 จะปรากฏชัดเจนที่ตัวรับแสงทั้งสองตัว ความเข้มของการแทรกสอดสูงสุดที่ตัวรับแสง D_1 จะอยู่ที่ประมาณ 130 mV ส่วนที่ D_2 จะมีความเข้มประมาณ 20 mV ดังรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



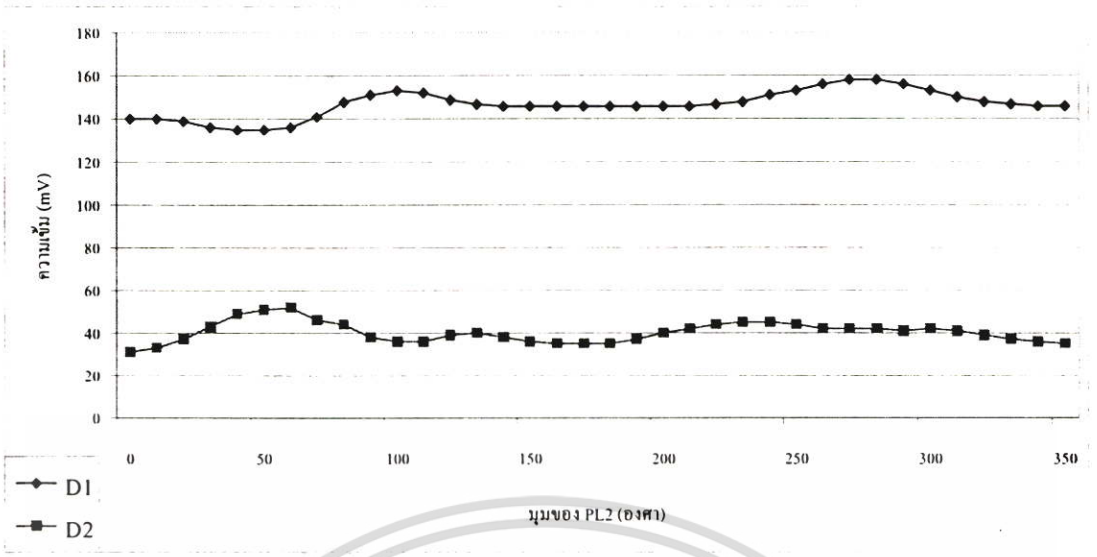
รูปที่ 5.1 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่หนึ่ง



รูปที่ 5.2 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่สอง

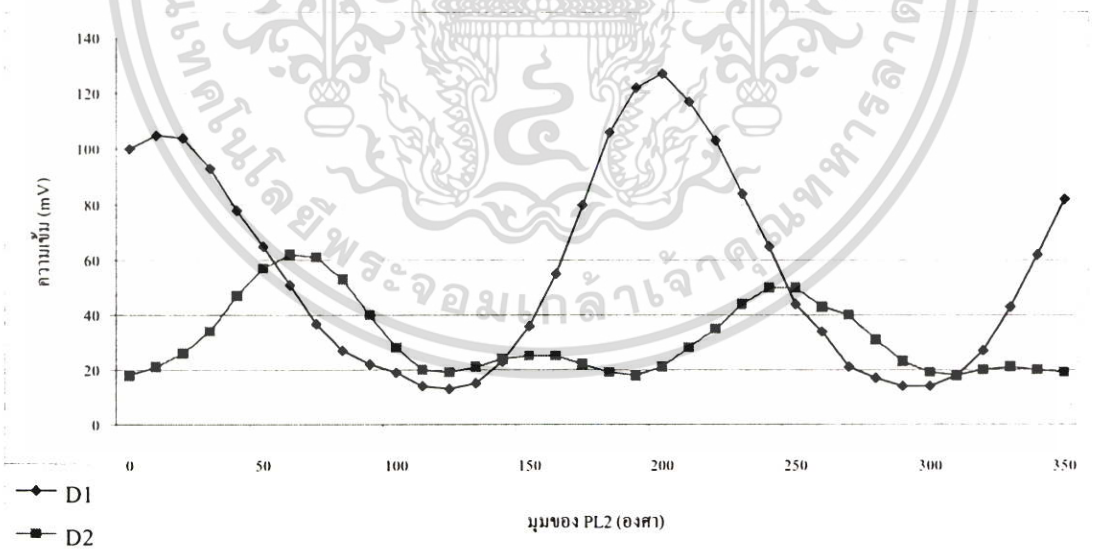
เมื่อโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุม 45 องศา เมื่อทำการปรับ PL_2 ที่วางอยู่ที่ตำแหน่งที่แขนที่หนึ่ง ปริมาณการแทรกสอดของสัญญาณที่ตัวรับแสงทั้งคู่ยังมีความแตกต่างกันมาก คือ ที่ D_1 มีความเข้มสูงสุดประมาณ 150 mV ส่วนที่ D_2 จะมีความข้มเพียงประมาณ 50 mV เท่านั้น การปรับ PL_2 ยังคงทำอยู่ที่แขนที่มีความเข้มต่ำกว่า ดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่หนึ่ง

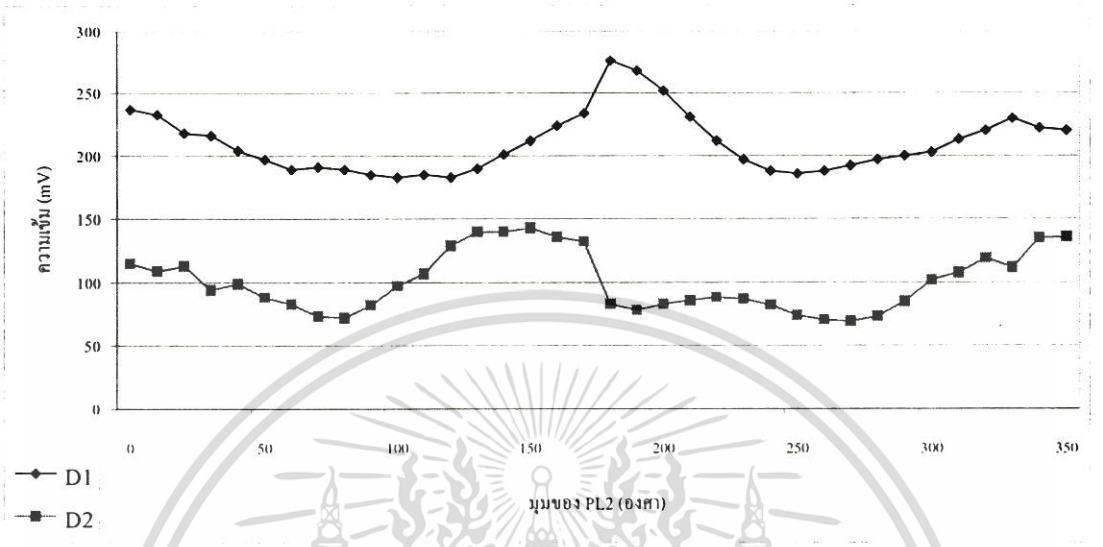
เมื่อย้าย PL_2 ไปไว้ที่แขนที่สอง ความเข้มของการแทรกสอดสูงสุดที่ D_1 จะอยู่ที่ประมาณ 120 mV ส่วนของ D_2 จะอยู่ที่ประมาณ 60 mV (ความแตกต่างมีน้อยลง) ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อย้าย PL_2 ไปไว้ที่แขนที่สอง ความเข้มของการแทรกสอดสูงสุดที่ D_1 มีค่าประมาณ 250 mV ส่วนที่ D_2 มีค่าประมาณ 140 mV ดังรูปที่ 5.8



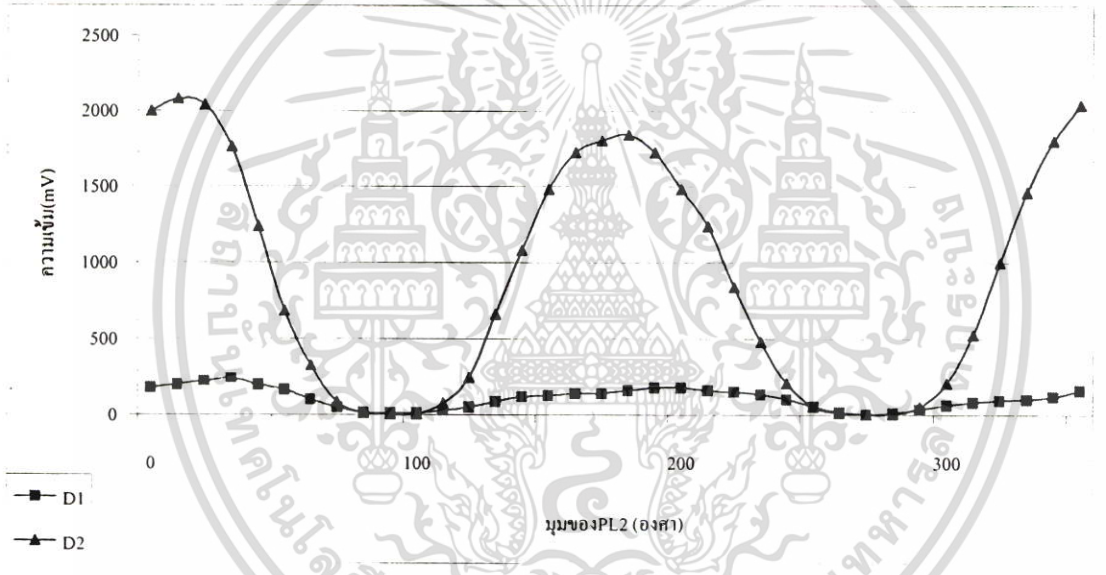
รูปที่ 5.8 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา และ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ผลการทดลองตอนที่ 2 แขนข้างหนึ่งเป็นที่ว่าง อีกข้างหนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบไฮไบร์

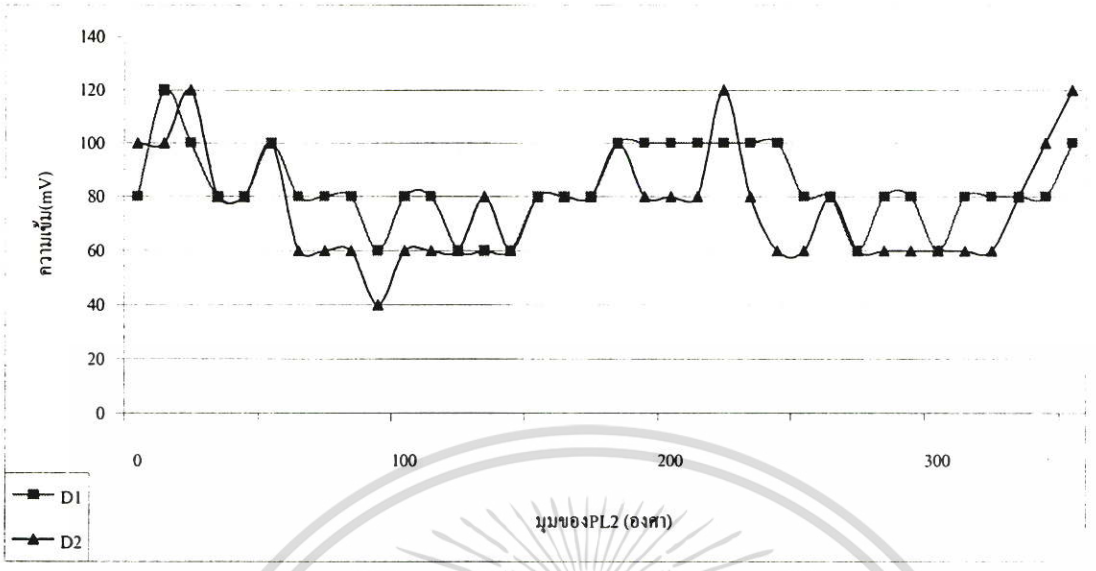
ในการทดลองตอนนี้ แขนข้างหนึ่งของ MZI จะเป็นเส้นใยนำแสงชนิดไฮไบร์ ดังนั้นการจะเพิ่มตัววิเคราะห์เข้าไปจะทำได้ที่แขนเพียงแขนเดียวเท่านั้น ผลการทดลองจึงมีตำแหน่งของ PL_2 เพียงตำแหน่งเดียว

เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 0 องศา(อยู่ในแนวดิ่ง) สัญญาณจะเกิดการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1 มากกว่าคือ สูงสุดประมาณ 2000 mV ที่ D_2 จะประมาณ 250 mV (รูปที่ 5.9) เมื่อให้โพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 45 องศา การแทรกสอดจะมีไม่มากนัก คือจะมีความเข้มของการแทรกสอดสูงสุดประมาณ 100 mV ทั้งสองช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 5.9



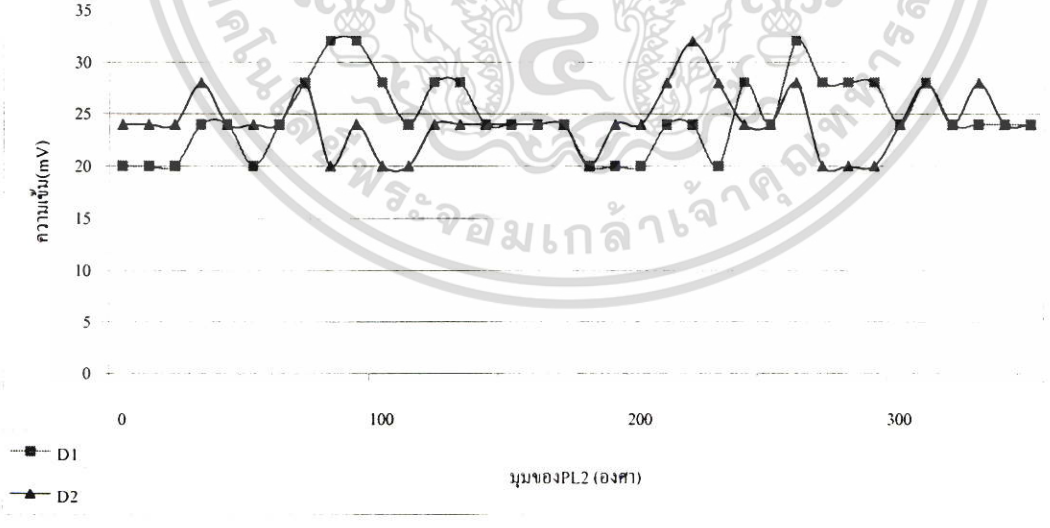
รูปที่ 5.9 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา

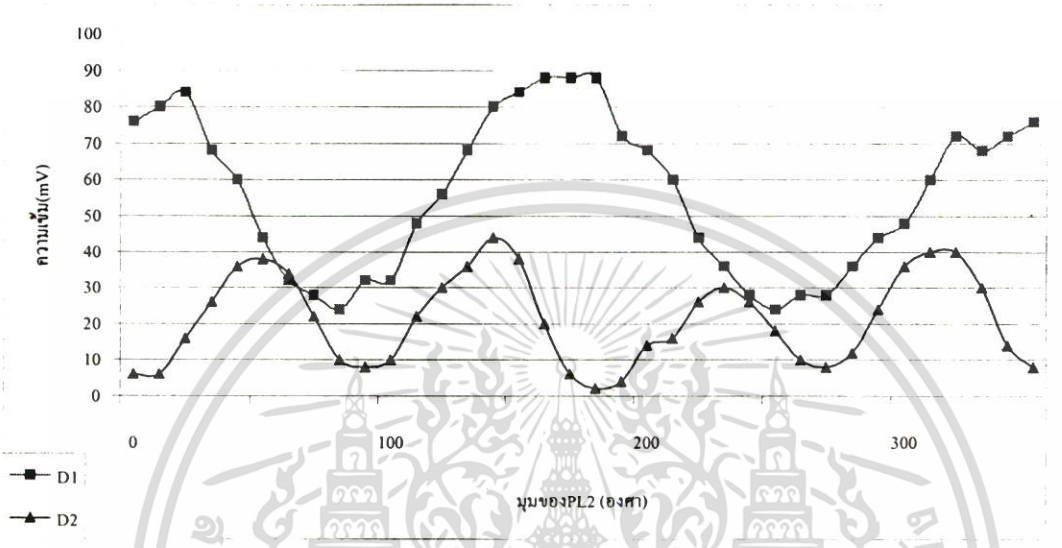
เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 90 องศา ความเข้มของการแทรกสอดยิ่งต่ำลงมาอีก คือมีการแทรกสอดสูงสุดเพียงประมาณ 20 - 30 mV ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 135 องศา ความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1 จะสูงกว่าที่ D_2 ไม่มากนัก คือ ที่ D_1 สูงสุดประมาณ 80 mV ส่วนที่ D_2 ประมาณ 40 mV ดังรูปที่ 5.12



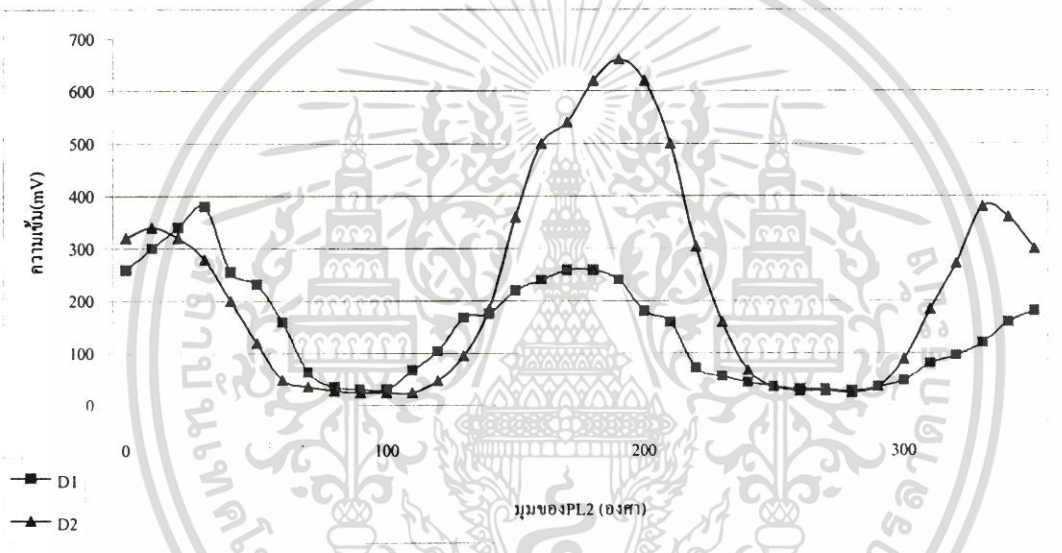
รูปที่ 5.12 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลการทดลองตอนที่ 3 แขนข้างหนึ่งเป็นที่ว่างอีกข้างหนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบซัมมาเรียน

ในการทดลองตอนนี้ แขนข้างหนึ่งของ MZI จะเป็นเส้นใยนำแสงชนิดซัมมาเรียน ดังนั้นการจะเพิ่มตัววิเคราะห์เข้าไปจะทำได้ที่แขนเพียงแขนเดียวเท่านั้น ผลการทดลองจึงมีตำแหน่งของ PL_2 เพียงตำแหน่งเดียวเช่นเดียวกับกรณีของไฮไบร์

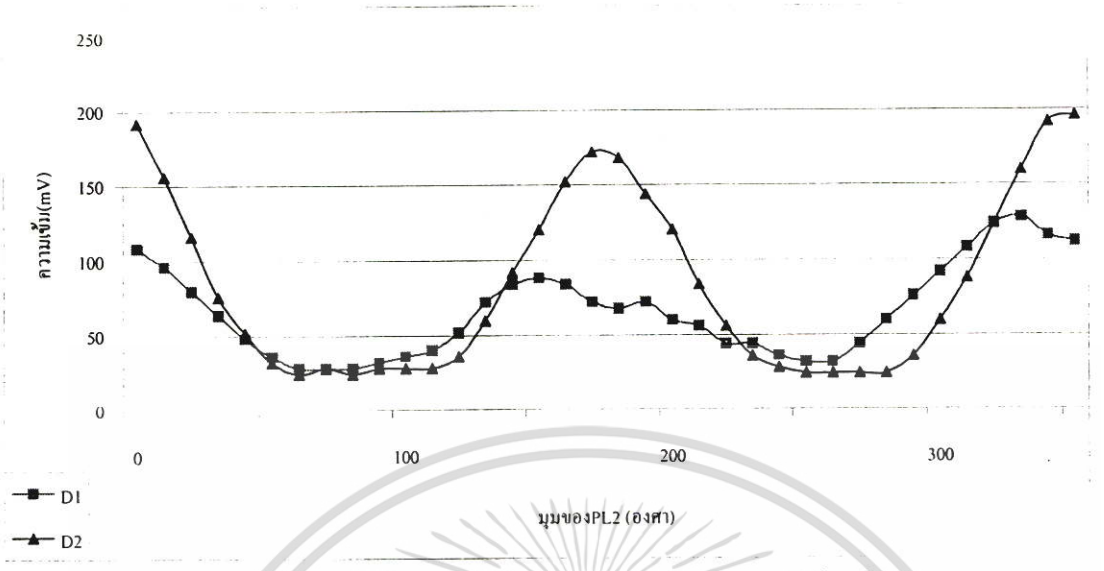
เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุม 0 องศา(อยู่ในแนวดิ่ง) ความเข้มของการแทรกสอดของสัญญาณทั้งสองช่องต่างกันไม่มาก คือ ที่ D_1 มีความเข้มสูงสุดประมาณ 300 mV ส่วนที่ D_2 มีความเข้มประมาณ 600 mV ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง

เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุม 45 องศา ความเข้มของการแทรกสอดช่องสัญญาณ D_1 จะมีค่าประมาณ 100 mV และที่ช่อง D_2 มีค่าประมาณ 200 mV ดังรูปที่ 5.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

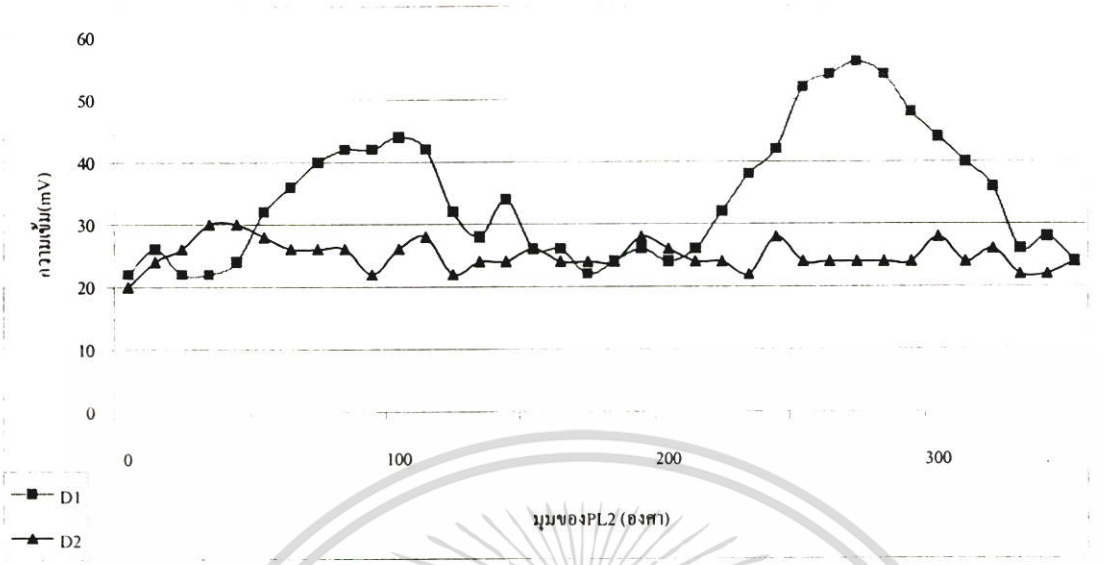


รูปที่ 5.14 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อเมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา

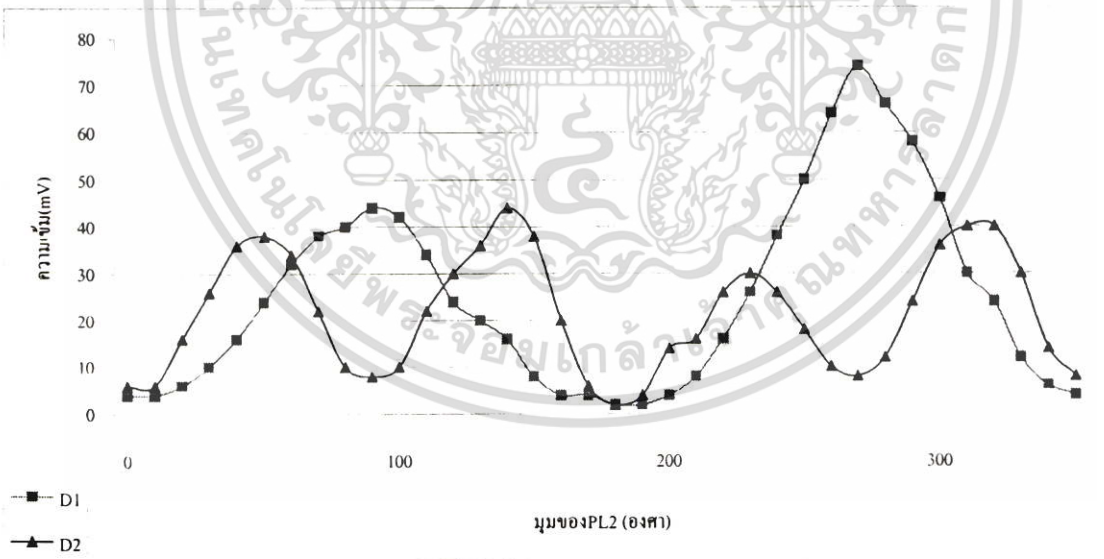
เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุม 90 องศา ความเข้มของสัญญาณการแทรกสอดของแสงทั้งสองช่องสัญญาณมีค่าค่อนข้างต่ำคือ สูงสุดมีค่าประมาณ 30-50 mV ดังรูปที่ 5.15

เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุม 135 องศา สัญญาณการแทรกสอดที่ตัวรับแสงทั้งคู่ มีค่าควมเข้มสูงสุดประมาณ 40 mV ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ดังรูปที่ 5.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา



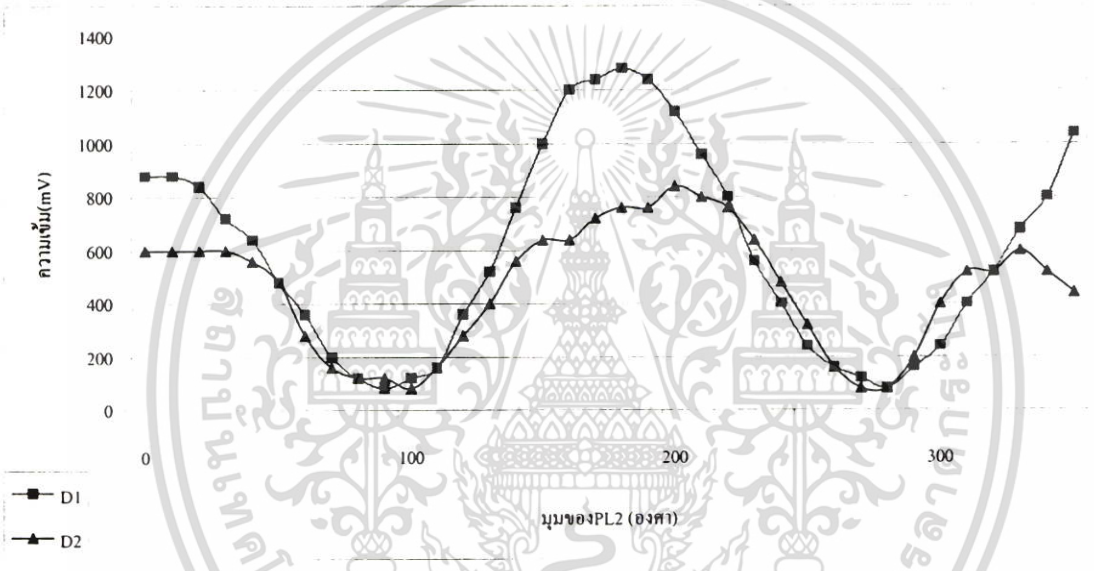
รูปที่ 5.16 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 ผลการทดลองตอนที่ 4 แขนข้างหนึ่งเป็นที่ว่าง อีกข้างหนึ่งเป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต

ในการทดลองตอนนี้ แขนข้างหนึ่งของ MZI จะเป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต ดังนั้นการจะเพิ่มตัววิเคราะห์เข้าไปจะทำได้ที่แขนเพียงแขนเดียวเท่านั้น ผลการทดลองจึงมีตำแหน่งของ PL2 เพียงตำแหน่งเดียวเช่นเดียวกับกรณีของไฮไบร์

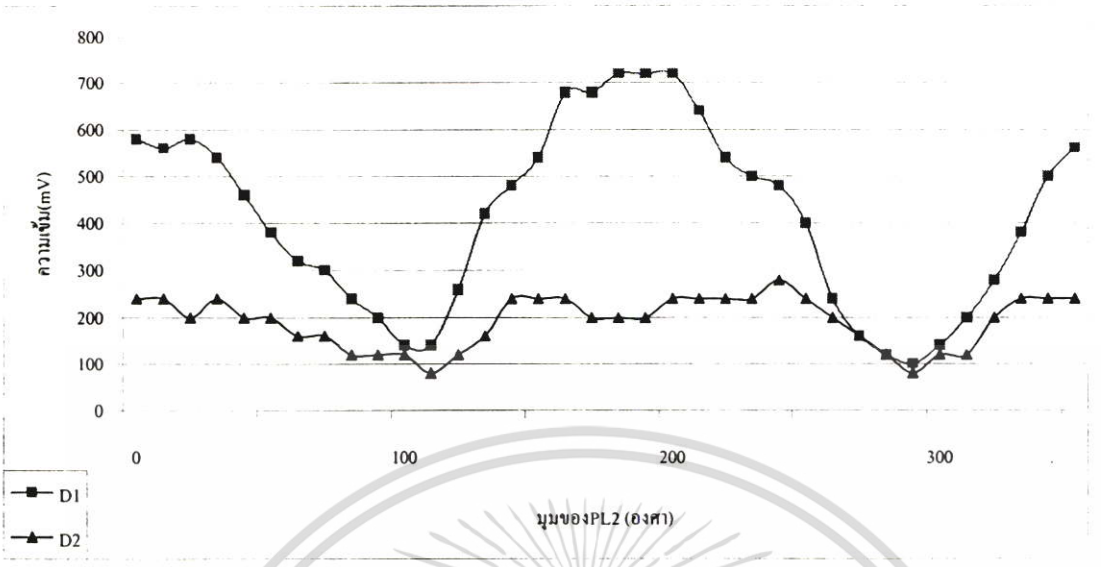
เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 0 องศา(อยู่ในแนวดิ่ง) ความเข้มสัญญาณของการแทรกสอดสูงสุดทั้งสองช่องสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 800-1200 mV โดยสัญญาณที่ตัวรับแสง D_1 จะสูงกว่าอีกช่องหนึ่งเล็กน้อย ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 0 องศา

เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา ความเข้มของการแทรกสอดสูงสุดของช่องสัญญาณ D_1 จะสูงกว่าอีกช่องหนึ่งเล็กน้อย คือ ช่อง D_1 มีค่าประมาณ 600 mV และที่ช่อง D_2 มีค่าประมาณ 200 mV ดังรูปที่ 5.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

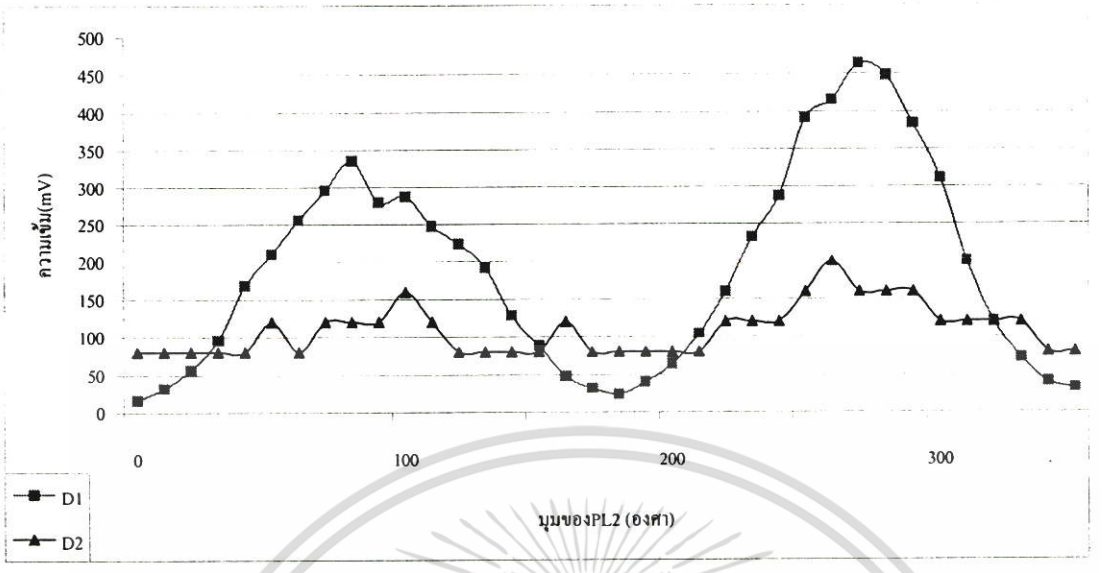


รูปที่ 5.18 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 45 องศา

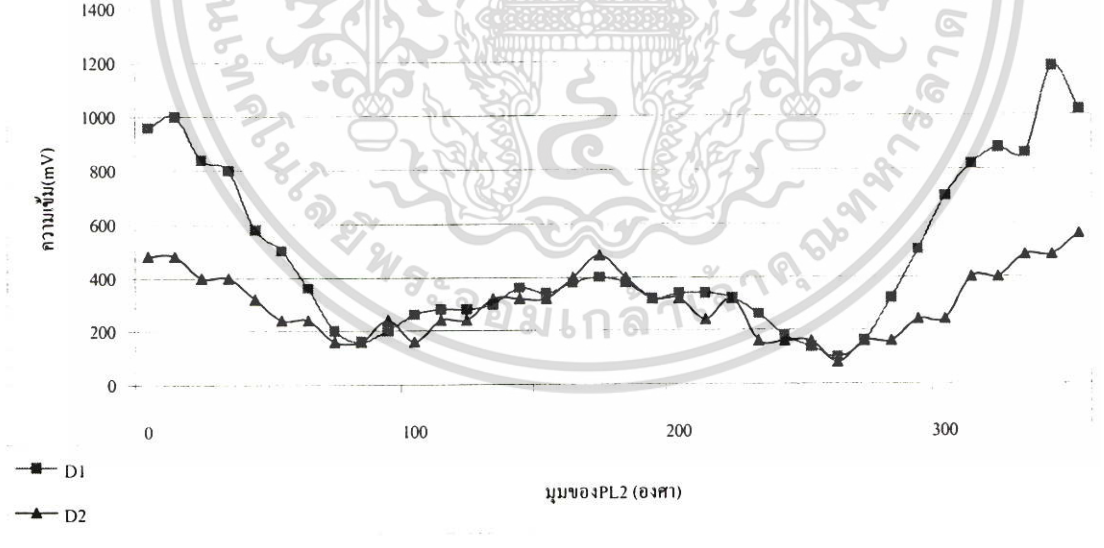
เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา ความเข้มของสัญญาณการแทรกสอดสูงสุดของช่องสัญญาณ D_1 มีค่าประมาณ 400 mV ส่วนช่องสัญญาณ D_2 มีค่าค่อนข้างต่ำคือประมาณ 100 mV ดังรูปที่ 5.19

เมื่อให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา ความเข้มของการแทรกสอดสูงสุดที่ตัวรับแสงที่ D_1 มีค่าความเข้มประมาณ 1000 mV ส่วนที่ D_2 มีค่าประมาณ 500 mV ดังรูปที่ 5.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 90 องศา



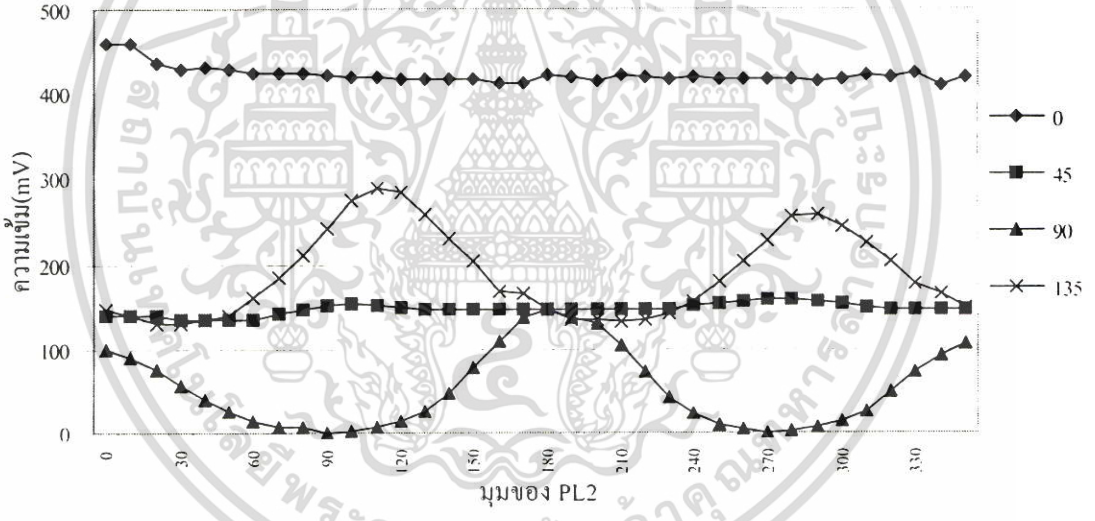
รูปที่ 5.20 แสดงความเข้มของการแทรกสอดของแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงทำมุม 135 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

โดยหลักการตามทฤษฎีแล้ว ถ้าระบบไม่ถูกรบกวนผลการทดลองที่ได้ ควรจะเห็นเฟสของการแทรกสอดที่ได้จากการทดลอง มุมของ PL_2 ที่จะให้ความเข้มของการแทรกสอดของสัญญาณมีค่าสูงสุดควรจะเป็นมุมเดียวกันกับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง และมุมที่บวกเพิ่มเข้าไปอีก 180 องศา และมุมที่ให้ความเข้มของการแทรกสอดต่ำที่สุดควรจะเป็นมุมที่ตั้งฉากกับมุมของระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง เช่น เมื่อตั้งระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงไว้ที่ 0 องศา ค่าความเข้มของการแทรกสอดสูงสุดที่ปรากฏที่ตัวรับแสงทั้งคู่ควรจะอยู่ที่ 0 องศา และ 180 องศา ส่วนความเข้มต่ำสุดควรจะอยู่ที่ 90 องศา และ 270 องศา แต่ผลการทดลองที่ได้ ต่างออกไป ซึ่งผลการทดลองที่ได้ในแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้

5.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1

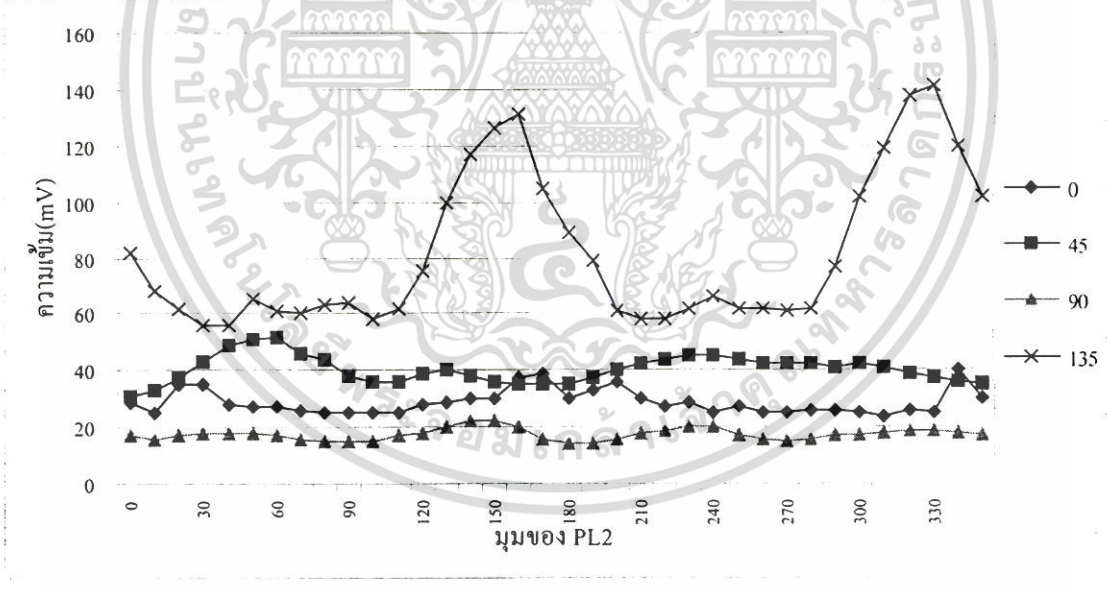


รูปที่ 5.21 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่หนึ่ง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ

จากรูปที่ 5.21 ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ในแนวดิ่ง แสงจะสะท้อนที่ BS_1 ได้ดีกว่าทะลุผ่าน และ PL_2 อยู่ที่แขนที่แสงที่มีความเข้มน้อย การเปลี่ยนแปลงที่แขนนี้จึงมีผลต่อความเข้มแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสงน้อยมาก การแทรกสอดที่เกิดขึ้น น่าจะเกิดจากการสะท้อนกลับไป-มาในแขนที่สอง(multiple reflection) ที่มุมของระนาบโพลาไรซ์เป็น 45 องศา แสงที่ผ่าน BS_1 จะมีความเข้มขององค์ประกอบของระนาบโพลาไรซ์ในแนวดิ่งและแนวราบใกล้เคียงกันและแขนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งมีความเข้มแสงต่ำกว่าแขนที่สองเล็กน้อย การปรับหมุน PL_2 ที่มุมต่างๆ การแทรกสอดก็มีการเปลี่ยนแปลงน้อยเช่นเดียวกัน ความเข้มของการแทรกสอดจึงค่อนข้างคงที่ ที่มุมของระนาบโพลาไรซ์เป็น 90 องศา แสงที่ผ่าน BS_1 ไปแขนที่หนึ่งจะมีความเข้มมาก แต่ก็ยังมีองค์ประกอบในแนวดิ่งอยู่บ้าง ส่วนแขนที่สอง(แสงสะท้อน) มีความเข้มแสงต่ำมากและมีองค์ประกอบของแสงในแนวดิ่งมากกว่าแนวราบ เมื่อหมุน PL_2 อยู่ในแนวดิ่ง องค์ประกอบในแนวดิ่งจะผ่านมาและแทรกสอดกับแสงในแขนที่สอง ความเข้มของการแทรกสอดจึงสูง และเมื่อหมุนPL_2 ไปเรื่อยๆ องค์ประกอบในแนวดิ่งก็ลดความเข้มลงเรื่อยๆ ความเข้มของการแทรกสอด ก็ลดลงเรื่อยๆ จนมีการแทรกสอดน้อยที่สุด ที่ 90 องศาและที่มุมอื่นๆก็เป็นเช่นเดียวกัน ที่มุมของระนาบโพลาไรซ์เป็น 135 องศา แสงที่ผ่านมาที่แขนที่หนึ่งน่าจะมีความเข้มของแสงที่องค์ประกอบในแนวราบมากกว่าองค์ประกอบแนวดิ่งเล็กน้อย เช่นเดียวกับแสงที่ผ่านมาที่แขนที่สองก็จะมีความเข้มของแสงที่องค์ประกอบในแนวดิ่งมากกว่าความเข้มของในแนวราบเล็กน้อย การแทรกสอดจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ 135 และ 315 องศา และน้อยที่สุดที่ 45 และ 225 องศา

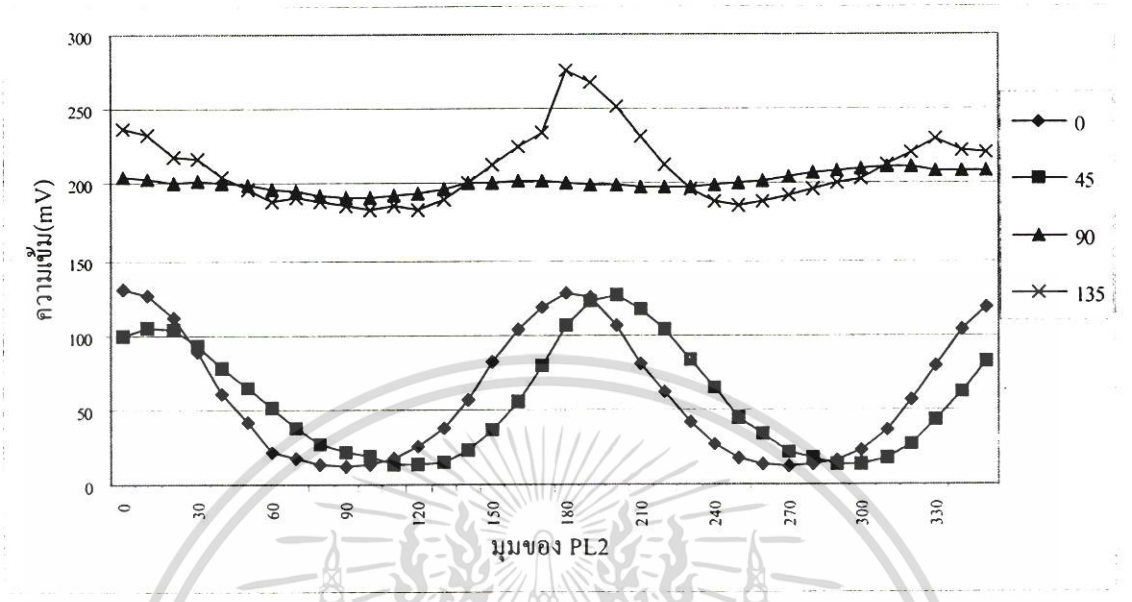


รูปที่ 5.22 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่หนึ่ง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ

เมื่อพิจารณาที่ตัวรับแสง D_2 ในรูปที่ 5.22 จะมีเฉพาะที่มุมโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง 135 องศาที่เห็นเฟสของการแทรกสอดชัดเจนและมีเฟสตรงกับที่ตัวรับแสง D_1 ส่วนที่มุมโพลาไรซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแหล่งกำเนิดแสงมุมอื่นๆ ความเข้มของการแทรกสอดค่อนข้างต่ำจนไม่สามารถสังเกตเฟสได้ชัดเจน

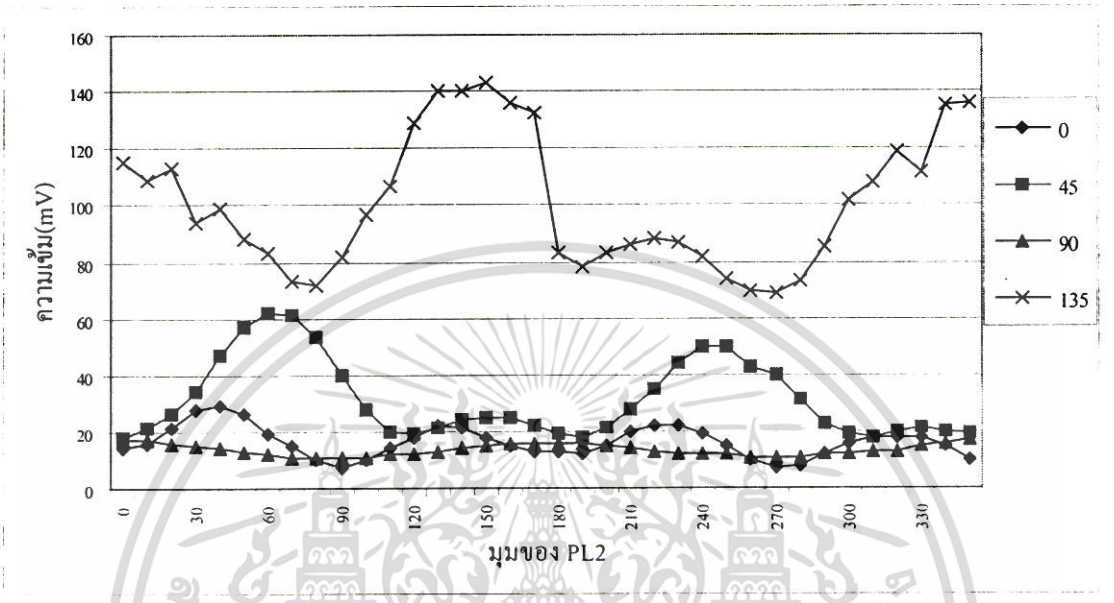


รูปที่ 5.23 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ

จากรูปที่ 5.23 เมื่อปรับให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดอยู่ในแนวดิ่งและ PL_2 อยู่ที่ตำแหน่งที่สองซึ่งเป็นแขนที่มีความเข้มของแสงมากกว่าแขนที่หนึ่ง การปรับ PL_2 ที่แขนที่สองจึงมีผลต่อความเข้มของการแทรกสอดที่ปรากฏที่ตัวรับแสง D_1 มุมของ PL_2 ที่ให้ค่าความเข้มของการแทรกสอดสูงสุดจะตรงกับมุมของระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง เมื่อเปลี่ยนระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดเป็น 45 องศา องค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวราบและแนวดิ่งประมาณเท่าๆกัน แต่ความเข้มแขนที่หนึ่งมีความเข้มน้อยกว่าแขนที่สอง การปรับ PL_2 ที่แขนที่สองจึงมีผลต่อความเข้มที่ตกลงที่ตัวรับแสงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงชัดเจน ที่มุมของระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 90 องศา ความเข้มแสงของแขนที่หนึ่งสูงกว่าแขนที่สองมาก การปรับ PL_2 เป็นการปรับที่แขนที่มีความเข้มต่ำกว่า(เช่นเดียวกับการปรับ PL_2 ที่วางที่ตำแหน่งที่หนึ่งและระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดอยู่ในแนวดิ่ง) และการแทรกสอดมีความเข้มค่อนข้างคงที่ก็น่าจะเกิดจากการสะท้อนกลับไป-มาเช่นเดียวกัน ที่มุมของระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดเป็น 135 องศา แขนที่หนึ่งจะมีความเข้มแสงขององค์ประกอบในแนวราบมากกว่าในแนวดิ่ง และที่แขนที่สองมีความเข้มแสงขององค์ประกอบในแนวดิ่งมากกว่าในแนวราบ การแทรกสอดก็จะคล้ายกับที่ 0 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45 องศา แต่จุดต่ำสุดจะสูงกว่าศูนย์เพราะที่จุดต่ำสุด(PL_2 อยู่ที่ 90 องศา) ก็ยังมีการแทรกสอดขององค์ประกอบของแสงในแนวราบที่มาจากแขนที่สองรวมกับองค์ประกอบของแสงแนวราบในแขนที่หนึ่ง



รูปที่ 5.24 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สองและปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ

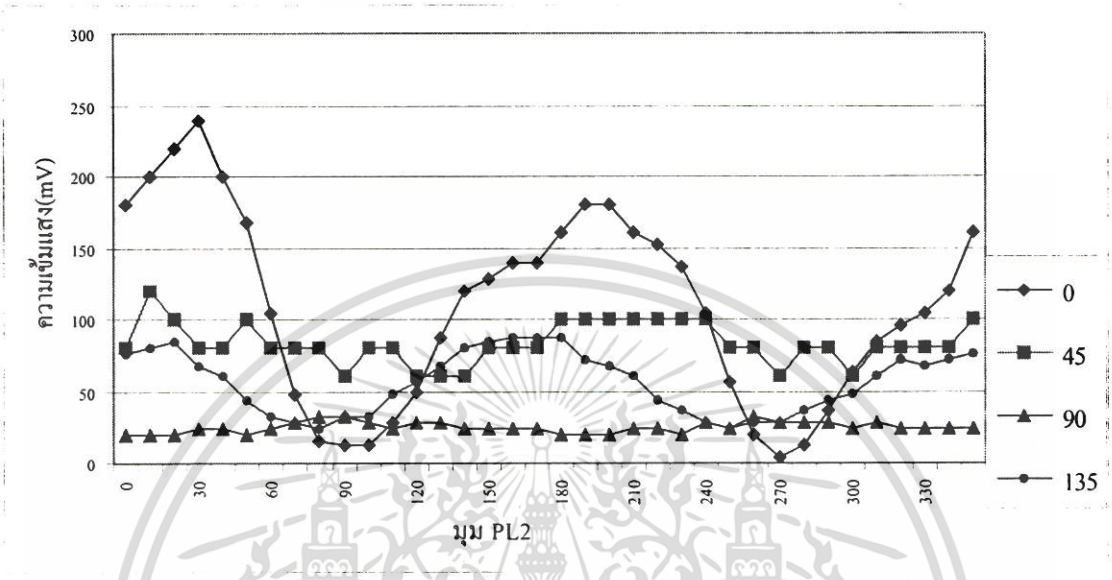
จากรูปที่ 5.22 และ 5.24 จะเห็นว่าความเข้มแสงที่ตกลงที่ตัวรับแสง D_2 มีค่าต่ำมาก เพราะว่าถ้ากรณีแสงทะลุผ่าน BS_1 ได้มาก ก็จะทะลุผ่าน BS_2 ไปตกลงที่ D_1 มากกว่า D_2 และถ้าแสงสะท้อนที่ BS_1 ได้มาก ก็จะสะท้อนที่ BS_2 ได้มากเช่นกัน และความเข้มแสงก็ตกลงที่ D_1 มากกว่า D_2 เช่นเดิม ดังนั้น D_2 จะมีแสงตกกระทบน้อยกว่าเสมอ เมื่อปรับ PL_2 ที่แขนที่สอง ความเข้มของการแทรกสอดก็จะน้อย ที่มุมของระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง 45 และ 135 องศา จะสังเกตเห็นเฟสของการแทรกสอดได้ แต่ไม่ชัดเจนนัก โดยความเข้มของการแทรกสอดจะสูงสุดเมื่อ PL_2 มีมุมเดียวกับมุมของแหล่งกำเนิดแสง ส่วนที่มุมของระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสง 0 และ 90 องศา ความเข้มของการแทรกสอดต่ำมากสังเกตได้ไม่ชัดเจนนัก

เมื่อสังเกตผลการทดลองที่ได้จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีค่อนข้างมาก ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการเลือกใช้อุปกรณ์ทางแสงที่ไม่เหมาะสมคือ ตัวแยกแสงที่ใช้ เป็นตัวแยกแสงที่ใช้สำหรับแสงความยาวคลื่น 1300 นาโนเมตร จึงจะแสดงสมบัติเป็นตัวแยก

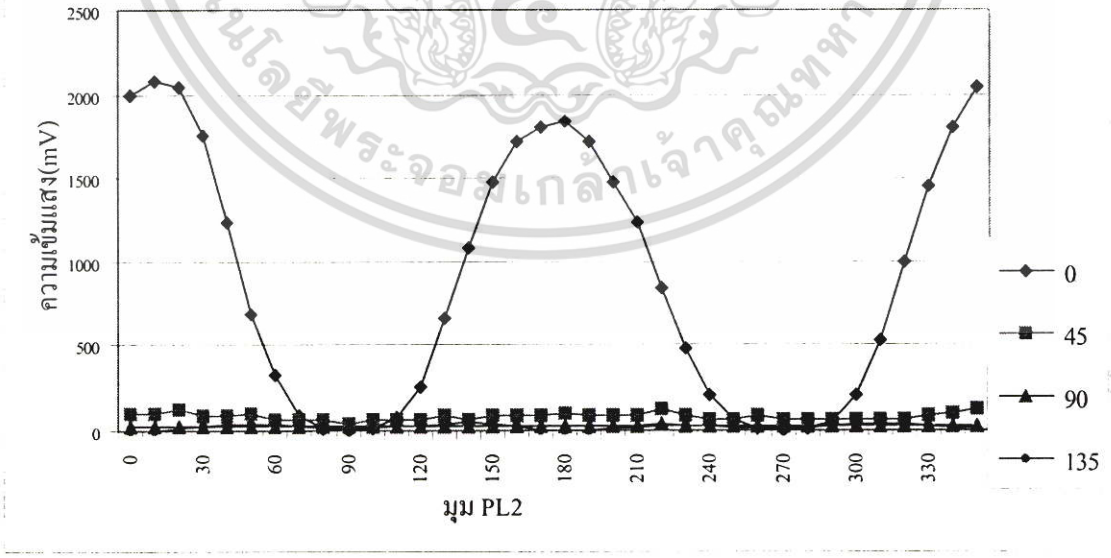
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงแบบไม่โพลาไรซ์ที่มีอัตราแยก 50:50 แต่ในการทดลองได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งตัวแยกแสงจะมีสมบัติต่างออกไป

5.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 2



รูปที่ 5.25 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบไฮไบร์



รูปที่ 5.26 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบไฮไบร์

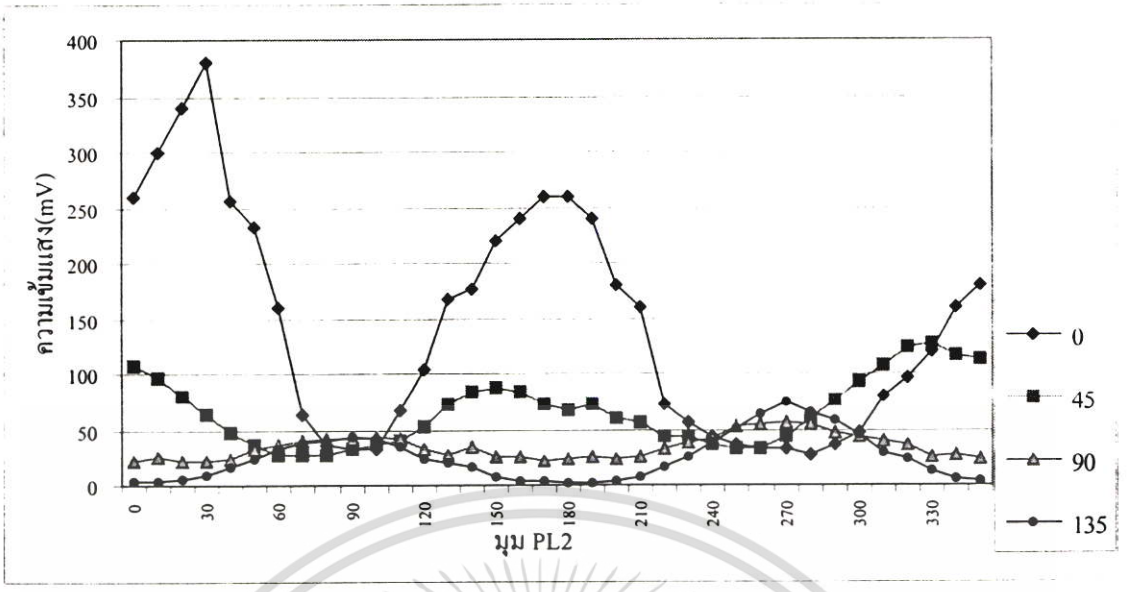
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปลี่ยนตัวกลางที่แขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงชนิดไฮไบร์ แล้วปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงไว้ที่มุม 0 องศา การปรับ PL_2 เป็นการปรับที่แขนที่ความเข้มแสงสูง จึงมีผลต่อความเข้มของการแทรกสอดที่ตกลงทั้ง D_1 และ D_2 ดังรูปที่ 5.25 และ 5.26 เฟสของการแทรกสอดที่สังเกตเห็นจะมีจุดสูงสุดที่ 0 และ 180 องศา (PL_2 อยู่ในแนวดิ่ง ตามองค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวดิ่งที่มีความเข้มมากกว่าองค์ประกอบในแนวราบที่แขนที่สอง) ส่วนที่มุมของโพราไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงที่มุมอื่นๆ (45, 90 และ 135 องศา) ความเข้มของการแทรกสอดต่ำมากจนสังเกตได้ไม่ชัดเจนนัก ซึ่งมีสาเหตุมาจากการลดลงของความเข้มแสงที่แขนที่สองและความเข้มแสงที่ผ่านเส้นใยนำแสงมีค่าต่ำมาก

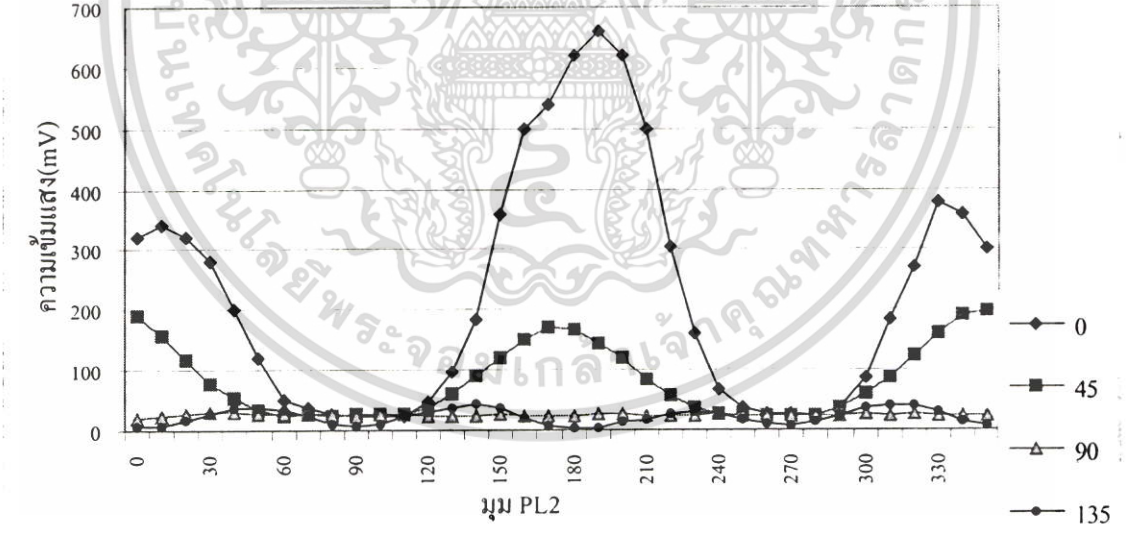
5.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 3

เมื่อเปลี่ยนตัวกลางที่แขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงชนิดซัมมาเรียน ความเข้มของการแทรกสอดที่ตกลงที่ตัวรับแสง D_1 และ D_2 เมื่อมุมของโพราไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 0 และ 45 องศา ความเข้มของการแทรกสอดจะมีค่าค่อนข้างสูง สามารถแยกเฟสได้ชัดเจน คือ ความเข้มของการแทรกสอดจะสูงสุดเมื่อแนวโพลาไรซ์ของ PL_2 อยู่ในแนวดิ่งและลดลงต่ำสุดเมื่อแนวโพลาไรซ์ของ PL_2 อยู่ในแนวราบ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากที่มุม 0 และ 45 องศา องค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวดิ่งจะมีค่าความเข้มสูงกว่าองค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวราบ(เมื่อผ่านตัวแยกแสงBS_1) ส่วนที่มุมของโพราไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 90 และ 135 องศา ความเข้มของการแทรกสอดจะมีค่าค่อนข้างต่ำจนสังเกตเฟสได้ยาก คล้ายกับกรณีของเส้นใยนำแสงแบบไฮไบร์ ดังรูปที่ 5.27 และ 5.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบซัมมาเรียน

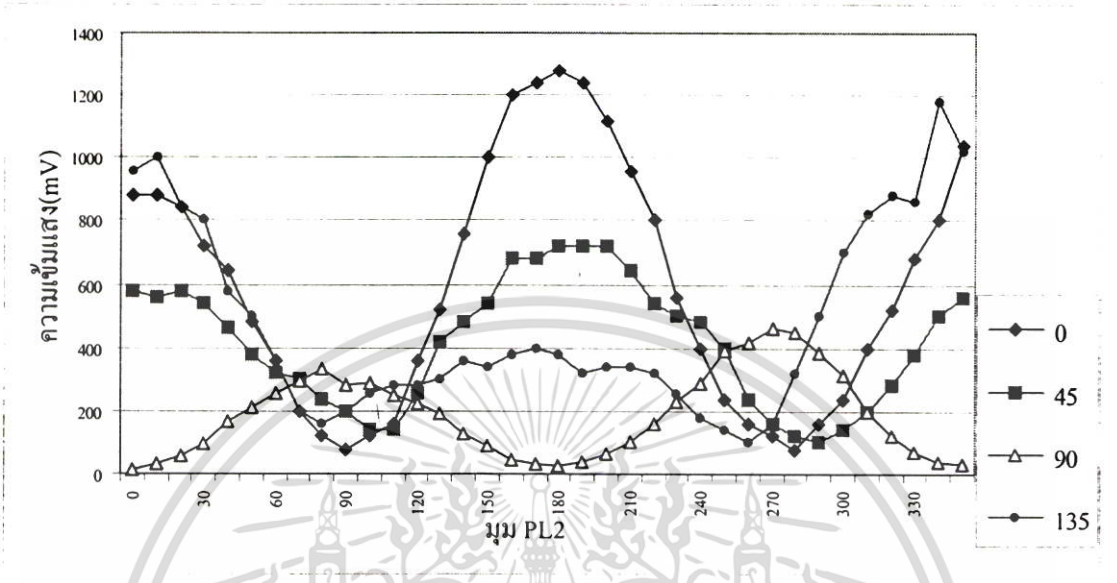


รูปที่ 5.28 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นเส้นใยนำแสงแบบซัมมาเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 4

เมื่อเปลี่ยนตัวกลางที่แขนที่หนึ่งเป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต

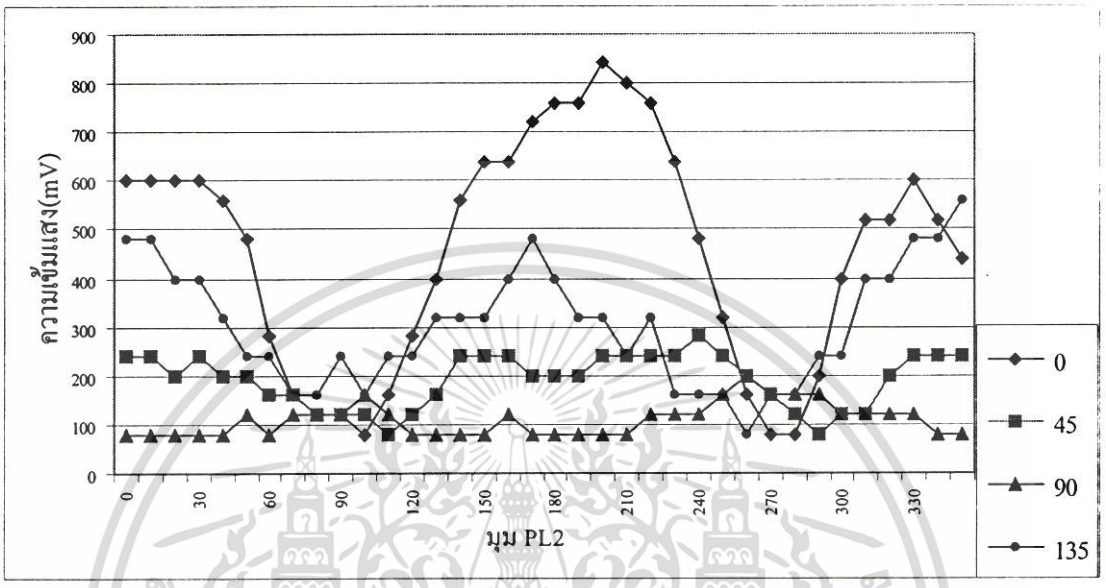


รูปที่ 5.29 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_1เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต

จากรูปที่ 5.29 ที่มุมของโพราไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 0, 45 และ 135 องศา องค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวดิ่งที่แขนที่สองมีค่าสูงกว่าองค์ประกอบในแนวราบ ความเข้มของการแทรกสอดจึงมีค่าสูงสุดเมื่อแนวโพลาไรซ์ของ PL_2 อยู่ในแนวดิ่ง(มุม 0 และ 180 องศา) และมีค่าต่ำสุดเมื่อแนวโพลาไรซ์ของ PL_2 อยู่ในแนวราบ(มุม 90 และ 270 องศา) แต่ที่มุมของโพราไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 90 องศา ที่แขนที่สอง องค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวดิ่งมีค่าต่ำกว่าองค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวราบ แต่โดยรวมแล้วที่แขนนี้ความเข้มแสงก็ยังต่ำกว่าแขนที่หนึ่งซึ่งองค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวดิ่งมีค่าต่ำกว่าองค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวราบเช่นกัน เมื่อแนวโพลาไรซ์ของ PL_2 อยู่ในแนวดิ่ง(มุม 0 และ 180 องศา) จะมีองค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวดิ่งจากแขนที่สอง(มีค่าต่ำ) ไปรวมกับองค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวดิ่งจากแขนที่หนึ่ง(มีค่าต่ำเช่นกัน) ความเข้มของการแทรกสอดจึงมีค่าต่ำ และเมื่อหมุนแนวโพลาไรซ์ของ PL_2 อยู่ในแนวราบ(มุม 90 และ 270 องศา) องค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวราบจากแขนที่สอง(มีค่าสูงกว่า) จะไปรวมกับองค์ประกอบของความเข้มแสงในแนวราบจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แขนที่หนึ่ง(มีค่าสูงเช่นกัน) ค่าความเข้มของการแทรกสอดจึงมีค่าสูงกว่าเมื่อแนวโพลาไรซ์ของ PL_2 อยู่ในแนวดิ่ง



รูปที่ 5.30 แสดงความเข้มของการแทรกสอดที่ตัวรับแสง D_2 เมื่อวาง PL_2 ที่ตำแหน่งแขนที่สอง และปรับระนาบโพลาไรซ์ของเลเซอร์เป็นมุมต่างๆ เมื่อแขนที่หนึ่งเป็นผลึกลิเธียมไนโอเบต

จากรูปที่ 5.30 ลักษณะของค่าความเข้มของการแทรกสอดที่ตกลงที่ตัวรับแสง D_2 มีลักษณะคล้ายกับค่าความเข้มของการแทรกสอดที่ตกลงที่ตัวรับแสง D_1 แต่สัญญาณที่มีความเข้มสูงพอที่พอจะสังเกตเฟสได้ชัดเจนก็คือที่มุมโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงที่ 0 และ 135 องศา และที่มุม 45 และ 90 องศาความเข้มของการแทรกสอดต่ำจนไม่สามารถสังเกตเฟสได้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองตอนที่ 1 เมื่อวาง PL_2 ไว้ที่แขนที่หนึ่ง รูปที่ 5.21 จะได้ว่าMZI จะสามารถเลื่อนเฟสของการแทรกสอดของสัญญาณได้เมื่อระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเปลี่ยนไปคือเปลี่ยนจากมุม 90 องศาเป็น 135 องศา เฟสของการแทรกสอดของสัญญาณจะเลื่อนไปประมาณ 90 องศาที่ตัวรับแสง D_1 แต่ที่ตัวรับแสง D_2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และถ้าวาง PL_2 ไว้ที่แขนที่สอง ถ้าให้ระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงอยู่ที่ 135 องศา จะสามารถสลับสัญญาณออกที่ D_1หรือD_2 ได้โดยหมุนแนวโพลาไรซ์ไปที่ 130 หรือ 180 องศา

การทดลองตอนที่ 2 จะไม่มีการเลื่อนเฟสของการแทรกสอดของสัญญาณ แต่มีการลดทอนความเข้มของสัญญาณลงไปเมื่อแสงเดินทางในเส้นใยนำแสง และการปรับมุมของระนาบแสงที่จะส่งเข้าในเส้นใยนำแสงยังมีความสำคัญ ถ้าระนาบของไม่เหมาะสมจะเกิดการลดทอนสูง

การทดลองตอนที่ 3 เส้นใยนำแสงชนิดซัมมาเรียนจะมีการลดทอนความเข้มของสัญญาณน้อยกว่าชนิดไฮไบร์ และการปรับระนาบโพลาไรซ์ที่แขนที่สองจะไม่มีผลให้เกิดการเลื่อนเฟส ไม่ว่าระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเปลี่ยนไปเป็นมุมเท่าใด จะเปลี่ยนเฉพาะความเข้มของการแทรกสอดเท่านั้น

การทดลองตอนที่ 4 ที่มุมโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 0, 45, และ 135 องศาจะไม่เกิดการเลื่อนเฟสของการแทรกสอดของสัญญาณ แต่ที่มุมโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 90 องศา เฟสของการแทรกสอดจะกลับเฟสกับที่มุมอื่นๆ (เฟสของการแทรกสอดเลื่อนไป 90 องศา) ที่ตัวรับแสงD_1

6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

ในตอนเริ่มทดลองแรกๆ จะพบปัญหาในเรื่องการบันทึกผลการทดลอง เนื่องจากในตอนแรกนี้ยังไม่ได้เพิ่มชุดสั่นกระจกเข้าไป ทำให้ค่าที่วัดได้มีการกระเพื่อมตลอดเวลา ในตอนแรกจึงแก้ปัญหาด้วยการทดลองและบันทึกผลในตอนกลางคืนที่ไม่มีคนพลุกพล่าน ปัญหาถัดไปที่พบก็คือการที่ต้องเสียเวลาในการสร้างอุปกรณ์เพิ่มเติมอีกหลายชิ้นเพื่อให้การทดลองเป็นไปโดยสะดวกและราบรื่น แต่เมื่อได้อุปกรณ์ตามที่ตั้งใจก็สามารถทำการทดลองต่อได้อย่างต่อเนื่องพอสมควร

ผลการทดลองที่ได้ไม่ตรงตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามา ซึ่งจากการตรวจสอบผลการทดลองต่างๆ พบว่าความคลาดเคลื่อนที่พบเห็นส่วนใหญ่มีผลมาจากการเลือกใช้อุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ หาประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น การเลือกตัวแยกแสงที่มีสมบัติเป็นตัวแยกแสงแบบไม่โพลาไรซ์ ที่มีอัตราแยกเป็น 50:50 แต่ตามสมบัติของอุปกรณ์จะใช้งานในย่านความยาวคลื่น 1300 นาโนเมตร แต่การทดลองจะใช้แหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ซึ่งในย่านนี้ตัวแยกแสงจะไม่แสดงสมบัติตามที่กำหนด ซึ่งอาจจะแสดงสมบัติของการเลือกแนวโพลาไรซ์ของแสงหรืออัตราแยกไม่เป็น 50:50

นอกจากนี้เลเซอร์ไดโอดที่ใช้ไม่ได้ให้แสงออกมาความยาวคลื่นเดียว แต่อาจมีความยาวคลื่นช่วงอื่นออกมาด้วย ซึ่งจะรบกวนการแทรกสอดของแสงได้ ซึ่งมีผลต่อค่าที่วัดได้จากการทดลองได้

6.3 วิจารณ์

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของโพลาไรซ์ในอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ยังไม่ได้เน้นเพื่อประยุกต์ใช้งานจริงใดๆ ผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด จึงมีเพื่อใช้ในการหาแนวทางในการประยุกต์เพื่อสร้างและใช้งานอุปกรณ์จากระบบเหล่านี้ทั้งในด้านการสื่อสาร การตรวจจับ หรืออื่นๆ ในอนาคต ซึ่งข้อมูลเหล่านี้น่าจะใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการวิจัยขั้นต่อๆไป

6.4 แนวทางการดำเนินการต่อไป

ในการทำการวิจัยขั้นต่อไป เมื่อมีทฤษฎีการทดลอง และทฤษฎีของอุปกรณ์ทุกอย่างที่ใช้ แนวทางที่น่าจะทำต่อไปก็คือ การจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) เพื่อนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้ในการทดลองจริง และในกรณีของผลึกลิเธียมไนโอเบต จะต้องทำการทดลองโดยให้ผลึกอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีค่าต่างๆ กัน เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป เช่น ถ้านำผลึกลิเธียมไนโอเบตมาวางหลังจาก PL_1 แล้วให้สนามไฟฟ้ากับผลึกเพื่อเปลี่ยนระนาบโพลาไรซ์ของแหล่งกำเนิดก่อนจะเข้า MZI เพื่อเป็นสวิตช์เลือกว่าจะให้แสงออกที่ตัวรับแสงตัวไดได้ และถ้าจะทำอุปกรณ์ตรวจจับ (sensor) ที่เป็นเส้นใยนำแสง ถ้านำมาต่อเข้ากับ MZI ที่เป็นชนิดที่สร้างจากเส้นใยนำแสง ก็จะสามารถเพิ่มความไว(sensitivity) ของเครื่องมือได้ เพราะ MZI มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงผลต่างทางเดินแสงในแขนทั้งสองแขนสูง ตัวตรวจจับที่กล่าวถึงสามารถตรวจจับได้หลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ, แรงกด, การสั่นสะเทือน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Thomas Pohlmann. 1991. **"Polarization Independent Ti : $LiNbO_3$ Switchs and Filters."** IEEE Journal of Quantum Electronics. Vol. 27. No. 3.

[2] K. Okamoto. 1996. **"Eight-Channel Flat Spectral Response Arrayed-Waveguide Multiplexer with Asymmetrical Mach-Zehnder Filters."** IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 8. No. 3.

[3] สุวรรณ คูสำราญ. **ทัศนศาสตร์กายภาพ.** คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2537.

[4] H. A. Bachor. **A Guide to Experiments in Quantum Optics.** John Wiley & Sons. Weinheim. 1998.

[5] Kiyoshi Nosu. **Optical FDM Network Technologies.** London. Artech House Inc. 1997.

[6] Jasprit Singh. **Optoelectronics An Introduction to Materials and Devices.** Singapore. The McGraw-Hill Companies Inc. 1996.

[7] ธนะศักดิ์ พิพัฒนภิวงศ์. " การศึกษาการสวิตซ์ด้วยแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดไบร์ฟรินเจนซ์ด้วยวิธีการควบคุมคัปปลิงโหมดโพราไรเซชั่น." วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

[8] http://homepages.wmich.edu/~rosentha/pdf%20files/13_Beamsplitters.PDF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับผลการทดลองตอนที่ 1

ตารางที่ ผ.1 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์อยู่ในแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุม	PL2 อยู่ ตำแหน่ง1		PL2 อยู่ ตำแหน่ง2	
	D1	D2	D1	D2
0	460	29	130	14
10	459	25	126	16
20	437	35	111	21
30	429	35	89	28
40	431	28	60	29
50	429	27	42	26
60	425	27	22	19
70	423	26	17	15
80	423	25	13	10
90	421	25	12	7
100	420	25	13	10
110	420	25	18	14
120	418	28	25	18
130	417	29	37	22
140	416	30	56	21
150	418	30	82	18
160	413	37	104	15
170	413	39	119	13

มุม	PL2 อยู่ ตำแหน่ง1		PL2 อยู่ ตำแหน่ง2	
	D1	D2	D1	D2
180	422	30	128	13
190	419	33	125	12
200	414	36	106	15
210	421	30	81	20
220	419	27	62	22
230	417	29	42	22
240	420	25	27	19
250	416	27	18	15
260	416	25	13	10
270	417	25	12	7
280	416	26	13	8
290	415	26	16	12
300	417	25	23	16
310	421	24	36	18
320	419	26	57	18
330	425	25	80	18
340	409	40	103	15
350	419	30	118	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 45 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุม	PL2 อยู่ ตำแหน่ง1		PL2 อยู่ ตำแหน่ง2	
	D1	D2	D1	D2
0	140	31	100	18
10	140	33	105	21
20	139	37	104	26
30	136	43	93	34
40	135	49	78	47
50	135	51	65	57
60	136	52	51	62
70	141	46	37	61
80	148	44	27	53
90	151	38	22	40
100	153	36	19	28
110	152	36	14	20
120	149	39	13	19
130	147	40	15	21
140	146	38	23	24
150	146	36	36	25
160	146	35	55	25
170	146	35	80	22

มุม	PL2 อยู่ ตำแหน่ง1		PL2 อยู่ ตำแหน่ง2	
	D1	D2	D1	D2
180	146	35	106	19
190	146	37	122	18
200	146	40	127	21
210	146	42	117	28
220	147	44	103	35
230	148	45	84	44
240	151	45	65	50
250	153	44	44	50
260	156	42	34	43
270	158	42	21	40
280	158	42	17	31
290	156	41	14	23
300	153	42	14	19
310	150	41	18	18
320	148	39	27	20
330	147	37	43	21
340	146	36	62	20
350	146	35	82	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.3 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 90 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุม	PL2 อยู่ ตำแหน่ง1		PL2 อยู่ ตำแหน่ง2	
	D1	D2	D1	D2
0	99	17	204	17
10	89	16	203	17
20	75	17	201	16
30	57	18	202	15
40	41	18	200	14
50	26	18	199	13
60	15	17	197	12
70	6	16	195	11
80	6	15	193	11
90	1	15	191	11
100	2	15	191	11
110	6	17	192	12
120	14	18	194	12
130	27	20	197	13
140	48	22	200	14
150	79	22	201	15
160	109	20	202	16
170	137	16	202	16

มุม	PL2 อยู่ ตำแหน่ง1		PL2 อยู่ ตำแหน่ง2	
	D1	D2	D1	D2
180	147	14	201	16
190	138	14	199	16
200	130	16	199	15
210	105	18	198	14
220	74	19	198	13
230	43	20	198	12
240	23	20	199	12
250	9	17	200	12
260	4	16	202	11
270	1	15	205	11
280	2	16	207	11
290	6	17	209	12
300	14	17	210	12
310	27	18	211	13
320	50	19	211	13
330	74	19	209	15
340	92	18	208	16
350	107	17	208	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.4 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 135 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุม	PL2 อยู่ ตำแหน่ง1		PL2 อยู่ ตำแหน่ง2	
	D1	D2	D1	D2
0	147	82	237	115
10	139	68	233	109
20	131	62	218	113
30	131	56	216	94
40	134	56	204	99
50	139	65	197	88
60	161	61	189	83
70	186	60	191	73
80	210	63	189	72
90	242	64	185	82
100	276	58	183	97
110	288	62	185	107
120	284	75	183	129
130	259	100	190	140
140	231	117	201	140
150	203	126	212	143
160	168	131	224	136
170	165	105	234	132

มุม	PL2 อยู่ ตำแหน่ง1		PL2 อยู่ ตำแหน่ง2	
	D1	D2	D1	D2
180	146	89	276	83
190	136	79	268	78
200	135	61	252	83
210	132	58	231	86
220	135	58	212	88
230	141	62	197	87
240	157	66	188	82
250	180	62	186	74
260	204	62	188	70
270	227	61	192	69
280	256	62	197	73
290	258	77	200	85
300	243	102	203	102
310	226	119	213	108
320	203	138	220	119
330	178	141	230	112
340	167	120	222	135
350	150	102	220	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับผลการทดลองตอนที่ 2

ตารางที่ ผ.5 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 0 องศากับแนวดิ่ง

(mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	180	2000	180	160	1840
10	200	2080	190	180	1720
20	220	2040	200	180	1480
30	240	1760	210	160	1240
40	200	1240	220	152	840
50	168	688	230	136	480
60	104	328	240	104	208
70	48	88	250	56	56
80	16	12	260	20	12
90	12	4	270	4	4
100	12	8	280	12	8
110	28	76	290	36	52
120	50	248	300	64	208
130	88	664	310	84	528
140	120	1080	320	96	1000
150	128	1480	330	104	1460
160	140	1720	340	120	1800
170	140	1800	350	160	2040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.6 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 45 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	80	100	180	100	100
10	120	100	190	100	80
20	100	120	200	100	80
30	80	80	210	100	80
40	80	80	220	100	120
50	100	100	230	100	80
60	80	60	240	100	60
70	80	60	250	80	60
80	80	60	260	80	80
90	60	40	270	60	60
100	80	60	280	80	60
110	80	60	290	80	60
120	60	60	300	60	60
130	60	80	310	80	60
140	60	60	320	80	60
150	80	80	330	80	80
160	80	80	340	80	100
170	80	80	350	100	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.7 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 90 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	20	24	180	20	20
10	20	24	190	20	24
20	20	24	200	20	24
30	24	28	210	24	28
40	24	24	220	24	32
50	20	24	230	20	28
60	24	24	240	28	24
70	28	28	250	24	24
80	32	20	260	32	28
90	32	24	270	28	20
100	28	20	280	28	20
110	24	20	290	28	20
120	28	24	300	24	24
130	28	24	310	28	28
140	24	24	320	24	24
150	24	24	330	24	28
160	24	24	340	24	24
170	24	24	350	24	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.8 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 135 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	76	6	180	88	2
10	80	6	190	72	4
20	84	16	200	68	14
30	68	26	210	60	16
40	60	36	220	44	26
50	44	38	230	36	30
60	32	34	240	28	26
70	28	22	250	24	18
80	24	10	260	28	10
90	32	8	270	28	8
100	32	10	280	36	12
110	48	22	290	44	24
120	56	30	300	48	36
130	68	36	310	60	40
140	80	44	320	72	40
150	84	38	330	68	30
160	88	20	340	72	14
170	88	6	350	76	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับผลการทดลองตอนที่ 3

ตารางที่ ผ.9 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 0 องศากับแนวดิ่ง

(mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	260	320	180	260	620
10	300	340	190	240	660
20	340	320	200	180	620
30	380	280	210	160	500
40	256	200	220	72	304
50	232	120	230	56	160
60	160	50	240	44	68
70	64	36	250	36	36
80	36	28	260	32	28
90	32	24	270	32	28
100	32	24	280	28	24
110	68	24	290	36	36
120	104	48	300	48	88
130	168	96	310	80	184
140	176	184	320	96	272
150	220	360	330	120	380
160	240	500	340	160	360
170	260	540	350	180	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.10 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 45 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	108	192	180	68	168
10	96	156	190	72	144
20	80	116	200	60	120
30	64	76	210	56	84
40	48	52	220	44	56
50	36	32	230	44	36
60	28	24	240	36	28
70	28	28	250	32	24
80	28	24	260	32	24
90	32	28	270	44	24
100	36	28	280	60	24
110	40	28	290	76	36
120	52	36	300	92	60
130	72	60	310	108	88
140	84	92	320	124	124
150	88	120	330	128	160
160	84	152	340	116	192
170	72	172	350	112	196

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.11 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 90 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	22	20	180	24	24
10	26	24	190	26	28
20	22	26	200	24	26
30	22	30	210	26	24
40	24	30	220	32	24
50	32	28	230	38	22
60	36	26	240	42	28
70	40	26	250	52	24
80	42	26	260	54	24
90	42	22	270	56	24
100	44	26	280	54	24
110	42	28	290	48	24
120	32	22	300	44	28
130	28	24	310	40	24
140	34	24	320	36	26
150	26	26	330	26	22
160	26	24	340	28	22
170	22	24	350	24	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.12 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 135 องศากับแนวดิ่ง(mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	4	6	180	2	2
10	4	6	190	2	4
20	6	16	200	4	14
30	10	26	210	8	16
40	16	36	220	16	26
50	24	38	230	26	30
60	32	34	240	38	26
70	38	22	250	50	18
80	40	10	260	64	10
90	44	8	270	74	8
100	42	10	280	66	12
110	34	22	290	58	24
120	24	30	300	46	36
130	20	36	310	30	40
140	16	44	320	24	40
150	8	38	330	12	30
160	4	20	340	6	14
170	4	6	350	4	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับผลการทดลองตอนที่ 4

ตารางที่ ผ.13 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 0 องศากับแนวดิ่ง

(mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	880	600	180	1280	760
10	880	600	190	1240	760
20	840	600	200	1120	840
30	720	600	210	960	800
40	640	560	220	800	760
50	480	480	230	560	640
60	360	280	240	400	480
70	200	160	250	240	320
80	120	120	260	160	160
90	80	120	270	120	80
100	120	80	280	80	80
110	160	160	290	160	200
120	360	280	300	240	400
130	520	400	310	400	520
140	760	560	320	520	520
150	1000	640	330	680	600
160	1200	640	340	800	520
170	1240	720	350	1040	440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.14 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 45 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	580	240	180	720	200
10	560	240	190	720	200
20	580	200	200	720	240
30	540	240	210	640	240
40	460	200	220	540	240
50	380	200	230	500	240
60	320	160	240	480	280
70	300	160	250	400	240
80	240	120	260	240	200
90	200	120	270	160	160
100	140	120	280	120	120
110	140	80	290	100	80
120	260	120	300	140	120
130	420	160	310	200	120
140	480	240	320	280	200
150	540	240	330	380	240
160	680	240	340	500	240
170	680	200	350	560	240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.15 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 90 องศากับแนวดิ่ง (mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	16	80	180	24	80
10	32	80	190	40	80
20	56	80	200	64	80
30	96	80	210	104	80
40	168	80	220	160	120
50	210	120	230	232	120
60	256	80	240	288	120
70	296	120	250	392	160
80	336	120	260	416	200
90	280	120	270	464	160
100	288	160	280	448	160
110	248	120	290	384	160
120	224	80	300	312	120
130	192	80	310	200	120
140	128	80	320	120	120
150	88	80	330	72	120
160	48	120	340	40	80
170	32	80	350	32	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.16 ความเข้มของการแทรกสอดเมื่อระนาบโพลาไรด์ของเลเซอร์ทำมุม 135 องศากับแนวดิ่ง(mV_{P-P})

มุมของPL2	D1	D2	มุมของPL2	D1	D2
0	960	480	180	380	400
10	1000	480	190	320	320
20	840	400	200	340	320
30	800	400	210	340	240
40	580	320	220	320	320
50	500	240	230	260	160
60	360	240	240	180	160
70	200	160	250	140	160
80	160	160	260	100	80
90	200	240	270	160	160
100	260	160	280	320	160
110	280	240	290	500	240
120	280	240	300	700	240
130	300	320	310	820	400
140	360	320	320	880	400
150	340	320	330	860	480
160	380	400	340	1180	480
170	400	480	350	1020	560

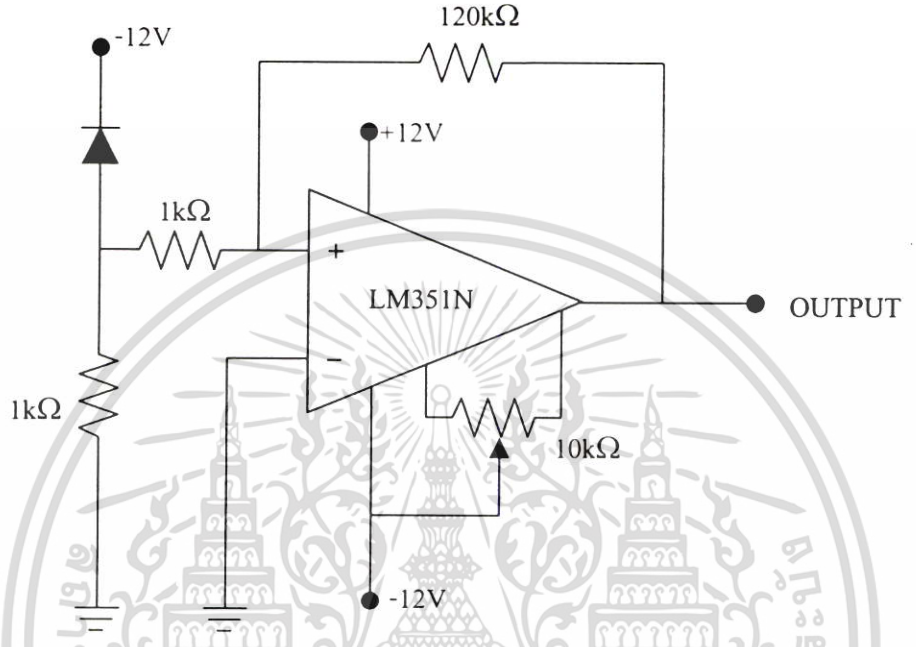
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วงจรขยายสัญญาณจากพินโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ในการขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากพินโฟโตไดโอด



รูปที่ ผ.1 แสดงวงจรขยายสัญญาณจากพินโฟโตไดโอด

วงขยายดังรูปเป็นวงจรขยายแบบใช้ออปแอมป์(Operating Amplifier, Op-Amp) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วงจรรวมเพื่อความสะดวกในการออกแบบและสร้าง โดยวงจรที่ออกแบบนี้จะเป็นวงจรขยายแบบไม่กลับขั้วมีอัตราขยายความต่างศักย์ที่ประมาณ 120 เท่าโดยหาได้จาก

$$Av = 1 + \frac{R_f}{R_i} \qquad (ผ.1)$$

เมื่อ R_f มีค่า 120 kΩและ R_i มีค่า 1 kΩ

วงจรที่สร้างขึ้นนี้มีสัญญาณรบกวน(background noise) ประมาณ 3 mV_{P-P}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photodiode Techinal Specification

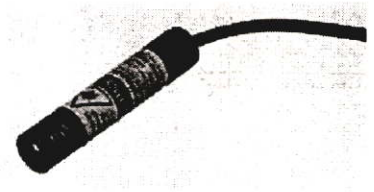
Type	general purpose photodiode
Case style	TO18
Peak specral response	750 nm
Wavelength range	350 – 1100 nm
Change in leakage current (with incident light)	0.7 μA/mW/cm
Dark current (at –20 V)	1.4 nA(typ.)
Temp. coeff. of dark current	x 2 for 10°C temp.
Reverse breakdown voltage	-80 V at 10 μA
Temp. coeff. of change in leakage current with illumination	0.35% /°C
Max. forward current	100 mA
Max. dissipation	200 mW at 25°C
Capacitance (-10 V bias)	12 pF
Response time	4 ns typ.
Operating temp.	-40°C to +70°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

คุณลักษณะของเลเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Vector Technology

Electrical connections	Green OV, black-V_{cc}
	White interlock
	Blue TTL disable
	Green and yellow (twisted pair)
	modulation

Beta TX Series

A range of high quality visible and infrared laser diode modules. Each module consists of a laser diode, driver and modulation circuitry and collimating lens all housed in a black powder coated brass body. The module body is electrically isolated.

The high quality adjustable lens provides a highly collimated beam making these visible ideal for precision applications such as alignment, edge detection and targeting. For the visible lasers the spot size can easily be adjusted by shining the beam onto a suitable target and adjusting the size with the focusing tool provided. With the infrared lasers the same process can be used this time viewing the spot with a TV camera and monitor. The lasers can be amplitude modulated using digital or analogue signals over a frequency range of 100Hz to 50MHz making them ideal for use in data transmission and audio/video communications.

For suitable detectors, refer to the RS range of photodiodes in this section.

A replacement standard singlet lens and a line generator lens are available and are suitable for use

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

with these modules, refer to this section.

For suitable driver ICs, refer to the Semiconductors, Drivers and Interface section.

WARNING: When using the infrared laser diode modules eye protection should be worn as aversion or blink response is not sufficient to protect the human eye. For suitable protection goggles, refer to the Health and Safety Equipment section of the catalogue.

Note : The spot size is obtained by optical measurement at a distance of 25mm.

technical specification

	Visible	Infrared
Output power (max.)		
(+0%, -10%)	1mW and 3mW	1mW
Wavelength range		
(min. to max.)	660-680nm	775-795nm
(typ.)	670nm	785nm
Supply voltage	-8V to -12V d.c.	
Supply current		
(V_{CC}=8V)	75mA	85mA
(V_{CC}=12V)	110mA	115mA
Divergence (full range)	<0·5m Radians	
Spot size	100µm	
Angular deviation of beam to case (front cell)	5mRad typ.	
Modulation (AM)	Analogue or digital	
Signal (50Ω)	Upto 5V peak to peak	
Frequency	100Hz to 50MHz	
Modulation depth	90% max.	
	50% typ.	
MTTF (@30±C ambient)	20 000hrs	32 000hrs
Operating temperature	-10°C to +40°C	-10°C to +50°C

WARNING : These laser diode modules are OEM devices and conform to the emission criteria of BS (EN) 60825, the 1mW visible module is class II, the 3mW visible is class IIIb and the 3mW infrared is a class IIIb. It is recommended that BS (EN) 60825 and the **RS** data sheet are read before these lasers are used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายธีรยุทธ ชาญนุวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2512 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก มหาวิทยาลัยขอนแก่น ชื่อวุฒิการศึกษาคือ วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ เมื่อปี พ.ศ. 2534

เริ่มทำงานที่บริษัท พีซีบี เซ็นเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่ง วิศวกร หลังจากนั้นได้เข้ารับราชการในตำแหน่งอาจารย์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537 ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 5 ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ. เมือง จ. ขอนแก่น

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้